

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI

AlSi9Cu3 ALAŞIMINDAN YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN PARÇANIN YARI KATI DÖKÜM YÖNTEMLERİYLE
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ferhat AYDOĞAN

Danışman
Prof.Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU



MANİSA-2023

Ferhat
Aydoğan

AlSi9Cu3 ALAŞIMININ YARIKATI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

2023

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ferhat AYDOĞAN



İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Alüminyum Alaşımları.....	4
2.1.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	5
2.1.2 Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem	9
2.1.3 AC 46000 (AlSi9Cu3) Alaşımı ve Özellikleri.....	14
2.2 Yüksek Basıncılı Döküm.....	16
2.3 Yarı Katı Döküm	19
2.3.1 Eğimli Soğutmalı Plaka ile Döküm	27
2.3.2 İnert Gaz (GISS) ile Döküm	30
2.3.3 Entalpi Çubuğu ile Döküm	33
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	36
3.1. Yarı Katı Döküm İçin Küresel Tane Hazırlama Metodları ve YBD Makinasında Yarı-Katı Döküm Prosesleri	36
3.1.1. Eğimli Soğutmalı Plaka ile Yarı Katı Döküm	36
3.1.2. İnert Gaz ile Yarı Katı Döküm (GISS)	39
3.1.3. Entalpi Çubuğu ile Yarı Katı Döküm	41
3.2. Isıl İşlem	43
3.3. Test Metodları.....	44
3.2. Simülasyon Metodu.....	51
3.2.2. Magmasoft Simülasyonu	51
3.2.1. Sigmasoft Simülasyonu	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	55
4.1 Kimyasal Analiz ve DTA Test Sonuçları.....	55
4.2 Simülasyon Sonuçları.....	57
4.3 Mikroyapı Analizleri	59
4.3 Isıl İşlem ile Kabarcık (Blister) Testi	62

4.4 X-ray Radyografi Testleri	63
4.5 Çekme Test Deneyi ve Sonuçları	64
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları	68
4.7. Proje hedefleri ve gerçekleşme durumları	72
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	73
5.1. Sonuç	73
5.2. Öneriler	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	78



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

T_0^L	Ergiyiğin ilk sıcaklığı
T_{semi}	Yarı katı durumundaki son sıcaklık
T_{EEM}^0	Entalpi Değişim Malzemesinin ilk sıcaklığı
f_{melts}	Eriyiğin Katı Fraksiyonu
f_s^{EEM}	Entalpi Değişim Malzemesinin katı fraksiyonu
dQ_{out}	Sıvı metalde ortaya çıkan ısı enerjisi
dQ_{in}	Entalpi değişim malzemesinin absorbe ettiği ısı enerjisi
ρ_{melt}	Sıvı metal yoğunluğu
ρ^{EEM}	Entalpi Değişim Malzemesinin yoğunluğu
$C_{p_{\text{melt}}}$	Ergiyik Metalin Spesifik Isı Kapasitesi Katsayısı
$C_{p^{\text{EEM}}}$	Entalpi Değişim Malzemesinin Isı Kapasitesi Katsayısı
V_{melt}	Ergiyik Metalin Hacmi
V^{EEM}	Entalpi Değişim Malzemesinin Hacmi
ΔH_{melt}	Ergiyik Metalin Katılaşma Faz Değişim Enerjisi
ΔH^{EEM}	Entalpi Değişim Malzemesinin Ergime Faz Değişim Enerjisi
T_L	Liküdis sıcaklığı
f_L	Sıvı oranı
T_i	İstenilen sıcaklık
$A(T_i)$	DTA analizinde istenilen sıcaklık altında kalan alan
$A(T)$	DTA analizinde toplam alan
YTS	Akma Mukavemeti
UTS	Çekme Mukavemeti
A_α	α -Al tanesinin Alanı
P_α	α -Al tanesinin çevresi
DTA	Diferansiyel Termogravimetrik Analiz
EP	Eğimli plaka yarı katı döküm
EÇ	Entalpi çubuğu yarı katı döküm
IG	İnert Gaz yarı katı döküm
HPDC	Yüksek basınçlı döküm
%e	%uzama

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Yarı-katı alaşımın tiksotropik davranışı.....	2
Şekil 1.2 %30 katı-%70 sıvı Al-Si alaşımının tiksotropik davranışı [5].....	2
Şekil 2.1 Alüminyum Ürünün Dünyadaki Bölgesel Dağılım, Ürün Dağılımı ve Nihai Ürün Olarak Sınıflandırılması [12].....	5
Şekil 2.2 Alüminyumun alaşım elementleriyle çeşitli kombinasyonlarda yapılan alaşımlarının şematik gösterimi [16]	8
Şekil 2.3 Isıl işlem uygulanabilirliğine göre dövme alaşımları [18]	9
Şekil 2.4 Isıl işlem uygulanabilirliğine göre döküm alaşımları [18].....	10
Şekil 2.5 Çökelme sertleştirmesinin uygulanabildiği solvüs eğrisi içeren faz diyagramı kesiti [13].....	12
Şekil 2.6 Çökelme sertleşmesinin uygulama adımları [13]	13
Şekil 2.7 Sabit sıcaklıkta yaşlanmanın süresine bağlı olarak alaşım mukavemetinin değişimi [13].....	14
Şekil 2.8 Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklere göre sıralaması [14].....	15
Şekil 2.9 Soğuk Kamaralı Basınçlı Alüminyum Döküm [17]	17
Şekil 2.10 Basınçlı Döküm İşlemi [17].....	18
Şekil 2.11 Enjeksiyonun kontrollü (a) ve kontrolsüz (b) ilk aşamalarını karşılaştıran, soğuk kamaralı bir pres döküm kovanındaki enjeksiyonu [17] ..	18
Şekil 2.12 Farklı akış tiplerini gösteren grafik çizimler (a) Konvansiyonel yüksek basınçlı dökümde düzlemsel olmayan ve türbülanslı akış, (b) Yarı katı dökümde yüksek kararlılığa sahip düzlemsel ve laminar akış ve (c) Belirli bir sıcaklıkta bir miktar kararsızlığa sahip düzlemsel ve laminar akış yarı katı/gaz arayüzü [20]	21
Sıkışan havanın sıcaklıkla birlikte blistere dönüşümü şekil 2.13’de gösterilmiştir.	22
Şekil 2.13 a)blister tipik görüntüsü, b) blister iç görünümü, c)blister yandan görünümü[20]	22
Şekil 2.14 AC 46000 alaşımlı numune mikroyapıları (a) gravite döküm ve (b) tiksotropik döküm[25].....	24
Şekil 2.15 (a)Al-8Si alaşımının DSC analizi ve (b)katı fraksiyonu/sıcaklık grafiği[26]	25
Şekil 2.16 ACSR Sisteminin şematik görünümü (1-Hava kompresörü; 2-Hava akış yolu; 3-Karıştırma Çubuğu; 4-Ergimiş Metal; 5-Pota; 6-Thermocouple; 7;Birincil α -Al partikül)[26]	26
Şekil 2.17 Farklı debilerde yapılan yarı katı YBD döküm mikroyapıları: (a) 0 L/s; (b) 1 L/s; (c) 3 L/s; (d) 5 L/s[26]	26
Şekil 2.18 α -Al tanelerinin döküm sıcaklığı ve eğimli plaka uzunluğuna göre shape factor (dendritik olmayan) değişimleri[30]	29
Şekil 2.19 GISS prosesi şematik gösterimi[31]	31
Şekil 2.20 Yarı katı hazırlama süresinin küresel partikül yoğunluğuna etkisi[33]32	

Şekil 2.21 GISS bulamaç döküm işlemleriyle oluşturulan çeşitli alaşımların mikroyapıları: (a) 356; (b) A380; (c) A383; (ç) 5052; (e) 6061; (f) 2024; (g) 7075; (h) ZAMAK-3.....	33
Şekil 2.22 Entalpi Değişim Çubuğu ile yarı katı malzeme oluşturulması[5].....	34
Şekil 2.23 SSR işleminin şeması. (1) Ergimiş alaşım liküdü sıcaklığının üzerinde tutulur. (2) Dönen, soğuk grafit çubuk katılaşmayı başlatmak için ergiyik içine indirilir. (3) Dönen çubuk çıkarılır ve durağan ergiyik, istenen döküm sıcaklığına kadar soğutulur.[36].....	35
Şekil 3.1 Eğimli Soğutmalı Plaka Tasarımı	37
Şekil 3.2 Eğimli Soğutmalı Plaka ile yarı katı numune döküm düzeneği ve dökülen numuneler	38
Şekil 3.3 Eğimli Soğutmalı Plaka YBD tezgahındaki görüntüsü	38
Şekil 3.4 Eğimli Soğutmalı Plaka YBD tezgahı döküm sırasındaki manuel sıcaklık kontrollerine ait görsel.....	39
Şekil 3.5 Yarı katı metal hazırlama düzeneği	40
Şekil 3.6 Yarı katı metal hazırlama ünitesinde numune dökümüne ait görseller..	40
Şekil 3.7 Yarı katı metal hazırlama ünitesi ile YBD tezgahında GISS metodu dökümü a) bekletme ocağından sıvı metal transferi, b) asal gaz ile yarı katı metal hazırlama, c) yarı katı metalin kovana transferi	41
Şekil 3.9 Entalpi Çubuğu Yarı Katı Dökümü Numune Döküm Görseli.....	42
Şekil 3.10 Yarı katı metal hazırlama ünitesi ile YBD tezgahında entalpi çubuğu ile yarı katı parça dökümü a)entalpi çubuğu yükleme, b) sıvı metalin potaya aktarımı, c)entalpi çubuğu ile yarı katı metal hazırlama, d)yarı katı metalin kovana transferi	43
Şekil 3.11 Laboratuar tipi ısıtma işlem fırını	43
Şekil 3.12 Numunelerin ısıtma işlem fırını içerisindeki yerleşimi	44
Şekil 3.13 Isıtma işlem esnasındaki sıcaklık zaman grafiği.....	44
Şekil 3.14 SpectroLAB S model spektrometre	45
Şekil 3.15 DTA test cihazı (Perkin Elmer STA 6000).....	45
Şekil 3.16 % Sıvı oranının hesaplanmasında kullanılan DTA eğrisinin şematik gösterimi	46
Şekil 3.17 Parça üzerinden alınan test numune lokasyonları	47
Şekil 3.18 DIN 50125'e göre hazırlanan çekme test numunesi teknik resmi	47
Şekil 3.19 Instron 5982 çekme test cihazı.....	48
Şekil 3.20 Çekme test numunesi	48
Şekil 3.21 Çekme test cihazı grafik ve sonuç raporu	49
Şekil 3.22 AFFRI LD250 Sertlik Ölçüm Test Cihazı	49
Şekil 3.23 Nikon LV150N motorize tablalı optik metal mikroskobu	50
Şekil 3.24 YXLON MU2000 model X-ışını radyografi cihazı.....	51
Şekil 3.25 Eğimli Soğutmalı Plaka Magmasoft Simülasyonları a)650°C sıvı metal verildiğinde plakadaki sıcaklık değişimi, b)Eğimli plakadan kovana sıvı metal boşaltılırken ki sıcaklık, c)Sıvı metalin kovanda 5sn beklemesi sonrasındaki sıcaklığı.....	52
Şekil 3.26 Sigmasoft ile yapılan akış izleri analizi görseli	53

Şekil 3.27 Sigmasoft ile yapılan dolum hızı analiz görseli	53
Şekil 3.28 Sigmasoft ile yapılan sıcak kalan bölge analiz görseli	54
Şekil 4.1 AC46000 Alaşımı DTA Analizi Isı Akısı-Sıcaklık Grafiği.....	56
Şekil 4.2 AC46000 Alaşımı DTA Analizi Sıvı Katı Fraksiyonu	56
Şekil 4.3 Eğimli soğutmalı plaka simülasyon sonuçlarının dağılımı	57
Şekil 4.4 Sigmasoft simülasyonu hava sıkışması son optimizasyon görseli.....	58
Şekil 4.5 Sigmasoft HotSpotFStime analiz karşılaştırması.....	59
60	
Şekil 4.6 Döküm yöntemlerine göre 100x büyütme mikroyapı karşılaştırmaları a)gravite döküm mikroyapısı, b)YBD metodu ile döküme ait mikroyapı, c-d-e) AC 46000 alaşımı ile yarı katı döküm mikroyapıları sırasıyla inert gaz, entalpi çubuğu, eğimli soğutmalı plaka	60
Şekil 4.7 Küresellik tayini mikroyapı analiz sonuç raporu (YBD).....	61
Şekil 4.8 Küresellik tayini mikroyapı analiz sonuç raporu (Yarı katı döküm)	62
Şekil 4.9 a-c)YBD ile dökülen 500°C’de 1 saat bekletilen, b-d) Yarı Katı dökülen 500°C’de 1 saat bekletilen parçalar	63
Şekil 4.10 a)YBD ile dökülen, b) 580-590°C sıcaklığında Yarı Katı dökülen parçalar	64
Şekil 4.11 Örnek Çekme Test numunesi X-ray kontrolü	64
Şekil 4.12 Isıl işlemsiz parçaların döküm yöntemlerine göre akma mukavemetleri	65
Şekil 4.13 Isıl işlemsiz parçaların döküm yöntemlerine göre çekme mukavemetleri	65
Şekil 4.14 Isıl işlemsiz parçaların döküm yöntemlerine göre %uzama değerleri .	66
Şekil 4.15 Isıl işlemli parçaların döküm yöntemlerine göre akma mukavemeti...	66
Şekil 4.16 Isıl işlemli parçaların döküm yöntemlerine göre çekme mukavemeti .	67
Şekil 4.17 Isıl işlemli parçaların döküm yöntemlerine göre %uzama değerleri ...	67
Şekil 4.18 Entalpi çubuğu dökümü çekme çubuğunun kırık yüzey SEM görüntüsü	68
Şekil 4.19 İnert gaz ile yarı katı döküm parçalara ait a-c)SEM görüntüleri, b-d) optik mikroskop görüntüleri	69
Şekil 4.20 İnert gaz dökümü çekme testi numunesi kırık yüzey SEM incelemesi	70
Şekil 4.21 Eğimli plaka çekme testi numunesi kırık yüzey SEM incelemesi	71

TABLO DİZİNİ

Tablo 2.1 Alüminyum alaşımları temper seri numaralarının tanımları [8]	11
Tablo 2.2 AlSi9Cu3(Fe) ile diğer yüksek basınçlı döküm alaşımlarının karşılaştırılması [19]	15
Table 2.3 Tikso döküm ve Gravite döküm Mekanik Özellik Karşılaştırma	23
Tablo 2.4 Eğimli Soğutmalı Plaka yarı-katı döküm parametreleri[30].....	29
Tablo 3.1 AC46000 kimyasal kompozisyonu[28]	36
Tablo 3.2 AC46000 mekanik özellikleri[28]	36
Tablo 3.3 Eğimli plaka numune döküm parametleri	37
Tablo 3.4 Çekme test numunesi ölçüleri	48
Tablo 4.1 Kimyasal Analiz Sonuçları	55
Tablo 4.2 Eğimli Soğutmalı Plaka Simülasyon Deney Tasarımı	57
Tablo 4.3 Yarı katı döküm metodlarına göre elde edilen küresellik değerleri.....	61
Tablo 4.4 Entalpi Çubuğu dökümü çekçe çubuğu kırık yüzey EDX analiz sonuçları	69
Tablo 4.5 Şekil 4.20’de İşaretli bölgelerden alınan EDX analiz pikleri	70
Tablo 4.6 Şekil 4.21’de İşaretli bölgelerden alınan EDX analiz pikleri	71
Tablo 4.7 Proje hedefleri ve gerçekleşme durumları	72

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU'na ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme ve eşim Cansu AYDOĞAN'a yürekten teşekkür ederim.

Ferhat AYDOĞAN
Manisa, 2023



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AlSi9Cu3 ALAŞIMINDAN YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇANIN YARI KATI DÖKÜM YÖNTEMLERİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ferhat AYDOĞAN

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof.Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU

Otomotiv sektöründe son yıllarda alüminyum kullanım oranı artış göstermektedir. Alüminyumun tercih edilme nedenleri; ağırlık azaltımı ve korozyon dayanımıdır. Özellikle ağırlık azaltma hedefleri sebebiyle giderek daha yüksek mukavemet özelliklerine sahip alüminyum döküm parçalar talep edilmektedir.

Ağırlık azaltmanın yanısıra kullanılan alüminyum alaşımının da geridönüştürülmüş olması talep edilmektedir. Bu taleplerin ortak nedeni ulusal ve uluslararası çevresel regülasyonlardır. Bu sebeple çalışmamızda yarı katı döküm yöntemlerinin uygulamasında geridönüştürülmüş alaşım seçilmiştir.

İş bu projede yarı katı döküm yöntemleri araştırılmıştır ve Yüksek Basınçlı Döküm (YBD) tezgahlarında uygulanabilecek üç farklı yarı katı döküm yöntemi (Eğimli Soğutmalı Plaka, Entalpi Çubuğu, İnert Gaz) seçilmiştir. Proje akışında sırasıyla simülasyon çalışması, kalıp tasarımı, proses tasarımı, deneme üretimleri ve sonuçların raporlanması adımları gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler:(Yarı Katı Döküm, Geridönüştürülmüş Alüminyum Alaşımı, İnert Gaz ile Yarı Katı Döküm, Entalpi Çubuğu ile Yarı Katı Döküm, Eğimli Plaka ile Yarı Katı Döküm, Yarı Katı Döküm Simülasyonu)

2023, 75 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE PRODUCTABILITY OF THE AISi9Cu3 ALLOY PART PRODUCED BY HIGH-PRESSURE CASTING METHOD USING SEMI-SOLID CASTING METHODS

Ferhat AYDOĞAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU

The use of aluminum in the automotive industry has increased in recent years. The reasons for preference of aluminum; weight reduction and corrosion resistance. Especially due to weight reduction goals, aluminum casting parts with higher strength properties are increasingly demanded.

In addition to weight reduction, it is requested that the aluminium alloy used is recycled. The common reason for these demands is national and international environmental regulations. For this reason, recycled alloy was chosen in the application of semi-solid casting methods in our study.

In this project, semi-solid casting methods have been researched and three different semi-solid casting methods (Cooling Slope Casting, Enthalpy Exchange Material, Gas Induced Semi-Solid) have been selected that can be applied in High Pressure Die Casting (HPDC). Simulation work, mold design, process design, trial production and reporting of results were carried out respectively in the project flow.

Keywords:(Semi-solid Casting, Recycled Aluminum Alloy, GISS, Semi-solid with EEM, Semi-Solid with Cooling Slope Casting, Semi-Solid Casting Simulation)

2023, 75 pages

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanı sıra korozyon direncinin iyi olması ve mukavemet değerlerinin özellikle alaşımlama ve ısıt işlemler sonucunda yüksek olabilmesi sebebiyle imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan ve her geçen gün kullanım alanları artan malzemelerdir. Bu malzemeler, bahsedilen özellikleri dolayısıyla otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otomotiv parçalarında araç hafifletme çalışmalarında demir-çelik parçalar yerine alüminyum parçaların kullanımı çok başvurulan bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Alüminyum yüksek basınçlı dökümde özellikle çevrim sürelerinin düşüklüğü ve ince kesitli parçaların üretimi açısından sağladığı avantajlar sebebiyle en çok kullanılan yöntemlerden biri olmaktadır. Otomotiv sektöründe alüminyumun başlıca tercih edilme nedenleri; ağırlık azaltımı ve korozyon dayanımıdır. Otomotiv sektöründeki ağırlık azaltma hedefleri sebebiyle giderek daha yüksek mukavemet özelliklerine sahip alüminyum döküm parçalar talep edilmektedir.

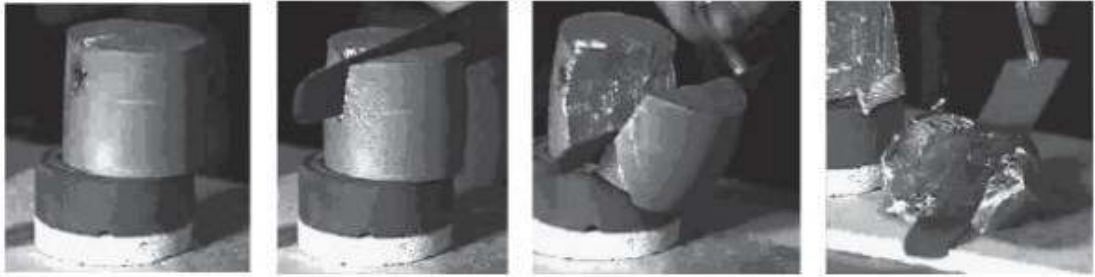
Demir döküm parçaların yerini alabilecek alüminyum alaşımlı döküm parçalarının sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışın yanında alüminyum alaşımlı döküm parçalarından beklenen mekanik özellikler ve metalgrafik özellikler artış göstermektedir.

Sıvı metal ile yüksek basınçlı döküm (YBD), yüksek verimlilik ve düşük üretim maliyetinin benzersiz özellikleri nedeniyle alüminyum alaşımlarının dökümünü yapmak için kullanılan en popüler işlemdir. Bununla birlikte, YBD tarafından üretilen Al alaşımları, kalıp doldurma sırasında gaz sıkışması nedeniyle çok sayıda porozite ve oksit içerir. Bu tür poroziteler, mekanik özellikleri ciddi şekilde bozabilir, ısıt işlem ve kaynak uygulama yoluyla daha fazla özellik geliştirmeyi engeller. Bugün otomotiv sektörüne yönelik pek çok parçanın üretimi alüminyum döküm yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Örneğin motor blokları dökme demir yerine alüminyum alaşımı ikame edilerek önemli derecede hafifletme sağlanmıştır. Bazı emniyet-kritik parçalardan beklenen uzama-tokluk değerlerine ise basınçlı dökümle ulaşmak mümkün olamamaktadır[1] Yüksek bütünlüğe sahip bileşenler

retmek için gelecek vaat eden teknolojilerden biri, tiksotroforming ve reoforming dahil olmak üzere yarı katı metal (SSM) işlemeleridir[2]

Metal alaşımların ve kompozitlerin yarı katı prosesleri, yarı katı halde dendritik olmayan mikro yapıya sahip malzemelerin tiksotropik davranışını kullanır. Bu davranışa dayalı yenilikçi üretim yöntemleri son 30 yıldır gelişmektedir ve 1970'lerin başlarında MIT'deki bilimsel çalışmalardan kaynaklanmaktadır[3]

Bu tiksotropik davranış bugün alüminyum ve magnezyum gibi pek çok alaşımın yarı-katı şekillendirme proseslerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Tanelerin küresel olması yarı-katı durumda kuvvet etkisindeyken viskozitesinin düşmesine ve böylece kolayca şekillendirilebilmesine olanak sağlar. Küresel tane yapısına sahip bir alaşım yarı-katı aralığa ısıtıldığında bıçak yardımıyla tereyağ gibi sürülebilir bir hale gelir[4]



şekil 1.1 Yarı-katı alaşımın tiksotropik davranışı



şekil 1.2 %30 katı-%70 sıvı Al-Si alaşımının tiksotropik davranışı [5]

rn kalitesinin yanısıra hali hazırda alçak basınçlı döküm ile üretilip T6 ısıt işlemi ile mekanik özellik spesifikasyonuna ulaşılan parçalarda, yarıkatı döküme

yönelik yoğun talep bulunmaktadır. Böyle bir eğilimin olması global ölçekte de bu yöne eğilimin artacağı öngörüsünü oluşturmuştur. İşbu proje'nin en önemli amacı yarı-katı döküm yeteneğinin kazanılması ve bunun yanında çevrim süresi, kalıp ömrü, mekanik özellikler, ıskarta oranı, mikroyapı vb. parametrelerin iyileşmesi sağlanmasıdır. Bu parametrelerin sağlanması durumunda maliyet avantajı ve ürün kalitesi elde edilecektir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Alüminyum Alaşımları

Otomotiv sektöründe artan güvenlik standartları nedeniyle, yeni nesil araçların gövde yapısının daha iyi yapısal bütünlüğe ve çarpışma sırasında enerji yutma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda yeni çevre kuralları nedeniyle karbon salınımının da daha düşük olması gerekmektedir. Motor ve şanzıman verimliliği, araç ağırlığı, aerodinamik ve yuvarlanma direnci, karbon emisyonlarını ve yakıt tüketimini etkileyen temel faktörlerdir. Bir arabanın 100 kg ağırlık tasarrufu, km başına 9 gram CO₂ tasarrufu sağlayabilmektedir. Bu nedenle, CO₂ emisyonunu azaltmak ve aynı zamanda performansı, sürüş kalitesini ve en önemlisi güvenliği korumak için en etkili önlemler olduğundan, araç ağırlığının azaltılması zorunludur [6]. Otomotiv yapısı tam araç ağırlığının yaklaşık% 40'ına sahip olduğundan, gövde yapısındaki ağırlık azaltımı, yakıt verimliliği, zararlı emisyon azaltımı ve hammadde tasarrufu sağlamanın önemli bir yoludur [7].

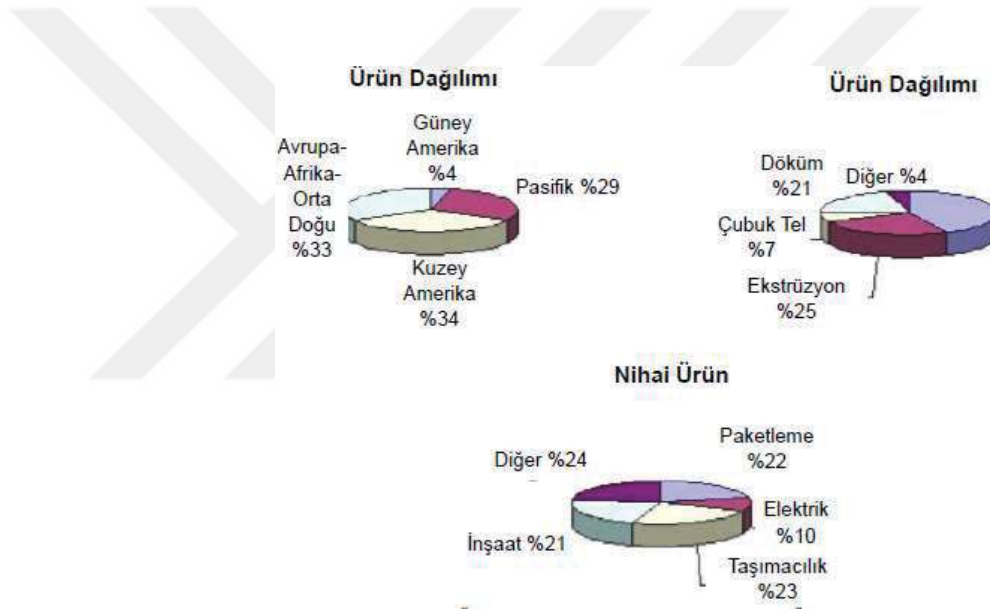
Çeşitli tasarım metodolojileri, alüminyum, magnezyum, kompozitler gibi yenilikçi malzeme seçenekleri ve doğru malzemelerin seçilmesi, araç gövde ağırlığının azaltılmasında en önemli etkidir. Alüminyum, maliyet, işlenebilirlik, korozyon direnci ve geri dönüşüm avantajları ve yaygın kullanımıyla otomotiv endüstrisinde kullanılacak malzemelerin başında gelmektedir [8].

Alüminyum, demir-çelik malzemelerden sonra, mekanik özelliklerinin üstünlüğü nedeniyle, çağımızın en çok kullanılan ikinci metalidir. Alüminyumun metal olarak özellikleri birçok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlamaktadır [9].

