

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ İLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM
OTOMOTİV PARÇALARINDA KALIP TASARIM DEĞİŞİKLİKLERİNİN
PARÇA DÖKÜM KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur KENAR

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

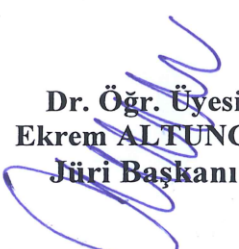
YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ İLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM
OTOMOTİV PARÇALARINDA KALIP TASARIM DEĞİŞİKLİKLERİNİN
PARÇA DÖKÜM KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ


Onur KENAR

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 29.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi
Ekrem ALTUNCU
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Süleyman Can KURNAZ
Üye


Doç. Dr.
Armağan ARICI
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Onur KENAR

29.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, çalışmanın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, SEM çalışmalarında bizzat eşlik eden, titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm firma olanaklarını kullanmama imkan veren Arpek Arkan Parça Alüminyum Enjeksiyon ve Kalıp San. Tic. A.Ş firmasının değerli yöneticilerine, yardım ve desteklerini esirgemeyen çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmalarım boyunca desteklerini ve fikirlerini esirgemeyen, çalışmaların birer parçası olan yöneticilerim Fuat TOPÇU ve Naci EKMEN'e, simülasyon çalışmaları boyunca yardımlarını esirgemeyen Erhan TÜRKMEN'e teorik ve deneysel çalışmalar konusunda bilgi ve tecrübelerini aktararak yardımcı olan Aykut DOĞAN, Barış DEMİR ve Rıdvan ZİRGİLOĞLU başta olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tüm eğitim ve iş hayatım boyunca destek ve güvenlerini arkamda hissettiğim sevgili aileme, zor günlerimde verdiği her türlü destek ve hayatıma kattığı renkler için sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi.....	2
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı ve Sektörel Talepler.....	5

BÖLÜM 2.

YÜKSEK BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM PROSESİ.....	11
2.1. Yüksek Basınçlı Dökümün Avantajları.....	14
2.2. Yüksek Basınçlı Dökümün Dezavantajları	15
2.3. Yüksek Basınçlı Döküm İşlemi ve Parametreleri.....	15
2.4. Basınçlı Dökümde Kullanılan Alüminyum Alaşımları.....	17
2.4.1. Al-Si Alaşımları.....	18
2.4.2. Al-Mg Alaşımları	19
2.4.3. Al-Cu Alaşımları.....	20
2.4.4. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	21
2.5. Yüksek Basınçlı Döküm Kalıpları.....	23
2.5.1. Kalıp Elemanları.....	25

2.5.1.1. Yolluk.....	25
2.5.1.2. Çekirdek.....	26
2.5.1.3. Kalıp Hamilleri.....	27
2.5.1.4. Maçalar.....	27
2.5.1.5. İtici Plakası, Paraleller ve İticiler.....	28
2.5.1.6. Dağıtıcılar, Hava Tahliye Kanalları ve Taşma Cepleri.....	30
2.5.1.7. Soğutma Sistemleri.....	31
2.6. Yüksek Basıncılı Döküm Kalıp Tasarımları.....	32
2.7. Yüksek Basıncılı Döküm Hataları.....	37
2.7.1. Gaz Porozitesi.....	43
2.7.2. Soğuk Birleşme.....	44
2.7.3. Çekinti (Shrinkage).....	46
2.7.4. Baloncuk (Blister).....	47
2.8. Yüksek Basıncılı Dökümün Kalite Kontrolü.....	48
2.8.1. Porozite (X-Ray Muayeneleri).....	48
2.8.2. Boyutsal (Ölçüsel) Problemler.....	49
2.8.3. Görsel Hatalar.....	49
2.8.4. Trim Hataları.....	50
2.8.4. Kaçak Problemi (Leakage).....	50
2.9. Yüksek Basıncılı Dökümde Simülasyon ve MAGMASoft.....	50
BÖLÜM 3.	
LİTERATÜR TARAMA.....	52
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	55
4.1. Tasarım ve Simülasyon Çalışmaları	56
4.2. Döküm Denemeleri.....	58
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	63
5.1. Simülasyon Sonuçları.....	63

5.2. Görsel Kontroller.....	66
5.3. X-Ray Radyoskopisi İncelemeleri.....	68
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri.....	70
5.5. Sızdırmazlık Testleri.....	75
5.6. Verimlilik Analizleri.....	76
BÖLÜM 6.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	83

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

8D	: 8 Disiplin problem çözme tekniği
AA	: U.S. Aluminium Association
AIM	: Associazione Italiana Metalurgia
ANSI	: American National Standards Institute
ERP	: Enterprise Resource Planning
FMEA	: Failure Mode Effect Analysis
HPDC	: High Pressure Die Casting
IATF 16949	: Otomotiv Kalite Yönetim Sistemi
MMC	: Metal Matrix Composite
MRP	: Material Resource Planning
PPM	: Parts Per Million
PDCA	: Plan-Do-Control-Act Problem çözme tekniği
SEM	: Scanning Electron Microscope
OEM	: Original Equipment Manufacturer

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Basınçlı döküm yöntemlerinde 2015-2020 BYBO analizi	3
Şekil 1.2. Üretim hızı - döküm ağırlığına göre döküm proseslerinin karşılaştırılması.5	
Şekil 1.3. Kuzey Amerika hafif araçların ortalama malzeme ağırlık analizi	6
Şekil 1.4. Çeşitli ülkeler için azalmakta olan CO ₂ emisyonu değerleri grafiği.....	7
Şekil 1.5. Başlıca OEM'lerin 2021 CO ₂ hedefleri	7
Şekil 1.6. Otomobillerde alüminyum bileşen oranları	9
Şekil 1.7. Araçlarda alüminyum kullanım miktarının yıllara göre değişimi.....	10
Şekil 1.8. Otomotiv uygulamalarında ağırlık tasarrufu ve pazar yayılımı.....	10
Şekil 2.1. Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi.....	12
Şekil 2.2. Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi	12
Şekil 2.3. Soğuk kamaralı HPDC makinasının kovanında sıvı metal hareketi.....	13
Şekil 2.4. Basınçlı döküm sırasında enjeksiyon aşamaları	14
Şekil 2.5. Yüksek basınçlı döküm proses zinciri	16
Şekil 2.6. Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi	24
Şekil 2.7. Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri.....	26
Şekil 2.8. Hareketli tarafa bağlanmış bir çekirdek görüntüsü.....	26
Şekil 2.9. Kalıp hamillerinin kalıp seti içerisinde görünümü.....	27
Şekil 2.10. Kalıp sisteminde hareketli maçaların görünüşü.....	28
Şekil 2.11. Kalıp sisteminde itici plakası ve paraleller	29
Şekil 2.12. İtici pimlerin şematik gösterimi	30
Şekil 2.13. Bir kalıpta dağıtıcılar, yolluk girişleri ve taşma cepleri.....	31
Şekil 2.14. Soğutma kanallarının şematik gösterimi.....	32
Şekil 2.15. İki gözlü kalıpta A- Klavuz pimi B- Hidrolik pompası C- Maça	35
Şekil 2.16. Havalandırma kanalları ve taşma cepleri.....	36
Şekil 2.17. Hataların sınıflandırılması ve kaynakları.....	42
Şekil 2.18. Bir alüminyum alaşımı döküm parçasında gaz kaynaklı porozite	44
Şekil 2.19. Yüksek basınçlı dökümde soğuk birleşme hatası oluşumu.....	44

Şekil 2.20. Düşük mekanik yük ile kırılmaya sebep olan soğuk birleşme hatası.	45
Şekil 2.21. Porozite ile çekinti boşluğunun mikroyapı ve 3D görünümü	46
Şekil 2.22. Baloncuk hatasının oluşumu (üstte) ve makro görüntüsü (altta).	47
Şekil 4.1. Deneysel çalışma sistematığı.	55
Şekil 4.2. E1 parçasının (a) ilk ve (b) ikinci chillvent tasarımı görüntüleri.	57
Şekil 4.3. K1 parçasının (a) ilk ve (b) ikinci chillvent tasarımı görüntüleri.	57
Şekil 4.4. StrikoWestofen ergitme fırını.	59
Şekil 4.5. Azotla gaz giderme sistemi.	59
Şekil 4.6. Bühler soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinası.	60
Şekil 4.7. Struers Tegrapol-11 Zımparalama ve parlatma cihazı.	61
Şekil 4.8. Yxlon 160 kw X-Ray Radyoskopi makinası.	61
Şekil 4.9. Tescan Elektron Mikroskobu – Sakarya Üniversitesi.	62
Şekil 5.1. E1 parçası (a) ilk ve (b) ikinci tasarım hava sıkışması sonuçları.	63
Şekil 5.2. E1 parçası (a) ilk ve (b) ikinci tasarım hava basıncı sonuçları.	64
Şekil 5.3. E1 parçası (a) ilk ve (b) ikinci tasarım hava basıncı karşılaştırması.	64
Şekil 5.4. K1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarım gaz basıncı simülasyon sonuçları.	65
Şekil 5.5. K1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarım dolum zamanı sonuçları.	66
Şekil 5.6. E1 parçası üzerinde soğuk birleşme baloncuk hataları.	66
Şekil 5.7. İlk tasarım ile dökülen E1 parçasında görsel soğuk birleşme hatası.	67
Şekil 5.8. İlk (a) ve ikinci (b) tasarımlar ile dökülen K1 parçalarında porozite.	68
Şekil 5.9. E1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarımlar sonrası X-Ray görüntüleri.	69
Şekil 5.10. K1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarımlar sonrası X-Ray görüntüleri.	69
Şekil 5.11. SEM incelemeleri için E1 parçasından alınan numuneler.	70
Şekil 5.12. E1 parçasında porozite hatasının SEM incelemeleri.	71
Şekil 5.13. E1 parçasında soğuk birleşme hatasının SEM incelemeleri.	72
Şekil 5.14. E1 parçasında baloncuk hatasının SEM incelemeleri.	73
Şekil 5.15. K1 parçasında porozite hatasının SEM incelemeleri.	74
Şekil 5.16. E1 parçası sızdırmazlık test sistemi.	75
Şekil 5.17. K1 parçası sızdırmazlık test sistemi.	75
Şekil 5.18. E1 Parçası ret oranları.	76
Şekil 5.19. K1 Parçası ret oranları.	76

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Basınçlı dökümün diğer döküm yöntemleri ile karşılaştırılması.....	4
Tablo 2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırılması.....	21
Tablo 2.2. Otomotiv sektöründe alüminyum alaşımları sembol gösterimleri	22
Tablo 2.3. Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinde malzemeler	32
Tablo 2.4. D.L. Cocks'a göre döküm hatalarının sınıflandırılması.....	37
Tablo 2.5. Campbell'a göre döküm hatalarının sınıflandırılması.....	38
Tablo 2.6. NADCA'ya göre döküm hatalarının sınıflandırılması.....	38
Tablo 2.7. İç hataların sınıflandırılması.....	40
Tablo 2.8. Yüzey hatalarının sınıflandırılması.....	41
Tablo 2.9. Geometrik hataların sınıflandırılması.....	41
Tablo 2.10. Yüksek basınçlı dökümde karşılaşılan hataların oluşma sıklıkları.....	42
Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan parçalar ile ilgili genel bilgiler.....	56
Tablo 4.2. AlSi12Cu1(Fe) alaşımının (E1) kimyasal kompozisyonu.....	58
Tablo 4.3. AlSi10Mg(Fe) alaşımının (K1) kimyasal kompozisyonu.....	58
Tablo 4.4. Gazalma proses parametreleri.....	58
Tablo 4.5. E1 parçasının yüksek basınçlı döküm proses parametreleri.....	60
Tablo 4.6. K1 parçasının yüksek basınçlı döküm proses parametreleri.....	60

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yüksek basınçlı döküm, alüminyum alaşımları, kalıp tasarımı, simülasyon, soğuk birleşme, blister, porozite.

Otomotiv endüstrisinin seri üretim şartlarına uyum sağlayabilecek ve aynı zamanda sürekli artan müşteri taleplerine de cevap verebilecek bir üretim yöntemi olarak alüminyum alaşımlarının yüksek basınçlı dökümü öne çıkmaktadır. Yüksek üretim hızı, tek bir kalıp ile yüksek üretim adedi, ölçüsel hassasiyet, düşük talaşlı imalat gereksinimi gibi avantajlarından dolayı tercih edilen yüksek basınçlı döküm yönteminde kalıp tasarımları nihai ürün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olan kalıpların üretimi öncesinde yapılan tasarım süreçlerine ek olarak simülasyon yazılımlarının kullanımı ile zaman ve maliyet açısından kayıplar azaltılabilmektedir. Yüksek basınçlı döküm makinasının kamerası içerisinden başlayarak kovan ve kalıp boşluğu içerisinde bulunan gazların döküm sırasında parça içerisinde sıkışmadan kalıp içerisinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Kalıp içerisinde bulunan havanın ve gazların verimli bir şekilde atılması döküm parça kalitesi açısından oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında yüksek basınçlı döküm prosesi ile AlSi12Cu1Fe, AlSi10MgFe alaşımlarından üretilen iki farklı otomotiv bileşenin ventil (gaz atma) kalıp tasarımları üzerine çalışılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Tasarımlara göre parça içerisinde sıkışan gazların bölgeleri ve miktarları MAGMASoft HPDC yazılımı ile incelenmiştir. Çalışmalarda özellikle soğuk birleşme, baloncuk (blister) ve porozite döküm hatalarına odaklanılmıştır. Deneme dökümleri sonrasında numune parçalar üzerinden görsel, X-Ray radyoskopi ve taramalı elektron mikroskopi (SEM) incelemeleri yapılmış ve ayrıca sızdırmazlık testleri sonuçları ile ERP yazılımı verileri kullanılarak verimlilik analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda genel olarak toplam gaz atma yüzey alanlarının kalıp tasarımında iki katına çıkarılması sonucunda döküm hatalarının önemli oranda azaldığı görülmüştür. Ayrıca parçalarda simülasyon sonuçlarına göre belirlenen kritik bölgelere hava ceplerinin yerleştirilmesi sıvı metal akışını değiştirerek kalıp boşluğu içerisinden daha verimli gaz atılmasını sağladığı tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIE DESIGN MODIFICATIONS ON CASTING PART QUALITY IN ALUMINUM AUTOMOTIVE PARTS PRODUCED BY HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS

SUMMARY

Keywords: High pressure die casting, aluminium alloys, die design, simulation, cold shut, blister, porosity.

High pressure die casting of aluminum alloys stands out as a production method that can adapt to the mass production conditions of the automotive industry and also to meet the ever-increasing customer demands. Mold designs are critical to the final product quality in high pressure die casting which is preferred because of its advantages such as high production speed, high production quantities with one mold, geometrical sensitivity, low machining requirement and mold designs are critical to the final product quality. In addition to the design processes prior to the production of the molds with high initial investment costs, the losses in terms of time and cost can be reduced with the use of simulation software. Starting from inside the chamber of the high pressure die casting machine, the gases in the sleeve and the mold cavity must be removed from the mold without being trapped in the part during casting. Efficient disposal of air and gases in the mold is very important in terms of casting quality. In this thesis, vent (gas disposal) design of two different automotive components produced with AlSi12Cu1Fe and AlSi10MgFe alloys by high pressure die casting process was studied and the results were examined. The regions and quantities of gases trapped inside the parts according to the designs were examined by MAGMAsoft HPDC software. The focus of the studies was on the casting defects of cold shut, blistering and porosity. After the experimental castings, visual, X-Ray radiography and scanning electron microscopy (SEM) studies were carried out on the sample pieces and also the results of leakage tests and the efficiency analysis were performed by using ERP software data. As a result of the experimental studies, it was observed that the total gas extraction surface areas were doubled in the mold design and the casting defects decreased significantly. In addition, according to the simulation results, it has been determined that the placement of air pockets on critical regions of the part changes the flow of liquid metal and provides more efficient gas disposal through the mold cavity.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

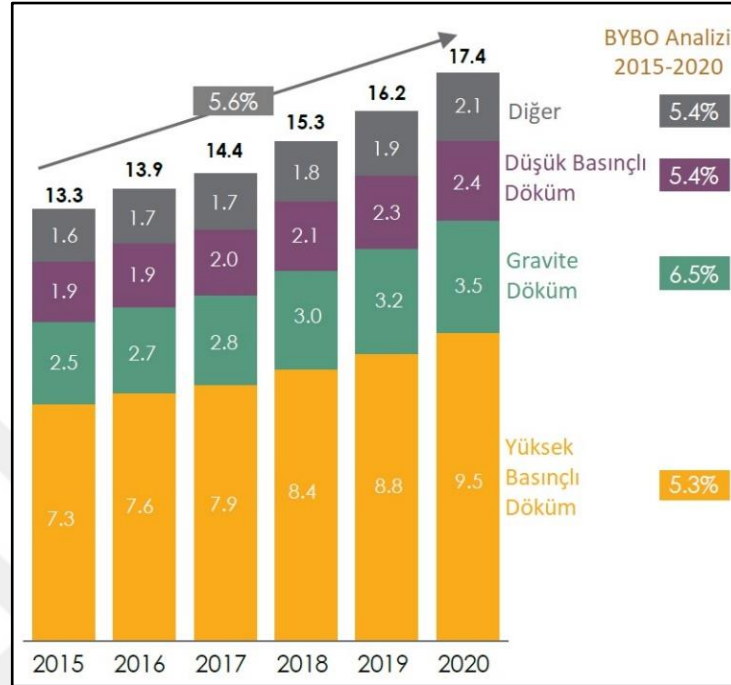
Günümüz otomotiv endüstrisinde alüminyum alaşımlarının sağladığı avantajlar nedeniyle kullanım oranı arttıkça seri halde üretim kabiliyetini ve verimliliğini artıran döküm yöntemlerine ve üretim proseslerine olan ilgi de artmaktadır. Genel olarak bu talebi geleneksel yöntemlere göre basınçlı döküm teknolojisi karşılamaktadır. Çok çeşitli otomotiv parçalarının üretiminde düşük yoğunluklu parça kullanımının giderek arttığı endüstriyel uygulamalarda alüminyum basınçlı döküm alaşımları kolay dökülebilirlik, düşük yoğunluk, alaşımlandırılabilme, yüksek korozyon direnci, yüksek mekanik dayanım ve sızdırmazlık özellikleri gibi avantajlarından dolayı tercih sebebi olmaktadır. Basınçlı döküm alüminyum alaşımları başta otomotiv olmak üzere elektrikli ev aletleri, ev eşyaları, makine, inşaat, denizcilik, havacılık, dekorasyon ve daha birçok sektörde yaygın olarak gerek sektörel şartnameler gerekse uluslararası standard kalite spesifikasyonları çerçevesinde kullanılmaktadır. Basınçlı döküm teknolojisi alüminyum alaşımının ergitilmesi sonrasında yüksek basınç etkisiyle yüksek sıcaklıklara dayanıklı çelik (H13,1.2344 kalite X40CrMoV51) kalıbın içerisine sıvı metalin yüksek hızla enjeksiyonu (yüksek basınçlı döküm makinesinde) ve hızlı katılaşmasını sağlayan bir seri döküm işlemlerini kapsamaktadır. Bu hızlı üretim koşullarında dakika mertebesinde parça son şekle yakın halde yüksek yüzey kalitesinde kalıptan çıkarılmaktadır. Her döküm yönteminde olduğu gibi basınçlı döküm prosesinde de döküm hataları üretim verimliliğini sınırlayıcı etkiye sahiptir. Genel olarak döküm hataları kullanılan tasarımdan, alaşımdan, kalıptan, proses parametrelerinden, döküm makinesinden kaynaklı ortaya çıkabilmektedir. Çoğunlukla yüzey hataları ve döküm içi hatalar olmak üzere iki hata grubu ile karşılaşılmaktadır. Döküm içi hatalar arasında en önemlileri: gaz porozitesi, çekinti porozitesi, soğuk birleşme yeralırken, kalıp kaynaklı hatalar yüzey hatalarına neden olmakta ve sonrasında ek işlemlere gereksinim duyulmaktadır. Hata oranlarının artması hem üretim verimliliğini düşürmekte hemde ek işlem maliyetlerini artırmaktadır. Birçok basınçlı döküm

üretimi yapan tesis için başta kalıp tasarımı olmak üzere düzeltici önleyici faaliyetler, belirli standartlar (IATF 16949:2016) doğrultusunda ve problem çözme teknikleri aracılığıyla (PDCA, 8D, Balık Kılçığı) kapsamlı bir şekilde sürdürülmektedir. Tüm hata kodları standartlar (NADCA standartları) ile tanımlanmış olup, üretim kapsamında alınan örnekler ile test ve kalite kontrole tabi tutulmaktadır. Prosesin çevrim hızının kısa olması proses kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle döküm öncesi simülasyon çalışmaları ile döküm hatalarının azaltıcı tedbirler alınmaya çalışılmaktadır. Sektörde yaygın olarak MAGMASoft döküm simülasyon yazılımının kullanımı söz konusu olup, kalıp tasarımı üzerinde uygun revizyon, iyileştirme çalışmaları ile birlikte bu hata türlerinin ortaya çıkması engellenmeye çalışılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında da yüksek basınçlı döküm prosesi (HPDC) ile basınçlı döküm alüminyum alaşımları (AlSi12Cu1Fe, AlSi10MgFe) kullanılarak üretilen otomotiv parçalarından, egzost arıtma sistemi bileşeni ve klima kompresör gövdesi parçalarının kalıp tasarım değişikliklerinin parça döküm kalitesi üzerine etkileri araştırılmış ve döküm simülasyon çalışmaları ile proses kontrol kabiliyeti detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır. Sonrasında döküm hataları gözle muayene, X-Işınları röntgen muayaneleri, metalografik hazırlama sonrası mikroskopik incelemeler elektron mikroskobu (SEM) ve sızdırmazlık testleri ile birlikte analiz edilmektedir. Tez sunum açısından 6 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde otomotiv sektöründe basınçlı döküm prosesi ve kullanım alanları, ikinci bölümde basınçlı döküm prosesi ve döküm alaşımları, üçüncü bölümde literatür tarama özetleri, dördüncü bölümde deneysel çalışma planı beşinci bölümde deneysel çalışma test ve analiz süreçleri ile sonuçlar ve tartışma, altıncı bölümde ise genel sonuçlar ve öneriler detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

1.1. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi

Basınçlı döküm işlemleri sayesinde, üretimi zorlu sayıca fazla hafif metalik bileşenler seri halde ekonomik olarak üretilebilmektedir. Basınçlı döküm prosesi gerek ülkemizde gerekse dünyada hızla yaygınlaşan ve gelişen bir üretim teknolojisine sahiptir. Küresel alüminyum güç aktarma organları ve yapısal bileşenler basınçlı döküm pazarının 2015 yılında 13,3 milyar dolar olduğu

bilinmektedir ve %5,6 lık bileşik yıllık büyüme oranı (BYBO) ile birlikte 2020 yılına kadar bu rakamın 17,4 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Şekil 1.1.) [1,2].



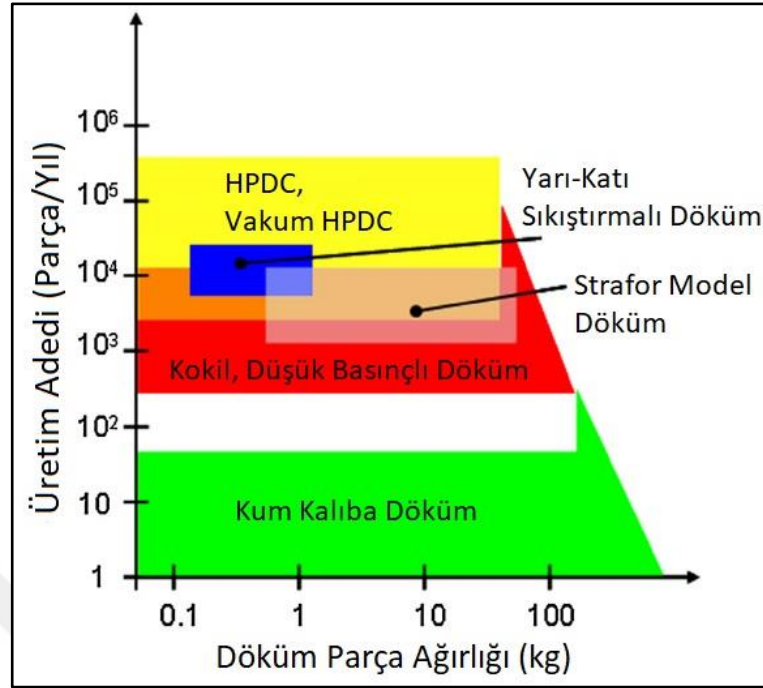
Şekil 1.1. Basıncılı döküm yöntemlerinde 2015-2020 BYBO analizi [2].

Özellikle otomotiv endüstrisindeki yüksek seri üretim adetlerine cevap verebilmesi açısından alüminyum alaşımı kompleks parçaların basınçlı döküm yöntemleri ile üretimi ön plana çıkmaktadır. Döküm teknolojisinde kaydedilen teknolojik ilerlemeler, yüksek enerji verimliliği ve düşük maliyet beklentileri karşısında yüksek kapasiteli döküm makineleri ve geniş yüzey alanına sahip kalıplar ile basınçlı döküm firmaları arasında rekabet oldukça yüksektir. Alüminyum basınçlı döküm diğer geleneksel birçok döküm yöntemine (kum döküm, kokil döküm, hassas döküm gibi) göre birçok açıdan üstünlük sağlamaktadır. Döküm yöntemleri parçanın geometrisine, ağırlığına ve döküm adedine bağlı olarak karşılaştırılmaktadır (Tablo 1.1.). Dökülebilme kabiliyeti oldukça önemli bir faktördür. Bu nedenle döküm hatalarını ve birim maliyetlerini azaltıcı modernizasyon çalışmaları yanında kapsamlı kalite kontrol ve döküm öncesi simülasyon faaliyetlerine olan ilgi artmaktadır [1-3].

Tablo 1.1. Basınçlı dökümün diğer döküm yöntemleri ile karşılaştırılması [1].

	Gravite Kalıp Döküm	Düşük Basınçlı Döküm	Yüksek Basınçlı Döküm	Kum Kalıba Döküm
Ağırlık	0,01 kg - 50 kg	1 kg - 70 kg	0,01 kg - 30 kg	0,1 kg - 500 kg
Kalıp ya da Model Maliyeti	Orta derecede	Orta derecede	Yüksek	Görece düşük maliyet
Değişikliklerin Maliyeti	Orta derecede	Orta derecede	Yüksek	Düşük
Dizayn Esnekliği	Yüksek	Görece yüksek	Görece yüksek	Çok yüksek
Minimum Kesit Kalınlığı	3 mm - 4 mm	3 mm - 4 mm	0,8 mm - 1,5 mm	4 mm - 6 mm
Ölçüsel Hassasiyet	Yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Orta derecede
Muhtemel Yüzey Pürüzlülüğü	$\geq 3,2$ Ra (2,5 Ra)	$\geq 3,2$ Ra	$\geq 1,6$ Ra (0,8 Ra)	$> 6,3$ Ra - 12,3 Ra

Tablo 1.1.'deki verilerden de görülebileceği gibi yüksek basınçlı döküm yönteminin iyi ürün kalitesi, yüksek yüzey hassasiyeti, dar toleranslarda, karmaşık geometrilerde ve ince kesitlerde seri halde yüksek üretim verimliliği ve çok yönlü ekonomik avantajları bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yüksek basınçlı döküm prosesi en yaygın kullanılan ve en hızlı gelişen metal döküm yöntemlerinden bir tanesidir. Yüksek basınçlı döküm yöntemi yaygın olarak otomotiv, haberleşme teçhizatı, havacılık, elektrik makineleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek basınçlı döküm proseslerinde belirli kimyasal kompozisyon standartlarına uygun alüminyum alaşımları, çinko alaşımları ve magnezyum alaşımları dökülebilmektedir. Yüksek üretim adetlerinin istendiği durumlarda en uygun üretim yönteminin düşük çevrim süreli yüksek basınçlı döküm olduğu bilinmektedir. Ancak yüksek basınçlı dökümde kullanılan kalıpların maliyetleri yüksek olduğu için bu yöntemin tercihi ancak yıllık 5000-10000 adetlik üretimlerin söz konusu olduğu durumlarda avantajlı hale gelmektedir (Şekil 1.2.) [3].

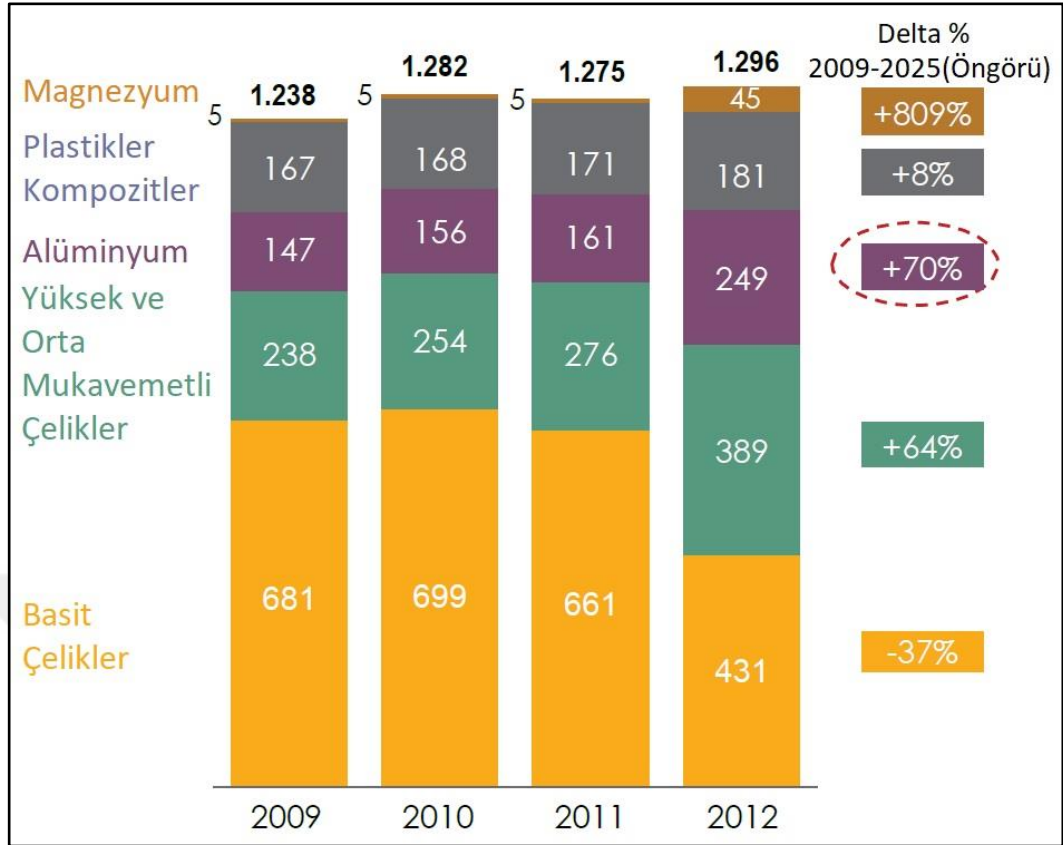


Şekil 1.2. Üretim hızı - döküm ağırlığına göre döküm proseslerinin karşılaştırılması [3].

