



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

**YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PARAMETRELERİNİN ALÜMİNYUM
DÖKÜM PARÇALARDA GÖZENEK OLUŞUMUNA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Leyla ŞİMŞEK
175107004**

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya ve Süreç Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN

OCAK 2021



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

**YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PARAMETRELERİNİN ALÜMİNYUM
DÖKÜM PARÇALARDA GÖZENEK OLUŞUMUNA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Leyla ŞİMŞEK
175107004**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Kimya ve Süreç Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN

OCAK 2021

YALOVA Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 175107004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Leyla ŞİMŞEK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PARAMETRELERİNİN ALÜMİNYUM DÖKÜM PARÇALARDA GÖZENEK OLUŞUMUNA ETKİSİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde sunmuş ve oy birliği ile başarılı bulunmuştur.

İmza / Kanaati
(Kabul/Red)

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi /
..... Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi /
..... Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi /
..... Üniversitesi

Teslim Tarihi : 08 Ocak 2021
Savunma Tarihi : 19 Ocak 2021



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan, güler yüzünü ve desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TURAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca benden desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. M. Cahit ENSARİ'ye, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BUĞDAYCI'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammad FAROOQ'a çok teşekkür ederim.

EMR-Lab'da birlikte çalıştığım ve hiçbir zaman yardımlarını eksik etmeyen, her zaman yanımda olan değerli arkadaşlarım Umay ÇINARLI ve Tuğçe ERGÜL'e teşekkür ederim.

Ocak 2021

Leyla ŞİMŞEK
(Metalurji ve Malz. Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
	No
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi.....	2
1.2 Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı ve Sektörel Talepler	5
2. YÜKSEK BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM PROSESİ.....	11
2.1 Yüksek Basınçlı Dökümün Avantajları.....	14
2.2 Yüksek Basınçlı Dökümün Dezavantajları.....	14
2.3 Yüksek Basınçlı Döküm İşlemi ve Parametreleri.....	15
2.4 Basınçlı Dökümde Kullanılan Alüminyum Alaşımları.....	17
2.4.1 Al-Si Alaşımları	17
2.4.2 Al-Mg Alaşımları.....	18
2.4.3 Al-Cu Alaşımları.....	19
2.4.4 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	20
2.5 Yüksek Basınçlı Döküm Kalıpları	21
2.5.1 Kalıp Elemanları	23
2.5.1.1 Yolluk	23
2.5.1.2 Çekirdek.....	24
2.5.1.3 Kalıp Hamilleri	25
2.5.1.4 Maçalar	25
2.5.1.5 İtici Plakası, Paraleller ve İticiler	26
2.5.1.6 Dağıtıcılar, Hava Tahliye Tanalları ve Taşma Cepleri.....	27
2.5.1.7 Soğutma Sistemleri	28
2.6 Yüksek Basınçlı Döküm Kalıp Tasarımları	29
2.7 Yüksek Basınçlı Döküm Hataları	33



2.7.1 Gaz Porozitesi	38
2.7.2 Soğuk Birleşme	39
2.7.3 Çekinti	40
2.7.4 Baloncuk (Blister)	41
2.8 Yüksek Basıncılı Dökümün Kalite Kontrolü.....	42
2.8.1 Porozite (X-Işınları Muayeneleri)	43
2.8.2 Boyutsal (Ölçüsel) Problemler.....	43
2.8.3 Görsel Hatalar	43
2.8.4 Trim Hataları.....	44
2.8.5 Kaçak Problemi.....	44
3. GAZ ATMA SİSTEMLERİ (VENTİLASYON)	45
4. LİTERATÜR TARAMA	49
5. MATERYAL VE METOD	51
5.1 Materyal.....	51
5.2 Metod	51
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	53
6.1 Gaz Giderme İşleminde Hidrojen Giderimi	53
6.2 Soğuk Kamaralı Yüksek Basıncılı Dökümde Basıncı Değişiminin Porozite Oluşumuna Etkisi	65
7. GENEL SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75



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
MRP	: Material Resource Planning
PPM	: Parts Per Million
PDCA	: Plan-Do-Control-Act Problem çözme tekniği
SEM	: Scanning Electron Microscope
OEM	: Original Equipment Manufacturer



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Table 1.1 Basınçlı dökümün diğer döküm yöntemleri ile karşılaştırılması .	4
Tablo 2.1 Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırılması .	20
Tablo 2.2 Otomotiv sektöründe alüminyum alaşımları sembol gösterimleri .	21
Tablo 2.3 Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinde malzemeler .	29
Tablo 2.4 D.L. Cocks'a göre döküm hatalarının sınıflandırılması .	33
Tablo 2.5 Campbell'a göre döküm hatalarının sınıflandırılması .	34
Tablo 2.6 NADCA'ya göre döküm hatalarının sınıflandırılması .	34
Tablo 2.7 İç hataların sınıflandırılması .	35
Tablo 2.8 Yüzey hatalarının sınıflandırılması .	36
Tablo 2.9 Geometrik hataların sınıflandırılması .	36
Tablo 2.10 Yüksek basınçlı dökümde karşılaşılan hataların oluşma sıklıkları .	37
Tablo 5.1 Alaşımların optik spektrometre ile belirlenen içerikleri.	51
Tablo 6.1 Alaşımların hidrojen içeriği (ağırlıkça%).	53
Tablo 6.2 Dört farklı basınçta üretilen numunelerin CT ile ölçülmüş porozite hacmi ve porozite yüzdesi.	66



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

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’da hafif araçların 2025 yılına kadar öngörülen malzeme ağırlık analizi	6
Şekil 1.4 Çeşitli ülkeler için otomobillerde azalan CO2 emisyonu	6
Şekil 1.5 Başlıca OEM'lerin 2021 CO ₂ hedefleri	7
Şekil 1.6 Otomobillerde alüminyum bileşen oranları	8
Şekil 1.7 Araçlarda alüminyum kullanım miktarının yıllara göre değişimi	9
Şekil 1.8 Otomotiv uygulamalarında ağırlık tasarrufu ve pazar yayılımı	9
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	15
Şekil 2.6 Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.7 Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri	24
Şekil 2.8 Hareketli tarafa bağlanmış bir çekirdek görüntüsü	24
Şekil 2.9 Kalıp hamillerinin kalıp seti içerisinde görünümü	25
Şekil 2.10 Kalıp sisteminde hareketli maçaların görünüşü	25
Şekil 2.11 Kalıp sisteminde itici plakası ve paraleller	26
Şekil 2.12 İtici pimlerin şematik gösterimi	27
Şekil 2.13 Bir kalıpta dağıtıcılar, yolluk girişleri ve taşma cepleri	28
Şekil 2.14 Soğutma kanallarının şematik gösterimi	29
Şekil 2.15 İki gözlü kalıpta; (A) kılavuz pimi, (B) hidrolik pompası ve (C) maça ..	31
Şekil 2.16 Havalandırma kanalları ve taşma cepleri	32
Şekil 2.17 Hataların sınıflandırılması ve kaynakları	37
Şekil 2.18 Bir alüminyum alaşımı döküm parçasında gaz kaynaklı porozite	39
Şekil 2.19 Yüksek basınçlı dökümde soğuk birleşme hatası oluşumu	39
Şekil 2.20 Düşük mekanik yük ile kırılmaya sebep olan soğuk birleşme hatası	40
Şekil 2.21 Porozite ile çekinti boşluğunun mikroyapı ve 3D görünümü	41
Şekil 2.22 Baloncuk hatasının oluşumu (üstte) ve makro görüntüsü (altta)	42



Şekil 5.1 Rotor ile gaz giderme ünitesi.	52
Şekil 6.1 AlSi9Cu3'ün vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.	54
Şekil 6.2 AlSi9Cu3'ün atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.	55
Şekil 6.3 AlSi9Cu3'ün vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.	56
Şekil 6.4 AlSi9Cu3'ün atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.	57
Şekil 6.5 AlSi12Cu1Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.	58
Şekil 6.6 AlSi12Cu1Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.	59
Şekil 6.7 AlSi12Cu1Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.	60
Şekil 6.8 AlSi12Cu1Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.	61
Şekil 6.9 AlSi12Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.	62
Şekil 6.10 AlSi12Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gazdan giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.	63
Şekil 6.11 AlSi12Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.	64
Şekil 6.12 AlSi12Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.	65
Şekil 6.13 Su pompa gövdesi prozite CT görüntüsü (150bar).	66
Şekil 6.14 Su pompa gövdesi prozite CT görüntüsü (200 bar).	66
Şekil 6.15 Su pompa gövdesi prozite CT görüntüsü (250 bar).	67
Şekil 6.16 Su pompa gövdesi prozite CT görüntüsü (300 bar).	67



YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PARAMETRELERİNİN ALÜMİNYUM DÖKÜM PARÇALARDA GÖZENEK OLUŞUMUNA ETKİSİ

ÖZET

Alüminyum alaşımları, özellikle ağırlık azaltmanın son derece önemli olduğu havacılık, savunma ve otomotiv endüstrisinde yüksek kullanım oranına sahiptir. Basınçlı döküm teknolojisi, seri üretime uygunluğu açısından alüminyum alaşımlarının dökümünde yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Yüksek basınçlı metal kalıba döküm yöntemiyle (HPDC, high pressure die casting) üretilen alüminyum-silisyum alaşımı parçalar genellikle, ergimiş metalin kalıp boşluğuna hızlı bir şekilde enjekte edilmesi esnasında sıkışan gazların tahliye problemleri nedeniyle farklı oranlarda ve boyutlarda porozite içermektedir. Döküm sektöründe güvenilirlik beklentilerinin ve müşteri şartnamelerinin ağırlaşması nedeniyle, özellikle gaz porozite seviyelerinin belirli kritik seviyelere indirilmesi arzulanmaktadır. Uygun kalıp tasarımı ve döküm proses parametrelerinin optimize edilmesi, kalıp boşluğundan havanın tahliyesini kolaylaştırarak gaz porozitesini azaltmada önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada üç farklı alüminyum alaşımı (AlSi9Cu3, AlSi12Fe ve AlSi12Cu1Fe) için gaz giderme öncesi ve sonrası porozite değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca AlSi9Cu3 alaşımı için 4 dört farklı (150, 200, 250 ve 300 bar) basınç altında soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi ile su pompa gövdesi üretimi yapılmış ve porozite değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüksek basınçlı döküm, alüminyum alaşımları, kalıp tasarımı, porozite.



EFFECTS OF HIGH PRESSURE DIE CASTING PARAMETERS ON POROSITY FORMATION IN ALUMINIUM CASTING PARTS

SUMMARY

Aluminum alloys have a high usage rate, especially in the aviation, defense and automotive industry, where weight reduction is extremely important. Pressure die casting technology is a widely used method of casting aluminum alloys in terms of its suitability for mass production. Aluminum-silicon alloy parts produced by the high pressure casting method (HPDC) generally contain porosity in different proportions and sizes due to the discharge problems of gases trapped during the rapid injection of molten metal into the mold cavity. Due to the worsening of reliability expectations and customer specifications in the casting industry, it is desired to reduce gas porosity levels to certain critical levels. Proper mold design and optimization of casting process parameters play an important role in reducing gas porosity by facilitating the evacuation of air from the mold cavity. In this study, porosity values before and after degassing for three different alloys (AlSi9Cu3, AlSi12Fe and AlSi12Cu1Fe) were compared. In addition, for the AlSi9Cu3 alloy, four different (150, 200, 250 and 300 bar) pressures were applied to produce water pump body through cold chamber high pressure casting method and, the porosity values were measured and compared.

Keywords: High pressure die casting, aluminium alloys, die design, porosity.



1. GİRİŞ

Alüminyum döküm parça kullanımı; otomotiv endüstrisi, savunma sanayi, uzay ve havacılık sanayi gibi yüksek kalite beklentisi gerektiren sektörlerde giderek artmaktadır. Döküm parça kullanılan sistemlerin kalitelerinin ve performanslarının her geçen gün gelişmesi ile alüminyum alaşımlarının kaliteleri daha önemli hale gelmiştir [1].

Otomotiv sektörü başta olmak üzere alüminyum alaşımlarının sağladığı kolay dökülebilme özelliği, alaşımlandırma çeşitliliği, mekanik özelliklerinin ve sızdırmazlık değerlerinin yüksek olması gibi avantajların yanı sıra parçalarda yapılan hafifletme çalışmaları alüminyum alaşımlarına ve döküm proseslerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Günümüzde alüminyum alaşımlarının döküm tekniğiyle üretiminde en çok kullanılan proses yüksek basınçlı döküm prosesi olmaktadır. Yüksek basınçlı döküm; sıvı metalin yüksek hızlarda kalıp boşluğunun doldurulup yüksek basınçlar altında katılaşmasını esas alan bir döküm tekniğidir. Otomasyon ve seri üretime uygun bir proses olması nedeniyle kullanım alanı geniş olan yüksek basınçlı döküm tekniği ile ince cidarlı, kompleks geometrilere sahip ve boyutsal toleransları az, nihai ürüne çok yakın parçalar üretilebilmektedir. Her döküm prosesinin doğası gereği yüksek basınçlı döküm tekniğinin de riskleri ve dezavantajları bulunmaktadır. Alüminyum basınçlı döküm yönteminde karşılaşılan problemleri çözmek için kararlı ve sürdürülebilir kalite kontrol gerekmektedir. Alaşımın ergitilip dökülmesinden, metal enjeksiyon işleminin gerçekleşmesine kadar makina, kalıp malzemeleri ve tasarımı, sıvı metal kalitesi, döküm parametreleri gibi birçok değişken dökümün kalitesine olumsuz yönde etki edebilmektedir. Yüksek basınçlı dökümde; makina, kalıp malzemeleri ve tasarımı, sıvı metal kalitesi, döküm parametreleri gibi kullanımı kısıtlayan ve kaliteyi etkileyen birçok faktör bulunabilmektedir. Tüm bu bileşenlerin neden olduğu döküm hataları yüzey hataları ve iç hatalar olarak gruplandırılmaktadır. Yüzey hataları genel olarak kalıp kaynaklı olmakla birlikte nihai parçaya uygulanan işlemleri artırmaktadır. İç hatalar arasında en çok karşılaşılan ve sızdırmazlık beklentisi yüksek fren, kompresör grubu gibi otomotiv parçalarında sistem performansını etkileyen hata türü ise porozitedir (gözeneklilik) [1].

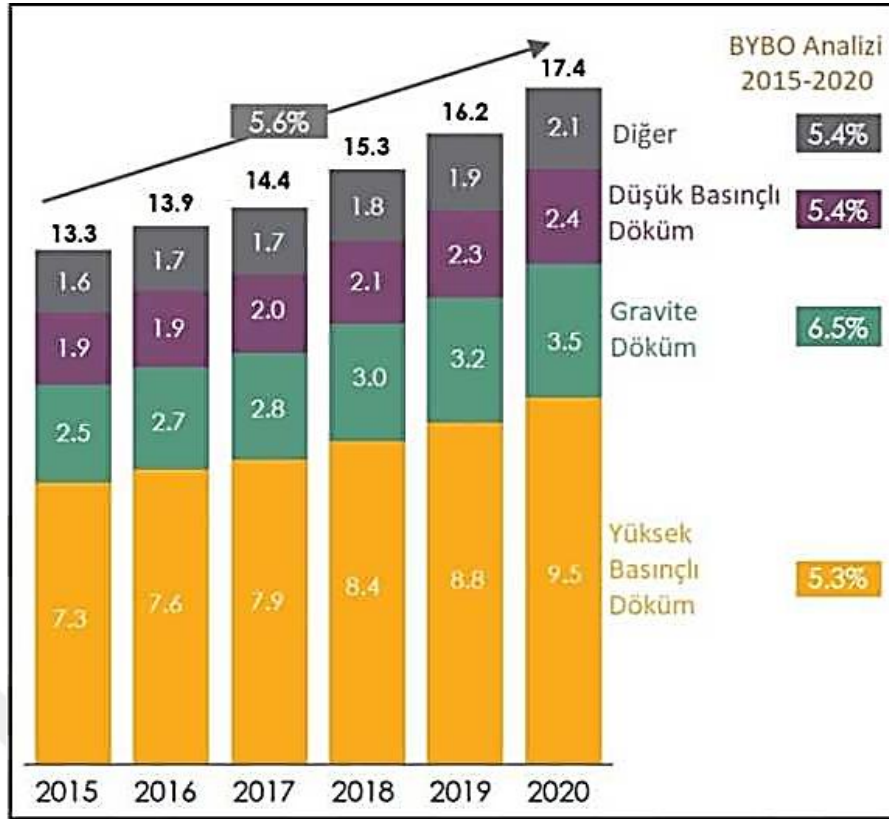
Yüksek basınçlı döküm yoluyla üretilen parçada porozite, mekanik özellikler ve sızdırmazlık özelliklerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Basınçlı döküm proseslerinde en önemli döküm hatası porozite olup, genellikle proses parametrelerine,

kalıp özelliklerine ve döküm alaşımına bağlı olarak karşılaşılmaktadır. Çekinti (büzülme) porozitesi ve gaz porozitesi olmak üzere iki ana tür porozite, döküm ürünlerinin mekanik dayanımını olumsuz etkilemektedir. Çekinti porozitesi çoğunlukla katılaşma nedenli bir poroziteyken, gaz porozitesi ise basınçlı döküm kalıp tasarımı, proses şartları ve kalıp içi havanın tahliyesine bağlı olarak oluşmaktadır. Yüksek basınçlı döküm prosesinde, yüksek hızda ve yüksek basınçta üretim yapılırken, kalıp boşluğunda kalan havanın ve gazın kalıptan atılması beklenmektedir. Metalin önünde sürüklenen havayı ve gazı kalıp dışarısına uzaklaştırmak için, son dolum noktaları iyi belirlenmeli ve doğru tasarımda gaz atma sistemleri kullanılması gerekmektedir. Bu fonksiyonu yerine getirebilmesi için, kalıp boşluğunun son dolum noktalarına ve hava sıkışan noktalarına cepler ve ventiller tasarlanmaktadır. Nihai tasarım sonuçlanmadan önce akış analizinin iyi yapılarak kalıp tasarlanması ve tasarımların doğruluğunun kontrolü için döküm simülasyon programları kullanılmaktadır. Havanın uzaklaştırılması için geçmişten günümüze kullanılan birçok sistem vardır. Vakumlu ve vakumsuz olarak çalışabilen bu sistemler; 2 boyutlu ve 3 boyutlu ventiller olarak tasarlanabildiği gibi, vakumun daha efektif kullanılabilmesi için mekanik açma kapama valfi olarak da tasarlanabilmektedir [1].

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde giriş, otomotiv sektöründe basınçlı döküm prosesi ve kullanım alanları, ikinci bölümde basınçlı döküm prosesi ve döküm alaşımları, üçüncü bölümde gaz ventilasyon yöntemi, dördüncü bölümde literatür taraması, 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 sistemlerinin ve yapısal bileşenlerin döküm pazarının 2015 yılında yaklaşık 13,3 milyar USD olduğu bilinmektedir ve %5,6'lık yıllık büyüme oranı ile 2020 yılında bu değerin yaklaşık 17,4 milyar USD'ye ulaşması öngörülmektedir (BYBO analizi) (Şekil 1.1) [1,2].



