

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ
İLE ÜRETİMİNDE FARKLI GAZ ATMA SİSTEMLERİNİN POROZİTE VE
PROSES VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aykut DOĞAN

Enstitü Anabilim Dalı : **METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU**

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ


ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ İLE
ÜRETİMİNDE FARKLI GAZ ATMA SİSTEMLERİNİN POROZİTE VE PROSES
VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

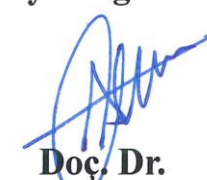
Aykut DOĞAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 22/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi
Ekrem ALTUNCU
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Uğur ÖZSARAC
Üye


Doç. Dr.
Armağan Aziz ARICI
Üye

BEYAN

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

Aykut DOĞAN
22.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm firma olanaklarını kullanmama imkan veren Arpek Arkan Parça Alüminyum Enjeksiyon ve Kalıp San. Tic. A.Ő. firmasına ve değerli yöneticilerine teşekkür ederim. Ayrıca çalışmanın her adımında desteklerini ve fikirlerini esirgemeyen, çalışmaların birer parçası olan yöneticilerim Burak ERDİL, Fuat TOPÇU ve Naci EK MEN 'e, deneysel çalışmalar konusunda bilgi ve tecrübelerini aktararak yardımcı olan Rıdvan ZİRGİLOĞLU, Erhan TÜRKMEN ve Onur KENAR başta olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Sürekli desteklerini hissettiğim ağabeyim Ufuk DOĞAN ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma; Tübitak 1501-Sanayi Arge Projeleri Destekleme Programı (Proje No: 3170668) kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY.....	ix
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi.....	3
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı.....	4
BÖLÜM 2.	
BASINÇLI DÖKÜM TEKNOLOJİSİ.....	7
2.1. Basınçlı Dökümün Avantajları ve Dezavantajları.....	7
2.1.1. Basınçlı Dökümün Avantajları.....	7
2.1.2. Basınçlı Dökümün Dezavantajları.....	8
2.2. Basınçlı Döküm Yöntemleri ve Makineleri.....	8
2.3. Basınçlı Döküm Kalıpları.....	12
2.4. Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Alüminyum Alaşımları.....	13
2.4.1. Alüminyum - Silisyum Grubu Alaşımlar.....	13
2.4.2. Alüminyum - Magnezyum Grubu Alaşımlar.....	14
2.4.3. Alüminyum - Bakır Grubu Alaşımlar.....	15
BÖLÜM 3.	
DÖKÜM KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE POROZİTE.....	16
3.1. Basınçlı Dökümde Porozite Tanımlaması ve Porozite Nedenleri.....	18
3.1.1. Gaz Poroziteleri.....	19
3.1.2. Çekinti Poroziteleri.....	22

BÖLÜM 4.	
GAZ ATMA - VENTİL SİSTEMLERİ.....	27
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
5.1. Simülasyon Çalışmaları	33
5.2. Döküm Denemeleri Deneysel Yöntemleri.....	33
BÖLÜM 6.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	39
6.1. Simülasyon Sonuçları	39
6.2. Döküm Sonrası Analizler.....	42
6.2.1. X-Ray Radyoskopi Sonuçları	42
6.2.2. CT Radyoskopi Sonuçları.....	43
6.2.3. Mikro Analiz Sonuçları.....	44
6.2.4. Verimlilik Analizleri	48
BÖLÜM 7.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

2B Ventil	: İki boyutlu ventil sistemi
3B Ventil	: Üç boyutlu ventil sistemi
CT	: Bilgisayarlı tomografi
HPDC	: Yüksek basınçlı döküm yöntemi
MV	: Mekanik vakum valfi
OM	: Optik mikroskop
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Alüminyum güç aktarma bileşenleri basınçlı döküm pazar analizi.....	3
Şekil 1.2: Üretim hızı - döküm ağırlığına göre döküm proseslerinin karşılaştırılması. 4	4
Şekil 1.3: Ülkelerin CO ₂ emisyon hedefleri.....	5
Şekil 1.4: OEM firmaların CO ₂ emisyon hedefleri.....	5
Şekil 1.5: Araç başına alüminyum bileşen oranları	6
Şekil 1.6: Avrupa'da üretilen araçlarda alüminyum kullanım miktarı.....	6
Şekil 2.1: Sıcak kamaralı döküm makine şeması.....	10
Şekil 2.2: Soğuk kamaralı döküm makinesi kesiti.....	10
Şekil 2.3: Soğuk kamaralı döküm makinesi proses çevrimi	10
Şekil 2.4: Basınçlı döküm çevrimi faz eğrisi	11
Şekil 2.5: Basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.1: Basınçlı dökümde porozitenin kök sebepleri.....	19
Şekil 3.2: Gaz porozitesi	20
Şekil 3.3: Alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü	21
Şekil 3.4: Kovan içerisinde pistonun hareketine bağlı türbülanslı akış şematığı.....	22
Şekil 3.5: Bifilm oluşum mekanizması: yüzey türbülansı	22
Şekil 3.6: (Üst) Katılama aralığı dar alaşım. (Alt) katılama aralığı geniş alaşım	23
Şekil 3.7: Çekinti Porozitesi.....	24
Şekil 4.1: Hava cebi örnekleri.....	28
Şekil 4.2: 2 boyutlu ventil sistemleri	28
Şekil 4.3: Mekanik vakum valfi.....	29
Şekil 4.4: 3 boyutlu ventil sistemi.....	30
Şekil 4.5: Farklı tipte ventil sistemleri	30
Şekil 5.1: Deneysel çalışma şematığı.....	32
Şekil 5.2: Ventil sistemleri kalıp adaptasyon tasarım çalışmaları.....	33
Şekil 5.3: Karakterizasyon çalışmaları akış şeması	35
Şekil 5.4: Strikowestofen ergitme fırını	36

Şekil 5.5: Gaz alma ünitesi	36
Şekil 5.6: Buhler yüksek basınçlı döküm hücresi	37
Şekil 6.1: Mekanik valfin giriş kesitinde (a) metal akış hızı (b) dolun sıcaklıkları..	40
Şekil 6.2: 3B ventil giriş kesitinde (a) metal akış hızı (b) dolun sıcaklıkları.....	40
Şekil 6.3: 2B ventil giriş kesitinde (a) metal akış hızı (b) dolun sıcaklıkları.....	40
Şekil 6.4: Ventil sisteminin dolunu sırasında metal akışı; a) 1 ms b) 2 ms C) 3 ms	41
Şekil 6.5: X-Ray radyoskopi görüntüleri (a) Mekanik valf (b) 3B ventil.....	42
Şekil 6.6: X-Ray radyoskopi görüntüleri (a) 2B ventil (b) 3B ventil.....	42
Şekil 6.7: CT radyoskopi görüntüleri (a) Mekanik valf (b) 3B ventil	43
Şekil 6.8: CT radyoskopi görüntüleri (a) Mekanik valf (b) 2B ventil	43
Şekil 6.9: Parça içerisindeki porozite oranları (1. Numune).....	44
Şekil 6.10: Parça içerisindeki porozite oranları (2. Numune).....	44
Şekil 6.11: Mikroskop görüntüleri a) Numune 1.1 b) Numune 1.2	45
Şekil 6.12: Mikroskop görüntüleri a) Numune 2.1 b) Numune 2.2	46
Şekil 6.13 SEM görüntüsü: a) Numune 1.1 b) Numune 1.2	47
Şekil 6.14: SEM görüntüsü a) Numune 2.1 b) Numune 2.2	47
Şekil 6.15: Yıllık duruş analizi (Mekanik valf-3B ventil)	48
Şekil 6.16: Porozite ret oranları (Mekanik valf-3B ventil)	49
Şekil 6.17: Porozite/toplam hata oranları (Mekanik valf-3B ventil).....	49
Şekil 6.18: Porozite ret oranları (2B ventil-3B ventil).....	50
Şekil 6.19: Porozite/toplam hata oranları (2B ventil-3B ventil)	50

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1: İ hataların sınıflandırılması	17
Tablo 3.2: Yüzey hatalarının sınıflandırılması.....	17
Tablo 3.3: Geometrik hataların sınıflandırılması	17
Tablo 5.1: Simülasyon çalışmalarında kullanılan döküm parametreleri.....	33
Tablo 5.2: Kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları	34
Tablo 5.3: Döküm parametreleri	35
Tablo 5.4: Numune tanımlamaları	35
Tablo 6.1: Ventil sistemlerinin çalışma parametreleri	39
Tablo 6.2: CT sonuçlarına göre porozite oranları	44
Tablo 6.3: Duruş zamanları.....	48

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ İLE ÜRETİMİNDE FARKLI GAZ ATMA SİSTEMLERİNİN POROZİTE VE PROSES VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

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 döküm yöntemiyle (HPDC) 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 (gaz, çekinti) içermektedir. Otomotiv sektöründe güvenilirlik beklentilerinin ve müşteri şartnamelerinin ağırlaşması nedeniyle, özellikle gaz porozite seviyeleri 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. Basınçlı döküm işlemlerinde kullanılan ventil (gaz atma) sistemlerinin performansı proses kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tez çalışmasında, yüksek basınçlı döküm sisteminde, farklı tasarımlara sahip üç farklı gaz atma sisteminin karşılaştırmalı performansı iki farklı basınçlı döküm alüminyum alaşımı (AlSi9Cu3-Fe, AlSi10Mg-Fe) parça üzerinde incelenmiştir. Farklı geometrik tasarımlara ve çalışma mekanizmalarına sahip ventil sistemlerinin ergiyik metal akış simülasyonları MagmaSoft HPDC yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen döküm parçaların kalite analizleri için X-Ray radyoskopi, bilgisayarlı tomografi (CT) ile porozite bölgeleri, porozite oran ve dağılımları belirlenmiştir. Mikroskobik incelemelerde (optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu) porozite morfolojileri ve boyutları tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında gaz porozitesi nedenli hata, duruş verileri bir yıl boyunca ERP sistemi kullanılarak takip edilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda; üç boyutlu ventil sisteminin, iki boyutlu ventil ve mekanik valf sistemlerine göre daha verimli olduğu görülmüştür. 3B ventil sisteminin üretim duruşlarını ve döküm hata oranlarını önemli oranda azalttığı gözlemlenmiştir. Mikroskobik incelemelerde 3B ventil sisteminin kullanıldığı proseslerde porozite nedenli döküm hata boyutlarının 100µm 'nin altına düşürüldüğü tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Porozite, ventil, alüminyum, yüksek basınçlı döküm

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT AIR VENTING METHODS ON POROSITY AND PROCESS EFFICIENCY IN THE HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS OF ALUMINUM ALLOYS

SUMMARY

Aluminum alloys have a high utilization rate in aerospace, defense and automotive industries, especially where weight reduction is extremely important. Pressure casting technology is a production method that widely used in casting aluminum alloys in terms of suitability for mass production. Aluminum-silicon alloyed parts produced by high pressure die casting (HPDC) generally contain gas and shrinkage porosity in different percentages and sizes due to evacuation problems of gases trapped during rapid injection of molten metal into the mold cavity. Due to the increase in reliability and customer specifications in the automotive industry, it is desired to reduce the gas porosity levels to specific critical levels. Optimizing the appropriate mold design and casting process parameters plays an important role in reducing gas porosity by facilitating the evacuation of air from the mold cavity. The performance of the vent (gas evacuation) systems used in the pressure die casting processes, significantly affects the process quality. In this thesis, the comparative performance of three different gas discharge systems with different designs in the high-pressure die-cast system were examined on two different pressure die cast aluminum alloys (AlSi9Cu3-Fe, AlSi10Mg-Fe). The liquid metal flow simulations of the venting systems with different geometric designs and operating mechanisms were realized with MagmaSoft HPDC software. Regions, percentages and distributions of porosities on the examined cast parts were determined by X-Ray radiography and computed tomography (CT) methods. Porosity morphology and dimensions were investigated by microscopy studies by optical microscope and scanning electron microscope. Within the scope of the thesis, defects and downtime data related to gas porosity were monitored annually by using ERP system. As a result of experimental studies, the 3D venting system was found to be more efficient in order to reduce gas porosity than the 2D venting and mechanical venting systems. It has been observed that the 3D venting system significantly reduces production downtime and casting defect percentages. In the microscopic studies, it has been determined that the size of the porosity defects are reduced below 100 μ m in the cast parts that produced by 3D venting system.

Keywords: Porosity, vent, aluminum, high pressure die casting

BÖLÜM 1. GİRİŞ

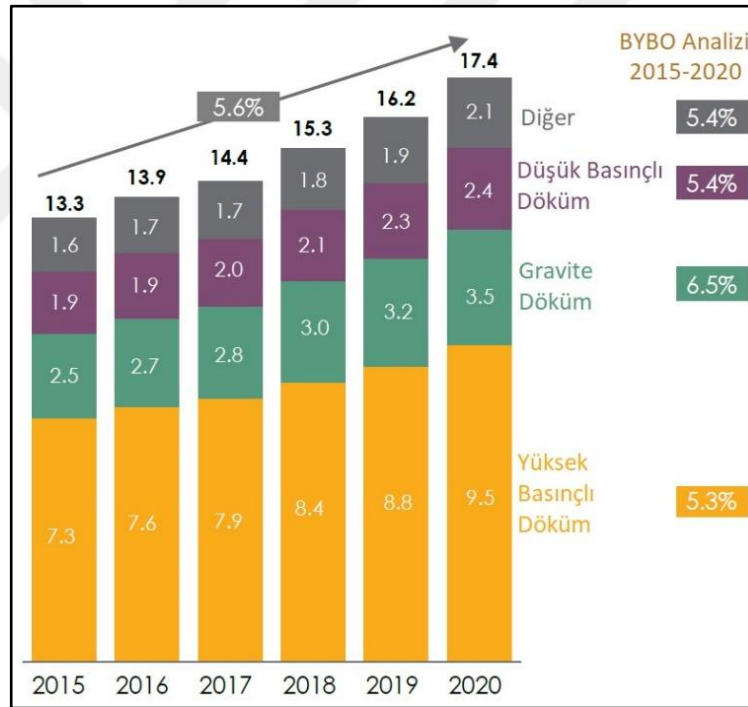
Alüminyum döküm parça kullanımı; otomotiv endüstrisi, savunma sanayi, uzay ve havacılık sanayi gibi yüksek kalite beklentisi gerektiren sektörlerde kullanımı giderek artmaktadır. Döküm parça kullanılan sistemlerin kalitelerinin ve performanslarının her geçen gün gelişmesi ile alüminyum alaşımlarının kaliteleri daha önemli hale gelmiştir. 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 riskleri ve dezavantajları bulunmaktadır. Alüminyum basınçlı döküm yönteminde karşılaşılan problemleri çözmek için kararlı, 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 sayılabilmektedir. 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 porozitedir. Yüksek basınçlı döküm yoluyla üretilen parçada porozite; mekanik, sızdırmazlık gibi özelliklerde malzeme hatalarına 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 tür porozite dökümün mekanik dayanımını olumsuz etkilemektedir. Çekinti porozitesi çoğunlukla katılaşma nedenli bir porozite oluşumuna neden olurken, 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. Bu tez çalışmasında, yüksek basınçlı döküm prosesinde en önemli gaz porozitesi kaynağı olan sıkışmış hava ve gazların kalıp boşluğundan tahliyesi için kullanılan farklı gaz atma (ventil) sistemlerinin performansı incelenmiştir. Tez kapsamında AlSi10Mg(Fe) ve AlSi9Cu3(Fe) alaşımlarından yapılan otomotiv kompresör ve fren parçası kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için farklı gaz atma tasarımların eşdeğer döküm şartlarında dolum simülasyonları MagmaSoft HPDC programı ile incelenmiştir. Daha sonra AlSi10Mg(Fe) alaşımlı kompresör parçası kalıbında mekanik valf ve 3 boyutlu ventil tasarımlarının adaptasyonu, AlSi9Cu3(Fe) alaşımlı fren parçasında 2 boyutlu ve 3 boyutlu ventil tasarımlarının adaptasyonu yapılarak döküm denemeleri gerçekleştirilmiştir. Döküm parçaların kalitesini ölçmek için X-Ray ve CT Radyoskopi muayenesi, optik mikroskop ve SEM mikroskopi analizleri

gerçekleştirilmiş ve yorumlanmıştır. Üretim performanslarını ölçmek için, ERP programında toplanan üretim verileri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler ve bulgular detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

1.1. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi

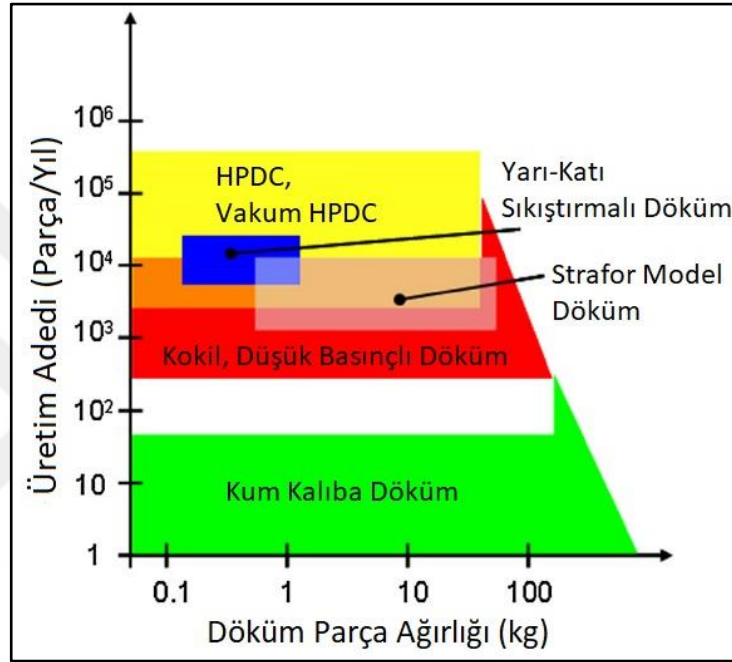
Basınçlı döküm prosesi ülkemizde ve dünyada hızla yaygınlaşan ve gelişen bir üretim teknolojisine sahiptir. Alüminyum güç aktarma organları basınçlı döküm pazarı 2015 yılında 13,3 milyar dolar seviyesine ulaşmaktadır ve yılda ortalama %5,6 oranında büyümektedir. 2020 yılına kadar bu rakamın 17,4 milyar dolara ulaşacağı öngörülmektedir (Filho ve Wili, 2016).



Şekil 1.1: Alüminyum güç aktarma bileşenleri basınçlı döküm pazar analizi (Filho ve Wili, 2016).

