T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ ÜRETİMLE ÜRETİLEN MAÇA VE SOĞUTMA KANALLARININ ÇEKİNTİ POROZİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Furkan Azer DİN

DANIŞMAN
Doç. Dr. Sebahattin KIRTAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 12.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Sebahattin KIRTAY (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. İlven MUTLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Cem KAHRUMAN
Bursa Teknik Üniversitesi
Mühendisik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli desteğini her zaman bana hissettiren, tecrübelerini her daim paylaşan, araştırmanın planlamasından yazılmasına kadar tüm süreçte yardımlarını esirgemeyen, sürekli motive eden ve bu çalışmayı bitirebilmemde çok büyük desteği olan sayın hocam Doç.Dr. Sebahattin KIRTAY' a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm firma olanaklarını kullanmama imkân veren, projenin ilerlemesinde ve geliştirilmesinde büyük katkıları olan değerli firmam Arpek Arkan Parça Alüminyum Enjeksiyon ve Kalıp San. Tic. A.Ş' ye ve çok kıymetli yöneticilerine teşekkür ederim. Çalışmanın her adımında bana çok büyük destek veren, tecrübelerini ve fikirlerini esirgemeyen, her daim çalışmanın bir parçası olan sayın yöneticilerim Naci EKMEN'e, Fuat TOPÇU' ya ve Burak ERDİL' e teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca deneysel çalışmalar boyunca her türlü desteği veren değerli çalışma arkadaşlarım Aykut DOĞAN, Rıdvan ZİRGİLOĞLU ve Barış DEMİR' e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatın her döneminde desteğini hissettiren, sonuca ulaşabilmem adına motive eden ve güvenen çok sevgili aileme, zor zamanlarımda yanımda olan çok kıymetli arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **iv**
TABLO LİSTESİ ..... **vi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **vii**
ÖZET ..... **viii**
SUMMARY ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Alüminyum 2
1.2. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi 2
1.3. Döküm Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımları 4
2. ALÜMİNYUMUN YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM TEKNOLOJİSİ **8**
2.1. Basınçlı Dökümün Avantajları ve Dezavantajları 8
2.1.1. Basınçlı Dökümün Avantajları 8
2.1.2. Basınçlı Dökümün Dezavantajları 8
2.2. Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Makineler ve Döküm Yöntemleri 9
2.3. Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Alüminyum Alaşımları ve Etkileri . 11
2.3.1. Alüminyum-Silisyum Alaşımları 11
2.3.2. Alüminyum-Magnezyum Alaşımları 12
2.3.3. Alüminyum-Bakır Alaşımları 12
3. DÖKÜM KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER **13**
3.1. Porozite; Tanımlaması ve Nedenleri 14
3.1.1. Gaz Porozitesi 15
3.1.2. Çekinti Porozitesi 16
4. YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI **17**
4.1. Yüksek Basınçlı Döküm Kalıbı Elemanları 18
4.1.1. Yolluk 18
4.1.2. Çekirdek 19
4.1.3. Kalıp Hamilleri 20
4.1.4. Maça Sistemleri 20
4.1.5. İtici Plakaları ve İticiler 22
4.1.6. Soğutma Sistemleri 22
5. METALLER İÇİN EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMLERİ **24**

5.1. 3B Metal Baskı Yöntemi 25
5.1.1. Toz Yatağı Füzyon Tabanlı Teknolojiler (Powder Bed Fusion (PBF)) 26
5.1.2. Doğrudan Enerji Biriktirme Tabanlı Teknolojileri (Direct Energy Deposition (DED)) 28
5.2. 3 Boyutlu Baskı Yöntemlerinin Avantajları ve Dezavantajları 29
6. MALZEME VE YÖNTEM 31
6.1. Döküm Aşaması 31
6.2. Döküm Sonrası Aşaması 34
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 36
7.1. Simülasyon Sonuçları 36
7.2. Döküm Sonrası Çalışmalar 38
7.2.1. Termal Maça Çalışmaları 38
7.2.2. X-Ray ve Mikroyapı Görüntüleri 39
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 45
KAYNAKÇA 47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Üretimlerine göre Döküm Yöntemlerinin Karşılaştırılması 2
Şekil 1.2: Üretimlerine göre Döküm Yöntemlerinin Karşılaştırılması. 3
Şekil 1.3: Ülkelerin CO2 emisyon hedefleri 5
Şekil 1.4: OEM firmaların CO2 emisyon hedefleri 5
Şekil 1.5: Otomobillerde alüminyum bileşen oranları 6
Şekil 1.6: Avrupa'da üretilen araçlarda, alüminyum kullanımının yıllara göre değişim grafiği 7
Şekil 2.1: Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi 9
Şekil 2.2: Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi 10
Şekil 2.3: Basınçlı döküm sırasında enjeksiyon aşamaları 11
Şekil 3.1: Basınçlı dökümde porozitenin temel sebepleri 15
Şekil 3.2: Bir alüminyum alaşımının mikroyapı analizi ve kesit görüntüsü 16
Şekil 3.3: Çekinti Porozitesi 16
Şekil 4.1: Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi 18
Şekil 4.2: Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri 19
Şekil 4.3: Kalıba bağlanmış bir çekirdek görüntüsü 19
Şekil 4.4: Kalıp grubu içerisinde gösterilen bir hamil görseli 20
Şekil 4.5: Hareketli maça sistemi 21
Şekil 4.6: Sıcak iş takım çeliğinden maça üretimi akışı 22
Şekil 4.7: Soğutma kanalları gösterimi 23
Şekil 5.1: Eklemeli Üretim Yöntemleri 25
Şekil 5.2: Seçici Lazer Sinterleme İşlemi 27
Şekil 5.3: 2013 Yılında 3B üretim yöntemiyle üretilen motor braket parçası 29
Şekil 6.1: AlSi10Mg-Fe alaşımı spektral değerleri 32
Şekil 6.2: StrikoWestofen Şaft Tipi Ergitme Fırını 32
Şekil 6.3: Gaz Giderme Ünitesi 32
Şekil 6.4: Bühler Carat 140D Carat Tipi Yüksek Basınçlı Döküm Makinesi 33
Şekil 6.5: Geleneksel yöntemlerle üretilen maça 33
Şekil 6.6: Örme teknolojisi ile üretilen maça 34
Şekil 6.7: Deneylerde kullanılan cihazlar 35
Şekil 7.1: Geleneksel maçalarla üretilen Crankcase parçasının simülasyonu 36
Şekil 7.2: 3 Boyutlu örme tekneği kullanılarak üretilen maçaların kullanıldığı Crankcase parçasının döküm simülasyonu. 37
Şekil 7.3: Geleneksel yöntemlerle üretilen maçanın döküm prosesi sonrası termal sıcaklık ölçümleri 38

Şekil 7.4: 3 Boyutlu örme teknolojisiyle üretilen maçanın, döküm prosesi sonrasındaki termal sıcaklık ölçümleri 39
Şekil 7.5: Gelenelsel Maça ile dökülen parçaların X-Ray görüntüleri 40
Şekil 7.6: 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların X-Ray görüntüleri 41
Şekil 7.7: Geleneksel maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların mikroyapı görüntüleri 42
Şekil 7.8: 3 Boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların mikroyapı görüntüleri *42*

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1: Basınçlı Döküm Yöntemlerinin Birbirleriyle Karşılaştırılmaları 4
Tablo 3.1: İç Hataların Sınıflandırılması 13
Tablo 3.2: Yüzey Hataların Sınıflandırılması 14
Tablo 3.3: Geometrik Hataların Sınıflandırılması 14
Tablo 5.1: PBF ile DED'in Kıyaslanması 28

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

AIM : Associazione Italiana Metalurgia

HPDC : High Pressure Die Casting

ERP : Enterprise Resource Planning

3B : 3 Boyutlu

OEM : Original Equipment Manufacturer

ASTM : American Society for Testing and Materials

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ ÜRETİMLE ÜRETİLEN MAÇA VE SOĞUTMA KANALLARININ ÇEKİNTİ POROZİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Furkan Azer DİN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Sebahattin KIRTAY

Otomotiv sanayisinde artan üretim miktarları ve buna bağlı olarak artan kaliteli parça taleplerini karşılayabilmek adına alüminyum alaşımlarının üretimi için yüksek basınçlı döküm yöntemi öne çıkmaktadır. Yüksek basınçlı döküm yönteminde, sıvı metalin kalıp boşluğa enjeksiyonu sırasında genellikle sıkışan havaya bağlı gaz poroziteleri ve katılaşmaya bağlı olarak oluşan çekinti poroziteleri görülmektedir. Müşteri şartnamelerinin gerekliliğince poroziteler için seviye beklentileri oluşmuştur. Uygun kalıp tasarımları ve döküm parametreleriyle beraber bu porozite seviyelerinin, uygun seviyelere getirilmesi mümkün olmuştur. Yüksek basınçlı döküm yönteminde çok rastlanan hatalardan olan çekinti porozitesinin gidermek için uygun katılaşma şartları oluşturulmalıdır. Bunun içinde yüksek basınçlı döküm prosesinde kullanılan kalıplarda ısıtma ve soğutma kanalları mevcuttur. Bu ısıtma ve soğutma kanalları, kalıbın sıcaklık seviyelerini dengeleyerek uygun sıvı metalin optimum şekilde katılaşmasına yardımcı olmaktadır. Bu tez çalışmasında, yüksek basınçlı döküm proseslerinde kullanılan maçaların ve bu maçaların içerisinde bulunan soğutma kanallarının çekinti porozitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretilen maçalar ve 3 boyutlu baskı yöntemiyle üretilen maçalarla $AlSi_{10}Mg$-Fe alaşımlı döküm parçası üretimleri yapılmıştır. Aynı zamanda bu maçaların içerisinde bulunan soğutma kanalları birbirinden farklı tasarımlara sahiptir. Böylece soğumaya bağlı olarak çekinti porozitesi analizi yapılabilmiştir. Üretim öncesinde parametrelerin belirlenmesi için MagmaSoft HPDC simülasyon programı kullanılmıştır. Daha sonrasında yüksek basınçlı döküm ile parçalar üretilmiştir. Üretilen parçaların analizleri için X-Ray radyoskopisi ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda; 3 boyutlu baskı yöntemiyle üretilen maçaların, geleneksel yöntemlerle üretilen maçalara göre çok daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Daha fazla yüzey alanına sahip soğutma kanalı bulunduran bu maçaların, çok daha iyi soğutma yaptığı gözlemlenmiştir. Eklemeli maçayla üretilen parçalarda yapılan mikroyapı analizlerinde herhangi bir çekinti porozitesine rastlanmamıştır. X-Ray radyoskopilerinde de herhangi bir çekinti porozitesi tespit edilmemiştir.

Temmuz 2021, 64 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yüksek basınçlı döküm, alüminyum alaşımları, 3 boyutlu örme metodu, eklemeli üretim yöntemleri, porozite, kalıp ve maça tasarımı, simülasyon

SUMMARY

M.Sc. THESIS

THE EFFECT OF ADDITIVE MANUFACTURING CORE AND COOLING CHANNELS ON SHRINKAGE POROSITY

Furkan Azer DİN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sebahattin KIRTAY

In the automotive industry, high pressure casting method comes to the fore for the production of aluminum alloys in order to meet the increasing production volumes and accordingly the increasing demand for quality parts. In the high-pressure casting method, gas porosities due to compressed air and shrinkage porosities due to solidification are generally observed during the injection of liquid metal into the mold cavity. Level expectations have been formed for the porosities as required by the customer specifications. With appropriate mold designs and casting parameters, it was possible to bring these porosity levels to appropriate levels. Appropriate solidification conditions must be established to eliminate shrinkage porosity, which is one of the most common mistakes in high pressure die casting method. There are heating and cooling channels in the molds used in the high pressure die casting process. These heating and cooling channels balance the temperature levels of the mold, helping to optimally solidify the appropriate liquid metal. In this thesis, the effect of the cores used in high pressure die casting processes and the cooling channels in these cores on shrinkage porosity were investigated. AlSi10Mg-Fe alloy casting parts were produced with cores produced by traditional methods and cores produced by 3D printing method. At the same time, the cooling channels in these cores have different designs. Thus, shrinkage porosity analysis could be performed depending on cooling. MagmaSoft HPDC simulation program was used to determine the parameters before production. Afterwards, parts were produced by high pressure

die casting. For the analysis of the produced parts, X-Ray radioscopy and microstructure examinations were made.

As a result of experimental studies; It has been observed that the cores produced by the 3D printing method are much more efficient than the cores produced by traditional methods. It has been observed that these cores, which have a cooling channel with a larger surface area, provide much better cooling. No shrinkage porosity was found in the microstructural analyzes of the pieces produced with 3D printed core. No shrinkage porosity was detected in X-Ray radioscopy

July 2021, 64 pages.

Keywords: High pressure die casting, aluminium alloys, additive manufacturing, porosity, die and core design, simulation

1. GİRİŞ

Uzay ve havacılık, savunma sanayi ve otomotiv endüstrisi gibi sektörlerde artan kalite ve hafif materyal ihtiyacı için alüminyum ve alaşımlarının kullanımı giderek artmaktadır. Alüminyum alaşımları sağladıkları kolay dökülebilirlik, korozyon direnci, yüksek mekanik dayanım ve düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı oldukça ilgi görmektedir. Özellikle seri üretimdeki hızı ve kalite beklentisi yüksek olan basınçlı döküm yöntemlerinde alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Basınçlı döküm yöntemleri alüminyum alaşımlarının ergitilerek basınç altında H13 gibi sıcak iş takım çeliklerinde bulunan kalıp boşluklarına yüksek hızla enjekte edilip hızla katılaşmasına dayalı bir döküm yöntemidir. Yüksek basınçlı döküm yöntemi, seri üretime uygunluğu, kompleks parçaların üretilebilirliği, neredeyse nihai ürünün üretilebilirliği ve yüksek yüzey kalitesi gibi avantajlara sahip bir döküm yöntemidir. Ne kadar yüksek kalite beklentisi olsa dahi, her döküm yönteminde olduğu gibi yüksek basınçlı döküm yönteminde de bazı döküm hataları mevcuttur. Bu hataların oluşmasında sıvı metalin ergitilmesinden dökülmesine, enjeksiyon işlemine, kalıp, kalıp malzemesi, makine ve döküm parametreleri gibi birçok etken mevcuttur. Döküm hatalarını yüzeysel hatalar, geometrik hatalar ve metalürjik hatalar olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Metalurjik hatalardan en önemlileri gaz ve çekinti poroziteleridir. Hata oranlarında ki artışlar hem verimsizliklere neden olurken hem de malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Yüksek basınçlı döküm yöntemindeki düşük çevrim sürelerinden dolayı bu döküm hatalarını engellemek oldukça zordur. Bu sebeple döküm öncesi aşamalarda öncelikle simülasyon çalışmaları yapılarak, bu hataların önlemesine yönelik tedbirler alınmaktadır. Simülasyon çalışmaları için genellikle MagmaSoft HPDC simünlasyon yazılı kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, eklemeli üretim yöntemiyle üretilen maçalar ve bu maçalarda bulunan farklı soğutma kanalı tasarımının çekinti porozitesi üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Geleneksel yöntemlerle üretilen maçalar ve bu maçalardaki soğutma kanallarının çekinti porozitesi üzerindeki etkileri, daha sonra da 3 boyutlu örmek metodu ile üretilen ve farklı soğutma kanalı tasarımına sahip maçaların çekinti porozitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı üretim metotlarıyla üretilen maçaların birbirleriyle kıyaslanması ve üretilen ürünlerdeki çekinti porozitesinin etkisinin kıyaslanması

amacıyla öncelikle X-Ray radyoskopisi yapılmıştır. X-Ray radyoskopisinin peşine, hazırlanan numunelerin mikroyapı analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları yorumlanmıştır. Elde edilen veriler ve bulgular detaylı şekilde irdelenmiştir.

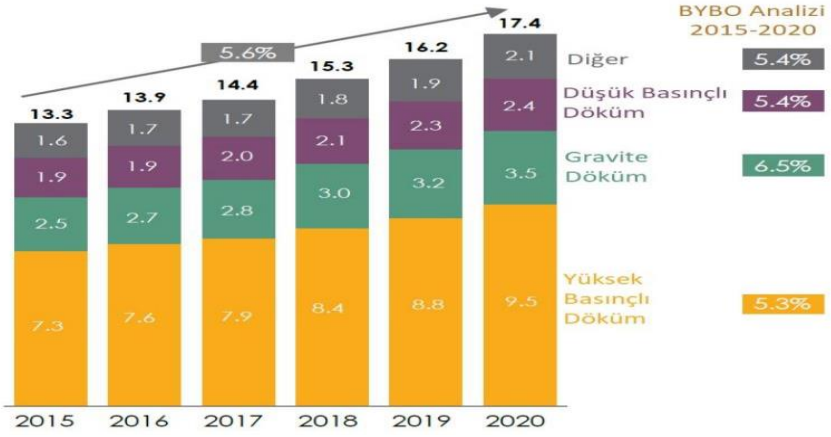
1.1. Alüminyum

Günümüz şartlarında endüstride kullanılan ağır metallerin yerini hafif metal alaşımları almaya başlamıştır. Hayatımızın birçok yerinde gördüğümüz alüminyum ise üzerinde en çok çalışma yapılan hafif metallerden birisidir.

Alüminyum; periyodik cetvelin 3A grubunda yer alır ve atom numarası 13'tür. Katı hal yoğunluğu 2,7 gr/cm³' tür. Doğada oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Alüminyum; hafif, alaşımlandırıldığında yüksek mukavemete sahip, tekrarlı kullanımı, korozyon direnci, şekillendirilebilirliği, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, yansıtıcılığı gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen bir metaldir [1].