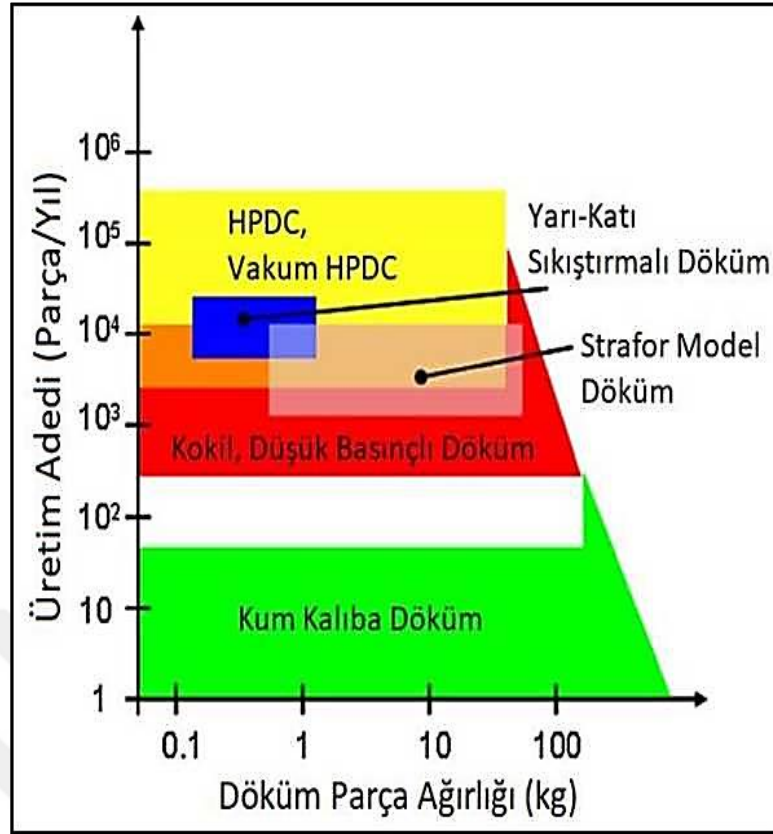
Şekil 1.1: Basıncılı döküm yöntemlerinde 2015-2020 BYBO analizi [2].

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].

Table 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	> 3,2 Ra (2,5 Ra)	> 3,2 Ra	> 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].

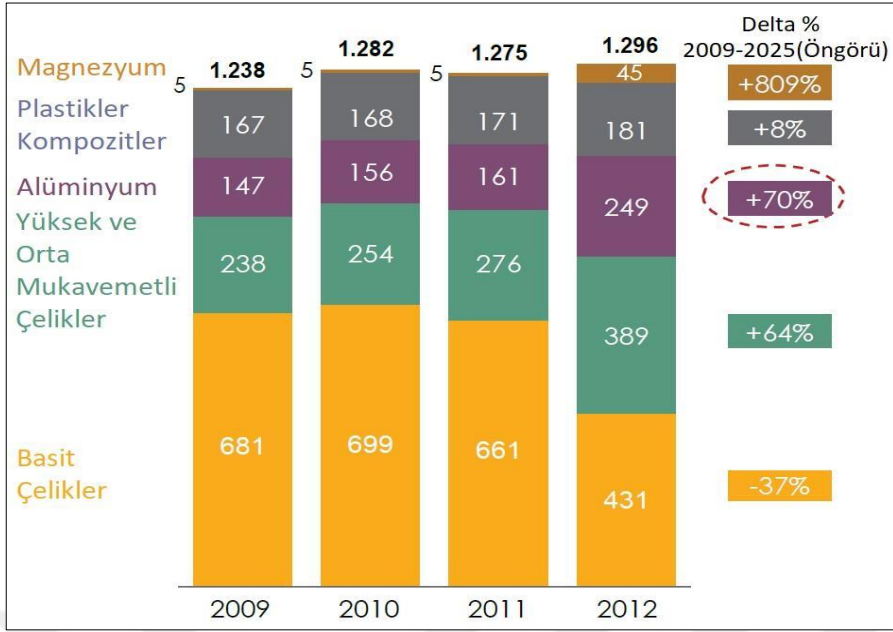


Şekil 1.2: Üretim hızı - döküm ağırlığına göre döküm proseslerinin karşılaştırılması [3].

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 prosestir [4].

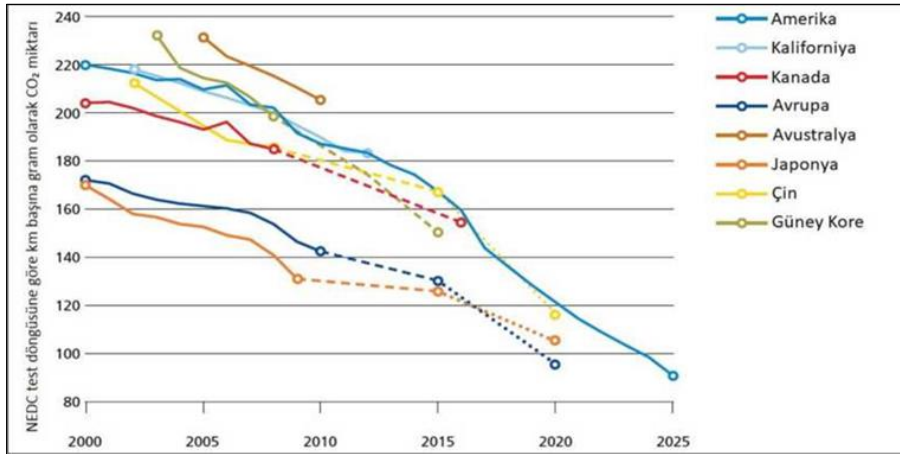
1.2 Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı ve Sektörel Talepler

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 (otomobil vb.) kullanılan farklı malzemelerin ortalama ağırlık analizi ile birlikte 2025 yılı tahminlerine göre bu malzemelerin kullanım oranları verilmiştir [2].



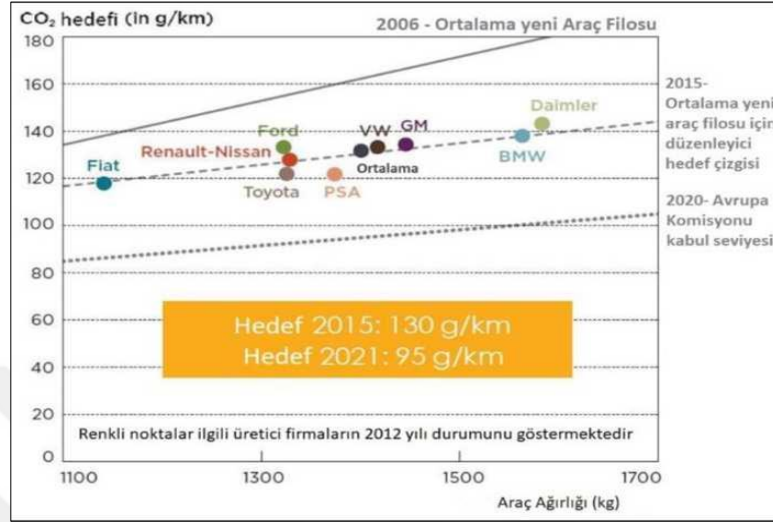
Şekil 1.3: Kuzey Amerika’da hafif araçların 2025 yılına kadar öngörülen malzeme ağırlık analizi [2].

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 tamamı ile bağımlı olan geleneksel otomotiv sektörünün karbondioksit emisyonuyla küresel ısınmaya olan katkısı da 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) düşmüştür. Şekil 1.4 çeşitli ülkeler için CO₂ emisyonu hedeflerini göstermektedir [5-6].



Şekil 1.4: Çeşitli ülkeler için otomobillerde azalan CO₂ emisyonu [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 (OEM, Original Equipment Manufacturer) otomobillerde ağırlık azaltma stratejilerini devam ettirmek durumundadırlar [2].



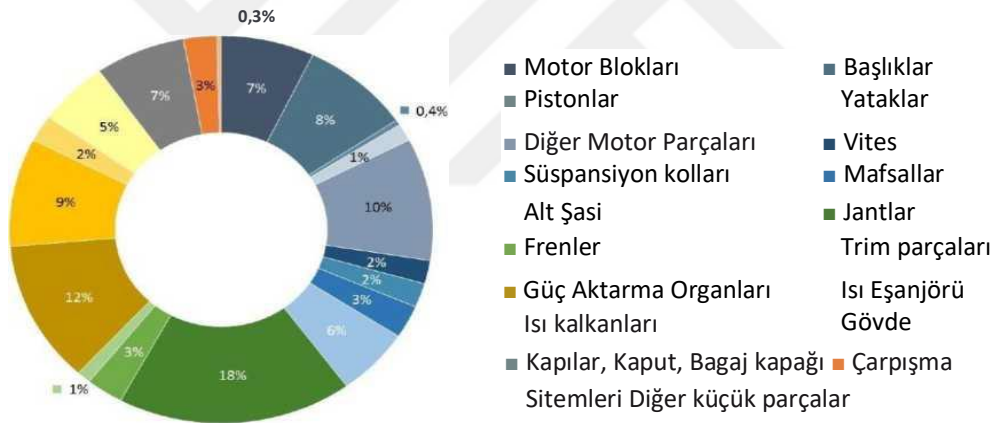
Şekil 1.5: Başlıca OEM'lerin 2021 CO₂ hedefleri [2].

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. Dünya üzerinde üretilen alüminyumun 3/4'ü hala geri dönüşüm yolu ile

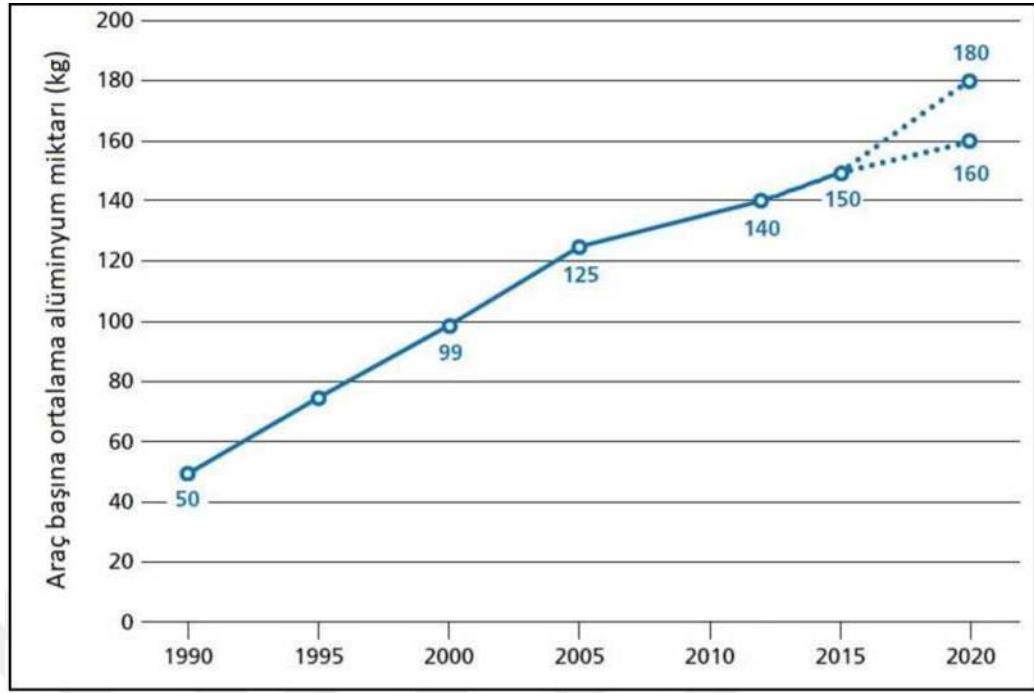
kullanılmaktadır. Alüminyumun geri dönüştürülebilirliği diğer pek çok metale kıyasla çok daha iyidir. Alüminyumun bu geri dönüştürülebilirlik özelliği de otomotiv parçası olarak popüler bir malzeme haline gelmesinin bir başka nedeni olarak gösterilmektedir. Alüminyumun bir diğer avantajı, yüksek spesifik enerji absorpsiyonudur. Alüminyum yapılar, aynı ağırlıktaki 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 grafikte verilmiştir [7-9].

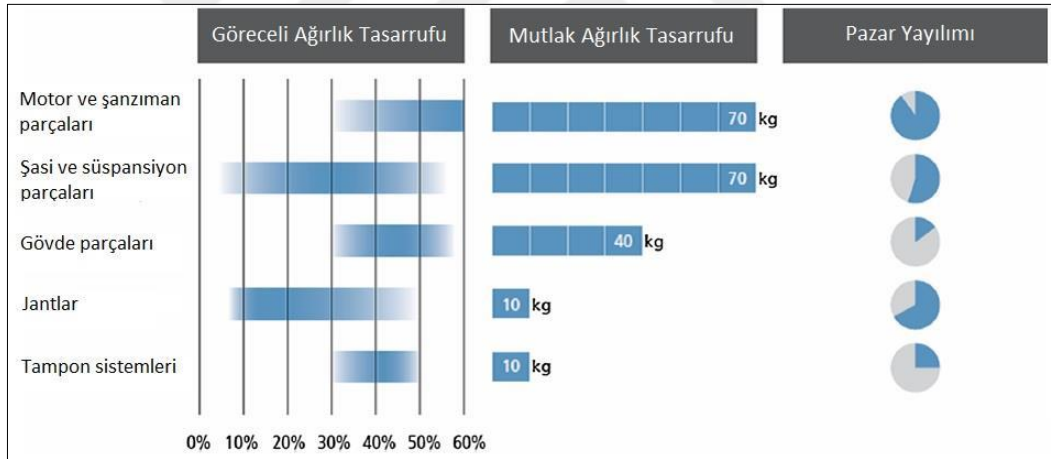


Şekil 1.6: Otomobillerde alüminyum bileşen oranları [9].

Hızlı gelişen otomotiv sektöründe sürekli olarak alüminyum kullanımında artış gözlemlenmektedir (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 yılında 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 [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 duruma ulaşmıştır. Bu kombinasyon yüksek basınçlı alüminyum döküm prosesini otomotiv endüstrisi için gelişmekte olan bir üretim yöntemi haline getirmektedir [7].

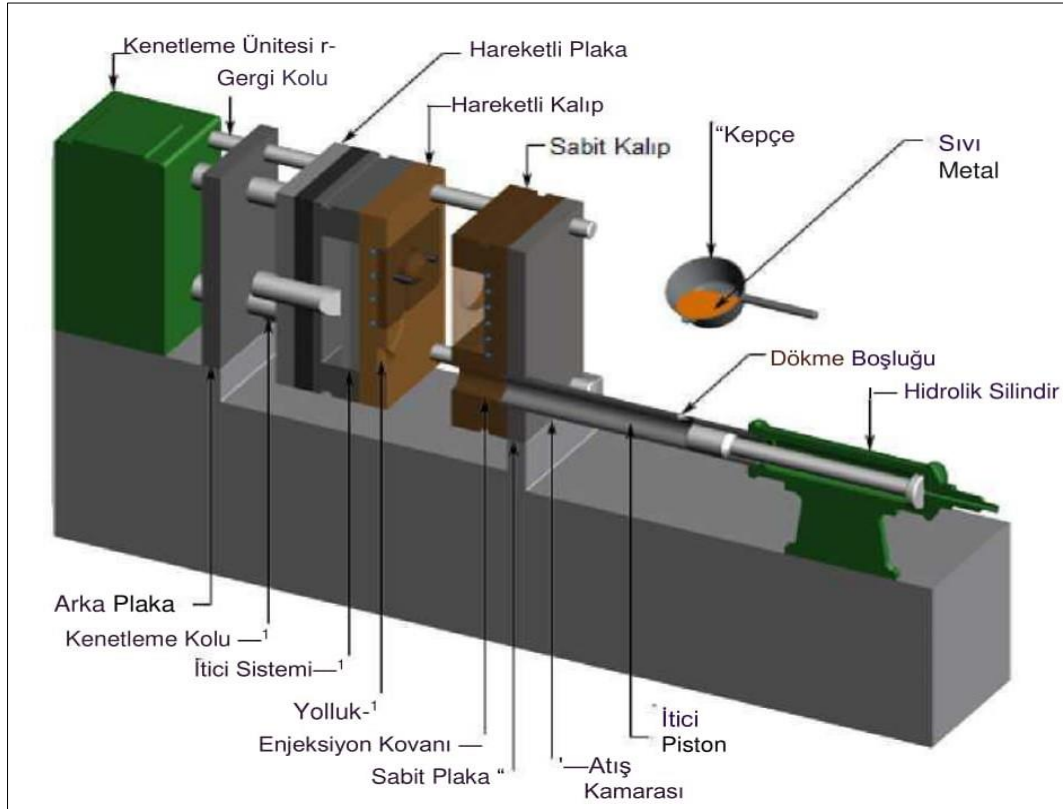


2. YÜKSEK BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM PROSESİ

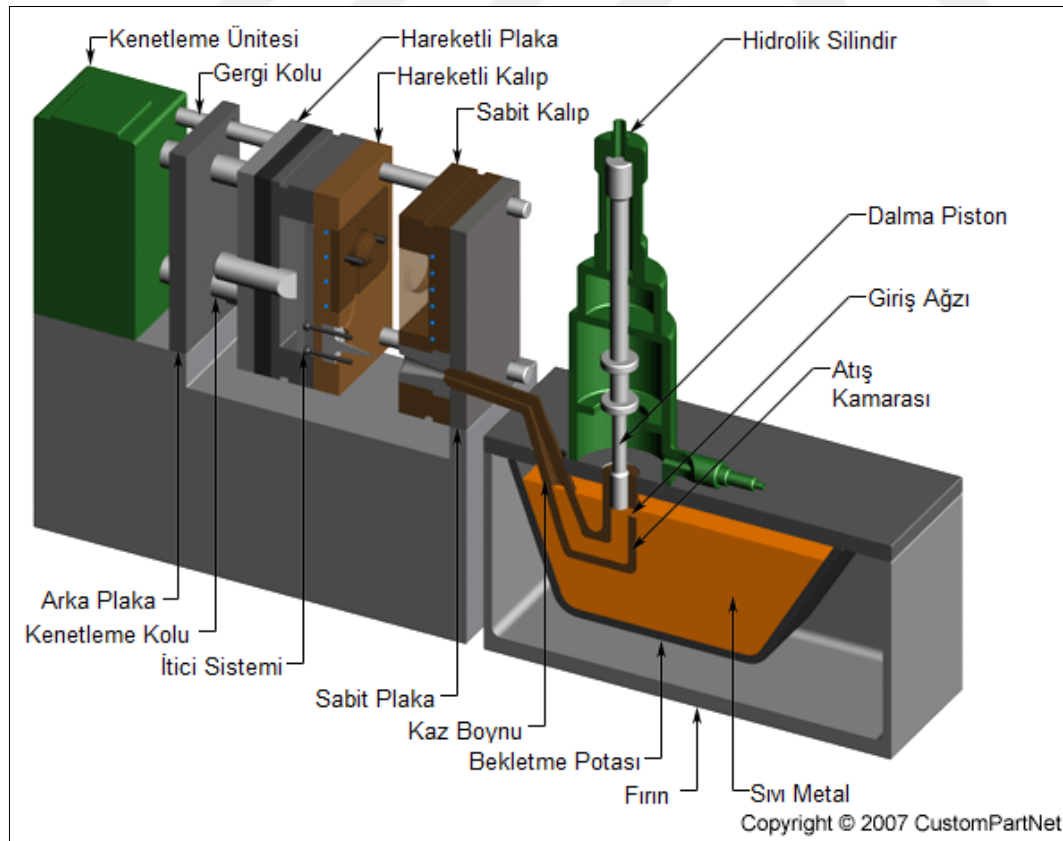
Günümüzde yüksek basınçlı döküm, alüminyum dökümde en çok kullanılan ve talep edilen döküm yöntemidir. Yaklaşık olarak alüminyum dökümlerin %70'i alçak basınç ve yüksek basınç yöntemleriyle üretilmektedir. Bu tarif içinde geleneksel ve yüksek teknoloji ihtiva eden vakum sıkıştırırmalı döküm, basınç altında 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 ve döküm sıcaklıkları düşük ise (zamak ve magnezyum gibi) bu tür metallerin dökümü için genellikle sıcak kamaralı makineler kullanılmaktadır. Eğer dökümü yapılan metalin ergime ve döküm sıcaklıkları yüksek ise 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].