Otomotiv endüstrisi özelinde bakıldığında yüksek basınçlı döküm, güç aktarma sistemi bileşenleri, havalı fren sistemi muhafazaları, klima sistemi gövdeleri, kompresör sistemi parçaları ve egzoz gazı arıtma sistemi bileşenleri gibi birçok yüksek hacimli ve düşük maliyetli parçaların üretiminde önemli bir prostir [4].

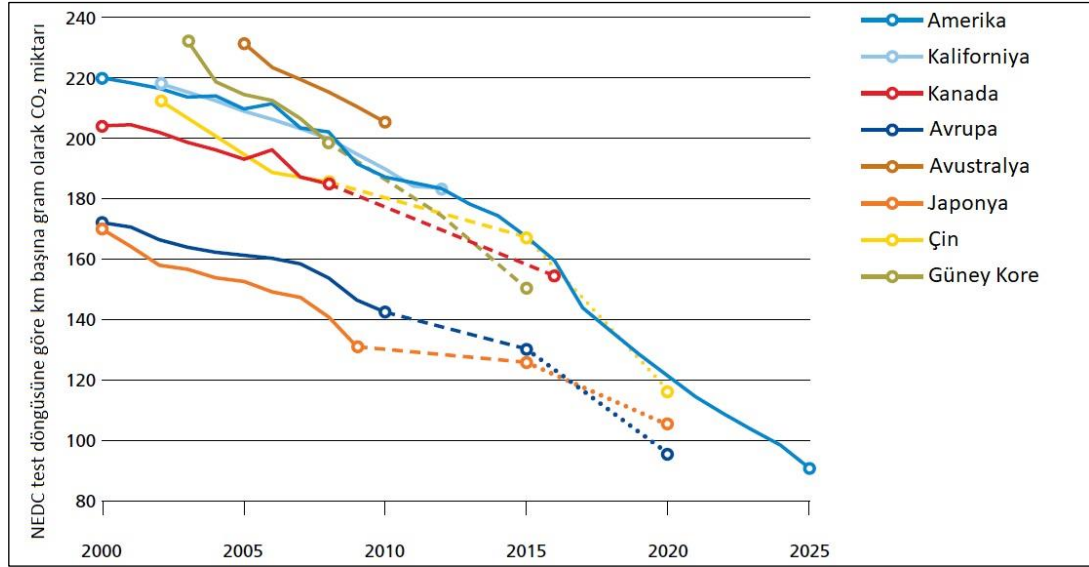
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı ve Sektörel Talepler

Alüminyum alaşımlarının güç aktarma organları ve yapısal otomotiv bileşenleri için kullanımı yalnızca lüks segment araçlar için değil, aynı zamanda basınçlı döküm yöntemi ile hassas toleranslarda üretilen seri üretim araçlar içinde artmaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafif araçlardaki global kullanımının önümüzdeki 10 yıl içinde %70 oranında artması beklenmektedir. Şekil 1.3.'te Kuzey Amerika'daki hafif araçlarda kullanılan farklı malzemelerin ortalama ağırlık analizi ile birlikte 2025 yılı tahminlerine göre bu malzemelerin kullanım oranları verilmiştir [2].



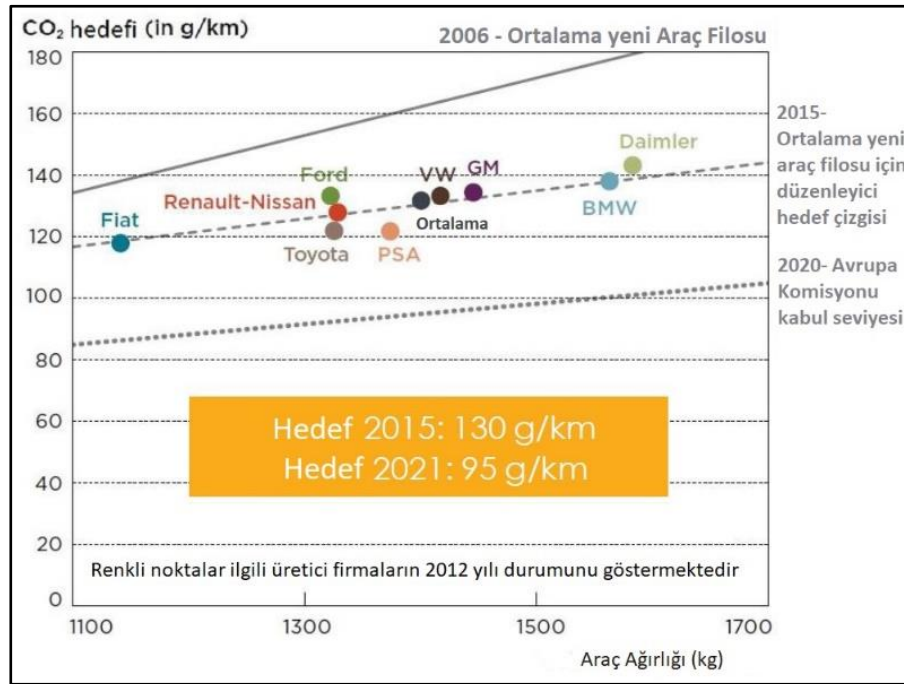
Şekil 1.3. Kuzey Amerika hafif araçların ortalama malzeme ağırlık analizi [2].

Petrol türevi yakıtların endüstri devrimiyle başlayarak her geçen gün azalıyor olması sınırlı olan bu enerji kaynağının daha etkin kullanılma ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu yakıt türüne tamamen bağımlı olan otomotiv sektörünün karbondioksit emisyonuyla küresel ısınmaya olan katkısında göz önüne alındığında hükümetlerin ve dünya çapındaki bazı organizasyonların getirdiği ulusal ve uluslararası düzenlemeler otomotiv sektöründe ilk ve en başlıca önlem olarak araçların ağırlıklarının hafifletilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. 2010-2020 yılları arasında Avrupa'daki araçlardan kaynaklanan ortalama CO₂ emisyonları 142 g/km'den 95 g/km'ye (yılda %3,9) düşmektedir. Şekil 1.4. çeşitli ülkeler için CO₂ emisyonu hedeflerini göstermektedir [5-6].



Şekil 1.4. Çeşitli ülkeler için azalmakta olan CO₂ emisyonu değerleri grafiği [6].

Küresel otomotiv endüstrisi, 2015 Avrupa CO₂ standartlarını sağlamış olmakla birlikte, Şekil 1.5.'te de belirtildiği gibi 2021 yılı emisyon şartlarının sağlanabilmesi için başlıca OEM'ler otomobillerde ağırlık azaltma stratejilerini devam ettirmek durumundadırlar [2].



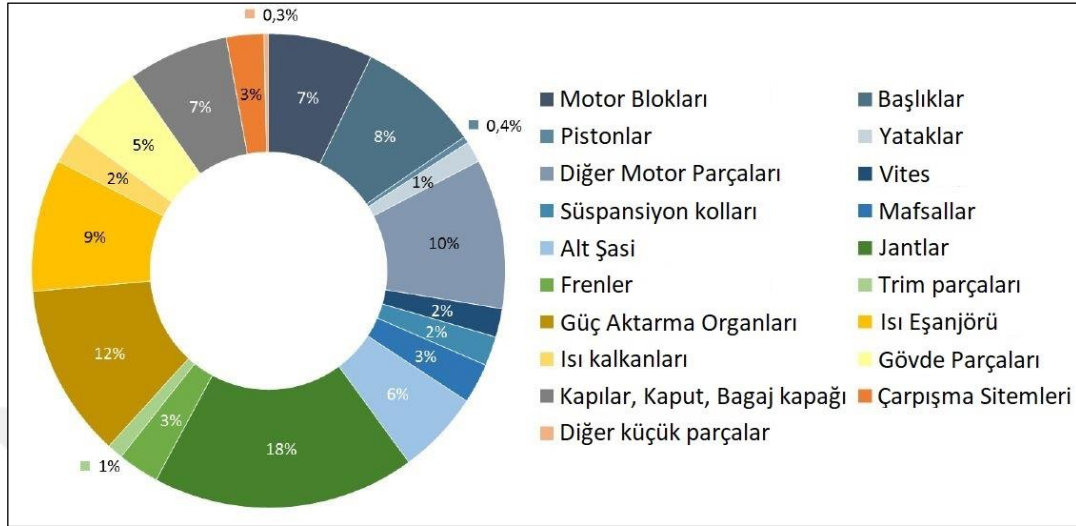
Şekil 1.5. Başlıca OEM'lerin 2021 CO₂ hedefleri [2].

Genel olarak tüm taşıtların toplam ağırlığının %15 oranında azaltılmasının yakıt ekonomisini %25 arttırabileceği tahmin edildiğinden otomotiv endüstrisinin yakıt ekonomisini geliştirmedeki temel amacı araçların ağırlığını azaltmak olmuştur. Otomotiv endüstrisi bunu öncelikle çelik aksamları alüminyum aksamlarla değiştirerek başarmış ve bunun sonucunda alüminyum döküm parçalar için daha büyük bir talep ortaya çıkmıştır. Ayrıca otomobillerde ağırlık azaltma, CO₂ emisyonlarını azaltmak açısından en etkili ve direkt yöntemlerden biridir, çünkü bir otomobilin kütlesinden tasarruf edilen 100 kg, kilometre başına CO₂ salınımının 9 gram azalmasını ve 100 km'de 0,35 litre yakıtın tasarruf edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca otomobillerde ağırlığın azaltılması hızlanma, fren mesafesi, yol tutuş ve sürüş konforu gibi ek faydalar sağlamaktadır [6-7].

Tüm bu veriler ışığında, başta Kuzey Amerika ve Avrupa'daki otomotiv üreticileri olmak üzere, firmalar tasarımlarında daha hafif metallerin kullanımını öne çıkarmıştır. Otomotiv endüstrisi sorunu öncelikle çelik aksamları alüminyum aksamlarla değiştirerek çözmüş ve bunun sonucunda alüminyum döküm parçalar için daha büyük bir talep ortaya çıkmıştır. Ayrıca alüminyum, kolaylıkla geri dönüştürülebilmesi nedeniyle otomotiv endüstrisi için giderek daha popüler bir malzeme haline gelmektedir. Tüketilen tüm alüminyumun yaklaşık dörtte üçü diğer amaçlar için tekrar kullanılabilir ve geri kazanılmış alüminyum süresiz olarak geri dönüştürülebilir ki bu avantajda otomotiv parçalarının dökümünde en popüler malzeme haline gelmesinin bir başka nedeni olarak gösterilmektedir. Alüminyumun bir diğer avantajı, yüksek spesifik enerji emilimidir. Alüminyum yapılar aynı çelik yapılardan %50 daha fazla enerji emilimine sahiptir. Son zamanlarda gerçekleştirilen çarpma testleri, çelik yapılara kıyasla daha yüksek çarpma performansına sahip alüminyum yapılarda yüzde 40 veya daha fazla ağırlık tasarrufunun sağlanabileceğini göstermektedir [5-7-8].

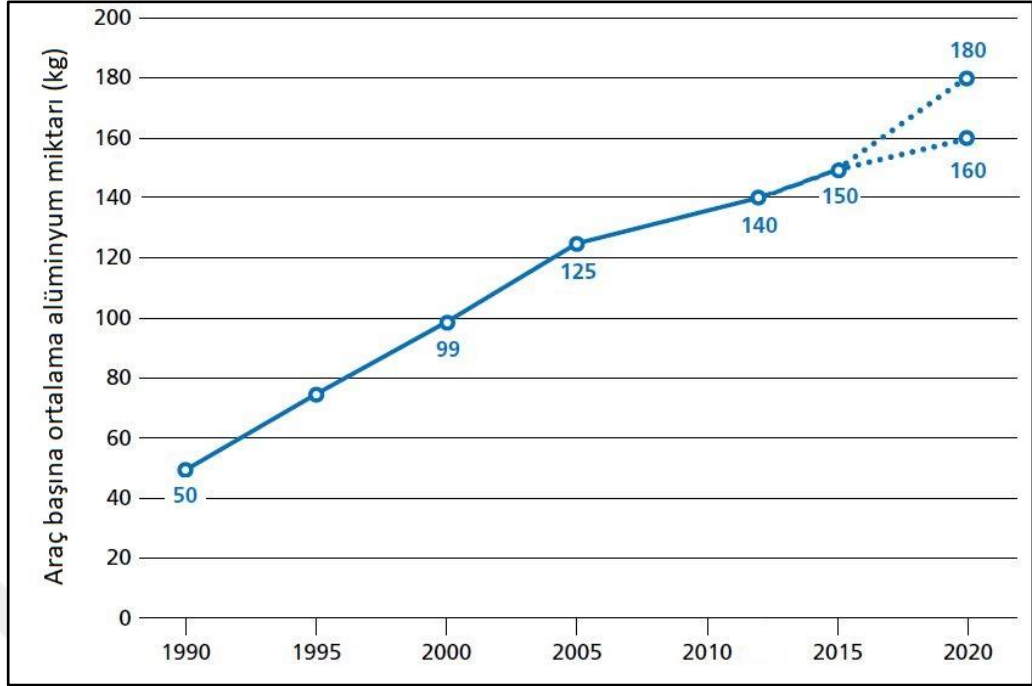
Otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanımında her ne kadar karoser için alüminyum levha ürünlerine odaklanılmış olsa da, aktarma organları ve tekerlekler arasındaki döküm parçalarının oranı da toplam ortalama alüminyum içeriğinin yaklaşık %50'sidir. 2016 yılı toplam Avrupa otomobil üretimi verilerine göre araç

başına ortalama alüminyum bileşen içeriği şekil 1.6.'daki pasta grafiğinde verilmiştir [7-9].

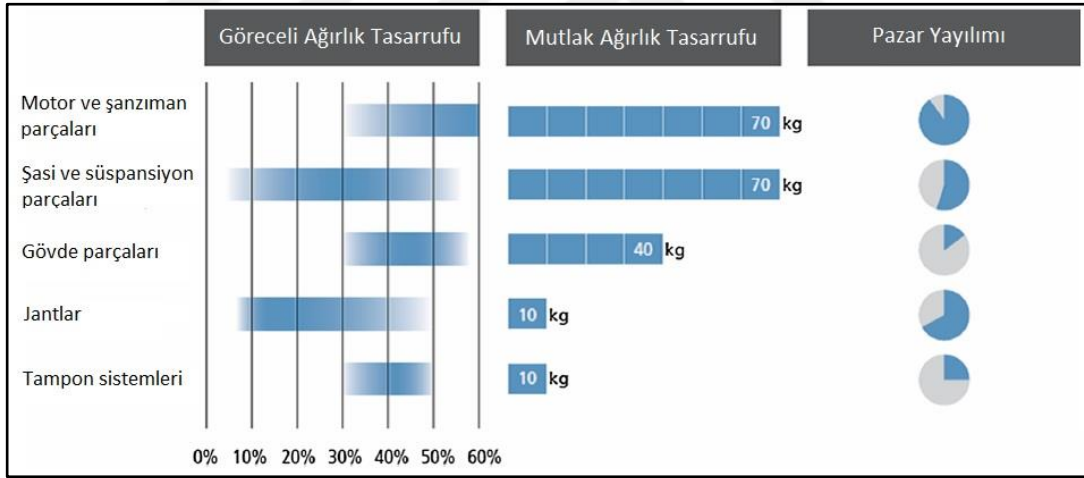


Şekil 1.6. Otomobillerde alüminyum bileşen oranları [9].

Hızlı gelişen otomotiv sektöründe sürekli olarak alüminyum kullanımında artış gözlenmektedir (Şekil 1.7.). Ayrıca otomotiv uygulamalarında alüminyum alaşımları için ağırlık tasarrufu ve pazar penetrasyonu şekil 1.8.'de verilmiştir. Döküm parçalar dahil olmak üzere yetmişli yıllardan başlayarak araçlarda artan miktarda alüminyum kullanılmaya başlamıştır. Gelecek yıllar için yapılan tahminlerine dayanarak, araç başına alüminyum içeriğinin 2020 yılına kadar yaklaşık olarak 170 kg, 2025 yılına kadar da 190 kg seviyelerine ulaşması beklenmektedir. Ayrıca binek araçlarda döküm, ekstrüzyon ve levha ürünü alüminyum alaşımlarının 2050 yılına kadar 250 kg'a ulaşması beklenmektedir. 2015 yılında, otomotiv parçaları için küresel alüminyum basınçlı döküm pazarı, ABD doları cinsinden 26,98 milyar dolar değerinde olmuştur. Bu rakamın yalnızca 2020 yılına kadar 35,57 milyar dolara ulaşması öngörülmektedir [3-5-7].



Şekil 1.7. Araçlarda alüminyum kullanım miktarının yıllara göre değişimi [3].



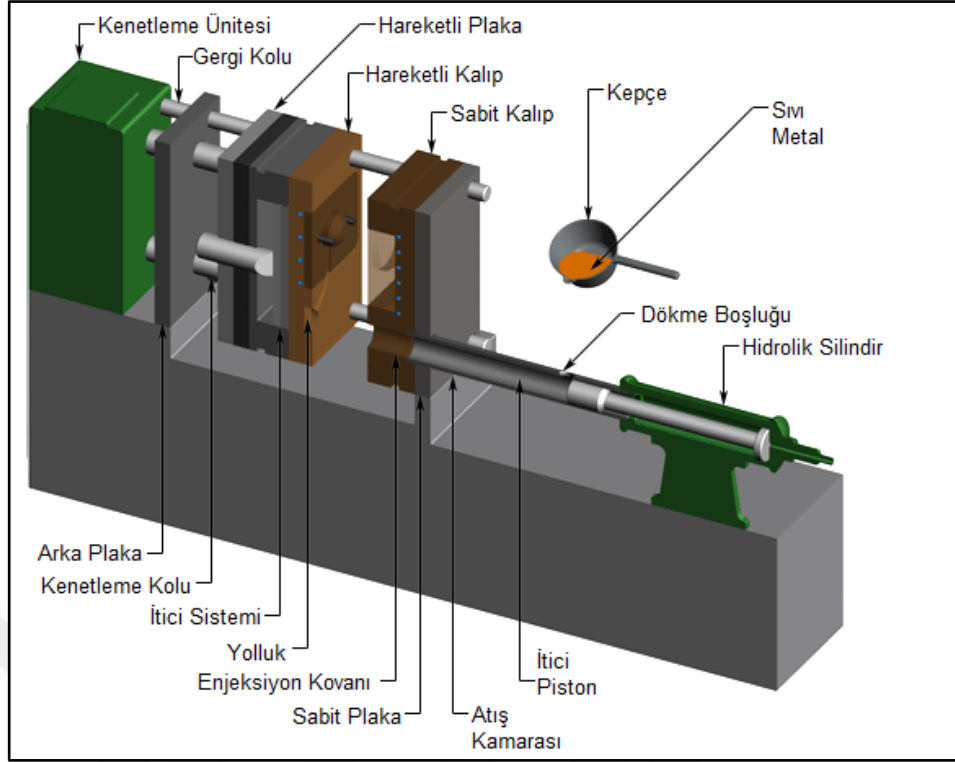
Şekil 1.8. Otomotiv uygulamalarında ağırlık tasarrufu ve pazar yayılımı [10].

Otomobil endüstrisinin alüminyum parçalara yönelik artan talebinin yanı sıra, sanayide artan otomasyon kullanımı, döküm prosesinin daha üretken hale getirilmesi ve daha fazla parçanın üretilmesine olanak sağlanması nedeniyle, yüksek basınçlı döküm son yıllarda daha da önemli bir mevkiye ulaşmıştır. Bu kombinasyon yüksek basınçlı alüminyum döküm prosesini otomotiv endüstrisi için gelişmekte olan bir üretim yöntemi haline getirmektedir [7].

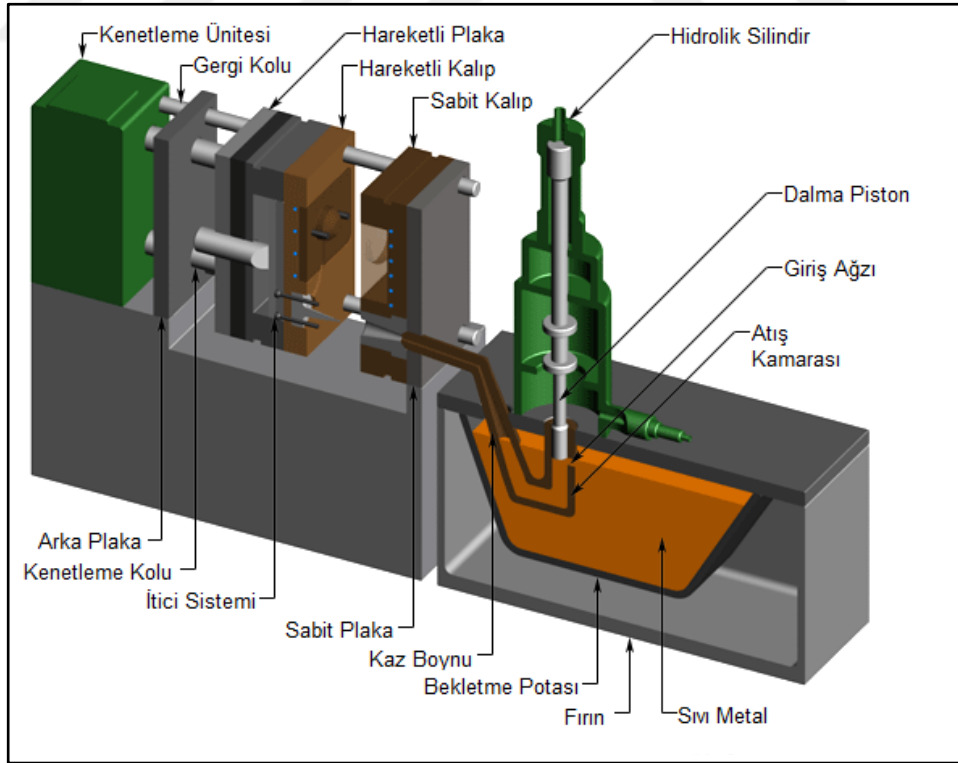
BÖLÜM 2. YÜKSEK BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM PROSESİ

Günümüzde yüksek basınçlı döküm en çok kullanılan ve istenen döküm yöntemidir. Yaklaşık olarak alüminyum dökümlerin %70'i alçak basınç ve yüksek basınç yöntemleriyle üretilmektedir. Bu tarif içinde geleneksel ve yüksek teknoloji ihtiva eden vakum sıkıştırımlı döküm, basınç altında tutma, yarı katı döküm yöntemleri de bulunmaktadır [11].

Yüksek basınçlı döküm yöntemi; ergitilmiş metalin enjeksiyon makinası haznesine doldurulup piston hareketi ile yüksek hızlarda (30-100 m/s) ve yüksek basınç altında (400-1000 bar), akışta güçlü türbülanslara neden olan kompleks geçit ve yolluk sistemleri ile tekrar tekrar kullanılabilen çelik bir kalıbın içine gönderilmesi ile gerçekleştirilen döküm yöntemidir. Bu faktörlerden dolayı yüksek basınçlı döküm bir "hata üretme süreci" olarak düşünülebilir. Önemli olan yüksek basınç döküm makinesinin "Ton" olarak kilitleme gücüdür. Bu yöntem ile çok karmaşık şekilli döküm parçalar çok hassas ölçüler içinde elde edilebilir. Yüksek basınçlı döküm prosesinin Sıcak kamaralı (Hot Chamber) ve Soğuk kamaralı (Cold Chamber) olmak üzere iki uygulaması vardır. Eğer dökümü yapılan metalin ergime derecesi ve döküm sıcaklığı düşük ise (zamak ve magnezyum gibi) ve bu metal enjeksiyon malzemesi ile reaksiyona girmiyorsa bu tür metal döküm için genellikle sıcak kamaralı makineler kullanılmaktadır. Eğer dökümü yapılan metalin ergime derecesi ve döküm sıcaklığı yüksek ve bu sıvı metal enjeksiyon malzemesi ile reaksiyona giriyorsa bu durumda soğuk kamaralı döküm makineleri kullanılmaktadır. Şekil 2.1.'de soğuk kamaralı, şekil 2.2.'de ise sıcak kamaralı enjeksiyon makinalarının şematik resimleri verilmiştir [4-11-12-13].

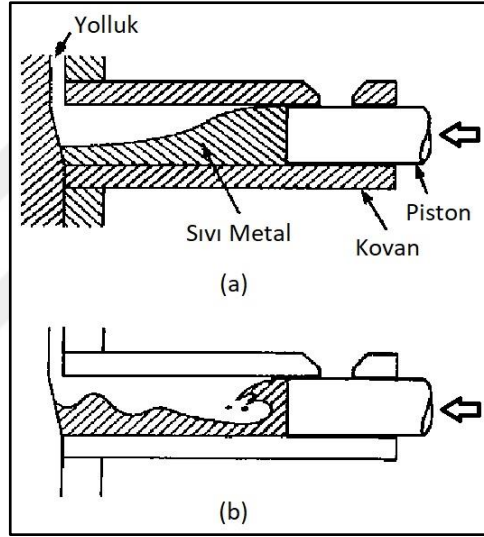


Şekil 2.1. Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi [14].



Şekil 2.2. Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi [14].

Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile genellikle alüminyum, magnezyum, bakır ve çinko (zamak) gibi alaşımlardan döküm parçalar üretilebilmektedir. Bu proseste kullanılan kalıp malzemeleri sıcak iş takım çelikleri olup ayrıca basınçlı döküm makinaları da çelikten oluşan konstrüksiyon ve makine elemanlarına sahip olması sebebiyle bu yöntem 1000°C'ye kadar olan alaşımların dökümünde kullanılabilir. Yüksek basınçlı döküm, bir enjeksiyon döküm tekniğidir. Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinelerinin genel tasarımı, Şekil 2.3.'te gösterildiği gibi sıvı metali kalıp içine enjekte etmek için (a-Kontrollü b-Kontrolsüz) yatay pistonlu sisteme sahiptir [4-11-12-13-15].

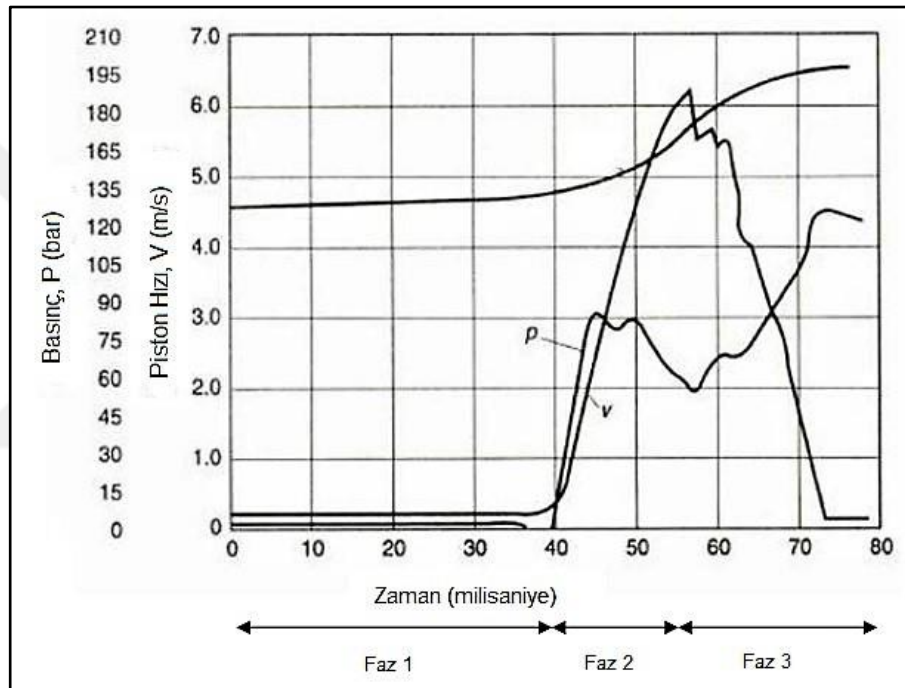


Şekil 2.3. Soğuk kamaralı HPDC makinasının kovanında sıvı metal hareketi [15].

Yüksek basınçlı döküm prosesinde sıvı metal hazneye (kovana) döküldüğü zaman genellikle kovan hacminin %40 ile %70'ini doldurur. Piston sıvı metali ileriye doğru iterken pistonun hızına bağlı olarak sıvı metalin kovan içindeki hareketi de farklı olur. Piston kovan içinde kalıba doğru metali iterken sıvı metal kovan içinde yükselerek tüm çapı doldurur. Bu pozisyona full (tam dolu) pozisyon adı verilir. Pistonun bu şartlardaki hareketine yavaş hız adı verilir. Yavaş hız döküm kalitesini etkileyen faktördür. Burada kritik olan nokta kovanın tam dolu pozisyona geçmez tazgahın yüksek hızlı vuruşa geçmesidir. Yüksek hız vuruşu döküm kalitesini en çok etkileyen faktörlerden biridir. Yüksek vuruş olduktan sonra hidrolik basınç

pistona yüklenerek statik basınç oluşur. Piston hareketi durunca güçlendirici hidrolik sistemdeki basıncı artırır.

