BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AlSi12(Fe) YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM ALAŞIMINDA Sr İLAVELERİNİN ALAŞIMIN MİKROYAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem SAPMAZ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AlSi12(Fe) YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM ALAŞIMINDA Sr İLAVELERİNİN ALAŞIMIN MİKROYAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem SAPMAZ
(181212874019)

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhammet ULUDAĞ

AĞUSTOS 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 181212874019 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, İrem SAPMAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "AlSi12(Fe) YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM ALAŞIMINDA Sr İLAVELERİNİN ALAŞIMIN MİKROYAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri üyeleri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Muhammet ULUDAĞ** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Cem KAHRUMAN** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL Atatürk Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 05 Ağustos 2021
Savunma Tarihi : 26 Ağustos 2021

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: İrem SAPMAZ

İmzası :

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans dönemim boyunca desteğini, değerli bilgi birikimi ve deneyimlerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, bilgisiyle her zaman yolumu aydınlatan, gerek metalürji mühendisi gerekse akademisyen olarak her zaman örnek alacağım ve izinden gideceğim, yaşadığım her türlü zorlukta beni anlayışla karşılayan, bana olan inancını hiçbir zaman kaybetmeyen ve en önemlisi desteğini hiçbir zaman benden eksik etmeyen değerli danışman hocam Dr. Muhammet Uludağ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasındaki döküm denemelerinin gerçekleştirildiği Can Metal Enjeksiyon Döküm ailesine, verdikleri sonsuz destek için şükranlarımı sunmayı borç bilirim. Yeşilova Holding Ar-Ge Merkezi'nde görev alan ve yüksek lisans sürecim boyunca benden desteklerini esirgemeyen tüm ekip arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar imkanlarını ve teknik desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen başta Dr. Emrah Fahri Özdoğru ve değerli TRİ Metalürji ekibine teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın en zorlu anlarında benden sevgilerini, desteklerini ve güvenlerini hiçbir zaman eksik etmeyen biricik ailem Nihal Sapmaz, Ercan Sapmaz, Özlem Akkaya, İlkay Akkaya ve varlığıyla desteklerin en büyüğünü veren hayat arkadaşım Cem Kahramanoğlu'na teşekkürlerin en büyüğünü borç bilirim. Sizi çok seviyorum.

Ağustos 2021 İrem SAPMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **x**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
1.2.1 Alüminyum alaşımları 3
1.2.1.1 Al-Si alaşımları 4
1.2.1.2 Al-Si alaşımlarının mikroyapısal özellikleri 7
1.2.1.3 Al-Si alaşımlarında görülen döküm hataları 10
1.2.1.4 Al-Si alaşımlarında döküm kalitesi iyileştirme çalışmaları 12
1.2.2 Al-Si alaşımında silisyum modifikasyonu 15
1.2.2.1 Modifikasyon metodları 15
1.2.2.2 Stronsiyum modifikasyonu 16
1.2.3 Al alaşımlarının üretiminde kullanılan döküm yöntemleri 20
1.2.3.1 Döküm yöntemleri arasında basınçlı dökümün yeri ve önemi 21
2.3.3 Yüksek basınçlı döküm yöntemi 22
2.3.2 Kalıp tasarımı ve döküm simülasyonu 24
1.3 Hipotez 25
2. MATERYAL VE YÖNTEM **26**
2.1 Kullanılan Alaşım ve Malzemeler 27
2.2 Kullanılan Modifiye Edici Malzeme 28
2.3 Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi ile Çekme Çubuğu Üretimi 28
2.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Cihazlar 32
2.4.1 Numune hazırlamada kullanılan cihazlar 32
2.4.2 Mikroyapı analizinde kullanılan cihazlar 34
2.4.3 Vakum altında katılaştırma (VAK) cihazı 35
2.4.4 Yoğunluk ölçümü için kullanılan Arşimet ölçüm cihazı 36
2.4.5 Tahribatsız görüntülemede kullanılan X ışını radyografi cihazı 36
2.4.6 Sertlik test cihazı 37
2.4.7 Çekme test cihazı 38
2.4.8 Darbe test cihazı 39
2.5 Deneysel Çalışmada Kullanılan Simülasyon Programları ve Yapılan Analiz Çalışmaları 40
2.6 Yapılan Testler 41

2.6.1 VAK numunelerinin hazırlanması ve yoğunluk ölçümü 41
2.6.2 VAK analizi ile metal kalitesinin belirlenmesi 42
2.6.3 Sertlik testi 42
2.6.4 Çekme testi 43
2.6.5 Çentik darbe testi 43
2.6.6 X ışını radyografi analizi 43
2.6.7 Mikroyapı analizi 43
2.6.8 SEM analizi 44
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
3.1 Döküm Simülasyonu Sonuçları 45
3.2 Metal Kalitesi Sonuçları 50
3.3 Sertlik Testi Sonuçları 54
3.4 Çekme Testi Sonuçları 55
3.5 Çentik Darbe Test Sonuçları 57
3.6 X Işını Radyografi İnceleme Sonuçları 58
3.7 Mikroyapı Analiz Sonuçları 60
3.8 SEM Analizi Sonuçları 64
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 73
4.1 Sonuçlar 73
4.2 Öneriler 75
KAYNAKÇA 76
ÖZGEÇMİŞ 82

KISALTMALAR

3D : Three Dimension (Üç boyut)

BSED : Back Scattered Electron Detector (Geri saçmalı elektron dedektörü)

CAD : Computer Aided Designing (Bilgisayar destekli tasarım)

$\mathbf{D_{80mbar}}$: 80 mbar vakum altında katılaşan numunenin yoğunluğu

$\mathbf{D_{atm}}$: Atmosferik koşullarda katılaşan numunenin yoğunluğu

DI : Density Index (Yoğunluk indeksi)

EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji dağılımlı spektrometre)

EN : European Norm (Avrupa standardı)

FDM : Finite Difference Method (Sonlu farklar yöntemi)

FEM : Finite Element Method (Sonlu elemanlar yöntemi)

ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası standartlar örgütü)

NADCA : North American Die Casting Association (Kuzey Amerika Döküm Derneği)

ppm : part per million (Milyon başına parçacık)

SED : Secondary Electron Dedector (İkincil elektron dedektörü)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)

VAK : Vakum Altında Katılaştırma

TS : Türk Standardı

SEMBOLLER

° C	**:** Santigrat derece
µm	**:** Mikrometre
Al	**:** Alüminyum
cm^3	**:** Santimetreküp
Cu	**:** Bakır
dk	**:** Dakika
Fe	**:** Demir
g	**:** Gram
HB	**:** Brinell sertlik
J	**:** Joule
kg	**:** Kilogram
kN	**:** Kilonewton
kW	**:** Kilowatt
m	**:** Metre
mbar	**:** Milibar
Mg	**:** Magnezyum
mm	**:** Milimetre
Mn	**:** Mangan
MPa	**:** Megapascal
Ø	**:** Çap
s	**:** Saniye
Si	**:** Silisyum
Sr	**:** Stronsiyum
α	**:** Alfa
β	**:** Beta

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Deneme çalışmalarında kullanılan AlSi12(Fe) alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık). **28**
Çizelge 2.2 : Deneme çalışmalarında kullanılan Al10Sr master alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık). **28**
Çizelge 2.3 : Döküm denemelerinde kullanılan alaşımın artan Sr miktarına bağlı olarak değişen kimyasal kompozisyonu (% ağırlık). **28**
Çizelge 2.4 : Click2Cast ve MagmaSoft programlarında kullanılan döküm dolum analizi parametreleri. **40**
Çizelge 3.1 : Sr miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk indeksi (DI) değerleri. **50**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Al-Si ikili faz denge diyagramı. **5**
Şekil 1.2 : Al-Si alaşımlarında gerçekleşmesi beklenen muhtemel ötektik katılaşma örnekleri. a) Termal gradyana ters yönde çekirdeklenme, b) Al dendritler üzerinde çekirdeklenme ve büyüme, c) Dendritler arasında ötektik tanelerin çekirdeklenmesi **8**
Şekil 1.3 : Al-12,5Si alaşımının titreşim uygulamasına bağlı olarak mikroyapısında meydana gelen değişim: a) Titreşim uygulaması yapılmayan döküm, b) Titreşim uygulaması yapılan döküm. **9**
Şekil 1.4 : İç kusurların sınıflandırılması. **11**
Şekil 1.5 : Yüzey kusurlarının sınıflandırılması **11**
Şekil 1.6 : Geometrik kusurların sınıflandırılması. **12**
Şekil 1.7 : Bifilm oluşumunun şematik görüntüsü. **13**
Şekil 1.8 : Döner gaz giderme cihazının şematik görüntüsü. **14**
Şekil 1.9 : Ötektik Al-Si alaşımının farklı Sr değerleri için gerçekleştirilen modifikasyon çalışmalarına bağlı olarak elde edilen mikroyapı görüntüleri; a) modifiye edilmemiş, b) 50 Sr, c) 250 Sr, d) 350 Sr. **18**
Şekil 1.10 : Basınçlı döküm yöntemlerinin döküm yöntemine ve kullanılan enjeksiyon presine göre sınıflandırılması **22**
Şekil 1.11 : Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm presinin şematik gösterimi **23**
Şekil 2.1 : Deneysel çalışma şematik gösterimi. **26**
Şekil 2.2 : Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların şematik gösterimi **27**
Şekil 2.3 : Üretimi yapılan a) Üretilen Çekme çubuklarının görüntüsü ve kesit kalınlığı değerleri, b) Silindirik çekme test çubuğunun ölçüleri, c) Çekme çubuğu salkımı. .. **29**
Şekil 2.4 : 5 no'lu numuneden alınan mikroyapı ve sertlik numunelerinin kesim sırasının temsili şematik gösterimi. **30**
Şekil 2.5 : Döner gaz giderme sistemi ile gerçekleştirilen gaz giderme prosesi. **30**
Şekil 2.6 : Döküm çalışmalarının gerçekleştirildiği 400 ton kapasiteli Metal Pres marka enjeksiyon presi. **31**
Şekil 2.7 : Numune kesiminde kullanılan Bulucut marka makro kesme cihazı. **32**
Şekil 2.8 : Zımparalama ve parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği Struers marka cihaz. **33**
Şekil 2.9 : Numunelerin bakaliteye alınmasında kullanılan Bulumount marka cihaz. **33**
Şekil 2.10 : Mikroyapısal incelemelerin gerçekleştirildiği Clemex yazılımının kullanıldığı Nikon Eclipse marka optik mikroskop. **34**
Şekil 2.11 : Deneysel çalışmada kullanılan Jeol JCM 6000 marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu. **35**
Şekil 2.12 : Doğuş Makine marka vakum altında katılaştırma test cihazı. **35**
Şekil 2.13 : Yoğunluk indeks ölçümünde kullanılan Doğuş Makine marka Arşimet ölçüm cihazı. **36**

