

T.C
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

6XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA VAKUM DESTEKLİ
KATILAŞMANIN GÖZENEKLİLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED TAHA ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi SELÇUK ŞİRİN

Ortak Danışman : Dr. Levent TURHAN

Mayıs 2024

T.C
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

6XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA VAKUM DESTEKLİ
KATILAŞMANIN GÖZENEKLİLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED TAHA ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 15/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Günhan BAYRAK	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Murat ÇOLAK	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ŞİRİN	BAŞARILI

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.

Muhammed Taha ARSLAN

15/05/2024

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, çalışmalarına yön veren, geleceğim ve gelişimim konusunda bana büyük fırsatlar sunan saygı değer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ŞİRİN' e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarımda bana daima yön veren, tezimin ortaya çıkmasında ve sonuca ulaşmasında tüm imkânı sağlayan sayın eş danışmanım Dr. Levent TURHAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Proje çalışmasında beraber bolca vakit geçirdiğimiz TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'nde yıllardır çalışan Başteknisyen Yücel TAŐKIN' a, Adem DENİZ' e ve Mesut YILDIRIM' a tez çalışmama yaptığı yardımlardan dolayı teşekkürlerimi borç bilirim.

Bugünlere gelmemde çok ama çok fazla emeği olan sevgili babama ve anneme teşekkürlerimi ederim.

Son olarak, tez çalışmam da başıma gelen her zorlukta yanımda olan, sevgi ve sabır gösteren eşime teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	v
SİMGELER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Alüminyum Alaşımlarının Tarihi ve Özellikleri	3
2.2 Alüminyumun Tarihçesi	3
2.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri	4
2.3.1 6101 alüminyum alaşımı ve özellikleri.....	5
2.3.2 Alüminyum döküm alaşımları	6
2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	6
2.4.1 Dövme alüminyum alaşımlar	7
2.4.2 Isıl işleme uygun olmayan alüminyum alaşımları	8
2.4.3 Isıl işleme uygun olan alüminyum alaşımları	8
2.5 Eklemeli İmalat Teknolojileri	9
2.5.1 Üç boyutlu yazıcı teknolojileri	10
2.5.1.1 Toz yataklı lazer eritmeli yazıcı.....	10
2.5.1.2 Yönlendirilmiş enerji biriktirme	12

2.5.1.3 Malzeme püskürtme.....	13
2.5.1.4 Bağlayıcı püskürtme	13
2.5.1.5 Malzeme ekstrüzyonu	14
2.5.1.6 Levha laminasyonu	15
2.5.1.7 Tekno fotopolimerizasyonu	16
2.6 Eklemeli İmalat ve Hassas Döküm	17
2.6.1 Hassas Döküm	20
2.6.1.2 Hassas dökümün tarihçesi.....	21
2.6.2 Dereceli hassas döküm.....	22
2.6.3 Model oluşturma	24
2.6.4 Model ağaç yapımı.....	25
2.6.5 Modelin kalıplanması	26
2.6.6 Mum giderme ve pişirme.....	28
2.6.7 Ergitme ve döküm.....	29
2.6.8 Kalıbın temizlenmesi	31
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
3.1 Deneylerin Yapılışı.....	33
3.1.1 Denemelerde kullanılan teçhizatlar ve malzeme	34
3.1.1.1 Alüminyum alaşımı.....	34
3.1.1.2 Üç boyutlu yazıcı	34
3.1.1.3 Mum yolluk.....	34
3.1.2 Kama model tasarımı	35
3.1.3 Model yolluk hazırlama	36
3.1.4 Alçı.....	38
3.1.5 Modelin alçı içerisine alınması	40
3.1.6 Alçı pişirme ve mum uzaklaştırma	41
3.1.7 Döküm ve ergitme	42
3.1.8 Alçı uzaklaştırma ve yolluk kesimleri	44
3.2 Kama Modellerin Karakterizasyonu	44
3.2.1 Mikro yapı incelemeleri.....	45
3.2.2. Yoğunluk Ölçümü.....	46
3.2.3. İmaj Analiz Tekniğiyle Porozite Ölçümü	47
3.2.4. Modelleme Çalışmaları.....	48
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL BULGULAR.....	49
4.1. Yoğunluk Ölçüm Metoduna Göre Gözeneklilik Sonuçları	49
4.2. Mikroyapı Görüntüleri.....	50
4.3. İmaj Analiz Tekniğine Göre Gözeneklilik Sonuçları	51
4.4. Simülasyon Sonuçları	55
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA	57
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60

KAYNAKLARHata! Yer işareti tanımlanmamış.



KISALTMALAR

AA	: Amerikan Alüminyum Birliği
ASM	: Amerikan Metaller Derneği
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DLP	: Dijital Işıkla Kürleme
DMLS	: Direkt Metal Lazer Sinterleme
DPI	: İnç Başına Düşen Nokta Sayısı
EBM	: Elektron Demeti Ergitme
FDM	: Eritilmiş Malzeme Şekillendirme
LENS	: Lazerle Tasarlanmış Net Şekillendirme
LMD	: Lazer Metal Biriktirme
LOM	: Lamine Nesne İmalatı
MJ	: Malzeme Püskürtme
PMMA	: Polimetilmetakrilat
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SL	: Levha Laminasyonu
SLA	: Işıkla Kürleme
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
STL	: Standart Üçgen Dili
TGA	: Termogravimetrik Analiz
UV	: Ultraviyole Işın

SİMGELER

Al	: Alüminyum
CaSO ₄ ½ H ₂ O	: Kalsiyum sülfat yarı hidrat
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
kN	: Kilonewton
L	: Uzunluk
Mg	: Magnezyum
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Zn	: Çinko

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2. 1: Saf alüminyumun özellikleri (Özderin, 2017).	5
Tablo 2. 2: Alüminyum serileri içinde bulunan ana elementler	7
Tablo 2. 3: Üç boyutlu yazıcı teknik özellikleri (Envision Tec., 2015).	12
Tablo 3. 1: Al 6101 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi(% ağı.).	34
Tablo 3. 2: Alçı-su oranı, karıştırma ve sertleşme süresi.	41
Tablo 3. 3: Döküm çalışma koşulları.	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Dünyada yaygın kullanılan metallerde talep oranları (Günay, 2013).....	1
Şekil 2. 1: Isıl işlem durumuna göre dövme alaşımlar.....	7
Şekil 2. 2: Eklemeli imalat yönteminin amaçlarına göre kullanımları.....	10
Şekil 2. 3: Lazer eritmeli sistem üç boyutlu yazıcı tekniği.....	11
Şekil 2. 4: Yönlendirilmiş enerji biriktirme şematik gösterimi.....	13
Şekil 2. 5: Malzeme püskürtme üç boyutlu yazıcı şematik gösterimi.....	13
Şekil 2. 6: Bağlayıcı püskürtme üç boyutlu yazıcı yöntemi.....	14
Şekil 2. 7: Malzeme ekstrüzyon üç boyutlu yazıcı şematik gösterimi.....	15
Şekil 2. 8: Levha laminasyonu şematik gösterimi.....	16
Şekil 2. 9: Tekno fotopolimerizasyonu şematik gösterimi.....	16
Şekil 2. 10: SLA tekniği kullanılarak hassas döküm tekniği ile üretilmiş manifold A356-T6 Alüminyum (Url-2, 2023).....	18
Şekil 2. 11: Bağlayıcı püskürtme (BJ) yöntemi ve hassas döküm yöntemiyle üretilen uçak kapısı (voxeljet, 2023).....	19
Şekil 2. 12: DLP yöntemi ile üretilen hassas döküm modelleri (Envision Tec., 2023). ...	19
Şekil 2. 13: Bağlayıcı püskürtme (BJ) yöntemi ile üretilen hassas döküm modeli (voxeljet, 2023).....	20
Şekil 2. 14: Dereceli hassas döküm işlem sırası (Blach & Kohser, 2011).....	23
Şekil 2. 15: Dereceli hassas döküm tekniğinde üretimi etkileyen parametreler.....	24
Şekil 2. 16: kauçuk kalıbından çıkarılan metal modeller ve mum modeller (Milli Eğitim Bakanlığı, 2006).....	25
Şekil 2. 17: Yolluk dizilimi yapılmış model ve kauçuk altlık (Milli Eğitim Bakanlığı, 2006).....	26
Şekil 2. 18: Etrafı bantlanmış 120mm çapında 260mm yüksekliğinde fanuslar.....	27
Şekil 2. 19: Dereceli hassas döküm aşamaları (Güler, 2012).....	28
Şekil 2. 20: Vakumlu döküm haznesi.....	30
Şekil 2. 21: Alçı pişirme fırını.....	30
Şekil 2. 22: Döküm işleminin şematik gösterimi (Çukur, Manufacturing and aging of 7075 based metal-metal composites sawduts as reinforcements, 2016).....	31
Şekil 2. 23: Su banyosu.....	31
Şekil 3. 1: Mum yolluk TGA (Güler F. , 2019).....	35
Şekil 3. 2: Kama CAD model ölçüleri.....	35
Şekil 3. 3: Vakumlu döküm (No.1) yolluk dizilimi.....	36
Şekil 3. 4: Vakumsuz döküm (No.2) yolluk dizilimi.....	37
Şekil 3. 5: Vakumlu döküm ters model (No.3) yolluk dizilimi.....	37
Şekil 3. 6: Vakumsuz döküm ters model (No.4) yolluk dizilimi.....	37

Şekil 3. 7: Vakumsuz döküm alttan dolm (No.5).....	38
Şekil 3. 8: XRD analizi (alçı).....	39
Şekil 3. 9: TGA Alçı.....	40
Şekil 3. 10: Bant ile sarılmış fanuslar.....	40
Şekil 3. 11: Pişirme fırını bilgi ekranı.....	42
Şekil 3. 12: Kesilmiş Alüminyum 6101 parçaları.....	42
Şekil 3. 13: Elektrik rezistanslı ergitme ocağı.....	43
Şekil 3. 14: Basınçlı su ile temizleme haznesi.....	44
Şekil 3. 15: ATA Brillant 265 kesme cihazı.....	44
Şekil 3. 16: STRUERS bakalite alma cihazı.....	45
Şekil 3. 17: 800 gritlik zımpara ile zımparalama işlemi.....	46
Şekil 3. 18: Metalografik olarak hazırlanan numunelerin, a) taranmış, b) eşik ayarı yapılmış görselleri.....	47
Şekil 3. 19: Simülasyon programına aktarılan katı model ve termo-fiziksel parametreler.....	48
Şekil 4. 1: a) 1 numaralı, b) 2 numaralı, c) 3 numaralı, d) 4 numaralı, e) 5 numaralı numunenin mikro yapı görüntüleri.....	50
Şekil 4. 2:1 numaralı numunenin imaj analiz görseli.....	51
Şekil 4. 3:2 numaralı numunenin imaj analiz görseli.....	52
Şekil 4. 4:3 numaralı numunenin imaj analiz görseli.....	52
Şekil 4. 5:4 numaralı numunenin imaj analiz görseli.....	53
Şekil 4. 6: 5 numaralı numunenin imaj analiz görseli.....	53
Şekil 4. 7: İmaj analiz ve yoğunluk ölçüm sonuçlarının kıyaslanması.....	54
Şekil 4. 8: Simülasyon çalışması yapılan üstten dolm yapılan numunenin, a) Dolm, b) Çekinti, c) Katılma zamanı, Ters kalıplanan numenin d) Dolm, e) Çekinti, f) Katılma zamanı, alttan dolm yapılan numunenin g) Dolm, h) Çekinti, i) Katılma zamanı görselle.....	55

6XXX ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA VAKUM DESTEKLİ KATILAŞMANIN GÖZENEKLİLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada; laboratuvar ölçekli çalışmaya en uygun döküm metotları arasında olan hassas döküm yöntemi kullanılmıştır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü laboratuvarların da Alüminyum 6101 serisi alaşım aynı şartlarda ergitilerek tez çalışması için 5 adet kama şeklinde numune üretilmiştir. İlk olarak bilgisayar destekli çizim programı olan Solidworks 2015 ile tasarımı tarafımızca yapılmış ve laboratuvarımız da bulunan 3d printer kullanılarak modellerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu modellere farklı şekillerde model mumu kullanılarak yolluk tasarımı yapılmıştır. Farklı yolluk dizilimi gerçekleştirilen modeller alt lastiğe uygun ve dik şekilde yolluk mumu ile sabitlenmiştir. Sonrasında da her biri aynı silindir şeklindeki delikli fanus içerisine dik bir şekil de yerleştirilmiştir. Hassas döküme uygun olan alçı ile belli oranda su ile karıştırılıp vibrasyon ortamında silindirik delikli fanuslar doldurulmuştur. Belirli bir süre yaklaşık olarak 3 saat sabit bir yerde bekletildikten sonra oda sıcaklığında katılma gerçekleşir ve alt lastiklerinden ayrılmaktadır. Ardından delikli fanuslar elektrik rezistanslı bir ısıtım işlem fırınına yerleştirilir ve belirli bir süre pişirilir. Alçı pişirme esnasında mum erir ve kül bırakmadan kaybolma gerçekleştirir. Fırından alınan kalıplar vakum destekli veya vakumsuz olarak ergitilmiş Alüminyum 6101 alaşımı yavaşça dökülür ve katılması beklenir. Her numune için bu işlemler vakum hariç aynı parametreler ile gerçekleştirilir. Dökümden bir süre sonra alçı kalıp yaklaşık olarak 25 dakika oda sıcaklığında soğur ve basınçlı su yardımı ile kalıptan alçı uzaklaştırılır ardından model yollukları ile beraber ortaya çıkarılmış olur. Sonrasında modelin yollukları taş motoru ile kesilip ardından bilgisayar ortamında 3 boyutlu modeli çizilen nihai şekle kavuşturulur.

Bilgisayar destekli tasarım da hazırlanan kama şeklindeki modelin üretimi, dereceli hassas döküm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Alüminyum 6101 alaşımı ile döküm gerçekleştirildiğinde bire bir aynı ölçü elde edildiği gözlemlenmiştir.

Üretilen alüminyum modellerin taş motoru ile kesilip bakalite uygun ölçülere getirilmesi sağlanmıştır. Ardından zımpara, parlatma ve dağlama işlemi TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinin laboratuvarların da gerçekleştirilmiş ve metalografik laboratuvarların da optik mikroskop yardımı ile 5 farklı döküm numunesinin tane yapıları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Dereceli hassas döküm, Tasarım,

INVESTIGATION OF THE POROSITY EFFECT OF VACUUM ASSISTED SOLIDIFICATION IN 6XXX ALUMINUM ALLOY

ABSTRACT

Aluminum alloys are widely used due to their high thermal conductivity, high corrosion resistance and low density. In recent years, it has been preferred in the automotive industry due to its lightness. For this reason, the use and usage areas of aluminum materials are constantly increasing.

In this study; The precision casting method, which is one of the most suitable casting methods for laboratory-scale studies, was used. Aluminum 6101 series alloy was melted under the same conditions in TUBITAK Marmara Research Center Material Institute laboratories and 6 wedge-shaped samples were produced for the thesis study. First of all, the design was made with Solidworks 2015, a computer aided drawing program, and the models were produced using a 3D printer. These models were designed as runners using wax in different shapes. Models with sprue alignment are fixed to the lower tire with sprue wax. It was then placed inside a cylindrical perforated bell jar. Cylindrical perforated bell jars were filled with plaster suitable for investment casting in a vibration environment. Solidification occurs at room temperature after being kept in a fixed place for a certain period of time. Then, the perforated bell jars are placed in an electrical resistance heat treatment furnace and baked for a certain period of time. During plaster firing, the wax melts and disappears without leaving ash. The molds taken from the furnace are poured with melted Aluminum 6101 alloy with or without vacuum support and waited for it to solidify. For each sample, these processes are carried out with the same parameters except vacuum. After a while after casting, the plaster mold cools down and the plaster is removed from the mold with the help of pressurized water, and then the model is revealed with its runners. Afterwards, the runners of the model are cut with a stone engine and the final shape is formed into a 3D model drawn on the computer.

The production of the wedge-shaped model prepared in computer-aided design is carried out using the graduated investment casting method. It has been observed that exactly the same size is obtained when casting with aluminum 6101 alloy.

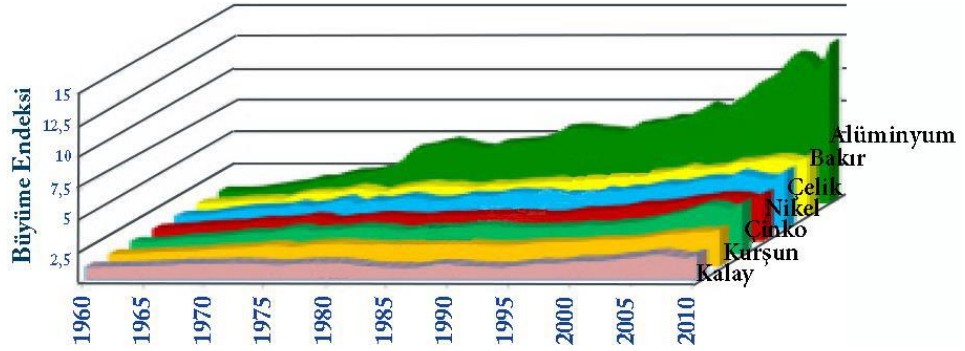
The produced aluminum models were cut and brought to the appropriate dimensions for bakelite. Then, the polishing and etching process was carried out and the grain structures of 6 different casting samples were examined with the help of an optical microscope.

Key words: Aluminum, Grade investment casting, Design.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Alüminyum, diğer metaller ile kıyaslandığında oldukça genç bir metaldir. Geçmişi sadece 200 yıllıktır. 1865 yılında Jules Verne' in kaleme aldığı "Ay'a Yolculuk" ismini verdiği kitabında alüminyum için altın gibi dayanıklı (korozyon direnci), demir kadar mukavemeti olan, gümüş renginde ve hafiflik olarak cam ile mukayese edebilecek diye tanımlamıştır. Altın ve platin, alüminyum ortaya çıktığı dönemde alüminyumdan daha değerlidir. En büyük problemlerden biri olan maliyet sorunu olmasaydı hafif metal çağı o zamanlarda başlardı. Alüminyumun günümüzde çok büyük bir kullanım alanının olmasının sebebi olarak, bilim adamlarının çabalarının netice vermesi olarak söylenebilir (Eskin, 2008).

Dünya'da ve Türkiye'deki eğilimler döküm sektörünün alüminyumla olan geleceğiyle ilgili teknik yazısında, genelde kullanılan metallerin artan talebe göre üretim ve büyüme endeksinin son 50 yıldaki oranlarını Şekil 1.1' de paylaşmıştır (Günay, 2013).



Şekil 1. 1. Dünyada yaygın kullanılan metallerde talep oranları (Günay, 2013).

Grafik incelendiğinde, son 50 yıl içerisinde alüminyum için 12,7 kat, çelik'e bakıldığında ise yalnızca 4 kat artış olduğu görülmüştür. Bunun asıl sebepleri düşünüldüğünde, büyük ölçüde otomotiv sektörünün hafif malzeme ihtiyacına yönelmesi bunun da karbon salınım miktarını azaltması, aracın menzilin yükselmesi, korozyon direncinin yüksek

olması, şekillenebilirliğinin iyi olması ve geri kazanımının basit süreçleri olması söylenebilir (Yılmaz , 2013).

Şu anda dünya da kullanılan en az 300 farklı standart alüminyum döküm alaşımı mevcut olduğu bilinmektedir. Bu da farklı döküm ürünleri elde edilmesine olanak sağlamasının yanın da her biri çeşitli karakteristik özelliğe sahip olabilmektedir. En yaygın olarak tüketilen alüminyum alaşımı Al-Si alaşımlarıdır (Kaufman & Rooy, 2001).

Döküm, ergitilmiş metalin basınç etkisi veya yerçekimi etkisi ile kalıpta istenilen şekile göre oluşturulmuş boşluğa doldurulması ve katılaşması demektir (Groover, 2010). Döküm yöntemi diğer imalat yöntemlerine göre özellikle maliyet olarak son derece avantajlıdır ve seri üretim içinde aynı şekilde avantaj barındırmaktadır. Kompleks parçaların üretimi için elverişlidir. Bu yöntemde boyut sınırlaması yoktur (Beeley, 2001).

Bu yöntemde kalıp içindeki ergitilmiş metal katılaşma esnasında hacim olarak daralır. Buna da çekinti adı verilir. Kalıp boşluklarının sebebi bu hacimsel küçülmedir. Bunun sonucu olarak genelde parça işe yaramaz bir hal almaktadır (Fredriksson & Akerlind, 2006).