Prensip olarak yüksek basınçlı döküm prosesi, hız-basınç diyagramı, pistonun hızını ve doldurma sırasında döküm parçası üzerine uygulanan basıncı gösteren şekil 2.4.'te gösteriliği gibi 3 ayrı fazdan ibarettir. Tüm bu aşamalar 1. Faz; piston hareketi ile kovanın tam dolum aşaması, 2. Faz; kalıp dolum aşaması, 3. Faz; son basınç aşaması olarak tanımlanabilir [11-15-16].



Şekil 2.4. Basınçlı döküm sırasında enjeksiyon aşamaları [16].

2.1. Yüksek Basınçlı Dökümün Avantajları

Yüksek basınç yöntemiyle yapılan dökümler, dökümden sonra fazla talaşlı imalat gerektirmezler. Yüksek üretim hızı vardır. Kullanılan kalıplar başlangıçta çok pahalı olmasına rağmen yüksek üretim adetleri, az kalıp aşınması ve uzun kalıp ömründen dolayı, kalıp maliyeti diğer döküm yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Dökümün ölçüsel değerleri ve hassasiyeti diğer döküm proseslerine göre daha iyidir. Çok ince kesitli dökümler basınçlı döküm yöntemiyle dökülebilir. Çok çeşitli şekil ve ebatlı

karmaşık dökümler bu yöntemle daha problemsiz dökülebilir. Yolluklar, besleyiciler ve talaş diğer döküm yöntemlerine kıyasla daha az ve hafif olduğundan metal kaybı daha azdır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen parçalarda yorulma mukavemeti ve mekanik özellikler daha iyidir. Minimum döküm büyüklüğü diğer döküm yöntemlerine kıyasla daha küçüktür. Dökümhane ortamı ve çevre daha temizdir. Yapılan dökümlerin yüzey kalitesi çok iyi olup, son işlemlerin minimum olması nedeniyle stok alanları diğer döküm yöntemlerine kıyasla daha azdır [11].

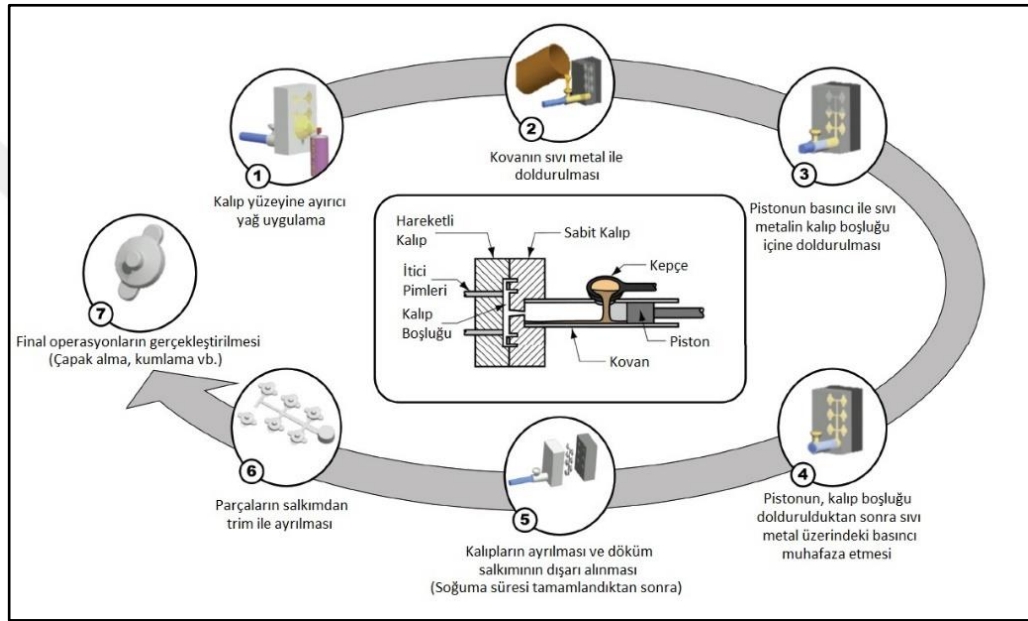
2.2. Yüksek Basınçlı Dökümün Dezavantajları

Döküm büyüklükleri sınırlıdır. Çok büyük parçalar dökülemez. Yolluk sistemlerine ve metal girişine bağlı olarak, vakum sistemi olmayan yüksek basınç makinelerinde döküm boşluğunda olan gazın tamamı dışa atılamadığı için döküm parçasında gaz boşlukları oluşur. Gaz boşlukları dökümün mekanik özelliklerini azalttığı gibi, eğer gaz boşlukları yüzeye yakınsa ısıl işlem sonucunda kabarmalar (baloncuk) olur. Kalıp bakım maliyeti yüksektir. Yüksek basınç makineleri ve ona bağlı yardımcı ekipmanların yatırımı yüksektir. Dökümde olan yüksek oranda porozite ısıl işlem ve kaynak işlemlerini zorlaştırmaktadır [11].

2.3. Yüksek Basınçlı Döküm İşlemi ve Parametreleri

Alüminyum alaşımlarının yüksek basınçlı döküm prosesinde genellikle, sıvı metalin çok kısa sürelerde sadece metal enjeksiyon sistemi ile temas ettiği soğuk kamaralı enjeksiyon döküm makineleri kullanılmaktadır. Bekleme fırınında (dozaj fırını) istenilen sıcaklıkta bekletilen sıvı metal, genellikle her çevrim için belirli miktarlarda kovan içerisine aktarılır. Yüksek basınçlı döküm prosesi, kalıbın açılıp kapanması arasında geçen spreyleme, kovanın sıvı metal ile doldurulması, daha sonra sıvı metalin kalıp boşluğu içerisine enjekte edilmesi, katılaşma, ve döküm parçanın (ya da salkımın) dışarı alınması gibi çeşitli operasyonları içermektedir. Bu nedenle, yüksek basınçlı döküm prosesi, sıvı metalin kalıp içerisinde katılaşması sırasında geçirdiği faz dönüşümleri sebebiyle kompleks bir prosestir [3].

Yüksek basınçlı döküm, otomotiv, ev aletleri ve elektronik endüstrileri için yüksek adetli ve düşük maliyetli bileşenlerin imalatında önemli bir prosestir. Genel olarak alüminyum, magnezyum veya çinko olan sıvı metal, yüksek hızlarda (30-100 m / s) ve karmaşık yolluk ve giriş sistemlerinden geçirilerek yüksek basınç altında kalıba enjekte edilir. Yüksek basınçlı kalıp döküm işlemi, kalıp ayırıcı yağın püskürtülmesi işleminden, kalıbın açılması ve kapanmasına kadar birkaç aşamadan oluşur. Şekil 2.5. genel yüksek basınçlı döküm işlem döngüsünü vurgulamaktadır [17].



Şekil 2.5. Yüksek basınçlı döküm proses zinciri [17].

- Yüksek basınçlı döküm prosesi, önce sıvı metalin çelik bir kovan (shot sleeve) içerisine aktarılması ile başlar.
- Piston kademeli olarak hızlanır ve sıvı metali kalıp boşluğuna taşır ve bu sürede sıvı metal 30 – 60 m/sn (yaklaşık 100-200 km/sa) arasındaki hıza ulaşır.
- Bir sonraki aşırı kısa doldurma süresi (50 - 100 ms), metal katılaşmadan önce ince kesitli ve kompleks şekilli kalıpların mükemmel bir şekilde doldurulmasını garanti eder.
- Katılaşma sırasında metal, faz dönüşümleri sebebiyle büzülür ve döküm parça içerisinde çekinti porozitesine neden olur.
- Döküm makinası, sıvı metal üzerine ~120 MPa'a kadar yüksek basınç uygulayarak bu fiziksel olayların üstesinden gelmeye çalışır [3].

Yüksek basınçlı döküm prosesinin kompleks yapısından dolayı, işleme prosesleri gibi diğer üretim hatlarındaki hurda oranı milyon başına parça (ppm) olarak ölçülürken, döküm hurdası oranı yüzde olarak hesaplanmaktadır. Yüksek basınçlı döküm otomotiv parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sektördeki hafif alaşımlı dökümlerin yaklaşık olarak %60'ı yüksek basınçlı döküm yöntemi ile yapılmaktadır ve Avrupa Birliği'ndeki otomobillerde ortalama yüksek basınçlı döküm bileşenleri 80-100 kg arasında olmaktadır.

Sanal araçların güvenilirliği, belirli hata alt sınıflarına referansla deneysel olarak onaylanmıştır. Muhtemel hataları ortaya çıkaran proses parametrelerinin bazıları ve deneysel değişkenler, özel sensörler ve cihazlar tarafından izlenebilir. Yüksek basınçlı kalıp dökümünün eksikliklerinden biri, işlemin genel karmaşıklığının tek bir bilgi sistemi tarafından ele alınamamasıdır. Yüksek basınçlı döküm makinasının kontrolleri sadece makina parametrelerini ölçmektedir, tutma fırınının sıcaklığı ayrı olarak kontrol edilir ve yağlama sistemi sadece yağlama basınçlarını ve uygulama zamanlarını kontrol etmektedir. Metalin katılaşmasının hızlı bir şekilde gerçekleştiği ve parçanın nihai kalitesinin ortaya çıktığı kalıplar bünyesinde, hemen hemen hiçbir proses parametresi ölçülemez ve kontrol edilemez [3].

2.4. Basınçlı Dökümde Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Alüminyum saf halde aşırı derecede yumuşak ve düşük mukavemetlidir. Alüminyumun mukavemetinin sırrı alaşımlandırmadan gelmektedir. Saf alüminyum, yüksek mukavemetli alaşımlar oluşturmak için diğer elementlerle karıştırılır. Alüminyumun mukavemetini ve şekillendirilebilirliğini arttırmak için kullanılan yaygın katkı maddeleri silisyum, magnezyum ve bakırdır. Alüminyum-çinko alaşımları, bugün mevcut en güçlü alaşımlardan bazılarıdır ve genellikle otomotiv ve havacılık endüstrileri tarafından kullanılmaktadır. Alüminyum metalinin güçlendirilmesi için yapılan işlemler, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu olmak üzere üç temel döküm alaşımını ortaya çıkarmıştır [15-18].

Alüminyum Birliği'nin (AA) döküm ve külçe formundaki alüminyum alaşımları için tanımlama ve kimyasal kompozisyon sınırları, her bir alaşım için 10 spesifik alaşım elementini listelemiştir. Bu listede ayrıca “diğer” başlığı altında elementler verilmektedir. Listelenen öğelerin tümü, kullanım amaçlarına göre bir alaşım bakımından majör alaşım elementi olmayabilir, örneğin bir alaşımda yer alan bazı majör elementler, bir diğer alaşımda minör element olabilmektedir. Ayrıca, örneğin Sr gibi bazı elementler, tane inceltme (mikroyapı kontrolü) ve mekanik özellikler bakımından çok önemli olmakla birlikte Alüminyum Birliği dökümanında özel olarak tanımlanmamıştır. Bu gibi elementler bunun yerine sadece “diğer” kategorisine dahil edilmiştir.

Alüminyum alaşımlarının çoğunda alaşım elementlerinin etkilerini ve önemini anlamak amacıyla yapılabilecek en iyi sınıflandırma birincil (Si - Mg - Cu), ikincil (Ni - Sn), tane küçültücüler (Ti - Br - Sr - P - Be - Mn - Cr) ve empüritelere (Fe - Cr - Zn) olarak verilebilir. Bununla birlikte, bazı alaşımlardaki empürite elementlerinin birincil elementler olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır [19].

2.4.1. Al-Si Alaşımları

Endüstriyel olarak önemli mühendislik döküm alaşımlarının en yaygın kullanılanı Al-Si alaşımlarıdır. Silisyum, öncelikle sıvı alüminyumun akışkanlığını artırarak kalıpların kolayca doldurulmasını ve sıcak yırtılma veya sıcak çatlama sorunları olmadan dökümlerin katılaşmasını, yani iyi dökülebilirliği sağlamaktadır. Bir alüminyum alaşımında silisyum miktarı arttıkça, termal genleşme katsayısı da o kadar düşük olacaktır, bu sayede sıcak yırtılma veya sıcak çatlama problemlerinin önüne geçilmiş olur. Silisyumun sert bir faz olmasından kaynaklı olarak alaşımların aşınma direncine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bir alüminyum alaşımındaki %5 civarındaki Silisyum oranı, herhangi bir sıcak yırtılma sorununu yenmek için yeterli derecede izotermal katılaşma sağlar ve aynı zamanda akışkanlığı artırır.

Silisyumun tek başına mukavemet artırıcı etkisi çok düşüktür. Özellikle Cu, Ni ve Mg ile karıştırıldığında yaşlanma ile sertleştirilebilir alaşımlar yapar. Fakat bu

alaşımların çekme mukavemetleri çok yüksek değildir ve 13,6-15,4 kg/mm² arasında değişmektedir. Bununla birlikte, silisyum magnezyum ile birleştirildiğinde Mg₂Si oluşturarak, alüminyum dökümlerde etkili bir sertlik artırma mekanizması sağlar. Mg₂Si, katı fazda yaklaşık %0,7 Mg sınırına kadar çözünür ve bütün ısı işlem görebilen alüminyum alaşım ailesi için çökeltme sertleşmesinin temelini sağlar. En yaygın kullanılan yapısal mühendislik alaşımlarından biri, Al-7Si-0.4Mg'dir. Al-Si alaşımlarına Cu ilavesi benzer şekilde CuAl₂'nin çökmesiyle sertliği arttırmaktadır, ancak Cu ilavesi aynı zamanda alaşımın korozyon direncini düşürmektedir. Mekanik özellikler, alaşımın bileşiminden çok silisyum içeren fazın şekli ve dağılımına bağlıdır. Küçük ve yuvarlak primer faz (veya ötektik yapı) yüksek mukavemet ve süneklik verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini artırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür.

Ayrıca silisyum, alaşımın aşınma direncini artırır; bu da çoğu zaman Al-Si alaşımlı dökümleri, otomotiv uygulamalarında gri gökme demir yerine çekici bir alternatif haline getirir. B390 gibi hiperötektik Al-Si alaşımları, örneğin çok sayıda pompa, kompresör, piston ve otomatik şanzıman bileşenlerinde olduğu gibi birinci sınıf alüminyum motor bloklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında döküm karakteristiklerini geliştirmesi açısından silisyumun tercih edilmesi yanında, talaşlı imalatta kullanılan takımalarının aşınma ömürlerini azaltıcı etkisi de bulunmaktadır. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilirlik sağlanabilmektedir [17-19-20].

2.4.2. Al-Mg Alaşımları

Magnezyum'un (Mg) rolü de silisyum da olduğu gibi alüminyum alaşımı dökümlerin mukavemetlendirilmesi ve sertleştirilmesidir. Popüler Al-Mg 356 alaşım ailesinde mukavemet kazanımı ve ısı işlem temeli Mg₂Si ile gelmektedir. Magnezyum ayrıca çok az silisyum içeren yüksek magnezyum 5XX alaşımlarında mukavemet artırıcı bir elementtir. 515-518 arasındaki Al-Mg alaşımları, basınçlı döküm prosesi için geliştirilmiş alaşımlardır. İkili Al-Mg bileşimlerinin mukavemeti, genel olarak ısı işlem ile geliştirilememektedir, ancak bu alaşımlar, kendiliğinden yaşlanma

koşullarında döküm ve oda sıcaklığında mükemmel mukavemet ve süneklığe sahiptirler. Al-Mg alaşımları düşük silisyum içerikleri nedeniyle sınırlı dökülebilirliğe sahip olmakla birlikte sıcak yırtılma eğilimindedirler. Bununla birlikte, Mg içeriğinin ağırlık olarak %10'a kadar yükselebildiği Al-Mg serisi, önemli korozyon direncine sahip ve gıda endüstrisi tarafından çokça tercih edilen, parlak beyaz eloksal bir kaplama alabilen, oldukça güçlü ve sünek alaşımlardır. Alüminyum alaşımlarında tercih edilen Mg miktarı genellikle ağırlıkça %5 veya 6'dır. Al-Si alaşımlarının MMC yapısına zıt olarak Mg içeren alüminyum alaşımlarının sünekliliği tek fazlı katı çözelti yapısından gelmektedir. Al-Mg alaşımları sıvı halde iken çevreleri ile güçlü reaksiyona girerler, bu sebeple genellikle kum kalıba yapılan dökümlerde metal/kalıp reaksiyonlarını azaltmak için kalıp içerisinde inhibitörlere (reaksiyon yavaşlatıcı) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alaşımların işlenebilirliği de mükemmeldir [15-19].

2.4.3. Al-Cu Alaşımları

Alüminyumun yanında alaşım elementi olarak kullanılan en eski element bakırdır. Tüm alaşım elementleri içerisinde bakır (Cu), ısıtım işlem görmüş ve görmemiş bütün alüminyum döküm alaşımlarının mukavemet ve sertliği üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bakır aynı zamanda matris sertliğini artırarak alaşımların işlenebilirliğini artırır, aynı zamanda işleme talaşının küçük olmasını ve ince işlenmiş yüzeylerin oluşturulmasını kolaylaştırır. Bunların yanı sıra bakır, genellikle alüminyumun korozyon direncini azaltır. Alüminyumun endüstride ilk kullanıldığı yıllarda döküm alaşımı olarak %8 Cu içeren Al-Cu alaşımı kullanılmaktaydı. Ticari saflıktaki alüminyuma Cu ilavesi ile yapılan bu alaşım dökülebilirliğinin zorluğuna rağmen kum kalıba döküm alaşımı olarak uzun yıllar kullanılmıştır. Daha sonraları bakırın oranı %1,5 civarına indirilmiş ve alaşıma silisyum ilave edilmiştir. Bu şekilde kolay dökülebilir, iyi akışkanlığa sahip, sıcak yırtılmaya karşı dayanıklı ve ısıtım işlemle sertleşebilen bir alaşım geliştirilmiştir ve de geniş kullanım sahası bulmuştur.

Alüminyum alaşımlarında bakır, alaşım elementi olarak %3-12 oranında kullanılmakla birlikte alaşımlara sertlik kazandıran başlıca elementtir. Isıl işleme tabi tutulmuş veya tutulmamış halde iken alaşımın kopma mukavemetini artırır. %5'den fazla bakır içeriği mekanik işleme gücünü ortaya çıkartarak, ayrıca elektrik iletkenliğini ve korozyon direncini düşürmektedir. Her ne kadar %10'a kadar bakır içeren alaşımlar, alüminyum döküm endüstrisinin ilk yıllarında popüler olmuş olsada, çok yüksek mukavemetli 206 alaşımı haricinde, bunların yerini silisyum içeren alaşımlar almıştır [19-20].

2.4.4. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması ve isimlendirilmesi kimyasal kompozisyonlarına göre yapılmaktadır. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen isimlendirme U.S. Aluminium Association tarafından döküm ve dövme olmak üzere 2 yöntem kullanılarak yapılmaktadır. Alüminyum dökümler için ANSI (NADCA) numaralandırma sisteminde, ana alaşım elementleri ve bazı element kombinasyonları Tablo 2.1.'de verildiği gibi spesifik numara serileriyle belirtilmektedir [19-21].

Tablo 2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırılması [19-21].

Numara Serisi	Alaşım Tipi
1XX.X	Minimum %99.0 Alüminyum (Alaşımlandırılmamış)
2XX.X	Al + Cu
3XX.X	Al + Si & Mg ya da Al + Si & Cu ya da Al + Si & Mg & Cu
4XX.X	Al + Si
5XX.X	Al + Mg
7XX.X	Al + Zn
8XX.X	Al + Sn
9XX.X	Al + Diğer elementler

AA (U.S. Aluminium Association) döküm alaşımlarının dört basamaklı gösteriminde bu basamaklarda yer alan rakamların her biri, bir anlam ifade etmektedir. Birinci basamak; majör (ana) alaşım elementlerini, ikinci ve üçüncü basamak; alaşımın ayrıntılarını tanımlayan rakamlardır. Dördüncü basamak ise döküm (0), standart

ingot (1) ya da standart ingottan daha dar kompozisyon aralığına sahip ingotu (2) tanımlamaktadır. 2XX.X, 3XX.X, 4XX.X ve 7XX.X serilerine ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solundaki iki rakam alaşım içerisindeki en az alüminyum içeriğini belirtmektedir. 2xx.x'den 9xx.x grubuna kadar olan aralıkta noktanın solundaki iki rakam sadece grup içerisindeki alaşımları ayırt etmek için kullanılmakta olup özel bir anlam taşımamaktadır. Örneğin 190.X dizilimi %99,90 saflığındaki alüminyumunu ifade etmektedir [21].

Neredeyse tüm otomobil uygulamalarında en çok kullanılan döküm alaşımı, tüm dökümlerin yaklaşık %50'sine sahip AlSi9Cu3 alaşımıdır. Buna ek olarak, ötektik AlSi12 ve AlSi10Mg'nin sırasıyla %16 ve %12'lik payı olan en önemli alaşımlardır. Tablo 2.2. otomotiv endüstrisindeki bileşenlerde kullanılan bazı karakteristik alaşımları ve uygulama paylarını göstermektedir [22].

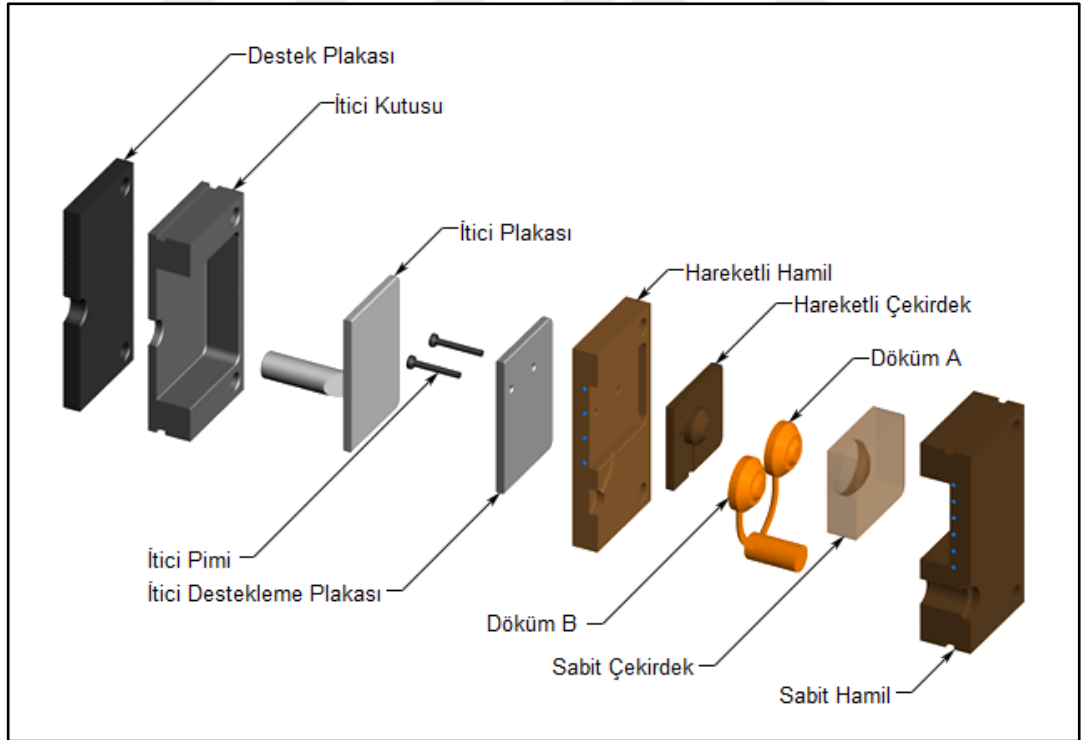
Tablo 2.2. Otomotiv sektöründe alüminyum alaşımları sembol gösterimleri [22].

Alaşım Tipi	AA numarası	Sembol ile Gösterim	Kullanım Oranı
Döküm Alaşımları (%78)	A 359	AlSi9Cu3	48%
	A 356	AlSi7Mg	20%
	A 361	AlSi10Mg	12%
	-	AlSi12Cu	9%
	A 413	AlSi12	7%
	A 332	AlSi12CuNiMg	4%
Plastik Şekillendirme Alaşımları (%22) Ekstrüzyon, Dövme, Hadde ürünleri	6060	AlMgSi0.5	35%
	6082	AlMgSi1	11%
	3003	AlMn1	10%
	5182	AlMg4.5Mn0.4	9%
	5754	AlMg3	14%
	6016	AlSi1.2Mn0.4	15%
7020	AlZn5.4Mg1	6%	

2.5. Yüksek Basınçlı Döküm Kalıpları

Yüksek basınçlı döküm işleminin en karmaşık ve en pahalı bileşeni kalıptır ve ayrıca kalıp tasarımı ve üretimi, yüksek basınçlı döküm prosesinde nihai ürün kalitesinin kilit faktörüdür. Kalıp malzemesi, 40 kN'a ulaşan yüksek kalıp kapama kuvvetleri ile yüksek sıcaklıklarda yeterli mekanik özellikleri sağlamalıdır. Aynı zamanda, kalıbın yüzeyi, döküm işlemi sırasında basıncın 120 MPa'a kadar yükseldiği ve sıvı metal hızının 60 m/sn'ye ulaşabildiği koşullarda kalıba giren erimiş döküm alaşımının oluşturacağı erozyona dayanmalıdır. Temelde, döküm parçasının negatif boşluğu görevinin yanı sıra kalıplar, ayrıca sıvı metalin aşırı ısını dağıtır, enjeksiyon stresini absorbe eder, kalıp boşluğu içerisindeki sıkışmış havanın tahliyesini sağlar ve döküm parçasının çıkarılmasını kolaylaştırır. Kalıp yüzeyi sıcaklıkları anlık olarak 350 °C'ye kadar ulaşabilmektedir. Termal şoku azaltmak için, kalıbın içindeki kanallardan geçen yağ veya su bazlı kimyasallar ile kalıp 180 ila 350 °C arasındaki sıcaklıklara önceden ısıtılır. Isıtma ve soğutma sırasında kalıbın boyutlarındaki değişiklikler minimum olmalıdır. Kalıbın yüzeyi, boyutsal doğruluk ve gerekli yüzey pürüzlülüğü elde etmek için aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Alüminyum, bakır ve çinko alaşımlarının basınçlı döküm prosesindeki talepler nedeniyle, kalıp malzemesi olarak yüksek alaşımlı sıcak iş takım çelikleri (çoğunlukla H10, H11 ve H13) kullanılmaktadır. Bu gibi çeliklerin talaşlı imalatı yüksek sertlik değerleri nedeniyle pahalı bir prosestir. Yaklaşık 30 HRC sertliğe sahip önceden sertleştirilmiş çelik bloklarda öncelikle kaba işleme yapılır. Daha sonra kaba işleme prosesi kaynaklı ortaya çıkabilecek gerilimlerin alınması için kalıplar gerilim giderme ısıl işlemine alınır. Gerilim giderme tavlamasından sonra son işleme gerçekleştirilir ve uzun servis ömrü elde edebilmek amacıyla kalıplar 50-55 HRC sertlik elde edilebilecek ısıl işlemlere tabi tutulur. Kalıp çeliklerindeki güncel gelişmelerden sonra yüksek basınçlı döküm prosesinin doğası gereği her çevrimde kaçınılmaz olan ısınma ve soğuma kaynaklı termal şoklardan dolayı ortaya çıkan ısıl çatlakların bir sonucu olarak kalıbın yenilenmesinden önce, 1 kg ağırlığında bir alüminyum döküm parçadan kabul edilebilir kalitede 100000 adedin üzerinde üretim yapılabilmektedir [15-16-23].

Yüksek basınçlı döküm kalıpları, her biri dökülecek parçanın geometrisine göre işlenmiş iki kalıp yarımından meydana gelir. Bunlardan biri sıvı metalin enjekte edildiği tarafa bağlanır ve sabittir. Buna “Sabit Kalıp” denir. Diğeri hareketli ve üzerinde itici parçaları taşır. Bu kalıba da “Hareketli ya da Alt Kalıp” denir. Hareketli kalıpta yolluk ve dağıtıcı sistemler bulunur ve her çevrim sonrası döküm parçasını kalıptan ayıran itici pimleri bu plaka üzerinde bulunmaktadır. Ergitilmiş sıvı metal, kalıp boşluğunu, sabit plakaya bağlı kalıpta bulunan yolluk girişinden doldurmaktadır. Sabit kalıpta ayrıca soğutma kanalları, maça kilit ve pimleri ile merkezleme milleri bulunmaktadır. Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerini içeren komple bir kalıp seti şekil 2.6.’da verilmiştir. Kalıpların birleşme yüzeyleri de mala yüzeyi (birleşme yüzeyi) olarak adlandırılır. Bu iki yarım kalıbın birleştirilmesi tam olmalı, birleşme yüzeylerinde hiç boşluk olmamalıdır. Az bir boşluk sıvı metalin fişkirarak dışarı çıkması sonucu döküm parçanın sakat olmasına ve iş kazalarına neden olur.



Şekil 2.6. Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi [14].

