T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMÜNDE SİMÜLASYON TEKNİĞİ İLE OPTİMUM KALIP TASARIMI VE SÜREÇ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Emre GÖKÇİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

Değerli Hocam Rahmetli Prof. Dr. Yücel Birol'a,

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMÜNDE SİMÜLASYON TEKNİĞİ İLE OPTİMUM KALIP TASARIMI VE SÜREÇ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Emre GÖKÇİL

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ACARER

2019, 65 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Mustafa ACARER
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

Çalışmanın amacı, ticari bir ürünün yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretimi sürecinde, döküm simülasyon yazılımı (Magmasoft) kullanılarak simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışmalarla optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametrelerinin belirlenmesi, belirlenen parametreler ile yüksek basınçlı döküm hattında üretimin gerçekleştirilmesidir. Çalışmada, ağır vasıtalarda kullanılan hava kurutucu parçasının optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametreleri belirlenmiştir. Bu süreçte, hem kalıp tasarımı (yolluk ve hava cebi sistemi) hem de yüksek basınçlı döküm sürecine en çok etki eden döküm sıcaklığı (initial temperature), enjeksiyon basıncı (injection pressure) ve enjeksiyon hızı (injection velocity) parametreleri simülasyon ortamında parametrik olarak ele alınmıştır. Yürütülen simülasyon çalışmalarının katılaşma sonuçları incelendiğinde, simülasyon ortamında katılaşma sürecine enjeksiyon basıncı değişkenliğinin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Diğer yandan, dolum sonuçları incelendiğinde optimum döküm sıcaklığının 625 °C ve optimum enjeksiyon hızının birbirine yakın sonuçlar sergileyen 3 farklı enjeksiyon hızı olmak üzere 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen optimum kalıp tasarımı ve süreç parametreleri ile dökümü gerçekleştirilen parçalar, dijital radyografik muayeneye tabi tutularak döküm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Radyografik muayene sonuçları ışığında, 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s enjeksiyon hızlarında olmak üzere gerçekleştirilen dökümler değerlendirildiğinde, 2 m/s ve 3 m/s enjeksiyon hızlarında dökülen parçalarda ASTM E2422 standardına göre sırasıyla 7 ve 5 seviyelerinde soğuk birleşme (cold fill) hatalarına rastlanırken 4 m/s enjeksiyon hızına sahip parçada herhangi bir hata gözlemlenmemiş olup, radyografik muayene sonucu optimum enjeksiyon hızının 4 m/s olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Döküm parametreleri, Kalıp tasarımı, Simülasyon, Soğuk birleşme, Radyografik muayene, Yüksek basınçlı döküm

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF OPTIMUM DIE DESIGN AND PROCESS PARAMETERS WITH SIMULATION TECHNIQUE IN HIGH PRESSURE DIE CASTING OF ALUMINUM ALLOYS

Emre GÖKÇİL

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Mustafa ACARER

2019, 65 Pages

Jury
Prof. Dr. Mustafa ACARER
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Asst. Prof. Dr. Murat ÇOLAK

The aim of this study is to determine the optimum die design and casting process parameters by using the casting simulation software (Magmasoft) during the production process of a commercial product by high pressure casting method and to produce the casting process parameters with the determined parameters on the high pressure casting line. In this study, optimum die design and casting process parameters of an air dryer part used in heavy vehicles were determined. Within the process, both the die design (runner and overflows system) and the initial temperature that affect most to high pressure die casting process, injection pressure and injection velocity parameters are handled parametically in the simulation inter face. When the solidification results of the simulation studies were examined, it was found that the injection pressure variability had no effect on the solidification process in the simulation context. On the other hand, when the filling results were examined, it was found that the optimum casting temperature was 625 °C and the optimum rate of injection was 2 m/s, 3 m/s and 4 m/s, three different injection rates showing similar results. The casting and simulation results were compared by the casted parts and digital radiographic examination with the determined optimum mold design and process parameters. In the consideration of the radiographic examination results, when the castings performed at 2 m/s, 3 m/s and 4 m/s injection rates are evaluated, it is observed that while cold fill failure is seen castings at 2 m/s and 3 m/s injection rates at 7 and 5 levels, respectively according to ASTM E2422 standard, the part casted at 4 m/s rate of injection seen no failure and it is obtained that the optimum rate of injection result of radiographic examination is 4 m/s.

Keywords: Aluminum, Casting parameters, Cold fill, Die design, High pressure die casting, Radiographic examination, Simulation

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinden, simülasyon ve döküm çalışmalarının gerçekleştirilmesine, sonuçlarının değerlendirilmesinden, tez yazımına kadar çalışmanın her aşamasında yol gösteren ve bilgi birikimini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa ACARER'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Yüksek basınçlı döküm çalışmalarının gerçekleştirilmesinde her türlü imkânı sağlayan Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. firmasına ve Sayın Seyit ACAR'ın nezdinde tüm Yıldız Pul firması çalışanlarına şükranlarımı sunarım. Ürün modelleme, kalıp tasarımı, kalıp imalatı çalışmalarındaki katkılarından dolayı Sayın Necdet UĞUR'a ve Sayın Halil ÖZKAN'a, döküm çalışmalarındaki katkılarından dolayı Sayın Özgür GÖKÇİL'e teşekkür ederim. Dijital radyografik muayene çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'ne, Sayın Prof. Dr. Havva Kazdal ZEYTİN'e ve Sayın Erdem GÜNGÖR'e teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, öğrenim hayatım boyunca maddi manevi her zaman destekleriyle yanımda olan aileme ve çalışmalarımda beni koşulsuz destekleyen eşime teşekkürü borç bilirim.

Emre GÖKÇİL
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **viii**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **7**

3.1. Malzeme 7
3.2. Ürün ve Kalıp Tasarımı 7
3.2.1. Yolluk sistemi tasarımı 8
3.2.2. Hava cebi sistemi tasarımı 8
3.3. Yüksek Basınçlı Döküm Simülasyonu 9
3.4. Yüksek Basınçlı Döküm 21
3.5. Radyografik Muayene 36

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **38**

4.1. Yüksek Basınçlı Döküm Simülasyonu 38
4.1.1. Optimum yolluk sisteminin belirlenmesi 39
4.1.2. Optimum hava cebi sisteminin belirlenmesi 43
4.1.3. Optimum süreç parametrelerinin belirlenmesi 46
4.2. Yüksek Basınçlı Döküm 58

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **60**

5.1 Sonuçlar 60
5.2 Öneriler 60

KAYNAKLAR **62**

ÖZGEÇMİŞ **64**

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

bar	: Bar
°C	: Santigrad Derece
cm^3	: Santimetreküp
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
kg/saat	: Kilogram/saat
kN	: Kilonewton
kV	: Kilovolt
m^3	: Metreküp
m/s	: Metre/saniye
mbar	: Milibar
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
sn	: Saniye
rpm	: Revolutions per minute

Kısaltmalar

$A_{döküm\ yüzey\ alanı}$	: Dökülen parçanın toplam yüzey alanı
$A_{enjeksiyon}$	: Yüksek basınçlı döküm makinesinin silindir yüzey alanı
A_{piston}	: Kullanılan pistonun yüzey alanı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CAD	: Computer Aided Design
CAE	: Computer Aided Engineering
CMM	: Coordinate Measurement Machine
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
FEM	: Finite Element Method
$F_{kilitleme}$	: Kilitleme kuvveti
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
$P_{enjeksiyon}$	: Enjeksiyon sistem basıncı
$P_{kalıp\ içi\ basınç}$	: Kalıp boşluğu içerisinde oluşan basınç
PLC	: Programmable Logic Controller
P_{piston}	: Pistonun topukta oluşturduğu basınç
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
TS EN	: Turkish Standard European Norm
Zn	: Çinko

1. GİRİŞ

Özellikle alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif alaşımlar kullanılarak üretilen bileşenler, endüstriyel üretimin birçok sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda, sınırlı üretim maliyetleri, mekanik performans, hafiflik ve geri dönüştürülebilirlik talepleri neticesinde alüminyum alaşımı kullanımı yaygınlaşmıştır.

Herhangi bir imalat endüstrisinin amacı, daha ekonomik bir nihai ürün üretmek için proses adımlarını en aza indirmektir. Bu amaç, net şekilli imalat olarak adlandırılır. Yüksek basınçlı döküm, alüminyum alaşımlarından yüksek boyutsal hassasiyete sahip ve net şekilli döküm bileşenleri üretmek için en yaygın yöntemdir. Doehler, 1915 yılında alüminyum alaşımları kullanarak basınçlı döküm ürünleri ürettiğinde, yüksek basınçlı döküm yöntemi ortaya çıkmış ve günümüze kadar imalat endüstrisi geliştikçe talepler giderek artmıştır.

Yüksek basınçlı döküm yönteminde alüminyum, çinko ve magnezyum esaslı olmak üzere yaygın olarak kullanılan 3 farklı alaşım ailesi vardır (Anonymous, 1988; 2015; 2016). Yüksek basınçlı döküm yönteminde, özellikle otomotiv sektöründe çoğunlukla alüminyum esaslı alaşımlar tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlarının en karakteristik özelliği hafif olmasıdır. Ayrıca, düşük yoğunluk, yüksek termal ve elektrik iletkenliği, düşük genleşme katsayısı ve yüksek korozyon direncine sahip olan alüminyum alaşımları, genellikle ince cidarlı ve karmaşık geometriye sahip parçaların yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Doehler, 1951).

Yüksek basınçlı dökümde, kalıp tasarımı (yolluk ve hava cebi sistemi), döküm sıcaklığı, enjeksiyon hızı (birinci ve ikinci faz hızları) ve enjeksiyon basıncı gibi süreç parametreleri döküm kalitesinde belirleyici rol oynamaktadır (Anonymous, 2016). Özellikle karmaşık geometriye sahip olan döküm ürünlerinde kalıp tasarımı ve döküm süreci parametrelerinin belirlenmesi üst düzey teknik ve teknolojik bilgi gerektirmektedir. Bu zorlayıcı etkenler döküm sürecini baştan sona sanal ortamda deneyimleyebilecek döküm simülasyon yazılımlarının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bilişim teknolojileri sektöründe gerçekleştirilen çalışmalar sonucu ortaya çıkan döküm simülasyonu yazılımları sayesinde, döküm süreçleri simüle edilerek üretim öncesinde döküm kalitesi tahmin edilebilmektedir. Matematiksel bir yöntem olan döküm simülasyon yazılımları, döküm süreci boyunca dolum ve katılaşma aşamalarında gerçekleşen olayların öngörülebilmesi adına geliştirilmiştir. Başlıca döküm simülasyonu yazılımları MagmaSoft, SolidCast, ProCast, Vulcan, Anycast ve Cast Designer programlarıdır (Stefanescu, 2005; Hsu ve ark., 2006).

Yürütülen çalışmaların amacı, ticari bir ürünün yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretimi sürecinin simülasyon yazılımı vasıtasıyla simüle edilerek optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametrelerinin belirlenmesi ve belirlenen parametreler ile yüksek basınçlı döküm hattında üretilmesidir.

Tez çalışması, daha önce aynı alanda gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak hem kalıp tasarımını (yolluk ve hava cebi sistemi) hem de yüksek basınçlı döküm sürecine en çok etki eden döküm sıcaklığı (initial temperature), enjeksiyon basıncı (injection pressure) ve ikinci faz hızı (2nd phase velocity) parametrelerinin hepsini simülasyon ortamında parametrik olarak ele alarak gerçek koşullarda ticari bir ürünün üretim sürecine katkı sunmuştur. Ayrıca, tez çalışmasına konu olan ticari ürünün, benzer çalışmalarda kullanılan nispeten basit geometrilere sahip parçalara göre daha karmaşık geometriye sahip olması yüksek basınçlı döküm yönteminde, kalıp tasarımı ve süreç parametrelerinin etkilerinin daha net bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında, döküm simülasyon yazılımı (Magmasoft) kullanılarak simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışmalarla ağır vasıtalarda kullanılan hava kurutucu parçasının optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, belirlenen kalıp tasarımı ve süreç parametreleri ile yüksek basınçlı döküm hattında döküm çalışmaları gerçekleştirilerek hava kurutucu parçası imal edilmiştir. Son olarak, dökümü gerçekleştirilen parçalara uygulanan radyografik muayene sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde yüksek basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşımlarının dökümü üzerine simülasyon yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen birçok çalışma bulunmakla birlikte, tez konusu olan simülasyon yazılımları aracılığıyla başlıca optimum kalıp tasarımı ve süreç parametrelerinin belirlenmesini ve simülasyon sonuçlarının tutarlılığını konu edinmiş sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen kaynak araştırması neticesinde, tez konusu ile ilgili tespit edilen geçmiş çalışmaların özetleri aşağıda verilmiştir.

Concer D. ve Marcondes P.V.P. (2017) alüminyum enjeksiyon ürünlerinde çekinti gözenekliliği oluşumunda birinci ve ikinci faz enjeksiyon hızlarının etkisini incelenmişlerdir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, birinci faz hızının 0.27 m/s, ikinci faz hızının ise 3.20 m/s seçildiği kombinasyonda katılaşma süresi 2.4435 sn. ile en düşük katılaşma süresine, böylece 6.8975e-07 m^3 ile en düşük çekinti gözenekliliği hacmine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Simülasyon çalışmalarında seçilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde radyografik muayene yardımıyla katılaşma süresinin yüksek basınçlı döküm yönteminde çekinti gözenekliliğinin ana kaynağı olduğu doğrulanmıştır.

Tsoukalas V. D. (2003) yüksek basınçlı dökümde birinci ve ikinci faz hızı, ikinci faz vuruş noktası, dolum süresi ve enjeksiyon basıncı parametrelerinin gaz ve çekinti gözenekliliği oluşumuna etkilerini araştırmıştır. Yürütülen çalışmalarda, 0.12 m/s, 0.27 m/s ve 0.42 m/s olmak üzere 3 farklı birinci faz hızı, 180 mm, 225 mm ve 270 mm olmak üzere 3 farklı ikinci faz vuruş noktası, 0.5 m/s, 2.5 m/s ve 4.5 m/s olmak üzere 3 farklı ikinci faz hızı, 5 ms, 25 ms ve 45 ms olmak üzere 3 farklı dolum süresi ve 200 bar, 225 bar ve 250 bar olmak üzere 3 farklı enjeksiyon basıncı parametresi belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deney tasarımı ile 27 kombinasyonda yürütülen döküm denemeleri neticesinde yoğunluk ölçümü metodu kullanılarak elde edilen veriler ışığında birinci faz hızının 0.42 m/s, ikinci faz vuruş noktasının 270 mm, ikinci faz hızının 0.5 m/s, dolum süresinin 45 ms ve enjeksiyon basıncının 250 bar olduğu kombinasyonda % 1.58 ile en düşük gaz ve çekinti gözenekliliğinin oluştuğu tespit edilmiştir.

Verran G. O. ve ark. (2006) 305 alüminyum alaşımının yüksek basınçlı dökümünde birinci ve ikinci faz hızlarının ve enjeksiyon sistem basıncının döküm parça kalitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yürütülen çalışmalarda 0.14 m/s, 0.27 m/s ve 0.29 m/s olmak üzere 3 farklı birinci faz hızı, 1.95 m/s ve 2.5 m/s olmak üzere 2 farklı ikinci faz hızı ve 150 bar, 225 bar ve 300 bar olmak üzere 3 farklı enjeksiyon basıncı olmak üzere 18 farklı kombinasyonun denemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, 300 bar enjeksiyon sistem basıncı, 0.14 m/s birinci faz hızı ve 1.95 m/s ikinci faz hızı kombinasyonunun, gerçekleştirilen yoğunluk ölçümü ve toplam gözeneklilik alanı ölçümleri ile en düşük çekinti gözenekliliğini sağladığı ifade edilmiş ve aynı parametreleri ile Magmasoft simülasyon yazılımı kullanılarak simülasyon çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ve simülasyon analizlerinin sonuçlarının karşılaştırılması neticesinde simülasyon yazılımının iyi bir yakınsama yaptığı belirtilmiştir.

Jin C. K. ve Kang C. G. (2011) yüksek basınçlı döküm yönteminde farklı birinci ve ikinci faz hızı değerlerine bağlı olarak gaz gözenekliliği oluşumunun asgari düzeye indirilmesi amacıyla Magmasoft simülasyon yazılımı aracılığıyla denemeler gerçekleştirmişlerdir. Bu bağlamda, 0.3 m/s, 0.5 m/s ve 0.7 m/s olmak üzere 3 farklı birinci faz hızı ve 1.28 m/s, 1.7 m/s, 2.13 m/s, 2.5 m/s olmak üzere 4 farklı ikinci faz hız belirlenerek toplam 12 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Çalışmalar ALDC6 alüminyum alaşımı kullanılarak hem gerçek koşullarda hem de Magmasoft simülasyon yazılımı ile sanal ortamda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde, gaz gözenekliliği oluşumu sonuçları kıyaslanarak, optimum parametrelerin birinci faz hızında 0.3 m/s, ikinci faz hızında ise 2.5 m/s olduğu belirtilmiştir.

Kwon H. J. ve Kwon H. K. (2019) karmaşık geometriye sahip bir ticari üründe yolluk sistemi tasarımını optimize etmek amacıyla simülasyon yazılımından faydalanmışlardır. Çalışmalarda, kullanılan AlSi9Cu3 alaşımının döküm sıcaklığı 680 ºC, birinci faz hızı 0.9 m/s, ikinci faz hızı 3.5 m/s tercih edilmiş olup 3 farklı yolluk ve taşma cebi sistemi tasarlanarak, AnyCasting yazılımında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, tasarlanan 3 farklı yolluk ve taşma cebi sisteminde en iyi akışa sahip olan tasarımda giriş yönlendirmesi ve yolluk merkezinde bulunan döner blok çevresinde modifikasyonlar gerçekleştirilerek nihai tasarım belirlenmiştir. Yolluk sisteminin merkezine yerleştirilen döner blok ergmiş metalin

ürüne girişi alanında herhangi bir geri akışın oluşmasını engellemiştir. Ayrıca, tasarımda kullanılan vakum (chill vent) sisteminin sıkışmış gazların tahliyesinde faydalı olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, yolluk ve taşma cebi sistemi tasarımında gerçekleştirilen değişikliklerle gaz sıkışmalarının neden olduğu gözeneklilikler simülasyon sonuçlarında gözle görülür oranda azaltılmıştır.

Serçe O. (2015) yüksek basınçlı döküm yönteminde optimum döküm parametrelerinin belirlenmesi için simülasyon yazılımı kullanımı üzerinde tez çalışması yapmıştır. Çalışmada ticari bir ürün modellenerek simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yürütülen simülasyon çalışmalarında, birinci faz hızı 0.4 m/s olarak sabit tutulmakla birlikte, ikinci faz hızlarında 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s olmak üzere üç farklı, enjeksiyon başlangıç noktasında topuk ve giriş olmak üzere iki farklı, kalıp sıcaklıklarında 423 K ve 573 K olmak üzere iki farklı ve döküm sıcaklığı olarak ise 953 K ve 1053 K değerleri olmak üzere iki farklı parametre seçilerek simülasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları neticesinde, soğuk birleşme noktaları, gaz sıkışmaları, dolum süresi, katılaşma süresi, dolum hızı ve çekinti gözenekliliği sonuçları yorumlanarak, enjeksiyon başlangıç noktası girişte olmak üzere, enjeksiyon hızı 2 m/s, döküm sıcaklığı 1052 K ve kalıp sıcaklığı 573 K olduğu parametre kombinasyonunun optimum olduğu belirtilmiştir.

Zhao X. ve ark. (2018) AlSi10MnMg alüminyum alaşımının yüksek basınçlı dökümü sürecinde gaz sıkışması kusurlarını azaltmak amacıyla farklı yolluk sistemleri tasarlayarak Flow 3D yazılımında simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir. Simülasyon sonuçları neticesinde, yolluk sisteminin ortasında bir giriş verildiğinde bariz gaz sıkışmalarının oluştuğu tespit edilmiştir. İkinci tasarımda, ortadaki giriş kapatılarak bir taşma cebine dönüştürülmüş, sıkışmış gaz hacminin azaltıldığı belirlenmiştir. Son olarak üçüncü tasarımda orta giriş tamamen kaldırıldığında, asgari gaz sıkışması ve kararlı bir dolum elde edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında gerçekleştirilen tasarım değişiklikleri gerçek koşullarda da uygulanarak dökümler gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları gerçek üretim denemeleriyle doğrulanmıştır. Sonuç olarak, yüksek yüzey kalitesi, başarılı bir mikroyapıya sahip parçalar ve gereksinimleri karşılayan mekanik özellikler elde edilmiştir.

Adamane A. R. ve ark. (2015) alüminyum alaşımlarında enjeksiyon parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkileri üzerine eleştirel bir derleme yayınlamışlardır. Gerçekleştirdikleri araştırmalarda, 1.7 m/s ile 3.4 m/s arasındaki seçilen ikinci faz hızlarında asgari gaz gözenekliliğinin elde edildiği belirtilmiştir. Bir diğer parametre olan enjeksiyon basıncında, 610 bar, 130 bar ve 0 bar olarak gerçekleştirilen denemelerde basınç artışının çekinti gözenekliliğini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, asgari çekinti gözenekliliğin elde edilmesinde doğru giriş (gate) kalınlığı ve enjeksiyon basıncı kombinasyonunun önemi vurgulanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada hava kurutucu parçasının yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretimi Magmasoft döküm simülasyonu yazılımı ile simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametreleri doğrulama çalışmaları yüksek basınçlı döküm hattında uygulanmıştır.

3.1. Malzeme

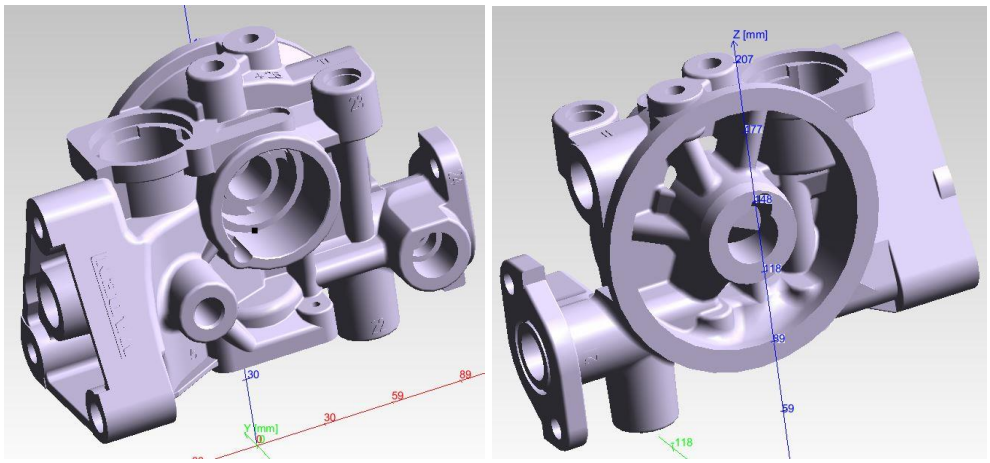
Bu çalışmada döküm malzemesi olarak en yaygın yüksek basınçlı döküm alaşımlarından olan AlSi12(Fe) alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de bu çalışmada kullanılan AlSi12(Fe) malzemesinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 3. 1 AlSi12(Fe) alaşımının kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim, %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
AlSi12(Fe)	12.47	0.54	0.07	0.24	0.06	0.14	0.13

3.2. Ürün ve Kalıp Tasarımı

Çalışmalar, yüksek basınçlı döküm ile üretim yapan özel bir firmanın kalıp ve süreç tasarımının zorlu olduğu karmaşık geometriye sahip bir ağır vasıtalarda kullanılan hava kurutucu parçası üzerinden yürütülmüştür. İlk olarak, Şekil 3.1'de verilen söz konusu ürünün orijinal ölçülerinde CAD yazılımı aracılığıyla modellenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir.