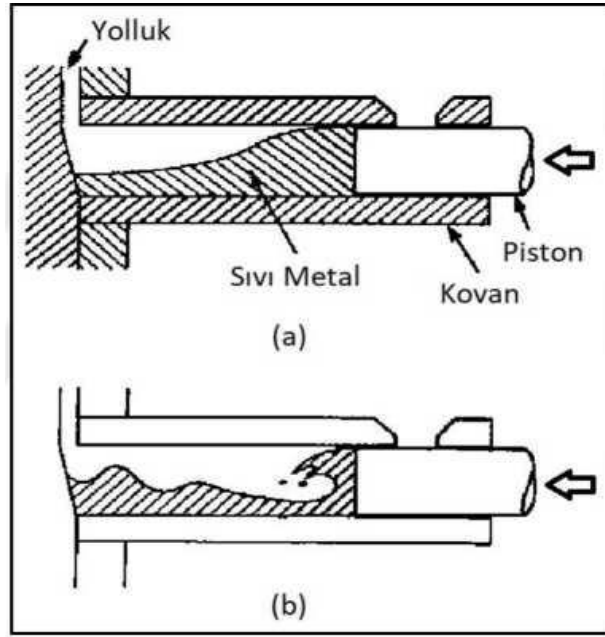
Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile genellikle alüminyum, magnezyum, bakır ve çinko (zamak) gibi alaşımlardan döküm parçalar üretilebilmektedir. Bu proseste kullanılan kalıp malzemeleri sıcak iş takım çelikleri olup ayrıca basınçlı döküm makinaları da çelikten oluşan konstrüksiyon ve makine elemanlarına sahip olması sebebiyle bu yöntem 1000°C'ye kadar olan alaşımların dökümünde kullanılabilmektedir. 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 2.1: Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi [14].



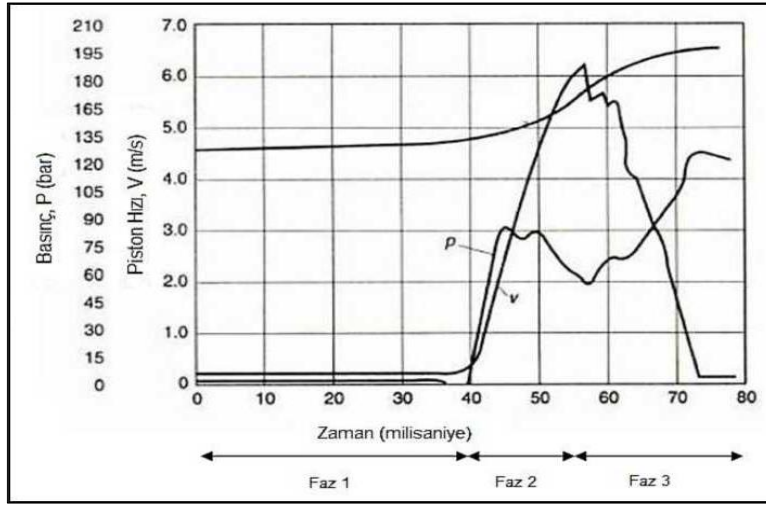
Şekil 2.2: Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi [14].



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 tam dolu (full) 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 geçer geçmez tezgâhın 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 arttırır [15].

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 üç 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 düşük kalır. 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

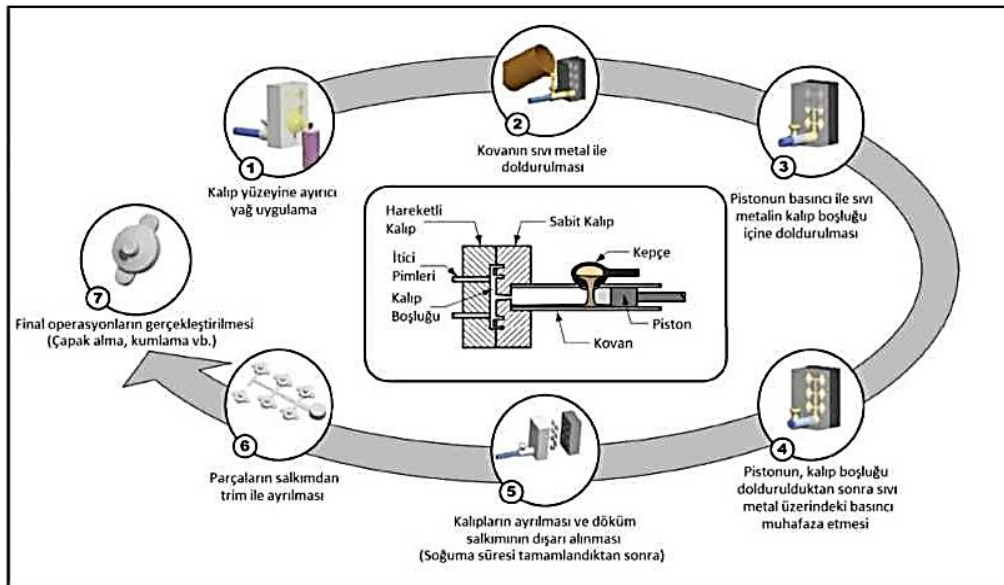
Döküm büyüklükleri sınırlıdır. Çok büyük parçalar dökülemez. Yolluk sistemlerine ve metal girişine bağlı olarak, vakum sistemi olmayan yüksek basınç makinelerinde döküm boşluğunda olan gazın tamamı dışa atılamadığı için döküm parçasında poroziteler (gaz boşlukları) oluşur. Poroziteler dökümün mekanik özelliklerini azalttığı gibi, eğer gaz yüzeye yakınlarsa ısıl işlem sonucunda kabarmalar (baloncuk) oluşmaktadır. Kalıp bakım maliyeti yüksektir. Yüksek basınç makineleri ve ona bağlı

yardımcı ekipmanların yatırımı yüksektir. Dökümde olan yüksek oranda porozite ısıtılma 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/sn.) 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 göstermektedir [17].



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

Proseste işlem adımları aşağıdaki gibidir.

- Yüksek basınçlı döküm prosesi, önce sıvı metalin çelik bir kovan 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 hızlara ulaşır.
- Bir sonraki aşırı kısa doldurma süresi (50-100 msn.), metal katılaşmadan önce ince kesitli ve kompleks şekilli kalıpların mükemmel bir şekilde doldurulmasını garanti eder.
- Katılaşma sırasında metal, faz dönüşümleri sebebiyle çekilme gösterir ve bu durum döküm parçası içerisinde çekinti porozitesine neden olur.
- Döküm makinası ile sıvı metal üzerinde ~120 MPa'a kadar yüksek basınç uygulanarak bu fiziksel olayların üstesinden gelinmeye çalışılır [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 [3].

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 mukavemeti alaşımlandırmadan gelmektedir. Saf alüminyum, yüksek mukavemetli alaşımlar oluşturmak için diğer elementlerle karıştırılır. Alüminyumun mukavemetini ve şekillendirilebilirliğini arttırmak için kullanılan yaygın alaşım metalleri 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, Aluminium Association) 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 dokümanında özel olarak tanımlanmamıştır. Bu gibi elementler bunun yerine sadece “diğer” kategorisine dahil edilmiştir [15-18].

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 empüriteler (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 [17,19,20].

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 130-150 MPa arasında değişmektedir. Bununla birlikte, silisyum magnezyum ile birleştirildiğinde Mg_2Si oluşturarak, alüminyum dökümlerde etkili bir sertlik artırma mekanizması sağlar. Mg_2Si , katı fazda yaklaşık %0,7 Mg sınırına kadar çözünür ve bütün ısıtım işlemi görebilen alüminyum alaşım ailesi için çökelme sertleşmesinin temelini sağlar. En yaygın kullanılan yapısal mühendislik alaşımlarından biri, Al-7Si-0.4Mg'dir. Al-Si alaşımlarına Cu ilavesi benzer şekilde $CuAl_2$ '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 [17,19,20].

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 takımlarının aşınma ömürlerini azaltıcı etkisi de bulunmaktadır. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme 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 ısıtım işlemi temeli Mg_2Si 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 ısıtılma işlemi ile geliştirilememektedir, ancak bu alaşımlar, kendiliğinden yaşlanma koşullarında döküm ve oda sıcaklığında mükemmel mukavemet ve sünekliğe 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-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 oldukça iyidir [15,19].

2.4.3 Al-Cu Alaşımları

Alüminyumun yanında alaşım elementi olarak kullanılan en eski element bakırdır. Tüm alaşım elementleri içerisinde bakır (Cu), ısıtılma işlemi görmüş ve görmemiş bütün alüminyum döküm alaşımlarının mukavemet ve sertliği üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bakır, 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 ısıtılma işlemiyle sertleşebilen bir alaşım geliştirilmiştir ve de geniş kullanım sahası bulmuştur [19,20].

Alüminyum alaşımlarında bakır, alaşım elementi olarak %3-12 oranında kullanılmakla birlikte alaşımlara sertlik kazandıran başlıca elementtir. Isıtılma işlemi tabii tutulmuş veya tutulmamış halde iken alaşımın kopma noktasını yükseltir. %5'den fazla bakır içeriği mekanik işleme güçlüğü 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 olsa da, 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 Alüminyum Birliği (AA, U.S. Aluminium Association) tarafından belirlenen ve alaşımları temel olarak döküm ve dövme olmak üzere iki temel gruba ayıran metodolojidir. 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 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].

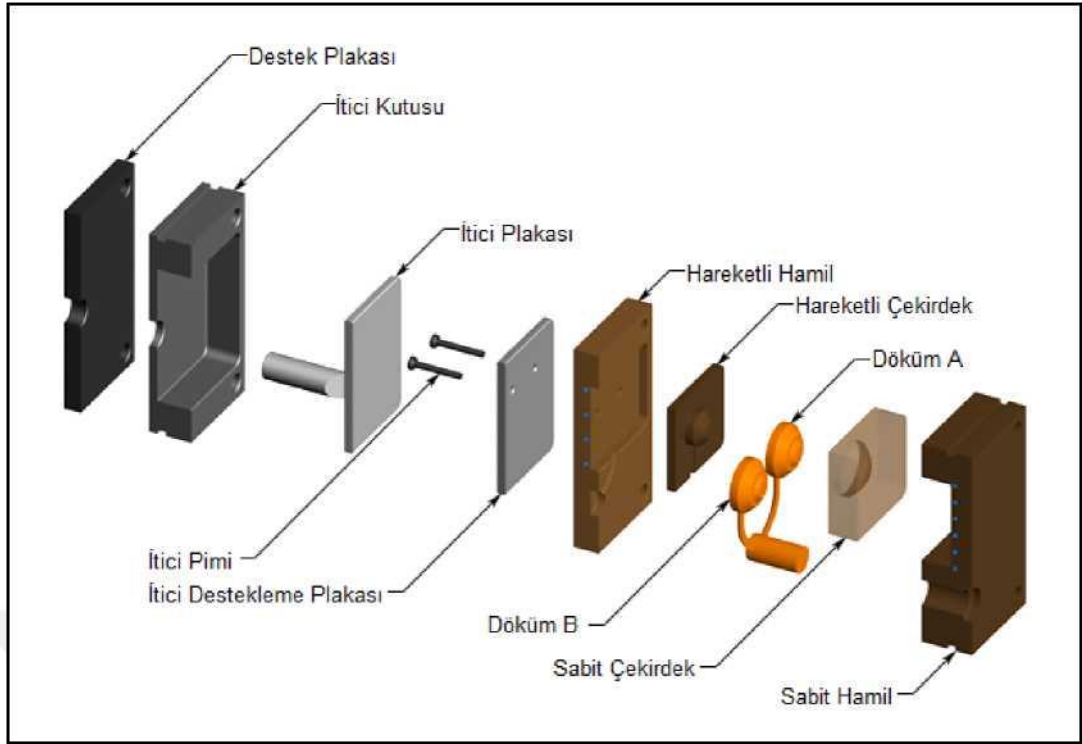
Alaşım Tipi	AA numarası	Sembol ile Gösterim	Kullanım Oranı
Döküm Alaşımları (%78)	A 359	AlSi9Cu3	48%
	A 356	AlSi7Mg	20%
	A 361	AlSi10Mg	12%
	-	AlSi12Cu	9%
	A 413	AlSi12	7%
	A 332	AlSi12CuNiMg	4%
Plastik Şekillendirme Alaşımları (%22) Ekstrüzyon, Dövme, Hadde ürünleri	6060	AlMgSi0.5	35%
	6082	AlMgSi1	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 ergimiş 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 yapılabilir [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 fişkırlarak dışarı çıkması sonucu döküm parçanın sakat olmasına ve iş kazalarına neden olur [15,16,23].



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 olabildiğince pürüzsüz olması gerekmektedir [16,20,24].

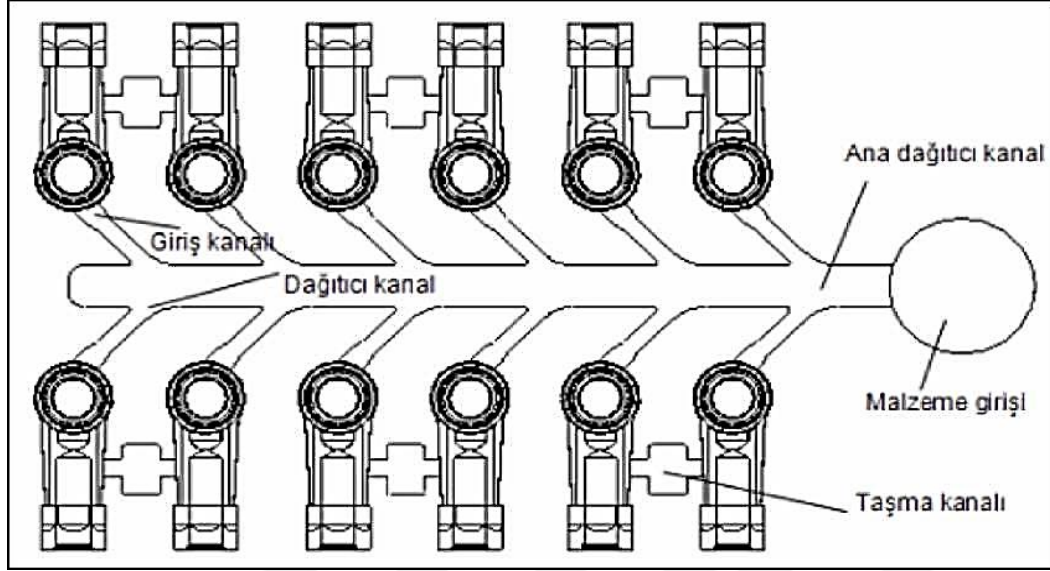
2.5.1 Kalıp Elemanları

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 $\times 1,5$ olarak hesaplanabilir. Sıvı metal hızı çinko alaşımlarında 15 m/sn. alüminyum alaşımlarında 10 m/sn. magnezyum alaşımlarında ise 20 m/sn. değerleri altına düşmemelidir [25,26].

Genel kural olarak, yolluk kanalları olabildiğince 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

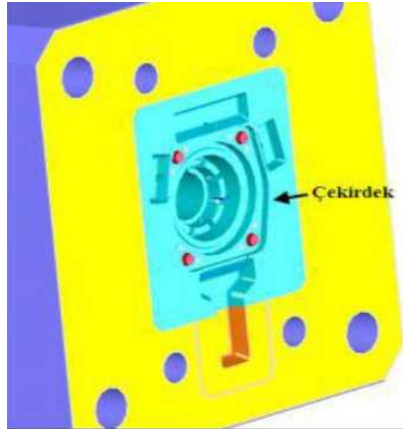
birlikte artık kısımların ve yüzeyin düzeltilmesi kolay olmaktadır, fakat yoğun bir döküm yapılamamaktadır. Büyük girişlerle daha yoğun ve kusursuz bir döküm yapılmaktadır. Fakat artık kısımların kırılması ve yüzeyin düzeltilmesi daha güç olmaktadır. Girişlerin büyüklüğü ve biçimi sıvı alaşımın hareketinin 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

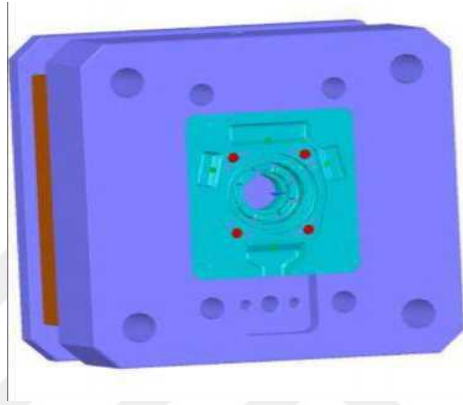
Parçanın geometrisinin negatif şekline sahip olan ve kalıp ayırma yüzeyi veya çizgisinden bölünen kısımları içeren kalıp elemanıdır. Çekirdekler, kalıplarda hareketli ve sabit hamillere bağlıdır. Çekirdekler tek göz ve birden fazla göz içeren çekirdekler ya da farklı parçaların formlarını içeren çekirdekler 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

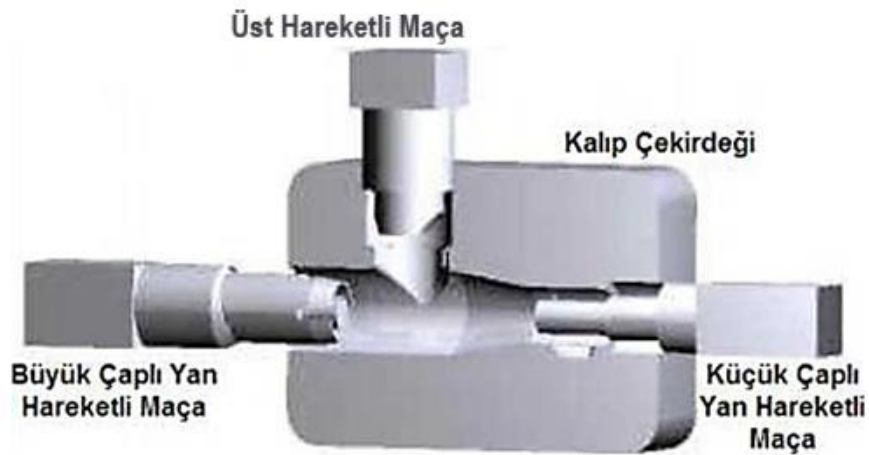
Kalıp hamilleri kalıbın diğer tüm elemanlarını bir arada tutmak için tasarlanan kısımdır (Şekil 2.9). Hareketli ve sabit taraf olmak üzere ikiye ayrılır. Bu bölüm, kalıp ayırma yüzeyi olarak da bilinmektedir. Sabit olan kalıp hamili, döküm makinesinin sabit tarafına yani kamara sisteminden kalıba olan 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 kilitlenmesini sağlamaktır [24].



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

2.5.1.4 Maçalar

Basıncılı 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.