Döküm teknolojilerinde sürekli gelişen teknoloji ve sektörün büyümesi rekabeti de artırmaktadır. Alüminyum basınçlı döküm diğer geleneksel döküm yöntemlerine (kum döküm, kokil döküm, hassas döküm gibi) göre birçok açıdan üstünlük sağlamaktadır. Kullanımıyla birlikte artan kalite beklentileri, döküm hatalarını ve birim maliyetlerini azaltıcı kontrol ve simülasyon faaliyetlerini artırmaktadır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi; iyi ürün kalitesi, yüksek hassasiyeti, dar toleranslarda, karmaşık

geometrilerde ve ince kesitlerde seri halde üretim verimliliği ve çok yönlü ekonomik avantajlarının bulunmasından dolayı en yaygın kullanılan yöntemlerinden bir tanesidir. Ancak yüksek basınçlı döküm makinalarının ve kalıplarının ilk yatırım maliyetinin yüksek olması dolayısıyla, sadece üretim adetlerinin yüksek partiler halinde yapıldığı proseslerde avantajlı bir yöntem olmaktadır (Şekil 1.2) (Bonollo, Gramegna ve Timelli, 2015).

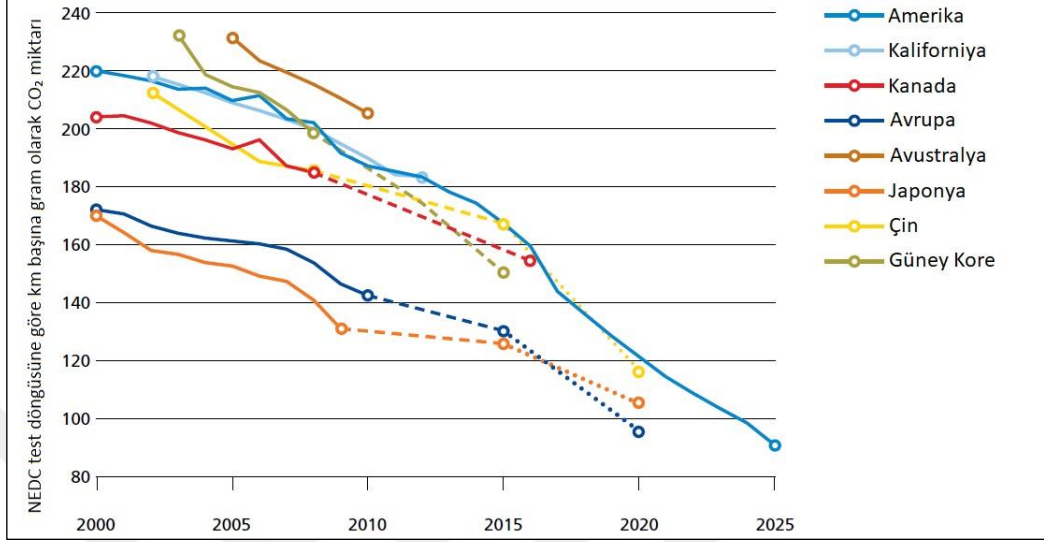


Şekil 1.2: Üretim hızı - döküm ağırlığına göre döküm proseslerinin karşılaştırılması (Bonollo ve diğerleri, 2015)

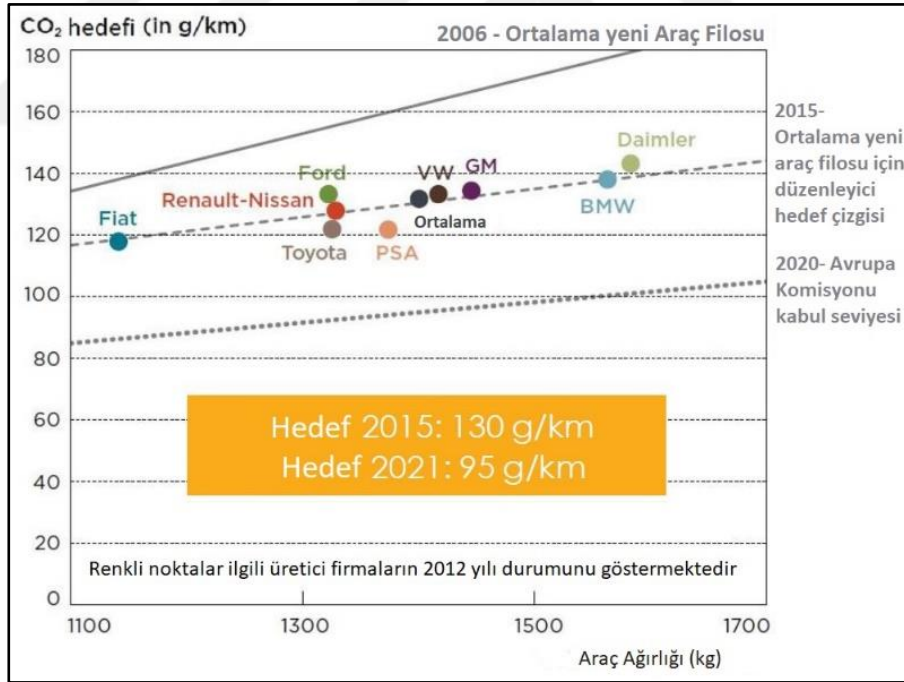
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı

Basınçlı döküm alaşımları içerisinde en yaygın kullanım oranına sahip alüminyum alaşımlarının hafif araçlardaki global kullanımının önümüzdeki 10 yıl içinde %70 oranında artması beklenmektedir. Petrol ve türevi enerji kaynaklarının gün geçtikçe kısıtlı hale geliyor olması ve ayrıca karbondioksit emisyonunun çevreye olan etkileri, enerji verimliliği çalışmalarını önemli kılmaktadır. Petrol ve türevlerine bağımlı olan otomotiv sektöründe son yıllarda artan standart ve gereklilik seviyeleri, otomotiv sektörünün parça hafifleterek yakıt kullanımını azaltma üzerindeki çalışmalarını artırmaktadır. Şekil 1.3'te ülkelerin CO₂ emisyonu hedefleri verilmektedir. Bu hedefler paralelinde; orijinal parça üreticileri kendi hedeflerini belirleyerek

çalışmalarını hızlandırmışlardır (Şekil 1.4) (Dündar ve Güngör t.y.; European Aluminium Association [EAA], 2012).



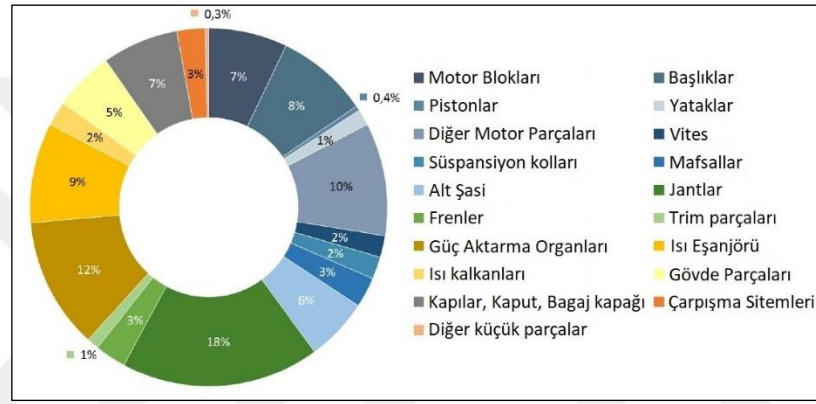
Şekil 1.3: Ülkelerin CO₂ emisyon hedefleri (EAA, 2012)



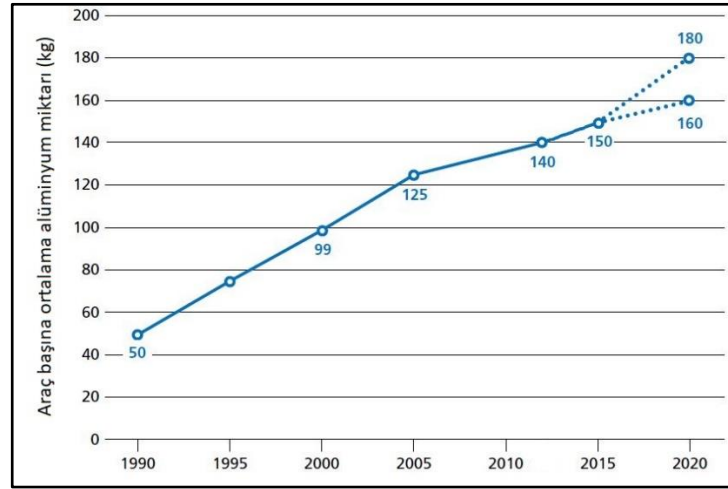
Şekil 1.4: OEM firmaların CO₂ emisyon hedefleri (EAA, 2012)

Araçların toplam ağırlığının %15 oranında azaltılması yakıt tüketiminde yaklaşık %25 oranında iyileştirme sağlayabilmektedir. Öncelikli ağırlık azaltma çalışmaları çelik parçaları alüminyum parçalar ile değiştirme yoluyla başlamış olup alüminyum döküm

parçalara talep artmıştır. Otomobillerde ağırlık azaltma, CO₂ emisyonlarını azaltmak açısından önemli olmaktadır. Tüm bu çalışmaların sonucu alüminyum döküm proseslerini de önemli hale getirmektedir. Bir otomobilde alüminyum parçaların %50'sini döküm parçalar oluşturmaktadır. 2016 yılı toplam Avrupa otomobil üretimi verilerine göre araç başına ortalama alüminyum bileşen içeriği Şekil 1.5 'de gösterilmektedir. Gelecek yıllar için yapılan tahminlere dayanarak, araç başına alüminyum içeriğinin 2020 yılına kadar yaklaşık olarak 170 kg, 2025 yılına kadar da 190 kg seviyelerine ulaşması beklenmektedir (Why is aluminum die casting, t.y.).



Şekil 1.5: Araç başına alüminyum bileşen oranları (European Aluminium Association [EAA], 2016)



Şekil 1.6: Avrupa'da üretilen araçlarda alüminyum kullanım miktarı (Bonollo ve diğerleri, 2015)

BÖLÜM 2. BASINÇLI DÖKÜM TEKNOLOJİSİ

Basınçlı döküm, sıvı metalin yüksek hızda kalıp boşluğunun doldurulup, yüksek basınç altında katılaştırılmasına dayanan seri üretime uygun bir döküm tekniğidir. Diğer döküm prosesleriyle karşılaştırıldığında, boyutsal tolerans hassasiyeti oldukça yüksek, otomasyona ve seri üretime uygun bir proses olması kullanım alanını genişletmektedir. Ayrıca; ince cidarlı ve karmaşık şekillerin dökülmesine imkan veren bir prosesdir. Basınçlı döküm yöntemi ile 25 kg ağırlığına kadar birçok parça üretilmektedir (ASM Handbook, No:15, 1998).

İlk manuel basınçlı döküm makinelerinin patentleri, proses hızını artırmak isteyen, Sturgiss (1849) ve Barr (1852) tarafından alınmıştır. İlerleyen yıllarda; Ottmar sıvı metalin piston yardımıyla kalıbı doldurması esasına dayanan otomatik döküm makinesini geliştirmiştir. Günümüz basınçlı döküm tekniğine uygun basınçlı döküm makinesinin patenti 1905 yılında H.H. Doehler tarafından alınmıştır. Doehler'in buluşundan 2 yıl sonra Wanger sıcak kamaralı basınçlı döküm makinesini ve tekniğini tanıtmıştır. Wanger 'in makinası ilk kez 2. Dünya Savaşı sırasında kullanılmıştır. Prosesin başarısı kanıtlandıktan sonra ticari alüminyum alaşım parçaları üretilmeye başlanmıştır (Doehler, 1974; Şirin, 2010).

2.1. Basınçlı Dökümün Avantajları ve Dezavantajları

2.1.1. Basınçlı Dökümün Avantajları

Basınçlı döküm; boyutsal toleransı düşük, talaş kaldırma ve malzeme maliyetlerinin az olması, yüksek parti adetlerinde üretime imkân vermesi gibi sebeplerden dolayı ticari olarak yüksek kullanım oranlarına sahip bir tekniktir (Uludağ, 2007; Aslan, 2007; Vanlı, 2007; Şirin, 2010). Avantajları kısaca maddeler haline tarif edilmiştir;

- Kompleks yapılı parçalar üretilebilmektedir.
- İnce cidarlı ve boyutsal hassasiyeti fazla olan parçalar dökülebilir.
- İmalat hızı yüksektir.
- Yüzey işlemi çok az gerekir ya da hiç gerekmebilir.
- Yüksek mekanik özelliklere sahip parça üretilmektedirler.

2.1.2. Basınçlı Dökümün Dezavantajları

Basınçlı dökümün dezavantajları şu şekilde sıralanabilmektedir (Aslan, 2007; Gözen, 2007);

- Döküm boyutları sınırlıdır.
- Kalıp tasarımı zordur. Dökümü yapılacak parçanın salkımı, yolluklarının, ventillerinin yanlış tasarlanmasına bağlı olarak döküm hataları ile karşılaşabilmektedir.
- İlk yatırım maliyetleri çok yüksektir.
- Alaşım sınırlaması bulunmaktadır.

2.2. Basınçlı Döküm Yöntemleri ve Makineleri

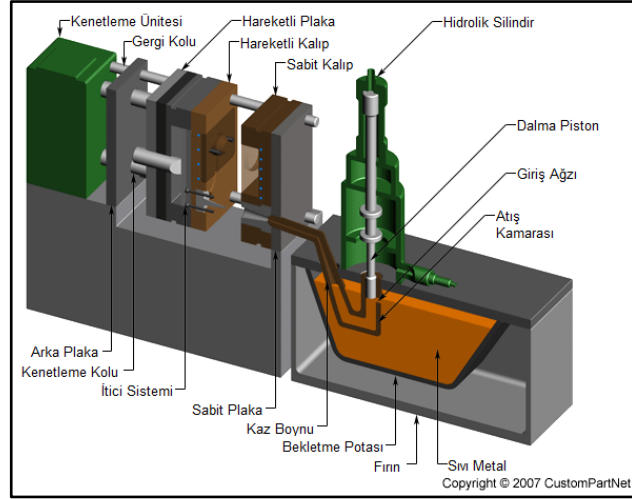
Basınçlı döküm, üretim yöntemine göre Düşük Basınçlı Döküm (Low Pressure Die Casting), Yüksek Basınçlı Döküm (High Pressure Die Casting), Vakum Döküm (Vacuum Casting), Sıkıştırma Döküm (Squeeze Casting) olarak sıralanabilmektedir (Uludağ, 2007).

Basınçlı döküm makineleri, metal enjeksiyon sistemlerine göre sıcak kamaralı (hot chamber) ve soğuk kamaralı (cold chamber) olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde sıcak kamara tipi makineler; yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde ise soğuk kamaralı makineler kullanılmaktadır (Doehler, 1974).

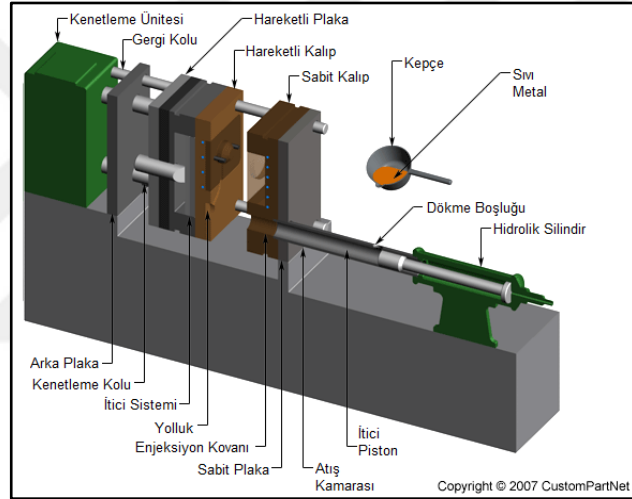
Sıcak kamaralı basınçlı döküm makineleri, ergime sıcaklığı 327°C olan kurşun, 420°C olan çinko, 232 °C olan kalay gibi ergime sıcaklıkları düşük olan malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Alüminyum gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımları, sıcak kamaralı makinalar kullanılarak dökmek mümkün olmamaktadır. Ergimiş alüminyum, kamara malzemesi olan çelik ile temas ettiği zaman, çelik çekme davranışı gösterebilmektedir ve alüminyum alaşımları ile çelik arasında gerçekleşen reaksiyon dolayısıyla, alaşımın içine demir nüfuz etmesine neden olabilmektedir (Şirin, 2010).

Alüminyum alaşımları yüksek basınçlı döküm prosesinde soğuk kamaralı döküm makineleri kullanılarak üretilmektedir. Bu sistemin, sıcak kamaralı sisteme göre avantajı sıvı alüminyumun kovanı etkilememesidir. Çünkü metal basınçlı döküm fazlarından hemen önce kovan içerisine boşaltılarak proses gerçekleştirilmektedir (Şirin, 2010). Bu yöntemde, ergimiş alaşım silindirin içerisinde çok kısa süre çelikle temas etmektedir. Böylece alüminyumun kovan malzemesi ile reaksiyon olasılığı en aza düşürülmektedir (Aslan, 2007).

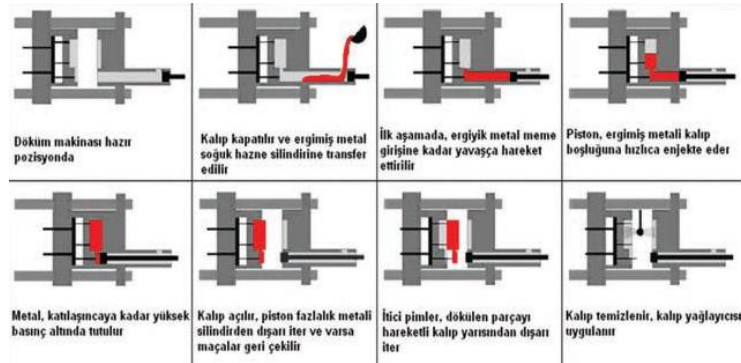
Soğuk kamaralı döküm yöntemi ile ergime sıcaklığı 665 °C olan alüminyum, 649 °C olan magnezyum, 1083 °C olan bakır gibi ergime sıcaklıkları yüksek olan alaşımların dökümü yapılmaktadır. Ergimiş alüminyumun kovanın içerisine dökülmesi ve bir piston yardımıyla kalıplara enjekte edilmesi ile yüksek basınç altında katılaştırılmasını temel alan basınçlı döküm yöntemidir. Soğuk kamaralı döküm makinaları yatay ve düşey olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Doehler, 1974; Gözen, 2007; Uludağ, 2007; Şirin, 2010).



Şekil 2.1: Sıcak kamaralı döküm makine şeması (Şirin, 2010; Die Casting, t.y.)