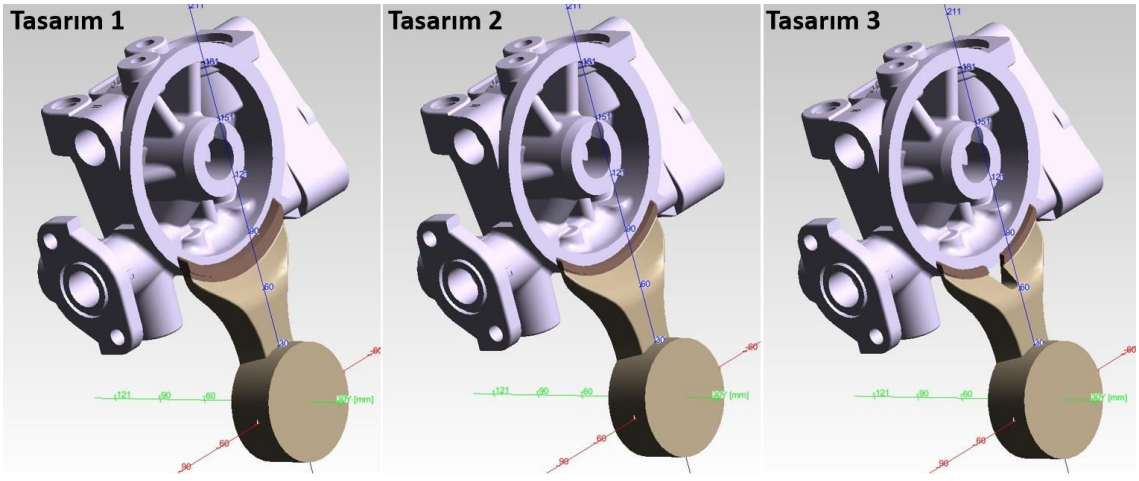


Şekil 3. 1 Hava kurutucu parçasının katı modeli

3.2.1. Yolluk sistemi tasarımı

Modelleme işlemi tamamlanan üründe yolluk tasarımına başlanmadan önce ürünün geometrisine göre sıvı metalin giriş yapacağı bölge belirlenmiştir. Talaşlı imalat aşaması, metal maça çalışma prensipleri, yeterli giriş kalınlığının oluşturulabileceği kesit kalınlığı gibi konular değerlendirildiğinde Şekil 3.2'de görülen bölgeden sıvı metalin parçaya girişi için en ideal nokta olarak belirlenmiştir. Sıvı metalin parçaya giriş noktasının belirlenmesinde döküm sonrası talaşlı imalat aşamasında işlenecek bir yüzeyin tercih edilmesi ile ilave bir taşlama işlemine gereksinim duyulmaması sağlanmıştır.

Sıvı metalin parçaya giriş yapacağı bölge belirlendikten sonra farklı giriş kalınlıkları ve giriş tiplerine sahip Şekil 3.2'de verilen 3 farklı yolluk sistemi tasarımı yine CAD yazılımı aracılığıyla oluşturulmuştur. Geleneksel yüksek basınçlı dökümde giriş kalınlığı 0.25 - 4 mm arasındadır (Anonymous, 2016). Bu sebeple, tez çalışmasında seçilen giriş kalınlıkları 2 mm ve 4 mm olarak tercih edilmiştir.

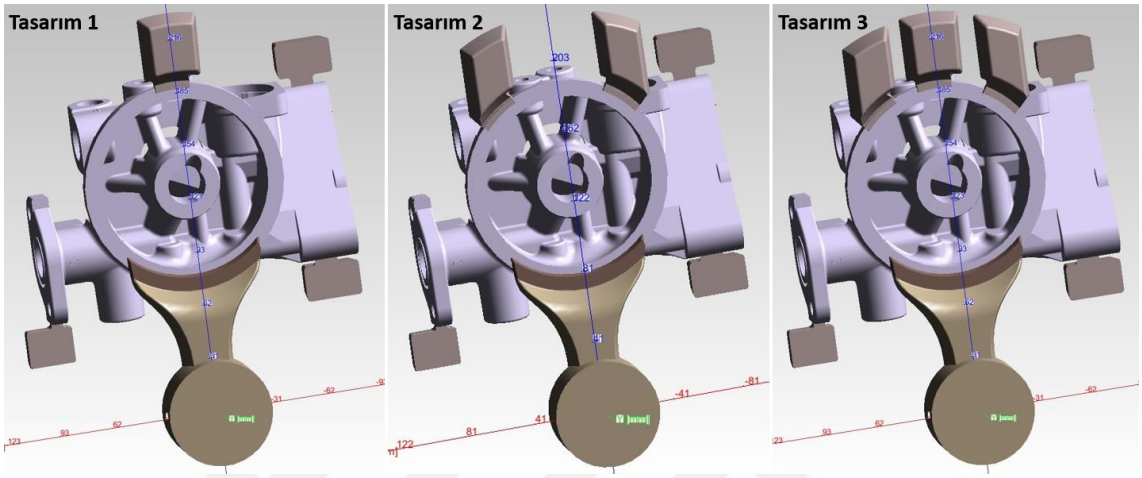


Şekil 3. 2 Tasarım 1) 4 mm giriş kalınlığı, tek giriş **Tasarım 2)** 2 mm giriş kalınlığı, tek giriş **Tasarım 3)** 2 mm giriş kalınlığı, çift giriş

3.2.2. Hava cebi sistemi tasarımı

Yolluk sistemi belirlendikten sonra optimum hava cebi sisteminin de elde edilmesi amacıyla bir sonraki bölümde detaylandırılacak olan yolluk sisteminin

belirlenmesi için yürütülen simülasyon analizi sonuçlarından yararlanılarak Şekil 3.3'te verilen 3 farklı hava cebi sistemi CAD yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımlarda kullanılan hava ceplerinin her birinden kalıp içerisindeki havanını tahliyesine yardımcı olabilmek için 0.1 mm x 6 mm boyutlarında hava deliği (vent) açılmıştır.



Şekil 3. 3 Tasarım 1) 4 adet hava cepli **Tasarım 2)** 5 adet hava cepli **Tasarım 3)** 6 adet hava cepli

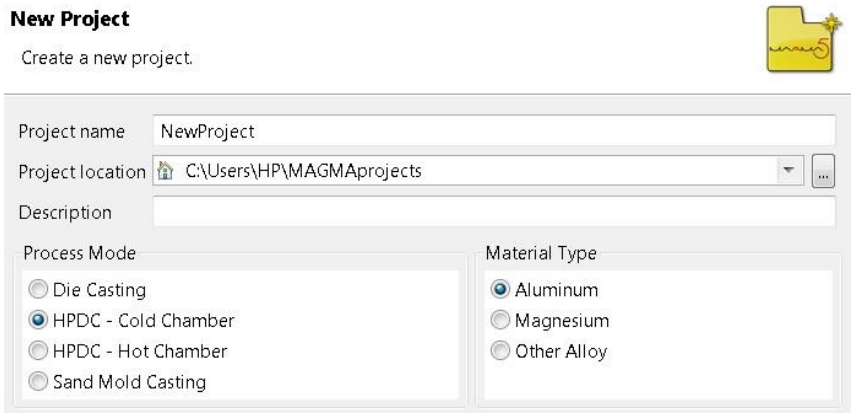
3.3. Yüksek Basınçlı Döküm Simülasyonu

Yüksek basınçlı döküm yönteminde, döküm esnasındaki akış tahmini, kalıp tasarımı, son katılaşma bölgelerine odaklanılır. Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) simülasyon yazılımları dolum analizi, katılaşma analizi ve döküm geometrilerinin optimizasyonuna katkı sunmaktadır (Fu ve Yong, 2009). Tez çalışmasında yararlanılan Magmasoft yazılımı dünya çapında dökümlerin teknolojik ve kalite odaklı üretimi için kapsamlı bir simülasyon yazılımıdır. Magmasoft, birçok değişkenden oluşan yüksek basınçlı döküm prosesinde dolum ve katılaşma problemlerini çözmek için sonlu elemanlar metodunu (FEM) kullanmaktadır (Wannarumon ve Grande, 2009). Simülasyon yazılımları ile dolum (ergiyik metalin hareketi ve hızı, dolum süresi, dolum sıcaklıkları, soğuk birleşmelerin gerçekleşeceği muhtemel noktalar, hava sıkışmaları, kalıp yüzeylerinde aşınma beklenen noktalar vb.) ve katılaşma (katılaşma süresi, katılaşma sıcaklıkları, çekinti porozitesi vb.) sonuçları görülebilmektedir. Simülasyon yazılımları bu yetenekleri sayesinde, döküm işlemi gerçekleştirilmeden, olacakların önceden görülüp optimum kalıp tasarımı ve süreç parametrelerinin elde edilmesini sağlayan, bir başka deyişle deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırarak düşük

üretim maliyetleri sunan ve ilk baskıdan itibaren yüksek oranda başarı ve verim elde edilebilen bir seçenek olarak görülmektedir (Jakumeit ve ark., 2012; Boydak ve ark., 2016).

Döküm süreci simülasyonu sırayla; ürün ve kalıbın katı modelinin oluşturularak simülasyon yazılımına aktarılması, modellerin örgü ağı (mesh) ile örülmesi, malzeme özelliklerinin tanımlanması, döküm süreci parametrelerinin tanımlanması, simülasyonun gerçekleştirilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Simülasyon çalışmaları, Magmasoft yazılımının tüm kombinasyonları tek seferde uygulama yeteneğine sahip olduğu ve görsel sonuçların yanı sıra sayısal sonuçlarında elde edilebildiği optimizasyon özelliği ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon özelliği sayesinde hem kalıp tasarımının hem de döküm süreci parametrelerinin belirlenmesinde olası tüm değişkenlerin tek seferde tanımlanmasıyla hem zamandan tasarruf sağlanmaktadır hem de tüm değişkenlerden elde edilen sonuçların sayısal olarak kıyaslanması ile optimum tasarım ve süreç parametrelerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır.

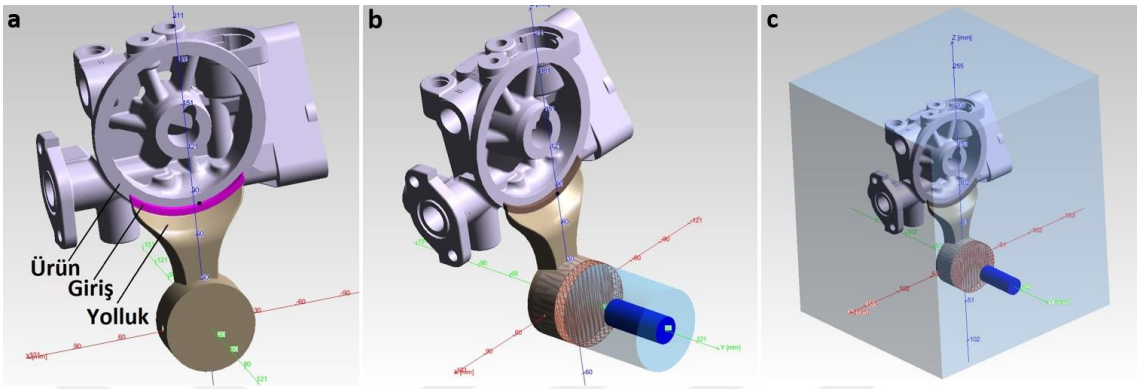
Yüksek basınçlı döküm simülasyonu çalışmaları için ilk olarak simülasyon yazılımı açılarak Şekil 3.4'te verilen pencereden malzeme ve döküm yöntemi seçimi yapılmıştır.



Şekil 3. 4 Malzeme ve döküm yöntemi seçimi penceresi

Simülasyon yazılımında yeni projenin oluşturulmasının ardından tasarlanan 3 farklı yolluk sistemi, simülasyon ortamına aktarılmıştır. Simülasyon ortamına aktarılan 3 farklı yolluk sistemine sahip katı modelin her birinde yüksek basınçlı döküm teorisine

uygun olarak Şekil 3.5'te verildiği üzere ürün (casting), yolluk (runner) ve giriş (gate) geometrilerinin tanımlamaları yapılmıştır. Ardından, piston (inlet) ve tüm tasarımı içine alacak şekilde kalıp tanımlanarak simülasyon kurulumunun geometrik düzenleme aşaması tamamlanmıştır.



Şekil 3. 5 a) Geometrilerin tanımlanması **b)** Döküm ağızı (inlet) tanımlanması **c)** Kalıbın tanımlanması

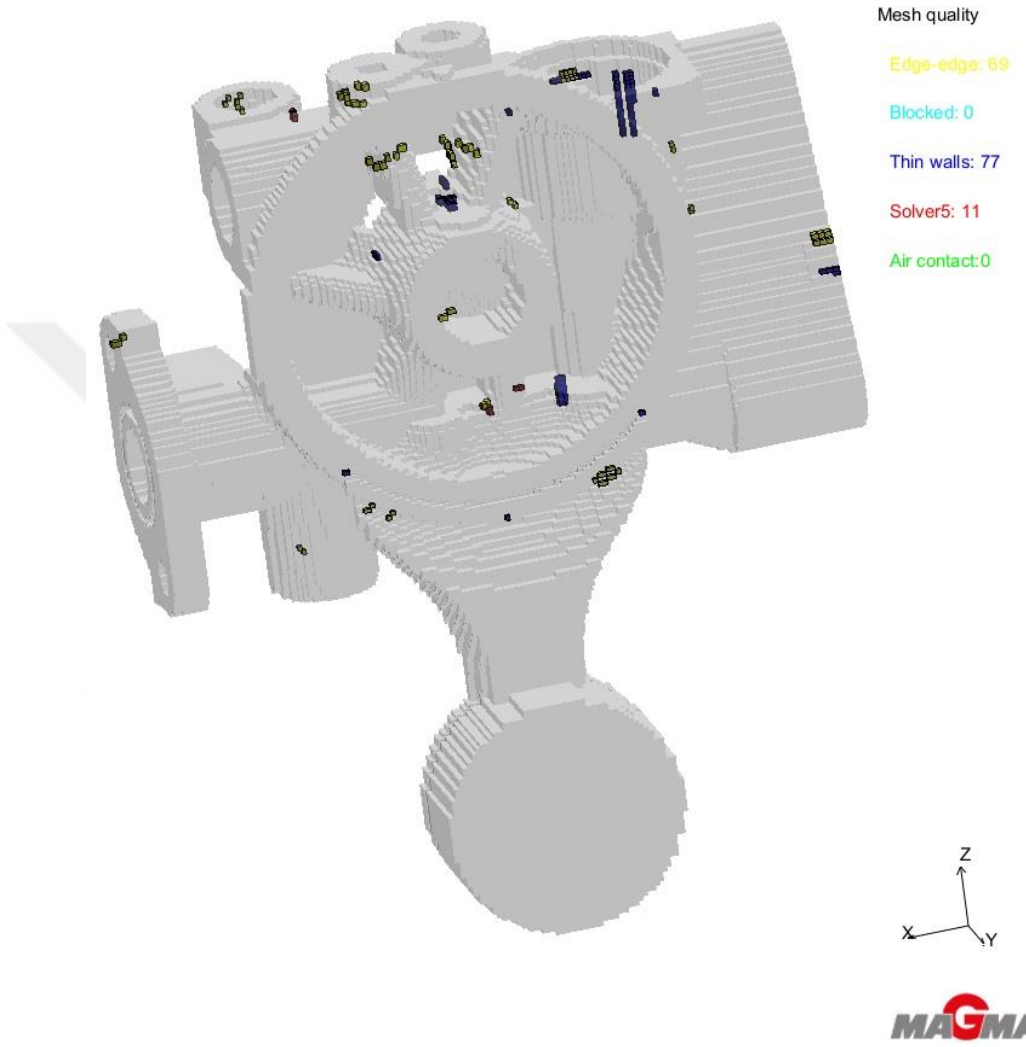
Simülasyon kurulumunun ilk aşaması olan geometrik düzenleme tamamlandıktan sonra yazılımın hesaplama yapabilmesi için ihtiyaç duyduğu örgü ağıyla (mesh) örme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mesh işleminde odaklanılması gereken nokta, döküm parçasının gerçek boyutlarının mesh hücreleri tarafından da yansıtılabilmesidir. Mesh hücrelerinin boyutları, ürün ve yolluk sisteminin en ince kesite sahip bölgelerinde asgari 3 adet mesh hücresi olacak şekilde belirlenmelidir, daha büyük boyutlara sahip mesh hücreleri oluşturulduğu takdirde gerçek boyutlarda bozulmalar yaşanması olasıdır, daha küçük boyutlara sahip mesh hücreleri oluşturulduğu takdirde ise simülasyon süresi gereğinden fazla uzayacaktır. Mesh örme işlemi, analiz edilen 3 farklı yolluk tasarımından optimizasyon özelliğinin gereği olarak en ince kesite sahip olan tasarım üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da mesh örme işlemi gerçekleştirilen ürün ve yolluk sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 6 Örgü ağı (mesh) oluşturulan ürün ve yolluk sistemi

Oluşturulan mesh ağının uygun olup olmadığı, Magmasoft yazılımının mesh kalitesi özelliği ile incelenmektedir. Mesh kalitesi özelliğinde, herhangi bir eksende komşusu olmayan mesh hücreleri (thin walls), bloke hücre (blocked), hiçbir eksende komşusu olmayan mesh hücreleri (edge-edge) ve atmosfer ile teması olan mesh hücreleri (air contact) hataları görülebilmekte ve simülasyon sonuçlarını doğrudan etkilemeyecek seviyelere indirilene dek mesh işlemi düzeltilmektedir. Şekil 3.7'de gerçekleştirilen mesh işleminin kalitesi görülmektedir. Dikkatle incelendiğinde, bloke hücre (blocked) sayısının ve atmosfer ile teması olan hücre sayısının (air contact) 0 olduğu görülmektedir. Bloke hücre sayısının 0 olması, dolum esnasında sıvı metalin akışının herhangi bir bölgede kesintiye uğramayacağını göstermektedir. Benzer şekilde atmosfer ile teması olan hücre sayısının (air contact) 0 olması, dolum esnasında sıvı metalin atmosferle hiçbir şekilde temas etmeyeceğini bir başka deyişle herhangi bir

kaçak yaşanmayacağını göstermektedir. Ek olarak, herhangi bir eksende komşusu olmayan mesh hücreleri (thin walls) sayısının 77, hiçbir eksende komşusu olmayan mesh hücreleri (edge-edge) sayısının 69 olduğu görülmekte olup dolumu etkilemeyecek kadar düşük seviyelerdedir.



Şekil 3. 7 Örgü ağı (mesh) kalitesi

Geometri ve örgü ağı (mesh) aşamaları tamamlandıktan sonra süreç parametrelerinin tanımlanması aşamasına geçilmiştir. Optimum yolluk sisteminin belirlenmesi için gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, optimum süreç parametrelerinin belirlenmesi için parametrik olarak çalışılan döküm sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve ikinci faz hızı parametreleri ile diğer parametreler sabit tutulmak kaydıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 3.8'de verilen pencereden döküm malzemesi, döküm sıcaklığı, kalıp malzemesi, kalıp sıcaklığı, piston

(inlet) malzemesi ve sıcaklığı, piston soğutma kanalında kullanılan malzeme ve sıcaklığı tanımlanmıştır.

Material	Mat ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)
⊞ Cast Alloy		MAGMA/AlSi12-HPDC	650.0
Material	Mat ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)
⊞ Permanent Mold		MAGMA/X40CrMoV5_1	175.0
Material	Mat ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)
⊞ Tempering Channel		MAGMA/Water	20.0
Material	Mat ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)
⊞ Plunger		MAGMA/CuCoBe	30.0

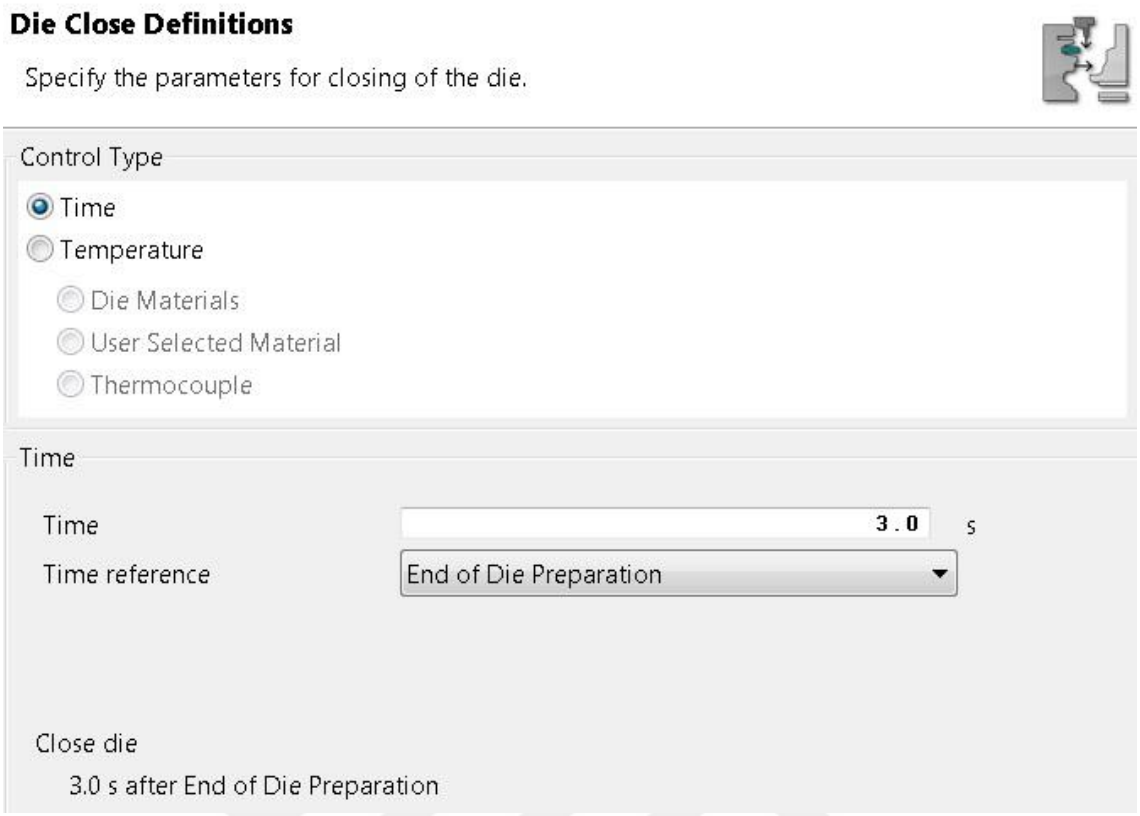
Şekil 3. 8 Malzeme tanımlama penceresi

Şekil 3.9'da verilen pencereden kalıp yağlama ve kurutma süreleri tanımlanmıştır.

Step	Type	Material		Process Control
001	Spraying	Cover Die ID 1	MAGMA/default.spray	Start 0.0 s after Begin of Preparation
		Plunger ID 1	MAGMA/default.spray	Stop after 5.0 s
002	Blowing	Cover Die ID 1	MAGMA/default.blow	Start 0.0 s after previous step
		Plunger ID 1	MAGMA/default.blow	Stop after 5.0 s

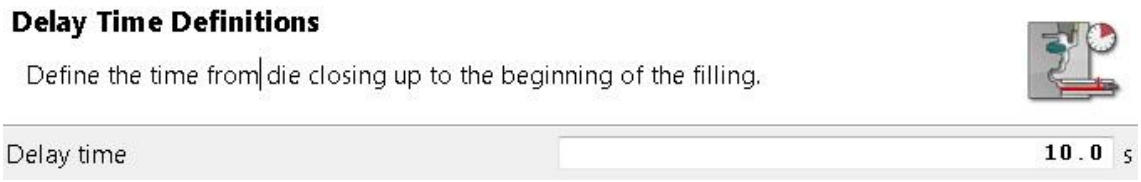
Şekil 3. 9 Kalıp yağlama ve kurutma süreleri tanımlama penceresi

Şekil 3.10'da verilen pencereden yağlama ve kurutma aşaması sonrası kalıp kapanma süresi tanımlanmıştır.