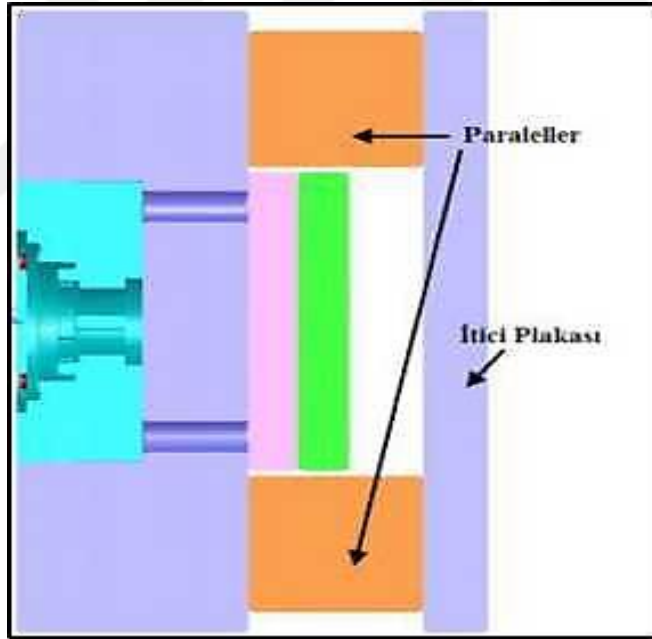


Şekil 2.10: Kalıp sisteminde hareketli maçaların görünüşü [25].

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

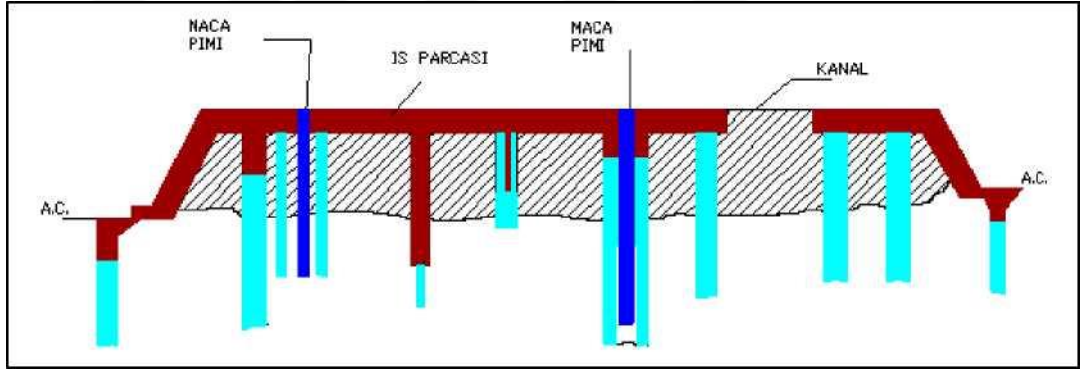
İtici plakası kalıbın itici sistemindeki ejektör kalıbın bağlandığı kısımdır. Tasarımı parçanın tasarımına bağlıdır. Bağlandığı hareketli tarafı kalıp kapama kuvvetine ve itici kuvvetlerine karşı korumaya yarar. Paraleller bağlantı yüzeyleri paralel olan ve hareketli hamilden makinenin hareketli kısmına kilitlenme veya kitleme plakasına ulaşmak için genellikle AISI 1020 gibi çeliklerden üretilen elemanlardır. Kalıbın tüm kitleme 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 katılma 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].

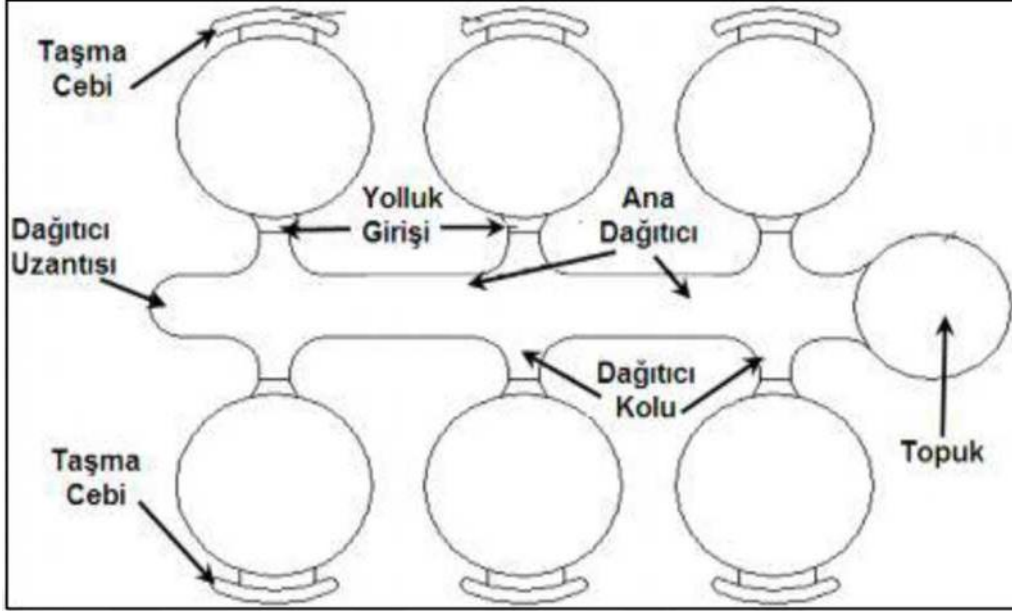


Şekil 2.12: İtici pimlerin şematik gösterimi [24].

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

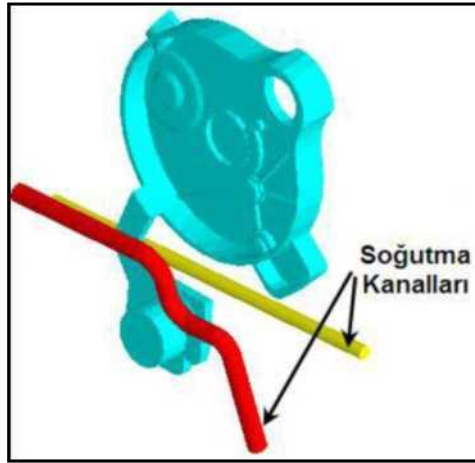
kanalları kızakların çevresine, hareketli maçaların ve iticilerin üzerine açılır. Taşma cepleri, basınçlı dökümde önemli rol oynayan tahliye sisteminin bir parçasıdır. Doldurulması zor olan dişi kalıpların çukurlarına sıvı metal alaşımın akmasını kolaylaştırır. Yüksek basınçlı döküm kalıplarında dağıtıcılar, hava tahliye kanalları ve taşma cepleri Şekil 2.13'te verilmiştir [24].



Şekil 2.13: Bir kalıpta dağıtıcılar, yolluk girişleri ve taşma 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 öngörülmeven 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 Basıncılı 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 ısıtma işlemi 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 artırılmış 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 arz eden 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].

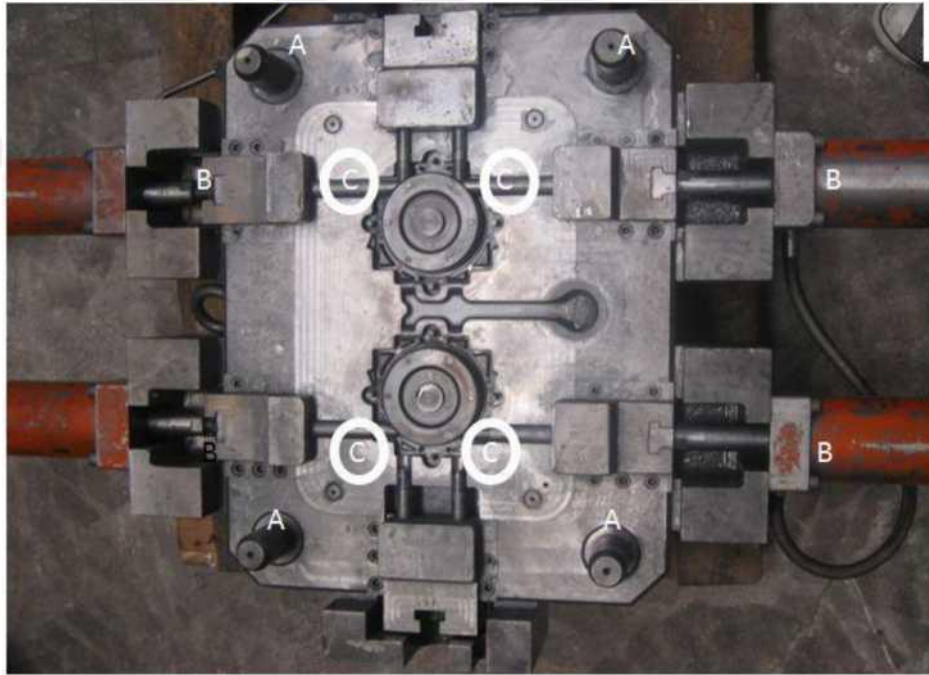
Yüksek basınçlı döküm kalıpları iki kalıp yarısından oluştuğu için, tasarım aşamasında ilk önce kalıp ayırma hattı dikkate alınmalıdır. Genel olarak yassı düzlemler kalıp ayırma çizgileri olarak seçilir, bu sayede talaşlı imalat prosesi kolaylaşır ve maliyet düşürülür. Ancak günümüz endüstrisinin karmaşık 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 ısıl dengesini 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 [16,20,24,7].

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 arz eden 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 [16,20].

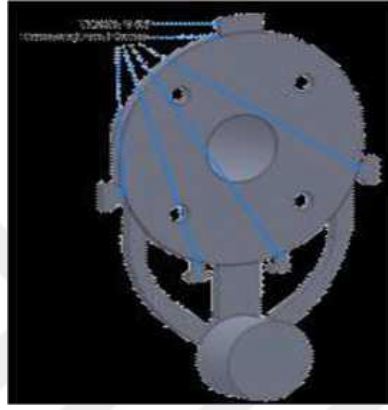
Çok gözlü kalıplar ile üretilen her bir parça kullanıldığı yerde de aynı görevi yerine getireceğinden yapısal özelliklerinin de aynı olması beklenmektedir. Çok gözlü kalıplarda gözlerin topuk kısmına olan uzaklıkları farklılık gösterebilir. Bu uzaklık farkı; dolum esnasında basınç farkına, dolum süresinin 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 kalitelere olması anlamına gelmektedir. Bu konu yolluk tasarımını da kapsadığından yolluk tasarımı sırasında da değerlendirilmelidir. Aynı veya farklı döküm parçalar çok gözlü kalıplar ile üretilmektedir. İki gözlü bir kalıp, Şekil 2.15'te gösterilmiştir [16,20,24].



Şekil 2.15: İki gözlü kalıpta; (A) kılavuz pimi, (B) hidrolik pompası ve (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 taşıma ceplerinin şematik görünümü verilmiştir. Havalandırma kanallarının yerinin ve kesitinin belirlenmesi kalıp tasarımının en önemli adımlarından birini teşkil etmektedir [16,20,24].



Şekil 2.16: Havalandırma kanalları ve taşıma cepleri [24].

Havalandırma kanalları ve taşıma cepleri bir bütün gaz uzaklaştırma sistemidir. Taşıma cepleri, havalandırma kanallarının devamına ve kalıp açma yüzeyi üzerine açılır. Kalıp boşluğunun doluşu esnasında sıvı metalin ilk olarak bu kanallar doldurması engellenmelidir. Taşıma cepleri ise kalıp boşluğunun döküm parçasının temsil eden hacmi dolana kadar dolmamasına dikkat edilmelidir. Bu cepler, dolumun 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 yönlerle 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 tasarımı 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 Basınçlı Döküm Hataları

Genel olarak literatürde, alüminyum alaşımı döküm bileşenlerinde hata sınıflamasına ilişkin üç ana yaklaşım önerilmiş ve 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
1-Yüzey hatları	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)
2-İç hatalar	3-prüzlü yüzey	1-Çekme izleri
		2-Lehimleme
	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 kullanılabildiği önceki geometri / konum temelli tekniklere göre dökümhanelerde uygulanabilirliği daha düşüktür.

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

Gaz Porozitesi	Çözünmüş gaz (hidrojen)
	Doldurma sırasında gaz sıkışması (hava)
	Bağlayıcıların parçalanması (maça gazları)
Çekinti Porozitesi	Makro porozite
	Mikro 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].

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 ve 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 gaz 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/sn. 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 ile oda sıcaklığına inilmesi) sabit proses parametrelerinin sürdürülebilirliğinin zorluğu ve proses kontrol üniteleri arasındaki etkileşimlerin olmaması, bu döküm yöntemini hata üreten bir proses yapmaktadır [3].

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

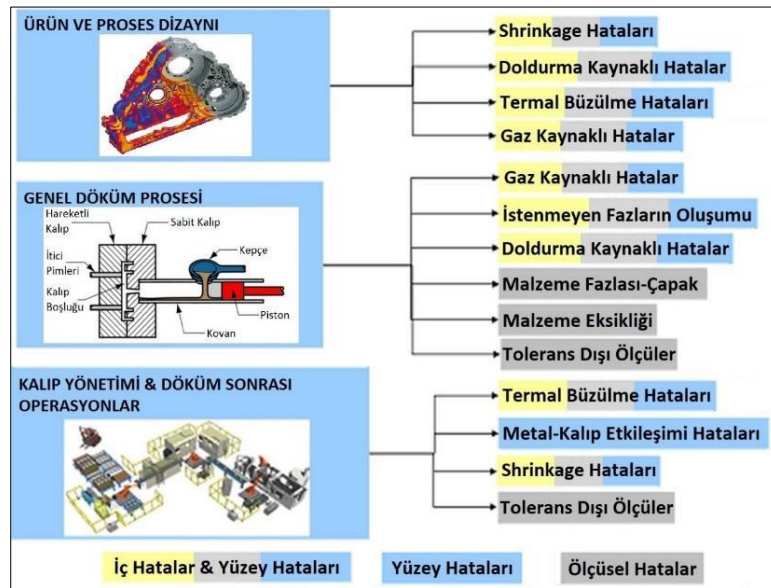
Tablo 2.9: Geometrik hataların sınıflandırılması [29].

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
Çekinti 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

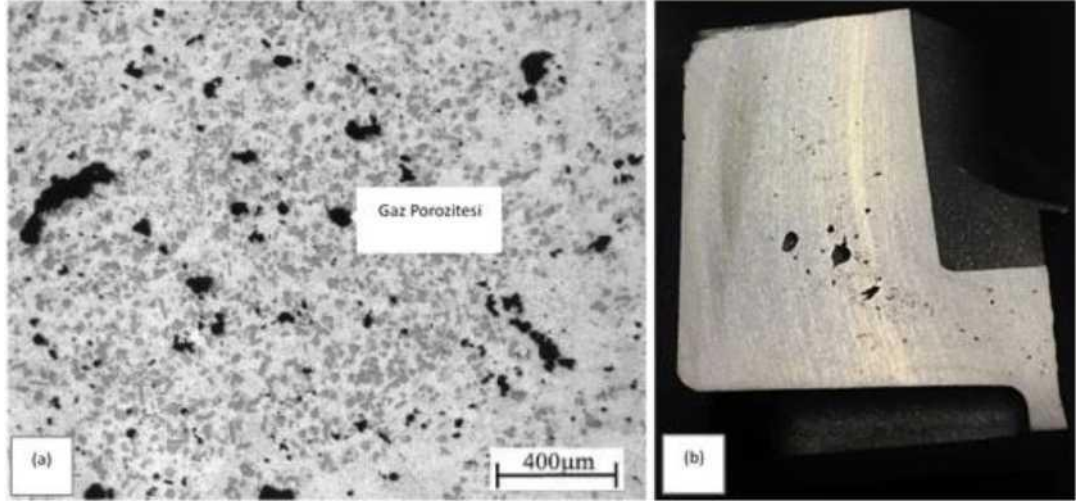


Şekil 2.17: Hataların sınıflandırılması ve kaynakları [3].

Yüksek basınçlı döküm uygulamalarında kalıp boşluğunda sıkışan hava, çekme boşlukları, döküm alaşımından kaynaklanan gaz ve curuflar 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 hapsolması tamamen önlenememektedir [27].

2.7.1 Gaz Porozitesi

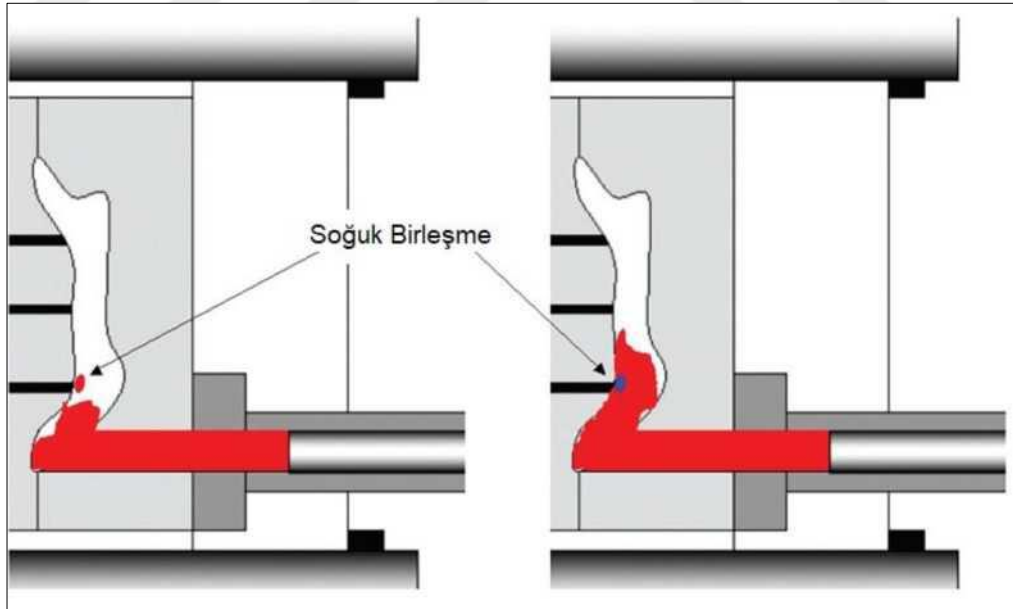
Yüksek basınçlı dökümde en çok ortaya çıkan döküm hatası gaz porozitesidir. Prosesin doğası gereği porozitesiz döküm parça imalatı neredeyse mümkün olmamakla birlikte uluslararası standartlar (ASTM E505) ve müşteri şartnameleri kapsamında belirli boyut ve miktarlardaki porozitelere müsaade edilebilmektedir. 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 ve 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. Sıvı alüminyum atmosferdeki su buharıyla reaksiyona girdiğinde hidrojen redüklenip sıvı alüminyum içerisinde atomik hidrojen $[H^+]$ şeklinde çözünür. Katılaşma esnasında alüminyumun düşen sıcaklığı ile çözünen hidrojen miktarı da düşer ve alüminyumu terk etmeye çalışırken kilitli kalan oluşmuş H_2 baloncukları gaz porozitelerine neden olur. 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].