Şekil 2.14 : Numunelerin X ışını radyografi görüntülerinin alınmasında kullanılan SRE HEX (160 kw) marka radyoskopi cihazı. **37**
Şekil 2.15 : Brinell sertlik ölçümlerinde kullanılan BMS Digirock markalı cihaz. .. **38**
Şekil 2.16 : Çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan Shimadzu marka 250 kN kapasiteli cihaz. **39**
Şekil 2.17 : Çentik darbe testlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan Alşa marka 300 J kapasiteli cihaz. **39**
Şekil 2.18 : Click2Cast ve MagmaSoft yazılımlarında gerçekleştirilen döküm dolum analizlerinde kullanılan parametreler. **41**
Şekil 2.19 : Yüzeyi hazırlanmış VAK numunesi görseli. **41**
Şekil 3.1 : Click2Cast analiz sonuçları; a) Katılaşma süresi, b) Döküm süreksizliği, c) Hava sıkışması, d) Porozite oluşumu. **46**
Şekil 3.2 : MagmaSoft analiz sonuçları; a) Katılaşma süresi, b) Döküm süreksizliği, c) Hava sıkışması, d) Porozite oluşumu. **48**
Şekil 3.3 : Artan Sr miktarına bağlı olarak VAK numunelerinin X ışını ve yüzey kesit görüntüleri. **51**
Şekil 3.4 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasına ait metal kalitesi hesaplamaları: a) Bifilm indeks, b) Bifilm sayısı, c) Ortalama porozite uzunluğu, d) Ortalama porozite alanı. **53**
Şekil 3.5 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait sertlik değerleri. **55**
Şekil 3.6 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait çekme özellikleri; a) Akma mukavemeti (MPa) , b) çekme mukavemeti (MPa), c) % uzama değerleri. **56**
Şekil 3.7 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait kırılma enerjisi değerleri. **57**
Şekil 3.8 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen çekme testi sonuçlarına ait en iyi – en kötü test numunesinin çekme özellikleri ve X ışını görüntüleri. **59**
Şekil 3.9 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen çentik darbe test sonuçlarına ait en iyi – en kötü test numunesinin ortalama kırılma enerjisi, kırılma açısı ve X ışını görüntüleri. **60**
Şekil 3.10 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait mikroyapı görüntüleri: a) 0 ppm Sr ilavesi, b) 20 ppm Sr ilavesi, c) 40 ppm Sr ilavesi, d) 80 ppm Sr ilavesi, e) 160 ppm Sr ilavesi. **62**
Şekil 3.11 : 0 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları. **65**
Şekil 3.12 : 20 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları. **66**
Şekil 3.13 : 40 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüleri ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları; a) alansal, b) çizgi. **67**
Şekil 3.14 : 80 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüleri ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları: a) 1 ve 2 no'lu analiz, b) 3 no'lu analiz. **69**
Şekil 3.15 : 160 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen noktasal EDS analiz sonuçları. **71**

AlSi12(Fe) YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM ALAŞIMINDA Sr İLAVELERİNİN ALAŞIMIN MİKROYAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Alüminyum ve alaşımları, özellikle otomotiv sektörünün ağırlık azaltma ve mukavemetten ödün vermeyecek şekilde hedeflerini karşılayacak kritik uygulamalarında kullanımı günden güne yaygınlaşan mühendislik malzemelerinden birisi haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında; yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılarak üretilen AlSi12(Fe) alaşımına Sr modifikasyonu yapılarak, Sr miktarının alaşımın mekanik ve mikroyapısal karakteristiği üzerine etkisi incelenmiştir. Döküm denemeleri ile birlikte enjeksiyon presinde kullanılan parametreler ile aynı olacak şekilde, MagmaSoft ve Click2Cast yazılımları ile kalıp dolum ve katılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede sahada elde edilen veriler ile simülasyon programlarından elde edilen veriler doğrudan karşılaştırılabilmiştir. Çalışma kapsamında 0 ppm, 20 ppm, 40 ppm, 80 ppm ve 160 ppm olacak şekilde toplamda beş farklı Sr parametresi için beş ayrı döküm yapılmıştır. Döküm çalışmaları ile birlikte eş zamanlı olarak VAK numunelerinin elde edilmesi ve numunelerin karakterize edilmesiyle alaşımın artan Sr miktarına bağlı olarak metal kalitesi belirlenmiştir. Metal kalitesinin belirlenmesi için VAK numuneleri metalografik hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin, bilgisayar ortamında yüzey analizleri gerçekleştirildikten sonra metal kalitesi belirlenmiştir. Yüzey analizi için kesim işlemi öncesinde VAK numuneleri, çentik darbe testi için numune hazırlık işlemi öncesinde lama çekme çubuğu ve çekme testi öncesi silindirik çekme çubuğu numuneleri için tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan X ışını radyografi yöntemi kullanılarak numunelerin porozite incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik karakterizasyon çalışmaları kapsamında; numunelerin sertlik ölçümleri, çentik darbe testleri ve silindirik çekme çubuğu için çekme testleri gerçekleştirilerek artan Sr miktarının, AlSi12(Fe) alaşımın mekanik özellikleri üzerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Artan Sr miktarına bağlı olarak silis morfolojisinde meydana gelecek değişiminin gözlemlenebilmesi için mikroyapısal analiz yapılmıştır. Artan Sr miktarına bağlı olarak mikroyapıda oluşan intermetalikler için SEM görüntülemesi gerçekleştirilerek ilgili fazlara noktasal, çizgisel ve alansal EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen AlSi12(Fe) alaşımı özelinde artan Sr miktarına bağlı olarak alaşımın hem mikroyapısal hem de mekanik özelliklerinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Artan Sr miktarı ile birlikte AlSi12(Fe) alaşımının akma mukavemetinde, çekme mukavemetinde ve % uzama değerinde belirgin bir iyileşme tespit edilmiştir. Yapılan çentik darbe testinin sonuçlarına göre Sr miktarının artması ile alaşımın enerji sönümleme yeteneği iyileştirilmiştir. 160 ppm Sr kullanımı ile AlSi12(Fe) alaşımının süneklik özelliği belirgin bir şekilde geliştirildiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler : AlSi12(Fe) alaşımı, Yüksek basınçlı döküm, Sr modifikasyonu, Mekanik özellikler, mikroyapı, Döküm kalitesi.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SR ADDITIONS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY IN AlSi12(Fe) HIGH-PRESSURE DIE CASTING ALLOY

SUMMARY

Aluminium and its alloys have become one of the most widely used engineering materials due to meeting the weight reduction and higher strength targets of the automotive sector more particularly in critical applications. In this thesis; changes in microstructure and mechanical properties of AlSi12(Fe) high pressure die casting (HPDC) alloy based on Si modification via different amounts of Sr were investigated. Mould filling and solidification analyses of the AlSi12(Fe) HPDC alloy were carried out with the help of MagmaSoft and Click2Cast software. The simulation parameters and injection press parameters that were chosen used during casting were used the same to compare casted product versus simulation casting process results on the simulation programs. Since one of the main subjects of the study is to determine the effects of increased Sr amount on the mechanical properties of AlSi12(Fe) alloy. Therefore, five different castings were organized for five different Sr parameters as 0 ppm, 20 ppm, 40 ppm, 80 ppm, and 160 ppm respectively. The metal quality was determined depending on the increasing Sr content of the alloy by obtaining and characterizing the RPT samples simultaneously with the casting studies. In order to determine the metal quality, RPT samples were subjected to metallographic preparation processes. The metal quality was determined after the surface analyzes of RPT samples were carried out via SigmaScan. Porosity analyzes of the samples were carried out by using the X-Ray radiography method, which is one of the most well-known non-destructive testing methods, for the RPT samples before cutting for surface analysis, for the lama tensile bar before the sample preparation for the impact test, and for the cylindrical tensile bar samples before the tensile test. Within the scope of mechanical characterization studies; The hardness measurements of the samples, impact tests, and tensile tests for the cylindrical tensile bar were performed and the effect of the increased amount of Sr on the mechanical properties of the AlSi12(Fe) alloy was investigated in detail. In order to observe the change in Si morphology depending on the increasing amount of Sr, microstructure analyzes of the samples were carried out. SEM imaging was performed for the intermetallic formed in the microstructure due to the increasing amount of Sr, and point, linear, and areal EDS analyses were performed on the relevant phases. As a result, it was observed that both the microstructural and mechanical properties of the alloy were positively affected due to the increased amount of Sr in the AlSi12(Fe) alloy produced by the HPDC. A significant improvement in yield strength, tensile strength and % elongation value of AlSi12(Fe) alloy was determined with increasing Sr content. According to the results of the notch impact test, the energy absorption ability of the alloy was improved with the increase in the amount of Sr. It was concluded that the ductility of the AlSi12(Fe) alloy was significantly improved with the use of 160 ppm Sr.

Key words : AlSi12(Fe) alloy, High-pressure die casting, Sr modification, Mechanical properties, microstructure, Casting quality.

1.GİRİŞ

Günümüzdeki otomotiv, havacılık, savunma sanayi gibi büyük endüstrilerde parça ağırlığın azaltıldığı ancak mekanik özelliklerden taviz verilmediği mühendislik malzemelerine duyulan gereksinim günden güne artmaktadır. Düşük yoğunluğa sahip alüminyum ve alaşımları ise sunmuş olduğu hafiflik, iyi işlenebilirlik, iyi termal ve elektriksel iletkenlik ve yeterli mekanik özellikleri gibi birçok teknik avantajından dolayı endüstride kritik bir önem kazanmıştır. Öncü sektörlerin alüminyumu tercih etmesinin en önemli nedeni ise alüminyumun hafif olması olarak gösterilebilmektedir. Özellikle ağırlık azaltma hedefleri karbon ayak izinin azaltılması dolayısıyla her geçen yıl artış gösteren otomotiv sektöründe, yapılan tasarım çalışmalarında hafiflik imkanı sağlamasından dolayı çeliğe alternatif olarak kullanılmaktadır. Yapısal uygulamalarda yaygın olarak sac, ekstrüzyon profil, dövülmüş ve döküm parçalar kullanılmaktadır. Alüminyum şekillendirme yöntemlerinden biri olan döküm prosesi, birçok avantaja sahip olmakla birlikte bilgi ve teknoloji eksikliğinde, sağladığı avantajları dezavantaja dönüştürebilmektedir. Döküm prosesinde kontrol altında tutulması gereken birçok parametre mevcuttur. Kalıp tasarımı ve proses tasarımı işin zorlu bir kısmını oluştururken ergiyik metal kısmı da işin en önemli bir diğer kısmını oluşturmaktadır. Ergiyik metal üzerine yapılacak sıvı metal kalitesi iyileştirme çalışmaları ile dökümün doğası gereği yapısında oluşturmuş olduğu içyapı kusurları minimize edilebilmektedir. İyi kurgulanan bir sıvı metal kalitesi iyileştirmesi ve alaşım modifikasyonu çalışmaları ile gerek mekanik özelliklerin belirgin bir şekilde iyileştirilmesi gerekse içyapı kusurlarının minimize edilmesi kaçınılmazdır.