1.2. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi

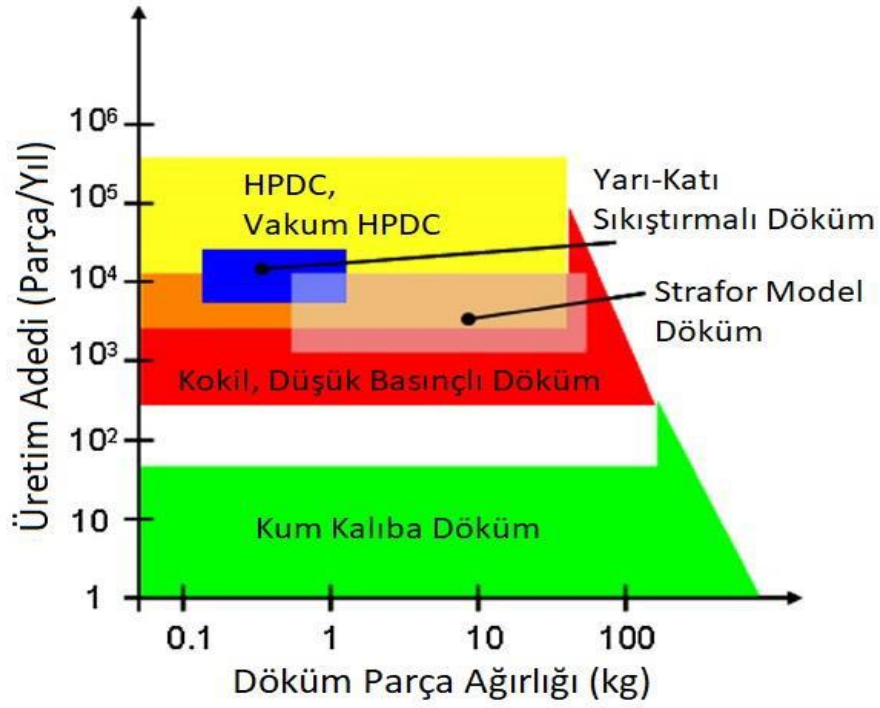
Basınçlı döküm teknolojileri seri üretim açısından dünyada çok büyük öneme sahiptir. Sürekli gelişen ve yaygınlaşan teknolojinin en büyük paydasını ise alüminyum oluşturmaktadır. Şekil 1.1'den de görülebileceği üzere küresel bazda alüminyumun döküm pazarındaki yeri 2015 yılında 13,3 milyar dolar iken bu değer 2020 yılı için 17,4 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir. Bunun anlamı ise alüminyumun döküm pazarındaki değerinin % 5.4 oranında artacağıdır.



Şekil 1.1: Üretimlerine göre Döküm Yöntemlerinin Karşılaştırılması [3]

Yüksek basınçlı döküm yöntemiyle alüminyum parça üretimi, geleneksel yöntemlere göre (kum/kokil döküm, hassas döküm gibi) daha avantajlıdır. Bu avantajları ise yüksek kaliteli döküm, düşük oranda döküm hatası içerme, seri üretimle yüksek oranda üretim adetlerine ulaşma ve karmaşık yapılı parçaların üretilebilirliği sağlamaktadır. Oldukça yüksek verimle çalışan bu yöntemin avantajlı konumda kalabilmesi için üretim adetlerinin yüksek olması gerekmektedir. Çünkü ilk üretim koşullarında döküm makinesi ve döküm kalıpları yatırım maliyetleri oldukça yüksektir.

Şekil 1.2 ve Tablo 1.1'de de görüleceği gibi yüksek basınçlı döküm yöntemi diğer yöntemlere göre oldukça avantajlı konumdadır. En hızlı gelişen döküm yöntemlerinden birisi olan yüksek basınçlı döküm yöntemi genellikle otomotiv, havacılık, haberleşme, uzay ve savunma sanayilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve çinko alaşımları için dökümü verimli ve uygundur, yaygın kullanımı da bu şekildedir [2,3].



Şekil 1.2: Üretimlerine göre Döküm Yöntemlerinin Karşılaştırılması. [3]

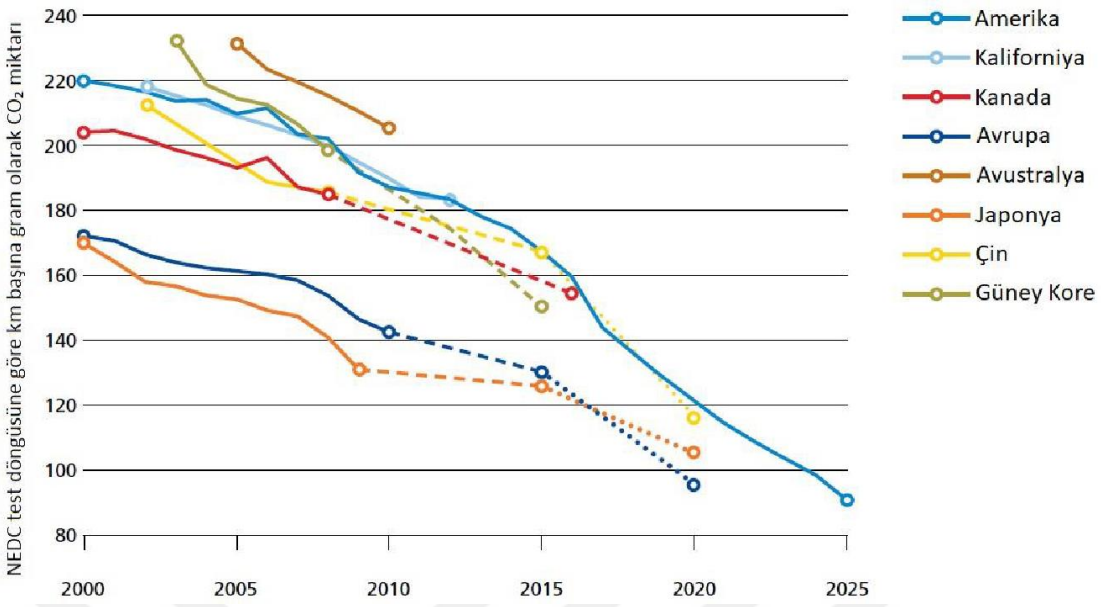
Tablo 1.1: Basınçlı Döküm Yöntemlerinin Birbirleriyle Karşılaştırılmaları [2]

	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
Olçüsel 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

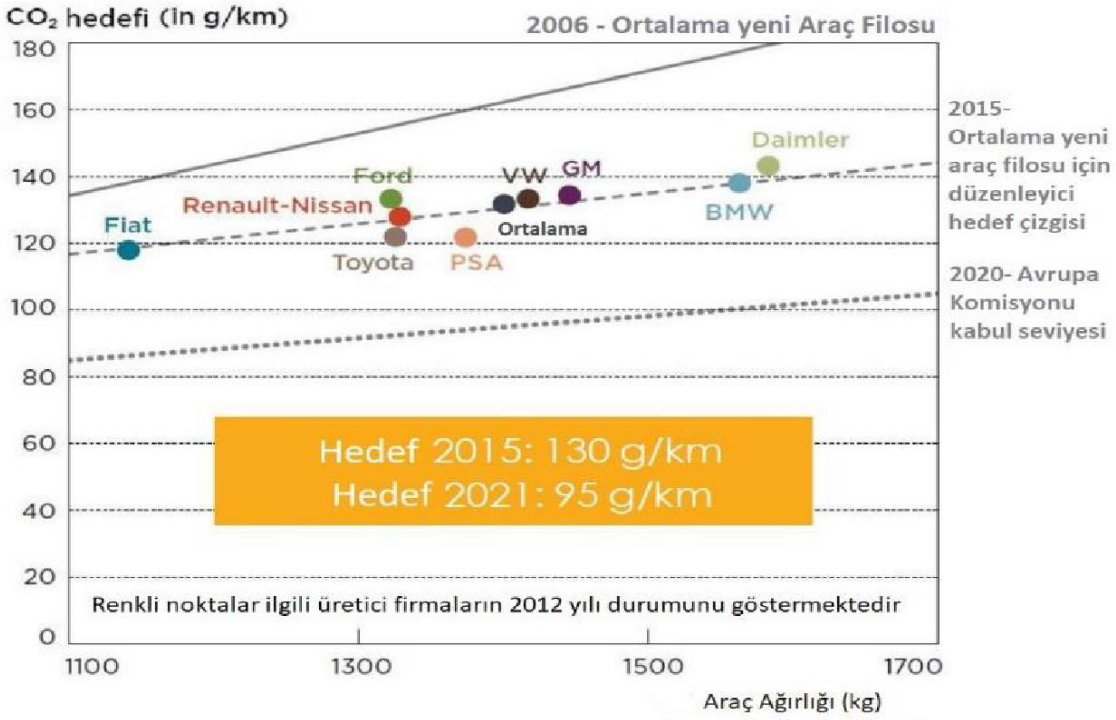
1.3. Döküm Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Basınçlı döküm alaşımları içerisinde en yaygın ve en uygun kullanıma sahip alüminyum alaşımlarının son yıllarda hafif araçlarda kullanımı oldukça artmıştır. Alüminyumun hafif araçlarda kullanım oranındaki artışın önümüzdeki 10 yıl içerisinde % 70'e kadar ulaşacağı beklenmektedir. Petrol ve türevi enerji kaynaklarının kısıtlılığı, enerji tasarrufu ve karbondioksit tüketimi sıkıntıları alüminyum kullanımını daha da ön plana çıkarmaktadır.

Otomotiv sektöründe petrol ve türevi enerji kaynaklara olan bağımlılık, standart ve gereklilikleri artırmış aynı zamanda yakıt kullanımındaki tasarrufu artırmak için parça hafifletme sistemleri üzerinde yapılan çalışmalara da baskı oluşturmuştur. Bu baskı doğrultusunda orijinal parça üreticileri kendi hedeflerini belirleyerek çalışmalarına hız vermiştir. Şekil 1.3'te ülkelerin, Şekil 1.4'te ise OEM firmalarının CO_2 emisyon hedefleri gösterilmektedir. Bu hedefler doğrultusunda ülkeler ve orijinal parça üreticileri çalışmalarını hızlanmışlardır.

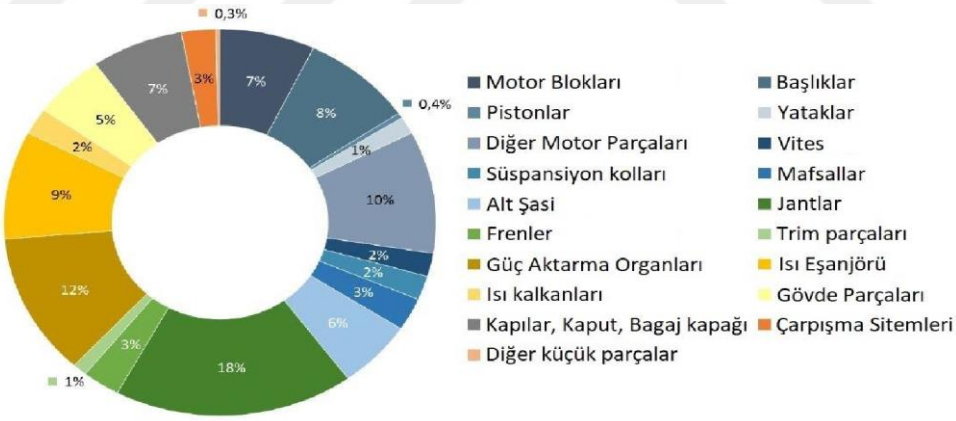


Şekil 1.3: Ülkelerin CO2 emisyon hedefleri [4]

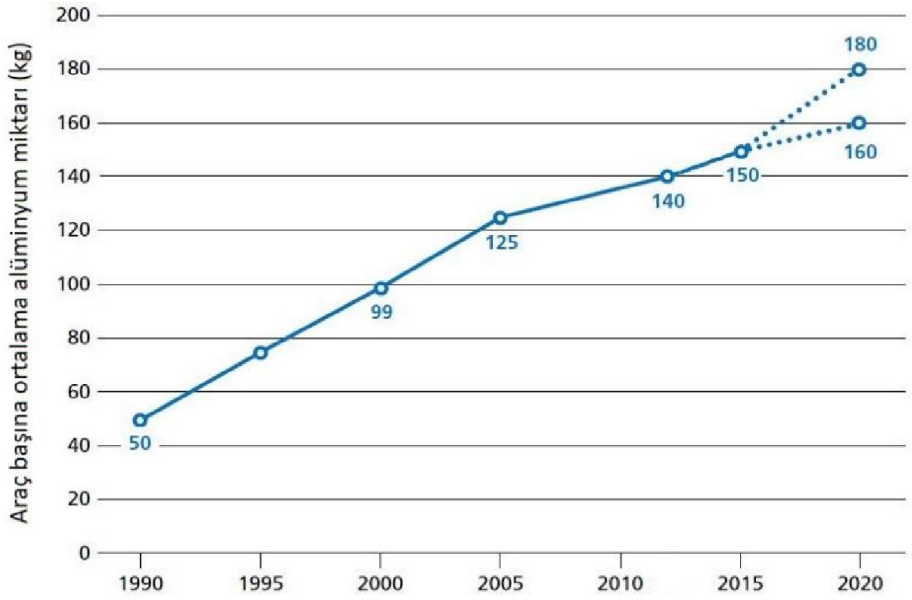


Şekil 1.4: OEM firmaların CO2 emisyon hedefleri [4]

Araçlarda toplam ağırlık miktarlarındaki değişiklikler yakıt sarfiyatını da etkilemektedir. % 15'lik bir ağırlık tasarrufu yaklaşık olarak % 25 yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Böylece yakıt tasarrufu için yapılan çalışmalardaki ana odak noktalarından birisi ağırlık azaltma olmuştur. Bunun içinde çelik olan parçaların birçoğu günümüzde alüminyuma dönüştürülmüş veya dönüştürülmeye çalıştırılmaktadır. Alüminyum parçaların birçoğunun döküm parçası olması ise alüminyum döküm proseslerinin önem kazanmasına neden olmuştur. Ayrıca alüminyumun kolay geri dönüştürülebilir olması popülerliğini artırmaktadır. Kullanılan toplam alüminyumun dörtte üçü tekrar başka amaçlar için kullanılabilmektedir. Alüminyumun süresiz olarak geri dönüştürebilir olması döküm proseslerinde oldukça avantajlıdır. Alüminyumun otomotiv sektöründe popülerliğinin diğer sebebi ise spesifik olarak yüksek derecede enerji emebilmesidir. Çelik yapılara kıyasla % 50 daha fazla enerji emilimine sahiptir. Ayrıca otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların % 50'sini döküm parçaları oluşturmaktadır. 2016 yılında Avrupa'da toplam otomobil üretimi verilerine göre araç başına ortalama alüminyum bileşeni içeriği Şekil 1.5'te gösterilmektedir. 1990-2020 yılları arasında otomobillerde kullanılan alüminyum miktarını değişimini ise Şekil 1.6'da gösterilmiştir [5-7].



Şekil 1.5: Otomobillerde alüminyum bileşen oranları [8].



Şekil 1.6: Avrupa'da üretilen araçlarda, alüminyum kullanımının yıllara göre değişim grafiği [9]

2. ALÜMİNYUMUN YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM TEKNOLOJİSİ

Yüksek basınçlı döküm teknolojisi günümüzde en çok talep gören ve en çok kullanılan döküm teknolojisidir. Alüminyum dökümlerinin yaklaşık olarak % 70'i yüksek ve alçak basınçlı döküm yöntemiyle gerçekleşmektedir. Yüksek basınçlı döküm yöntemi; ergitilmiş metalin yüksek basınçlı döküm makinesinde bulunan enjeksiyon haznesine doldurulup, piston hareketiyle yüksek bir hız ve basınçla kalıba doldurulması prosesidir [10].

Bu döküm yöntemiyle ince cidarlı, boyutsal tolerans hassasiyeti yüksek, otomasyona ve seri üretime uygun parçalar üretilebilmektedir. Ayrıca çok karmaşık yapılı parçalar ile birlikte 25 kg ağırlığına kadar birçok parça üretilebilmektedir [11].