Alüminyumun aşağıdaki özellikleri kullanımının çok büyük bir hızla yaygınlaşmasına neden olmuş, böylelikle alüminyumu 21.yüzyıla damgasını vuran bir metal yapmıştır [10]. Şekil 2.1’de alüminyum ürünün dünyadaki bölgesel dağılım, ürün dağılımı ve nihai ürün olarak sınıflandırılması gösterilmiştir [11].

Alüminyumun kullanım oranının sürekli artmasına sebep olan özellikleri aşağıda yer almaktadır;

- Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,
- Korozyona karşı dayanımı,
- Alaşımlarının sağlamlık ve yumuşaklık açısından son derece çeşitli olması,
- Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve hijyenik koşullar,
- Uygulanan enerjiyi barındırma yeteneği,
- Geri dönüşebilir olması,
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği,
- Parlama ve alev almazlık,
- Magnetik nötralite,
- Kolay işlenebilme ve biçimlendirilebilmesi,
- Çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri,



Şekil 2.1 Alüminyum Ürünün Dünyadaki Bölgesel Dağılım, Ürün Dağılımı ve Nihai Ürün Olarak Sınıflandırılması [12]

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişmektedir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri silisyum, bakır, magnezyum, mangan ve çinkodur.

2.1.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları imal şekillerine göre dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmaktadır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımları, farklı mikroyapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Dövme alüminyum alaşımları külçe

veya kütük halinde dökülür, daha sonra haddeleme, ekstrüzyon veya dövme ile nihai ürünlere dönüştürülür, döküm alaşımları ise ergitme işlemi sonrası üretilecek parça şekline sahip kalıba dökülür, katılaştırılır [13].

Dövme yöntemi ile çeşitli ürünlerde döküm yöntemi ve diğer yöntemlere nazaran daha iyi bir içyapı oluşmaktadır. İçyapıda bulunan süreksizlikler plastik deformasyon ile giderilmektedir. Döküm yöntemi ile yapılan üretimlerde ise içyapıda bulunan süreksizlikleri gidermek ve istenilen yapının elde edilmesi amacı ile bazı önlemler ve işlemler gereklidir, mekanik özellikleri iyileştirme amacıyla döküm alaşımlarının bazıları ısıtılma prosesine tabi tutulmaktadır [14].

Alüminyum Birliği'nin dövme alüminyum alaşımları için takip ettiği sınıflandırma sistemi dört numara ile ifade edilmekte olup, bazı alaşımları belirtmek için numaraların ön veya arkasına harfler eklenmektedir. İlk rakam alüminyum serisi içerisinde kullanılan alaşım grubunu belirtmektedir. İkinci rakam alüminyum alaşımı içerisinde bulunan ana alaşımın kullanım miktarındaki değişimi nitelemektedir. Örneğin; orijinal kompozisyon için bu rakam her zaman sıfır (0) olurken, bir sonraki kullanım yüzde sınıfı için bu değeri bir (1) ve iki (2) gibi rakamlar takip etmektedir. Ana alaşımın kompozisyon içerisindeki kullanım miktarının 0.15% - 0.50% aralığında değişmesi kodlamanın ikinci rakamında artış ile ifade edilmektedir. Ek olarak malzeme içerisindeki katkı maddesi oranına da işaret etmektedir. Örneğin ikinci rakamın sıfır olduğu durumlarda işlem görmemiş alüminyum ana alaşımında kabul edilen katkı miktarı yüksek seviyede iken, özel istenen performans değerlerini sağlayabilmek için belirli prosesler veya eklemeler sonrası katışkı miktarının azaltılması amaçlanan alaşımlarda, alaşım serisi sıfır yerine sıralaması önem arz etmeksizin bir ile dokuz arasında bir rakam ile numaralandırılmıştır.

1xxx serisi alaşımlarında, üçüncü ve dördüncü rakamlar kompozisyon içerisinde bulunan alüminyum yüzdesi hakkında bilgi vermektedir. Örneğin 1060 alaşım serisinin kompozisyonunda minimum %99.60 oranında Al bulunduğunu belirtir.

Amerikan Alüminyum Birliği'ne göre, alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırması şu şekildedir [15]:

1XXX: Saf alüminyum. Kompozisyon içerisinde 99.00%'dan fazla alüminyum bulunmaktadır. 1xxx son iki rakam kompozisyon içerisindeki minimum alüminyum yüzde bilgisini vermektedir. 1xxx serisi alaşımlar ısıtılma olumlu yanıt vermezler. Plastik şekil verme ile pekleşme sonucu sertleşme ve mukavemet arttırımı sağlanabilir. Sertleştirme sonrası bile düşük mukavemet değerlerine sahiptirler. Kolay şekillendirilebilirlikleri ve süneklik değerleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.

2XXX: Al-Cu alaşımları. Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir. Çökeltme prosesinde bakır alüminyum fazı içerisinde çözünbilme kabiliyetine sahip olduğundan ısıtılma prosesine son derece uygundur. Bu sayede yüksek seviye mukavemet değerleri sağlanabilmektedir, havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3XXX: Al-Mn alaşımları. Esas alaşım elementi mangandır. Isıtılma prosesine yanıt vermezler. Plastik şekil verme ile mukavemet kazandırılabilir. Yüksek korozyon direncine sahip uygulamalarda tercih edilir. Kaynak kabiliyeti oldukça iyidir. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.

4XXX: Al-Si alaşımları. Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genişleme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.

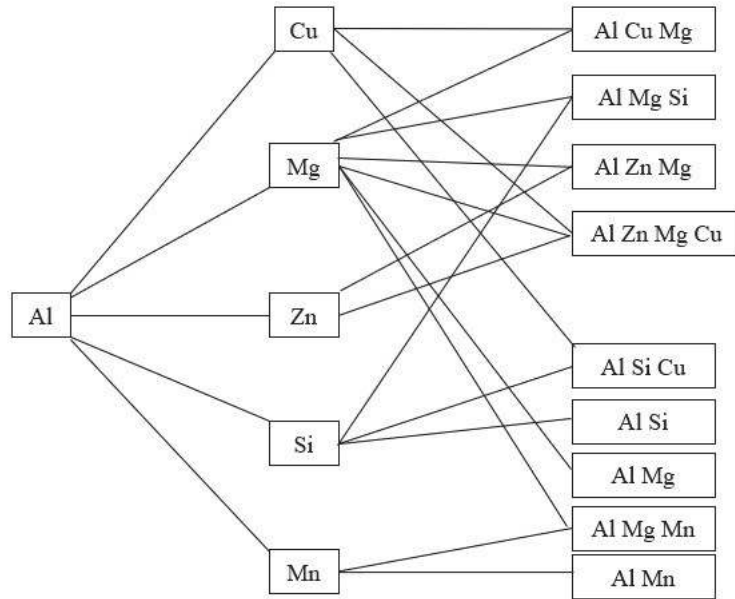
5XXX: Al-Mg alaşımları. Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Enerji sönümleme kabiliyetleri yüksektir. Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.

6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Kompozisyon içerisinde Mg_2Si fazında bulunur ve çok iyi çökeltme sertleşme kabiliyetine sahiptir. Bu sebep ile ısıtılma sonrası yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.

7XXX: Al-Zn alaşımlar. Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğerk yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.

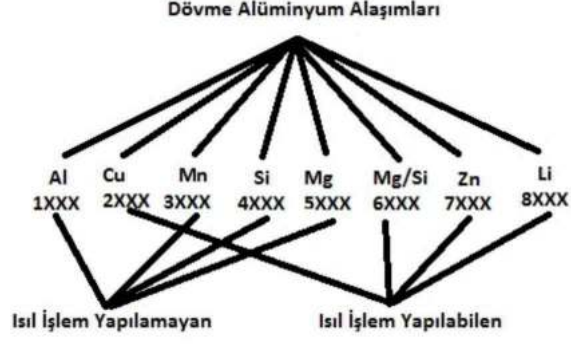
8XXX: Al-Li alaşımları: Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisi de yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğerk Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.

Şekil 2.2’de alüminyumun alaşım elementleriyle çeşitli kombinasyonlarda yapılan alaşımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Alüminyumun alaşım elementleriyle çeşitli kombinasyonlarda yapılan alaşımlarının şematik gösterimi [16]

1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi dövme alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Bu alaşımlar sadece şekil değıştirme yolu ile sertleştirilebilirler. 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alaşımlar ise ısıl işlem ile sertleştirilebilmektedirler. Isıl işlem uygulanabilirliğine göre dövme alaşımları şekil 2.3’te şematik olarak gösterilmiştir [17].



Şekil 2.3 Isıl işlem uygulanabilirliğine göre dövme alaşımları [18]

Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum döküm alaşımları aşağıdaki harflendirme ile sınıflandırılmaktadır [18].

1XX.X: Saf alüminyum.

2XX.X: Esas alaşım elementi bakırdır.

3XX.X: Esas alaşım elementi silisyumdur. Bakır ve magnezyum gibi başka alaşım elementleri de bulunabilir. Sanayide kullanılan döküm alaşımlarının % 90'ı 3XX.X serisidir.

4XX.X: Esas alaşım elementi silisyumdur.

5XX.X: Esas alaşım elementi magnezyumdur.

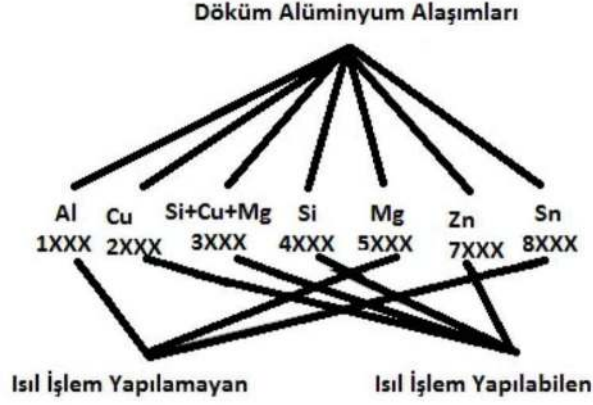
6XX.X: Bu seri numarası kullanılmamaktadır.

7XX.X: Esas alaşım elementi çinkodur.

8XX.X: Esas alaşım elementi kalaydır

2.1.2 Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem

Isıl işlem uygulanabilirliğine göre döküm alaşımları şekil 2.4'de şematik olarak gösterilmiştir [18].



Şekil 2.4 Isıl işlem uygulanabilirliğine göre döküm alaşımları [18]

Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarında; bazı ısıl işlemlerle çökelme sertleşmesi elde edilmektedir. Bahsedilen ısıl işlem, alüminyum alaşımlarda istenilen dayanımı elde etmek için uygulanan bir prosestir. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise çökelmeyle sertleştirilemez, dayanımlarının artırılabilmesi sadece soğuk işlemeyle mümkündür. Katı eriyik ve pekleşme mukavemetlendirmesiyle mukavemetlendirilirler [8].

Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları tablo 2.1’te tanımlanmıştır.

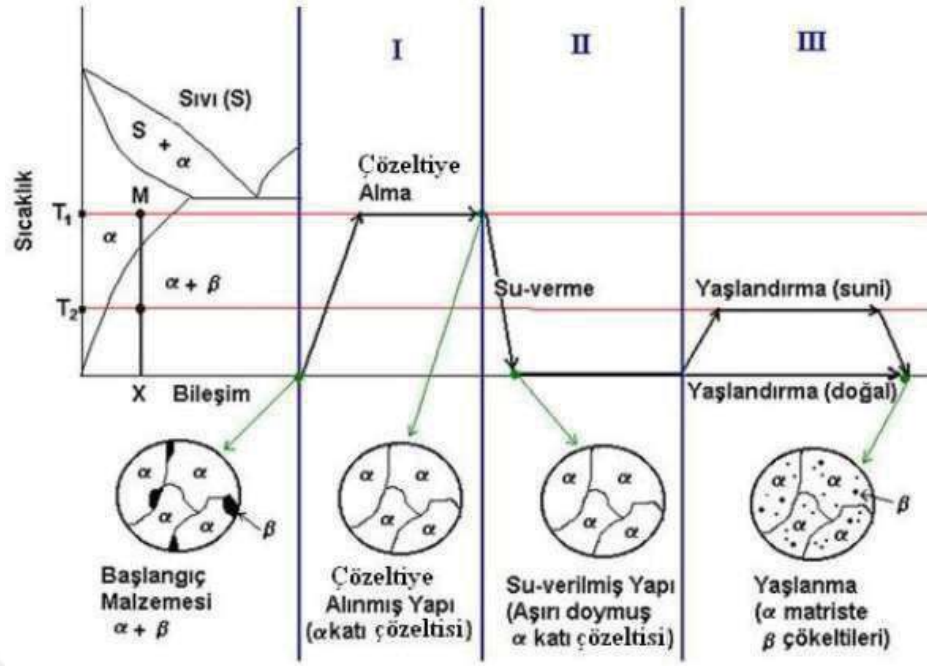
Tablo 2.1 Alüminyum alaşımları temper seri numaralarının tanımları [8]

Temper Kodu	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözeltili ısıtma işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltili ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltili ısıtma işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltili ısıtma işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözeltili ısıtma işlemi görmüş ve kararlılaştırılmış
T8	Çözeltili ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltili ısıtma işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

Malzemenin yapısını değiştirip mukavemet elde edilen yöntemlerden birisi çökelme sertleştirme işlemidir. Çökelme sertleştirme tanım olarak, malzeme içinde daha az miktarda bulunan ikinci fazın tanecikler halinde ana faz içerisinde çökeltilmesinin sağlanması ve bu sayede malzemede mukavemet artışının elde edilmesidir. Bu yöntem malzemelerin mukavemetlerini artırmada kullanılan en önemli yöntemlerden biridir ve genellikle demirdışı metal alaşımlarında (Al, Ti, Mg) kullanım alanına sahiptir. Çökelme sertleştirme işleminde mukavemetin artmasının temel

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarında yaşlanma ısıl işlemi, üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu adımlar; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma adımlarıdır. Şekil 2.6’da bu adımlar gösterilmektedir [13].

12

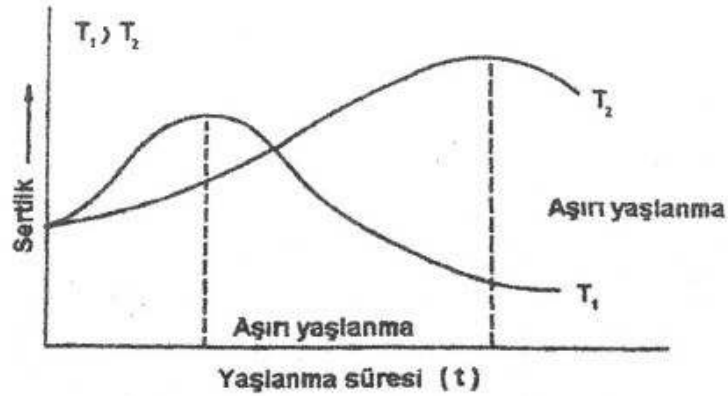


Şekil 2.6 Çökeltme sertleşmesinin uygulama adımları [13]

Şekil 2.5 ve şekil 2.6 birlikte değerlendirildiğinde, öncelikle; X bileşimindeki α ve β fazları içeren alaşım, tek fazlı yapı elde etmek için T_1 sıcaklığına kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta β fazı tamamen çözülene kadar tutulur. Bu işlem şekil 2.6'da birinci ve ikinci oklar ile temsil edilmiş olan solüsyona alma işlemidir. Solüsyona alma işlemi çözme tavlama veya homojenleştirme olarak da adlandırılabilir. Bu işlem sonrasında su verme işlemiyle alaşım oda sıcaklığına ani olarak soğutulur ve bu sıcaklıkta aşırı doymuş α katı eriyiği elde edilir. Bundan sonra alaşım kendi halinde oda sıcaklığında bırakılarak doğal yaşlandırmaya veya belirli bir sıcaklığa çıkılarak yapay yaşlandırmaya tabi tutulabilir. Bu yaşlanma aşamasında α katı çözeltisi içerisinde bulunan β fazının küçük tanecikler halinde çökmesi sağlanmış olur. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi belirli bir sıcaklığa çıkılarak yapılan yapay yaşlandırma işlemi sürenin kısılmasını sağlamaktadır, fakat daha yüksek sıcaklıkta ve daha az sürede yapılan yaşlandırma işlemlerinin daha düşük sıcaklıkta ve uzun sürelerde yapılan yaşlandırmaya göre mekanik özellikler üzerinde bazı küçük olumsuz etkileri mevcuttur [13].

Yaşlandırma işlemi sonrasında mukavemetin artmasının temeli dislokasyon hareketlerine dayanır. Yaşlandırma sonrası oluşan çökelti parçacıkları dislokasyon kaymasını engelleyerek alaşımın mukavemetinin artmasını sağlar [13].

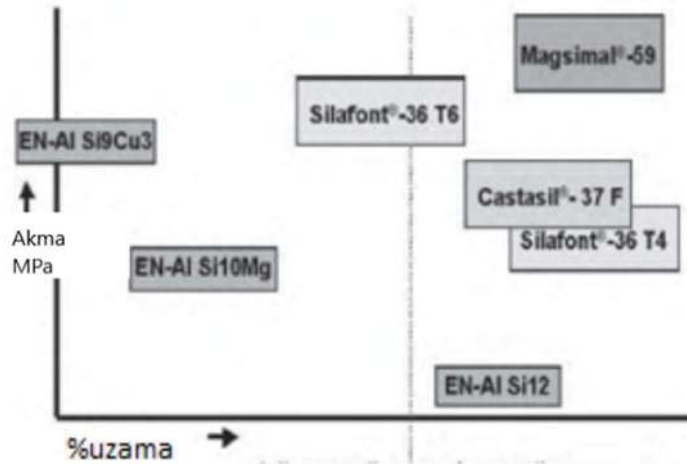
Yaşlanma aşamasının ilk evrelerinde oluşan çökelti boyutu çok küçük olduğu için dislokasyon hareketlerini etkilemeleri zordur ve dolayısıyla çökelti başlangıcında malzemenin sertliğinde veya mukavemetinde önemli bir değişiklik görülmez. Zaman etkisiyle artmaya başlayan çökelti boyutları dislokasyon hareketlerini daha fazla engellemeye başlar ve mukavemet miktarı belirgin düzeyde artar. Yaşlanma süresinin çok fazla uzatılması da aşırı yaşlanma olarak adlandırılan ve mukavemetin düşmesine sebep olan bir olaya sebep olur. Aşırı yaşlanma durumunda çökelti boyutu çok fazla büyümüştür ve çökelti sayısı azalmıştır, bu durum ters etki yaparak malzemenin mukavemetinde düşüş meydana getirir. Yaşlanma süresine bağlı olarak alaşım mukavemetinin değişimi ve aşırı yaşlanma durumu şekil 2.7’de görülmektedir [13].



Şekil 2.7 Sabit sıcaklıkta yaşlanmanın süresine bağlı olarak alaşım mukavemetinin değişimi [13]

2.1.3 AC 46000 (AlSi9Cu3) Alaşımı ve Özellikleri

Otomotiv endüstrisi, yeni kalıp döküm alaşımlarının geliştirilmesi ve üretimi için itici güç sağlamıştır. Teknik açıdan, standart alüminyum alaşımlarının uygulama alanı sınırlıdır. Bu alaşımlar temel olarak basit bir gereksinim profiline sahip, genellikle düşük ağırlık ve belirli bir akma dayanımına sahip parçalar için kullanılır. Şekil 2.8'deki değerlendirme, standart alaşımların sınırlarını göstermektedir. AlSi9Cu3 tipi, yüksek basınçlı dökümde esas olarak süneklik veya korozyona karşı iyi dirençle ilgili herhangi bir gereksinimi olmayan parçalar için kullanılmaktadır. Bir AlSi12 alaşımı, bir kalıba döküldüğünde belirli bir süneklik sağlar, ancak kayda değer bir akma dayanımına sahip değildir [14].



Şekil 2.8 Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklere göre sıralaması [14]

AlSi9Cu3 alaşımı mekanik özellikler açısından yüksek değerler sağlayamasa da ikincil olarak üretilmesi ve tablo 2.2’de görüldüğü gibi kalıp ömründeki pozitif katkıları sebebiyle yoğun bir kullanım alanına sahiptir.

Tablo 2.2 AlSi9Cu3(Fe) ile diğer yüksek basınçlı döküm alaşımlarının karşılaştırılması [19]

Alaşım Tipi	AlSi10MnMg	AlSi10Mg(Fe)	AlSi9Cu3(Fe)
Isıl İşlem Uygulanabilirliği	çok iyi	iyi	orta
Sıcak Yırtılma Eğilimi	Düşük	Düşük	Düşük
Yapışma Eğilimi	Düşük	Düşük	Düşük
Kalıp Ömrü	>%80	>%80	100%
Lineer Çekinti	%0,4-0,6	%0,4-0,6	%0,4-0,6

Yüksek uzama değerlerini sağlayabilmek için, yapıda meydana gelen plaka tipi AlFeSi fazlarının payını olabildiğince düşük tutmak amacıyla alaşımda demir içeriği olabildiğince düşüktür. Bu fazlar, morfolojilerinden dolayı ve özellikle dinamik yüklerin varlığında çatlak oluşumunun başlangıç noktası olarak hareket ettikleri için düşük mukavemet ve uzama değerlerinin temel sebebidir [19].

2.2 Yüksek Basınçlı Döküm

Otomobil hafifliğinin ana yolu, demir-çelik parçalar yerine alüminyum parçaların veya komponentlerinin kullanılması ile sağlanmaktadır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi, parçaları şekillendirmek için kullanılan en popüler döküm yöntemlerinden biridir.

Basınçlı döküm, büyük hacimli döküm baskı türüne yönelik artan ihtiyaca yanıt olarak 1820'lerin başlarında ortaya çıkmıştır. Metalik kalıplara basınç altında metal enjeksiyonu ilk başta el krankları kullanılarak tamamen mekanik olarak uygulanmıştır. Daha sonra, uygulamalar bisiklet, pikap ve tüketici dayanıklı parçaları içerecek şekilde büyüdükçe pnömatik ve hidrolik sistemler kullanılmıştır. 1870 yılına gelindiğinde, kalıp döküm makineleri şaşırtıcı derecede otomasyonla kurşun ve diğer düşük sıcaklık metalleri üretmiştir. Basınçlı döküm alüminyumdaki ilerleme, 1920'lerde soğuk hazneli basınçlı döküm işleminin gelişmesine kadar sınırlı olarak kalmıştır [15].

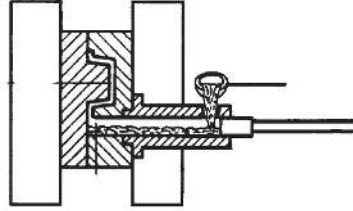
Basınçlı döküm, ergimiş alaşımın metal bir kalıba döküldüğü ve basınca tabi tutulduğu süreci tanımlamaktadır. Bu, aşağıdaki etkileri sağlamaktadır [16]

- Kalıp boşluğunun çok hızlı ve iyi şekilde doldurulması,
- Katılaşma çekintisinin beslenmesi,
- İnce taneli kristal yapı,
- Karmaşık biçimli küçük parçaların dökülebilmesi,
- İnce cidarlı yapıda parçalar üretilebilmesi

Genellikle metal enjeksiyon olarak bilinen yüksek basınçlı dökümde, ergimiş alaşım, yüksek hassasiyette bölünmüş bir metal kalıba basınç altında enjekte edilmektedir. Alüminyum alaşımları için en yaygın kullanılan döküm işlemidir. Üretim oranları hızlıdır, süreç yüksek oranda otomatikleştirilebilir ve boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi mükemmeldir. İnce cidarlı bileşenler mümkündür ve delikler, oluklar ve girintiler dökülebildiği için döküm parçada çok az veya hiç işlemeye gerek yoktur [17].

Alüminyum alaşımları soğuk kamaralı basınçlı döküm makinelerinde dökülmektedir. Kalıp, genellikle metalin enjekte edildiği iki çekirdekten oluşan takım

eliğinden yapılmaktadır. Kalıp çekirdekleri kapatıldıktan sonra yüksek enjeksiyon basıncına dayanmak için hidrolik olarak birbirine kilitlenmektedir. Ergimiş metal kovana verildikten sonra elik bir piston 100 MPa'ya (1000 bar) kadar bir basıncı altında sıvı metali kalıp boşluğuna enjekte etmektedir. şekil 2.9 soğuk kamaralı basınçlı döküm mekanizmasını göstermektedir [17].

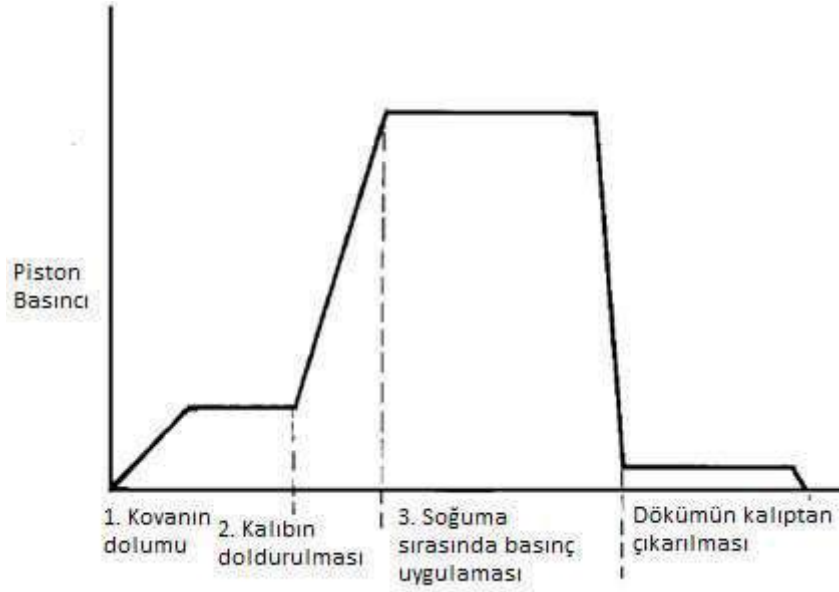


şekil 2.9 Soğuk Kamaralı Basınçlı Alüminyum Döküm [17]

Kalıp doldurma süreleri çok kısadır, 3–4 mm et kalınlığına sahip dökümler 0,1 saniyeden daha kısa sürede doldurulmaktadır. Metal, su soğutmalı kalıpla iyi termal temas nedeniyle hızla katılaşır ve bitmiş dökümü çıkarmak için kalıp çekirdekleri açılır, daha sonra işlem tekrarlanmaktadır. evrim süreleri, parçaların boyutuna ve kesit kalınlığına bağlı olarak değişmektedir [17].

şekil 2.10'de gösterilen basınçlı döküm işleminde üç aşama vardır [17]:

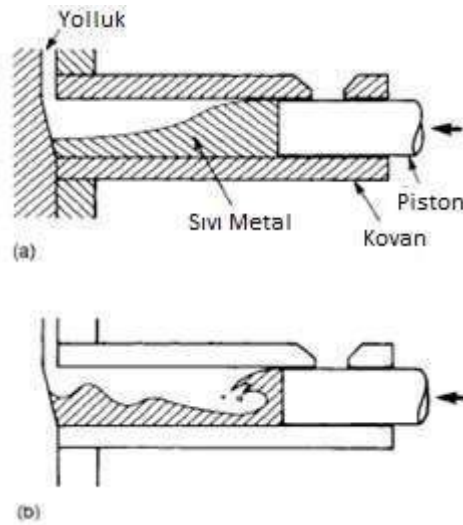
- 1- Kovanın dolumu
- 2- Kalıbın doldurulması
- 3- Soğuma sırasında basınç uygulanması



Şekil 2.10 Basınçlı Döküm İşlemi [17]

Son yıllarda bu aşamaların hassas bir şekilde kontrol edilmesiyle pres dökümlerin iç kalitesi artmıştır. 0,1 saniye kadar kısa kalıp doldurma süreleri ile, metal akış hızları çok yüksektir (yaklaşık 50 m / sn) [17].