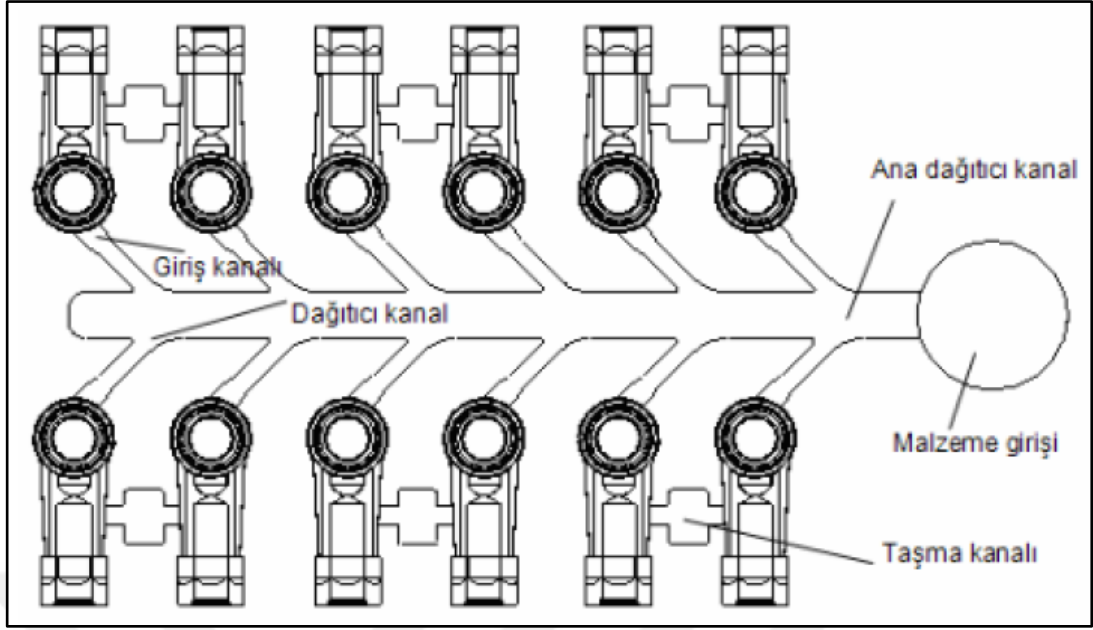
Yüksek basınçlı döküm yönteminde kullanılacak kalıplar, dökülecek parçanın geometrik şekil ve boyutlarına göre talaş kaldırma ya da dalma erozyon ile üretilirler. Basınçlı dökümün diğer yöntemlere karşı olan üstünlüklerinden biri olan yüzey kalitesinin sağlanması için sabit ve hareketli kalıpların işlenmiş yüzeylerinin mümkün olduğunca pürüzsüz olması gerekmektedir [16-20-24].

2.5.1. Kalıp Elemanları

2.5.1.1. Yolluk

Yolluk sistemi, yolluk burcundan giren sıvı alaşımı, kalıbın içine taşıyarak kalıp boşluğunun dolmasını sağlayan özel kanallardır (Şekil 2.7.). Derinlikleri 4,5-8 mm arasında değişmektedir. Genişlikleri ise iş parçasının ağırlığına ve geometrisine göre belirlenmektedir. Yolluk kanallarının derinliği, döküm parçasının et kalınlığı $x1,5$ olarak hesaplanabilir. Sıvı metal hızı çinko alaşımlarında 15 m/s alüminyum alaşımlarında 10m/s magnezyum alaşımlarında ise 20 m/s değerleri altına düşmemelidir.

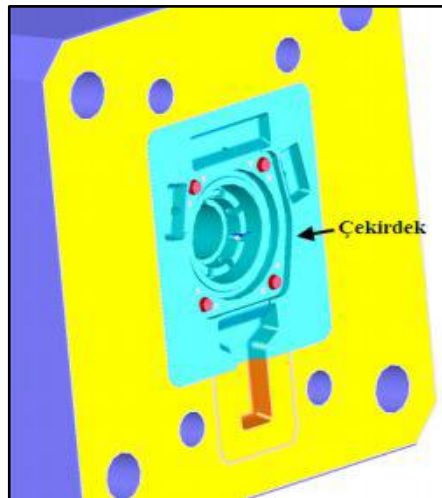
Genel kural olarak, yolluk kanalları olduğunca kısa olmalıdır; ancak soğuk birleşme hatalarının önlenmesi için kalıp boşluğunun belirli bölümlerinin ısıtılması gerekiyorsa kör bir yolluk kanalı kullanılabilir. İnce girişlerle iyi yüzey kalitesi elde edilmekle birlikte artık kısımların ve yüzeyin düzeltilmesi kolay olmaktadır, fakat yoğun bir döküm yapılamamaktadır. Büyük girişlerle daha yoğun ve kusursuz bir döküm yapılmaktadır. Fakat artık kısımların kırılması ve yüzeyin düzeltilmesi daha güç olmaktadır. Girişlerin büyüklüğü ve biçimi sıvı alaşımın hareketinin buhar gibi püskürmeden bir akım sağlayacak şekilde olmasını sağlamalıdır [25-26].



Şekil 2.7. Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri [25].

2.5.1.2. Çekirdek

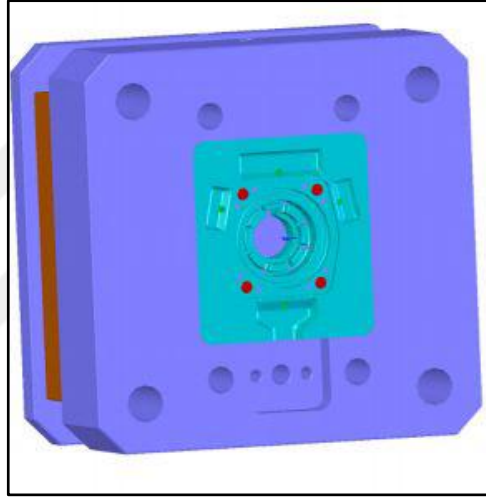
Parçanın geometrisinin negatif şekline sahip olan ve kalıp ayırma yüzeyi veya çizgisinden bölünen kısımları içeren kalıp elemanıdır. Çekirdekler, kalıplarda hareketli ve sabit hamillere bağlıdır. Çekirdekler tek göz ve birden fazla göz içeren çekirdekler ya da farklı parçaların formlarını içeren çekirdekler olabilir. Şekil 2.8.'de hareketli tarafa bağlanmış bir çekirdeğin örnek görüntüsü verilmiştir [24].



Şekil 2.8. Hareketli tarafa bağlanmış bir çekirdek görüntüsü [24].

2.5.1.3. Kalıp Hamilleri

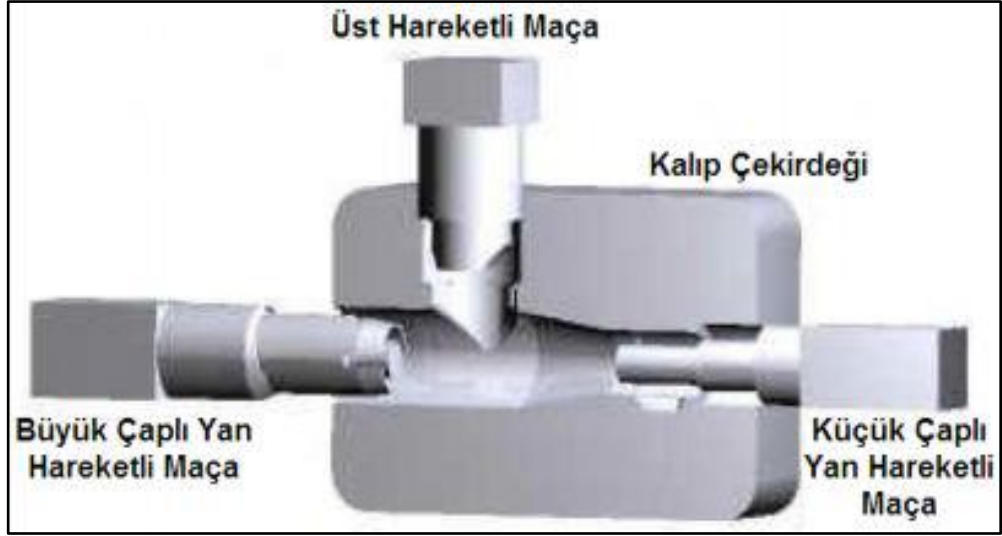
Kalıp hamilleri kalıbın diğer tüm elemanlarını bir arada tutmak için tasarlanan kısımdır (Şekil 2.9.). Hareketli ve sabit taraf olmak üzere ikiye ayrılır. Bu bölüm, kalıp ayırma yüzeyi olarak da bilinmektedir. Sabit olan kalıp hamili, döküm makinesinin sabit tarafına yani kamara sisteminden kalıba olan bağlantı yerine bağlanır. Hareketli hamil ise itici plakasıyla beraber makinenin hareketli tarafına bağlanır. Sabit olan kalıp hamiline açılan kilitleme elemanlarının amaçları döküm sırasında kalıbın kapanmasını ve kilitlemesini sağlamaktır [24].



Şekil 2.9. Kalıp hamillerinin kalıp seti içerisinde görünümü [24].

2.5.1.4. Maçalar

Basınçlı döküm kalıplarında, üretilen parça üzerindeki delik, kanal, boşluk, oluk gibi iç formları oluşturmak için maçalar kullanılmaktadır. Hareketli (hidrolik) ve sabit olmak üzere iki çeşittir. Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi sabit maça seklindedir. Bazı maçalar, parçanın cidar kalınlıklarını eşitlemek ve metal tasarrufu sağlamak için kullanılabilir.

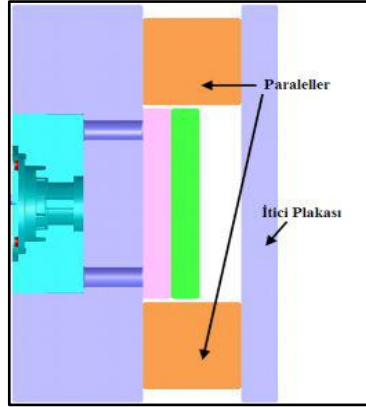


Şekil 2.10. Kalıp sisteminde hareketli maçaların görünüşü [25].

Kalıplarda sabit ve/veya hareketli maçalar sıklıkla kullanılmaktadır. Sabit maça kullanılacaksa, maçanın eksenini kalıbın açılma eksenine paralel olmalıdır. Hareketli maçalar ise, ayırma yüzeyine paralel olmakla birlikte bazı durumlarda ayırma yüzeyine açılı olarak da yerleştirilebilmektedirler [24-25].

2.5.1.5. İtici plakası, Paraleller ve İtici

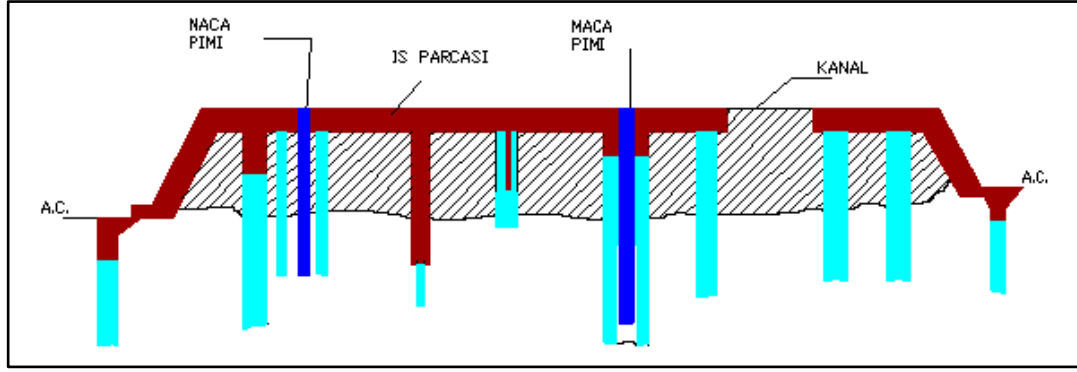
İtici plakası kalıbın itici sistemindeki ejektör kalıbın bağlandığı kısımdır. Tasarımı parçanın tasarımına bağlıdır. Bağlandığı hareketli tarafı kalıp kapama kuvvetine ve itici kuvvetlerine karşı korumaya yarar. Paraleller bağlantı yüzeyleri paralel olan ve hareketli hamilden makinenin hareketli kısmına kilitleme veya kilitleme plakasına ulaşmak için genellikle AISI 1020 gibi çeliklerden üretilen elemanlardır. Kalıbın tüm kilitleme kuvvetleri paraleller elemanlar tarafından karşılanır ve üzerine etki eden baskılara karşı yeterli sertlikte olmalıdır. Şekil 2.11.'de itici plakanın kalıp sistemindeki yeri ve paraleller şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.11. Kalıp sisteminde itici plakası ve paraleller [24].

Basınçlı döküm kalıp konstrüksiyonun da en önemli öğelerden biri parçayı kalıp içindeki şekillendikten sonra çıkarılabilecek sistemin ortaya konmasıdır. Döküm malzemesinde meydana gelen katılaşma küçülmesi neticesinde, parça kendi iç boşluğunu elde etmeden kullanılan kalıp elemanını sıkar ve parçayı kalıptan ayırmak zorlaşabilir. Parçaların basınçlı döküm kalıplarından çıkarılması için iticiler kullanılır (Şekil 2.12.).

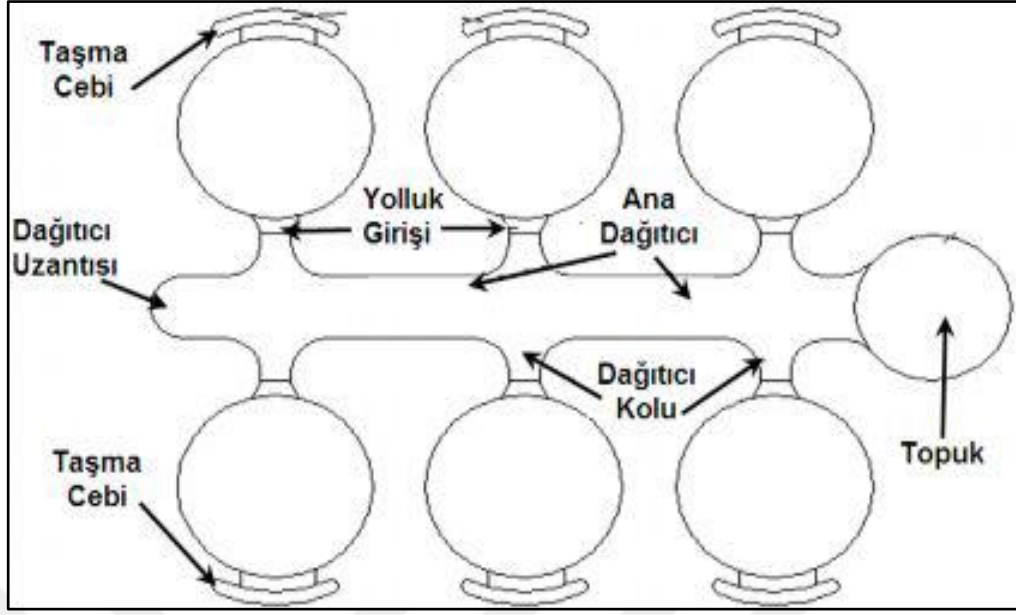
Kalıp itici sistemi karmaşıklığı ve tasarımına göre çeşitlilik gösterir. İtici sisteminin ana fonksiyonu, kalıp açılması esnasında parçanın dışarı atılmasıdır. Bu itilme esnasında düşen parça yerçekimi ile makineden uzaklaşır veya baskı bir manuel olarak operatör tarafından ya da robot ile makineden alınır. İtici pimlerinin, parça üzerinde oluşturacakları izlerin en az görünür veya hiç görünmez olmasını sağlaması yanında parçada deformasyon oluşturmamak için kuvvet dağılımını da en dengeli şekilde sağlamaları gerekir. Bunun için bazen köşeler ve kirişler gibi parçanın kritik bölgelerine etki edecek pimlere ihtiyaç duyulabilir. İtici tasarımı yapılırken kalıp içine yerleştirilecek soğutma kanalları gibi diğer fonksiyonel elemanlarında dikkate alınması önemlidir. İtici pimlerin çapları, uygulamaya göre 3-25 mm arasında olabilmektedir. En çok kullanılan pim çapları 6-8 ve 10 mm'dir. İtici pimlerin yüzeylerine aşınmaya karşı direnç gösterebilmeleri için nitrür kaplama yapılmaktadır [20-24-26].



Şekil 2.12. İtici pimlerin şematik gösterimi [24].

2.5.1.6. Dağıtıcılar, Hava Tahliye Tanalları ve Taşma Cepleri

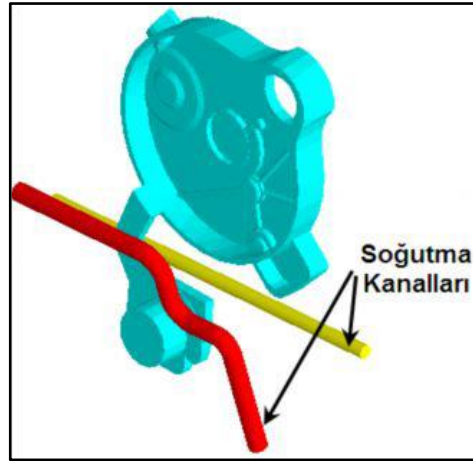
Dağıtıcılar yolluk burcundan giren sıvı metal alaşımının, kalıba ayırma yüzeyinden dışı kalıbın girmesini sağlayan kanallardır. Dağıtıcılar genellikle kalıp iticisi bulunan kısma açılır. İnce yolluk girişleri ile iyi yüzey kalitesi elde edilir ve yolluğun parçadan ayrılması kolay olur, fakat sıkıştırma fazının etkisi kısa süreceğinden yoğun bir döküm yapılamaz. Büyük yolluk girişleri ile daha yoğun ve kusursuz bir döküm yapılabilir ancak artık kısımların kırılması ve yüzeyin düzeltilmesi zor olur. Yolluk girişlerin büyüklüğü (kesit alanı) ve biçimi sıvı metal alaşımının buhar gibi püskürmeden bir akım sağlayacak şekilde ve kalıp erozyonuna karşı hızının belirli limitler dâhilinde olmalıdır. Hava tahliye kanalları basınçlı döküm kalıplarda kalıbın ayırma çizgisi üzerine işlenen elemanlardır. Tahliye kanalı genellikle sıvı metal alaşımının havayı sıkıştıracağı yerde veya yolluk girişin karşıt tarafına açılır. Bazı durumlarda tahliye kanalları kızakların çevresine, hareketli maçaların ve iticilerin üzerine açılır. Taşma cepleri, basınçlı dökümde önemli rol oynayan tahliye sisteminin bir parçasıdır. Doldurulması zor olan dışı kalıpların çukurlarına sıvı metal alaşımının akmasını kolaylaştırır. Yüksek basınçlı döküm kalıplarında dağıtıcılar, hava tahliye kanalları ve taşma cepleri Şekil 2.13.'te verilmiştir [24].



Şekil 2.13. Bir kalıpta dağıtıcılar, yolluk girişleri ve taşıma cepleri [24].

2.5.1.7. Soğutma Sistemleri

Basınçlı döküm makineleri, üretimden önce belli bir üretim hızına göre ve kalıp ısınmaları göz önüne alınarak programlanmış da olsa kalıpların bazı kısımları diğer taraflarına nazaran daha fazla ısınır. Bu parçaların ısınması, öncelikle kalıp malzemesinin ilgili bölgesinde mekanik özellikte azalmaya ve öngörülme boyutsal değişime neden olmaktadır. Bu kısımlar soğutma kanalları yardımıyla istenilen sıcaklık aralığında tutulabilir. Şekil 2.14.'teki gibi soğutmayı gerektiren bölgelere su, kalıp bloğuna delinen delikler (soğutma kanalları) ile iletilir. Bu kanalların kalıp yüzeyine 2 cm'den daha yakın olmaması tavsiye edilir. Bununla birlikte sakıncası olmayan durumlarda kanallar, maça yahut boşluk yüzeylerine 0,6 cm kalıncaya kadar yaklaşabilir. Soğutma sadece imalat kolaylığı için değil aynı zamanda çekirdeğin yüzey kalitesinin ve kalıp ömrünün artmasına yardımcı olur [24].



Şekil 2.14. Soğutma kanallarının şematik gösterimi [24].

2.6. Yüksek Basınçlı Döküm Kalıp Tasarımları

Yüksek basınçlı döküm kalıplarının tasarımı ürün kalitesi açısından hayati öneme sahiptir. Kalıp tasarımı, kalıp ömrünü de etkilediğinden ve yüksek basınçlı döküm kalıpları; malzeme, işleme ve ısıl işlem gibi maliyetli süreçlerden geçtiği için üretimin birim maliyeti üzerinde etkilidir. Dikkatle yapılmış bir kalıp tasarımı sayesinde, yüksek yoğunlukta ve daha fazla ürün elde edilerek üretimin verimi arttırılmış olur. Bir kalıp setinin tasarımı, göz sayısı, üretim miktarı, parça geometrisi, yüksek basınçlı döküm makinesinin kapasitesi, maça ihtiyacı, kalıp ayırma çizgisi ve itici pimlerinin konumu gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Kalıp tasarımında önem arzeden çekirdek blokları, tutucu blokları, itici pimleri, kovan ve diğer bazı bileşenler için malzemeler Tablo 2.3.'te verilmiştir [16-24].

Tablo 2.3. Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinde malzemeler [16].

Kalıp Bileşeni	Malzeme	Sertlik
Çekirdek	SAE 2344	45 HRC
Maça	SAE 2344	45 HRC
Tutucu Blok	SAE 4140	30 HRC
İtici Pimleri	SAE 1020	Yüzey Sertleştirilmiş
Klavuz Pimleri	SAE 1020	Yüzey Sertleştirilmiş
Kovan	SAE 2344	45 HRC

Bir kalıp tasarımında için birçok parametre göz önünde bulundurulmalıdır. Kalıp tasarımlarında ilk olarak odaklanılacak noktalardan biri keskin kenar ve sivri uçlardan kaçınmaktır. Parçalardaki koniklik miktarı 1° 'den düşük olmamalıdır [16-24].

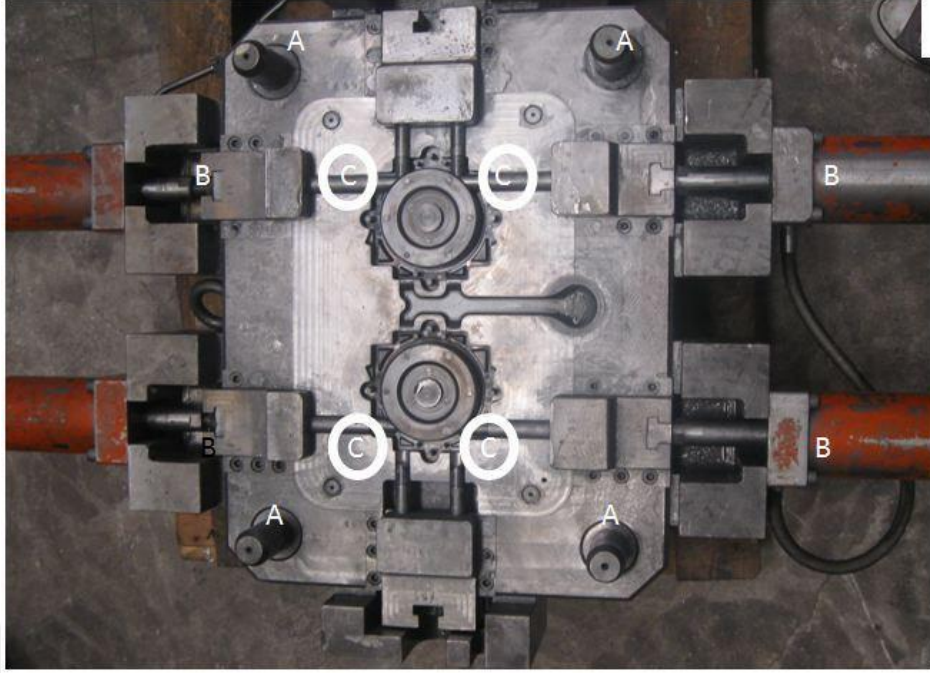
Yüksek basınçlı döküm kalıpları iki kalıp yarısından oluştuğu için, tasarım aşamasında ilk önce kalıp ayırma hattı dikkate alınmalıdır. Genel olarak yassı düzlemler kalıp ayırma çizgileri olarak seçilir, bu sayede talaşlı imalat prosesi kolaylaşır ve maliyet düşürülür. Ancak günümüz endüstrisinin karmaşık parçaları böylesine basit bir kalıp ayırma çizgisinin belirlenmesine müsaade etmez. Kalıp ayırma çizgisinin belirlenmesi tasarım aşamasında bir diğer önemli unsur olan yolluk yerinin belirlenmesi içinde önemlidir. Yolluk kanalları kalıpların hareketli yarımlarında bulunur ve yolluk girişleri kalıp ayırma (açma) çizgisi (düzlemi) ile sınırlanır. Yolluklar, sıvı metalin kalıp boşluğuna giriş hızını ve yönünü belirlediklerinden tasarımı, üretilecek parçanın döküm modeli tasarımı kadar önemlidir. Yolluk sisteminden beklenen özellikler sıvı metalin tamamını; katılaşmadan, olabildiğince yön değiştirmeden, sıvı metalin düzenli bir dağılımla, kalıbın ısı dengisini bozmadan kalıp boşluğuna taşımak, dökümden sonra parçadan iz bırakmadan kolaylıkla ayrılabilir olmak şeklinde sıralanabilir. İnce cidarlı parçalarda yolluk kanalının kalınlığı, döküm kalıbı duvar kalınlığından %50 oranında daha büyük tutulmalı ayrıca yolluk genişliği de yolluk derinliğinin 3-5 katı kadar olmalı ayrıca yolluk girişinin kalınlığı ise döküm parçasının ölçülerine göre 0,5-1,5 mm arasında olmalı ve yalnızca çok özel ya da ağırlığı yüksek parçalarda artırılmalıdır [16-20-24-27].

Bir döküm parçasının tasarlanmasında basit bir sınır vardır. Kalıp ayırma hattına dik olan detaylar maçalar olmadan dökülemez. Bu maçalar mekanik veya hidrolik olarak hareketli olabilmektedir ve ayrıca Çeşitli boşluk, delik ve cep gibi yerlere konulacak maçalardaki koniklik $1,5^\circ$ 'nin altında olmamalıdır [16-20].

Yüksek basınçlı döküm kalıplarının tasarım aşamasında önem arzeden bir diğer unsur, prosesin en büyük avantajı olan üretim hızından faydalanmak noktasında göz

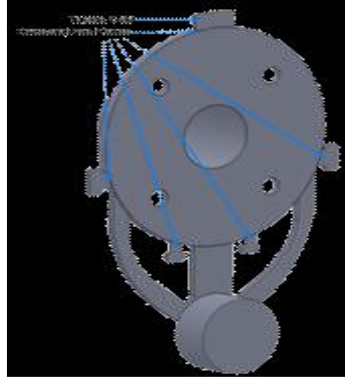
sayısının belirlenmesidir. Zira her baskıda tek bir adet parça üretilmesi yüksek basınçlı dökümün getirdiği en önemli avantajlardan biri olan üretim hızından faydalanamamak demektir. Basınçlı döküm kalıplarında göz sayısının belirlenmesi; basınçlı döküm makinesinin sıvı metal kapasitesi ve teknik özellikleri, kalıp boşluğunun doldurulması esnasında öngörülen debiyi sağlayıp sağlayamayacağı, kalıbın bağlanacağı kolonlar arası mesafe, üretim planlaması, parçanın geometrisi, parçadan beklenen özellikler ve bu özelliklerin homojenitesi gibi parametrelere bağlıdır. Göz sayısının belirlenmesinde kalıbın büyüklüğü, makine üzerinde bağlanabildiği kolonlar arası mesafe gibi boyutsal sınırlamalar mevcuttur. Kolonlar arası mesafe kalıp boyutunu, kalıp boyutu da içinde oluşturulabilecek göz sayısını belirlemektedir.

Çok gözlü kalıplar ile üretilen her bir parça kullanıldığı yerde de aynı görevi yerine getireceğinden yapısal özelliklerinin de aynı olması beklenmektedir. Çok gözlü kalıplarda gözlerin topuk kısmına olan uzaklıkları farklılık gösterebilir. Bu uzaklık farkı; dolun esnasında basınç farkına, dolun süresinin gözler arasında farklı olmasına ve katılma esnasında sıkıştırma fazının etkisinin her bir parça üzerinde farklılık göstermesine neden olacaktır. Sıkıştırma fazı etkisi, topuk bölgesine daha yakın olan parçalar üzerine etki eden sıkıştırma süresi uzak olanlara göre daha uzun olacağından, parçalar içindeki porozite oranları da buna bağlı olarak farklılık gösterecektir. Bu da aynı kalıp ile üretilen parçaların farklı kalitelerde olması anlamına gelmektedir. Bu konu yolluk tasarımını da kapsadığından yolluk tasarımı sırasında da değerlendirilmelidir. Aynı veya farklı döküm parçalar çok gözlü kalıplar ile üretilebilmektedir. İki gözlü bir kalıp, Şekil 2.15.'te gösterilmiştir [16-20-24].



Şekil 2.15. İki gözlü kalıpta A- Klavuz pimi B- Hidrolik pompası C- Maça [16].

Kalıp boşluğunda ve kamara sisteminde bulunan hava ile sıvı metalden açığa çıkan gazların döküm parçası içerisinde kalmasını önlemek için kalıp boşluğundan uzaklaştırılması gerekir. Bu gazlar döküm parçasının iç kısımlarında veya yüzey alt bölgelerinde konumlanabilir. Her iki durumda da parçanın mekanik özelliklerini düşürücü yönde etki etmektedir. Birden fazla yolluk girişiyle doldurulan kalıp boşluklarında farklı açılardan gelen sıvı metal birbirleriyle ve kalıp cidarlarına çarparak türbülanslar oluşturur. Bu türbülanslar oluşumu esnasında sıvı metal kalıp içerisindeki havayı çevreleyerek hapseder ve döküm sonrası gaz boşluklarına neden olur. Bu yüzden kalıp boşluğundaki havanın kanallar yardımıyla tahliyesi çok önemlidir. Şekil 2.16.'da havalandırma kanalları ve taşma ceplerinin şematik görünümü verilmiştir. Havalandırma kanallarının yerinin ve kesitinin belirlenmesi kalıp tasarımının en önemli adımlarından birini teşkil etmektedir.



Şekil 2.16. Havalandırma kanalları ve taşma cepleri [24].

