



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**OTOMOBİLLERDE KULLANILAN DENGİ
ÇUBUKLARININ PLASTİK ŞEKİL
DEĞİŞTİRME DAVRANIŞINA BASINÇLI
DÖKÜM PROSES PARAMETRELERİNİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Abdülğani TEKİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ARALIK-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdülgani TEKİN tarafından hazırlanan ‘‘Otomobillerde Kullanılan Denge ubuklarının Plastik Şekil Değiştirme Davranışına Basınçlı Döküm Proses Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi’’ adlı tez çalışması 17/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

Başkan

Doç. Dr. Ahmet CAN

İmza

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TRKZ

.....

ye

Doç. Dr. Ahmet CAN

.....

ye

Doç. Dr. M. Hüseyin ÇETİN

.....

ye

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TRKZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdülğani TEKİN

Tarih: 22.12.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMOBİLLERDE KULLANILAN DENGE ÇUBUKLARININ PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞINA BASINÇLI DÖKÜM PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Abdülğani TEKİN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

2022, 77 Sayfa

Jüri

Danışmanın Unvanı Adı SOYADI
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI

Otomotiv sektöründe karbon salınımını azaltmak önemli bir faktördür. Araçlarda kullanılan birçok parçada düşük ağırlık sağlamanın yanında yüksek mukavemet ve düşük maliyet istenmektedir. Bu isterler doğrultusunda diğer mühendislik malzemelerine kıyasla alüminyum alaşımları tercih edilmektedir.

Alüminyum-Silisyum alaşımlarından yüksek basınçlı döküm (YBD) yöntemiyle birçok otomotiv parçası üretilmektedir. Parçaların istenilen kaliteye ve ömre sahip olmaları için proses parametrelerinin etkilerinin bilinmesi, bunun yanında başarılı parçaların üretilmesi için çekinti ve gaz poroziteleri gibi hatalara neden olmayacak en uygun kalıp tasarımının yapılması gereklidir.

Bu yüksek lisans tez çalışması KÜSİ programı kapsamında AYD Otomotiv Firmasında hizmet alımı ile üretilen otomobillerde kullanılan denge çubuklarında, kapak kapama işlemi sırasında yaşanan kırılma probleminin nedenlerinin araştırılması ve giderilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda YBD yöntemiyle üretilen denge çubuklarının plastik şekil değiştirme davranışına basınçlı döküm proses parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada A356 serisi AlSi7Mg alüminyum alaşımından denge çubuklarının üretilmesi için öncelikle en uygun kalıp tasarımı, Anycasting simülasyon programı desteği ile belirlenmiştir. Sonrasında üç farklı sıcaklık, basınç ve hız parametresi seviyesinde, Taguchi L9 deney tasarım tablosuna göre basınçlı döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan sıcaklıklar 700, 720 ve 740 °C; basınçlar 850, 1050 ve 1290 bar; hızlar 2, 2.5 ve 3 m/s'dir. Bu parametre seviyelerinde üretilen numunelere mafsallık yerleştirilerek kapak kapama işlemleri yapılmış ve sonrasında kapak çıkma kuvvetleri ölçülerek YBD prosesiyle üretilen denge çubuklarının kullanım performansı test edilmiştir. Sonrasında numunelerden çekme deneyi çubukları hazırlanmış ve beş tekrarlı olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Böylece proses parametrelerinin akma mukavemetine, çekme mukavemetine ve plastik uzama miktarına etkisi araştırılmıştır. Proses parametrelerinden akma mukavemetine etkisi en fazla olan parametrenin basınç olduğu ve basınçla birlikte akma mukavemetinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen 90 adet kapak kapama

işleminin hiçbirinde kırılma problemi yaşanmamıştır. Bu durum doğru kalıp tasarımı ve uygun proses şartlarında parça üretimlerinin gerçekleştirilmiş olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: A356, Çekme deneyi, Döküm simülasyonu, Plastik şekil verme, Yüksek basınçlı döküm.



ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF PRESSURE DIE CASTING PROCESS PARAMETERS TO THE PLASTIC FORMING BEHAVIOR OF SWAY BAR LINKS USED IN AUTOMOBILES

Abdülğani TEKİN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Asist. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ

2023, 77 Pages

Jury

**Advisor Asist. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI
Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI**

Reducing carbon emissions is an important factor in the automotive industry. In addition to providing low weight in many parts used in vehicles, high strength and low cost are required. In line with these requirements, aluminum alloys are preferred compared to other engineering materials.

Many automotive parts are manufactured from aluminum-silicon alloys by high pressure die casting (HPDC) method. In order for the parts to have the desired quality and life, it is necessary to know the effects of the process parameters, as well as to design the most suitable mold that will not cause errors such as shrinkage and gas porosity in order to produce successful parts.

This master's thesis study was carried out to investigate and eliminate the causes of the breakage problem experienced during the cover closing process in the sway bar links manufactured in AYD Automotive Company within the scope of the KÜSİ program. In this context, the effect of HPDC process parameters on the plastic deformation behavior of the sway bar links used in automobiles produced by the HPDC method was investigated. In the study, first, the most suitable mold design was determined with the support of the Anycasting simulation program for the manufacturing of sway bar links from A356 series AlSi7Mg aluminum alloy. Afterwards, HPDC process was carried out according to Taguchi L9 experimental design table at three different temperature, pressure and velocity parameter levels. The temperatures used in the study were 700, 720 and 740 °C; pressures 850, 1050 and 1290 bar; speeds are 2, 2.5 and 3 m/s. Cover closure processes were performed by placing hinges on the samples manufactured at these parameter levels, and then the usage performance of the sway bar links manufactured by the HPDC process was tested by measuring the capping forces. Afterwards, tensile test rods were prepared from the

samples and tensile tests were performed with five repetitions. Thus, the effects of process parameters on yield strength, tensile strength and plastic elongation were investigated. It has been concluded that the parameter with the greatest effect on yield strength from process parameters is pressure and yield strength increase with pressure. There was no breakage problem in any of the 90 cover closing processes. This has shown that the correct mold design and the manufacturing of parts under appropriate process conditions have been carried out.

Keywords: A356, Tensile test, Cast simulation, Plastic forming, High pressure die casting.



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez sürecim boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ'e en samimi duygularıyla teşekkür ederim.

Çalışmalarımın döküm denemelerini ve deney faaliyetlerini gerçekleştirdiğim, Aydınlar Otomotiv Endüstri San. ve Tic. A.Ş.'ye ve çalışmalar sırasında yardımını esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez sürecimde bilgi, önerileri ve yardımları için Endüstri Müh. Ümit Ahmet ÇAKAL, Mak.Öğr. Murat YAVUZ ve Mak. Tek. Muammer AKSOY Bey'e Teşekkür ederim.

Kalıp tasarımı ve simülasyon analizi süreçlerinde yardımcı olan Mak. Öğr. Levent TOPÇU Bey'e, kıymetli bilgiler ve yardımları için teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Babam, Annem, Kardeşlerim ve tez sürecimin her aşamasında bana destek olup beni motive eden Hayat Arkadaşıma en derin duygularıyla teşekkürü borç bilirim.

Abdülgani TEKİN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Bozulabilir kalıba döküm yöntemleri.....	4
2.2. Kalıcı Kalıba Döküm Yöntemleri	7
2.3. Basınçlı Döküm Yöntemi.....	9
2.3.1. Sıcak kamaralı basınçlı döküm yöntemi	11
2.3.2. Soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi	12
2.4. Literatürde Basınçlı Döküm Prosesi Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Malzeme.....	23
3.2. Döküm Simülasyonu.....	23
3.3. Ürün ve Kalıp Tasarımı.....	24
3.3.1. Yolluk Tasarımı	25
3.3.2 Hava Cepleri Tasarımı	27

3.4. Döküm İşlemi.....	30
3.5. Çekme Deneyleri.....	35
3.6. Mikroyapı İncelemesi	38
3.7. Kapak Kapama İşlemi.....	39
3.8. Kapak Çıkma Deneyi	43
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47
4.1. Döküm Simülasyonu Sonuçları.....	47
4.2. Kapak Kapama İşlemi Sonuçları.....	54
4.3. Kapak Çıkma Deneyi Sonuçları.....	57
4.4. Çekme Deneyi Sonuçları.....	60
4.5. Mikroyapı İnceleme Sonuçları.....	68
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72
5.1 Sonuçlar	72
5.2 Öneriler	73
KAYNAKLAR	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Santigrad Derece
bar	: BAR
cm ³	: Santimetreküp
kg	: Kilogram
kg/saat	: Kilogram/saat
MPa	: Megapaskal
kN	: Kilonewton
m/s	: Metre/saniye
mbar	: Milibar
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
sn	: Saniye
rpm	: Revolutions per minute

Kısaltmalar

YBD	: Yüksek Basıncılı Döküm
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CAD	: Computer Aided Design
ANOVA	: Analysis of variance
P-değeri	: İstatiksel anlamlılık değeri
µm	: Mikrometre

1. GİRİŞ

İnsanlık var olduğundan bu yana yaşamını sürdürmek ve daha kolay idame ettirebilmek amacıyla işine yarayacak araç ve gereçler üretme çabası içerisinde olmuştur. Bu süreç içerisinde insanlık çok farklı üretim yöntemi keşfedip uygulamıştır. Keşfedilen bu yöntemler zamanla gelişerek daha verimli hale gelmiştir.

Toplumların hayatını kolaylaştıran araç ve gereç üretiminde önemli imalat yöntemlerinden biri de döküm yöntemidir. Arkeolojik bulgular, döküm yönteminin M.Ö.4000 yıllarından başlayan geçmişe sahip olduğunu işaret etmektedir. Bakır cevheri, odun ile tabakalar halinde ocaklara doldurulup keçi derileri ile körüklenerek ergitilip taş veya pişirilmiş kilin işlenmesiyle elde edilen kalıplara dökülürdü. İlk başlarda balta gibi yassı ürünler tek parça açık kalıpla üretilirken zamanla gelişim gösterip önce daha karmaşık parçaların üretimi için kapalı kalıplara döküm uygulanmış, sonrasında da M.Ö. 2000 yıllardan itibaren iç boşlukların elde edilmesi için maçalar kullanılmaya başlanmıştır. Döküm yöntemiyle ilgili geliştirilen teknikler, savaşlar ve göçlerle Akdeniz havzası'na oradan da Avrupa'ya ulaştı. Rönesans'tan sonra canlanan sanat uygulamaları ve ticaret bağımsız döküm sanayinin gelişmesinin başlangıcı olmuştur (Aran, 1999).

Döküm yöntemi günümüzde de birçok sektörde, karmaşık yapıdaki ve benzerliği yüksek olan parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Döküm yöntemiyle başka proseslerde elde edilemeyecek derecede büyük ve karmaşık geometrili boyutlu parçalar kum kalıba döküm yöntemi ile ekonomik olarak üretilebilmektedir. Birçok çeşidi olan döküm yönteminde özellikle üretim hızının fazla olması, dar toleranslar ve iyi yüzey kalitesinin gerekli olduğu parçalarda basınçlı döküm yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Basınçlı döküm yöntemi ile karmaşık yapıdaki parçalar, talaş kaldırma gibi operasyonlara en az miktarda ihtiyaç duyulacak şekilde üretilmektedir. Böylece seri üretime ve tekrarlanabilirliğe uygun olan parçalar elde edilir.

Bu yüksek lisans tez çalışması, otomobillerde kullanılan ve Yüksek Basınçlı Döküm (YBD) prosesiyle üretilen denge çubuklarında, kapak kapama işlemi sırasında yaşanan kırılma probleminin nedenlerinin araştırılması ve giderilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda YBD yöntemiyle üretilen denge çubuklarının plastik şekil değiştirme davranışına basınçlı döküm proses parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Üç farklı sıcaklık, döküm basıncı ve döküm hızı parametresi seviyesinde, Taguchi L9

deney tasarım tablosuna göre basınçlı döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında parçalara, bir plastik şekil verme yöntemi olan kapak kapama işlemi devamında da çekme deneyleri uygulanmış ve proses parametrelerinin kapak kapama kuvveti, akma ve çekme mukavemeti ile plastik uzama miktarına etkileri araştırılmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İnsanlık tarihinin en eski üretim yöntemlerinden biri olan döküm yöntemi ergitilmiş akışkanın yer çekiminin etkisiyle önceden belirlenip oluşturulan boşluk içerisine bırakılması işlemidir. Döküm yönteminde paça boyutundaki ve ağırlığındaki toleranslar oldukça geniştir. Birkaç gramdan onlarca tona kadar ve birkaç milimetreden birkaç metreye kadar aralıktaki parçalar döküm yöntemiyle üretilebilmektedir. Bu üretim yöntemi ile oldukça basit parçalar üretilebildiği gibi çok karmaşık parçalar da elde edilebilir (Çiğdemoglu, 1972).

Otomotiv, havacılık, savunma sanayi gibi sektörlerin birçok parçasının üretiminde büyük ölçüde önem taşıyan döküm yöntemi ülkemizde çok yaygın olarak tercih edilmektedir.

Döküm yönteminin üretim sınırları çok geniş olması olmakla birlikte, hem çok küçük parçaların hem de tonlarca ağırlıktaki parçaların imalatına uygun yöntemler bulunmaktadır. Şekilsel olarak çok karmaşık ya da içi boş parçaların üretimi mümkündür. Hemen hemen tüm metal alaşımlarının dökümü mümkünken, dökme demirin ise sadece döküm yoluyla elde edilmesi mümkündür. Döküm yönteminde çok ince kesitlerin üretilmesi zordur. Yüksek adetli ürünlerin üretimi için ekonomiktir (Aran, 1999).

Döküm yöntemleri kullanılan kalıba bağlı olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar bozulabilir kalıba ve kalıcı kalıba döküm yöntemidir. Bozulabilir kalıba döküm yönteminde üretilen parçayı kalıptan çıkarmak için kalıbın bozulması gerekir. Kalıbın her yeni döküm işlemi için yeniden hazırlanması gerektiğinden bozulabilir kalıp yöntemiyle üretimde üretim hızı dökümün hızından çok kalıbın oluşturulması için gereken süre tarafından belirlenir ve sınırlanır. Belli geometriye sahip parçalardan kum kalıba döküm ile saatte 400 adet veya daha fazla parça üretilebilmektedir. Kalıcı kalıba döküm yöntemlerinde, kalıp metalden veya diğer dayanıklı malzemelerden yapılır ve birçok döküm yönteminde kullanılabilir. Kalıbın tekrar tekrar hazırlanması gerekmediğinden bozulabilir kalıba göre üretim hızı çok daha yüksektir. Ancak kalıbın açılması gerektiğinden, bozulabilir kalıba göre daha basit şekiller ve kalıp maliyeti nedeniyle daha küçük parçalar elde edilebilmektedir.

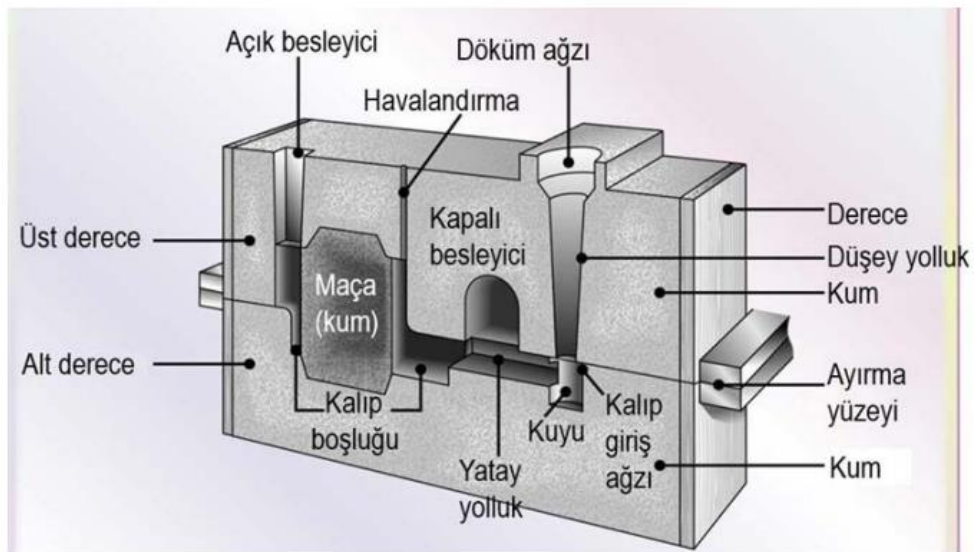
2.1. Bozulabilir kalıba döküm yöntemleri

Döküm işlemi sonrası, elde edilmek istenen modeli kalıptan çıkarmak için kalıbın dağıtılıp elde edildiği yöntemlerdir. Karmaşık şekillerin üretilmesine olanak sağlayan bu döküm yönteminde, dökümden daha çok kalıbın oluşturulması için gerekli süre uzun olduğu için imalat hızı düşüktür. Bu döküm yöntemleri kum kalıba döküm, kabuk kalıplama, vakum kalıplama, köpük polistren yöntemi, hassas döküm, alçı ve seramik kalıba döküm olarak sınıflandırılır.

Şematik resmi Şekil 2.1’de verilen kum kalıba döküm yöntemi tüm döküm yöntemleri içerisinde en yaygın kullanıma sahip olup döküm ile üretilen parça sayısının çoğunluğunu bu yöntem oluşturmaktadır. Yöntemin avantajları

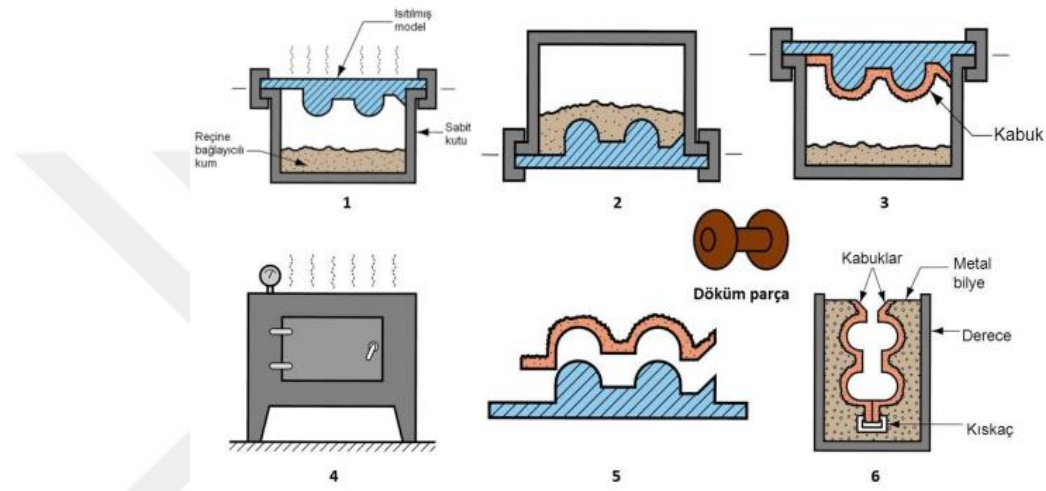
- Bozulabilir kalıp olması nedeniyle karmaşık şekilli parçalara uygun olması,
- Büyük boyutlu parçaların dökümünün mümkün olması,
- Çelikler, Ni-alaşımları ve Ti-alaşımları gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin dökülebilmesi

gibi avantajları nedeniyle diğer yöntemlerden daha çok tercih edilmektedir. Üretilcek döküm parçasının yaklaşık bire bir ölçekli kopyası olan kalıp boşluğuna erimiş metalin boşaltılmasıyla döküm işlemi başlar, erimiş metal katılaşması için beklenerek devam eder ve döküm parçasının çıkarılması için kalıbın bozulmasıyla son bulur.



Şekil 2.1 Döküme hazır kum kalıp (Akar, 2007)

Kabuk Kalıplama döküm yöntemi (Şekil 2.2) bağlayıcı madde olarak ısıyla sertleşme özelliği gösteren bir termoset reçine karıştırılmış kumdan hazırlanan ve genellikle 9 mm kalınlığında kabuk biçiminde olan bir kalıba döküm işlemidir. Döküm işlemi öncesindeki örnek bir kabuk Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Kabuk kalıplamada elde edilen kalıp boşluğu yüzeyi geleneksel yaş kum kalıptan daha pürüzsüzdür, dolayısıyla erimiş metalin akışı daha kolay olduğundan döküm parçasının yüzeyi kalitesi daha iyidir. Bu kalıplamada, 2,5 μm yüzey pürüzlülüğü ve $\pm 0,25$ mm boyut toleransları elde edilebilir.

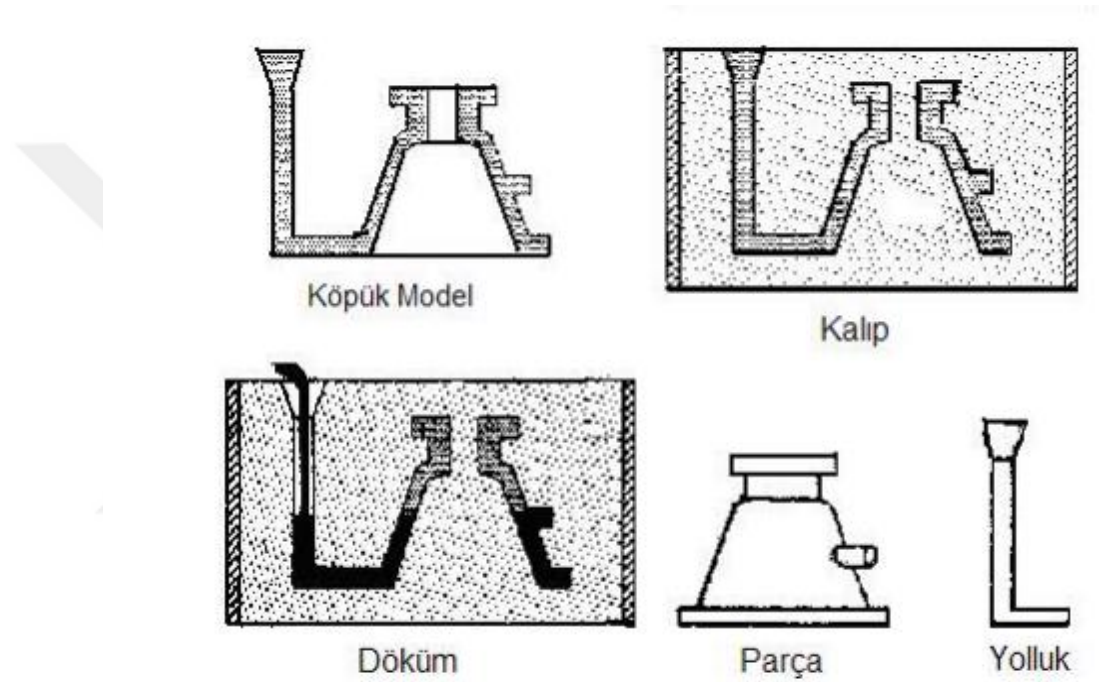


Şekil 2.2. Kabuk kalıplama döküm yönteminin şematik gösterimi (Groover, 2021)



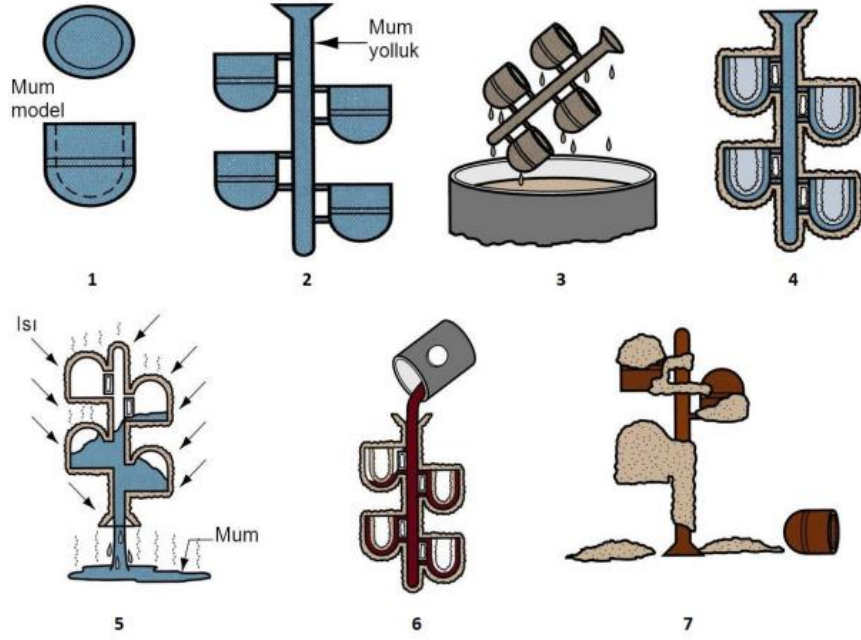
Şekil 2.3. Dökümden önceki aşamada hazırlanmış olan kabuk kalıplar

Köpük Polistiren Yönteminde kum kalıp içerisinde ergiyik metal ile temas ettiğinde buharlaşan köpük polistirenden elde edilmiş model kullanılır (Şekil 2.4). Köpük model, düşey yolluk, besleyici ve yolluk sistemi hep birlikte tek parça olarak polistiren köpükten imal edilir. Modelin kalıptan çıkarılması söz konusu olmadığı için kalıbın iki parçalı olmasına gerek yoktur ve bu durum karmaşık kesitli parçalar için büyük bir avantajdır. Yöntem otomobil motor parçalarının seri üretiminde tercih edilmektedir.