1.1 Tezin Amacı

Döküm yöntemiyle üretilen alüminyum ve alaşımlarının büyük endüstrilerin kritik uygulamalarında kullanılmaya başlaması ile birlikte daha yüksek mekanik özellik beklentilerini karşılayacak alaşımların geliştirilmesi / iyileştirilmesi talep edilmektedir. Sr ilavesi, genel olarak her dökümhanenin uyguladığı ancak nedenini tam olarak özümseyemediği bir metodolojidir. Bu konu özelinde, özellikle yüksek

basınçlı döküm yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının mekanik ve mikroyapısal karakterizasyonu konusu için, literatürde yer alan bilgilerin oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür. Yapılan bu tez çalışmasında farklı miktarlarda kullanılan Sr miktarının; AlSi12(Fe) alaşımı özelinde sertlik, çekme testi özellikleri, çentik darbe dayanımı gibi kritik mekanik özelliklere ve alaşımın mikroyapı karakteristiği üzerine etkisinin incelenmesiyle birlikte literatürde halihazırda var olan bilgilere katkı sağlanması ve bilgi boşluğu olan kısımların doldurulması amaçlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında; 1. bölümde tezin amacı, tez konusu özelinde literatürde araştırması ve teze ait hipotez paylaşılmıştır. 2. bölümde materyal ve yöntem başlığı altında tez çalışmasında kullanılan test yöntemleri ve testlerin uygulanmasında kullanılan cihazlar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. 3. bölümde bulgular ve tartışma başlığı altında yapılan testlerden elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. 4. bölümde sonuçlar ve öneriler başlığı altında tez çalışmasına ait sonuçlar ve bu kapsamda verilebilecek öneriler özetlenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Yüksek basınçlı döküm yöntemi, özellikle alüminyum esaslı alaşımların üretiminde seri üretime elverişli olması sebebiyle yaygın olarak kullanılan bir imalat yöntemidir. Yüksek basınçlı dökümden elde edilen döküm parçaların, boyutsal doğrulamasının yanı sıra mekanik özelliklerinin ve porozite değerlerinin de isterleri karşılaması beklenmektedir. Alüminyum alaşımlarının dökümünde karşılaşılan ana problemlerden birisi de porozitedir. Alüminyum ergiyik haldeyken hidrojen çözebilme kabiliyeti oldukça yüksektir. Fakat katılaşma süresince alüminyumun yapısındaki hidrojenin çözünürlüğü oldukça azalmaktadır [1]. Genel olarak hidrojen, alüminyum alaşımlarının dökümünde karşılaşılan döküm kusurları arasında görülen porozitelerin ana kaynağı olarak bilinmektedir. Bu problemi elimine etmek için dökümhanelerde gaz giderme prosesleri uygulanmaktadır. Dışpınar ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada dökümhanelerde yaygın olarak kullanılmakta olan döner gaz giderme sisteminin temizleme işlemi sırasında oluşan türbülans etkisinin; hidrojen içeriğine kıyasla mekanik özellikler ve porozite özelinde daha kritik bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [2]. Ancak Dışpınar ve Campbell porozite oluşum teorilerinin aksine mekanik özellikleri ve metal kalitesini negatif etkileyen; ergiyik metale alüminyumun yüzeyinde oluşan oksit tabakasının kırılarak katılmasıyla oluşan çift katlı oksit film

(bifilm) kaynaklı olabileceğini belirtmektedir [3]. Metal kalitesinin tanımlanmasında kullanılan bifilm indeks değeri, ergiyik metalde bulunan hidrojen içeriğinden bağımsız olarak toplam porozite sayısı olarak da tanımlanabilecek toplam bifilm sayısı ile değişiklik göstermektedir. Bifilm indeks değeri ile mekanik özellikler arasında bifilm indeksin artması ile birlikte mekanik özelliklerin negatif etkilenmesinden dolayı korelasyon bulunmaktadır [2].

Faz denge diyagramına göre alaşımın yapısında bulunan yüzdesel Si miktarı arttığında, ergitme işlemi için ihtiyaç duyulan enerji artmaktadır. Ergime sıcaklığı arttığı takdirde alaşımın yapısında bulunan hidrojen gazının da çözünürlüğü artış göstereceği için ergime sıcaklığının çok yükseltilmesi istenmemektedir [1]. Silis miktarı olarak zengin alaşımların katılaşma için ihtiyacı olan süre daha uzundur. Bu da alaşımın akışkanlığını, dökülebilirliğini ve dendritler arasının beslenmesini iyileştirmektedir. Ancak bu özellik yüksek basınçlı döküm ekipmanları için zarar verici olabilmektedir. Birincil Si parçacıkları, dengesiz katılaşmadan dolayı ötektik alaşımların yapısında da görülebilmektedir. Özellikle ötektik alaşımlarda alaşımın yapısında bulundan silis fazlarının çatlak oluşum mekanizmasında etkin bir rol oynadığı görülmektedir. Si parçacıklarının geometrisinden kaynaklı negatif etkisini azaltmak için alaşımın yapısında kimyasal (Sr modifikasyonu) veyahut çözündürme işlemi uygulanmaktadır [4].

1.2.1 Alüminyum alaşımları

Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metal olan, yaklaşık 2,7 g/cm^3 özgül yoğunluğa sahip, yüksek termal ve elektriksel iletkenliği olan, yüksek korozyon direncine sahip, yüksek mukavemeti, süneklik özelliğinden dolayı şekillendirilebilirlik yönünden yüksek performans gösteren, yüzey merkezli kübik kristal yapıda, 660 °C ergime sıcaklığına sahip ve sonsuz geri dönüştürülebilme yeteneğine sahip alüminyum, cevherden elde edilmesi sırasında harcanması gereken enerjinin yaklaşık %5'inin kullanılması ile yeniden ergitilirek yeniden kullanılabilme yeteneğine sahiptir [5]. Alüminyumun alaşımlamasında kullanılan Cu, Zn, Si, Mg, Fe ve Ti gibi alaşım elementleri, alüminyumun kristal yapısında katı ergiyik oluşturma mekanizması ile mekanik özellikleri iyileştirilmektedir [5]. Ancak alaşım elementlerinin yapıda kullanım miktarı kritik bir önem arz etmektedir. Alaşımın mukavemetinin arttırılmasıyla şekil değiştirme kabiliyeti negatif yönde etkilenmektedir [6].

Alüminyum alaşımları, üretim şekline bağlı olarak dövme alaşımları ve döküm alaşımları olacak şekilde iki ana gruba ayrılmaktadır [5]. Üretim yöntemlerine bağlı olarak alaşımların kimyasal bileşimi ve mikroyapısı farklılık göstermektedir [6]. Dövme alüminyum alaşımları dört rijit ile tanımlanmaktadır ve ilave edilen alaşım elementine bağlı olarak, sistematikteki birinci basamak ana alaşım elementini sembolize etmektedir [5]. Dövme alaşımlarında kütük olarak üretilen hammadde, plastik şekillendirme yöntemleri kullanılarak nihai ürün haline getirilmektedir. Döküm alaşımlarında ise alaşım ergiyik haldeyken alaşımlama, modifikasyon, tane inceltme ayarlamaları yapıldıktan sonra nihai ürün kalıbına direkt dökümü gerçekleştirilir. Alüminyum alaşımlarında ana alaşım elementleri; Si, Mn, Cu, Mg ve Zn olarak verilmektedir [7]. Alaşım elementlerinin genel konfigürasyonu, bu elementlerin bileşimlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Al-Si-Cu ve Al-Si alaşım grupları da döküm alaşımları başlığı altında verilmektedir [7].

1.2.1.1 Al-Si alaşımları

Al-Si alaşım grubu, alüminyum döküm alaşımları özelinde büyük bir üretim payına sahiptir. Temel alaşım elementi Si olan bu grubun, dökülebilirliği, korozyon direnci, talaşlı imalat ile şekillendirilebilme ve kaynak kabiliyeti oldukça yüksektir. 4XX.X şeklinde gösterilen Al-Si grubu alaşımlar, otomotiv sektöründe, yüksek sıcaklık ve aşınmaya maruz kalan pistonlar, silindir blokları ve süspansiyon parçaları gibi yapısal parçaların uygulamasında termal genleşme katsayısının düşük olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olması ve yapısında bulundurduğu Si miktarına bağlı olarak ergiyik metalin akışkanlığı gibi sağladığı birçok avantajdan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. Al-Si alaşımına ait ikili faz denge diyagramı Şekil 1.1'de gösterilmektedir.

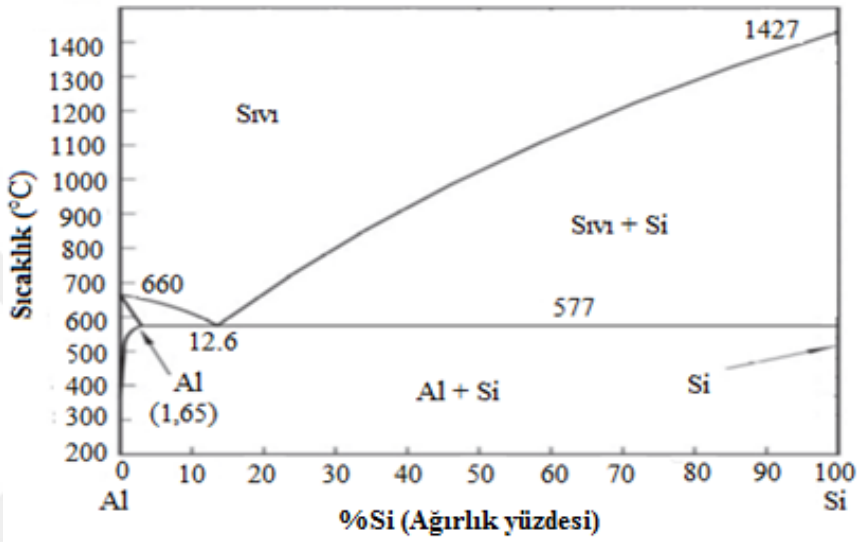
Otomotiv, savunma ve havacılık başta olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılan Al-Si alaşımları, yapısında bulundurduğu Si miktarına bağlı olarak üç ayrı şekilde gruplandırılmaktadır [9]. Bunlar:

Ötektikaltı Alaşımlar: Ötektik kompozisyonun altında %5-10 arasında Si içermektedir. Yüksek mukavemet ve süneklik beklenen uygulamalarda kullanılmaktadır.

Ötektik Alaşımlar: Ötektik kompozisyonunda %10-13 arasında Si ve Al-Si ötektik fazını içermektedir. Alaşımların dökülebilirliği ve akışkanlığı iyi olup; katılaşma aralığı dardır. Aşınma davranışı iyi olup; alaşımlama işlemi yapılmadığında ve ısıl

işlem gördüğünde sünekliği epeyce iyileşmektedir. Cu, Mg ve bazen de Ni içeren ötektik alaşımları pistonların üretiminde tercih edilmektedir.

Ötektiküstü Alaşımlar: Ötektiküstü kompozisyonunda %15-20 arasında Si ve birincil Si parçacıklarını içermektedir. Alaşımların aşınma davranışı ve yüksek sıcaklık uygulamalarındaki mukavemeti oldukça iyi olup; pistonlarda, motor bloklarında ve kompresörlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu alaşımların işlenebilirliği oldukça zordur.



Şekil 1.1 : Al-Si ikili faz denge diyagramı [10].

Şekil 1.1'de gösterilen Al-Si alaşımına ait ötektik ikili faz denge diyagramından da görüldüğü üzere, diyagramın ötektik reaksiyonu %12,5 Si içeriğinde 577 °C'de meydana gelmektedir. İlgili faz diyagramı için üç farklı durum söz konusu olabilmektedir. Al-Si faz denge diyagramında meydana gelebilecek durumlar aşağıda listelenmektedir [9].