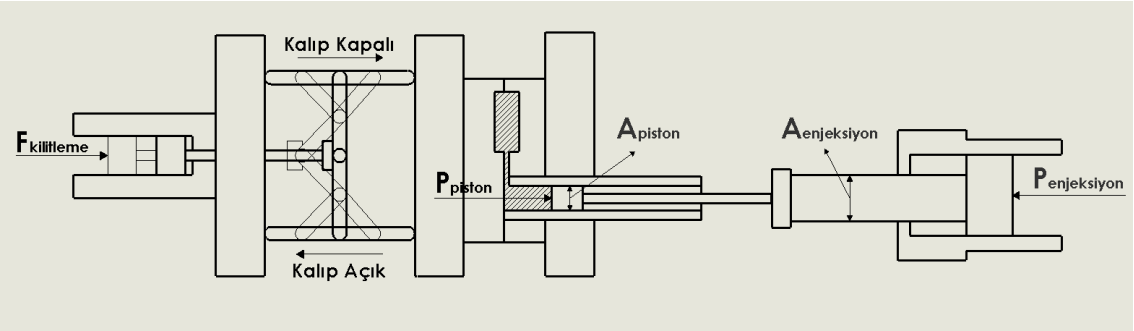
Şekil 3. 10 Kalıp kapanma tanımlama penceresi

Şekil 3.11'de verilen pencereden kalıbın kapanmasıyla dolumun (ikinci fazın devreye girmesi) başlaması arasında geçen süre tanımlanmıştır.



Şekil 3. 11 Gecikme süresi tanımlama ekranı

Yüksek basınçlı döküm makinesinin çalışma prensibini temel olarak enjeksiyon ve kilitleme olmak üzere iki ünite oluşturmaktadır. Enjeksiyon ünitesinin görevi, döküm kovanına beslenen sıvı metali kalıp boşluğuna enjekte etmektir. Kilitleme ünitesinin görevi ise enjeksiyon ünitesinin piston vasıtasıyla kalıp boşluğunda oluşturduğu basıncı karşılayabilecek bir karşı kuvvet oluşturmaktır. Şekil 3.12'de soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesinin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 12 Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesinin şematik görüntüsü

Literatür incelendiğinde, enjeksiyon basıncı tanımında bir karmaşa olduğu görülmektedir. Bazı yayınlarda enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sistem basıncını (injection system pressure) tanımlarken bazı yayınlarda ise pistonun topukta (biscuit) oluşturduğu basıncı (specific injection pressure) tanımlamaktadır. Enjeksiyon sistem basıncı ile pistonun oluşturduğu basınç farklı olmakla birlikte aralarında matematiksel bir bağıntı mevcuttur (Denklem 3.1).

$$A_{piston} \times P_{piston} = A_{enjeksiyon} \times P_{enjeksiyon} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de A_{piston}; kullanılan pistonun yüzey alanını, P_{piston}; pistonun topukta oluşturduğu basıncı, $A_{enjeksiyon}$; yüksek basınçlı döküm makinesinin silindir yüzey alanını ve $P_{enjeksiyon}$; enjeksiyon sistem basıncını ifade etmektedir. Denklemden görüldüğü üzere pistonun oluşturduğu basınç kullanılan piston çapına, kullanılan makineye ve uygulanan enjeksiyon sistem basıncına bağlıdır. Bu tez çalışmasında, enjeksiyon basıncı, pistonun topukta oluşturduğu basıncı (specific injection pressure) tanımlamaktadır.

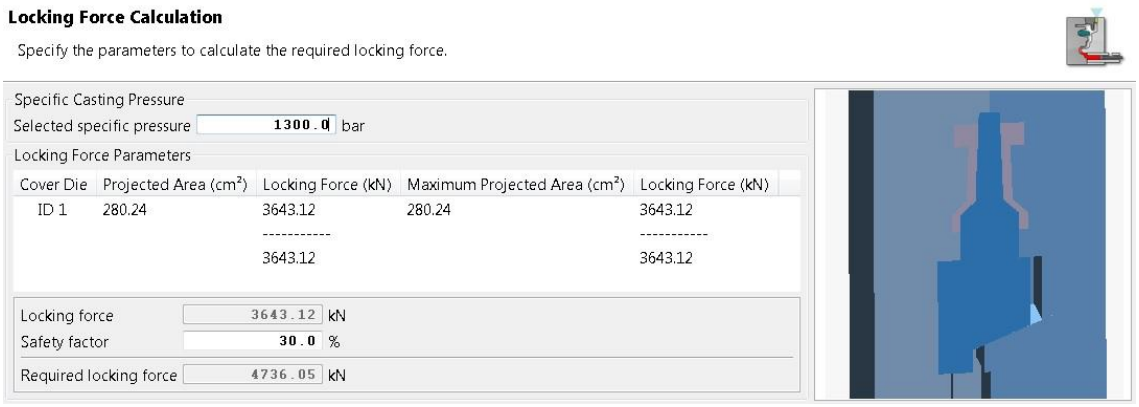
Şekil 3.13'te verilen pencereden uygulanmak istenen enjeksiyon basıncına göre döküm yüzey alanına etki etmesi gereken kilitleme kuvveti hesaplanarak makine kapasitesine karar verilmiştir. Kilitleme kuvvetinin hesaplanması Denklem 3.2'de verilmiştir.

$$F_{kilitleme} = A_{döküm\ yüzey\ alanı} \times P_{kalıp\ içi\ basınç} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de $F_{kilitleme}$; yüksek basınçlı döküm makinesinin uygulaması gereken kilitleme kuvvetini, $A_{döküm\ yüzey\ alanı}$; dökülen parçanın yolluk ve hava cebi

sistemleri dahil yüzey alanını ve $P_{\text{kalıp içi basınç}}$; kalıp boşluğu içerisinde oluşan basıncı ifade etmektedir. Pascal ilkesi gereği, sıvıların üzerine etkiyen basıncı aynen iletmesinin sonucu olarak kalıp boşluğu içerisinde oluşan basınç değeri yerine direkt P_{piston} değeri kullanılmaktadır.

Tez çalışmasında, ilerleyen bölümlerde bahsedileceği üzere, enjeksiyon basıncı parametresinde denenen en yüksek basınç değeri 1300 bar seçildiğinden dolayı makine kapasitesi seçimini 1300 bara göre yapılmış olup, %30 oranında bir güvenlik faktörü de göz önüne alındığında simülasyon yazılımının yeteneklerinden olan kilitleme kuvveti hesaplayıcı vasıtasıyla 4736.05 kN değerinde bir kilitleme kuvvetinin gerekli olduğu hesaplanmıştır. Çalışmada, yüksek basınçlı döküm denemeleri firmada bulunan 5500 kN kilitleme kuvvetine sahip makinesinde gerçekleştirilmiştir.



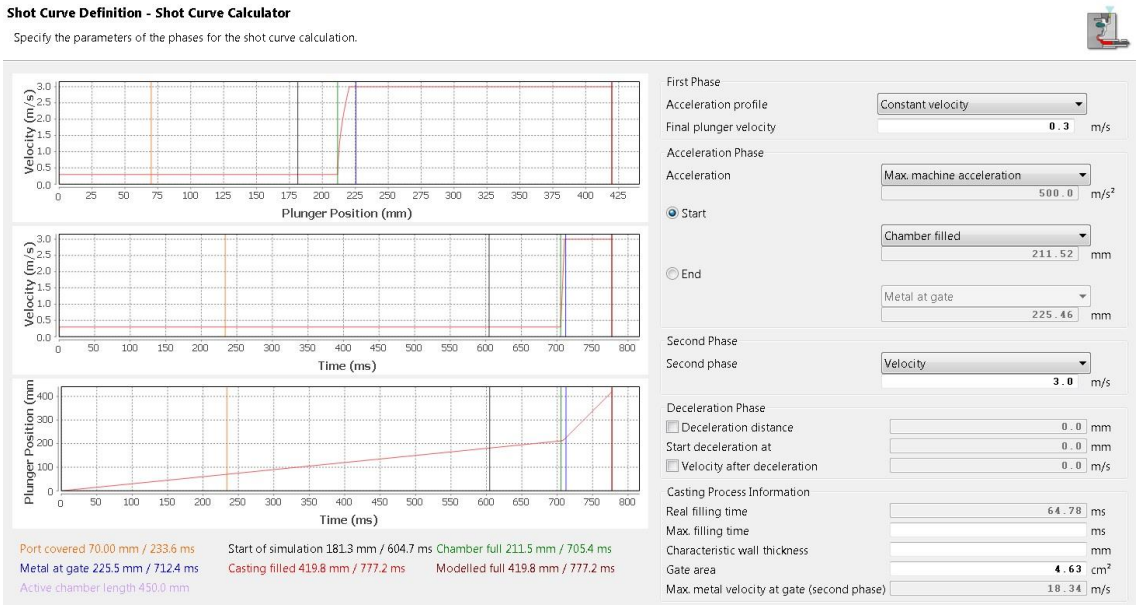
Şekil 3. 13 Kilitleme kuvveti ve makine kapasitesi seçimi penceresi

Şekil 3.14'te verilen pencereden yüksek basınçlı döküm makinesi kovanının toplam uzunluğu tanımlanarak doluluk oranı hesaplaması yapılmış olup, tanıtılan kovan uzunluğuna göre Magmasoft, toplam parça ağırlığından kovanda %53 oranında doluluk oranı sağlanacağını hesaplamıştır.



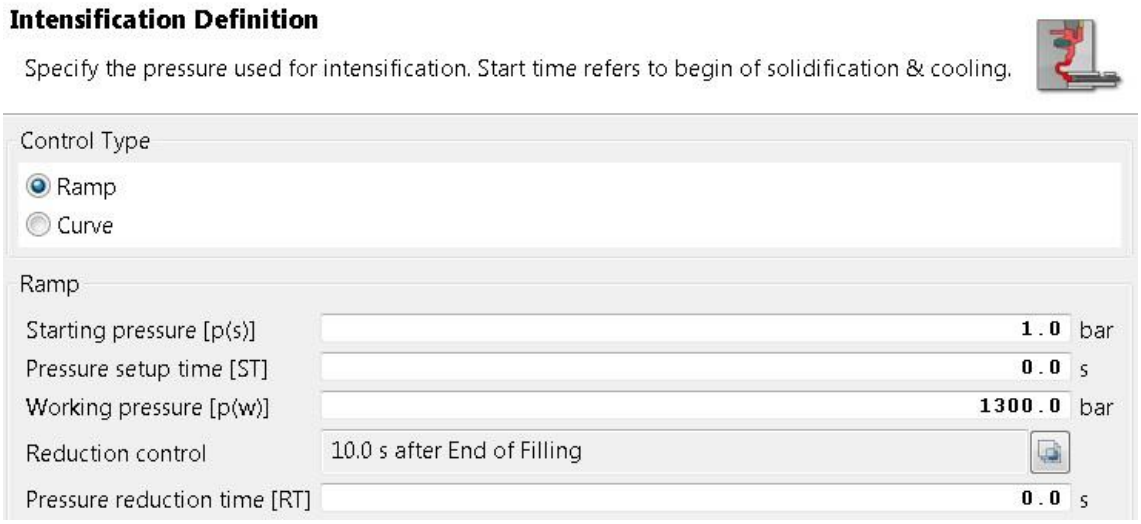
Şekil 3. 14 Kovan tanımlama penceresi

Şekil 3.15'te verilen pencereden birinci faz hızı 0.3 m/s, ikinci faz hızı 3.0 m/s, enjeksiyon başlangıç noktası ise piston hareketi esnasında kovan doluluk oranının %100 olduğu nokta olarak tanımlanmıştır.



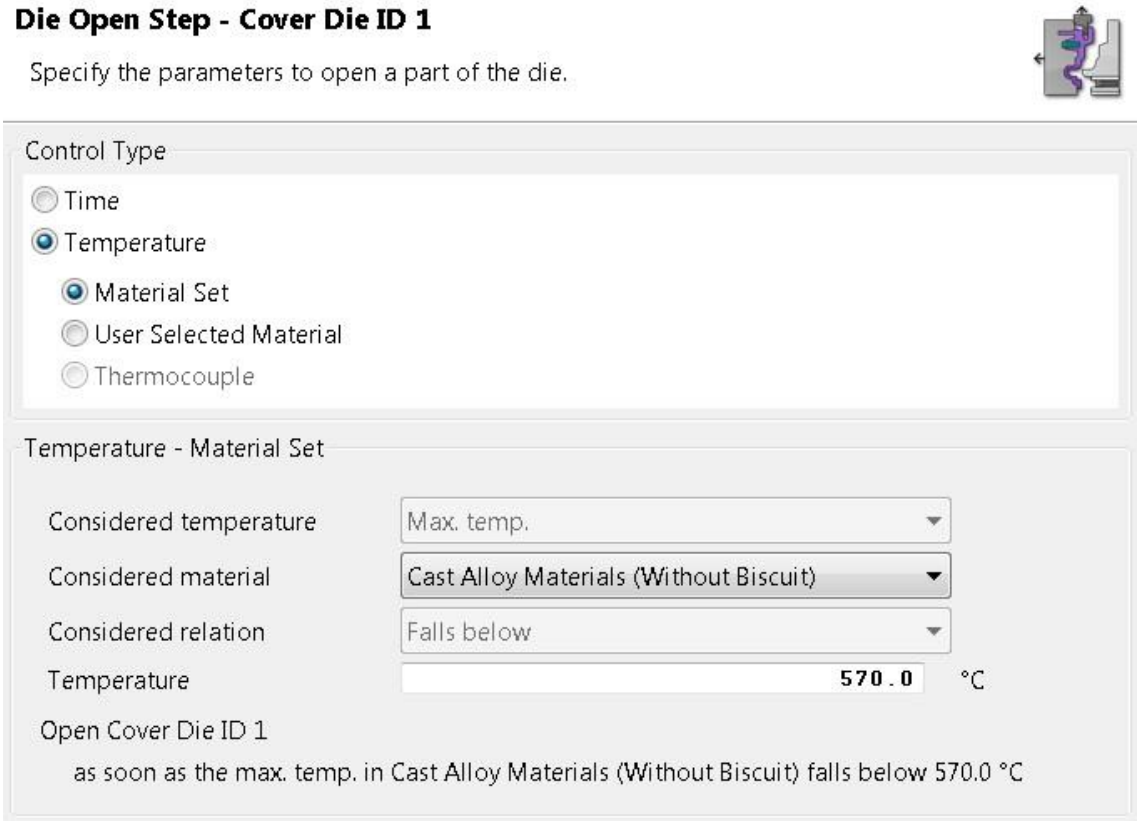
Şekil 3. 15 Birinci ve ikinci faz hızları ve enjeksiyon başlangıç noktası seçimi penceresi

Şekil 3.16'da verilen pencereden dolumun hemen sonrasında katılaşma esnasında uygulanacak olan enjeksiyon basıncı 1300 bar olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. 16 Enjeksiyon basıncı tanımlama penceresi

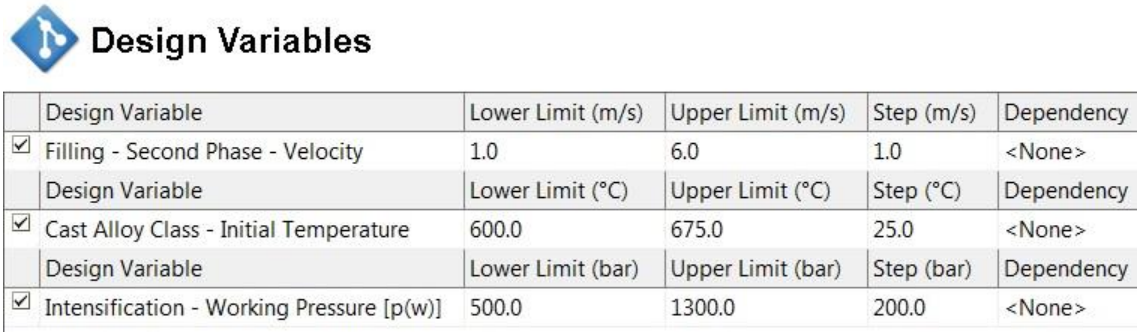
Şekil 3.17'de verilen pencereden dolum ve katılaşma aşamalarının akabinde kalıbın, parça sıcaklığı Magmasoft malzeme kütüphanesinde AlSi12(Fe) alaşımının katılaşma sıcaklığının yaklaşık 10 °C altı olan 570 °C seviyesine indiğinde açılması tanımlanmıştır.



Şekil 3. 17 Kalıp açılma tanımlama penceresi

Yürütülen tasarım ve simülasyon çalışmaları neticesinde optimum yolluk tasarımı elde edilmiştir. Yolluk sistemi için yürütülen simülasyon çalışmalarına benzer şekilde, tasarımları gerçekleştirilen 3 farklı hava cebi sistemi için de belirlenen yolluk sistemi kullanılarak optimum hava cebi sisteminin de elde edilmesi amacıyla simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hava cebi sisteminin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmaları, yolluk sistemi çalışmalarında olduğu gibi yürütülmüştür. Hava cebi sistemi çalışmalarında yolluk sistemi çalışmalarından farklı olarak simülasyon ortamına aktarılan 3 farklı hava cebi sistemine sahip katı modelin her birinde hava cebi (overflow) geometrisinin de tanımlamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde optimum yolluk sistemi tasarımının ardından optimum hava cebi tasarımı da elde edilmiştir.

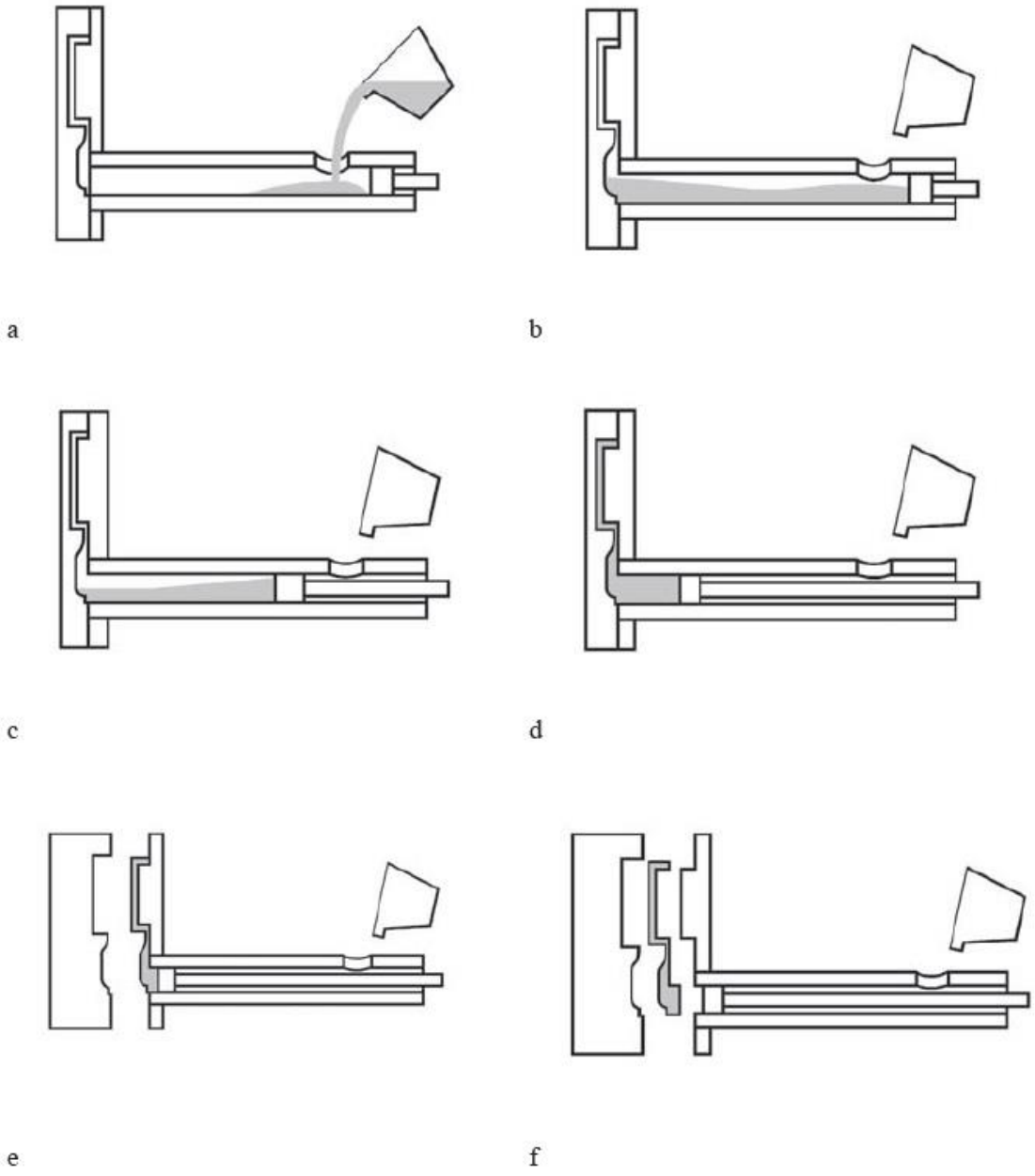
Yüksek basınçlı döküm sürecinde parça kalitesine en çok etki eden parametreler gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda saptanmış olup, bu parametreleri konu alan parametrik çalışmalar ile optimum süreç parametreleri de belirlenmiştir (Apparao ve Birru, 2017). Simülasyon çalışmaları, optimum kalıp tasarımının belirlenmesinde olduğu gibi optimum süreç parametrelerinin belirlenmesinde de Magmasoft yazılımının tüm kombinasyonları tek seferde uygulama yeteneğine sahip olduğu optimizasyon özelliği ile gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, belirlenen yolluk ve hava cebi sisteminin simülasyon yazılımında gerekli geometrik tanımlamaları yapılmış, mesh oluşturma işlemi gerçekleştirilmiş, ardından süreç parametrelerinin tanımlanması aşamasına geçilmiştir. Optimum süreç parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen çalışmalarda, parametrik olarak çalışılan olan döküm sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve ikinci faz hızı dışındaki diğer süreç parametreleri yolluk ve hava cebi sistemlerinin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmalarıyla bire bir aynı seçilmiştir. Şekil 3.18'de verilen optimizasyon penceresinden, 600 ºC, 625 ºC, 650 ºC ve 675 °C olmak üzere 4 farklı döküm sıcaklığı, 500 Bar, 700 Bar, 900 Bar, 1100 Bar ve 1300 Bar olmak üzere 5 farklı enjeksiyon basıncı, 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s ve 6 m/s olmak üzere 6 farklı ikinci faz hızı olmak üzere toplamda 120 farklı parametrik kombinasyon oluşturularak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yürütülen çalışmalar neticesinde, gaz gözenekliliği, çekinti gözenekliliği, soğuk birleşme ve kalıp aşınması sonuçlarına göre optimum süreç parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 3. 18 Optimizasyon penceresi

3.4. Yüksek Basınçlı Döküm

Yüksek basınçlı döküm yöntemi Şekil 3.19'da şematik olarak görüldüğü üzere ergiyik metal, yüksek basınç altında bir kalıp boşluğunun tamamen doldurulmasını sağlamak için yüksek hız kullanılarak bir piston yardımıyla döküm kovanı içinden kalıba enjekte edilir, hemen akabinde uygulanan sıkıştırma kuvveti (enjeksiyon basıncı) ile katılaşma esnasında meydana gelen hacimsel büzülme beslenir. Kalıpta tutulduğu süre boyunca, ergiyik metalin sahip olduğu ısının kalıba transferi sağlanmış olur ve katılaşma gerçekleşir. Katılaşma tamamlandığında, kalıp yarımları açılır ve ürün kalıptan çıkartılır (Doehler, 1951; Anonymous, 2015; Il Jeong ve ark., 2016). Bu süreçte, piston, birinci faz, ikinci faz ve üçüncü faz olarak isimlendirilen 3 farklı kademede metal enjeksiyonu gerçekleştirmektedir. Birinci fazda döküm kovanı içerisine dökülen sıvı metal yolluk girişine doğru yavaşça sürüklenmektedir. İkinci fazda sıvı metal, milisaniyeler içerisinde hızlı bir şekilde kalıba enjekte edilir. Üçüncü fazda ise, piston hızı neredeyse sıfır olur ve kalıba enjekte edilen metale katılaşma tamamlanıncaya kadar yüksek basınç uygulanır. Bu sayede, dökümü gerçekleştirilen parçada hacimsel büzülme kaynaklı boyutsal değişim ve çekinti gözeneklilikleri asgari seviyelere indirilmektedir.