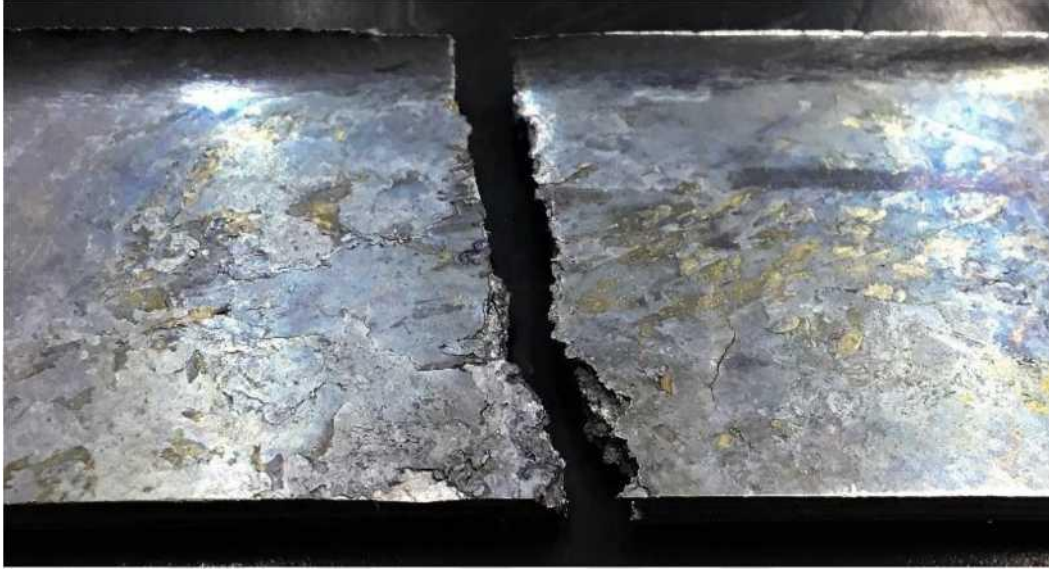
2.7.2 Soğuk Birleşme

Kalıp içinde ısısını önceden kaybederek katılaşmış bölgelerde, sonradan gelen daha sıcak sıvı metal yüzeyi ile karşılaştığı ve aradaki oksit tabakası nedeniyle kaynamanın tam olarak gerçekleşmediği 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 yükleme sonrasında soğuk birleşme olan bölgeden kırılmış bir alüminyum parça verilmiştir [28].



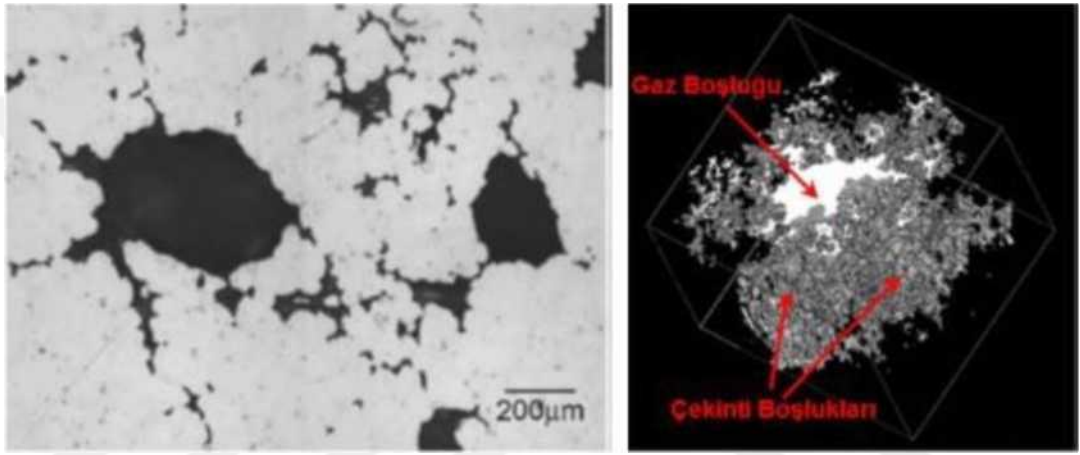
Şekil 2.20: Düşük mekanik yük ile kırılmaya sebep olan soğuk birleşme hatası [28].

Soğuk birleşme, sıvı metalin bir kısmı kalıba temas ettiğinde ve hızla soğuduğunda oluşur. Hızlı katılaşma, çevresindeki bölgenin ince bir oksit tabakasıyla da ayrılabilceği bölgeye göre daha ince bir mikro yapıya yol açar. Bazı durumlarda kalıba giren sıvı metal, bu hızlı katılaştıran 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 da 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

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 sırasında 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 katılaştıran bölgelerin, ince kesitli ve erken katılaştıran 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 şeklidir [24,30].

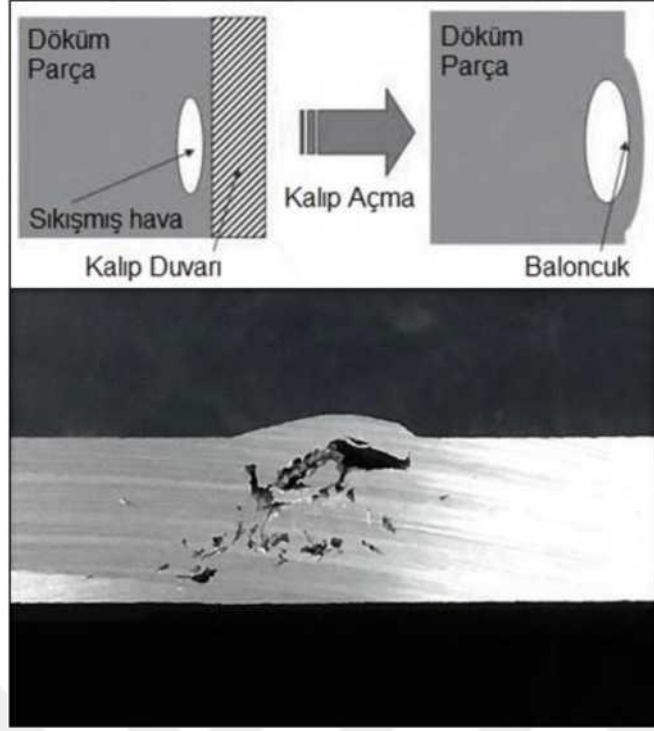


Şekil 2.21: Porozite ile çekinti boşluğunun mikroyapı ve 3D görünümü [24].

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 birkaç mm arasında büyüklüklerde olabilmektedir [13,31].

Baloncuk hatası hem döküm kalıptan çıkarıldığı sırada hem de ısıtma işlemlerinin ardından ortaya çıkabilir. Benzer şekilde, kaplanmış döküm parçaların ısıtma işlemlerinde, metal içinde sıkışmış olan gazlar sızabilir ve kaplama patlayabilir. Bazen gaz atma olarak da 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) [13,31]

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, Failure Mode and Effect Analysis) problemleri henüz yaşanmadan çözmede 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 [13,31].

2.8.1 Porozite (X-Işınları 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 [13,31].

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 Poka-Yoke gibi metotların kullanımı son derece etkili bir önleyici faaliyet olarak yapılmaktadır. Döküm parçalarındaki 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 [13,31].

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 [13,31].

2.8.4 Trim Hataları

Trim problemlerinin döküm parçalardaki çapakları almak için kullanılan metot ve ekipmana bağlı olarak birçok nedeni olabilir. Trim kalıbı ile ilgili konular genellikle etkili bir bakım rutini ve iyi bir trim kalıp tasarımı ile önlenabilmektedir. Trim ile ilgili hataların tespit edilmesi genellikle görsel muayene ile yapıldığı için zordur. Yüksek önem dereceli problemler için, master kontrolü veya Poka-Yoke cihazları kullanılabilir [13,31].

2.8.5 Kaçak Problemi

Döküm parçaların sızdırma problemi genellikle yukarıda bahsi geçen hatalardan biri veya birkaçının bir araya 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].

3. GAZ ATMA SİSTEMLERİ (VENTİLASYON)

Basınçlı döküm yöntemlerinde döküm kalitesini artırmak için gaz kaynaklarının sebep olduğu hataları minimuma indirmek gerekir. Eğer, basınçlı döküm kalıbında havalandırma kanalları bulunmuyorsa, hava döküm parçası tarafından tutularak parçanın boşluklu ve gözenekli bir hal almasına sebebiyet vermektedir. Metalden açığa çıkan gazların ve kalıp boşluğunda bulunan havanın basınçlı döküm parçasının içine hapis olmasını engellemek amacıyla hava tahliye kanal ve cep sistemleri kullanılmaktadır. Literatürde; basınçlı dökümde metalin enjeksiyonu aşamasında, kalıp boşluğundaki hava 8-25 kPa'lık negatif basınç uygulanarak boşaltılabilmektedir. Kalıp boşluğunda, dolumdan hemen önce sıkışan havanın boşaltılması ile ergimiş metal akış direncini önemli ölçüde azaltmaktadır ve dolumun hatasız bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır [3,5,20].

Geçmişten günümüze, yüksek basınçlı döküm yönteminde birçok gaz atma sistemi kullanılmıştır. İlk olarak, hava cepleri ile geleneksel yöntem kullanılmaya başlanmıştır. Hava cepleri ve hava tahliye kanalları havanın sıkıştığı bölgelerde ve kalıbın son dolum bölgelerine bir boşluk şeklinde ve genellikle kalıp ayırma hattı üzerine işlenmiştir. Hava tahliye kanalları (gaz çıkışları) havanın tahliyesini kolaylaştırmak için atmosfere açık olarak tasarlanmışlardır. Bazı tahliye kanalları kızakların etrafına hareketli maçaların ve iticilerin üzerine açılmaktadır. Yetersiz tahliye kanallı kalıplarda, döküm hataları meydana gelmektedir [3,5,20].

Gaz çıkışı, hava cebi tasarımları uygulamalarından sonra, ventiller kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel ventiller, geçmişte ve günümüzde kalıp boşluğundan havayı atmosfere aktarmak için döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [3,5,20].

Geleneksel ventiller iki boyutlu olarak tasarlanmışlardır (2B) ve yeni nesil 2B ventiller vakum bağlantısı ile kullanılabilirler. Ancak 2B ventillerin gaz atma kesit alanının küçük olması en büyük dezavantajlarıdır. Genellikle ventil boşlukları, yaklaşık olarak 70-120 mm² gaz atma kesit alanına sahiptir. Yüksek gaz atma kesit alanlarına ulaşabilen ventiller ise büyük boyutlara sahip olabilmekte ve kalıp hamillerinin kuvvetini azaltabilmektedir [3,5,20].

İlerleyen yıllarda yeni teknoloji olarak mekanik vakum valflerinin kullanımı artmıştır. Mekanik valfler (MV) iki pistonu sahiptir ve metalin hareketine duyarlı olarak mekanik açma kapama hareketi sağlar. Mekanik valf oldukça verimli olarak döküm

proseslerinde kullanılmıştır. Açma kapama valflerinin kısa çalışma mesafesi, 60 m/sn. hıza ulaşan sıvı metal için oldukça kısa olmaktadır ve açma kapama valfinin verimli çalışmamasına neden olmaktadır. Bu durumun valfin tıkanmasına sebep olduğu dökümhanelerde sıklıkla karşılaşılan durumlardandır. Mekanik vakum valfleri kullanan proseslerde makine duruş sürelerinin, valflerin periyodik bakımı ve bakım zorluğu nedeniyle çok yüksek olduğu gözlenmiştir. Duruşların ve bakım maliyetlerinin yüksek olması mekanik valflerin kullanımını kısıtlamaktadır [3,5,20].

Son yıllarda, yüksek basınçlı döküm kalıplarında üç boyutlu (3B) ventil sistemleri geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemler hem ventil hem de vakum valfi olarak kullanılabilir. Wang'ın araştırması; 3B ventil sistemlerinin ventil olarak kullanıldığında, mekanik vakum valflerinden daha verimli olduğunu göstermiştir ve bir başka çalışmada Wang ve ekibi; 3B ventillerin basınçlı döküm işleminde kullanıldığında, mekanik vakum valfinin yarattığı üretim duruşlarının en aza indirildiğini göstermiştir. 3B ventil sistemleri kullanıldığında, kalıp içerisinden vakum yardımıyla tahliye işlemi, basınçlı döküm çevrimi tamamlanmaya kadar sürmektedir. Kalıp boşluğunda verimli şekilde uygulanacak vakum uygulaması, kompleks yapıları parçalarda akışının kalıp içerisinde akışına olumlu yönde etki etmektedir. Ayrıca mekanik vakum valflerinin aksine bakım ihtiyacı bulunmamaktadır [3,5,20].

Walkington'un çalışması; verimli vakum uygulamasının, kalıp içerisindeki gaz içeriğini azaltabileceğini göstermiştir [12]. Bar-Meir ve arkadaşları (2016) hava ve gazdan kaynaklanan gözeneklerin, toplam gözeneklenmenin önemli bir bölümünü oluşturduğunu belirtmiştir. Draper (1996), gaz atma alanının artmasının, döküm parçadaki gözenek seviyesini azaltacağını gözlemlemiştir. Gaz atma sistemindeki sürtünmeyi ihmal eden Lindsey ve Wallace (1972), ventil sisteminin verimli çalışması ile gözeneklerin azaldığını göstermiştir. Ayrıca; Lindsey ve Wallace piston ve kalıp yağlayıcılarının gaz gözenekleri üzerinde etkisinin az olduğunu basit bir kalıpta deneyimlemiştir. Elde edilen bu sonuçlar, gaz atma kesit alanının gözeneklerinin azaltılması için çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Brevick ve arkadaşları (1991) pistonun yüksek hızlara ulaştığında, türbülansın bir gözeneklenme kaynağı olabileceğini belirtmektedir [12,24].

Nabil ve arkadaşları (2016) 1. faz aşamasında yüksek hızın havanın sıkışacağını ve sıkışan havanın gözenek oluşumunu artırdığını anlatmıştır. Kuru ve Serçe (2014),

yüksek basınçlı döküm prosesinde enjeksiyon ürünün kalitesine yolluk tasarımının ve vakum uygulanmasının etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada, yolluk tasarımı ve vakum uygulamasına bağlı olarak, makro ve mikro gözenek değerlerinin azaldığı görülmüştür. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında, vakum olmadan yapılan dökümlerin vakumla yapılanlardan daha fazla gaz içerdiği görülmektedir [12,27].





4. LİTERATÜR TARAMA

Bodhayaet ve ark. (2014), sıvı metalin kalıp içerisine enjekte edildiği basınçlı döküm yönteminin çok yönlü bir üretim tekniği olduğunu incelemişlerdir. 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 irdelleyerek 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].

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. Ayrıca, 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 azalttığını saptanmıştır [37].

5. MATERYAL VE METOD

5.1 Materyal

Bu çalışmada öncelikle, AlSi9Cu3, AlSi12Cu1Fe ve AlSi12Fe alüminyum alaşımlarının gaz giderme öncesi ve gaz giderme sonrası atmosferik koşullar ve vakum altında katılaşması sağlanarak porozite yapıları incelenmiştir. İlgili alaşımların optik spektrometre ile belirlenen içerikleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1: Alaşımların optik spektrometre ile belirlenen içerikleri.

	%Al	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Cr
Minimum		8	0	2	0	0.05	0	0
Maksimum		11	1.3	4	0.55	0.55	1.2	1.5
AlSi9Cu3	85.29	9.568	0.79	2.71	0.201	0.145	1.05	0.026
Minimum		10	0	0	0	0.05	0	0
Maksimum		13.5	1	0.4	0.55	0.55	1.2	1.5
AlSi12Fe	88.7	10.2	0.608	0.13	0.051	0.016	0.105	0.006
Minimum		10.5	0	0.7	0	0	0	0
Maksimum		13.5	1.3	1.2	0.55	0.35	0.55	0.1
AlSi12Cu1Fe	86.73	11	0.666	0.713	0.192	0.017	0.483	0.019

5.2 Metod

Ergimiş üç farklı alaşım için gaz giderme öncesi ve sonrası numuneler alınmıştır. Üç farklı alaşım AlSi9Cu3, AlSi12Cu1Fe ve AlSi12Fe’dir. Gaz giderme işlemi, Şekil 5.1’de görülen rotorlu gaz giderme ünitesi kullanılarak yapılmıştır. Gaz giderme işlemi sırasında azot gazı kullanılmıştır ayrıca işlem sırasında rotor 610 devir/dk ile çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda ilk olarak vakum altında (80 mbar) ve atmosferik koşullar altında (1000 mbar) katılaşma için vakum yoğunluk test cihazı (Mk 2200) kullanılmıştır. Numune kesme işlemi için Metkon Metacut 251 hassas kesme cihazı, CT görüntüleme için YXLON MU2000-D cihazı ve stereo mikroskop görüntüleri için Bestscope BUC2B-500C mikroskop kullanılmıştır. Deneylerle parçaların porozite çapları ve derinlikleri bilgisayarlı tomografi (CT, computed tomography) ile ölçülmüştür. Ayrıca, gözenek çapları ve miktarları stereo mikroskop (SM) yöntemi ile incelenmiş ve sonuçlar daha önce CT yöntemi ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Deneyisel çalışmaların ikinci kısmında, AlSi9Cu3 alaşımı için dört farklı basınç altında (150 bar, 200 bar, 250 bar ve 300 bar) su pompa gövdesi üretimi soğuk kamaralı yüksek basınçlı alüminyum enjeksiyon döküm yönetimi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığı 680 °C'dir.



Şekil 5.1: Rotor ile gaz giderme ünitesi.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

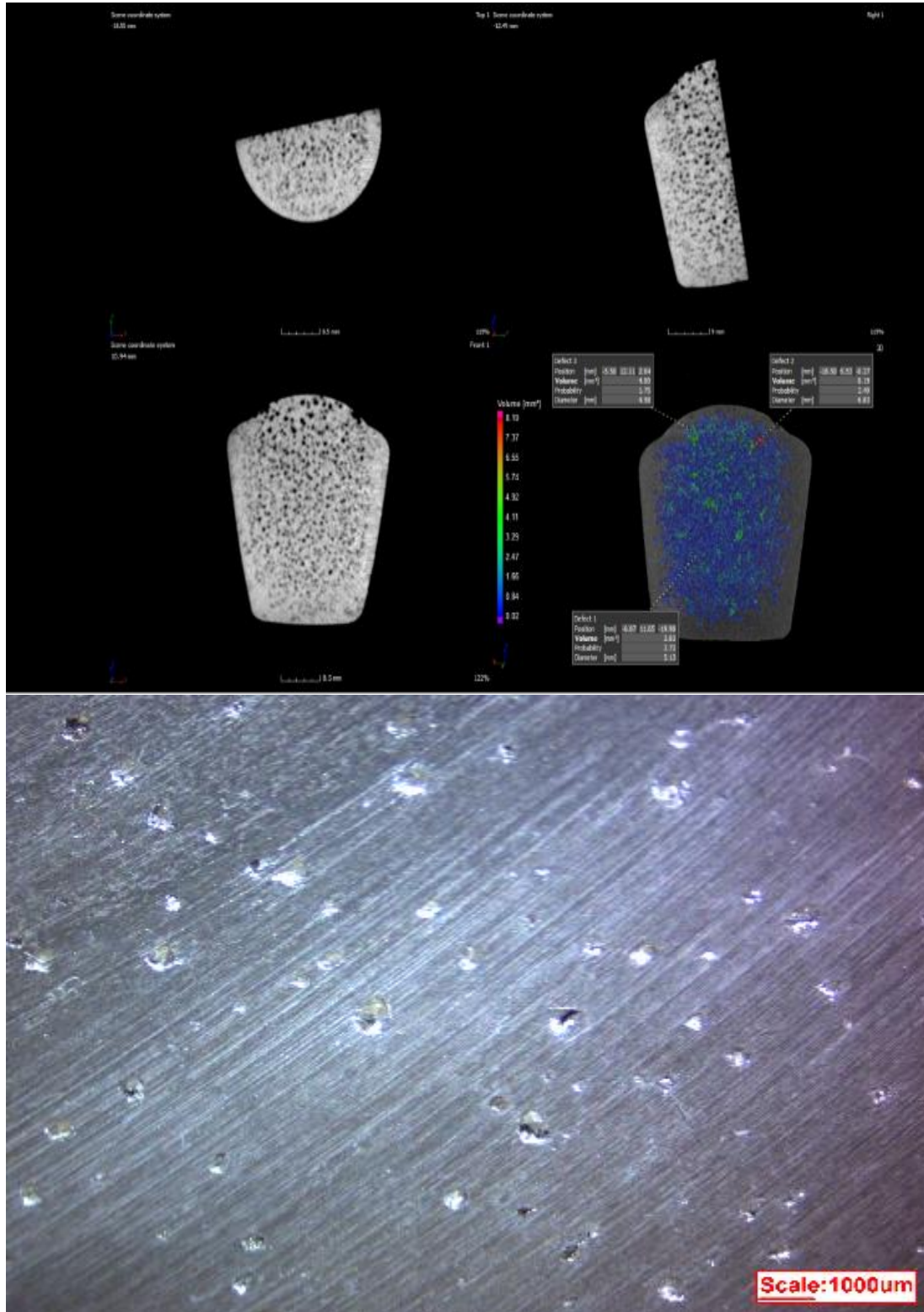
6.1 Gaz Giderme İşleminde Hidrojen Giderimi

Gaz giderme işlemi öncesinde ve sonrasında alaşımlardaki çözünmüş hidrojen miktarları ölçülerek Tablo 6.1’de paylaşılmıştır. Alaşımlarda çözünen hidrojen miktarı, porozite oluşumunun başlıca nedenlerinden bir tanesi olduğu için alüminyum döküm proseslerinde takip edilmesi bir zorunluluktur. Sonuçlar hem atmosferik hem de vakum koşulları için aynıdır ve analizlerin güvenilirliğini kanıtlamaktadır. Özet olarak hem vakum altında hem de atmosferik koşullar altında testler yapmanın çözünmüş hidrojen içeriğini doğru bir şekilde ölçmek için uygun olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, değişen hidrojen miktarları, döküm ürünlerinin katılaşmasında gözeneklerin oluşumunu önlemek ve alaşımların hidrojen içeriğini azaltmak için gazdan arındırmanın başarılı bir işlem olduğunu göstermektedir.