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde alüminyum ve alüminyum alaşımlarının tarihçesinden ve özelliklerinden bahsedilecektir. Eklemeli imalat yöntemleri, üç boyutlu yazıcı özellikleri ve bu yöntemin hassas döküm için ne kadar önemli ve kullanışlı olduğundan söz edilecektir. Devamın da hassas döküm yöntemi anlatılacak ve vakumlu döküm ile ilgili bilgiler verilecektir.

2.1 Alüminyum Alaşımlarının Tarihi ve Özellikleri

Bu bölümde alüminyum ve alaşımlarının tarihinden ve genel özelliklerinden bahsedilerek A6101 alüminyum alaşımının özellikleri ile ilgili bilgiler verilecektir.

2.2 Alüminyumun Tarihçesi

Alüminyum, tarihi boyunca özelliklerinin getirdiği avantajlardan dolayı oldukça kullanılan bir malzemedir. Alüminyum ve alaşımları son zamanlarda kimya, elektrik, tıp, inşaat, uçak ve otomotiv alanlarında çok fazla miktarda kullanılmasından dolayı alüminyumun önemi sürekli artmaktadır (Başer, 2012).

Sir Humphrey Davy' nin 1807 yılında yaptığı bir çalışmada alüminada oksijene bağlı bir metalin olduğu kanısına varmıştır. Fakat yapılan bu çalışma da Alüminanın elektroliz edilmesi ile demir-alüminyum alaşımı üretilmiş ve yalnızca saf alüminyum üretilmemiştir. 1820 yıllarının başında M.Pierre Berhier Fransa'da boksit cevherini bulmuştur. 1855'te Deville tarafından ilk olarak imal edilen alüminyum fuarda gösterilmiştir. Fransa'da Paul T. Heroult ve Amerika'da Charles Martin Hall birbirinden bağımsız kriyolitte çözülmüş alüminanın elektrolitik parçalanması hakkında patent başvurusu yapmıştır. Şuan ki teknolojiye cevherden alüminyuma üretim sağlayan tesislerde bu patent esasları ile üretim yapılmaktadır. İlk elektroliz tesisi 1887-1988

yıllarında Heroult İsviçre firması Metallurgischen Gesellschaft tarafından kurulmuştur. 1887-1892 tarihlerin de K.J.Bayer alüminyum imalatı için Bayer prosesini geliştirmiş ve ilk patentin sahibi olmuştur. Alüminyum boksit cevherlerinden imalatının seri ve fazla sayıda üretimi olağan hale geldikten sonra alüminyumun kullanımı endüstride hızlı artmıştır (Alper, 2003).

2.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

Yer yüzeyinde neredeyse oksijen kadar çok bulunan element alüminyumdur. Yer yüzeyinin neredeyse %8' i alüminyum' dan meydana gelmektedir. Alüminyum, doğada çokça mevcut olması, ideal mekanik özelliklere beraber düşük ağırlıkta olabilmesi özgül ısı, korozyon direnci ve elektrik iletkenliği, kimyasal ve kokulara karşı mukavemeti, yeniden kullanılabilir olması gibi özellikleri ile, şuan da oldukça kullanılan metallerdendir.

Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri, kullanılan alaşıma ve mikro yapı özellikleri ile beraber farklılık göstermektedir. Alüminyum alaşımları, dünya çapında standartlarda genel olarak kabul edilmiş Amerikan Alüminyum Birliği (AA) tarafından, imalat teknikleri esas alınarak işlenebilir ve döküm alaşımları adında iki farklı grup olmaktadır. İşlenebilir alaşımları çoğunlukla kütük halinde döküm sonrası plastik deformasyon gerçekleştirilerek son haline getirilmektedir. Döküm alaşımlarında ergitme işlemi yapılır sonrasında üretimi gerçekleştirilecek parçanın modeline göre hazırlanan kalıba döküm ve katılaştırma ile üretilmektedir (Başer, 2012).

Alüminyum diğer metal malzemelere kıyasla yüksek ışık yansıtır ve daha yüksek ısı yayılımı kabiliyetindedir. Saflık oranı yüksek olan bir alüminyum levha %80' in üzerinde ışık yansıtılmaktadır. Güneş ışınlarından gelen ultraviyole etkiyi alüminyum katkılı boyalar kullanılarak engellenebilmektedir (Özderin, 2017).

Saf alüminyum, korozyon dayanımı ve yüzey kalitesi yüksek olması gereken parçaların imalatında (araba farları, kimya ve gıda enstitüsünde, ince folyo yapraklar 4/20 µm ve özel iletkenler elektronik sanayisi için.) kullanılabilir.

Tablo 2. 1: Saf alüminyumun özellikleri (Özderin, 2017).

Kimyasal sembol	Al	Isıl genleşme katsayısı	23.8x10 ⁻⁶ °C
Atom numarası	13	Elektrik direnci	2.699 mikro ohm.cm
Atom ağırlığı	26,98	Çekme mukavemeti	4-9 kPa/mm ²
Kafes yapısı	YMK	Akma mukavemeti	1-3 kPa/mm ²
Yoğunluğu(20°C)	2,6989gr/cm ³	Elastik Modül	6500-7200 N/mm ²
(660 °C'de sıvı)	2,37gr/cm ³	Sıvılaştırken Hacim Büyümesi	%6,50
Kaynama sıcaklığı	2300°C	Katılaştırken Kendini Çekme	%1,7-1,8
Ergime sıcaklığı	660,24°C	Kopma Uzaması	%30-50
Ergime ısısı	94,6 cal/gr	Sertlik	15-30 HB30
Özgül ısısı	0,2259 cal/g°C	%Doğada Bulunabilirlik	7,9

2.3.1 6101 alüminyum alaşımı ve özellikleri

Alüminyum döküm alaşımları, yoğrulabilir döküm alaşımları ile benzer sistemlere sahiptir. Bununla birlikte içerisinde silisyum olan alaşımlardan dövme kategorisinin de yer alanlar daha az silisyum miktarına sahiptir. Döküm sınıfında olanlar ise daha yüksek miktarlarda silisyum bulundurmaktadır.

6101 alaşımları, döküm kabiliyetlerinin iyi olması korozyona karşı dirençli olması ve dayanımlarının otomotiv sektöründe yeterli olması, havacılık ve uzay başta olmak üzere çeşitli alanlarda büyük çapta kullanılmaktadır.

6101 alaşımlarda Mg ve Si, MgSi' yi oluşturmaktadır. MgSi' i oluşturmak için gerekli olandan fazla silisyum, alaşımın sertleşmesine büyük ölçüde katkı sağlayabilir. 6101 serisindeki temel alaşım elementi Mg ve Si, kısmen Al matrisi içerisinde, katı eriyikte çözünmekle beraber kısmen de intermetalik fazlar halinde bulunurlar. Katılaşma esnasında, katılaşma şartlarına bağlı olarak farklı intermetalik fazlar oluşabilmektedir (Karabay, Yılmaz, & Zeren, 2011).

2.3.2 Alüminyum döküm alaşımları

Alüminyum sünek bir metal malzemedir ve gümüş rengindedir. Alüminyum' un en iyi özellikleri arasında kolay işlenebilirlik, iyi yüzey kalitesi, özgül ağırlığının düşük olması, çok iyi dökülebilirlik ve düşük seviyede gaz çözünürlüğü vardır. Kalıp tasarımı yapılırken, alüminyumdaki katılaşma sırasın da %3 - %8 arasındaki çekme oranı dikkate alınmalıdır. Alüminyum döküm alaşımlarının diğer dövme alaşımlara kıyasla mekanik özellikler olarak üstündür. Bunun ile beraber ısı işleme tabi tutularak mekanik özelliklerde iyileştirme yapılabilmektedir.

Dökülebilirlik özellikleri alüminyumlarda akışkanlığın, sıcak yırtılma eğiliminin ve çekme özellikleri için özel kalıplar kullanılarak kontrol edilmektedir. Mekanik özellikler de, çoğu zaman çok iyi ısı işlem uygulanabilen ötektik kompozisyonları olan alaşımlar ile elde edilmektedir. Ek olarak döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini daha iyi karakterize etmek için, empürite seviyesi kontrolü, ötektik modifikasyon ve tane boyutu kontrolü yapılabilmektedir.

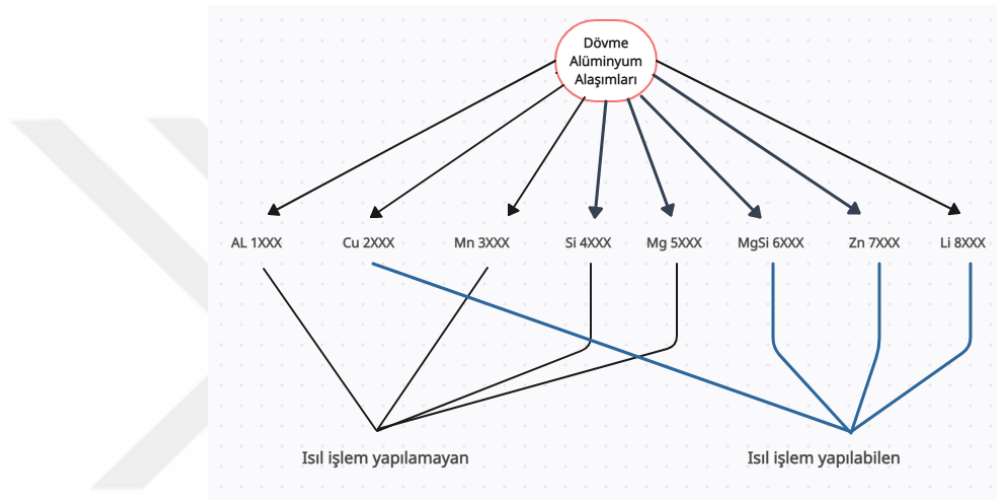
Alüminyum alaşımları genelde 3 farklı döküm yöntemi ile üretilirler. Bunlar; pres döküm, sabit kalıp içerisine döküm ve kum kalıba dökümdür. Bu alaşımların fiziksel özellikleri oldukça iyidir. Kaynak edilebilirliği iyidir. Isıl işlemler de yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek sıcaklıklarda direnci arttırmak için %1-%4 bakır ilavesi yapılabilir. Titanyum ve bor tane küçültücü olarak kullanılabilir (Delikanlı, 2011).

2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarında mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri alaşımların elementlerine ve mikro yapısına göre farklılık gösterir. Günümüzde alüminyum alaşımlarının iyileştirilmiş mukavemet özellikleri, hafiflik avantajları ve iyi elektrik iletkenlikleri, korozyon direnci sebebiyle gıda, kimya otomotiv ve gemi imalatı endüstrisi, makine imalatına ek olarak inşaat, havacılık gibi geniş kullanıl alanına sahiptir. Birçok avantajlı özellikleri sebebiyle mühendisler ve tasarım işi ile uğraşanların tercihi olmuştur. Alüminyum yapısına eklenen alaşımlar bakır, silisyum, mangan, çinko ve magnezyumdur. Döküm ve dövme alaşımları olarak ayrılırlar (Özderin, 2017).

2.4.1 Dövme alüminyum alaşımlar

Bu alaşımlarının, plastik deformasyon karşı yetenekleri çok iyi derecededir ve basitçe şekil değiştirebilirler. Alüminyum döküm ve dövme alaşımlarına ısıtılabilir. Amerikan Alüminyum (AA) birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harf ile sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2. 1: Isıl işlem durumuna göre dövme alaşımlar.

Tablo 2. 2: Alüminyum serileri içinde bulunan ana elementler.

Alaşım elementleri	İSİM
Al içeriği >%99	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Silisyum	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer	8XXX

2.4.2 Isıl işleme uygun olmayan alüminyum alaşımları

1xxx serisi alaşımlar en az %99,0 alüminyum, empürite olarak da demir ve silisyum barındırırlar. Bu alaşımlar haddeleme ile folyo ya da levha olarak kullanılabilirler.

3xxx serisi alaşımların en sağlam alaşımı 3003' tür. Bu alaşım 1100%1.25 mangal eklenerek oluşturulur. 3003 alaşımının tavlandıktan sonra çekme dayanımı 110 MPa'dır. Bu klasman işlenebilirlik açısından iyi olduğundan genel amaçlı bir alaşımdır.

4xxx serisi alaşımların temel elementi silikondur. (4032,4043,4145 vs.) belirli oranlarda (%12 civarı) ilave edilmesiyle, erime oranı ciddi şekilde azalır. Bu nedenle, alüminyum-silikon alaşımları, erime sıcaklığı ana metalin erime sıcaklığından biraz daha alt derece de olan pirinç ve kaynak teli alaşımlarında, alüminyum ilavesi ile kullanılmaktadır.

5xxx alüminyumların da temel alaşım elementi magnezyum katı eriyik mukavemeti sağlar. Miktarı %5'e kadar çıkabilir. Kullanılan en önemli alaşım serisi 5052'dir. %52,5 Mg, %0,2 Cr içeren bu alaşım tavlandıktan sonra çekme dayanımı 193 MPa'dır.

2.4.3 Isıl işleme uygun olan alüminyum alaşımları

2xxx serisi alaşımlarında bakıra ilave olarak magnezyum ve az miktarda diğer elementler de eklenmektedir. 2xxx serisi uçak sanayisi için birim ağırlık dayanımının yüksek olması sebebiyle uygundur ve bolca kullanılmaktadır. 2024 endüstriyel olarak uygulama alanı en bol olan alaşımdır.

6xxx serisi alaşımlarının Mg_2Si intermetalik bileşikleri, çökelti sertleşmesi gerçekleştirildikten ciddi bir sonra dayanım artışı sağlamaktadır. En çok kullanılan alaşımı 6061 dir. Bu alaşım %0,6 silisyum, %0,3 bakır ve %1 magnezyum içermektedir. Çekme mukavemeti 290 MPa'dır. Otomotiv alanın da yapılarında bolca kullanılmaktadır.

7xxx serisi alaşımlar, temel çökeltisi $MgZn_2$ intermetalik bileşiğinden oluşmaktadır. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içince yüksek çözünebilirlikli ve yüksek yoğunluklu çözeltilerin oluşmasını, yani dayanımın epeyce yükselmesinde büyük rol oynar. 7075 alaşımı bu serideki en önemli alaşımdır. Yüksek dayanım gerektiren parçalarda kullanılır (Onar, 2010).

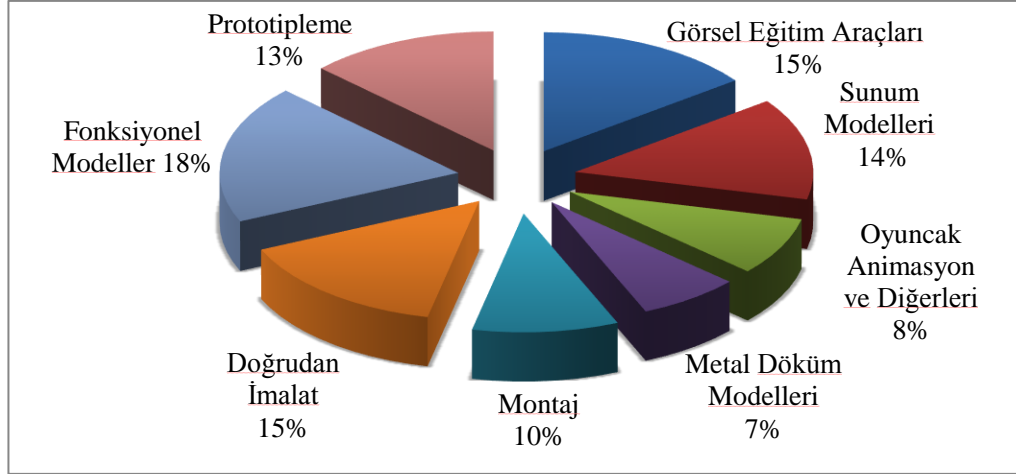
8xxx serisi alaşımların esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisi de yapılabilmektedir. Yüksek yorulma dayanımı ve tokluk özellikleri olduğunu için uzay ve havacılık sektöründe tercih edilmektedir.

2.5 Eklemeli İmalat Teknolojileri

Eklemeli imalat (katmanlı), üç boyutlu bilgisayar ile çizilmiş geometrileri kullanarak oluşturan ve fiziksel olarak üst üste katman eklenmesi ile seri bir şekilde üretimin gerçekleşebileceği bir imalat teknolojisidir. 1980 yıllarında ortaya çıkan bu yöntem, ilk zamanlarında yalnızca prototip için kullanılmıştır. Bu sebepten adı Prototipleme olarak da bilinmektedir (Alcisto, Garcia, & Hinkson, 2011).

İlk başlar da sadece prototip üretimi için amaçlar ile kullanılmıştır. Eklemeli imalat teknolojileri temelde geometrik bir şekil sınırının olmaması, malzeme israfının önüne geçebilmesi, farklı malzeme çeşitlerinin olması, hızlı bir şekilde üretimin gerçekleştirilmesi ve istenilen kaliteli yüzeyi elde edilebilmesinde çok avantajlı bir yöntemdir. Son yıllarda kullanımı oldukça artmakla beraber geleneksel üretim yöntemlerini geride bırakmaktadır (Özkan & Çelik, 2017).

Bir çok eklemeli imalat yöntemi vardır. Bununla beraber tüm bu yöntemler ortak bir noktada buluşmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinde esas olarak bilgisayar yardımı ile çizim yapılması ve üç boyutlu tasarım dosyası oluşturulmaktadır. Bu tasarım dosyası , kullanılan 3d yazıcının ara yüzüne uygun ilave program ile “stl.” formatına dönüştürüldükten sonra yazıcıya gönderilir. Sonra belirlenen üretim yöntemine uygun olarak parametreler belirlenerek üretime geçilir. Üretim yöntemi seçiminde, imalatı talep edilen malzeme, üretilmek istenen ürün ölçüleri, iletkenlik, sıcaklık ve parçanın mekanik özellikleri gibi fiziksel özellikler esas alınarak parametreler oluşturulmaktadır (Kai, 1997).



Şekil 2. 2: Eklemeli imalat yönteminin amaçlarına göre kullanımları.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen ürünler çeşitli alanlarda hayatımıza dahil olmaktadır. Askeri ekipman, havacılık, mimari, oyuncak, enerji, yağ-petrol, otomotiv ve kuyumculuk gibi sektörleri eklemeli imalat yöntemlerinin tercih edilebildiği alanlara örnek verilebilir. Eklemeli imalat yöntemlerinin hedeflerine yönelik kullanım alanları yüzde olarak yukarıda Şekil 2.2’ de verilmiştir (Envision Tec., 2015).

2.5.1 Üç boyutlu yazıcı teknolojileri

Günümüzde eklemeli (katmanlı) imalatı yapmak için bir çok çeşitli teknik ile çalışan 3d yazıcılar bulunmaktadır. Bu teknikler, kullanılan malzeme çeşitlerine, üretilen parçanın mukavemetine, makinelerin üretim yaptığı ortama vb. özelliklerine, baskı hassasiyetine, baskı hızına, küllenme oranına, üretim maliyetine, üretim anındaki sıcaklığa ve ultraviyole (UV) ışınların miktarlarına göre kendileri arasında ayrılmaktadır.

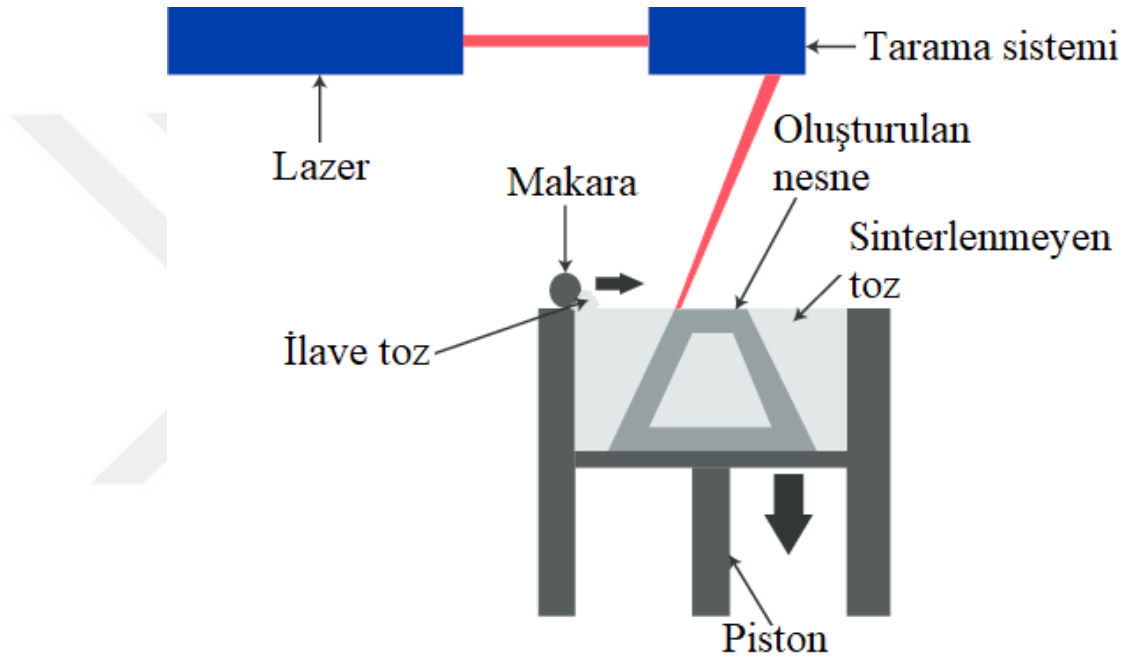
Literatürde üç boyutlu yazıcılar 7 ana başlık altında incelenebilirler. Bu yazıcıların farklı sınıflandırmaları oldukları bilinmektedir (Envision Tec., 2015). Üç boyutlu yazıcıların sınıflandırılması aşağıda Tablo 2.3’ te verilmiştir.