Piston hızının kontrolü, kovandaki türbülansı azaltabilir ve bu sayede hava hapsolmesini azaltır ve döküm gözenekliliğini iyileştirir, şekil 2.11’de enjeksiyonun kontrollü ve kontrolsüz ilk aşamalarını karşılaştıran, soğuk kamaralı bir pres döküm kovanındaki enjeksiyonu gösterilmiştir [17].



Şekil 2.11 Enjeksiyonun kontrollü (a) ve kontrolsüz (b) ilk aşamalarını karşılaştıran, soğuk kamaralı bir pres döküm kovanındaki enjeksiyonu [17]

Enjeksiyon strokunun basınç profilini kontrol etmek, kalıp dolumu bitmeden pistonu yavaşlatarak strok sonunda hidrolik darbeyi azaltırken kalıbın hızlı bir şekilde doldurulmasını sağlamaktadır. Bu durum çapağı azaltmakta ve dökümün boyutsal doğruluğunu artırmaktadır. Maksimum basınç uygulaması katılaşma başlayana kadar ertelenerek, ardından kalan sıvı metal üzerinde çapak oluşumuna neden olmadan mümkün olduğunca yüksek bir basınç sağlamak için basınç uygulanmaktadır. Piston hızını ve basıncını ölçen dönüştürücüler, hızlı, gerçek zamanlı elektronik kontrol sistemleri aracılığıyla doldurmanın üç aşamasını hassas bir şekilde kontrol etmek için kullanılmaktadır [17].

2.3 Yarı Katı Döküm

Sıvı metal ile YBD, yüksek verimlilik ve düşük üretim maliyeti özellikleri nedeniyle alüminyum alaşımlarının dökümünü yapmak için kullanılan en popüler işlemdir. Bununla birlikte, YBD tarafından üretilen Al alaşımları, kalıp doldurma sırasında gaz sıkışması nedeniyle çok sayıda porozite ve oksit içerir. Bu tür poroziteler, mekanik özellikleri ciddi şekilde bozabilir, ısıl işlem ve kaynak uygulama yoluyla daha fazla özellik geliştirmeyi engeller. Bugün otomotiv sektörüne yönelik pek çok parçanın üretimi alüminyum döküm yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Örneğin motor blokları dökme demir yerine alüminyum alaşımı ikame edilerek önemli derecede hafifletme sağlanmıştır. Bazı emniyet-kritik parçalardan beklenen uzama/tokluk değerlerine ise basınçlı dökümle ulaşmak mümkün olamamaktadır. Yüksek bütünlüğe sahip bileşenler üretmek için gelecek vaat eden teknolojilerden biri, tiksotroforming ve reoforming dahil olmak üzere yarı katı metal (SSM) işlemleridir. Metal alaşımların ve kompozitlerin yarı katı prosesleri, yarı katı halde dendritik olmayan mikro yapıya sahip malzemelerin tiksotropik davranışını kullanır.[5]

Yarı katı döküm yöntemi, döküm işlemi sırasında metalin yarı katı (viskoelastik) fazda olduğu bir döküm yöntemidir. Bu yöntemde, metalin ergime noktasının altında bir sıcaklıkta sıvı metal, özel olarak hazırlanmış bir enjeksiyon kalıbına enjekte edilir. Yarı katı hale geldiğinde, metalin akışkanlığı azalır fakat tiksotropik davranışa sahip olur. Bu kalıpta laminar bir doluma sebep olacağı için daha

iyi bir döküm kalitesi sağlar. Ayrıca, yarı katı haldeki metalin yüksek viskozitesi, kalıp içindeki boşlukları daha iyi doldurmasına yardımcı olur.

Yarı katı döküm yöntemi, daha az porozite ve daha iyi bir malzeme homojenitesi sağlayarak, geleneksel döküm yöntemlerine göre daha yüksek bir mekanik özelliklere sahip parçalar üretmek için kullanılır. Bu yöntem aynı zamanda, işlenebilirliği ve yüzey kalitesini arttıran daha az pürüzlü yüzeyler sağlar. Yarı katı döküm yöntemi, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde ve daha yüksek kalite ve verimlilik gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yarı katı dökümün ana avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir;

Avantajlar;

- Enerji verimliliği: aynı alüminyum alaşımı için döküm enerji gerekliliği yarı-katı şekillendirmeye göre %35 daha fazladır [5]
- Kalıbın hava sıkışması ve çekinti porozitesi olmadan laminar bir şekilde doldurması, parçalara yüksek bütünlük sağlar (ince cidarlı bölümler dahil) ve proses daha yüksek mukavemetli olup ısıtma işlem uygulamalarına olanak sağlar.
- Daha düşük işlem sıcaklıkları, kalıp üzerindeki termal şoku azaltır, kalıp ömrünü uzatır.
- Kalıp üzerindeki daha düşük etki, aynı zamanda hızlı prototipleme kalıpları olasılığını da beraberinde getirir.
- İnce, tek tip küresel mikroyapılar gelişmiş özellikler kazandırır.
- Katılaşma sırasında düşük hacimsel büzülme olması ile nihai forma yakın parçalar elde edilir, böylece imalat maliyetleri azalır. Maliyet düşüşünün %20-50 arasında olduğu söylenmektedir.
- Yüzey kalitesi geleneksel metotlara göre daha iyidir.
- Korozyon direnci daha yüksektir. Özellikle çukurcuk korozyon direncinin daha yüksek olduğu incelenmiştir.
- Ağırlık hafifletmeye olanak sağlar.

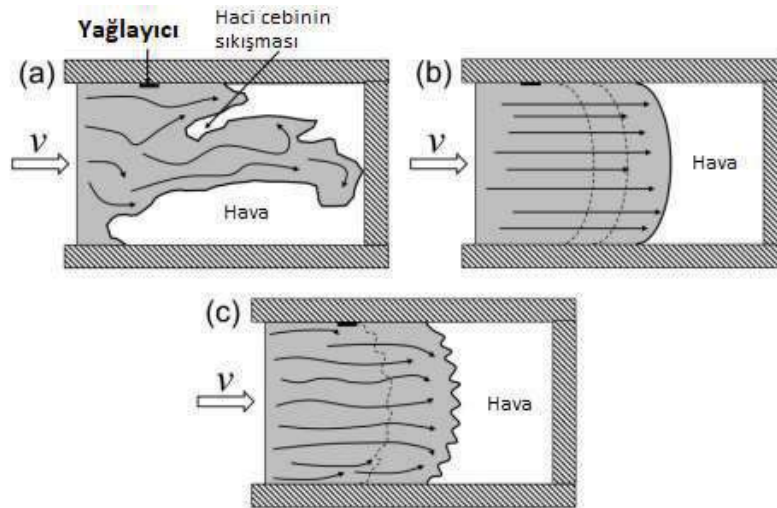
Dezavantajlar;

- Sürecin yeni bileşenlere uygulanmasını kolaylaştırmak için süreç bilgisi ve deneyimi sürekli olarak oluşturulmalıdır.
- Personel en azından başlangıçta geleneksel süreçlere göre daha yüksek düzeyde eğitim ve beceriye ihtiyaç duyar.

- Sıcaklık kontrolü; Yarı katı haldeki katı oranı ve viskozitesi, sıcaklığa çok bağlıdır. Yarı katı bölgede dar bir sıcaklık aralığına sahip alaşımlar, sıcaklığın doğru kontrolünü gerektirir.
- Homojen olmayan ısıtma nedeniyle sıvı ayrılması, bileşende muntazam olmayan kompozisyona neden olabilir.[5]

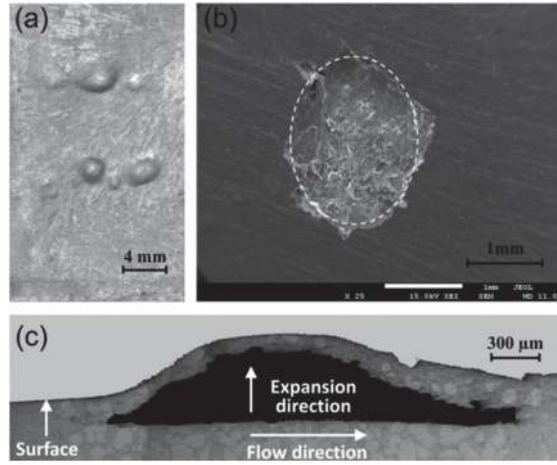
Yarı katı döküm ile ilgili yapılan çalışmalara ait literatür bilgileri aşağıdaki şekilde paylaşılmaktadır.

Konvansiyonel YBD ile üretilen bileşenler, çözelti ısıt işlemleri sırasında yüzeyde kabarmaya neden olan hapsedilmiş hava ve yağlayıcılar gibi döküm kusurlarının varlığı nedeniyle tipik olarak ısıt işleme tabi tutulmaz[20] YBD metodu ile üretilen parçalarda döküm sırasında hava sıkışmasından dolayı T6 ısıt işlem uygulamak kabarcık problemine neden olabilmektedir. Bu sebeple yüksek mekanik özellik beklentilerinde tercih edilmemektedir. Yarı katı döküm yönteminde laminar dolum sağlanabildiğinde hava sıkışmaları engellenip bu problem çözülmektedir ve T6 ısıt işlemi uygulanmaktadır. Şekil 2.12’de grafik çizimler ile yarı katı döküm ve YBD proseslerindeki hava sıkışması gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Farklı akış tiplerini gösteren grafik çizimler (a) Konvansiyonel yüksek basınçlı dökümde düzensiz ve türbülanslı akış, (b) Yarı katı dökümde yüksek kararlılığa sahip düzensiz ve laminar akış ve (c) Belirli bir sıcaklıkta bir miktar kararsızlığa sahip düzensiz ve laminar akış yarı katı/gaz arayüzü [20]

Sıkışan havanın sıcaklıkla birlikte blistere dönüşümü şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 a) blister tipik görüntüsü, b) blister iç görünümü, c) blister yandan görünümü[20]

Yücel Birol [21] çalışmasında, katı-sıvı aralığına soğutma sırasında karıştırma ve soğutma uygulamalarının tane boyutlarının küreselleşmesinde ve küçülmesindeki etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada mikroyapıdaki küreselliğin katı oranı arttıkça iyileştiği gözlemlenmiştir. En iyi küreselliğe ulaşılan numune %35 katı oranına sahiptir.

Zihao Yuan ve ark. [22] çalışmalarında, AC 46000 alaşımında yüksek basınçlı döküm (YBD) parçalarında ısıtma işlemi çalışmaları gerçekleştirmiştir. Yüksek basınçlı dökümde dolum sırasında oluşacak gaz boşluklarının çözeltiye alma sırasında blister oluşturacağı öngörülüp vakum sistemi kullanılmıştır. Parçaların ısıtma işlemi 475°C - 525°C sıcaklıkları arasında 1-8 saat sürelerinde çözeltiye alma, 150°C sıcaklığında 12-48 saat sürelerinde yaşlandırma işlemleri yapılmıştır. Vakum desteği sayesinde çözeltiye alma sonrasında yüzeyde bir bozulma gözlenmemiştir. Ayrıca yaşlandırma uygulaması ile 80 HV sertliğe sahip parçanın 140HV sertlik değerlerine kadar ulaştığı görülmüştür.

GUO Hongmin ve ark. [23] AC46000 ve A356 alüminyum alaşımlarında yarı katı dökümler gerçekleştirerek diğer döküm yöntemlerine göre mekanik özellik karşılaştırmaları yapmışlardır. LSPSF adı verilen 90 devir/dk hızında dönen soğutmalı ve eğimli silindir ile yarı katı metal hazırlanıp yüksek basınçta dökümleri

gerçekleştirmişlerdir. A356 alaşımı için döküme başlama sıcaklıkları 645-660°C, AC46000 alaşımı için 620-635°C olarak belirlemişlerdir. İki alaşım için de küresel yapı elde etmeyi başarmışlardır fakat mekanik özellik olarak A356 alaşımından daha iyi sonuç almışlardır. A356 alaşımının diğer döküm yöntemleri ile mekanik özelliklerini karşılaştırdıklarında özellikle T6 ısıtıl işlemi uygulanabilmesi sebebiyle üstünlük sağlayabilmişlerdir.

S.G. Shabestari ve E. Parshizfard [24] AC46000 alaşımının içyapısını 0,7%, 1,5%, 3% Fe oranlarında incelemişlerdir. %30-50 katı oranını 577-579 °C sıcaklık aralığında elde etmişlerdir. Mikroyapı ve SEM incelemelerinde α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂, Al₂Cu intermetalik yapıları görülmüştür. 577 °C sıcaklığa ısıtılıp tiksodökmeye yapıldığında mekanik özelliklerin iyileştiği özellikle %uzamanın arttığı görülmüştür.

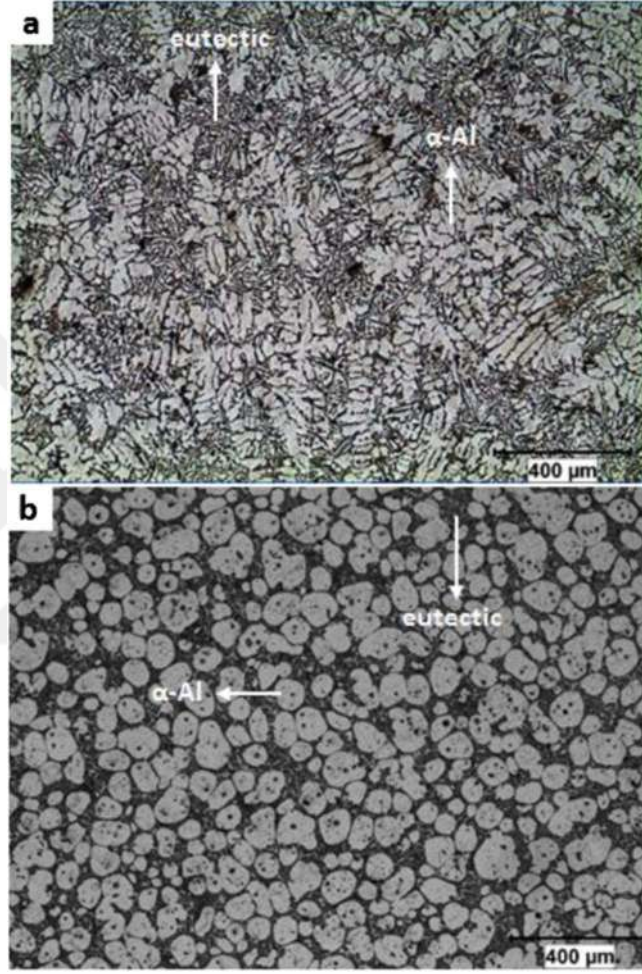
Simge Gencalp Irizalp ve Nurşen Saklakoğlu [25] çalışmalarında, AC46000 (A380) alaşımında gravite döküm ve tiksodöküm yaparak α -Fe, β -Fe intermetalik konsantrasyonu, α -Al morfolojisi ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Demir esaslı çökeltilerin genelde α -Fe(Al₁₅Si₂(Fe,Mn)₃) veya β -Fe(Al₁₅FeSi) kristaller şeklinde olduğu görülmüştür. Çalışmada elde edilen mekanik özellikler gravite döküm mekanik özellikleri ile Tablo 2.3'te karşılaştırılmıştır.

Table 2.3 Tikso döküm ve Gravite döküm Mekanik Özellik Karşılaştırma

Alloy	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	%Uzama	Sertlik (HB)
Thikso Döküm - AC46000(A380)	240	190	3,5	75
Gravite Döküm – AC46000(A380)	200	150	2,0	65

Simge Gencalp Irizalp ve Nurşen Saklakoğlu'nun çalışmasında tiksodöküm ile Şekil 2.14'deki gibi ince ve küresel α -Al taneli mikroyapılar elde edilmiştir. Geleneksel gravite dökümde ise kaba α -Al taneleri ve dendritik yapı gözlemlenmiştir.

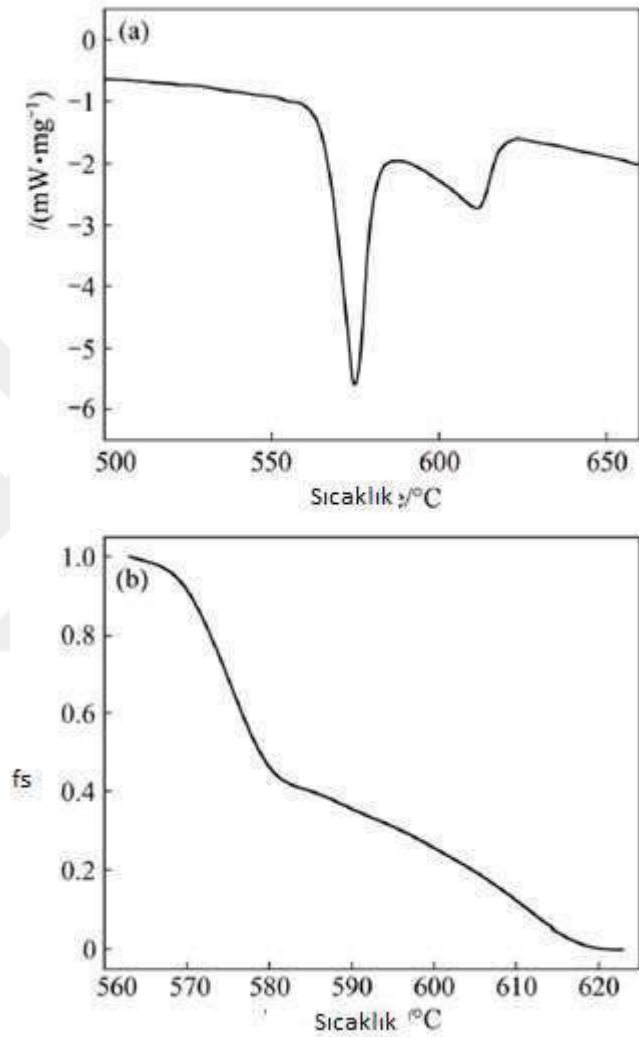
İntermetalik bileşiklerin morfolojisi Tikso dökümde ve gravite dökümde farklı olarak gözlemlenmiştir. Tikso dökümde β -Al₅FeSi intermetalik küçük levha morfolojisinde ve Q-Al₂Cu intermetalik parçacık halindeyken, gravite dökümde β -Al₅FeSi intermetalik iğne benzeri morfolojiye ve Q-Al₂Cu intermetalik ince levha formunda gözlemlenmiştir.[25]



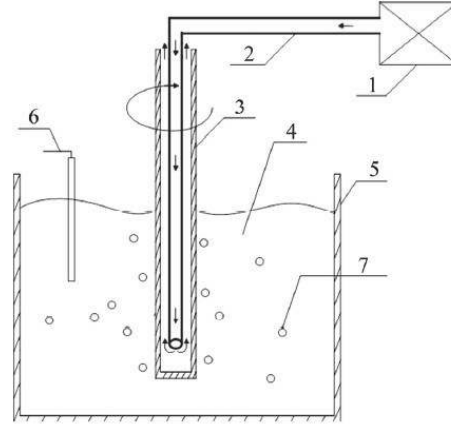
Şekil 2.14 AC 46000 alaşımlı numune mikroyapıları (a) gravite döküm ve (b) tikso döküm[25]

Ming-fan QI ve ark.[26] çalışmalarında Al-8Si alaşımında gaz soğutmalı karıştırıcı çubuk (ACSR) ile şekil 2.16'da görüldüğü gibi yarı katı malzeme hazırlayarak yarı katı döküm gerçekleştirmişlerdir. Farklı gaz debileri verilerek hazırlanan yarı katı metal ile yapılan Yüksek Basıncılı Döküm(YBD) numunelerinin DSC analizleri şekil 2.15'de, mikroyapıları şekil 2.17'de incelenmiştir. Küresel α -Al parçacıkları ACSR sistemiyle hazırlanan yarı katı metal ile YBD ile elde edilmiştir.

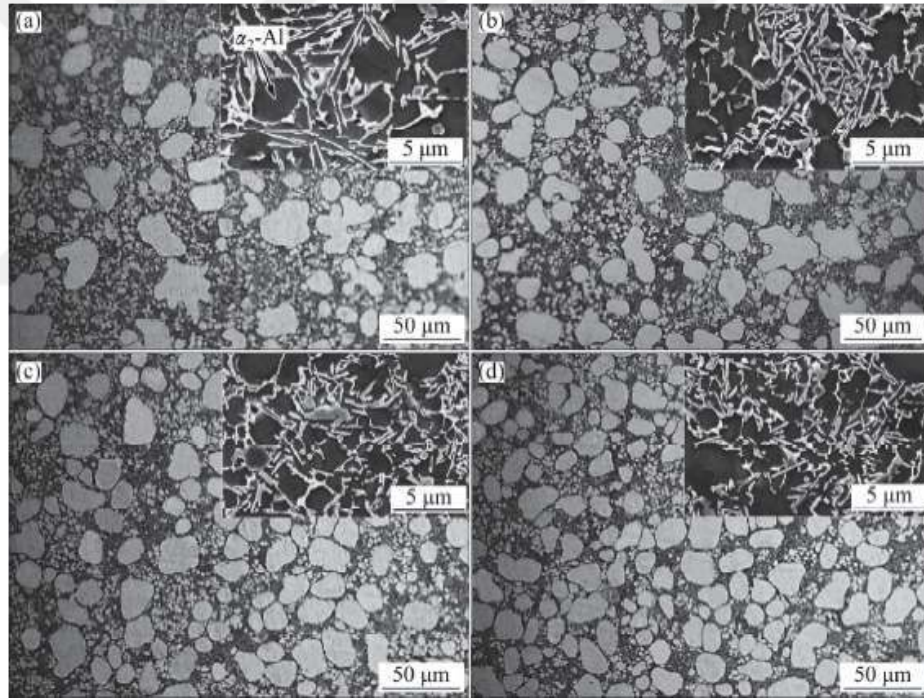
Elde edilen küresel yapıların boyutunun ve küresellik oranının hava debisi arttıkça iyileştiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda çalışmada ACSR yarı katı döküm ile elde edilen parçaların mekanik özellikleri YBD parçalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada Çekme Mukavemeti, Akma Mukavemeti, %Uzama, Sertlik, Termal iletkenlik sırasıyla %20, %15, %88, %13 ve %10 oranında arttığı görülmüştür.



Şekil 2.15 (a)Al-8Si alaşımının DSC analizi ve (b)katı fraksiyonu/sıcaklık grafiği[26]



Şekil 2.16 ACSR Sisteminin şematik görünümü (1-Hava kompresörü; 2-Hava akış yolu; 3-Karıştırma Çubuğu; 4-Ergimiş Metal; 5-Pota; 6-Thermocouple; 7;Birincil α -Al partikül)[26]



Şekil 2.17 Farklı debilerde yapılan yarı katı YBD döküm mikroyapıları: (a) 0 L/s; (b) 1 L/s; (c) 3 L/s; (d) 5 L/s[26]

AC 46000 (AlSi9Cu3) sekonder alüminyum alaşımı genellikle yüksek basınçlı dökümde tokluk ve mukavemet beklentisi yüksek olmayan parçalar için kullanılmaktadır.

Yarı katı döküm metodunda geridönüşüm ile elde edilen AC 46000 alaşımı çokça çalışılmaktadır ve bu çalışmalar neticesinde yüksek mukavemet ve yüksek tokluk gösterebilecek seviyede %uzama değerine sahip parçalar elde edilmesi hedeflenmektedir ve çalışmalar genellikle numune dökümleri boyutlarında kalmaktadır. Bu tez çalışmasında AC 46000 alaşımında farklı yarı katı döküm yöntemlerini YBD tezgahına uyarlayarak parça dökümleri yapılmıştır. Parça dökümlerinden önce yarı katı hazırlama düzenekleri tasarlanıp imal edilmiştir ve parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ile YBD tezgahında parça dökümleri gerçekleştirilmiştir ve YBD dökümünden elde edilen parçalarla mekanik, metalografik karşılaştırmalar yapılmıştır.

Projenin en önemli adımlarından birisi küresel tane elde edilmesi aşamasıdır ve bu konuda literatürde çok sayıda metod önerilmektedir. Bu çalışmada mevcut YBD tezgahına kurulabilecek ve çıktıları daha iyi olan metodlar seçilmiştir. Bu metodlar; Eğimli Soğutmalı Plaka ile döküm (Cooling Slope), Entalpi Çubuğu ile döküm (Rapid Slurry Casting), İnert gaz ile döküm (Gas Induced Semi-Solid) metodlarıdır.

2.3.1 Eğimli Soğutmalı Plaka ile Döküm

Eğimli soğutma plakası temelde su veya yağ ile soğutulan çok basit bir plaka sisteminden oluşmaktadır. Bu proseste, uygun sıcaklıktaki ergimiş metal yumuşak çelikten yapılmış eğimli plaka boyunca akarak kalıp içine dökülmektedir. Eğimli soğutma plakasının yüzeyi katılaştıran metalin yüzeye yapışmasını engellemek için genellikle kaplanmaktadır. Katı çekirdekler ergiyik ve eğimli plaka arasındaki temasta hızlı ısı transferinden dolayı şekillenmektedir. Bu çekirdekler uygulanan kayma gerilmesi ve metal akışının bir sonucu olarak yüzeyden ayrılır. Sonuç olarak, çekirdekler metal içine dağılmaktadır. Eğimli soğutma plakasından elde edilen döküm alaşımı katılaştırılıp yeniden ısıtılarak tikso şekillendirmelerde kullanılabileceği gibi, doğrudan basınçlı döküm makinasına transfer edilerek yarı katı döküm de yapılabilmektedir. Bu yöntemde döküm sıcaklığı, eğimli soğutma plakasının uzunluğu, eğimli soğutma plakasının eğimi, eğimli soğutma plakasının malzemesi ve döküm yapılan kalıbın malzemesi gibi çeşitli parametreler son mikroyapı üzerinde etkilidir.

N. Saklakoglu ve ark. [27] çalışmalarında, otomotiv sektöründe yaygın kullanımı olan yüksek basınçlı alüminyum döküm alaşımlarından sekonder AC 46000[28] alaşımında eğimli soğutmalı plaka ile yarı-katı numune dökümleri gerçekleştirmişlerdir. AC 46000 alaşımında Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi yaparak katı yüzdesinin sıcaklık ile oranı %50 katı = 567°C olarak tespit edilmiştir. Eğimli soğutmalı plaka döküm parametrelerinin döküm numunesi mikro yapısındaki küresellik etkisi incelenmiştir.

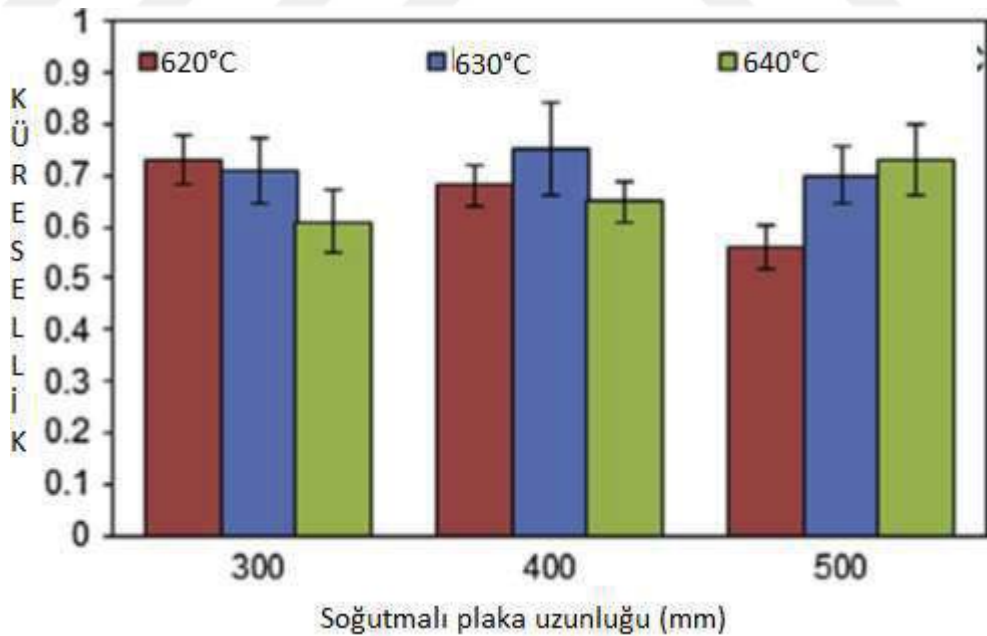
Prosenjit Das ve ark.[29] çalışmalarında, eğimli soğutmalı plaka ile A356 alüminyum alaşımının yarı katı metal hazırlanmasını açıklamaktadır. Çalışmada yarı katı fraksiyonunun belirlenmesi için DSC analizi yapılmıştır. Ayrıca simülasyon uygulamaları ile eğimli soğutmalı plakanın açısı, uzunluğu parametreleri çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda hem katı oranı hem de mikroyapıdaki küresellikler ele alındığında; 653°C sıvı metal 50 cm uzunluk, 60°'lik eğim, 60°C sıcaklığa sahip eğimli plakadan dökülerek 588°C'de %44 katı oranına sahip yarı katı metal elde edilmiştir.