- %12,5 Si içeriği ile 577 °C'de doğrudan sıvı alüminyumdan katı ötektik oluşması
- Si oranının ağırlıkça %12,5 değerinden düşük olması durumunda α-Al fazının oluşması ve ötektik reaksiyon meydana gelmesi
- Si oranının ağırlıkça %12,5 değerinden fazla olması durumunda birincil Si kristallerinin oluşması ve ötektik reaksiyonun meydana gelmesi

Katılaşma hızlarının yüksek olduğu döküm yöntemlerinde (kokil kalıba döküm, yüksek basınçlı döküm gibi) dökümü yapılan parçaların ince kesitlerinin bulunduğu bölgelerinde sıcaklığa bağlı olarak ergiyiğin yeteri kadar kalıbı besleyememesinden

dolayı döküm parçasının yapısında çekinti boşlukları oluşabilmektedir. Özellikle Al-Si alaşım ailesi için alaşımın içeriğinde bulunan Si miktarı, katılaşma hızı ile doğrudan ilişki içerisindedir.Bundan dolayı hassas döküm, kum kalıba döküm gibi daha yavaş katılaşma hızlarına sahip ve kaybolan kalıp yöntemlerinde Si miktarı %5-7; kalıcı kalıp yöntemlerinden kokil kalıba dökümde Si miktarı %7-9 ve yüksek basınçlı dökümde ise Si miktarı %8-12 olacak şekilde belirlenmektedir [11]. Konvansiyel yöntemler ile yapılan Al-Si ailesine mensup alaşımlar için gerçekleştirilen dökümlerde elde edilen Si fazı, alaşımın mekanik özelliklerini negatif yönde etkileyecek kaba mikroyapı göstermektedir [12]. Bu nedenden dolayı alaşım ve döküm prosesi özelinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının temel amacı, mekanik özellikleri negatif yönde etkileyen Si morfolojisinin daha homojen dağılım göstermesini ve daha ince olmasını sağlamak olarak verilebilmektedir [13].

Fe elementi, alaşımın yapısında Al-Fe içerikli ve kırılgan yapılı intermetalik faz oluşumuna sebep olduğu ve bu intermetalik fazlar alaşımın mekanik özelliklerini negatif etkilediği için alaşımın yapısında bulunması istenmemektedir [14]. Ancak döküm alaşımlarında Fe elementinin varlığı, ergiyik metalin akışkanlığını arttırdığı ve kalıp aşınmasını azalttığı için dökümün verimli olabilmesi adına alaşımda uygun oranlarda bulunması istenmektedir [15]. Al-Si alaşımının yapısında oluşan Al_5FeSi intermetaliği (β fazı), kırılgan ve iğnemsi morfolojiye sahip olduğu için alaşımda gerilim yoğunlaştırıcı bir etkiyle beraber alaşımda çatlamalara sebep olmaktadır.

Fe intermetaliklerinin morfolojisinden kaynaklı yapıda oluşturduğu negatif etkisi, Mn elementi ile birlikte modifiye edilebilmektedir. Alüminyumun yapısında çözünebilirliği düşük olan Mn elementinin, Fe ve Si elementlerine karşı duyarlılığı yüksektir. Dört element bir araya geldiklerinde çin yazısı (Chinese script) olarak bilinen ve alaşımın mekanik özelliklerine daha az zarar veren $Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$ intermetaliğini oluşturmaktadır. Mn:2 Fe oranı; yapıda bulunan β fazının (Fe içerikli intermetalik), α fazına (Çin yazısı) dönüşmesini sağlamaktadır. Özellikle piston alaşımlarında yapılan Mn modifikasyonu, Al_9FeNi intermetalikleri üzerinde etkilidir ve alaşımın mukavemetini arttırmaktadır ancak yapıda oluşan bir diğer Mn esaslı plakamsı fazın, alaşımın mukavemetinin arttırmada yarattığı etki düşük olduğu için Mn takviyesinin kontrollü bir şekilde yapılması gerekmektedir [16]. Mn elementinin Sr ile birlikte kullanımı ise β fazının parçalanmasını sağlayarak Fe elementinin negatif

etkisini elimine etmektedir [17]. Mn ile yapılan modifikasyon özellikle çekme mukavemeti sonuçlarını olumlu etkilemektedir [18].

Cr elementinin de Mn gibi Al-Si alaşımlarının yapısında bulunan intermetalik fazların morfolojilerinin modifikasyonunda kullanılmakta olup; β fazın α fazına dönüştürülmesini sağlamaktadır [19]. Alaşımların sertlik, akma ve çekme mukavemeti değerleri üzerinde belli bir oranda kullanıldığı takdirde pozitif etkisi bulunduğu görülmektedir [20]. Al-Si alaşımlarının yük altındaki davranışı, döküm hatalarına ve Cr içeriğine duyarlıdır ancak yapıda bulunan döküm hataları ve ağırlıkça %Cr içeriği alaşımın akma davranışı üzerinde belirli bir etki yaratmamaktadır [21].

Al-Si alaşımlarının yapısında oluşan ötektik ve bileşikler

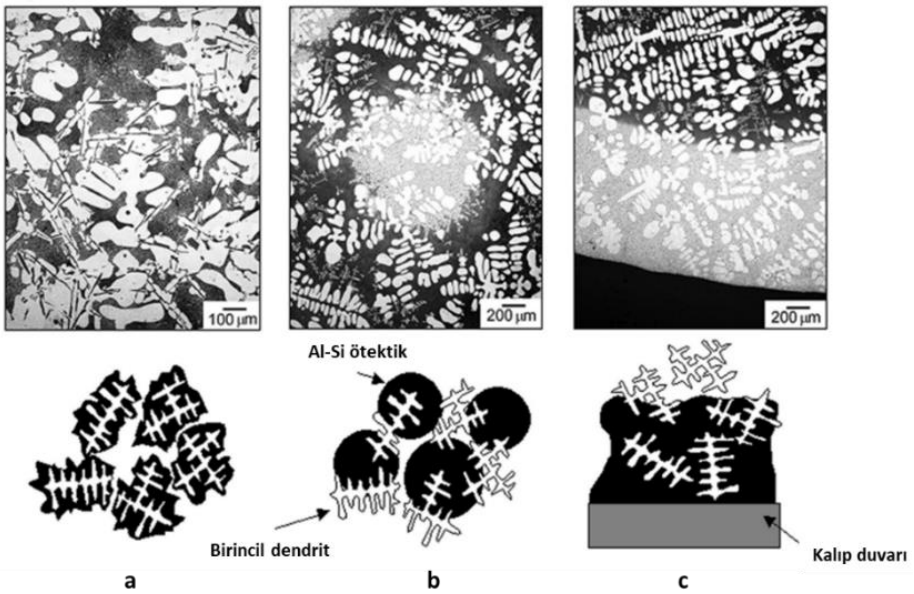
AlSi alaşımları özelinde bakır elementinin eksikliğinde demir elementinin Al-$FeSiAl_5$-Si ötektiğini oluşturmasına neden olmaktadır [22]. Oluşan bu ötektik faz, ince silis fazının dağılmasına sebep olur. Demir oranının %8 mertebesinden yüksek olması durumunda ise demir $FeSiAl_5$ kristallerini oluşturmaktadır. Hızlı soğuma sağlandığı takdirde ilgili kristal dağılarak ötektiği yüksek demir bileşimine kaydırılmasını sağlamaktadır [23]. Düşük miktarda silis veya magnezyum, bakır, çinko bulunduran alaşım ise çin harflerini anımsatan Fe_2SiAl_5 bileşiğini oluşturma eğilimi göstermektedir [22]. Alaşımın yapısında bakır elementinin bulunması durumunda, alaşımın Cu_2FeAl bileşiğini; magnezyum bulundurma durumunda ise ötektikte ve birincil kristal durumunda açık mavi renkte, Çin harflerini anımsatan $FeMg_3Si_6Al_8$ bileşiğini oluşturma olasılığı yüksektir [24]. Mangan ile demir elementleri bir araya geldiğinde oluşacak bileşiğin formülasyonu ise $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$ olarak verilmektedir [22]. Mangan ve demirin bir arada bulunması ve demirin %0,8 değerinden yüksek olma durumunda ise oluşan birincil $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$ alaşımın işlenebilirlik özelliğini negatif yönde etkileyecek duruma sebep olmaktadır [15].

1.2.1.2 Al-Si alaşımlarının mikroyapısal özellikleri

Al-Si ikili faz diyagramından da anlaşılacağı üzere, bu alaşımlarda meydana gelen ötektik yapı, iki ayrı fazın sıvı formdan eş zamanlı bir şekilde katılaşması sonucu oluşmaktadır [25]. Bundan dolayı alaşımlarda farklı mikroyapı görüntüleri elde edilebilmektedir. Mikroyapı görüntülerinde fazların lamelli, iğnesel veya fiberli morfolojiye sahip olduğu; bu fazların düzenli ya da düzensiz büyüme gösterebildiği görülebilmektedir. Katılaşacak iki fazın hacimsel kesir değerlerinin birbirine eşit

olması durumunda lamelli bir ötektik yapı elde edilmektedir. Şayet iki fazdan birinin hacimsel kesrinin daha düşük olması durumunda ise fiberli faz elde edilebilmektedir [9]. Ötektik yapının fiberli morfolojide elde edilebilmesi için altında olunması gereken hacim kesri eşik değeri 0,25 olarak paylaşılmaktadır [9]. Ancak hacim kesri her ne kadar paylaşılan değerden düşük olsa da Al-Si alaşımınına ait ötektik faz lamelli morfoloji oluşturma eğilimi göstermektedir. Bunun nedeni olarak ise Si fazının anizotropik büyümesi ve Al-Si arasındaki düşük ara yüzey enerjisi olarak verilebilmektedir [9]. Ötektik bölgedeki iki fazın yönlenmemesi durumunda ise ötektik yapı düzenli ve tekrarlayan lamelli ya da fiberli morfoloji oluşturacaktır. Bir fazın yönlenmesi durumunda ise düzensiz bir ötektik morfoloji elde edilecektir [26].

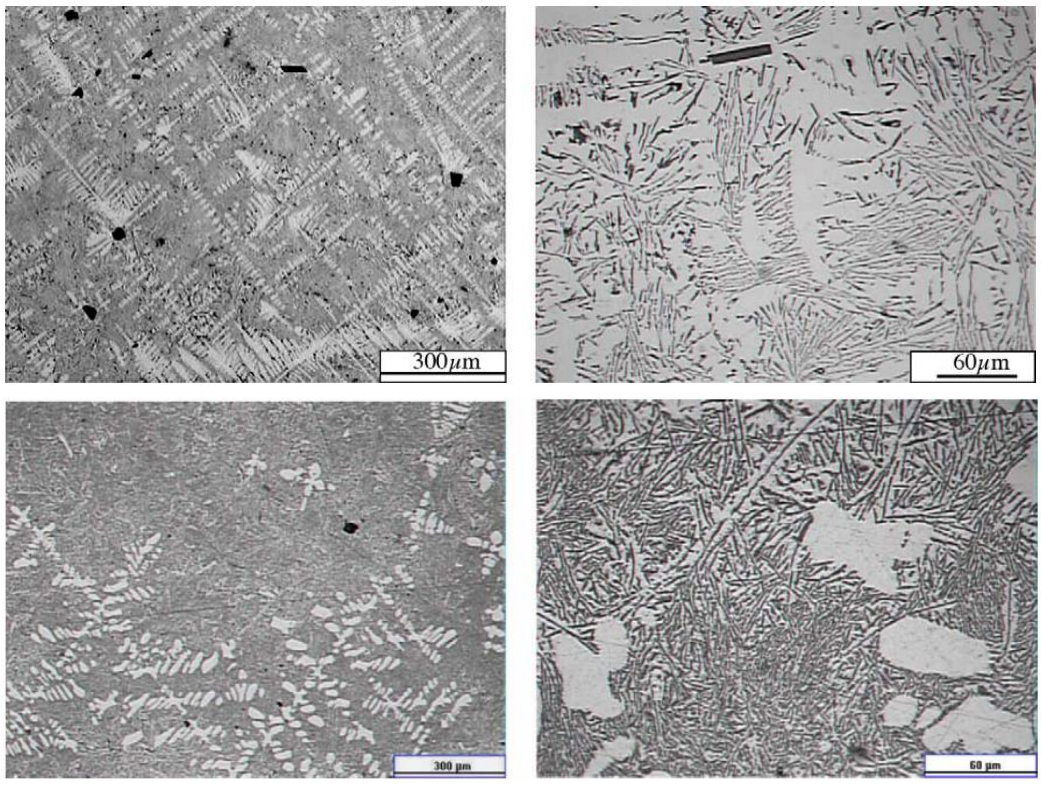
Al-Si alaşımlarında, ötektik oluşumu sırasındaki katılaşma sonrasında yapıda bulunan porozitelerin eş zamanlı olarak oluşumu söz konusu olduğu için önem arz etmektedir. Ötektik faz oluşumu, kullanılan döküm tekniğinin katılaşma koşullarına bağlı olarak, üç farkı şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir. Birinci olarak birincil Al dendritlerinde veya bu dendritlere komşu bölgelerde çekirdek oluşumu ile, ikinci olarak dendritler arasında bulunan ötektik tanelerin heterojen çekirdeklenmesi ile büyümesi ve son olarak ısıl akışın tersi yönünde gerçekleşen ötektik büyüme olarak verilebilmektedir [27]. Katılaşma koşullarına bağlı olarak ötektik faz oluşumlarının şematik görselleri Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 : Al-Si alaşımlarında gerçekleşmesi beklenen muhtemel ötektik katılaşma örnekleri. a) Termal gradyana ters yönde çekirdeklenme, b) Al dendritler üzerinde çekirdeklenme ve büyüme, c) Dendritler arasında ötektik tanelerin çekirdeklenmesi [28].