2.5.1.1 Toz yataklı lazer eritmeli yazıcı

Toz yataklı lazer eritmeli yazıcılarda (Powder Bed Laser Melting), toz içindeki belirli bölgeler lazer ile eritilir. Sonra üzerine yeni bir katman toz eklenerek bir sonraki katman eritilerek üzerine eklenir. Her bir katman kalınlık olarak 20-100 µm aralındadır. Son

teknoloji uygulamalarda değişik güçlerde lazerler soy gaz ortamında kullanılabilir. Bu yöntem “SLS”, “SLM”, “DMLS” gibi isimlerle duyulabilir. Bunlara ek olarak, tamamen vakum ortamında uygulanan “Elektron Işını ile Ergitme (EBM)” yöntemi de bu alanda değerlendirilebilir.

Üç boyutlu yazıcılarda lazer eritmeli teknik sistemlerin şematik gösterimi Şekil 2.3’ te gösterilmiştir (Ganeriwala & Zohdi, 2014).



Şekil 2. 3: Üç boyutlu yazıcı tekniği lazer eritmeli sistem.

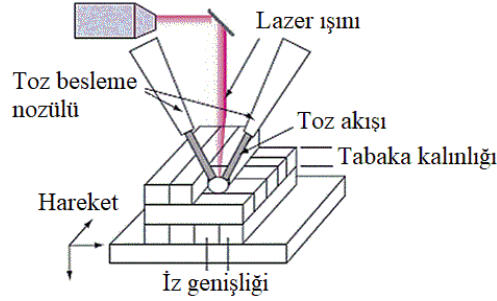
Tablo 2. 3: Üç boyutlu yazıcı teknik özellikleri (Envision Tec., 2015).

	Lazerli Sistemler	Enerji Depolama	Malzeme Püskürtme	Bağlayıcı Püskürtme	Malzeme Ekstrüzyonu	Levha Laminasyonu	Tekno Foto Polimerizasyonu
Teknik	SLS, SLM DMLS, EBM	LENS LMD	MJ	Kum/Plastik BJ, Metal BJ	FDM	SL LOM	SLA DLP
Basılabilen Malzemeler	Polimerler, metaller	Metaller	Polimerler seramikler	Plastik, seramik	Polimerler, metaller,	Polimerler metaller	Polimerler seramikler
Baskı Hızları	Yavaş	Yavaş	Orta	Hızlı	Orta	Orta	Orta- Hızlı
Baskı Maliyetleri	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Az	Az	Orta
Hassasiyet	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Az	Orta	Orta
Önemli Avantajları	Yüksek çözünürlük	Büyük parça yapabilir	İyi yüzey kalitesi	Destek gerekmez	Geniş kullanım	Benzer olmayan malzemeler	Kompleks parçalar
Önemli Dezavantajları	Yüksek güç tüketimi	Kötü yüzey kalitesi	Kötü dayanım	Zayıf parçalar	Kötü yüzey kalitesi	Sınırlı geometri	Zayıf dayanım
Önemli Endüstriyel Uygulamalar	Prototipleme, havacılık	Havacılık, savunma, petrol	Medikal havacılık medikal	Model yapımı Prototipleme döküm,	Otomotiv, eğitim,	Prototipleme mimari, eğitim	Prototipleme, medikal, döküm, dişçilik

2.5.1.2 Yönlendirilmiş enerji biriktirme

Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yönteminde , toz şeklindeki işlenmemiş metallerin istenilen bölgelere lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynakları ile ısıtılıp eritme ile püskürtme yapılmaktadır. Bu teknik, makinelere bağlı olarak, 100 µm' a kadar ince yapıları oluşturabilir. Yönlendirilmiş enerji biriktirme tekniği, “Lazer kaplama”, ”Lazer Metal Biriktirme (LMD)” gibi isimlerde anılabilmektedir. Bu yöntemde, lazer eritmeli sistemlerin tersine, metal biriktiren yüzey çok fazla ısıtılmamaktadır. Bu yöntemin iyileştirilen bir uygulamasında, “Lazer Tozu ile Şekillendirme (Lens)” yöntemi de bir yapıya zarar verilmeden kaplamasıyla onarım yapılabilmesi mümkündür. Bu yöntem, oksitlemeyi engellemek amacıyla soy gaz ortamını sağlayan tezgâhlarda ve daha çok farklı metal alaşım kullanılmaktadır. Kullanımı mümkün olan metaller olarak, bakır, kobalt, nikel, alüminyum ve titanyum alaşımlarıyla alet malzemeleri ve değerli metaller düşünülebilir.

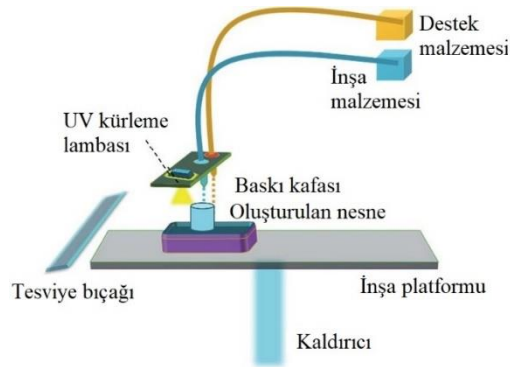
Üç boyutlu yazıcı yöntemlerinden biri yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemini aşağıda Şekil 2,4'te verilmiştir (Heralic, Ottosson, & Christiansson, 2010).



Şekil 2. 4: Yönlendirilmiş enerji biriktirme şematik gösterimi.

2.5.1.3 Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme (Material Jetting) yönteminde, eriyik şekilde olan polimerler kontrollü bir olarak, mürekkepli yazıcı gibi hareketli kafalar ile püskürtülerek ve sonrasında UV ışınları ile kürlenerek modeller imal edilir. Bu tekniğin en iyi avantajlarından biri parlak yüzeylerin oluşturulmasıdır. Fakat dezavantajı nispeten kırılgan parçalar oluşmakta ve üretim süreci uzun sürmektedir. Şematik gösterimi aşağıda Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Sireesha, Ramakrishna, Babu, & Lee, 2018).

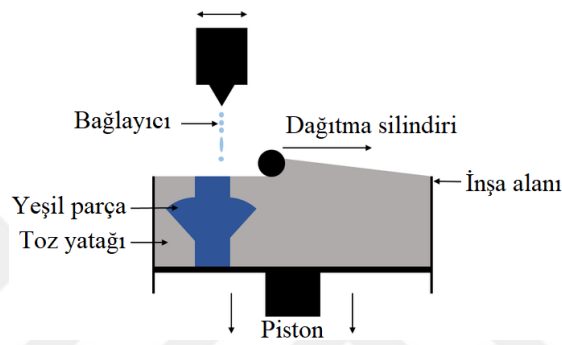


Şekil 2. 5: Malzeme püskürtme şeması

2.5.1.4 Bağlayıcı püskürtme

Bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting) yönteminde, toz malzeme üstüne, mürekkep kullanan yazıcı gibi hareketli kafa ile yapıştırıcı uygulanmasından sonra üzerine yeni malzeme katmanını sererek sertleştirilmekte. Bağlayıcı püskürtme yöntemi genelde kalıp

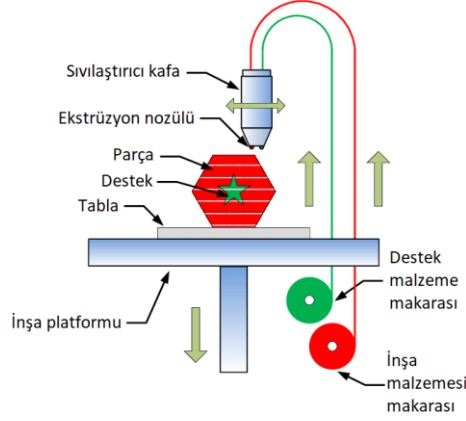
imalatında kullanılmaktadır. Bu yöntemde polimer,seramik ve metal malzeme üretimi sağlanmaktadır. Özellikle hassas döküm , prototipleme, otomobil, modelleme,mimari ve havacılık uygulamaları için bu yöntem sıkça kullanılabilir. Diğer taraftan bağlayıcı püskürtme yöntemi çoklu nozüller yardımı ile bağlayıcı boyanabilmektedir ve karıştırılmaktadır. Bu da çok farklı renklerdeki objelerin üretimini sağlamaktadır. Bu yöntemde bağlayıcı ana tutucu olduğundan dolayı genelde daha kırılabilir olmaktadır. Üç boyutlu yazıcı ile gerçekleşen bu tekniğin şematik gösterimi şekil 2.6’ da verilmiştir (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).



Şekil 2. 6: Bağlayıcı püskürtme üç boyutlu yazıcı yöntemi.

2.5.1.5 Malzeme ekstrüzyonu

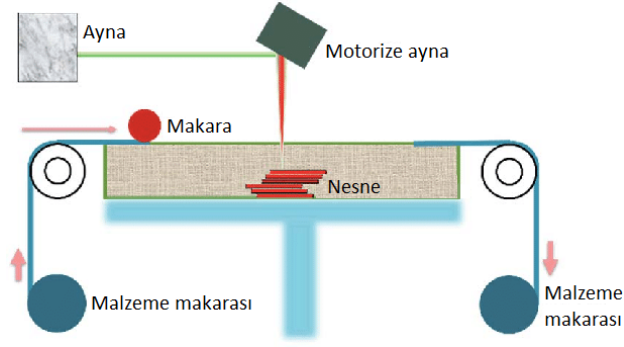
Malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion) yöntemi, genelde bilinen adı ile “Eritilmiş malzeme şekillendirme ”, genelde polimer malzemelerdir. Metal, kompozit ve seramik malzemelerin dahil edildiği üç boyutlu yazıcı yöntemidir. Bu yöntemde, malzemeler filamanlar halinde eritilmekte ve uygulama yapan hareketli bir kafaya iletilmektedir. Daha sonrasında katmanlar halinde üst üste yapıştırılması ile şekil oluşturulur. Ortam sıcaklığından sertleşmesi beklenir. Bu yöntemde çoğunlukla hızlı bir prototipleme ve az sayıda üretim durumlarında tercih sebebi olmaktadır. Üç boyutlu yazıcı yöntemlerinden biridir. Şematik gösterimi şekil 2.7’ de verilmiştir (Ning, Qiu, wang, Wei, & Cong, 2014).



Şekil 2. 7: Malzeme ekstrüzyon üç boyutlu yazıcı şematik gösterimi.

2.5.1.6 Levha laminasyonu

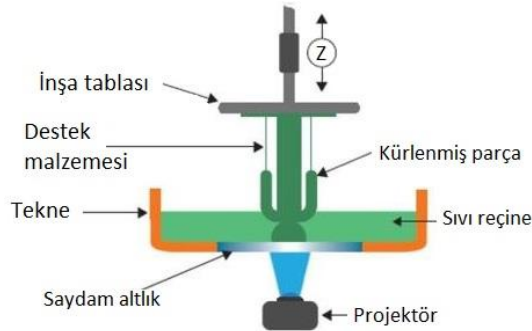
Levha laminasyonu (Sheet Lamination) yönteminin temel bileşenleri, inşaa platformu üstüne bir levha ilerleten besleme mekanizması, levha ile aşağıdaki katman birleştirilmesi ile basınç uygulayarak ısıtılmış bir silindir ve bir levha katmanının parçanın dış hatlarından kesilmesi için kullanılan bir lazerdir. Levha laminasyon yöntemi, "Lamine Nesne İmalatı" yöntemi ismiyle bilinmektedir. Bu yöntemde parça üretimi, yapışkan kaplanmış bir levha malzemenin bir adım önceki katmanının üzerine birleşmesi, kesilmesi ve yığılması şeklinde gerçekleşmektedir. Bu yöntemde lazer, her bir katmandaki parçanın dış tarafını kesmesi ve her kesme işleminden sonra platform levha kalınlığına eşit miktarda aşağı doğru derinlik vermektedir. Diğer levha ise daha önce konumlandırılan levhanın üzerine doğru ilerlemektedir. Daha sonra hafifçe yükseltilmektedir. Isıtılan silindir yeni bir katmanı yapıştırmak için yüksek basınçta maruz kalmaz. Lazeri parça ana hattıyla dışta kalan kısımları kesmektedir. Parça bitine kadar bu tekrar edilmektedir. Tabaka kesildikten sonra artan malzeme, parçaya destek görevinde yerinde kalmaktadır. Bu yöntemin şematik gösterimi şekil 2.8'de verilmiştir (European Defence Agency, 2018).



Şekil 2. 8: Levha laminasyonu şematik gösterimi.

2.5.1.7 Tekno fotopolimerizasyonu

Tekno fotopolimerizasyonu (Vat photopolimerisation) yöntemi, oda sıcaklığında sıvı halde olan fotopolimer reçine tabakasının mor ötesi (ultraviyole) ışın ile belirlenen bölgelere kürleştirme uygulamasına dayanmaktadır. Her bir katman oluşturulması ile parça katmanı kalınlığı aşağı indirilerek işlem devam etmektedir. Katmanlar oluşturulduktan daha sonra model reçine havuzundan alınmaktadır. Bu yöntem kullanılması ile oldukça hassas şekillerde düzgün modeller oluşturulabilir. Mekanik özellikleri diğer yöntemlere kıyasla değişkendir ve fotopolimer malzemeler kararlı değildir (Vaezi, Chianrabutra, Yang, & Mellor, 2013). Üç boyutlu tekniklerden biri olan tekno fotopolimerizasyonu yöntemi şematik gösterimi şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2. 9: Tekno fotopolimerizasyonu şematik gösterimi.

Tekno fotopolimerizasyonu yöntemi hızlı bir şekilde prototipleme ve bir çok kalıp uygulamalarında tercih edilen bir yöntemdir. Tekno fotopolimerizasyonu yöntemi “SLA” ve “DLP” adı ile bilinmektedir. SLA ve DLP teknikleri büyük oranda aynıdır. SLA yönteminde model noktasal bir ultraviyole lazer ışınına maruz kalmaktadır. DLP

yönteminde ise modele ultraviyole ışın projektör vasıtasıyla üretilmektedir (Ozsoy & Duman, 2017).

2.6 Eklemeli İmalat ve Hassas Döküm

“Kayıp mum (lost wax)” diğer adıyla “Hassas döküm (Investment casting)” yöntemi temeli yüzlerce yıl önceye dayanan en eski metal döküm yöntemleri arasındadır. Mısır uygarlıkları, Çin Hanedanlıkları, Antik Mezopotamya ve Afrika’da Benin Medeniyetlerinde de ayrıntılar ile detaylandırılmış sanat eserlerini bronz, bakır veya altından üretebilmek için hassas döküm yöntemi kullanmışlardır.

Hassas döküm yöntemi en eski döküm yöntemlerinden biri olmasına rağmen, bir çok modern teknolojik gelişmelerin gerçekleştirilmesine çok önemli katkılar sağlamıştır. İlk başlarda yalnızca heykel ve benzeri sanat eserlerinde kullanılan hassas döküm yöntemi, şimdilerde en kompleks parça üretimlerinin olduğu uzay, savunma sanayii ve havacılık gibi önemli uygulamalarda kullanılmaktadır (Ravi, Pal, Bhargava, & Chandrasekhar, 2004).

Hassas döküm yöntemi ile üretim yapılan uygulama alanları sürekli olarak artış göstermekte ve imal edilen parçaların önemli durumda olması, parçaların boyutsal hassasiyetleri, mekanik dayanımları ve yüzey pürüzlülüğü gibi karakteristik özelliklerinin iyileştirilmesi ön plana çıkmıştır. Diğer taraftan şimdiki koşullar dikkate alındığında ise parça üretimi için harcanan zaman ve ekonomik durum ile ilgili konular büyük sorun teşkil etmektedir. Dile getirilen bu beklentilerin karşılanabilmesi ihtiyacı ile hassas döküm yönteminde eklemeli imalat yöntemlerinden sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Şimdiler de model prototipleri, maçalar ve model kalıplar bu yöntemle üretilmektedir. Hassas döküm yöntemi ile maçaların ve modellerin üretilmesine eklemeli imalat tekniklerinden BJ, DLP ve SLA, yöntemleri ile beraber FDM ve SL teknikleri kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden hassas döküm ile üretimi gerçekleştirilerek, her parça için ayrı yapılan mum enjeksiyon kalıpları kullanılmamaktadır. Tasarım değişiklikleri, bilgisayar destekli çizim programları ile çok rahat bir şekilde yapılmaktadır. Bu yöntemde kullanılmadığı durumda tasarım değişikliği safhalarının her biri için yeni takımlar gerekmektedir. Üretilen modellerin metal ile beslenebilmesi vede üretilen modele destek olabilmesi için kullanılan yolluklar, bu

yöntem ile farklı denemeler yapılabilmesi ile hızlı ve uygun maliyetlerle optimize edilebilmektedir. Diğer taraftan geleneksel kalıplara alınamayan çok farklı karmaşık şekiller bu yöntem ile gerçekleştirilebilir (Ravi, Pal, Bhargava, & Chandrasekhar, 2004). Bu yöntem ile imal edilen prototip motor testleri için şekilde 2.10’da Ford’ a ait motor emiş manifoldu verilmiştir.



Şekil 2. 10: SLA tekniği kullanılarak hassas döküm tekniği ile üretilmiş manifold A356-T6 Alüminyum (Url-2, 2023).

Uçak kapısı model üretimi ve hassas döküm tekniği ile üretilen model. Bağlayıcı püskürtme (BJ) eklemeli imalat yöntemi ile PMMA (Polimetilmetakrilat) malzemenen üretilmiştir. Şekil 2.11’ de verilmiştir.



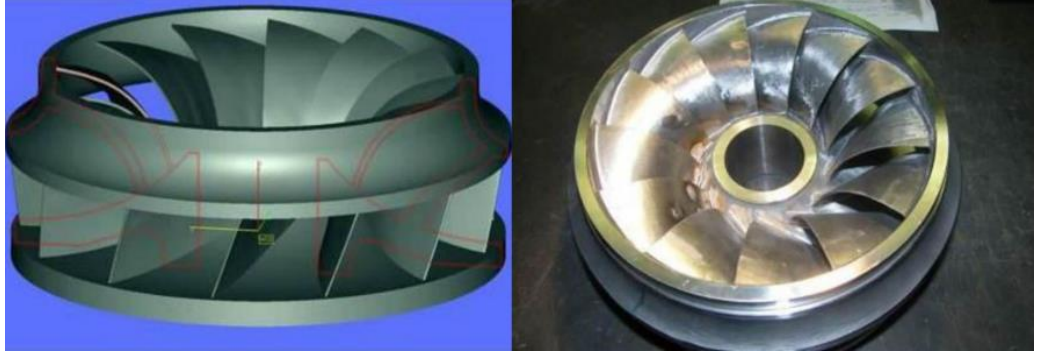
Şekil 2. 11: Bağlayıcı püskürtme (BJ) yöntemi ve hassas döküm yöntemiyle üretilen uçak kapısı (voxeljet, 2023).

Digital Light Processing (DLP) eklemeli imalat yöntemi ile fotopolimer reçine kullanılarak üretilen kuyumculuk modelleri Şekil 2.12’ de verilmiştir.



Şekil 2. 12: DLP yöntemi ile üretilen hassas döküm modelleri (Envision Tec., 2023).

Bağlayıcı püskürtme (BJ) eklemeli imalat yöntemi ile PMMA malzemeyle pervane prototip imalatı Şekil 2.13’ te verilmiştir.



Şekil 2. 13: Bağlayıcı püskürtme (BJ) yöntemi ile üretilen hassas döküm modeli (voxeljet, 2023).