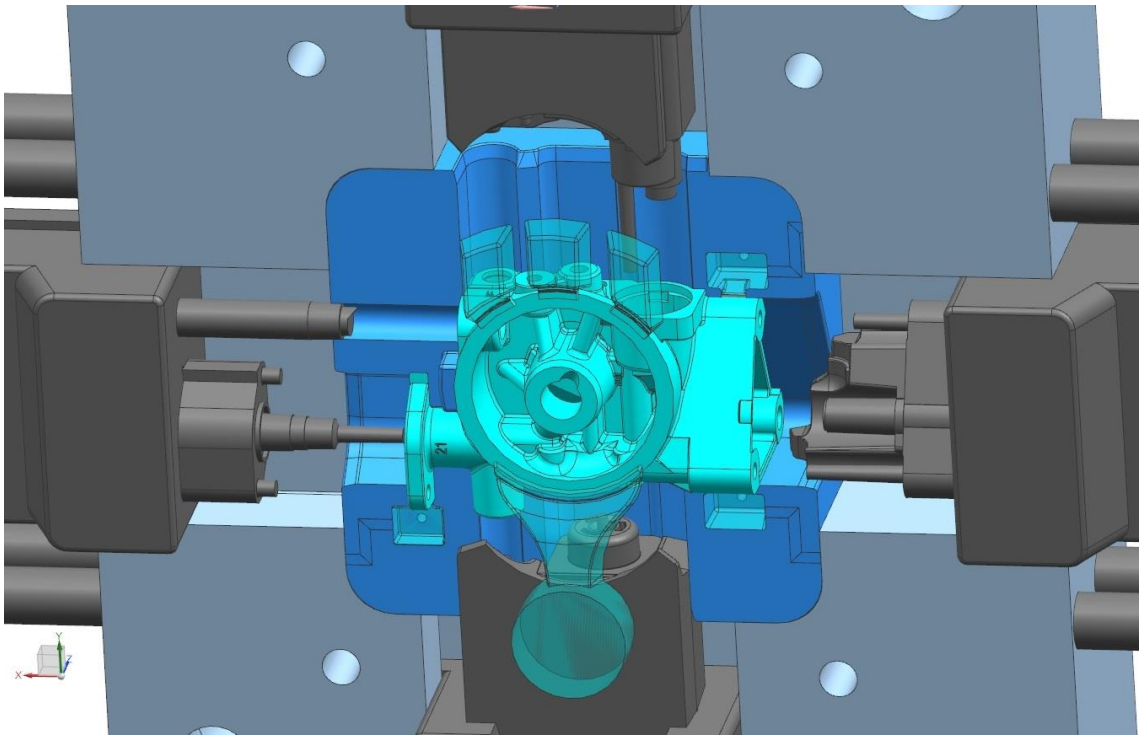
Şekil 3. 19 Soğuk kamara yöntemindeki aşamalar **a)** ergiyik metal döküm kovanına dökülür **b)** piston harekete geçer **c)** ergiyik metal yolluk sisteminden kalıp boşluğuna enjekte edilir **d)** katılaşma süresince enjeksiyon basıncı uygulanır **e)** katılaşma tamalandıktan sonra kalıp yarımları açılır **f)** ürün kalıptan çıkartılır (Reikher ve Barkhudarov, 2007)

Yüksek basınçlı döküm yönteminde, ergiyik metalin kalıba enjekte edilmesinde sıcak ve soğuk kamara olmak üzere iki farklı çalışma mantığına sahip makine kullanılmaktadır. Soğuk kamara yöntemi, alüminyum, pirinç ve magnezyum gibi yüksek sıcaklıklarda ergiyen ve sıvı fazda demir elementiyle birleşme eğilimine sahip olan metaller için kullanılır. Sıcak kamara yöntemi ise, çinko ve kurşun gibi düşük sıcaklıklarda ergiyen ve sıvı fazda demir elementiyle birleşme eğilimi düşük olan

metaller için kullanılır (Vinarcik, 2003; Anonymous, 2015). Ergiyik metal enjeksiyonu, kalıp boşluğu içinde bulunan havanın, hava sıkışmalarına neden olabilecek türbülanslı akışına yol açacak hızlarda gerçekleşmektedir. Döküm bileşenlerde gaz gözenekliliği varlığı, mekanik özellikleri ve basınç sızdırmazlığını olumsuz yönde etkilediğinden zararlıdır (Erturk ve ark., 2014; Raffaeli ve ark., 2015).

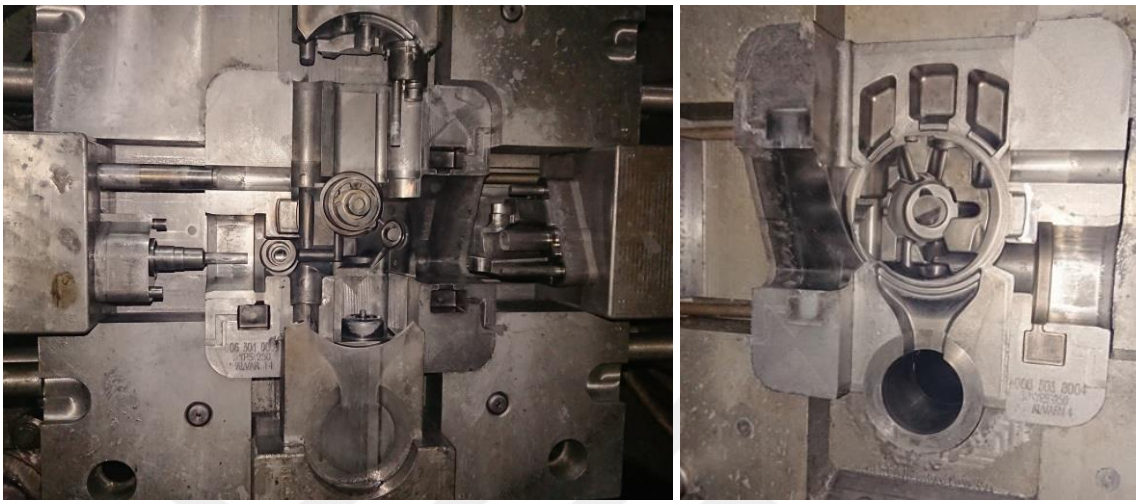
Yüksek basınçlı döküm yönteminde üretim hızı, alçak basınçlı döküm veya sabit kalıba döküm yöntemlerine göre çok yüksektir. Sahip olduğu hassas boyutsal tolerans özelliği sayesinde yüksek basınçlı döküm, talaşlı imalat proseslerinin asgari düzeye indirilmesine olanak sağlar. Yüksek basınçlı döküm prosesi ile imal edilen parçalar, kaplama prosesleri için kritik öneme sahip olan yüzey kalitesine sahiptir. Yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılan basınç sayesinde daha ince et kalınlığına sahip ve daha karmaşık parçaların üretilmesinin önünü açarak montaj bileşenlerinin sayısını azaltmaktadır (Doehler, 1951; Anonymous, 2015).

Yürütülen simülasyon çalışmaları neticesinde yolluk ve hava cebi sistemlerinin nihai tasarımlarına karar verilmesinin ardından Şekil 3.20'de verilen kalıp tasarımı CAD yazılımı vasıtasıyla modellenmiştir.



Şekil 3. 20 Kalıp tasarımı

Kalıp tasarımının CAD yazılımı aracılığıyla oluşturulmasının ardından Şekil 3.21'de görülen kalıp çekirdekleri ve metal maçalar X40CrMoV5-1 sıcak iş malzemesinden, diğer kalıp bileşenleri ise C45 malzemesinden talaşlı imalat yöntemiyle imal edilmiştir.



Şekil 3. 21 Kalıp yarımları

İmalatı tamamlanan kalıp, daha önce gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında döküm yüzey alanına göre kilitleme kuvveti hesaplayıcı tarafından hesaplaması yapılarak karar kılınan Şekil 3.22'de verilen 5500 kN kilitleme kuvveti kapasitesine sahip soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesine bağlanmıştır.



Şekil 3. 22 5500 kN kilitleme kapasiteli yüksek basınçlı döküm makinesi

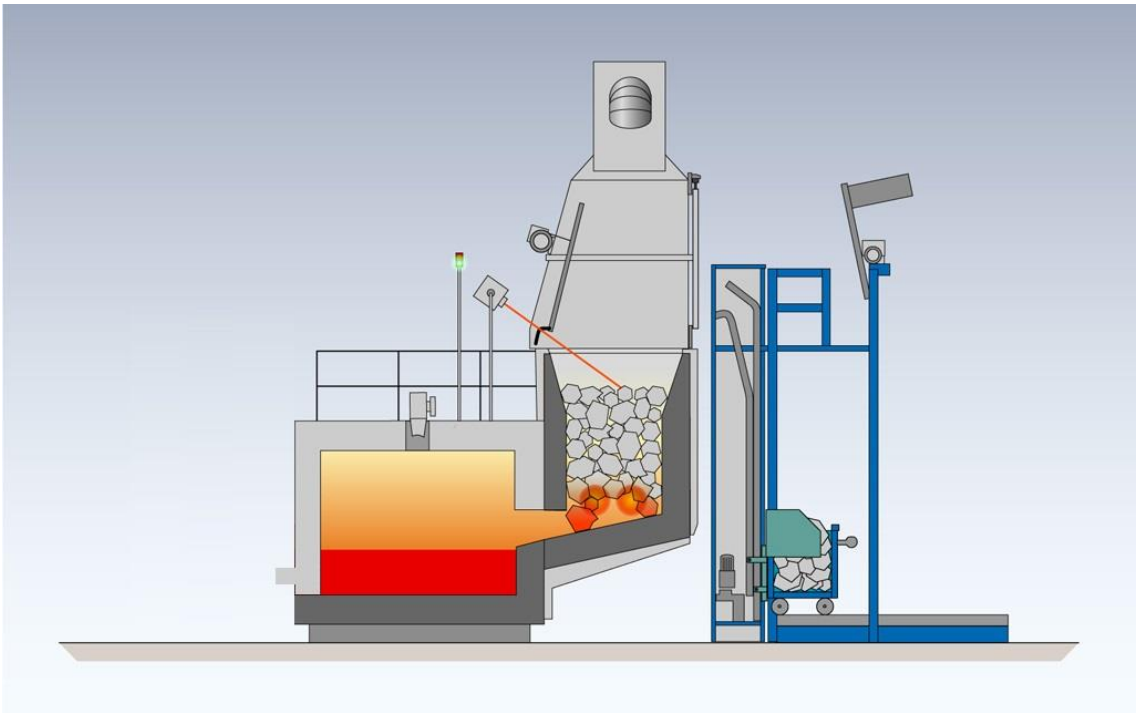
Yüksek basınçlı döküm sürecinde aşılması gereken önemli kısıtlardan birisi, demir elementinin alüminyum elementine olan yüksek afinitesi sebebiyle ergiyik halde kalıp boşluğuna enjekte edilen alüminyum elementince zengin metalin demir elementince zengin kalıp malzemesine yapışma eğilimidir. (Anonymous, 2015; 2016). Söz konusu yapışma eğiliminin engellenebilmesi adına kalıp çekirdek yüzeylerinde yüksek basınçlı döküm yönteminin rutin uygulamalarından olan oksidasyon işlemiyle bir oksit tabakası oluşturulur. Bu bağlamda, imalat aşaması tamamlanan kalıptan oksidasyon aşamasına geçmeden önce birkaç adet deneme baskısı alınarak, parçalar koordinat ölçme cihazı (CMM) yardımıyla boyutsal olarak onaylanmıştır. Deneme baskılarında dökülen parçalarda boyutsal olarak herhangi bir problem görülmemesi üzerine kalıp çekirdekleri oksidasyon işlemi için özel bir ısıl işlem firmasına gönderilmiştir. Talaşlı imalatı ve kaplama operasyonları tamamlanan kalıp, 5500 kN kilitleme kuvveti kapasitesine sahip soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesine yeniden bağlanarak döküme hazır duruma getirilmiştir.

Yüksek basınçlı döküm sürecinin ilk etabında kalıp tasarımı, imalatı, yüksek basınçlı döküm makinesi seçimi, kalıbın bağlanmasıyla döküme hazır duruma getirilmiştir. İkinci etap ise, ergitme ve döküm işleri yürütülmüştür. İlk olarak, AlSi12(Fe) alaşımı külçeler tedarik edilmiş olup Şekil 3.23'te görülen ergitme ocağında ergitilmiştir.



Şekil 3. 23 Ergitme ocağı

1500 kg/saat ergitme kapasitesine sahip olan ergitme ocağının Şekil 3.24'te şematik gösterimi verilmiştir. Ergitme ve bekletme olmak üzere iki bölümden oluşan ocak bir asansör sistemi yardımıyla ergitme bölümünün üstünden beslenir. Ergitme bölümünde bulunan 2 adet doğalgaz brülörü çalışmaktadır. Ergitme bölümünde katı fazdan sıvı faza geçen külçeler iki bölüm arasında bulunan dar bir penceren bekletme bölümüne akar ve bekletme bölümünde bulunan 1 adet doğalgaz brülörü bu bölümdeki sıvı metali yaklaşık 800 °C sıcaklıkta tutar.



Şekil 3. 24 Ergitme ocağının şematik gösterimi

Ergime gerçekleştikten sonra Şekil 3.25'te görülen 200 kg kapasiteli bir döküm potası vasıtayla yaklaşık 800 °C sıcaklığa sahip sıvı metal ergitme ocağından alınmıştır. Sıvı metal potayı doldurduktan sonra Şekil 3.26'da görüldüğü üzere bir aparat yardımlıya sıvı metal üzerinde oluşan cüruf tabakası alınmıştır.



Şekil 3. 25 Ergitme ocağından sıvı metalin potaya alınması



Şekil 3. 26 Cüruf tabakasının alınması

Şekil 3.24'e dikkatli bakıldığında ergitme ocağının sıvı metal tahliyesi ocağın alt kısmında yer almaktadır, bunun amacı ergiyen metal içerisinden, ocak duvarlarından veya atmosferden gelen inklüzyonların ergiyik yüzeyinde oluşturduğu cüruf tabakasını tahliye edilen sıvı metalden uzak tutmaktır. Bekletme bölümünün üst yüzeyinde biriken cüruf tabakası belirli periyotlarla cüruf alma flaksları kullanılarak bir aparat yardımıyla yüzeyden toplanır.

Sıvı metal ergitme ocağından çıktığı andan itibaren asgari enerji kaybı amacıyla olabildiğince hızlı hareket edilerek yaklaşık 200 kg sıvı metal Şekil 3.27'de görülen gaz giderme ünitesine yerleştirilmiştir.



Şekil 3. 27 Gaz giderme ünitesi

Gaz giderme operasyonunda özellikle hidrojen elementinin etkisi sorgulanması gerekir. Hidrojen atomları sıvı fazdaki alüminyum içinde çözündüğünde, katılaşma sırasında diğer elementlerden farklı olarak gaz fazında çökelmektedir. Sıvı fazdaki alüminyumun hidrojen çözebilme kapasitesinin katı fazdaki alüminyuma oranla yaklaşık 20 kat daha yüksektir. Katılaşma esnasında hidrojen çözünürlüğünde büyük bir düşüş meydana gelir ve katılaşma esnasında çözünmüş hidrojenin önemli bir bölümünün döküm parçada kalmasıyla gaz gözeneklerinin oluşmasına sebep olmaktadır (Puga ve ark., 2009). Gaz giderme operasyonunda, Şekil 3.28'de görüldüğü üzere yaklaşık 2 bar basınca sahip inert bir gaz olan azot gazı 180 saniye boyunca 420 rpm hızda döner gaz alma ünitesinde sıvı alüminyum içinden geçirilerek oluşturulan kabarcıklar sayesinde çözünmüş hidrojen yüzeye doğru taşınarak sıvı alüminyumdan uzaklaştırılmıştır. Gaz giderme operasyonu tamamlandığında sıvı alüminyum yüzeyinde oluşan cüruf tabakası tekrar bir aparat yardımıyla yüzeyden uzaklaştırılmıştır.



Şekil 3. 28 Gaz giderme operasyonu

Gaz giderme operasyonu tamamlandıktan sonra, sıvı metal dökümün gerçekleştirileceği yüksek basınçlı döküm makinesine entegre olarak çalışan Şekil 3.29'da görülen rezistanslı bekletme ocağına beslenir.



Şekil 3. 29 Rezistanslı bekletme ocağı

Sıvı alüminyumun sıcaklığı bekletme ocağına gelene değin gaz giderme operasyonu ve taşıma süreçleri boyunca yaklaşık 120 °C düşerek rezistanslı bekletme ocağının rutin sıcaklığı olan 680 °C sıcaklıkta transferini tamamlamıştır.

Simülasyon yazılımının optimizasyon özelliği kullanılarak döküm sıcaklığı, ikinci faz hızı ve enjeksiyon basıncı parametrelerinin 120 farklı kombinasyonunda gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları neticesinde elde edilen özellikle gaz ve çekinti gözenekliliği, soğuk birleşme ve kalıp aşınması sonuçları baz alınarak en iyi sonucu veren kombinasyonlarda gerçek koşullarda dökümler gerçekleştirilmiştir.

Sıvı alüminyum hazırlığı devam ederken, Şekil 3.30'da görülen kalıp şartlandırıcı (termoregülatör) kullanılarak kalıp, belirlenen kalıp sıcaklığı olan 175 °C sıcaklıkta stabil duruma getirilmiştir.



Şekil 3. 30 Kalıp şartlandırıcı (termoregülatör)

Sıvı metalin bekletme ocağına transferi sonrası tez çalışmasında dökümü gerçekleştirilen parçanın simülasyon yazılımı yardımıyla tespit edilen yolluk ve hava

cebi sistemi ile beraber toplam ağırlığına göre Şekil 3.31’de görülen otomatik kepçe sisteminin bekletme ocağından ne kadar sıvı metal alacağı, dökme açısı ve hareket rotası programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) yardımıyla programlanmıştır. Uygulanan program sonrası Şekil 3.32’de otomatik kepçe sisteminin bekletme ocağından ergiyik metali aldığı an görülmektedir.



Şekil 3. 31 Otomatik kepçe sistemi



Şekil 3. 32 Otomatik kepçe sisteminin bekletme ocağından ergiyik metali alması

Her bir çevrim için kalıpta son olarak yağlama ve kurutma operasyonu gerçekleştirilmiştir. Yağlama ve kurutma işlemi Şekil 3.33'te görülen yüksek basınçlı döküm makinesine entegre olarak çalışan otomatik doğrusal yağlama sistemiyle gerçekleştirilmektedir. Tez çalışmasında yağlama ve kurutma operasyonunda otomatik doğrusal yağlama sisteminin hareketi kepçe sisteminde olduğu gibi programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) yardımıyla programlanmıştır.



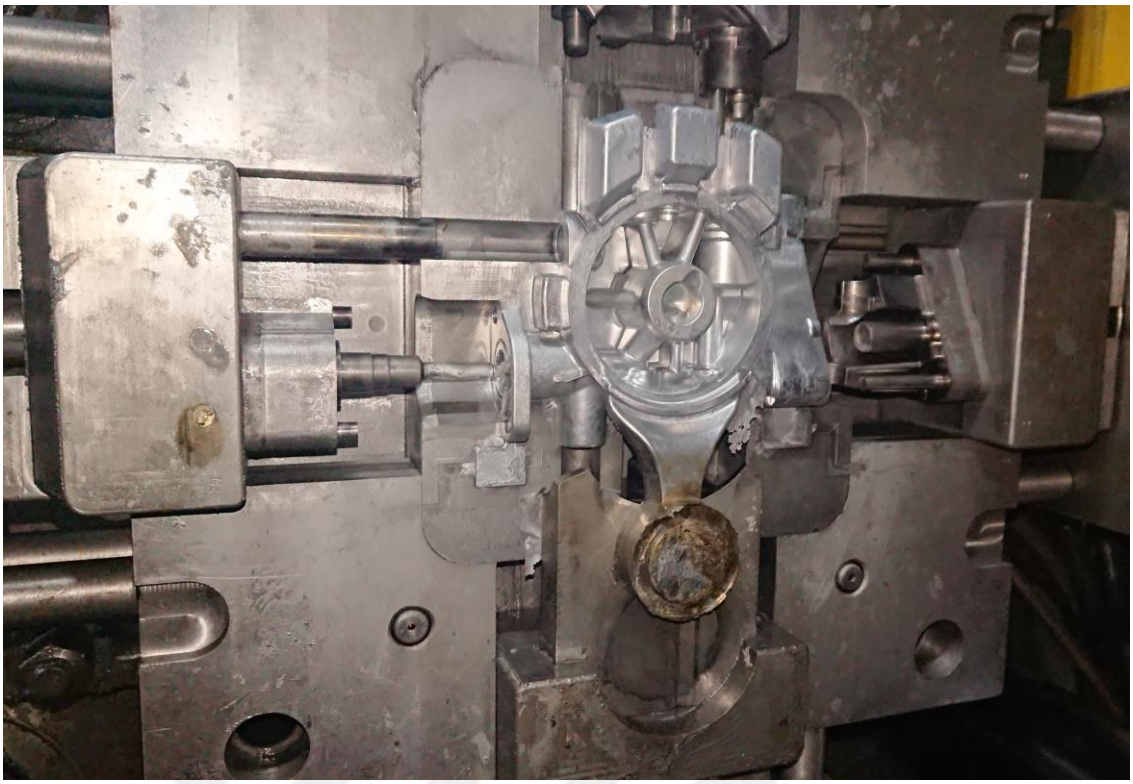
Şekil 3. 33 Otomatik doğrusal yağlama ve kurutma sistemi

Yağlama ve kurutma operasyonu sonrası kalıp kapatılmıştır. Kalıp kapandığı anda eş zamanlı olarak bekletme ocağından otomatik kepçenin aldığı ergiyik metal Şekil 3.34'te görüldüğü gibi döküm kovanına dökülmeye başlanmıştır.