Şekil 2.4. Köpük Polistiren Döküm Yöntemi (Aran, 1999)

Hassas döküm yönteminde balmumundan yapılmış bir model, refrakter bir karışım ile kaplanır (Şekil 2.5). Model üretimi genelde balmumunun metal bir master kalıbına dökümü veya enjeksiyonu şeklinde yapılır. Döküm parçasının şekli karmaşık olduğu zaman, çok sayıda balmumu parça birleştirilerek salkım oluşturulur. Sıvı metal kalıba dökülmeden önce balmumu eritilerek uzaklaştırılır ve sonrasında sıcak kalıba ergimiş metal dökülür. Kalıbın sıcak olması nedeniyle erken katılaşma sorunu olmadığı çok ince ve karmaşık kesitler elde edilebilir. Boyut kontrolünün $\pm 0,075\text{mm}$ boyut toleranslarına kadar mümkün olması, yüzey kalitesinin çok iyi olması, çok karmaşık şekilli parçaların üretilmesine imkan sağlaması dolayısıyla tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 2.5. Seramik kabuklu hassas döküm yöntemi (1)Bal mumu model oluşturulur (2)Modeller yolluk etrafında bağlanarak model salkımı elde edilir. (3) Salkım refrakter çamura daldırılır.(4) Seramik kabuk istenilen kalınlığa ulaşmaya kadar kaplanır (5) Ters çevrilen kalıp ısıya maruz bırakılarak balmumu eritilip kalıp boşluğu oluşturulur (6)Döküm işleminin gerçekleştirilir (7)Kalıplama bozularak ürün elde edilir. (Groover, 2021)

Alçı ve seramik kalıba döküm yöntemi kalıp yapımında alçıtaşı kullanılması dışında kum kalıba döküm yöntemine benzemektedir. Bu yöntemin dezavantajı oluşturulan alçı kalıbın sertleşmesini beklemek gerekmektedir. Alçı kalıbın birkaç saat pişirilerek nemi alınması gerekir fakat bu işlemin uzun tutulması halinde kalıbın mukavemeti düşecektir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmayan bu yöntem düşük erime sıcaklığındaki metallerin (Alüminyum, magnezyum, bakır) dökümünde kullanılır (Groover, 2021).

2.2. Kalıcı Kalıba Döküm Yöntemleri

Döküm yönteminde kullanılan kalıbın daha çok metalden veya seramikten oluştuğu bu yöntemde, elde edilen parçayı kalıptan çıkarmak için kalıbın deforme edilmesine gerek yoktur. Çok sayıda döküm yapılmasına olanak sağlayan bu yöntemin üretim hızı yüksektir fakat parça geometrisi sınırlıdır. Bu döküm yöntemi kokil kalıba döküm, santrifüj döküm ve basınçlı döküm olarak sınıflandırılır.

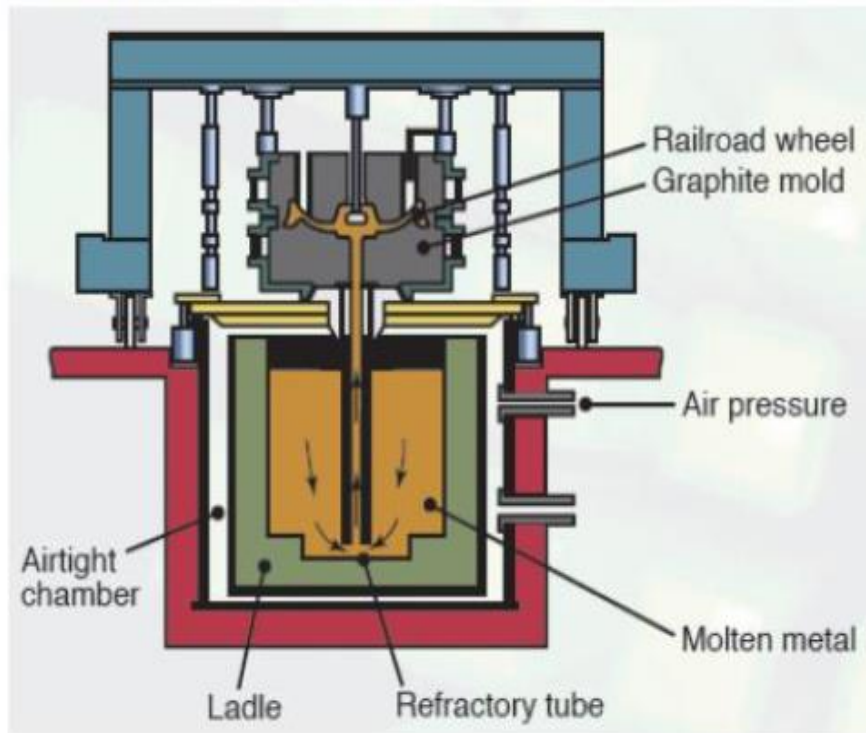
Kokil (metal) kalıba döküm yönteminde kolay ve hassas biçimde açılıp kapanabilen metallerden oluşan kalıplar kullanılır. Erimiş metal kalıp boşluğuna yer çekimi etkisi ile doldurulur. Yüksek boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi elde etmenin

mümkün olduğu bu yöntemde soğuk kalıp kullanıldığında ince taneli yapı sayesinde iyi dayanım elde edilir. Basit geometriler dökmek için daha uygun olan bu yöntem yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller için uygun değildir.

Santrifüj döküm yönteminde oluşturulan kalıbın yüksek hızda döndürülmesiyle oluşan merkezkaç kuvvetin etkisiyle eriyiğin kalıbın dış bölgelerine transferi edilmesi sağlanır. Uygulanış biçimine göre boru, tüp, halka gibi ürünlerin elde edilebildiği gibi tekerlik makara gibi dolu radyal simetrik parçalar dökülebilir.

Alçak basınçlı döküm

Basınçlı döküm yöntemi ergiyik metalin manuel olarak aktarılmasını ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Kalıbın daha hızlı ve daha kontrollü doldurulmasını sağlamak için ergimiş metal basınçlandırılır. Düşük basınçlı dökümde erimiş metal yalıtımlı basınç sızdırmaz pota veya fırın içerisinde bulunur. Ergiyik metal ile kalıp arasında köprü olacak şekilde bir tüp dikey olarak yerleştirilmiştir. Sızdırmaz fırının içine verilen hava oluşturduğu 0,1MPa düzeyinde düşük bir basınç ile akışkan tüpün içinden kalıba hareket etmesini sağlar.



Şekil 2.6. Alçak basınçlı döküm yöntemi (Groover, 2021)

Bazı ürünler için doluluk oranı döküm kesit kalınlığına bağlı olarak değişebilir. Çok karmaşık parçalarda bilgisayar kontrollü düşük basınç makineleri kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem her bir ürün için ekstra maliyet oluşturmaktadır. Düşük basınçlı döküm yöntemi ince kesitli parçalar için yaygın olarak kullanılan, verimi %90-95 oranında olan bir yöntemdir. Bu yöntemde hava ile temas etmiş olan sıvı metalin değil potanın ortasındaki temiz sıvı metalin kalıba aktarılması daha saf parçaların üretilmesini sağlar. Böylece, parçada oluşabilecek gaz boşluğu ve oksitlenme hataları önlenir ve parçanın mekanik özellikleri geliştirilir. Yüksek basınçlı dökümden daha düşük bir üretim oranına sahip olması ve daha küçük parçaların dökümü için uygun olmamasıdır. Minimum duvar kalınlığı, kokil dökümden daha küçük olsa da, yüksek basınçlı kalıp dökümünden daha büyüktür. Takım maliyeti de kokil kalıptan daha yüksektir (Butler, 2001)

2.3. Basınçlı Döküm Yöntemi

Ergitilmiş metalin yüksek basınç altında kalıplara doldurulduğu bir döküm yöntemidir. Basınçlı dökümle bisiklet parçaları, çatal bıçak takımları, saatler, klimalar, kül tablaları, el aletleri, motorlar, kilitler, makaralar, valfler, traktör parçaları, tren parçaları, elektrik aletleri, dürbünler, hava freni donanımı, savaş gereçleri, roket parçaları v.b. gibi yapımı özen gerektiren önemli parçalar üretilmektedir (Aslan, 2007). Basınçlı döküm yöntemiyle üretilen parçalara örnekler Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Basınçlı döküm yöntemi dar toleranslarda üretim ve iyi yüzey kalitesi avantajlarını sunmaktadır. Bu yöntemle $\pm 0,12$ mm boyut toleransları ve yüzey pürüzlülüğü 0,5-3 μ m değerine kadar olan parçalar üretilmektedir. Bu nedenle de ek talaşlı imalata ihtiyaç olmaması maliyet ve süre açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında ince kesitlerin elde edilebilmesi, üretimin saatte 500 parçaya varan oranda bir hız sunması da yöntemin tercih edilirliliğini artırmaktadır. Birçok avantajının yanında kalıp ve makine maliyetlerinin fazla olması ve alüminyum, magnezyum, çinko, kalay gibi düşük sıcaklıkta eriyen metallere uygun olması yöntemin dezavantajlarıdır. Yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.



Şekil 2.6. Basınçlı Dökümle Üretilen Ürünler (Karataş ve Kahraman, 2003)

Prosesin Avantajları

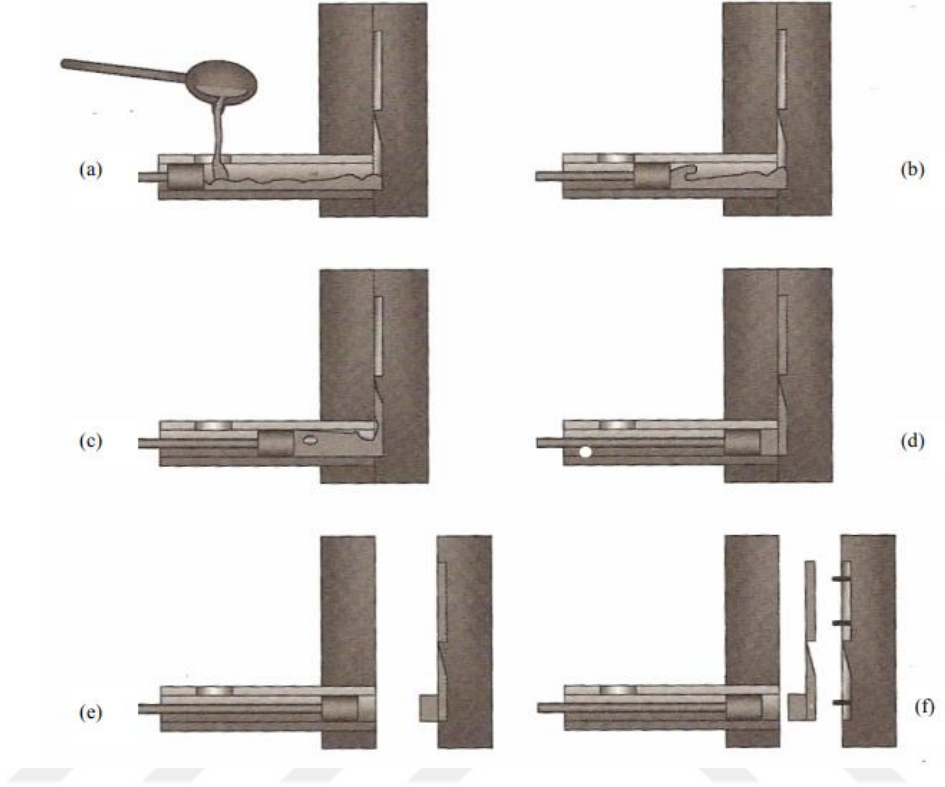
- Karmaşık ve küçük boyutlu parçaların imal edilmesi için uygundur.
- Üretim hızı açısından yüksektir.
- Yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti çok yüksektir.
- Hızlı soğuma sonucu oluşan ince taneli iç yapının mekanik özellikleri iyidir.
- Ekstra yüzey bitirme işlemine genel olarak ihtiyaç duymazlar.

Prosesin Dezavantajları

- Küçük parçaların üretimine daha yatkındır.
- Kalıptan çıkması mümkün olmayan şekillere sahip parçalarda üretime elverişli değildir.
- Kalıp tasarımı zordur.
- Döküm işlemini gerçekleştirecek makine için yüksek bir ön yatırım gerekmektedir.
- Kalıp yatırımı nedeniyle yüksek adetli seri imalatla ekonomiktir.
- Yüksek sıcaklıkta eriyen malzeme dökümü yapılamaz (Aran, 1999).

Basınçlı döküm, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi erimiş metalin basınç altında kilitlenmiş bir metal kalıp boşluğuna dolmaya zorlandığı (Şekil 2.7-b-c) ve metal katılaşana kadar güçlü bir pres ile kalıpların kapalı olarak tutulduğu bir döküm işlemidir (Şekil 2.7-d). Metalin katılaşmasından sonra kalıp açılır ve döküm parça dışarı atılır (Şekil 2.7-e-f). Dökümün çıkarılmasından sonra kalıp kapatılır ve bir sonraki döngü için tekrar kilitlenir. Metalin kalıp boşluğuna enjeksiyonu saniyenin küçük bir kısmında tamamlanır. Çoğu zaman, erimiş metal hala kalıpta tutulurken, aşırı yüksek basınç uygulanır (yoğunlaştırma basıncı olarak adlandırılır). Bu yüksek basınç, metale

hapsolmuş herhangi bir gazı sıkıştırır ve katılaştıkça metalin büzülmesini telafi etmek için boşluğa ilave metal besler. Erimiş metali kalıba enjekte etmek için iki tip pres kullanılır. Bunlar sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı presler olarak adlandırılır.



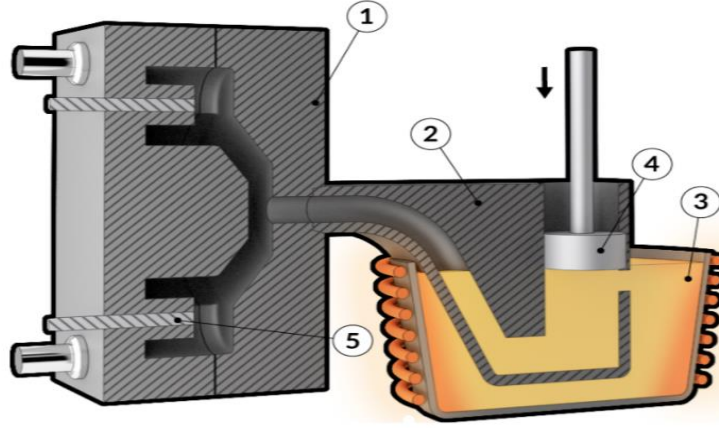
Şekil 2.7. Basınçlı döküm proses çevrimi (Yalçınkaya, 2006)

2.3.1. Sıcak kamaralı basınçlı döküm yöntemi

1900'lerin başında ilk patenti alınarak uygulanmaya başlanmış olan bu sistem genel olarak kalıp, piston, sıvı metal potası, gaz akümülatörü ve kalıp kilitlerinden oluşmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip çinko magnezyum kalay kurşun gibi metallerin basınçlı döküm yöntemi için en çok tercih edilen döküm yöntemidir (Kaplan,2012). Hazırlanmış alaşım Şekil 2.8'de görüldüğü gibi makinanın ön tarafında bulunan potada ergitilir. Kalıp kilitlendiği zaman pota içerisinde bulunan piston hareket ederek önündeki sıvı metali kalıp boşluğuna yüksek bir basınçta doldurur. Metal katılaştıktan sonra piston otomatik olarak geriye çekilir, kalıp açılır ve parça alınır. Bu sırada pota içerisindeki alan tekrar sıvı ile dolar ve otomatik çevrim bu şekilde tekrarlanır.

Metal ergitme potaları makine üzerinde yer alan bu makineler ergime sıcaklığı 327 °C olan kurşun, 420 °C olan çinko, 232 °C olan kalay gibi ergime sıcaklıkları düşük olan metallerin üretilmesinde kullanılır. Bu yöntemde çok küçük boyutta parçalar ve

$\pm 0,05\text{mm}$ gibi yüksek yüzey hassasiyeti elde edilebilir. Üretim sırasında 70-350 bar aralığında çalışıldığından parça yüzey hassasiyeti oldukça yüksektir (Duran, 2014).



Şekil 2.8. Sıcak kamaralı basınçlı döküm 1-Kalıp 2-Besleme mekanizması (Kaz boynu) 3-Pota 4-Piston 5-İtici (Anonymous, 2022)

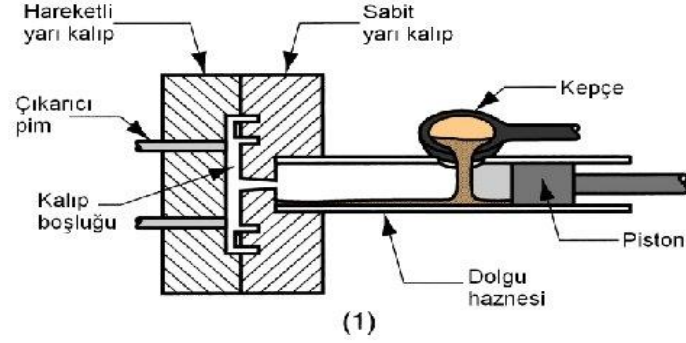
2.3.2. Soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi

Soğuk kamaralı döküm yöntemi erime sıcaklığı $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde olan alüminyum, magnezyum ve bakır gibi metallerin üretiminde tercih edilir. Bu yöntem metal enjeksiyon da denilmektedir. Metal enjeksiyon yönteminin en büyük avantajı yüksek sıcaklığa sahip metalin piston-silindir düzeneğini etkilememesidir. Metal, enjeksiyon makinasından ayrı bir potada ergitilerek bir kepçe yardımıyla alınarak Şekil 2.9'de görüldüğü gibi makine haznesine dökülür. Haznede bulunan metal yüksek basınçlarla kalıp boşluğuna basılır. Kalıp boşluğuna basınç altında doldurulan metal soğuduktan sonra iticiler vasıtasıyla çıkartılır.

Soğuk kamaralı döküm makinalarında ergimiş metalin, yüksek sıcaklık nedeniyle enjeksiyon sistemini etkilememesi için silindir içine eklenen soğutucu kanallar sayesinde silindirin soğuması sağlanır. Bu sayede enjeksiyon sonrasında sistemin çalışma performansının olumsuz etkilenmesi engellenir. Alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımlarının yüksek ergime noktasına sahip olmaları ve çelikten yapılan silindir ve pistonun bu alaşımlar ile uzun süre etkileşim halinde olması alaşımların karakteristiğini değiştirdiği ve piston ile silindirin ömrünü azalttığı bir gerçektir. Soğuk kamaralı makinede alaşımların özelliği değişmez, çünkü metal piston ve silindirle kısa süre temas halindedir. Piston ve silindir madene nazaran oldukça soğuktur. Hidrolik olarak çalışan makinelerdeki enjeksiyon basıncı mekanik olarak çalışanlara göre çok daha yüksektir. Enjeksiyon basıncı, makinenin kapama kuvvetini yenip kalıbın hareketli

ve sabit kısmını birbirinden ayırmamalıdır. Enjeksiyon basıncı erimiş metali giriş kanalından ve yolluklardan donmadan geçmesini sağlayacak büyüklükte olmalıdır. Bu durum sağlandığında dökülen parçanın yoğunluğu ve diğer halleri tatmin edici olur (Duran, 2014).

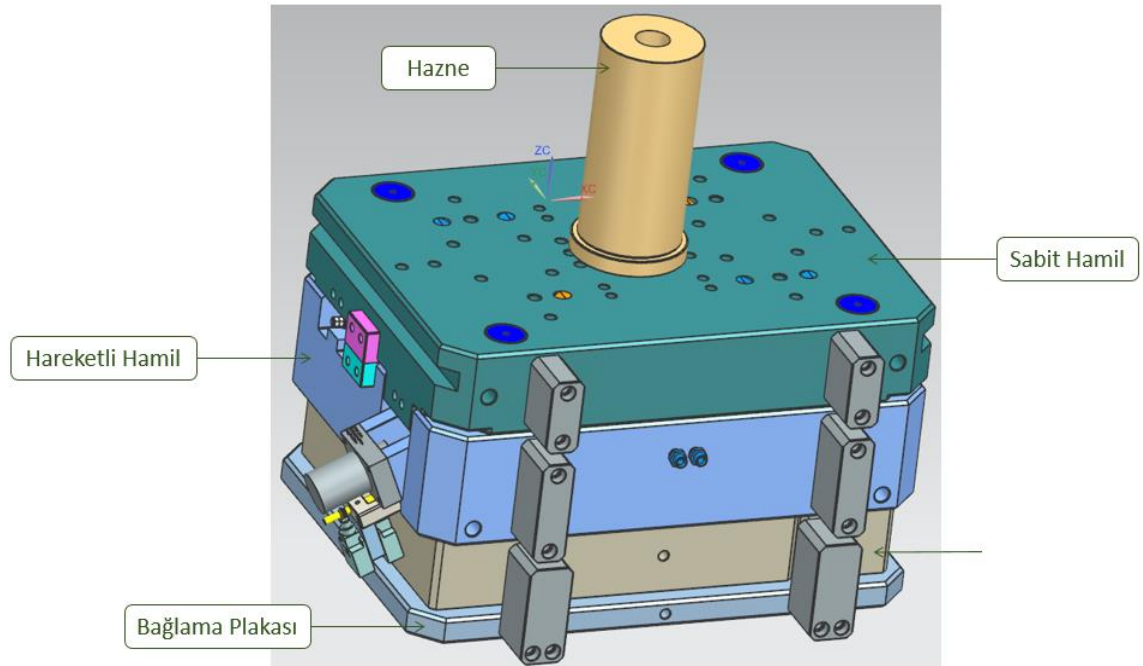
Soğuk Hazneli Basınçlı Döküm



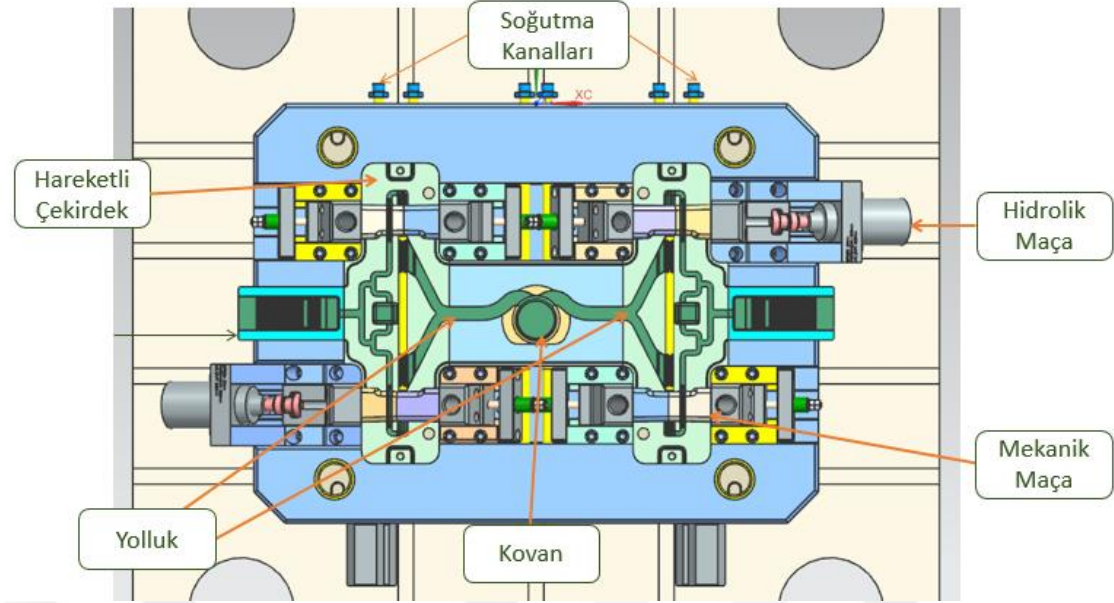
Şekil 2.9. Soğuk kameralı basınçlı döküm makinası (Groover, 2021)

Basınçlı döküm yönteminin en önemli parametrelerinden biri olan kalıplar, üretimi zor ve pahalı elemanlardır. Kalıpların sıcaklık dayanımının yüksek olması gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması elde edilecek parçaların yüzey kalitesine de etki etmektedir. Maliyeti nedeniyle yüksek bir sertlik ve dayanımla uzun bir ömre sahip olması istenir. Bu nedenle basınçlı döküm kalıplarında 2344 (X40CrMoV5-1) gibi sıcak iş çelikleri ile 1020-1050 imalat çeliklerinden kalıp setleri kullanılır. Kalıp işletme sıcaklığı 160°C ile 450°C arasında olan proseste kalıp malzemesinin sertliği enjeksiyon sıcaklığına bağlı olarak 34-38 HRC olması istenir. Kalıplarda önemli bir yeri olan yolluk girişinin şekli, yassı, geniş bir bant görünümündedir. Sıcak kamaralı döküm makinalarında kalıp boşluğunda basınç, 50-250 bar ve kalıp boşluğuna giriş hızı 50-120 m/s değerleri aralığındadır. Yolluk giriş çapı parça boyutlarına göre değişiklik göstermekte olup 0,3-2 mm aralığında kalıp yüzeyine açılır. Soğuk kamaralı döküm makinalarında kalıp boşluğundaki basınç ~50-1000 bar ve kalıp boşluğuna giriş 50-200 m/s aralığındadır (Uludağ, 2000).

Şekil 2.10’de örnek modeli verilen kalıplar hareketli ve sabit kısım olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Hareketli kısım içerisinde elde edilmek istenen döküm modelin bulunduğu çekirdek, maçalar, itici sistemi, hava cepleri, yolluk ve soğutma sistemini bulundurmaktadır (Şekil 2.11).