2.6.1 Hassas Döküm

Hassas döküm (Lost wax) tekniği, yüzey kalitesi ve yüksek hassasiyet sebebiyle tercih sebebi olmaktadır. İşlenmesi, imalatı zor olan parça üretiminde genelde bu yöntem tercih edilir. “(Shell Investment Casting)” ve “(Investment Flask Mould Casting)” yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Kabuk hassas döküm tekniğın gerçekleştirilirken model ağacının etrafında bir seramik kabul oluşturulur. Ön kaplama işlemine yapılır. Dereceli hassas döküm yönteminde ise kalıp, içi boş silindir şeklinde derece içerisinde oluşturulmaktadır. Ön kaplama işlemine tabi tutulmamaktadır. Bu yöntem daha çok uzay, havacılık, savunma sanayisi ve kuyumculukta kullanılmaktadır. Birçok üstün özelliği olduğu için tercih edilmektedir.

Hassas döküm yönteminin üstün özellikler (Güler K. , 2012).

1. Vakum altında dökülmesi gereken metal ve alaşımları için uygundur.
2. 25 kilograma kadar döküm yapılabilir.
3. Kalıp tek parça olduğu için parça üzerinde bölüm düzlemi izi kalmaz.
4. Yönlenmiş katılaşma gibi metalürjik özellikleri bu yöntem ile kontrol altına alınabilir.
5. Bu yöntem tüm eritilebilen metallere uygulanabilir.
6. Yüksek boyutsal doğruluk ve düşük yüzey pürüzlülükleri sağlar.
7. Üretilmesi karmaşık ve zor olan şekilli parçaların üretimine olanak sağlar (Yaman, 2002).

2.6.1.2 Hassas dökümün tarihçesi

Hassas döküm tekniği yüzlerce yıl eskiye dayanan, metalürjik sanatlar içinde eski ve en gelişmiş tekniklerdendir. Kazı çalışmaları sonucunda ortaya çıkan kanıtlara göre, ilk hassas dökümü M.Ö. 4500' lü yıllarda Tayland yakınlarında yapıldığı ön görülmektedir. Diğer yapılan araştırmalarda ise Hindistan'ın Happan sınırlarında M.Ö 2500' lü yıllarda yapıldığı düşünülen eserlere, M.Ö 1330' lu yıllara ait Tutankhamun'un mezarına ve Mezopotamya, Maya, Aztekler ve Afrika'daki Benin medeniyetlerinde bronz, altın ve bakırdan yapılmış ince detayları olan sanat eserleri bulunmuştur (Sinan, 2010).

Hassas döküm tekniğinde söz edilen en eski yazı olduğu tahmin edilen "Schedula Diversarum", M.S 1100' lü yıllarda Theophilus Presbyter isminde bir rahip yazmıştır. Avrupa 'da Rönesans yıllarında heykeltıraş, yazar ve kuyumcu Benvenuto Cellini (1500-1571) bu metinleri kullanılarak Perse ve Medusanın Başı bronz başyapıtını üretmiştir (Karafazlıoğlu, 2016).

Hassas döküm 19. Yüzyılın başlarında modern endüstrilerde yer almıştır. Dr. Bluffs tarafından 1897 yılında dişçilikte kullanılan kronların hassas döküm tekniği ile üretilmeye başladığı tespit edilmiştir. Dr. Taggart tarafından 1907 yılında, mumları birleştirerek oluşturduğu formülde hava basıncı ile çalışan döküm makinesi icat edilmiştir ve hassas döküm tekniğine hız kazandırmıştır (Hitchiner Manufacturing Company, 2023).

İkinci dünya savaşı sırasında askeri cihaz ve ekipmanlara olan yüksek ihtiyaç sebebi ile atölyeler silah, teçhizat ve uçak parçası gibi taleplere yetişememeye başlamıştır. Bu sebeplerden ötürü ihtiyaca yönelik parçaların imal edilmesinde, nihai ürün kalitesinin yüksek olması ve istenilen alaşımlar ile üretilebilirliği görülen hassas döküm tekniği kullanılmıştır. Hassas döküm tekniği 1940' lı yıllarda tarihsel dönemecini atlatmıştır (Hitchiner Manufacturing Company, 2023).

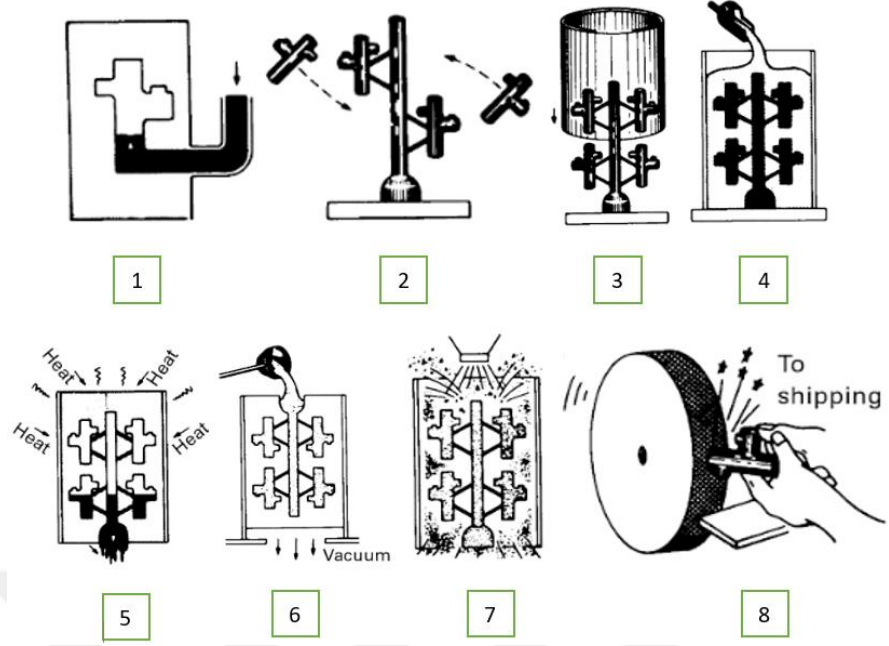
Hassas döküm yöntemi kullanımı ikinci dünya savaşı zamanından bugünü kadar birçok ticari ve farklı uygulama alanlarında kullanımı artış göstermiştir. Süs eşyaları, spor ekipmanları, tekstil makineleri, otomobiller, bindiğimiz uçaklar, ayakkabılara kadar yaşantımızın nerdeyse her alanında kullanılmaya devam etmektedir.

2.6.2 Dereceli hassas döküm

Dereceli hassas döküm tekniği, alçı kalıp malzemeleri ile etrafı kaplanan nihai ürün mum modelinin yapımından uzaklaştırılmasının beraberinde boşluğa ergitilmiş sıvı metal ile doldurulması şeklinde gerçekleştirilmektedir.

Dereceli hassas döküm yönteminde ilk olarak üç boyutlu yazıcılar ile veyahut kauçuk kalıplar yardımı ile üretilmek istenilen parça model mumu oluşturulur. Bu model mumlarına ağaç dizilimi yapılması ile vakum ve vibrasyon eşliğinde alçıyla kalıplanır. Daha sonra silindirik ve delikli fanus şeklinde kalıplar içerisine yerleştirilir. Döküm kalıpları hazırlanmış olur. Bu kalıplar fırın içerisinde alçı pişirme işlemine tabi olur. Bu esnada mum uzaklaştırılması gerçekleşir. Fırın içerisindeki kalıplar, vakum destekli döküm haznesine yerleştirilir. Kalıbın içerisindeki model mumun uzaklaştırılması ile gerçekleşen boşluğa doldurulan ergitilmiş metal doldurulur. Belli bir süre bekledikten sonra ergiyik metal donar. Ardından su havuzunda alçı uzaklaştırma işlemine geçilir. Daha detaylı modeller için basınçlı su ile alçı temizleme işlemi yapılabilir. Üretilen metal modele tesviye işlemi yapılabilir. Bu şekilde mum modelin birebiri üretilmiş olur.

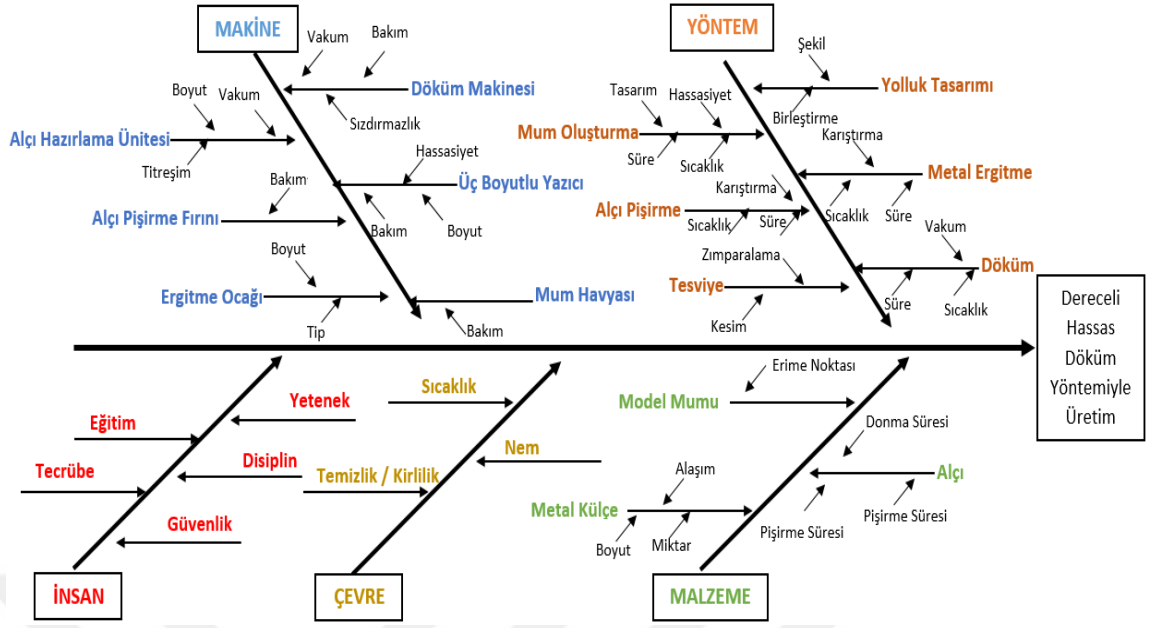
Dereceli hassas döküm tekniği ile üretim basamakları şekil 2.14' te verilmiştir.



Şekil 2. 14: Dereceli hassas döküm işlem sırası (Blach & Kohser, 2011).

1. Model kalıplarını elde etmek için bir kalıp içerisine mum veya plastik enjekte edilir.
2. Model kalıpları bir yolluk üzerine havaya yardımıyla model mumları kullanılarak dizilir.
3. Derece (fanus), ağaç salkımı üstüne konumlandırılır ve etrafı bantlanır.
4. Derece alçı ile doldurulur ve döküm kalıbı oluşturulur.
5. Döküm kalıbına fırında mum uzaklaştırma ve alçı pişirme işlemi uygulanır.
6. Döküm kalıbının içerisindeki boşluğa ergimiş metal, vakumlu ortamda doldurulur.
7. Metalin katılaştıktan sonra basınçlı su vb. işlemler ile döküm kalıpları alçıdan uzaklaştırılır.
8. Üretilen metal modele tesviye işlemi yapılır.

Şekil 2.15' te hassas döküm tekniğini etkileyen parametreler gösterilmiştir.



Şekil 2. 15: Dereceli hassas döküm tekniğinde üretimi etkileyen parametreler.

2.6.3 Model oluşturma

Dereceli hassas döküm tekniğinin birinci aşamasında kâğıt üzerinde veya bilgisayar destekli çizim programı ile istenen geometriler modellenir. Model tasarımları gerçekleştirilir ve nihai model için üretime geçilir. Günümüzde nihai model üretimi için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemler; eklemeli imalat tekniği, işleme makineleri ile model oluşturma ve el becerisiyle model oluşturma olmak üzere üç ayrılmaktadır.

Eklemeli imalat yönteminde bilgisayar destekli tasarım verileri, üç boyutlu yazıcılar ile yüksek hassasiyette imal edilebilmektedir. 3d yazıcı ile imal modellerin bazıları direkt olarak ağaç dizilimi yapılmaktadır ve döküm için uygun hale getirilmektedir. Bir diğer uygulama türünde de model yazıcıda üretildikten sonra döküm işlemi gerçekleştirilir ve metal hale getirilir. Sonrasında ise kauçuk üzerine alınarak çoğaltma işlemi gerçekleştirilir.

Kauçuk kalıplar hazırlamadan önce ana model ultrasonik banyo ile belli bir süre ve belirli kimyasallar ile temizlenmektedir. Kauçuk kalıp hazırlanması sırasında metal çerçeve içine model merkezde olacak şekilde yerleştirilir. Sonra kauçuk pres makinesi ile belirli bir basınç ve sıcaklık altında bir süre vulkanize edilir. Vulkanizasyondan sonra metal

çerçeve presten alınır ve üretilen kauçuk kalıp ikiye ayrılır ve içerisindeki metal ana model çıkarılır. Bu işlemlerden sonra içerisine mum enjekte edilmesi ile model çoğaltılabilir (Faccenda, 2003).



Şekil 2. 16: kauçuk kalıbından çıkarılan metal modeller ve mum modeller (Milli Eğitim Bakanlığı, 2006).

İşleme makineleri yardımıyla ana modelin imalatında altın, nikel ve gümüş gibi metaller ile direkt olarak metal model üretimi gerçekleştirilebilir. Bu şekilde metal model direkt olarak silikon kauçuk içerisine alınabilmektedir.

Bir diğer yöntem ise el becerileriyle ana modelin üretimi. Neşter ve eğre gibi aletler kullanılarak mum modele şekillendirmeler yapılarak modelin nihai halini alması sağlanmaktadır. Şekillendirilen model polimerik mum model, döküm yapılarak metal modele çevrilmektedir. Mum ana modelin metal ana modele çevrilmesindeki sebep bir diğer aşamada silikon kauçuk içerisine yerleştirildiğinde kalıbın oluşturulmasına imkân verebilmesidir. Bu şekilde diğer aşamada kauçuk kalıp oluşacak ve de içerisine mum enjekte edilerek ana modelin kopyaları oluşturulabilecektir.

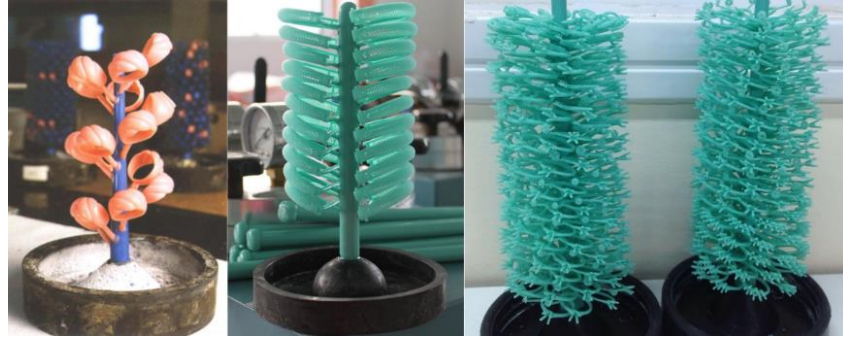
2.6.4 Model ağaç yapımı

Mum enjeksiyon makinesi kullanılarak çoğaltılan modeller, kauçuk altlık üstüne ana yolluk üzerine monte edilir. Ağaca benzer şekilde dizilir ve kalıp üretilmesi için hazır hale getirilir. Döküm esnasında yolluk ağzını oluşturan kısım kauçuk altlık olarak isimlendirilir. Yolluk, kauçuk kısık ile birleştirilen kalın kütleye denir. Ana yolluk olarak ise geçiş yolu olarak kullanılır.

Yolluk diziliminin amaçları aşağıda sıralanmıştır.

1. Modelin alçı ile kalıplanması sırasında, kauçuk altlık ile model arasında destek görevindedir.
2. Döküm sırasında sıvı metalin ilerlemesini sağlar.
3. Mumdan uzaklaştırma ve alçı pişirme sırasında model mumun çıkışında yardımcı olur.

Döküm için hazırlanan model için hazırlanacak yolluk dizimi esnasında önemli birkaç nokta vardır ve dikkat edilmelidir. Temel yolluk malzemesi, dökümü yapılmak istenen metalin cinsine, modelin tasarımına göre boyutları hazırlanmalıdır. Ana yolluk malzemesinin ergime sıcaklığı, model mum malzemesininkinden düşük olması gerekmektedir. Bu şekilde pişirme esnasında ilk olarak ana yolluk mumunun erimesi gerçekleşecektir. Bu da model mum malzeme eridiğinde kalıp içinde meydana gelecek gerilmeleri bertaraf edecektir. Ana yolluk, ara yolluk ve kauçuk alt tabanın birleştirme işleminin düzgün yapılması çok önemlidir. Kesit daralmaları olmaması gerekmektedir. İyi bir yolluk tasarımı ile model malzemenin dökümü sırasında sıvı metal rahat bir şekilde ilerleyebilmelidir. Yoğun ve sık bir dizilimden kaçınılmalı ve de oldukça benzer ebatlarda ve şekildeki parçalar ağaca dizilmelidir (Faccenda, 2003).



Şekil 2. 17: Yolluk dizilimi yapılmış model ve kauçuk altlık (Milli Eğitim Bakanlığı, 2006).

2.6.5 Modelin kalıplanması

Kauçuk altlık üzerine yolluk üzerine paslanmaz çelikten imal edilmiş silindir şeklindeki bir fanus içerisine yerleştirildikten sonra içerisine alçı ilave edilerek kalıp oluşturulabilir. Silindir şeklindeki fanusların üzerinde delik olmasının amacı vakum sırasında yardımcı olabilmektir.

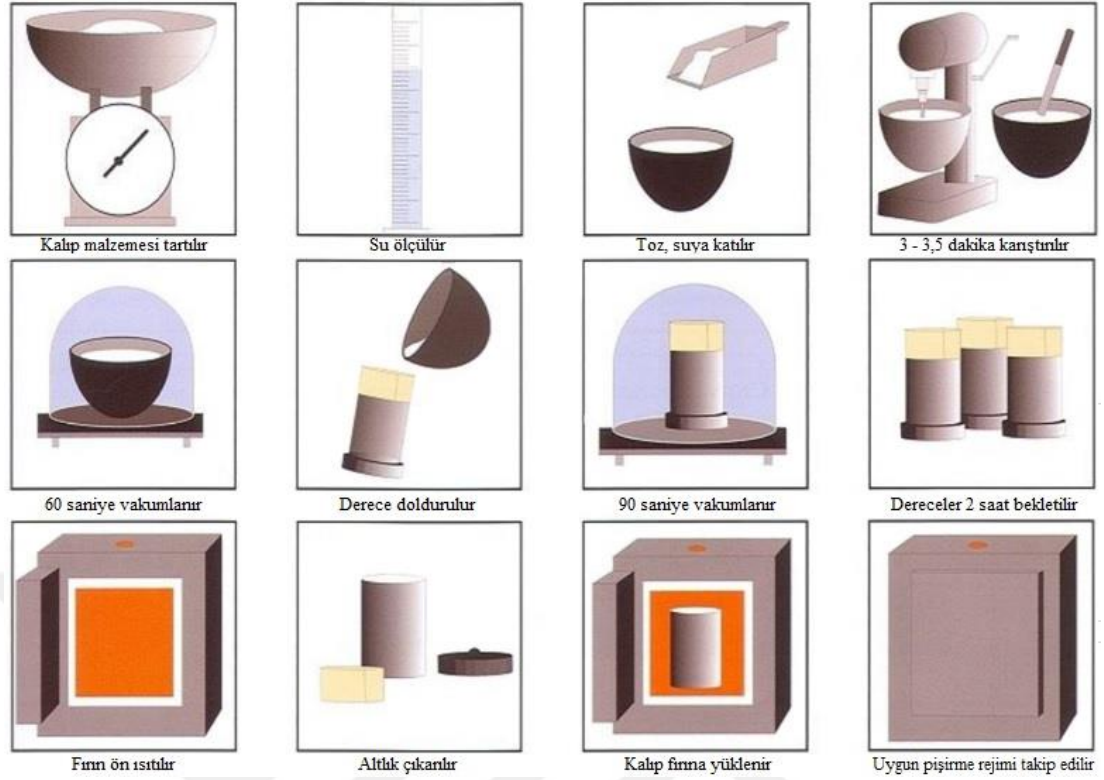


Şekil 2. 18: Etrafı bantlanmış 120mm çapında 260mm yüksekliğinde fanuslar.

Bant ile sarılmasındaki esas amaç donmamış alçının silindirik şeklindeki fanusun deliklerinden dışarı taşmasını önlemektir.