M.S. Salleh ve ark. [30] çalışmalarında, A319 alaşımında farklı Mg ilaveleri ile tiksodöküm yöntemi ile dökümler yapılmıştır. Çalışmada eğimli soğutmalı plaka yöntemi ile yarı katı döküm yapılan parçalar tekrar 571°C sıcaklığa ısıtılarak dövme işlemi yapılmasıyla tiksodövme olarak üretilmiştir. Yapılacak çalışmada eğimli soğutmalı plaka yarı-katı döküm parametrelerinden faydalanılacaktır. Bu çalışmada Tablo 2.4'de ki parametreler ile soğutmalı plaka yöntemiyle üretilen yarı-katı döküm numuneler incelendiğinde mikroyapılardaki dendritlerin kırılması ile oluşan küresellik “shape factor” (küresellik) ile ölçülmüştür.

Tablo 2.4 Eğimli Soğutmalı Plaka yarı-katı döküm parametreleri[30]

Eğim Açısı°	Soğutmalı Plaka Uzunluğu (mm)	Döküm Sıcaklığı (°C)	Liküdüs Sıcaklığı (°C)
60	300	620	610
		630	
		640	
	400	620	
		630	
		640	
	500	620	
		630	
		640	

Küresellik=1 ise taneler %100 küreselliğe ulaşmış sayılacaktır. Şekil 2.18’de parametrelerin küreselliğe etkisi gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça istenen küreselliğe ulaşmak için soğutmalı plakanın uzunluğunu katılaşma olmayacak şekilde artırmak gerekmektedir.



Şekil 2.18 α -Al tanelerinin döküm sıcaklığı ve eğimli plaka uzunluğuna göre küresellik (dendritik olmayan) değişimleri[30]

2.3.2 İnert Gaz (GISS) ile Döküm

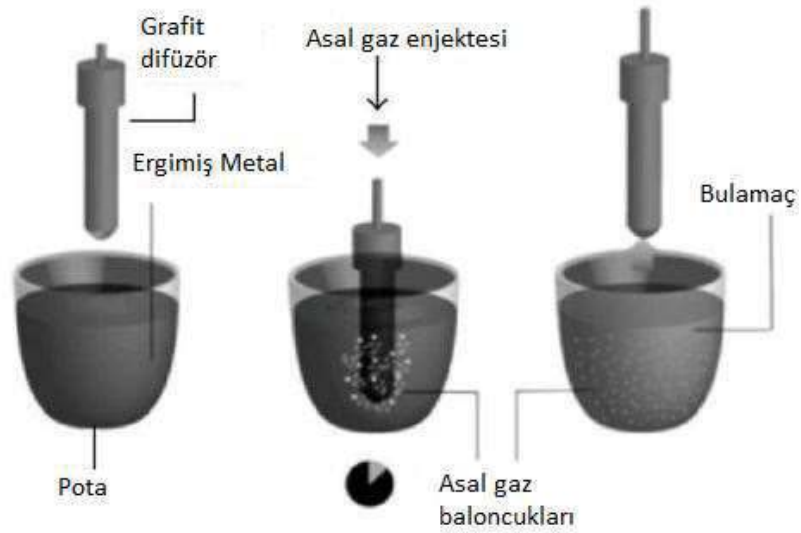
GISS (Gaz indüklenmiş yarı katı) döküm metodu, sıvı metalin içine genellikle azot gazı enjekte edilerek yarı katı bir bulamaç oluşturulması temeline dayanan yarı katı döküm için gerekli küresel tanelerin elde edilmesi için kullanılan metotlarından biridir. Bu işlem alüminyum, magnezyum, bakır alaşımları gibi birçok metal ile uygulanabilir.

GISS işlemi, öncelikle metalin ergitilmesi ve ardından herhangi bir kirliliğin giderilmesi için gazlandırılması ile başlar. Gazlandırılmış metal daha sonra ergime noktasının hemen altında bir sıcaklıkta ısıtılır ve yarı katı bir bulamaç oluşturulması için belirli bir süre bekletilir.

Metal yarı katı hale geldiğinde, genellikle azot gazı gibi bir asal gaz metalin içine enjekte edilir. Gaz kabarcıkları, sıvı metaldeki katılaşma işlemi için çekirdeklendirme görevi görerek, sıvı metal içinde homojen bir katı partikül dağılımı oluşturur. Gaz basıncı, metal bulamaç viskozitesinin istenilen düzeyde kalmasını sağlamak için dikkatlice kontrol edilir. Yarı katı metal bulamaç, yüksek basınç altında bir kalıba enjekte edilerek son ürün oluşturulur. GISS işlemi, geleneksel döküm yöntemlerine göre az gözenekli ürünler oluşturmakta ve son ürünün mekanik özelliklerini artırmaktadır. Ayrıca, GISS işlemi, daha az atık üreten ve daha az enerji tüketen çevre dostu bir işlem olarak da kabul edilir.

Ancak, GISS işlemi, özel ekipman gerektirmesi ve son üründe gaz gözenekliliği oluşma riski gibi bazı sınırlamalara sahiptir.

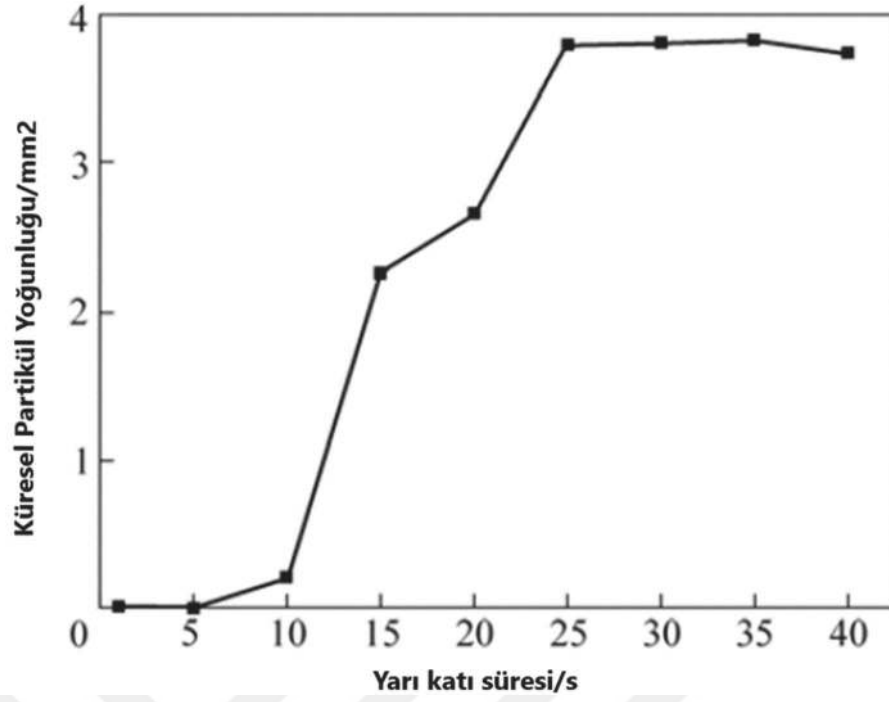
M.S. Salleh ve ark. [31] çalışmalarında parametre tespiti için geliştirilen yarı katı hazırlama düzeneğinde öncelikle numune dökümleri yapılmıştır. Şekil 2.19’da yarı katı metal hazırlama için geliştirilen düzenek tasarımı paylaşılmaktadır. Yarı katı hazırlama düzeneği hem GISS metodu hem de entalpi çubuğu ile yarı katı döküm metodu için özel olarak tasarlanmıştır.



Şekil 2.19 GISS prosesi şematik gösterimi[31]

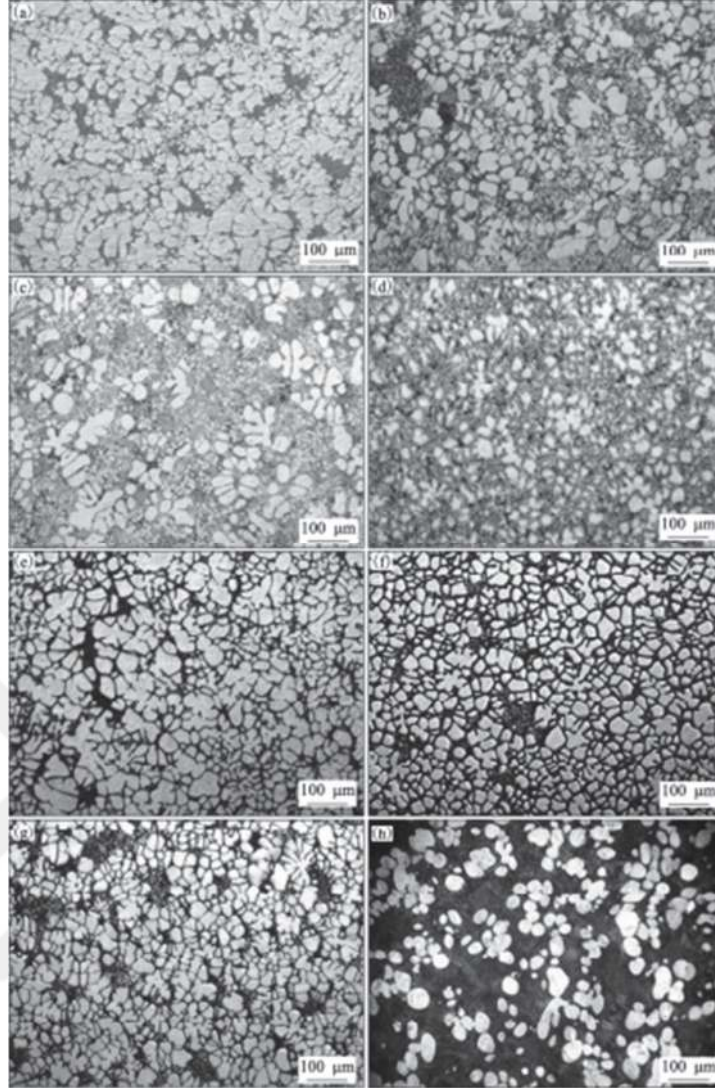
J.Wannasin ve ark.[32] çalışmalarında, AC46000 alaşımında GISS metodu ile yarı katı numune çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada indüklenen asal gazın tipi, süresi vb. parametreleri çalışılmıştır. Ayrıca Pandat yazılımı kullanılarak Sheil modeli hesaplaması ile katı fraksiyonu yaklaşımı yapılmıştır.

R.Canyook ve ark. [33] çalışmalarında, A356 alaşımında GISS metodu ile yarı katı metal hazırlayıp suda soğutarak numune dökümleri yapmıştır. Yarı katı hazırlama süresinin mikroyapıdaki küresel partikül yoğunluğuna olan etkilerini incelemiştir ve yarı katı hazırlama süresinin küresel partikül yoğunluğuna etkisi şekil 2.20’de verilmiştir. . Katı fraksiyonu arttıkça topaklanma ve porozite oluşumunun olabildiği belirtilmiştir.



Şekil 2.20 Yarı katı hazırlama süresinin küresel partikül yoğunluğuna etkisi[33]

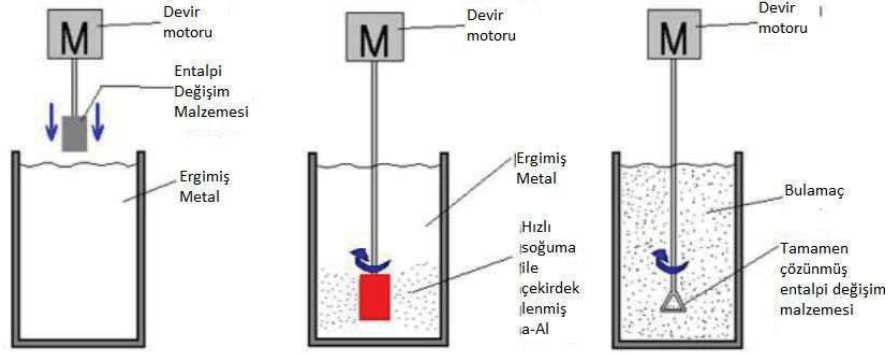
J.Wannasin ve ark. [34] çalışmalarında A356, A380, A383, 5052, 6061, 2024, 7075; ZAMAK-3 gibi farklı alaşımlar ile GISS metodu ile yarı katı metal hazırlamışlardır. Farklı alaşımlardan elde edilen yarı katı numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 2.21’de gösterilmiştir. Yöntemin farklı alaşımlarda kullanılabildiği ispat edilmiştir.



Şekil 2.21 GISS bulamaç döküm işlemleriyle oluşturulan çeşitli alaşımların mikroyapıları: (a) 356; (b) A380; (c) A383; (ç) 5052; (e) 6061; (f) 2024; (g) 7075; (h) ZAMAK-3

2.3.3 Entalpi Çubuğu ile Döküm

Entalpi çubuğu ile döküm prosesi (RSF;Rapid Slurry Forming) Rheometal firması tarafından endüstriyel olarak satışı yapılan patentli bir prosestir. RSF'nin farkı, entalpi değişim malzemesi adı verilen önceden katılaştırılmış bir alüminyum parçasının kullanımından kaynaklanmaktadır. Entalpi değişim malzemesi karıştırıcı çubukla birlikte dökülerek oluşturulur, Şekil 2.22'deki gibi bulamaç oluşturma sırasında ergir ve sıvı metale karışır. Entalpi değişim malzemesinin miktarı parça ağırlığının %3-7'si kadardır.



Şekil 2.22 Entalpi Değişim Çubuğu ile yarı katı malzeme oluşturulması[5]

Entalpi çubuğu ile döküm metodunda yarı katı metalin hazırlanmasında entalpi çubuğu tasarımı ve üretimi önem teşkil etmektedir. Entalpi çubuğu tasarımı yapılırken dökümü yapılacak parçanın ağırlığı, karıştırma yapılacak kepçenin boyutları gibi ölçütler kısıtlayıcı ve belirleyici olmaktadır.

Magnus Wessen ve ark. [35] çalışmalarında, Entalpi Çubuğu ile yarı katı hazırlama parametrelerini incelemiştir. Çalışmada Entalpi Değişim çubuğunun sıcaklığı ve kütlesini belirleyecek olan aşağıdaki formüller elde edilmiştir.

Eriyiğin enerji salınımı;

$$dQ_{out} = \rho_{melt} \cdot C_{p_{melt}} \cdot V_{melt} \cdot (T_0^L - T_{semi}) + \Delta H_{melt} \cdot \rho_{melt} \cdot (1 - f_{melts}) \cdot V_{melt} \quad (1)$$

T_0^L = Eriyiğin ilk sıcaklığı

T_{semi} = Yarı katı durumundaki son sıcaklık

f_{melts} = Eriyiğin katı fraksiyonu

Entalpi çubuğu tarafından absorbe edilen enerji,

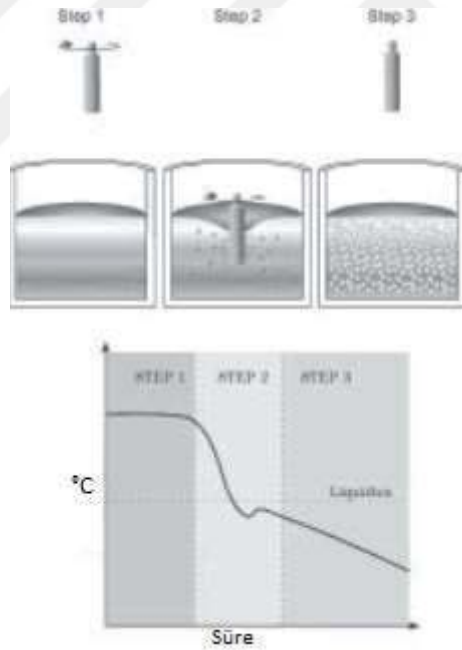
$$dQ_{in} = \rho_{EEM} \cdot C_{p_{EEM}} \cdot V_{EEM} \cdot (T_{semi} - T_{EEM}^0) + \Delta H_{EEM} \cdot \rho_{EEM} \cdot (1 - f_s^{EEM}) \cdot V_{EEM} \quad (2)$$

T_{EEM} = Entalpi çubuğunun ilk sıcaklığı

f_s^{EEM} = Entalpi çubuğunun katı fraksiyonu

$$dQ_{out} = dQ_{in} \quad (3)$$

James A. Yurko ve ark. [36] çalışmalarında AC46000, A356 alaşımları ve özel alaşım tasarlayan Rheinfelden [19] alaşımlarından Silafont-36, Magsimal-59 alaşımlarında entalpi değişim çubuğu ile yarı katı metal hazırlama yöntemi çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada YBD tezgahlarına sonradan takılabilen SSR(Semi-Solid Rheocasting) ünitesi ile yarı katı döküm yapılabilmektedir. SSR yönteminde dönen soğutmalı bir grafit çubuk ile yarı katı metal hazırlama metodu şekil 2.23'teki gibi geliştirilmiştir. Çalışmada A356 alaşımı, minimum gözeneklilik ve azaltılmış bekleme süreleri ile başarılı bir şekilde parçalar dökülmüştür. A356 alaşımında yarı katı metal hazırlamada 635-665°C aralığındaki ergimiş metala dönen soğutmalı çubuk daldırılarak 605-610°C aralığında sıcaklığa düşürülerek döküm yapılmıştır. AC46000, Silafont-36 ve Magsimal-59 dahil olmak üzere diğer alaşımlar proseste kullanım için değerlendirilmiştir. Bu alaşımlarla dökümler yapılmış ve parçalar dendritik olmayan mikroyapı sergilemişlerdir.



Şekil 2.23 SSR işleminin şeması. (1) Ergimiş alaşım liküdüs sıcaklığının üzerinde tutulur. (2) Dönen, soğuk grafit çubuk katılaşmayı başlatmak için ergiyik içine indirilir. (3) Dönen çubuk çıkarılır ve durağan ergiyik, istenen döküm sıcaklığına kadar soğutulur.[36]

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Çalışmada kullanılacak olan malzeme alaşımı AC46000 ile ilgili limitler ve çalışmada kullanılan analiz Tablo 3.1’de gösterilmektedir. AC46000 alaşımının mekanik özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1 AC46000 kimyasal kompozisyonu[28]

MATERIAL	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Ti	% Pb	% Sn	% Sr
AC46000 – Standard; EN 1706	8,0 – 10,0	0,80 – 1,00	2,00 – 4,00	0,20 – 0,40	0,15 – 0,30	max. 1,22	max. 0,55	max. 0,20	max. 0,12	max. 0,10	-
AC46000 Yarı Katı	9,06	0,82	2,50	0,30	0,28	0,96	0,06	0,05	0,06	0,02	0,02

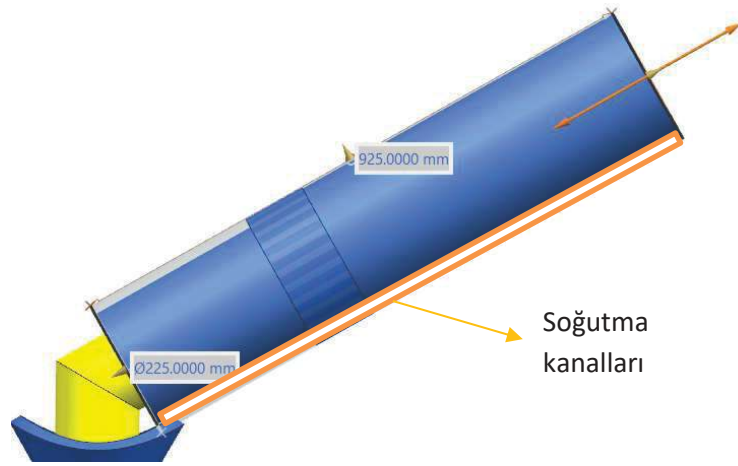
Tablo 3.2 AC46000 mekanik özellikleri[28]

ALAŞIM	AC46000
PROSES	YBD
Isıl İşlem	-
YTS(MPa)	140
UTS(MPa)	240
e(%)	<1

3.1. Yarı Katı Döküm İçin Küresel Tane Hazırlama Metodları ve YBD Makinasında Yarı-Katı Döküm Prosesleri

3.1.1. Eğimli Soğutmalı Plaka ile Yarı Katı Döküm

Bu çalışmada öncelikle yarı katı malzeme hazırlama parametrelerinin tespiti için eğimli soğutmalı oluk tasarımı **Şekil 3.1**’deki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 3.1 Eğimli Soğutmalı Plaka Tasarımı

Elde edilen tasarım çıktısı ile parametre tespiti çalışmaları yapılmadan önce Magmasoft döküm simülasyon programı kullanılarak sıcaklık değişimleri tespitleri yapılmıştır.

Çalışmada simülasyonda elde edilen sıcaklıklar kullanılarak Şekil 3.2'deki gibi numune dökümleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.3'te belirtilen parametrelerde dökümü gerçekleştirilen numuneler metalografik olarak incelenerek yarı katı parametreler belirlenmiştir.

Tablo 3.3 Eğimli plaka numune döküm parametreleri

Plaka Sıcaklığı	Plaka Açısı	Maden Sıcaklığı	Döküm Sıcaklığı
90°C	30°	650°C	573°C
		640°C	572°C
		630°C	570°C
	45°	650°C	574°C
		640°C	573°C
		630°C	569°C
150°C	30°	650°C	575°C
		640°C	574°C
		630°C	572°C
	45°	650°C	576°C
		640°C	575°C
		630°C	571°C



Şekil 3.2 Eğimli Soğutmalı Plaka ile yarı katı numune döküm düzeneği ve dökülen numuneler

Numune dökümlerinde metalografik olarak uygun çıkan sonuçlar göz önüne alınarak eğimli soğutmalı plaka uzunluğu, açısı, sıcaklığı belirlenmiştir. YBD tezgahına Şekil 3.3’de görüldüğü gibi eklenerek parça dökümü için kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Eğimli Soğutmalı Plaka YBD tezgahındaki görüntüsü

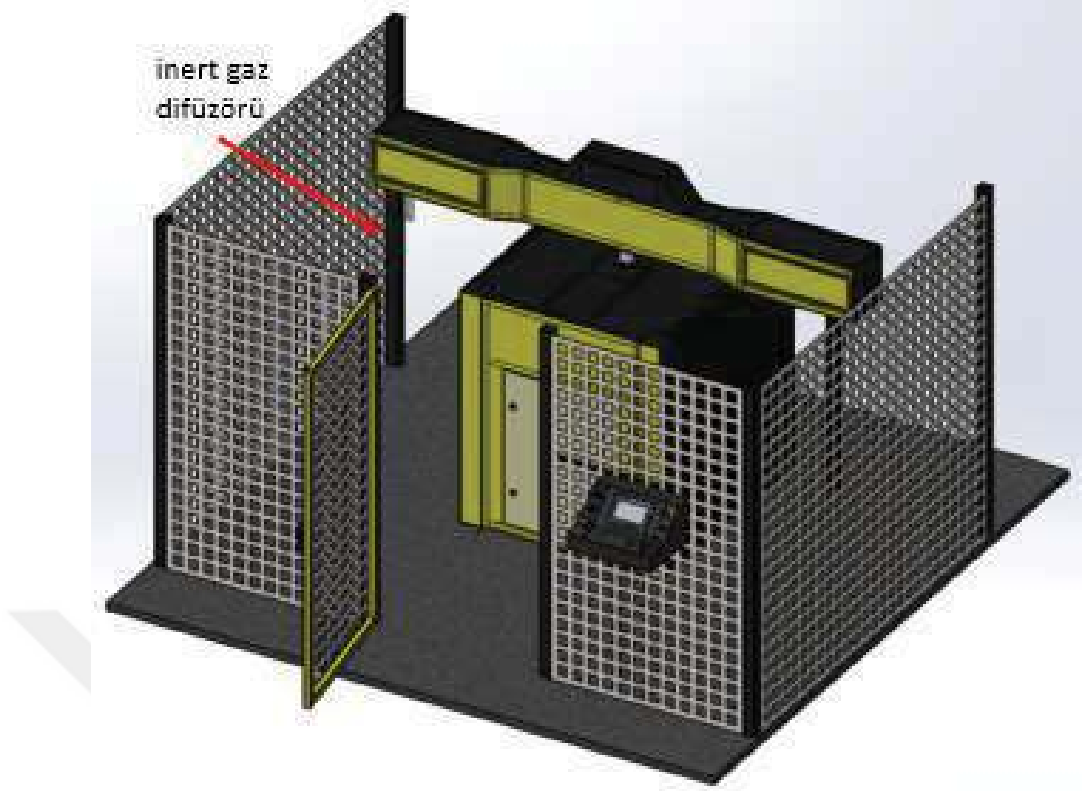
Parça dökümleri sırasında K tipi tel termokupl’lar ile Şekil 3.4’deki gibi anlık sıcaklıklar ölçülerek proses kontrol altında tutulmuştur.



Şekil 3.4 Eğimli Soğutmalı Plaka YBD tezgahı döküm sırasındaki manuel sıcaklık kontrollerine ait görsel

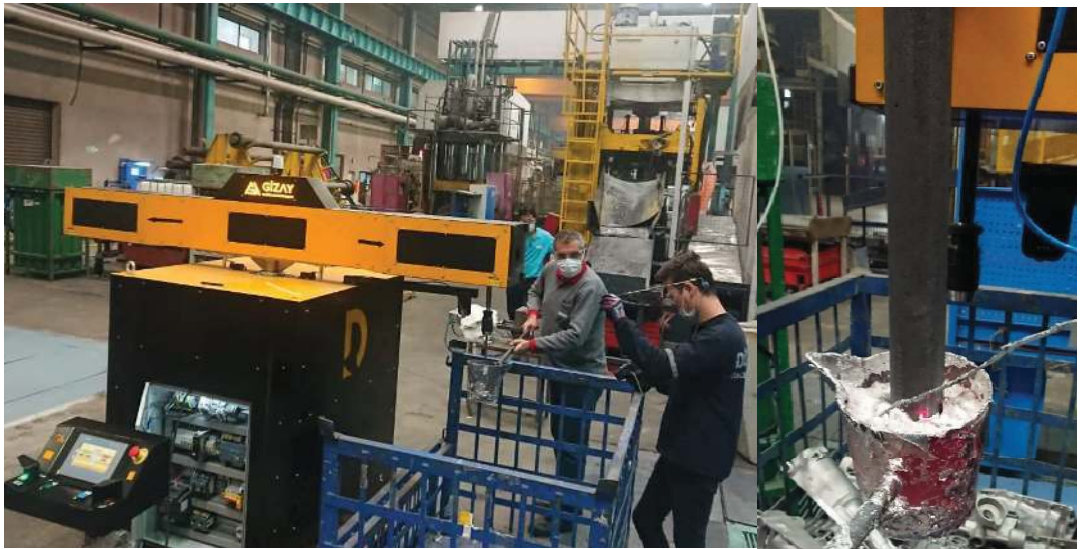
3.1.2. İnert Gaz ile Yarı Katı Döküm (GISS)

İnert gaz ile yarı katı döküm için difüzörün konumlandırılması ve asal gaz bağlantısı yapılması gerekmektedir. Şekil 3.5'teki düzenekte hem inert gaz difüzörü konumlandırılması sağlanmaktadır hem de asal gaz bağlantısı bulunmaktadır. Ayrıca aynı düzenekte entalpi çubuğu ile yarı katı döküm için karıştırıcı kafalar da eklenmiştir.