2.1. Basınçlı Dökümün Avantajları ve Dezavantajları

2.1.1. Basınçlı Dökümün Avantajları

- Boyutsal toleransı düşük
- Malzeme maliyeti az
- Çok yüksek üretim adetlerine imkân sunar
- Karmaşık yapılı parçalar üretilebilir
- İmalat hızı oldukça yüksektir
- İnce cidarlı parçalar üretilebilir
- Yüzey işlem gerekliliği yoktur/çok azdır
- Parça mekanik özellikleri bakımından oldukça iyidir

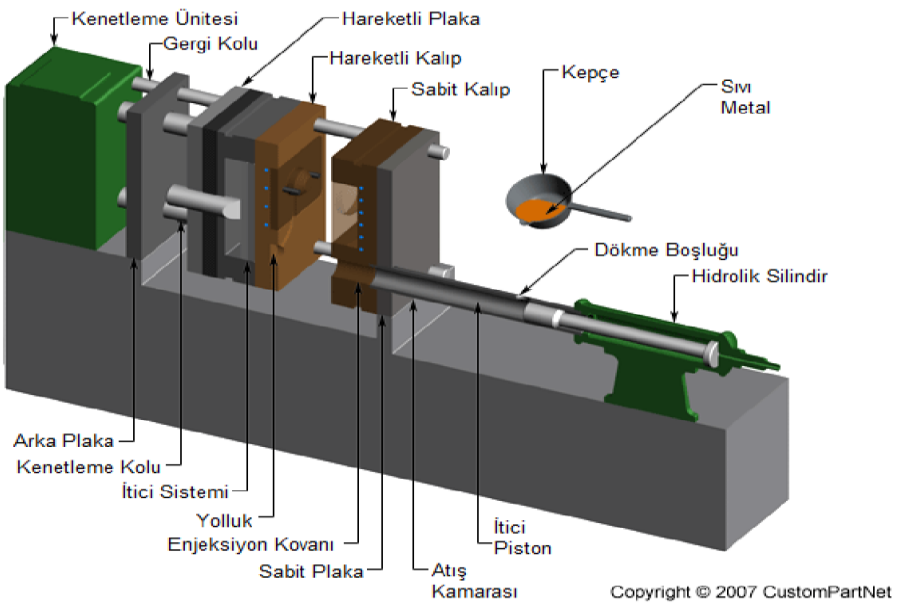
2.1.2. Basınçlı Dökümün Dezavantajları

- Döküm boyutları sınırlıdır
- Alaşım olarak sınırlamalar mevcuttur
- İlk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir
- Kalıp ve parça tasarımı oldukça zordur

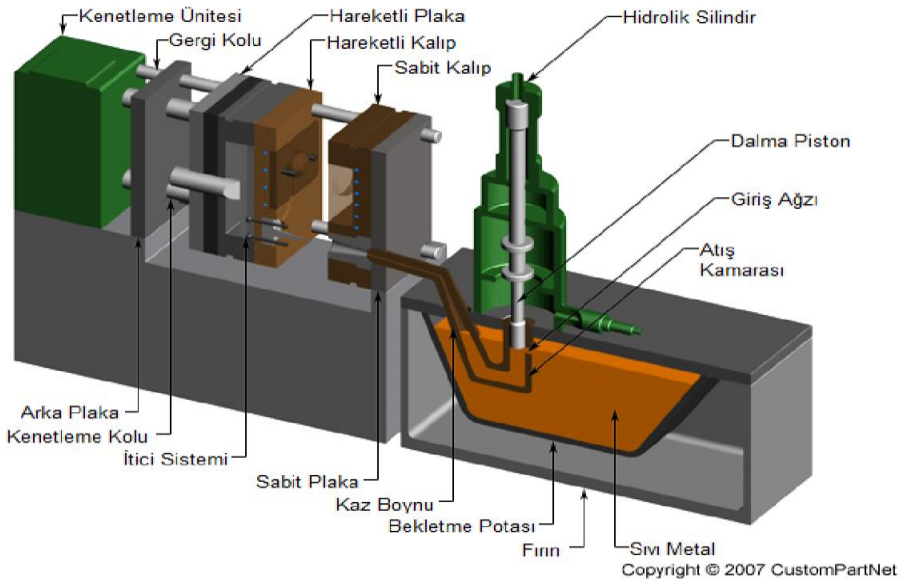
2.2. Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Makineler ve Döküm Yöntemleri

Basınçlı döküm yöntemleri olarak Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi (High Pressure Die Casting), Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi (Low Pressure Die Casting), Vakum Döküm (Vacuum Casting) ve Sıkıştırma Döküm (Squueze Casting) olarak 4'e ayrılmaktadır.

Basınçlı döküm makineleri ise metal enjeksiyon sistemlerine göre adlandırılmaktadır ve ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki Soğuk Kamaralı (Cold Chamber), ikincisi ise Sıcak Kamaralı (Hot Chamber) enjeksiyon sistemidir. Sıcak kamaralı döküm makinelerde düşük ergitme sıcaklığına sahip alaşımların dökümü gerçekleştirilmekteyken, soğuk kamaralı sistemlerse yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde kullanılmaktadır [10,12,13,14].

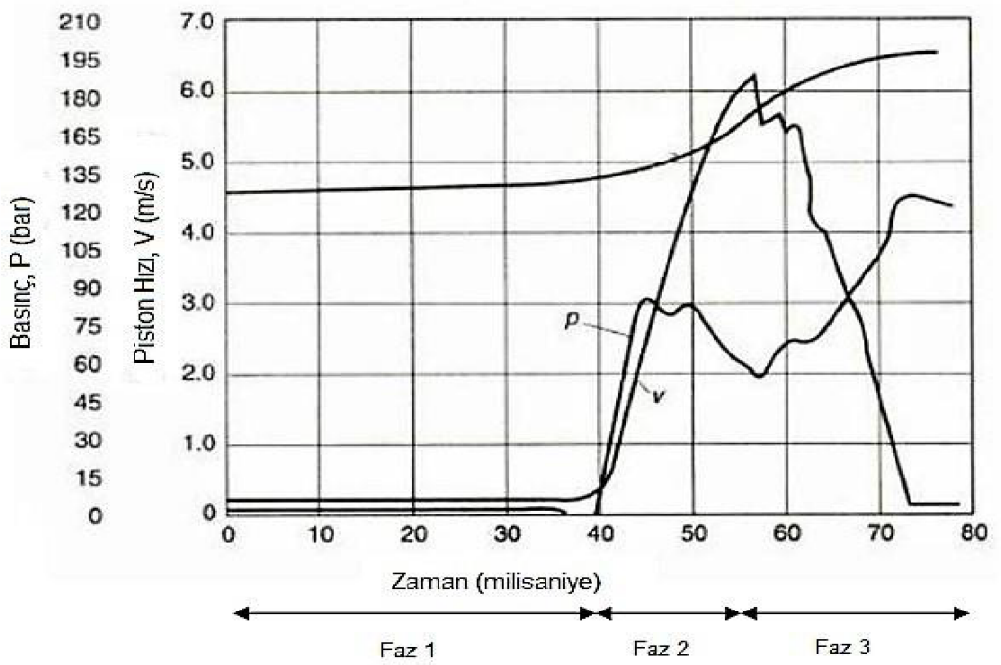


Şekil 2.1: Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi [15]



Şekil 2.2: Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi [15]

Yüksek basınçlı döküm yöntemiyle genellikle alüminyum, bakır, magnezyum ve zamak alaşımlarından oluşan parçalar üretilir. Döküm yapılan kalıplar genellikle sıcak iş takım çeliğinden yapılmış olurlar. Bu yöntem yaklaşık olarak 1000°C' ye kadar olan dökümlerde kullanılır. Yüksek basınçlı döküm, bir enjeksiyon yöntemidir. Bu yöntemde kovan içerisinde gelen sıvı metal, kovanın % 40 - % 70'ini doldurur. Piston hareketiyle beraber kalıbın içerisinde sıvı metal enjekte edilir. Kovan içerisinde piston hareketine bağlı olan parametreler ise döküm kalitesini doğrudan etkilemektedirler. Sıvı metal kalıbı tam olarak doldurana kadar 3 adet fazdan geçer. 1.Faz, pistonun hareket etmesiyle kovanın tam dolu pozisyona gelmesidir. 2.Faz, kalıbın doldurulduğu fazdır. 3.Faz ise yüksek (son) basınç aşamasıdır. Yüksek basınçlı döküm yönteminde görülen hız-basınç diyagramı Şekil 2.3'te verilmektedir [10,16,17].



Şekil 2.3: Basınçlı döküm sırasında enjeksiyon aşamaları [17]

2.3. Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Alüminyum Alaşımları ve Etkileri

Alüminyumun saf halde yumuşak ve düşük mukavemette olduğu bilinmektedir. Mekanik özelliklerin ve dökülebilir özelliklerinin artırılabilmesi için alüminyuma silisyum, magnezyum, bakır ve çinko gibi elementler eklenmektedir. Böylece alüminyum Al-Si, Al-Mg, Al-Cu ve Al-Zn gibi alaşımlarını meydana getirir. Bu alaşımlar genel olarak otomotiv ve havacılık sanayisinde kullanılmaktadır [16].

2.3.1. Alüminyum-Silisyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları içerisinde endüstriyel anlamda en çok kullanılan alüminyum alaşımı Al-Si alaşımlarıdır. Yüksek oranda silisyum içermesi, akışkanlık ve dökülebilirlik gibi özelliklerini artırmaktadır. Silisyum aynı zamanda sıcak yırtılma veya sıcak çatlama gibi problemlerinde oluşma ihtimalini düşürmektedir. Silisyumun alaşıma katmış olduğu yüksek sertlik değeri ise aşınma direncini artırıcı yönde etkiye sahiptir.

Silisyumun tek başına mukavemet artırma kabiliyeti yoktur. Ancak alaşım elementleri olarak Cu, Ni ve Mg ile beraber alaşımlandırıldığında ısıl işlem prosesiyle sertleştirilebilir alaşımlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle yapı içerisinde oluşan Mg_2Si fazı, alüminyum dökümlerinde önemli bir sertlik oluşturma mekanizması sağlamaktadır. Yapı içerisinde iğnemsi olarak

bulunan silisyum, çekme mukavemetini artırırken, darbe ve yorulma mukavemeti gibi özellikleri düşürmektedir.

Silisyumun aşınma direncini artırıcı etkisi, otomotiv sanayisinde dökme demir uygulamalarının yerini alüminyum alaşımlarının almasını sağlamaktadır [16,19].

2.3.2. Alüminyum-Magnezyum Alaşımları

Magnezyumun mukavemet ve sertleşme artırıcı özellikleri, alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılmasında önemli rol oynamaktadır. Al-Mg alaşımı yapısında oluşan Mg_2Si fazı, yapı içerisinde yüksek mukavemeti oluşturan mekanizmadır. Aynı zamanda Mg ilaveli alüminyum alaşımlarında korozyon direnci de yüksek seviyelerdedir. Al-Mg ikili bileşimlerinde, yeterli mukavemet artışı sağlayamadığı için ısıl işlem prosesi kullanılamamaktadır. Düşük silisyum içeren Al-Mg alaşımları ise sıcak yırtılma ve sınırlı dökülebilirlik gibi riskler barındırmaktadır. Yüksek korozyon direnci istenen Al-Mg alaşımlarında, Mg oranının ağırlıkça % 10 bandında olması gerekmektedir [16,18].

2.3.3. Alüminyum-Bakır Alaşımları

Alüminyum alaşımlandırılmasında kullanılan en eski element olan bakır (Cu), ısıl işlem prosesi görmüş ya da görmemiş bütün alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemetleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bakırın aynı zamanda işlenebilirliği artırma gibi özellikleri de mevcuttur. Bu sayede yüzeyden ince ve küçük talaş çıkmasını sağlamaktadır. Bakırın alüminyum alaşımlarında korozyon direncini azaltmak gibi bir etkisinin bulunması, çok dikkatli oranlarda ilave edilmesi gerektiğinin bir göstergesidir. Endüstride alüminyumun kullanıldığı ilk dönemlerde, Al-Cu alaşımlarında Cu oranı % 8 olarak kullanılmıştır. Dökülebilirlik özelliğinin zayıf olmasına rağmen uzun yıllar kullanılan Al-Cu alaşımları, ilerleyen dönemlerde Cu oranının azaltılıp, Si oranının artırılmasıyla ideal seviyeye çekilmiştir. Böylece akışkanlık özelliği kazanmış bir alaşım elde edilmiştir. Basınçlı döküm proseslerinde en çok kullanılan alaşımları ise AlSi9Cu3(Fe) ve AlSi8Cu3(Fe)'dir. Bu alaşımların içerisinde % 3,5' e kadar Cu bulunabilmektedir [18,19].

3. DÖKÜM KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Yüksek kalite beklentisi gerektiren sektörlerde alüminyum döküm parçalarının kullanımı artmaktadır. Bunun sonucu olarak ise yüksek kaliteli parça üretmek ön plana çıkmıştır. Yüksek kalite beklentisini karşılayabilmek için yüksek kararlılıkta bir kalite kontrol işlemi gerekmektedir. Sıvı metalin ergitilmesinden döküm işleminin sonucuna kadar birçok parametre döküm kalitesine etki etmektedir. Sıvı metalin kalitesini belirleyen parametreler ise üçe ayrılmıştır. Bunlar; 1) Sıvı içerisinde bulunan çözünmüş gazların atılması, 2) empüritelerin kontrolü, 3) inklüzyonların giderilmesidir.

İnklüzyonlar, alüminyum alaşımları içerisinde kalıntı gerilmeler oluşturarak kalitesizlik oluşturmaktadır. Bu inlüzyonların oluşmasında en çok etkiye sahip olan döküm hatası ise oksit ve oksit filmleridir. Sıvı metal içerisinde yaşanan türbülanslar ile bu oksit ve oksit filmleri sıvı içerisine karışıp, katılaşma esnasında tane sınırlarına çökerek döküm parçası içerisinde cüruf benzeri bir görüntü oluşturarak kalitesizlik oluşturmaktadır [16,20,21,22].

İtalyan Meturluji Derneği (AIM), basınçlı döküm prosesinde görülen hataları 3 farklı seviyede incelemektedir. Bu sınıflandırma; 1) Kusur morfolojisi, konumu (iç, dış, geometrik), 2) Metalurjik olarak görülen kusurlar (Gaz porozitesi, çekinti porozitesi), 3) Özel kusurlar olarak tanımlanmıştır. Basınçlı döküm prosesinde görülen hatalar Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3' te verilmiştir [23].

Tablo 3.1: İç Hataların Sınıflandırılması [23]

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 gas 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 Hataların Sınıflandırılması [23]

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 3.3: Geometrik Hataların Sınıflandırılması [23]

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

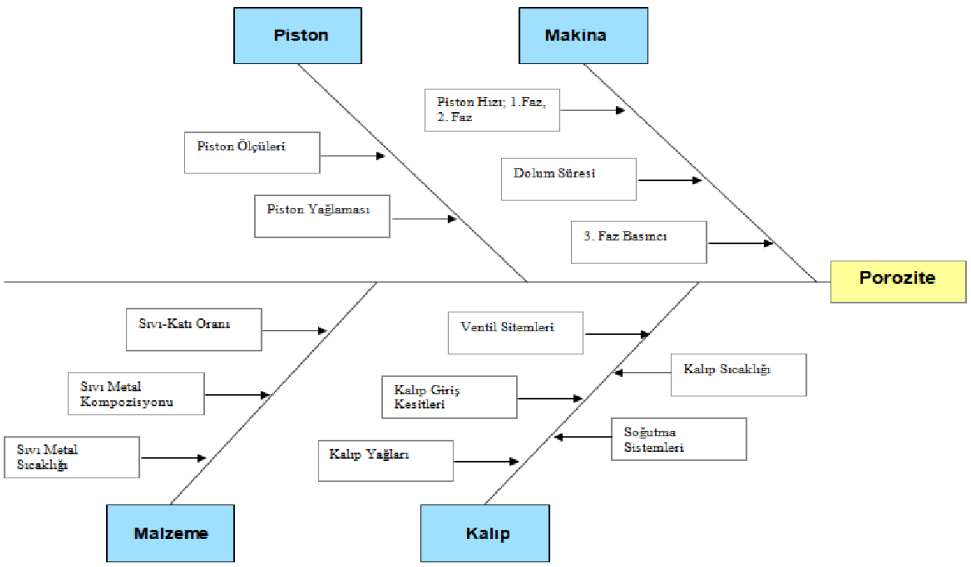
3.1. Porozite; Tanımlaması ve Nedenleri

Basınçlı döküm prensibiyle üretilen parçalarda porozite parçadan beklenilen bazı mekanik özellikleri (termal, sızdırmaklık, mekanik dayanım gibi) olumsuz yönde etkilemektedir. Porozite, katılaşma esnasında parça içerisinde hava veya gaz hapsolması ile oluşmaktadır. Bunun yanı sıra büzülme veya çekilmeden kaynaklı porozite de oluşabilmektedir. Katılaşma mekanizması porozitesiz bir yapı için oldukça önemlidir.

Yüksek basınçlı döküm prosesinde, kalıp dolumu esnasında kalıp boşluklarında bulunan hava metal kalıbı doldurmadan önce tahliye edilmelidir. Aksi durumda hava basıncı artacak ve parça içerisinde hava miktarında artış gözlemlenecektir. Optimum döküm şartlarında hava tahliye kanallarından atılması gereken havanın hacmi, kalıbı dolduracak olan ergimiş metal hacmine eşit olmalıdır [24].

Basınçlı döküm prosesinde porozite genellikle; alaşım elementi, döküm kalıbı ve kalıp tasarımı ile beraber döküm paremetrelerine bağlı olarak oluşmaktadır. Porozite sadece gaz ya da hava

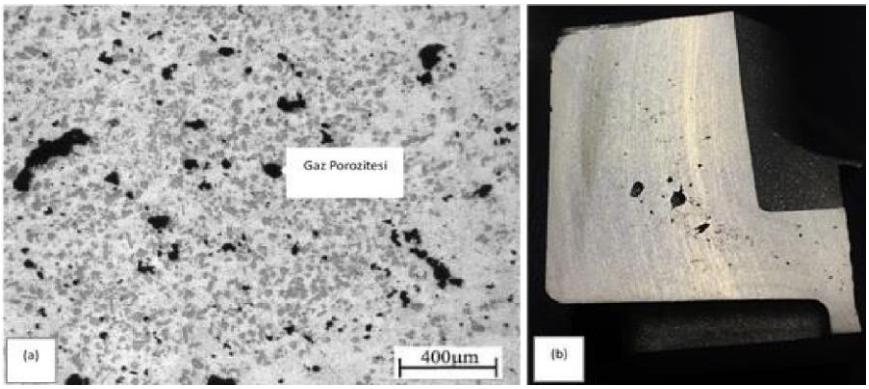
sıkışması olarak değil aynı zamanda çekinti/büzülme porozitesi olarakta gözlenmektedir. Çekinti porozitesi çoğunlukla katılaşma kaynaklı olarak gözlemlenmektedir. Basınçlı döküm yönteminde porozite nedenlerinin balık kılçığı yöntemiyle incelenmesi Şekil 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.1: Basınçlı dökümde porozitenin temel sebepleri [3]

3.1.1. Gaz Porozitesi

Yüksek basınçlı döküm proseslerinde en çok görülen döküm hatası gaz porozitesidir. Gaz porozitesinin oluşma sebebi parça içerisinde katılaşma esnasında kalan hava ya da gazlardır. İdeal teorik döküm şartlarında en iyi parça porozitesiz olarak nitelendirilmiş olsa bile pratikte porozitesiz parça üretmek yüksek basınçlı döküm prosesinde neredeyse imkansızdır. Üretilen parçaların kalitesi ise porozite miktarı ve boyutlarına bağlı olarak uluslararası standartlar (ASTM E505) ya da müşteri şartnameleri kapsamınca belirlenmektedir. Yüksek basınçlı döküm prosesinde gaz porozitesi genellikle; 1.faz hız parametresine, alaşım elementine uygulanan gaz giderme operasyonuna, piston hareketinin gerçekleştiği kovanın deformasyonuna, kalıp ve kovanın kirliliğine bağlı olarak görülmektedir [25,26]. Şekil 3.2'de alüminyum alaşımı ile dökülen bir parçanın mikroyapısı analizi ve kesit görüntüsü ile alınan gaz porozositesi görülmektedir.