Havalandırma kanalları ve taşma cepleri bir bütün gaz uzaklaştırma sistemidir. Taşma cepleri, havalandırma kanallarının devamına ve kalıp açma yüzeyi üzerine açılır. Kalıp boşluğunun doluşu esnasında sıvı metalin ilk olarak bu kanallar doldurması engellenmelidir. Taşma cepleri ise kalıp boşluğunun döküm parçasının temsil eden hacmi dolana kadar dolmamasına dikkat edilmelidir. Bu cepler, dolunun son anlarında sıvı metal üzerine nihai basıncın uygulandığı ana denk düşmelidir. Havalandırma kanallarının yerinin tespiti, sıvı metalin doluş rejimine göre yapılır. Kalıp boşluğunu doldurmak için tasarlanan uygun yolluk ve yolluk girişinden gerçekleşen kalıp doluşu esnasında, sıvı metalin kalıp boşluğu içerisindeki havayı nasıl ve hangi yönlere sürüklediği incelenmelidir. Bu aşamada döküm simülasyon yazılımları, tasarımcılara büyük katkı sağlamaktadır [24].

Döküm sonrası salkımın kalıptan kolay bir şekilde ayrılabilmesi için tasarımda göz önünde bulundurulması gereken bir başka faktör çıkış açısı ve itici pimlerin konumlarıdır. Döküm sonrası parçanın kalıptan çıkarılması için ilgili yüzeylere çıkış (draft) açıları verilmelidir. Genellikle bu açılar döküm parçasındaki tüm ilgili yüzeylerde, geometriye bağlı olarak ayrılma yönüne paralel 1-5° arasında olmaktadır. Katılaşma sırasında döküm alaşımlarının hacimleri azalacağından iç yüzeylerin açısı, duvarların dış yüzeylerinin iki katı olmalıdır. Yüksek basınçlı döküm kalıp tasarımında bir diğer sınırlayıcı unsur, itici pimlerinin konumlandırılmasıdır. Çünkü itici pimleri döküm parçasında iz bırakırlar. Üretilcek parça görsel bir bileşen ise, itici pimlerinin konumuna dikkat edilmelidir [16].

2.7. Yüksek Basıncılı Döküm Hataları

Genel olarak literatürde, alüminyum alaşımı döküm bileşenlerinde hata sınıflamasına ilişkin üç ana yaklaşım önerilmiş bir başka deyişle şu anda dökümhaneler tarafından benimsenmiştir. Bu sınıflandırmalara göre D.L. Cocks'un yaklaşımı, hata geometrisi veya konumunu; Campbell'in yaklaşımı metalurjik kaynaklı nedenleri; ve Kuzey Amerika Döküm Derneği (NADCA) ise hata morfolojisini baz almaktadır.

D.L. Cocks tarafından önerilen ilk yaklaşım, yüzey ve iç hatalarına vurgu yapmaktadır (Tablo 2.4.). Yüzey kusurları görsel olarak tespit edilebilir ve hem ürünün estetiğini hem de işlevselliğini etkilemektedir. Öte yandan iç hatalar, bileşenin yalnızca kullanım durumunda etkili olmaktadır.

Tablo 2.4. D.L. Cocks'a göre döküm hatalarının sınıflandırılması [13].

Kategori	Sınıf	Tür	
D.L. Cocks'un Sınıflandırması	1- Yüzey hataları	1- Soğuk birleşme	1- Genel
			2- Sıçrama ve çekme
			3- Vorteks (Girdap)
			4- Laminasyon (Katman ayrılması)
		2- Hafif düzensizlikler	1- Kabarcık (Baloncuk)
			2- Sink (Çukur)
			3- Gölcükler (Lakes)
		3- Pürüzlü yüzey	1- Çekme izleri
			2- Lehimleme
	2- İç hatalar	1- Gaz porozitesi	1- Hidrojen
2- Oksitleyici gazlar			
2- Çekinti porozitesi		1- Kümelenme	
		2- Tanelerarası	
		3- Çatlaklar - Sıcak yırtılmalar	

Campbell tarafından önerilen ikinci yaklaşım, metalurjik kökenler / nedenler (döküm geometrisi, alaşım, kalıp özellikleri, yağlama, proses parametreleri vb.) temelinde hataları sınıflandırmaktadır (Tablo 2.5.). Bu sınıflandırmanın temel avantajı, ürün kalitesini arttırmak adına stratejiler tasarlama ve kullanma imkanı sağlamaktır. Bununla birlikte, hataların kökeni / nedenleri, eş zamanlı olarak hata tanımlamasında ortaya çıkarılabilir ve aynı hata, birkaç faktöre bağlı olabilir. Ayrıca bu yaklaşımın, farklı hata gruplarını ortaya çıkarmak için belirli denetimlerin kullanılabilirdiği önceki geometri / konum temelli tekniklere göre dökümhanelerde uygulanabilirliği daha düşüktür.

Tablo 2.5. Campbell'a göre döküm hatalarının sınıflandırılması [13].

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

Üçüncü yaklaşım NADCA tarafından önerilmiştir ve hata morfolojisine dayanmaktadır (Tablo 2.6.). Bu yaklaşımda NADCA, bir harfle gösterilen yedi hata kategorisini önermektedir. Her kategori sırayla farklı alt gruplara bölünmüş gruplara ayrılmıştır.

Tablo 2.6. NADCA'ya göre döküm hatalarının sınıflandırılması [13].

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

EN 12258-1: 20125 standardı “hata” yı ürünün istenen işlevi yerine getirmesine izin vermeyen bir kalite özelliği olarak tanımlamaktadır. Bu Avrupa Standardı (EN 12258-1: 2012), imalat, örnekleme, test ve genel özellikler gibi alüminyum alaşımlarından üretilen ürünlerle ilgili genel terimleri tanımlar. Aksine, bir hatanın varlığı, ürünün kullanıma uygun olmadığı anlamına gelmez. Bir döküm hatası, ürünün kullanıma uygun hale getirilmesi için gerekli kalite seviyesine sahip olup olmadığına karar vermek için ilgili özelliklere göre uygun bir ölçek aracılığıyla değerlendirilmelidir [13-28].

Yukarıda bahsi geçen 3 farklı sınıflandırmaya ek olarak AIM (İtalyan Metalurji Derneği), yaklaşık 50 alüminyum dökümhanesinin dahil olduğu 2 yıllık bir anketin ardından, hataları 3 farklı seviye içerisinde tanımlayan yeni bir sınıflandırma yaklaşımı önermiştir (Tablo 2.7., Tablo 2.8., Tablo 2.9.). Bu seviyeler;

- Seviye 1: Kusurların morfolojisi / konumu (iç, dış, geometrik);
- Seviye 2: Metalurjik kusurların kökeni (gaz porozitesi, çekinti, vb.)
- Seviye 3: Özel tip kusurlar (aynı metalurjik olgular) Olarak verilebilir.

Seviye 1, morfolojiyi veya lokasyonu baz almaktadır. Alt yüzey kusurları, yüzey hataları olarak kabul edilir. Geometrik hatalar, boyutlar ve toleranslar bakımından döküm parçanın formunu ifade etmektedir. Seviye 2, temel olarak metalurjik hataların kökenine odaklanmıştır. Hatalar genel metalurjik kökenlerine göre birkaç sınıfa ayrılır. Seviye 3, belirli hata tiplerini tanımlamak için kullanılır. Genellikle, belirli bir hatayı tanımlamak için kabul edilen terim, önceki seviyede tespit edilmiş olan, hatanın kendisinin metalurjik kökeninin daha iyi tanımlanmasını sağlar [13-29].

Tablo 2.7. İç hataların sınıflandırılması [29].

1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
A İç hatalar	A1 Çekinti hataları	A1.1 Makro-çekinti
		A1.2 Dendritlerarası çekinti
		A1.3 Katman porozitesi
	A2 Gaz kaynaklı hatalar	A2.1 Gaz sıkışması porozitesi
		A2.2 Hidrojen porozitesi
		A2.3 Buhar sıkışması porozitesi
		A2.4 Yağlayıcı kaynaklı gas porozitesi
	A3 Doldurma kaynaklı hatalar	A3.1 Soğuk birleşme
		A3.2 Laminasyon (Kabuklanma)
		A3.3 Soğuk birleşme porozitesi
	A4 İstenmeyen fazlar	A4.1 İnküzyonlar
		A4.2 İstenmeyen mikroyapı
	A5 Termal büzülme hataları	A5.1 Soğuk çatlak
		A5.2 Sıcak yırtılma, sıcak çatlak

Yüksek basınçlı döküm prosesinde sıvı metal ve kalıbın maruz kaldığı aşırı koşullar (sıvı metal hızının yolluk girişinde yaklaşık 60 m/sn olması, yaklaşık 100 °C/s soğuma hızı ve katılma süresince basıncın yaklaşık 120 MPa değerlerine ulaşması, kalıbın yaklaşık 600 °C’lerde sıvı metal ile temas edip daha sonra birkaç saniye içinde kalıp ayırıcı spretleme ile oda sıcaklığına inilmesi) sabit proses parametrelerinin sürdürülebilirliğinin zorluğu ve proses kontrol üniteleri arasındaki etkileşimlerin olmaması, bu döküm yöntemini hata üreten bir proses yapmaktadır.

Sonuç olarak, yüksek basınçlı döküm ile ortalama %5–10 hurda üretilmesinin yanı sıra, aynı zamanda kusurların türü, boyutu ve kritikliği de çeşitlilik göstermektedir. Yüksek basınçlı döküm bileşenleri için yapılan hata sınıflandırmasına göre, tahmini bir ortaya çıkma sıklığının da sunulduğu Tablo 2.10.’da gösterildiği gibi, farklı tipte hata alt sınıfları tanımlanabilir [3].

Tablo 2.8. Yüzey hatalarının sınıflandırılması [29].

1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye		
B Yüzey Hataları	B1	Çekinti Hataları	B1.1	Sink (Yüzey altı porozitesi)
	B2	Gaz kaynaklı hatalar	B2.1	Kabarcık (Baloncuk)
			B2.2	Gözenek
	B3	Doldurma kaynaklı hatalar	B3.1	Soğuk birleşme, Vorteks (Girdap)
			B3.2	Laminasyon (Kabuklanma)
			B3.3	Soğuk birleşme porozitesi
	B4	İstenmeyen fazlar	B4.1	Yüzey tortusu
			B4.2	Kontaminasyon, inklüzyon
	B5	Termal büzülme hataları	B5.1	Soğuk çatlak
			B5.2	Sıcak yırtılma, sıcak çatlak
	B6	Sıvı metal-kalıp etkileşimi kaynaklı hatalar	B6.1	Erozyon
			B6.2	Yapışma (Tutma)
			B6.3	Termal yorulma izleri
			B6.4	Ejeksiyon izleri
			B6.5	Kalıp korozyonu

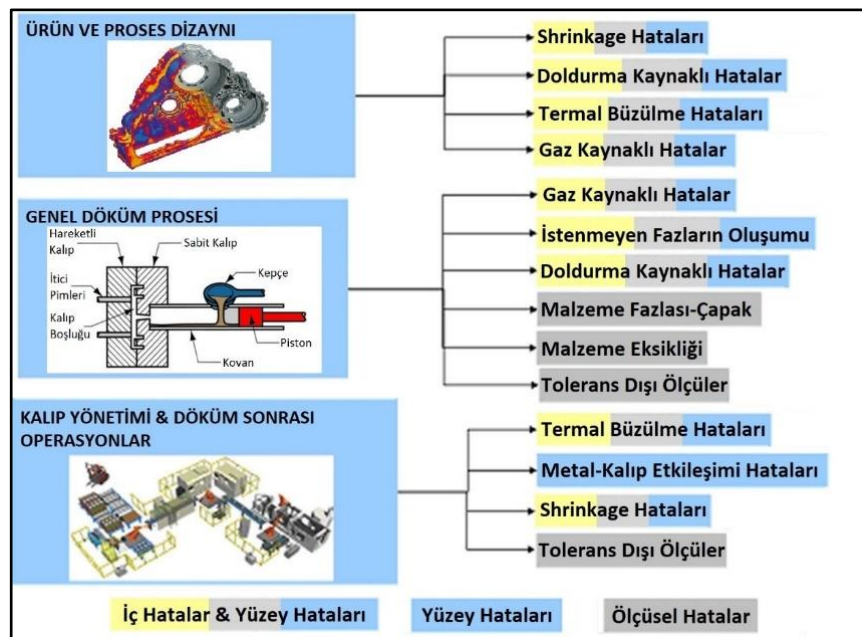
Tablo 2.9. Geometrik hataların sınıflandırılması [29].

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

Geleneksel yüksek basınçlı döküm işleminin her aşaması, yukarıda belirtilen sınıflandırmanın birinci seviyesindeki üç kategoride yer alan bu hataları, yani yüzey hataları, iç ve yüzey hatalarını ve geometrik hataları ortaya çıkarabilmektedir (Şekil 2.17.) [3].

Tablo 2.10. Yüksek basınçlı dökümde karşılaşılan hataların oluşma sıklıkları [3].

Hata Sınıfı	Oluşma Sıklığı %	Simülasyon ile Tespit Edilebilirlik	Deneysel Onaylama	İzleme Parametreleri
Shrinkage hataları	20	Kısmi olarak	X-Ray, Mikroskobi	Sıcaklık, basınç, metal ön sensörleri
Gaz kaynaklı hatalar	15	Hayır	X-Ray, Mikroskobi, kabarcık testi	Hava basıncı, nem
Doldurma kaynaklı hatalar	35	Evet	Görsel muayene, kaçak testi	Havabasıncı, metal ön sensörleri, sıcaklık
İstenmeyen fazların oluşumu	5	Hayır	Mikroskobi	Atış kovani izleme
Termal büzülme (çekme) hataları	5	Evet	Görsel muayene, Mikroskobi	Sıcaklık
Metal-Kalıp etkileşimi kaynaklı hatalar	5	Kısmi olarak	Mikroskobi	Sıcaklık, atış kuvveti
Tolerans dışı ölçüler	5	Gelişmiş simülasyon ile	Görsel muayene, Boyutsal ölçüm	Geometrik ölçümler
Malzeme eksikliği (lack of material)	5	Evet	Görsel muayene, Boyutsal ölçüm	Geometrik ölçümler
Malzeme fazlası - Çapak	5	Gelişmiş simülasyon ile	Görsel muayene, Boyutsal ölçüm	Geometrik ölçümler

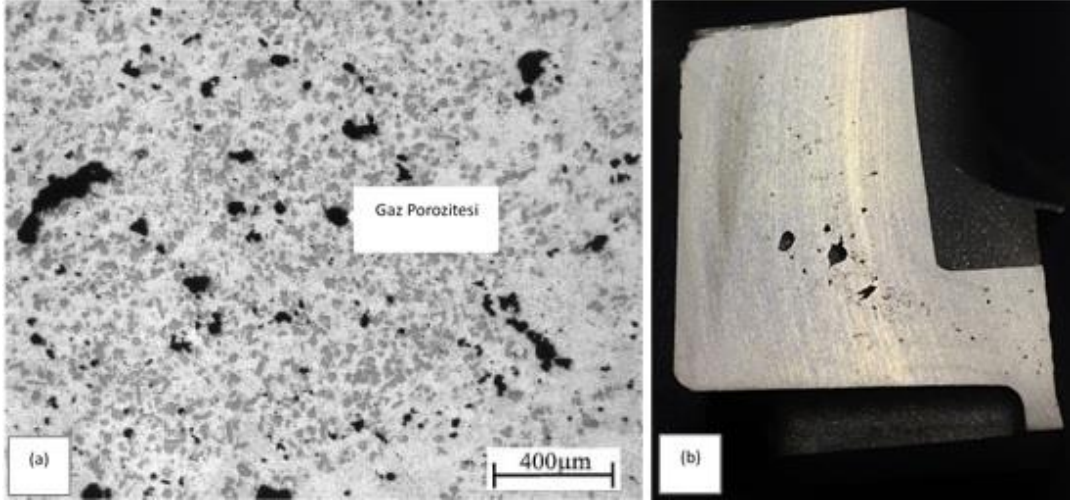


Şekil 2.17. Hataların sınıflandırılması ve kaynakları [3].

Yüksek basınçlı döküm uygulamalarında kalıp boşluğunda sıkışan hava, çekme boşlukları, döküm alaşımından kaynaklanan gaz ve cürufklar döküm kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıvı metalin kalıbı doldurma süresinin ortalama 0,1 sn. olduğu ve karmaşık şekilli parçalarda sıvı metalin keskin köşeleri dönerken oluşan türbülans düşünüldüğünde alınacak önlemlere rağmen hava veya gazın metal içinde hapsolmesi tamamen önlenememektedir [27].

2.7.1. Gaz Porozitesi

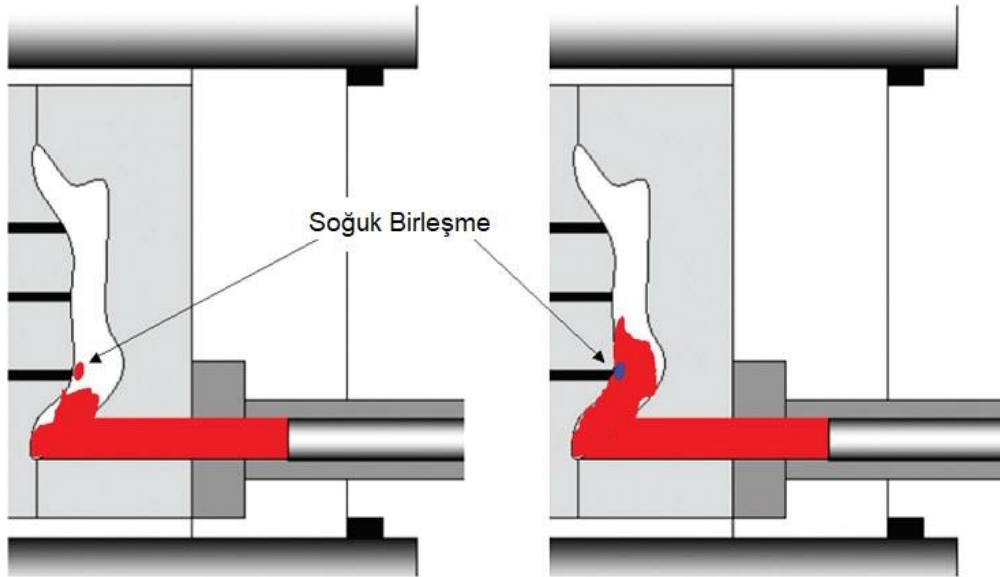
Yüksek basınçlı dökümde en çok ortaya çıkan döküm hatası gaz porozitesidir. Prosesin doğası gereği porozitesiz döküm parça imalatı neredeyse mümkün olmamakla birlikte uluslararası standartlar (ASTM E505) ve müşteri şartnameleri kapsamında belirli boyut ve miktarlardaki porozitelere müsaade edilebilmektedir. Gaz porozitesi, pistonun 1.faz hareket hızının iyi ayarlanamaması, kovandaki ya da itici pistondaki yapısal bozukluk veya oluşan hasarlar, sıvı metale gaz giderme işlemi uygulanmaması ya da gaz gidericilerin etkisini kaybetmesi sonucu metal içerisinde çözünmüş halde bulunan gazlar (Alüminyum alaşımları için H_2) ve kalıp boşluğunda bulunan havanın kalıbı terk edememesi sonucu parça yüzeyinde veya içerisinde kalan havanın neden olduğu döküm hatasıdır (Şekil 2.18. a - mikroskobik b - makroskobik). Gaz boşlukları ve porozite hatalarının ana nedeni, döküm sırasında sıvı metalde sıkışmış hidrojen gazıdır. Sıvı metaldeki hidrojen miktarındaki artış, dökümdeki porozite büyüklüğünü ve miktarını artıracaktır. Katılaşma sırasındaki gaz porozitesinin temel faktörü sıvı metal içerisindeki çözünmüş hidrojen seviyesidir ve bundan kaçınılması gerekir, aksi takdirde nihai döküm ürününün mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini önemli ölçüde azaltır. Alüminyum atmosferdeki su buharıyla birleştiğinde hidrojen gazı salınır. Porozite kalın kesitli döküm parçasında az sayıda büyük boşluklar veya parçanın içinde küçük gözenekler şeklinde özellikle yüzeye yakın yerlerde görülür [24-30].



Şekil 2.18. Bir alüminyum alaşımı döküm parçasında gaz kaynaklı porozite [24].

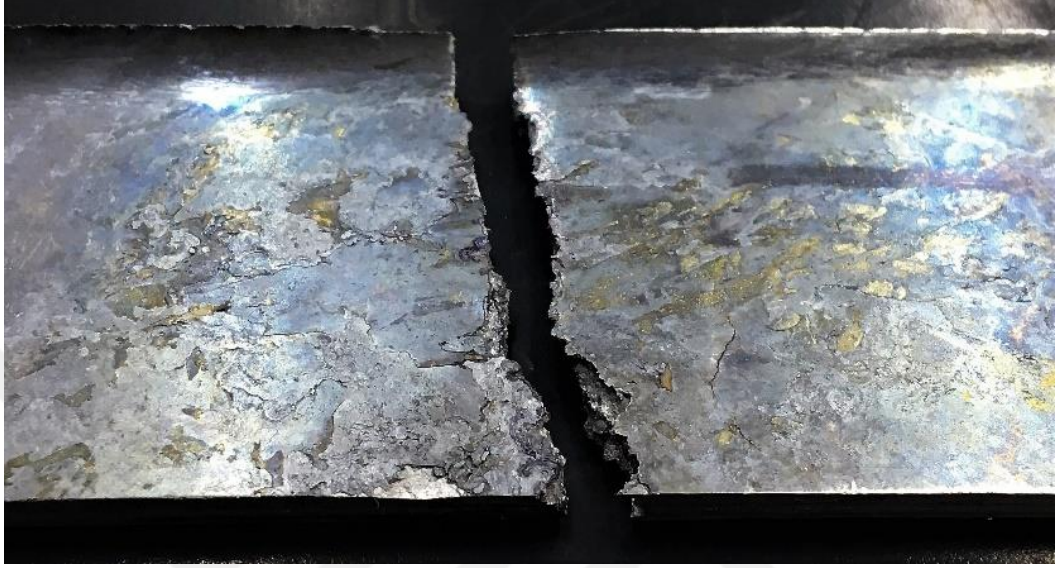
2.7.2. Soğuk Birleşme

Kalıp içinde ısısını önceden kaybederek katılaşmış bölgelerde, sonradan gelen daha sıcak sıvı metal yüzeyi ile karşılaştığı ve aradaki oksit tabakası nedeniyle kaynamanın tam olarak gerçekleşemediği bölgelerde görülür (Şekil 2.19.). Sıvı metalin farklı yönlerden gelerek karşılaştıkları noktada, birbirleri içinde ergimeyecek kadar soğumuşlarsa bu olay meydana gelir [24].



Şekil 2.19. Yüksek basınçlı dökümde soğuk birleşme hatası oluşumu [28].

Döküm parçalarda soğuk birleşme hatası genellikle, görece düşük gerilimler altında kırılmaya neden olur. Şekil 2.20.'de düşük mekanik yüklemeye sonrasında soğuk birleşme olan bölgeden kırılmış bir alüminyum parça verilmiştir [28].

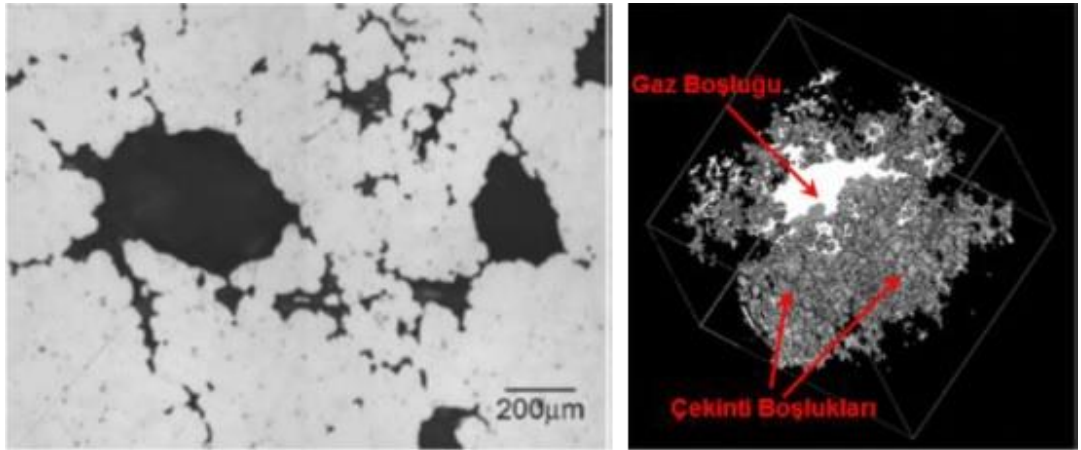


Şekil 2.20. Düşük mekanik yük ile kırılmaya sebep olan soğuk birleşme hatası.

Soğuk birleşme, sıvı metalin bir kısmı kalıba temas ettiğinde ve hızla soğuduğunda oluşur. Hızlı katılaşma, çevresindeki bölgenin ince bir oksit tabakasıyla da ayrılabilmesi bölgeye göre daha ince bir mikro yapıya yol açar. Bazı durumlarda kalıba giren sıvı metal, bu hızlı katılaşan bölgelerden bazılarının ayrılmasına neden olabilir ve erimelerini tamamlamadan onları boşluğun içine sürükleyebilir. Bu nedenle, soğuk birleşme genellikle parçanın yüzeyinde ortaya çıksa bile, sıvı metal akışı tarafından takip edildiğinde iç kusur olarak ta bulunabilmektedir. Bu hatanın temel nedenleri; kalıp doluşu anındaki süreksizlikler, akışkanlığı düşük sıvı metal, yanlış yolluk tasarımına bağlı beslenememe, düşük döküm sıcaklığı ve düşük kalıp sıcaklığı sayılabilir [13-24-31].

2.7.3. Çekinti (Shrinkage)

Yüksek basınçlı döküm parçalarda en sık karşılaşılabilen döküm hatalarından biri olan çekinti metalurjik kökenli bir hatadır. Döküm sonrası katılaşma sırasında sıvı ve katı faz arasındaki hacimsel farkların bir sonucu olarak çekinti (büzülme) meydana gelir. Çoğu alüminyum alaşımları için katılaşma sırasındaki büzülme hacimce yaklaşık %6'dır. Dökülen metal katı haldeyken, sıvı hale oranla daha az yer kaplar, diğer bir deyişle metaller (genellikle) sıvı halden katı hale geçerken hacimsel bir küçülmeye maruz kalırlar. Bu küçülme, parça içerisinde kalın kesitli ve geç katılan bölgelerin, ince kesitli ve erken katılan bölgeleri beslemesiyle ince kesitler için aşılmış olur. Kalın kesitler ise basınçlı döküm yönteminde besleyici uygulaması olmadığından yolluk girişinden beslenmek zorundadır. Katılaşma sonunda izole olmuş ince kesitler ve yeterli besleme olmadan besleme yolu katılaşmış olan kalın kesitlerde metalde meydana gelen hacimsel küçülmenin sonucu olarak çekme boşlukları oluşmaktadır. Bu boşluklar ürünün mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkileri yüzünden mümkün olduğunca azaltılması gerekir. Çekme boşlukları düzensiz ve pürüzlü oldukları halde gaz boşlukları yuvarlak ve düzgündür. Ancak bu hatalar tamamen birbirinden ayrı değildir. İçerisinde gaz boşluğu da içeren çekinti boşlukları döküm yapısı içinde bulunabilir. Şekil 2.21.'de gaz boşluğu (porozite) ile içiçe geçmiş çekinti boşluğunun mikroyapı ve 3 boyutlu görüntüsü verilmiştir. Çekinti hatası, radyografik muayenede koyu lekeler gibi görünen bir süreksizlik şeklindedir [24-30].

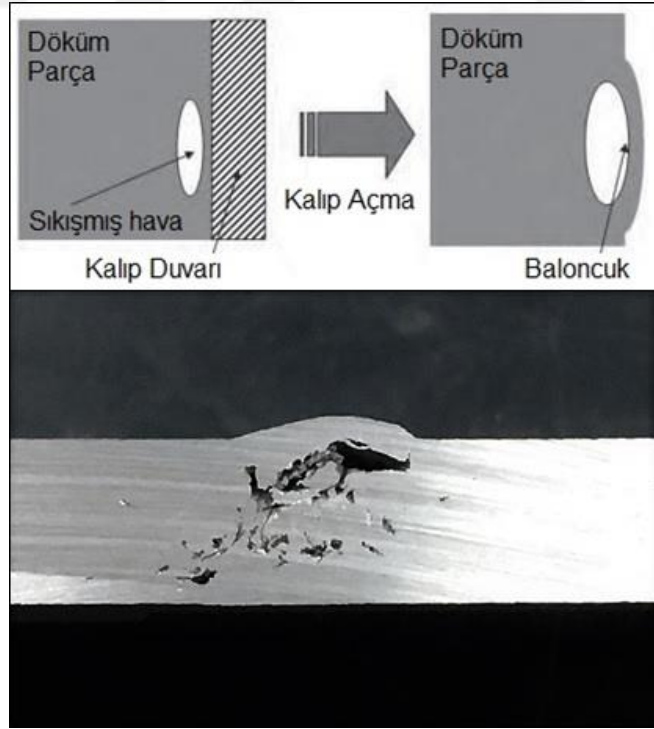


Şekil 2.21. Porozite ile çekinti boşluğunun mikroyapı ve 3D görünümü [24].

2.7.4. Baloncuk (Blister)

Baloncuk hataları genellikle gaz kaynaklı yüzey hataları olarak bilinmektedir. Bunlar, yüzey altındaki gaz porozitesinin iç basıncı, onu kaplayan ince metalik yüzey tabakasını plastik olarak deforme ettiğinde patlayan ya da patlamayan küçük yüzey alanlarından oluşur. Dolayısıyla bu hatanın temel kaynağı sıvı metal içerisindeki çözünmüş gazlardır. Şekil 2.22.'de bu hatanın oluşum mekanizması ve bir alüminyum parçada meydana gelmiş baloncuk hatasının makro görüntüsü verilmiştir. Baloncuk hatası 100 µm ila birkaç mm arasında büyüklüklerde olabilmektedir.