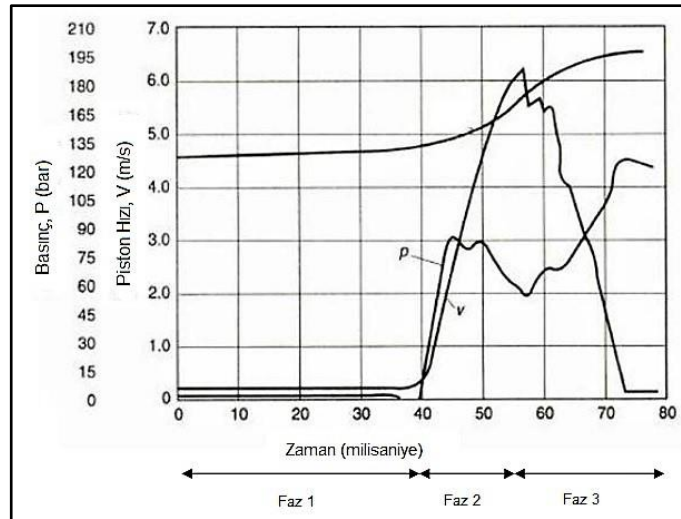
Şekil 2.2: Soğuk kamaralı döküm makinesi kesiti (Şirin, 2010; Die Casting, t.y.)



Şekil 2.3: Soğuk kamaralı döküm makinesi proses çevrimi (Vanlı, 2007)

Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm; 1. Faz (ön dolun fazı, 2. Faz (enjeksiyon fazı) ve 3. Faz (sıkıştırma-ütüleme fazı) olmak üzere üç fazda gerçekleşmektedir. Döküm

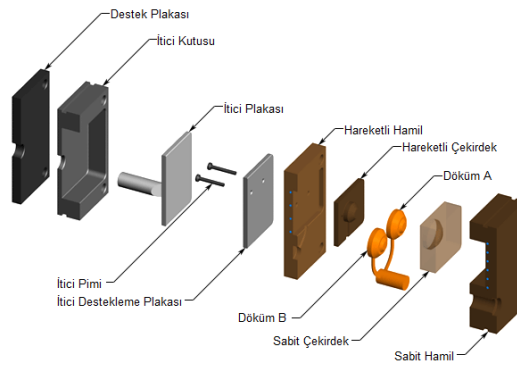
için parça, yolluk ve topuk bölümlerinin hacmi yeteri kadar sıvı metal alabilen kovana (enjeksiyon silindirine) yer çekimi etkisiyle (gravity) doldurulmaktadır. Dolumu takiben 1.faz olarak bilinen ön dolum fazı başlamaktadır. Hareket öncesi kovandaki sıvı metal hacmi, kovan hacminin %40 ile %60 aralığında olması gerekmektedir. Bu doluluk oranındaki kamarada ilerleyen piston için kritik hız 0,52 m/s mertebesindedir. Bu fazdaki pistonun hareket hızı, kalıp boşluğunun doldurulduğu 2.faza göre oldukça düşüktür. Enjekte edilen sıvı metal alaşımının kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğinden “kritik hız” olarak adlandırılmaktadır. 1.faz sıvı metalin kovan içerisinde tam kütük oluşturuncaya kadar geçen zaman boyunca devam etmektedir. Sıvı metal mümkün olduğunca türbülanssız bir şekilde kovandaki ve yolluklardaki hareketini tamamladıktan sonra sıra 2.faz başlamaktadır. Bu adım sıvı metalin kalıp boşluğuna yüksek hız ve basınçta enjekte edilmesini tanımlamaktadır. 2.faz başlangıcı topuk kısmı ve giriş kesitleri olmak üzere iki farklı yerden başlatılabilmektedir. 3.faz (Sıkıştırma Fazı) Kalıp metal ile doldurulduktan sonra enjeksiyon sisteminin metal üzerine, enjeksiyon parçası katılaşıncaya kadar uyguladığı yüksek basıncı ifade etmektedir. 3. Fazda amaç katılaştıran enjeksiyon parçasında oluşabilecek çekme boşluklarının azaltılmasıdır. 3. Faz basıncı; topuk, yolluk ve döküm boşluğu tamamen doldurulduktan sonra sıvı metale topuk bölgesinden piston yardımıyla iletilmektedir.



Şekil 2.4: Basıncı döküm çevrimi basınç-faz eğrisi (Okcu, 2011)

2.3. Basınçlı Döküm Kalıpları

Basınçlı döküm yoluyla üretilen parçanın kalitesini etkileyen ve üretim aksamalarına neden olan en önemli proses bileşeni metal kalıplardır. Uygun olmayan kalıp tasarımı, uygun olmayan kalıp malzemesinin seçimi ile döküm hatalarının oluşma riski artmaktadır. Kalıp hatalarıyla üretimin aksamaması için kalıbın; termal gerilme, yorulma, çatlama-kırılma, korozyon-erozyon etkilerine karşı dirençli olması gerekmektedir. Basınçlı döküm proseslerinde kalıp sistemlerinin kompleks bileşenlere sahip olması, makine parametrelerine ve parça geometrisinin kalıplamaya uygunluğu yüksek önem arz etmektedir. Salkım tasarımı yapılırken yolluk giriş kesit alanlarının ve konumunun, metal akışı sırasında türbülans yaratmaması ve kalıp boşluğunda dolmuş ile ilgili hatalara yol açmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Parça salkım tasarımı sırasında son dolmuş bölgelerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Birden fazla göz sayısına sahip kalıplarda sıvı metalin her bir göze aynı anda dolmaya başlayacak şekilde tasarlanması, dolmuş parametrelerinin ayarlanabilmesi açısından oldukça önemlidir. Kalıp tasarımında gaz çıkışları, hava cepleri gibi kalıp bileşenlerinin homojen ve kabul edilebilir porozite seviyelerine sahip döküm parçalar elde edilmesi için doğru konumlandırılması gerekmektedir. Kalıp tasarımında risk analizinin doğru yapılmaması kalıp maliyetlerinin ve tasarım işçiliğinin yüksek maliyetlere çıkmasına neden olmaktadır. Tasarım sürecinin zorluğu ve önemi simülasyon çalışmalarını daha da önemli hale getirmektedir. Kalıp imalatına başlamadan önce salkımın simülasyon çalışmaları ile optimize edilmesi döküm hatalarını azaltmada önemli rol oynamaktadır (Kenar, Dogan, Topcu ve Altuncu, 2018).



Şekil 2.5: Basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi

Basınçlı döküm kalıpları, parça tasarımının özelliklerini taşıyacak kalıp boşluğuna sahip iki parçadan oluşturulmaktadır. Kalıp bileşenlerinden biri sabit (hareketsiz) kalıp yarımı, diğeri hareketli kalıp yarımı olarak tanımlanmaktadır. Ergimiş metalin kovan ile kalıp arasındaki bağlantısı sabit kalıp üzerinde bulunan topuk kısmı yardımıyla yapılmaktadır. Parçanın kalıp çeliğinden çıkarılamayacak formları elde etmek için maçalar kullanılmaktadır. Metal kalıba enjekte edildiğinde kalıp boşluğu içerisindeki havanın çıkması için havalandırma, gaz atma kanalları tasarlanmaktadır. Enjeksiyon sırasında kalıp boşluğunda bulunan hava ve gazlar tahliye edilemez ise döküm hatalarına yol açmaktadır (Doehler, 1974; Gözen, 2007; Aslan, 2007).

Basınçlı dökümde, alüminyum gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların üretiminde kalıplar sıcak iş takım çeliklerinden yapılmaktadır (X40CrMoV51, 1.2344, Dievar). Bu çelikler ısıl işlem uygulanarak 44 – 48 HRc sertliğe çıkartılmaktadır. Kalıp elemanlarının yüzeylerine, aşınmaya karşı daha dirençli olması için nitrüleme işlemi uygulanmaktadır (Doehler, 1974; Gözen, 2007).

2.4. Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Saf alüminyum yumuşak ve düşük mukavemetlidir. Alüminyumun mekanik özelliklerini ve dökülebilme özelliklerini arttırmak için yaygın olarak silisyum, magnezyum ve bakır elementleri kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları, genellikle otomotiv ve havacılık endüstrileri tarafından kullanılmaktadır. Alüminyumun diğeri metaller ile yaptığı alaşımlar, Al-Si, Al-Mg, Al-Cu olmak üzere üç temel alaşım grubu altında toplanmaktadır (Campbell, 2011).

2.4.1. Alüminyum - Silisyum Grubu Alaşımlar

Endüstriyel anlamda en yaygın kullanılan döküm alaşımı silisyum bazlı alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyum alaşımlarının içerisinde silisyumun yüksek olması ile alaşımın akışkanlık özelliği artmaktadır ve iyi dökülebilirlik özelliklerini sağlamasına yardımcı olmaktadır. Alüminyum alaşımlarının barındırdığı silisyum miktarının artması, termal genleşme katsayısının düşmesine sebep olmaktadır. Silisyumun

alaşıma kattığı bu özellik sıcak yırtılma veya sıcak çatlama problemlerinin oluşma riskini artırmaktadır. Silisyumun oluşturduğu yüksek sertlikte fazlar, aşınma direncini artıracak yönde rol oynamaktadır.

Silisyumun elementinin mukavemet artırma özelliği düşüktür. Ancak Cu, Ni ve Mg ile bir arada bulunduğu alaşımlarının, ısı işlem ile sertleştirilebilir alaşımlar olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte, silisyum ve magnezyumun birlikte bulunduğu alaşımlarda Mg_2Si fazı oluşmaktadır ve alüminyum döküm ürünlerde sertlik sağlamaktadır. En yaygın kullanılan mühendislik alaşımlarından biri, Al-7Si-0.4Mg alaşımıdır. Al-Si alaşımlarında bir diğer sertlik artırma mekanizması Cu ilavesi ile gerçekleşmektedir ve bu alaşımda $CuAl_2$ fazının tane sınırına çökmesiyle sertlik artmaktadır. Fakat yüksek Cu oranı alaşımın korozyon direncini düşürmektedir. Mekanik özellikler, alaşımın bileşiminden çok silisyum içeren fazın şekli ve dağılımına bağlıdır. Küresel ötektik fazlar mukavemeti arttırmaktadır. İğnemsî yapıda silisyum içeren fazlar çekme mukavemetini artırmakla birlikte darbe ve yorulma mukavemetini düşürmektedir.

Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde dökme demir uygulamalarının yerine kullanımının artması silisyumun aşınma direncini artırması ile mümkün olmaktadır. Hiperötektik Al-Si alaşımları; kompresör, piston, şanzıman bileşenlerinde ve alüminyum motor bloklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Apelian, 2009; Şirin, 2010; Campbell, 2011)

2.4.2. Alüminyum - Magnezyum Grubu Alaşımlar

Magnezyum (Mg) elementi alüminyum alaşımlarında döküm parçaların mukavemetinin artırılması ve sertleştirilmesi için kullanılabilir. Al-Mg alaşımlarında yüksek mukavemet özelliği Mg_2Si fazının oluşmasıyla artmaktadır. Al-Mg alaşımları, basınçlı döküm proseslerinde, yüksek mukavemet ve korozyon direnci istenilen uygulamalarda kullanılabilir. İkili Al-Mg bileşimlerinin mukavemeti, genel olarak ısı işlem ile geliştirilememektedir. Al-Mg alaşımlarının düşük silisyum içermesi, sınırlı dökülebilirliğe sahip olmasına ve sıcak yırtılma eğiliminde olmasına

sebeptir. Mg içeriğinin ağırlıkça %10 gibi yüksek olduğu alaşımlar önemli korozyon direncine sahip olmaktadır. Bu alaşımlar sıvı halde bulunduğunda diğer elementlere karşı afinitesi yüksek olduğu için bazı döküm tekniklerinde inhibitörler kullanılmaktadır. Al-Mg grubu alaşımların kullanılabilirliğini artıran bir diğer özellik ise işlenebilirlik özelliklerinin yüksek olmasıdır (Apelian, 2009; Campbell, 2011).

2.4.3. Alüminyum - Bakır Grubu Alaşımlar

Alüminyum alaşımlarının içerisinde yüksek bakır oranı, diğer alaşım elementlerine oranla çok yüksek mukavemet ve sertlik etkisi göstermektedir. Bakır alüminyum alaşımlarında kullanılan en eski alaşım elementi olarak bilinmektedir. Matris sertliğini artırma üzerinde de etkisi olan bakır alüminyum alaşımlarının işlenebilirliğini arttırmakta olup, işleme talaşının küçük olmasını ve iyi işleme yüzeylerin oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ancak bakır elementi korozyon direncini azaltmaktadır. Alüminyumun endüstrinde bilinen ilk Al-Cu döküm alaşımı ağırlıkça %8 Cu içeren alaşımdır. Ticari saflıktaki alüminyuma Cu ilavesi ile yapılan bu alaşım dökülebilirlik özelliğinin zayıf olmasına rağmen uzun yıllar kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda bakır oranı azaltılarak, silisyum ilavesi ile akışkanlık özelliği kazandırılmış alaşımlar kullanılmaya başlanmıştır. Cu alaşımı Al-Si grubu alaşımlarda yüksek oranlarda günümüzde de kullanılmaktadır. En önemli basınçlı döküm alaşımlarından AlSi9Cu3(Fe), AlSi8Cu3(Fe) gibi alaşımların içerisinde %3,5 'e kadar Cu bulunabilmektedir. Ancak korozyon direncinin yüksek olması beklenen otomotiv fren grubu elemanları gibi uygulamalarda ancak kaplama uygulamaları ile kullanılabilirler (Apelian, 2009; Şirin, 2010).

BÖLÜM 3. DÖKÜM KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE POROZİTE

Alüminyum döküm parçaların; otomotiv endüstrisi, savunma sanayi, uzay ve havacılık sanayi gibi yüksek kalite beklentisi gerektiren sektörlerde kullanımının artarak devam etmesiyle, yüksek kaliteli parça üretimi çok büyük önem kazanmıştır (Dispınar, 2005; Dispınar ve Campbell, 2009; Campbell, 2011). Alüminyum basınçlı döküm yönteminde karşılaşılan problemleri çözmek için kararlı, sürdürülebilir kalite kontrol gerekmektedir. Alaşımın ergitilip dökülmesinden, metal enjeksiyon işleminin gerçekleşmesine kadar 50'den fazla parametre dökümün kalitesine olumsuz yönde etki edebilmektedir. Temel olarak, sıvı metal kalitesini belirleyen üç önemli özellik sayılmaktadır, bunlar; kalıntı elementlerinin kontrolü, çözünmüş gazların tahliyesi ve metalik olmayan inklüzyonların giderilmesidir (Dispınar, 2005). Inklüzyonlar, alüminyum alaşımlarında kalıntı gerilmeler oluşturmaktadır ve parçalar üzerinde kalitesizlik yaratmaktadır (Tan, 2011). Oksitler ve oksit filmleri, alüminyum alaşımlarının ergiyiklerinde en sık görülen inklüzyonlardır. Ergitme potasına her katı şarj ilave edildiğinde oksitler türbülans etkisiyle ergiyiğin içine karışmaktadır. Bu şekilde bu oksit filmleri katılma sırasında tanesınırılarına çökelerek nihai döküm içerisinde curuf benzeri inklüzyonlar olarak bulunmaktadır (Dispınar, 2005).

AIM (İtalyan Metalurji Derneği), basınçlı döküm hatalarını 3 farklı seviye içerisinde tanımlamaktadır. Bu sınıflandırmaya göre hatalar; seviye 1; Kusurların morfolojisi, konumu (iç, dış, geometrik), seviye 2; metalurjik kusurlar (gaz porozitesi, katılma çekintisi); seviye 3; özel tip kusurlar olarak tanımlanmaktadır. Seviye 1, morfolojiyi veya lokasyonu baz almaktadır. Alt yüzey kusurları, yüzey hataları olarak kabul edilmektedir. 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 kullanılmaktadır (Gariboldi ve diğerleri, 2010; Bonollo, 2012).

Tablo 3.1: İç hataların sınıflandırılması

A İç hatalar	A1	Çekinti hataları	A1.1	Makro-çekinti
			A1.2	Dendritlerarası çekinti
			A1.3	Katman porozitesi
	A2	Gaz kaynaklı hatalar	A2.1	Gas 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	İnklüzyonlar
			A4.2	İstenmeyen mikroyapı
	A5	Termal büzülme hataları	A5.1	Soğuk çatlak
			A5.2	Sıcak yırtılma, sıcak çatlak

Tablo 3.2: Yüzey hatalarının sınıflandırılması

B Yüzey Hataları	B1	Çekinti Hataları	B1.1	Sink (Yüzey altı porozitesi)
			B2	Kabarcık (Baloncuk)
	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 3.3: Geometrik hataların sınıflandırılması

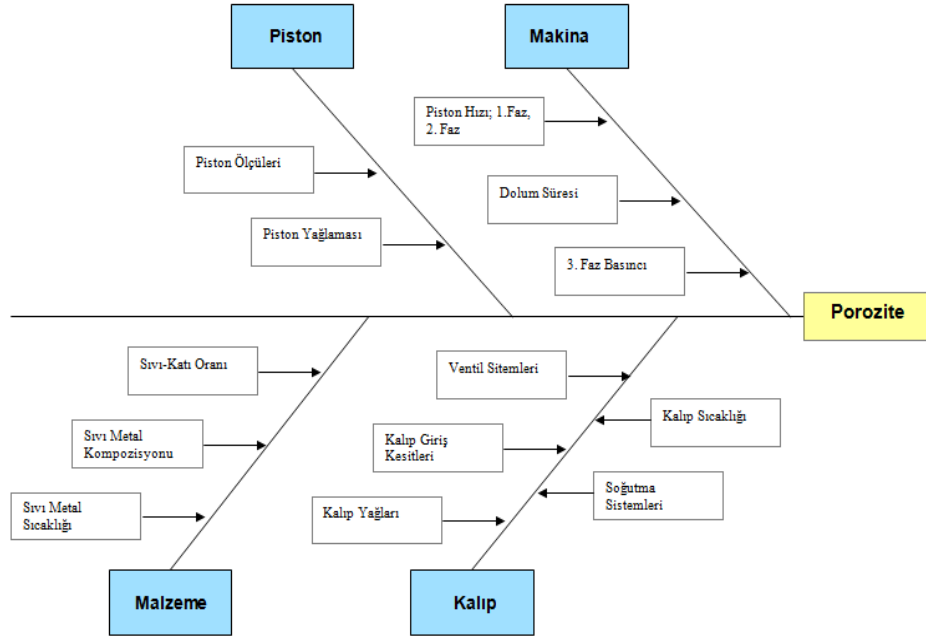
C Geometrik Hatalar	C1	Malzeme eksikliği	C1.1	Doldurmama
	C2	Fazla malzeme	C2.1	Çapak
	C3	Tolerans dışı olma	C3.1	Deformasyon

3.1. Basınçlı Dökümde Porozite Tanımlaması ve Porozite Nedenleri

Basınçlı döküm yoluyla üretilen parçada porozite; termal, mekanik, sızdırmazlık gibi parçadan beklenen özelliklerde (örneğin akma mukavemeti, süneklik gibi) malzeme hatalarına neden olmaktadır. Porozite, katılma işlemi sırasında döküm parçasına hava veya gaz hapsolmesinin yanı sıra sıvı metalin büzülmesinden, çekmesinden de kaynaklanabilmektedir.