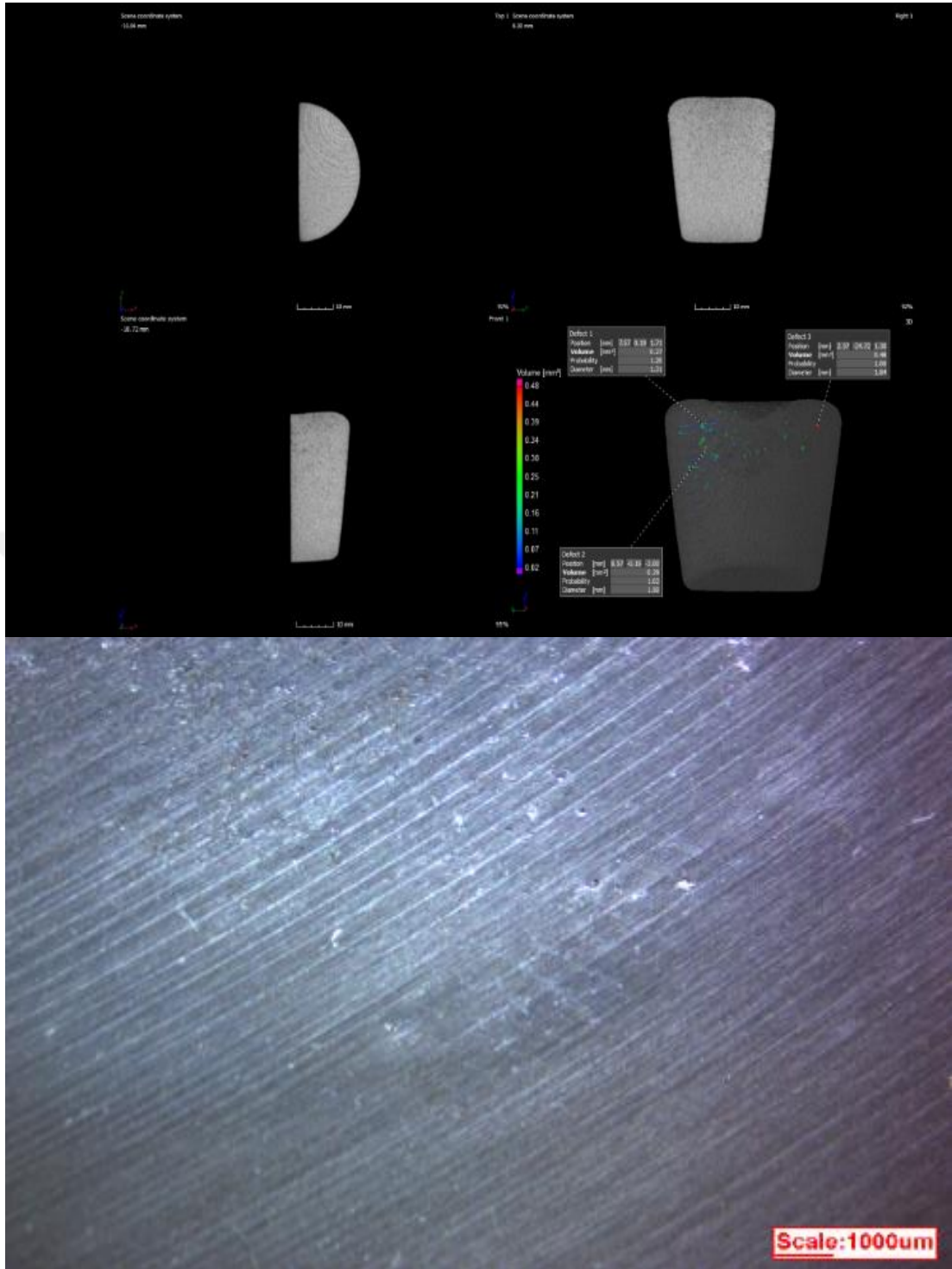
Tablo 6.1: Alaşımların hidrojen içeriği (ağırlıkça%).

Alaşımlar	Gaz giderme öncesi	Gaz giderme sonrası
AlSi9Cu3	6.37	1.5
AlSi12Cu1Fe	10.19	0
AlSi12Fe	13.85	1.53

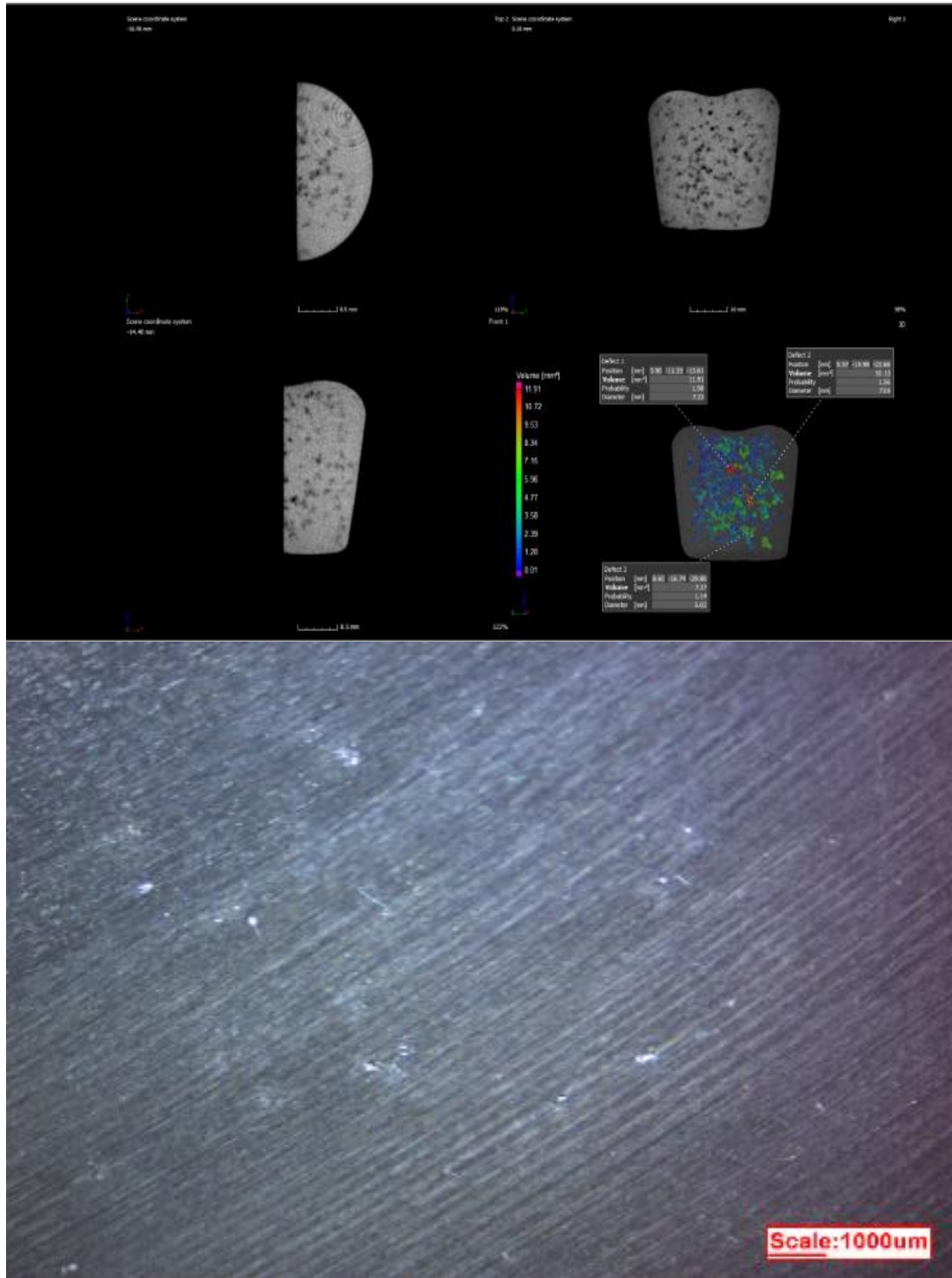
AlSi9Cu3 salaşımının gazdan arındırma öncesi CT ve SM mikrografları Şekil 6.1’de vakum altında katılaştırılmış numune için, Şekil 6.2’de atmosferik koşullar için verilmiştir. Ayrıca, Şekil 6.3 ve 4, gazdan arındırıldıktan sonra sırasıyla vakum ve atmosferik koşullar altında katılaştırılan numuneleri göstermektedir. Azaltılmış atmosfer gözenekleri görünür hale getirmiş ve gaz giderme işleminin olumlu etkisi mikroyapı tarafından da kanıtlanmıştır.



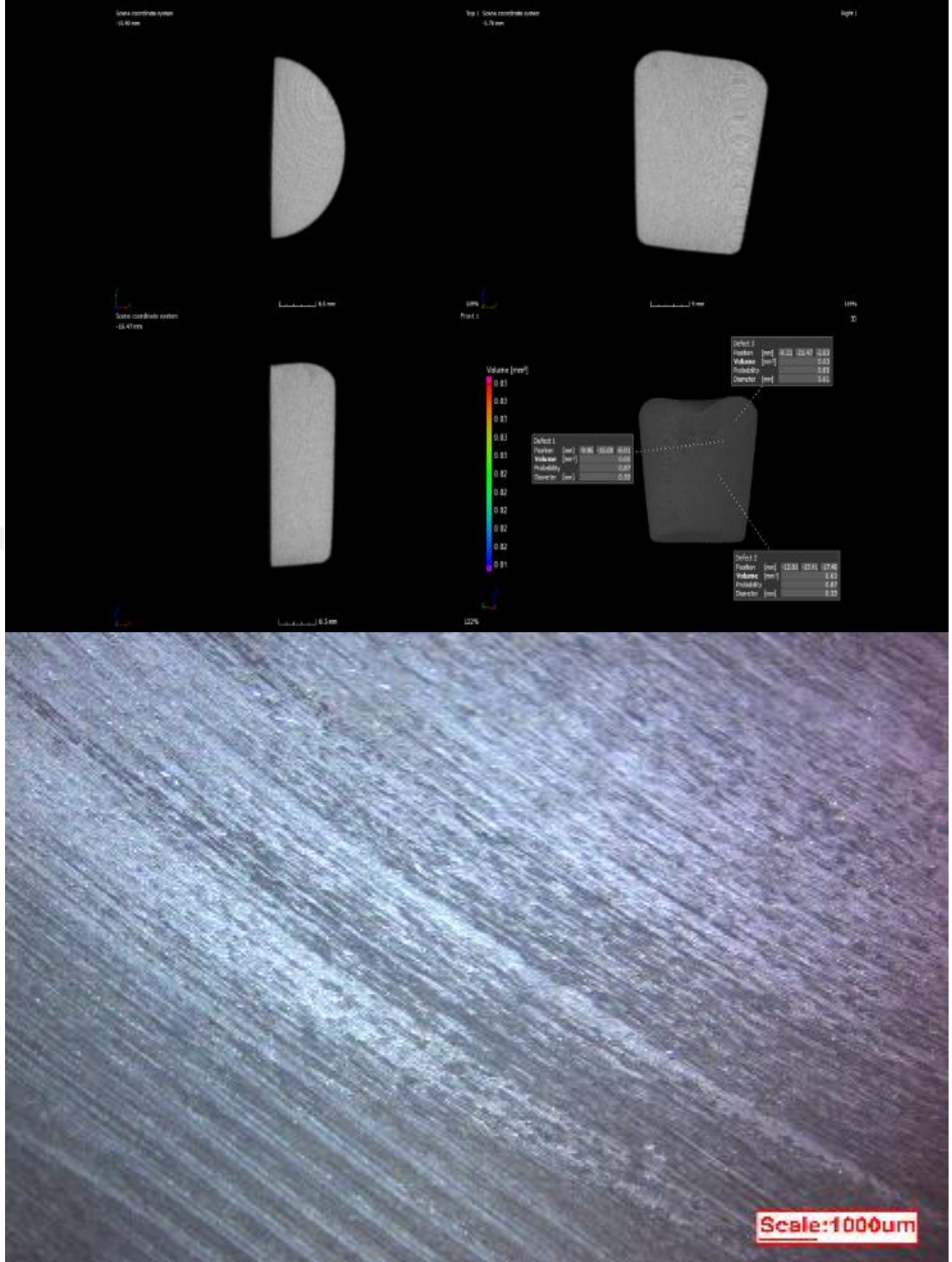
Şekil 6.1: AlSi9Cu3'ün vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.



Şekil 6.2: AlSi9Cu3'ün atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.



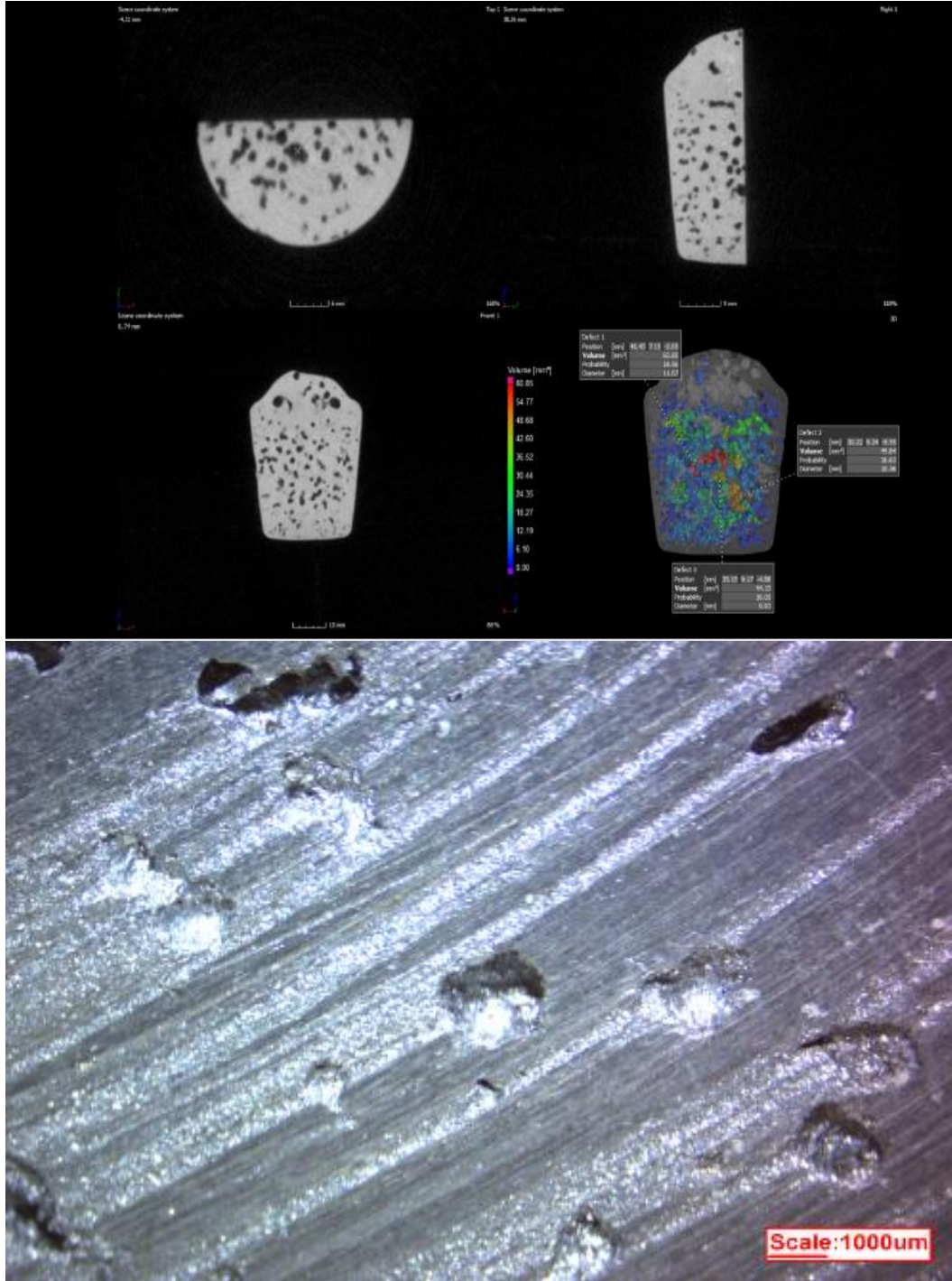
Şekil 6.3: AlSi9Cu3'ün vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.