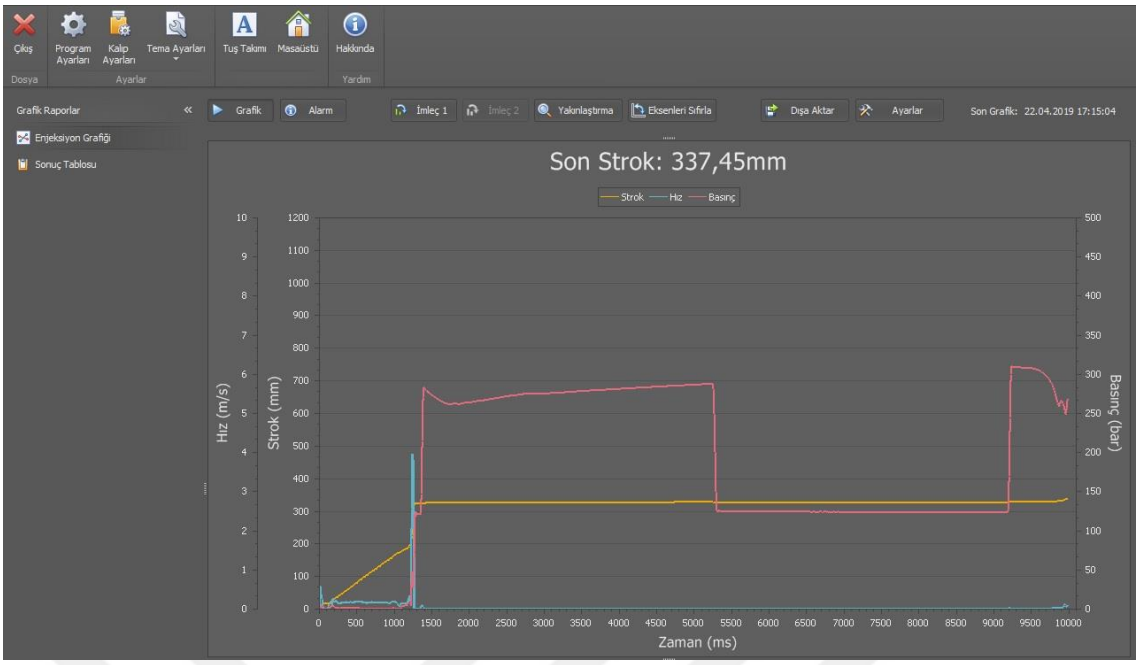
Şekil 3. 34 Otomatik kepçe sistemiyle ergiyik metalin döküm kovanına aktarılması

Döküm kepçesindeki sıvı metalin tamamı döküm kovanına aktarıldıktan hemen sonra piston harekete geçmiş ve milisaniyeler içerisinde döküm tamamlanmıştır. Parça sıcaklığı AlSi12(Fe) alaşımının katılaşma sıcaklığının yaklaşık 10 °C altı olan 570 °C sıcaklığa düştüğü anda Şekil 3.35'te görüldüğü üzere kalıp yarımları ve metal maçalar açılmıştır. Daha sonra parça itici pimler yardımıyla kalıptan çıkarılmış, bir maşa yardımıyla alınmış ve kalıpta bir sonraki çevrim için yeniden yağlama ve kurutma operasyonu başlamıştır.



Şekil 3. 35 Kalıp yarımları ve metal maçaların açılması

Yüksek basınçlı döküm sürecinde piston seyri, yolluk giriş hızı (gate velocity), dolum süresi, katılaşma süresi, birinci faz hızı ve süresi, ikinci faz hızı ve süresi, enjeksiyon basıncı ve süresi, topuk (biscuit) kalınlığı, kalıp açma kuvveti gibi sürece direkt etki eden parametreler Şekil 3.36'da verilen enjeksiyon grafiğinden kontrol edilmektedir. Yüksek basınçlı döküm makinesinin her bir çevriminin özeti enjeksiyon grafiğine aktarılmaktadır. Enjeksiyon grafiği üzerinden otomatik olarak çekilen parametrelerin sunulduğu sonuç tablodan süreç sürekli kontrol altında tutulmakta, gerçekleştirilen teorik hesaplamaların dışında bir pratik gözlemlendiği takdirde müdahale edilmektedir. Ayrıca, enjeksiyon grafiği üzerinde manuel bir şekilde hareket ettirilebilen imleç vasıtasıyla da her parametre incelenebilmektedir.



Şekil 3. 36 Enjeksiyon grafiği

3.5. Radyografik Muayene

Optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametreleri ile yüksek basınçlı döküm hattında döküm işlemleri tamamlanan ürünler, radyografik muayeneye alınmıştır. Radyografik muayenelerde, gaz ve çekinti gözenekliliği, soğuk birleşme gibi döküm kusurları incelenmiştir. Tez çalışmasında, radyografik muayeneneler, Şekil 3.37'de görülen Alman menşeili YXLON marka Y.MU2000-D 320 kV model dijital radyografi cihazı kullanılarak TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ'NDE gerçekleştirilmiştir. İncelemelerde kullanılan standart TS EN 12681 olup, değerlendirme ise ASTM E2422 standardına göre yapılmıştır. Radyografik muayene sonucunda, sanal ve gerçek koşul çalışmaları sonuçları kıyaslanarak simülasyon verimliliği tartışılmıştır.



Şekil 3. 37 Dijital radyografik muayene cihazı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Yüksek Basınçlı Döküm Simülasyonu

Optimum kalıp tasarımı ve döküm süreci parametrelerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen yüksek basınçlı döküm simülasyonu çalışmalarında ilk olarak kalıp tasarımının döküm kalitesine en çok etkiyen aşaması olan yolluk sisteminin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının sonuçları incelenmiştir. Simülasyon sonuçları üzerinde gerçekleştirilen tartışmalar neticesinde optimum yolluk sistemi tasarımında karar kılınmıştır. Karar kılınan yolluk sistemi kullanılarak hava cebi sistemi tasarımının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ikinci simülasyon çalışmalarının sonuçları üzerinde gerçekleştirilen tartışmalar neticesinde optimum hava cebi sistemi tasarımı da belirlenmiştir. Kalıp tasarımının belirlenmesinin ardından optimum döküm süreci parametrelerini konu alan metot bölümünde de bahsedildiği üzere 120 farklı tasarımla oldukça kapsamlı üçüncü aşama simülasyon çalışmaları sonuçları üzerinde gerçekleştirilen tartışmalar neticesinde optimum döküm süreci parametreleri belirlenmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan Magmasoft döküm simülasyonu yazılımında herhangi bir projenin kurulumundan simülasyonun başlatılmasına kadar olan aşamalarında yürütülen çalışmalar metot bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölümde ise gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonuçları irdelenerek tartışmaya açılmıştır.

Magmasoft simülasyon yazılımında sonuçlar dolum (fiiling) ve katılaşma (solidification) olmak üzere iki temel başlıkta ele alınmaktadır. Dolum başlığı altında, sıcaklık (temperature), hız (velocity), dolum esnasındaki sıvı oranı (fraction liquid), dolum esnasındaki katı oranı (fraction solid), dolum süresi (fiiling time), kalıp aşınması (mold erosion), dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure), parça içerisinde sıkışan hava (air entrapment) vb. sonuçlar, katılaşma başlığı altında ise, sıcaklık (temperature), katılaşma esnasındaki sıvı oranı (fraction liquid), katılaşma esnasındaki katı oranı (fraction solid), kalıp yapışması (die soldering), son katılaşan bölgelerin katılaşması için gerekli süre (hot spot fstime), çekinti gözenekliliği (shrinkage porosity) vb. sonuçlar olmak üzere döküm kalitesinin bir çok yönüyle

incelenebilmesi adına olanak sağlanmaktadır. Herhangi bir projede, projeye konu olan parçadan beklenilen özellikler ve kısıtlar gözetilerek bahsedilen sonuçlardan ilgili olanlar detaylıca incelenerek yorumlamalar yapılmaktadır.

4.1.1. Optimum yolluk sisteminin belirlenmesi

Tez çalışmaları kapsamında yürütülen yüksek basınçlı döküm simülasyonu çalışmalarında optimum kalıp tasarımının oluşturulabilmesi için ilk aşama optimum yolluk sistemi tasarımının belirlenmesidir. Yolluk sistemi optimizasyon çalışmaları için Şekil 3.2'de verilen 3 farklı tasarım oluşturulmuş olup, yolluk tasarımı kriterleri göz önünde bulundurularak hem sayısal hem de görsel sonuçların ışığında optimum tasarıma karar verilmiştir.

Araştırma bulgularına Magmasoft yazılımının, sayısal sonuçların incelenmesine olanak sağlayan optimizasyon özelliği ile başlanmıştır. Sayısal sonuçların elde edilebilmesi için ilk olarak simülasyon çalışması gerçekleştirilen tasarımdan beklenilen özellik ve kısıtlara göre hedef sonuçlar seçilmiştir. Tasarlanan bir yolluk sisteminden beklenen en önemli özellikler asgari türbülans oluşturarak düzgün bir akış sağlanması, katılaşma esnasında parçanın kesit kalınlığı nispeten daha yüksek olduğu son katılaşmaların yaşanacağı bölgelerin yüksek basınçlı döküm makinesinin uyguladığı basınç sayesinde beslenerek katılaşma esnasında oluşan büzülmelerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi ve yolluk girişinde sıvı metalin ulaştığı azami hızın kalıp aşınmasına neden olmaması olarak sıralanabilir. Yolluk sistemi optimizasyonunda önem arz eden bu özelliklerin incelenebilmesi için Çizelge 4.1'de verilen hedefler seçilmiştir. Bu bağlamda, son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot), yolluk girişindeki azami sıvı metal hızının azaltılması (reduce velocity in gate) ve katılaşma esnasında yolluk girişindeki sıvı oranının artırılması (increase fraction liquid in gate) hedeflenmiştir.

Çizelge 4. 1 Yolluk sisteminin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmalarında incelenen sayısal sonuçların seçimi penceresi

Objectives

	Name	Type	Value	Expression
☑	Increase Fraction Liquid in Gate	Maximize		{Cycle 4/Solidification & Cooling until Eject/Fraction Liquid/Avg/Gate All IDs}
☑	Reduce Hot Spot	Minimize		{Cycle 4/Solidification & Cooling until Eject/Hot Spot FSTime/Weighted Volume/Casting All IDs}
☑	Reduce Velocity in Gate	Minimize		{Cycle 4/Filling/Velocity/Absolute Velocity/Max/Gate All IDs}

Seçilen hedefler doğrultusunda, tamamlanmış olan simülasyon sonuçlarını yazılımın yeniden hesaplaması ile Çizelge 4.2'de görülen tablodaki sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar her bir hedef için tek tek incelendiğinde, Tasarım 1'de yolluk girişindeki azami sıvı metal hızının (max. velocity in gate) 48.37 m/s ile en düşük hız olduğu görülmektedir. Yüksek basınçlı döküm yönteminde alüminyum alaşımları için tipik yolluk giriş hızı 30 - 60 m/s arasında tercih edilmektedir. (Chen ve Jahedi, 1999; Bonollo ve ark., 2015). Bu bağlamda, Tasarım 1'de elde edilen yolluk giriş hızının ideal olduğu tespit edilmiştir.

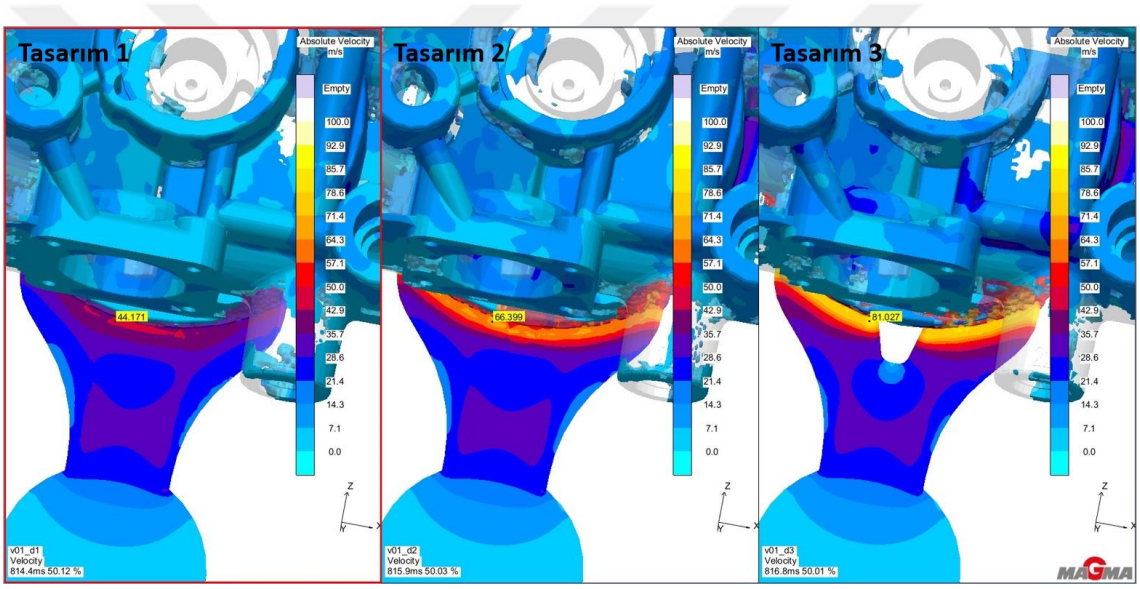
Bir diğer hedef olan katılaşma esnasında yolluk girişindeki sıvı oranı (fraction liquid in gate) yine Tasarım 1'de % 29.72 ile en yüksek değere sahiptir. Yolluk sistemi ile dökülen parçanın bağlantı noktası olan yolluk girişinin uygulanan enjeksiyon basıncını parçaya iletilmesi görevi üstlenmesi sebebiyle katılaşma esnasında yolluk girişi her ne kadar geç katılaşırsa enjeksiyon basıncı dökümü gerçekleştirilen parçaya o kadar uzun süre iletilecektir. Bu sayede, parçanın katılaşma esnasında yaşayacağı hacimsel büzülme kaynaklı çekinti gözenekliliği olabildiğince asgari düzeye indirilecektir. Yolluk girişindeki sıvı oranının katılaşma süresi boyunca yüksek istenilmesinin temel sebebi bu mekanizmadır.

Son olarak, son katılaşan bölgelerin (hot spot) parçadaki hacimsel yoğunluğu 172.65 cm^3 ile Tasarım 1'de en düşük seviyededir. Bu sonuç yolluk girişlerinde katılaşmanın olabildiğince geciktirilmesi mekanizmasını doğrulamaktadır. Katılaşma esnasında yolluk girişindeki sıvı oranı (fraction liquid in gate) sonucunun en yüksek olduğu Tasarım 1'de son katılaşan bölgelerin (hot spot) parçadaki hacimsel yoğunluğu sonucunun en düşük olması yolluk girişleri en geç katılaşan tasarımda son katılaşan bölge yoğunluğunun daha az olması çekinti gözenekliliğinin de daha az olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4. 2 Yolluk sisteminin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmalarında incelenen sayısal sonuçlar

Rank	Design	Increase Fraction Liquid in Gate (-)	Reduce Hot Spot (-)	Reduce Velocity in Gate (-)
Rank 1	Design 1	29.72	172.65	48.37
Rank 2	Design 3	16.03	178.36	88.65
Rank 3	Design 2	17.68	187.59	73.35

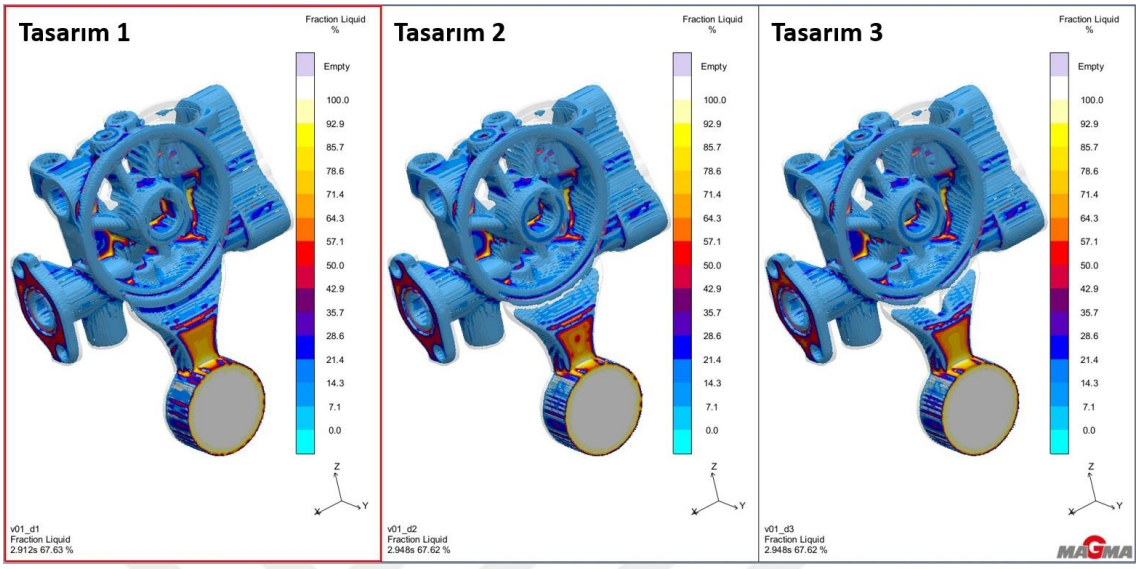
Sayısal sonuçlar incelendikten sonra görsel sonuçlarda detaylı olarak yorumlanarak sayısal verilerin bir anlamda sağlaması yapılmıştır. Şekil 4.1'de dolumun % 50 oranında olduğu anda alınan anlık sonuçta yolluk girişinde ulaşılan azami hızın (max. velocity in gate) Tasarım 1'de 44.171 m/s, Tasarım 2'de 66.399 m/s ve Tasarım 3'te 81.027 m/s olduğu tespit edilmiş olup, görsel sonuçların sayısal sonuçlarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 4. 1 Hız (velocity) sonucu

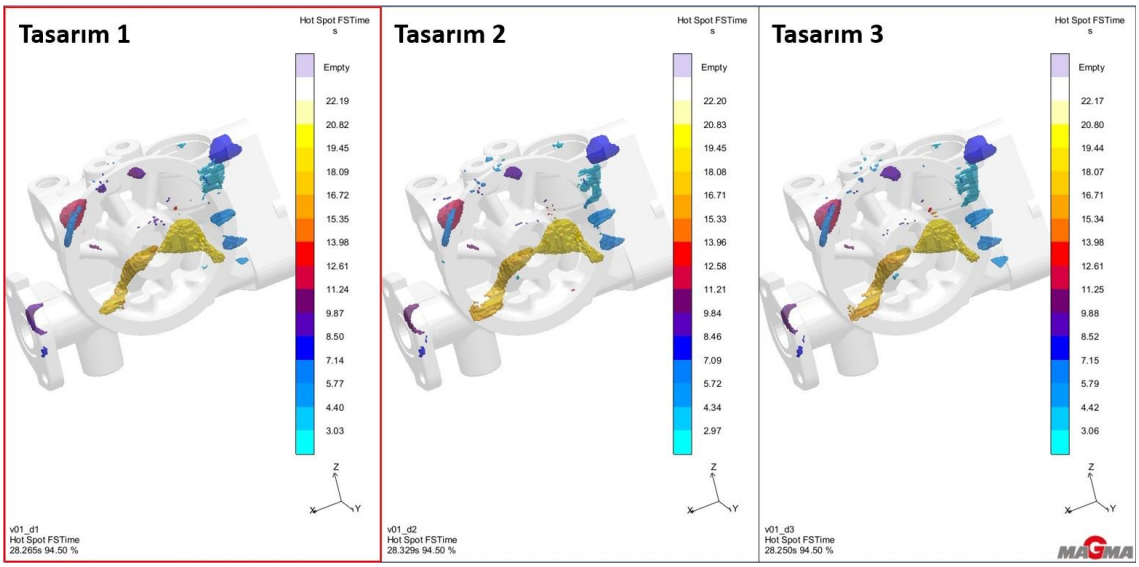
Şekil 4.2'de katılaşmanın % 32.38 oranında olduğu anda alınan anlık katılaşma esnasındaki sıvı oranı (fraction liquid) sonucunda Tasarım 1'de yolluk girişinin dökülen parça ve yolluk arasındaki bağlantı görevini halen sürdürmesine karşın Tasarım 2 ve Tasarım 3'te bağlantının koptuğu görülmektedir. Yolluk girişindeki sıvı oranı sonucuna daha geniş perspektiften bakılacak olursa Tasarım 2 ve 3'te yolluk bağlantısının katılaşmanın henüz 3'te 1'i tamamlanmışken kopmuş olması uygulanan enjeksiyon basıncının Tasarım 1'e göre daha kısa süre uygulanmasına, bunun sonucu olarak da çekinti gözenekliliğini tetikleyen, Şekil 4.3'te görülen son katılaşan bölgelerin (hot spot) parçadaki hacimsel yoğunluğunun az miktarda olsa da artmasına sebep olmuştur.

Yolluk girişindeki sıvı oranı görsel sonuçları da sayısal sonuçlarla benzerlik göstermektedir.



Şekil 4. 2 Katılaşma esnasındaki sıvı oranı (fraction liquid) sonucu

Şekil 4.3'te son katılaşan bölgelerin katılaşması için gerekli süre (hot spot fstime) sonucu incelendiğinde, katılaşmanın tamamlanması için gerekli sürelerin hemen hemen aynı olmasına rağmen son katılaşan bölgelerin hacimsel yoğunluğunun Tasarım 1'de diğerlerine göre daha az olduğu, benzer şekilde sayısal sonuçlarla da uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçta, skala renkleri son katılaşan bölgelerin tamamen katılaşmaları için gerekli olan süreleri ifade etmektedir. Yolluk sisteminin belirlenmesi çalışmalarında, sonuçlar derlendiğinde Tasarım 1'in optimum yolluk sistemi tasarımı olduğuna karar verilmiştir.



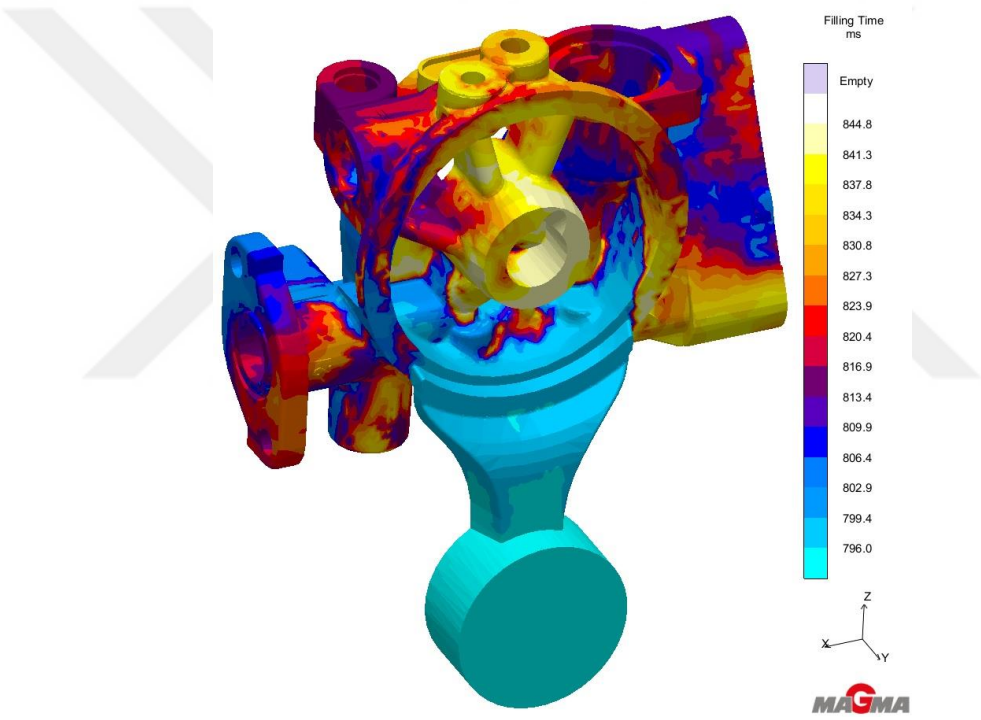
Şekil 4. 3 Son katılaşan bölgelerin katılaşması için gerekli süre (hot spot fstime) sonucu

4.1.2. Optimum hava cebi sisteminin belirlenmesi

Tez çalışmaları kapsamında yürütülen yüksek basınçlı döküm simülasyonu çalışmalarında optimum kalıp tasarımının oluşturulabilmesi için ilk aşama olan optimum yolluk sistemi tasarımının belirlenmesinin ardından ikinci aşama optimum hava cebi sistemi tasarımının belirlenmesidir. Hava cebi sistemi optimizasyon çalışmaları için Şekil 3.3'te verilen 3 farklı tasarım oluşturulmuş olup, hava cebi sistemlerinin yegâne görevi olan gaz gözenekliliğin azaltılması göz önünde bulundurularak hem sayısal hem de görsel sonuçların ışığında optimum tasarıma karar verilmiştir.