Yüksek basınçlı döküm prosesinde kalıp boşluğunu doldurma işlemi esnasında kalıp boşluğu içindeki hava tahliye edilemez ise, proses devamında yüksek hava basıncı oluşabilmektedir. Artan hava basıncı, ergimiş metal içinde havanın miktarını artırabilmekte ve basınçlı döküm parçasında poroziteye neden olmaktadır. İdeal şartlarda, doldurma işlemi bittiğinde hava tahliye kesitlerinden çıkan hava hacmi, gelen ergimiş metal hacmine eşit olmalıdır. Kalıp içerisindeki hava, hataları önlemek için ergimiş metalin katılma öncesinde tahliye edilmelidir (Borujerdi ve Goldak, 2004).

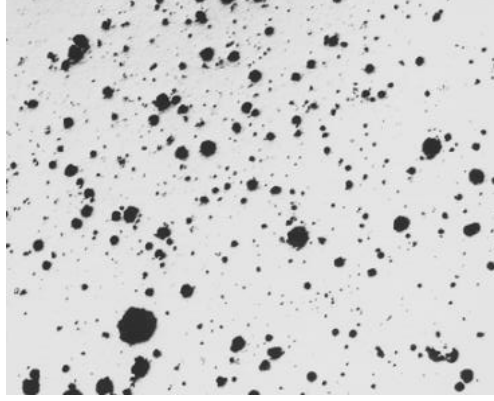
Basınçlı döküm proseslerinde en önemli döküm hatası porozite olup, genellikle proses parametrelerine, kalıp özelliklerine ve döküm alışıma bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çekinti (büzülme) porozitesi ve gaz porozitesi olmak üzere iki tür porozite dökümün mekanik dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Çekinti porozitesi çoğunlukla katılma nedenli bir porozite oluşumuna neden olurken, gaz porozitesi ise basınçlı döküm kalıp tasarımı, proses şartları ve kalıp içi havanın tahliyesine bağlı olarak oluşabilmektedir.



Şekil 3.1: Basıncılı dökümde porozitenin kök sebepleri

3.1.1. Gaz Poroziteleri

Gaz poroziteleri kalın kesitli döküm parçalarında az sayıda büyük boşluklar veya parçanın içerisinde dağılmış halde bulunan küçük boşluklar şeklinde, özellikle yüzeye yakın yerlerde görülmektedir. Çoğu zaman ilk işleme yüzeyine kadar gaz porozitelerini fark etmek mümkün olmamaktadır. İşleme yüzeylerinde gaz porozitesi içeren parçalar sızdırmazlık problemlerine ve mekanik özelliklerin zayıflamasına yol açar. Gaz poroziteleri, türbülanslı akış nedeniyle metal içerisine sürüklenen ve hapsolan hava kabarcıklarından ortaya çıkabildiği gibi, ergimiş metal içerisindeki gazların çökmesiyle oluşabilmektedir. Gaz porozitelerinin yuvarlak ve düzgün görünümlere sahip olması, gaz porozitelerini katılma kaynaklı porozitelerden ayıran en önemli karakteristiktir (Campbell, 2011; Tüdöksad, 2014). Ancak her düzgün ve küresel görünüme sahip porozite gaz porozitesi olarak tanımlanamamaktadır.

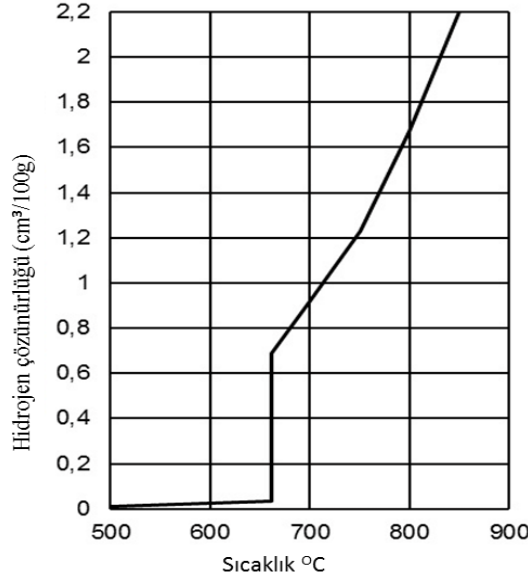


Şekil 3.2: Gaz porozitesi (Porosity, t.y.)

Basınçlı dökümde gaz porozitesini oluşturan dört ana unsur söz konusudur (Walkington, 2017):

1. Sıkışmış Hava
2. Sıkışmış Buhar
3. Buharlaşabilen Yağlayıcılardan Gelen Gaz
4. Hidrojen Gazı

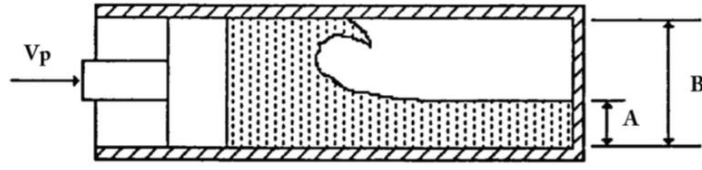
Hapsolan hava, hapsolan buhar, yağlama sonrası kalıntıları ve sıvı metalin hidrojen gazı içermesi, gaz porozitesine sebep olan dört ana neden olarak gösterilmektedir (Walkington, 2017). Hidrojen seviyesi ve hava sıkışmasından kaynaklanan gaz porozitesi, her zaman ergimiş alüminyumda önemli bir porozite kaynağı olmaktadır. Katı alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü çok düşük olmasına karşın, sıvı alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü çok yüksektir (Şekil 3.3). Bu sebeple proses adımlarında türbülanslı akışa bağlı oluşan porozite, döküm kalitesini doğrudan etkilemektedir (Campbell, 2011). Gaz porozitesini gidermenin zorluğu, gaz porozite kaynağını tanımlamak ve kaynağı azaltmaktır (Monroe). Bu nedenle katılaşma esnasında çözelti içinde hapsolmuş hidrojen, nihai parçada porozite oluşturabilmektedir (Dispınar, 2005).



Şekil 3.3: Alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü (Campbell, 2011)

Döküm yüzeyinin altında oluşan poroziteler, enjeksiyon işleminin gerçekleşmesi sırasında sürüklenen hava kabarcıklarının kalıp içerisinde kalması sonucu oluşabilmektedir. Hava kabarcıkları yaklaşık 5 mm çapında veya daha küçüktür. Bu seviyeden daha büyük hava kabarcıkları genellikle kalıptan kolayca tahliye edilebilmektedir. 5 mm ve altında bulunan hava kabarcıkları, yüzeyde konumlanmış oksit tabakasının kırılması için gereken kuvvete ulaşamamaktadır. Döküm sırasında oluşan gaz en az direnç göreceği yolu izlemektedir ve genellikle yer çekimine dik şekilde hareket etmektedir. Yüzeydeki oksit tabakalarını kıramayan kabarcıklar, yüzeye çok yakın bir konumda hapsolarak askıda kalırlar. Bu poroziteler, genellikle griftli bölgeler üzerinde yer alır ve 1–5 mm çapında boyutsal özelliklere sahip olmaktadır (Campbell, 2011).

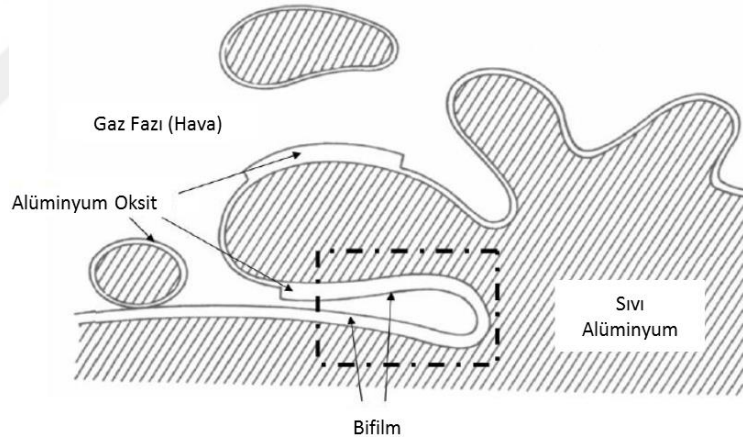
Gaz porozitesinin bir kaynağı sıkışmış hava, yani sıvı metal içerisinde havanın hapsolmesi olarak gösterilmektedir. Eğer basınçlı döküm prosesinde metal türbülanslı akış sergilerse, hava sıvı metal içerisinde hapsolarak kalıp dışarısına atılmasını engelleyebilmektedir. Türbülanslı akış olmaması için 1.faz piston hızının iyi ayarlanması gerekmektedir. Şekil 3.4 'de pistonun 1. Faza başladığı anın bir şematığı sunulmuştur. Eğer piston hızı optimize edilemez ise metal 1. Fazda türbülanslı akış sergilemektedir (Campbell, 2011).



A: İlk Döküm Yüksekliği
B: Kovan Çapı

Şekil 3.4: Kovan içerisinde pistonun hareketine bağlı türbülanslı akış şematığı (Campbell, 2011)

Alüminyum üzerinde ince film tabakası halinde bulunan oksit filmler, yüzey üzerinde kaldığı süre boyunca nihai ürüne olumsuz yönde etki gösterememektedir. Fakat, bu film tabakasının türbülanslı akış etkisiyle kırılması, oksitlerin sıvı metal içerisinde dağılıp hapsolmesine neden olmaktadır (Dispınar, 2005; Tan, 2011). Sıvı metal içerisinde dağılan oksitler bifilmelerin oluşmasına neden olmakta ve döküm parçada poroziteye sebep olmaktadır. (Şekil 3.5) (Dispınar, 2005).

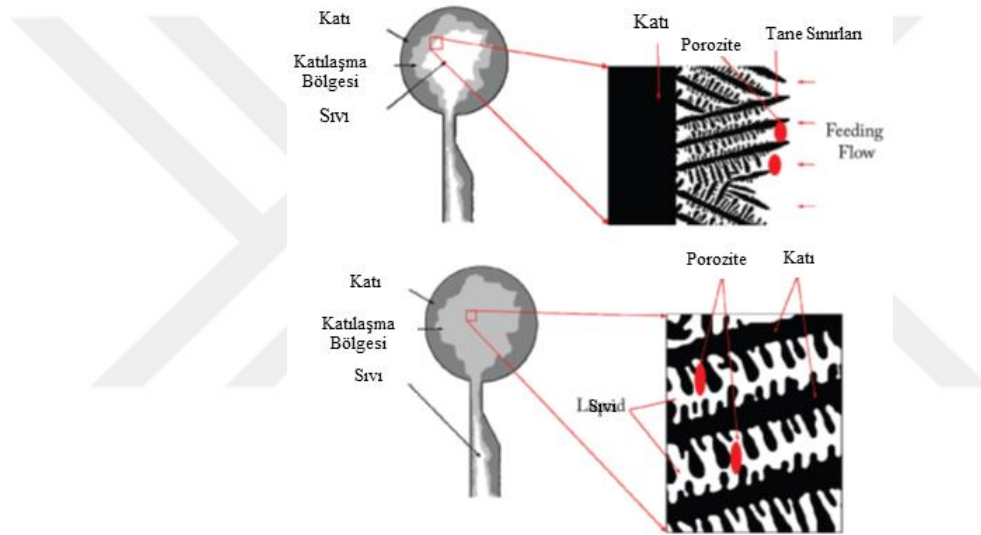


Şekil 3.5: Bifilm oluşum mekanizması: yüzey türbülansı (Dispınar, 2005; Campbell, 2011)

3.1.2. Çekinti Poroziteleri

Basınçlı dökümde bir diğer önemli porozite türü, katılaşma farklarından kaynaklanan çekinti poroziteleridir. Sıvı metalin hacmi, düşen sıcaklıkla doğrusal olarak azalmaktadır. Tüm döküm proseslerinde oluşan metalin büzülmesi giderilmeye çalışılmaktadır ve katılaşma tamamlanıncaya kadar kalıp boşluğunu beslemeye özen gösterilmektedir. Beslemenin etkili olmaması nihai döküm parçada kalitesizliğe yol açmaktadır. Sıvı halde düzensiz ve nispeten daha az yoğun şekilde bulunan metal,

katılaşma ile birlikte daha yoğun ve kristal mikroyapı oluşturmaya yönelmektedir. Alüminyum gibi yüzey merkezli kübik yapıya sahip metaller katılaşma sırasında %7 civarında hacimsel değişime maruz kalmaktadır. Bu hacimsel değişim kalıp tasarım süreci sırasında ne kadar hesaplanırsa dahi, kalıp tasarım ve malzeme özellikleri kısıtlamaları gereği tamamıyla elimine edilememektedir. Kullanılan alaşımın katılaşma aralığı çekintinin morfolojisini ve konumu doğrudan etkilemektedir (Şekil 3.6). Yüksek basınçlı dökümde çekintiyi önlemek için 3.fazda uygulanan basıncın önemi büyüktür. 3. Faz adımının efektif olmaması çekinti porozitesine sebebiyet vermektedir (Monroe, 2014).



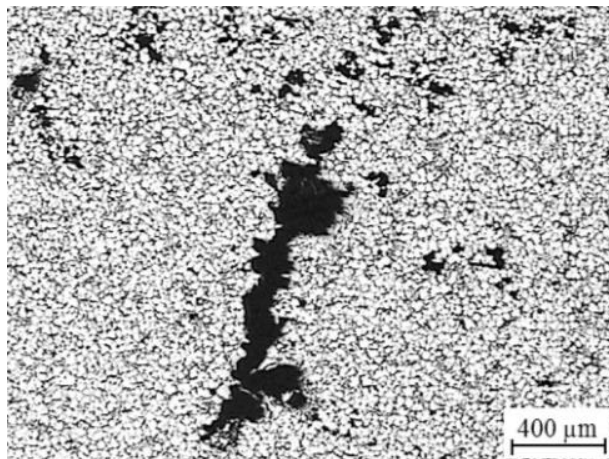
Şekil 3.6: (Üst) Katılaşma aralığı dar alaşım. (Alt) katılaşma aralığı geniş alaşım (Monroe, 2014)

Bir alaşımın dökümünde katılaşma aralığından bağımsız olarak oluşan çekintiler, genellikle dökümde bulunan tüm boşlukların hesabıyla yapılmaktadır. Çoğu zaman dökümlerde çekinti poroziteleri küresel görünüme sahip gaz poroziteleriyle birlikte oluşmaktadır. Bu sebeple bir basınçlı döküm prosesinde gaz kaynaklarının elimine edilmesi, çekinti hatalarının azalacağı anlamına gelmektedir (Monroe, 2014).

Campbell (2011) çalışmalarında çekintinin oluşmasını engelleyen ve tüm döküm proseslerinde geçerli olacak 7 temel kuralı belirtmektedir. Kural 1; beslemenin doğru olmasıdır. Yetersiz besleme nihai döküm parçada hatalara sebep olabileceği gibi, beslemenin fazla olması da hata kaynaklarından biri olmaktadır. Campbell yaptığı araştırmalar ile besleyicinin düşük olduğu alüminyum döküm prosesinde yaklaşık %8

porozite olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer alüminyum teorik katılaşma çekintisi olan %7,14 'e çok yakındır ve arada kalan diğer fark muhtemelen gazdan kaynaklı porozite olmaktadır. Aynı çalışmada besleyici boyutunun artmasıyla porozite miktarının arttığı görülmektedir. Besleyicin artması; katılaşma süresini artırmaktadır ve bifilmelerin açılarak dentritler arası gaz miktarının arttığını göstermektedir. Kural 2; Chvorinov ısı transfer kuralına göre yolluğun, döküm ile aynı anda veya daha sonra katılaşmasıdır. Eğer yollukta veya kalıp boşluğunun giriş kesitinde erken katılaşma görülürse, kalıp boşluğu içerisinde metal beslenemez ve basınç iletilemez (Monroe, 2014). Besleyici ve yolluğun hacimsel küçülmesini karşılayacak kadar metal içermesi üçüncü kuralı tanımlamaktadır. 4. Kural; yolluk ve döküm arasında bir sıcak nokta oluşmamasıdır. 5. Kural; yollukların ve girişlerin dolumu zorlaştıracak bir tasarıma sahip olmaması gerekliliğini ifade etmektedir. 6. Kurala göre dolunun gerçekleşmesini sağlayan basınç farkı olmalıdır. 7. Kural porozite oluşumunu ve büyümesini engellemek için dökümdeki tüm noktalarda yeterli basınç olması gerektiğini anlatmaktadır. Basınç, aynı zamanda tanelerarası açıklığın azalmasını ve dökümün iyi mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır.

Çekinti poroziteleri gaz porozitelerine benzerlik göstermektedir. Gaz poroziteleri yuvarlak ve düzgün görünüme sahipken, çekinti porozitesi dentrit görünümünde döküm parçanın içyapısında görülmektedir (Şekil 3.7) (Aslan, 2007).



Şekil 3.7: Çekinti Porozitesi (Zyska, Konopka, Lagiewka ve Nadolski, 2015)

Düzensiz katılaşma poroziteye neden olan durumlardan biridir. Yüksek basınçlı döküm prosesinde, yollukta veya ince kesitli bölgelerde metalin daha önce katılaşması ve sonraki metal akışını engellemesinden kaynaklı porozitelere sıklıkla rastlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda eriyen metallerde basınç artırılmaktadır ve böylece kalıp dolumu daha hızlı gerçekleştirmek için bu sırada kalıp ve metal sıcaklığı daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Metalin soğuma esnasındaki çekilmesiyle porozite ve buna bağlı diğer kalitesizlikler meydana gelmektedir. Genellikle kullanılan alaşıma ve parça tasarımına bağlıdır. Parçada ani kesit değişimleri olduğu takdirde, bu bölgelerde katılaşma hızları farklılık gösterecektir. Oluşan katılaşma hızı farkları büzülmenin ana sebebi olmaktadır. Kesitler arasında uyum sağlamanın mümkün olmadığı tasarımlarda kalın kesitlerde soğutucu uygulaması kullanılmalıdır. Parça tasarımında geçiş radyüslerinin yetersiz veya geniş olması durumunda da çekinti poroziteleri oluşmaktadır (Aslan, 2007; Tüdöksad, 2014).