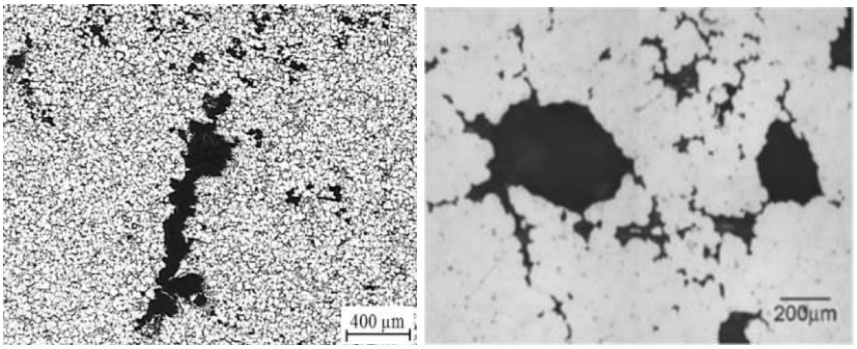


Şekil 3.2: Bir alüminyum alaşımının mikroyapı analizi ve kesit görüntüsü [24]

3.1.2. Çekinti Porozitesi

Basınçlı döküm proseslerinde en çok rastlanan döküm hatalarından birisi de çekinti poroziteleridir. Çekinti poroziteleri temel olarak katılaşma farklarından dolayı oluşmaktadırlar. Sıvı metal hacmi, katılaşma ile beraber azalmaktadır (Çoğu alüminyum alaşımında %6 olarak kabul edilmektedir). Döküm prosesi tamamlanıncaya kadar metalin büzülmesi engellenmeye çalışılmaktadır. Bunun içinde döküm prosesi boyunca kalıp boşlukları beslenmeye çalışılmaktadır. Katılaşan parça içerisinde gözlemlenecek çekinti porozitesi parçada kalitesizliğe neden olacaktır.

Çekinti poroziteleri gaz porozitelerine benzerlik gösterirler. Gaz poroziteleri yuvarlak, düzgün ve homojen yapıda gözlemlenirken; çekinti poroziteleri düzensiz ve dentritik olarak parça iç yapısında gözlemlenmektedirler. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te alüminyum alaşımı ile dökülen bir parçanın mikro yapısı analizi ile görüntülenen çekinti porozositesi görülmektedir [27,28].

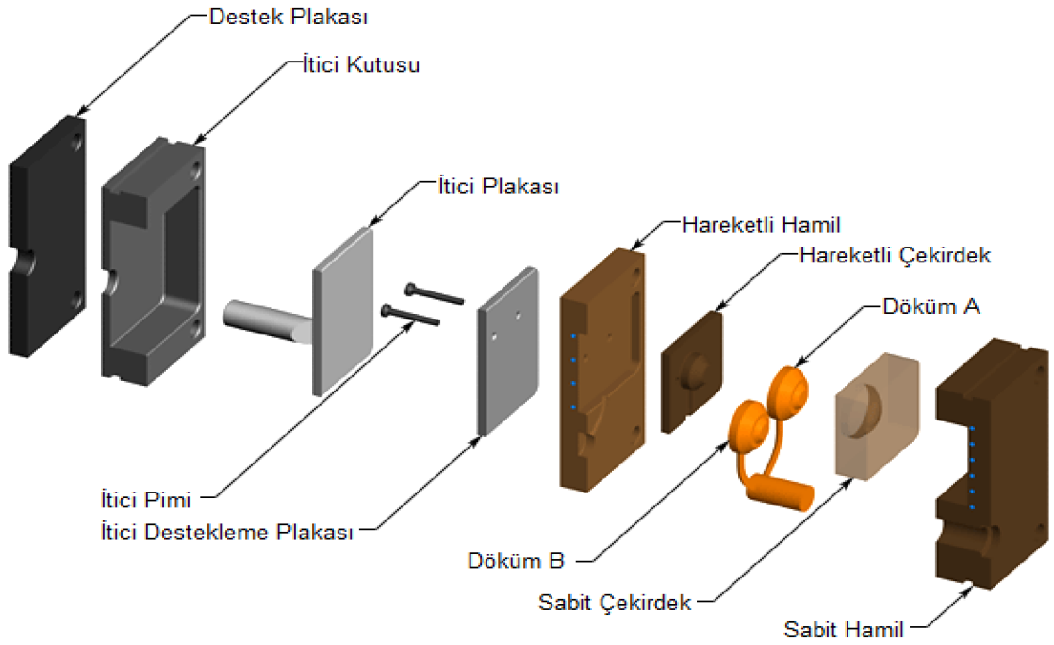


Şekil 3.3: Çekinti Porozitesi [2,3]

4. YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI

Yüksek basınçlı döküm bileşenlerinden biriside döküm kalıplarıdır. Döküm kalıpları, en maliyetli ve en karmaşık döküm elemanıdır. Kalıp malzemesi, kalıp tasarımı ve üretimi ise yüksek basınçlı döküm prosesinde kilit rol oynamaktadır. Yüksek basınçlı döküm kalıpları yüksek sıcaklık ve yüksek kalıp kapama kuvvetleri karşısında yeterli mekanik mukavemeti sağlamalıdır. Kalıp kapama kuvvetleri 40 kN'a kadar ulaşabilmektedir. Ayrıca döküm esnasında, kalıp yüzeyi 120 Mpa'a kadar basınç ve 60 m/sn' ye ulaşan sıvı metal hızının sebep olacağı erozyonlara dayanmalıdır. Kalıpların döküm prosesindeki önemli rollerinden bazıları; sıvı metal sıcaklığını dağıtmak, kalıp boşluklarındaki hava tahliyesini sağlamak, stresi absorbe etmek ve dökülen parçanın kolay çıkartılabilmesini sağlamaktır. Kalıplarda yaşanabilecek olası termal şokları engellemek için kalıplar döküm öncesinde 180° ile 350° arasındaki sıcaklıklara ısıtılırlar. Kalıp yüzeyleri yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluklardan dolayı aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Kalıp malzemesi olarak yüksek alaşımlı sıcak iş takım çelikleri kullanılmaktadır. Çoğunlukla H10, H11 ve H13 sıcak iş takım çelikleri yüksek basınçlı döküm proseslerinde tercih edilmektedir [16,17,29].

Yüksek basınçlı döküm proseslerinde kalıplar, dökülecek parçaların şekillerine bağlı olarak işlenir. Kalıplar çoğunlukla sabit ve hareketli olmak üzere iki yarımdan meydana gelmektedirler. "Sabit Kalıp" olarak adlandırılan kalıp, sıvı metalin enjekte edileceği tarafa bağlanır ve sabittir. Karşısında yerleştirilen ve "Hareketli Kalıp" olarak adlandırılan kalıp ise üzerinde itici grubunu barındırmaktadır ve hareketlidir. Her çevrimde sabit kalıba doğru açma/kapama hareketini gerçekleştirir. Yüksek basınçlı döküm kalıbının bileşenleri Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1: Yüksek basınçlı döküm kalıp bileşenlerinin şematik gösterimi [15].

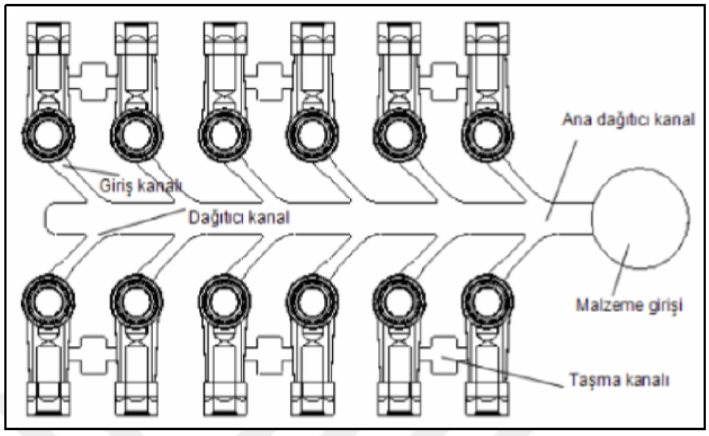
Yüksek basınçlı döküm prosesinde kullanılan kalıplar, dökülecek parça geometrisine bağlı olarak tasarlanıp, uygun talaşlı imalat yöntemleriyle üretilmektedirler. Yüksek basınçlı döküm parçalarının çoğunun gereksinimi olan yüzey pürüzlülüğü şartlarını sağlamak için, kalıp yüzeyleri işlenmiş ve mümkün olduğunca pürüzsüz olmalıdırlar [17,19,25].

4.1. Yüksek Basınçlı Döküm Kalıbı Elemanları

4.1.1. Yolluk

Yolluk sistemi, yolluktan giren sıvı metalin kalıp boşluklarına özel kanallar ile taşınmasını sağlayan sistemdir. 4,5 – 8 mm arasında değişken derinliklere sahip olup, parça geometrisine ve ağırlığına bağlı olarak da genişlikleri belirlenmektedir. Yolluk kanallarının derinlik hesabı, döküm parçası x 1,5 olarak kabul edilmektedir. Yolluk içerisinden geçen sıvı metalin hızı alaşımlarına bağlı olarak; magnezyum alaşımlarında 20 m/s, çinko alaşımlarında 15 m/s ve alüminyum alaşımlarında ise 10 m/s' nin altına düşmemelidir.

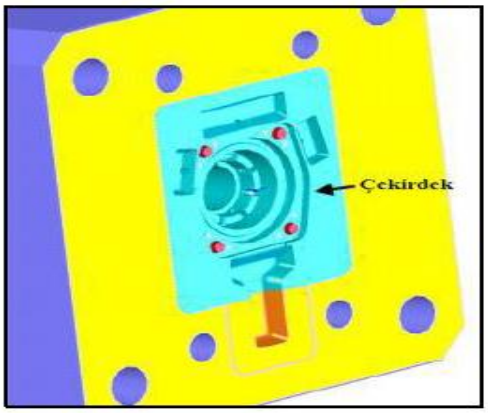
Genel olarak yolluk kanalları kısa yapılmalıdır. Ancak parça tasarımı ve döküm koşullarına bağlı olarak bu kuralda bazı değişiklikler yapılabilir. İnce girişli yolluklarda iyi bir yüzey kalitesi elde edilebilirken, yoğun döküm yapılamamaktadır. Büyük ve kalın kesitli yolluklarda ise yoğun ve kusursuza yakın döküm yapılabilirken, yüzeysel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.2'de örnek bir yolluk ve dağıtıcı sistemi verilmiştir [28,30].



Şekil 4.2: Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri [30]

4.1.2. Çekirdek

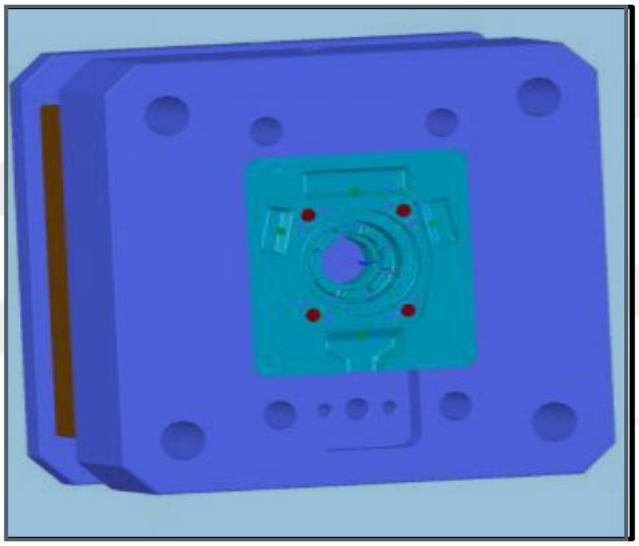
Çekirdek, parçanın şeklinin negatif olarak işlendiği kalıp elemanıdır. Çekirdekler, sabit ve hareketli kalıplara bağlıdırlar. Kalıplara bağlanan çekirdekler, tek çekirdek ya da çoklu çekirdek olabilirler. Aynı zamanda kalıba farklı geometrilerdeki çekirdeklerde bağlanabilirler. Şekil 4.3'de kalıba bağlanmış bir çekirdek görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.3: Kalıba bağlanmış bir çekirdek görüntüsü [2]

4.1.3. Kalıp Hamilleri

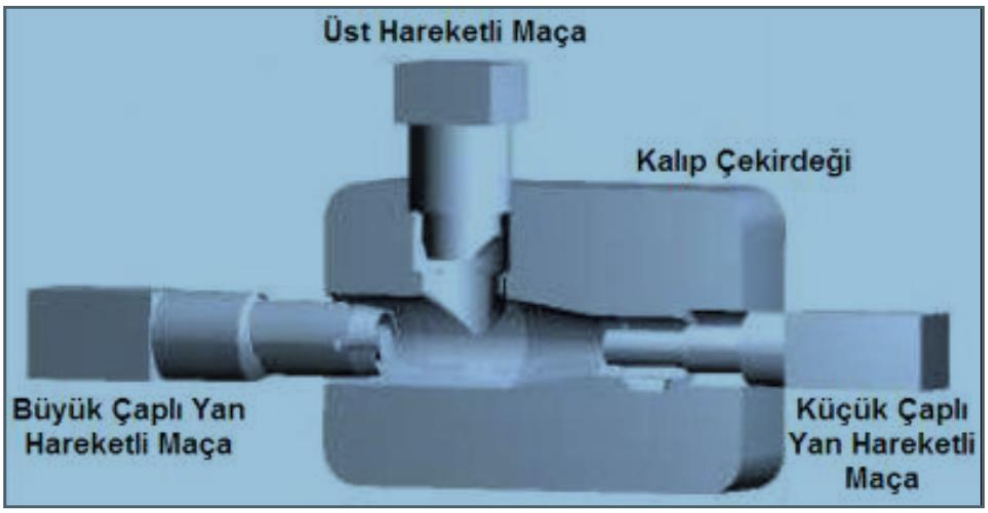
Kalıp hamilleri, kalıpta bulunan diğer elemanları bir arada tutan plaka kısımdır. Hareketli ve sabit olmak üzere iki tanedir. Sabit olan hamil, enjeksiyon yapılacak olan tarafa bağlanırken, hareketli olan hamil itici grupları ile beraber hareketli sistem tarafına bağlanmaktadır. Hamil sistemleri kalıp kapanması ve kilitlenmesini sağlamakla beraber kalıp ayırma yüzeyi olarak da tanımlanmaktadır. Şekil 4.4'te mor renkle bir kalıp hamili örneği gösterilmiştir [25].



Şekil 4.4: Kalıp grubu içerisinde gösterilen bir hamil görseli [2]

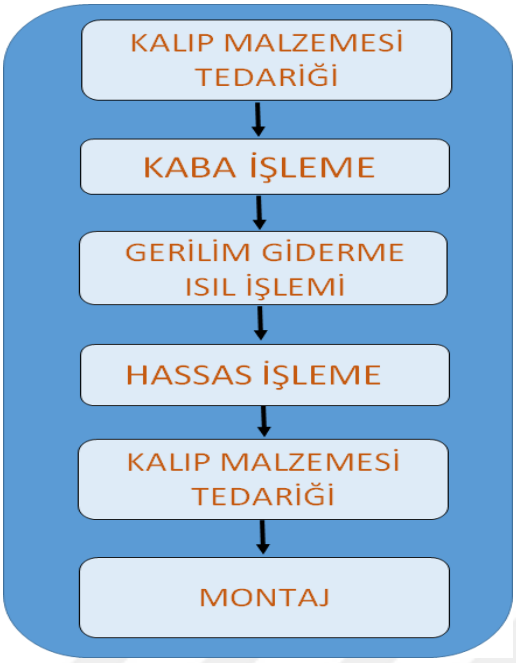
4.1.4. Maça Sistemleri

Basınçlı döküm proseslerinde yer alan kalıplarda, parçada bulunan delikler, boşluklar ya da kanal vb. yapılar için form oluşturmakta kullanılan sistemdir. Hareketli maça ve sabit maça olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sabit maçaların uygulamasında, maça ekseni ile kalıp açılma ekseni birbirine paralel olmalıdır. Hareketli maçalarda ise maçalar ayırma yüzeyine paralel yerleştirilmelidir. Şekil 4.5'te 3 adet hareketli maçanın kalıp çekirdeği üzerindeki pozisyonu verilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı gibi kalıplarda birden çok maça aynı anda bulunabilmektedir [25,30].