Belirli oranlarda su ve alçı bir süre karıştırılarak aynı zamanda da vibrasyona maruz bırakılarak döküm kalıbı oluşturulur. Elde edilen karışım fanusların içerisine dökülür. Sonrasında içerisi alçı ile dolu olan fanuslar donması için bir süre beklenir. Vibrasyon yapılmasının asıl amacı karışımın içinde kalabilecek havanın dışarı atılmasıdır. Alçı donduktan sonra altındaki kauçuk çıkarılır, bantların bir bıçak yardımı ile fanustan kesilerek ayrılır ve elde ettiğimiz alçı kalıp fırın içerisine yerleştirilir (Çukur, 2009).

Dereceli hassas döküm aşamaları aşağıda şekil 2.19' da gösterilmiştir.



Şekil 2. 19: Dereceli hassas döküm aşamaları (Güler K. , 2012).

2.6.6 Mum giderme ve pişirme

Mum giderme, yolluk mumlarından uzaklaştırmak ve onun yerine döküm de ergimiş metal doldurulacak olan boşluk için fırın içerisinde bir süre belirli sıcaklıklarda yapılan işleme denir.

Alçı pişirme olarak yapılan işlem de yolluk ve model mumları uzaklaştırıldıktan (külleştikten) sonra döküm kalıbını döküme uygun bir hale getirilmesi için mum giderme işleminin ardından yapılmaktadır. Önceden programlanmış bir fırın içerisinde belirli bir süre ve sıcaklıkta gerçekleşir.

Tek bir fırın içerisinde mum giderme ve alçı pişirme işlemi yapılabilir. Mum giderme ve alçı pişirme işlemi süresi döküm kalıbının karakteristiğini belirler. Bu pişirme işlemi alçı mumun büzülme ve genleşme karakteristiğine bakılarak yapılmalıdır.

Pişirme programlaması genel olarak ilk kademedeki yavaş bir şekilde 250°C sıcaklığa çıkartılır. Bu sıcaklıkta 2-3 saat kadar bekletilir. Bekleme esnasında alçı içerisindeki su ve alçının kristal suyu uzaklaştırılır. Model mumu erir ve hacimde artışlar gerçekleşebilir. Sebebi ise α -kristobalit - β -kristobalit dönüşümleri gerçekleşmesidir. Sonra fırın bir saat

içerisinde 450 °C'ye çıkarılır. Bu derecede yine iki saat civarında bekletilir. Sonrasında yine bir saatte kuvars dönüşümlerinin gerçekleşebileceği 600 °C civarlarına çıkartılır ve yaklaşık iki saat bekletilir. Kalıbın tamamında sıcaklığın dengelenmesi çok önem teşkil etmektedir bu sebeple belirlenen süre kadar bekletilmelidir. Alçının ısı iletimi düşük olmasından dolayı bu süreç çok faydalı olacaktır. Daha sonra fırın 750 °C Sıcaklığa çıkartılır ve takriben üç saat bekletilir. Bu şekilde alçı pişmiş olur. Devamında ise dökümü yapılması istenen parçanın alaşımına uygun sıcaklığa getirilerek en az iki saat bekletilir. Döküm kalıbının her yerindeki sıcaklığın homojen olması sağlamış olur (Güler K. , 2012).

2.6.7 Ergitme ve döküm

Üç farklı yöntem ile dereceli hassas döküm gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki indüksiyon ile ergitmedir. Diğer üfleç ile ergitme ve son olarak elektrik rezistanslı ergitme yöntemidir. En eski yöntemlerden olan üfleç ile ergitme yöntemidir. Propan ve doğalgaz kullanılan bu teknikte alev ile metal alaşımı ergitilmektedir. Elektrik rezistans ile ergitme (Şekil 2.20) yönteminde, rezistanslı kapalı bir hazneye ergitilecek metal ile dolu pota yerleştirilir ve sıcaklığın istenilen seviyeye çıkartılıp bir süre beklenir.

En modern yöntem indüksiyonlu ergitme olarak bilinir. Bu yöntemde ergitme sırasında manyetik alanın oluşur ve metal karıştırılır. Bu şekilde kimyasal ve ısı homojenizasyon gerçekleşir (Güler K. , 2012).

Bu yöntemler uygulanarak gerçekleştirilen ergitme sürecinin sonlarına mum giderme ve alçı pişirme işlemi biter. Bir maşa yardımı ile fırından (Şekil 2.21) alınan sıcak kalıplar döküm haznesine yerleştirilir.

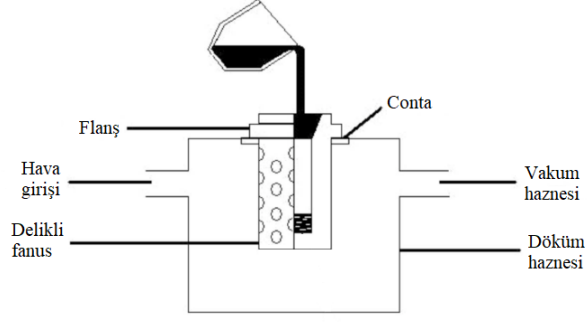


Şekil 2. 20: Vakumlu döküm haznesi.

Ergitme işlemi uygulanmış sıvı metal, ocaktan maşa ile alınır ve ana yolluk girişinden döküm gerçekleştirilir. Belirli bir süre bekletilir, kalıbın soğuması sağlanır aynı zamanda içerisindeki metalde soğur ve donar.



Şekil 2. 21: Alçı pişirme fırını.



Şekil 2. 22: Döküm işleminin şematik gösterimi (Güler K. A., 2016).

Döküm haznesine ergitilmiş metalin doldurulması işleminin şematik olarak gösterimi şekil 2.22’ de gösterilmiştir.

2.6.8 Kalıbın temizlenmesi

Döküm gerçekleştikten sonra bir süre oda sıcaklığında bekletilen döküm kalıpları, alçıdan uzaklaştırmak için banyoya götürülür. Birçok kez su banyosuna daldırılıp çıkarılır. Bu işlem büyük oranda alçıdan uzaklaştırma konusunda başarılı olmaktadır. Kalan alçılar ve iç yüzeylerde sıkışmış olan alçılar için basınçlı su cihazı kullanılır ve tam anlamıyla alçıdan uzaklaştırma sağlanmış olur. İşlemin gerçekleştiği su banyosu şekil 2.23’ te verilmiştir.



Şekil 2. 23: Su banyosu.

Alçıdan uzaklaştırılmış tüm yolluklar kesilir. Modelin tasarlanan ölçülere indirilmesi için gerekli takım ve aletler ile işlemler gerçekleştirilir. Zımparalama, ayırma ve kesme gibi birkaç farklı aşama olabilir. Bu işlemlerden sonra model nihai şekline kavuşmaktadır. Hassas döküm tekniği ile imal edilen ve temizlenip nihai haline getirilmiş model aşağıdaki şekil 2.24' te verilmiştir.



Şekil 2.24: Nihai hale getirilmiş metal model

BÖLÜM 3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Eklemeli imalat tekniği kullanılarak hassas döküm ile üretilen kama şeklindeki modellerin üretiminde yapılan çalışmalar yazılı ve görsel olarak burada açıklanacaktır.

3.1 Deneilerin Yapılışı

Yapılacak deneyler için ilk adım olarak Solidworks programı ile kama şeklinde bir geometri çiziminin bilgisayar destekli tasarım (CAD) yapılmıştır. Programda yapılan tasarım verileri, reçine esaslı Anycubic Photon M3 marka üç boyutlu yazıcıda işlenerek kama şeklindeki numuneler elde edilmiştir. Kama şeklindeki modeller mum ile yolluk dizimi yapıldıktan sonra silindirik dereceler (fanus) içerisine konularak vibrasyon ortamında alçı ile doldurulur. Hazırlanan bu alçı dolu fanuslar, elektrik rezistansı ile ısıtılan fırın içerisine atmosfer basıncında alçı pişirme ve mum giderme işlemleri gerçekleştirilir. Fırından içerisinden çıkarılan fanuslar vakumlu veya vakumsuz olarak kullanılabilen döküm haznesine yerleştirilir. Mumun külleşmesi ile alçının içinde oluşan kama şeklindeki boşluğa, daha önceden ergitme ocağından ergitilmiş metal yolluk ağzından içeriye doldurulur. Döküm işlemi her bir fanus için bu şekilde yapılmıştır. Yaklaşık 20 dakika bekledikten sonra metal donmuş ve sıcaklığı belirli seviyelere inmiştir. Sonrasında su havuzunda alçı kabaca uzaklaştırılır ve basınçlı su ile detaylara kadar temizlik sağlanmıştır. Elde edilmiş kama şeklindeki metal yapıdan yollukları kesilmiştir. Bu şekilde dereceli hassas döküm tekniği ile kama şeklindeki modeller üretilmiştir.

Bu çalışmada döküm malzemesi Alüminyum 6101 alaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan üç boyutlu yazıcı fotopolimer reçine ile model üretimi gerçekleştirilmektedir.

3.1.1 Denemelerde kullanılan teçhizatlar ve malzeme

Bu çalışmada üç boyutlu yazıcı, döküm alçısı, yolluk mumu ve 6101 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

3.1.1.1 Alüminyum alaşımı

Fanus kullanarak yaptığımız dereceli hassas döküm tekniğinde 6101 (Al, Si ve Mg) alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Kimyasal bileşimi Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3. 1: Al 6101 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağı.).

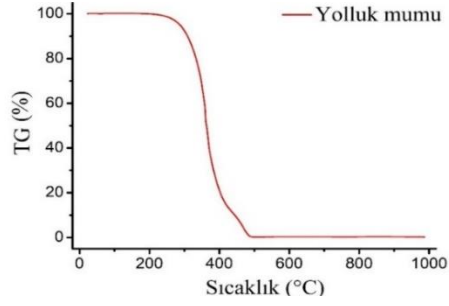
Si	Mg	Fe	Cr	Zn	Mn	Cu
0.5	0.8	0.5	0,03	0,10	0,03	0,10

3.1.1.2 Üç boyutlu yazıcı

Modelimizi üretmek için kullandığımız Anycubic Photon M3 üç boyutlu yazıcı. Tekno fotopolimerizasyonu (Vat photopolimerisation) yöntemi, oda sıcaklığında sıvı halde olan fotopolimer reçine tabakasının mor ötesi (ultraviyole) ışın ile belirlenen bölgelere kürleştirme uygulamasına dayanmaktadır. Her bir katman oluşturulması ile parça katmanı kalınlığı aşağı indirilerek işlem devam etmektedir. Katmanlar oluşturulduktan daha sonra model sıvı reçine havuzu içerisinden alınmaktadır. Bu yöntem kullanılması ile oldukça hassas şekillerde düzgün modeller oluşturulabilir. Kullandığımız reçinenin bize verilen bilgileri doğrultusunda öğrendiğimiz yanma (burn-out) noktası 600-700 °C sıcaklık aralığındadır. Kül kalıcılığı %0.01 seviyelerindedir.

3.1.1.3 Mum yolluk

Yolluk mumunun düşük ergime sıcaklığına sahip olması gerekmektedir. Modelimizin yolluk dizimi ve altlığı (kauçuk) sabitlenmesi için kullanılmıştır. Mum yollukların fırında pişirilme esnasındaki davranışı öğrenebilmek için TGA yapılmıştır (Güler F. , 2019).



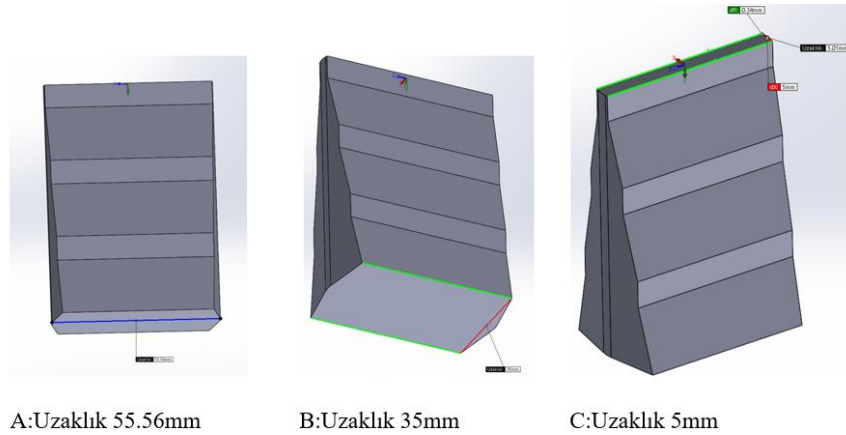
Şekil 3. 1: Mum yolluk TGA (Güler F. , 2019).

TGA (Termogravimetrik Analiz), Seiko Exstar TG/DTA 6300 ile yolluk mumu incelemesi yapılmıştır. 1000 °C sıcaklığa kadar ısıtılan ortama azot gazı verilmektedir.

İnceleme neticesinde 230°C sıcaklıkta kütle azalması başlamıştır. 492°C sıcaklıkta ise modelin tamamı yok olmuştur. Şekil 3.1’de grafiği verilmiştir (Güler F. , 2019).

3.1.2 Kama model tasarımı

Kama tasarımının üç boyutlu yazıcıda elde edilebilmesi için SolidWorks çiziminin yapılması gerekmektedir. Oluşturduğumuz bu modelin taban genişliği 35mm, üst genişliği 5mm, taban tavan mesafesi 79.86mm ve taban kısmındaki en uzak iki nokta arası 55.56mm dir. CAD modelinin farklı açıdan görünüşleri ve ölçüleri Şekil 3.2 de verilmiştir.

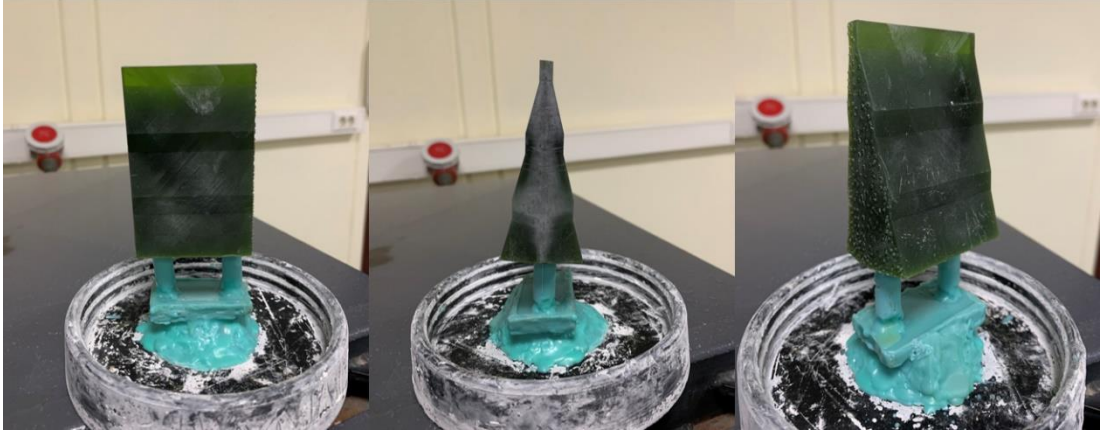


Şekil 3. 2: Kama CAD model ölçüleri.

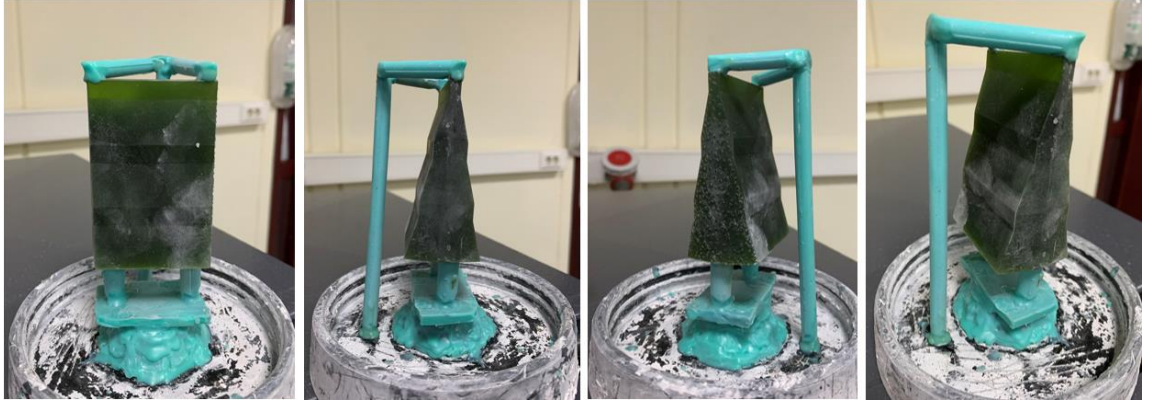
3.1.3 Model yolluk hazırlama

Uygun yolluk dizilimi, hassas döküm yöntemine göre ürettiğimiz kama şeklindeki üç boyutlu yazıcı ile üretilen modellere uygulanmıştır. Yolluk malzemesi olarak kullandığımız mumun ergime sıcaklığı 60-70°C derecedir. Bu mumu seçmemizin asıl sebebi ise ısıl genleşme katsayısının düşük olması. Bu da demek oluyor ki erime sırasında alçıyı çatlatma olasılığı çok düşüktür.

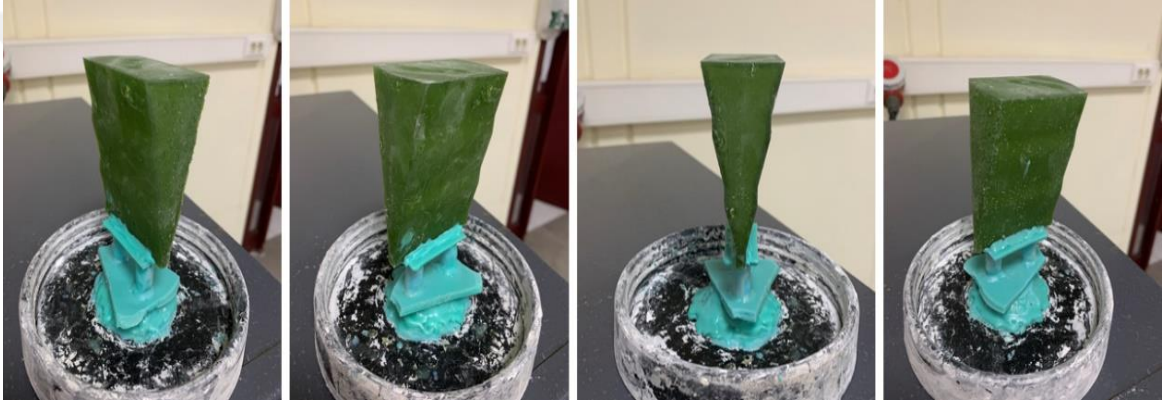
Yaptığımız mum yolluklar, vakumlu ve vakumsuz döküm için farklılık göstermektedir. Model'in türbülanslı dolunda ve vakum altında dolumu arasındaki farkı gözlemleyebilmek adına farklı yolluk dizimleri yapılmıştır. Aşağıda 5 farklı döküm için kullanılan yolluk tasarımları görsellerde verilmiştir.



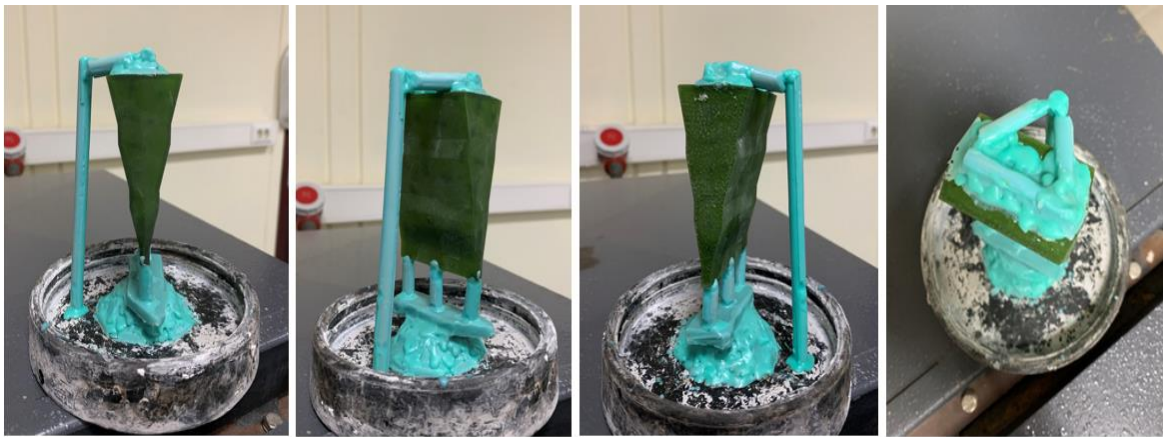
Şekil 3. 3:Vakumlu döküm (No.1) yolluk dizilimi.