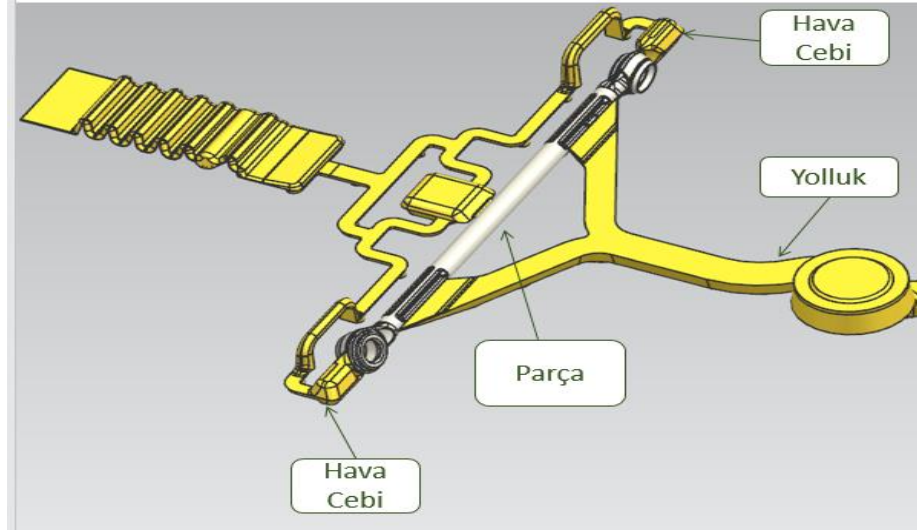


Şekil 2.10. Basınçlı döküm kalıbı örneği

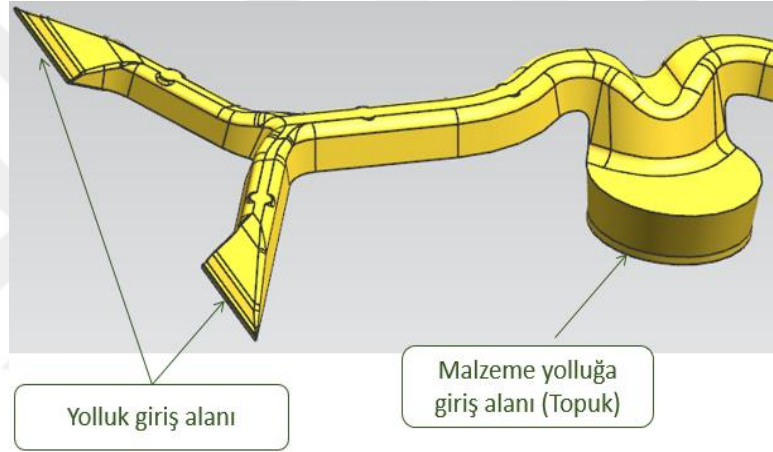


Şekil 2.11. Basınçlı döküm kalıbında hareketli hamilin iç tasarımı

Şekil 2.12’de gösterildiği gibi eriyik metalin rehberi olarak kabul edebileceğimiz yolluklar, kalıp girişinden elde edilmek istenen ürünün bütün kesitlerine dolmasını ve dağılmasını sağlayan kalıbın önemli bölümlerinden biridir. Yolluklar döküm kalitesine birinci dereceden etkisi bulunan, döküm prosesi sonrası elde edilmek istenen üründen çıkartılan parçalardır. Döküm kalitesine birinci dereceden etkisi bulunan yolluklar kalıp boşluğuna girişteki yön ve hızı tayin ettikleri için kalıp tasarımı kadar yolluk tasarımına da dikkat edilmesi gerekir. Örneği Şekil 2.13’de verilen yolluk giriş alanı genişliği üretilmek istenen malzeme için hayati önem taşımaktadır. Doğru yolluk tasarımı seçimi yapılmaması sebebiyle kalıp içine yavaş dolum yada hızlı dolum farklı etkiler meydana getirmektedir. Yavaş dolum gerçekleşen kalıplarda metal uzun süre hareket ederek yol boyu ısı kaybedip kalıp dolumu tamamlanmadan bazı bölgelerde katılaşmalar meydana gelecektir. İnce kesitli bir yolluk seçimi yapıp hızlı gerçekleştirilen dolumda ise kalıp içindeki metal çok hızlı hareket eder. Hızlı hareketlenme sonrası metal çarpışmalarından oluşan hava tanecikleri porozite ismi verilen boşluk hatalarını oluşturur. Çok hızlı hareket eden metal kalıbın yüzeyinde aşınmalar meydana getirerek elde edilen ürünlerin bozuk yüzeyli olmasına sebep olacaktır (Aksel, 2008).

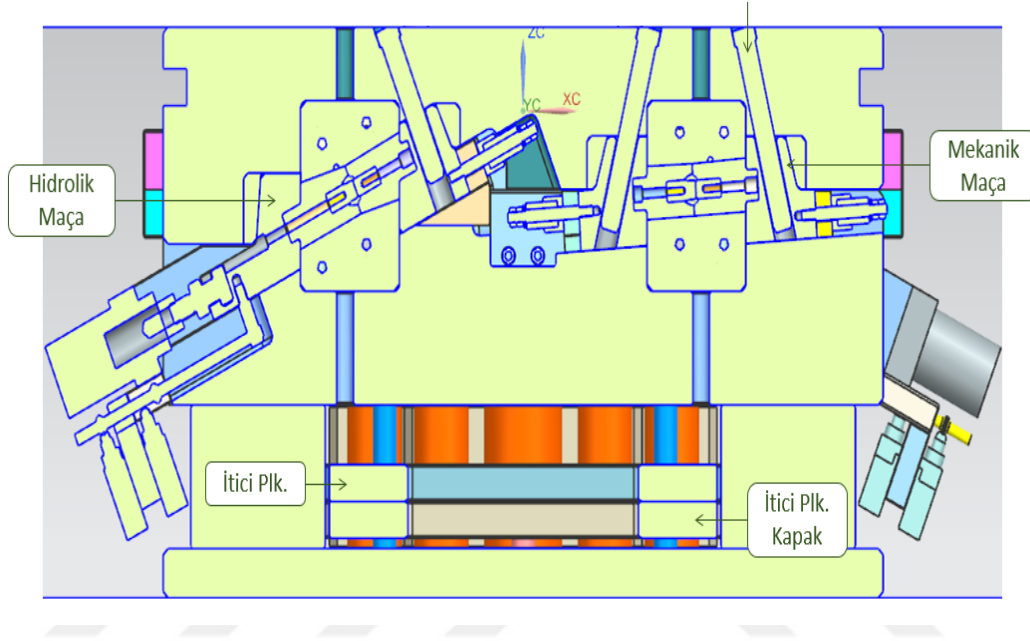


Şekil 2.12. Bir döküm parçasına ait yolluk ve hava cebi gösterimi



Şekil 2.13. Bir döküm parçasına ait malzeme ve yolluk giriş alanı

Basınçlı döküm kalıplarında, elde edilmek istenen parça üzerindeki delik, kanal ve boşluk gibi formları oluşturmak için maçalar kullanılmaktadır. Şekil 2.14’de gösterilen hareketli (hidrolik) ve sabit maçalar olmak üzere iki çeşittir. Sabit maça tercih edilecekse maçanın eksenini kalıbın açılma eksenine paralel olmalıdır. Hareketli maçalar ise ayırma yüzeyine paralel olmakla birlikte bazı durumlarda ayırma yüzeyine açılı olarak da yerleştirilebilir (Ertürk, 2010).



Şekil 2.14. Maça ve İticiğin Gösterimi

İtici ana fonksiyonu kalıbın açıldığı sırada parçanın dışarıya atılmasını sağlayan elemanlardır. Basınçlı döküm kalıbın önemli öğelerinden biri olan iticiler şekillenen parçanın çıkarılması sistemini oluşturur. Genellikle erkek kalıp tarafında bulunan iticiler seçilirken çıkartılacak parçanın dizaynına, estetik görünüşüne, üretim ihtiyaçlarına göre belirlenir. İticilerden parçaya zarar vermeden kalıp dışına atılması beklenir (Aslan, 2007).

Kalıbın metal ile doldurulması sırasında dalıcı piston tarafından hareket ettirilen metal hızla hareket etmesinden dolayı kalıp cidarlarına çarpar. Bu çarpışmalar esnasında sıvı metal türbülanslar yada hava kabarcıkları içeren girdaplar oluşmaktadır. Oluşan bu kabarcıkların tahliye edilmesi gerekmektedir. Bu tahliye işlemi hava cebi ismi verilen kalıpta oluşturulan boşluklarla sağlanmaktadır. Tasarımı özenle seçilmesi gereken hava ceplerinin dolumu kalıbın dolduğu ana ve yüklenilen basıncın son anına denk gelmelidir. Hava cebi tasarımı yapılırken yolluktan ilerleyen sıvının ürünü tam doldurmadan hava cebini doldurmamasına dikkat edilmelidir. Hava cepleri, kalıp

içerisinde ilerleyecek metalin tahmini izleyeceği yol belirlenerek farklı sıvı jetlerinin karşılaştığı noktaların tam karşısına ve kalıp cidarlarının keskin noktalarına yerleştirilmelidir (Aksel, 2008).

Başarılı bir basınçlı döküm için proses parametrelerinin uygun değerlerde seçilmesi gerekir. Proses parametreleri döküm sıcaklığı, basıncı ve katılma süresidir. Bunun yanında kalıp ve malzeme parametreleri de önemlidir. Yönteme etki eden faktörler 3 grupta sıralanabilir. Bunlar:

- Uygun basınç oluşturma ve bırakma gibi faktörlerle doğru çalışan döküm mekanizması
- Doğru şekilde tasarlanmış ve imal edilmiş kalıp
- Uygun alaşım

Bu özellikler tek başına değil bütün olarak değerlendirilmeli, bütünsel olarak dökümün koordinasyonu sağlanmalıdır (Aslan, 2007).

2.4. Literatürde Basınçlı Döküm Prosesi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Wang ve ark. (2022) çalışmalarında ADC12 alüminyum alaşımından yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen bir parçanın proses parametrelerinin eriyik doldurma ve besleme üzerindeki etkisini incelemektedir. Farklı metal sıcaklığı ve piston hızı ile yapılan denemeler simülasyonlar ile karşılaştırılmış bu karşılaştırmalar ile parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerde piston hızlı vuruş hızının (2.ve 3.faz) eriyik dolumu ve parça besleme üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğu görülmüştür. Eriyik sıcaklığının düşük olması durumunda gaz gözenekliliğinin kolayca oluşabileceği belirtilmiştir. Piston yavaş vuruş hızının (1.faz) gaz gözenekliliği üzerindeki etkisini enjeksiyon odasında bulunan havanın metal içine karışmasıyla belirtmiştir.

Jarfors ve ark. (2022) çalışmalarında farklı doldurma aşamaları ile son basınç ayarları arasındaki geçişleri anlamak için proses ayarları ile kalıp içi koşullar arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Basıncın zaman içindeki gelişimini dolaylı olarak ölçmek ve kalıp içi koşulları incelemek ve doldurma sürecini izlemek için kalıp boşluğuna bir basınç sensörü yerleştirmiştir. Basınç-zaman profilini analiz ederek maksimum basınç ve basıncın ivmesi araştırmıştır. Çalışma sonucunda, artan yoğunlaştırma basınçlarının kullanımının döküm sağlamlığı için olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Yüksek

yoğunlaştırma basıncının ikinci aşama doldurma hızından daha önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Şimşek (2021) $AlSi9Cu3$, $AlSi12Cu1Fe$ ve $AlSi12Fe$ alaşımları için gaz giderme işleminin poroziteye olan etkisini karşılaştırarak incelemiştir. Gaz giderme işlemi sonrası alaşımlar içerisinde bulunan hidrojen miktarının ağırlıkça %5 ile %11 arasında azalma gösterdiğini tespit etmiştir. $AlSi9Cu3$ alaşımı ile farklı basınç değerlerinde üretilen numunedeki porozite miktarının basınç artırıldıkça azaldığını tespit etmiştir.

Sapmaz (2021), çalışmasında $AlSi12(Fe)$ alaşımına Sr (stronsiyum) modifikasyonu yaparak Magmasoft ve click2cast yazılımları kullanılarak kalıp dolum ve katılaşma analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen $AlSi12(Fe)$ alaşımı özelinde artan Sr miktarına bağlı olarak alaşımın hem mikroyapısal hem de mekanik özelliklerinin olumlu etkilendiği görülmüştür. Yapılan çentik darbe testinin sonuçlarına göre Sr miktarının artması ile alaşımın enerji sönümleme yeteneği iyileştirilmiştir. 160 ppm Sr kullanımı ile $AlSi12(Fe)$ alaşımının süneklik özelliği belirgin bir şekilde geliştirildiği sonucu elde edilmiştir.

Zhang ve ark (2021) yaptıkları çalışmada piston hareket eğrisi profillerinin değiştirilerek mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. A356 alüminyum alaşımı için yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen çekme numuneleri, deneysel ve modelleme sonuçlarına dayalı olarak incelenmiştir. YBD prosesinin simülasyonu ile gözeneklilik tahmini yapılmış ve mikro yapı analizi ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda piston hızının artması serbest yüzey parçalanması ve taşınmasından kaynaklanan oksitlerin dağılımının daha homojen olmasına sebep olduğu görülmüştür. Azaltılmış oksit dağılımı, döküm numunelerindeki çekme özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur. Buna göre piston hızının artması gözeneklilik dağılımında bir azalma eğilimine yol açtığı görülmüştür

Dou ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada kalıp ısıtma, termal kalıp çevrimi, bilyeli kovan, ön doldurma, yavaş / hızlı enjeksiyon, kalıp doldurma, katılaştırma ve yoğunlaştırma dahil olmak üzere tüm yüksek basınçlı döküm proses parametrelerini, bir Al-Si alaşımı için Procast programı yardımıyla nümerik olarak araştırmışlardır. Model güvenilirliğini daha da doğrulamak için simülasyonla aynı koşullar altında

gerçekleştirilen bir yüksek basınçlı döküm döngüsü sırasında kalıp yüzey sıcaklığı FLIR T6xx serisi kızılötesi kamera ile ölçülmüştür. Hesaplanan kalıp yüzey sıcaklığı ile ölçülen sonuç arasındaki karşılaştırma yapılmış, sonuçların benzer olduğu görülmüştür. Üretilen çekme çubuklarının incelenmesi neticesinde giriş bölgeleri zamanından önce katılaşır, erken katılaşma oluşumu yoğunlaştırma basıncının etkin iletimini engelleyecek ve katılaşan alaşımın yetersiz beslenmesine neden olacağı belirtilmiştir. Katılaşma kusurlarının oluşumunu ve dağılımını kontrol etmenin, YBD prosesiyle elde edilen parçanın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kilit faktör olduğu belirtilmiştir.

Patnaik ve ark. (2020) yapmış oldukları çalışmada bir otomobilin krank kutusunun yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretimini incelemiştir. Üretim için gerekli tasarım parametreleri değerlendirilerek bir yüksek basınçlı döküm kalıbı geliştirmenin adım adım yöntemi açıklanmıştır. Parametreler deneysel olarak hesaplanmış ve kalıp doldurma simülasyonları MAGMASoft programı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonlar, sonucunda doldurma sıcaklığı, dolum süresi, katılaşma, hava basıncı ve sıkışmanın tahmin edilmesi ve son olarak soğutma sistemi değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına bakarak yapılan modifikasyonlar ile doldurma süresinde azalmalar elde edilmiş, doğru soğutma biçiminin parça üzerindeki olumlu etkisi görülmüştür.

Gökçil (2019) çalışmasında bir hava kurutucu parçasına 3 farklı yolluk tipi ve her parçaya farklı hava cepleri ekleyerek tasarım yapmıştır. Yapılan tasarımlar Magmasoft sonlu elemanlar programı yardımı ile farklı sıcaklık, enjeksiyon basıncı, ikinci faz hızı için simülasyonlar yapılarak optimum kalıp tasarımı ve proses verileri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak üretilen parçaların simülasyonlar ile benzer sonuçlar gösterdiği görülmüştür. Çalışma sonunda enjeksiyon basıncının katılaşma sürecine etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Kenar (2019) tarafından yapılan çalışmada $AlSi12Cu1Fe$ ve $AlSi10MgFe$ basınçlı döküm alaşımları seçilerek yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen 2 parçanın gaz atma bölgelerinde gerçekleştirilen değişikliklerin parça döküm kalitesine etkileri incelenmiş ve simülasyon çalışmalarıyla değerlendirilmiştir. Gaz atma yüzey alanları artırıldığında soğuk birleşme, baloncuk, porozite gibi döküm hatalarının azaldığı tespit edilmiştir.

Aksoy (2017) tarafından yapılan çalışmada hava fren kompresör kapaklarında meydana gelen aşınma performanslarını iyileştirmek için farklı kalıp tasarımları gerçekleştirilmiştir. Magmasoft programında optimum kalıp tasarımını elde etmek için 12 farklı kalıp tasarımı denenmiş simülasyon sonuçlarından yola çıkılarak üretilen kalıplarda AlSi12 (Etial-140) alaşımına farklı oranlarda Mg eklenip üretilen numunelerin mikro yapı, aşınma ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mg eklenmesiyle çekme mukavemetinde artış sünekliğinde ise azalma meydana geldiği görülmüştür. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde yük altında uygulanan testlerde AlSi12 (Etial-140) alaşımına göre 3 kat performans artışı sağlanmıştır.

Toptaş (2014) tarafından yapılan çalışmada dövme yöntemiyle üretilen bir tabanca gövdesinin uygun hammadde ile basınçlı döküm yöntemiyle üretilebilirliği araştırılmıştır. Uygun hammadde seçimi için deneyler gerçekleştirilmiştir. 6082 Al, T5 ve T6 ısıtma işlemine tabi tutulduğunda elde edilen özellikler yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ürünlerin kalıptan çıktıktan sonra su verme işlemiyle paralel mukavemet değerlerine ulaşmıştır. Vakumlu ve vakumsuz üretimler gerçekleştirerek vakumun parça içerisinde oluşan boşlukları kaldırdığı tespit edilmiştir.

Yalçın ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada, döküm basıncı, döküm hızı ve ürün soğutma şekli değiştirilerek 8 farklı parametre denenmiştir. Etial 150 alüminyum alaşımının basınçlı dökümünde enjeksiyon parametreleri enjeksiyon hız oranı: %100, enjeksiyon basıncı: 150 bar olarak ayarlandığında ve çıkan ürünlere sulu soğutma uygulanması durumunda parça kalitesinde bir artış olduğu tespit edilmiştir. Üretilen numunenin suda soğutulmasıyla dayanımın %3 arttığı görülmüştür.

Şirin (2010) tarafından yapılan çalışmada trafo faz yönü değiştirme ve voltaj çevirici başlığı isimli parçanın üretimindeki döküm hatasının tespiti için Adaptive Thermal Analysis System kısaltması olan ATAS sistemi ile termal değerler ölçülüp sağuma eğrileri şeklinde sıcaklık değişimleri izlenebilmiştir. Çalışmada, daha gerçekçi bir yaklaşım sağlamak için ATAS'tan elde edilen veriler simülasyon programına girilmiş ve farklı basınç ve sıcaklıklarla analizler yapılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler ışığında üretilen numunelerin hata barındırmadığı tespit edilmiştir. Çalışmaların sonunda termal analiz cihazları, döküm alaşımıyla ilgili sağuma eğrisi, hacimsel çekme oranı vb. gibi gerçek döküm ortamındaki parametrelere çok yakın sonuçlar sunduğu için simülasyonların gerçek döküm şartlarının belirlenmesinde önemli rol oynadığı tespit edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada basınçlı döküm yöntemi ile alüminyumdan üretilen süspansiyon parçası denge çubuğunun plastik şekil değiştirme davranışına proses parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda AYD Otomotiv Firmasında dövme yöntemiyle üretilen Şekil 3.1’de görülen denge çubuğunun, daha uygun maliyetle imal edilebilmesi için döküm teknolojisi ile üretilmesi ve bunun için gerekli olan optimum parametrelerin araştırılması hedeflenmiştir. Parçanın üretiminde aşılması gereken en büyük problem döküm yöntemiyle üretilen parçada şekillendirilebilirliğin az olması nedeniyle kapak kapama işlemi sırasında kırılmalar yaşanmasıdır. Döküm parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkisini araştırmak için üç farklı döküm sıcaklığı, döküm basıncı ve hızında Taguchi L9 tasarım planına göre deneyler yapılarak, numunelerin yüzde uzaması, kapak kapama işlemindeki başarısı, kapak çıkma kuvvetine göre sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 3.1 Alüminyum döküm yöntemiyle üretilen denge çubuğu

Döküm yönteminde şekillendirilebilirliği döküm simülasyon yazılımı Anycasting ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon verileri neticesinde optimum döküm parametreleri ve kalıp tasarımını teyit etme çalışmaları yüksek basınçlı döküm hattında gerçekleştirilmiştir.

3.1. Malzeme

Bu çalışmada Çizelge 1’de kimyasal bileşimi verilen, alüminyum döküm yönteminde sıklıkla tercih edilen A356 serisi Al-Si7Mg alaşımı kullanılmıştır. Bu malzeme, akıcılığının yüksek olması ve yeterli derecede dayanım sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca malzeme sahip olduğu yeterli süneklikle plastik şekil verme açısından da uygun bir kullanım sunmaktadır.

Çizelge 3.1. A356-0 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu

Si	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg	Ti	Diğer	Al
6,5-7,5	0,20	0,2	0,1	0,1	0,25-0,45	0,20	0,15	Kalan

3.2. Döküm Simülasyonu

Teknolojinin gelişmesi ile artan rekabet ve zaman yönetimi birçok alanda değişikliklere neden olmuştur. YBD prosesinde deneme yanılma yöntemi ile kalıpların üretilmesi zaman ve maddi kayıplara neden olmaktadır. Üretim maliyetleri oldukça fazla olan kalıpları üretmeden önce öngörüler oluşturmak için döküm simülasyon programları kullanılmaktadır. Bu programlar yardımı ile ilerleyen akışkanın hızı, türbülanslar, soğuk birleşme noktaları dolum analizi gibi birçok sonuç hakkında öngörü sunmaktadır.

Basınçlı döküm yönteminde simülasyonlar, parametre ve kalıp dizaynı için tercih edilen popüler bir yöntemdir. Simülasyon programları teknik personellere üretimle ilgili doğru karar almaları için fikir sunmaktadır. Simülasyonlar karşılaşılan problemlere yardımı ile kısa zamanda doğru çözümler oluşturmaya yardımcı olur.

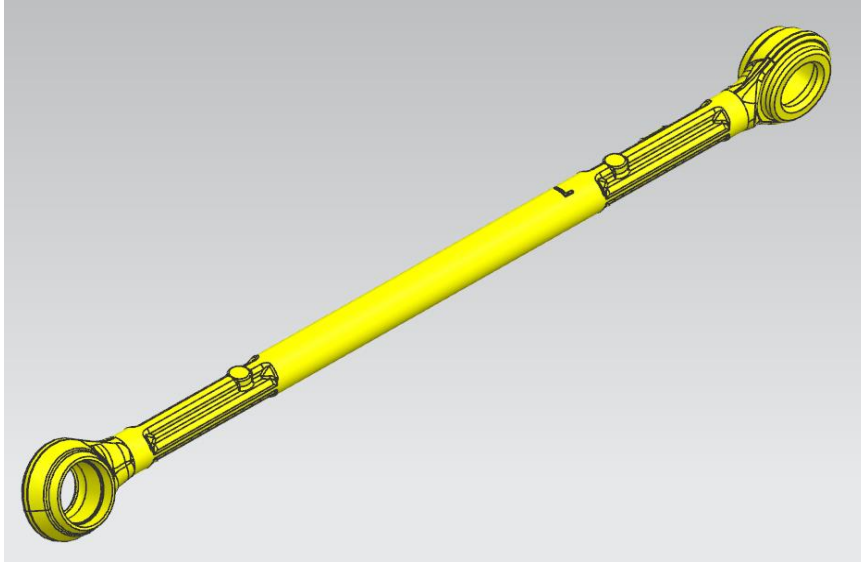
Bu çalışmada kalıp tasarımında farklı yolluk ve hava ceplerine ait durumlar, kalıp dolumu, porozite, katılaşma ve türbülans gibi performans kriterlerini incelemek için ANYCASTING döküm simülasyon programı yardımı ile simüle edilmiştir. Simülasyon neticesinde elde edilen veriler yorumlanarak yolluklarda ve hava ceplerinde modifikasyonlar yapılmıştır. Modifikasyon neticesinde optimum kalıp tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır.

Simülasyon çalışmalarında maden sıcaklığı basınç ve hız parametreleri tüm denemeler için sabit tutularak yolluk hava ceplerinde değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmasında maden sıcaklığı 700°C, kalıp içi basınç 1000 bar ve hız 2 m/s değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

3.3. Ürün ve Kalıp Tasarımı

Basınçlı döküm yönteminde kalıp tasarımı yapılırken üretimin gerçekleştirileceği makine kapasitesi ve şartları göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek basınçlı döküm yönteminde kalıp çalışırken kalıp yüzey alanı fazla olduğunda iç basınçtan kaynaklanan kuvvet nedeniyle kalıpların açılma ihtimali vardır. Bu nedenle kalıpta elde edilecek ürün sayısı, pres kapasitesi ve çalışma basıncı dikkate alınarak belirlenmelidir. Diğer taraftan makine basınç kapasitesinin yeterli olmadığı bir kalıp tasarımı yapılırsa kalıp içerisinde bulunan eriyik ürünü tam dolduramayacak, yüzeyde ve malzeme iç yapısında boşluklar oluşacaktır.

Bu çalışmada seçilen ürün binek grubu araçların süspansiyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan denge çubuğu parçası olmuştur. Denge çubuğunun, referans alındığı ürünle aynı ölçülere sahip olacak şekilde CAD yazılımı vasıtasıyla 3B modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.2). Ardından kalıp tasarımı aşamalarına geçilmiştir.



Şekil 3.2 CAD yazılımı vasıtasıyla oluşturulan 3D katı model

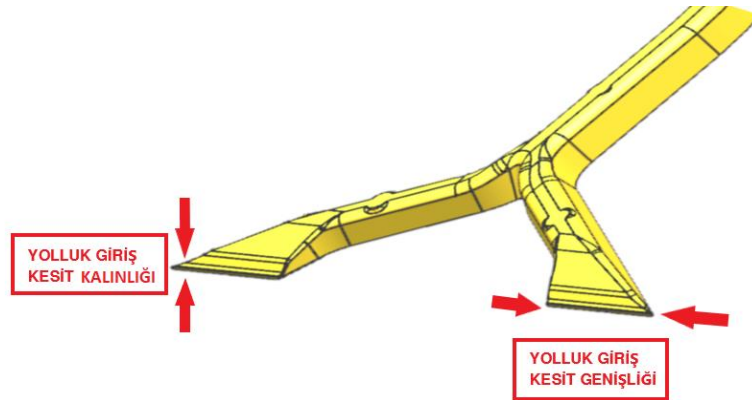
Basınçlı döküm yönteminde kalıp tasarımı yapılırken ürünün ağırlığı, bir çevrimde kaç adet ürün elde edileceği, ürünün formu baz alınarak kalıp tasarımı yapılmalıdır. Bu çalışmada deneylerin gerçekleştirileceği pres kapasitesi ve basınçlar

göz önünde bulundurularak bir çevrim sonrasında 2 adet ürün elde edilecek şekilde kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında kalıp tasarımı yolluk ile ilgili olarak yolluğun kalıp boşluğuna kaç noktadan giriş yapmasının uygun olduğu ve kalıp boşluğuna giriş kesit alanı önemlidir. Hava cebi ile ilgili olarak da yeri ve büyüklükleri önem arz etmektedir. Sayılan kalıp tasarım parametrelerinin uygun değerleri ve ölçüleri döküm simülasyonları yardımıyla belirlenmiştir.