Chen ve Engler (Chen ve Engler, 1994) çalışmasında, küresel tipte porozitenin yüksek sıvı fraksiyonlarında meydana geldiğini ve düşük sıvı fraksiyonlarında küresel olmayan porozitenin oluştuğunu savunmuştur. Chen ve Engler 'e göre yüksek sıvı fraksiyonlarında çekirdeklenme yüksek hidrojen konsantrasyonunda gerçekleşmektedir ve bu konsantrasyonlarda çekirdeklenmeyi sınırlandıracak bir etki söz konusu olmamaktadır. Dolayısıyla porozite küresel görünüme sahip olmaktadır. Düşük sıvı konsantrasyonlarında çekirdeklenme geç başlamaktadır ve dentritler arasında oluşmak zorunda kalmaktadır. Bu etki ile; porozite hidrojen gazının etkisiyle oluşmuş olmasına karşın küresel görünüme sahip olmamaktadır.

Campbell; oksitler, inklüzyonlar ve gaz kabarcıklarının yarattığı kusurların, döküm parça hurdaların büyük bir çoğunluğunu oluşturduğunu savunmaktadır (Campbell, 2011). Dışpınar ve Campbell (2004), yaptıkları çalışmada; porozite oluşumunun bifilmelerin etkisiyle başladığını ve hidrojen gazının porozite oluşumuna yardımcı olduğunu savunmaktadır. Bununla birlikte, aynı konu üzerinde yapılan başka çalışmalar bifilmelerin alüminyum alaşımlarında kalitesizlik problemlerine yol açtığını kanıtlanmaktadır (Dışpınar, 2005; Tan, 2011).

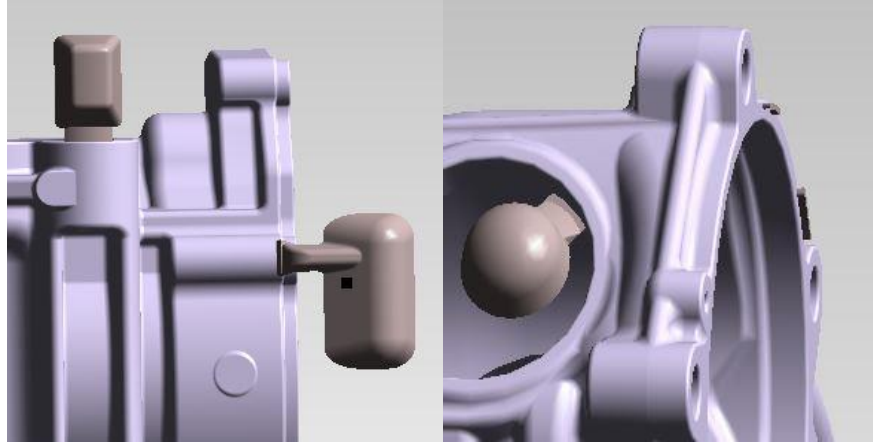
Runyoro ve ekibinin (Runyoro, Boutorabi ve Campbell, 1992) çalışmasına göre; dolum hatalarının ve uygun olmayan faz hızlarının, ergimiş metalin içerisindeki oksit filmleri artırdığını ve bu oksit filmlerin döküm parça kalitesini düşürdüğünü tespit edilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalar, katılma hızı ve sıvı metal içeriğindeki hidrojen yoğunluğunun porozite miktarını etkilediğini belirlerken, başka araştırmalar, alaşımın beslenme özelliklerinin çekinti porozitelerinde önemli olduğunu belirtmektedir. Atwood ve ekibinin çalışmasında, porozite boyutuna basıncın, hidrojen yoğunluğunun ve katılma zamanının etki ettiğini göstermektedir (Tan, 2011).



BÖLÜM 4. GAZ ATMA – VENTİL SİSTEMLERİ

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, doludan hemen önce sıkışan havanın boşaltılması ile ergimiş metal akış direncini önemli ölçüde azaltmaktadır ve dolunun hatasız bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır (Aslan, 2007; Mert, 2013).

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 dolun 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 (Gözen, 2007; Mert, 2013).



Şekil 4.1: Hava cebi örnekleri

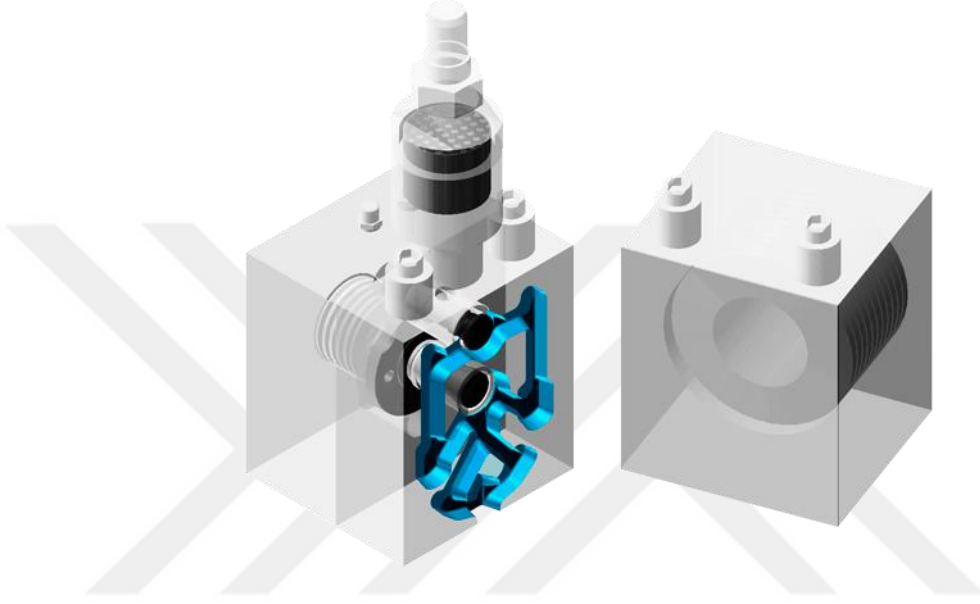
Gaz çıkışı, hava cebi tasarımları uygulamalarından sonra, ventiller kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel ventiller, geçmişte ve günümüzde kalıp boşluğundan havayı atmosfere aktarmak için döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel ventiller iki boyutlu olarak tasarlanmışlardır (2B) ve yeni nesil 2B ventiller vakum bağlantısı ile kullanılabilirler. Ancak 2B ventillerin gaz atma kesit alanının küçük olması en büyük dezavantajlarıdır. Genellikle ventıl 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.



Şekil 4.2: 2 boyutlu ventıl sistemleri (Chill vent, t.y.)

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/s

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.

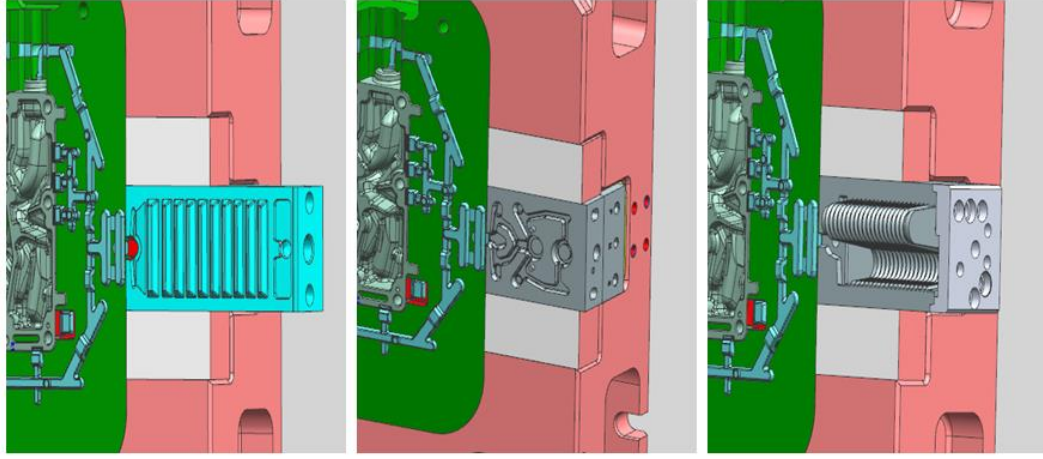


Şekil 4.3: Mekanik vakum valfi (Vacuum valve, t.y)

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 içerisinde 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.



Şekil 4.4: 3 boyutlu ventil sistemi (Wang ve diğerleri, 2011)



Şekil 4.5: Farklı tipte ventil sistemleri

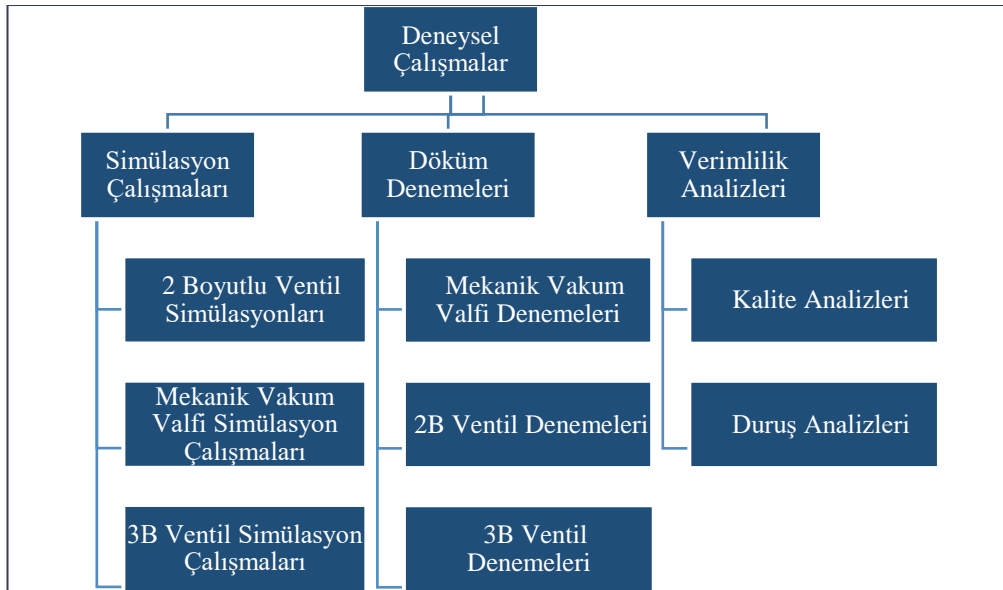
Walkington 'un çalışması; verimli vakum uygulamasının, kalıp içerisindeki gaz içeriğini azaltabileceğini göstermiştir (Walkington, 2017). Bar-Meir ve ekibi (Bar-Meir, Eckert ve Goldstein, 2016) hava ve gazdan kaynaklanan porozitenin, toplam porozitenin önemli bir bölümünü oluşturduğunu belirtmiştir. Draper (Draper, 1996), gaz atma alanının artmasının, döküm parçadaki porozite seviyesini azaltacağını gözlemlemiştir. Gaz atma sistemindeki sürtünmeyi ihmal eden Lindsey ve Wallace (Lindsey ve Wallace, 1972), ventil sisteminin verimli çalışması ile porozitenin azaldığını göstermiştir. Ayrıca; Lindsey ve Wallace piston ve kalıp yağlayıcılarının gaz poroziteleri üzerinde etkisinin az olduğunu basit bir kalıpta deneyimlemiştir. Elde edilen bu sonuçlar, gaz atma kesit alanının porozitenin azaltılması için çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Brevick ve ekibi (Brevick ve Cheng, 1991) pistonun yüksek hızlara ulaştığında, türbülansın bir porozite kaynağı olabileceğini

söylemektedir. Nabil ve ekibi (Nabil ve Abboudi, 2016) 1.faz aşamasında yüksek hızın havanın sıkışacağını ve sıkışan havanın poroziteyi artırdığını anlatmıştır. Kuru ve Serçe (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 porozite değerlerinin azaldığı görülmüştür. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında (Wang, Savage ve Arthur, 2011), vakum olmadan yapılan dökümlerin vakumla yapılanlardan daha fazla gaz içerdiği görülmektedir.



BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada deneysel çalışmalar; yüksek basınçlı döküm simülasyon çalışmaları, yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen parçaların analizi ve proses verimliliği analizi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında farklı gaz atma alanlarına ve farklı tasarımlara sahip üç ventil sisteminin (3B ventil, 2B ventil, mekanik valf) çalışma performansları gözlemlenmiştir. 2. Aşamada simülasyon sonuçlarından alınan optimum parametreler ile yapılan dökümlerde, yüksek basınçlı döküm yönteminde gaz atma metodlarının poroziteye etkisi incelenmiştir. Çalışmada 3B ventil ve mekanik valf sistemleri kullanılmış olup, yapılan dökümler sonucu porozite tayini yapılarak döküm parça kaliteleri analiz edilmiştir. 3. Aşamada; iki farklı metod için performans analizleri yapılmıştır. Dökümhaneden MRP yazılımı kullanılarak tam zamanlı olarak alınmış verilerden kalite ve proses analizleri yapılmıştır. Farklı metodlarda porozite kaynaklı hataların oranı karşılaştırılarak kalite etkileri gözlemlenmiştir. Proses verimliliği için ise, makine duruş oranları hesaplanarak proses verimliliği gözlemlenmiştir.



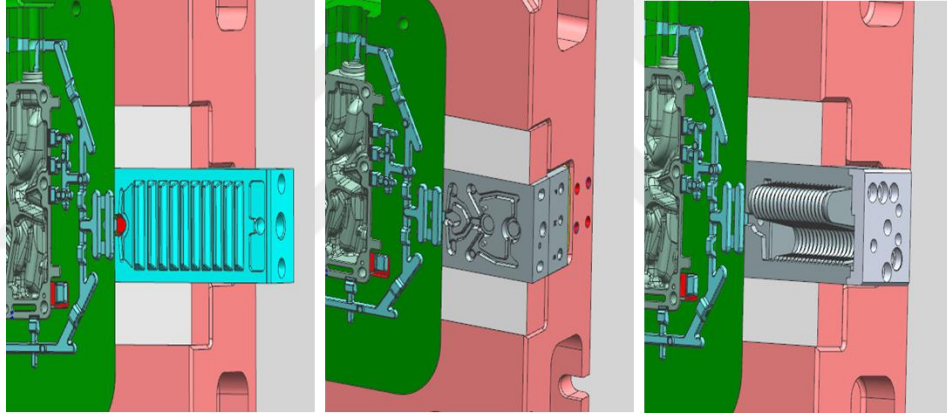
Şekil 5.1: Deneysel çalışma sistematığı

5.1. Simülasyon Çalışmaları

Bu çalışmada hava kompresörü parçası datasına 3 farklı (mekanik valf, 2 boyutlu ventil, 3 boyutlu ventil) gaz atma sistemine dataları adapte edilerek MagmaSoft HPDC yazılımında oluşturulan mesh yardımıyla simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları için seçilen döküm parametreleri Tablo 5.1’dedir. Simülasyon sonuçlarında alaşımın hızı, sıcaklığı ve katılaşma oranları incelenmiştir.

Tablo 5.1: Simülasyon çalışmalarında kullanılan döküm parametreleri

Döküm Sıcaklığı (°C)	2. Faz Hızı (m/s)	Çalışma Basıncı (bar)	Enjeksiyon Süresi (s)
660	4	600	5



Şekil 5.2: Venti sistemleri kalıp adaptasyon tasarım çalışmaları

5.2. Döküm Denemeleri Deneysel Yöntemleri

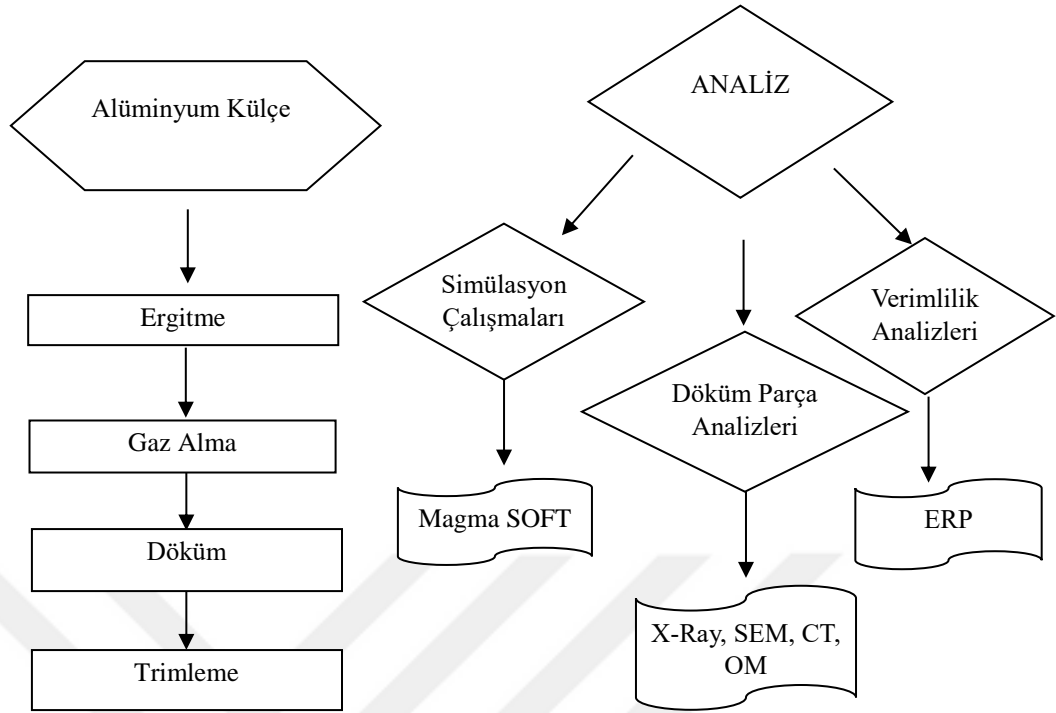
Bu çalışmada; araçlarda kompresör ve fren parçası olarak kullanılan otomotiv parçalarının vakum altında yüksek basınçlı dökümü gerçekleştirilmiştir. Numuneler, farklı gaz atma sistemleri kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışma akış şeması Şekil 5.3 ‘dedir. Ergitme işlemi; 710°C ergitme sıcaklığı kullanılarak StrikoWestofen Ergitme fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4). Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 5.2 ‘de verilmiştir. Ergitme işleminden sonra ergimiş alüminyum içerisindeki çözülmüş hidrojen seviyesini azaltmak için gaz alma

işlemi yapılmıştır (Şekil 5.5). Gaz alma işlemi sonrası yoğunluk endeks ölçümleri yapılmış ve hidrojen yoğunluğunun %4 'ün altında olduğu kontrol altına alınmıştır.

Tablo 5.2: Kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları

Alaşım	Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	-
AlSi10Mg(Fe)	Max	9-	Max	Max	Max	Max	Max	0.2-	Max	Al -
	1	11	0.55	0.15	0.2	0.1	0.15	0.5	0.15	remainder
AlSi9Cu3(Fe)	0.6-	9-	Max	Max	Max	2-4	Max	0.15-	Max	Al -
	1.1	11	0.55	0.55	0.2		0.35	0.55	1.2	remainder

1. Numune (Kompresör parçası) AlSi10Mg(Fe) alaşımı ile 84D Buhler Basınçlı Döküm Makinası kullanılarak üretilmiştir (Şekil 5.6). 1. Numunede mekanik valf ve 3 boyutlu ventil sistemleri kullanılmıştır. 2. Numune (Fren parçası) AlSi9Cu3(Fe) ile 84D Buhler Basınçlı Döküm Makinası kullanılarak üretilmiştir. 2. Numunede 2 boyutlu ventil ve 3 boyutlu ventil sistemleri kullanılmıştır. Numune üretimleri için kullanılan kalıplar H13 sıcak iş takım çeliklerinden imal edilmiştir. Döküm sonrası parçalar trimlenerek nihai döküm parça elde edilmiştir. Döküm parçaları numuneleri üretiminde kullanılan parametreler Tablo 5.3 'dedir.