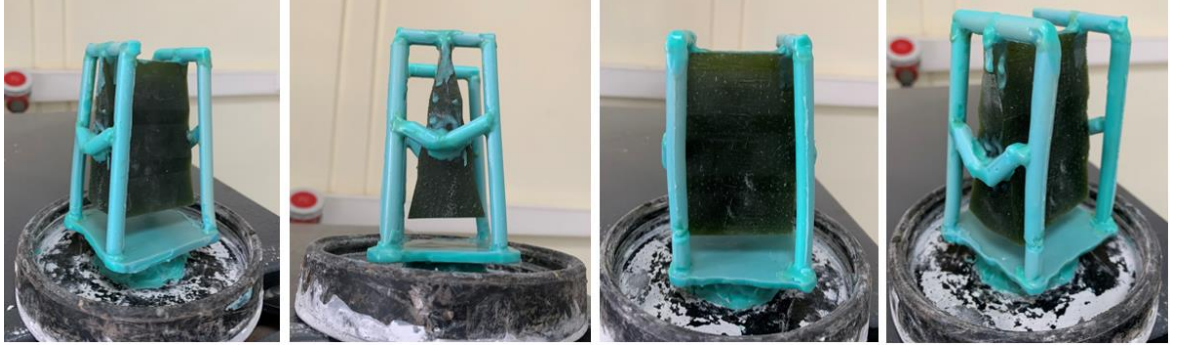
Şekil 3. 4: Vakumsuz döküm (No.2) yolluk dizilimi.



Şekil 3. 5: Vakumlu döküm ters model (No.3) yolluk dizilimi.



Şekil 3. 6: Vakumsuz döküm ters model (No.4) yolluk dizilimi

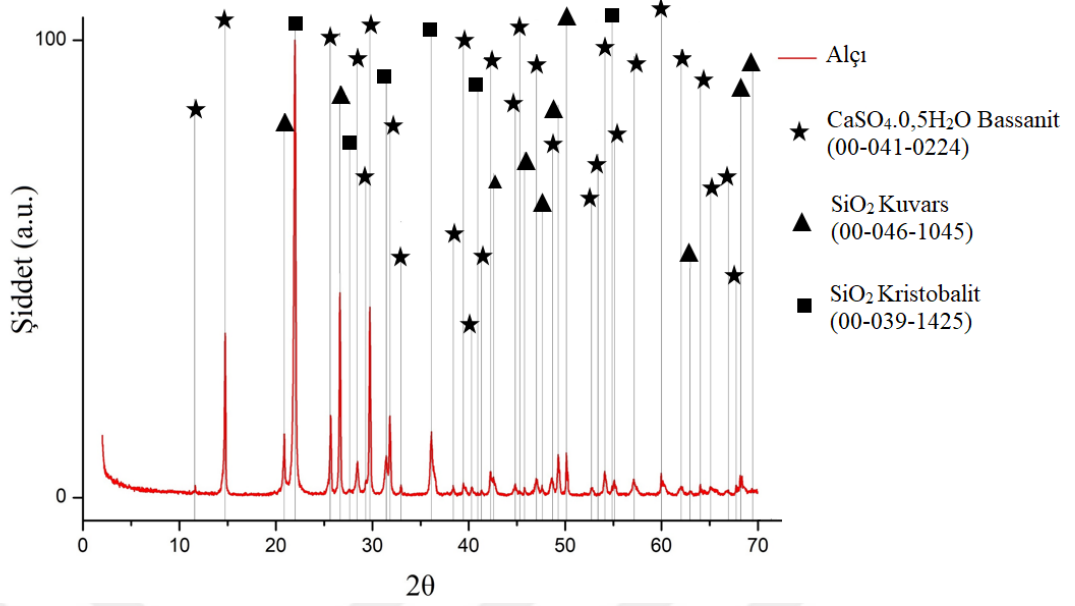


Şekil 3. 7: Vakumsuz döküm alttan dolum (No.5).

3.1.4 Alçı

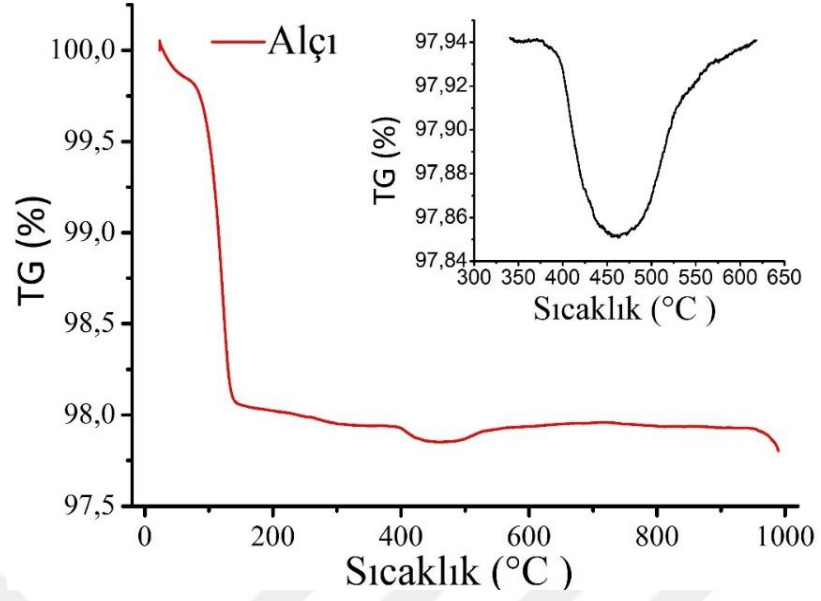
Yaptığımız deneylerde hassas döküm alçısını döküm kalıp malzemesi olarak kullandık. Kullandığımız bu alçıya yapılmış olan XRD analizleri, Shimadzu XRD-6000 marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. $\text{CuK}\alpha$ radyasyonunda 40 kV ve 40mA' da 2-70° aralığında, dakikada 2° hızla XRD analizi yapılmıştır. XRD analizinin sonuçlarına göre içerisinde $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ Bassanit, SiO_2 Kuvars ve SiO_2 Kristobalit fazları tespit edilmiştir. Grafik Şekil 3.9' da verilmiştir.

Kalsiyum sülfat yarı hidratı ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) bağlayıcı amaçlı kullanılmış ve kuvars olarak agrega kullanılmıştır. İçerisinde kristobalit gözlemlenmiştir. 1200°C den sonra parçalanıyor olmasından ötürü yüksek sıcaklık döküm uygulamaları için uygun değildir. Ancak alüminyum gibi ergime derecesi düşük (<1200°C) olan metaller için deneysel çalışmalarda kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir (Güler K. , 2012).



Şekil 3. 8: XRD analizi (alçı).

Kama modelinin üretimi için hazırlayacağımız döküm kalıplarında alçının sergiyeceği termal davranışlar ve pişirme sıcaklıkları için TGA(Termogravimetrik analiz) yapılmıştır. Analiz için Seiko Exstar TG/DTA 6300 TGA cihazı kullanılmıştır. 1000°C sıcaklığı kadar ısıtılan ortama azot gazı verilmiştir. Sonuç olarak alçı, 88°C den sonra içerdiği suyu kaybetmektedir. 144°C ye ulaştığında alçı kristal suyundan tamamen arınmaktadır. 250°C sıcaklığa geldiğinde ise α -kristobalit - β -kristobalit dönüşümü gerçekleşmektedir ve de kütle kaybı yaşanmaktadır. α - β kristal dönüşümü gerçekleşen kuvarsın sıcaklığı 500°C'dir. Bu esnada hacim olarak büyüme gerçekleşmez. 1000°C sıcaklıkta yaklaşık olarak %2 alçı kütlesi azalmıştır. Şekil 3.9'da grafik verilmiştir (Güler F. , 2019).



Şekil 3. 9: TGA Alçı.

3.1.5 Modelin alçı içerisine alınması

Kama şeklindeki üretimini yaptığımız mum modellerimizi kauçuk altlık üzerine yerleştirdikten sonra çelik fanus (silindirik derece) içerisine yerleştirdik. Sıvı alçının doldurulma esnasında dışarı taşmaması için fanusun etrafını bant ile sıkıca sarma işlemi uyguladık. Şekil 3.10’ da görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3. 10: Bant ile sarılmış fanuslar.

Belirli bir su ve alçı oranı ile belirli bir süre matkap yardımı ile karıştırdıktan sonra döküm kalıbının oluşturmak amacı ile elde ettiğimiz karışımı fanus içine doldurulmuştur. İçerisinde hava kabarcığı kalmaması amacı ile bir süre vibrasyon yapılmıştır. Sonrasında alçının sertleşmesi için bir süre bekletilmiştir.

Alçının sertleşme işleminden sonra fanus bantlardan ve kauçuk altlıktan ayrılmıştır. Ardından içerisi donmuş alçı ve mum model olan fanuslar pişirilmek ve mum giderme işleminin gerçekleşmesi için fırına yerleştirilmiştir. Deneylerimizde su-alçı oranı, karıştırma ve sertleşme süresi değerleri aşağıda (Tablo 3.2) yaklaşık olarak verilmiştir.

Tablo 3. 2: Alçı-su oranı, karıştırma ve sertleşme süresi.

Su-alçı oranı	Karıştırma süresi	Alçı sertleşme süresi
40/100	3-5 dakika	4-4,5 saat

3.1.6 Alçı pişirme ve mum uzaklaştırma

Tüm çalışmalarımızda, alçı ile doldurulmuş fanuslar, fırın içerisine yerleştirilirken çıkarttığımız kauçuk altlık tarafı aşağıya gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde döküm ağzı alta gelmiş olacak. Döküm ağzı kısmının altta kalmasındaki amaç, mum uzaklaştırma sürecinde model mumunun yer çekimi ile dışarı çıkabilmesidir. Fırının pişirme programlaması ilk etapta 20 dakikada 80°C sıcaklığa çıkartıp bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. Buradaki amaç alçının yavaşça ısıtılması ve model mumu uzaklaştırma işleminin yavaşça gerçekleşmesidir. Fırının diğer kademesinde 1 saat içerisinde 250°C'ye çıkarılmıştır. Yine iki saat bekletilmiştir. Buradaki amaç alçı içerisindeki kristal sudan kurtulmaktır ve α -kristobalit - β -kristobalit dönüşümleri meydana gelmiştir. Sonrasında 1 saat içerisinde 400°C'ye çıkartılmış ve yine 2 saat bekletilmiştir. Kuvars dönüşümlerinin gerçekleştiği bilinen 600°C sıcaklığa fırın geldiğinde 2 saat daha bekletilmiş ve ardından 750°C sıcaklığa çıkartılmıştır. Bu sıcaklıkta 4 saat bekletilmesinin ardından alçı pişirme işlemi gerçekleşmiştir. Son kademedede fırın 500°C'ye 4-5 saat içerisinde indirip alüminyum için uygun döküm sıcaklığına getirilmiştir.

Alüminyum 6101 alaşımı ile kama şeklindeki modelimizin dökümünde fanus sıcaklığı yaklaşık 500°C’ dir. Tüm deneylerimizde şartları aynı tutmak adına aynı derecelerde dökümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11’de fırının sıcaklık takibi için bilgi ekranı verilmiştir.



Şekil 3. 11: Pişirme fırını bilgi ekranı.

3.1.7 Döküm ve ergitme

Yaptığımız döküm çalışmalarında, alüminyum 6101 alaşımını grafit potaya sığması için önceden kestirilip külçe haline getirilmiştir. (Şekil 3.12)



Şekil 3. 12: Kesilmiş Alüminyum 6101 parçaları.

Elektrikli rezistans kullanan yerli malı ergitme ocağında ergitilmiştir. (Şekil 3.13) Alüminyum 6101 alaşımı için dökümde getirmemiz sıcaklık 700-715°C dir.



Şekil 3. 13: Elektrik rezistanslı ergitme ocağı.

Bu sıcaklığa ergitme ocağımız yaklaşık olarak 40-50 dakikada gelebilmektedir. Pota içerisindeki ergimiş metalin sıcaklığını termokupl ile sürekli ölçülmüştür. Model mumun erimesi sayesinde oluşan boşluğa, ergittiğimiz sıvı metali maşa kullanarak yolluk ağzından doldurularak döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Vakumlu ve vakumsuz olarak bu döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Vakum motorumuzun gücü yaklaşık olarak 63 m³/saat' tir. Vakum işlemi -1bar da yaklaşık 10 dakika uygulanmıştır. Çalışma koşullarını aşağıdaki tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3. 3: Döküm çalışma koşulları.

Numune No	Dolum Tekniği	Kalıp sıcaklığı (°C)	Döküm sıcaklığı (°C)	Döküm atmosferi
1	Üstten Dolum	500	710	Vakumlu -1 bar
2	Üstten Dolum	495	715	Yer Çekimi
3	Ters Model Üstten Dolum	495	710	Vakumlu -1 bar
4	Ters Model Üstten Dolum	495	710	Yer Çekimi
5	Alttan Dolum	500	715	Yer Çekimi

3.1.8 Alçı uzaklaştırma ve yolluk kesimleri

Döküm ve katılaşma işlemi bittikten sonra yaklaşık 20-25 dakika soğutulan kalıplar su banyosuna alçıdan uzaklaştırılmak amacıyla götürülmüştür. Bir maşa ile tutulan kalıp soğuk su banyosuna daldırılıp alçıların kabaca uzaklaştırılması sağlanmıştır. (Şekil 3.14)



Şekil 3. 14: Basınçlı su ile temizleme haznesi.

Ardından basınçlı su yardımı ile su banyosunda uzaklaştırılamayan alçılar da uzaklaştırılmıştır. Ardından alüminyum 6101 alaşımındaki yolluklar ATA BRİLLANT 265 markalı kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir. (Şekil 3.15)



Şekil 3. 15: ATA Brillant 265 kesme cihazı.

3.2 Kama Modellerin Karakterizasyonu

Fanus kullanarak yapılan hassas döküm tekniği ile üretimi yapılan kama modellerin mikro yapı incelemeleri ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır.

3.2.1 Mikro yapı incelemeleri

Dökümleri yapılan alüminyum 6101 alaşımli kama modellerin mikro yapı incelemeleri optik mikroskop NIKON Eclipse L150 kullanılarak yapılmıştır. İncelemeler yapılmadan önce bakalite almak amacıyla yine ATA Brillant 265 kesme cihazı kullanılarak kesme işlemi uygulanmıştır. Bakalite alınırken STRUERS ProntoPress-10 markalı cihaz kullanılmıştır. (Şekil 3.16)



Şekil 3. 16: STRUERS bakalite alma cihazı

Sonrasında sıra ile 200-400-800-1200 ve 2500 gritlik zımpara ile su altında zımpara yapılmıştır. Zımparalama işlemi bittikten sonra elmas sıvı ve yağlayıcı ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.17) Ardından numuneler deterjan ve sabun ile temizlenip sıcak hava ile kurutulmuştur.



Şekil 3. 17: 800 gritlik zımpara ile zımparalama işlemi.

3.2.2. Yoğunluk Ölçümü

Arşimet yöntemi, metal parçalardaki gözeneklilik oranını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir ve sonuçlar sıvının sıcaklığına, numune hacmine ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Yoğunluk ölçümü için numunenin havadaki (m_{hava}) ve sıvı ($m_{sıvı}$) ortamdaki kütesinin bilinmesi gerekmektedir. Bununla birlikte ölçüm yapılan sıvının yoğunluğu ($\rho_{sıvı}$) da bilindiğinde numunelerin yoğunluğu ve gözenek oranı Denklem 3.1. ve Denklem 3.2.ye göre ölçülebilir hale gelecektir (Terris, 2019).

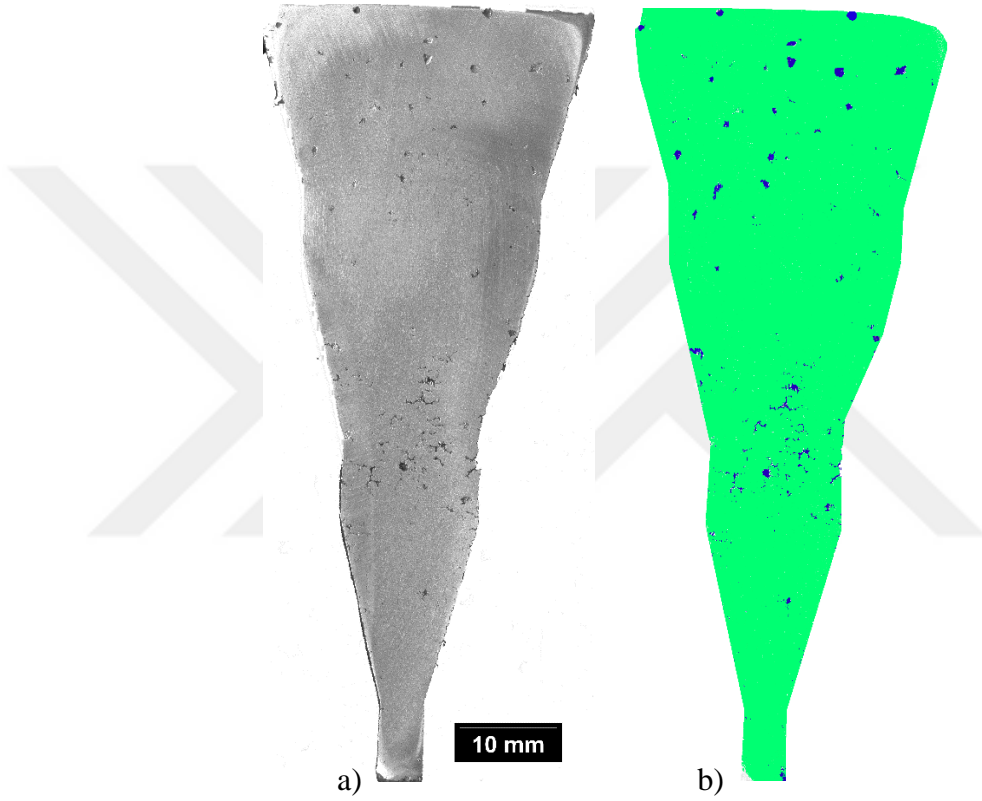
$$\rho_{numune} = \frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{sıvı}} * \rho_{sıvı} \quad (3.1)$$

$$\%Porozite = 100 - \left(\frac{\rho_{numune} * 100}{\rho_{teorik}} \right) \quad (3.2)$$

- Yoğunluk ölçümleri 1,5 kg ağırlık tartım kapasiteli 0,02 gr. hassasiyete sahip Dikomsan marka HT-SH1500 model Arşimet düzeneğinde yapılmıştır. Ölçümler 15°C sıcaklıkta, 0,99925g/cm³ yoğunluğundaki suda yapılmıştır.

3.2.3. İmaj Analiz Tekniğiyle Porozite Ölçümü

İmaj analiz tekniğinde, ortadan kesilen numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra tam boydan porozite incelemesi yapılmıştır. Bunun için ilk etapta parlatılan yüzeyleri taranan parçalar (Şekil 3.18a), Photoshop programına aktarılmış ve threshold menüsünden eşik ayarı yapılarak gözenekli bölgeler ile sağlam bölgeler farklı tonlarda renklendirilmiştir (Şekil 3.18b).



Şekil 3. 18: Metalografik olarak hazırlanan numunelerin, a) taranmış, b) eşik ayarı yapılmış görselleri

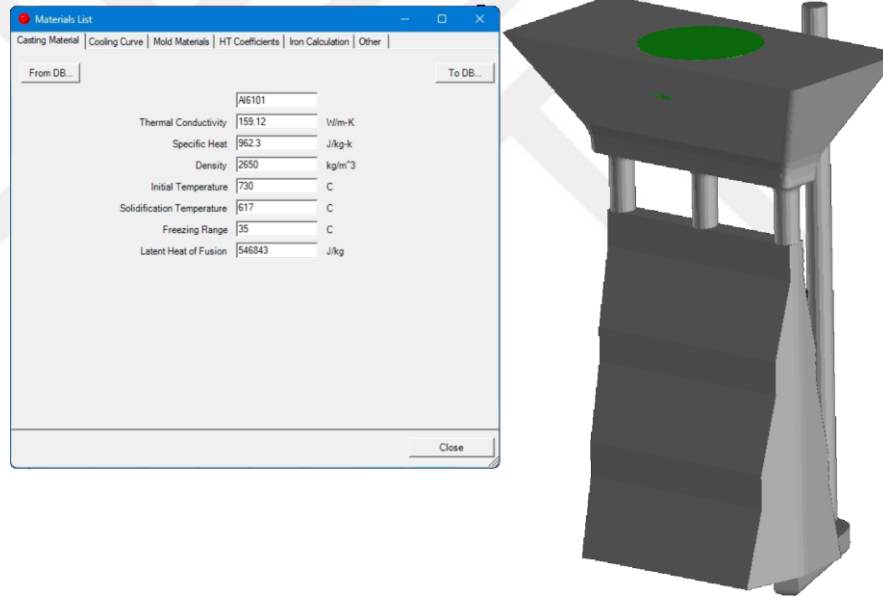
-

Eşik ayarı yapılan görseller ImageJ yazılımına aktarılarak analize hazır hale getirilmiştir. İlk etapta alan ölçümlerinin doğru yapılabilmesi amacıyla *Analyze* → *Set Scale* menüsünde ölçü kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra olarak yeşil ve lacivert bölgelere ayrılan görüntü üzerinde alan hesabı yapmak için *Analyze* → *Analyze Particles* menüsüne girilmiş

ve lacivert bölgelerin yeşil bölgelere, dolayısıyla gözenekli bölgelerin dolu bölgelere oranı hesaplanmıştır.