3.3.1. Yolluk Tasarımı

Ergimiş akışkanın, kalıp boşluğuna enjekte edilmesi sırasında geçtiği kanallara yolluk ismi verilir. Yolluklar elde edilmek istenen parçayı doğrudan beslerler. Yolluklar elde edilmek istenen ürünün formuna ve malzemesine göre tasarımları değişmektedir.

Yollukların kalıba giriş kesitlerinde genişlikler ve kalınlıklar (Şekil 3.3) belirlenirken üretilmek istenen ürünün geometrisi ve ağırlığı göz önünde bulundurulur. Kesit kalınlıklarının az yada fazla olması ürün yapısına etki etmektedir. Geleneksel yüksek basınçlı dökümde kesit kalınlıkları genellikle 0.25-4 mm aralığında alınmaktadır (Gökçil, 2016). Yollukların parçaya girişleri ince olmasıyla yüzey kalitesi kötüleşmekte ve parçada porozite ihtimali artmaktadır. Kalın bir girişte ise yollukların kırılması ve yüzeylerin düzeltilmesi zor olmakta ve bu durum ekstra maliyetlere sebep olmaktadır (Kenar, 2019).

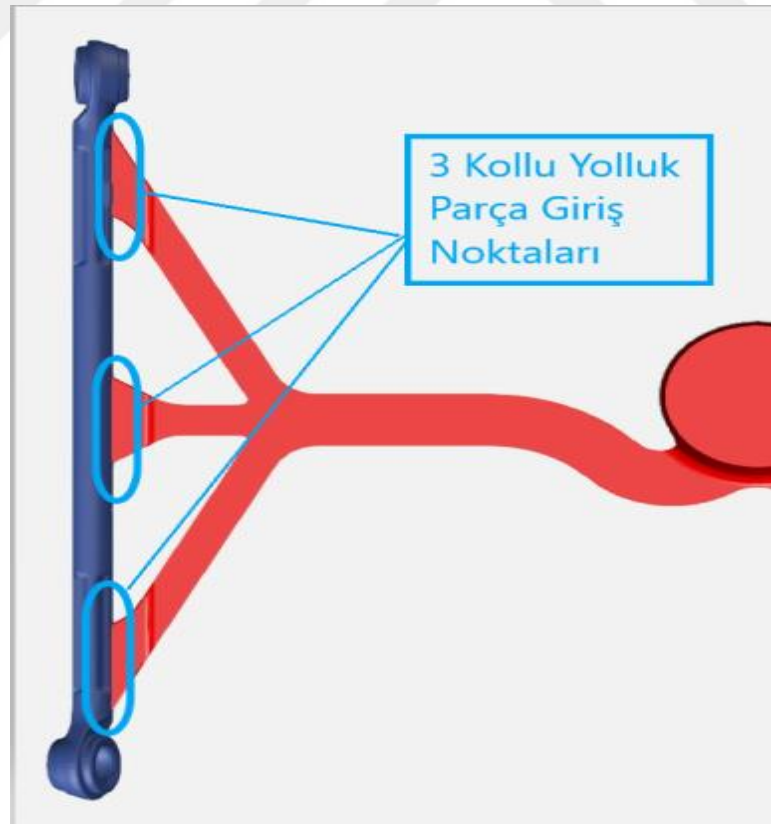


Şekil 3.3 Yolluğun kalıba açılan giriş kesiti kalınlık ve derinlik gösterimi

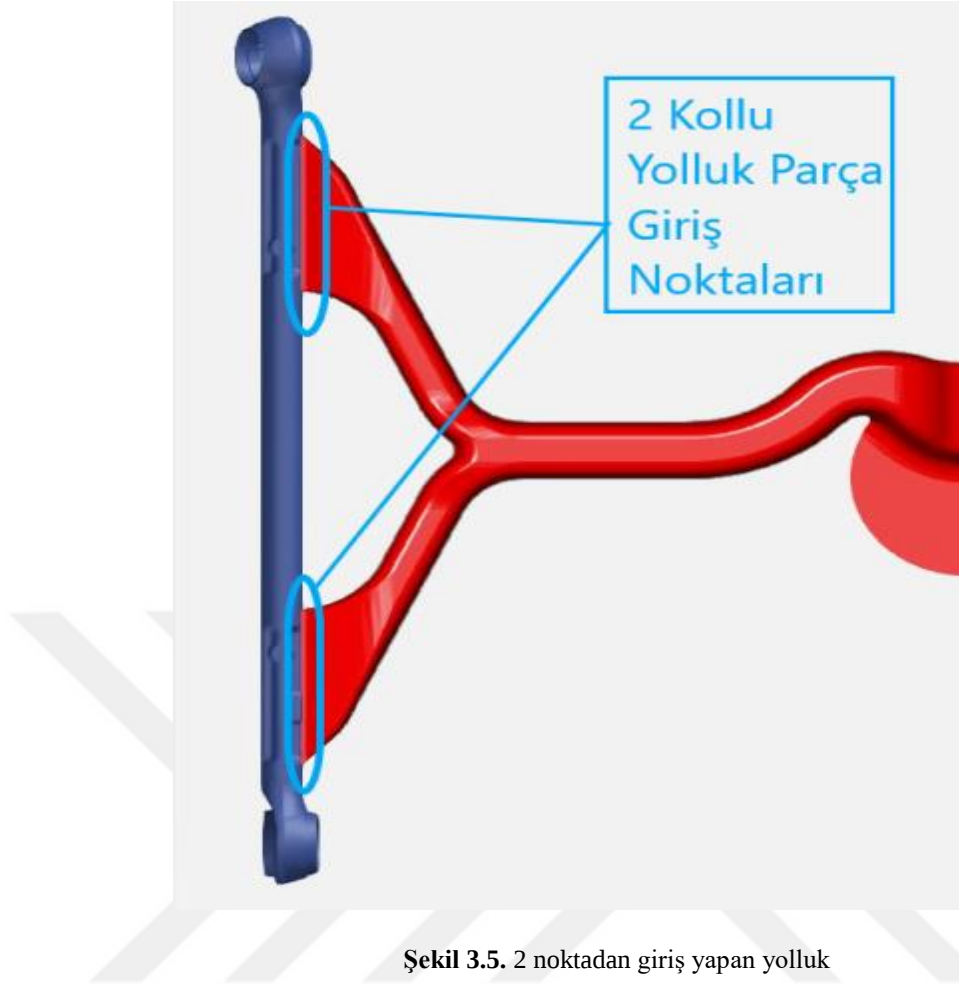
Yolluk giriş kesitinin genişliği de üretilmek istenen parça için önemlidir. Doğru yolluk tasarımı yapılmaması sebebiyle kalıp dolum hızı uygun değerlerde elde edilememektedir. Kesit genişliğinin fazla olması durumunda akış hızı azalmakta böylece metal uzun süre hareket ederek yol boyu ısı kaybedip kalıp dolumu

tamamlanmadan bazı bölgelerde katılaşmalar meydana gelmektedir. Kesit genişliğinin az olması durumunda da akış hızı artmakta ve ergimiş metalin türbülanslı akışı ve kalıp cidarlarına çarpışmalarından dolayı oluşan hava tanecikleri, porozite ismi verilen boşluk hatalarını oluşturmaktadır. Ayrıca çok hızlı hareket eden metal kalıbın yüzeyinde aşınmalar meydana getirerek elde edilen ürünlerin bozuk yüzeyli olmasına sebep olmaktadır (Aksel, 2008).

Yukarıda sayılan sebeplerle yolluğun parça kalıp boşluğuna giriş yaptığı kesit optimum olarak tasarlanmalıdır. Çalışmada yolluk tasarımı yapılırken malzemenin giriş yapacağı kesitin kalınlığı tecrübelerle göre 1 mm olarak seçilmiştir. Yollukların parça kalıp boşluğuna giriş noktalarının sayıları ve kesit genişlikleri simülasyonlarla araştırılmıştır. Bu kapsamda kalıp boşluğuna Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilen 2 ve 3 noktadan girişli yolluklar tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarında 2 noktadan girişli yollukların daha az hatalı sonuçlar barındırması sebebiyle 2 noktadan girişli yolluk seçimi gerçekleştirilmiştir. Yolluk kesit genişlikleri için 2 adet 75 mm giriş kesitli, 2 adet 60 mm kesitli tasarım için simülasyonlar yapılarak optimum yolluk tasarımı belirlenmiştir.



Şekil 3.4. 3 noktadan giriş yapan yolluk



Şekil 3.5. 2 noktadan giriş yapan yolluk

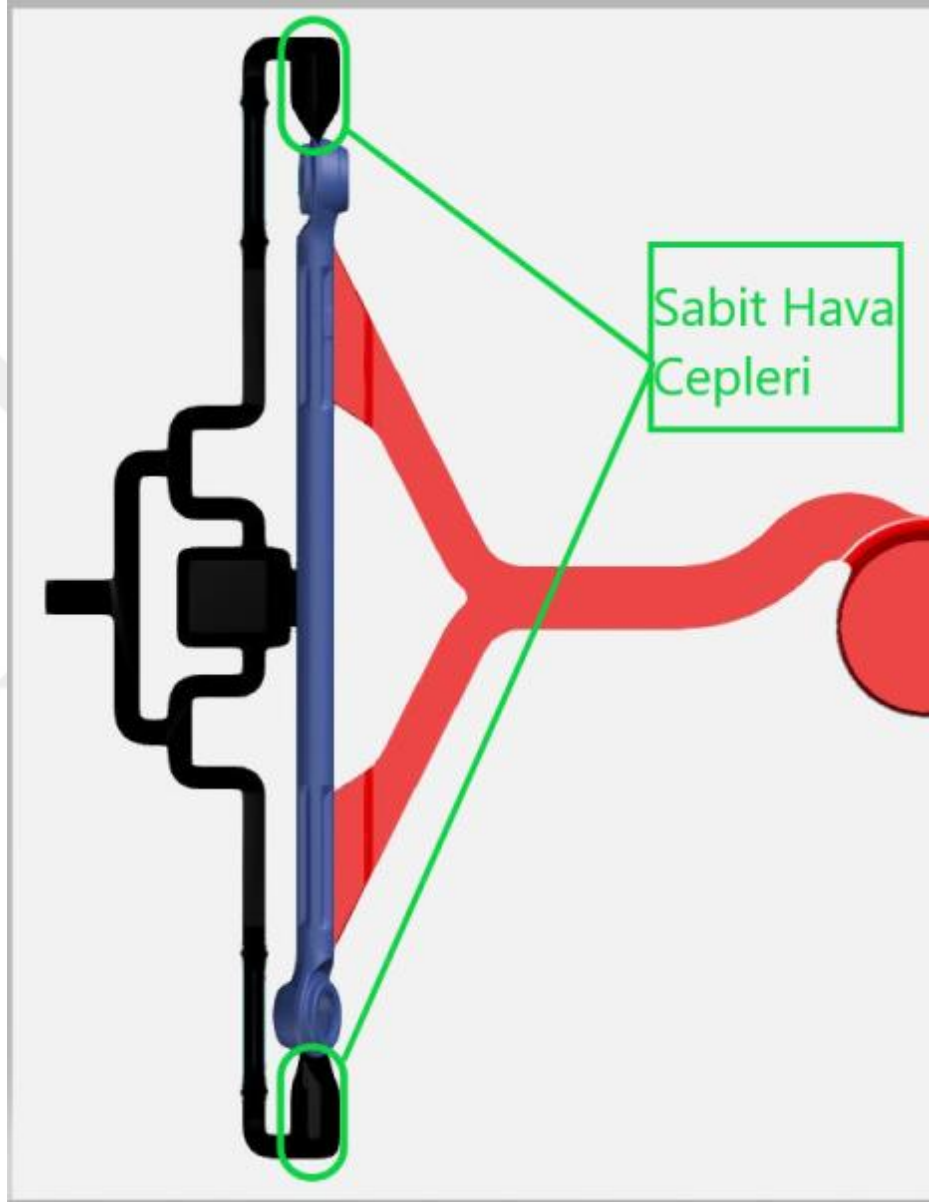
3.3.2 Hava Cepleri Tasarımı

Üretim gerçekleşirken ergimiş metal, kalıp dolumu sırasında, karşılaştığı kalıp cidarlarına çarpıp durmaktadır. Bu çarpışmalar sonucunda hava kabarcıkları barındıran girdaplar ve türbülanslar meydana gelir. Oluşan bu kabarcıklar ürün dışına tahliye edilmesi gerekmektedir. Basınçlı döküm prosesinde kalıp içindeki hava parça içerisinde kalır ise porozite ismi verilen döküm hatalarına sahip parçalar oluşabilir. Bu tahliye işlemleri hava cepleri ve hava tahliye kanalları ile yapılmaktadır.

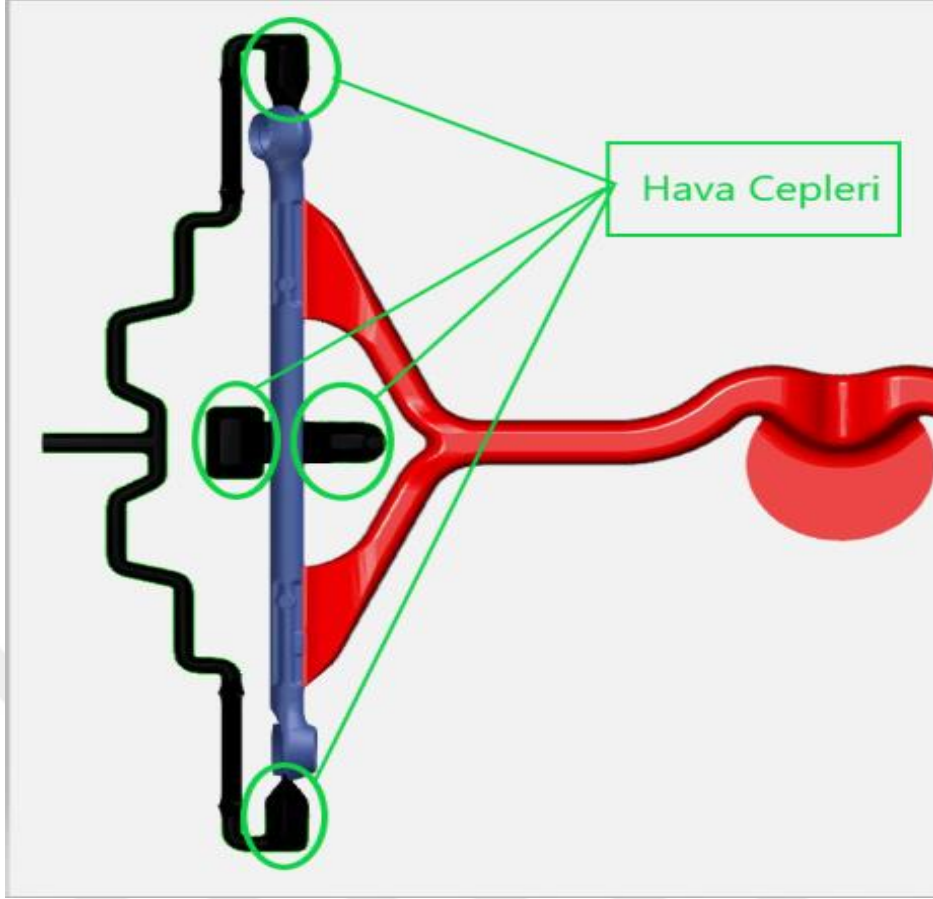
Elde edilmek istenen ürünün dolumu tamamen gerçekleşmeden hava cebi dolumun gerçekleşmemesine dikkat edilmelidir. Hava ceplerin türbülansların olduğu bölgelerin karşısına kalıp geometrisine bağlı olarak yerleştirilmelidir. Hava cepleri sıvı metalin akış yönüne göre yerleştirilir. Kalıp içinde yer alan keskin köşelerde türbülans oluşturacağı için karşılıklarına hava cebi yerleştirilmesi uygun olmaktadır.

Bu çalışmada plastik şekil verme işleminin uygulanacağı denge çubuğunun görülen kafa bölgelerinde porozite olmaması istenmektedir. Bu nedenle hava cepleri

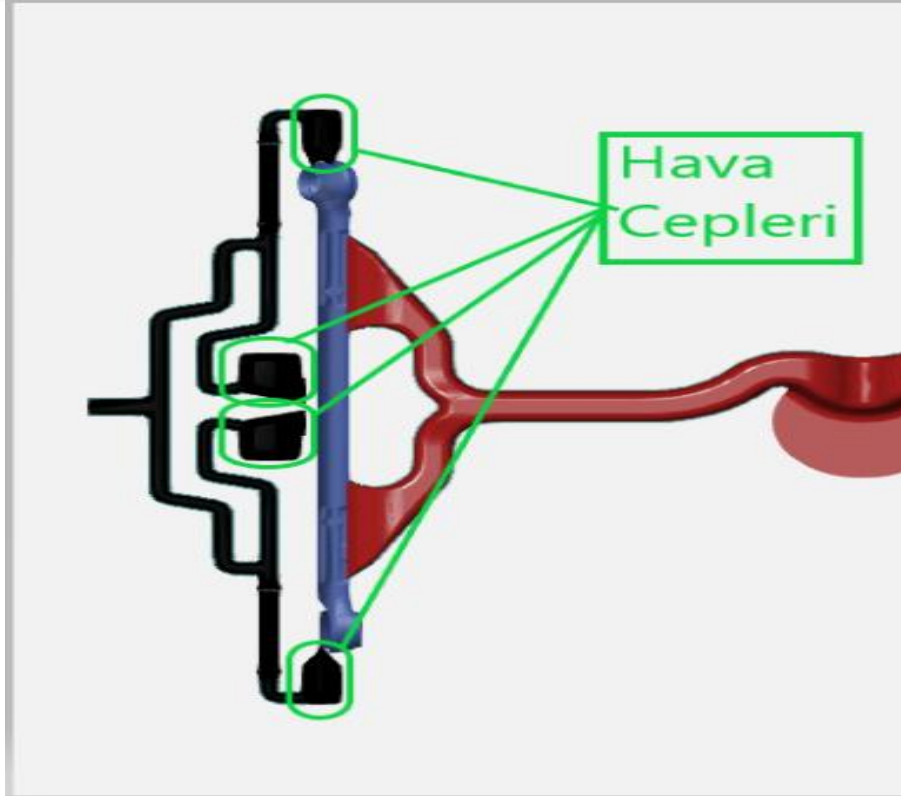
tasarımı yapılırken ürünün plastik şekil verme işleminin uygulanacağı denge çubuğunun kafa bölgelerine öncelikli olarak Şekil 3.6’da görülen hava cebi yerleştirilmiştir. Bu hava ceplerinin konumu sabit olduğu için Şekil 3.7’de 4 adet asimetrik dağılımlı hava cebi, Şekil 3.8’de 4 adet simetrik dağılımlı hava cebi ve Şekil 3.6’da 3 adet simetrik dağılımlı hava cebi için simülasyonlar yapılmıştır.



Şekil 3.6 Sabit tutulan hava cepleri



Şekil 3.7 4 adet asimetrik dağılımlı hava cebi



Şekil 3.8 4 adet simetrik dağılımlı hava cebi

3.4. Döküm İşlemi

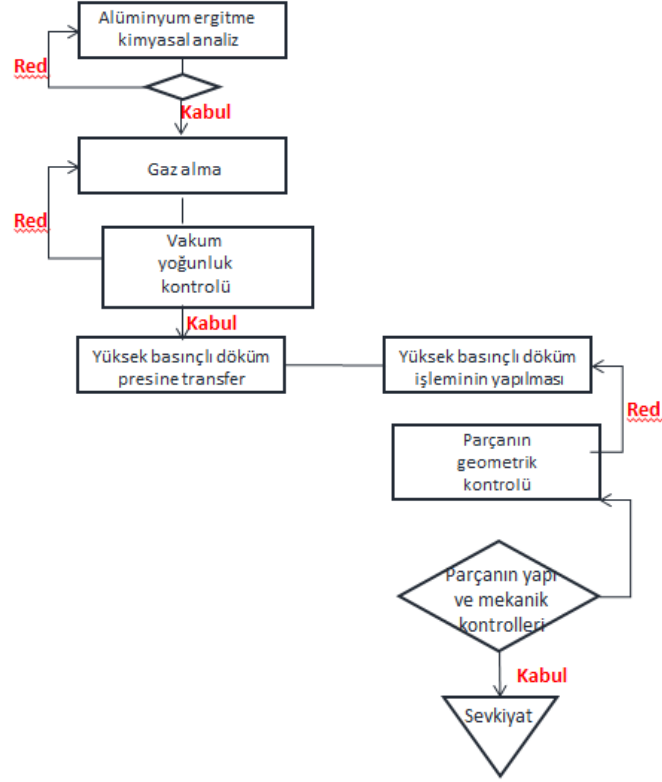
Kalıp tasarımının uygunluğu döküm simülasyonları ile görüldükten sonra kalıplar Şekil 3.9'te görüldüğü gibi kalıp boşluğuna iki koldan giriş, giriş kesiti 1 mm kalınlık ve 2x60 mm genişliğinde olacak şekilde ve ortada bir hava cebi olacak şekilde imal edilmiştir.



Şekil 3.9 Yüksek basınçlı döküm makinasına bağlanmış imal edilmiş kalıp

YBD prosesi Şekil 3.10'de görülen akış şemasına göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre alüminyum alaşımı Şekil 3.11'da görülen 600 kg sıvı maden kapasiteli, devirmeli tip doğalgazlı fırına külçeler halinde eklenerek 700°C'de ergitilmiştir. Fırında bulunan ergiyik metalden alınan numuneler spektrometre yardımıyla kimyasal analize tabi tutularak içindeki element seviyeleri kontrol edilerek istenilen malzeme uygunluğu kontrol edilmiştir.

ALÜMİNYUM YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM



Şekil 3.10. YBD prosesinin akış şeması



Şekil 3.11 Devirmeli tip ergitme fırını

Fırında eritilen metal içerisinde çözülmüş hidrojen gibi istenmeyen gazlar bulunmaktadır. Bu gazları döküm işlemi öncesi tahliye edilmesi gerekmektedir. Ergitilmiş metal Şekil 3.12’de görüldüğü gibi 250 kg kapasiteli bir pota yardımıyla gaz

alma işlemine tabi tutulmuştu. Gaz alma işlemi sırasında Azot gazı kullanılarak 180-220sn gaz alma süresince 600RPM şaft dönme hızıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12 Azot gazı kullanılarak gerçekleştirilen gaz alma işlemi

YBD işleminde ergitilmiş metalin gazlardan arınmış olması ve saflığı, doğrudan ürüne etki etmekte ve büyük önem teşkil etmektedir. Sıvı faza geçişi sağlanmış alaşımın gaz içeriyor olması ve saflık durumu ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçümler vakum yoğunluk test cihazları ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13). Yoğunluk ölçümü için 2 farklı numune kullanılmıştır. 1. numune vakum basıncı altında 2. numune ise atmosfer basıncında katılaştırılmıştır. Katılaşma sonrası her iki numune suda soğutularak ağırlıkları ölçülmüş ve tam yoğunlukları belirlenmiştir. Her iki numune arasındaki yüzdelik yoğunluk farkı ne kadar düşük ise o kadar temiz ve saf bir numune elde edilmiş demektir.



Şekil 3.13 Vakum yoğunluk test cihazı

Yeni nesil basınçlı döküm makinalarında enjeksiyon işlemi PLC kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyon işlemi 3 fazda gerçekleşmektedir (Duran, 2014).

- 1.Faz: Yavaş ilerleyen ergiyik metal kalıba giriş başlangıç noktasındadır.
- 2.Faz: Ergiyik metal kalıp içerisine kısa bir sürede yüksek hız ile iletilir.
- 3.Faz: Dolmuş kalıp yüksek basınç ile beslenir.

Yüksek basınçlı döküm işlemi soğuk kamaralı yatay enjeksiyon sistemine sahip Şekil 3.14’de gösterilen Era press marka makine ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak pres 7720 kN enjeksiyon kuvvetine sahiptir. Erimiş metali kalıplara basan piston çapı 60 mm’dir. Makinenin basınç, hız ve sıcaklık kontrollerinin ayarlandığı enjeksiyon değerleri kayıt altında tutulmuştur.



Şekil 3.14 Soğuk kamaralı yatay enjeksiyon presi

Literatür incelendiğinde, enjeksiyon basıncı tanımında bir karmaşa olduğu görülmektedir. Bazı yayınlarda basınç parametresi olarak haznenin içerisindeki ergiyik metalin basıncı alınırken, bazı yayınlarda enjeksiyon makinesinde hidrolik silindirin yağ basıncı alınmıştır. İki basınç arasında hidrolik piston alanı ve hazne içerisindeki piston alanı oranı kadar bir fark bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, enjeksiyon basıncı olarak, pistonun haznede oluşturduğu basınç (specific injection pressure) tanımlanmaktadır.

Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi üçer seviyeye sahip olan sıcaklık, ikinci faz hızı ve basınç parametreleri için Taguchi L9 deney tasarım tablosu Çizelge 3.3’teki gibi oluşturulmuş ve 5 tekrarlı olarak numune üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Belirlenmiş olan ön parametre seviyeleri

	1	2	3
Sıcaklık (°C)	700	720	740
Hız (m/s)	2	2,5	3
Basınç (bar)	850	1010	1290

Çizelge 3.3. Taguchi L9 deney tasarım tablosu

Deney No	Sıcaklık (°C)	Hız (m/s)	Basınç (bar)
1	700	2	850
2	700	2,5	1010
3	700	3	1290
4	720	2	1010
5	720	2,5	1290
6	720	3	850
7	740	2	1290
8	740	2,5	850
9	740	3	1010

Deney parametreleri değişikliği yapıldıktan sonra istenilen verilerin rejime girmesi için her ayar sonrası 3’er baskı alınmış olup bu baskılar deneyler için kullanılmamıştır. Makine rejime girdikten sonra baskılar yapılarak ürünler elde edilmiştir(Şekil 3.15).