Şekil 5.3: Karakterizasyon çalışmaları akış şeması

Tablo 5.3: Döküm parametreleri

	Alaşım	Döküm Sıcaklığı (°C)	2. Faz Hızı (m/s)	Çalışma Basıncı (bar)	Enjeksiyon Süresi (s)
Deneme1	AlSi10Mg(Fe)	660	4,6	530	4
Deneme2	AlSi9Cu3(Fe)	660	4,5	405	3

Tablo 5.4: Numune tanımlamaları

Numune İsmi	Tanımlama	Alaşım
1. Numune (Kompresör Parçası)	1.1: Mekanik Valf Numunesi	AlSi10Mg(Fe)
	1.2: 3B Ventil Numunesi	
2. Numune (Fren Parçası)	2.1: 2B Ventil Numunesi	AlSi9Cu3(Fe)
	2.2: 3B Ventil Numunesi	



Şekil 5.4: Strikowestofen ergitme fırını



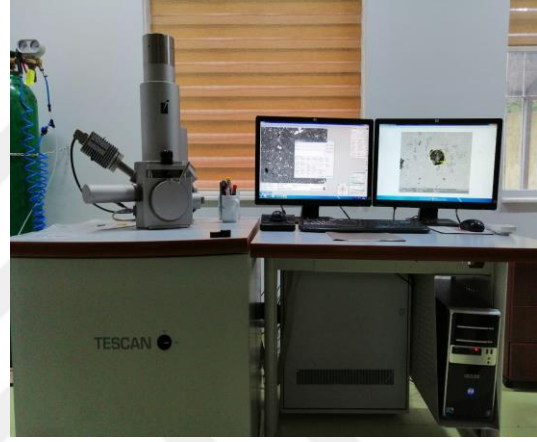
Şekil 5.5: Gaz alma ünitesi



Şekil 5.6: Buhler yüksek basınçlı döküm hücresi

Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri için üretilen numunelerin referans bölgelerinden alınan numuneler sırasıyla; kesme, bakalite alma, zımparalama, parlatma ve dağlama metalografik işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi 240-400-600-800-1200 ve 1500 mesh özelliklerine sahip zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Zımpara işlemi sonrası kaba parlatma ve nihai parlatma olmak üzere iki adımda parlatılmıştır. Parlatılmış numuneler keller dağlayıcısı (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO₃, 190ml su) kullanılarak dağlanmıştır.

Üretilen parçaların kalite analizleri sırasıyla X- Ray radyoskopi, CT (Computed Tomography), optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır (Şekil 5.7). ASTM E505 'e göre porozite analizi X – Ray Radyoskopi kullanılarak (Yxlon, 160 kw) gerçekleştirilmiştir. Porozite yüzde analizleri bilgisayarlı tomografi (CT, Nikon 195kw) ile yapılmıştır. Porozite morfolojisi ve tane boyutu belirlemek için optik mikroskop (Olympus, BX53M) ve SEM (Tescan, Elektron mikroskobu -BSE modu) kullanılmıştır.



Şekil 5.7: Deneylerde kullanılan cihazlar a) X-Ray b) CT c) OM, d) SEM

BÖLÜM 6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

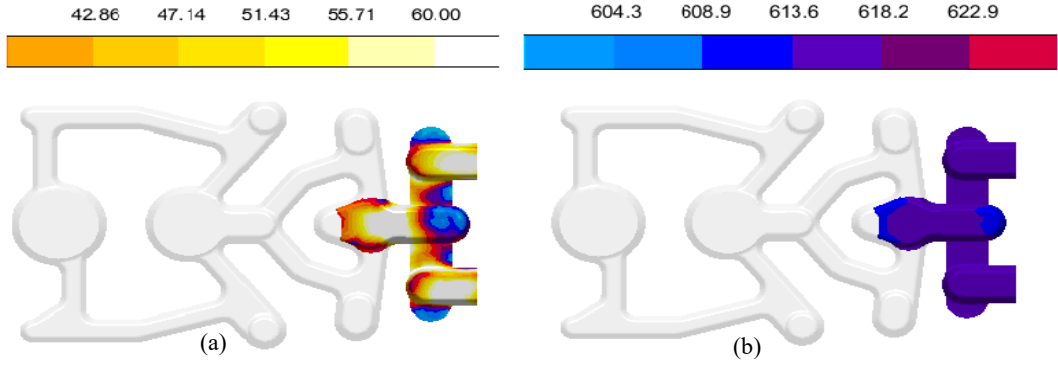
6.1. Simülasyon Sonuçları

Ventil sistemlerinin verimliliğini ölçmek için MagmaSoft HPDC modülünün dolum sıcaklığı ve dolum akış hız sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar farklı ventil sistemlerinin dolum davranışlarının farklı olduğunu göstermiştir. Bu farklılıklar Tablo 6.1’de özet halinde sunulmuştur.

Tablo 6.1: Ventil sistemlerinin çalışma parametreleri

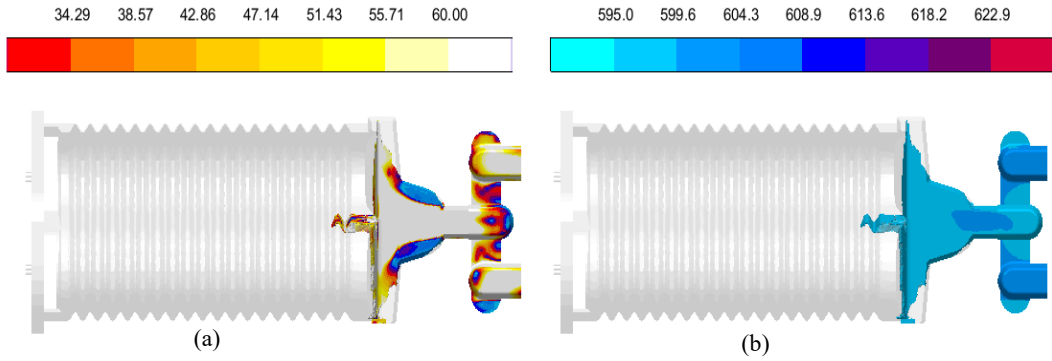
Sistem	Gaz atma kesit alanı	Dolum Süresi	Giriş Sıcaklığı	Giriş Hızı
Mekanik Valf	19,5 mm ²	3 ms	618 °C	60 m/s
2B Ventil Sistemi	80 mm ²	5 ms	610 °C	60 m/s
3B Ventil Sistemi	120 mm ²	10 ms	598 °C	48 m/s

Yüksek basınçlı dökümde en çok kullanılan ve 160 mm² gaz atma kesit alanına sahip mekanik valf sadece 19,5 mm² alandan gaz çıkışı sağlamaktadır. Bu kesit alanı herhangi bir ventile göre çok düşük bir alandır. Bunun dışında mekanik valfin girişinde metal sıcaklığı 618 °C ve metal akış hızı 60 m/s olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.1). Aynı şartlarda gaz atma kesit alanının 120 mm² olan 3B ventil sisteminde giriş hızı 60 m/s ve giriş sıcaklığı 560 °C olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.2). Bu değerler 2B ventil sisteminde ise mekanik valfin parametrelerine yaklaşık değerlerde gözlemlenmiştir.

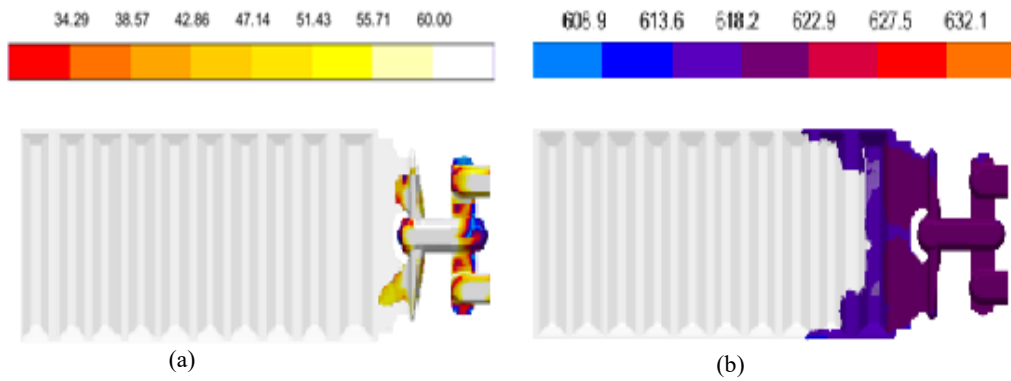


Şekil 6.1: Mekanik valfin giriş kesitinde (a) metal akış hızı (b) dolum sıcaklıkları

Prosesin doğasında olan yüksek sıcaklık ve yüksek hız sebebiyle valfin dolum süresi 2,203 saniyede gerçekleşmiş olup bunun karşılığında dolum süresi 2B ventil sisteminde 2,206 saniye, 3B ventil sisteminde bu değer 2,207 saniye olarak hesaplanmaktadır.

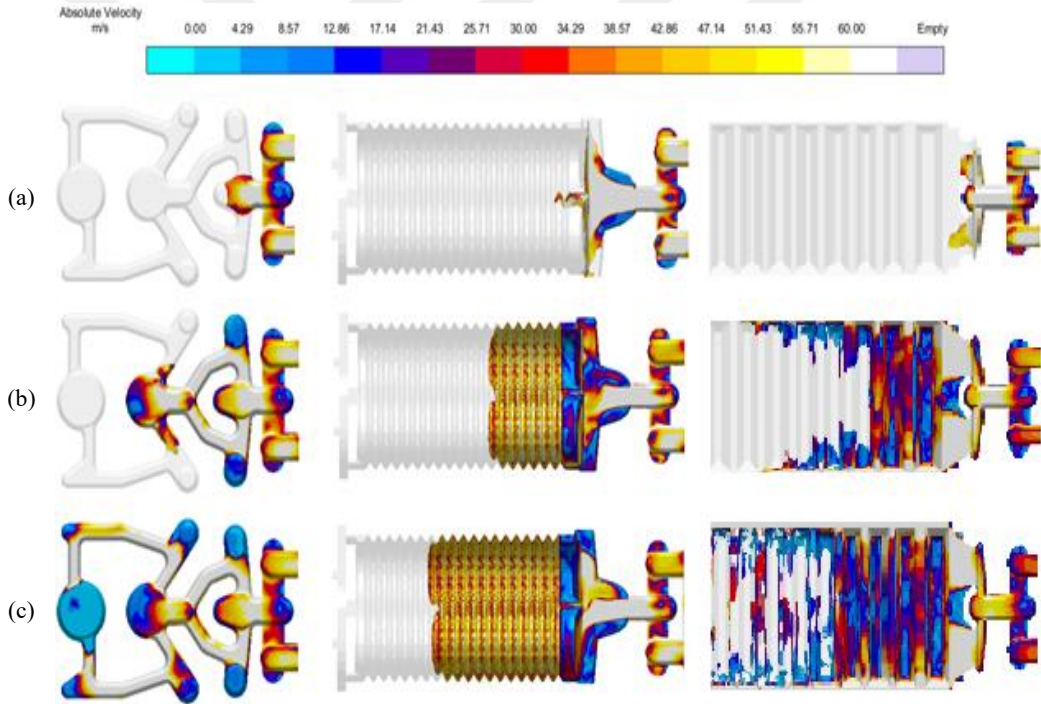


Şekil 6.2: 3B ventil giriş kesitinde (a) metal akış hızı (b) dolum sıcaklıkları



Şekil 6.3: 2B ventil giriş kesitinde (a) metal akış hızı (b) dolum sıcaklıkları

Mekanik valfin çalışma sistemi göz önüne alındığında 3 milisaniyelik dolun süresi yetersiz olarak yorumlanabilmektedir. Çünkü; sıvı metal mekanik valfin çalışmasını başlatacak olan ilk pistonun geldiğinde, valfin kapanması için 2 milisaniyelik bir süre kalmaktadır (Şekil 6.4.b). Metal birinci pistonun gaz kesit alanına doğru ilerlerken metal akış hızı ve sıcaklığı çok yüksektir. Bu değerler mekanik valf sisteminin kapama olayını gerçekleştirmesi için olanak vermemektedir. 2B ventil sisteminin giriş kesitinde metal sıcaklık değerleri mekanik valfe göre benzerlik göstermektedir. Buna karşılık olarak, 3B sistemin sonuçlarına bakıldığında metal akışının katılaşma sıcaklığına yaklaşık bir sıcaklıkta sistem içerisinde hareket ettiği görülmektedir. Ayrıca metal akış hızı diğer sistemlere göre iki kat daha yavaştır (Şekil 6.4.c). Bu sonuçlar ventilin tıkanmadan işlevini yerine getireceğini doğrulamaktadır.



Şekil 6.4: Ventil sisteminin dolumu sırasında metal akışı; a) 1 ms b) 2 ms C) 3 ms

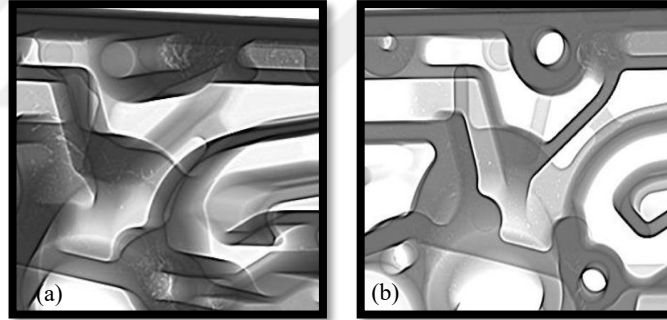
Dökümhane tecrübesi; herhangi bir ventil sisteminin bir süre çalışması durumunda tıkanacağını göstermektedir. Tıkanıklık düzenli olarak temizlik gerektirmektedir. Tıkanıklık gaz atma kesit alanının daralmasına ve homojen olmayan metal akışına neden olmaktadır. Bu nedenle ventil sisteminin verimi tıkanıklığa bağlı olarak azalmaktadır. Yaşanan tıkanıklıklardan kaynaklı porozite miktarının artması döküm

parça kalitesini olumsuz etkilemekle birlikte, mekanik valf bakım maliyetinin yüksek, temizliğinin zor olması verimsizliğe yol açmaktadır. Bu yüzden valf sistemlerinin yetersiz kesit alanı ve tıkanmaya müsait çalışma prensibi yüksek basınçlı döküm teknolojisinde risk teşkil etmektedir.

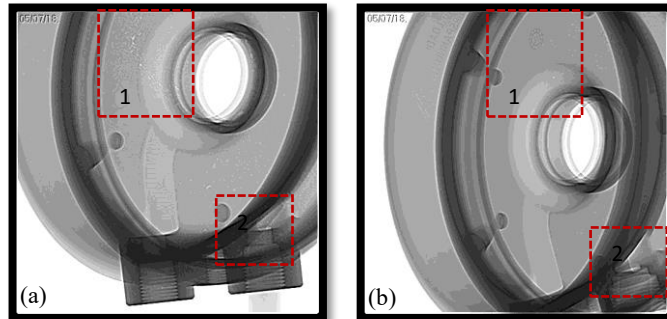
6.2. Döküm Sonrası Analizler

6.2.1. X-Ray Radyoskopi Sonuçları

3B ventil ve mekanik valf karşılaştırılması için yapılan kompleks otomotiv kompresörü parçalarından alınan numunelerin X-Ray görüntüleri (Şekil 6.5), 3B ventil ve 2B ventil sistemlerinin karşılaştırılması için otomotiv fren sistem parçalarından alınan numunelerin X-Ray görüntüleri (Şekil 6.6) incelenmiştir. X-Ray görüntüleri 3B ventil kullanımının porozite miktarını azalttığını göstermektedir.



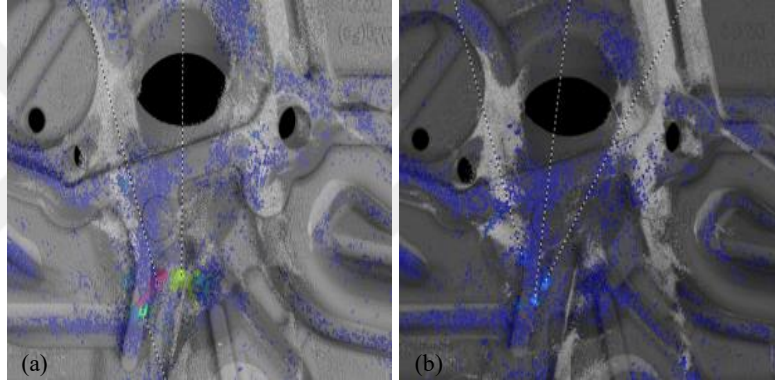
Şekil 6.5: X-Ray radyoskopi görüntüleri (a) Mekanik valf (b) 3B ventil



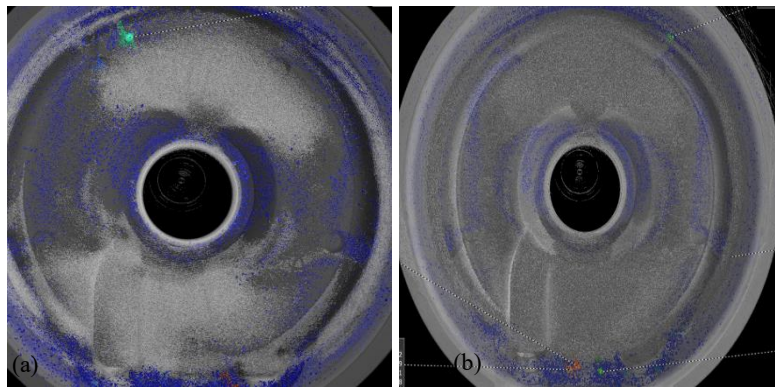
Şekil 6.6: X-Ray radyoskopi görüntüleri (a) 2B ventil (b) 3B ventil

6.2.2. CT Radyoskopi Sonuçları

Yapılan bilgisayarlı tomografi (CT) incelemeleri sonucu porozite miktarları belirlenmiştir. CT incelemeleri açık şekilde göstermektedir ki; gaz atma kesit alanının ve çalışma prensibinin poroziteyle birebir ilişkisi vardır. CT incelemelerine göre 3B ventil sisteminin kullanıldığı proseslerde porozite azalmaktadır. Valfin mekanik altyapısından kaynaklanan çalışma kısıtları ve yetersiz gaz atma kesit alanına sahip olması porozite üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Aynı şartlarda yapılmış dökümlerde porozite dağılımı ve miktarına bağlı parça kalitesi, 3B ventil sisteminde, 2B ventile ve mekanik valfe göre artış göstermektedir. CT sonuçları Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 'de görülmektedir. Porozite dağılım oranları Tablo 6.2'de verilmektedir.