Şekil 4.5: Hareketli maça sistemi [30]

Ayrıca maçalar üretim yöntemlerine göre de çeşitlilik göstermektedir. Kum kalıp ile maça üretimi, eklemeli üretim yöntemi ile maça üretimi ve sıcak iş takım çeliğinin talaşlı imalatıyla üretimi bunlardan başlıcalarıdır. Eklemeli üretim yöntemiyle üretilen maçaların çoğu, toz metalürjisi ile sinterlenen metallerden üretilir. Bu maçalar diğer yöntemlerle üretilen maçalara göre daha iyi mekanik özellikler göstermektedir. Aynı zamanda teknolojik olarak da yeni olan bu proses, gelişimini sürdürmektedir. Kum kalıp ile üretilen maçalarda reçine, bağlayıcı ve kum ile beraber bir kum kalıp hazırlanır. Bu kum kalıp içerisinde maça üretimi gerçekleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Sıcak iş takım çeliğinden üretilen maçalar ise belirli bir talaşlı imalat ve ısıl işlem proseslerine maruz kalmaktadır. Sıcak iş takım çeliğinin öncelikle istenilen özelliklere sahip olanları tercih edilir. Akabinde kaba işleme yapılarak ana şekillendirme yapılır. Bu işlemden sonra gerilim giderme ısıl işlemi uygulanır. Isıl işlem sonrasında hassas işleme yapılarak, maça montajlanmaya hazır hale getirilir. Talaşlı imalat yöntemiyle üretilen maçaların akışını Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6: Sıcak iş takım çeliğinden maça üretimi akışı

4.1.5. İtici Plakaları ve İticiler

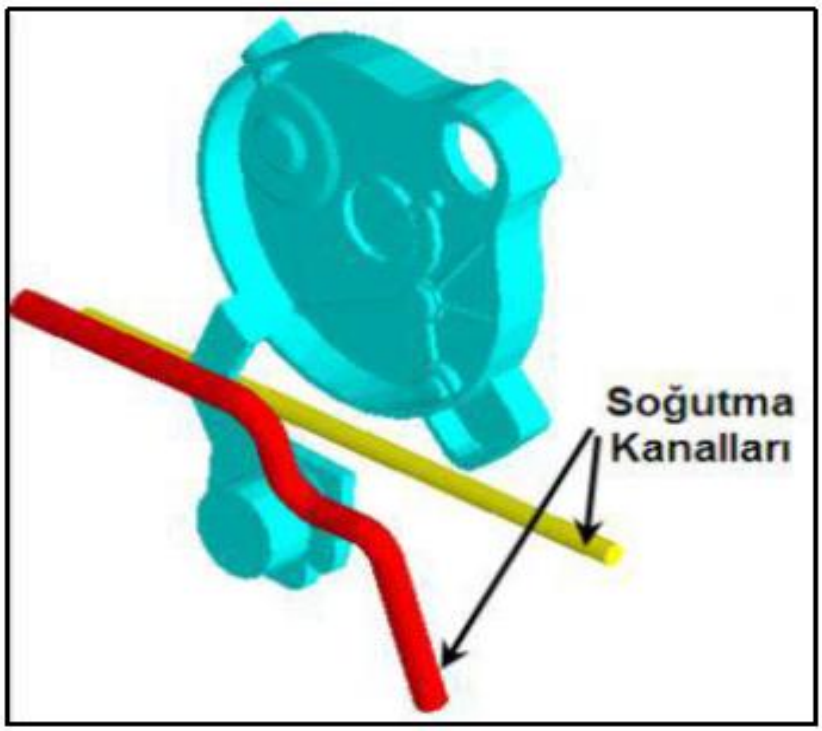
İtici plakaları, kalıbın hareketli tarafına bağlanır. Kalıp kapama kuvvetiyle beraber itici kuvvetlerine karşı koruma sağlar. İtici plakalarının tasarımları, parçanın tasarımına bağlıdır.

İticiler ise kalıbın açık pozisyonunda parçanın kalıp dışına atılmasını sağlayan sistemdir. Hareketli kalıpta yer almaktadır. Parçanın kalıp dışına atılması esnasında parça yüzeylerinde oluşabilecek hasar/izlerin engellenmesi için, iticilerin parçaya uygulayacağı kuvvetin dengeli şekilde dağıtılması gerekmektedir. Kalıp sistemi içerisinde bulunacağı konumlar parça tasarımına bağlı olarak ayarlanmaktadır [19,25,28].

4.1.6. Soğutma Sistemleri

Basınçlı döküm kalıplarında, döküm esnasında kalıbın belirli kısımları diğer kısımlarına göre daha fazla ısınabilir. Kalıbın belirli bölgelerinde ki oluşan sıcaklık farkları, mekanik özelliklerde azalma ve olası boyutsal farklılıklara neden olabilir. Fazla ısınan kısımların soğutulması ve homojen ısı dağılımı sağlamak için soğutma kanalları kullanılmaktadır. Soğutma kanallarının kalıp yüzeylerine yakınlığı en fazla 2 cm olmalıdır. Kalıp soğutma sistemleri, parça kalitesinden kalıp ömrü ve yüzey kalitesine kadar birçok parametreyi doğrudan etkilemektedir. Soğutma sistemleri sadece kalıp hamilleri içerisinde değil, maça sistemleri içerisine de yerleştirilebilir. Böylece maçalarda oluşabilecek fazla sıcaklık ya da

homojen olmayan sıcaklık dağılımının önüne geçilmiş olmaktadır. Soğutma kanallarından genellikle su geçirilerek soğutma işlemi yapılmaktadır. Şekil 4.7'de örnek bir parça için kalıp üzerinde bulunan soğutma kanalları verilmiştir [25].



Şekil 4.7: Soğutma kanalları gösterimi [2]

5. METALLER İÇİN EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

ASTM standartları eklemeli üretim yöntemini, 3 boyutlu model verilerinden nesneler yapmak için malzemeleri birleştirme süreci olarak tanımlamıştır. Katmanlı imalatın ana uygulamaları arasında hızlı prototipleme, hızlı kalıplama, doğrudan parça üretimi ve plastik, metal, seramik ve kompozit malzemelerin parça onarımı yer almaktadır.

Eklemeli üretim yöntemine, 3 boyutlu baskı yöntemi (3D printing), Eklemeli Proses (Additive Process), Eklemeli Teknolojiler (Additive Technologies) ya da Katmanlı Üretim Yöntemi (Layer Manufacturing) de denilmektedir.

Geleneksel üretim işlemlerinin birçoğu ya talaşlı imalat ile üretim (freze, torna, testere ya da matkap işlemleri gibi) ya da ham maddeye zorla şekil verme (dövme, enjeksiyon, döküm gibi) yöntemleriyle üretilir. 3 boyutlu baskı yöntemi ise üreticiler tarafından bu iki ana üretim yöntemine alternatif olarak ciddi oranda düşünülmeye başlamıştır.

3B baskı yöntemi (3 Boyutlu Baskı Yöntemi) geleneksel yöntemlerden enerji ve malzeme yönüyle daha üstündür. Daha çok prototipleme aşamasında kullanılmakta olan 3B Baskı yöntemi, zamanla üretim sahasında kullanımını da artırmıştır. Endüstride kullanımı birçok uygulama için oldukça ekonomiktir.

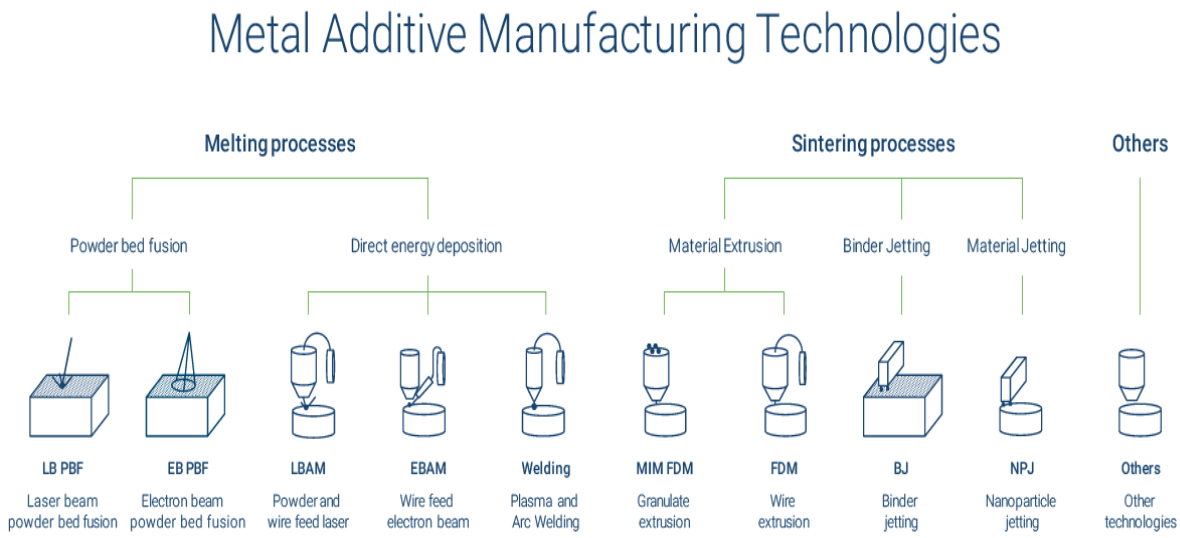
3B baskı yöntemi, köken olarak 1980'lerin sonuna dayanmaktadır. Bu dönemden sonra, 3B baskı yöntemi iki kısma ayrılmıştır. Bu kısımlardan birincisi, plastik modellerin üretildiği ve daha çok bu konuya ilgi duyan kişiler ile yatırımcıların kullandığı makinelerdir. İkincisi ise, uçak parçaları, makine parçaları ve biyomedikal parça ve cihaz üretiminde kullanılan makinelerdir.

Oldukça kaliteli ve hatasız nihai ürün üretimine yatkın olan sistem, üreticiler tarafından çoğunlukla nihai ürün yerine prototip ürün üretiminde kullanılmaktadır. Bu tercihin belli başlı nedenleri vardır. Bunlar:

i) Seri üretime kıyasla yavaş üretim hızları,
ii) Değişken kalite ve standartsızlık,
iii) Karmaşık yapılarda üretim zorlukları

Gibi nedenleri vardır. Oldukça basit ve küçük parçaların üretimi 6-8 saat sürebilirken, seri

üretimde bu parçaların binlercesinin üretimi yıllarca sürecektir [31,32,33]. Şekil 5.1'de bütün eklemeli üretim yöntemlerinin genel bir tablosu verilmiştir.



Şekil 5.1: Eklemeli Üretim Yöntemleri [36]

5.1. 3B Metal Baskı Yöntemi

Herhangi bir malzeme grubuna uygulanabilen 3B baskı yönteminde, metal grubu için iki ana parametre söz konusudur. Bu parametreler; giriş 25 hammaddesi ve enerji kaynağıdır. Giriş hammaddesi, metal tozu ya da tel şeklinde kullanılabilirken, enerji kaynağı olarak lazer / elektron ışını veya ark kullanılabilmektedir. 3B metal baskı prosesi genel olarak iki ana sınıfa ayrılabilir. Bunlar;

i) Toz Yatağı Füzyon Tabanlı Teknolojiler (Powder Bed Fusion (PBF))

ii) Doğrudan Enerji Biriktirme Tabanlı Teknolojilerdir (Directed Energy Deposition (DED)).

İki yöntemde kullandıkları enerji kaynağı türüne göre sınıflandırılabilir.

5.1.1. Toz Yatağı Füzyon Tabanlı Teknolojiler (Powder Bed Fusion (PBF))

PBF yönteminde, termal enerji seçici olarak toz yatağı bölgelerinde birleştirici rol oynar.

- Seçici Lazer Sinterleme / Eritme (Selectively laser sintering/melting (SLS / SLM)),
- Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct metal laser sintering (DLMS))
- Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting (EBM))

Yöntemleri PBF yönteminin ana süreçleridir.

PBF süreçlerinden DMLS yöntemi, kullanılabilir bir parçanın sinterlenmesi için metal tozu ve yüksek güçlü bir lazer kullanan bir katmanlı üretim yöntemi ya da hızlı prototipleme yöntemidir. Bu yöntem doğrultusunda, oldukça yoğun/katı parçalar üretilebilir, fakat gaz ve basınç sızdırmazlığı sağlamak için genellikle son işlem gerekmektedir. DMLS yöntemi, SLS yöntemiyle oldukça benzerlikler göstermektedir. SLS yönteminde, sinterleme malzemesi olarak kaplanmış metal tozları ve polimerler kullanılmaktadır. DMLS yöntemindeyse, sinterleme malzemesi olarak kaplanmamış ön alaşımlı metal tozları kullanılmaktadır. EBM yöntemi ise vakum ortamında ısıtılmış toz yatağı kullanılır. Elektron ışını kullanılarak eritilip katman katman şekillendirme işlemi yapılmaktadır [33].

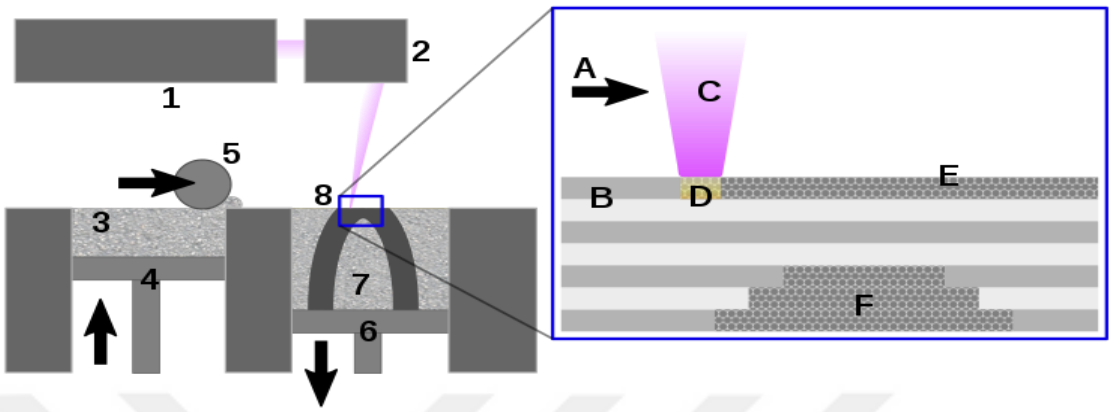
5.1.1.1 Seçici Lazer Sinterleme (SLS) Yöntemi

Katmanlı üretim teknolojilerinden birisi olan SLS, küçük toz parçacıklarını seçici olarak birleştirerek katı bir ürün oluşturmaya yaramaktadır. 3 Boyutlu bir tasarımın, toz metalürjisi ile üretimine dayanmaktadır. SLS, çoğunlukla gelişmiş malzemelerdeki tamamen işlevsel prototipler için kullanılmaktadır. SLS yazıcılar; naylon gibi, polikarbonat gibi bir standart termoplastikler ve ya alüminyum, çelik gibi metaller dahil olmak üzere çok çeşitli toz malzemeler kullanabilir.

SLS yöntemiyle üretim, toz katmanın bir silindir ile oluşturulması ve bu katmanın üzerine lazer ışığı gönderilerek bölgesel olarak sinterlenmesine dayanır. Bu işlem katman katman gerçekleştirilerek nihai ürün elde edilmektedir.

SLS'in en büyük avantajlarından birisi ise, eklemeli üretim yöntemlerinin birçoğunda ihtiyaç duyulan destek yapılarına ihtiyaç duymamasıdır. Ayrıca çoğu yöntemle üretimi yapılamayacak olan karmaşık geometrideki yapılarında üretimine olanak sağlamaktadır. Katmanlar arası bağ

gücü yüksek olması nedeniyle parçada homojen bir dayanım da sağlamaktadır. SLS ile üretilen parçalar, oldukça yüksek gerilme mukavemetine sahiptirler. Şekil 5.2'de SLS'in çalışma şeması verilmiştir.



Şekil 5.2: Seçici Lazer Sinterleme İşlemi [34]

1)Lazer**, 2)** Tarayıcı Sistem**, 3)** Toz Dağıtım Sistemi**, 4)** Toz Dağıtım Pistonu**, 5)** Rulman**, 6)** İmalat Pistonu**, 7)** Toz Yatağı**, 8)** Üretilen Nesne**, A)** Lazer Tarama Yönü**, B**) Sinterlenen Toz Parçacıklar**, C)** Lazer Işını**, D)** Sinterlenen Tozlar**, E)** Toz Yatağı**, F)** Önceki Katmanlardaki Sinterlenmemiş Malzeme

Avantajları:

- Sinterlenmiş toz yatağı tamamen kendi kendini destekler.
- Üretilen parçalar yüksek mukavemet ve sertliktedirler.
- Kimyasal olarak iyi bir dirence sahiptirler. (Nihai ürün üzerine boya, kaplama vs yapılabilir.)
- Karmaşık geometrideki parçaların üretilebilirliğini sağlamaktadır.
- Prototip ve nihai ürün parçalarının üretiminde en hızlı katmanlı üretim yöntemidir.
- Diğer katmanlı üretim yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha verimlidir.

Dezavantajları:

- Parçaların gözenekli yapıya sahip olmasından dolayı, bu gözeneklerin kapılabilmesi için birkaç farklı kaplama yöntemi ihtiyacı vardır.

5.1.2. Doğrudan Enerji Biriktirme Tabanlı Teknolojileri (Direct Energy Deposition (DED))

DED tabanlı teknolojilerde, tel ya da toz tabanlı malzemelerin birleştirilmesi esnasında termal enerji kullanılır.

1. Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekillendirme
2. Doğrudan Metal Biriktirme
3. Elektron Işınsız Form Üretimi
4. Ark tabanlı eklemeli üretim yöntemi

Popüler DED tabanlı teknolojilerden bazılarıdır. DMD tabanlı teknolojiler, bir robot kolu üzerinde bulunan fiber lazer sistemi ile toz enjeksiyon sistemine dayanmaktadır. DMD, alet onarımı, parçalara yeni özellikler eklenmesi veya parça üretimi için kullanılmaya uygundur. Elektron Işınsız Form Üretimi yöntemi, metal bir alt tabakanın üzerine ergiyik havuzu oluşturmak için vakumlu bir ortamda elektron ışını kullanır. Metal eklemeli üretim yönteminde ise, düşük doğruluk değerinden dolayı ve sonrasında işleme gerektirdiğinden dolayı bütün parça üretiminde kullanılması oldukça az görülmektedir. Metal eklemeli üretimin aksine DED ise daha çok onarım uygulamalarında kullanılmaktadır.

Tablo 5.1'de Toz Yatağı Füzyon Tabanlı Teknolojiler (PBF) ile Doğrudan Enerji Biriktirme Tabanlı Teknolojilerinin (DED) karşılaştırılması gösterilmiştir [33].

Tablo 5.1: PBF ile DED'in Kıyaslanması [33]

CRITERIA	LASER POWDER BED FUSION	DIRECTED ENERGY DEPOSITION
Build speed	5-20 cm^3/h (~40-160 g/h)	Up to 0.5 kg/h (~70 cm^3/h)
Accuracy	+/- 0.02-0.05 mm/25 mm	+/- 0.125-0.25 mm/25 mm
Detail capability	0.04-0.2 mm	0.5-1.0 mm
Surface quality	Ra 4-10 µm	Ra 7-20 µm
Max. part size	500 mm x 280 mm x 325 mm	2,000 mm x 1,500 mm x 750 mm
Avg. system price	EUR 450,000-600,000	EUR 500,000-800,000
FOCUS AREA	> Rapid prototyping > Direct manufacturing of parts	> Repair of worn components > Modification of tooling for re-use
INSTALLED SYSTEMS	~990	~90
	FOCUS OF STUDY	

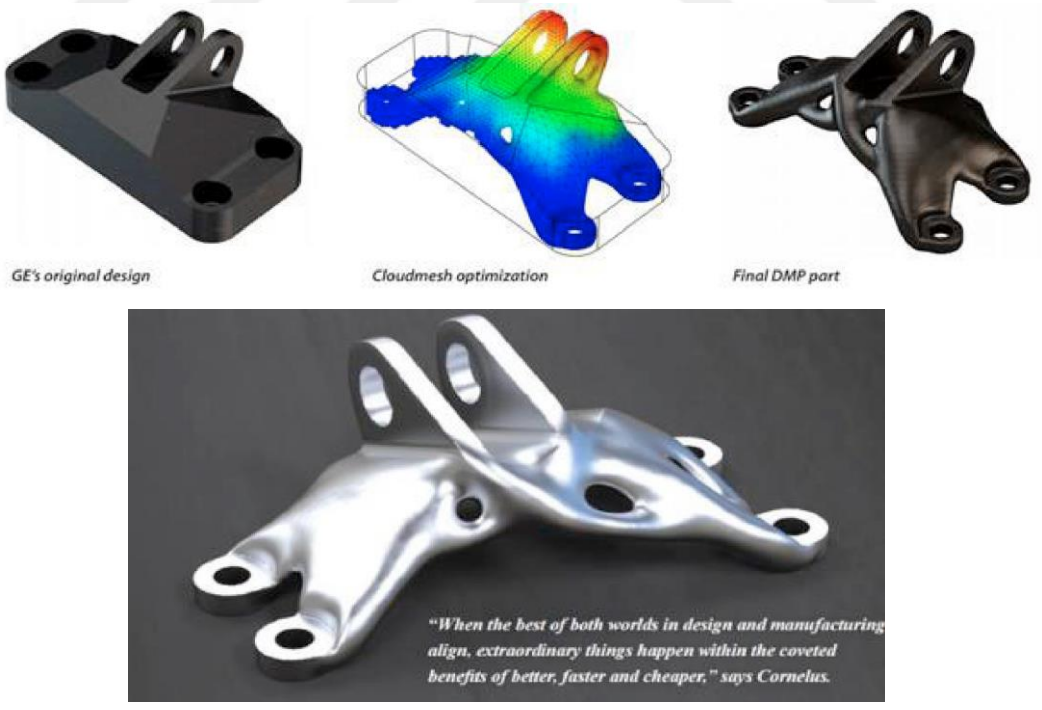
5.2. 3 Boyutlu Baskı Yöntemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

3B Baskı yöntemi; havacılık, otomotiv, petrol, dişçilik ve ortopedik gibi çok çeşitli sanayi alanlarında çok geniş alaşım perspektifinde kullanılmaktadır.

Avantajları:

- Tasarım özgürlüğü ve buna bağlı olarak karışık yapıların kolayca üretilebilirliği
- Montaj gereksinimlerini azaltarak üretim adımlarını ortadan kaldırmaktadır. (Ürün doğrudan üretilebilir.)
- Parçaların daha hafif ve kolay üretimine olanak sağlamaktadır.
- Ürün yapısının oldukça optimum ve stabil olması.
- Mekanik olarak daha sağlam ürünler üretilebilmesi.
- Kalitesel hataların azaltılması.

Örnek olarak, Şekil 5.3'de kompleks bir yapıda olan ve 2013 yılında üretilen bir motor braket parçası %70 daha hafif olarak üretilmiştir.



Şekil 5.3: 2013 Yılında 3B üretim yöntemiyle üretilen motor braket parçası [33]

Dezavantajları:

- Hala yeni bir teknoloji olmasından dolayı üretim hızları oldukça yavaştır.
- Sınırlı bileşen boyutlarının üretimi yapılabilmektedir.
- Tasarım ve üretim parametrelerinin ayarlanmasının oldukça çaba gerektirmesi.
- Kullanılan tozun kalitesine bağlıdır.
- İşlem sonrası bazı yüzey işlemlerini gerektirmesi.
- Oldukça maliyetli bir yöntem olması [33].

6. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında; döküm parçasının (Crankcase) MagmaSoft HPDC modülü ile simülasyon çalışmaları, dökülen parçaların X-Ray analizleri (geleneksel maçalarla dökülen parçanın X-Ray analizi, eklemeli üretim yöntemiyle dökülen parçanın X-Ray analizi), mikroyapı analizi ve maça termal sıcaklık analizleri olmak üzere 4 aşamada gerçekleştirilmiştir.

3 Boyutlu örme teknolojisiyle katman katman daha kompakt bir yapıda üretilen, iyileştirilmiş bir soğutma kanalı tasarımına sahip olan maça ile dökülen parçaların, geleneksel yöntemlerle üretilen maçalarla üretilen parçalara göre X-Ray ve mikroyapı kıyaslanması yapılmıştır. Geleneksel yöntemlerle üretilen maçaların termal görüntüleri incelenmiş, daha sonrasında bu maçalarla üretilen parçaların X-Ray radyoskopisi ve akabinde mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. 3 boyutlu örme tekneğiyle üretilen maçaların döküm prosesinde kullanılabilmesi için öncelikle simülasyon çalışmaları yapılıp, parametreleri döküme entegre edilmiştir. Uygun döküm şartları sağlandıktan sonra parça dökümü gerçekleştirilip, önce X-Ray radyoskopisi akabinde de mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

6.1. Döküm Aşaması

Döküm aşamasında öncelik geleneksel yöntemlerle üretilmiş kalıp maçası kullanılmıştır. Bu maçalarda soğutma kanallarının tasarımı standart olup, çok farklı geometrilerde üretimi yapılamamaktadır. Bu neden homojen soğutma/ısıtma sağlanamamaktadır. 3 Boyutlu örme teknolojisi ile üretilen parçalarda ise çok farklı geometrik soğutma kanalı tasarımları yapılabilir olup, soğutma/ısıtma istenildiği şekilde yönlendirilebilmektedir. Bu çalışmada; iki maça da aynı kalıba bağlanmış olup, aynı döküm tezgâhı ve alaşımı kullanılmıştır. Üretim akışı ergitme işlemiyle başlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan $AlSi_{10}Mg$-Fe'in ergitme işlemi, StrikoWestofen marka şaft fırınında 710 °C de gerçekleştirilmiştir. $AlSi_{10}Mg$-Fe alaşımının spektral bileşimi Şekil 6.1'de verilmiştir. Ergitme işleminin yapıldığı şaft fırınını Şekil 6.2'de gösterilmektedir.

Alaşım	Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Pb	Mg	Zn	-
AlSi10Mg(Fe)	Max 1	9-11	Max 0.55	Max 0.15	Max 0.2	Max 0.1	Max 0.15	0.2-0.5	Max 0.15	Al - remainder

Şekil 6.1: AlSi10Mg-Fe alaşımı spektral değerleri



Şekil 6.2: StrikoWestofen Şaft Tipi Ergitme Fırını

Ergitme işlemi sonrasında sıvı metal içerisinde bulunan çözünmüş hidrojen oranını azaltmak için gaz giderme prosesi gerçekleştirilmiştir. Gaz giderme prosesi sonrası numune alınarak yoğunluk indeksi değerlerinin % 2'nin altında olduğu garanti altına alınmıştır. Gaz giderme prosesinin yapıldığı gaz giderme makinesi Şekil 6.3'de verilmektedir.



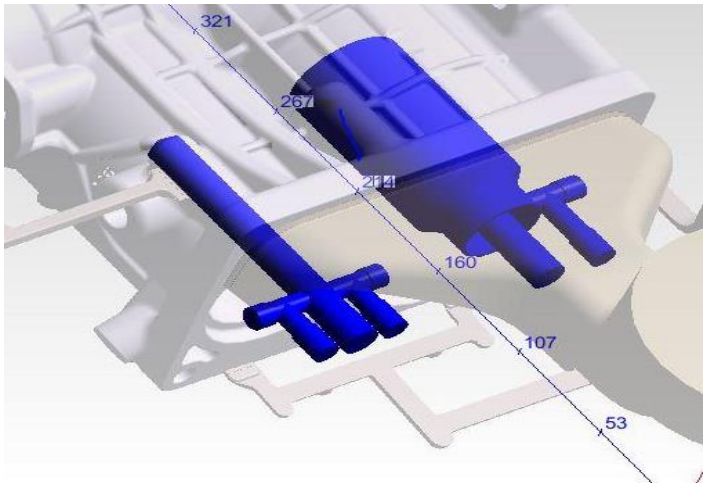
Şekil 6.3: Gaz Giderme Ünitesi

Gaz giderme prosesi sonrası güvence altına alınan sıvı metal, 140D Carat Bühler Yüksek Basınçlı Döküm Makinesi'ne transfer edilmiştir. Şekil 6.4'de yüksek basınçlı döküm makinesi verilmektedir.



Şekil 6.4: Bühler Carat 140D Carat Tipi Yüksek Basınçlı Döküm Makinesi

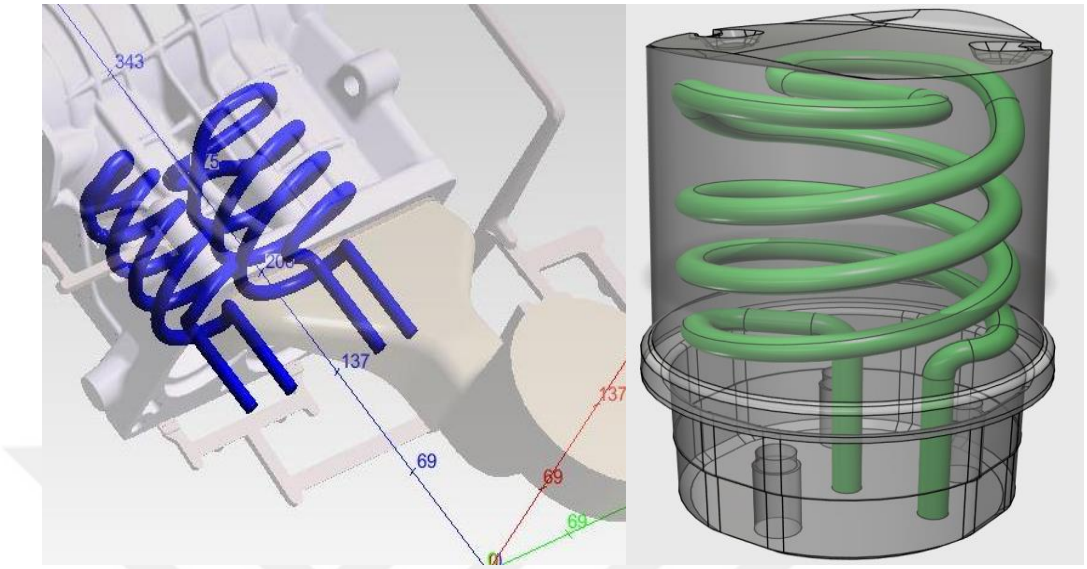
Döküm makinesinde H13 sıcak iş takım çeliğinden imal edilen kalıp bulunmaktadır. Bu kalıbın üzerinde geleneksel yöntemlerle üretilen maçalar bulunmaktadır. Bu maçaların malzemeleri de kalıp gibi H13 sıcak iş takım çeliğidir. Geleneksel yöntemlerle üretilen maçanın Crankcase parçası için tasarlanmış hali Şekil 6.5'de verilmektedir. Yüksek basınçlı döküm makinesinde parçalar döküldükten sonra parça trimlenerek nihai halini almıştır.



Şekil 6.5: Geleneksel yöntemlerle üretilen maça

Geleneksel yöntemlerle üretilen maça ile döküm işleminin tamamlanmasından sonra, 3 boyutlu örme yöntemlerinden Seçici Lazer Sinterleme yöntemiyle üretilen yeni maça devreye alınmıştır. Bu maça 3 boyutlu örme yöntemlerinden üretilmiştir. Ergitme, gaz giderme ve döküm işlemleri aynı şartlarda ve bire bir aynı parametrelerde yapılmıştır. Crankcase parçası

için daha iyi bir soğutma/ısıtma sağlayabilirliği olan 3 Boyutlu örme tekniği ile üretilen maça Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6: Örme teknolojisi ile üretilen maça

6.2. Döküm Sonrası Aşaması

Döküm prosesi sonrasında üretilen nihai ürünler 160 kw Yxlon X-Ray Radyaskopi makinesinde X-Ray analizine alınmıştır. Ayrı ayrı incelemeleri ve kayıtları alındıktan sonra, çekinti porozitesi tespit edilen bölgeler işaretlenerek mikroyapı analizi için kesilmiştir. Mikroyapı analizi için sırasıyla; kesme, bakalite alma, zımparalama, parlatma ve dağlama metalografik işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işlemi Struers TegraForce-1 makinesinde 240-400-600-800-1200 ve 1500 mesh özelliklerine sahip zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Numune hazırlama işlemi sonrasında optik mikroskop ile mikroyapı incelemeleri tamamlanmıştır. Optik mikroskop olarak Nikon Eclipse LV150 cihazı kullanılmıştır. Şekil 6.7'de kullanılan X-Ray radyoskopisi cihazı ve optik mikroskobu görülmektedir.

a)  b) 

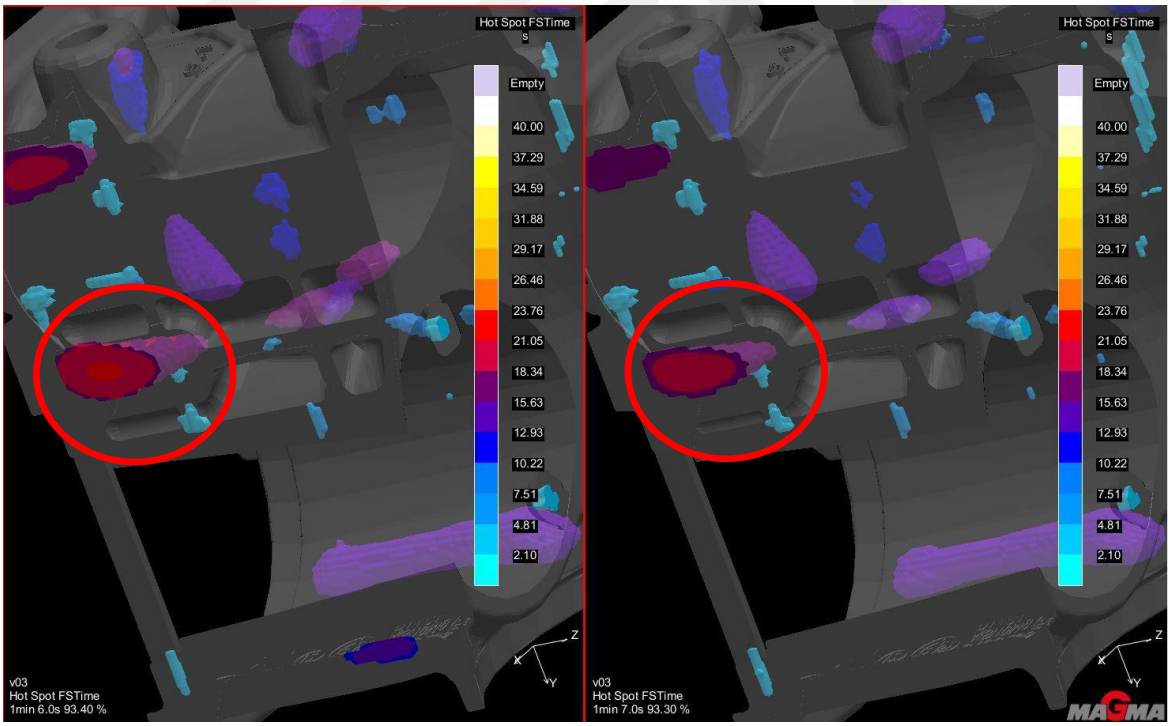
Şekil 6.7: Deneylerde kullanılan cihazlar a) Optik Mikroskop b) X-Ray