Hava cebi sistemi tasarımında olası değişkenler; hava cebi sayısı, yeri ve hacmi olarak sıralanabilir. Gerçekleştirilen ilk simülasyon çalışmalarında karar kılınan Tasarım 1 isimli yolluk sisteminin Şekil 4.4'te görülen dolum süresi (fiiling time) sonucu incelenmiştir. Yüksek basınçlı döküm kalıbı tasarımında yolluk sistemi belirlendikten sonra hava cebi sisteminin belirlenmesinde ilk sorgulanan konu, dolum esnasında kalıp boşluğu içerisinde bulunan hava, sıvı metalin ilerlemesiyle süpürüldüğü için sıvı metalin en son ulaştığı bölgelerin hangi bölgeler olduğudur. Hava cepleri sıvı metalin en son ulaştığı bölgelere konumlandırıldığı takdirde süpürülen havanın parça içerisinde değil, hava cepleri içerisinde kalması sağlanmakta böylece gaz gözenekliliği asgari düzeye indirilmektedir. Şekil 4.4'te verilen dolum süresi sonucu incelendiğinde,

özellikle sarı ve kırmızı tonlara sahip bölgeler en son dolan bölgeler olup hava ceplerinin bu bölgelere yakın konumlandırılması konusunda yorumlamalar yapılmıştır. Hava ceplerinin söz konusu bölgelere konumlandırılması, sıvı metalin en son ulaştığı bölgelerde gaz gözenekliliğine sebep olabilecek seviyelerde oluşabilecek hava sıkışmalarının gaz gözenekliliğine sebep olma ihtimali azaltılmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 3.3'te verilen 3 farklı hava cebi sistemi tasarlanmıştır. 3 tasarım arasındaki tek fark yolluk girişinin tam karşısındaki bölgedeki hava cebi sayısıdır. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, bu bölgede yoğun bir şekilde oluşması beklenen hava sıkışmalarını asgari düzeye indirecek optimum hava cebi sayısı araştırılmıştır. Diğer hava cepleri ise parçaya yeterli giriş alanı olmadığı için birer tane kullanılmıştır.



Şekil 4. 4 Belirlenen optimum yolluk sisteminde dolum süresi (fiiling time) sonucu

Optimum hava cebi sisteminin belirlenmesi çalışmalarının sonuçlarının irdelenmesine de yolluk sisteminde olduğu gibi Magmasoft yazılımının, sayısal sonuçların incelenmesine olanak sağlayan optimizasyon özelliği ile başlanmıştır. Sayısal sonuçların elde edilebilmesi için benzer şekilde simülasyon çalışması gerçekleştirilen tasarımdan beklenilen özellik ve kısıtlara göre hedef sonuçlar seçilmiştir. Tasarlanan bir hava cebi sisteminden beklenen en önemli özellik dolum esnasında sıkışan havayı kendi bünyesinde toplayarak parça içerisinde kalmasının önüne geçilmesiyle asgari gaz gözenekliliğinin elde edilmesidir. Hava cebi sistemi

optimizasyonunda önem arz eden gaz gözenekliliğinin incelenebilmesi için Çizelge 4.3'de verilen hedef seçilmiştir. Bu bağlamda, dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının (actual air pressure) azaltılması hedeflenmiştir.

Çizelge 4. 3 Hava cebi sisteminin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmalarında incelenen sayısal sonuçların seçimi penceresi



	Name	Type	Value	Expression
☑	Reduce Air Pressure	Minimize		{Cycle 4/Filling/Actual Air Pressure/Max/Casting All IDs}

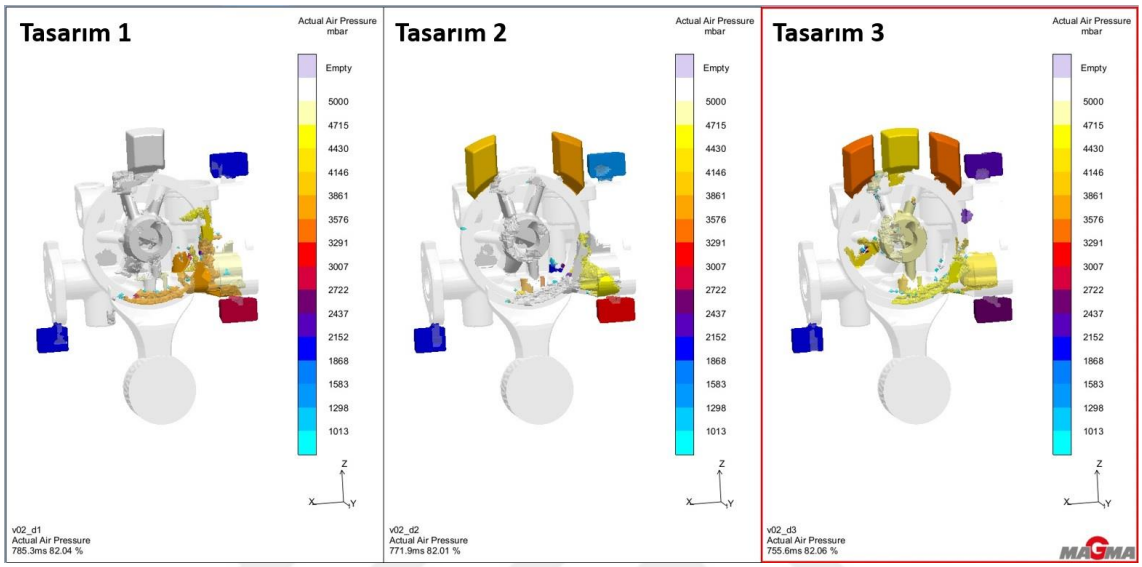
Seçilen hedef doğrultusunda, tamamlanmış olan simülasyon sonuçlarını yazılımın yeniden hesaplaması ile Çizelge 4.4'te görülen tablodaki sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar tek tek incelendiğinde, Tasarım 3'te dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının 34800.0 mbar ile en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu sonuç irdelendiğinde, en az gaz gözenekliliğinin toplam 6 adet hava cebine sahip olan Tasarım 3'te elde edildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4. 4 Hava cebi sisteminin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmalarında incelenen sayısal sonuçlar

Rank	Design	Reduce Air Pressure (-)
Rank 1	Design 3	34800.0
Rank 2	Design 2	45807.0
Rank 3	Design 1	61975.0

Sayısal sonuçlar incelendikten sonra görsel sonuçlarda detaylı olarak yorumlanarak sayısal verilerin bir anlamda sağlaması yapılmıştır. Şekil 4.5'te dolumun % 82 oranında olduğu anda alınan anlık sonuçta parçada oluşan hava basıncı (actual air pressure) değeri Tasarım 1 ve Tasarım 2'de sızdırmazlık parçaları için riskli kabul edilen 5000 mbar değerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncının (actual air pressure) parça içindeki hacimsel yoğunluğunun Tasarım 1 ve 2'de, Tasarım 3'e göre daha yüksek olduğu tespit edilmiş olup, görsel sonuçların sayısal sonuçlarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Görsel sonuçlar ışığında, Tasarım 3'te diğer iki tasarıma göre fazla olan 2 adet hava cebinin parça içerisinde kalan hava sıkışmalarını kendi bünyelerinde toplayarak hava sıkışmalarını önemli ölçüde yok ettikleri görülmüş bir başka deyişle olası gaz

gözenekliliğini asgari düzeye indirmekte fazlasıyla başarı sağladıkları ortaya koyulmuştur. Sonuç olarak, hava cebi sistemleri için yürütülen simülasyon çalışmalarında, Tasarım 3'ün optimum hava cebi sistemi tasarımı olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 4. 5 Dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonucu

4.1.3. Optimum süreç parametrelerinin belirlenmesi

Tez çalışmaları kapsamında optimum kalıp tasarımının oluşturulabilmesi için optimum yolluk ve hava cebi sistemi tasarımları, yürütülen yüksek basınçlı döküm simülasyonu çalışmaları neticesinde belirlenmiştir. Belirlenen kalıp tasarımı kullanılarak tez konusunun ikinci aşaması olan optimum süreç parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları yürütülmüştür. Süreç parametreleri optimizasyon çalışmaları kapsamında Şekil 3.18'de verilen optimizasyon penceresinden görüldüğü üzere döküm sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve ikinci faz hızı parametrelerinden oluşan toplamda 120 farklı kombinasyonda simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan 120 farklı tasarımda, gaz gözenekliliği, çekinti gözenekliliği, soğuk birleşme ve kalıp aşınması sonuçları göz önünde bulundurularak incelenen hem sayısal hem de görsel sonuçlar neticesinde optimum süreç parametrelerine karar verilmiştir.

Süreç parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları da yolluk ve hava cebi sistemi tasarımlarının belirlenmesi çalışmalarında olduğu gibi Magmasoft yazılımının sayısal

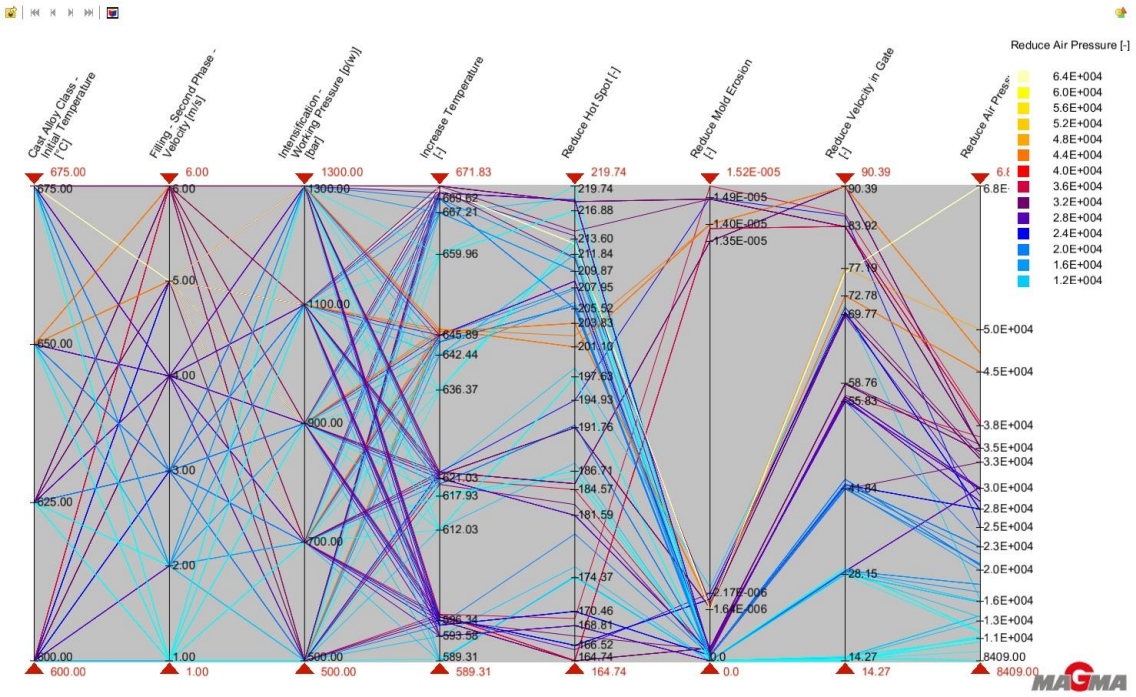
sonuçların incelenmesine olanak sağlayan optimizasyon özelliği kullanılarak yürütülmüştür. 120 farklı süreç kombinasyonu içerisinden elde edilecek optimum parametrelerden beklenen en önemli özellikler asgari türbülans ile düzgün bir akış sağlayarak parça içerisinde asgari gaz gözenekliliğinin elde edilmesi, katılaşma esnasında gerçekleşen hacimsel büzülmelerin sebebiyet verdiği çekinti gözenekliliğinin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi, sıcaklık kaynaklı soğuk birleşmelerin önlenmesi ve yolluk girişinde sıvı metalin ulaştığı azami hızın kalıp aşınmasına neden olmaması olarak sıralanabilir. Döküm süreci parametreleri optimizasyonunda önem arz eden bu özelliklerin incelenebilmesi için Çizelge 4.5'te verilen hedefler seçilmiştir. Bu bağlamda, dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının azaltılması (reduce air pressure), son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot), yolluk girişindeki azami sıvı metal hızının azaltılması (reduce velocity in gate), kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) ve dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedeflenmiştir.

Çizelge 4. 5 Süreç parametrelerinin belirlenmesi için yürütülen simülasyon çalışmalarında incelenen sayısal sonuçların seçimi penceresi

Objectives

	Name	Type	Value	Expression
☑	Reduce Hot Spot	Minimize		{Cycle 4/Solidification & Cooling until Eject/Hot Spot FSTime/Weighted Volume/Casting All IDs}
☑	Reduce Velocity in Gate	Minimize		{Cycle 4/Filling/Velocity/Absolute Velocity/Max/Gate All IDs}
☑	Reduce Mold Erosion	Minimize		{Cycle 4/Filling/Mold Erosion/Avg/Cover Die All IDs}
☑	Reduce Air Pressure	Minimize		{Cycle 4/Filling/Actual Air Pressure/Max/Casting All IDs}
☑	Increase Temperature	Maximize		{Cycle 4/Filling/Temperature/Avg/Casting All IDs}

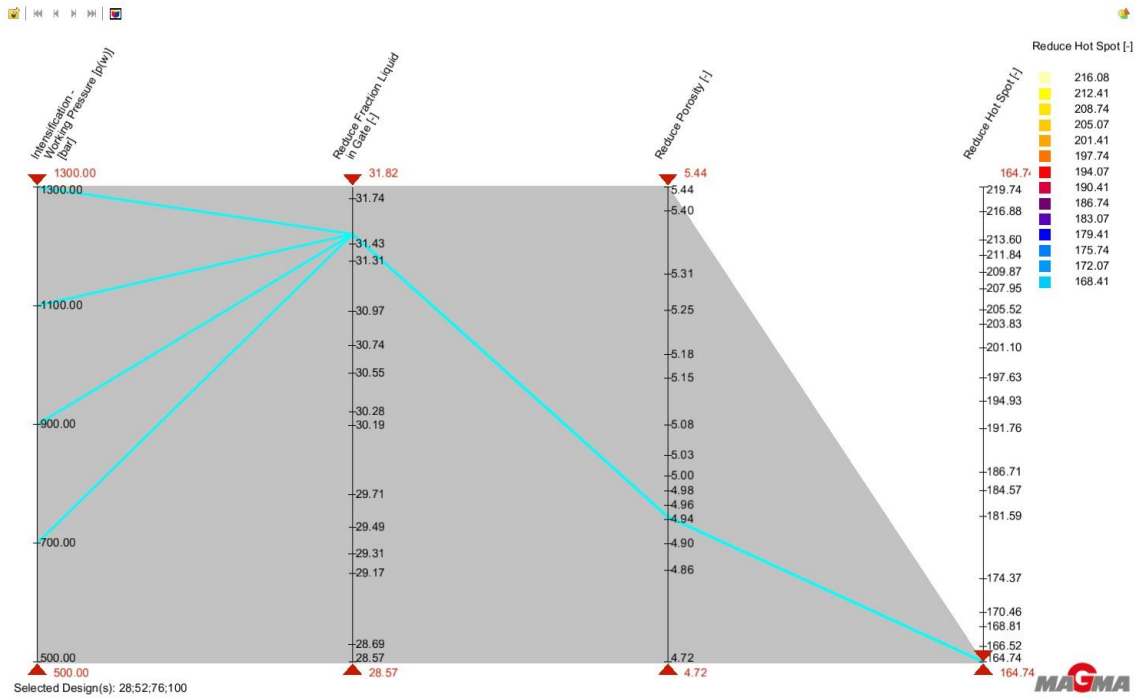
Şekil 4.6'da, 600 ºC, 625 ºC, 650 ºC ve 675 °C olmak üzere 4 farklı döküm sıcaklığı, 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s ve 6 m/s olmak üzere 6 farklı ikinci faz hızı ve 500 Bar, 700 Bar, 900 Bar, 1100 Bar ve 1300 Bar olmak üzere 5 farklı enjeksiyon basıncı değişkeninden oluşan 120 farklı kombinasyon bir arada verilmiştir. Magmasoft optimizasyon grafiğinde, seçilen hedeflerden hangisi grafiğin en sağında yer alırsa grafik renklenmeleri o hedefe göre oluşmaktadır, bu bağlamda Şekil 4.6'da görülen renkler, grafiğin en sağında yer alan dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının azaltılması (reduce air pressure) hedefini temsil etmektedir.



Şekil 4. 6 Belirlenen süreç parametrelerinin dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının azaltılması (reduce air pressure) hedefine göre optimizasyon grafiği

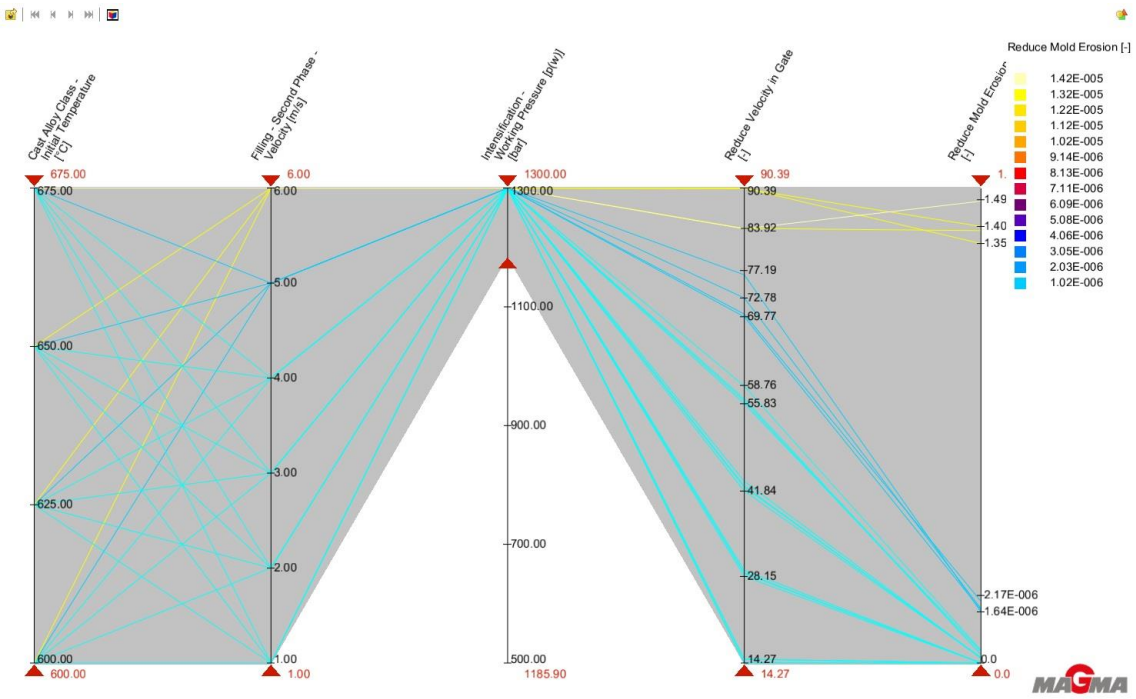
Şekil 4.6'da verilen optimizasyon grafiği, 120 farklı kombinasyonun bir arada olmasından dolayı fazlasıyla karmaşık görünmektedir. Belirlenen değişkenler ve seçilen hedeflerin bir arada gözlemlenebildiği bu grafiğe biraz daha yakından bakmak gerekirse: ilk olarak enjeksiyon basıncı (working pressure) parametresi üzerinde konuşmak gerekmektedir. Yüksek basınçlı döküm sürecinde döküm kalitesine en çok etki eden parametrelerden biri enjeksiyon basıncıdır (Apparao ve Birru, 2017). Yüksek basınçlı döküm sürecinde, enjeksiyon basıncının görevinin katılaşma esnasında meydana gelen hacimsel büzülmeyi besleyerek çekinti gözenekliliğini asgari düzeye indirmek olduğu önceki satırlarda bahsedilmiştir. Bu mekanizma göz önüne alındığında, enjeksiyon basıncı katılaşma aşamasını etkilediği için döküm simülasyonu yazılımında enjeksiyon basıncı parametresinin etkisi katılaşma (solidification) sonuçlarına bakılarak yorumlanmaktadır. Şekil 4.7'de verilen grafikte, son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot) hedefi skalasına göre enjeksiyon basıncı parametresinin katılaşma sonuçlarına etkisi görülmektedir. Grafik incelendiğinde, en önemli katılaşma sonuçları olan son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğu (hot spot), katılaşma esnasında yolluk girişindeki sıvı oranı (fraction liquid in gate) ve çekinti gözenekliliği (porosity) sonuçları üzerinde enjeksiyon basıncı değişkenliğinin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiş olup yürütülen simülasyon

çalışmalarında katılaşma sürecinin enjeksiyon basıncına duyarlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında, simülasyon çalışmalarında, enjeksiyon basıncı, yüksek basınçlı döküm yönteminde teze konu olan hava kurutucu parçası gibi sızdırmazlık özelliği sergilemesi gereken parçalarda genellikle 1000 bar üzerinde tercih edildiği için, 1300 bar olarak belirlenmiştir.



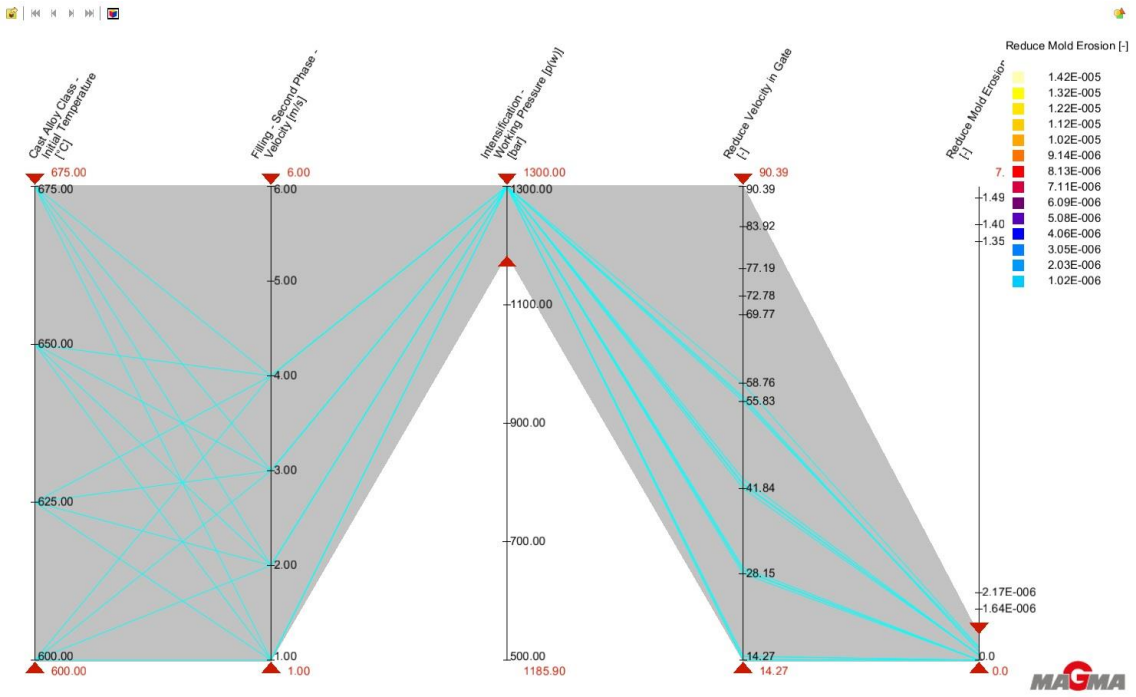
Şekil 4. 7 Enjeksiyon basıncı parametresinin katılaşma sonuçlarına etkisi

Süreç parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları kapsamında incelenen bir diğer bulgu kalıp aşınması (mold erosion) sonuçlarıdır. Şekil 4.8'de verilen grafikte, grafiğin en sağına kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) hedefi yerleştirilerek renk skalasının kalıp aşınmasına göre oluşması sağlanmıştır.