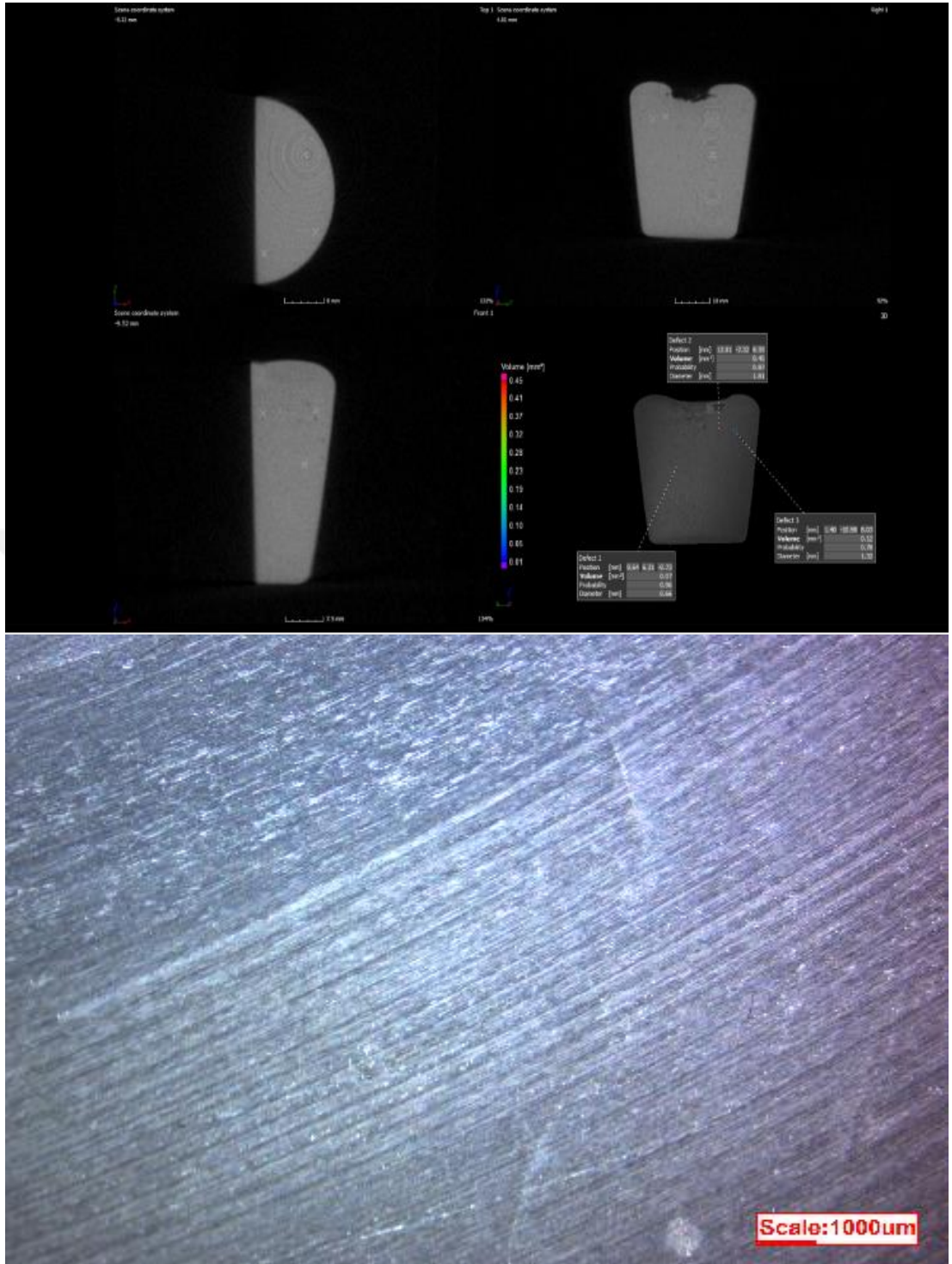
Şekil 6.4: AlSi9Cu3'ün atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.

Şekil 6.5'ten Şekil 6.8'e kadar, test edilen numunelerin CT ve SM mikrografları, sırasıyla vakum ve atmosferik koşullar için gaz giderme işlemlerinden önce ve sonra verilmiştir. Atmosferik koşullar altında katılaşan örneklerle kıyasla vakumla katılaşan örneklerde de gözenekler görülmüştür. Ancak bu, vakumla katılaşmanın, atmosferik koşullardan çok daha büyük bir oranda gözenek oluşumuna neden olduğu anlamına

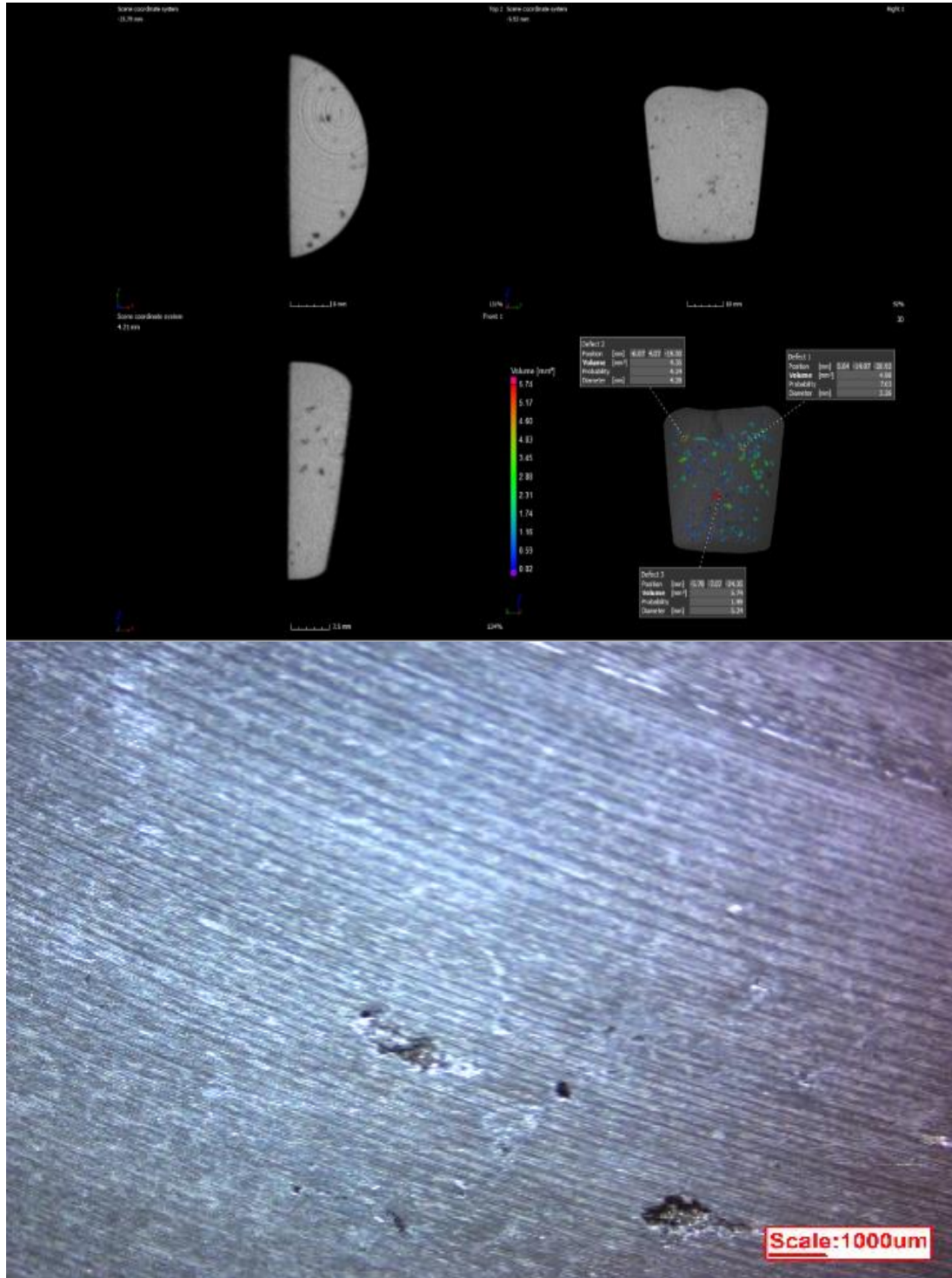
gelmemektedir. Hidrojen miktarı ölçüm cihazının çalışma mekanizması ile ilgili olarak, vakum koşulları altında çözünmüş hidrojen gazının salındığı ve gözeneklerin oluşumuna neden olduğu anlaşılrken, çözünmüş hidrojenin, atmosferik koşullar altında katılaşılan numuneler için hala döküm ürünlerinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, alaşımlarda çözünmüş hidrojen miktarlarını gösteren Tablo 6.1'deki sonuçlarla da tutarlıdır.



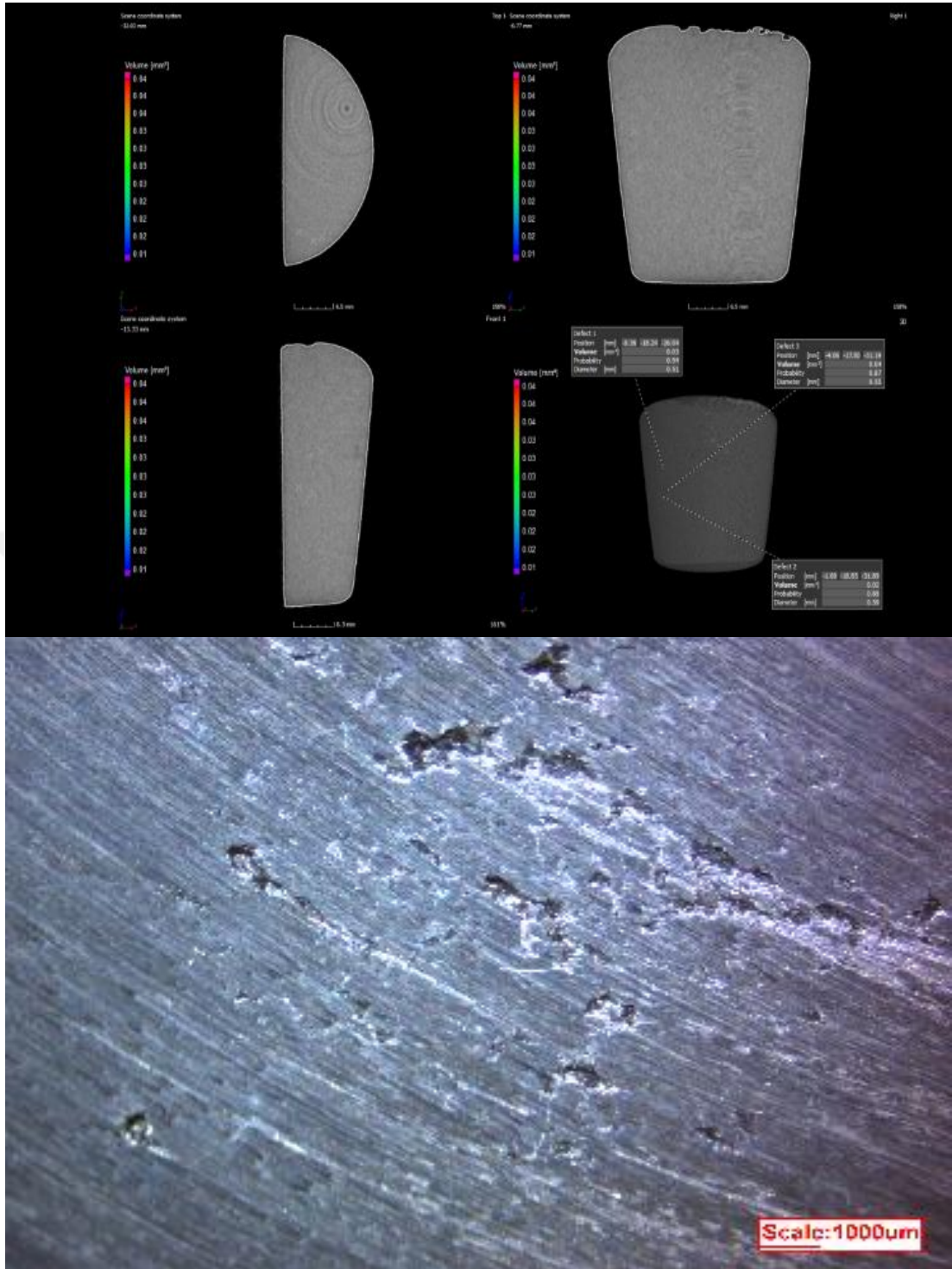
Şekil 6.5: AlSi12Cu1Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.



Şekil 6.6: AlSi12Cu1Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.

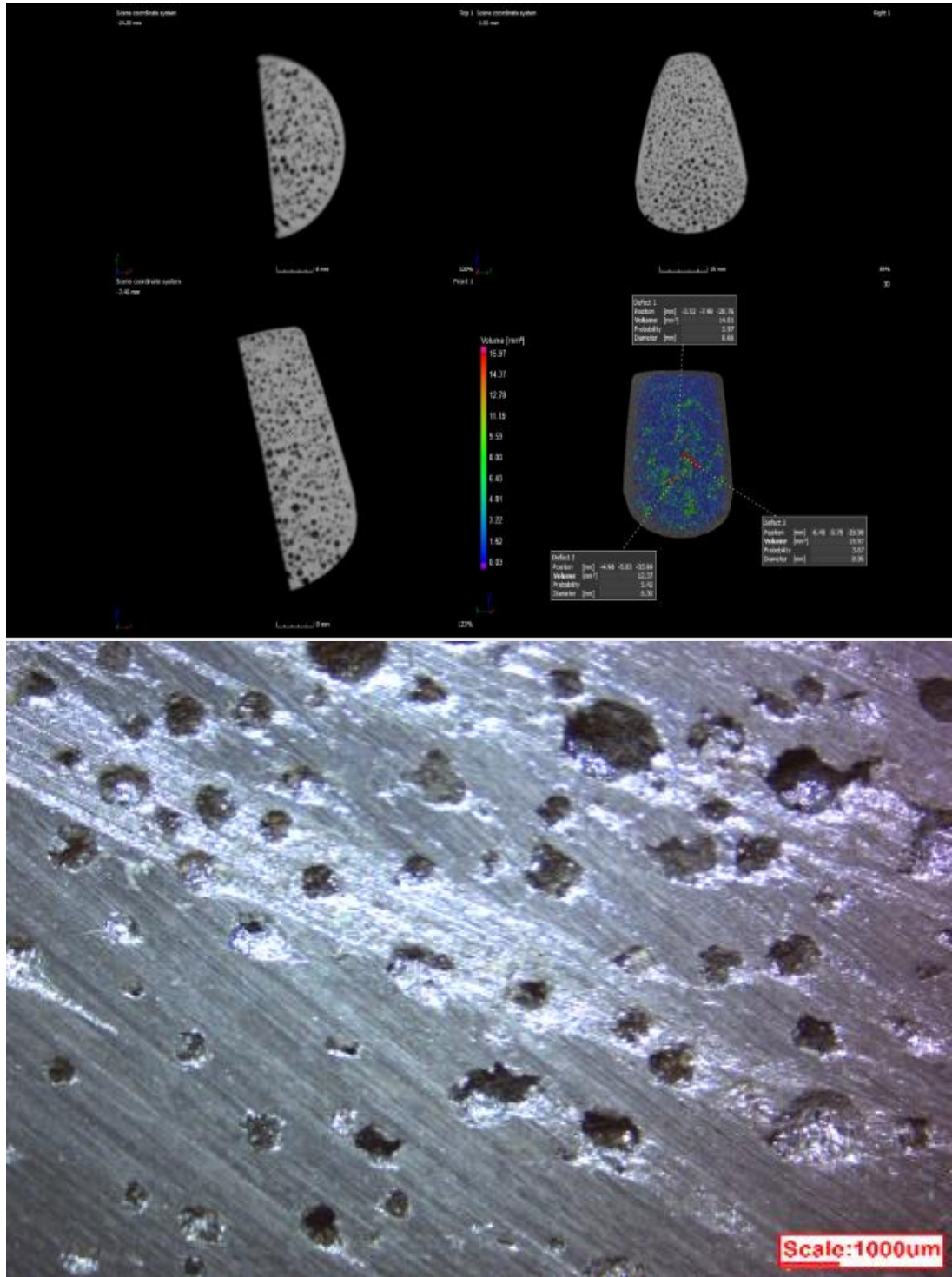


Şekil 6.7: AlSi12Cu1Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.

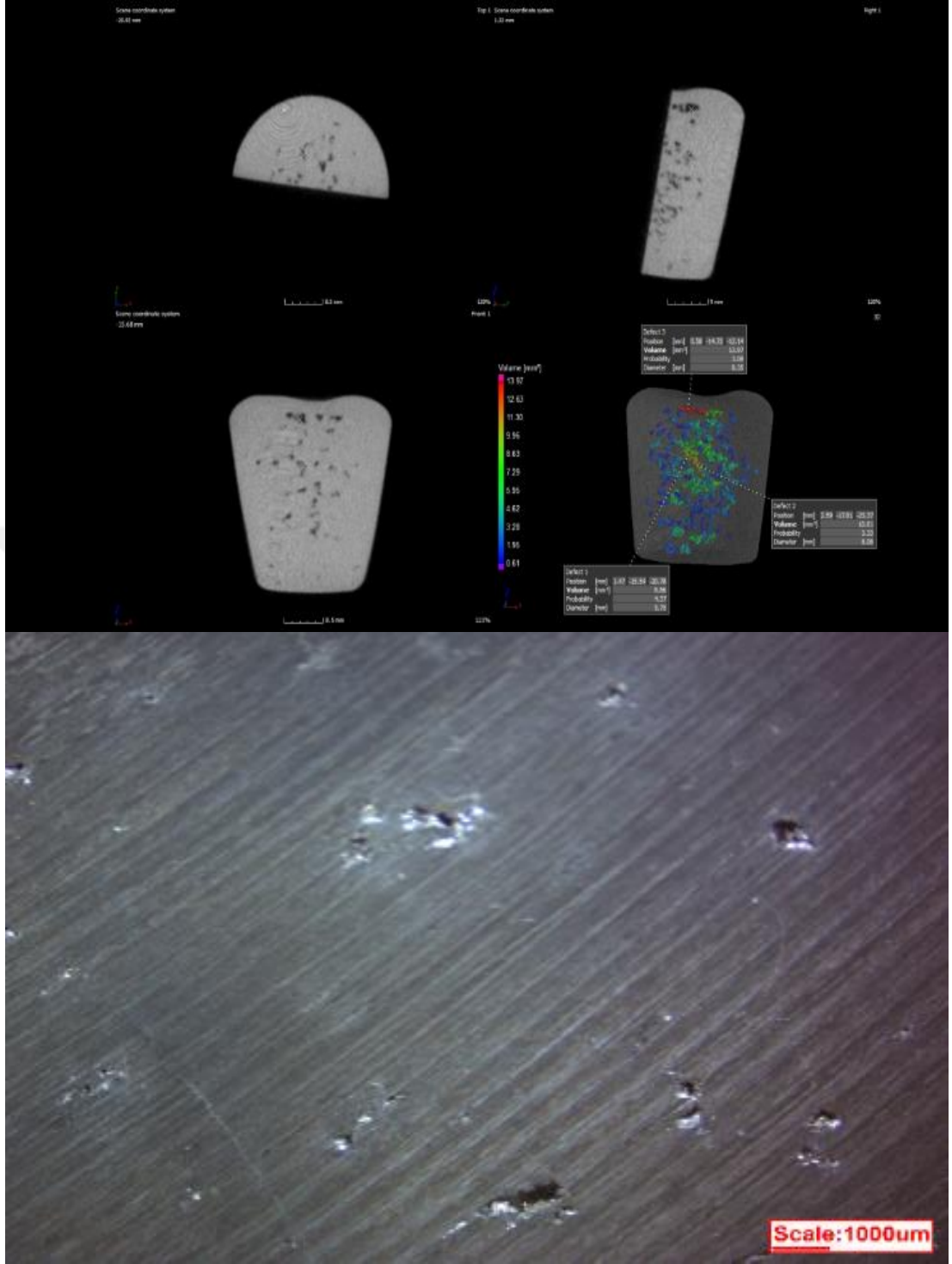


Şekil 6.8: AlSi12Cu1Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.