Baloncuk hatası hem döküm kalıptan çıkarıldığı sırada hem de ısıl işlemlerin ardından ortaya çıkabilir. Benzer şekilde, kaplanmış döküm parçaların ısıl işlemlerinde, metal içinde sıkışmış olan gazlar sızabilir ve kaplama patlayabilir. Bazen gaz atma olarak ta adlandırılan bu olgu, baloncuk (blister) olarak kabul edilir. Bu tür bir hata, türbülanslı kalıp doldurma ve buna bağlı olarak havanın sıkışması nedeniyle yüksek basınçlı döküm işleminde daha sık bulunabilir [13-31].



Şekil 2.22. Baloncuk hatasının oluşumu (üstte) ve makro görüntüsü (altta).

2.8. Yüksek Basıncılı Dökümün Kalite Kontrolü

Yüksek basınçlı dökümde kalite kontrol, kapsamlı bir süreçtir. Döküm işleminin doğasından gelen çeşitli hatalar nedeniyle, kalite kontrol çalışmalarının her parçadan beklenen özelliklere göre uyarlanması gerekmektedir. Bu noktada havacılık ve otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok sektörde etkin olarak kullanılan Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) problemleri henüz yaşanmadan çözüme son derece etkili bir yöntemdir. Yüksek basınçlı döküm işlemi, takibi ve önlenmesi gereken birçok hata moduna sahiptir. Hangi hata modlarının önemli olduğu, parçadan beklenen özelliklere ve son kullanıcıya bağlıdır.

Yüksek basınçlı döküm ürünlerinde karşılaşılan hatalardan bazıları aşağıdaki gibi verilebilir. Bu hata modlarının her birini tespit etmek ve önlemek için birçok farklı teknik mevcuttur.

- Talaşlı imalat sonrasında sızıntı yolları oluşturan porozite
- Kalıptaki hareketli bileşenlerde kaymalar, aşınma veya hareketler nedeniyle dökümdeki boyutsal problemler
- Doldurma problemleri veya kalıp kondisyonu nedeniyle görsel hatalar
- Trim problemleri sonucu döküm parçada fazla malzeme kalması
- Diğer hataların kombinasyonu sonucu ortaya çıkan sızdırmazlık problemi
- Boyama veya montaj gibi atlanmış veya uygun olmayan ikincil işlemler

2.8.1. Porozite (X-Ray Muayeneleri)

Porozite, X-ışını teknikleri kullanılarak kolayca tespit edilebilmektedir. Bu yöntem genellikle, toplam porozite miktarlarının belirlenmesinde etkili olmakla birlikte, ancak küçük porozitelerin spesifik olarak lokasyonunu belirlemek zor olabilmektedir. Aynı zamanda talaşlı imalat, poroziteyi değerlendirmek için de etkili bir araçtır, fakat maliyetli olabilir ve örnekleme büyüklüklerine dayanarak yanlış öngörüler verebilir. Poroziteyi kontrol etmenin en iyi yöntemleri, oluşumu önlemek için döküm prosesi parametrelerinin kontrol altına alınmasıdır.

2.8.2. Boyutsal (Ölçüsel) Problemler

Boyutsal problemlerin tespit edilmesinde ölçüm sıklığı, olası sorunların sıklığına ve proses istikrarına bağlı olarak belirlenir. Boyutsal hataların ortaya çıkmasını önlemede, uygulanabilir olmaları durumunda Poke-Yoke gibi metodların kullanımı son derece etkili bir önleyici faaliyet olarak yapılmaktadır. Döküm parçalardaki boyutsal hatalar genellikle kalıp ve kalıp alt parçalarındaki hataların sonucudur. Bu sorunları azaltmak veya tamamen gidermek için yapılan düzeltici faaliyetler bazen pahalı bir yöntem olmakla birlikte, hata tekrarını önlemede genellikle uzun vadeli ve kesin çözümler sunmaktadır.

2.8.3. Görsel Hatalar

Görsel hataların yakalanmasında çoğu zaman güvenilir olmayan ve muhtemelen en ucuz hata yakalama yöntemi olan göz kontrolü kullanılmaktadır. Değişken doğası gereği, görsel sistemler görsel hataların tespiti için henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çoğu hata modunda olduğu gibi, bir problemin müşteriye ulaşmasını engellemenin en iyi yolu, ilk etapta oluşmalarını önlemektir. Bu amaçla, sağlam ve güçlü bir prosesi sürdürmek için proses kontroller kilit öneme sahiptir. Bunun ötesinde, kalıpların bakım gereksinimlerini karşılamanın en iyi yolu müşteriler ile yapılan anlaşmalarla takım bakım programları yapmaktır.

2.8.4. Trim Hataları

Trim problemlerinin döküm parçalardaki çapakları almak için kullanılan metod ve ekipmana bağlı olarak birçok nedeni olabilir. Trim kalıbı ile ilgili konular genellikle etkili bir bakım rutini ve iyi bir trim kalıp tasarımı ile önlenmektedir. Trim ile ilgili hataların tespit edilmesi genellikle görsel muayene ile yapıldığı için zordur. Yüksek önem dereceli problemler için, master kontrolü veya Poke-Yoke cihazları kullanılabilir.

2.8.5. Kaçak problemi (Leakage)

Döküm parçaların sızdırma problemi genellikle yukarıda bahsi geçen hatalardan biri veya birkaçının biraraya gelmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Parçalardaki hem porozite hem de yüzey hataları parçada içten dışa doğru kaçak yolları oluşturur. Kaçak hatalarının tespit edilmesi genellikle parçaya özel olarak tasarlanan hava kaçak testleri ile yapılmaktadır. Hava kaçak testinin avantajı nispeten hızlı bir test döngüsüne sahip olmasıdır [32].

2.9. Yüksek Basıncılı Dökümde Simülasyon ve MAGMASoft

Üretim sürecinden optimum ürün elde edilebilmesi için günümüzde yüksek işlem hızına sahip bilgisayarlar ve simülasyon programları kullanılmaktadır. Döküm simülasyon programları, kalıp tasarımını kolaylaştıran, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayan deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldıran, ilk baskıdan itibaren yüksek oranda başarı ve verim elde edilebilen bir seçenek olarak görülmektedir. Bu programların amacı, döküm esnasında sıvı metalin yolluk boyunca ilerleme şekli, kalıbı doldurma biçimi ve döküm sonunda parça bünyesinde oluşacak hataları, kalıp tasarım eksikliklerini simüle etmektir. Simülasyon programları ile katılaşma, dolum, ürün-kalıp sıcaklık dağılımı, soğuk birleşme noktaları, son hava, malzeme akış hızları, mikro porozite, makro porozite vb. simülasyonlar yapılabilmektedir. Böylece tek seferde başarılı üretim ve döküm hatalarını henüz tasarım aşamasında görebilmek mümkün olmaktadır [27].

Yüksek basınçlı döküm kalıplarının üretiminde, bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik uygulamalarının kullanılması gerek çevresel yönüyle gerekse ekonomik ve kaliteli üretimin sağlanması noktasında günümüz dökümcüleri için bir rahatlıktan çok bir gerekliliktir. Ancak bu araçların kullanımında, tasarımcı ne kadar gerçeğe yaklaşık modelleme yaparsa o derecede gerçekçi sonuçlar alacaktır. Yapılacak simülasyon incelemesinin sonuçlarının doğru okunması hem kalıpta oluşması muhtemel hataların hem de üretilen parçada oluşacak kusurların azaltılmasında hayati önem taşımaktadır.

Yüksek basınçlı döküm prosesindeki kalıpların karmaşıklığı (sabit ve hareketli kalıplar, çekirdekler, soğutma kanalları, vb.) ve makine parametreleri (enjeksiyon sıcaklığı, piston hızları, döngü süreleri, vb.), modelleme sürecinde dikkate alınması gereken sınır koşullarının sayısını arttırmaktadır. Kalıpların geometrik karmaşıklığı ve ince kesit kalınlıkları, döküm sırasında alüminyumun kayda değer serbest yüzey dağılması ve sıçramasına sahip güçlü 3 boyutlu sıvı akışına sebep olur. Kalıbın çeşitli bölümlerinin doldurulma sırası ve gaz çıkışlarının etkin bir biçimde konumlandırılması, minimum seviyede sıkışmış hava (porozite) içeren homojen döküm parçaların üretimi için çok önemlidir. Bu, yolluk ve gaz çıkış sisteminin tasarımı ve ayrıca kalıbın geometrisinden etkilenir. Kalıp tasarımı sürecindeki bu faktörler nedeniyle, simülasyon daha da önemli hale gelmektedir. Simülasyon, bir döküm sistemini optimum hale getirebilir ve ayrıca döküm kalitesini daha az deneyle ve daha düşük maliyet ile yükseltebilir. Tüm bu zorluklar, doğru yüksek basınçlı döküm simülasyon modelleri elde etmenin zorluğunu ve gerçek süreci mümkün olduğunca çoğaltmaya yönelik ayarlamalarının ilgisini ortaya koymaktadır. Simülasyon, kalıp doldurma ve kalıp ısıl performanslarının daha etkin kontrolü dahil olmak üzere farklı kalıp tasarımlarının, dolum proseslerinin ve gaz çıkış sistemlerinin etkinliğini incelemek için güçlü ve uygun maliyetli bir yol sunarak, sonuçta hem ürün kalitesinde hem de proses verimliliğinde iyileştirmelere olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak, iyi tasarlanmış bir yolluk ve gaz çıkış sistemi, homojen bir kalıp doldurma modelinin sağlanması ve kaliteli dökümlerin üretilmesi için çok önemlidir. Bileşenin akış analizi, boşluk doldurma ve havalandırma işleminin görsel olarak analiz edilmesi amacıyla yapılır. MAGMASoft, yüksek basınçlı döküm endüstrisinde, özellikle dökümhane uygulamalarında, sıvı metal akışını modellemek için yaygın olarak kullanılan üç boyutlu bir katılaşma ve sıvı metal akış inceleme yazılımıdır. MAGMASoft, dikdörtgen bir grid (örgü sistemi) üzerinde ısı ve kütle transferini çözmek için sonlu hacim yöntemini kullanır. Kalıp boşluğunun dolumu hakkında faydalı bilgiler sağlayabildiğinden ve güçlü malzeme özellikleri kabiliyetine sahip olduğundan, yüksek basınçlı döküm kalıbında sıvı metal akışını simüle etmede faydalı bir araçtır. Ayrıca erken katılaşma, kalıp boşluğunda hava hapsolmesi, sıvı metal hız dağılımı, yolluk ve yolluk girişleri gibi dökümle ilgili özellikler hakkında oldukça doğru veriler üretebilmektedir [33-34].

BÖLÜM 3. LİTERATÜR TARAMA

Bodhayaet ve ark. (2014), sıvı metalin kalıp içerisine enjekte edildiği basınçlı döküm yönteminin çok yönlü bir üretim tekniği olduğunu incelemiştir. Basınçlı döküm kalıbı maçalar ve kalıp boşluğundan oluşmaktadır. Maça ya da maçalar ve kalıp boşluğu birlikte kapandığında toplam döküm boşluğunu oluşturmaktadır. Bu boşluk, parçanın şeklini ve geometrisini oluşturur. Basınçlı dökümde temel zorluk, kalıp tasarımı ve üretimidir. Kalıp üretim sürecine tasarım ve analizin entegrasyonunun parça kalitesi açısından daha verimli sonuçlara yol açacağını öne sürmüşlerdir [34].

Ertürk (2010), yüksek basınçlı döküm yönteminde yolluk sisteminden kaynaklanan gaz problemlerinin simülasyon programı ile optimizasyonu üzerinde tez çalışması yapmıştır. Çalışmasında önce farklı yolluk modellerinin simülasyon sonuçlarını irdelerek en uygun yolluğu belirlemiş ve dolum sonuçlarına bağlı olarak parça üzerindeki hava ceplerinin tasarımını gerçekleştirmiştir. Yapılan hava cepleri tasarımlarını simülasyon ile inceleyerek, genel olarak tüm kalıp tasarımını düzenlemiş ve en uygun yolluk ve hava cebi modelini belirlemiştir. Sonrasında tasarımları üzerinden sırasıyla kalıp üretimini ve döküm işlemlerini gerçekleştirmiştir. Böylelikle kalıp tasarım optimizasyonunun bilgisayar ortamında yapılması ile döküm kaynaklı hataların önüne geçilebileceğine ve ayrıca maliyet ve zaman açısından kazanç sağlanabileceğine vurgu yapmıştır [24].

Sung ve ark. (2008), kalıp boşluğu içerisindeki sıvı metal akışını ve etkili kalıp tasarımını analiz etmek için döküm simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında optimum koşulları, deneysel veriler kullanılarak incelenen basit denklemlerle hesaplamışlardır. [34]

Boydak (2007), tez çalışmasında yüksek basınçlı döküm yöntemi ile imal edilen bir parça üzerinden döküm parametrelerinin simülasyon ve deneysel metotlar ile karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda simülasyon ve deneysel verileri kıyaslamış ve çok yakın olduklarını tespit etmiştir. Bu nedenle yüksek basınçlı dökümde bilgisayar destekli simülasyon çalışmalarının, döküm parametrelerinin optimizasyonu açısından etkin bir yol olduğuna vurgu yapmıştır [35].

Gözen (2007), tez çalışmasında ProCAST simülasyon programı ile örnek bir parçanın yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretiminin simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalarda kalıp ve yolluk tasarımlarının simülasyon programları verileri ile optimizasyonunun nihai parça açısından önemini vurgulamıştır [25].

Yan ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilecek bir bileşen için yolluk ve hava cebi tasarımları üzerinde çalışmışlardır. Akabinde bu tasarımın simülasyonunu yapmışlardır. Sonrasında elde edilen simülasyon verileri ile tasarım üzerinde iyileştirmeler yapılmış ve tekrar simülasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak simülasyon programları kullanılarak kalıp tasarımları üzerinde optimizasyonlar yapılmış ve daha kısa sürede ve aynı kalitede daha fazla parça üretilmesinin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır [36].

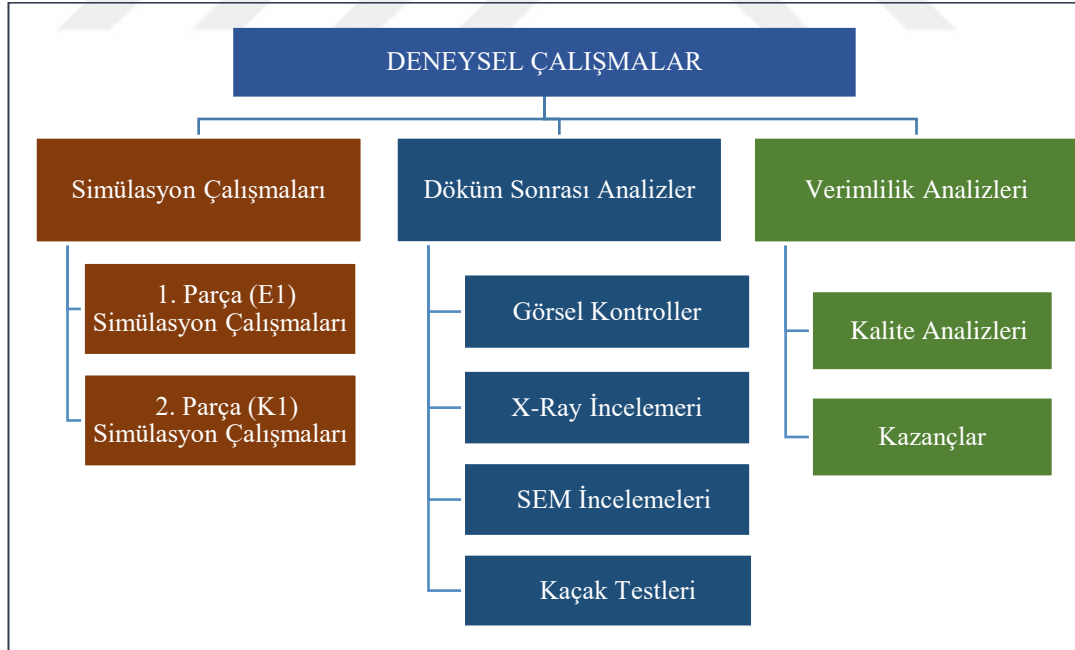
Cleary ve ark. (2006), çalışmalarında MAGMAsoft programı ve smooth particle hydrodynamics (SPH) metodu ile hazırlanan üç boyutlu akış hesaplama programı ile incelemeler yapmışlardır. yanı sıra camdan hazırlanan kalıp içerisine yapılan dolumun video kamera ile kayıt edilmiş görüntülerini zamana bağlı olarak karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda her iki metodun da gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylelikle simülasyon programlarının yapılacak döküm işleminin bilgisayar ortamında görülmesi açısından kullanılabilir yöntemler olduğunu kanıtlamışlardır [4].

Verran ve ark. (2006), yaptıkları çalışmada yüksek basınçlı döküm prosesinde birinci ve ikinci faz hızı ile sıkıştırma fazı olan üçüncü fazın etkilerini incelemişlerdir. Bunlara ek olarak çalışmada hem MAGMAsoft programı ile döküm simülasyonları yapılmış hem de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre birinci faz ve ikinci faz hızlarının yükselmesinin porozite oranını arttırdığını saptamışlardır. Ayrıca üçüncü faz basınç değerinin yükselmesinin porozite oluşumunu azalttığı saptanmıştır [37].



BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

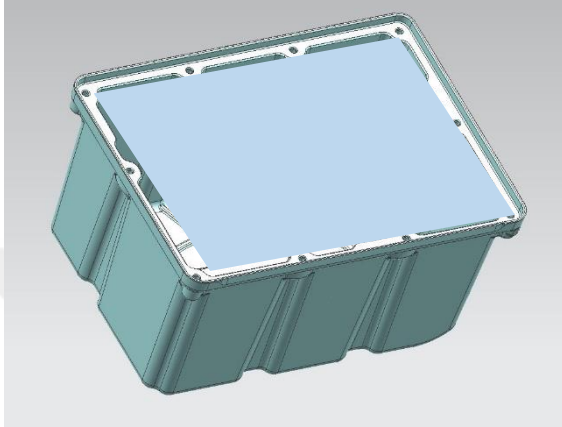
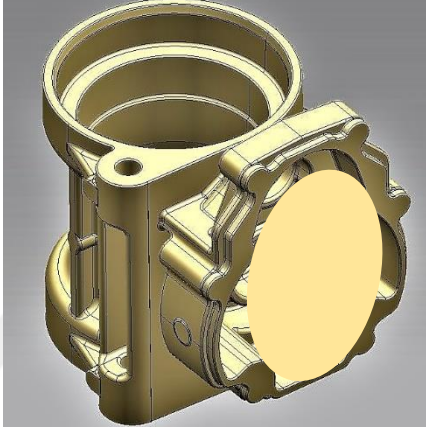
Deneysel çalışmalar kapsamında 2 farklı yüksek basınçlı döküm otomotiv parçası (Egzoz gazı arıtma sistemi kapağı ve klima kompresör gövdesi) üzerinde farklı ventil çıkış tasarımlarının parçalarda yaşanan soğuk birleşme, baloncuk ve porozite hataları üzerine etkileri MAGMASoft yüksek basınçlı döküm simülasyon yazılımı kullanılarak irdelenmiş ve sonrasında görsel kontrol, X-Ray ve SEM incelemeleri ile simülasyon sonuçlarının doğrulaması yapılmıştır. Çalışmaya konu parçalarda müşteri tarafından sızdırmazlık beklentisi olduğu için kaçak testleri de uygulanmıştır. Deneysel çalışmada son olarak ERP ve MRP yazılımları kullanılarak dökümhaneden tam zamanlı olarak alınmış verilerden kalite ve proses verimlilik analizleri yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar ile ilgili sistematik Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışma sistematığı.

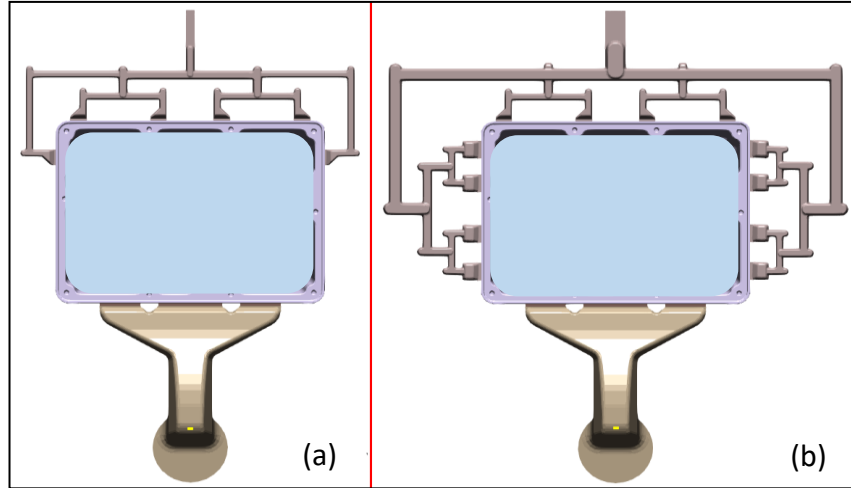
Tezin bu bölümünde anlatım kolaylığı açısından deneysel çalışmalarda kullanılan egzoz gazı arıtma sistemi kapağı parçası E1 ve klima kompresör gövdesi parçası K1 olarak adlandırılmıştır. Tablo 4.1.'de E1 ve K1 parçaları için genel bilgiler verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan parçalar ile ilgili genel bilgiler.

	
E1	K1
Malzeme : AlSi12Cu1(Fe)	Malzeme : AlSi10Mg(Fe)
Ağırlık : 1,9 kg	Ağırlık : 0,570 kg
Yüzey Alanı : 917 cm ²	Yüzey Alanı : 333 cm ²
Hacim : 1245 cm ³	Hacim : 344 cm ³

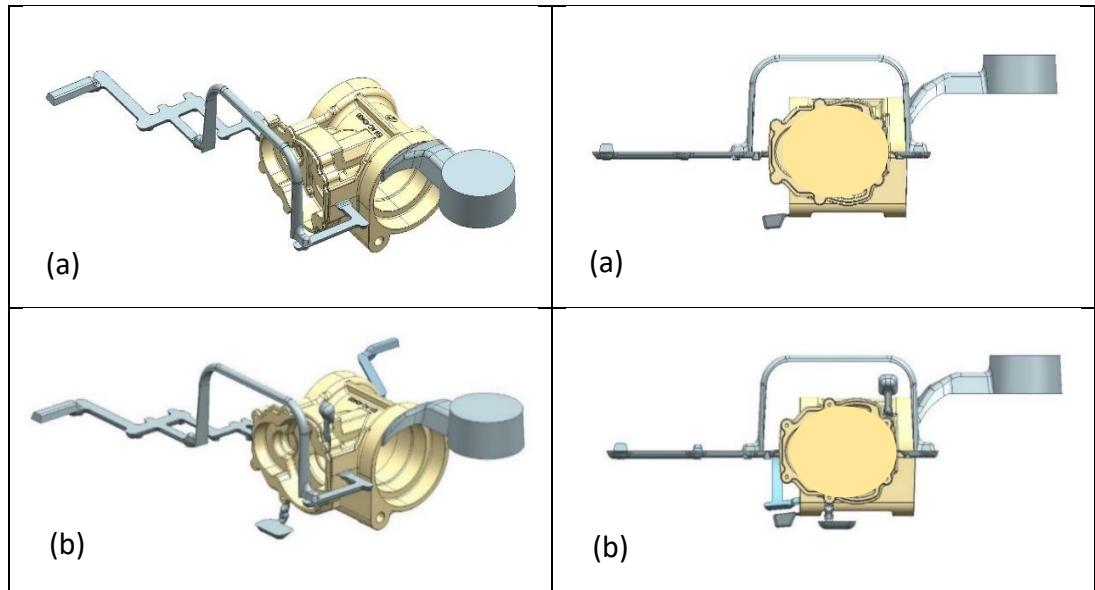
4.1. Tasarım ve Simülasyon Çalışmaları

Deneysel çalışmaların bu aşamasında MAGMASoft HPDC yazılımı kullanılarak yüksek basınçlı döküm sırasında kalıp boşluğu içerisindeki havanın farklı chillvent tasarımları ile uzaklaştırma performansı araştırılmıştır. E1 parçası üzerinde yapılan farklı ventil tasarımlarının görüntüleri Şekil 4.2.'de verilmiştir. Seri üretimde soğuk birleşme ve baloncuk hataları sebebiyle sızdırmazlık beklentilerini karşılayamayan ilk tasarımda (Şekil 4.2. a) kalıp boşluğu içerisindeki havanın atılmasını sağlayan chillvent yüzey alanı 126 mm² iken ikinci tasarımda (Şekil 4.2. b) bu alan 312 mm²'ye çıkartılmıştır.



Şekil 4.2. E1 parçasının (a) ilk ve (b) ikinci chillvent tasarımı görüntüleri.

K1 parçasının tasarım ve simülasyon çalışmalarında ise ventiller üzerinde yapılan tasarımlar Şekil 4.3.'te verilmiştir. İlk yapılan tasarımda kalıp içerisindeki havanın atılmasını sağlayan chillvent yüzey alanı 58 mm^2 iken ikinci tasarımda bu alan 116 mm^2 'ye çıkartılmıştır. Müşteri tarafından sızdırmazlık beklentisi yüksek olan K1 parçasının ikinci tasarımında özellikle mekanik montajın yapılacağı spot face yüzeyindeki montaj deliklerinde kritik olarak öngörülen bölgelere ek çıkışlar yapılmıştır. Bu sayede spot face bölgesinde yüksek basınçlı döküm sırasında sıkışabilecek havanın daha etkili bir şekilde atılması hedeflenmiştir.



Şekil 4.3. K1 parçasının (a) ilk ve (b) ikinci chillvent tasarımı görüntüleri.

4.2. Döküm Denemeleri

Tasarım ve simülasyon çalışmaları sonrasında H13 çeliğinden imal edilen kalıplar ile yüksek basınçlı döküm denemeleri gerçekleştirilmiştir. E1 ve K1 parçaları için Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'te kimyasal analizleri verilen külçeler Şekil 4.4.'te görseli verilen StrikoWestofen ergitme fırınlarında 710 C°'de ergitilmiş ve daha sonrasında potaya alınan sıvı alüminyum alaşımları, içerisindeki çözülmüş hidrojen seviyesinin azaltılması amacıyla Şekil 4.5.'te verilen gaz giderme işlemine tabi tutulmuştur. Gazalma prosesi parametreleri Tablo 4.4.'te verilmiştir. Gaz alma işlemi sonrası yoğunluk endeks ölçümleri yapılmış ve hidrojen yoğunluğunun %4'ün altında olduğu kontrol altına alınmıştır. Gaz giderme sonrası Buhler gerçek zamanlı döküm kontrolü hücresinde (Şekil 4.6.) döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dökümler sonrası parçalar trimlenerek nihai döküm parçalar elde edilmiştir. Parçaları üretmek için kullanılan yüksek basınçlı döküm prosesi parametreleri Tablo 4.5. ve Tablo 4.6.'te verilmiştir.

Tablo 4.2. AlSi12Cu1(Fe) alaşımının (E1) kimyasal kompozisyonu.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
10,5-13,5	0,6-1,1	0,7-1,2	0,55 Max	0,35 Max	0,10 Max
Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al.
0,30 Max	0,55 Max	0,20 Max	0,10 Max	0,02-0,15	Kalan

Tablo 4.3. AlSi10Mg(Fe) alaşımının (K1) kimyasal kompozisyonu.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
9-11	1 Max	0,1 Max	0,55 Max	0,2-0,5	-
Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al.
0,15 Max	0,15 Max	0,15 Max	0,05 Max	0,2 Max	Kalan

Tablo 4.4. Gazalma proses parametreleri.

Gaz Alma Prosesi Parametreleri	
Kullanılan Gaz	Azot
Gazalma Süresi	200-225 sn.
Şaft dönme hızı	550-650 RPM.
Gaz Basıncı	1,5-3,5 bar



Şekil 4.4. StrikoWestofen ergitme fırını.



Şekil 4.5. Azotla gaz giderme sistemi.



Şekil 4.6. Bühler soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinası.

Tablo 4.5. E1 parçasının yüksek basınçlı döküm proses parametreleri.

Döküm Sıcaklığı (°C)	2. Faz Hızı (m/s)	Çalışma Basıncı (Bar)
660-670	4,30	1000-1050

Tablo 4.6. K1 parçasının yüksek basınçlı döküm proses parametreleri.

Döküm Sıcaklığı (°C)	2. Faz Hızı (m/s)	Çalışma Basıncı (Bar)
660-670	4,00	1100-1150

Döküm işlemleri sonrasında yapılacak taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri için üretilen numunelerin iyileştirme yapılan bölgelerinden alınan numuneler sırasıyla; kesme, zımparalama ve parlatma metalografik işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi Struers Tegrapol-11 (Şekil 4.7.) cihazı ile 180-320-400-600-800 ve 1200 mesh özelliklerine sahip zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Zımpara işlemi sonrası 1-3 mikron alümina pasta ile kaba parlatma ve elmas pasta ile nihai parlatma işlemleri yapılmıştır.



Şekil 4.7. Struers TegraPol-11 Zımparalama ve parlatma cihazı.

Hazırlanan parçalar ve numunelerin kalite analizleri sırasıyla görsel muayene, X-Ray radyoskopi ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) yöntemleriyle yapılmıştır. ASTM E505'e göre porozite analizi Yxlon 160 kw X-Ray Radyoskopi makinası (Şekil 4.8.) ile gerçekleştirilmiştir. Mikroskobik incelemeler için Şekil 4.9.'da verilen Tescan, Elektron mikroskopu - BSE modu kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Yxlon 160 kw X-Ray Radyoskopi makinası.