3.2.4. Modelleme Çalışmaları

Dökümü gerçekleştirilen numunelerde oluşabilecek hataların nedenini tespit edebilmek için simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Katı modeli oluşturulan parçalar simülasyon programına aktarıldıktan sonra parçanın ve kalıbın termofiziksel özellikleri tanımlanarak (Şekil 3.19) üstten dolum, üstten dolum ters model ve alttan dolum olacak şekilde 3 farklı geometrinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Katılma koşulları yer çekimi etkisiyle gerçekleştirilmiş ve döküm parametreleri Tablo 3.3'e göre düzenlenmiştir.



Şekil 3. 19: Simülasyon programına aktarılan katı model ve termo-fiziksel parametreler

Daha sonra simülasyon çalışmasından elde edilen dolum ve katılma verileri gerçek döküm sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde 6101 alüminyum alaşımının kama şeklinde tasarlanan modellerin hassas döküm tekniği ile üretimi ve gözenek oluşumuna yönelik elde edilen sonuçlar bulunmaktadır. Sonuçlar üç başlık altında toplanmaktadır. Bunlar;

- Yoğunluk Ölçüm metoduna göre gözeneklilik sonuçları
- Mikroyapı görüntüleri
- İmaj analizi tekniğine göre gözeneklilik sonuçları
- Simülasyon sonuçları

olacak şekilde aşağıda aktarılmıştır.

4.1. Yoğunluk Ölçüm Metoduna Göre Gözeneklilik Sonuçları

Deneysel çalışmalar sonucu Arşimed prensibine göre hesaplanan yoğunluk ölçümleri ve gözenek oranı Tablo 4.1.de verilmiştir. Yoğunluk ve gözenek oranları da Denklem 3.1. ve 3.2.ye göre hesaplanmış ve teorik yoğunluk 2.68 g/cm^3 alınmıştır.

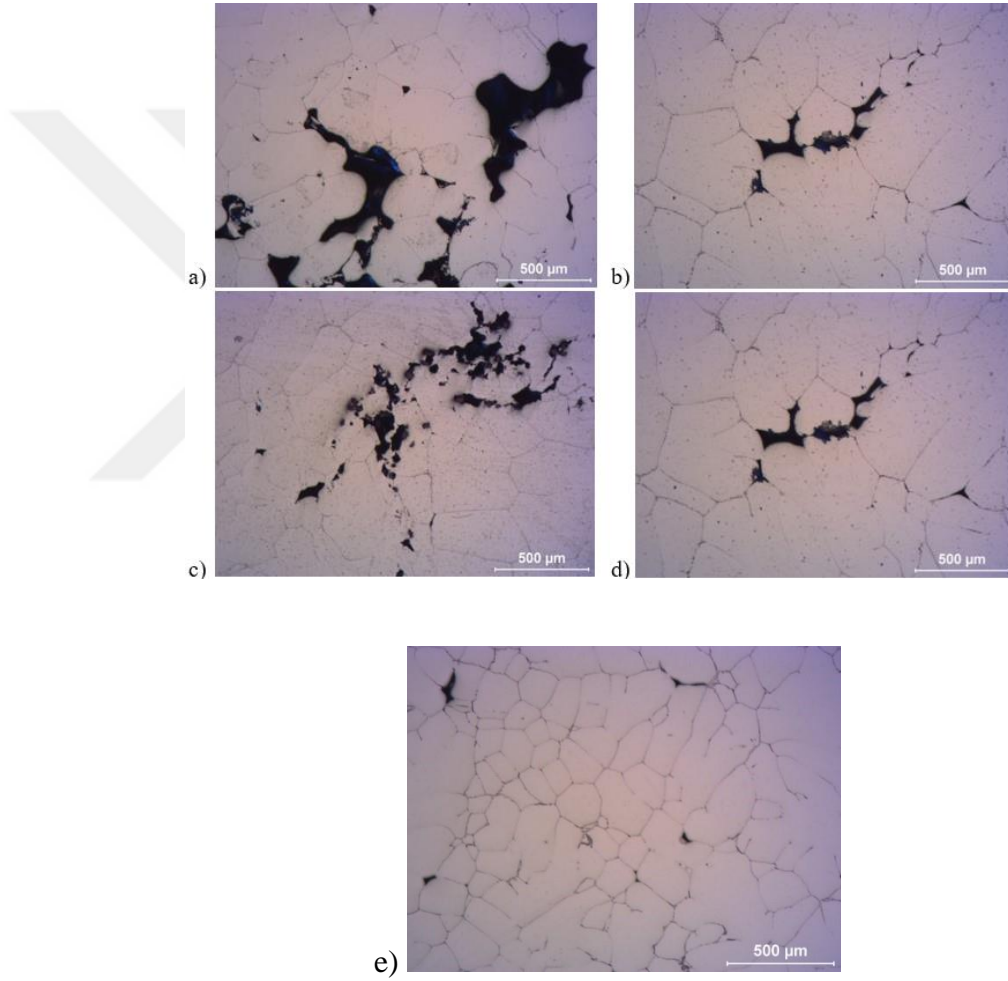
Tablo 4.1. Arşimed prensibine göre hesaplanan gözeneklilik sonuçları.

Numune No	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Deneysel yoğunluk (g/cm^3)	% Porozite
1	82.14	50.18	2.568	4.35
2	95.34	58.62	2.593	3.37
3	95.82	58.04	2.534	5.61
4	93.42	57.32	2.586	3.69
5	101.60	62.76	2.613	2.65

Bu sonuçlara göre gözenek oranı en yüksek olan numuneler, vakum altında katılaştırılan 1 ve 3 numaralı numuneler olurken gözenekliliği en düşük olan numune, 5 numaralı alttan dolmuş numune olmuştur.

4.2. Mikroyapı Görüntüleri

Metalografik olarak hazırlanan numuneler mikroskop altında incelenmiş ve hata tiplerinin çekinti ya da gaz kaynaklı olup olmadığı irdelenmiştir. Mikroskop altında yapılan incelemelerde belli bir bölge büyütüldüğü için gözenek sonuçları için sağlıklı bir şekilde yorum yapmak mümkün olmayacaktır. Bu yüzden gözeneklilik için arşimed prensibine göre yoğunluk ölçümü ve numunenin tüm boyunun tarandığı imaj analiz sonuçları incelenecektir.

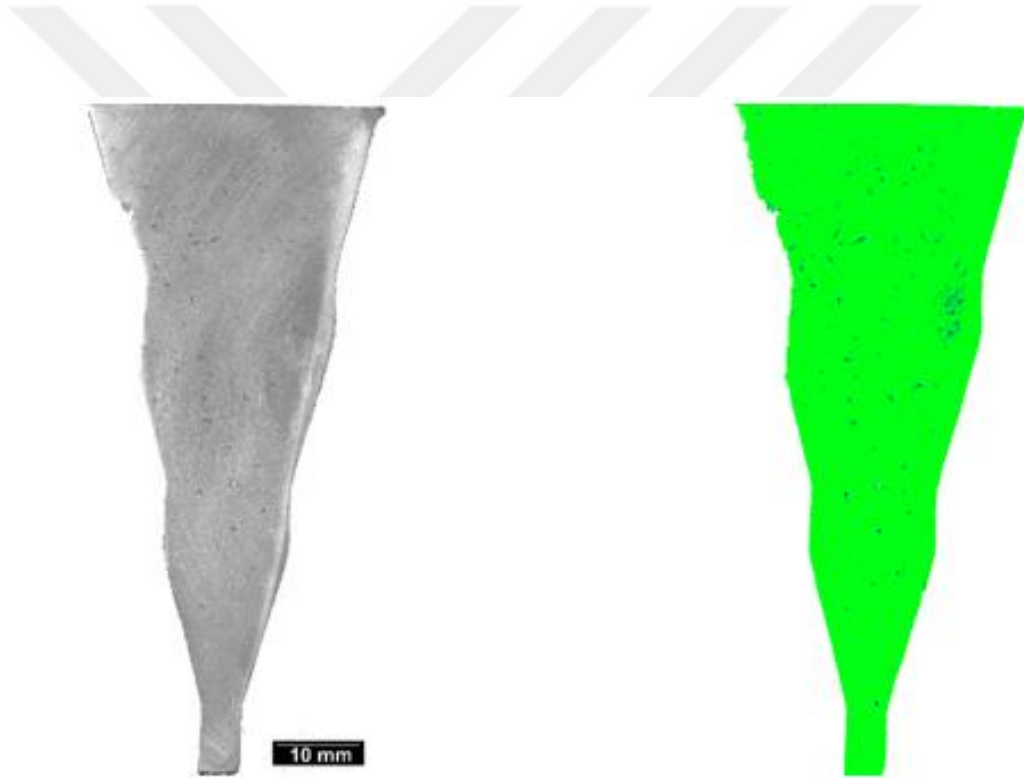


Şekil 4. 1: a) 1 numaralı, b) 2 numaralı, c) 3 numaralı, d) 4 numaralı, e) 5 numaralı numunenin mikro yapı görüntüleri.

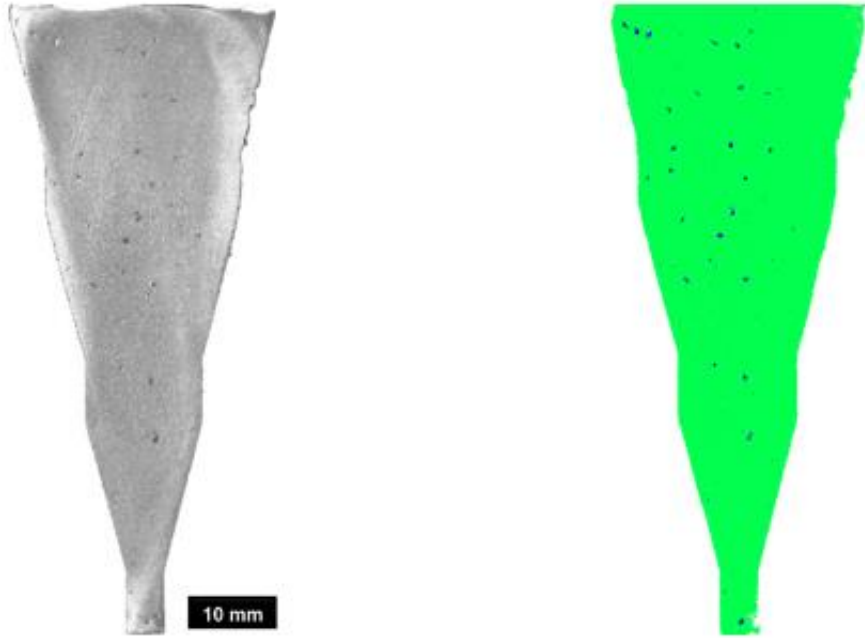
Bu görsellere tüm hataların tane sınırlarında oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte hata tipleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde gözeneklerin düzensiz bir şekilde olduğu tespit edilmiştir. Literatüre göre düzensiz şekilli gözeneklerin çekinti kaynaklı, küresel ya da küresele yakın şekildeki gözeneklerin ise gaz kaynaklı olduğu bilinmektedir. Buna göre özellikle 3 numaralı vakum altında katılaştırılan ters modelde çekinti tipi hataların daha yaygın olduğu tespit edilmiştir.

4.3. İmaj Analiz Tekniğine Göre Gözeneklilik Sonuçları

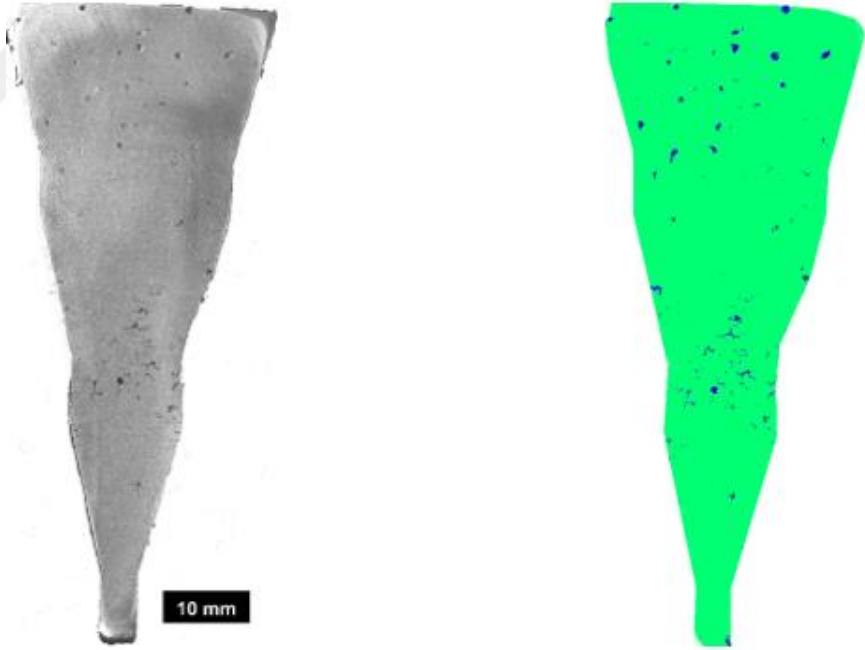
Eşik ayarı yapılarak gözenekli bölgeler ile sağlam bölgeler farklı tonlarda renklendirilen numuneler sırasıyla aşağıda paylaşılmıştır.



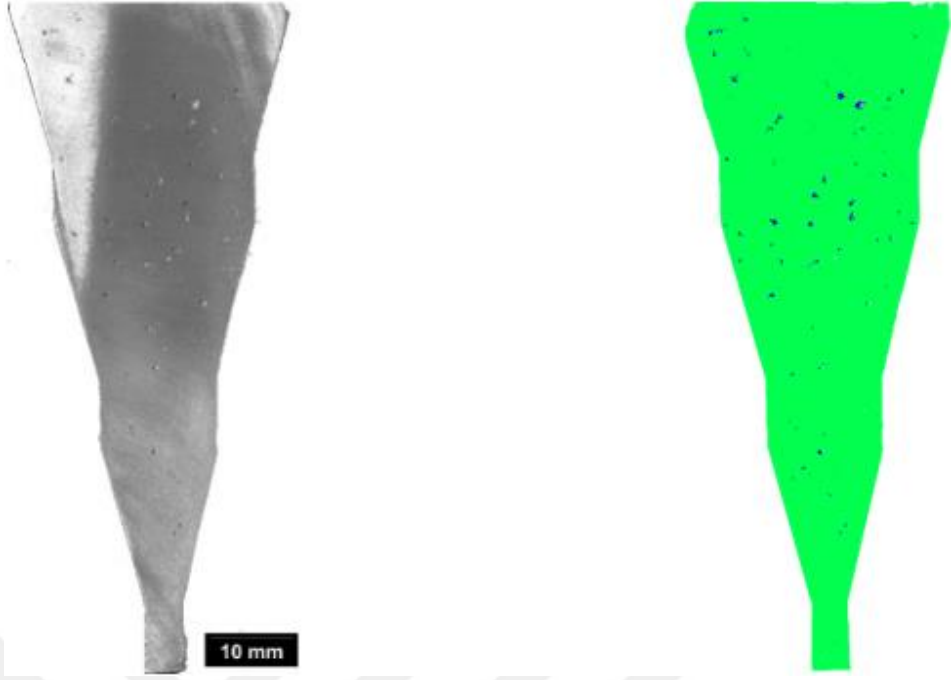
Şekil 4. 2:1 numaralı numunenin imaj analiz görseli.



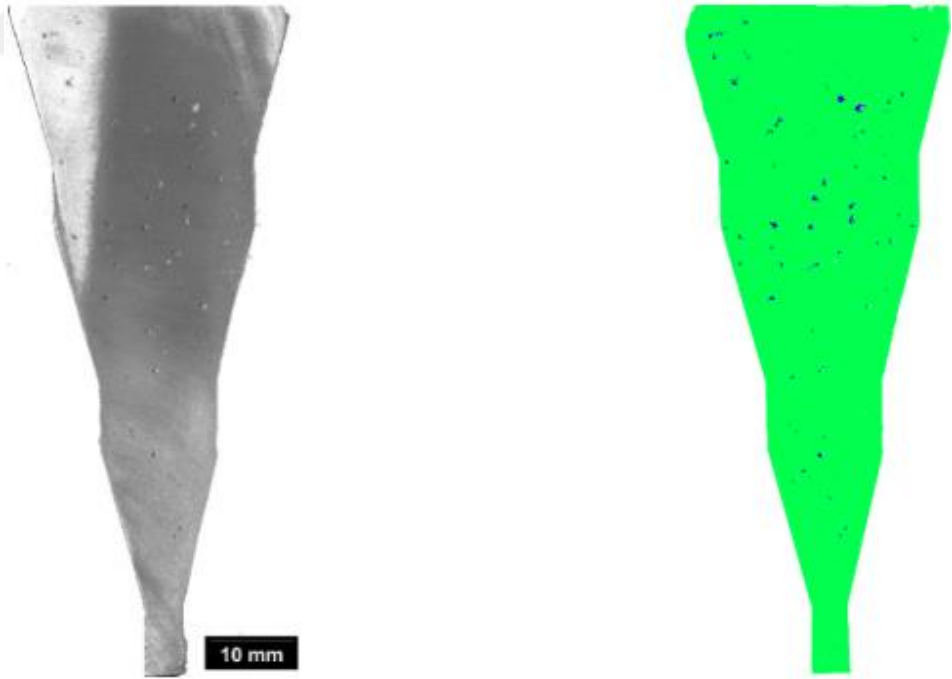
Şekil 4. 3:2 numaralı numunenin imaj analiz görseli



Şekil 4. 4:3 numaralı numunenin imaj analiz görseli



Şekil 4. 5:4 numaralı numunenin imaj analiz görseli



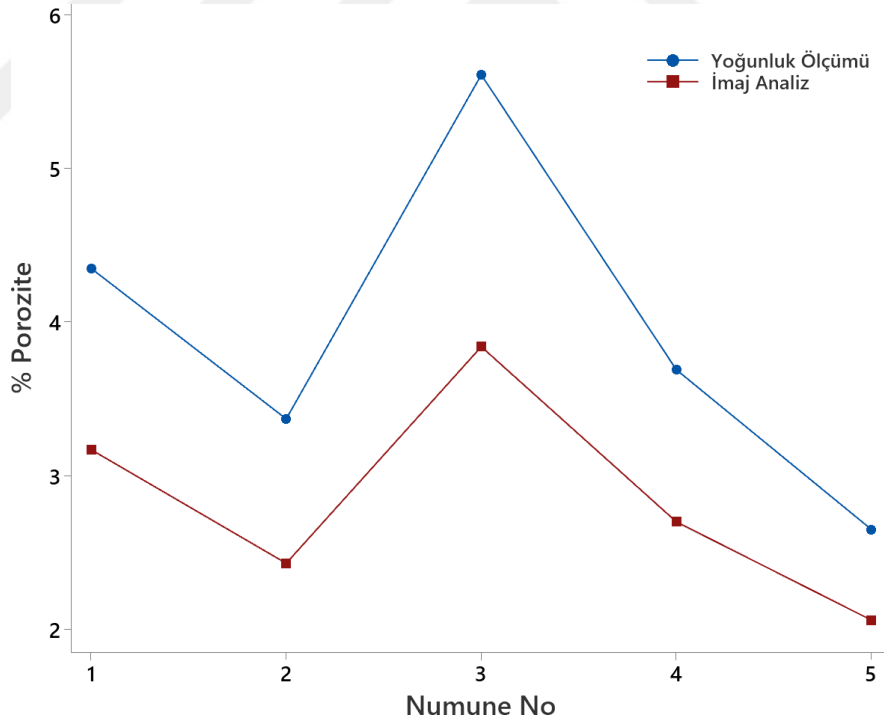
Şekil 4. 6: 5 numaralı numunenin imaj analiz görseli

Bu görsellerde yeşil olarak renklendirilen dolu olan bölgelerle, lacivert olan boşluklu bölgelerin alanı birbirine oranlanarak imaj analiz yöntemine göre gözeneklilik oranı hesaplanmıştır (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. İmaj analiz tekniğine göre hesaplanan gözeneklilik sonuçları