Al-Si alaşımlarında alaşımın mekanik özellikleri, yapısında bulundurduğu silisyum fazının şekline ve dağılımına göre değişiklik göstermektedir. Küçük ve yuvarlak formda olan ötektik birincil faz alaşımın mukavemetini arttırmakla birlikte süneklik özelliğini de iyileştirmektedir. İğnesel morfolojiye sahip Si fazı ise çekme mukavemetini iyileştirmekle beraber süneklik, darbe dayanımı ve yorulma mukavemeti üzerinde negatif etki yaratmaktadır [27] .

Katılaşma esnasında kullanılan basınç, alaşımın özelliklerinin geliştirilmesinde oldukça etkilidir. Aynı zamanda kalıpta kullanılan titreşim; alaşımın yapısında bulunan Si kristallerinin büyümesini engellemekte, alaşımda homojen bir yapı elde edilmesinde, ergiyik metalin içinde kalan gazın dışarı atılmasını, çekme boşluğu oluşumu olasılığının azaltılmasını ve ergiyik metalin akıcılığının arttırılmasını sağlamaktadır [29]. Titreşimin etkisiyle ötektik Al-12,5Si alaşımının mikroyapısal değişimi Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3 : Al-12,5Si alaşımının titreşim uygulamasına bağlı olarak mikroyapısında meydana gelen değişim: a) Titreşim uygulaması yapılmayan döküm, b) Titreşim uygulaması yapılan döküm [29].

1.2.1.3 Al-Si alaşımlarında görülen döküm hataları

Döküm prosesi, doğası gereği yapısında elimine edilemeyen gaz porozitesi, çekinti boşluğu gibi bazı kusurlar meydana getirmektedir [30]. Döküm parçasında tolerans aralığı dışında kalan ölçüler, şekilsel bozukluklar, yüzey dokusunda meydana gelen farklılıklar ve diğer istenmeyen kusurların bulunması durumunda bu parça, hatalı döküm olarak kabul edilmektedir. Döküm parçasında karşılaşılan bir hata; parçanın uygulama alanına, çalışma parametrelerine, çalışma koşullarına, karşılaşılan hatanın türüne ve seviyesine bağlı olarak değerlendirilmektedir. Hatalı parçanın ya onarımı yapılarak yeniden kullanımına imkan sağlanır ya da parça hurda olarak değerlendirilir. Hatalı bir döküm parçasında bir veya birden fazla hata aynı anda gözlemlenebilmektedir [31].

Döküm parçalarında meydana gelebilecek hataların sınıflandırılması için üç ayrı yaklaşım açıklamalarıyla birlikte aşağıda paylaşılmaktadır [32]:

- Cocks'ın yaklaşımına göre hataların konumuna ve geometrisine bağlı olarak sınıflandırılması: Bu yaklaşımda, hatalar yüzeysel ve iç hatalar olarak sınıflandırılmaktadır.
- Campbell'ın yaklaşımına göre hataların metalürjik kusurlar ve bu kusurların sebeplerine göre sınıflandırılması: Bu yaklaşımda hatalar; döküm geometrisi, alaşım, kalıp özellikleri, yağlama ve proses gibi parametrelere bağlı olarak sınıflandırılmaktadır.
- Kuzey Amerika Döküm Derneği'nin (NADCA) yaklaşımına göre hata sınıflandırması: Bu yaklaşımda hatalar, 7 ayrı hata kategorisinde değerlendirilerek sınıflandırılmaktadır.

Yeni yaklaşımlara bağlı olarak dökümün yapısında meydana gelen hatalar, üç ayrı seviyede – üç ayrı kategoride incelenerek ve problem tanımları spesifik olarak tablo haline getirilerek sınıflandırılmıştır. Döküm yapısında oluşan kusurların kategorize edilmesinde kullanılan Seviye 1, hataları lokasyonuna ve hata tespit yöntemine (görsel kontrol) göre ayırmaktadır. Bu seviyeye, boyutsal ölçüm hataları ve tolerans aralığı dışında olan ölçüler, iç hatalar ve yüzey kusurları dahil edilmektedir. Seviye 2, hataların metalürjik kökenine odaklanmaktadır. Dolum hataları, istenmeyen fazlar, çekintiler ve metal-kalıp etkileşimleri gibi gruplara ayrılmaktadır. Son olarak Seviye 3, yapıda bulunan kusurları spesifik bir şekilde tanımlamaktadır. Genellikle, belirli bir

kusur tipini tanımlamak için kabul edilen terim, Seviye 2'de bahsedilen metalürjik kökenin daha iyi bir açıklamasına izin verir [33]. Kusurların lokasyonuna göre incelendiği kategorilerden ilk kategori iç kusurlardır. İç kusurların kategorize edilmesi ile ilgili yeni yaklaşım Şekil 1.4'te gösterilmektedir.

1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
A İç Kusurlar	*A1 – Çekinti*	A1.1 Makro çekinti
		A1.2 Dendritarası
		A1.3 Alansal
	A2 – Gaz (Porozite)	A2.1 Hava
		A2.2 Hidrojen
		A2.3 Nem
		A2.4 Yağlayıcı
	A3 – Dolum	A3.1 Soğuk birleşme
		A3.2 Laminasyon
		A3.3 Sıçrama
	A4 – Faz	A4.1 İnklüzyon
		A4.2 İstenmeyen yapı
	A5 – Isıl çekme	A5.1 Soğuk çatlama
		A5.2 Sıcak yırtılma

Şekil 1.4 : İç kusurların sınıflandırılması [32].

Kusurların lokasyonuna göre incelendiği kategorilerden ikinci kategori yüzey kusurlarıdır. Yüzey kusurlarının kategorize edilmesi ile ilgili yeni yaklaşım Şekil 1.5'te gösterilmektedir.

1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
B Yüzey Kusurları	*B1 – Çekinti*	B1.1 Çökme
	B2 – Gaz (Porozite)	B2.1 Kabartı
		B2.2 Gaz delikciği (pinhole)
	B3 – Dolum	B3.1 Soğuk birleşme
		B3.2 Laminasyon
		B3.3 Sıçrama
	B4 – Faz	B4.1 Yüzey birikintisi
		B4.2 İnklüzyon-kontaminasyon
	B5 – Isıl çekme	B5.1 Soğuk çatlama
		B5.2 Sıcak yırtılma
	B6 – Metal-Kalıp etkileşimi	B6.1 Aşınma
		B6.2 Lehimleme
		B6.3 Isıl yorulma izi
		B6.4 Ejeksiyon izi
		B6.5 Kalıp korozyonu

Şekil 1.5 : Yüzey kusurlarının sınıflandırılması [32].

Kusurların lokasyonuna göre incelendiği kategorilerden üçüncü kategori geometrik kusurlardır. Geometrik kusurların kategorize edilmesi ile ilgili yeni yaklaşım Şekil 1.6'da gösterilmektedir.

1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
C Geometrik Kusurlar	*C1 – Malzeme eksikliği*	C1.1 Eksiklik
	C2 – Malzeme fazlalığı	C1.2 Parlama
	C3 – Tolerans dışı	C1.3 Deformasyon

Şekil 1.6 : Geometrik kusurların sınıflandırılması [32].

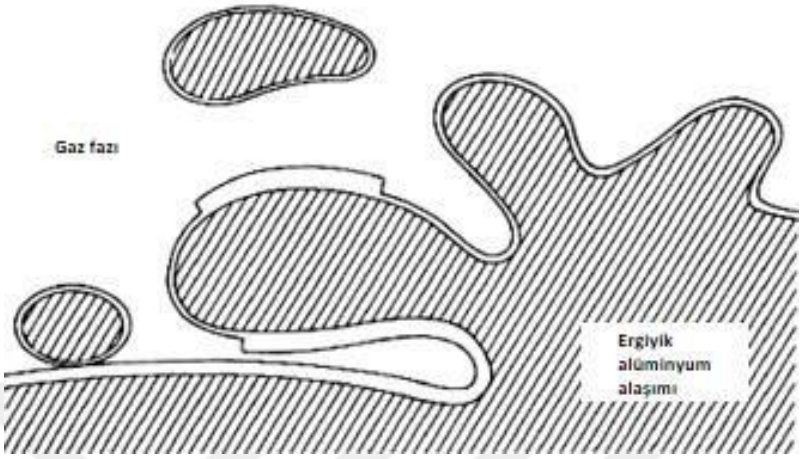
Yüksek basınçlı döküm yönteminde de üç ayrı kategori başlığı altındaki birçok kusur türü ile karşılaşılabilmektedir. Yüksek basınçlı döküm prosesinde katılaşma çekmesi ve hava sıkışması bilinen ve tamamen engellenmesi mümkün olmayan hata türleridir. Bu hataların olduğu kısımlar, çoğunlukla ürüne ait malzemedeki hatasız kısımlara göre daha düşük mekanik özellikler göstermektedir [34]. Söz konusu mekanik özellikler; alaşım çalışmalarının kimyasal kompozisyonu, soğuma hızı, kalıp dolumu esnasında yapısında oluşan döküm hataları ve katılaşma karakteristiğinin incelenmesi ile tespit edilebilmektedir [35].

1.2.1.4 Al-Si alaşımlarında döküm kalitesi iyileştirme çalışmaları

Dökümü yapılan ergiyik alaşımın; döküm koşulları, ergiyik metalin kalıba / potaya dolum koşulları (türbülans etkisi) metal kalitesi üzerinde doğrudan etki oluşturmaktadır. Özellikle türbülanslı dolum sonrasında elde edilen döküm parçasının yapısında oldukça fazla sayıda kusurla karşılaşılmaktadır. Bu kusurlar alaşımın birçok özelliği üzerinde negatif etki yaratmaktadır. Yüksek hızla yapılan döküm, sıvı metalin gerek içinde gerek yüzeyinde türbülans oluşmasına sebep olmaktadır [36].