Şekil 3.5 Yarı katı metal hazırlama düzeneği

Yarı katı metal hazırlama düzeneği YBD tezgahları ile haberleşme kurabilecek ve robotlarla entegre çalışacak şekilde geliştirilmiştir. YBD tezgahlarında döküm yapılmadan önce manuel olarak Şekilde 3.6'daki gibi numune dökümleri yapılarak debi, süre, sıcaklık gibi ana parametrelerin tespiti ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Yarı katı metal hazırlama ünitesinde numune dökümüne ait görseller

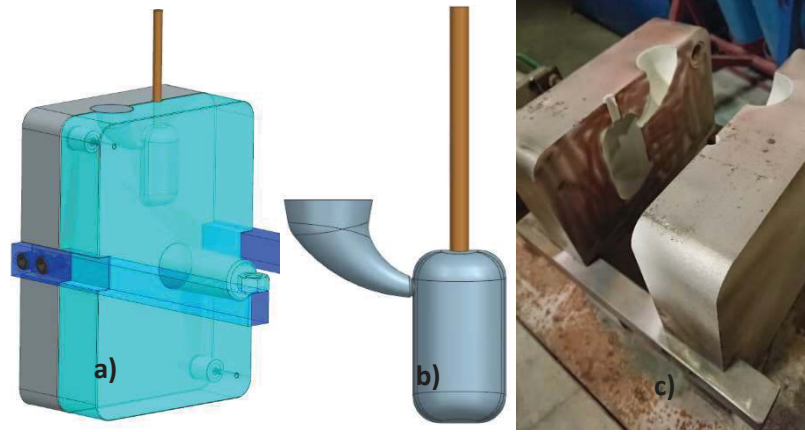
Numune dökümleri ile elde edilen parametreler kullanılarak YBD tezgahında yarı katı parça dökümleri Şekil 3.7’deki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Yarı katı metal hazırlama ünitesi ile YBD tezgahında GISS metodu dökümü a) bekletme ocağından sıvı metal transferi, b) asal gaz ile yarı katı metal hazırlama, c) yarı katı metalin kovana transferi

3.1.3. Entalpi Çubuğu ile Yarı Katı Döküm

Entalpi çubuğu ile yarı katı döküm için Şekil 3.5’teki tasarımın yanı sıra entalpi çubuğunun elde edilebilmesi için de kalıp gereksinimi oluşmaktadır. Entalpi çubuğu dökümü yapılacak parçanın brüt ağırlığının %6 ağırlığına denk gelecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.8’de hem 3D tasarımları hem de imal edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Entalpi çubuğuna ait kalıp 3D dataları ve kalıp görseli a) Kalıp 3D görüntüsü, b) entalpi çubuğu 3D görüntüsü, c) imal edilmiş kalıp görüntüsü

GISS metodu gibi YBD tezgahında dökümler yapılmadan önce entalpi çubuğu ile yarı katı döküm için de Şekil 3.9'daki gibi numune dökümleri yapılarak devir hızı, entalpi çubuğu sıcaklığı, süre vb. parametrelerin tespiti yapılmıştır.



Şekil 3.9 Entalpi Çubuğu Yarı Katı Dökümü Numune Döküm Görseli

Numune dökümleri ile elde edilen parametreler kullanılarak YBD tezgahında yarı katı parça dökümleri Şekil 3.10'deki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10 Yarı katı metal hazırlama ünitesi ile YBD tezgahında entalpi çubuğu ile yarı katı parça dökümü a)entalpi çubuğu yükleme, b) sıvı metalin potaya aktarımı, c)entalpi çubuğu ile yarı katı metal hazırlama, d)yarı katı metalin kovana transferi

3.2. Isıl İşlem

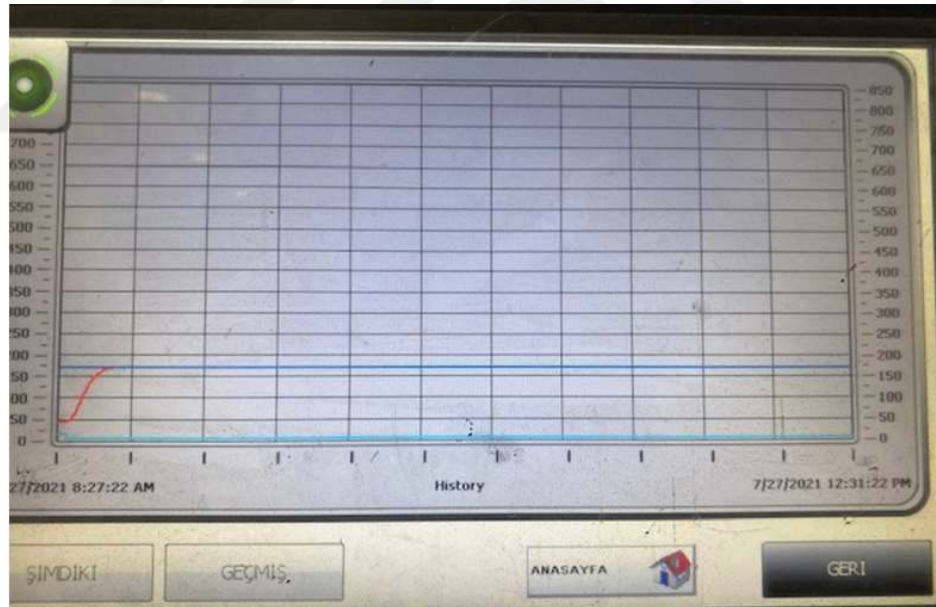
AC46000 alaşımıyla YBD ve Yarı katı döküm yapılmış parçalardan kesilen numuneler laboratuar tipi ısıtma fırınında ısıtma işlemi uygulanmıştır (şekil 3.11, şekil 3.12, şekil 3.13) Isıtma uygulamasında çözeltiye alma işlemi 500°C’de 2 saat , yaşlandırma işlemi ise 170 °C’de 2 saat olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3.11 Laboratuar tipi ısıtma fırını



Şekil 3.12 Numunelerin ısıtım fırını içerisindeki yerleşimi



Şekil 3.13 Isıtım esnasındaki sıcaklık zaman grafiği

3.3. Test Metodları

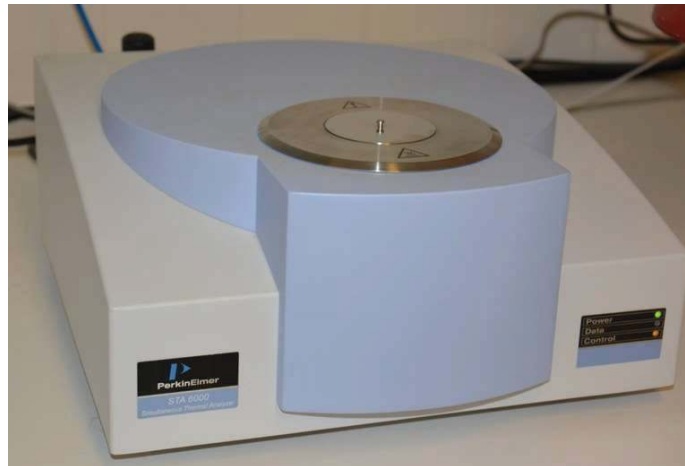
Yarı katı döküm için sıvı metal hazırlanması alaşım limitlerinin ayarlanması, ilave malzemelerin belirlenmesi işlemleri için her aşamada kimyasal analiz testleri

Şekil 3.14'deki Spectrolab S model CCD teknolojisine sahip spektrometre ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14 SpectroLAB S model spektrometre

Yarı katı döküm sıcaklığı liküdüs ve solidüs arasında seçilmektedir. Literatür taraması ile belirlenen sınır sıcaklıklarını doğrulamak ve kullanılacak alaşımlara özel katı oranlarını belirlemek için Diferansiyel Termal Analiz (DTA) testi gerçekleştirilmiştir. DTA testi Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında şekil 3.15'de gösterilen Perkin Elmer STA 6000 Model test cihazında yapılmıştır.

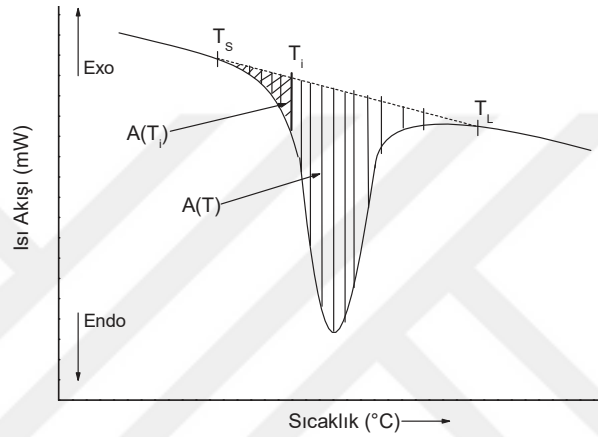


Şekil 3.15 DTA test cihazı (Perkin Elmer STA 6000)

Alaşımanın sıcaklığa bağlı olarak değişen sıvı oranlarının belirlenmesinde DTA eğrisinden faydalanılarak “kısmi alan” yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde DTA eğrisinde ergime sıcaklığı (T_L) kadar olan alanın toplamı, toplam sıvı oranına (%100) karşılık geldiği kabul edilmektedir (Şekil 3.16). Buna göre istenilen bir sıcaklığa (T_i) karşılık gelen sıvı oranı (f_L), o sıcaklığın altında kalan alanın $A(T_i)$, toplam alana $A(T)$ bölünmesiyle bulunabilmektedir. Buna göre;

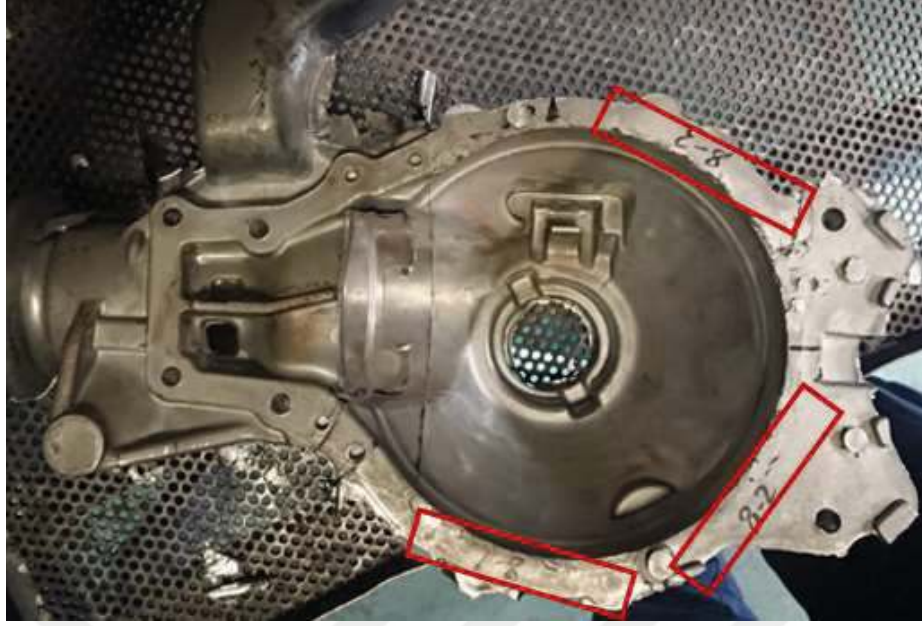
$$f_L(T) = \frac{A(T_i)}{A(T)} \quad (4)$$

eşitliği istenilen sıcaklığa (T) ait sıvı oranını vermektedir.



Şekil 3.16 % Sıvı oranının hesaplanmasında kullanılan DTA eğrisinin şematik gösterimi

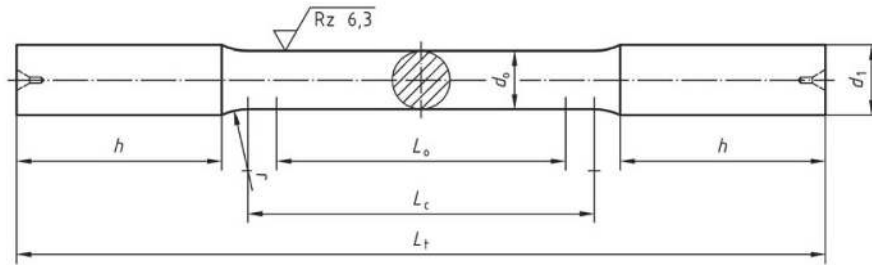
Yarı katı döküm yöntemiyle dökümü gerçekleştirilen parçalardan çıkarılan numunelerden çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Test numuneleri her parçada şekil 3.17’de gösterilen aynı bölgelerden alınmıştır.



Şekil 3.17 Parça üzerinden alınan test numune lokasyonları

Instron 5982 çekme test cihazında çekme testleri uygulanmıştır. Parçalardan alınan numunelere ait çekme testleri ısıl işlemsiz ve ısıl işlemli durumlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada 450 adet çekme testi yapılmıştır ve yapılan testlerin sonuçları istatistiksel olarak Minitab programında karşılaştırılmıştır.

Yarı katı parçaların mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla DIN 50125 standardına göre hazırlanan çekme test numunelerine INSTRON 5982 (100kN) ekstensiyometreli test cihazında ISO 6892 standardına göre çekme testleri uygulanmıştır. Numune teknik resmi şekil 3.18’de, boyutlar tablo 3.4’te, çekme test cihazına ait görseller şekil 3.19, 3.20 ve 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 DIN 50125’e göre hazırlanan çekme test numunesi teknik resmi

Tablo 3.4 Çekme test numunesi ölçüleri

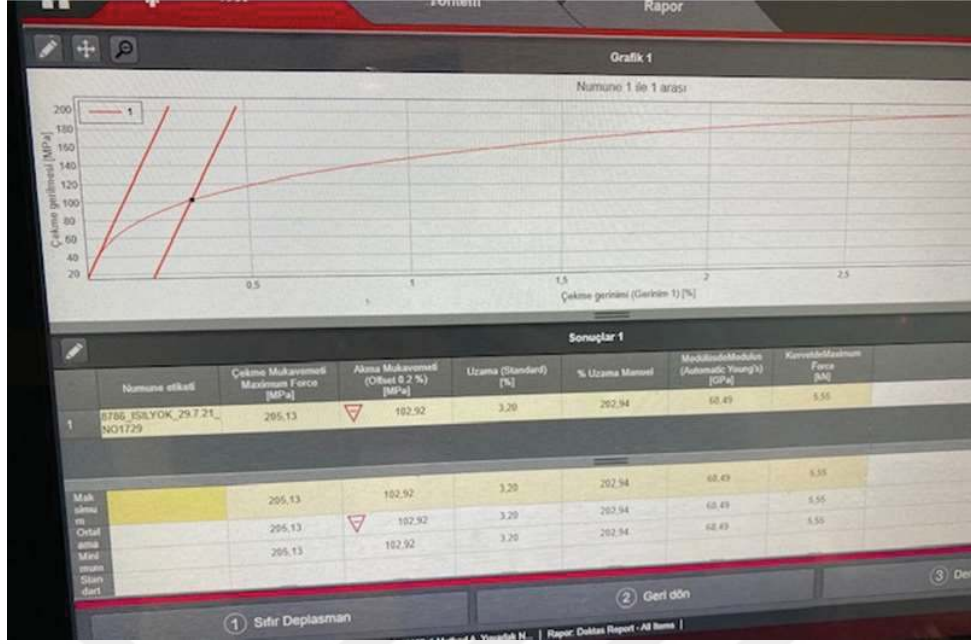
do	Lo	d1 (min)	r (min)	h (min)	Lc (min)	Lt (min)
6 mm	30 mm	8 mm	5 mm	25 mm	36 mm	92 mm



Şekil 3.19 Instron 5982 çekme test cihazı



Şekil 3.20 Çekme test numunesi



Şekil 3.21 Çekme test cihazı grafik ve sonuç raporu

Yarı katı numune ve parça dökümlerinde mekanik özellik karşılaştırmaları için Şekil 3.22’de gösterilen AFFRI LD250 sertlik ölçüm cihazında ISO 6506 standardına göre 5mm bilya çapında 250 kg yükte Brinell sertlik testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.22 AFFRI LD250 Sertlik Ölçüm Test Cihazı

Yarı katı numunelerde ve parçalarda yarı katı dökümün başarılı olduğunun en büyük göstergesi olan küresellik tane yapısının kontrolleri için Şekil 3.23’de gösterilen Nikon LV150N model optik metal mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 3.23 Nikon LV150N motorize tablalı optik metal mikroskobu

Mikroyapı analizlerinde küresellik ve dendritik yapılar genellikle görsel karşılaştırmalar ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma özelinde Nikon LV150 Optik Mikroskobunda Clemex görüntü analiz yazılımında kamera ile alınan görüntüler analiz edilmiştir. Mikroyapılardaki küresellik ölçümü analizi Clemex Professional Edition analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan rutin ile yapılan analiz raporu şekil 4.7’deki gibi görünmektedir. Küresellik ölçümü α -Al tanesinin alanından çapı bulunarak (G.D) çevre formüllerinin oranı kullanılarak küresellik değeri (S.F) aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır.

$$G.D = \sqrt{A\alpha/\pi} \quad (5)$$

$$S.F = (4\pi A\alpha/P^2\alpha) \quad (6)$$

Parça dökümlerinin tahribatsız iç yapı kontrolleri için x-ışını radyografi testi Şekil 3.24’deki YXLON MU2000 cihazı ile ASTM E-155 standardına göre yapılmıştır.



Şekil 3.24 YXLON MU2000 model X-ışını radyografi cihazı

Kırık yüzey incelemeleri ve intermetalik fazların belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskop incelemeleri Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (DEFAM) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2. Simülasyon Metodu

3.2.2. Magmasoft Simülasyonu

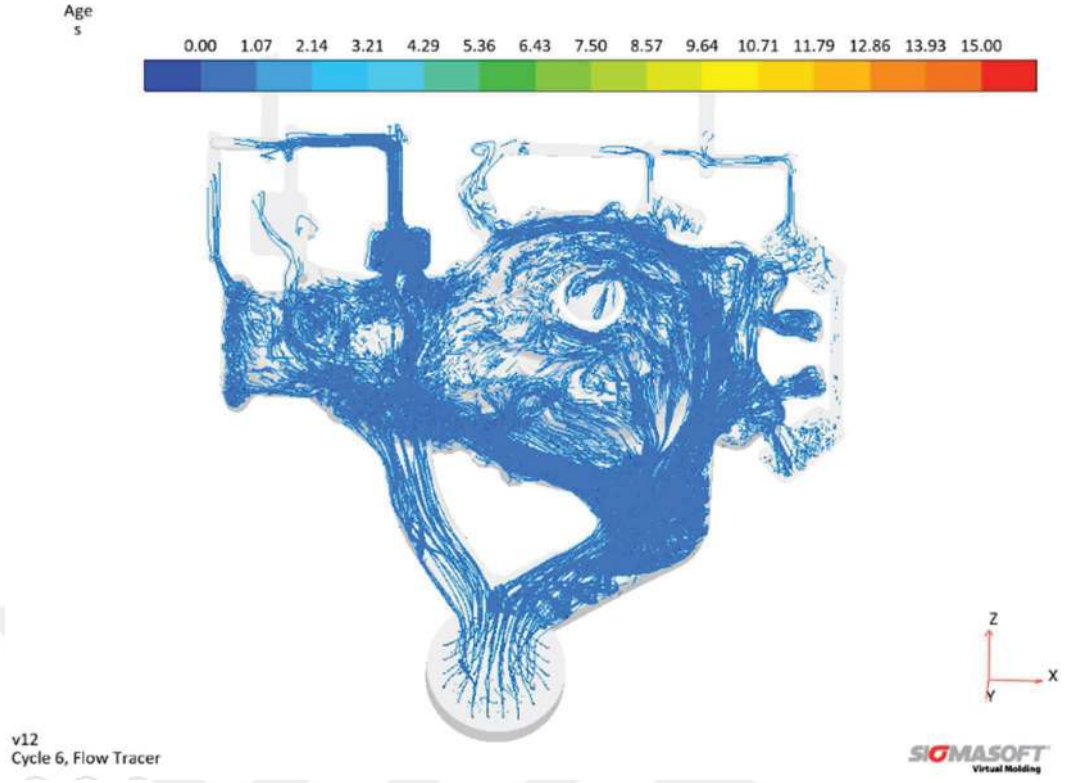
Kimyasal analiz ve DTA testlerinin sonuçları simülasyon programına yüklenerek parça kalıp tasarımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Döküm simülasyonu için genellikle Magmasoft uygulaması kullanılmaktadır. Bu çalışmada eğimli plakadan döküm parametrelerinin belirlenmesi amacıyla şekil 3.25'deki gibi Magmasoft uygulaması kullanılmıştır.



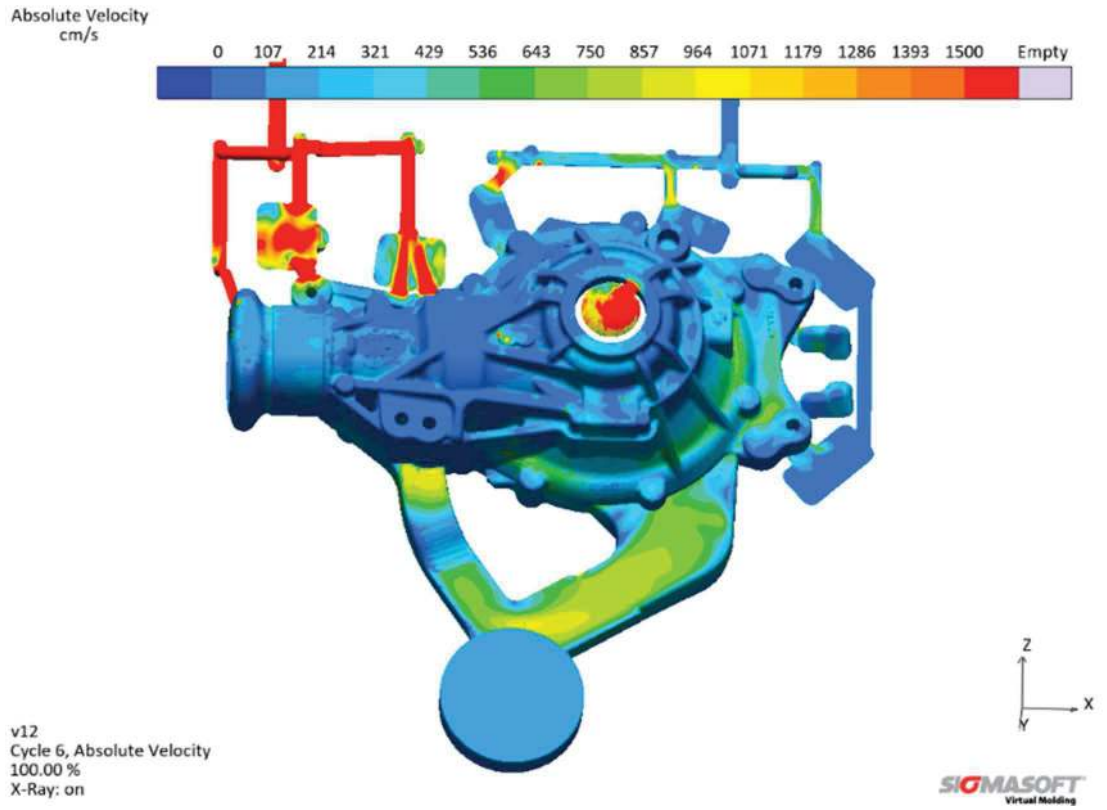
Şekil 3.25 Eğimli Soğutmalı Plaka Magmasoft Simülasyonları a)650°C sıvı metal verildiğinde plakadaki sıcaklık değişimi, b)Eğimli plakadan kovana sıvı metal boşaltılırken ki sıcaklık, c)Sıvı metalin kovanda 5sn beklemesi sonrasındaki sıcaklığı

3.2.1. Sigmasoft Simülasyonu

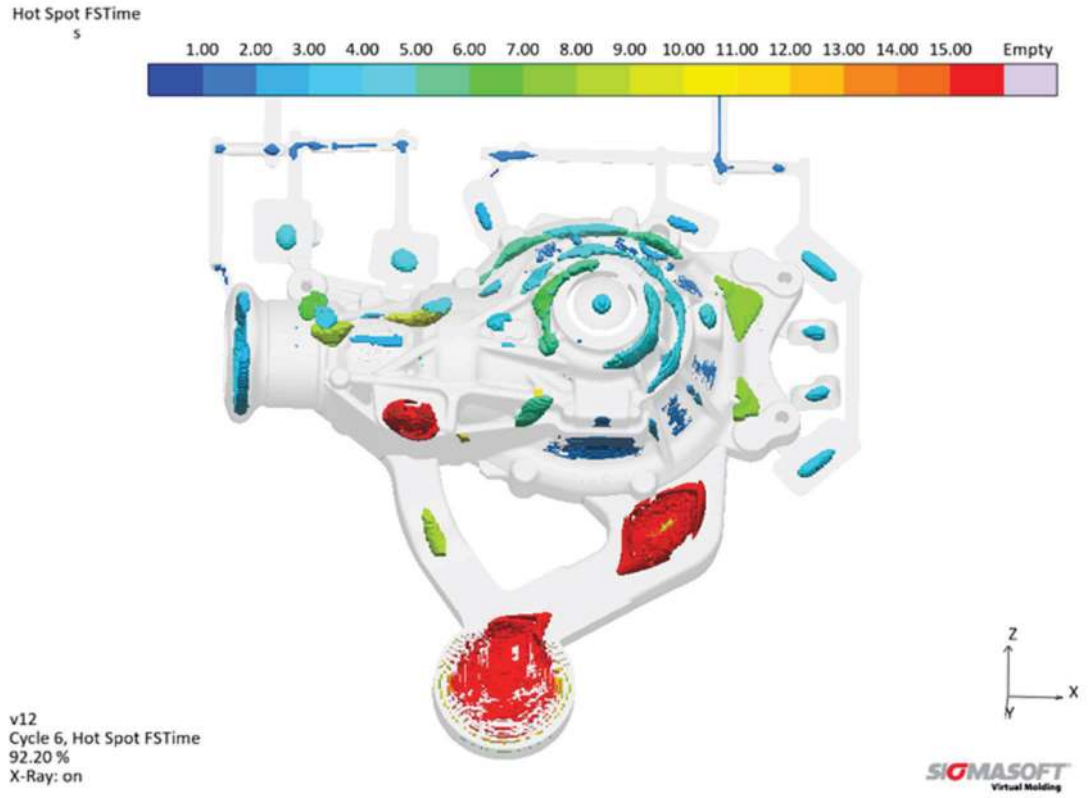
Yarı katı döküm simülasyonu ağırlıklı plastik enjeksiyon prosesinde kullanılan Sigmasoft programı ile gerçekleştirilmiştir ve firma dışından hizmet alınmıştır. Sigmasoft ile yapılacak analizler neticesinde yarı katı döküme uygun yolluk tasarımı ve yarı katı döküm sıcaklıkları tespit edilmesi amaçlanmıştır. Sigmasoft uygulamasında yapılan optimizasyon çalışmalarında Şekil 3.26, 3.27 ve 3.28’de görüldüğü gibi sırasıyla akış izleri, dolum hızı ve sıcak kalan bölgeler analizleri yapılmıştır. Akış izleri analizi ile dolum sırasında oluşacak türbülans bölgelerinin analizleri yapılmıştır. Dolum hızı analizi ile yolluk ve hava ceplerinin etkinliği kontrol edilmiştir. Sıcak kalan bölge analizi (HotSpotFStime) ile dolum sonrasında çekinti riski oluşturabilecek bölgeler tespit edilmiştir. Tüm bu analizler kullanılarak yolluk ve hava cebi tasarımlarının optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.26 Sigmasoft ile yapılan akış izleri analizi görseli



Şekil 3.27 Sigmasoft ile yapılan dolum hızı analiz görseli



Şekil 3.28 Sigmasoft ile yapılan sıcak kalan bölge analiz görseli

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Proje kapsamında yapılacak yarı-katı döküm metodları DÖKTAŞ A.Ş. firma bünyesinde ilk defa kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Araştırmalarımız neticesinde eğimli soğutma plakası ile yapılacak yarı-katı döküm metodu YBD tezgahında küresel olarak (Türkiye'de) ilk defa denenmiştir.