Numune No	Dolu Olan Bölgenin Alanı (mm ²)	Gözenekli Bölgenin Alanı (mm ²)	% Porozite
1	1441.27	45.69	3.17
2	1275.25	30.98	2.43
3	1345.54	51.67	3.84
4	1334.03	36.02	2.70
5	1339.28	27.58	2.06

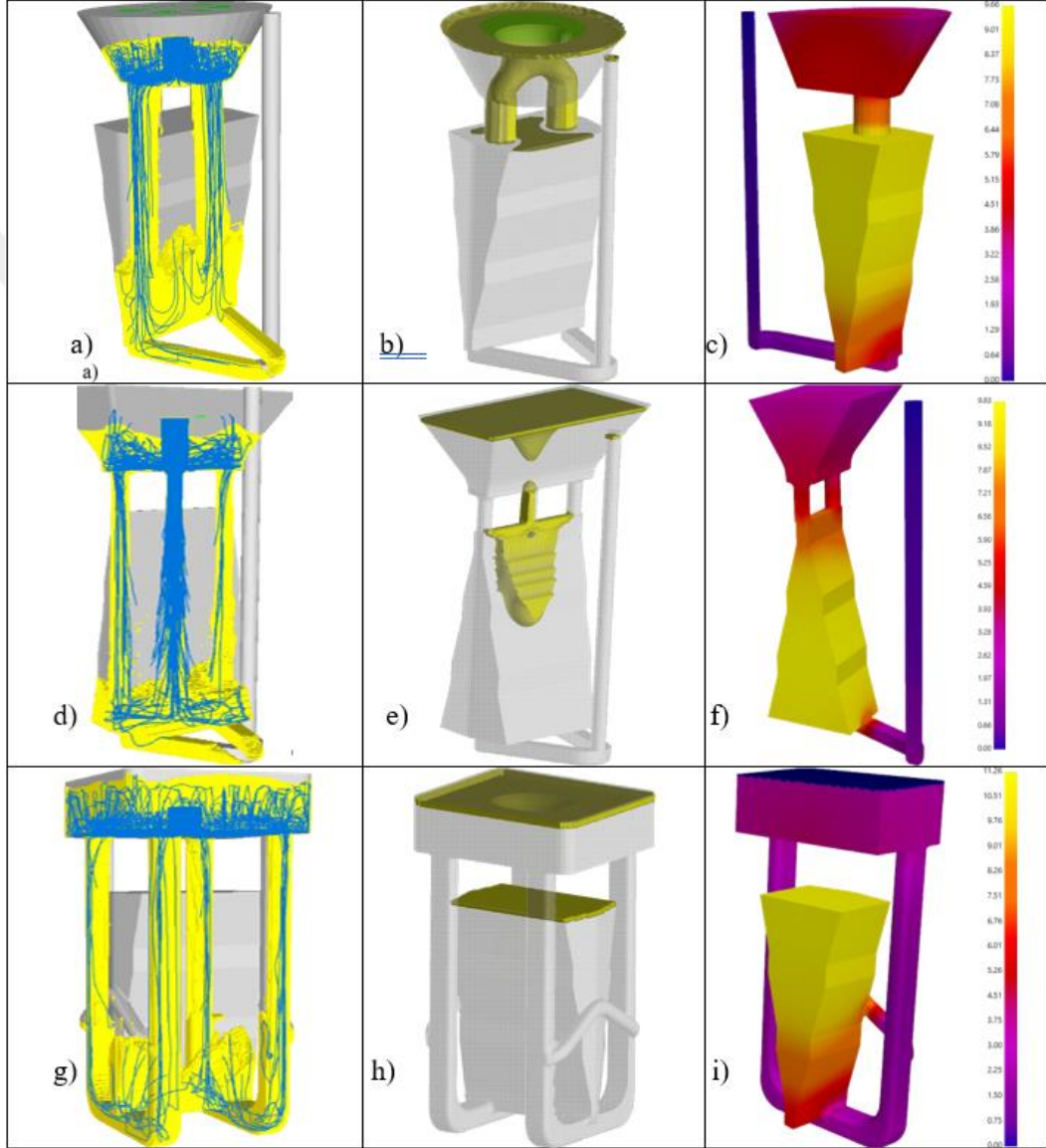
İmaj analiz sonuçlarıyla yoğunluk ölçüm sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.7.de paylaşılmıştır.



Şekil 4. 7: İmaj analiz ve yoğunluk ölçüm sonuçlarının kıyaslanması

4.4. Simülasyon Sonuçları

Döküm simülasyon çalışmaları üstten dolum, üstten dolum ters model ve alttan dolum olarak üç farklı şekilde uygulanmıştır. Simülasyon programında vakum atmosferi modellenemediğinden çalışmalar sadece yerçekimi etkisi altında uygulanmıştır. Üç farklı modelin dolum, çekinti ve katılaşma zamanı görselleri sırasıyla aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 4. 8: Simülasyon çalışması yapılan üstten dolum yapılan numunenin, a) Dolum, b) Çekinti, c) Katılaşma zamanı, Ters kalıplanan numenin d) Dolum, e) Çekinti, f) Katılaşma zamanı, alttan dolum yapılan numunenin g) Dolum, h) Çekinti, i) Katılaşma zamanı görselle

Dolum sonuçları incelendiğinde üstten dolum ve ters model tasarımlarında akış çizgilerinden de anlaşılacağı üzere üstten düşen metalin yere çarptıktan sonra türbülanslı bir şekilde dolduğu görülmektedir. Alttan dolum da ise akış çizgilerinin doğrusal olduğu yani laminar bir akışın olduğu görülmektedir. Döküm için hazırlanan sıvı metalin kalitesi yüksek olsa bile türbülanslı dolum esnasında meydana gelen çalkantılardan ötürü sıvı metal gaz kapacaktır. Laminer akışta ise sıvı metal içerisine dolumdan kaynaklı bir gaz girişi olmayacaktır. Bununla birlikte çekinti ve katılma zamanı görselleri incelendiğinde özellikle ters kalıplanan numunenin kalın kesitinin alt kısmında olduğu buna bağlı olarak yolluktan beslenemediği ve çekinti riskinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA

Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar ve literatür tartışması aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalara göre en düşük yoğunluk 1 ve 3 numaralı vakumlu üstten dolum yapılan numunelerde tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluklar ise vakumsuz dökümlerde tespit edilmiştir. Literatür taramasına göre vakum destekli döküm uygulamalarında gözenekliliğin azaldığı, sünekliğin, maksimum çekme dayanımının ve yorulma direncinin arttığı bilinmektedir (Daronde, et al., 2021). Bununla birlikte birçok literatürdeki bir çok çalışmada türbülanslı dolumun yol açabileceği risklere özellikle vurgu yapılmış ve üstten dolumun ciddi anlamda türbülans oluşturacağı ve bunun sonucunda sıvı metalde yeni oksit ve gazların oluşmasıyla beraber gözenekliliğin arttığı ve mekanik özelliklerin düştüğü vurgulanmıştır. Campbell sıvı metal kalitesine yönelik yaptığı bir çalışmada (Campbell, 2012) dökümün metalurjik kalitesini en çok etkileyen unsurların başlangıç sıvı metal kalitesi ve bifilm oluşumlarının olduğunu vurgulamıştır. Bifilmeler ya da diğer bir deyişle çift oksit filmler, özellikle alüminyum alaşımlarında gözeneklilik oluşumunda çok önemli bir rol oynar. Bu kusurlar, yüzey oksit tabakasının kendi üzerine katlandığı, dolum sırasında türbülans yoluyla eriyik içine sokulur. Zamanla, bu bifilmelerin içindeki sıkışmış hava oksitlenir ve katılaştıran metal içindeki gözeneklerin büyümesini şiddetlendiren alüminyum nitrür (AlN) ve diğer bileşiklerin oluşumuna yol açar. Sonuç olarak, bifilmeler gözenek çekirdeklenmesi için alanlar olarak hareket ederek, katılaştıran metal içinde çatlaklar başlatarak ve sıkışmış gazların oksidasyonu yoluyla eriyik kalitesini bozarak döküm işlemlerinde gözenekliliğe katkıda bulunur (O Gursoy,

2021). Bu çalışmada beklentinin aksine vakumsuz dökümlerde yoğunlukların yüksek çıkmasının ana sebebi dolum esnasında meydana gelen türbülansdır. Türbülanslı dolum sonucunda sıvı metalin gaz alması neticesinde vakum desteğiyle birlikte sıvının içindeki gazın hacmi artarak dökümdeki gözenekliliğin artmasında neden olmaktadır.

- Aynı zamanda simülasyon çalışmasından elde edilen çekinti ve katılma zamanı görselleri incelendiğinde özellikle 3 numaralı numunede katılmanın yolluğa en uzak yerden başlayıp yollukta son bulacak şekilde yönlü katılma kriterine göre değil de tam zıttı şekilde tasarlandığı görülmüştür. Yönlü katılaşmada, katılma cephesi belirli bir yönde hareket eder ve bu da daha düzgün bir çözünen ve hidrojen dağılımına yol açabilir. Bu homojenlik, sıvı metal katılma sırasında hacim azalmasını telafi etmek için daha tutarlı bir besleme yoluna sahip olduğundan, büzülme gözenekliliği oluşumunu azaltmaya yardımcı olur. Yönlü katılaşmada kontrollü soğutma hızı da hayati bir rol oynar. Genellikle yönlü katılmanın bir özelliği olan daha yavaş bir soğutma hızı, gaz gözenekleri arasındaki rekabetçi büyüme nedeniyle daha büyük ve daha düzensiz gözenekliliklere yol açabilir. Bunun nedeni, azaltılmış soğutma hızının gaz gözeneklerinin büyümesi ve katılma dendritlerle etkileşime girmesi için daha fazla zamana izin vermesi, bu da düzgün olmayan gözeneklilik boyutlarına ve daha düzensiz morfolojilere yol açmasıdır. Tersine, daha hızlı bir soğutma hızı, gözenekliliklerin büyümesini sınırlayabilir ve bu da daha küçük ve daha küresel gaz gözeneklerine neden olabilir (T Wang, 2015). İşlem, katılma cephesinin erimiş metal boyunca düzgün bir şekilde hareket etmesini sağlamak için termal gradyanın ve katılma oranının kontrol edilmesini içerir ve böylece hata olasılığını azaltır. Yönlü katılma, yerel katılma süresini ve solidus hızını etkileyerek yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlı dökümlerde gözenekliliği etkiler. Yoğunluğun en yüksek ve gözenekliliğin en az olduğu numune ise alttan dolmuş numune olmuştur. Bu numunede alttan dolmuş neticesinde laminer bir akışla dolmuş kaynaklı risklerin önüne geçilmiştir. Aynı zamanda katılma zamanı görseli incelendiğinde de katılmanın yolluğa en uzak yerde başlayıp yollukta son bulunduğu tespit edilmiştir. Daha kısa katılma süreleri ve daha yavaş

katı hızları genellikle gözenekliliği azaltmada faydalıdır ve bu da daha az kusurlu daha kaliteli dökümlere yol açar (Kuo, 2014).



BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 6101 Al alaşımında hem vakum destekli olarak hem de yerçekimi etkisiyle üç farklı yolluk tipinde katılaştırılan kama şekilli modelde döküm ve katılaştırmanın gözenekliliğe etkileri incelenmiştir. Burada farklı yolluk tiplerinin kullanılmasındaki amaç vakum ortamında dolmuş ya da katılaştırmanın gözenekliliği ne şekilde etkileyeceğini araştırmak olmuştur. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Dökülen modellerde gözeneklilik, Arşimet prensibine göre %2,65 (Numune 5) ile %5,61 (Numune 3) arasında, imaj analiz tekniğine göre %2,06 (Numune 5) ile %3,84 (Numune 3) arasında değişiklik göstermiştir.
- Gözenekliliğin en yüksek olduğu 3 numaralı numunenin imaj analiz görseli incelendiğinde gözenek formunun çoğunlukla küresel şekilli olduğu görülmektedir. Küresel şekilli gözenek oluşumunun sebebi sıvı metalin gazlı oluşu ve vakum etkisiyle sıvı metal içindeki gaz boşluklarının büyümesidir.
- Simülasyon çalışmasındaki dolmuş görselleri incelendiğinde iki tespit gözle çarpılmaktadır. Bunlardan ilki gözenek yüksek olduğu numunelerde türbülanslı bir akış, düşük olduğu numunelerde ise laminar bir akış meydana gelmesidir. Diğer bir tespit ise yine yüksek gözenekli numunelerde yönlü katılaştırmanın oluşmaması, düşük gözenekli numunelerde ise sıcak bölgeye doğru yönlü bir katılaştırmanın meydana gelmesidir. Buna göre yolluk tasarımı da döküm kalitesindeki ana unsurlardan biridir.
- İmaj analiz tekniğiyle Arşimet prensibine göre yapılan gözeneklilik ölçümünde farklı sonuçlar elde edilmesine rağmen sonuçlar birbirleriyle paralellik göstermektedir.

Bununla birlikte imaj analiz tekniğinde bir kesit düzleminde inceleme yapılırken Arşimet prensibinde tüm numune incelenmektedir. Bu yüzden Arşimet prensibine dayalı ölçümler daha sağlıklı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir.

- Vakum destekli katılaştırma döküm kalitesini arttıran ana unsurlardan biri olarak bilinmekle beraber hatalı döküm tasarımı sonucunda vakumun beklendiğinin tam tersi etkiye sebep olabileceği görülmüştür. Bu çalışmada yapılan deneyler ve elde edilen bulgulardan yola çıkarak gelecekte yapılacak çalışmalar için şu önerilerde bulunulabilir.
- Bu çalışmada primer alüminyum alaşımı kullanıldığı için sıvı metal kalitesinin etkisi incelenmemiştir. Gelecek çalışmalarda döküm öncesi sıvı metal kalitesi de incelenerek bunun nihai sonuca etkisinin incelenmesi literatüre önemli katkı sunacaktır.
- Bu çalışmada kalıp olarak sadece hassas döküm alçı kalıbı kullanılmıştır. Farklı kalıp malzemelerinin kullanılması katılma zamanını etkileyeceğinden bununla birlikte gözeneklilik sonuçları da değişecektir. Vakum destekli farklı sıcaklıklarda kokil kalıba döküm çalışmalarının gözeneklilik ve mekanik özelliklere etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- (2023, 04 15). Url-2: <http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/uyg-muh-prototip.html> adresinden alındı
- Alcisto, J., Garcia, A., & Hinkson, S. (2011). Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V. *JMEP*, 202-2012.
- Alper, G. (2003). *Alüminyum sürekli döküm yöntemi ile üretilmiş 5052-5182 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Başer, T. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makine*, 53, 51-58.
- Beeley, P. (2001). *Foundry Technology*. Butterworth-Heinemann. Oxford:: Butterworth-Heinemann.
- Blach, J., & Kohser, R. (2011). *Degarmo's materials and processes in manufacturing*. USA: Jhon Wiley & Sons.
- Campbell, J. (2012, 6). Stop Pouring, Start Casting. *International Journal of Metalcasting*, s. 7-18.
- Çukur, B. (2009). *Kuyumculuk sanatında mum kalıba alma ve döküm tekniği*. (Lisans Tezi), Ankara: Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Fakültesi.
- Daronde, S., Kuthe, A., Keerti, S., Khatirkar, R., Bagde, A., Kamble, M., & Dahake, S. (2021, August 24). The Effect of Vacuum on the Mechanical Properties of Sand Cast AA6061 Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 262-271.

- Delikanlı, Y. (2011). *Alüminyum alaşımlarında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi*. (Lisans Tezi), Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi.
- Envision Tec.* (2015). General Informartion Presentation.: <https://envisiontec.com/>> adresinden alındı
- Envision Tec.* (2023, 03 10). Url-4: <https://envisiontec.com/3d-printing-materials/jewelry/> adresinden alındı
- Eskin, D. (2008). *Physical Metalurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys* . Boca Raton: CRC Press Book.
- European Defence Agency. (2018). Additive manufacturing feasibility study & technology frmondrtion report. 51-56. Belçika.
- Faccenda, V. (2003). *Handbook on Investment Casting*. London: World Gold Council.
- Fredriksson, H., & Akerlind, U. (2006). *Materials Processing during Casting*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Ganeriwala, R., & Zohdi, T. (2014). Multiphysics modeling and simulation of selective laser sintering manufacturing processes. *Procedia CIRP 14*, 298-305.
- Gibson, L., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printingi rapid prototyping and direct digital manufacturing. *Springer*, 2., 205.
- Groover, M. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing*. United Kingdom: John Wiley & Sons, inc.(4th Ed.).
- Güler, F. (2019). *Eklemeleli imalat destekli dereceli hassas döküm yöntemi ile bal peteği yapılarının üretimi ve karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güler, K. (2012). *Hassas dökümde boyutsal hassasiyete ve yüzey kalitesine etki eden unsurlar*. (Doktora Tezi), İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güler, K. A. (2016). Manufacturing and aging of 7075 based metal-metal composites sawduts as reinforcements. *Academia Edu*, 114-117.

- Günay, Y. (2013). Yeni Dünya, Yeni Eğilimler, Teknolojiler ve Türk Döküm Sekötörü. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI*, 22-40.
- Heralic, A., Ottosson, M., & Christiansson, A.-K. (2010). Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurement. *Optics and Laser in Engineering*, 48(4), 479-486.
- Hitchiner Manufacturing Company. (2023, 04 10). Hitchiner Manufacturing Company: <https://www.hitchiner.com/history-of-the-process> adresinden alındı
- Kai, C. (1997). Interface between CAD and Rapid Prototyping Systems Part 1. *Journal of Advanced Manufacturing Tecnology*, 565-569.
- Karabay, S., Yılmaz, M., & Zeren, M. (2011). AA-6101 Alaşımının yüksek gerilim çıplak havai hatlarında AAAC İletkeni olarak kullanımı. (Lisans Tezi), Kocaeli, İzmit: Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- Karafazlıoğlu, K. (2016). *Hassas döküm sürecinde ürün kalitesinin geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaufman, J., & Rooy, E. (2001). *Aluminum Alloy Castings: Properties , Processes ,* Hollanda: ASM International.
- Kuo, Y. S. (2014, Haziran). Study of Solidification Time and Solidus Velocity on Porosity Formation in High Strength Aluminum Alloy Castings. *Applied Mechanics and Materials*, 575, s. 442-445. Scientific: <https://www.scientific.net/AMM.575.442> adresinden alındı
- Milli Eğitim Bakanlığı. (2006). Kuyumculuk teknolojisi-alçı kalıp. Ankara.
- Ning, F., Qiu, J., wang, S., Wei, J., & Cong, W. (2014). Additive munufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *MSEC*, 1-8.
- O Gursoy, A. N. (2021, Kasım). Role of metal quality and porosity formation in low pressure die casting of A356: experimental observations. *Archives of Foundry Engineering*, 21(1), s. 5-10.

- Onar, V. (2010). *Tıg kaynağında azot gazının alüminyum yüzey ve mikroyapının özelliklerine etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ozsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *Dergipark.org*, 37-45.
- Özderin, Y. (2017). Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi parametrelerinin döküm alüminyum alaşımlarının birleştirilebilirliğine olan etkilerinin incelenmesi. *Dergipark.org*, 733-737.
- Özkan, A., & Çelik, K. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 106-122.
- Ravi, B., Pal, D., Bhargava, L., & Chandrasekhar, U. (2004, Kasım). Rapid casting development using reverse engineering, rapid prototyping. *researchgate*, 1-15.
- Sinan, D. (2010). *Hassas döküm için seramik kalıpların hazırlanmasında otomatik sistemlerin incelenmesi ve geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli: Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sireesha, M., Ramakrishna, S., Babu, V., & Lee, J. (2018). A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *Royal Society of Chemistry*, 22450-22469.
- T Wang, D. A. (2015). Modeling of microporosity formation during solidification of aluminum alloys. *IOP Konferans Serisi*. 84, s. 1-8. Awaji adası, Hyogo, Japonya: iopscience.
- Terris, T. A. (2019). Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of Selective Laser Melted metallic parts. *Additive Manufacturing*, 802-813.
- Vaezi, M., Chianrabutra, S., Yang, S., & Mellor, B. (2013). *Multiple material additive manufacturing Part 1 a review*. İngiltere: Virtual and Physical Prototyping.
- voxeljet*. (2023, 4 10). Url-3: <https://www.voxeljet.com/industries/foundries/creating-the-aircraft-doors-of-the-future/> adresinden alındı

voxeljet. (2023, 04 10). Url-5:

<https://www.voxeljet.com/industries/foundries/investment-casted-impeller/>
adresinden alındı

Yaman, B. (2002). *Demirdışı alaşımların dereceli hassas dökümünde kullanılan kalıp malzemeleri*. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz , M. (2013). *Türkiye Alüminyum Sektörünün 2023 Projeksiyonu*. Ankara: Türk Döküm.