Şekil 3.15 9 Farklı deney parametresi için üretilen deney çubukları

Elde edilen ürünler;

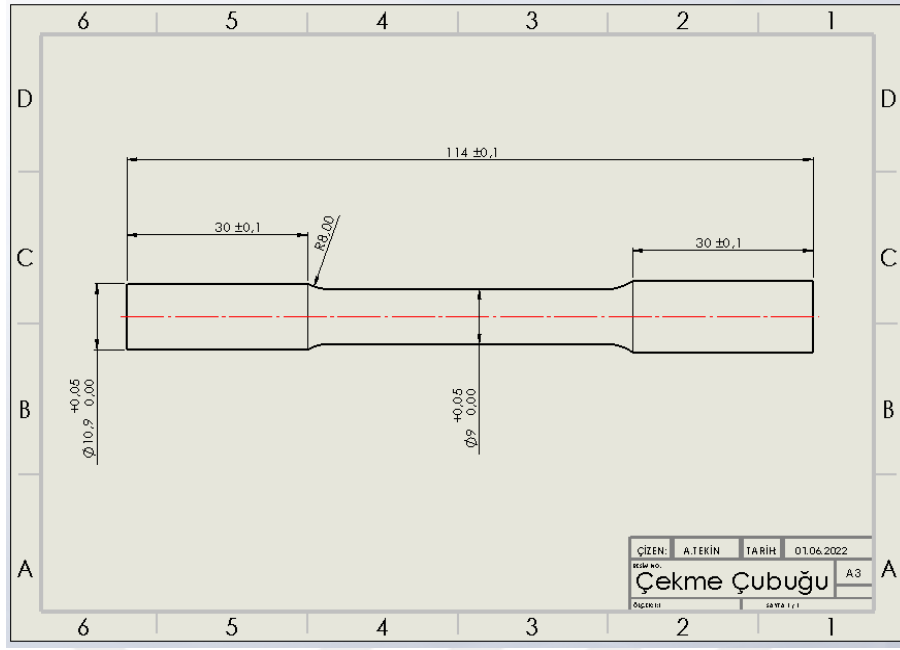
-Metalurjik incelemeler ve çekme deneyi

-Ürün performans isterleri doğrultusunda belirlenen kapak sıvama ve kapak çıkma deneylerine tabi tutulmuştur.

3.5. Çekme Deneyleri

Malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için yapılan mekanik testlerin başında çekme testi gelmektedir. Malzemelerin statik yüke maruz kaldığında elastik ve plastik davranışlarını çekme testleri yapılarak belirlenebilmektedir.

Çekme çubukları ASTM E8 Çekme Deney standartlarına göre Şekil 3.16'de verilen ölçülerde, Goodway Marka GLS-200 model CNC Torna tezgahında işlenmiş ve diş açma operasyonu için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.17).

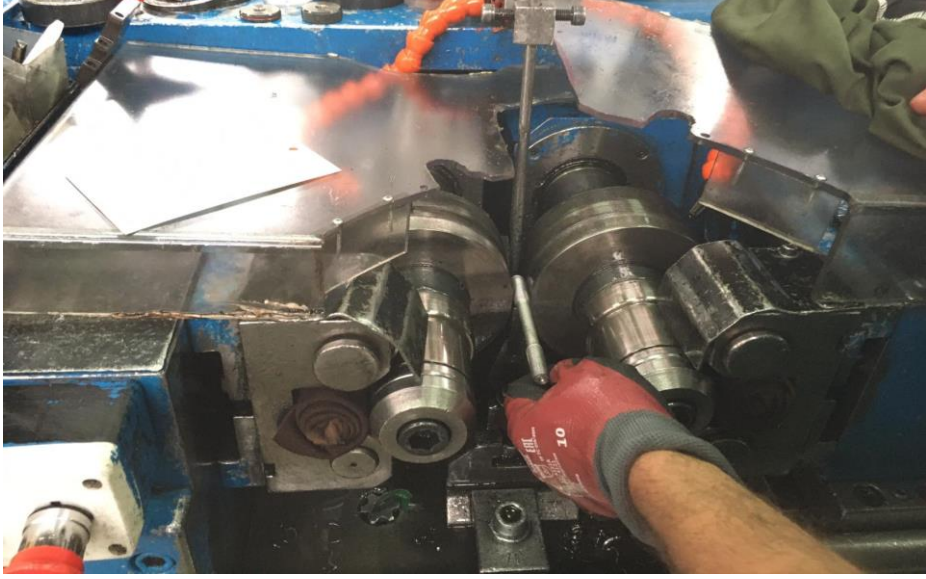


Şekil 3.16 İmal edilen çekme çubuğu ölçüleri



Şekil 3.17 Goodway GLS-200 CNC Torna Tezgahı

Çekme çubuklarının dişleri Atamakin marka ovalama tezgahında açılarak numuneler çekme deneyine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Atamakin marka ovalama cihazı

Çekme deneyi için hazır hale getirilen çekme çubukları Şekil 3.19’da görülmektedir.



Şekil 3.19. Hazır hale gelmiş çekme çubuğu ve gruplandırılmış numuneler

Çekme Deneyleri Devotrans Marka DVTNU model Şekil 3.20’de görülen 100KN kapasiteli cihazda oda sıcaklığında 5 mm/dk hız ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.20 Çekme testinin uygulanması

3.6. Mikroyapı İncelemesi

Basınçlı döküm yöntemiyle üretilen numunelerden incelemek istenen kesitler, abresif kesme cihazı ile su soğutma yardımıyla ısınması engellenerek alınmıştır (Şekil 3.21).

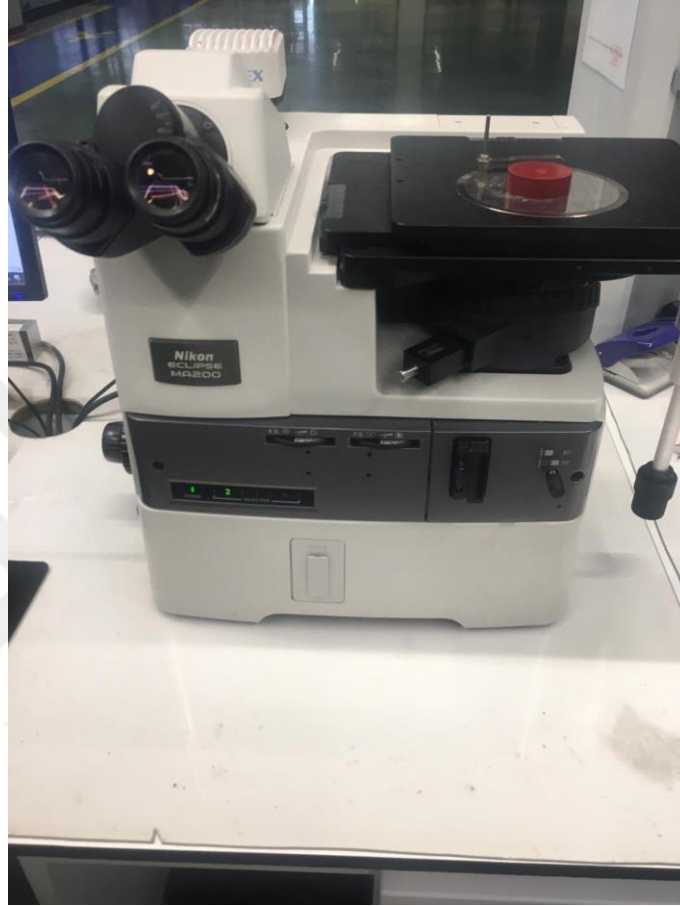


Şekil 3.21. Abresif kesme cihazı

Alınan kesitler bakalite alınarak buhler marka zımpara parlatma cihazı ile zımparalanmıştır. Bu işlem sırayla 180 μ -320 μ -500 μ -800 μ -1200 μ -2400 μ zımparalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalanan numunelere elmas süspansiyon 3 μ seviyesinde kaba parlatma işlemi, daha sonra silica süspansiyon ile

0,87 μ m seviyesinde finiş parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi sonrası yüzeyler alüminyum micro dağlayıcı (%0,5 HF, %99,5saf su) içeriği ile dağlanmıştır.

Mikroyapı görüntüleri Şekil 3.22’de görülen Nikon ECLIPSE MA200 model mikroskop kullanılarak 100X (200 μ) büyütmede incelenmiştir.



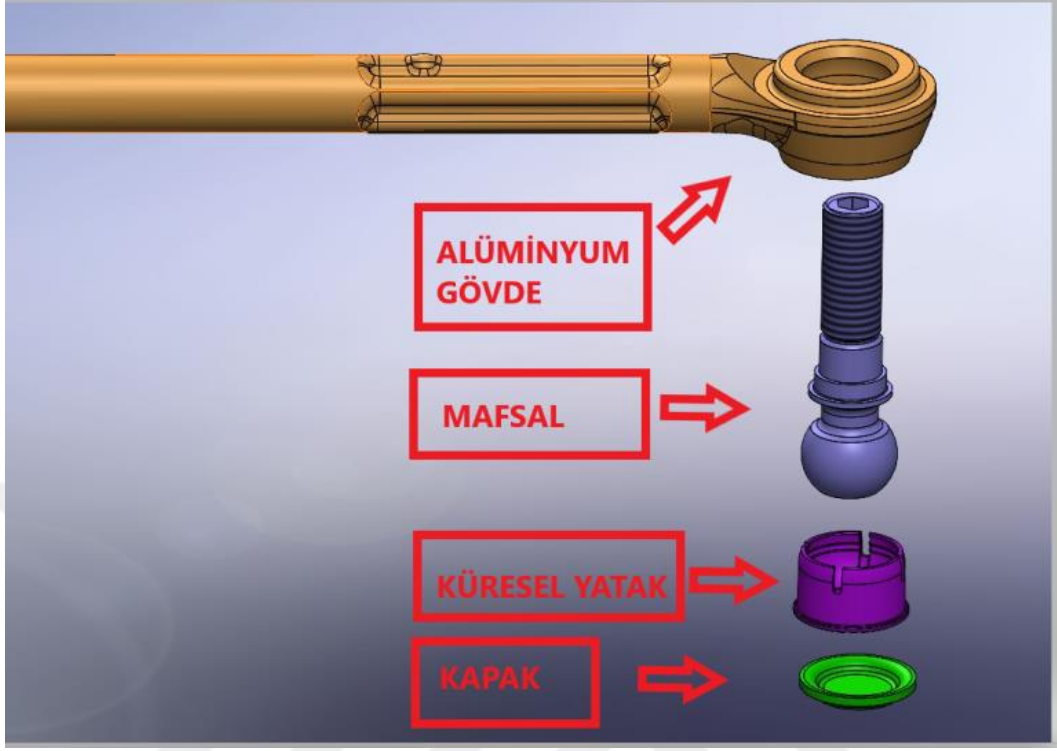
Şekil 3.22 Nikon ECLIPSE MA200 model mikroskop

3.7. Kapak Kapama İşlemi

Araçların süspansiyon sistemlerinde kullanılan salıncaklar, rotilli kollar, rotil, rotbaşı ve denge çubukları birbirlerine çeşitli elemanlar ile bağlanmaktadır. Bu bağlantı elamanı seçilirken hareket halindeki 2 parçanın birbirinin hareketini engellenmemesine dikkat edilir. Hareketli olması istenen bu kısımlarda genel olarak küresel mafsallı bağlantılar kullanılmaktadır.

Küresel mafsallı bağlantı elamanları genel olarak Şekil 3.23’de görülen dövme ile imal edilen mafsallar, alüminyum ve çelikten imal edilen gövdeler, plastikten imal

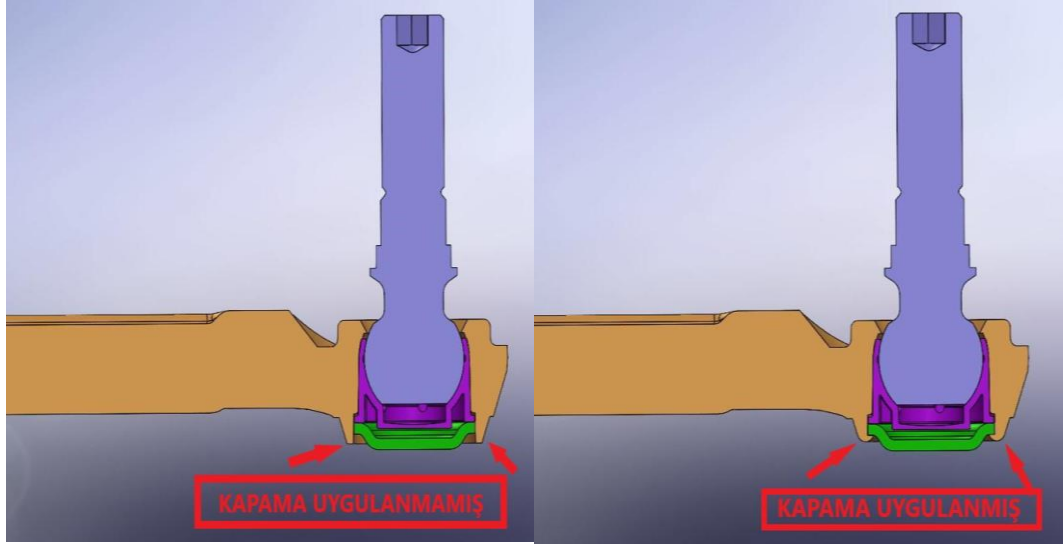
edilmiş küresel yataklar, kapamanın yapılacağı kapak ve yatak ile mafsallı arasında kullanılan sentetik yağlayıcılardan oluşmaktadır.



Şekil 3.23 Mafsallı bağlantıları oluşturan elamanlar

Mafsallı hareket mekanizmaları oluşturulurken yapılan işlemler aşağıda sıralanmıştır.

- Mafsallı küresel plastik bir yatak içine sentetik yağlayıcı ilave edilerek montajı
- Mafsallı çalışacağı boşluk içerisine mafsallı plastik yatağın montajı
- Plastik yatak arkasına pul yerleştirilmesi
- Kapama işlemi (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Kapama işlemi gösterimi

Kapama işleminin doğru tasarlanmış kapama kalıbı ile yapılması gerekmektedir. Doğru tasarlanmamış kalıp, üründe verilmek istenen forma doğrudan etki edeceği için üründe fazla ezme, kırma, verilmek istenenden farklı şekiller oluşturma gibi hatalara neden olacaktır. Kapama işlemi sırasında uygulanacak olan ilerleme miktarının sabit tutulması gerekmektedir. İlerlemenin sabit tutulmadığı işlemler sonucunda ya üründe ezilmelerin sebep olacağı fazla kapamalar ya da yetersiz şekil değişimi gerçekleşecektir. Olması gerekenden fazla kapatılmış ürünlerde mafsal tork hareketi azalacak ve ürün içerisindeki plastik yatak ezilerek hareket kabiliyetini kaybedecektir. Yetersiz şekil değişimi olması durumunda ise mafsal boşluklu bir şekilde çalışacak ve mafsal güvenli bir şekilde çalışamayacaktır. Sayılan kriterler ışığında kapak kapama işlemi adı verilen, ürüne plastik şekil verme prosesini gerçekleştirmek üzere tasarlanan kalıplar Şekil 3.25'te verilmiştir.

Şekil 3.25 Kapama işlemi için tasarlanan kalıp

Şekil 3.25 Kapama işlemi için tasarlanan kalıp kesit görüntüsü



Şekil 3.26 Denge çubuğunun aparata yerleştirilmesi



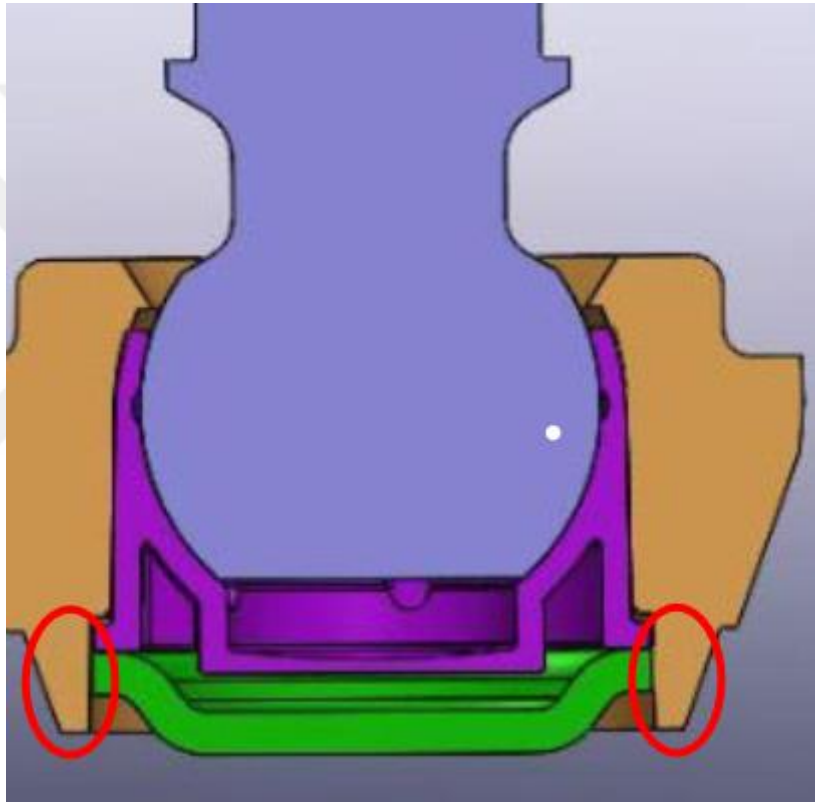
Şekil 3.27 Kapama işlemi yapılması

3.8. Kapak Çıkma Deneyi

Denge çubuğu süspansiyon sisteminde aracın viraj alırken devrilme eğilimi olduğunda aracın tekerleklerinin yerden kesildiği taraftaki denge çubuğunda çekme, karşı tarafta ise basma kuvvetleri meydana gelmektedir. Denge çubuğu bu yükü

dağıtarak aracın stabil bir hareket yapmasını sağlamaktadır. Oluşan kuvvetler denge çubuğunda kapağı çıkmaya zorlamaktadır. Bu nedenle kapak çıkma kuvvetleri denge çubuklarının performansı için önemli bir kriterdir.

Kapama işlemi sonrasında şekil değişimine uğrayan ve Şekil 3.28’da görülen kesitin kalınlığının az olması sebebiyle kırılma oluşumuna meyillidir. Parçanın araç üzerinde çalışması sırasında gelen yükü karşılayan bu ince kesitli ve kırılmaların oluşabileceği bölgelerin yeterli dayanıma sahip olması istenir. Dayanımı yeterli olmayan ürünlerin şekil değiştirmiş kısmında Şekil 3.29’te görüldüğü gibi kırılmalar meydana gelecek ve ürün kullanılmaz hale gelecektir.



Şekil 3.28 Kapama işlemi sırasında plastik deformasyona uğrayan kesit



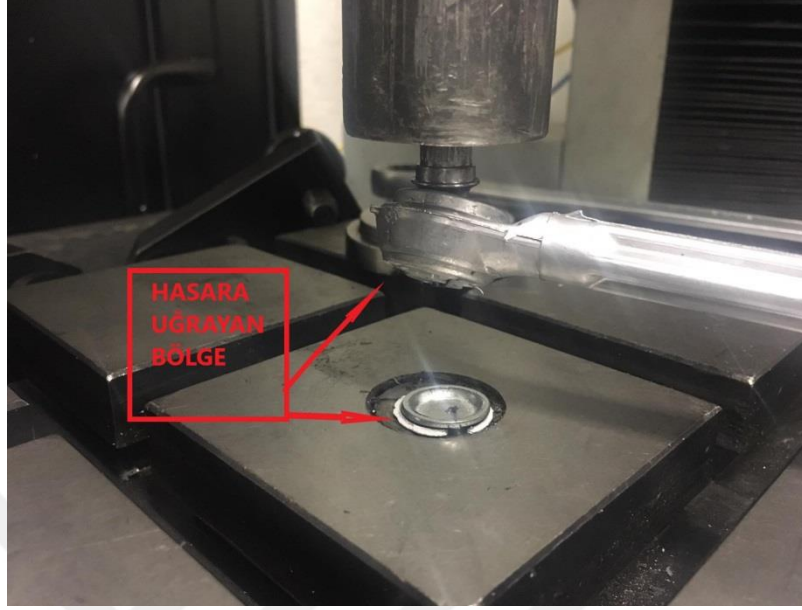
Şekil 3.29. Kapak kapama işlemi yapılmış kesitte meydana gelen hasar

Yukarda belirtilen nedenlerle kapama işlemi yapılmış olan denge çubuklarının kapaklarının çıkma performansları test edilmiştir. Bu test işlemi mafsala dik olarak uygulanan bir kuvvete karşı, şekil değiştirmiş bölgelerin kırılmaya karşı gösterdiği direnç ile ölçülmüştür. Kapak çıkma işlemi kapağa temas etmeyecek ve ürünü sabit olarak tutacak bir aparata Şekil 3.30’te görüldüğü gibi yerleştirilmiş ürünlerde, mafsala sabit 5 mm/dk ilerleme hızı uygulanarak ve oluşan kuvvet ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Deneylerde değerlendirilmek üzere maksimum kuvvet değerleri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.30 Kapak çıkma deneyi

Kapak çıkma deneyi sonrasında hasara uğrayan bölgeler Şekil 3.31’te görüldüğü gibi kontrol edilmiş ve üründeki kırılmanın sıvama bölgesinde olduğu teyit edilmiştir.



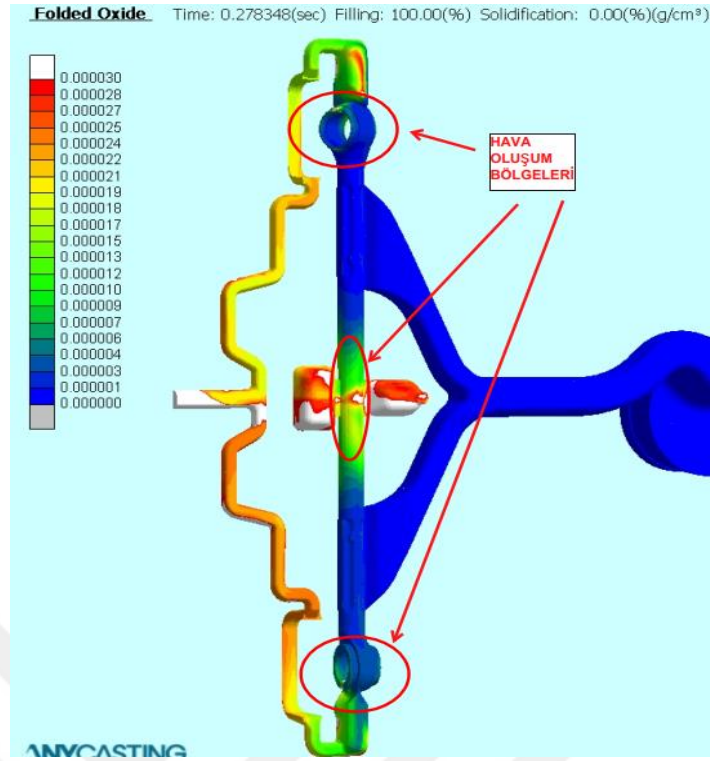
Şekil 3.31 Kapak çıkma deney sonrası kırılma gerçekleşen bölge

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

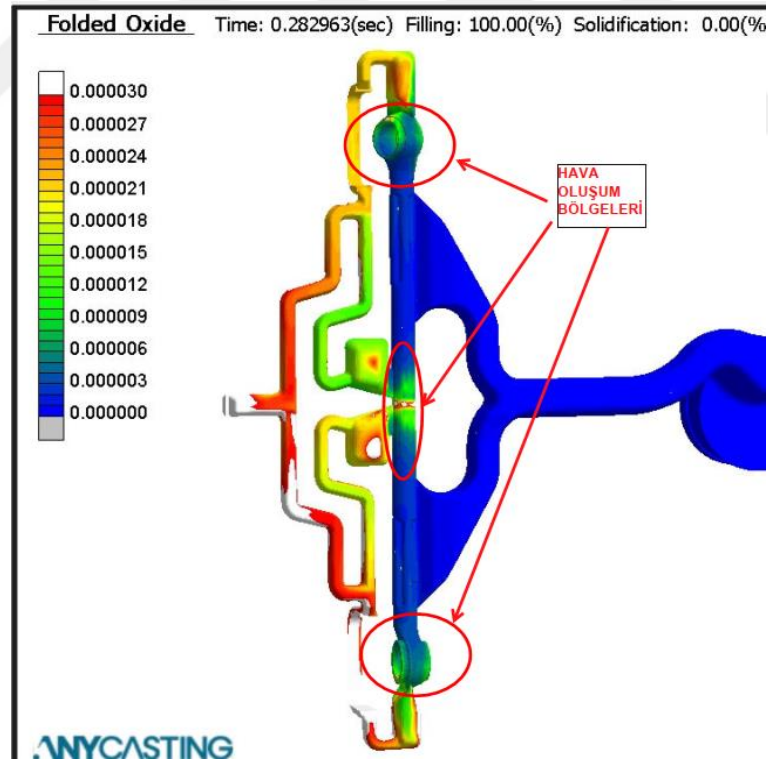
Basınçlı döküm işleminde kalıp tasarım parametrelerinin belirlemek üzere gerçekleştirilen döküm simülasyonları ile ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir. Yine basınçlı döküm işlemi sonucunda üretilen toplamda 90 adet deney numunesi üzerine uygulanan çekme testi, kapak kapama işlemi ve kapak çıkma deneylerinin sonuçları aşağıda ayrı bölümler halinde anlatılmıştır.