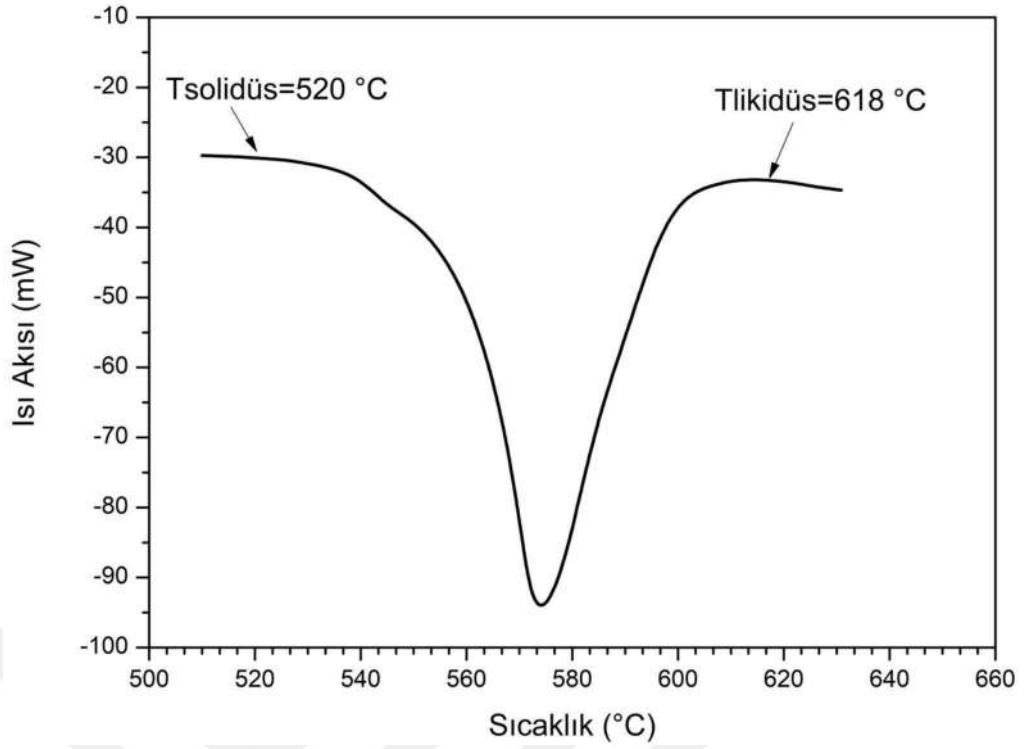
4.1 Kimyasal Analiz ve DTA Test Sonuçları

Yarıkatı ve YBD dökümlerinde kimyasal analiz testleri parça üzerinden ve sıvı alüminyumdan numune alınarak gerçekleştirilmiştir. Test edilen numuneler en az 2 analiz yapılarak ortalamaları alınmıştır. Kimyasal analiz testleri proje boyunca her sıvı metal transferinden her incelenen parçadan onlarca test yapılmıştır ve bu sonuçların ortalaması Tablo 4.1'deki gibidir.

Tablo 4.1 Kimyasal Analiz Sonuçları

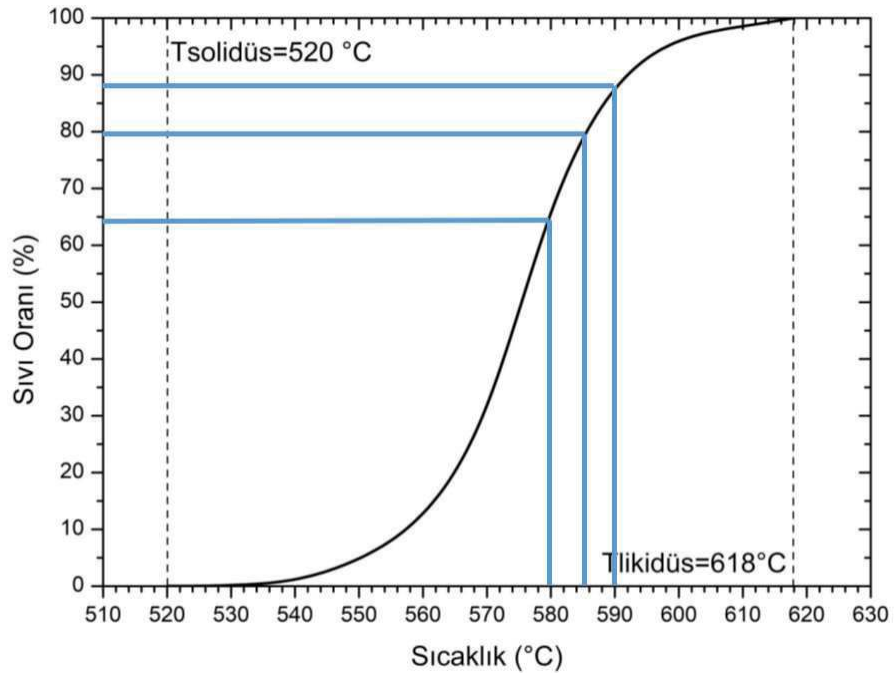
MATERIAL	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Ti	%Pb	%Sn	%Sr
AC46000	9,06	0,82	2,50	0,30	0,28	0,96	0,06	0,05	0,06	0,02	0,02

Literatür taraması sonucunda AC 46000 (AlSi9Cu(Fe) alaşımı için elde edilen yarı katı aralıkları; Magmasoft'da (479 - 578 °C) , Matweb'de (538 - 593 °C), E.Parshizfard ve arkadaşları (570,6 - 595 °C)[24] , Zhi-Yang Liu ve arkadaşları (525 – 596 °C)[22]. Literatürde yapılan araştırmalarda elde edilen sıcaklık değerleri farklılık göstermektedir. Yarı katı dökümde sıvı-katı oranını belirlemek için DTA testi yapılması pratik olarak çözüm üretmemizi sağlamıştır. Çalışmada kullanılan alaşım için yapılan DTA analizleri sonucunda elde edilen grafik şekil 4.1'de AC46000 alaşımı için solidüs ve liküdüs sıcaklıkları sırasıyla 520°C, 618 °C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 AC46000 Alaşımı DTA Analizi Isı Akısı-Sıcaklık Grafiği

Şekil 4.1’de elde edilen ham datalar ile Şekil 3.16’da belirtilen eşitlik formülasyonu kullanılarak Şekil 4.2’deki Sıvı-Katı oranı eğrisi elde edilmiştir. Grafikte belirtildiği %65-80 ve 90 sıvı oranına karşılık gelen 580-585-590°C sıcaklıklarında yarı katı dökümler gerçekleştirilmiştir.



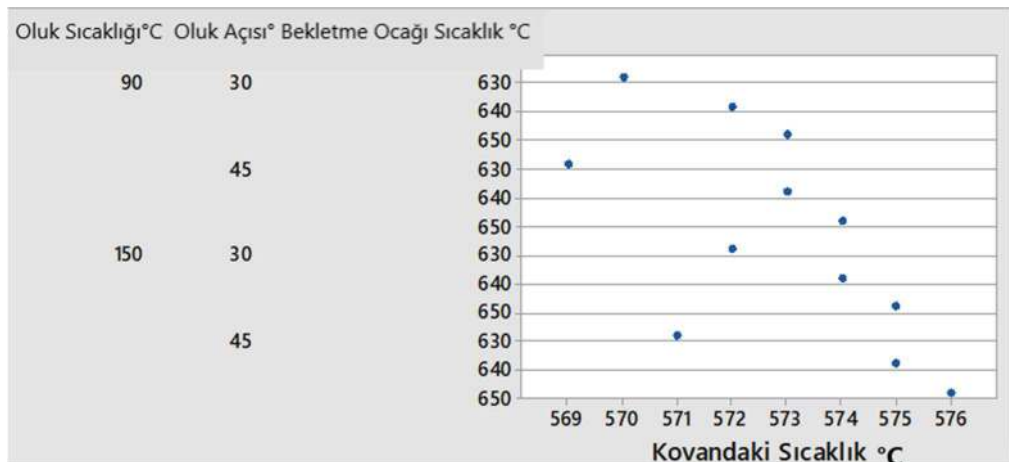
Şekil 4.2 AC46000 Alaşımı DTA Analizi Sıvı Katı Fraksiyonu

4.2 Simülasyon Sonuçları

Magmasoft simülasyonları ile çeşitli döküm parametrelerinde (oluk açısı, oluk uzunluğu, döküm sıcaklığı vs) gerçekleştirilen analizlerle en uygun eğimli soğutma plakalı döküm parametreleri ortaya konmuştur. Yapılan deney tasarımı sonuçları Tablo 4.2 ve Şekil 4.3'te görülmekte olup, bu parametrelerden en önemlisi kovan sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Kovandaki sıcaklık değerleri numune döküm denemelerinde referans olarak kullanılmıştır. Böylelikle pratikte yapılacak deneme sayıları minimize edilmiştir. Oluk sıcaklığı ve oluk açısı artıkça kovandaki sıcaklık değerinin arttığı görülmüştür.

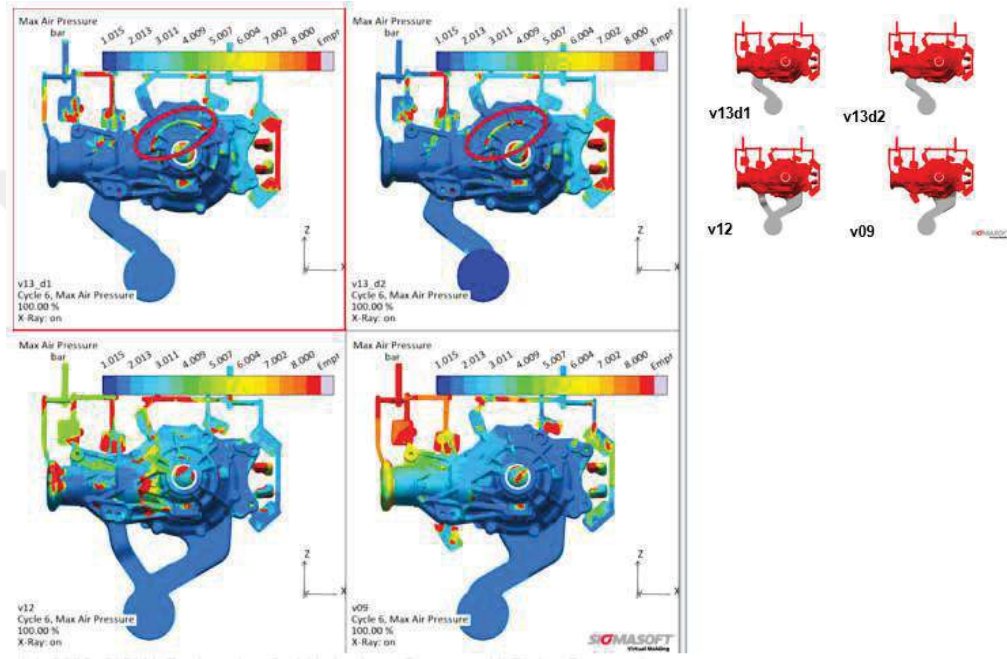
Tablo 4.2 Eğimli Soğutmalı Plaka Simülasyon Deney Tasarımı

C5	C6	C7	C8	C9
Oluk Sıcaklığı	Oluk Açısı	Bekletme Ocağı Sıcaklığı	Oluk Çıkışı Sıcaklığı	Kovandaki Sıcaklık
90	30	630	591,8	570
90	30	640	602,6	572
90	30	650	610,9	573
90	45	630	604,0	569
90	45	640	612,0	573
90	45	650	619,3	574
150	30	630	598,1	572
150	30	640	606,8	574
150	30	650	619,2	575
150	45	630	601,7	571
150	45	640	613,8	575
150	45	650	622,5	576



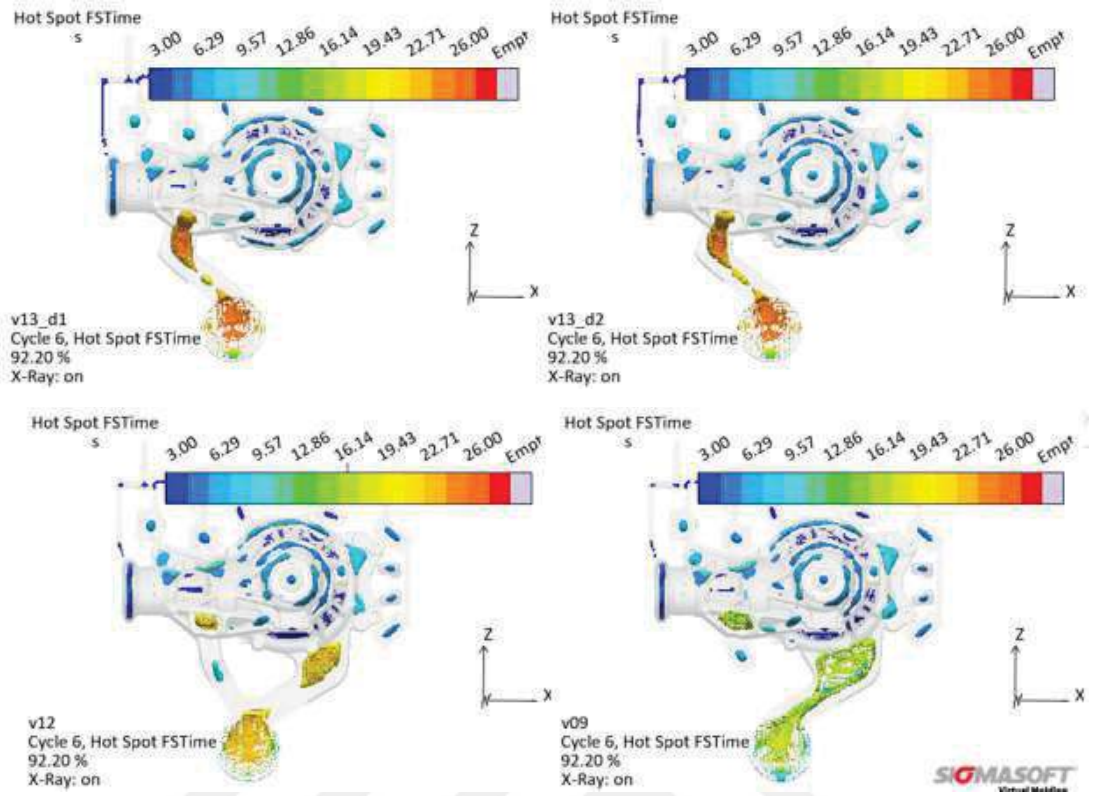
Şekil 4.3 Eğimli soğutmalı plaka simülasyon sonuçlarının dağılımı

Sigmasoft yarı katı döküm simülasyonları çalıştırılırken öncelikle yolluk konumu ve sayısı çalışılmıştır. Yolluk konumları 3 farklı bölgeden çalıştırılmıştır ve çift yolluk girişi simüle edilmiştir, optimizasyon sonucunda yolluk konumları belirlenmiştir. Her bir konumun kesit kalınlıkları da optimize edildikten sonra Şekil 4.4'te olduğu gibi farklı yolluk tasarımlarına göre metal dolumu kesişim bölgelerinde ve kalın kesitlerde hava sıkışması analizi yapılmıştır.



Şekil 4.4 Sigmasoft simülasyonu hava sıkışması son optimizasyon görseli

Yolluk kesitinde ve parçada oluşabilecek çekintiler için “HotSpotFStime” analizleri yapılarak versiyonlar arası yolluk seçimleri Şekil 4.5’deki gibi karşılaştırılmıştır. HotSpotFStime analizinde dökümde genellikle kalın kesitlerde olmak üzere en son katılan ve sıcak kalan bölgelerin süreleri belirlenmiştir.



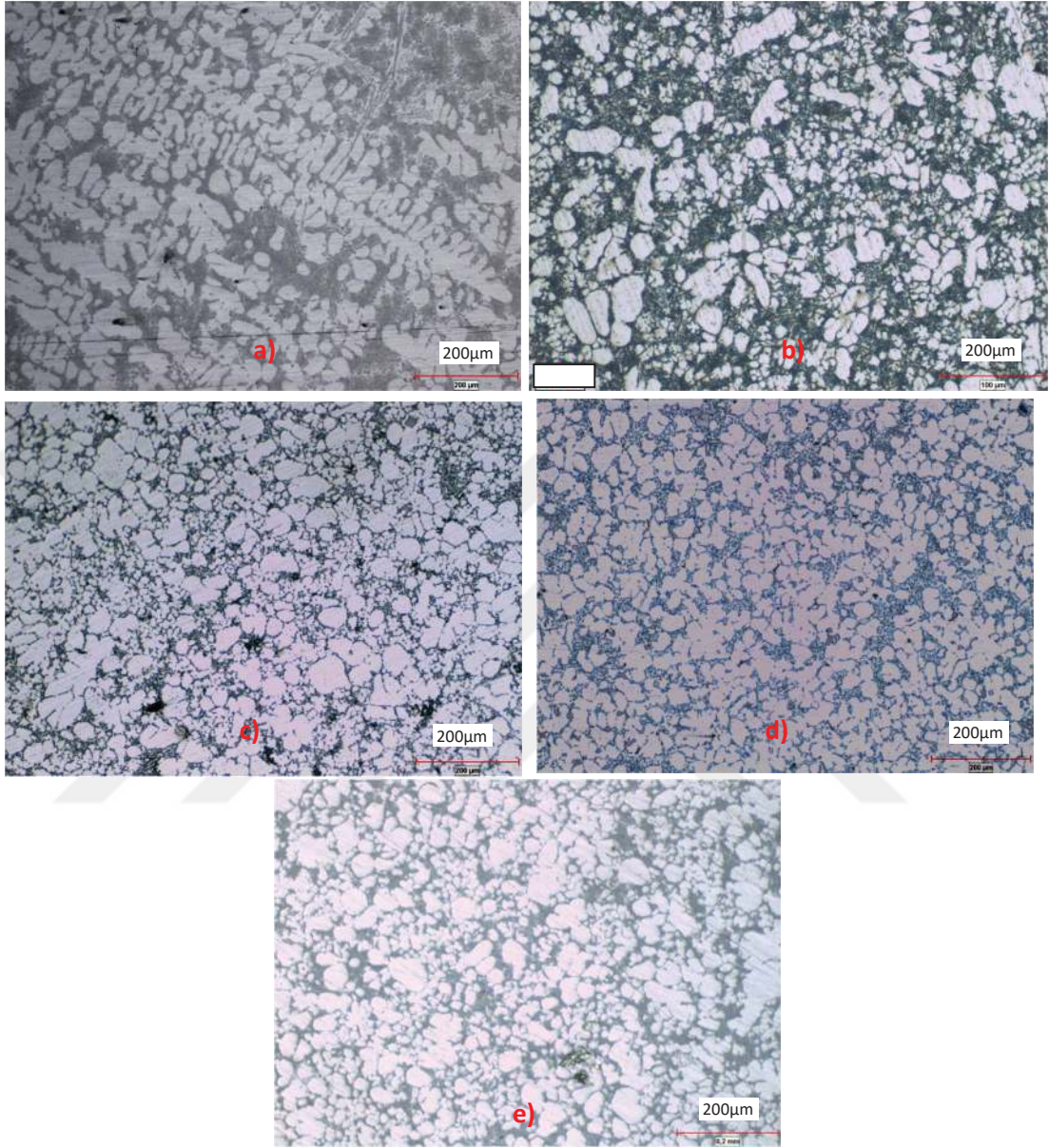
Şekil 4.5 Sigmasoft HotSpotFSTime analiz karşılaştırması

Hava sıkışması ve çekinti açısından kritik değerlendirme alanımızdaki “HotSpotFSTime” sonucu baz alındığında toplamda optimizasyon gerçekleştirilen 14 farklı tasarım arasından şekil 4.4’de gösterilen yolluklardan en kalın girişli olan (v13) en iyi sonucu vermiştir.

4.3 Mikroyapı Analizleri

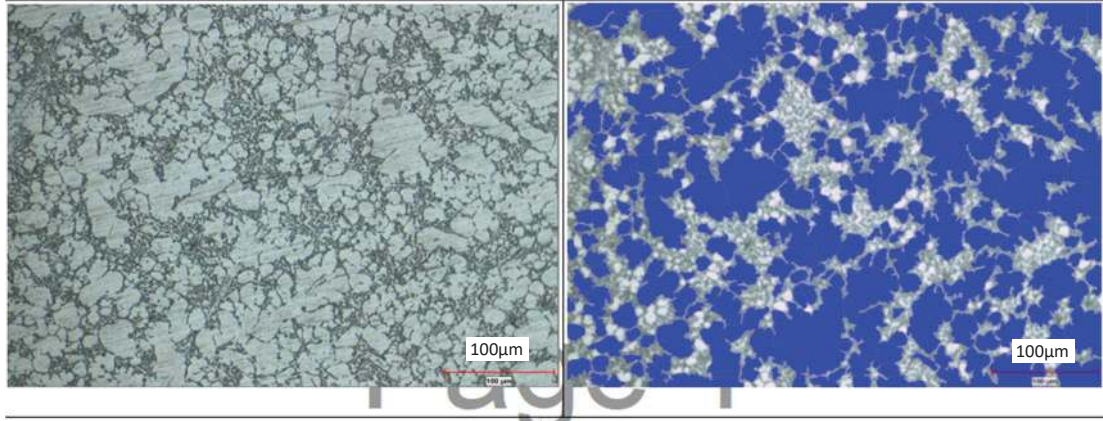
Çalışmada elde edilen numunelerde ve parçalarda yarı katı dökümün başarılı olduğunun göstergesi olarak dendritik yapının kırılması ve küresel yapının elde edilmesinin kontrolü mikroyapı analiziyle sağlanmaktadır. Özellikle numune dökümlerinde gravite yarı katı döküm yapıldığı için soğuk birleşmeler olmuştur. Bu sebeple mekanik testlerden kullanılabilecek sonuçlar elde edilememiştir. Numune dökümlerinde yapılan mikroyapı analizleri parametre tespitinde büyük rol oynamıştır. Şekil 4.6’da a) görselinde gravite döküm sonrası elde edilen tamamen dentritik mikroyapı görüntüsü paylaşılmıştır, b) görselinde YBD ile elde edilmiş homojen olmayan dendritlerin kırılmaya başladığı mikroyapı görüntüsü paylaşılmıştır, yarı katı

döküm yöntemleriyle dendrit kolların tamamen kırılması sonucunda elde edilen küresel mikroyapı görselleri c) ve d)'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.6 Döküm yöntemlerine göre 100x büyütmeli mikroyapı karşılaştırmaları
a)gravite döküm mikroyapısı, b)YBD metodu ile döküme ait mikroyapı, c-d-e) AC 46000 alaşımı ile yarı katı döküm mikroyapıları sırasıyla inert gaz, entalpi çubuğu, eğimli soğutmalı plaka

Küresellik değeri 1 olduğunda %100 küreselliğin sağlandığı anlamına gelmektedir. YBD ile üretilen parçaların kürsellik ölçümü yapıldığında şekil 4.7’de görüldüğü gibi 0,15-0,35 küreselliğe sahip taneler elde edilmektedir.



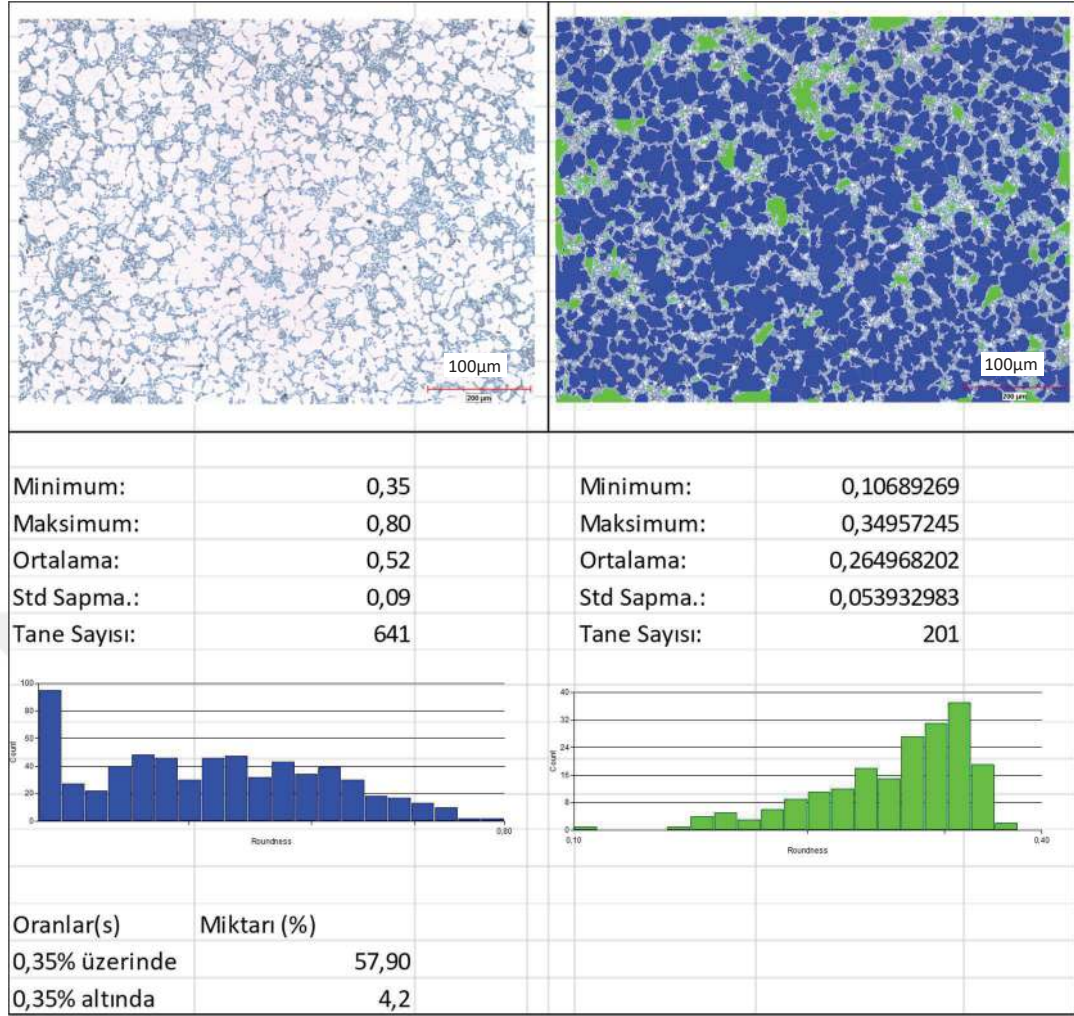
Uzunluk (µm)		
Minimum	15.01	µm
Maksimum	35.87	µm
Ortalama	19.03	µm
Std Sapma	3.87	µm
Toplam Ölçüm	4338.61	µm

Şekil 4.7 Küresellik tayini mikroyapı analiz sonuç raporu (YBD)

Şekil 4.8'deki raporda olduğu gibi ortalama değerleri 0,45'in üzerinde ölçülmektedir. Yarı katı döküm ile dendrit kolların kırıldığı ve tanelerin küreselleştiği görülmüştür. Yarı katı döküm ile elde edilen küresellik değeri YBD ile dökülen parçalara göre 2 kattan fazla artmıştır. Yapılan numune ve parça dökümlerinde tablo 4.3'de görüldüğü gibi 3 farklı döküm yönteminde de dendritlerin kırılıp küresel yapının elde edilebilirliği görülmektedir.