Yapılan çalışmalarda hidrojen gazının porozite formasyonunun asıl sebebi olmadığını; yapıda oluşan porozitelerin asıl sebebinin alüminyum yüzeyinde oluşan ve koruyucu ince oksit film olan alüminyum oksit tabakasının olduğu iddia edilmektedir [3]. Ergiyik metalin yapısında bulunan bifilm kusurunun oluşum mekanizmasına ait şematik gösterim Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Alüminyumun yüzeyinde bulunan oksit tabakasının her kırılışında, oksit film katlanma hareketi ile Şekil 1.5'te gösterildiği gibi ergiyik metal yapısının içine gömülür. Katlanmanın sonucunda oksit filmlerin oksit-oksit yüzeyleri birbirine temas eder ve çatlak formuna sahip bifilm

kusurunun oluşmasına sebep olur. Bifilmin çatlak gibi forma sahip olması döküm kalitesini düşürmesinin yanı sıra döküm parçasının mekanik, süneklik ve özellikle yorulma gibi özelliklerini negatif etkilemektedir [37].

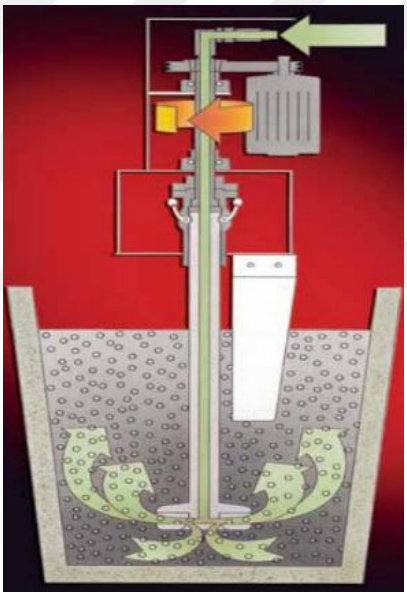


Şekil 1.7 : Bifilm oluşumunun şematik görüntüsü [3].

Döküm işlemi tamamlandıktan sonra sıvı metal içerisinde oluşan türbülans azaldığı için yapı içerisinde karışmış olan bifilmler, düzlemsel ve çatlak benzeri formda başlangıç boyutuna ulaşmaktadır. Yapı içerisine karışmış olan çift katlı bu oksit filmlerin açılması doğrudan metal kalitesi üzerinde etki oluşturmaktadır. Filmlerin açılmaması ve metal kalitesinin negatif yönde etkilenmemesi adına kalıp dolumunun tamamlanmasının ardından katılaşmanın oldukça hızlı gerçekleşmesi gerekmektedir. Hızlı katılaşmanın gerçekleştiği dökümlerde mekanik özellikler üzerinde bifilm kaynaklı negatif etki oluşumu söz konusu olmamaktadır. Ancak katılaşmanın yavaş olduğu döküm çalışmalarında, ergiyik metalin içinde katlanmış formda bulunan bifilmler açılması için gerekli zamanı kazanmış olacak ve buna bağlı olarak döküm parçasının içerisinde bifilm kaynaklı düzlemsel çatlaklar oluşturabilme imkanı bulacaktır [35].

Ergiyik alaşımın metal kalitesinin tespit edilmesinde, bilimsel araştırmalarda da yaygın olarak kullanılan vakum altında katılaştırma (VAK) ile ergiyik metalin vakum altında katılaştırılarak metal kalitesinin hesaplanması esasına dayanmaktadır [38]. Metal kalitesinin hesaplanması; vakum altında katılaştırılan VAK numunelerinin kesilmiş yüzeylerine yapılan yüzey analizi sonucunda yüzeyde tespit edilen numunelerdeki bifilmlerin toplam uzunluğunun ölçmesi ve bu değerlerin bifilm indeks değeri olarak sıvı metal kalitesini temsil etmesi olarak açıklanabilmektedir [39].

Alüminyum alaşımlarının yapısında bulunan safsızlıklar, alaşımların uygulama alanlarına bağlı olarak alaşımın üzerinde negatif etki yaratabilmektedir. Empürite (gaz, metal) ve inklüzyon (oksit, karbür, nitrür, borür) esaslı olacak şekilde sınıflandırılan uzaklaştırılması için sektörde en yaygın kullanılan yöntem gaz giderme prosesi (Rotari gaz giderme) olmakla beraber [2]; prosesin optimizasyonu (kullanılan gazın türü, süresi, debisi) dökümün metal kalitesi ve mekanik özellikleri üzerine etkisi olduğunu göstermektedir [40]. Döner başlıktan verilen asal gazın ergiyik alüminyumda bulunan çözünmüş hidrojen gazının ve oksit filmlerin ergiyikten uzaklaştırılması için kullanılan döner gaz giderme prosesine ait şematik görsel Şekil 1.8'de gösterilmektedir. Gaz giderme prosesi ile birlikte katılaşma davranışının zamana yayılmasının (gradient solidification), döküm parçaların mekanik özelliklerini maksimum performansa çıkarma açısından faydalı bulunduğu görülmektedir [41].



Şekil 1.8 : Döner gaz giderme cihazının şematik görüntüsü [42].

Sıvı metal kalitesinin iyileştirilmesi özelinde birçok çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bunlara örnek olarak; gaz giderme prosesi, üfleç, gözenekli tapa, elektromanyetik karıştırma, flakslama, ultrasonik proses ve filtrasyon işlemleri verilebilmektedir [42]. Mostafaei ve arkadaşlarının yapmış olduğu Al-Si alaşımları özelinde yapılan çalışmada, optimize edildiği takdirde döner gaz giderme işleminin metal kalitesinin iyileştirilmesinde efektif olduğu belirtilmektedir [40]. Dışpınar ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise döner gaz giderme sistemi

nde yapılan prosesin kontrollü olması gerektiği; aksi takdirde yapılan çalışmanın metal kalitesini negatif yönde etkileyeceği belirtilmektedir [2]. Uludağ ve arkadaşlarının

yaptığı çalışmada ise gaz giderme prosesinin metal kalitesini iyileştirmede etkili olduğu paylaşılmaktadır [38].

A413 alaşımlarında gerçekleştirilen Sr modifikasyonu, döküm yapısındaki porozitenin bir ölçüsü olan bifilm indeksini belirgin bir şekilde düşürdüğü belirtilmektedir. Bekletme süresinin 4 saatten 17 saate çıkarılmasıyla her iki alaşımda da modifiye edilmemiş numunelerde bifilm indeksinin arttığı, modifiyeli numunelerde ise önemli ölçüde azaldığı görülmüştür [43].

1.2.2 Al-Si alaşımında silisyum modifikasyonu

Al-Si alaşımlarının yapısına yapılan ilaveler sonucunda alaşımın yapısında gözlemlenen ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesine modifikasyon adı verilir. Modifikasyon işlemi, alaşımların yapısına belirli bir oranda Na, K, Sr gibi alkali metallerin ilavesinin yapılmasıyla gerçekleştirilir. Modifiye yapı tanımı yalnızca alkali metallerin ilavesi ile değil, hızlı katılaşmanın sağlandığı döküm sonucunda elde edilen yapı için de kullanılmaktadır. Al-Si alaşımları özelinde yüksek soğutma hızı ve Sr modifikasyonu, Fe içeriği zengin iğnesel morfolojiye sahip fazların modifiye edilmesini sağlamaktadır [44].

Ötektik modifikasyon, alaşımın yapısında bulunan ve gevrek özellik gösteren ötektik silisyum fazlarının incelmesini sağlayarak alaşımın kopma uzamasını ve süneklik özelliğini iyileştirmek adına yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılmakta olan Sr elementi, Al-Si alaşımlarında silisyum morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Kaba ve plaka yapıdan, inceltilmiş lifli yapı elde edilmesini sağlamaktadır [45].

1.2.2.1 Modifikasyon metodları

Modifikasyon metodları temel olarak beş başlık altında gruplandırılmaktadır. Yapılan ötektik faz modifikasyonu ile modifiye edilen alaşımın mekanik özellikleri pozitif yönde etkilenmektedir [46]. Silisyum modifikasyonunda kullanılan yöntemlere ait detaylar aşağıda paylaşılmaktadır.

Element ilavesi ile modifikasyon: Al-Si alaşımlarının modifikasyon işleminde Na, Sr, K, Rb, Cs, Li, Ca, Ba, Mg, La, P, Bi, Cd, Mn, Ni, Pb gibi elementler kullanılmaktadır. Element ilavesi ile gerçekleştirilen modifikasyon işlemlerinden en efektif elementler Sr ve Na olarak gösterilmektedir. Her iki element de alaşımların yüzde uzama

değerlerini arttırmaktadır ancak Sr elementi Na elementinden daha efektif rol almaktadır [4].

Çil ile modifikasyon: Soğuma hızının arttırılması ile Al-Si alaşımının ötektik bileşimi ve sıcaklığında düşüş meydana gelmektedir. İkili faz denge diyagramında ise ötektik bileşimin %Si değeri artış göstermektedir. Bundan dolayı ötektik alaşım, hızlı soğumanın etkisiyle ötektik altı davranışı sergiler. Sonuç olarak, soğuma hızının artış göstermesiyle birlikte silisyum fazının aralıklarında azalma gözlemlenir. Bu da alaşımın çekme dayanımını ve bununla beraber süneklik özelliğini iyileştirmesini sağlamaktadır [47].

Vibrasyon ile modifikasyon: Ergiyik metallerde modifikasyon için vibrasyon kullanımı, alaşımda difüzyonun yükselmesini sağlayarak kalın silis partiküllerinin kırılarak dağıtılmasına yardımcı olur [29]. Daha kısa ve ince form alması istenen silis partikülleri için alaşıma uygulanacak vibrasyon şiddetinin arttırılması gerekmektedir. Ancak vibrasyon şiddetinin kontrollü bir şekilde arttırılması zorunludur. Aksi takdirde şiddeti gereğinden fazla arttırılan alaşımlarda kaba silislerin yeniden oluşmasıyla mekanik özellikler negatif yönde etkilenme göstermektedir. Tane incelmesini de sağlayan vibrasyon, yalnızca işlem görmemiş alaşımlarda efektif bir şekilde kullanılabilmektedir [29].

Yüksek basınç altında modifikasyon: Ergiyik metalin basınç altında katılaştırılmasını esas alan bu dövme döküm tekniğinde üretilen parçalarda uygulanan basıncın etkisiyle ötektik sıcaklığında yükselme söz konusu olacağı için dökümde; daha ince taneli, yapısal olarak homojen ve daha iyi ölçüsel doğruluk elde edilebilmektedir [47-48].

Isıl işlem ile küreselleştirme: Herhangi bir modifikasyon işlemi görmemiş alaşımlarda ötektik silisyum fazı kollarında bölünmeler meydana gelerek ince parçalar oluşturur. Uygulanan ısıl işlem sayesinde bölünen silisyumun küreselleştirilmesi sayesinde ötektik silis modifiye edilebilmektedir [48].