4.1. Döküm Simülasyonu Sonuçları

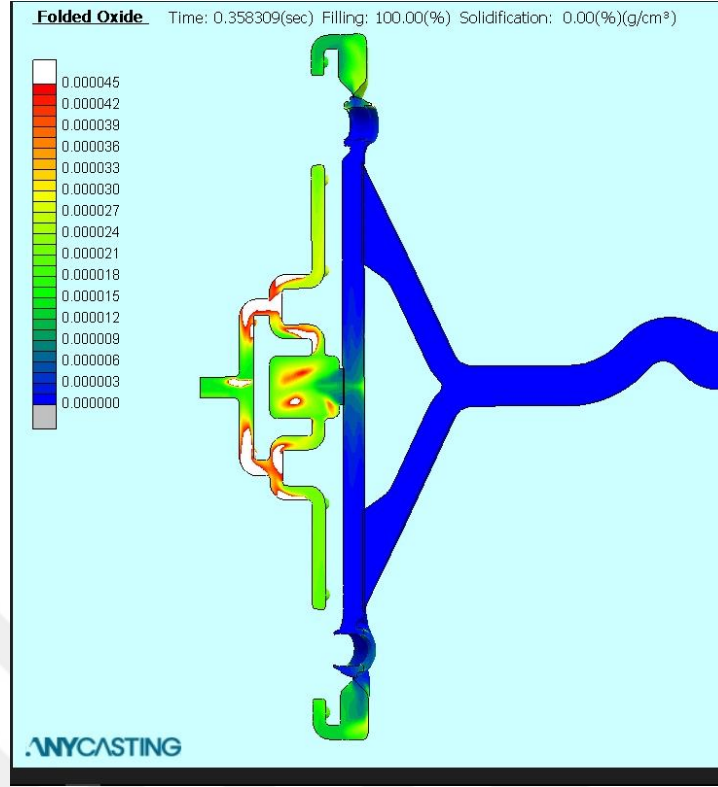
Döküm simülasyonlarında ilk olarak kalıp boşluğundaki havanın tahliyesini sağlayan hava ceplerinin en uygun konumu ve sayısı araştırılmıştır. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te üç farklı hava cebi tasarımı için parçada meydana gelen hava boşluğu sonuçları gösterilmiştir. Anycasting yazılımında gerçekleştirilen analizlerde parça içerisinde kalan muhtemel hava oluşum bölgeleri “folded oxide” seçeneği ile incelenmektedir. Şekil 4.3'de asimetrik dağılımlı hava cebi tasarımında hava boşlukları parçanın kafa ve orta kısımlarında Şekil 4.2'deki simetrik dağılımlı hava cebine göre daha azdır. Hava cebi tasarımı Şekil 4.3'te görüldüğü gibi üç adet ve simetrik olarak gerçekleştiğinde hava boşluğu parça kafasında neredeyse sıfırlanmış, parça orta bölgesinde ise ihmal edilebilir miktara düşürülmüştür. Bu nedenle hava cebinde Şekil 4.3'te görülen üç adet ve simetrik tasarım tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. Hava boşluğu açısından 4 adet asimetric dağılımlı hava cebi tasarım sonucu

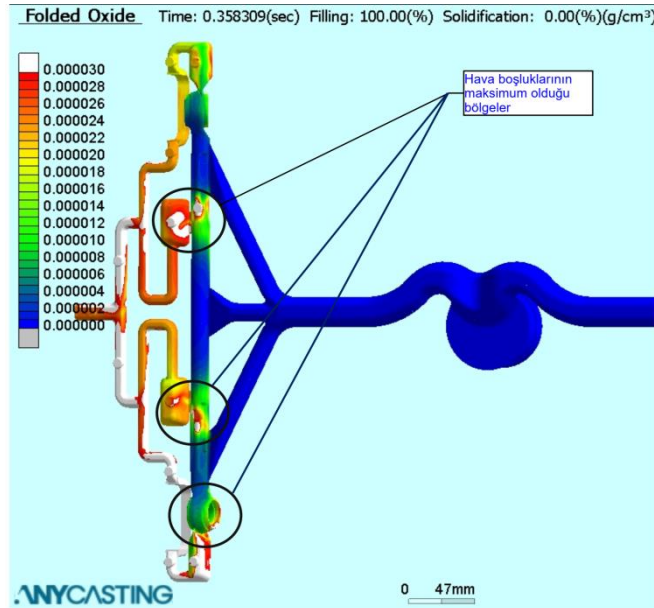


Şekil 4.2. Hava boşluğu açısından 4 adet simetrik dağılımlı hava cebi tasarım sonucu



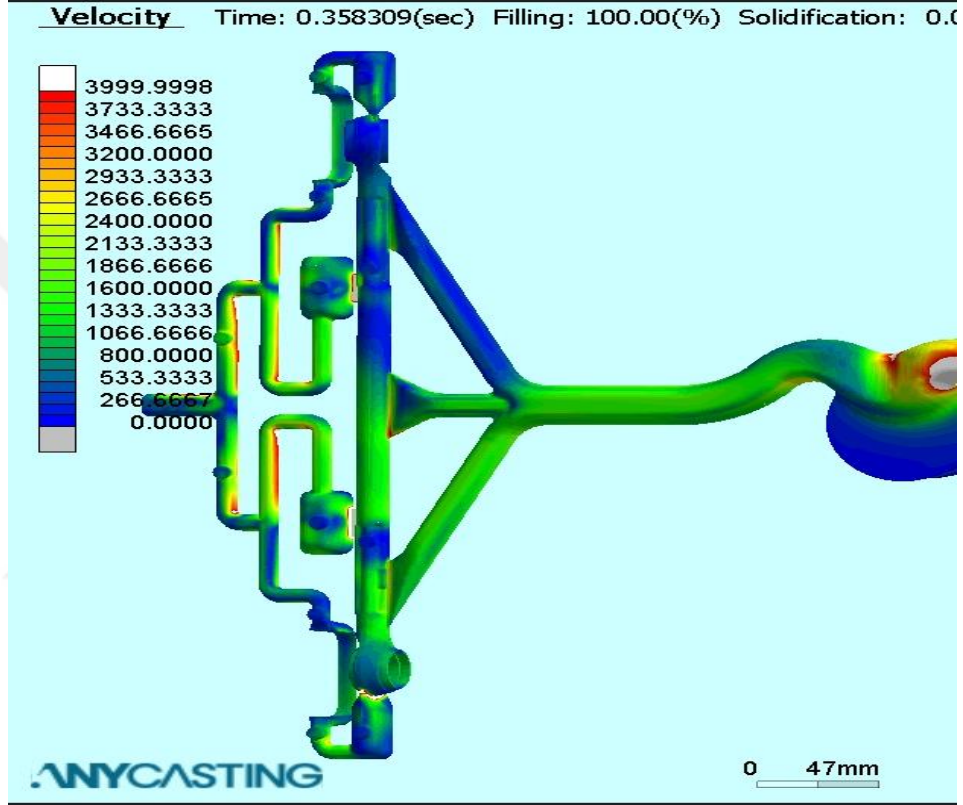
Şekil 4.3. Hava boşluğu açısından 3 adet simetrik dağılımlı hava cebi tasarımı sonucu

Döküm simülasyonlarında ikinci olarak kalıp boşluğuna açılan yolluk giriş sayısı incelenmiştir. 3 girişli yollukta Şekil 4.4’de görüldüğü gibi yolluk seçiminin uygun olmaması neticesinde hava ceplerine yakın bölgelerde parça içerisinde hava boşluklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Sonuçta ürün üzerinde porozitelerin mevcut olduğu görüldüğü için 3 girişli yolluğun uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

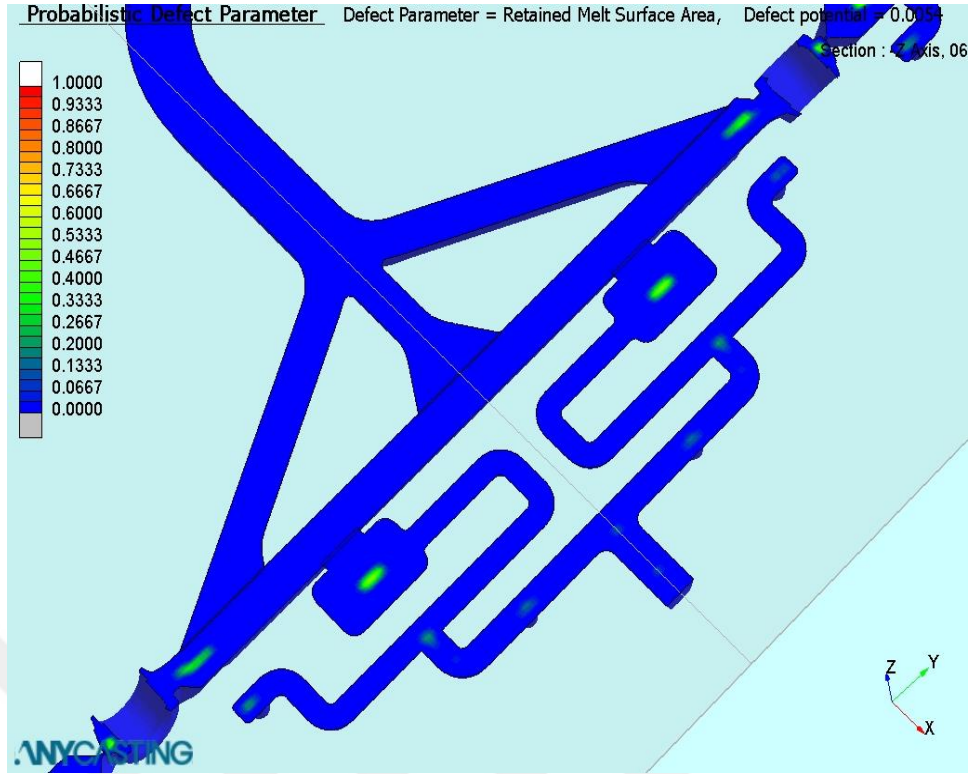


Şekil 4.4 3 girişli yolluk için hava boşluğu (porozite) sonuçları

Simülasyon neticesinde Şekil 4.5’da görülen 3 girişe sahip yollukta hızın tüm kollarda eşit olmadığı görülmüştür. Hızın eşit olmaması erimiş metalin kalıp boşluğunu homojen doldurmamasına bu nedenle de soğuk birleşme gibi hataların oluşmasına neden olabilir. 3 girişli tasarımda akış hızının farklılığı sonucu parçada homojen bir dolum gerçekleşmemektedir. Dolumun homojen olmamasının parçada Şekil 4.6’de görülen çekme boşluğu ihtimalini doğurmaktadır. Şekildeki renk skalası bu ihtimalin gerçekleşme oranını göstermektedir.



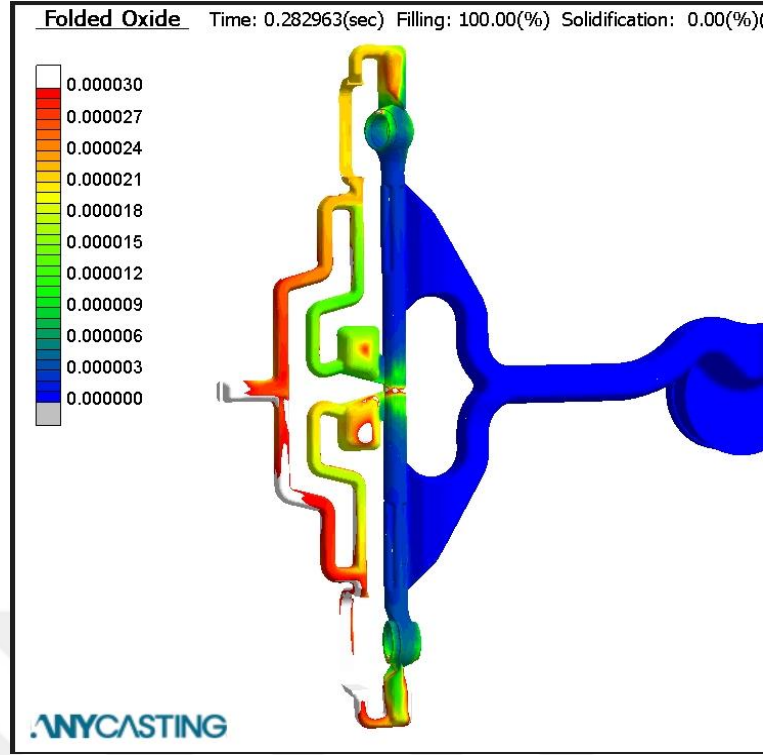
Şekil 4.5 3 girişli yolluk hız sonuçları



Şekil 4.6 3 girişli yolluk çekinti / büzülme oluşabilecek bölgeler

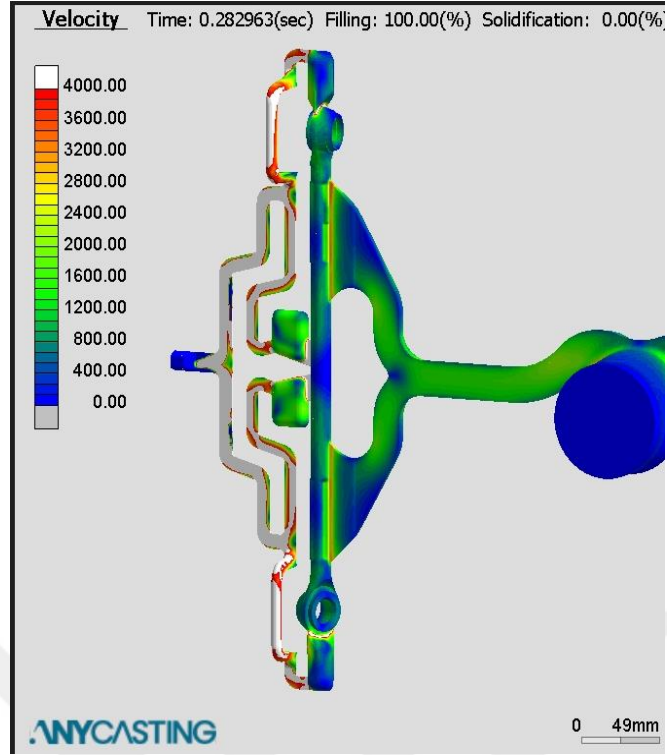
Yüksek basınçlı döküm prosesinde parçanın homojen olarak dolması ve katılaşması beklenmektedir. 3 girişli yolluk tasarımında dolumun bu şartları sağlamaması nedeniyle 2 girişli yolluk sisteminin uygunluğu analizlerle değerlendirilmiştir.

2 noktadan girişli yolluk sisteminde simülasyon sonuçlarına bakıldığında elde edilmek istenen ürünün kafa bölgelerinde ve hava ceplerinin birleştiği noktalarda poroziteler olduğu görülmüştür (Şekil 4.7).

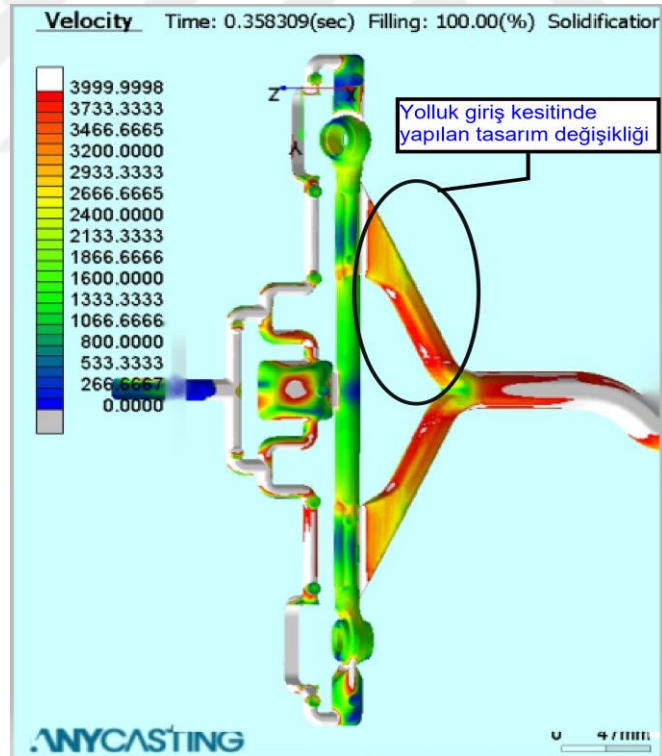


Şekil 4.7 2 noktadan girişli yolluk porozite simülasyon sonucu

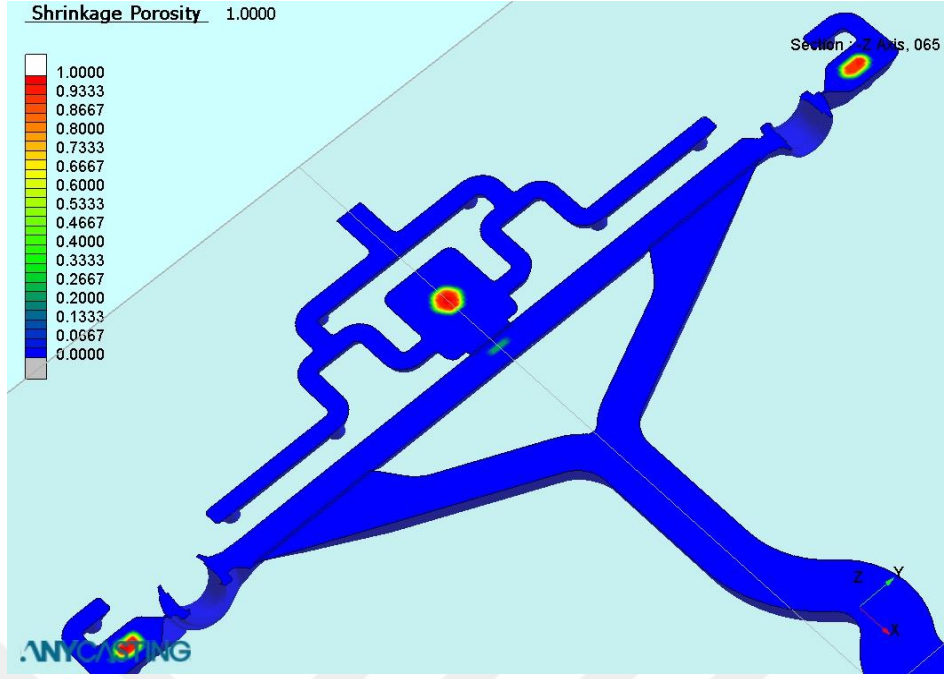
Şekil 4.8’da görülen hız sonuçlarına göre dolum esnasında parça üzerindeki akışta halen homojensizlikler olmakla birlikte üç girişli yolluk sistemine göre daha homojen bir akış gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu nedenle 2 girişe sahip yolluk sisteminde yolluk kesit tasarımında değişiklik yaparak akış daha homojen hale getirilmeye çalışılmıştır. Sonuçta Şekil 4.9’da görüldüğü gibi yolluk giriş kesitinde yapılan tasarım değişikliği ile erimiş akışkanın hız dağılımı daha homojen hale getirilmiştir. Bu nedenle kalıp tasarımında Şekil 4.9’da görülen yolluk sistemi kullanılmıştır. Nihai hava cebi ve yolluk tasarımı sonucunda Şekil 4.10’te görüldüğü gibi çekme boşlukları sadece hava ceplerinde meydana gelmiş böylece parçanın hava boşluğu oluşmadan üretilebileceği kalıp tasarımına ulaşılmıştır.



Şekil 4.8 2 noktadan girişli yolluk sisteminin hız simülasyon sonucu



Şekil 4.9. Yolluk giriş kesitinde yapılan tasarım değişikliği



Şekil 4.10 Çekme boşluğu hataları

4.2. Kapak Kapama İşlemi Sonuçları

Kapak kapama işlemi 9 deney ve 5 tekrar için toplamda 45 numuneye uygulanmıştır. Her bir numunenin de iki tarafında mafsal yerleştirildiği için toplamda 90 adet kapama işlemi yapılmıştır. Kapama işlemi uygulanmış numuneler örnek olarak Şekil 4.11’de verilmiştir. Deney numunelerinin hiçbirinde kapama işlemi sırasında çatlamlar ve ezilmeler meydana gelmediği görülmüştür. KÜSİ kapsamında gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, AYD firmasının hizmet alımı ile temin ettiği basınçlı döküm yöntemiyle imal edilmiş denge çubuklarında, kapama işlemi sırasında Şekil 4.12 görülen hasarların meydana gelme oranlarının çok olmasıydı. Ancak AYD firmasının bünyesinde kurulan basınçlı döküm hattında Bölüm 3.4’te görülen 9 farklı deney şartında üretilmiş numunelerin hiçbirinde bu hasarın oluşmadığı görülmüştür. Buradan dışarıdan hizmet alımı ile ürettirilen parçaların döküm proses şartlarının ve kalıp tasarımının uygun olmadığı ve bu sebeple numunelerde yapılan incelemelerde Şekil 4.13 görüldüğü gibi porozitelerin meydana geldiği görülmüştür. Firma bünyesinde tez kapsamında üretilen numunelerde ise kalıpların uygun tasarıma sahip olması ve her ne kadar proses şartları deneyler arasında değişken olsa da uygun aralıkta kaldığı ve bu nedenle kapama işlemlerinde hasar oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.11 Kapama yapılmış numuneler



Şekil 4.12 Sıvama sırasında hasar meydana gelmiş parça



Şekil 4.13 Porozite hataları barındıran kırılma gerçekleşmiş parça

Kapak kapama işlemi uygulanmış numunelerin performansının ölçülmesinde kullanılan bir deney, mafsal tork deneyidir. Bu deneyde kapak kapama işleminden sonra mafsalın kırılma ve çalışma tork deneyleri Şekil 4.14 görülen tork ölçüm cihazı ile ölçülmektedir. Kapanmış numunelerin tork ölçümleri gerçekleştirilmiş olup 0.5 ile 0.8 Nm arasında tork değerine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.15). Bu tork değerleri, ürünün çalışma kabiliyeti isterleri doğrultusunda kabul edilir aralıkta yer almaktadır.



Şekil 4.14 Tork ölçüm cihazı

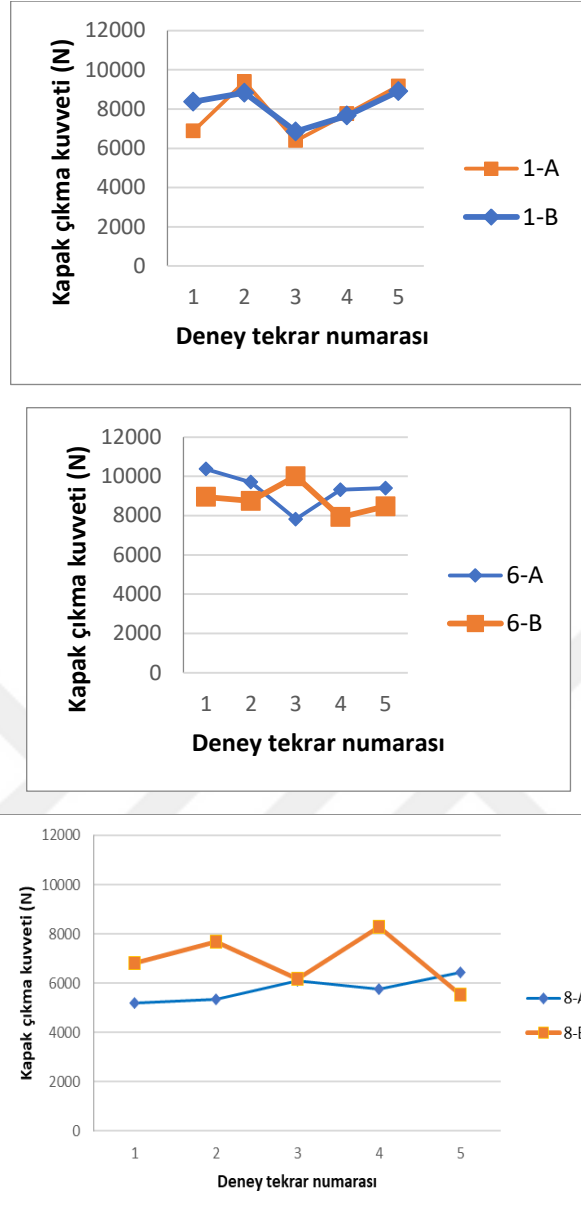


Şekil 4.15 Tork ölçüm değeri

4.3. Kapak Çıkma Deneyi Sonuçları

Denge çubuklarında mafsallı bağlantıların güvenle çalışabilmesi için kapak kapama işleminden sonra, çalışma şartlarında karşılaşılabilecek yüklerde kapağın konumunu muhafaza etmesi gerekmektedir. Kapağın çıkması ancak kapama işlemi sırasında kıvrılan kenarların kırılması sonucunda meydana gelir. Denge çubuklarının kalite kontrolünde önemli bir gösterge olduğu için kapak çıkma kuvvetleri ölçülmüştür.

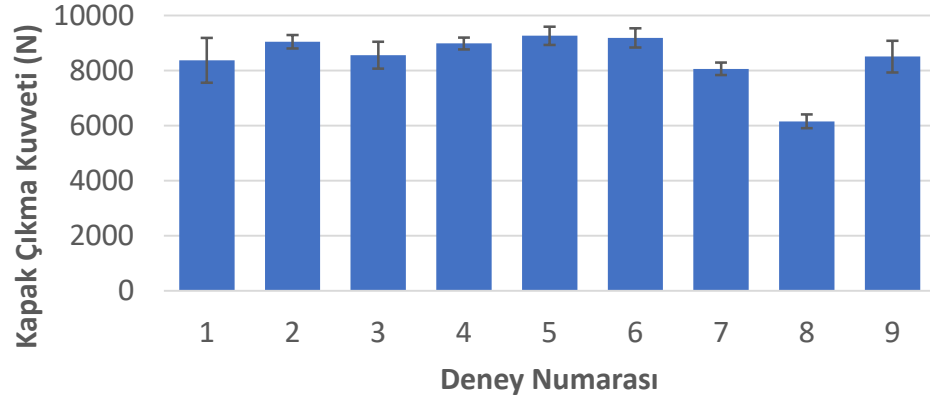
Kapak çıkma kuvvetleri dokuz farklı deney ve 5 tekrarlı numunede her bir numunenin iki tarafındaki mafsal yuvaları için ölçülmüştür. Denge çubuklarının sağ ve sol taraflarından elde edilen kapak çıkma kuvvetlerinin karşılaştırılması 1. 6. ve 8. Deneyler için Şekil 4.16'de verilmiştir. 1.Deneyde görüldüğü gibi denge çubuğunun her iki tarafındaki sonuçların deneyler arasında birbirine çok yakın çıktığı sonuçlar olmakla birlikte 6. ve 8. Deneylerde görüldüğü gibi birbirinden daha farklı çıkan sonuçlar da bulunmaktadır.