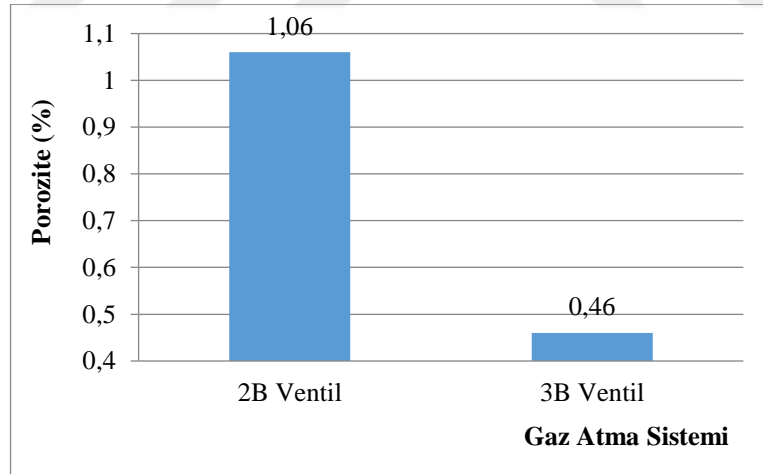
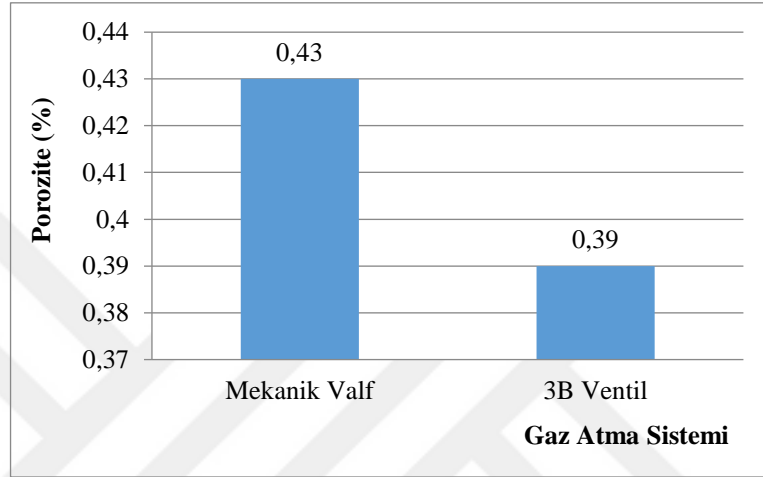
Şekil 6.7: CT radyoskopi görüntüleri (a) Mekanik valf (b) 3B ventil



Şekil 6.8: CT radyoskopi görüntüleri (a) Mekanik valf (b) 2B ventil

Tablo 6.2: CT sonuçlarına göre porozite oranları

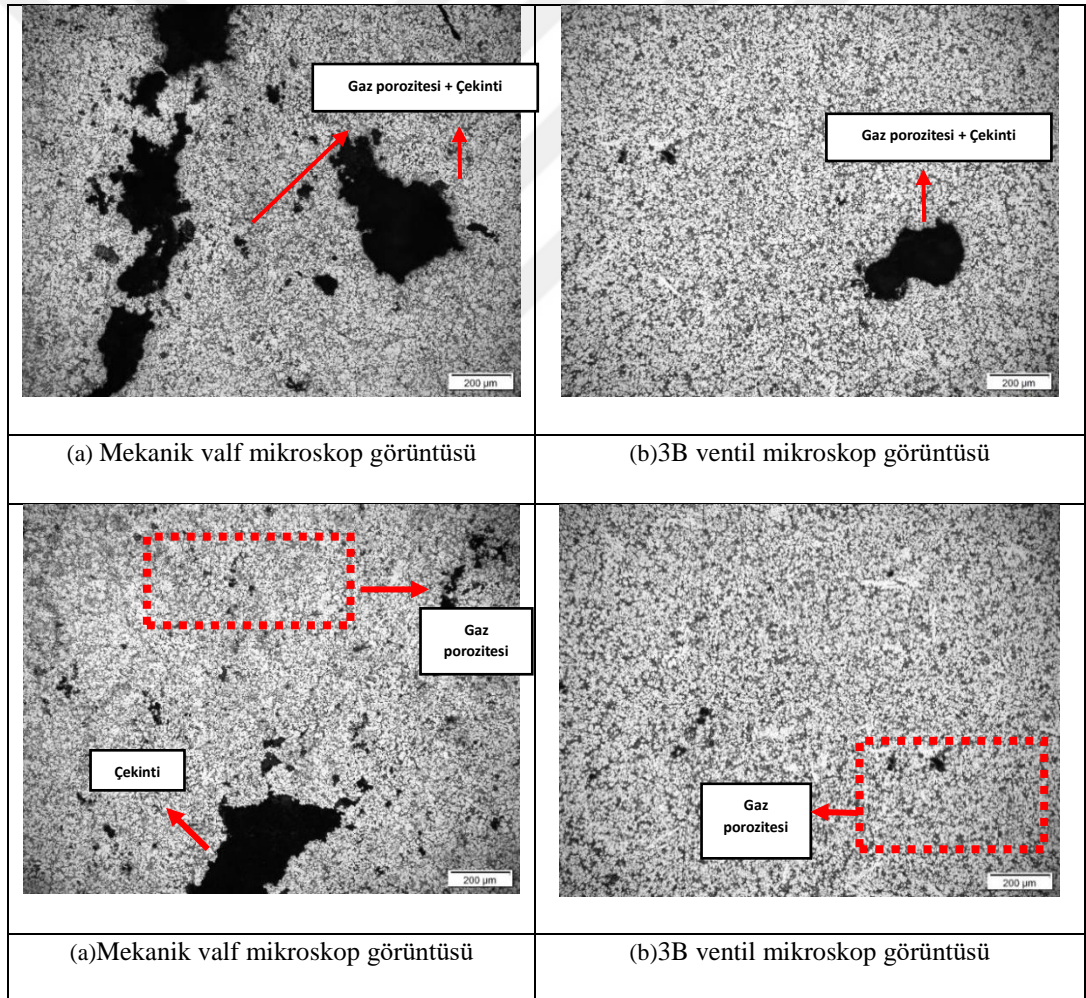
Numune	2B Ventil/Vakum Valfi Porozite, %	3B Ventil Porozite, %
1. Numune	0,43 (Mekaik Valf)	0,39
2. Numune	1,06 (2 Boyutlu Ventil)	0,46



6.2.3. Mikro Analiz Sonuçları

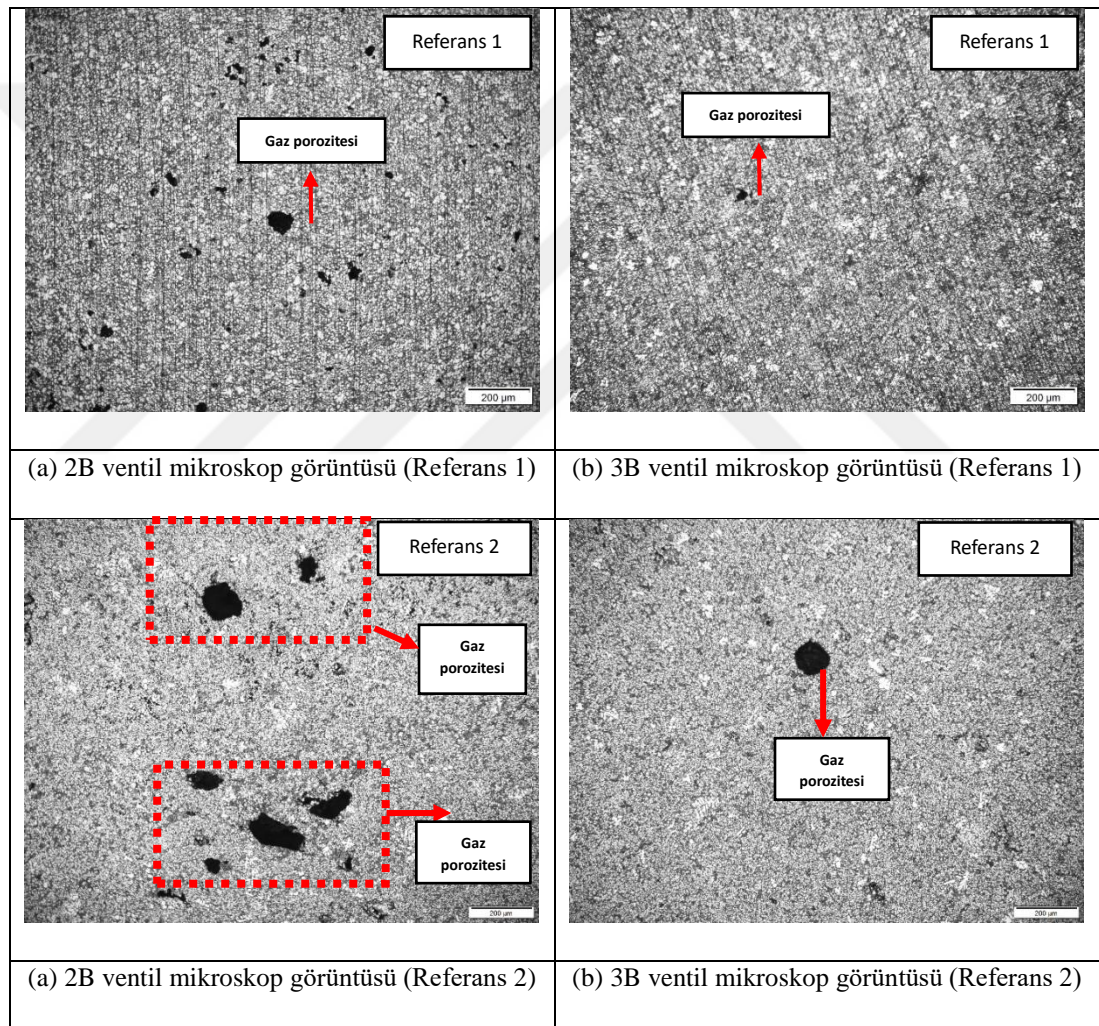
İncelenen numunelerde; 3B ventil kullanılarak üretilmiş kompleks yapıya sahip kompresör parçasında (Numune 1.2) porozitenin, mekanik valf ile üretilmiş parçada (Numune 1.1) tespit edilen poroziteye oranla azaldığı görülmektedir. Mekanik valf

kullanılarak üretilmiş parçanın (Numune 1.1) optik mikroskop görüntüsünde çekinti net bir şekilde göze çarpmaktadır. Bununla birlikte gaz porozitelerinin çekinti poroziteleriyle birleşerek oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.11). Numune 1.1 'in referans bölgesinden alınan kesitlerde, gaz porozitelerinin sayısının azaldığı, boyutlarının küçüldüğü görülmektedir ve 3B ventil sisteminin, çekinti miktarını azalttığı görülmektedir. Gazların verimli olarak atılmadığı proseslerde, gaz porozitesinin tane sınırlarında hapsolmesi ile çekinti miktarını arttırdığı görülmektedir. Numune 1.1 'de 400-500 μm boyutlarında poroziteler ile karşılaşılmasına rağmen numune 1.2 'de maksimum porozite boyutlarının 50-200 μm aralığında oluştuğu görülmektedir.



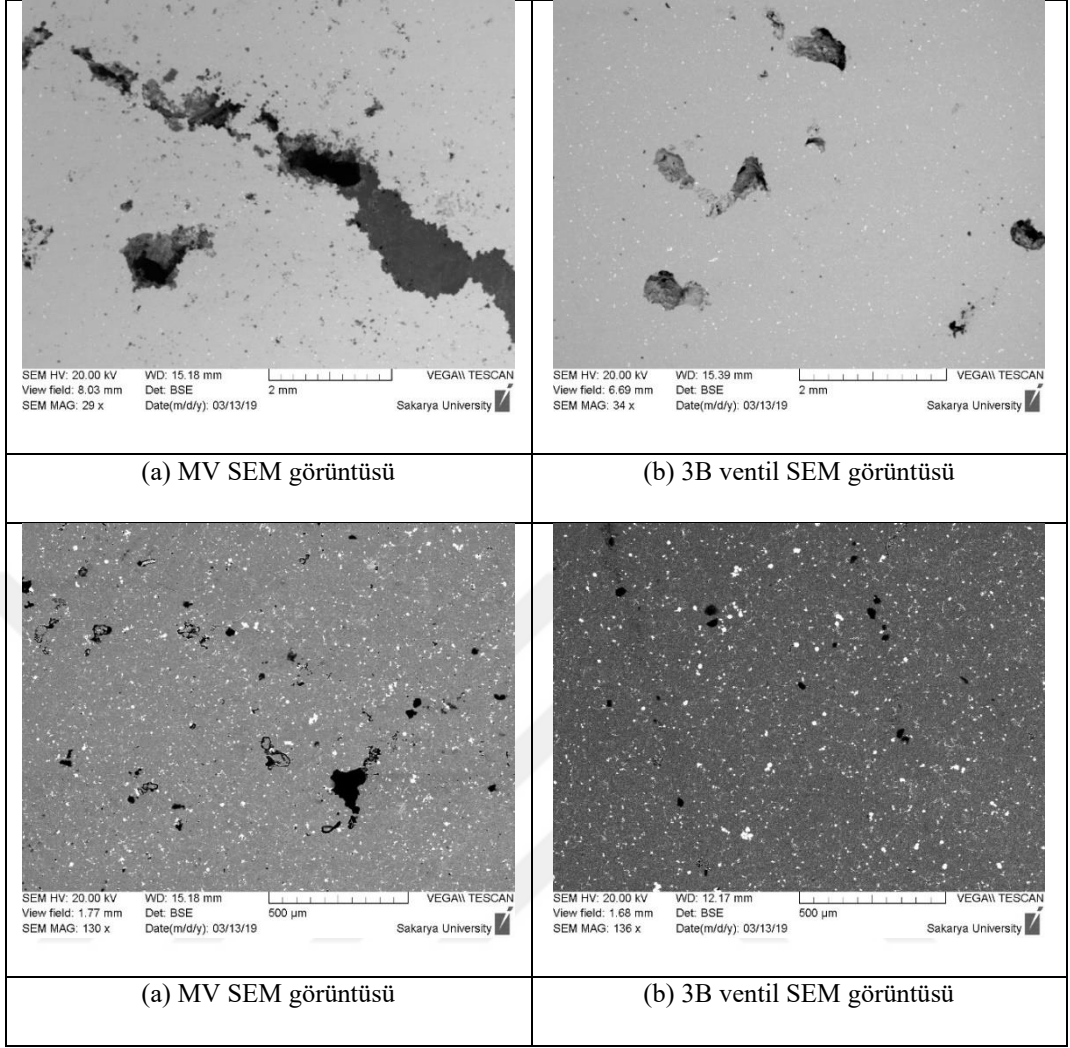
Şekil 6.11: Mikroskop görüntüleri a) Numune 1.1 b) Numune 1.2

Sızdırmazlık beklentisi yüksek fren körüğü parçası olan Numune 2 parçasının 1 numaralı referans bölgesinden alınan numunelerde; 3B ventil sisteminin gaz atma veriminin çok yüksek olduğu ve 2B ventil sisteminde bulunan gaz porozitelerinin elimine edildiği görülmektedir. 2 numaralı referans bölgeden alınan numuneler incelendiğinde; gaz porozitelerinin miktarlarının azaldığı gözlemlenmektedir (Şekil 6.12). Numune 2.1 'de 300-400 µm boyutlarında gaz poroziteleri ile karşılaşılmasına rağmen Numune 3.1 'den alınan numunelerde gaz porozitesi boyutunun 100 µm altına indirildiği görülmektedir.

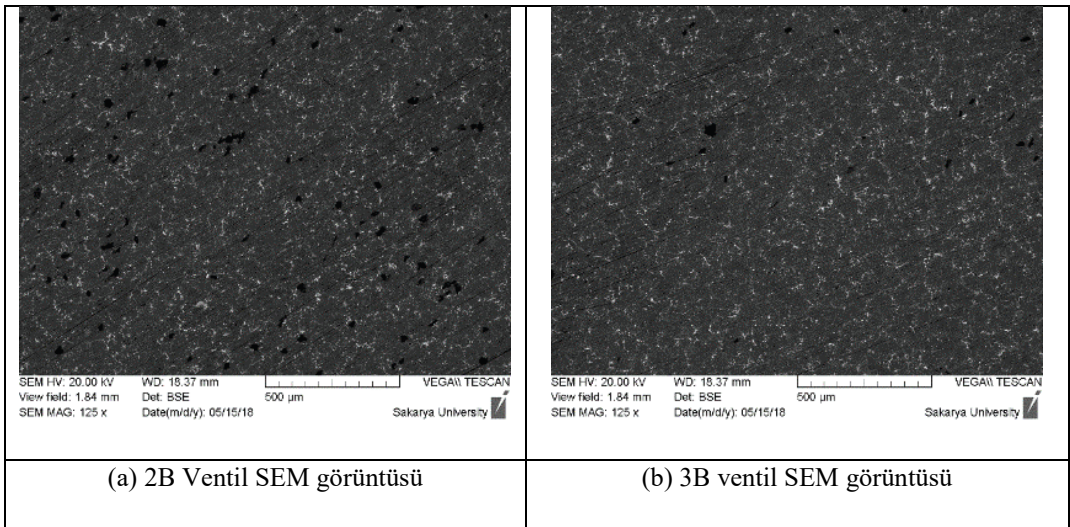


Şekil 6.12: Mikroskop görüntüleri a) Numune 2.1 b) Numune 2.2

SEM sonuçları, 3B ventil kullanılarak üretilmiş Numune 1.2 ve Numune 2.2 'de var olan porozitenin, Numune 1.1 (MV) ve Numune 2.1 (2B) görüntülerinde tespit edilen poroziteden daha az olduğu görülmektedir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 SEM görüntüsü: a) Numune 1.1 b) Numune 1.2



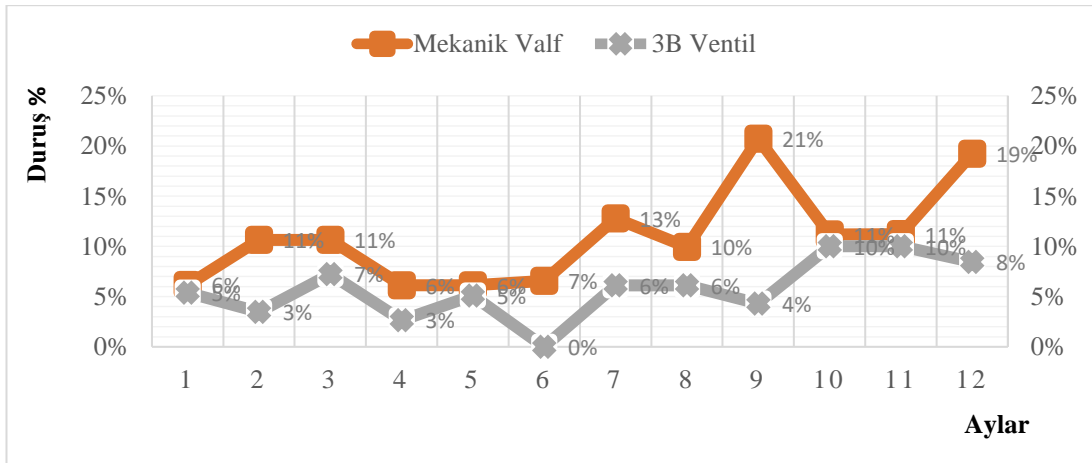
Şekil 6.14: SEM görüntüsü a) Numune 2.1 b) Numune 2.2

6.2.4. Verimlilik Analizleri

Tüm sistemlerin seri üretim performansları Erp yazılımı kullanılarak alınan üretim verileri ile yapılmıştır. Mekanik valf ve 3B ventil karşılaştırılmasının yapıldığı prosesin duruş verileri göze alındığında; mekanik valf kullanıldığında %10 olan valf kaynaklı duruş oranı, 3B ventil kullanımıyla %6 seviyesine düşmüştür (Tablo 6.3). Duruş süresine en büyük etkiyi; mekanik valf kullanıldığında gerekli olan valf temizliği ihtiyacının, 3B ventil sisteminde bulunmaması ve buna bağlı olarak her valf temizliği sonrası tüm sistemin rejime girmesi için üretim başlangıç adımına gerek duyulmaması göstermektedir. Yıllık bazda oluşan duruş eğrisi Şekil 6.15 'de verilmiştir.