1.2.2.2 Stronsiyum modifikasyonu

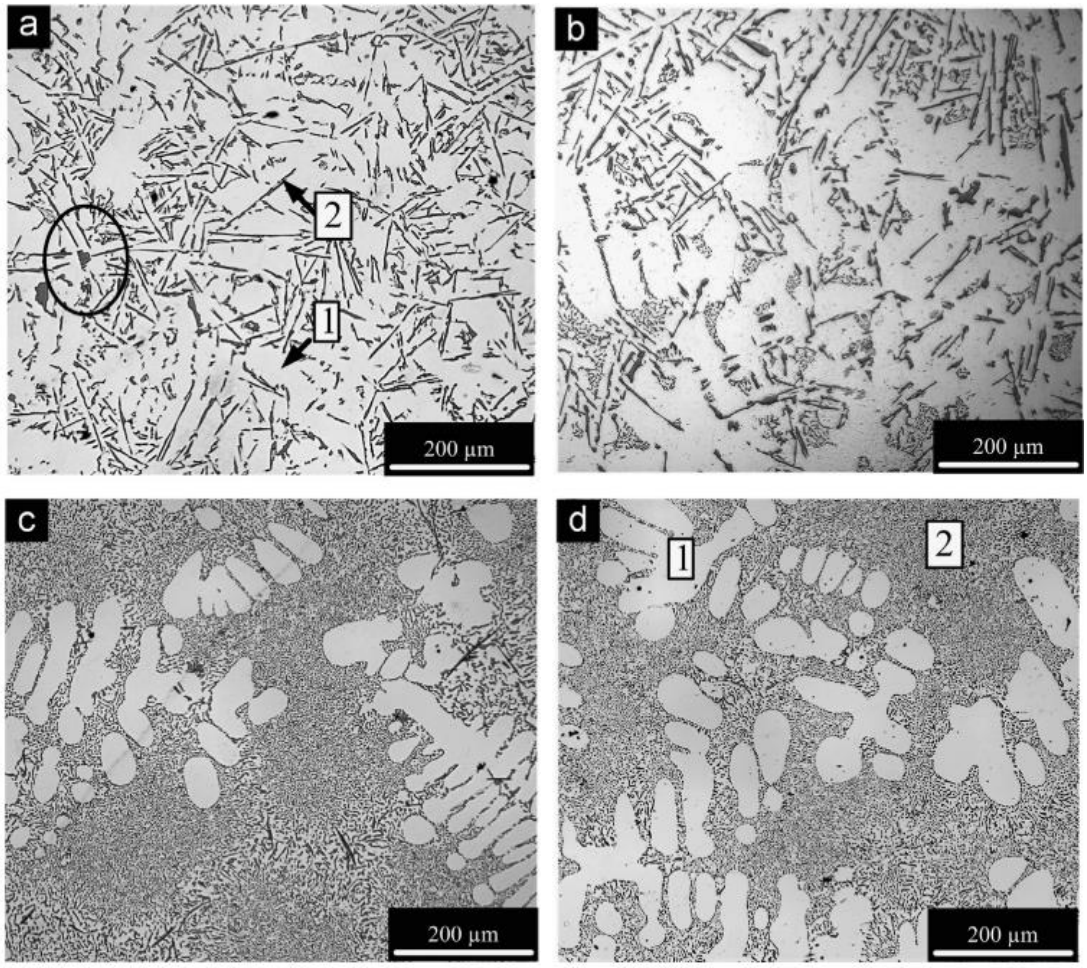
Alaşımı modifiye edici elementler, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bu elementler, alüminyum alaşımlarının yapısında oluşan porozitelerin miktarını ve boyutlarını da azaltmakta oldukça etkilidir [49]. Özellikle Al-Si esaslı alaşımlarda silisyum, yapıda kaba ve iğnemsi bir morfolojiye sahip olduğu için alaşımın mekanik özelliklerini

negatif etkilemektedir. Silisyumun sahip olduğu kaba morfolojinin daha ince forma dönüştürülebilmesi için AlSr15 veya AlSr10 master alaşımı sıvı metale ilave edilmektedir. Stronsiyum esaslı master alaşım, silisyumun yönlenmiş uzamalarının önünü kestiği için tanelerin büyümesini engelleyip; daha küçük formda kalmasını sağlamaktadır [11]. Bu sayede alaşımın gevrekliğinin azalmasının yanı sıra tokluğunda iyileşme gözlenmektedir. Sr elementinin tercih edilmesinde en önemli etkenler sırasıyla daha iyi modifiye edebilme kabiliyeti ve modifiye edilen alaşımın akışkanlığını iyileştirmesi olarak verilebilmektedir [50].

Sr elementi, ergiyik metalde saf halde kullanılmamaktadır. Bunun sebebi ise elementin, havadaki oksijen ile reaksiyona girme eğiliminin yüksek olması ve bu reaksiyon sonucunda SrO, SrO_2 ve $Sr(OH)_2$ gibi bileşikler oluşturması olarak söylenebilmektedir. Oluşan bu oksit esaslı bileşikler, Sr elementinin ergiyik metal içerisinde çözünmesini engellemektedir. Ağırlıkça düşük miktarda Sr içeren master alaşımlar, hava atmosferinde reaktif olmadıklarından dolayı tercih edilmektedir. Bu master alaşımların çözünürlüğü ise ergiyik sıcaklığının yükselmesi ile birlikte artmaktadır [50].

Ötektik modifikasyonun temelinde ötektik silis kristallerinin yapısında çekirdeklenme ve kristalizasyon sürecine bağlı olarak morfolojik değişiklikler bulunmaktadır. Modifiye edilmiş ötektik silis fazı, ince yapıya sahip, hegzagonal ve yassı Si fazından meydana gelmektedir. Bu faz yapısı ise kristalizasyon sürecinde çubuk formlu ve fibröz yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Sr, daha düşük yayılım katsayısına sahip olduğu için ergiyik alaşımda bulunan Si elementinin difüzyon hızını düşürücü etki oluşturmaktadır. Bu da ergiyik alaşımdaki Si ve ara yüzey seviyesinde bulunan kristallerin büyümesine engel teşkil etmektedir [4]. Ötektik silisin çekirdeklendirmesi alüminyum tarafından gerçekleştirilmektedir ancak düşük difüzyon hızı nedeniyle silisyum alüminyumun önünde büyümeye imkan bulamayıp; kristalleşmeyi önden tayin ederek sıvı faz silisyumun önünde büyür. Katılaşma sürecinin tamamlanabilmesi için ötektik silis fazının alüminyum tarafından sürekli çekirdeklenmesi gerekmektedir. Yeniden çekirdeklenme süreci boyunca sıvı faz, silisyuma aşırı doygun hale gelerek sıcaklık yükselmesine engel olmaktadır. Bu durumda silisyumun alüminyum tarafından çekirdeklendiği sıcaklık değerinde ötektik katılaşma gerçekleşmiş olur [51].

Modifiye edilmemiş ötektik Al-Si alaşımında modifikasyon ile birlikte mikroyapıda meydana gelen değişim Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Kullanılan modifiye edici element olan Sr miktarına bağlı olarak ötektik yapı ve Al dendritlerinde meydana değişim görülmektedir. Mikroyapı görüntülerine göre, artan Sr miktarına bağlı olarak ötektik yapının daha ince form aldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 1.9 : Ötektik Al-Si alaşımının farklı Sr değerleri için gerçekleştirilen modifikasyon çalışmalarına bağlı olarak elde edilen mikroyapı görüntüleri; a) modifiye edilmemiş, b) 50 Sr, c) 250 Sr, d) 350 Sr [52].

Sr modifikasyonunun mekanik özelliklere etkisi

Uludağ ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, gaz giderme işlemi uygulanan A356 alaşımında porozite sayısının belirgin bir şekilde azaldığı ve Sr modifikasyonu ile metal kalitesinin iyileştiği (Bifilm indeksin azaldığı) görülmektedir [38].

Shin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Al-Si10.5 alaşımına yapılan ağırlıkça %0,01 – 0,02 Sr modifikasyonu, ötektik silis fazının morfolojisini iğnemsi formdan, lamelsi

forma; %0,03 Sr kullanımı ile ötektik silis morfolojisi fibröz bir forma çevirmek ile birlikte alaşımın çekme mukavemetini ve uzama değerini arttırmaktadır [53].

Lozano ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, AlSi12 alaşımına yapılan ağırlıkça %0,06 Sr modifikasyonunun, birincil α-Al dendritlerinin hacimsel oranını arttırdığı ve artan bu hacimsel oranın mekanik özellikleri iyileştirme eğilimi gösterebileceği anlaşılmaktadır [54].

Hekimoğlu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Al–12Si–Sr alaşımlarının sertlik, akma ve çekme dayanımları %0,1 stronsiyum içeriğine kadar yükselmektedir [55]. Sertlik ve çekme mukavemeti azalır, ancak stronsiyum ilavesi %0,1'i aştığında akma mukavemetinin önemli bir değişiklik göstermediği görülmektedir [55].

Chandrashekharaiah ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, ağırlıkça %0,3 Sr modifikasyonu ile çekme mukavemeti, yüzde uzama ve sertlik gibi mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiştir [56]. Yapılan modifikasyon işlemi sonucunda döküm alaşımına kıyasla darbe dayanımında ve kırılma tokluğunda hafif bir artış gözlenmiştir [56].

Basavakumar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Al-12Si alaşımına ait darbe tokluğunun esas olarak matristeki α-Al tanelerinin ve silisyum parçacıklarının şekline, tipine, boyutuna ve boyut dağılımına bağlı olduğu belirtilmektedir. A-Al dendritlerinin yapıda homojen dağılım göstermesi ve ötektik silis fazının %4 Sr modifikasyonu ile fibröz morfolojiye sahip olması darbe dayanımının iyileştirilmesi için kritik olduğu vurgulanmaktadır [57].

Tan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Al–12Si–4Cu–2Ni–0.8 Mg alaşımı için ağırlıkça %0,02 Sr kullanımı ile ötektik Si modifikasyonu, ortam sıcaklığı performansının artmasına ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerde hafif bir azalmaya yol açtığı görülmektedir [58].

Shabestari ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Sr ilavesinin % 0,03 oranında olması durumunda A413 alaşımında ötektik silisyum morfolojisini modifiye edildiği ancak Sr ilavesinin % 0,1 olması durumunda ise A413 alaşımında hidrojen çözünürlüğünü arttırdığı için porozite miktarını arttırdığı belirtilmiştir [17].

Shin ve arkadaşlarının geri dönüşümden elde edilmiş yüksek basınçlı döküm Al-10.5Si-2.0Cu alaşımı üzerinde yapmış oldukları çalışmada, alaşıma yapılan ağırlıkça % 0.01–0.02 Sr modifikasyonu ile iğnemsi silisyum morfolojisinin lamelli yapıya

dönüştürdüğü, tane boyutunu inceltmede ve alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili olduğu belirtilmektedir [53].

Sıvı metal bekletme süresinin Sr modifikasyonu üzerine etkisi

Na elementi ile gerçekleştirilen modifikasyon işlemine kıyasla Sr elementinin ergiyik metalde kaybolma hızı daha düşüktür. Bunun yanı sıra Sb elementi ile kıyaslandığında da Sr elementi daha etkin olduğu için döküm proseslerinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak döküm prosesi süresinin uzaması durumunda Sr elementinin, tutma fırınının sahip olduğu atmosfere de bağlı olarak, oksidasyonun etkisiyle sıvı metalden uzaklaşma ihtimali söz konusudur. Bu durumun temel nedeni ise Sr oksit formda iken Al veyahut Si elementlerinin meydana getirdikleri oksit bileşiklerden daha kararlı bir form oluşturması olarak verilebilmektedir. Sıvı metal bekletme süresinin arttırılması da Sr elementinin alaşımın yapısında bulunan diğer elementler ile reaksiyona girme eğilimini arttırarak modifiye etme yeteneğini kaybetmesine neden olabilmektedir [59]. Uludağ ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Sr elementinin Al-Si alaşımı ergiyik metalde optimum bekletme süresinin 60 dakika olduğunu; artan bekletme süresi ile birlikte Sr elementinin modifikasyon etkisinin azaldığını belirtmişlerdir [60]. Uludağ ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir diğer çalışmada da sıvı metal bekletme süresinin artmasıyla Sr modifikasyonunun negatif etkilendiği belirtilmektedir [61]. Sezgin Yaşa ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir diğer çalışmada ise sıvı metal bekletme süresinin artmasıyla hem Sr elementinin modifikasyon kabiliyetinin hem de sıvı metal kalitesinin azaldığı görülmüştür [62].