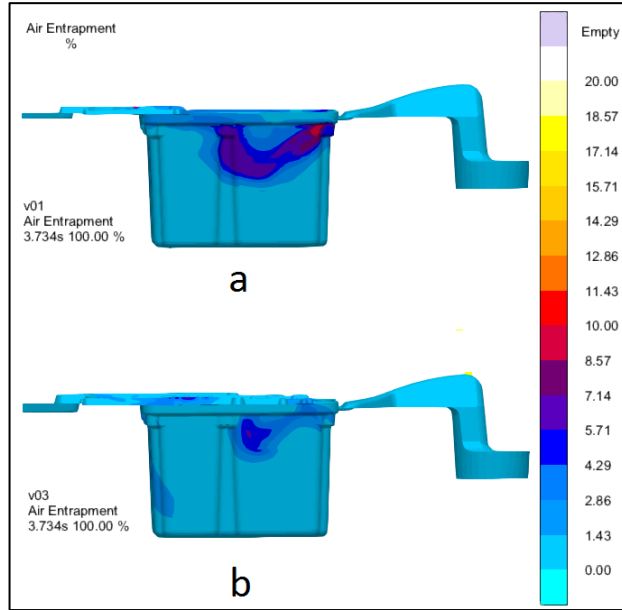


Şekil 4.9. Tescan Elektron Mikroskobu – Sakarya Üniversitesi.

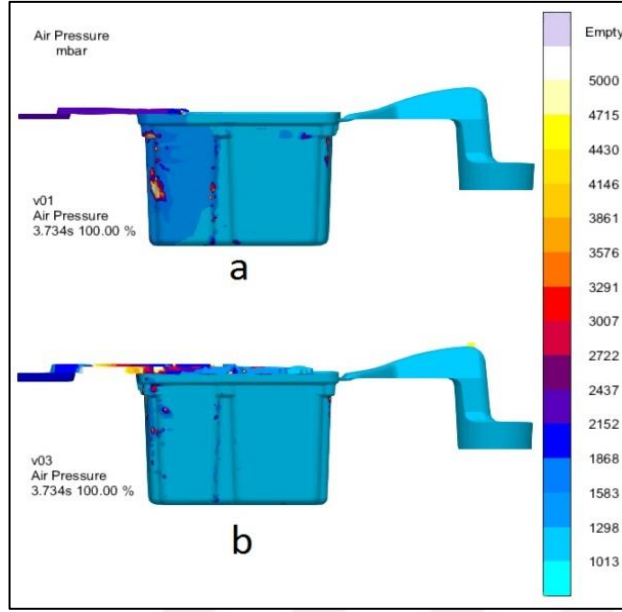
BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

5.1. Simülasyon Sonuçları

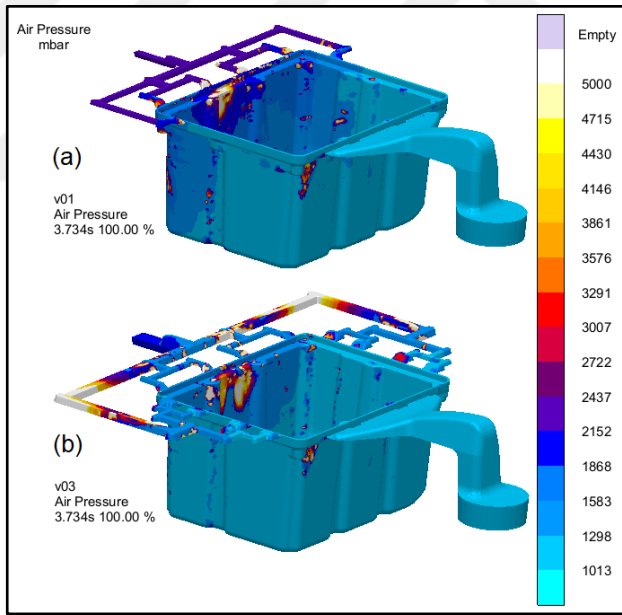
Bu bölümde deneysel çalışmaların ilk aşamasında gerçekleştirilen tasarım ve akabinde uygulanan simülasyon denemelerinin sonuçları verilmiştir. E1 parçasında yapılan farklı ventil tasarımlarına göre gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında MAGMASoft yüksek basınçlı döküm simülasyon yazılımının hava sıkışması (Air Entrapment) ve hava basıncı (Air Pressure) modülleri kullanılarak yüksek basınçlı döküm prosesi sırasında kalıp boşluğu içerisinde atılmaya çalışılan havanın parça içerisinde kaldığı bölgeler ve miktarları incelenmiştir (Şekil 5.1., 5.2. ve 5.3.). Buna göre açıkça görülmektedir ki chillvent yüzey alanı arttırılmış tasarımda parça içerisinde sıkışan hava miktarının ilk tasarıma kıyasla net bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. E1 parçası (a) ilk ve (b) ikinci tasarım hava sıkışması sonuçları.



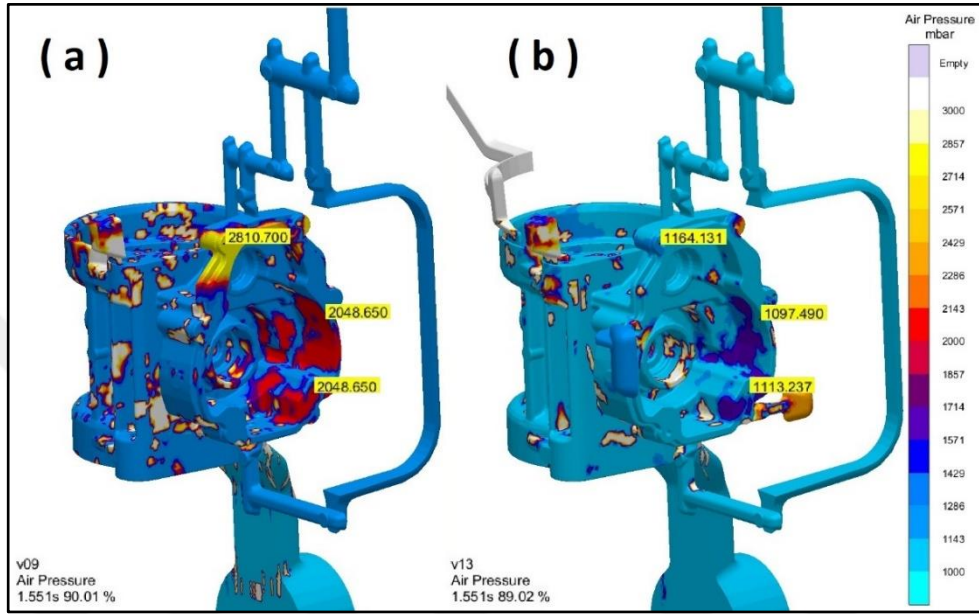
Şekil 5.2. E1 parçası (a) ilk ve (b) ikinci tasarım hava basıncı sonuçları.



Şekil 5.3. E1 parçası (a) ilk ve (b) ikinci tasarım hava basıncı karşılaştırması.

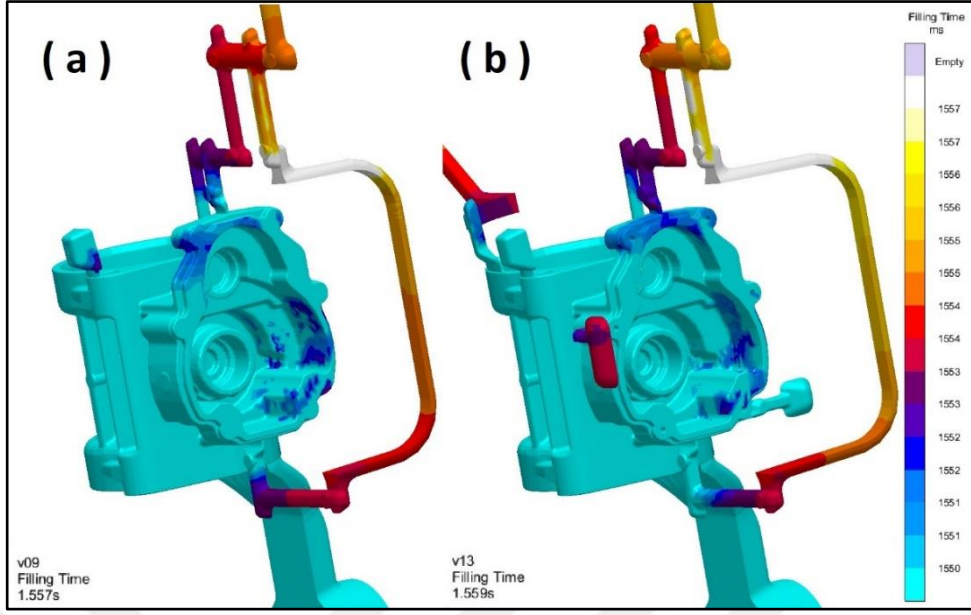
K1 parçası üzerinde yapılan tasarımlara göre gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında MAGMASoft yüksek basınçlı döküm simülasyon yazılımının hava basıncı (Air Pressure) ve dolum zamanı (Filling Time) modülleri kullanılarak yüksek basınçlı döküm prosesi sırasında kalıp boşluğu içerisinde atılmaya çalışılan havanın özellikle spot face bölgesinde kaldığı bölgeler ve miktarları incelenmiştir (Şekil 5.4.).

Buna göre ek ventil çıkışları verilmiş tasarımda daha az miktarda havanın sıkıştığı açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Kritik olarak öngörülen bölgelerde ilk tasarımda 2000 mbar seviyelerinde hava sıkışması görülürken ikinci tasarımda aynı bölgede ölçülen değerler 1000 mbar seviyelerindedir.



Şekil 5.4. K1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarım gaz basıncı simülasyon sonuçları.

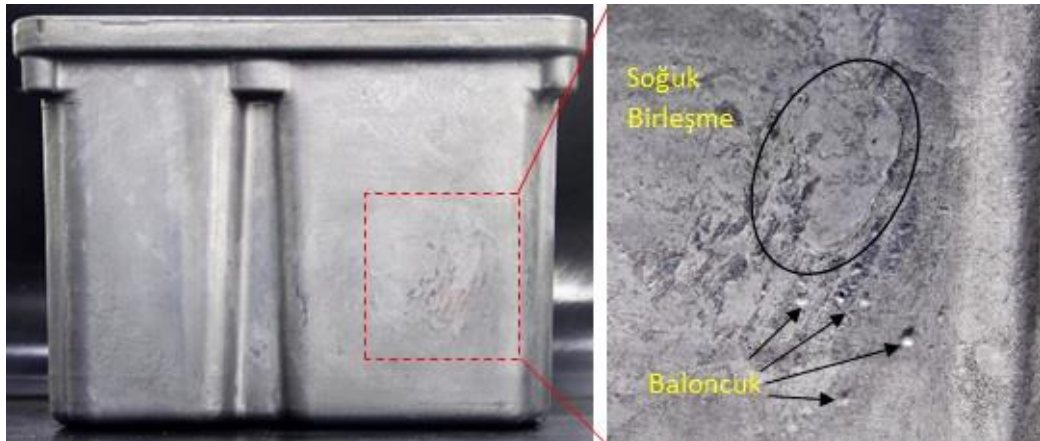
Gaz çıkış yüzey alanının arttırılması parçanın kritik bölgesindeki dolum zamanını da olumlu yönde geliştirmiştir (Şekil 5.5.). İlk tasarımda son dolum noktasında gaz çıkışı olmadığı için, sıvı alüminyumun önünde sürüklenen gaz, hava, oksit vb. hataya yol açabilecek kaynaklar parça içerisinde sıkışacaktır. İkinci tasarımda dolum süresi sonucu incelenerek son dolum noktalarına eklenen gaz çıkışları potansiyel hataları minimize etmektedir. Simülasyon sonuçlarından açıkça görülebilmektedir ki, gaz atma çıkış yüzey alanının arttırılması ilgili parça için kritik olan bölgedeki sıkışan hava miktarını yaklaşık olarak yarı yarıya azaltmıştır.



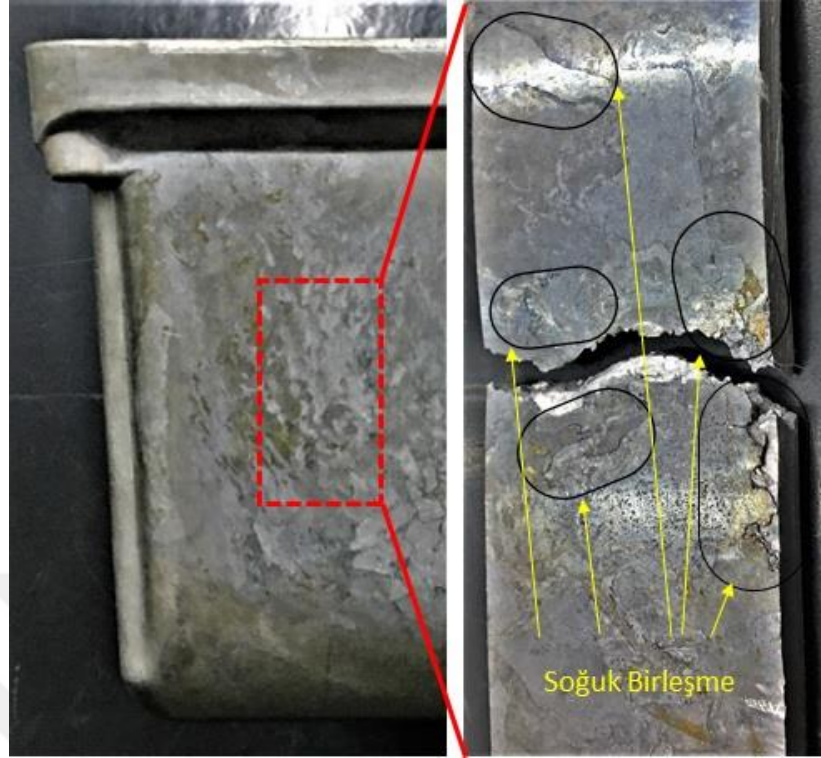
Şekil 5.5. K1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarım dolum zamanı sonuçları.

5.2. Görsel Kontroller

Görsel kontroller kapsamında E1 parçasının ilk tasarımı ile yapılan döküm sonrası parça yüzeyinde soğuk birleşme ve baloncuk gibi görsel hatalar tespit edilmiştir. Bu gibi hatalar simülasyon sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde E1 parçasının ilk ventil tasarımı ile yapılan döküm işlemleri sonucu parçadaki gazın yeterli miktarda atılamaması kaynaklı ortaya çıktığı düşünülmektedir (Şekil 5.6. ve 5.7.).



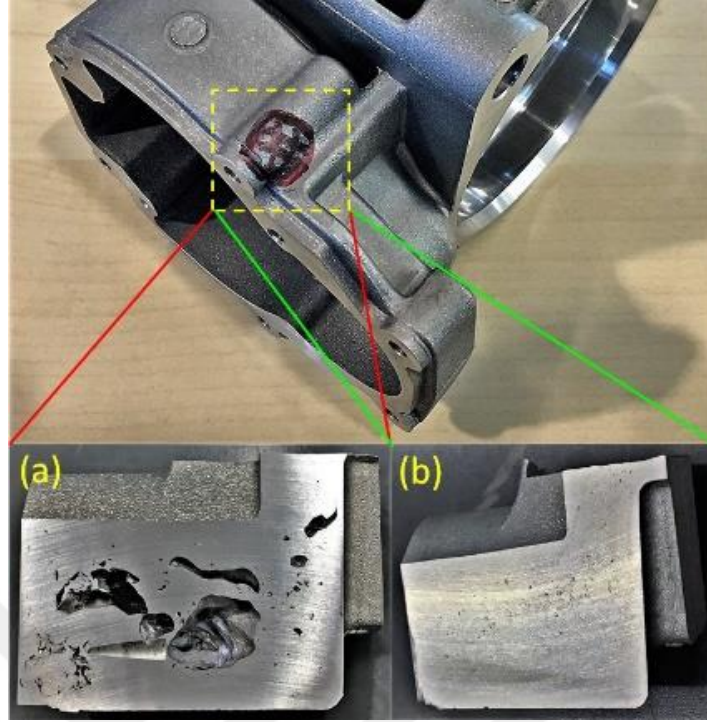
Şekil 5.6. E1 parçası üzerinde soğuk birleşme baloncuk hataları.



Şekil 5.7. İlk tasarım ile dökülen E1 parçasında görsel soğuk birleşme hatası.

E1 parçasının ikinci ventil tasarımı ile dökülen parçalarda simülasyon sonuçlarına benzer olarak gaz çıkış yüzey alanının artırılması sonucu parçanın herhangi bir yüzeyinde soğuk birleşme ve baloncuk hatalarına rastlanmamıştır. Bu incelemeler, tasarımda ventil yüzey alanının 126 mm^2 'den 312 mm^2 'ye çıkartılmasının olumlu sonuç verdiğini kanıtlamaktadır.

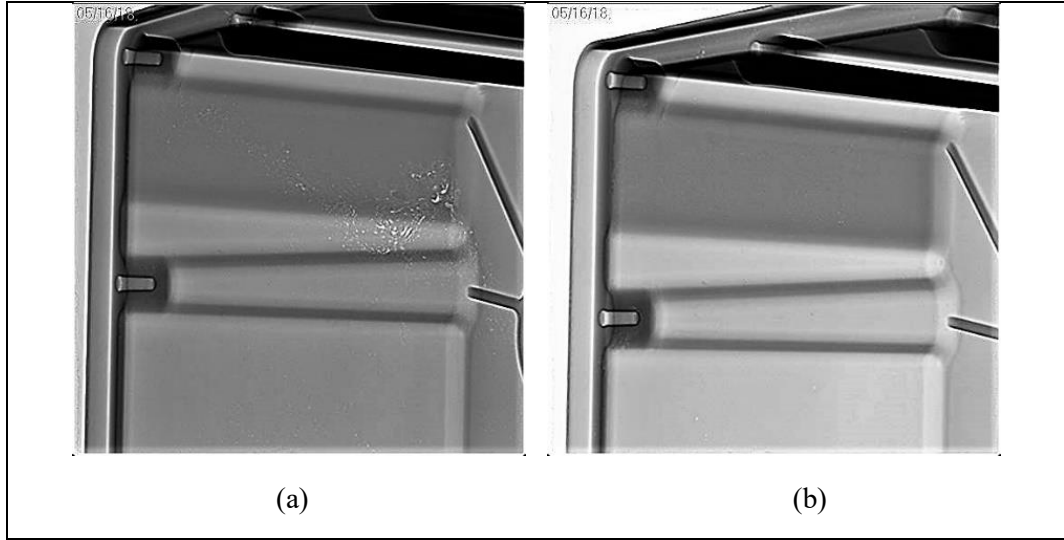
K1 parçası üzerinden yapılan ilk ventil tasarımı ile dökülen parçada karşılaşılan döküm hatası metalografik inceleme için kritik olarak belirlenen bölgelerin kesilmesi sonrasında görsel olarak tespit edilebilen yoğun poroziteler olarak tespit edilmiştir. Bu porozitelerin makro görüntüleri ilk tasarım (a) ve ikinci tasarım (b) olacak şekilde Şekil 5.8.'de verilmiştir. İlk tasarımda parça içerisindeki gazın atılmamasından kaynaklı son derece büyük poroziteler oluşmuşken, ikinci tasarımda ilk tasarıma göre çok daha küçük boyutlarda homojen olarak dağılmış poroziteler açıkça görülebilmektedir. Bu sonuçlar E1 parçasında da olduğu gibi simülasyon verileri ile eşleşmektedir.



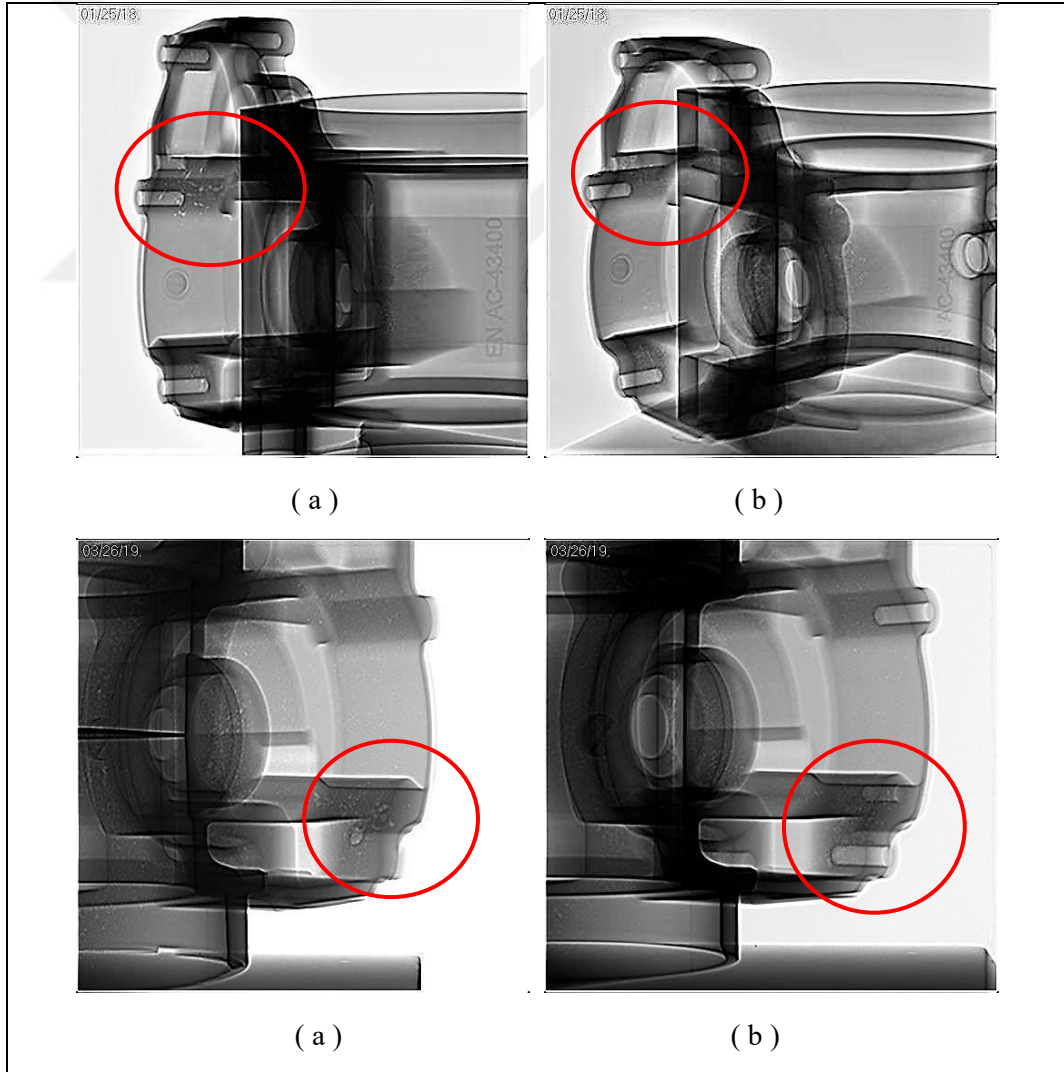
Şekil 5.8. İlk (a) ve ikinci (b) tasarımlar ile dökülen K1 parçalarında porozite.

5.3. X-Ray Radyoskopisi İncelemeleri

Yüksek basınçlı dökümde farklı chillvent tasarımlarının parça kalitesi ve döküm hataları üzerine etkisini gözlemlemek için E1 ve K1 parçaları üzerinden yapılan üretimler sonrasında yapılan X-Ray radyoskopi incelemeleri Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da verilmiştir. İlk tasarım ile dökülen E1 parçasının X-Ray incelemelerinde, görsel kontrollerde tespit edilen bölgelerde parça içerisindeki gazın atılamaması kaynaklı sıkışan gaz poroziteleri açıkça görülebilmektedir. Gaz atma yüzey alanının artırılması ile yapılan tasarım iyileştirmesi sonrasında ise E1 parçasında porozite miktarının ciddi oranda azaldığı X-Ray görüntüleri ile teyit edilmiştir. Farklı gaz atma yüzey alanlarına sahip tasarımlar ile dökülen parçaların X-Ray radyoskopi görüntüleri birbirleri ile karşılaştırıldığında, ikinci tasarım ile döküm sırasında çok daha etkin bir şekilde parça içerisindeki gazın atılabildiği, simülasyon verileri paralelinde kanıtlanmıştır.



Şekil 5.9. E1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarımlar sonrası X-Ray görüntüleri.

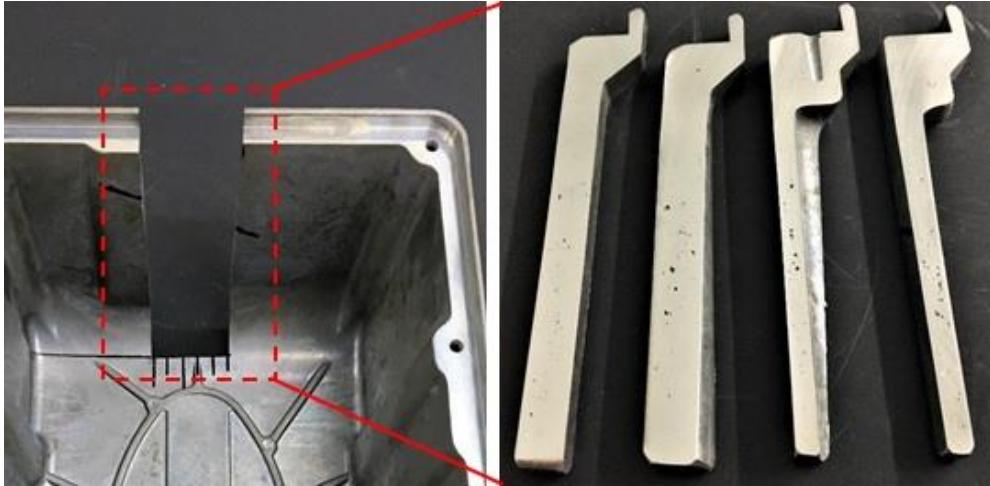


Şekil 5.10. K1 parçası ilk (a) ve ikinci (b) tasarımlar sonrası X-Ray görüntüleri.

K1 parçasının tasarım çalışmaları sonrasında dökülen parçaların kritik olarak belirlenen bölgelerinin X-Ray radyoskopi incelemelerinde 2 farklı gaz atma tasarımları karşılaştırıldığında ikinci tasarımın döküm sırasında parça içerisinde sıkışan gazı daha etkili bir şekilde atabildiği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar simülasyon verilerinde de görülmüş olup bu noktada doğru tasarıma ulaşıldığı söylenebilir.

5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

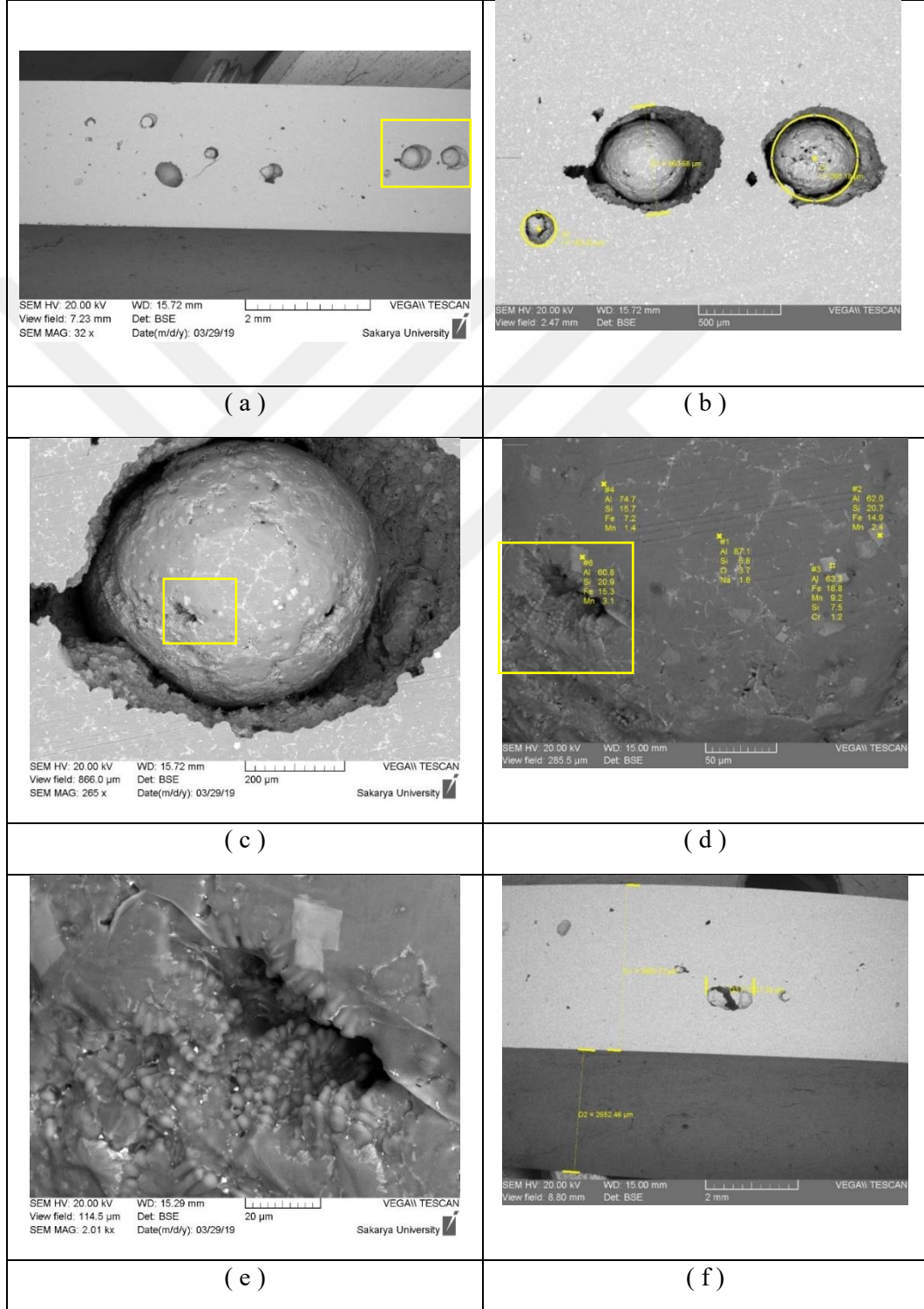
Deneysel çalışmalarda E1 parçasının taramalı elektron mikroskobu incelemelerini yapabilmek amacıyla numuneler Şekil 5.11.'deki gibi parçadan kesildikten sonra dilimlenerek metalografik olarak hazırlanmıştır. İlk tasarım ile dökülen parçadan alınan numunelerde metalografik hazırlama sonrasında parçanın et kalınlığı boyunca gaz kaynaklı poroziteler açıkça görülebilmektedir. Bu poroziteler sızdırmazlık beklentisi olan bu parçada kaçak testi ya da çalışma koşullarında sistemdeki akışkanın dışarı sızmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.11. SEM incelemeleri için E1 parçasından alınan numuneler.