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Simülasyon Sonuçları

Maçalardaki soğutma paterni farklarının döküm parçalarında görülen çekinti porozitesi üzerinde ki etkisinin incelenebilmesi için MagmaSoft HPDC modülü ile simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları sonucunda farklı soğutma kanalı tasarımına sahip maçaların kullanılmasının çekinti porozitesi üzerinde ciddi etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

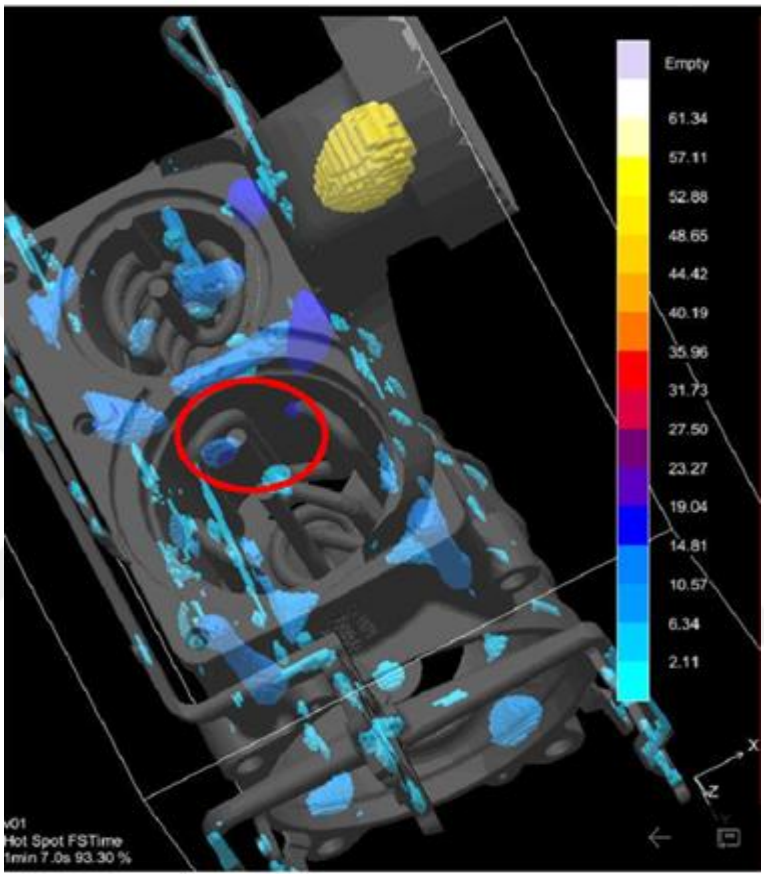
Geleneksel yöntemlerle üretilen maçalarda soğutma kanalı tasarımı sabit olup, belirli oranda esneklik sağlamaktadır. Özellikle kalın cidarlı, karmaşık geometrilere sahip parçalarda etkin soğutma sağlamadığı ve çekinti porozitesi gideremediği gözlemlenmiştir. Şekil 7.1'de, geleneksel yöntemlerle üretilen maçaların sahip olduğu standart soğutma kanallarının parçada oluşan Hot Spotlarının önüne geçemediği gözlemlenmiştir. Parçada Hot Spot olan bölgelerde yoğun çekinti porozitesi gözlemlenmiştir.



Şekil 7.1: Geleneksel maçalarla üretilen Crankcase parçasının simülasyonu

3 Boyutlu örme teknolojisi ile üretilen maçaların ise daha esnek bir çalışma alanı olup, Hot Spot oluşumunun büyük oranda azaltıldığı gözlemlenmiştir. Bu sayede kalın kesitlerde oluşan çekinti porozitesinin de önüne geçilmiştir. Daha iyi soğutma sağlayarak çekinti porozitesinin

önüne geçtiği hem simülasyon hem de X-Ray radyoskopisinde gözlemlenmiştir. Şekil 7.2'de 3 boyutlu örme tekniği kullanılarak üretilen maçaların kullanıldığı döküm simülasyonunu gösterilmiştir. Şekil 7.1'de ki işaretli olan bölgelerin mukayesesi şekil 7.2'de ki aynı bölge işaretlenerek yapılmıştır. İşaretli bölge aynı zamanda yolluk girişi olup, parçanın en sıcak kalan bölgesidir.



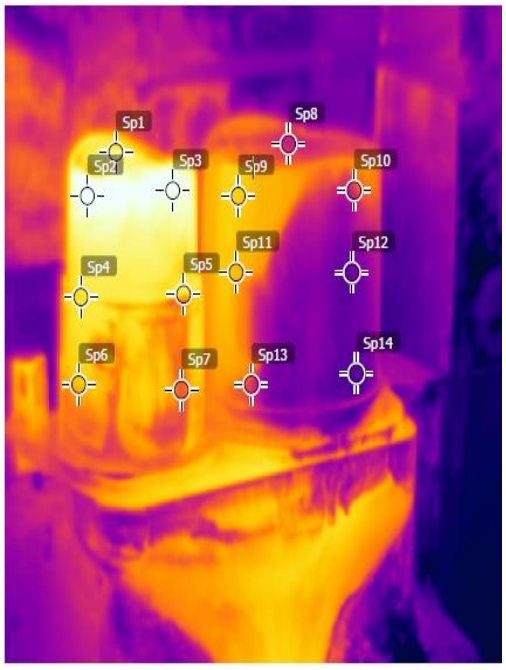
Şekil 7.2: 3 Boyutlu örme tekneği kullanılarak üretilen maçaların kullanıldığı Crankcase parçasının döküm simülasyonu.

3 Boyutlu örme metodu kullanılarak üretilen maçalar, daha özgür tasarımlara sahiptir. Bu tasarım özgürlüğü, maça içerisinde daha fazla bölgeyi soğutma imkânı sağlamaktadır. Ancak kontrolsüz soğutma yapmak, parçada farklı hataların oluşmasına da neden olabilmektedir. Dolasıyla, bu tür bir çalışma yapılırken, seçilecek parametrelere oldukça dikkat edilmelidir.

7.2. Döküm Sonrası Çalışmalar

7.2.1. Termal Maça Çalışmaları

660°C'de yapılan döküm sonrasında geleneksel yöntemlerle üretilen maçaların en yüksek sıcaklık değeri olarak 316,9 °C'yi gördüğü gözlemlenmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretilen maçanın döküm prosesi sonrası termal sıcaklık ölçümlerini Şekil 7.3'de, 3 Boyutlu örme teknolojisiyle üretilen maçanın döküm prosesi sonrası termal sıcaklık ölçümleri ise Şekil 7.4'de verilmektedir.

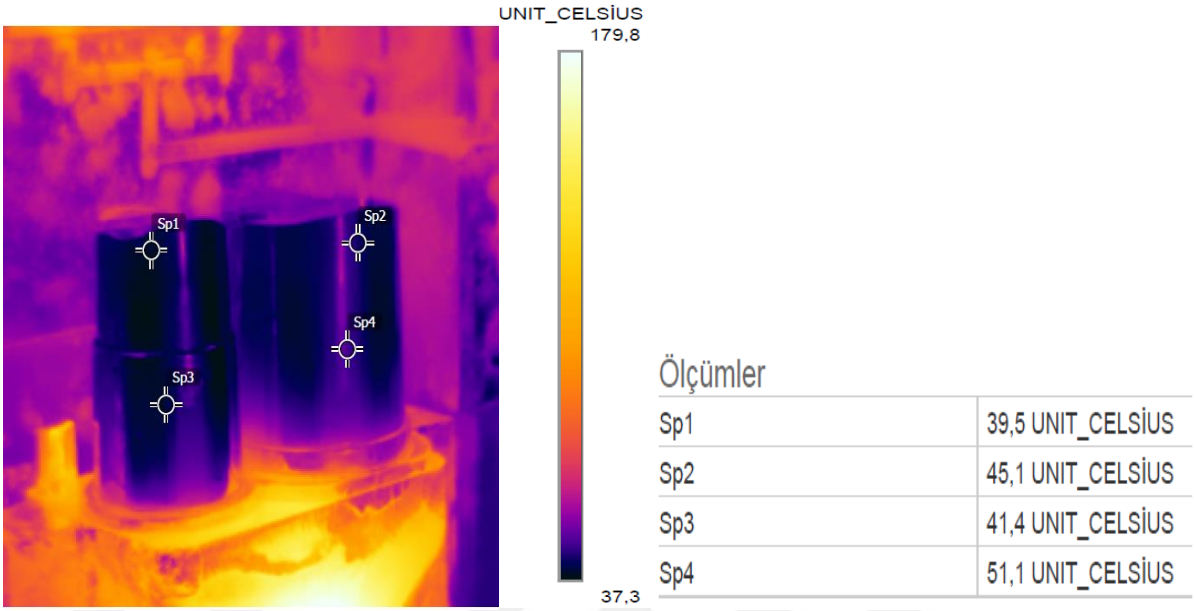


UNIT_CELSİUS
316,0
45,7
62104890

Ölçümler	
Sp1	293,0 UNIT_CELSİUS
Sp2	316,9 UNIT_CELSİUS
Sp3	313,5 UNIT_CELSİUS
Sp4	258,2 UNIT_CELSİUS
Sp5	256,7 UNIT_CELSİUS
Sp6	237,1 UNIT_CELSİUS
Sp7	176,2 UNIT_CELSİUS
Sp8	131,4 UNIT_CELSİUS
Sp9	247,0 UNIT_CELSİUS
Sp10	148,5 UNIT_CELSİUS
Sp11	236,6 UNIT_CELSİUS
Sp12	89,6 UNIT_CELSİUS
Sp13	148,0 UNIT_CELSİUS
Sp14	82,6 UNIT_CELSİUS

Şekil 7.3: Geleneksel yöntemlerle üretilen maçanın döküm prosesi sonrası termal sıcaklık ölçümleri

3 Boyutlu örme teknolojisi ile üretilen parçalarda ise en yüksek sıcaklık değeri 51,1 °C olarak ölçülmüştür.



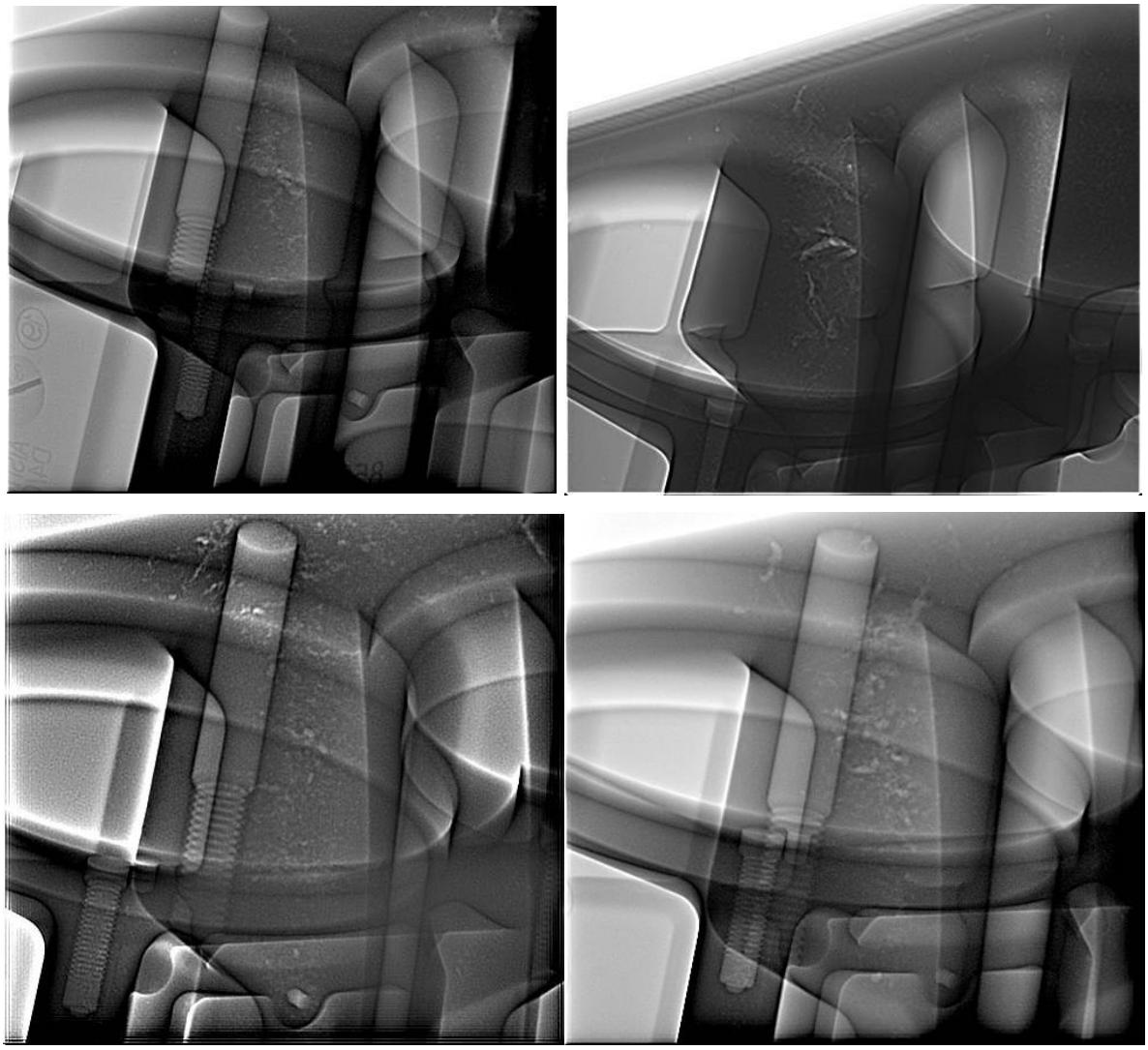
Şekil 7.4: 3 Boyutlu örme teknolojisiyle üretilen maçanın, döküm prosesi sonrasındaki termal sıcaklık ölçümleri

3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçaların soğutma kanallarının çok çok daha efektif olduğu gözlemlenmiştir. Maça sıcaklıkları arasında yaklaşık 250 °C'ye varan sıcaklık farkları mevcuttur. 3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçaların daha iyi sonuç vermesinin nedeni, daha farklı geometrilerde soğutma kanalları tasarlanabilir olup, istenilen seviyede soğutma/ısıtma sağlayabilmesidir. Bu çalışmada sıcak kalan bölgenin soğutulması istenildiği için 3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçaların daha iyi bir soğutma sağladığı tespit edilmiştir.

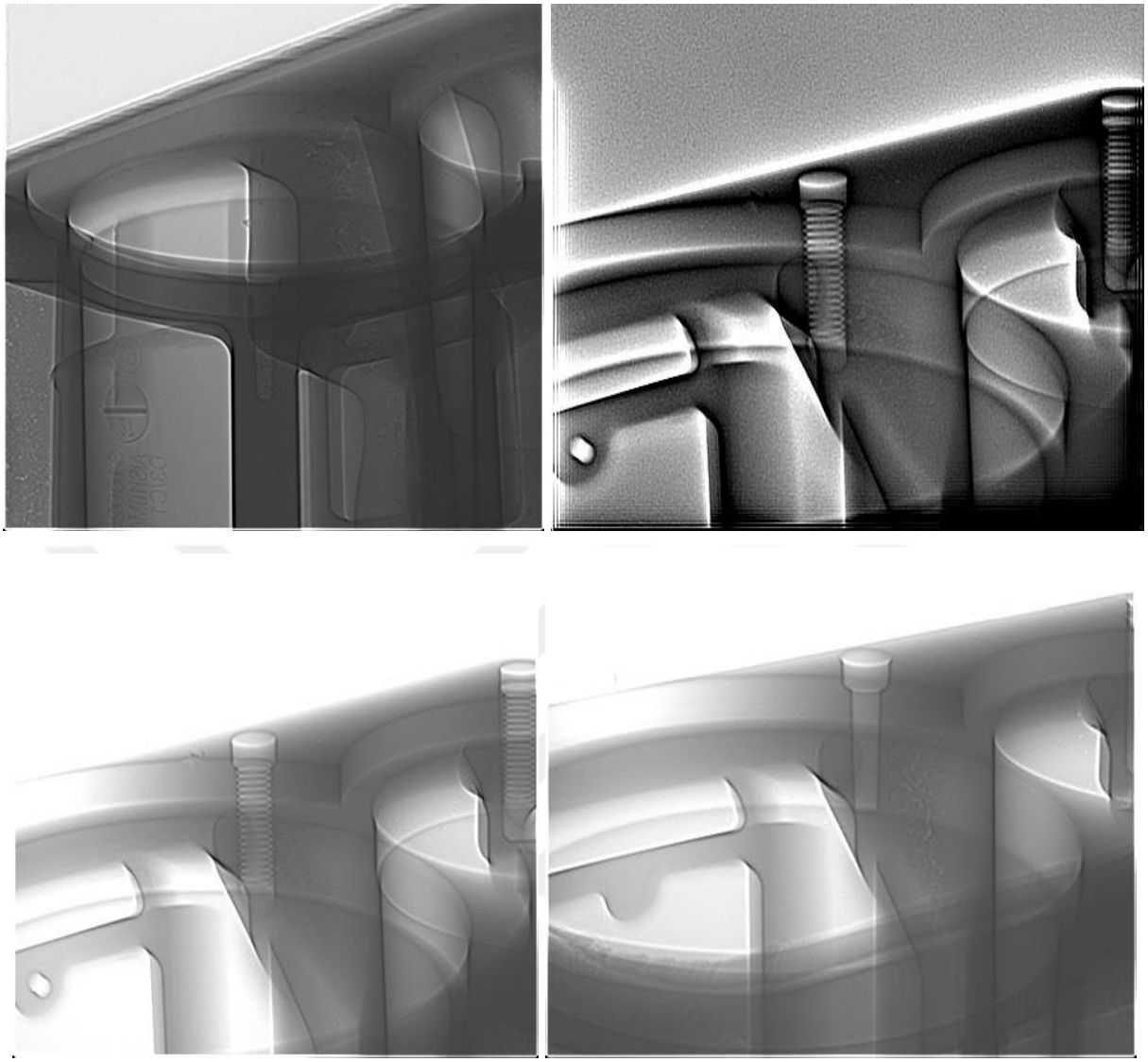
7.2.2. X-Ray ve Mikroyapı Görüntüleri

İki farklı maça ile de dökülen parçalara X-Ray ve mikroyapı analizi yapılmıştır. X-Ray analizleri sonucunda geleneksel maçalarla dökülen parçalarda çekinti porozitesi gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak parçanın ilgili bölgesinin yeterince soğutulamadığı söylenebilir. Aynı parçanın mikroyapı analizlerinde de çekinti porozitesi gözlemlenmiştir.