Şekil 4. 8 Belirlenen süreç parametrelerinin kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) hedefine göre optimizasyon grafiği

Şekil 4.9'da kalıp aşınması hedefine ait üst imlecin hareket ettirilmesiyle kalıp aşınmasının sıfır değerine yakın sonuçların dışındaki kombinasyonların elenmesiyle, yolluk girişindeki azami sıvı metal hızı (max. velocity in gate) sonuçlarından da yaklaşık 60 m/s üzerindeki değerler elenmiştir. Bu tespitle bağlantılı olarak, yolluk girişindeki azami sıvı metal hızının yaklaşık 60 m/s değeri üzerine çıkan kombinasyonların hepsinin 5 m/s ve 6 m/s ikinci faz hızı değişkenlerine ait olduğu gözlenmiştir. Kalıp aşınması sonucu üzerinden gerçekleştirilen tespitler neticesinde, 5 m/s ve 6 m/s olan ikinci faz hızı değişkenlerinin kalıp aşınmalarına sebep olmasından dolayı optimizasyon dışı kaldığı görülmektedir. Yolluk giriş hızının 60 m/s değeri altında olan kombinasyonlarda kalıp aşınmasının en düşük seviyelerde gerçekleştiği tespitini, Bonollo ve ark. (2015) ve Chen ve Jahedi (1999) gerçekleştirdikleri çalışmalarında vurgulamışlarıdır.

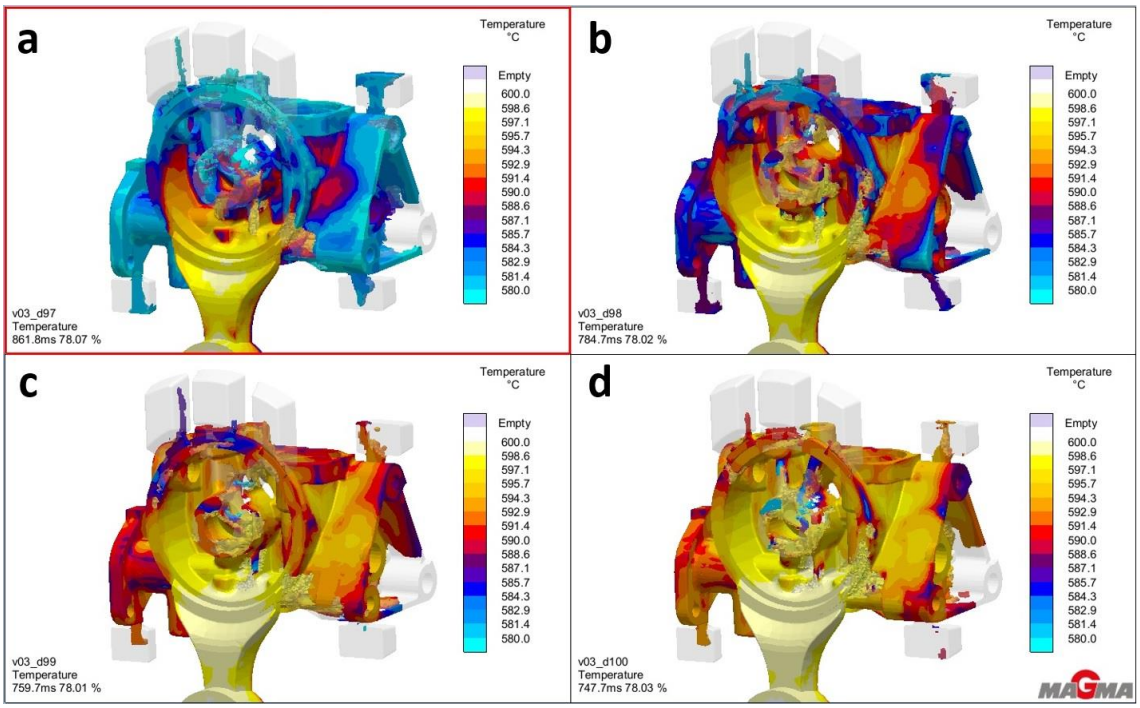


Şekil 4. 9 Kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) hedefinin değerlendirilmesi

Gelinen noktada ilk olarak, yukarıda açıklandığı üzere enjeksiyon basıncı (working pressure) değişkeni 1300 bar olarak belirlendiği için, enjeksiyon basıncı alt imleci hareket ettirilerek diğer basınç değerleri elenmiş, enjeksiyon basıncı 1300 bar olarak seçilmiştir. Diğer yandan, kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) hedefinin üst imleci sıfır değerine yaklaştırılarak kalıp aşınması asgari düzeye indirilmiştir. Daha sonra, bir diğer hedef olan dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedefi değerlendirilmiştir. Dolum esnasında sıvı metalin, herhangi bir soğuk birleşmeye sebebiyet vermeyeceği asgari bir sıcaklığa sahip olması gerekmektedir. Bir başka ifadeyle, optimizasyon grafiğinde dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının ne kadar artırılması gerektiğine karar verilmelidir. Fakat, optimizasyon grafiği bu soruya tek başına cevap verememektedir, bu yüzden dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedefinin alt imlecinin hangi sıcaklığa kadar hareket ettirileceğine görsel sıcaklık sonuçları incelenerek karar verilmiştir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilen sıcaklık (temperature) sonuçlarında, döküm sıcaklığı ve ikinci faz hızı değişkenlerinin etkileri gözlemlenmektedir. İlk olarak, döküm sıcaklığı değişkenlerinin en düşüğü olan 600 °C sıcaklığında, farklı ikinci faz hızlarının sıcaklıklar üzerinde yarattığı etkilerin görüldüğü Şekil 4.10'da verilen

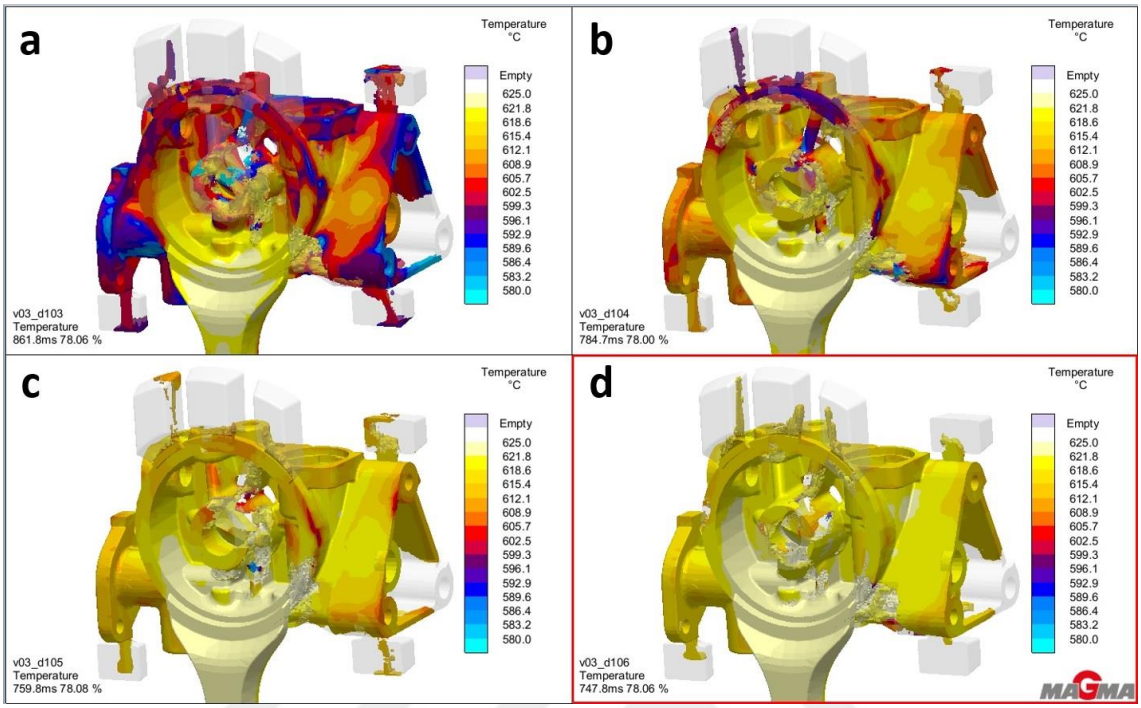
sonuçlar değerlendirilmiştir. 600 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen dökümlerde dolumun henüz yaklaşık %78 oranında olduğu anda alınan sonuçlarda sıvı metalin sıcaklığının, AlSi12(Fe) alaşımının katılaşma başlangıç sıcaklığı olan 580 °C sıcaklığının altına düştüğü görülmektedir. İkinci faz hızının 1 m/s olduğu kombinasyonda bu durum bariz bir şekilde gözlemlenirken, ikinci faz hızının 4 m/s olduğu ve dolumun en hızlı gerçekleştiği kombinasyonda da dikkat edildiğinde özellikle parçanın orta bölgesine sıvı metalin 580 °C kritik sıcaklığının altında ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, 600 °C döküm sıcaklığında gerçekleştirilecek dökümlerde soğuk birleşme riskinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.



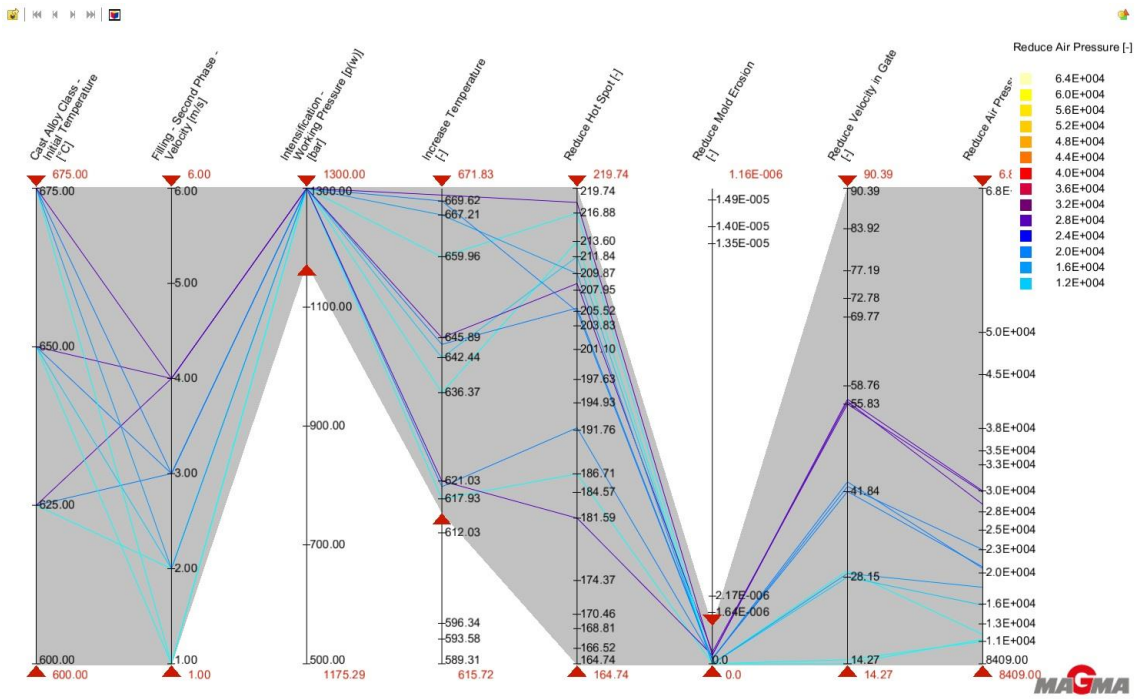
Şekil 4. 10 a) 600 °C döküm sıcaklığı 1 m/s ikinci faz hızı, **b**) 600 °C döküm sıcaklığı 2 m/s ikinci faz hızı, **c)** 600 °C döküm sıcaklığı 3 m/s ikinci faz hızı, **d)** 600 °C döküm sıcaklığı 4 m/s ikinci faz hızı

İkinci olarak, 625 °C döküm sıcaklığında gerçekleştirilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 4.11'de görülen sıcaklık sonuçlarında, Şekil 4.10'da olduğu gibi dolumun yaklaşık %78 oranında gerçekleştiği anda 1 m/s ikinci faz hızına sahip olan kombinasyonun dışındaki kombinasyonlarda dolumun sonuna kadar sıvı metal sıcaklığı kritik sıcaklıkların üzerinde seyretmiştir. Görsel sıcaklık sonuçları üzerinde gerçekleştirilen yorumlamalar neticesinde, Şekil 4.12'de dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedefinin alt imleci 600 °C döküm sıcaklığına sahip kombinasyonlar ile 625 °C döküm sıcaklığı ve 1 m/s ikinci faz

hızı kombinasyonunu optimizasyon dışında bırakacak seviyeye kadar yukarı doğru hareket ettirilmiştir.



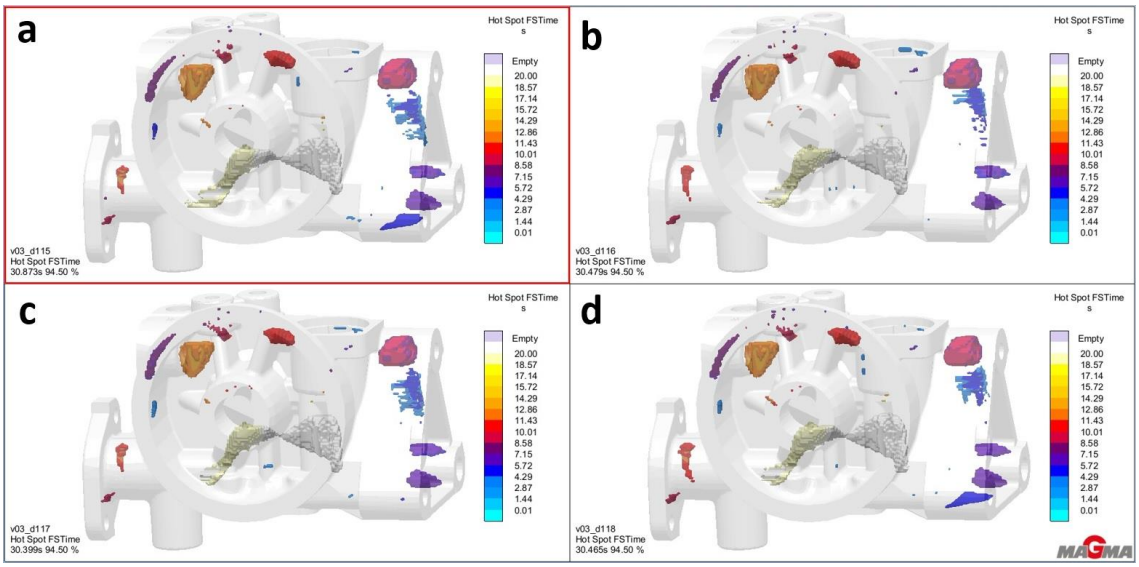
Şekil 4. 11 a) 625 °C döküm sıcaklığı 1 m/s ikinci faz hızı, **b**) 625 °C döküm sıcaklığı 2 m/s ikinci faz hızı, **c)** 625 °C döküm sıcaklığı 3 m/s ikinci faz hızı, **d)** 625 °C döküm sıcaklığı 4 m/s ikinci faz hızı



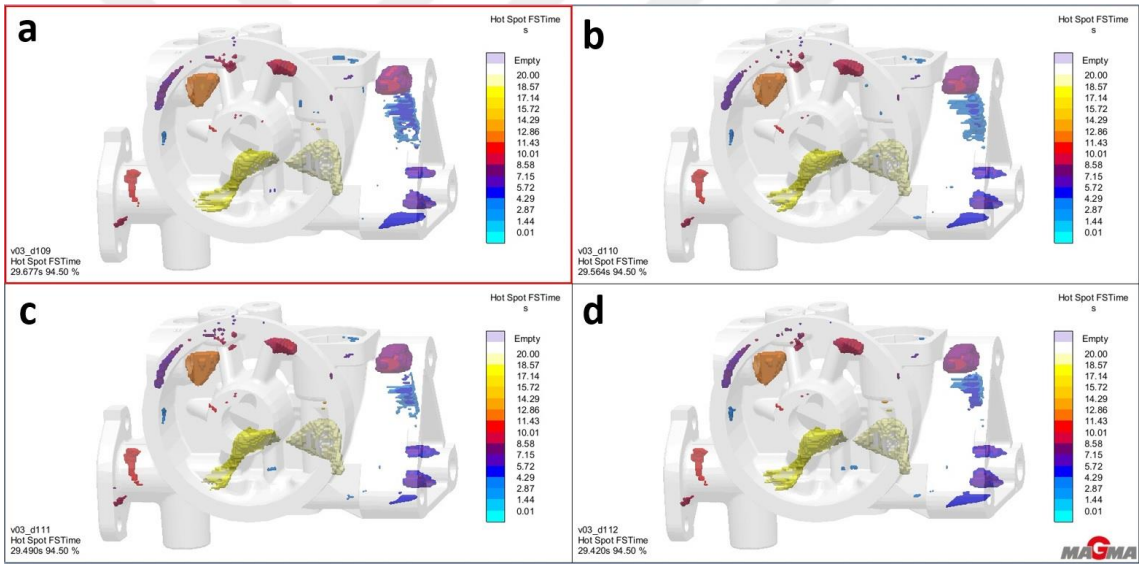
Şekil 4. 12 Dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedefinin değerlendirilmesi

Enjeksiyon basıncı (working pressure) değişkeni, kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) hedefi ve dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedefinin değerlendirilmelerinden sonra bir başka hedef olan son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot) hedefi ele alınmıştır. Dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedefinde olduğu gibi son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot) hedefinde de optimum parametrelerin belirlenmesinde sayısal sonuçlara yardımcı olarak görsel sonuçlardan yararlanılmıştır.

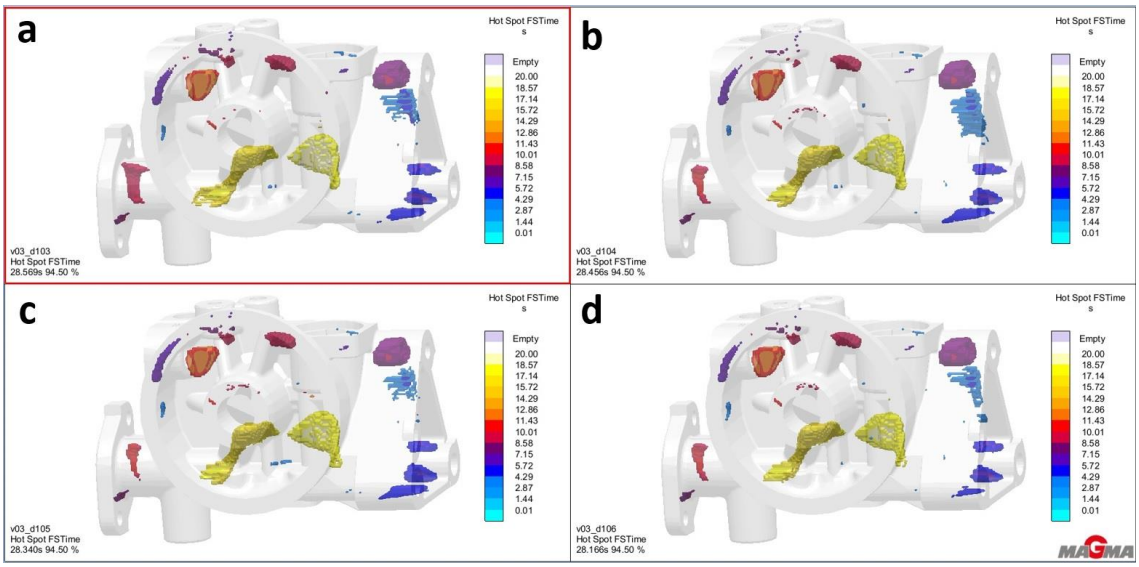
Görsel sonuçlarda gerçekleştirilen incelemeler neticesinde, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilen son katılaşan bölgelerin katılaşması için gerekli süre (hot spot fstime) sonuçlarında, kombinasyonların karşılaştırılabilmesi adına skala her birinde 0.01-20 sn arasında sabitlenmiştir. Son katılaşan bölgelerin katılaşması için gerekli süre (hot spot fstime) sonucunda katılaşma için gerekli süre ne kadar uzun olursa ve son katılaşan bölgelerin hacimsel yoğunlukları ne kadar büyük olursa çekinti gözenekliliği oranının artacağı önceki bölümlerde açıklanmıştır. Sonuçlara biraz daha yakından bakılacak olursa, her bir şeklin kendi içinde sabit döküm sıcaklığına ve değişken ikinci faz hızına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 bir bütün olarak incelendiğinde, katılaşma için gerekli sürelerin ve son katılaşan bölgelerin hacimsel yoğunluğunun döküm sıcaklığının azalmasıyla doğru orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Her bir şekil kendi içinde incelendiğinde ise, katılaşma için gerekli sürelerin ve son katılaşan bölgelerin hacimsel yoğunluğunun ikinci faz hızının değişiminden kayda değer bir oranda etkilenmediği gözlemlenmektedir. Son katılaşan bölgelerin katılaşması için gerekli süre (hot spot fstime) sonucundan yürütülen incelemeler neticesinde, Şekil 4.16'da verilen optimizasyon grafiğinde son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot) hedefinin üst imlecinin aşağı doğru hareket ettirilmesiyle çekinti gözenekliliğine sebep olma ihtimali 625 °C döküm sıcaklığına göre nispeten daha fazla olan 675 °C ve 650 °C döküm sıcaklıkları optimizasyon dışı bırakılmıştır. Sonuç olarak, bu noktaya kadar gerçekleştirilen elemeler neticesinde, döküm sıcaklığının 625 °C, ikinci faz hızlarının ise 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s olduğu 3 farklı optimum kombinasyon elde edilmiştir.