Şekil 4.16. Denge çubuklarının sağ ve sol taraflarından elde edilen kapak çıkma kuvvetlerinin karşılaştırılması

Dokuz farklı deneyden elde edilmiş kapak çıkma kuvvetleri ve tekrarlanabilirlik değerlerinden elde edilen hata bantları Şekil 4.17’de verilmiştir. İlk 6 ve 9. deneyin sonuçları hata bantları da dikkate alınırsa 9000 N civarında çıkmıştır. 7. Deneyde kuvvet 8000 N ve 8. Deneyde 6000 N değerine kadar düşmüştür. Deneyler arasında birbirinden farklı sonuçlar çıkmadığı için ANOVA analizleri sonrasında parametrelerin anlamlı istatistiksel etkileri elde edilememiştir. 8. deneyde en düşük kapak çıkma kuvvetinin elde edilmesi bu deneyden elde edilen numunelerin en kırılgan dolayısı ile sünekliği en az olan numuneler olduğu sonucunu akla getirmektedir. Ancak Şekil 4.21’deki çekme deneyi eğrileri ve Şekil 4.26’deki plastik uzama değerleri incelendiğinde 8. deneydekinden daha kırılgan olan numunelerin olduğu görülmektedir.

Bu nedenle 8. Deneydeki proses koşullarında kapak kapama işleminde deformasyona uğrayan bölgede porozite gibi döküm hatalarının oluşma ihtimali değerlendirilmiştir. Numunelerin kapak çıkma deneyi sonrasındaki hasar bölgeleri kesitleri incelendiğinde Şekil 4.18'de görüldüğü gibi 8. Deneydeki porozite oluşumları dikkat çekmiştir. Porozite oluşumlarının yoğunluğu nedeniyle 8. Deneyde kapak çıkma kuvvetinin daha düşük çıktığı sonucuna ulaşılmıştır.



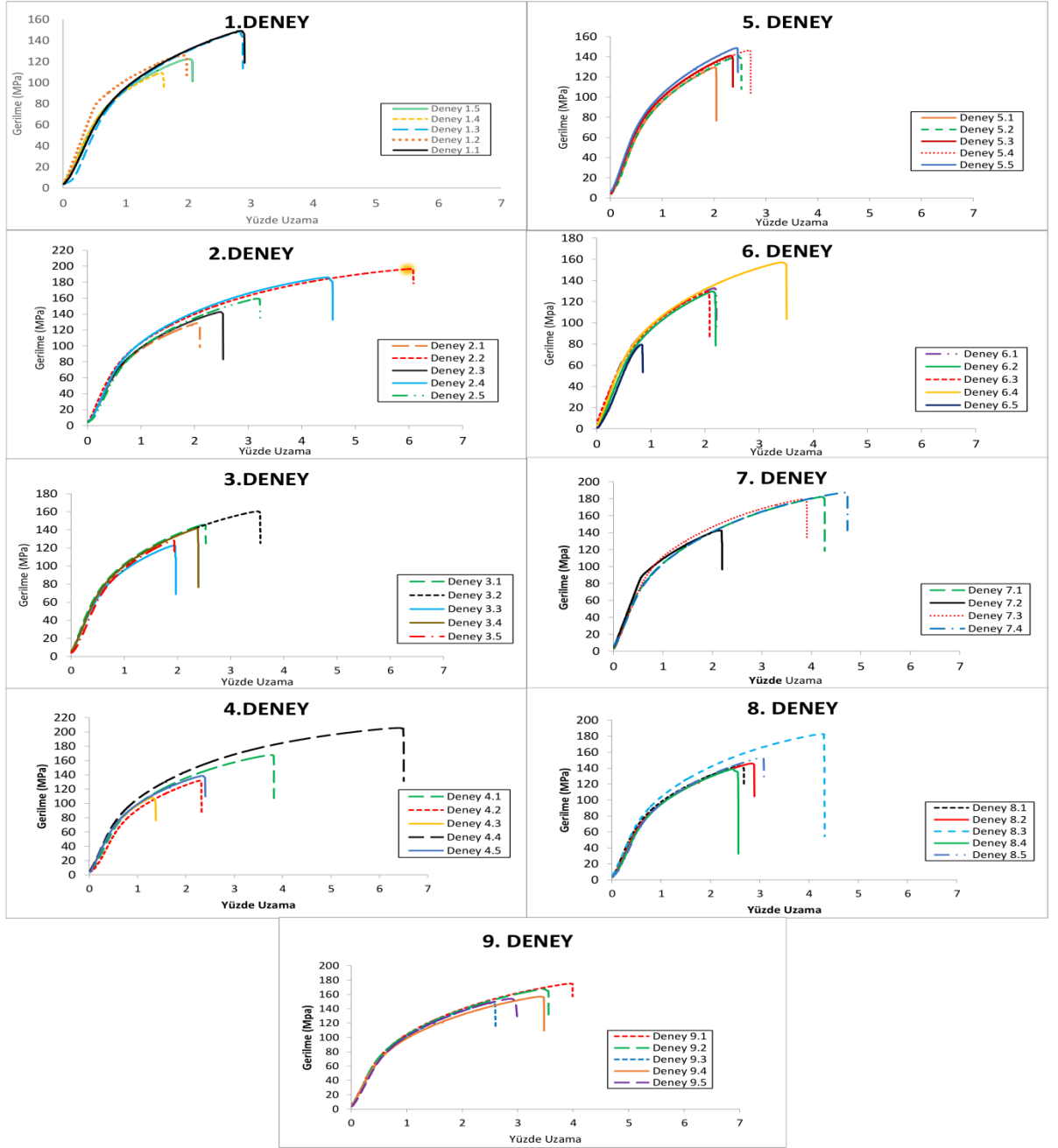
Şekil 4.17. Kapak çıkma deneyi sonuçları



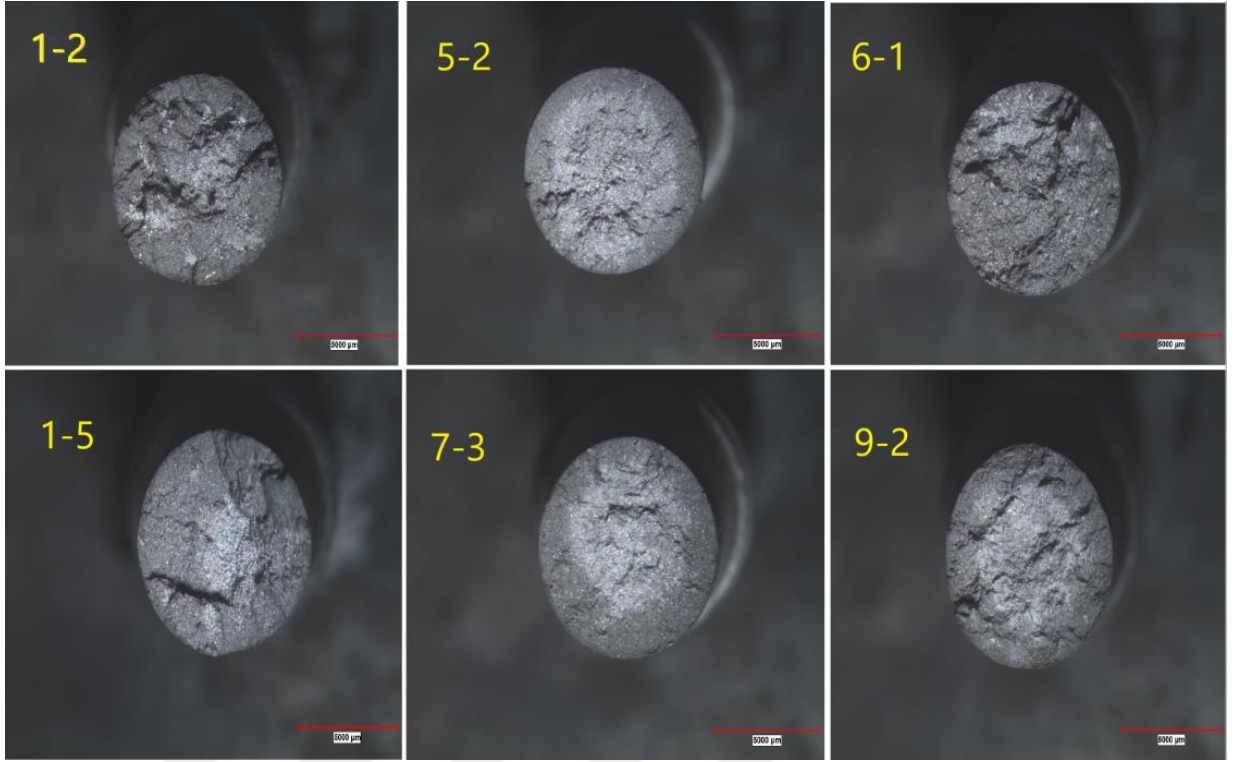
Şekil 4.18 8.deneye ait numunelerde plastik değişim bölgesi kesitinde görüntülenenen mikroporoziteler

4.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Taguchi L9 deney tasarım tablosuna göre dokuz farklı şartta üretilen denge çubuklarından hazırlanan deney numunelerine uygulanan çekme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.19'de verilmiştir. Her bir deney beş tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş olup grafiklerde tüm tekrarlara ait eğriler görülmektedir. Grafiklerden tekrarlar arasında akma mukavemetleri açısından önemli farklar görülmemektedir. Ayrıca akma eğrileri de neredeyse tüm tekrarlar için üst üste elde edilmiştir. Ancak çekme mukavemetleri ve yüzde uzamalar açısından bazı tekrarların ortalamadan oldukça farklılıklar içerdiği görülmektedir. Aynı şartlarda üretilmiş olsalarda numunelerin mekanik özellikleri arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bazı deney sonuçlarının birbirine çok yakın çıkarken diğerlerinin farklı çıkmasına kontrol edilemeyen faktörlerin neden olduğu düşünülmüştür. Denge çubukları üretilirken her bir çevrimde ikişer adet ürün üretilmiş olup her deneyde beş üretim çevrimi uygulanarak toplamda 10 adet numune üretilmiştir. Kapak kapama işlemi sırasında karşılaşılabilecek hasarlar ve başarısız deneylere karşı fazladan numuneler üretilmiştir. Bu numunelerden 5'er adeti üzerinde çekme testleri ve kapak çıkma deneyleri uygulanmıştır. Yapılan çekme deneyleri sonrası çekme çubuğu numunelerinde, Şekil 4.20'da görüldüğü gibi gevrek kırılmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. YBD prosesinde alüminyumun hidrojene ilgisi nedeniyle porozite oluşma ihtimali çok yüksektir. Bu durumun her bir çevrimde üretilen numunelerde porozite seviyelerinin farklı olmasına ve dolayısıyla özellikle süneklik değerinin farklı olmasına sebep olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle aynı deneyin tekrarları arasında farklılıklar mevcuttur.

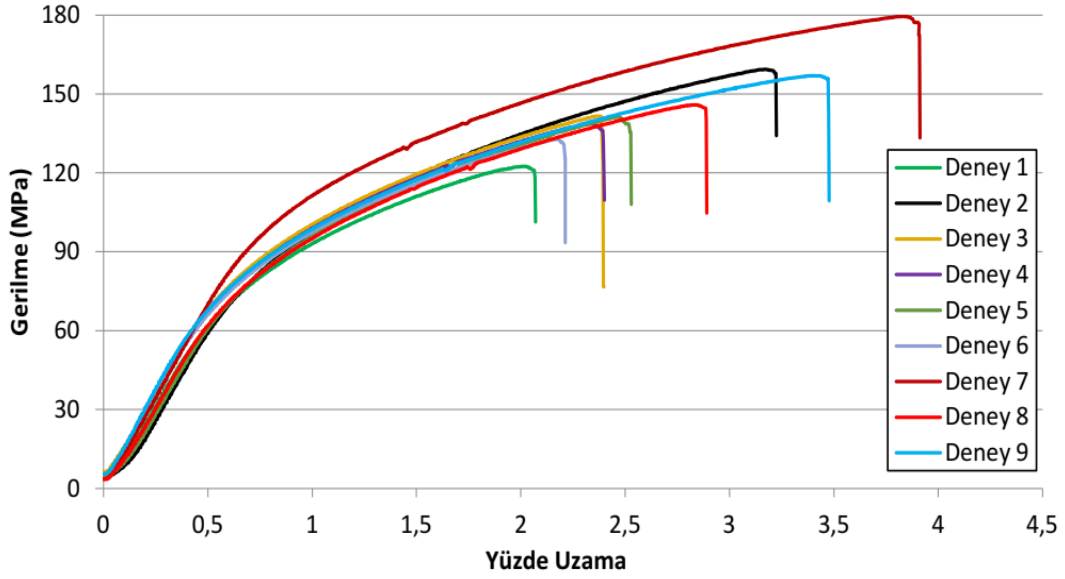


Şekil 4.19. Tüm çekme deneylerine ait tekrarlı deney sonuçları



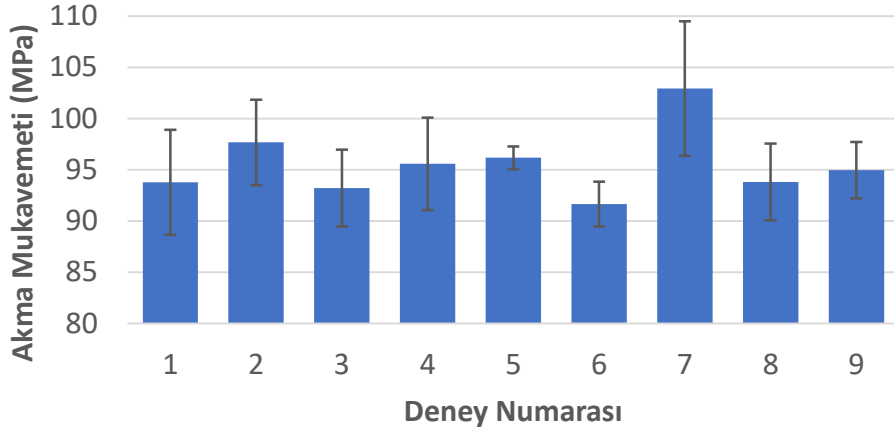
Şekil 4.20 Çekme deneyi sonrası kırık yüzey görüntüleri

Her bir deney için ortalamayı temsil eden bir çekme deney eğrisi alınarak, farklı üretim şartlarında üretilen parçaların çekme eğrileri Şekil 4.21’de birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre 7. Deneyde en yüksek sıcaklık (740°C), en düşük hız (2 m/s) ve en yüksek basınç (1290 bar) parametreleriyle üretilmiş olan parçalarda akma eğrisi daha üstte çıkmıştır ve bu numunelerde akma ve çekme mukavemetinin yanında yüzde uzama değerlerinin de diğer şartta üretilenlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. 1. Deneyde en düşük sıcaklık (700°C), en düşük hız (2 m/s) ve en düşük basınç (850 bar) parametreleriyle üretilmiş olan parçalarda ise mekanik özellikler bakımından en kötü durumun elde edildiği anlaşılmıştır. Diğer deneylerden elde edilen akma eğrilerinde gerilme seviyeleri arasında önemli bir fark olmamakla birlikte yüzde uzamalar arasında farklılıklar meydana gelmiştir. Proses parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini daha detaylı olarak incelemek için her bir deneyden elde edilen akma ve çekme mukavemeti, yüzde uzama ve plastik uzama miktarları hesaplanarak kıyaslanmış ve varyans analizi uygulanmıştır.



Şekil 4.21. Deney tasarım tablosuna göre gerçekleştirilen dokuz farklı deney numunesine uygulanan ortalama çekme eğrilerinin karşılaştırılması

Çekme deneylerinden hesaplanan akma mukavemetleri Şekil 4.22’te karşılaştırılmıştır. Şekildeki sütun grafikleri deneylerdeki ortalama değerleri göstermekte değerlerin saçılımı her bir sütunda hata bandı olarak gösterilmiştir. Grafik oluşturulurken ortalamadan en fazla sapma gösteren değerler atılarak ortalamaya en yakın olan en az üç adet değer sonuçları kullanılmıştır. Sonuçların sayısal değeri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Akma mukavemeti ortalama olarak minimum 90.7 MPa, maksimum 100 MPa’dır. Parametrelerin akma mukavemetine etkisini belirlemek için varyans analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre sadece basınç parametresinin P değeri 0.05’ten az çıkmıştır. Bu nedenle akma mukavemetine sadece basınç parametresinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer parametrelerin P değeri 0.05’ten büyük olduğu için sıcaklık ve hız parametrelerinin akma mukavemetine anlamlı bir etkide bulunmadığı tespit edilmiştir. Basınç parametresinin akma mukavemetine etki yüzdesi ~%73 olmuştur.



Şekil 4.22. Akma mukavemetlerinin karşılaştırılması

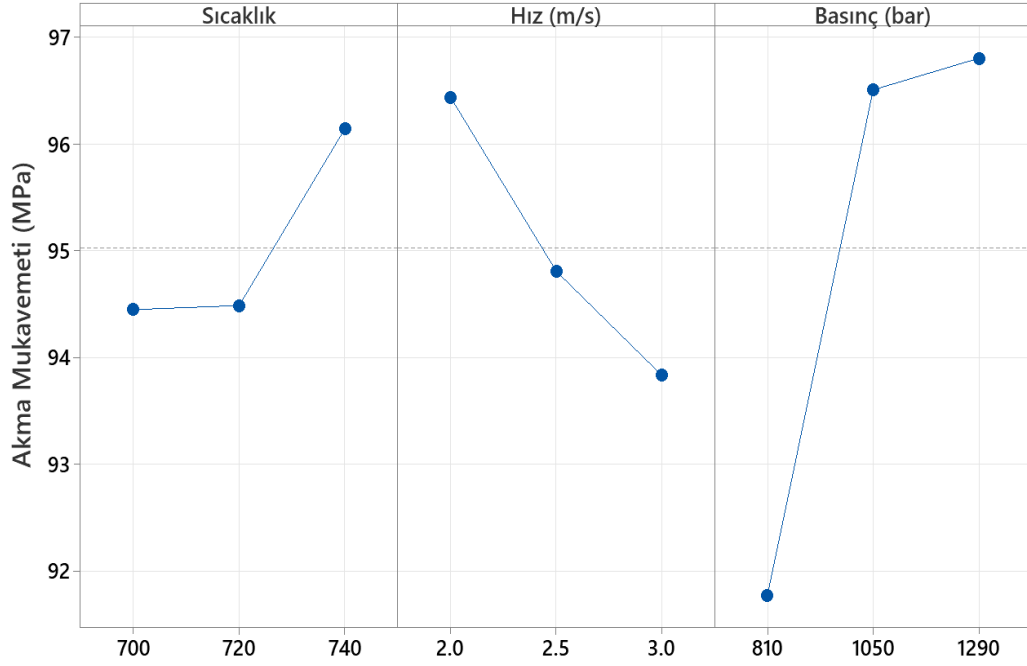
Çizelge 4.1. Akma mukavemetlerinin sayısal değerleri

AKMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Tekrar	97,57	93,17	91,81	99,41	96	90,2	96,2	89,63	96,2
2. Tekrar	94,3	95,45	95,25	95,5	96,26	89,78	103,02	92,06	94,43
3. Tekrar	87,98	95,63	97,1	100,5	95,04	92,06	100,68	95,39	96,97
4. Tekrar	89,24	101,15		92,84	95,56				96,8
Ortalama	92,27	96,35	94,72	97,06	95,72	90,68	99,97	92,36	96,10
StdSapma	4,46	3,39	2,68	3,54	0,53	1,21	3,47	2,89	1,16

Çizelge 4.2. Akma mukavemeti sonuçlarına göre yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları

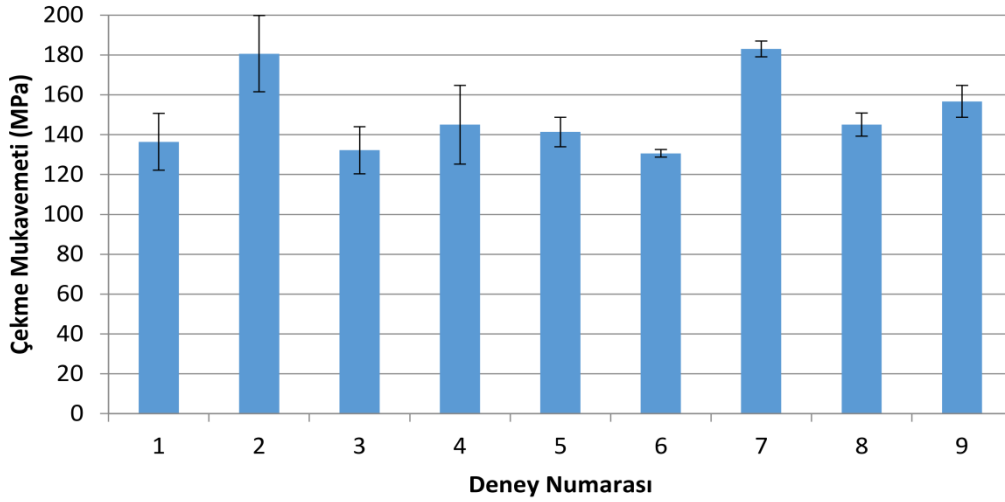
Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Etki Yüzdesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Sıcaklık	2	5.616	8.56%	2.8078	3.04	0.247
Hız (m/s)	2	10.356	15.78%	5.1781	5.61	0.151
Basınç (bar)	2	47.795	72.84%	23.8974	25.89	0.037
Hata	2	1.846	2.81%	0.9231		
Total	8	65.613	100.00%			

Regresyon analizi sonucu sistemin güvenilirliğini temsil eden Rsquare (adj) değeri %88.74 çıkmıştır. Mühendislik problemlerinde %70 ve üstü değerler kabul edilebilir olmakla birlikte %88.74 deney ve analizlerin büyük oranda güvenilir olduğunu net bir şekilde göstermektedir. Parametrelerin akma mukavemetine etki grafikleri Şekil 4.23’de görülmektedir. Buna göre en etkili parametre olan basınç değeri arttıkça akma mukavemetinin arttığı görülmektedir. Bu nedenle denge çubuğunun üretiminde en uygun basınç değerinin seçilen seviyeler arasında 1290 bar olduğu sonucuna varılmıştır. Her ne kadar sıcaklık ve hız parametrelerinin akma mukavemeti üzerine anlamlı bir etkisi bulunamasa da yüksek sıcaklık ve düşük hızların akma mukavemetini yükselttiği söylenebilir.



Şekil 4.23. Parametrelerin akma mukavemetine etki grafikleri

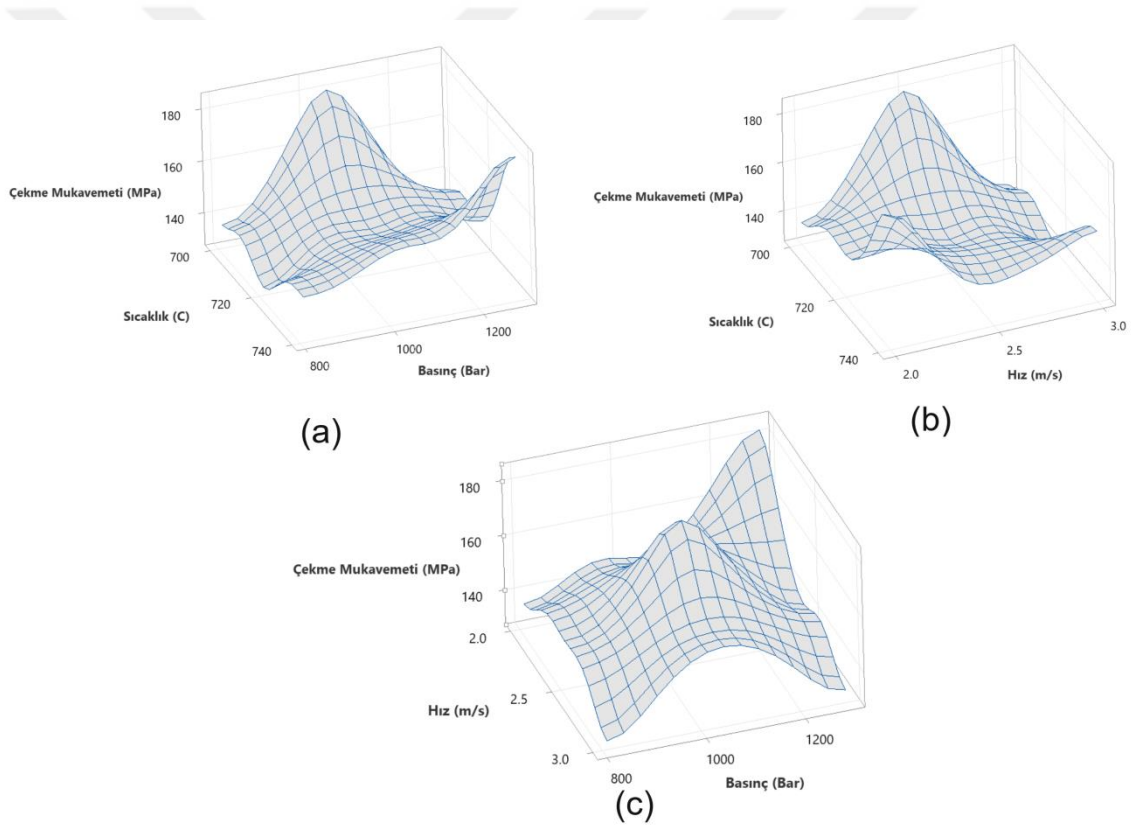
Yapılan her bir deney için çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.24'te verilmiştir. Çekme mukavemeti değerlerinin en düşük değerinin 130 MPa en yüksek değerin ise 185 MPa olduğu görülmüştür.