Tablo 6.3: Duruş zamanları

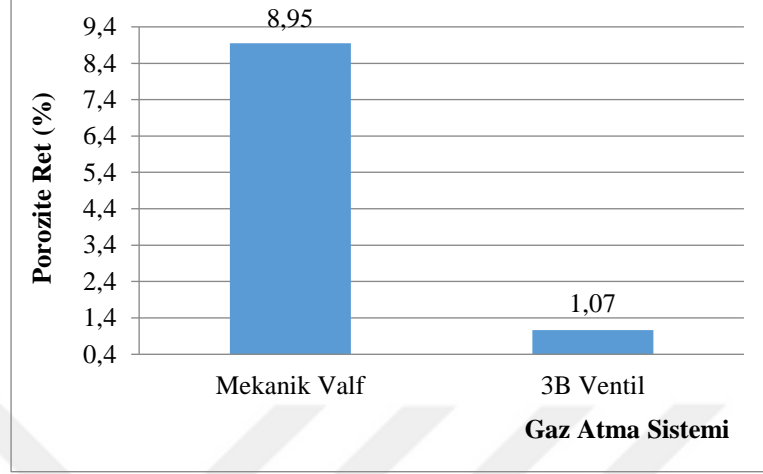
Ventil türü	Valf Kaynaklı Duruş (dk)	Toplam Çalışma Zamanı (dk)	Duruş Yüzdesi
Mekanik Valf	15227	154615	% 10
3B Ventil	9106	149213	% 6



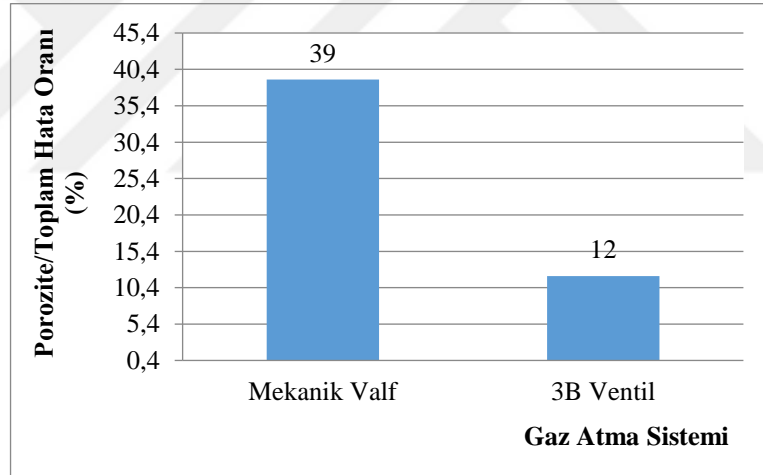
Şekil 6.15: Yıllık duruş analizi (Mekanik valf-3B ventil)

Mekanik valf ve 3B ventil karşılaştırılmasının yapıldığı 1.numunenin hurda verileri analiz edildiğinde toplam hata oranında azalma gözlemlenmektedir. Mekanik valf kullanılan sistemde poroziteden kaynaklı ret oranı, tüm üretim miktarının yaklaşık %9 'u olurken 3B ventil sisteminde bu oran %1 'e yakın olarak hesaplanmaktadır. Hata

dağılımlarına bakıldığında ise; toplam hatalar içerisinde porozite kaynaklı hatanın oranının %39'dan %12'ye düşmüştür. (Şekil 6.16, Şekil 6.17).

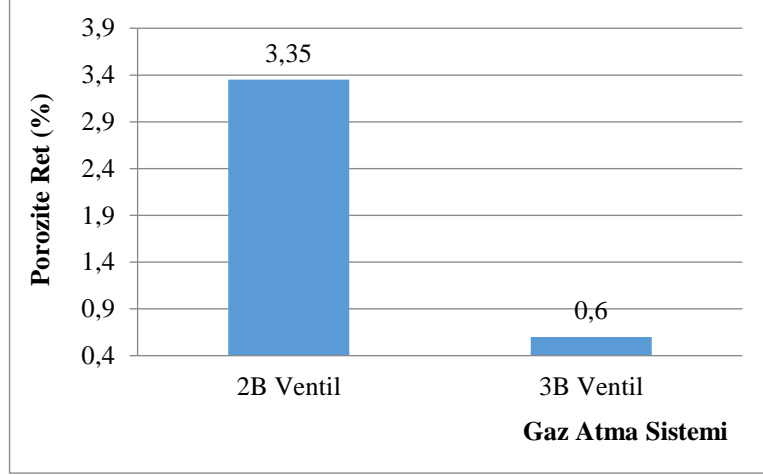


Şekil 6.16: Porozite ret oranları (Mekanik valf-3B ventil)

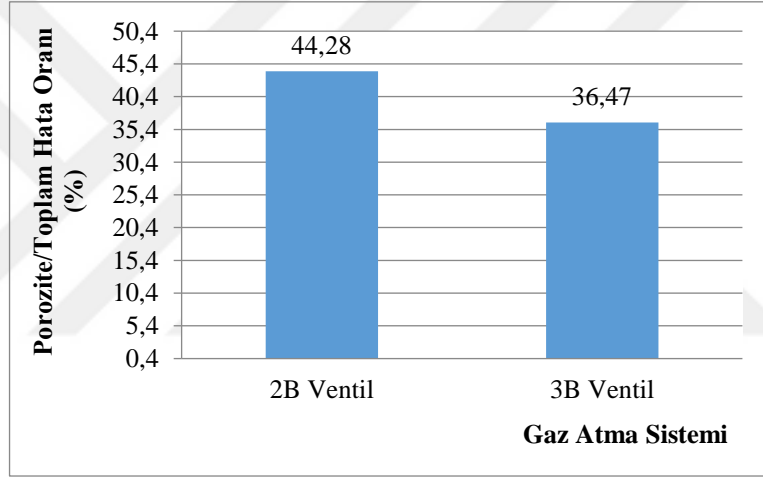


Şekil 6.17: Porozite/toplam hata oranları (Mekanik valf-3B ventil)

2B ventil ve 3B ventil sistemlerinin karşılaştırıldığı (Numune 2) üretim proseslerinden alınan veriler incelendiğinde; porozite kaynaklı hurdalar, 2B ventil kullanıldığında %3,35 iken, 3B ventil kullanıldığında %0,6 seviyesine kadar inmektedir. Hata dağılımlarına bakıldığında ise; toplam hatalar içerisinde porozite kaynaklı hatanın oranının %44 'dan %36 'ya indiği gözlemlenmektedir (Şekil 6.18, Şekil 6.19).



Şekil 6.18: Porozite ret oranları (2B ventil-3B ventil)



Şekil 6.19: Porozite/toplam hata oranları (2B ventil-3B ventil)

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında farklı ventil sistemlerinin (3B, 2B ve mekanik valf) yüksek basınçlı döküm sistemlerinde uygulanabilirliği ve gaz porozitesi nedeniyle döküm hatalarının azaltılmasına, proses verimliliğinin artırılmasına etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir:

- Üç boyutlu ventil sisteminin diğer ventil sistemlerine göre havanın tahliyesinde avantaj sağladığı tespit edilmiştir. Ventil yüzey alanının artması ile gaz tahliyesinin daha hızlı sağlandığı görülmektedir. Buna karşın mevcut durumda kullanılan geleneksel mekanik valfin çalışma sisteminin gaz atma sisteminin çalışması konusunda bakım zorlukları ve üretim şartlarında duruş sayısının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda üç boyutlu ventil sisteminin etkin bir şekilde kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Simülasyon çalışmaları yapılan analizler ve incelemeler ile gerçek zamanlı döküm hata verileri uyumluluk göstermektedir.
- Döküm hatalarının muayanesinde X-Ray ve CT radyoskopi sonuçları; 3B ventil sisteminin gaz atma verimliliğinin 2B ventil ve mekanik valfe göre daha üstün olduğunu göstermiştir. Porozite oranı %1 in altına indirilebilmiştir. Her parçada belirlenen referans bölgeler SEM ve OM aracılığıyla incelenmiş ve alınan referans bölgelerde porozite miktarlarının ve boyutlarının azaldığı görülmüştür. 3B ventil sistemleri gaz atma verimini artırarak gaz porozitesini azaltmakta olup çekinti porozitesini de iyileştirici yönde rol oynamaktadır. Mikroskobik incelemelerde; gaz porozite boyutlarının 300-400 µm seviyelerinden 100 µm altına düştüğü görülmüştür.

- Üretim verimlilik analizleri sonucunda ; 3B ventil sistemlerinin kullanımı üretim duruşlarının %10'dan %6'ya ve porozite nedenli hurda oranlarının %9'dan %1'e kadar azaltılabileceğini göstermiştir.
- Tübitak 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında yapılan arge ve proses iyileştirme çalışmaları sonucunda firmaya yıllık toplamda yaklaşık 65000 € değerinde kazanç sağlanmıştır.
- Öneriler: Yüksek basınçlı döküm prosesinde faz parametrelerinin 3 boyutlu ventil kullanılarak gaz atma performansına etkilerinin araştırmasının yapılması yanında farklı basınçlı döküm alüminyum alaşımlarının (farklı silisyum oranına sahip, farklı katılaşma aralığına sahip) proses şartlarına bağlı olarak performansı incelenebilir. Vakum altında ve vakum kullanılmaksızın üç boyutlu ventil sistemlerinin verimliliğinin incelenmesi önerilir. Bunun yanında 3 boyutlu ventil sistemlerinde kullanılan kanal ve formlar üzerinde farklı tasarım ve boyutlandırmalar ile özgün yeni ventil tasarımları yapılarak performans ölçümleri takip edilebilir.

KAYNAKLAR

- Apelian, D. (2009), *Aluminum Cast Alloys Enabling Tools for Improved Performance*. North American Die Casting Association, USA
- Aslan, O. B. (2007). *Basınçlı Dökümde Kaliteyi Etkileyen Faktörlerin Araştırılması*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Bar-Meir, G., Eckert, E. R. G. ve Goldstein, R. J. (1996). *Pressure Die Casting: A Model of Vacuum Pumping*. ASME J. Manuf. Sci. Eng., 118, pp. 259–265.
- Berry, J. T. ve Pehlke R. D. (1998). *Casting*. ASM Handbook, Vol. 15, ASM, Material Park
- Bonollo, F. (2012). *New Quality And Design Standarts For Aluminum Alloys Cast Products Database On Defects*. Stacast, Italy
- Bonollo, F., Gramegna N. ve Timelli, G. (2015). *High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges*. The Minerals, Metals & Materials Society, 5, 1047-4838. doi: 10.1007/s11837-015-1333-8
- Borujerdi, A.N. ve Goldak, J.A. (2004). *Modelling of air venting in pressure die casting process*. Journal of manufacturing science and engineering 126 (3), 557-581
- Brevick, J. ve Cheng, P., (1995). *Evaluating the Quality of Vacuum Die Castings*. North American Die Casting Association Transactions, Paper No. T95-045.
- Campbell, J. (2003), *Castings*. Buterworth-Heinemann, UK, 9780080488448
- Campbell, J. (2011). *Complete Casting Handbook*, University of Birmingham, United Kingdom
- Chill block / chill vent for efficient evacuation during die casting* (t.y.) Erişim Tarihi 19 Mayıs 2019, Erişim Adresi: <http://hercogroup.com/mold-technology/mold-components/chill-vent>
- Chen, X. G. ve Engler, S. (1994). *Formation of Gas Porosity in Aluminum Alloys*. AFS Transactions , vol. 102, 673-682.

- Dispınar, D. ve Campbell, J. (2009). *Alüminyum ve alaşımlarının döküm kalitesinin belirlenmesi*. 4. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul, s. 394-404.
- Dispınar, D. ve Campbell, J (2004). *Critical assessment of reduced pressure test. Part 1: Porosity phenomena*, International Journal Of Cast Metals Research, vol. 17, p. 280-286.
- Dispınar, D. (2005). *Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys*. Doktora Tezi, The University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials, UK
- Doehler, H.H. (1974). *Basınçlı Döküm*. Çeviren, Bayvas, M.Ş., Mesleki ve Teknik Öğretim
- Draper, A. B. (1996). *Effect of Vent and Gate Area on the Porosity of Die Casting*. Transactions of American Foundrymen's Society, 75, pp. 727-734.
- Dündar, M. ve Güngör, G. (t.y.). *Otomotiv Sektöründe Alüminyum Uygulamaları Ve Sürekli Döküm Tekniğı İle Üretilmiş Alüminyum Levha Alaşımları*. Erişim Tarihi 17 Mayıs 2019, Erişim Adresi: <https://www.assanaluminyum.com/tr-tr/ar-ge/yayınlar>
- Gariboldi, E., Bonollo, F. ve Parona, P. (2010). *Handbook of Defects in High Pressure Die Castings*. Associazione Italiana Metallurgia, Italy, 88-85298-73-7
- Gözen, A. (2007). *Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Sistemlerinin Tasarımı ve Simülasyonunun İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, İstanbul
- Hazani, A. A. ve Sultan, F. (2016). *Opportunities In The Aluminum Die Casting Industry In The Kingdom of Saudi Arabia*. Investment Overview
- Kenar, O., Dogan, A., Topcu, F. ve Altuncu, E. (2018). *Performance Evaluation of Overflow Desings on Cold Shut and Blister*. 19th International Metallurgy and Materials Congress, 978-605-01-1258-0
- Koru, M. ve Serce, O., (2014). *Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde, Farklı Yolluk Tipi ve Vakum Uygulamasının Simülasyonu*, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi: 1-13
- Lindsay, D. ve Wallace, J.F., (1972). *Effect of Vent Size and Design, Lubricant Practice, Metal Degassing, Die Texturing and Filling of Shot Sleeve on Die Casting Soundness*, Transactions 7th SDCE International Die Casting Congress, Chicago, Paper No. 10372

- Mert, F. (2013). *Basınçlı Dökümde Am50 Magnezyum Alaşımına Ce İlavesinin Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Ankara
- Monroe, A. (2014). *Porosity In Die Castings*. North American Die Casting Association, USA
- Nabil, K. ve Abboudi, S. (2016). *Effects of Shot Sleeve Filling on Evolution of the Free Surface and Solidification in the High-Pressure Die Casting Machine*. International Journal of Metal Casting, Vol11, Issue 2, pp 223–239
- Okcu, I. Y. (2011). *Effect Of Process Parameters On Mechanical Properties of High Pressure Die Cast Magnesium Az91 Components*, Middle East Technical University, Natural And Applied Sciences, Metallurgical and Material Engineering Department, Master of Science Thesis, Ankara
- Porosity, (t.y.). Erişim Tarihi 08 Mayıs 2019, Erişim Adresi: <https://www.prodiecasting.com/casting-porosity/>
- Runyoro, J., Boutorabi, S.M.A. and Campbell, J., 1992. *Critical gate velocities for film forming casting alloys: a basis for process specification*. AFS Transactions, 100: p. 225-234.
- Şirin, S. (2010). *Kalın kesitli yüksek basınçlı dökümlerde döküm ve simülasyon parametrelerinin incelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya
- Tan, E. (2011). *Alüminyum Alaşımlarında Blister Oluşumu*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı, Denizli
- Tüdöksad. (2014). *Döküm Hataları Atlası*. Türkiye, 978-605-62246-3-8
- Uludağ, A. (2007). *Basınçlı Döküm Yönteminde Kalıp Sistem Tasarımı Ve Simülasyon Analizi, Yıldız Teknik Analizi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Vacuum valve. (t.y.) Erişim Tarihi 02 Mayıs 2019, Erişim Adresi: https://www.fondarex.com/media/fox_products_2013.pdf
- Vanlı, A.S. (2007). *Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- W. Walkington (2017). *Gas Porosity: A guide to correction the problem*, North American Die Casting Association, USA, 249, 559-569

Wang L., Savage, G. ve Arthur, J. (2011). *CASTvac – A low cost and highly efficient vacuum valve for HPDC*. Die Casting Engineer, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.690.112

Wili, J. ve Wilho, P. (2016). *Opportunities for Aluminium Components in Automotive Applications*. JWP Engineering & Consulting, Charles Hatchett Seminar

Why is aluminum die casting, (t.y.). Erişim Tarihi 25 Nisan 2019, Erişim Adresi: <https://www.lupton-place.co.uk/why-is-aluminium-diecasting-rising-in-the-car-industry/>

Zyska, A., Konopka, Z., Lagiewka, M. ve Nadolski, M. (2015). *Porosity of Casting Produced by Vacuum Assisted Pressure Die Casting Method*. Archives of Foundry Engineering, Poland, 2299-2944, 15 Doi: 10.1515/afe-2015-0023



ÖZGEÇMİŞ

Aykut DOĞAN, 15/12/1992 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Arpek Arkan Alüminyum Enjeksiyon ve Kalıp San. Tic. A.Ş. firmasında Proje Mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı görevi sürdürmeye devam etmektedir.