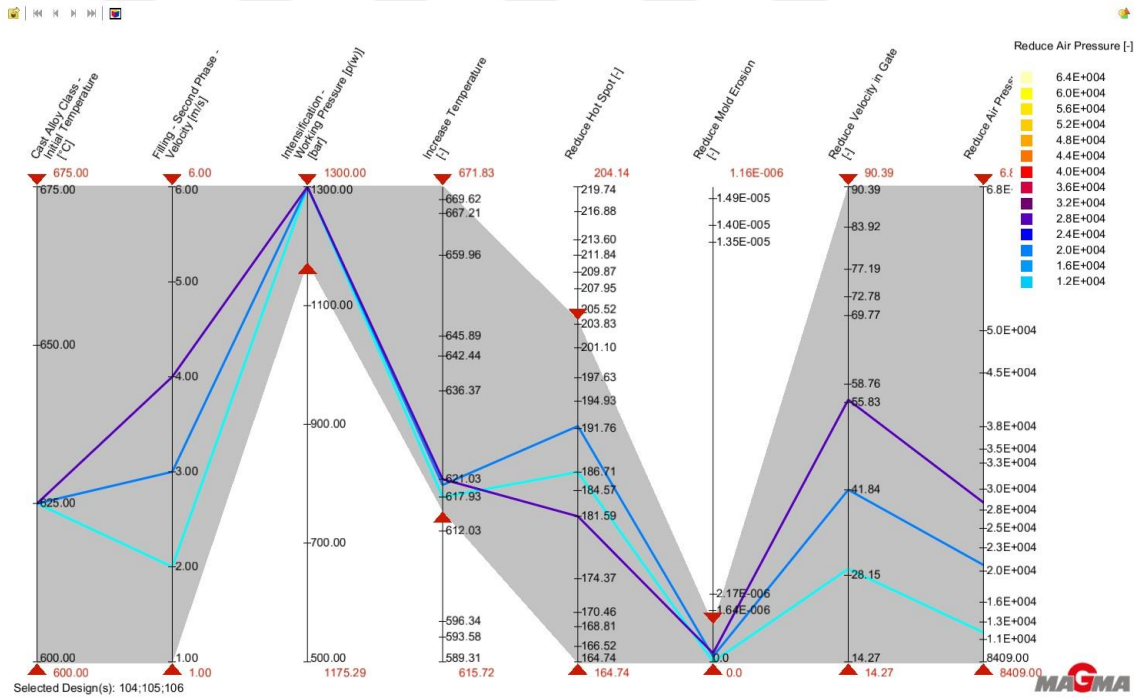
Şekil 4. 13 a) 675 °C döküm sıcaklığı 1 m/s ikinci faz hızı, **b**) 675 °C döküm sıcaklığı 2 m/s ikinci faz hızı, **c)** 675 °C döküm sıcaklığı 3 m/s ikinci faz hızı, **d)** 675 °C döküm sıcaklığı 4 m/s ikinci faz hızı



Şekil 4. 14 a) 650 °C döküm sıcaklığı 1 m/s ikinci faz hızı, **b**) 650 °C döküm sıcaklığı 2 m/s ikinci faz hızı, **c)** 650 °C döküm sıcaklığı 3 m/s ikinci faz hızı, **d)** 650 °C döküm sıcaklığı 4 m/s ikinci faz hızı



Şekil 4. 15 a) 625 °C döküm sıcaklığı 1 m/s ikinci faz hızı, **b**) 625 °C döküm sıcaklığı 2 m/s ikinci faz hızı, **c)** 625 °C döküm sıcaklığı 3 m/s ikinci faz hızı, **d)** 625 °C döküm sıcaklığı 4 m/s ikinci faz hızı

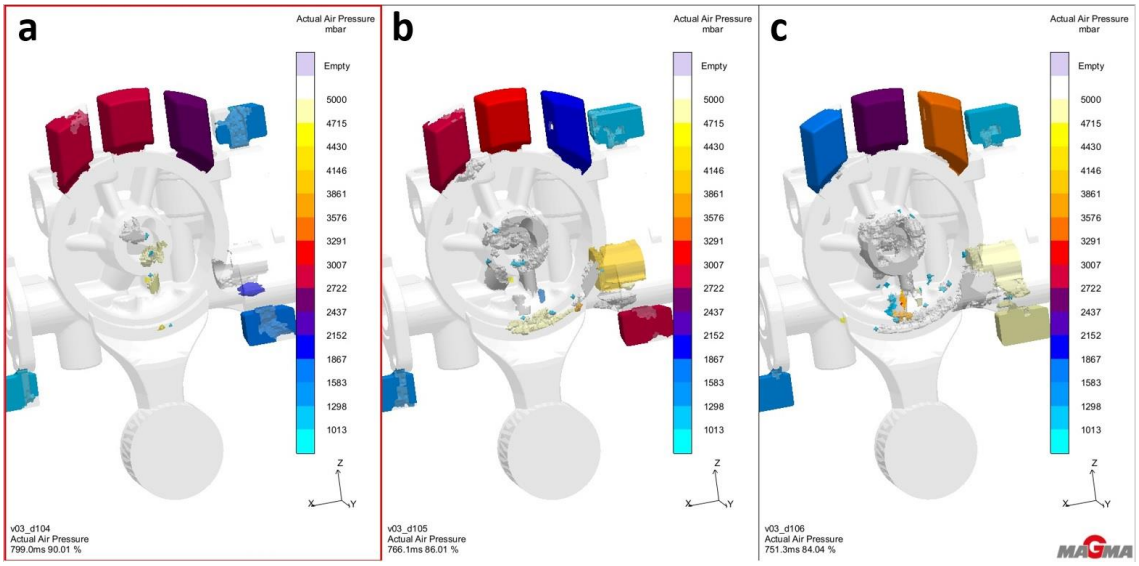


Şekil 4. 16 Optimum süreç parametreleri optimizasyon grafiği

Belirlenen süreç parametreleri kendi içlerinde değerlendirildiğinde, dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının azaltılması (reduce air pressure), son katılaşan bölgelerin parçadaki hacimsel yoğunluğunun azaltılması (reduce hot spot), yolluk girişindeki azami sıvı metal hızının azaltılması (reduce velocity in gate), kalıp aşınmasının azaltılması (reduce mold erosion) ve dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığının artırılması (increase temperature) hedeflerinin her birinin tekelinde yapılan

değerlendirmelerde belirlenen 3 farklı kombinasyondan daha ideal değerlere sahip kombinasyonlar mevcuttur. Bu durum karmaşık görünse de açıklaması oldukça basittir. Bir süreç kombinasyonu herhangi bir sonuç için en ideal değeri sergileyebilir, fakat seçilen hedeflerin tümü yüksek basınçlı döküm kalitesinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu yüzden yapılan değerlendirmelerde, tüm hedefler göz önüne alınarak optimum süreç parametrelerine karar verilmiştir.

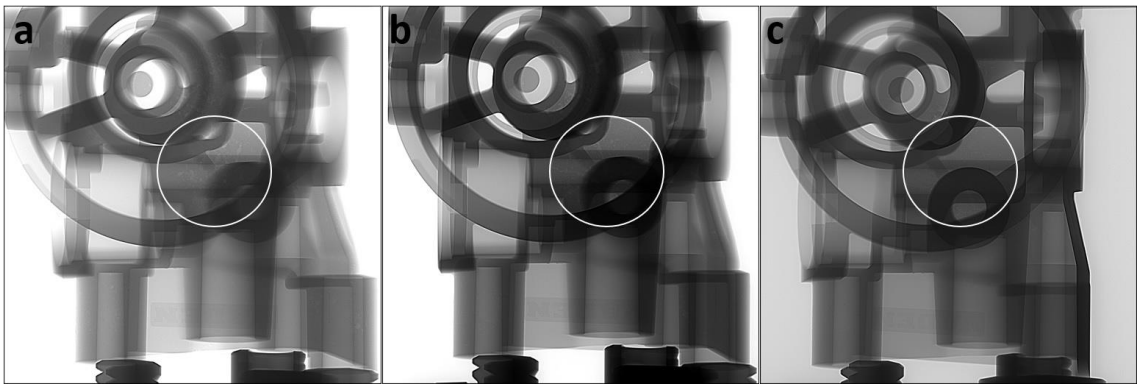
Şekil 4.17'de, yürütülen çalışmalar neticesinde elde edilen optimum parametrelerin dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonuçları görülmektedir. Görsel sonuçlar, Şekil 4.16'da dolum esnasında parçada oluşan azami hava basıncının azaltılması (reduce air pressure) hedefinde görülen sayısal sonuçlarla da paralellik göstermektedir. Elde edilen veriler ışığında, incelenen sonuçlardan, dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonucu dışındaki tüm sonuçlarda belirlenen 3 farklı kombinasyon yakın değerler sergilemektedir. Dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonucu tekelinde değerlendirildiğinde ise, 625 °C döküm sıcaklığı ve 2 m/s ikinci faz hızı kombinasyonunun en iyi sonucu verdiği görülmekle birlikte, simülasyon yazılımından elde edilen optimum süreç parametrelerinin gerçek koşullarda gerçekleştirilen denemelerine belirlenen diğer iki kombinasyonda dahil edilmiştir. Enjeksiyon hızı parametresini konu alan benzer çalışmalarda, Jin ve Kang (2011), Serçe (2015) ve Adamane ve ark. (2015) gerçekleştirdikleri çalışmalarda, asgari gaz gözenekliliğinin elde edildiği enjeksiyon hızlarını 2.5 m/s, 2 m/s ve 1.7-3.4 m/s arası olarak ifade etmişlerdir. Bir sonraki bölümde ele alınan gerçek koşullardaki yüksek basınçlı döküm denemeleri sonucunda 3 farklı kombinasyonda dökülen parçalar radyografik muayeneye tabi tutularak simülasyon çalışmalarının sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.



Şekil 4. 17 a) 625 °C döküm sıcaklığı 2 m/s ikinci faz hızı, **b**) 625 °C döküm sıcaklığı 3 m/s ikinci faz hızı, **c)** 625 °C döküm sıcaklığı 4 m/s ikinci faz hızı

4.2. Yüksek Basınçlı Döküm

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları neticesinde belirlenen, döküm sıcaklığının 625 °C, ikinci faz hızlarının ise 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s olduğu 3 farklı kombinasyonun gerçek koşullarda dökümleri, materyal ve yöntem bölümündeki yüksek basınçlı döküm başlığı altında detaylarıyla açıklandığı şekilde gerçekleştirilmiştir. 3 farklı ikinci faz hızında dökülen hava kurutucu parçaları her bir parametreden bir tane olacak şekilde TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ'NDE dijital radyografik muayeneye tabi tutulmuştur. Dijital radyografik muayenede, her bir parçadan alınan görüntülerden birer adedi Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4. 18 a) 2 m/s ikinci faz hızı, **b)** 3 m/s ikinci faz hızı, **c)** 4 m/s ikinci faz hızı

Alüminyum döküm parçaların dijital radyografik muayenesi neticesinde yapılan değerlendirmeler, ASTM E 2422 standardında verilen dijital referans görüntülerine göre gerçekleştirilmektedir. Söz konusu standart gaz gözenekliliği (gas porosity), soğuk birleşme (cold fill), çekinti gözenekliliği (shrinkage cavity) ve yabancı partikül (foreign material) hatalarına yönelik 1 en iyi 8 en kötü olmak üzere 8 farklı seviyede referans görüntü içermekte olup, dijital radyografi sonucu elde edilen görüntüler referans görüntülerle karşılaştırılarak hangi seviyede hata içerdiği tespit edilmektedir. TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ Tahribatsız Muayene Laboratuvarı tarafından, Şekil 4.18'de verilen 3 farklı ikinci faz hızına sahip görüntülerde yapılan değerlendirmelerde, sadece soğuk birleşme (cold fill) hataları tespit edildiği, beyaz çember içinde gösterilen bölgede tespit edilen hatalardan, 2 m/s ikinci faz hızına sahip parçada hata seviyesinin 7, 3 m/s ikinci faz hızına sahip parçada hata seviyesinin 5 olduğu tespit edilirken ve 4 m/s ikinci faz hızına sahip parçada herhangi bir hata tespit edilmediği belirtilmiştir.

Dijital radyografik muayene sonuçlarına göre, tüm hata çeşitleri göz önüne alındığında en iyi sonucun 4 m/s ikinci faz hızına sahip olan parçada elde edildiği görülmüştür. Bu sonuca etkiyen parametreler değerlendirildiğinde, sıcaklık sonuçlarının ele alındığı Şekil 4.11 incelendiğinde 4 m/s ikinci faz hızında dökülen parçada sıvı metalin sıcaklığı, neredeyse dolum sonuna kadar soğuk birleşmeye sebep olabilecek kritik sıcaklıkların altına inmemekle birlikte, 2 m/s ve 3 m/s ikinci faz hızında dökülen parçalarda sıvı metal sıcaklığının, 4 m/s ikinci faz hızına göre nispeten soğuk birleşmeye sebebiyet verebilecek seviyelere indiği görülmektedir. Bu etkenlerin, radyografik muayenede görülen soğuk birleşme hatalarına sebep olduğu yorumlanmıştır.

Diğer yandan, Şekil 4.17'de dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonucu tekelinde yapılan değerlendirmede, 625 °C döküm sıcaklığı ve 2 m/s ikinci faz hızı kombinasyonunun en iyi sonucu vermesine rağmen, gerçek koşullarda gerçekleştirilen denemelerine 3 m/s ve 4 m/s ikinci faz hızlarının da dahil edildiği önceki satırlarda bahsedilmiştir. Dijital radyografi görüntüleri incelendiğinde, anlık hava basınçlarının herhangi bir gaz gözenekliliğine sebep olmadığı görülmüştür. Böylelikle 2, 3 ve 4 m/s olmak üzere farklı ikinci faz hızlarında dökülen parçaların arasında görülen hava basıncı farklarının anlamlı seviyelerde olmadığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında yürütülen simülasyon çalışmalarının katılaşma sonuçları incelendiğinde, katılaşma sürecine enjeksiyon basıncı değişkenliğinin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiş olup katılaşma sürecinin enjeksiyon basıncına duyarlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Özellikle gaz gözenekliliğinde belirleyici olan dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonucu başta olmak üzere, yolluk girişindeki azami sıvı metal hızının (velocity in gate), kalıp aşınmasının (mold erosion) ve dolum esnasında parçanın ortalama sıcaklığı (temperature) sonuçlarında gerçekleştirilen incelemeler neticesinde optimum döküm sıcaklığının 625 °C ve enjeksiyon hızlarının (ikinci faz hızı) 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s olduğu tespit edilmiştir.

Belirlenen optimum kalıp tasarımı ve süreç parametreleri ile dökümü gerçekleştirilen parçalar, dijital radyografik muayeneye tabi tutularak döküm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Radyografik muayene sonuçları ışığında, 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s enjeksiyon hızlarında olmak üzere gerçekleştirilen döküm çalışmalarında gaz gözenekliliği (gas porosity), soğuk birleşme (cold fill), çekinti gözenekliliği (shrinkage cavity) ve yabancı partikül (foreign material) hataları değerlendirildiğinde, 2 m/s ve 3 m/s enjeksiyon hızlarında dökülen parçalarda ASTM E2422 standardına göre sırasıyla 7 ve 5 seviyelerinde soğuk birleşme hatalarına rastlanırken 4 m/s enjeksiyon hızına sahip parçada herhangi bir hata gözlemlenmemiştir. Ayrıca, soğuk birleşme dışındaki diğer hatalara her üç enjeksiyon hızı parametresinde de rastlanmamıştır. Bu sonuç, simülasyon çalışmalarında 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s enjeksiyon hızlarına sahip parçaların dolum esnasında parçada oluşan anlık hava basıncı (actual air pressure) sonuçlarında görülen hava basıncı farklarının anlamlı seviyelerde olmadığını göstermiştir.

5.2 Öneriler

Yapılan değerlendirmelerde, yüksek basınçlı döküm sürecinde döküm sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı parametrelerinin her ne kadar sürece etki oranı sıralamasında ilk üç sırayı alsa da benzer konuda yapılacak çalışmalarda, birinci faz hızı

ve enjeksiyon başlangıç noktası (ikinci faz vuruş noktası) parametrelerinin de ele alınması bu tez çalışmasına yardımcı sonuçlar ortaya koyacaktır.

Diğer yandan, simülasyon çalışmalarında enjeksiyon basıncı değişkenliğinin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiş olup yürütülen simülasyon çalışmalarında katılaşma sürecinin enjeksiyon basıncına duyarlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, yüksek basınçlı döküm sürecinde, katılaşma esnasında meydana gelen hacimsel büzülmelerin sebep olduğu çekinti gözenekliliğine enjeksiyon basıncının etkisinin görülebilmesi adına farklı basınçlarda dökümü gerçekleştirilen parçalar tahribatsız muayene yöntemleriyle incelenerek optimum enjeksiyon basıncı değerinin tespiti üzerinde çalışılabilir.

KAYNAKLAR

Adamane, A. R., Arnberg, L., Fiorese, E., Timelli, G. ve Bonollo, F., 2015, INFLUENCE OF INJECTION PARAMETERS ON THE POROSITY AND TENSILE PROPERTIES OF HIGH-PRESSURE DIE CAST Al-Si ALLOYS: A REVIEW, *International Journal of Metalcasting*, 9 (1), 43-53.

Anonymous, 1988, Casting, ASM International, p. 611.

Anonymous, 2015, Die Casting Handbook, *Illinois*, NADCA Publication, p. 5-24.

Anonymous, 2016, Introduction to Die Casting, *Illinois*, NADCA Publication, p. 5-24.

Apparao, K. C. ve Birru, A. K., 2017, Optimization of Die casting process based on Taguchi approach, *Materials Today-Proceedings*, 4 (2), 1852-1859.

Bonollo, F., Gramegna, N. ve Timelli, G., 2015, High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges, *Jom*, 67 (5), 901-908.

Boydak, O., Savas, M. ve Ekici, B., 2016, A Numerical and an Experimental Investigation of a High-Pressure Die-Casting Aluminum Alloy, *International Journal of Metalcasting*, 10 (1), 56-69.

Chen, Z. W. ve Jahedi, M. Z., 1999, Die erosion and its effect on soldering formation in high pressure die casting of aluminium alloys, *Materials & Design*, 20 (6), 303-309.

Concer, D. ve Marcondes, P. V. P., 2017, Experimental and numerical simulation study of porosity on high-pressure aluminum die casting process, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39 (8), 3079-3088.

Doehler, H., 1951, Die Casting, *New York*, McGraw Hill Book Company, p.

Erturk, S. O., Kumruoglu, L. C. ve Ozel, A., 2014, A Simulation and Fabrication Works on Optimization of High Pressure Aluminum Die Casting Part, *Acta Physica Polonica A*, 125 (2), 449-451.

Fu, M. W. ve Yong, M. S., 2009, Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process, *International Journal of Production Research*, 47 (18), 5203-5216.

Hsu, F. Y., Jolly, M. R. ve Campbell, J., 2006, Vortex-gate design for gravity casting, *International Journal of Cast Metals Research*, 19 (1), 38-44.

Il Jeong, S., Jin, C. K., Seo, H. Y., Kim, J. D. ve Kang, C. G., 2016, Mold structure design and casting simulation of the high-pressure die casting for aluminum automotive clutch housing manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84 (5-8), 1561-1572.

Jakumeit, J., Jana, S., Bottger, B., Laqua, R., Jouani, M. Y. ve Buhrig-Polaczek, A., 2012, Simulation-based prediction of micro-shrinkage porosity in aluminum casting: Fully-coupled numerical calculation vs. criteria functions, *3rd International Conference on Advances in Solidification Processes*, 27.

Jin, C. K. ve Kang, C. G., 2011, Fabrication process analysis and experimental verification for aluminum bipolar plates in fuel cells by vacuum die-casting, *Journal of Power Sources*, 196 (20), 8241-8249.

Kwon, H. J. ve Kwon, H. K., 2019, Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 147-153.

Puga, H., Barbosa, J., Seabra, E., Ribeiro, S. ve Prokic, M., 2009, The influence of processing parameters on the ultrasonic degassing of molten AlSi9Cu3 aluminium alloy, *Materials Letters*, 63 (9-10), 806-808.

Raffaeli, R., Favi, C. ve Mandorli, F., 2015, Virtual prototyping in the design process of optimized mould gating system for high pressure die casting, *Engineering Computations*, 32 (1), 102-128.

Reikher, A. ve Barkhudarov, M. R., 2007, Casting: an analytical approach, Springer Science & Business Media, p.

Serçe, O., 2015, Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde Enjeksiyon Parametrelerine Bağlı Olarak Döküm Simülasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi*, Isparta.

Stefanescu, D. M., 2005, Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings - a review, *International Journal of Cast Metals Research*, 18 (3), 129-143.

Tsoukalas, V. D., 2003, The effect of die casting machine parameters on porosity of aluminium die castings, *International Journal of Cast Metals Research*, 15 (6), 581-588.

Verran, G. O., Mendes, R. P. K. ve Rossi, M. A., 2006, Influence of injection parameters on defects formation in die casting Al12Si1,3Cu alloy: Experimental results and numeric simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (1-3), 190-195.

Vinarcik, E. J., 2003, High Integrity Die Casting Processes, *New York*, John Wiley & Sons, Inc., p.

Wannarumon, S. ve Grande, M. A., 2009, Comparisons of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 55, 88-95.

Zhao, X., Wang, P., Li, T., Zhang, B. Y., Wang, P., Wang, G. Z. ve Lu, S. Q., 2018, Gating system optimization of high pressure die casting thin-wall AlSi10MnMg longitudinal load-bearing beam based on numerical simulation, *China Foundry*, 15 (6), 436-442.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Emre Gökçil
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Konya / 1990
Telefon	**:**	0530 911 1881
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	emregokcil@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	**:**	Özel Türmak Anadolu Lisesi, Selçuklu, Konya	2008
Üniversite	**:**	İstanbul Teknik Üniversitesi, Sarıyer, İstanbul	2014
Yüksek Lisans:			
Doktora	**:**		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2014-2017	Aydınlar Yedek Parça A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2017-……	Yıldız Pul Oto. Motor Par. San. A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Metalurji
Mikroyapı Karakterizyonu
Mekanik Karakterizasyon
Alüminyum Dövme
Çelik Dövme
Alüminyum Yüksek Basınçlı Döküm
Küresel Grafitli Dökme Demir
Lamel Grafitli Dökme Demir
Metallerin Isıl İşlemleri
Metallerin Yüzey İşlemleri

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

ULUSLARARASI HAKEMLİ DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER (SCI JOURNALS)

KOKTAS, S., GOKCIL, E., AKDI, S., BIROL, Y. (2017). "Effect of Copper on Corrosion of Forged AlSi1MgMn Automotive Suspension Components". *Journal of Materials Engineering and Performance*. 3

GOKCIL, E., AKDI, S., BIROL, Y. (2017). "Potential Of Horizontal Direct Chill Cast EN AW 6082 Rods As Forging Stock In The Manufacture Of Light Weight Suspension Components". *Metallurgical Research and Technology*. vol. 114, issue 2.

GOKCIL, E., AKDI, S., BIROL, Y. (2017). "Potential Of Twin-Belt-Cast EN AW 6082 Blanks For The Manufacture Of Wishbone Suspension Forgings". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

BIROL, Y., GOKCIL E., GUVENC M.A., AKDI S. (2016) "Processing of high strength EN AW 6082 forgings without a solution heat treatment". *Materials Science & Engineering A*. 674 S25–32.

GOKCIL, E., AKDI, S., BIROL, Y. (2015). "A Novel Processing Route For The Manufacture Of EN AW 6082 Forged Components". *Materials Research Innovations*. VOL 19 SUPPL 10 S10-311-314.

ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

GÖKÇİL, E., ACARER. M. (2019). "Alüminyum Alaşımlarının Yüksek Basınçlı Dökümünde Simülasyon Tekniği ile Optimum Enjeksiyon Hızının Belirlenmesi". IMSMATEC'19, Kapadokya. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

GÖKÇİL, E., ESER. A., AKDI, S. (2016). "Impact of Austenitizing and Tempering Temperature Parameters on Different Quenched and Tempered Steel". *5th HTS*, İstanbul.

GÖKÇİL, E., ESER. A., AKDI, S., BİROL, Y. (2015). "Döküm, Ekstrüzyon ve Dövme Durumundaki AA6082 Alaşımının Çökelme Sertleşmesinde Çözeltiye Alma Sıcaklık ve Sürelerinin İncelenmesi". *7. Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul

GÖKÇİL, E., ESER. A., AKDI, S., BİROL, Y. (2015). "Özgün Bir Proses ile EN AW 6082 Dövme Bileşenlerin Üretilmesi". *7. Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul

GÖKÇİL, E., YAKIŞAN, U., AKDI, S., BİROL, Y. (2015). "Alaşım Bileşimi Optimizasyonu İçeren EN AW 6082-T5 Dövme Bileşenlerin Üretilmesi". *7. Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul

ESER. A., GÖKÇİL, E., AKDI, S., BİROL, Y. (2015). "Alüminyum İşlem Alaşımlarının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırma Sıcaklık ve Sürelerinin İncelenmesi". *7. Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul

YAKIŞAN, U., GÖKÇİL, E., AKDI, S., BİROL, Y. (2015). "1050 ve 5005 Serisi Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Özelliklerine Etkisi". *7. Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul

GÖKÇİL, E., YAKIŞAN, U., ESER. A., AKDI, S., BİROL, Y. (2015). "Küresel Grafitli Dökme Demirden Mamul Süspansiyon Parçalarında Yüzde Uzama Değerinin İyileştirilmesi". *2. Uluslararası Demir-Çelik Sempozyumu*, Karabük