Şekil 4.24 Çekme Mukavemeti Değerleri

Basınç, hız ve sıcaklık değişimlerinin çekme mukavemeti üzerinde etkisini belirlemek için ANOVA analizi yapıldığında hiçbir parametrenin P değeri 0.05'in altında elde edilmemiştir. Ayrıca regresyon analizi sonucu sistemin güvenilirliğini temsil eden Rsquare (adj) değeri %0 çıkmıştır. Bu nedenle parametrelerin çekme mukavemetine etkileri yüzey grafiği olarak Şekil 4.25'te incelenmiştir. Şekil 4.25a'ya göre 700 °C sıcaklıkta basınç değerinin 850 bar seviyesinden ~1000 bara

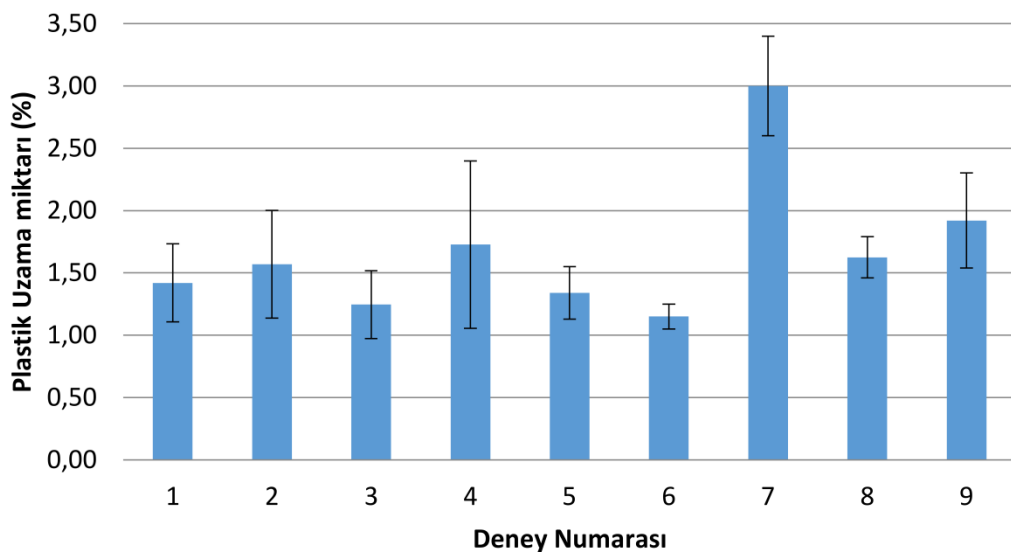
çıkartılmasının çekme mukavemetini 140 MPa'dan 180 MPa'la yükselttiği görülmüştür. 720 °C sıcaklıkta basıncın çekme mukavemetine net bir etkisi görülmemektedir. 740 °C sıcaklıkta ise 1290 bar basınç değerinde maksimum çekme mukavemetine ulaşılmıştır. Şekil 4.25b'de sıcaklık ve hız parametrelerinin çekme mukavemetine etkisi yüzey grafiği olarak verilmiştir. Grafikten 720 ve 740 °C sıcaklıkta döküm hızının çekme mukavemetine önemli bir etkisi olmamasına karşın 700 °C sıcaklıkta 2.5 m/s hızda maksimum mukavemet değerine ulaşılmıştır. Şekil 4.25c'de görülen hız ve basınç parametrelerinin çekme mukavemetine etkisi grafiğine göre genel olarak düşük sıcaklık, düşük hız ve yüksek basınç değerlerinde mukavemetin daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Bu durum düşük sıcaklık ve hızlar ile yüksek basınçlarda porozite oluşumunun azalması ile açıklanabilir.



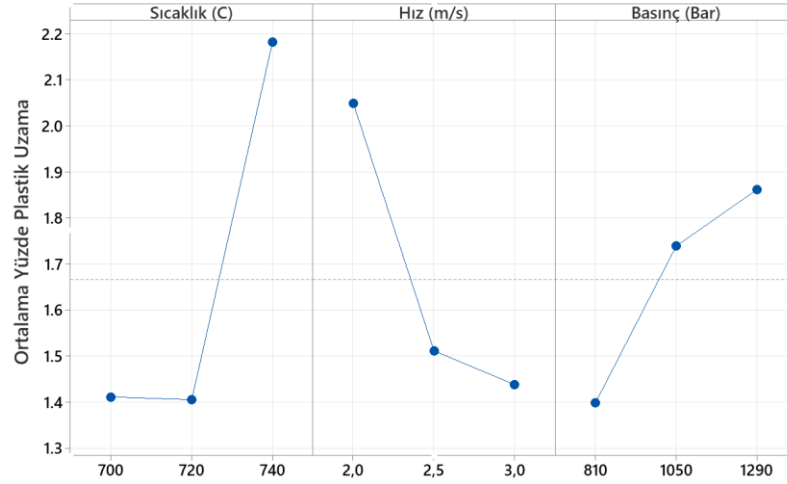
Şekil 4.25. Proses parametrelerinin çekme mukavemetine etkisi

Çekme testinde malzemenin akmaya başladıktan sonra kopmasına kadar gerçekleşen uzama miktarına plastik uzama adı verilmektedir. Tezin amacı basınçlı döküm parametrelerinin malzemenin plastik şekil değiştirme davranışına etkisi araştırmak olduğu için çekme deneylerindeki toplam yüzde uzama yerine plastik uzama miktarları performans kriteri olarak alınmıştır. Dokuz farklı deneyde beş tekrarlı olarak yapılan deneylerden elde edilen plastik uzama miktarları Şekil 4.26'de verilmiştir.

Plastik uzama miktarı %1.15 ila %3 arasında değişkenlik göstermektedir. En fazla uzama en yüksek sıcaklık, en yüksek basınç ve en düşük hız parametrelerinde elde edilirken en düşük uzama en yüksek hız, en düşük basınç ve orta sıcaklık seviyesinde meydana gelmiştir. Buradan A356 alüminyum alaşımından üretilen denge kolunun plastik şekil değiştirme kabiliyeti açısından en uygun parametrelerin en yüksek basınç, en düşük hız ve en yüksek sıcaklık seviyeleri olduğu söylenebilir. Parametrelerin etkilerini daha detaylı olarak araştırmak için deney sonuçlarına ANOVA yapıldığında seçilen parametre seviyelerinde parametrelerin P değerleri 0.05'in üzerinde çıktığı için istatistiksel olarak anlamlı sonuçların elde edilmediği görülmüştür. Regresyon analizi sonucu deney sonuçlarının güvenilirliğini temsil eden Rsquare (adj) değeri %57.7 çıkmıştır. Bu nedenle Şekil 4.27'de verilen etki grafikleri ile parametreleri plastik uzamaya etki konusunda yaklaşımda bulunulabileceği değerlendirilmiştir. Sıcaklığın 700°C'den 720 °C'e artması plastik uzamada değişikliğe neden olmamıştır, fakat Sıcaklığın 720°C'den 740 °C'e artması plastik uzamada %57 lik bir artışa sebep olmuştur. Hızın 2 m/s'den 2,5 m/s'ye getirilmesi plastik uzamada %25 oranında bir azalmaya sebep olduğu görülmektedir. 2,5 m/s den 3 m/s seviyesine getirildiğinde plastik uzamadaki azalma devam etmektedir. Basıncın 850 bardan 1290 bara kadar artırılması plastik uzamaya %32 katkıda bulunmuştur. Böylece, sıcaklığın diğer iki parametreye göre plastik uzamada daha fazla etkili olduğu ve A356 alaşımının plastik şekil değiştirme kabiliyetinde yüksek sıcaklıkların, yüksek basıncın ve düşük hızın daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



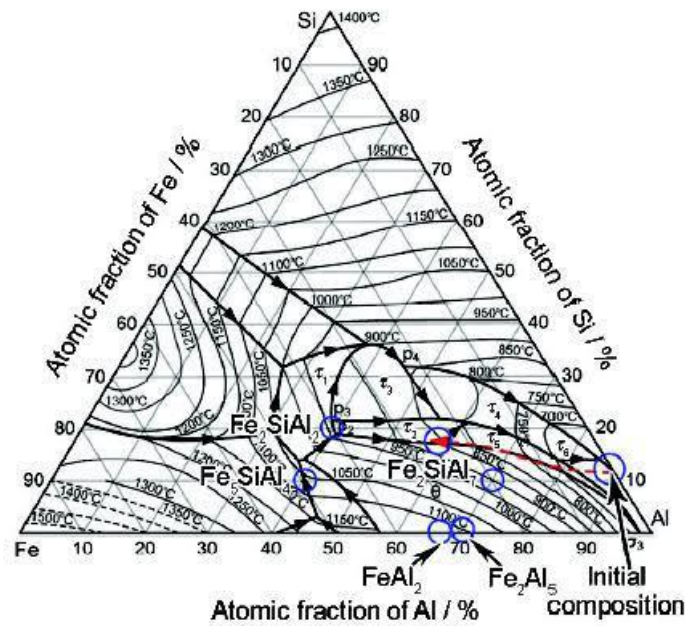
Şekil 4.26 9 Deney için yüzde plastik uzama miktarları



Şekil 4.27 Deney parametrelerinin plastik uzamaya etki grafiği.

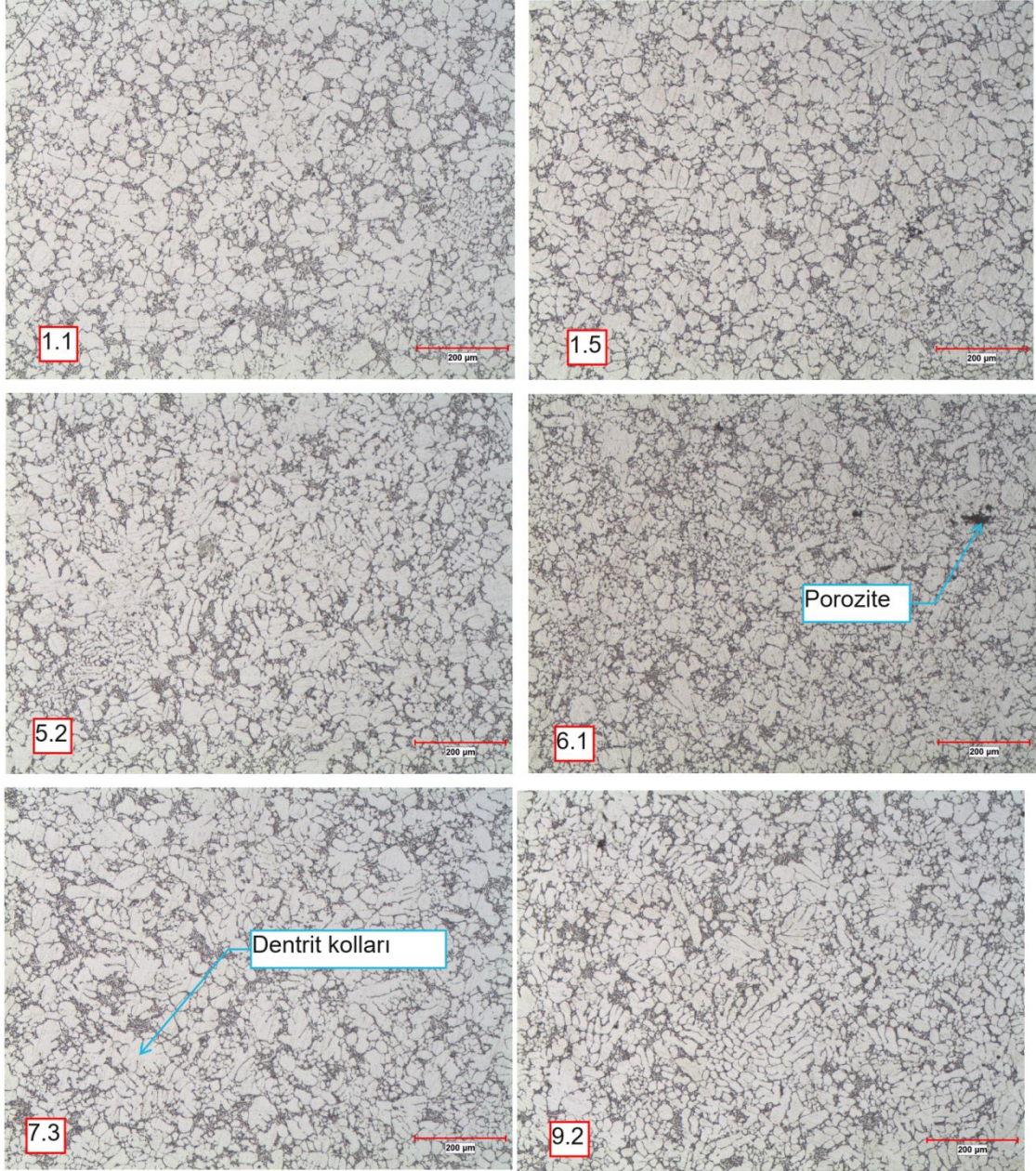
4.5. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Proses parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini daha kapsamlı olarak incelemek için bazı deney sonuçlarına ait mikroyapı görüntüleri ve kırılma yüzeyleri elde edilmiştir. 1, 5, 6, 7 ve 9. Deneylere ait ve 100X büyütme ile elde edilmiş, dağlanarak tane sınırları ve ikinci fazları ortaya çıkartılmış olan mikroyapı görüntüleri Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.28'de Al-Si-Fe'e ait faz diyagramı verilmiştir. Mikroyapıda beyaz tonlu alanlar α -alüminyum fazı ve iğnesel formda ötektik silis fazlarının olduğu görülmektedir. İkinci fazlar yapı içerisinde tane sınırlarında dengeli olarak dağılsa da yer yer kümelenmelerin olduğu gözlenmektedir.

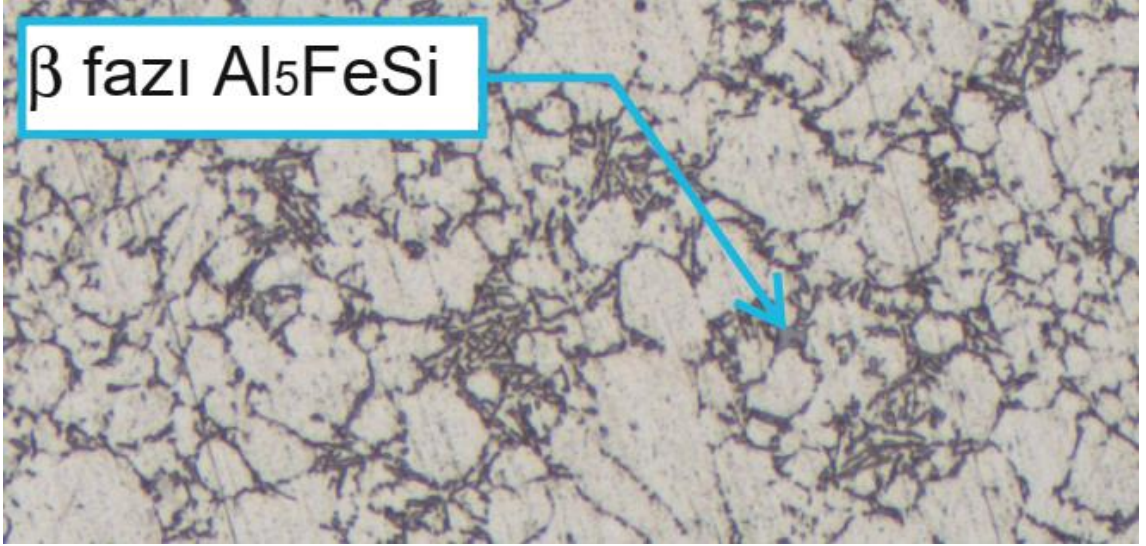


Şekil 4.28 Al-Si-Fe faz diyagramı

Ayrıca mikroyapıda Şekil 4.30'da görüleceği üzere gri renkli bölgelerde Al_5FeSi β fazı gözlemlenmiştir. Bu faz Fe'nin alüminyum içerisinde çözünmemesi sebebiyle meydana gelmekte olup çok kırılgan bir yapıdadır. Bu nedenle sünekliği azaltmıştır. Siyah bölgelerin olduğu porozite boşlukları az da olsa yapı içerisinde gözlemlenmiştir. Porozite özellikle hidrojenin alüminyum içerisinde kolay çözünmesi sebebiyle meydana gelmektedir. Miktarca az olmakla birlikte mikroporozitelerin deney tekrarları arasında sünekliğin çok değişken çıkmasına sebep olduğu düşünülmüştür. Bazı numunelerde dentritik büyüme kollarının olduğu görülmektedir. Mikroyapı incelemesinde sonuç olarak tane boyutlarının, ikinci faz morfolojisinin ve dağılımının genel olarak deneyler arasında benzer olduğu görülmüştür. Bu durum deneyler arasında mekanik özelliklerin önemli farklılıklar göstermemesinin nedeni olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.29. Numunelere ait mikroyapı görüntüleri



Şekil 4.30. Mikroyapıdaki Al₅FeSi β fazı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında A356 (AlSi7Mg) alaşımı kullanılarak, yüksek basınçlı döküm (YBD) prosesi ile üretilen denge çubuğunun plastik şekil verme davranışına proses parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle en uygun kalıp tasarımı, simülasyon programı desteği ile belirlenmiştir. Sonrasında üç farklı sıcaklık, basınç ve hız parametre seviyesinde, Taguchi L9 deney tasarım tablosuna göre basınçlı döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelere mafsallık yerleştirilerek kapak kapama işlemleri yapılmış ve sonrasında kapak çıkma kuvvetleri ölçülerek YBD prosesiyle üretilen denge çubuklarının kullanım performansı test edilmiştir. Sonrasında numunelerden çekme deneyi çubukları hazırlanmış ve beş tekrarlı olarak çekme deneyleri uygulanmıştır. Böylece proses parametrelerinin akma mukavemetine, çekme mukavemetine ve plastik uzama miktarına etkisi araştırılmıştır.

Üretilen numunelere uygulanan plastik şekil değişimi sırasında kırılmaların meydana gelmediği görülmüştür. Denge çubuklarının plastik şekil değişimi uygulanan bölgelerinde kırılmaların meydana gelmemiş olması, o bölgelerde kapama işleminde hasara neden olacak boyutta porozitelerin bulunmadığını göstermiştir. Hizmet alımı ile üretilen parçalarda kapama işlemi sırasında önemli oranda hasar meydana gelirken tez çalışması kapsamında yapılan üretimlerde bu hasarların meydana gelmemesinin nedeninin doğru kalıp tasarımı ve uygun proses şartlarında parça üretimi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Üretilen numunelerde soğuk birleşme, dolmama ve porozite gibi hataların bulunmaması simülasyon verilerinin, gerçekte üretilen numune sonuçları ile örtüşmekte olduğunu göstermiştir.

Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde varyans analizi (ANOVA) sonucunda sadece akma mukavemetinde basınç parametresinin sonuçlar üzerinde istatistiki olarak anlamlı bir etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Akma mukavemeti minimum 90.7 MPa, maksimum 100 MPa elde edilmiştir. Akma mukavemetinde %73 oranla basınç parametresinin etkili olduğu ve basınçla birlikte mukavemetin %5 civarında arttığı bulunmuştur. Çekme mukavemetinin en düşük değerinin 130 MPa en yüksek değerinin ise 185 MPa olduğu görülmüştür. Genel olarak düşük sıcaklık, düşük hız ve yüksek basınç değerlerinde çekme mukavemetinin daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Bu

durum düşük sıcaklık ve hızlar ile yüksek basınçlarda porozite oluşumunun azalması ile açıklanabilir. Plastik uzama miktarı %1.15 ila %3 arasında değişkenlik göstermiştir. A356 alüminyum alaşımından üretilen denge kolunun plastik şekil değiştirme kabiliyeti açısından en uygun parametrelerin en yüksek basınç, en düşük hız ve en yüksek sıcaklık seviyeleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Denge çubuklarının kalite kontrolünde önemli bir gösterge olan kapak çıkma kuvvetine proses parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Deneylerde ölçülen kapak çıkma kuvvetleri 9000 N civarında çıkmıştır. Bu değer denge çubuğunun kullanım koşullarındaki isterlerini karşılamıştır.

Deneyler sonuçlarına göre akma mukavemetine basıncın etkisi haricinde diğer performans kriterleri olan çekme mukavemeti, plastik uzama ve kapak çıkma kuvvetine parametrelerin net bir etkisi elde edilememiştir. Parametrelerdeki değişkenliğin performans kriterlerinde önemli farklılıklar oluşturmamasının mikroyapısal nedenleri araştırıldığında tane boyutlarının, ikinci faz morfolojisinin ve dağılımının genel olarak deneyler arasında benzer olduğu görülmüştür. Bu durum deneyler arasında mekanik özelliklerin önemli farklılıklar göstermemesinin nedeni olarak değerlendirilmiştir. Deneylerde benzer mikroyapı elde edilmesinin sebebinin ise parametre seviyeleri arasındaki farklılığın, mikroyapıyı değiştirecek ölçüde olmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Bunun yanında üretilen parçaların ihtiva ettiği porozite oluşumlarının meydana getirdiği belirsizliğin de yine parametrelerin etkisini gölgelediği sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Öneriler

Yüksek basınçlı döküm prosesiyle ilgili ileride yapılabilecek çalışmalara ışık tutması açısından konuyla ilgili öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Özellikle sıcaklık parametre seviyelerinin aralığının daha yüksek olmasıyla performans kriterlerinde daha hissedilir farklılıklar oluşturulması sağlanabilir.
- Döküm malzemenin kimyasal içeriği daha fazla süneklik elde edilecek tarzda güncellenebilir. Sünekliği artıracak kimyasal bileşim konusunda araştırmalar yapılabilir.

- Fırında eritilen metal içerisinde çözünmüş hidrojen gibi istenmeyen gazları uzaklaştırmak için uygulanan gaz alma işleminin etkinliği konusunda araştırmalar yapılabilir. Bu kapsamda azot gazı miktarı, karıştırma devri ve süresi değişkenlerinin en uygun değerleri araştırılarak porozite oluşumuna etkisi belirlenebilir.
- Üretilen parçalara uygulanacak ısıt işlemlerin mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Anonymous. (2022). Manufacturingguide Web Sitesi: <https://www.manufacturingguide.com/en/warm-chamber-die-casting> [2022, Ocak 12]],
- Aksel, L. (2008). *Metal Enjeksiyon Kalıplarında Yolluk Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Aksoy , S. (2017). *Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi ile Etial-140 Alaşımından Üretilen Havalı Fren Kompresör Kapağında Aşınma Direncinin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Aran, A. (1999). *Döküm teknolojisi-Metal Döküm Teknolojisi*. İSTANBUL: Birsen Yayınevi.
- Aslan, O. B. (2007). *Basınçlı Dökümde Kaliteyi Etkileyen Faktörlerin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Butler, W. (2001). Die Casting. W. A. Butler içinde, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (s. 2147-2152).
- Çiğdemoglu, M. (1972). *Basınçlı Döküm*. Ankara: Makine Mühendisleri Odası.
- Dou, K., Lordan, E., Zhang, Y., Jacot, A., & Fan, Z. (2020). A complete computer aided engineering (CAE) modelling and optimization of high pressure die casting (HPDC) process. *Journal of Manufacturing Processes*, 435-446.
- Dubey, S., & Swain, S. (2019). Numerical investigation on solidification in casting using ProCAST. *IOP Conference Series:Materials Science and*. Coimbatore: IOPscience.
- Duran, S. (2014). *Metal Enjeksiyon Yöntemi ile Üretilen Alüminyum Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ertürk, S. Ö. (2010). *Al Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Yolluk Sisteminden Kaynaklanan Gaz Problemlerinin Simülasyon Tekniği İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Gökçil, E. (2019). *Alüminyum Alaşımının Yüksek Basınçlı Dökümünde Simülasyon Tekniği ile Optimum Kalıp Tasarımı ve Süreç Parametrelerinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Groover, M. P. (2021). *Principles of Modern Manufacturing*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Jarfos, A., Du, A., Zhou, J., Zheng, J., & Yu, G. (2022). On the In-Die Conditions and Process Parameter Settings in Indirect Squeeze Casting. *Technologies*, 10(1), 29.
- Jürgen Buschow, K. H., & Cahn, R. W. (2001). K. H. Jürgen Buschow içinde, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (s. 2147-2152). Amsterdam.
- Kaplan, S. (2012). *Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Kullanılan Makinelerin Tasarım Esasının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karataş, Ç., & Kahraman, E. (2003). Basınçlı Metal Döküm Makine Ve Kalıpları. *Kalıp Dünyası Dergisi*, 114-120.
- Kenar, O. (2019). *Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi ile Üretilen Alüminyum Otomotiv Parçalarında Kalıp Tasarım Değişikliklerinin Parça Döküm Kalitesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özaydın, O., Armağan, E., & Çatal, Y. (2018). *Designing a New Cooling Channel for Less Air Consumption*. İzmir: International Foundry Congress.
- Patnaik, L., Saravanan, I., & Kumar, S. (2020). Die casting parameters and simulations for crankcase of automobile. *Materials Today: Proceedings*, 563-571.
- Sapmaz, İ. (2021). *AlSi2(Fe) Yüksek Basınçlı Döküm Alaşımında Sr İlavelerinin Alaşım Mikroyapısı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Serçe, O., & Kuru, M. (2014). Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde, Farklı Yolluk Tipi Ve Vakum Uygulamasının Simülasyonu. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 1-13.

- Şimşek, L. (2021). *Yüksek Basınçlı Döküm Parametrelerinin Alüminyum Döküm Parçalarda Gözenek Oluşumuna Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova.
- Şirin, S. (2010). *Kalın Kesitli Yüksek Basınçlı Dökümlerde Döküm ve Simülasyon Parametrelerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Toptaş, V. (2014). *Bir Alüminyum Alaşımı ile Basınçlı Döküm Yöntemi Kullanılarak Tabanca Gövdesi Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uludağ, İ. (2000). *Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Dizaynı ve Havalandırmaya Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wang, T., Huang, J., Fu, H., Yu, K., & Yao, S. (2022). Influence of Process Parameters on Filling and Feeding Capacity during High-Pressure Die-Casting Process. *Applied Sciences*, 12(9), 4757.
- Yalçın, B., İpek, O., Koru, M., & Gültekin, N. (2012). Basınçlı Döküm Yöntemiyle İmal Edilen Etial-150 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısına Kalıp Tasarımı ve Enjeksiyon Parametrelerinin Etkisi. *International Materials Symposium*. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Yalçınkaya, S. (2006). *Metal Enjeksiyon Tezgahına Ergimiş Metal Besleme Robotu Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhang, Y., Dou, K., Lordan, E., Jacot, A., & Fan, Z. (2021). A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in. *Journal of Materials Processing Tech.*, 117-193.