Daha farklı ve etkin bir soğutma kanalı tasarımına sahip olan örme maçayla dökülen parçaların X-Ray analizlerinde ise çekinti porozitesine rastlanmamıştır. Şekil 7.5'te Geleneksel maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların X-Ray görüntüleri, Şekil 7.6'da ise 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların X-Ray görüntüleri verilmiştir.

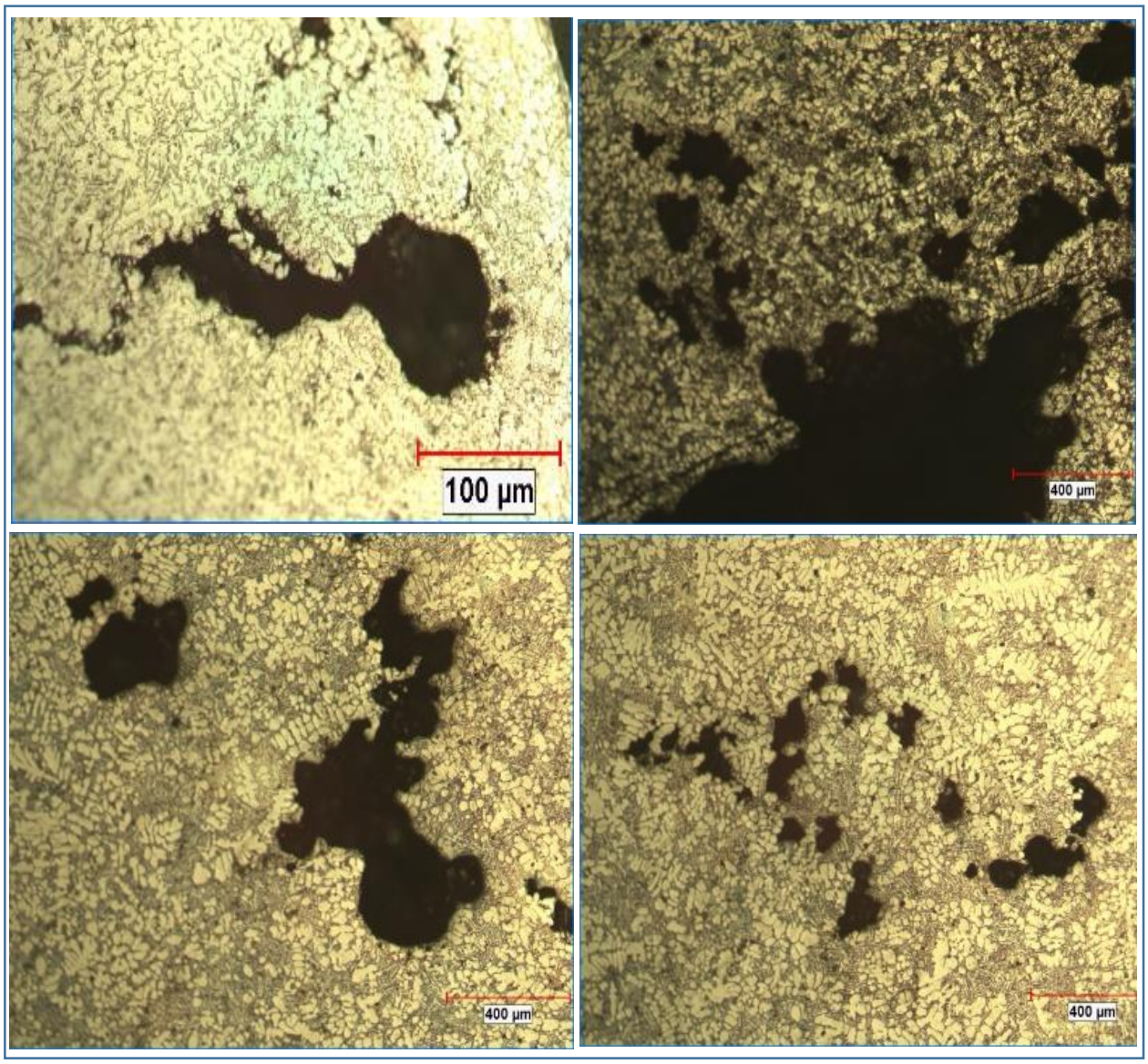


Şekil 7.5: Gelenelsel Maça ile dökülen parçaların X-Ray görüntüleri

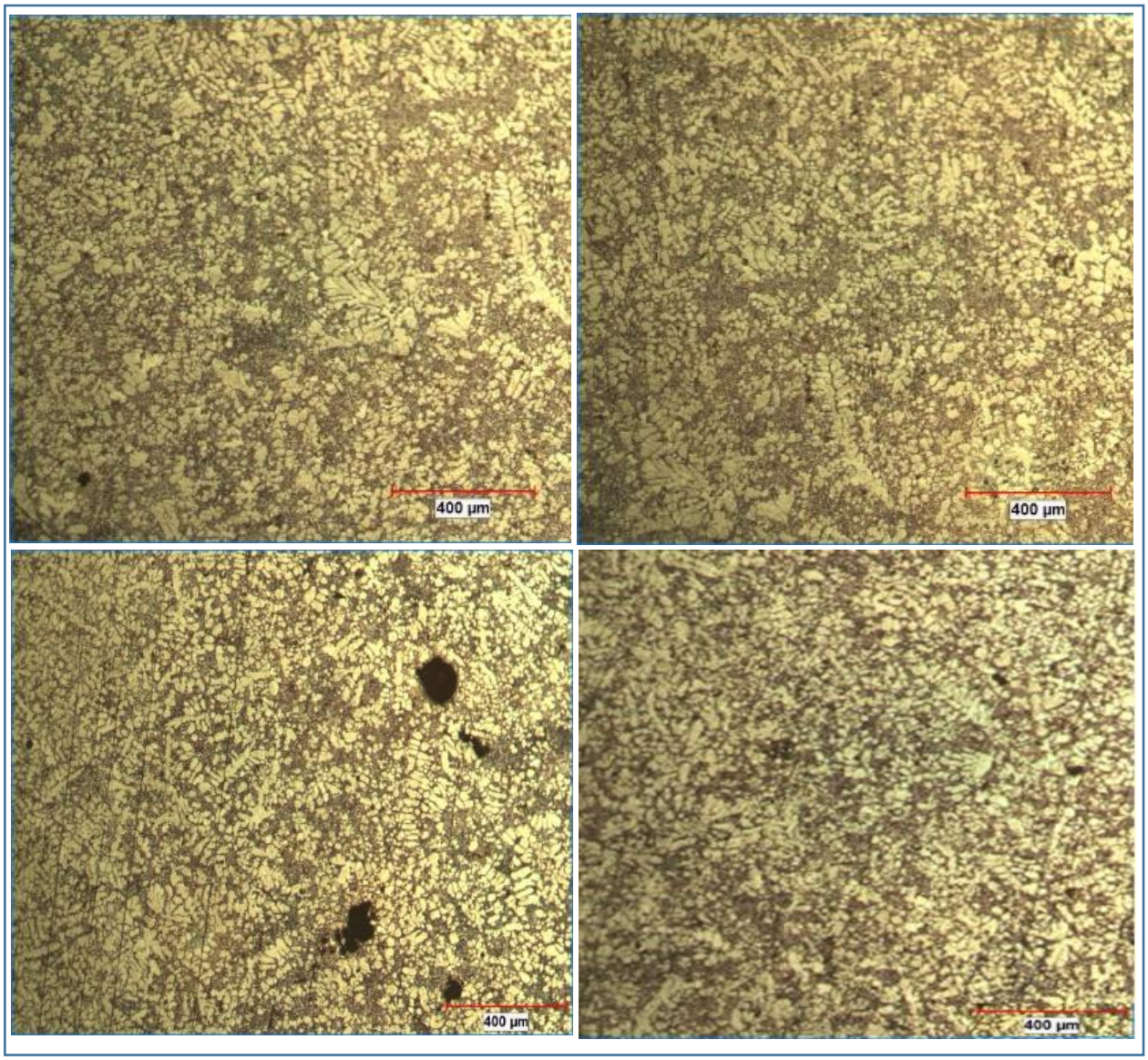


Şekil 7.6: 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların X-Ray görüntüleri

Mikroyapı analizinde, daha ince taneli ve daha düşük oranda poroziteli bir mikroyapı gözlemlenmiştir. Şekil 7.7'de Geleneksel maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların mikroyapı görüntüleri, Şekil 7.8'de ise 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.7: Geleneksel maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların mikroyapı görüntüleri



Şekil 7.12: 3 Boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların kullanılarak dökümü yapılan parçaların mikroyapı görüntüleri

Eklemeli üretim yöntemiyle üretilen maçaların ve bu maçalarda bulunan soğutma kanallarının alüminyum alaşımlarındaki çekinti porozitesine etkisine dair bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Ancak Chavan ve Kulkarni'nin yaptığı bir çalışmada, geleneksel yöntemlerle üretilen maça ve kalıplarda bulunan soğutma kanallarının kalıp ve maçalardaki pozisyonunun çekinti porozitesi için ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Optimum soğutma kanalı derinliğinin 20 mm olduğu belirtilmiştir. MagmaSoft HPDC simülasyon programıyla yapılan çalışmada da bu veriler kanıtlanıp, uygun dizayn edilen soğutma kanallarının çekinti porozitesine doğrudan etki ettiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada porozite oranının %1'den düşük olduğu gözlemlenmiştir [35]. Bu çalışmada ise Chavan ve Kulkarni'nin çalışmasının aksine, eklemeli üretim yöntemiyle bir maça üretilmiştir. Bu maça içerisinde standart maçalardan farklı bir soğutma kanalı tasarlanarak döküm yapılmıştır. Ancak soğutma kanallarının çekinti porozitesi üzerinde ki etkisi ise literatürle uyum göstermiş ve çekinti porozitesinin azaldığı görülmüştür.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında farklı yöntemlerle üretilen (geleneksel maçalar ve 3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçalar) maçalarda bulunan soğutma kanalları ve bu maçaların parçalarda oluşabilen çekinti porozitesi üzerindeki etkisi kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir:

- 3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçaların diğer üretim yöntemleriyle üretilen maçalara göre daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Daha özgür bir tasarım imkânı veren bu yöntemde, çok farklı geometrilerde soğutma kanalları tasarlanarak daha kaliteli döküm yapma imkânı bulunmaktadır. Buna karşın geleneksel yöntemlerle üretilen maçaların, daha kısıtlı tasarım ve çalışma aralığı olması, efektif olmayan bir soğutma/ısıtma yapmasına neden olmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmaları ve döküm çalışmalarının uyumluluğu, 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçaların dökümlerde daha efektif olduğunu göstermektedir.

- X-Ray radyoskopisi incelemelerinde, 3 boyutlu örme metoduyla üretilen maçaların kullanıldığı döküm parçalarının çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu parçalarda çalışmanın amacı olan çekinti porozitesinin ciddi oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Buna karşın olarak geleneksel maçaların kullanıldığı döküm parçalarında ise ciddi çekinti poroziteleri gözlemlenmiştir. Yapılan X-Ray analizlerin sonucunda 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçanın daha efektif sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

- Mikroyapı incelemelerinde, 3 boyutlu örme metoduyla üretilen maçaların kullanıldığı döküm parçalarının çok daha iyi bir mikroyapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tane yapısı daha homojen, daha az mikroyapı hatası barındıran ve yer yer sadece gaz porozitelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Geleneksel maçaların kullanıldığı döküm parçalarında ise yapıda oldukça büyük çekinti boşlukları görülmüştür. Aynı zamanda çekinti boşluğu bulunan bölgenin çevresinde de tanelerde dentrit oluşumu ve heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Yapılan mikroyapı analizleri sonucunda 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçanın daha efektif olduğu ve bu maça ile üretilen parçaların daha iyi özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

- Geleneksel maçaların kullanıldığı dökümlerde çıkan çekinti poroziteleri 1 sene boyunca ERP sistemi üzerinden kayıt altına alınmıştır. Akabinde 3 boyutlu örme metodu kullanılarak üretilen maçayla döküm işlemi yapılmıştır. Çıkan çekinti poroziteleri 1 sene boyunca ERP sistemi üzerinden kayıt altına alınmıştır. Geleneksel maçalarla üretilen parçalarda % 5,1'lik bir ret oranı gözlenmiştir. 3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçalarla üretilen parçalarda ise % 0,79'luk bir ret oranı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda 3 boyutlu örme metodu ile üretilen maçanın kullanılmasıyla yaklaşık 50.000 €'luk bir kazanım elde edilmiştir.
- Öneriler: 3 Boyutlu örme metoduyla üretilen maçalarda, soğutma kanalı tasarımının daha özgün ve efektif yapılabildiği görülmüştür. Soğutma/ısıtma ihtiyacı duyulan kalıplarda 3 boyutlu örme metodu kullanılarak (SLS ya da DMLS yöntemi önerilir) daha özgün soğutma kanalları tasarlanabilir. Böylece hem kalıp ömürleri uzarken hem de sıcaklık kontrolleri istenilen seviyelerde sağlanabilir.

KAYNAKÇA

[1] TMMOB Metaluji Mühendisleri Odası, 2004, "Alüminyum Raporu 24. Dönem Çalışma Raporu", Ek-16.

[2] Kenar, O. (2019), Yüksek Basınçlı Döküm Prosesi ile Üretilen Alüminyum Otomotiv Parçalarında Kalıp Tasarım Değişikliklerinin Parça Döküm Kalitesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[3] Doğan, A. (2019), Alüminyum Alaşımlarının Yüksek Basınçlı Döküm Prosesi İle Üretiminde Farklı Gaz Atma Sistemlerinin Porozite ve Proses Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[4] Avrupa Alüminyum Derneği (EAA), Aluminium in Cars Unlocking the lightweighting potential. Brüksel, 2012

[5] Dündar M. ve Güngör G. Otomotiv Sektöründe Alüminyum Uygulamaları ve Sürekli Döküm Tekniği ile Üretilmiş Alüminyum Levha Alaşımları.

[6] www.lupton-place.co.uk/why-is-aluminium-diecasting-rising-in-the-car-industry. Erişim Tarihi: 03.04.2019.

[7] 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.

[8] Avrupa Alüminyum Derneği (EAA). Aluminum Content in Cars –Summary Report. Brüksel, 2016.

[9] 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.

[10] Onat N. Alüminyum Döküm Teknolojisi, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD). Yayın No: 5 ISBN: 978-605-62246-0-7, 2011.

[11] Berry, J. T. ve Pehlke R. D. Casting. ASM Handbook, Vol. 15, ASM, Material Park, 1998.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Campbell, J. Complete Casting Handbook. Elsevier. UK, 2011.

[17] Okçu I.Y. Effect Of Process Parameters On Mechanıcal Propertıes Of Hıgh Pressure Dıe Cast Magnesıum Az91 Components. Middle East Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, The Degree of Master Of Science, 2011.

[18] Apelian, D. Alüminum Cast Alloys Enabling Tools for Improved Performance. NADCA, USA, 2009.

[19] 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.

[20] Dispinar, D. ve Campbell, J. (2009). Alüminyum ve alaşımlarının döküm kalitesinin belirlenmesi. 4. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul, s. 394-404.

[21] Dispinar, D. (2005). Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys. Doktora Tezi, The University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials, UK

[22] Tan, E. (2011). Alüminyum Alaşımlarında Blister Oluşumu. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı, Denizli

[23] Gariboldi, E., Bonollo, F. ve Parona, P. (2010). Handbook of Defects in High Pressure Die Castings. Associazione Italiana Metalurgia, Italy,88-85298-73-7

[24] 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

[25] 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.

[26] 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.

[27] Monroe, A. (2014). Porosity In Die Castings. North American Die Casting Association, USA

[28] Aslan, O. B. (2007). Basınçlı Dökümde Kaliteyi Etkileyen Faktörlerin Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversiesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

[29] 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.

[30] Gözen, A. Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Sistemlerinin Tasarımı ve Simülasyonunun İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, 2007.

[31] William E. Frazier. Metal Additive Manufacturing: A Review. Submitted February 24, 2014; published online April 8, 2014

[32] Yılmaz F., Arar M. E., Koç E., "3D Baskı ile Hızlı Prototip ve Son Ürün Üretimi." Dünya Gazetesi, 26 Ekim 2013.

[33] Duda T., Raghavan V. ,3D Metal Printing Technology (2016). IFAC-PapersOnLine Volume 49, Issue 29, Pages 103–110. (December 2016)

[34] Johnson, M. A. Review on Selective Laser Sintering, United International Journal for Research & Techonology (2020)

[35] Chavan R. & Kulkarni P.S., "Die Design and Optimization of Cooling Channel Position for Cold Chamber High Pressure Die Casting Machine", 2017.

[36] Binder Jetting and DFM: A Comparision with Laser Powder Bed Fusuion and Metal Injection Moulding, Metal AM Vol. 4 No. 3, Autumn 2018.