Tablo 4.3 Yarı katı döküm metodlarına göre elde edilen küresellik değerleri

Yarı Katı Döküm Metodu	Ortalama Küresellik	Maksimum Küresellik
Entalpi Çubuğu	0,54	0,82
Eğimli Plaka	0,52	0,80
İnert Gaz	0,53	0,81



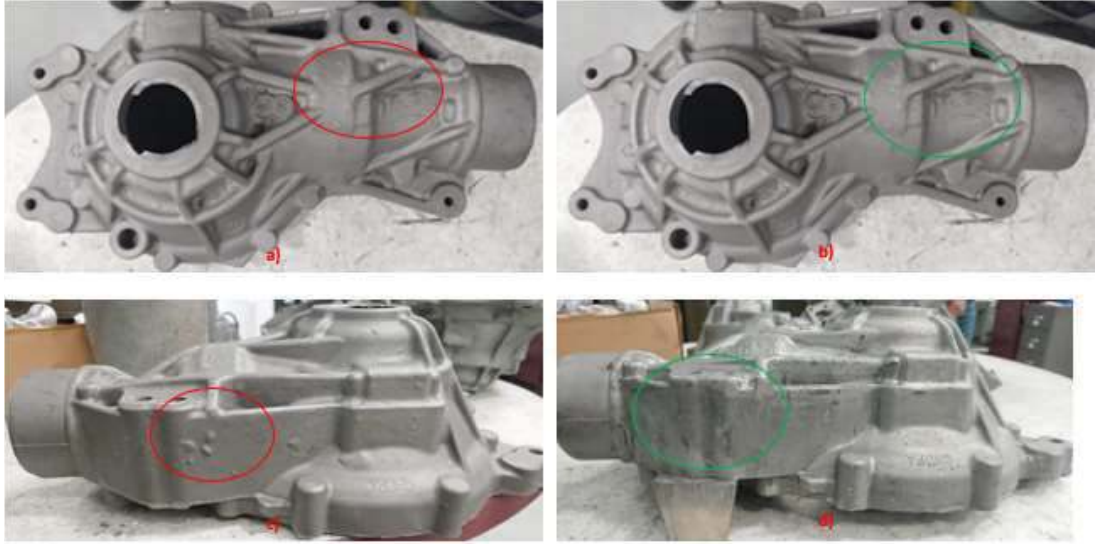
Şekil 4.8 Küresellik tayini mikroyapı analiz sonuç raporu (Yarı katı döküm)

Simge Gencalp Irizalp ve Nurşen Saklakoğlu [27] çalışmalarında 0,80 küresellik değerine ulaşmışlardır. Prosenjit Das ve ark. [29] çalışmalarında 0,60 küresellik değerine ulaşmışlardır. M.S. Salleh ve ark. [30] çalışmalarında dendrit kolların kırıldığını göstererek çalışmalarını yayınlamışlardır.

Literatür incelemelerine bakıldığında yarı katı dökülen numunelerin küreselliğinin literatüre uygun şekilde olduğu anlaşılmıştır.

4.3 Isıl İşlem ile Kabarcık (Blister) Testi

500°C’de 1 saat bekletilerek blister testi yarı katı dökümde ısıl işlem uygulanabilirliği test edilmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi blister testi hem YBD ile üretilen parçalara hem de yarı katı döküm yöntemleriyle dökülen parçalara yapılmıştır.



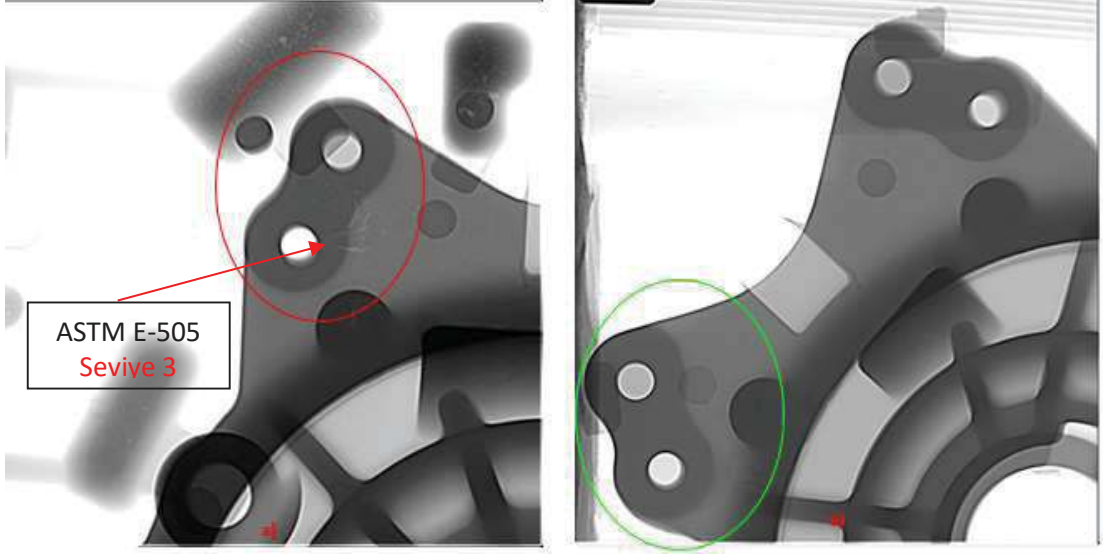
Şekil 4.9 a-c)YBD ile dökülen 500°C’de 1 saat bekletilen, b-d) Yarı Katı dökülen 500°C’de 1 saat bekletilen parçalar

Blister testinde de görüldüğü gibi yarı katı yöntemler ile üretilen parçalarda blister oluşmadığı ve T6 ısıtılmasının kabarcık oluşturmada uygulanabilirliği tespit edilmiştir. YBD ile dökülen parçaların ise ısıtılma sonrası blister oluştuğu görülmüştür. Isıtılma parametreleri hem literatür hem de pratik deneyler neticesinde 500°C sıcaklıkta 2 saat çözeltiye alma 170°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırma olarak belirlenmiştir. [22]

4.4 X-ray Radyografi Testleri

Yarı katı döküm yöntemiyle dökümü yapılan parçaların tahribatsız olarak içyapı hatalarının tespiti ASTM E-505 standardına göre X-Ray Radyografi yöntemi ile test edilmiştir.

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi YBD ile üretilen ve Yarı Katı döküm ile üretilen X-ray hata sınırlarına uygun parçaların görüntüleri paylaşılmıştır. Kabul sınırları içerisinde olan hataların da yarı katı döküm ile daha da iyileştiği görülmektedir. İncelenen parçanın X-ray kabul limitleri ASTM E-505 standardına göre seviye 2’dir. YBD ile üretilen parçalarda fire oranı %5,6 iken yarı katı döküm ile üretilen parçaların fire oranı %2,5’a düşmüştür.



Şekil 4.10 a)YBD ile dökülen, b) 580-590°C sıcaklığında Yarı Katı dökülen parçalar

Ayrıca parça üzerinden alınan çekme testi numunelerinin de radyografi kontrolleri şekil 4.11’da görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir.



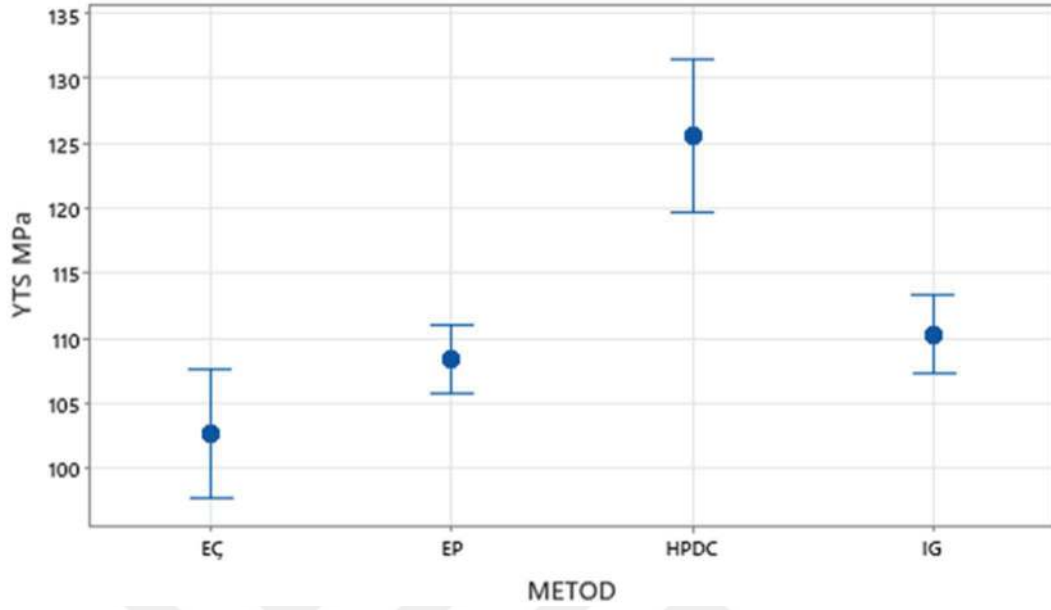
Şekil 4.11 Örnek Çekme Test numunesi X-ray kontrolü

4.5 Çekme Test Deneyi ve Sonuçları

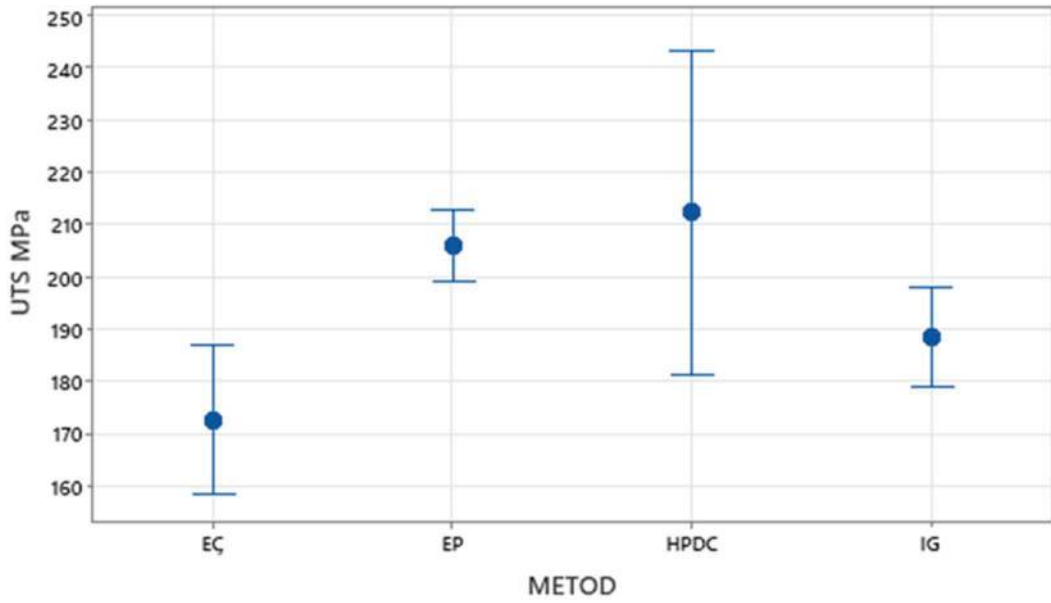
Çekme testi sonuçları ısıtıl işlemsiz ve ısıtıl işlemlili olarak şekil 4.12- 4.17 ‘de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, ısıtıl işlemsiz sonuçlara göre;

- En yüksekten düşüğe akma mukavemeti sırasıyla; YBD, İnert Gaz, Entalpi Çubuğu, Eğimli Plaka olarak görülmüştür.
- En yüksekten düşüğe çekme mukavemeti sırasıyla; YBD, Eğimli Plaka, Entalpi Çubuğu, İnert Gaz olarak görülmüştür.
- En yüksekten düşüğe %uzama sırasıyla; Eğimli Plaka, YBD, Entalpi Çubuğu, İnert Gaz olarak görülmüştür.

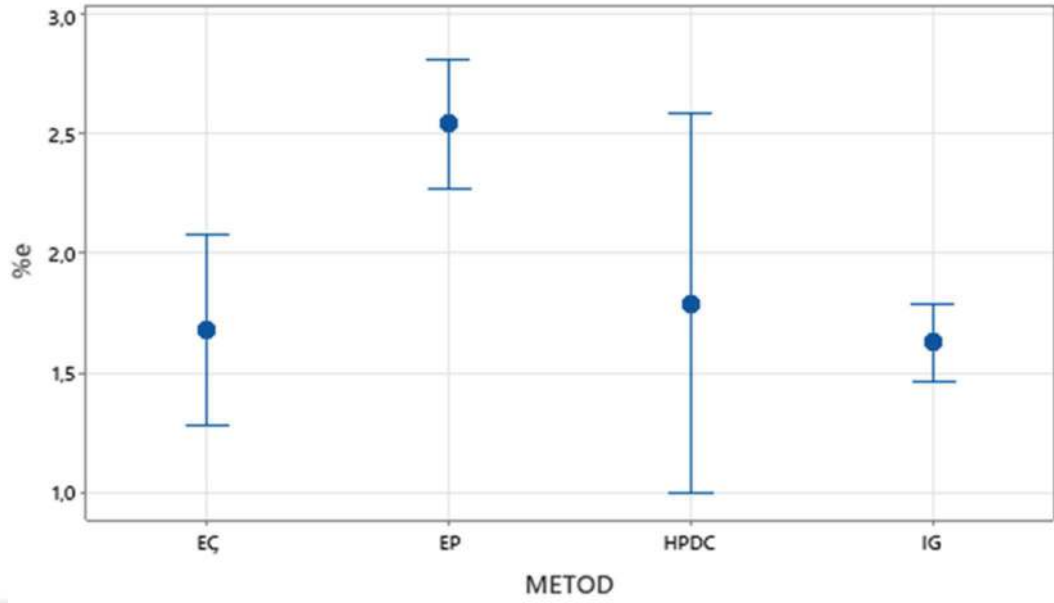
Görüldüğü gibi, YBD yarı-katı proseslere göre daha yüksek mukavemet ve düşük uzama göstermiştir. Eğimli plaka en yüksek uzama değeri göstermiştir.



Şekil 4.12 Isıl işlemsiz parçaların döküm yöntemlerine göre akma mukavemetleri



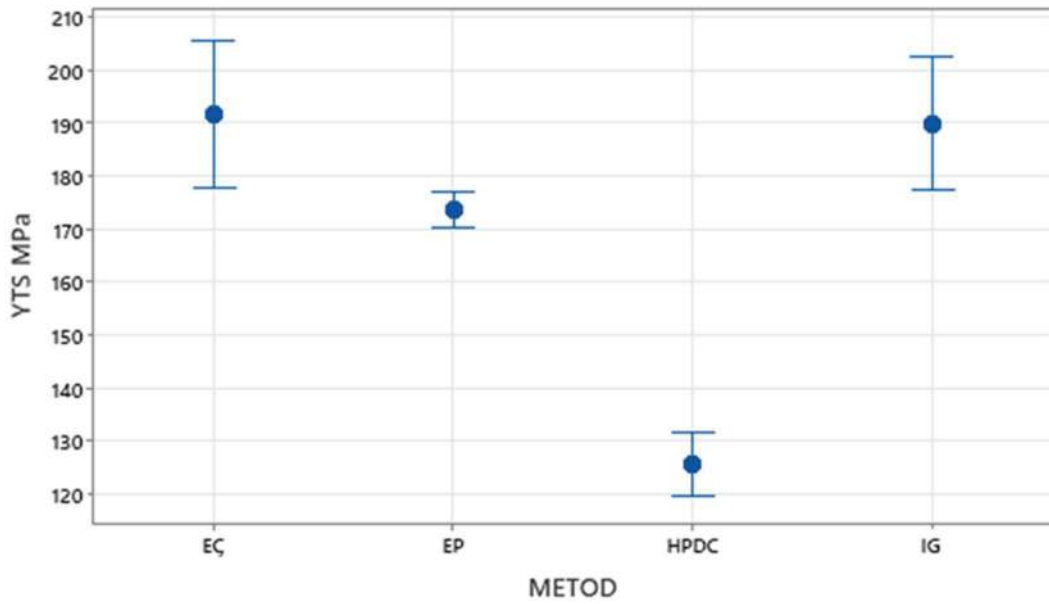
Şekil 4.13 Isıl işlemsiz parçaların döküm yöntemlerine göre çekme mukavemetleri



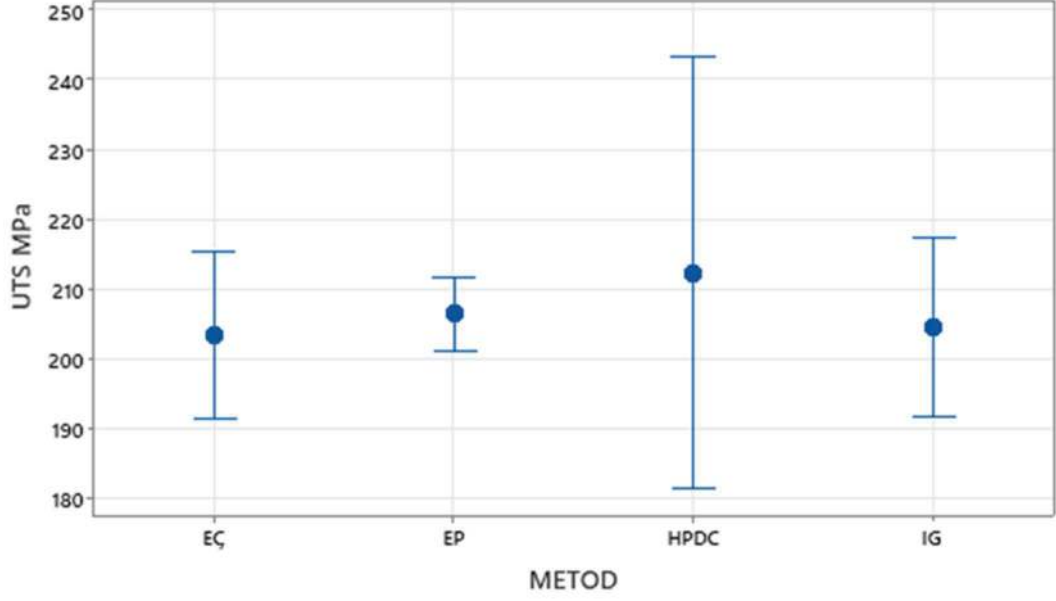
Şekil 4.14 Isıl işlemsiz parçaların döküm yöntemlerine göre %uzama değerleri

YBD parçasının daha yüksek sıcaklıkta dökümü gerçekleştiğinden katılaşma sıcaklığı ile sıcaklık farkının daha fazla olması ve soğuma hızının daha yüksek olması sonucunda ısıl işlemsiz mukavemetler daha yüksek elde edilmektedir.

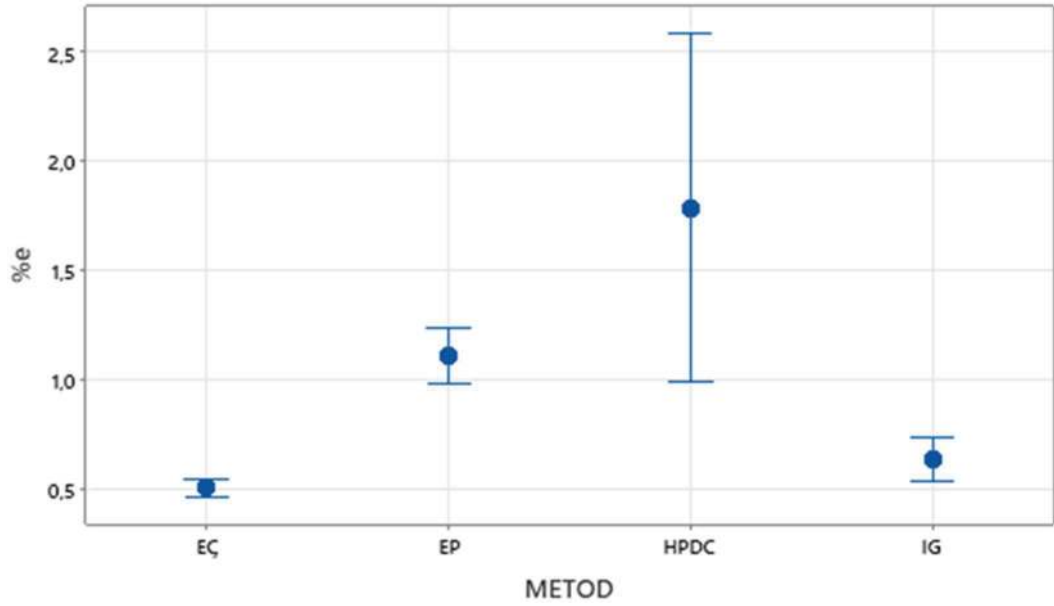
%Uzama değerleri ise sistem tasarımı gereği Entalpi Çubuğu ve Inert Gaz parçalarında ergimiş metal transferinin uzun sürmesi ve atmosferle temasının fazla olması sebebiyle düşük çıkmaktadır.



Şekil 4.15 Isıl işlemli parçaların döküm yöntemlerine göre akma mukavemeti



Şekil 4.16 Isıl işlemlenmiş parçaların döküm yöntemlerine göre çekme mukavemeti



Şekil 4.17 Isıl işlemlenmiş parçaların döküm yöntemlerine göre %uzama değerleri

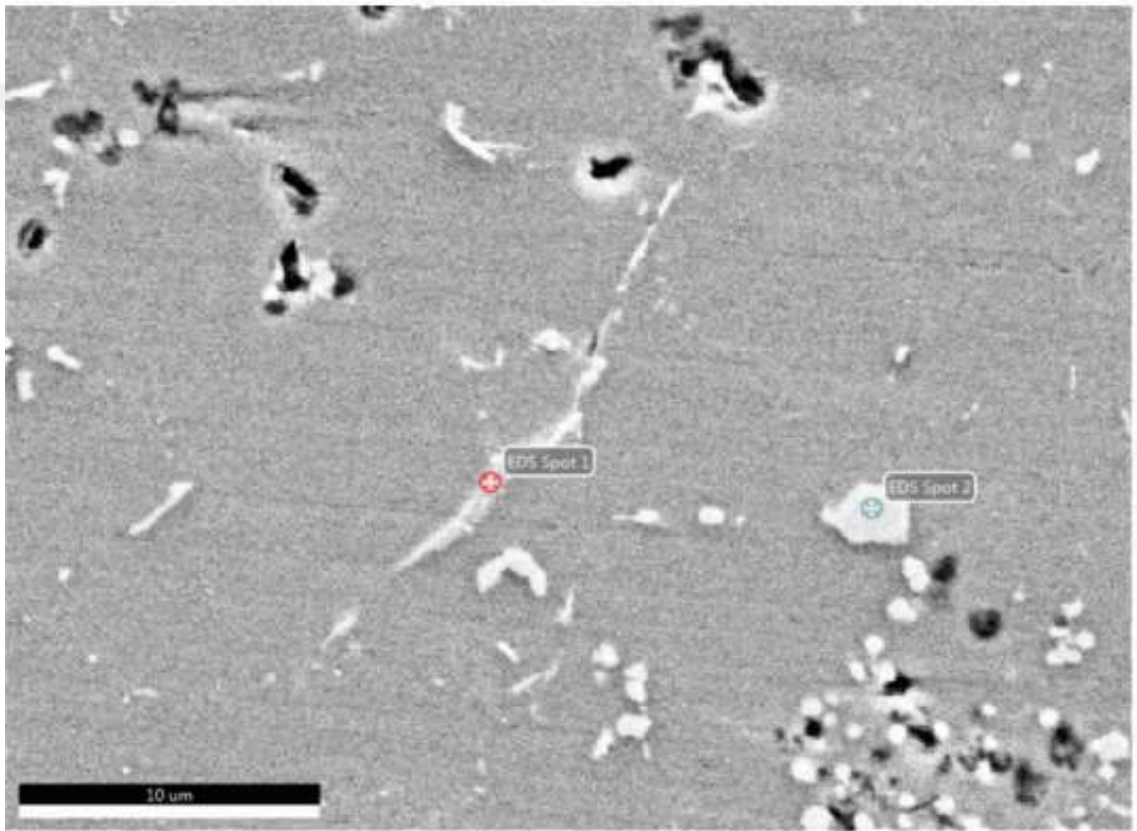
Mevcut YBD ile üretilen parçalara blister problemi sebebiyle ısıtıl işlem uygulanamamıştır.

- Isıl işlem uygulanan parçaların %uzama değerleri ısıtıl işlem etkisi ile azalmaktadır. En iyi %uzama değerleri Eğimli Plaka dökümünde görülmüştür.
- Isıl işlemlenmiş sonuçları karşılaştırdığımızda en yüksek akma ve çekme mukavemeti Entalpi Çubuğu dökümü ile elde edilmiştir. Akma mukavemeti YBD'e göre %40 civarında artmıştır. Ancak, uzamanın düşük olması sebebiyle çekme değerine

ulaşamadan koptuğu için, çekme mukavemetinde ısıl işlem ile belirgin bir artış gözlenmemiştir.

4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları

Numunelerde oluşan intermetallik bileşiklerin formülü, EDX analizi ile elde edilen kimyasal bileşimler kullanılarak stokiometrik olarak belirlenmiştir. Çekme ubuğu kırık yüzeylerinden elde edilen EDX analizi ve bileşiklerin formülasyonu örnek olarak şekil 4.18 ve tablo 4.4’de örnek olarak verilmiştir.