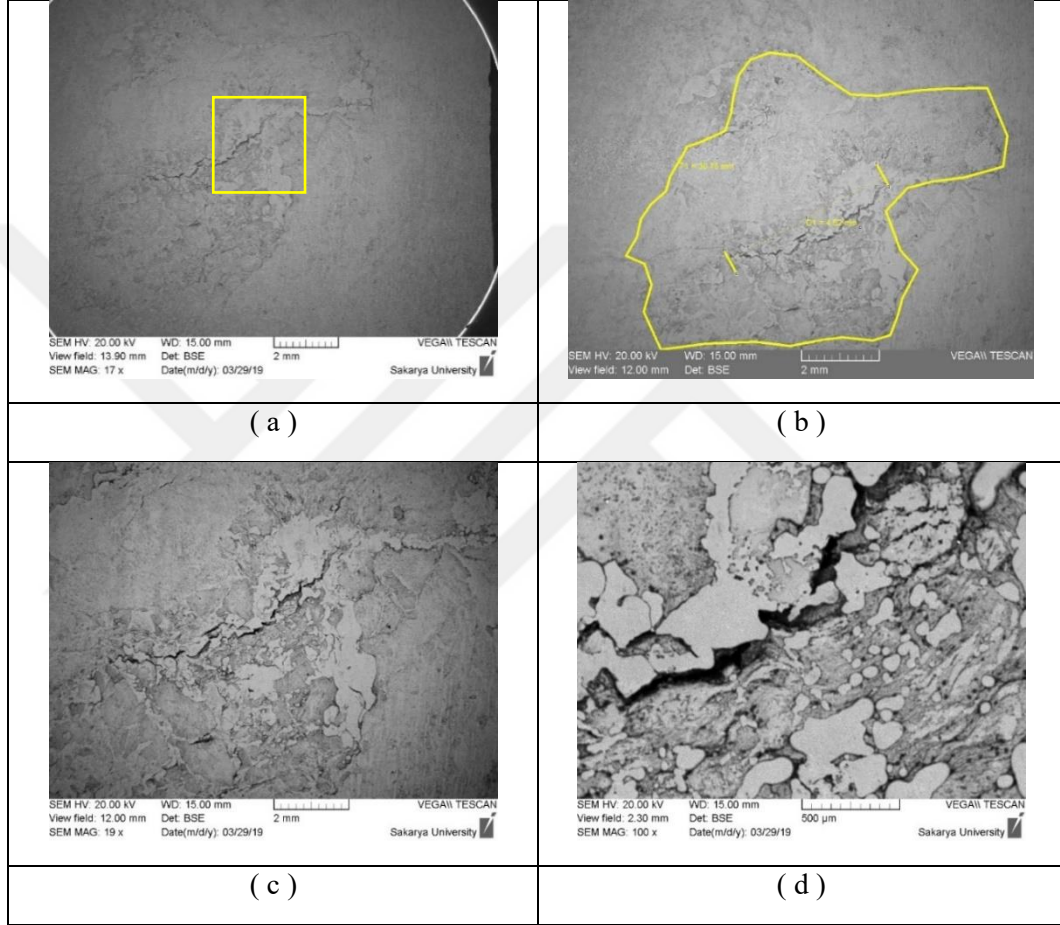
E1 parçasının taramalı elektron mikroskobu porozite incelemelerinde parçanın kesitinde yaklaşık 100-600 mikron arası çaplara sahip, çoğunlukla küre formunda katılmış parçaların etrafını sarmış gaz poroziteleri tespit edilmiştir (Şekil 5.12. a,b).

Bu poroziteler bazı noktalarda birleşerek 1 mm çaplara kadar ulaşmaktadır (Şekil 5.12. f). Küresel formda katılaştan yapıların yüzeyleri detaylı olarak incelendiğinde dendritik katılma yöreleri tespit edilmiştir (Şekil 5.12. c,d,e). Ayrıca noktasal olarak yapılan XRD analizlerinde anormal değerler görülmemiştir.



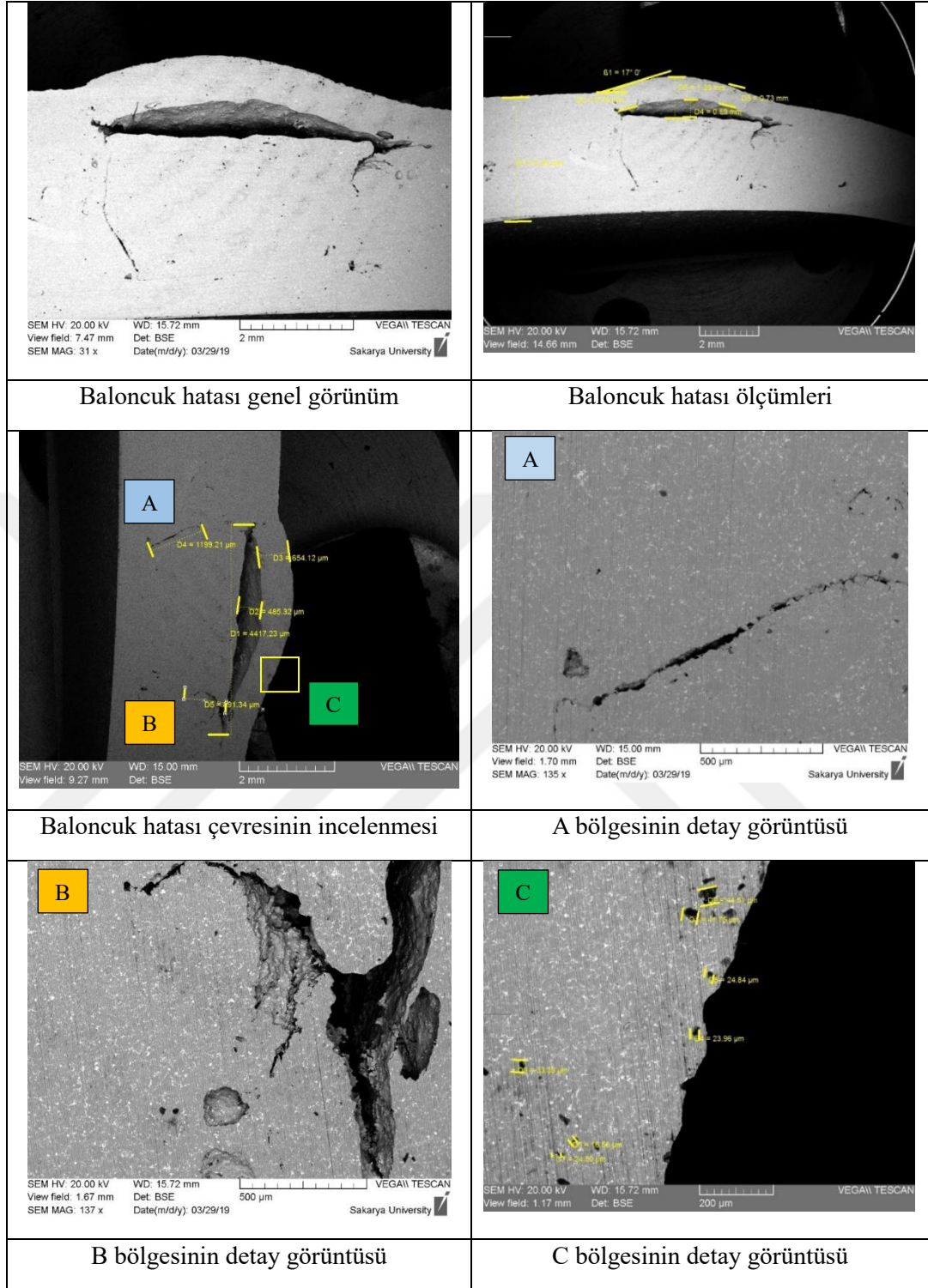
Şekil 5.12. E1 parçasında porozite hatasının SEM incelemeleri.

E1 parçasında görsel olarak tespit edilebilen bir diğer hata olan soğuk birleşmenin taramalı elektron mikroskobu genel görüntüsü Şekil 5.13. a'da verilmiştir. Parça yüzeyinde yaklaşık 55 mm² büyüklüğünde bir alanda oluşan soğuk birleşme hatasının orta kısmında muhtemelen kaçağa sebep olabilecek yaklaşık 4,5 mm büyüklüğünde bir yırtılma tespit edilmiştir (Şekil 5.12. b).



Şekil 5.13. E1 parçasında soğuk birleşme hatasının SEM incelemeleri.

E1 parçasının ilk tasarımına göre dökülen parçada porozite hataları ile aynı zamanda soğuk birleşme ve baloncuk görsel hataları da tespit edilmiştir. Görsel olarak tespit edilen baloncuk hatasının taramalı elektron mikroskobu incelemeleri Şekil 5.14.'de verilmiştir. Parça içerisinde sıkışan gazın yüzeye doğru ilerlemesi sırasında katılaşmanın tamamlanması sebebiyle oluşan baloncuk hatası parça yüzeyi ile 17°'lik açı yaparak dudak şeklinde büyümüştür ve yaklaşık 4,5 mm uzunluğunda, 0,5 mm genişliğinde bir yarık oluşturmuştur.

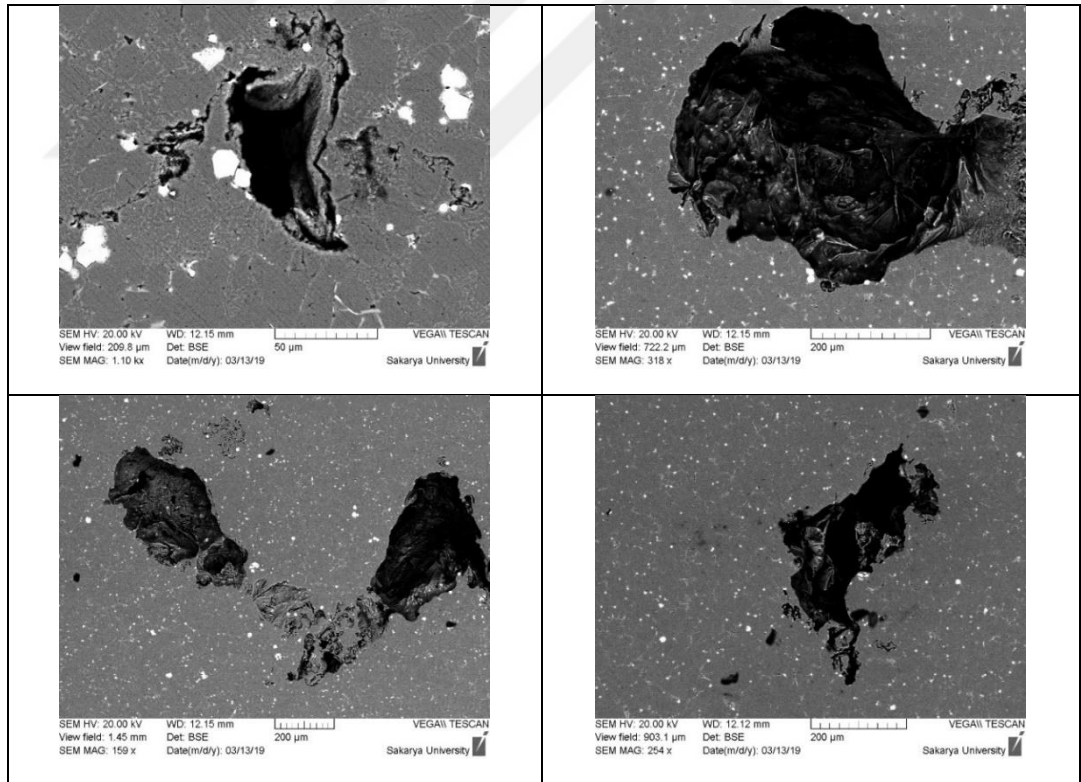


Şekil 5.14. E1 parçasında baloncuk hatasının SEM incelemeleri.

Katılma sırasında parça içerisinde yüzeye yakın bölgede baloncuk hatası oluşurken aynı zamanda yakın çevresinde, özellikle hatanın alt kısımlarında ya da dudak uçlarında 0,8-1,2 mm uzunluğunda yırtılmalar da oluşturmuştur (Şekil 5.14. A ve B

bölgeleri). Hatanın yüksek büyütmelelerdeki detaylı incelemesinde ise yüzeye yakın bölgelerde 15-45 arasındaki büyüklüklerde küçük poroziteler de tespit edilmiştir (Şekil 5.14. C bölgesi). E1 parçasının ilk tasarımı ile üretilen parçadan alınan numunelerde tespit edilen soğuk birleşme ve baloncuk hataları ikinci tasarım ile üretilen parçada tamamen ortadan kalkmış ve bu problemler tamamen çözülmüştür. İki tasarım porozite açısından karşılaştırıldığında ise ilk tasarıma kıyasla ikinci tasarımda gaz atma verimliliğinin artışından dolayı porozite miktarı ve boyutlarının düşürülmesinin yanında daha homojen yapılar elde edilmiştir.

K1 parçasının iki farklı tasarımlarının SEM incelemeleri sonucu alınan görüntüler Şekil 5.15.'te verilmiştir. İlk tasarıma göre üretilen parçadan alınan numunelerde farklı morfolojilerde görece büyük poroziteler tespit edilmişken ikinci tasarımda bu porozitelerin azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.15. K1 parçasında porozite hatasının SEM incelemeleri.

Her iki parça için simülasyon verilerine paralel olarak görsel, X-Ray radyoskopi ve taramalı elektron mikroskopisi incelemelerinde alınan sonuçlar birbirleri ile eşleşmektedir. Bu sonuçlar tasarım ve simülasyon sürecinin doğru ve etkin bir şekilde yapıldığını kanıtlamıştır.

5.5. Sızdırmazlık Testleri

Deneysel çalışmada incelenen her iki otomotiv parçasında da müşteriler tarafından sızdırmazlık beklentisi olduğundan parçalar sevkiyat öncesi son kontrol aşamasında özel olarak tasarlanmış sızdırmazlık test makinalarında %100 kaçak testlerine tabi tutulmaktadır. E1 ve K1 parçalarının ilk tasarımları ile yapılan üretimlerde sızdırmazlık testlerinde yüksek oranlarda parça ret olmaktadır. geliştirilen gaz atma tasarımları sayesinde sızdırmazlık testleri ret oranlarında kayda değer azalma yaşanmıştır. E1 parçası için kullanılan sızdırmazlık test sistemi Şekil 5.16.'da, K1 parçası için kullanılan sızdırmazlık test sistemi ise Şekil 5.17.'de verilmiştir.



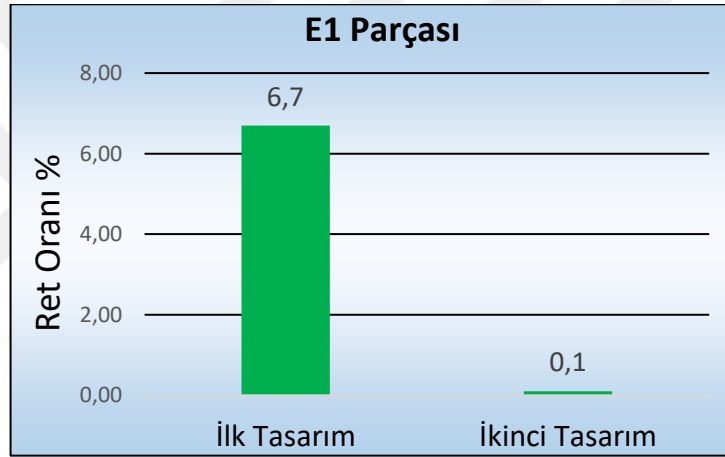
Şekil 5.16. E1 parçası sızdırmazlık test sistemi.



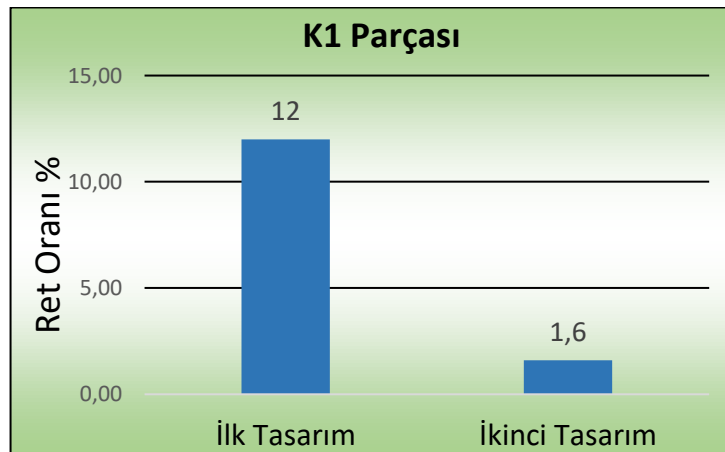
Şekil 5.17. K1 parçası sızdırmazlık test sistemi.

5.6. Verimlilik Analizleri

Çalışmalar sonrasında yapılan verimlilik analizleri kapsamında tasarım iyileştirmeleri kalite analizleri açısından değerlendirilmiştir. Buna göre E1 parçasında yapılan güncellemeler sonrasında ret oranı %6,7'den %0,1'e azalmıştır (Şekil 5.18.). Bu sayede hem proses verimliliğinin artması hem de ıskarta miktarının azalması ile yıllık olarak yaklaşık 4500 € kazanç sağlanmıştır. K1 parçasında ise bu oran %12 seviyelerinden %1,6 seviyelerine indirilmiştir (Şekil 5.19.). Ayrıca K1 parçasındaki iyileştirmelerden sonra emprenye maliyetlerinde düşüş ile yıllık 5700 € kazanç sağlanmıştır. Tüm bunlara ek olarak proses verimliliği artırılmıştır.



Şekil 5.18. E1 Parçası ret oranları.



Şekil 5.19. K1 Parçası ret oranları.

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında AlSi12Cu1Fe, AlSi10MgFe basınçlı döküm alüminyum alaşımları kullanılarak yüksek basınçlı döküm prosesi ile üretilen otomotiv parçalarından, egzost arıtma sistemi bileşeni (E1) ve klima kompresör gövdesi (K1) parçalarının kalıp gaz atma (Chillvent) bölgeleri üzerindeki tasarım değişikliklerinin parça döküm kalitesi üzerine etkileri araştırılmış ve döküm simülasyon çalışmaları detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

Her iki parça için kalıp tasarımlarında gaz atma yüzey alanları E1 parçasında gaz atma yüzey alanı 126 mm²'den 312 mm²'ye, K1 parçasında ise 58 mm²'den 116 mm²'ye çıkartılarak parçalarda karşılaşılan soğuk birleşme baloncuk ve porozite gibi döküm hatalarını azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca simülasyon verileri kullanılarak parçalarda kritik olarak belirlenen bölgelere hava ceplerinin yerleştirilmesi gaz atma performansını arttırarak yüksek basınçlı döküm sırasında sıvı alüminyumun akışının değişmesine ve genel olarak porozite miktarının %11 azalmasına sebep olmuştur. Özellikle K1 parçasının, hava basıncı simülasyon verileri incelendiğinde iki farklı tasarım arasında noktasal olarak 2 kat iyileşme görülmüştür.

Tasarım ve simülasyon çalışmaları sonrasında döküm parçalar üzerinden yapılan analizlerde ilk tasarımlarda karşılaşılan görsel döküm hatalarının ikinci tasarımlarda azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle E1 parçasında, çalışma koşullarında kaçağa neden olan ve görsel olarak tespit edilen soğuk birleşme ve baloncuk hataları ikinci tasarıma göre dökülen parçalarda %90 oranında azalmıştır. K1 parçasının sızdırmazlık testlerinde %40 seviyelerinde ret almasına sebep olan porozite miktarının ikinci tasarımda %2 seviyelerine düştüğü görülmüştür. Simülasyon sonuçlarıyla paralel olarak tüm bu çalışmalar görsel kontroller, X-Ray Radyoskopi incelemeleri, SEM incelemeleri ve kaçak testleri ile birlikte doğrulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile öncesi sonrası kalite analizleri ve verimlilik çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda güncellenen kalıp tasarımları ile yapılan üretimlerde kalite ret oranları E1 parçası için %6,7'den %0,1'e, K1 parçası için %12'den %1,6'ya düşürülmüştür. Yapılan tüm iyileştirmeler neticesinde her iki parça için artan proses verimliliği ve ıskarta oranlarının azalmasıyla yıllık 10000 € kazanç sağlanmıştır.

Bu tezde gerçekleştirilen gaz atma yüzey alanlarının artırılması çalışmalarına ek olarak gaz atma sistemlerinin kalıp tasarımı üzerindeki yolluk, dağıtıcılar, topuk kalınlığı vb. gibi diğer bileşenler ile ortak olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Seri üretim şartlarında bu tez çalışmasında incelenen K1 gibi parçalar üzerinde yer alan ince kesitli hava ceplerinin proste ortaya çıkabilecek aksaklıklardan dolayı tıkanması gaz atma kesit alanının daralmasına hatta tamamen kapanmasına yol açarak homojen olmayan metal akışına sebep olabilmektedir. Bunun sonucunda parça kalitesi üzerinde olumlu etkisi olması beklenen tasarım ile porozite açısından olumsuz sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu nedenle kalıp üzerindeki ilgili bölgeler operatör tarafından periyodik olarak temizlenmeli ve kontrolleri yapılmalıdır. Yaşanabilmesi olası bu tıkanıklıklar tasarım aşamasında da göz önünde bulundurulmalı ve ilgili talimatlar ile seri üretim için gerekli altyapı oluşturularak sistemin sürekliliği sağlanmalıdır. Bu sayede yüksek basınçlı dökümde risk teşkil edebilecek bu gibi durumların önüne geçilerek verimsizlik riskinin azaltılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] www.chinasavvy.com/permanent-mold-process-limitation., Erişim Tarihi: 03.04.2019.
- [2] Wili, J. ve Wilho, P. Opportunities for Aluminium Components in Automotive Applications. JWP Engineering & Consulting, Charles Hatchett Seminar, 2016.
- [3] Bonollo, F., Gramegna N. ve Timelli, G. High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges. The Minerals, Metals & Materials Society, 5, 1047-4838. doi: 10.1007/s11837-015-1333-8, 2015.
- [4] Cleary P.W., Ha J., Prakash M. ve Nguyen T. 3D SPH flow predictions and validation for high pressure die casting of automotive components. Applied Mathematical Modelling 30 (2006) 1406-1427, 2005.
- [5] Dündar M. ve Güngör G. Otomotiv Sektöründe Alüminyum Uygulamaları ve Sürekli Döküm Tekniği ile Üretilmiř Alüminyum Levha Alaşımları. Erişim Adresi: <https://www.assanaluminyum.com/tr-tr/ar-ge/yayinlar>, Tarih yok.
- [6] Avrupa Alüminyum Derneği (EAA), Aluminium in cars Unlocking the lightweighting potential. Brüksel, 2012.
- [7] www.lupton-place.co.uk/why-is-aluminium-diecasting-rising-in-the-car-industry., Erişim Tarihi: 03.04.2019.
- [8] Blair P.D., Govan E.L. Advanced automotive technology: visions of a super-efficient family car, OTA-ETI-638, GPO stock #052-003-01440-8, 1995.
- [9] Avrupa Alüminyum Derneği (EAA). Aluminum Content in Cars – Summary Report. Brüksel, 2016.
- [10] Hirsch J.R., Recent development in aluminium for automotive applications, Transactions of Nonferrous Metals Society of China 24(2014) 1995-2002. Doi: 10.1016/S1003-6326(14)63305-7, 2014.
- [11] Onat N. Alüminyum Döküm Teknolojisi, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD). Yayın No: 5 ISBN: 978-605-62246-0-7, 2011.

- [12] Aksoy S., Yüksek Basıncılı Döküm Yöntemi ile Etial-140 Alaşımından Üretilen Havalı Fren Kompresör Kapağında Aşınma Direncinin Geliştirilmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [13] Bonollo F., Timelli G., Fiorese E., Gariboldi E., Parona P. ve Arnberg L. New quality and design standarts for aluminum alloys cast products database on defects, StaCast FP7-NMP-2012-CSA-6, Project Number: 31918, 2013.
- [14] Advekar A., Arunkumar Y. ve Srinath M.S. Simulation of High Pressure Die Casting Process for Identifying and Minimising Defects, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181, 2015.
- [15] Campbell, J. Complete Casting Handbook. Elsevier. UK, 2011.
- [16] Okçu I.Y. Effect Of Process Parameters On Mechanical Properties Of High Pressure Die Cast Magnesium Az91 Components. Middle East Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, The Degree of Master Of Science, 2011.
- [17] Favi C., Germani M. ve Mandolini M., Analytical cost estimation model in High Pressure Die Casting, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM) 11(2017) 526-535, 2017.
- [18] [www.aluminum.org/strength-aluminum.](http://www.aluminum.org/strength-aluminum), Erişim Tarihi: 04.04.2019.
- [19] Apelian, D. Alüminum Cast Alloys Enabling Tools for Improved Performance. NADCA, USA, 2009.
- [20] Şirin, S. Kalın kesitli yüksek basınçlı dökümlerde döküm ve simülasyon parametrelerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [21] Ak M. AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [22] Zapp P., Rombach G. ve Kuckshinrichs W. The Future of Automotive Aluminium. Light Metals Warrendale Proceedings, 1003-1010, 2002.
- [23] Dadic Z., Zivkovic D., Catipovic N. ve Bilic J. High pressure die casting mould repair technologies, International Conference “Mechanical Technologies and Structural Materials” Split (MTSM2017) ISSN: 1847-7917, 2017.

- [24] Ertürk S.Ö. Al Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Yolluk Sisteminden Kaynaklanan Gaz Problemlerinin Simülasyon Tekniği ile İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [25] Gözen, A. Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Sistemlerinin Tasarımı ve Simülasyonunun İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, 2007.
- [26] Aslan, O.B. Basınçlı Dökümde Kaliteyi Etkileyen Faktörlerin Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [27] Kuru M. ve Serçe O. Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde, Farklı Yolluk Tipi ve Vakum Uygulamasının Simülasyonu, SDU International Technologic Science-Mechanical Technologies, Vol. 6, No:3, 2014.
- [28] Fiorese E., Bonollo F. ve Timelli G. New Classification of Defects and Imperfections for Aluminum Alloy Castings, International Journal of Metalcasting doi: 10.1007/BF03355602, 2015.
- [29] Gariboldi, E., Bonollo, F. ve Parona, P. Handbook of Defects in High Pressure Die Castings. Associazione Italiana Metalurgia, Italy, 88-85298-73-7, 2010.
- [30] Patel J.M., Pandya Y.R. ve Patel R.C. Optimization for Shrinkage Porosity on Aluminium Alloy ADC-12 Material, International Journal for Scientific research & Development Vol.5, Issue 09, ISSN: 2321-0613, 2017.
- [31] Gariboldi E., Bonollo F. ve Rosso M. Proposal of a Classification of Defects of High-Pressure Die Casting Products, La Metallurgia Italiana-Giugno, 2007.
- [32] [basicaluminum.com/die-casting-quality-control/.](http://basicaluminum.com/die-casting-quality-control/), Erişim Tarihi: 10.04.2019.
- [33] Doğan A., Kenar O., Erdil B. ve Altuncu E. Effect of Different Air Venting Designs on Porosity In High Pressure Aluminum Die Casting Process, 19th International Metallurgy and Materials Congress, ISBN No: 978-605-01-1258-0, 2018.
- [34] Vispute P. ve Chaudhari D. Utilizing Flow Simulation in the Design Phase of a Casting Die to Optimize Design Parameters and Defect Analysis, International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing (ICAAMM) Materials Today 4 (2017) 9256-9263, 2016.

- [35] Boydak, Ö. An Experimental and A Numerical Investigation of A High Pressure Die Casting Aluminium Alloy. Boğaziçi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2007.
- [36] Yan H., Zhuang W., Hu Y., Zhang Q. ve Jin H. Numerical Simulation of AZ91D Alloy Automobile Plug in Pressure Die Casting Process. Journal of Materials Processing Technology, 187-188, 349-353, 2007.
- [37] Verran G.O., Mendes R.P.K. ve Rossi M. A. Influence of Injection Parameters on Defects Formation in Die Casting Al12Si1,3Cu: Experimental Results and Numeric Simulation. Journal of metarials Processing Technology, 179, 190-195, 2006.



ÖZGEÇMİŞ

Onur KENAR, 11.12.1984 yılında Eskişehir’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Eskişehir’de tamamladı. 2003 yılında Eskişehir Fatih Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nü 2008 yılında bitirdi. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2009 yılında yüksek lisans sürecinin ders aşamasını tamamladıktan sonra askerlik görevini yapmak amacıyla yüksek lisans eğitimini dondurdu. Askerlik görevi sonrasında Ankara’da sırasıyla Heraeus Electro-Nite, Yazkan Mühendislik Döküm ve Bodycote ISTAŞ firmalarında farklı pozisyonlarda çalıştıktan sonra İstanbul’a gelerek 2014-2017 yılları arasında Silvan Sanayi A.Ş.’de profesyonel çalışma hayatına devam etti. 2017 yılında Arpek Arkan Parça Alüminyum ve Kalıp Sanayi A.Ş.’de kalite bölümünde çalışmaya başladı. Halen Arpek Arkan Parça Alüminyum ve Kalıp Sanayi A.Ş.’de proses kalite mühendisi olarak görev yapmaktadır.