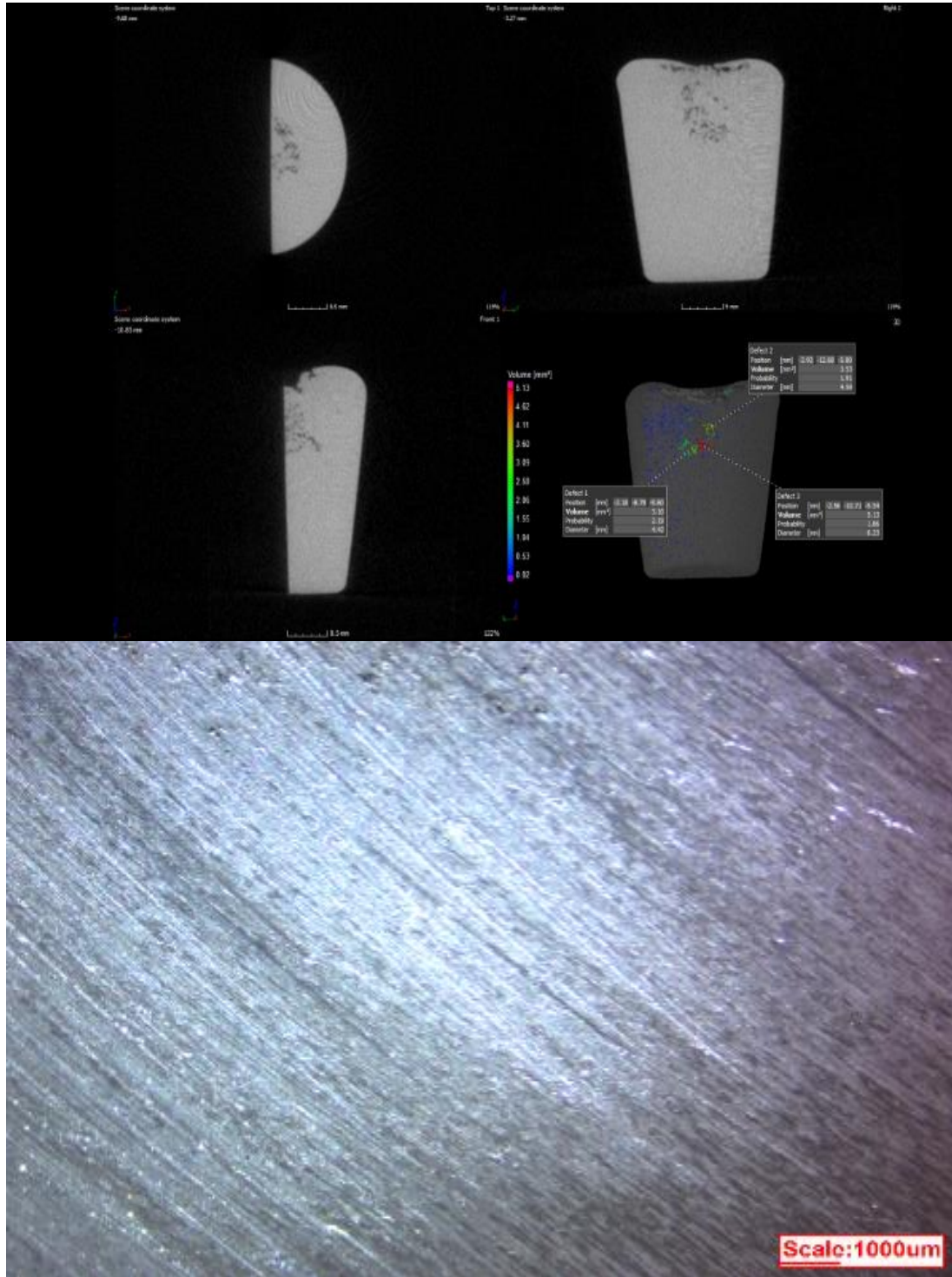
Son deneysel seride, farklı katılaştırma teknikleri için AlSi12Fe alaşımı için gaz giderme işleminden önce ve sonra numunenin mikrogramları çekilmiştir. Sonuçlar, AlSi9Cu3 ve AlSi12Cu1Fe alaşımlarından alınan önceki test sonuçlarına benzerdi. Gaz giderme, alaşımın çözünmüş hidrojen içeriğini gidermek için başarılı bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 6.9-6.12).



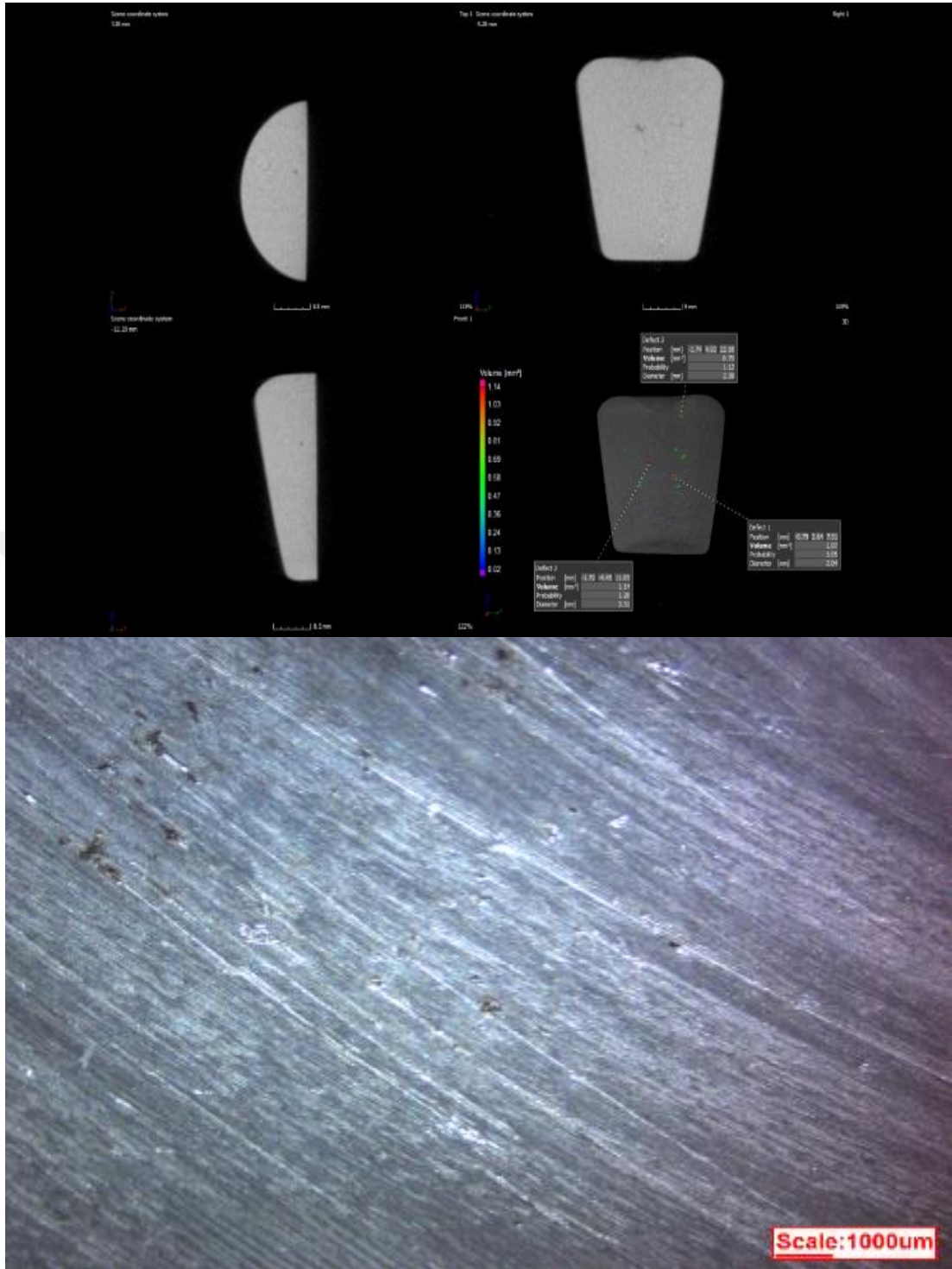
Şekil 6.9: AlSi12Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.



Şekil 6.10: AlSi12Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gazdan giderme öncesi CT ve SM görüntüleri.



Şekil 6.11: AlSi12Fe'nin vakum altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.



Şekil 6.12: AlSi12Fe'nin atmosferik koşullar altında katılaştırılmış numune için gaz giderme sonrası CT ve SM görüntüleri.

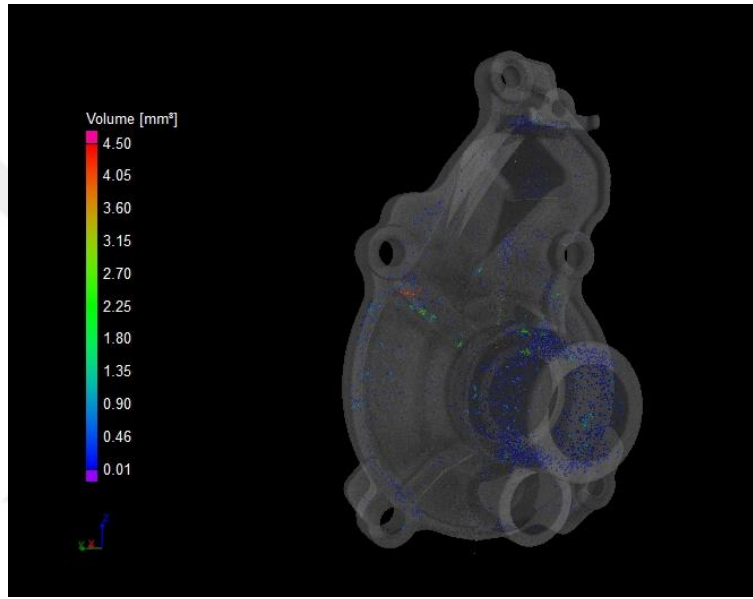
6.2 Soğuk Kamaralı Yüksek Basıncılı Dökümde Basıncı Değişiminin Porozite Oluşumuna Etkisi

AlSi9Cu3 alaşımı için 4 farklı basınçta üretilmiş su pompa gövdesi CT sonuçları aşağıda paylaşılmıştır. Tablo 6.2'de 4 farklı numune için CT ile ölçülmüş porozite hacmi ve porozite yüzdeleri paylaşılmıştır. Tablo 6.2 görülen değerler ve Şekil

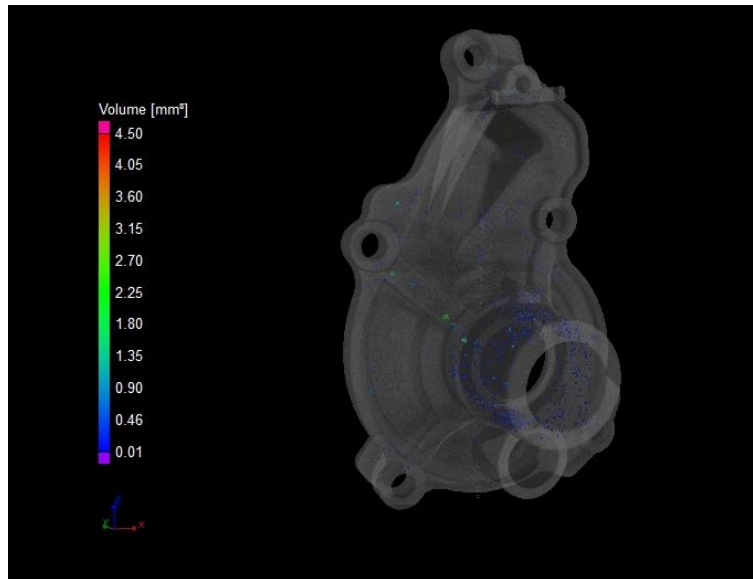
6.13'den 6.16'ya kadar olan görsel CT tarama sonuçları basınç arttıkça su pompa gövdelerinde oluşan porozite hacimlerinin azaldığını gösterir niteliktedir.

Tablo 6.2: Dört farklı basınçta üretilen numunelerin CT ile ölçülmüş porozite hacmi ve porozite yüzdesi.

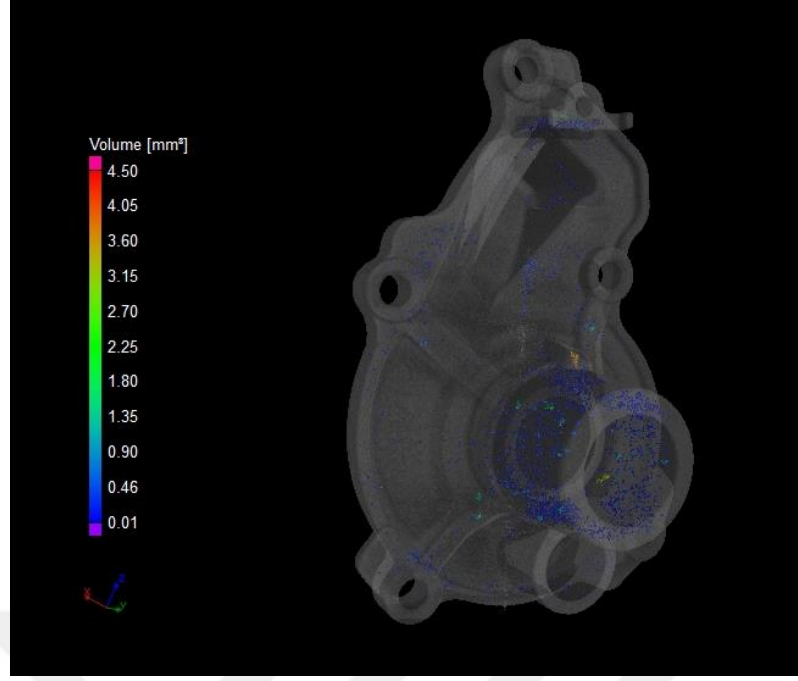
	150 bar	200 bar	250 bar	300 bar
Porozite Hacmi (mm ³)	243.3	170.25	137.7	90.25
Porozite Hacmi (%)	0.29	0.21	0.17	0.11



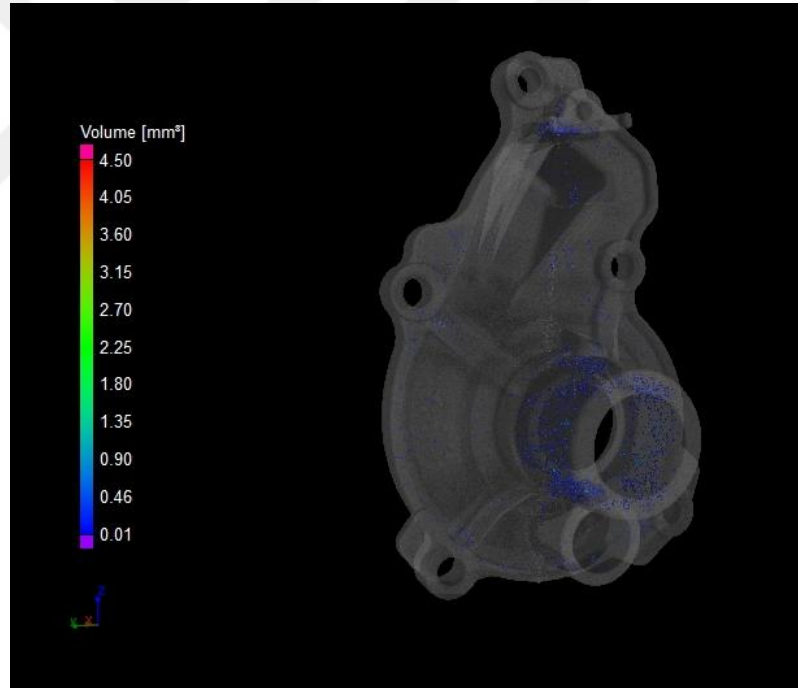
Şekil 6.13: Su pompa gövdesi porozite CT görüntüsü (150bar).



Şekil 6.14: Su pompa gövdesi porozite CT görüntüsü (200 bar).



Şekil 6.15: Su pompa gövdesi prozite CT görüntüsü (250 bar).



Şekil 6.16: Su pompa gövdesi prozite CT görüntüsü (300 bar).



7. GENEL SONUÇLAR

AlSi9Cu3, AlSi12Cu1Fe ve AlSi12Fe alüminyum yüksek basınçlı döküm (HPDC) alaşımlarının döküm esnasında gözenek oluşum mekanizmaları ve gözenek oluşumunu engelleme yöntemleri bu tez kapsamında araştırılmıştır.

Deneysel çalışmaların ilk bölümünde, AlSi9Cu3, AlSi12Cu1Fe ve AlSi12Fe alaşımlarının döner gaz giderme işleminden önce ve sonra hidrojen çözünürlük değerleri ölçülmüştür. İlgili alaşımların hidrojen çözünürlükleri hem atmosferik koşullar hem de vakum altında vakum yoğunluk ölçüm cihazı ile test edilmiştir (80 mbar ve 1000 mbar). Sonuçlar, örneklerin mikrografları alınarak CT ve SM teknikleri ile desteklenmiştir. Gaz giderme işlemi sonucunda tüm alaşımlarda çözünmüş hidrojen miktarları ağırlıkça ~%1,5 ve altındaki değerlere düşürülmüştür ve bu değerler sağlam döküm ürünleri elde etmek için endüstriyel uygulamada da kabul edilebilir değerlerdir.

Dört farklı basınçta HPDC ile üretilen (150 bar'dan 300 bar'a kadar) su pompa gövdesi döküm ürünleri için oluşan porozite değişimleri CT yöntemi ile incelenmiştir. 300 bar basınç ile üretilen numunede porozite dağılımının hacimsel olarak değerlendirildiğinde %0.11 ile en iyi sonucu vermiştir. Sırasıyla 250 bar %0.17, 200 bar %0.21, 150 bar %0.29 şeklinde CT kullanılarak ölçülmüştür.

Bu çalışmadan faydalanılarak sıvı metal sıcaklığı, kalıp sıcaklığı vb. üretim şartları değiştirilerek porozite oluşumu gözlemlenerek devam edilebilir.

Destekleyen Kişi ve Kurum Bilgisi.

Bu tez çalışması, Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından, 2019/YL/0003 numaralı proje ile desteklenmiştir.



KAYNAKLAR

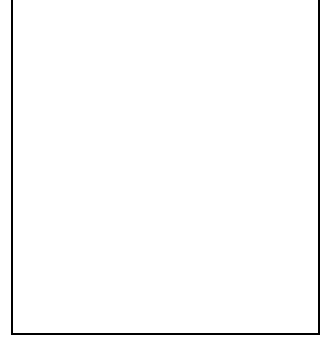
- [1] www.chinasavvy.com/permanent-mold-process-limitation., Erişim Tarihi: 03.02.2020.
- [2] Wili, J. ve Wilho, P. Opportunities for Aluminium Components in Automotive Applications. JWP Engineering & Consulting, Charles Hatchett Seminar, 2016.
- [3] Bonollo, F., Gramegna N. ve Timelli, G. High-Pressure 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 Üretilmiş 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: 03.02.2020.
- [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 Basınçlı 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: 04.02.2020.
- [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, 88-85298-737, 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/, Erişim Tarihi: 10.03.2020.

- [33] Doğan A., Kenar O., Erdil B. ve Altuncu E. Effect of Different Air Venting Desings on Porosity In High Pressure Aluminum Die Casting Process, 19th International Metallurgy and Materials Congress, ISBN No: 978-605-011258-0, 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, 190195, 2006.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Leyla ŞİMEK

Doğum Yeri ve Tarihi:

E-Posta:

Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Yandal: Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği

Yayın Listesi:

- [1] Y. Birol Ü. Cöcen, L. Şimşek, A. Uzunköprü, N. Yıldar, Investigated Of Carbonated Drinks Packaging Desin And Production, 7. Alüminyum Sempozyumu, 8-9 Ekim 2015, İstanbul.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Bildiri:

- [1] L. Şimşek, M. Farooq, A. Turan, Effects of Smelting, Refining and High Pressure Die Casting Parameters on Porosity Formation in Aluminium Casting Parts, ICENTE'20, 19-21 Kasım 2020, Konya, Türkiye.