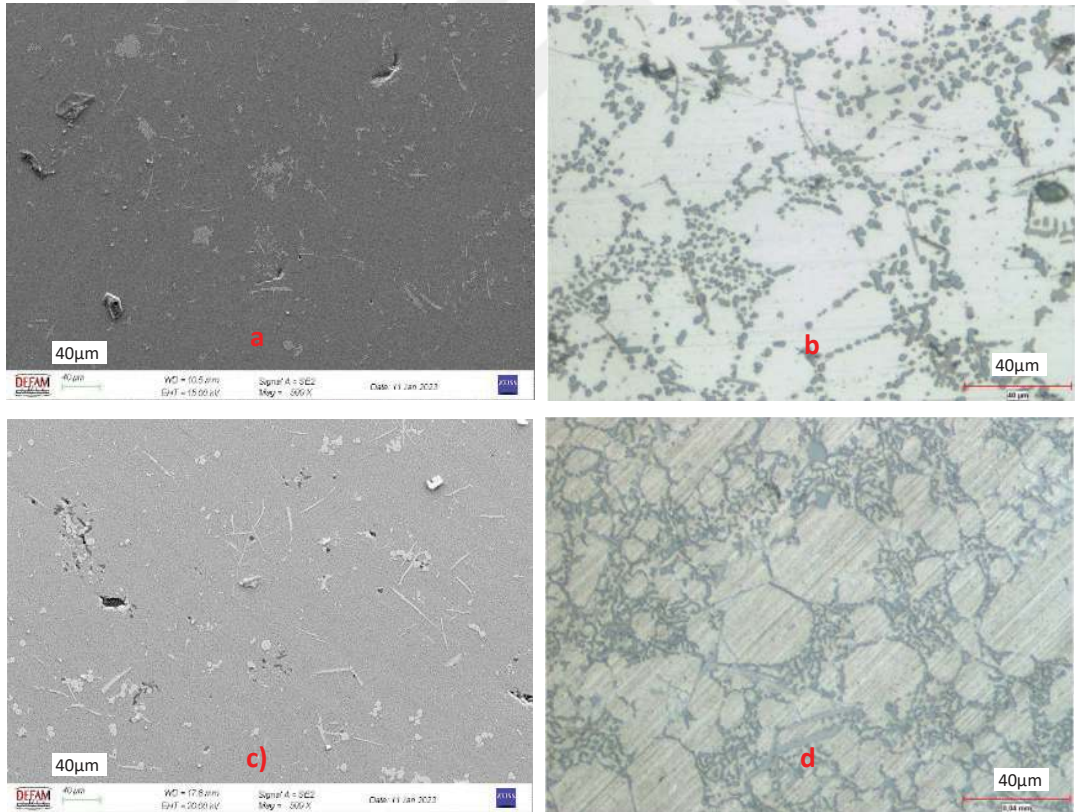


şekil 4.18 Entalpi ubuğu dökümü çekme ubuğuğunun kırık yüzey SEM görüntüsü

Tablo 4.4 Entalpi Çubuğu dökümü çekçe çubuğu kırık yüzey EDX analiz sonuçları

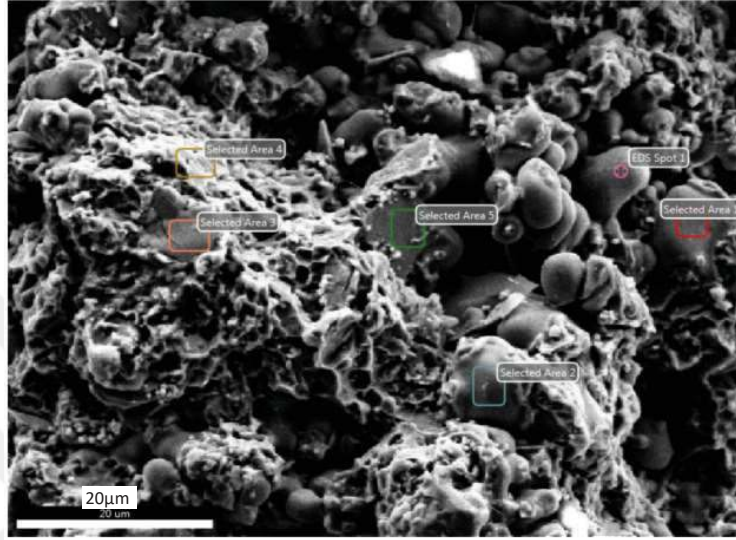
	Spot 1		Spot 2	
	Ağırlıkça%	Önerilen Formül	Ağırlıkça%	Önerilen Formül
Al	74,86	β - Al ₁₅ FeSi phase	63,45	Al ₁₅ Si ₂ (FeMn) ₃
Si	15,71		9,08	
Fe	9,42		18,59	
Mn	-		8,85	

Bu çalışmada SEM ve metal mikroskobu incelemelerinde malzemelerde çok miktarda intermetalik bileşikler bulunduğu görülmüştür (Şekil 4.19). Bu intermetalikler, genel olarak, polihedral veya iğnemsî şekilde oluşmuşlardır. Malzemelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilebilmesi için bu intermetaliklerin belirlenmesi önemlidir.



Şekil 4.19 İnert gaz ile yarı katı döküm parçalara ait a-c)SEM görüntüleri, b-d) optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.19 ve 4.20’de görüldüğü gibi, yarı-katı döküm sonrası tüm numunelerde iğnemi β -Al₁₅FeSi ve polihedral Al₁₅Si₂(FeMn)₃ fazları görülmüştür. Döküm sonrası genellikle oluşan çin yazısı şekilli intermetaliklerin yarı-katı dökümlerde oluşmadığı görülmüştür. İğnemi sert intermetaliklerin süneklik üzerinde olumsuz etkisi olduğu bilinmektedir.



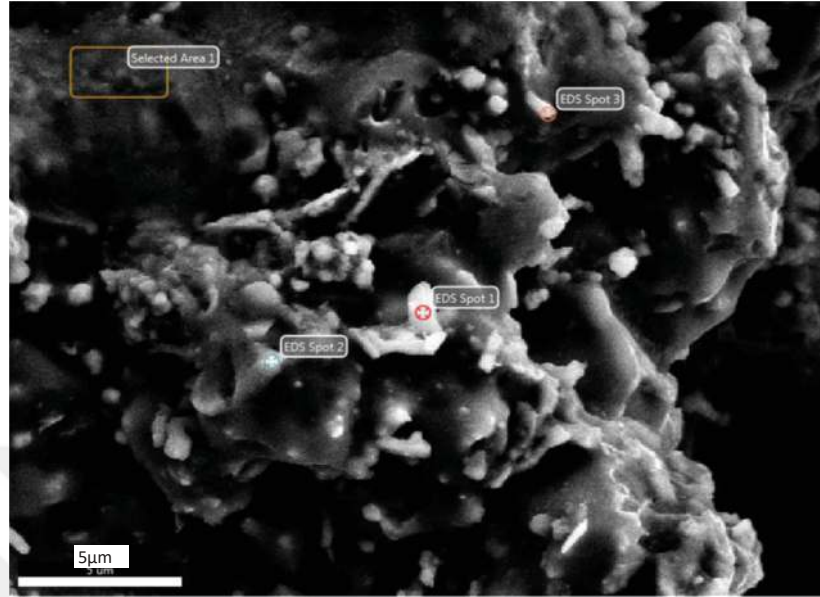
Şekil 4.20 İnert gaz dökümü çekme testi numunesi kırık yüzey SEM incelemesi

Tablo 4.5 Şekil 4.20’de İşaretli bölgelerden alınan EDX analiz pikleri

Selected area 1	Selected area 2	Spot 1	Selected area 3	Selected area 4	Selected area 5																																																																																																																																												
α -Al			Polihedral intermetalik (Al ₁₅ Si ₂ (FeMn) ₃)																																																																																																																																														
<table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th></tr><tr><td>C K</td><td>10.30</td></tr><tr><td>O K</td><td>0.49</td></tr><tr><td>NaK</td><td>0.03</td></tr><tr><td>MgK</td><td>0.99</td></tr><tr><td>AlK</td><td>81.79</td></tr><tr><td>SiK</td><td>2.33</td></tr><tr><td>SrL</td><td>0.98</td></tr><tr><td>CrK</td><td>0.16</td></tr><tr><td>MnK</td><td>0.17</td></tr><tr><td>FeK</td><td>0.22</td></tr><tr><td>CuK</td><td>1.89</td></tr><tr><td>ZnK</td><td>0.84</td></tr></table>	Element	Weight %	C K	10.30	O K	0.49	NaK	0.03	MgK	0.99	AlK	81.79	SiK	2.33	SrL	0.98	CrK	0.16	MnK	0.17	FeK	0.22	CuK	1.89	ZnK	0.84	<table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th></tr><tr><td>C K</td><td>16.15</td></tr><tr><td>O K</td><td>0.73</td></tr><tr><td>NaK</td><td>0.02</td></tr><tr><td>MgK</td><td>0.89</td></tr><tr><td>AlK</td><td>78.26</td></tr><tr><td>SiL</td><td>1.47</td></tr><tr><td>CrK</td><td>0.12</td></tr><tr><td>MnK</td><td>0.10</td></tr><tr><td>FeK</td><td>0.18</td></tr><tr><td>CuK</td><td>1.45</td></tr><tr><td>ZnK</td><td>0.53</td></tr></table>	Element	Weight %	C K	16.15	O K	0.73	NaK	0.02	MgK	0.89	AlK	78.26	SiL	1.47	CrK	0.12	MnK	0.10	FeK	0.18	CuK	1.45	ZnK	0.53	<table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th></tr><tr><td>C K</td><td>13.09</td></tr><tr><td>O K</td><td>0.25</td></tr><tr><td>MgK</td><td>1.12</td></tr><tr><td>AlK</td><td>82.87</td></tr><tr><td>SiK</td><td>0.40</td></tr><tr><td>SrL</td><td>0.18</td></tr><tr><td>CrK</td><td>0.17</td></tr><tr><td>MnK</td><td>0.12</td></tr><tr><td>FeK</td><td>0.14</td></tr><tr><td>CuK</td><td>1.66</td></tr></table>	Element	Weight %	C K	13.09	O K	0.25	MgK	1.12	AlK	82.87	SiK	0.40	SrL	0.18	CrK	0.17	MnK	0.12	FeK	0.14	CuK	1.66	<table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th></tr><tr><td>C K</td><td>20.48</td></tr><tr><td>O K</td><td>2.38</td></tr><tr><td>MgK</td><td>0.42</td></tr><tr><td>AlK</td><td>48.75</td></tr><tr><td>SiK</td><td>7.13</td></tr><tr><td>SrL</td><td>0.41</td></tr><tr><td>CrK</td><td>0.87</td></tr><tr><td>MnK</td><td>6.11</td></tr><tr><td>FeK</td><td>12.35</td></tr><tr><td>CuK</td><td>1.09</td></tr></table>	Element	Weight %	C K	20.48	O K	2.38	MgK	0.42	AlK	48.75	SiK	7.13	SrL	0.41	CrK	0.87	MnK	6.11	FeK	12.35	CuK	1.09	<table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th></tr><tr><td>C K</td><td>15.71</td></tr><tr><td>O K</td><td>2.06</td></tr><tr><td>MgK</td><td>0.72</td></tr><tr><td>AlK</td><td>66.82</td></tr><tr><td>SiK</td><td>6.38</td></tr><tr><td>SrL</td><td>2.49</td></tr><tr><td>CrK</td><td>0.20</td></tr><tr><td>MnK</td><td>0.57</td></tr><tr><td>FeK</td><td>2.05</td></tr><tr><td>CuK</td><td>2.14</td></tr><tr><td>ZnK</td><td>0.85</td></tr></table>	Element	Weight %	C K	15.71	O K	2.06	MgK	0.72	AlK	66.82	SiK	6.38	SrL	2.49	CrK	0.20	MnK	0.57	FeK	2.05	CuK	2.14	ZnK	0.85	<table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th></tr><tr><td>C K</td><td>9.90</td></tr><tr><td>O K</td><td>0.88</td></tr><tr><td>MgK</td><td>0.43</td></tr><tr><td>AlK</td><td>43.16</td></tr><tr><td>SiK</td><td>3.51</td></tr><tr><td>SrL</td><td>1.55</td></tr><tr><td>CrK</td><td>0.36</td></tr><tr><td>MnK</td><td>3.80</td></tr><tr><td>FeK</td><td>34.43</td></tr><tr><td>CuK</td><td>1.95</td></tr></table>	Element	Weight %	C K	9.90	O K	0.88	MgK	0.43	AlK	43.16	SiK	3.51	SrL	1.55	CrK	0.36	MnK	3.80	FeK	34.43	CuK	1.95
Element	Weight %																																																																																																																																																
C K	10.30																																																																																																																																																
O K	0.49																																																																																																																																																
NaK	0.03																																																																																																																																																
MgK	0.99																																																																																																																																																
AlK	81.79																																																																																																																																																
SiK	2.33																																																																																																																																																
SrL	0.98																																																																																																																																																
CrK	0.16																																																																																																																																																
MnK	0.17																																																																																																																																																
FeK	0.22																																																																																																																																																
CuK	1.89																																																																																																																																																
ZnK	0.84																																																																																																																																																
Element	Weight %																																																																																																																																																
C K	16.15																																																																																																																																																
O K	0.73																																																																																																																																																
NaK	0.02																																																																																																																																																
MgK	0.89																																																																																																																																																
AlK	78.26																																																																																																																																																
SiL	1.47																																																																																																																																																
CrK	0.12																																																																																																																																																
MnK	0.10																																																																																																																																																
FeK	0.18																																																																																																																																																
CuK	1.45																																																																																																																																																
ZnK	0.53																																																																																																																																																
Element	Weight %																																																																																																																																																
C K	13.09																																																																																																																																																
O K	0.25																																																																																																																																																
MgK	1.12																																																																																																																																																
AlK	82.87																																																																																																																																																
SiK	0.40																																																																																																																																																
SrL	0.18																																																																																																																																																
CrK	0.17																																																																																																																																																
MnK	0.12																																																																																																																																																
FeK	0.14																																																																																																																																																
CuK	1.66																																																																																																																																																
Element	Weight %																																																																																																																																																
C K	20.48																																																																																																																																																
O K	2.38																																																																																																																																																
MgK	0.42																																																																																																																																																
AlK	48.75																																																																																																																																																
SiK	7.13																																																																																																																																																
SrL	0.41																																																																																																																																																
CrK	0.87																																																																																																																																																
MnK	6.11																																																																																																																																																
FeK	12.35																																																																																																																																																
CuK	1.09																																																																																																																																																
Element	Weight %																																																																																																																																																
C K	15.71																																																																																																																																																
O K	2.06																																																																																																																																																
MgK	0.72																																																																																																																																																
AlK	66.82																																																																																																																																																
SiK	6.38																																																																																																																																																
SrL	2.49																																																																																																																																																
CrK	0.20																																																																																																																																																
MnK	0.57																																																																																																																																																
FeK	2.05																																																																																																																																																
CuK	2.14																																																																																																																																																
ZnK	0.85																																																																																																																																																
Element	Weight %																																																																																																																																																
C K	9.90																																																																																																																																																
O K	0.88																																																																																																																																																
MgK	0.43																																																																																																																																																
AlK	43.16																																																																																																																																																
SiK	3.51																																																																																																																																																
SrL	1.55																																																																																																																																																
CrK	0.36																																																																																																																																																
MnK	3.80																																																																																																																																																
FeK	34.43																																																																																																																																																
CuK	1.95																																																																																																																																																

Şekil 4.20’de çekme numunesi kırık yüzey incelemesinde Selected area 1, selected area 2 ve spot 1 α -Al iken selected area 3 ve selected area 5 Fe ve Mn’ca zengin polihedral intermetalikler olduğu değerlendirilmiştir. Selected area 4 ‘te sünek kırılma işareti olan çukurcuklar yanısıra intermetalikler üzerinde klivaj(gevrek) kırılmaları da gözlenmektedir. Bu numunede %0,7 uzama olduğu dikkate alınırsa, gevrek kırılmanın daha baskın olduğu söylenebilir. Salkım şeklinde dentritlerin

bulunduğu bölge çekinti porozitesini göstermektedir. Malzemenin çok miktarda intermetalik içermesi sebebiyle kırılma gevrek formda gerçekleşmiştir.



Şekil 4.21 Eğimli plaka çekme testi numunesi kırık yüzey SEM incelemesi

Tablo 4.6 Şekil 4.21’de İşaretli bölgelerden alınan EDX analiz pikleri

Selected area 1		Spot 2		Spot 1	
Element	Weight %	Element	Weight %	Element	Weight %
O K	14.49	C K	21.44	C K	31.57
NaK	3.39	O K	20.16	O K	4.89
MgK	0.89	MgK	0.62	MgK	0.23
AlK	57.20	AlK	52.82	AlK	8.21
SiK	16.32	SiK	2.76	SiK	41.53
SrL	4.90	SrL	0.90	SrL	12.75
K K	0.29	K K	0.10	CrK	0.11
CrK	0.14	MnK	0.14	MnK	0.12
MnK	0.16	FeK	0.33	FeK	0.31
FeK	1.11	CuK	0.73	CuK	0.28
CuK	1.09				

Inert gaz ve entalpi çubuğu yarı katı dökümlerinde robot ve tezgah konumlandırılmasından ötürü sıvı metal atmosferde uzun süre geçirmektedir. Bu nedenle oksit oluşumlarına fırsat tanınmaktadır. Oluşan oksitler mekanik özellik sonuçlarını düşürmektedir. İntermetalik bileşikler kadar oksit filmler de mekanik özellikleri kötü etkilemektedir. EDS analizi sonuçlarında yüksek miktarda O, Sr, Na, K gibi elementlerin bulunması oksit filmlerin varlığını kanıtlamaktadır.

4.7. Proje hedefleri ve gerçekleşme durumları

Proje başlangıcında belirlenen hedefler ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.7’de paylaşılmıştır. Proje başlangıcında literatür ve proses karşılaştırılması yapılarak belirlenen hedef değerlere çok yakın değerler elde edilmiş ve yüksek oranda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.7 Proje hedefleri ve gerçekleşme durumları

Başarı Ölçütü	Mevcut Durum	Hedef	Gerçekleşen
Çevrim Süresi	90sn	75sn	80sn
Küresel Tane Formu	0	0,8	Ort. 0,54 Ulaşılan 0,84
Kabarcık (Yüzey Blister)	Isıl işlem sonrası var.	Isıl işlem sonrası yok	yok
Kalıp Ayırıcı	40ml	22ml	22ml

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu projede çalışılan parçanın müşterinin talep ettiği mekanik özellikleri GISS, Eğimli Plakalı Soğutma ve İnert Gaz proseslerinin üçüyle de karşılanmaktadır. Bu özellikleri karşılamış olmakla birlikte, yarı katı dökümde %uzama değerlerinin daha yüksek olması beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan hammaddenin yüksek Fe elementi içeren %100 ikincil alüminyumdan kullanılmış olması çok miktarda iğnemesi ya da polyhedral tipte intermetalik oluşumlarını teşvik etmiştir. %Uzama değerlerinin beklenen değerlere ulaşamamasının ana sebebi sert ve gevrek olan intermetalik fazlardır.

Projede kullanılan yöntemlerle hali hazırda Alçak Basıncılı Döküm Yöntemiyle (ABD) üretilen parçalar YBD tezgahlarında üretilbileceklerdir. ABD kalıplarının baskı ömürleri yaklaşık 45000'dir. Sadece döküm tezgahı değişimiyle bile baskı adedi en az 2 kat arttırılabilecektir.

Kalıp sıcaklıkları YBD dökümde 300-350°C sıcaklıklara kadar çıkmaktadır, yağlama sürecinde bu sıcaklık 250°C'nin altına düşürülmektedir. Yarı Katı döküm prosesinde kalıp sıcaklığı maksimum 250°C sıcaklığa ulaşmakta olup yağlama ile bu sıcaklık 100-150°C sıcaklıklara düşürülmektedir. Görüldüğü gibi çevrimsel ısı yükleri yarı katı dökümde oldukça düşmektedir, bunun sonucunda kalıp ömrüne öngörülen değerlerde katkı yapacağı düşünülmektedir.

Ayrıca yarı katı parça dökümlerinde ıskarta oranı %5,6'dan %2,5'a düşmüştür.

5.2. Öneriler

Yüksek basınçlı parçalar döküldüğünde T6 ısıtma işleminde kabarcık problemlerinden ötürü uygun olmamaktadır, Yarı katı prosesleri ile T6 ısıtma işlemi kabarcık olmadan uygulanabilir hale gelmiştir. Bu ısıtma işlem uygulaması ile YBD ile üretilen parçalara göre daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmiştir.

Sekonder alaşım kullanılması ve bu sekonder alaşımının yüksek miktarda Fe içeriyor olması kırılma intermetalik fazları teşvik etmiş olup malzemede beklenen

kopma ve %uzama deęerlerine eriřilememiřtir. Sekonder alařım miktarının azaltılması ve/veya daha dūřık Fe ięeren sekonder alařımların kullanılması daha yūkses kopma ve %uzama deęerlerine ulařacaęı dūřūnūlmektedir.

Yarı katı proses tasarlanırken metal transfer sūresinin olumsuz etkisi olmaktadır. Bu durumu engellemek ięin sıvı metal transferi ve yarı katı hale getirilmiř alařımın kovana transferinin daha kısa sūrede yapılması gerektięi gōrūlmūřtur.



KAYNAKLAR

- [1] W. M. Mao, Z. Z. Chen, H. W. Liu, and Y. G. Li, "Preparation and rheo-die casting of semi-solid A356 aluminum alloy slurry through a serpentine pouring channel," in *Solid State Phenomena*, 2013, pp. 404–409. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.192-193.404.
- [2] P. Kapranos, "Current state of semi-solid net-shape die casting," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 12, pp. 1–13, 2019, doi: 10.3390/met9121301.
- [3] H. V. Atkinson, "Modelling the semisolid processing of metallic alloys," *Prog Mater Sci*, vol. 50, no. 3, pp. 341–412, 2005, doi: 10.1016/j.pmatsci.2004.04.003.
- [4] R. Koeune and J. P. Ponthot, "An improved constitutive model for the numerical simulation of semi-solid thixoforming," *J Comput Appl Math*, vol. 234, no. 7, pp. 2287–2296, 2010, doi: 10.1016/j.cam.2009.08.085.
- [5] F. Aydoğan, E. B. Mentese, and N. Saklakoglu, "Alüminyum Alaşımlarında Yarıkatı Döküm Yöntemleri," *MANİSA CELAL BAYAR UNIVERSITY III. NATIONAL UNIVERSITY INDUSTRY COOPERATION, R&D AND INNOVATION CONGRESS*, Dec. 2020.
- [6] İ. Özbay *et al.*, "Aluminium High Pressure Die Casting Application on Rear Frame Rails," *European Mechanical Science*, vol. 3, no. 2, pp. 62–67, Jun. 2019, doi: 10.26701/ems.422299.
- [7] E. ALTINOK, H. KAYSERİLİ, A. MERT, and S. A. ALTINEL, "LIGHTWEIGHT DOOR RING SOLUTION IN CAR BODY DEVELOPMENT," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCES ON AUTOMOTIVE AND TECHNOLOGY*, vol. 1, pp. 131–136, 2017, doi: 10.15659/ijaat.17.07.529.
- [8] T. A. Başer, "ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI," *Mühendis ve Makina*, vol. 53, pp. 51–58, 2012.
- [9] M. Dünder, G. Güngör, and A. Alüminyum, "OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ALÜMİNYUM UYGULAMALARI VE SÜREKLİ DÖKÜM TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ ALÜMİNYUM LEVHA ALAŞIMLARI."
- [10] C.-J. Chen, "OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN A356 VIA SIMULATION AND PERMANENT MOLD TEST-BARS," Doctor of Philosophy, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY, Ohio, 2014.
- [11] A. Akdoğan Eker, "Al ve Alaşımları," Mar. 2013.
- [12] E. Okumuş, "Sürekli Levha Döküm Tekniğiyle Üretilmiş 1XXX-3XXX ve 5XXX Alaşımlı Levhaların Mikro Yapı Karakterizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, İstanbul, 2003.

- [13] E. D. Şam Parmak and B. Küçükelyas, “ÇÖKELME SERTLEŞMESİ (YAŞLANDIRMA),” Bursa, 2016.
- [14] R. Franke, D. Dragulin, A. Zovi, and F. Casarotto, “Progress in Ductile Aluminium High Pressure Die Casting Alloys For The Automotive Industry,” *La metallurgia italiana*, pp. 19–23, 2007.
- [15] J. G. (John G. Kaufman and E. L. Rooy, *Aluminum alloy castings : properties, processes, and applications*. ASM International, 2004. Accessed: May 08, 2023. [Online]. Available: www.asminternational.org
- [16] M. Conserva, *The High Pressure Die Casting Process*. Affimet, 2007. Accessed: May 08, 2023. [Online]. Available: <file:///E:/anglais/Livre1/10.html>
- [17] J. R. Brown, “Foseco Non-Ferrous Foundryman’s Handbook,” 1994.
- [18] CEN (European Committee For Standardization), “Alüminyum ve alüminyum alaşımları-Tekrar ergitme için alaşımlı ingotlar-Özellikler,” Jul. 2020.
- [19] R. Alloys, “Primary Aluminium Alloys for Pressure die Casting.”
- [20] X. G. Hu *et al.*, “Blistering in semi-solid die casting of aluminium alloys and its avoidance,” *Acta Mater*, vol. 124, pp. 446–455, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.actamat.2016.11.032.
- [21] Y. Birol, “Semi-solid processing of the primary aluminium die casting alloy A365,” *J Alloys Compd*, vol. 473, no. 1–2, pp. 133–138, 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2008.05.074.
- [22] Z. Yuan, Z. Guo, and S. M. Xiong, “Effect of as-cast microstructure heterogeneity on aging behavior of a high-pressure die-cast A380 alloy,” *Mater Charact*, vol. 135, no. September 2017, pp. 278–286, 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2017.11.040.
- [23] H. Guo, X. Yang, B. Hu, and G. Zhu, “Rheo-diecasting process for semi-solid aluminum alloys,” *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, vol. 22, no. 4, pp. 590–595, 2007, doi: 10.1007/s11595-006-4590-0.
- [24] S. G. Shabestari and E. Parshizfard, “Effect of semi-solid forming on the microstructure and mechanical properties of the iron containing Al-Si alloys,” *J Alloys Compd*, vol. 509, no. 30, pp. 7973–7978, 2011, doi: 10.1016/j.jallcom.2011.05.052.
- [25] S. Gencalp Irizalp and N. Saklakoglu, “Effect of Fe-rich intermetallics on the microstructure and mechanical properties of thixoformed A380 aluminum alloy,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 58–62, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.jestch.2014.03.006.
- [26] M. fan QI, Y. lin KANG, and G. ming ZHU, “Microstructure and properties of rheo-HPDC Al-8Si alloy prepared by air-cooled stirring rod process,” *Transactions of*

- Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 27, no. 9, pp. 1939–1946, 2017, doi: 10.1016/S1003-6326(17)60218-8.
- [27] S. Gencalp and N. Saklakoglu, “Semisolid microstructure evolution during cooling slope casting under vibration of A380 aluminum alloy,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, no. 9, pp. 943–947, 2010, doi: 10.1080/10426911003636944.
 - [28] European Committee For Standardization, “TS EN 1706:2020-07,” *TSE*, 2020.
 - [29] P. Das, S. K. Samanta, H. Chattopadhyay, and P. Dutta, “Effect of pouring temperature on cooling slope casting of semi-solid Al-Si-Mg alloy,” *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 25, no. 5, pp. 329–339, 2012, doi: 10.11890/1006-7191-125-329.
 - [30] A. M. Aziz, M. Z. Omar, Z. Sajuri, and M. S. Salleh, “Microstructural morphology of rheocast A319 aluminium alloy,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1177/1687814016649354.
 - [31] M. S. Salleh, M. Z. Omar, J. Syarif, and M. N. Mohammed, “An Overview of Semisolid Processing of Aluminium Alloys,” *ISRN Materials Science*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1155/2013/679820.
 - [32] J. Wannasin, R. Canyook, R. Burapa, L. Sikong, and M. C. Flemings, “Evaluation of solid fraction in a rheocast aluminum die casting alloy by a rapid quenching method,” *Scr Mater*, vol. 59, no. 10, pp. 1091–1094, 2008, doi: 10.1016/j.scriptamat.2008.07.029.
 - [33] R. Canyook, S. Petsut, S. Wisutmethangoon, M. C. Flemings, and J. Wannasin, “Evolution of microstructure in semi-solid slurries of rheocast aluminum alloy,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 20, no. 9, pp. 1649–1655, Sep. 2010, doi: 10.1016/S1003-6326(09)60353-8.
 - [34] J. Wannasin *et al.*, “Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 20, no. SUPPL. 3, pp. s1010–s1015, 2010, doi: 10.1016/S1003-6326(10)60622-X.
 - [35] M. Wessén, “Semi Solid Manufacturing Rheocasting / RheoMetal Process,” *Rheometal AB*, Dec. 2015.
 - [36] J. A. Yurko, R. A. Martinez, and M. C. Flemings, “Commercial development of the semi-solid rheocasting (SSR) process,” *Metallurgical Science and Technology*, vol. 21, no. 1, 2003.