1.2.3 Al alaşımlarının üretiminde kullanılan döküm yöntemleri

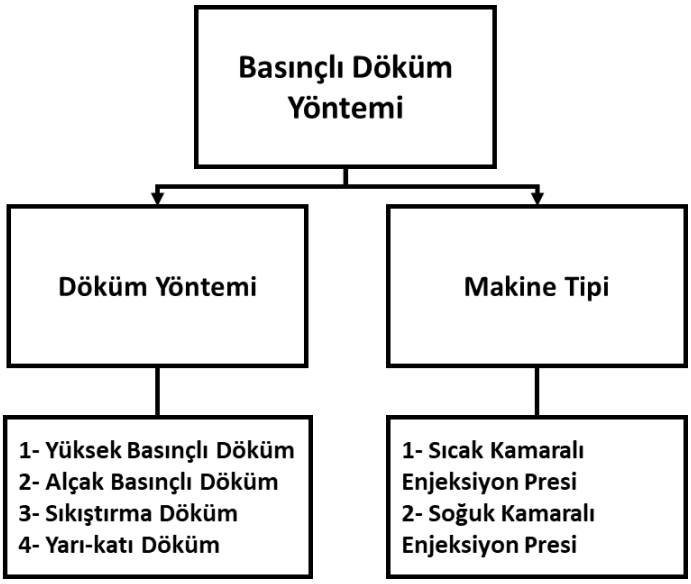
Bilinen en eski üretim metotlarından birisi olan döküm yöntemi; ergitilen bir metalin modellenen bir kalıba doldurulmasını esas alan bir imalat yöntemidir [63]. Döküm yöntemi ile basit ya da kompleks geometriye sahip olan parçalar kolaylıkla üretilebilmekle birlikte üretilen parçaların ağırlıkları gram değerlerinden ton değerlerine kadar değişiklik gösterebilmektedir. Kalıba yapılan dökümler temel olarak bozulabilir kalıp ve kalıcı kalıp olarak ikiye ayrılmaktadır. Kalıcı kalıp olarak çelik malzeme kullanılmaktadır ancak maliyeti yüksek olduğu için bu kalıpların ekonomik hale gelebilmesi ancak yüksek adetli üretim hacimlerinde söz konusu olmaktadır. Döküm yöntemi; karmaşık geometriye sahip parçaların tek seferde üretilebilmesi, seri üretim hızının ve üretim adedinin yüksek olması, diğer üretim yöntemlerine kıyasla

maliyetinin düşük olması ve farklı metal ve alaşımlarının üretimine imkan sağlaması ve nihai ürün için gerekli olan talaşlı imalat gereksiniminin düşük olması gibi avantajları sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Günümüz teknolojisinde kullanılmakta olan başlıca döküm yöntemleri ise kum kalıba döküm, kokil döküm, basınçlı döküm ve hassas döküm olarak sıralanabilmektedir. Endüstriyel ölçekte yüksek seri üretim hızına ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde gerekli isterleri karşılayabilmesi açısından basınçlı döküm yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir [64].

1.2.3.1 Döküm yöntemleri arasında basınçlı dökümün yeri ve önemi

Endüstriyel uygulamaların ve günümüz artan teknoloji isterlerinin gerektirdiği, yüksek adetli ve seri üretime elverişlilik odağında yeni döküm yöntemleri ortaya çıkmıştır. Bu üretim yöntemlerinden birisi olan basınçlı döküm, ergiyik metalin yüksek basınç ve hız uygulamasıyla birlikte çelik kalıbı doldurmasını ve kalıp içinde katılaşmasını esas almaktadır. Bu yöntem sayesinde, doğru yapılmış bir kalıp ve yolluk tasarımı sayesinde eş zamanlı olarak birden fazla parça üretimi söz konusu olabilmektedir [34]. Yöntemin sağladığı en kritik avantajlar; karmaşık geometriye sahip parçaların hızlı bir şekilde üretilebilmesi, parça cidarlarının ince olması ve parçaya hızlı katılaşma olanağı sağlaması olarak verilebilmektedir [65].

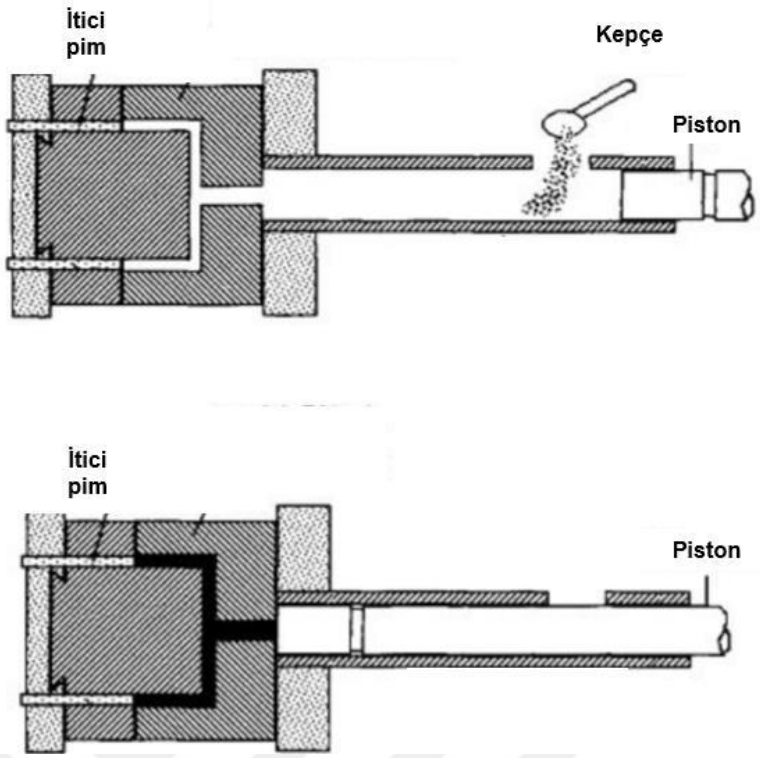
Basınçlı döküm yöntemi kullanılarak demir dışı metal ve alaşımlarının dökümü yapılabilmektedir [11]. Metal kalıp, bilinen bir diğer adıyla kokil kalıp kullanılarak yapılan dökümde ergiyik metal yerçekimi etkisiyle kalıbı doldurmaktadır. Ancak basınçlı dökümde, kokil kalıba dökümden farklı olarak ergiyik metal, hidrolik pistonun uyguladığı basınç ile kalıbı doldurmaktadır. Bu sayede parçalar seri bir şekilde kolaylıkla üretilebilmektedir. Basınçlı döküm yöntemleri, kullanılan makine ve yönteme bağlı olarak iki ayrı kategoride sınıflandırılmaktadır. Basınçlı döküm yöntemlerinin kullanılan makine ve döküm yöntemine göre sınıflandırılması Şekil 1.10’da gösterilmektedir.



Şekil 1.10 : Basınçlı döküm yöntemlerinin döküm yöntemine ve kullanılan enjeksiyon presine göre sınıflandırılması

2.3.3 Yüksek basınçlı döküm yöntemi

Farklı ağırlık değerlerine ve kesit kalınlıklarına sahip parçaların üretilebilirliğini sağlayan yüksek basınçlı döküm, özellikle otomotiv, havacılık, savunma ve enerji sektörü gibi birçok kritik alanda kullanılan parçaların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bir yüksek basınçlı enjeksiyon presinin bir parçayı dökebilirliğini sahip olduğu kitleme gücü belirler. Kitleme gücü ise "Ton" olarak ifade edimektedir. İlgili yöntemde kullanılan preslerin kapasitesi 50 tondan 3500 tona kadar kitleme kapasitesine sahiptir. Presin kitleme kapasitesinin artması; üretilebilecek parçaların boyutunun, ağırlığının ve et kalınlığının artmasına imkan tanımaktadır. Biri sabit diğeri ise hareketli olan ve dikey olarak bağlanan iki kalıba, kovana doldurulmuş ergiyik metal hidrolik olarak hareket ettirilen piston aracılığıyla kalıba doldurulmaktadır [11]. Sektörde de yaygın olarak kullanılmakta olan soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm presinin şematik görüntüsü Şekil 1.11'de gösterilmektedir.



Şekil 1.11 : Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm presinin şematik gösterimi [64].

Yüksek basınçlı dökümün temelini 3 ana faz oluşturmaktadır. Bu fazlar; birinci faz, ikinci faz ve üçüncü faz olarak adlandırılmaktadır. Bu üç ana faz, temel olarak kepçenin ergiyik metali hazneye dökerek doldurmasından silindirin ivmelenerek hızının sıfıra yaklaştığı anına kadar olan sürecini kapsamaktadır. Fazların aşamaları ile ilgili detaylar aşağıda paylaşılmaktadır.

Birinci Faz: Yüksek basınçlı döküm yönteminin en kritik adımlarından birisidir. Bu fazda basınç uygulanmamaktadır. Yüksek hız tercihen kullanılmamaktadır. Bu aşamanın en kritik noktası kullanılan ivme değeridir. Çünkü ergiyik metal, hazneye doldurulduğu andan itibaren ısı kaybederek soğur ve katılaşmaya başlar. Birinci fazın başlangıç ve bitiş noktasının belirlenmesi döküm parçasının yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Birinci fazın süresinin uzun olması, döküm parçasında soğuk birleşme ve yüzey karartıları gibi yüzey hatalarının oluşmasına sebebiyet vermektedir. Birinci faz süresinin kısa olması durumunda ise kritik hız değeri aşılıp sıvı metalde hava kapması problemi yaşandığı için döküm türbülanslı gerçekleşecektir [66].

İkinci Faz: Bu faz, yüksek basınçlı dökümde en karmaşık ve prosesin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için gereken en kritik aşamadır. Bunun sebebi ise sıvı metalin çok yüksek hız değerlerinde kalıba doldurulduğu aşama olmasıdır. Burada söz konusu hız olduğu için preste kullanılan piston seçiminden, kalıp / yolluk tasarımına;

hava cebi konumundan, kullanılan ergiyik metalin sıcaklığına kadar birçok parametre ikinci fazın kalitesine doğrudan etki etmektedir. Yüksek basınçlı dökümde kontrol altında tutulması gereken çok fazla sayıda parametre bulunduğu için simülasyon programlarının kullanımı, ileride oluşacak döküm boşluğu ya da yüzey kalitesi firelerinin minimuma çekilmesinde kritik bir önem arz etmektedir. Çünkü ergiyik metalin ikinci fazda hızı çok yüksek olduğu için ancak yolluk tasarımının başarılı bir şekilde yapılmasıyla başarılı bir döküm elde edilebilmektedir [67].

Üçüncü Faz: Ütüleme fazı olarak bilinen üçüncü faz ise yüksek basınçlı döküm prosesinin son aşamasıdır. Burada maksimum basınç elde edilir ve hız değeri yaklaşık sıfır olmaktadır. Kalıp içerisinde yarı-katı formda bulunan alüminyum ise uygulanan maksimum basınç değeri ile sıkıştırılarak işlem tamamlanmaktadır. Üçüncü fazın en kritik noktası ise kalıp için tasarlanmış olan soğutma kanallarıdır. Bu nokta, kalıp ömrünün belirlenmesinde ve döküm parçanın mikroyapısının nihai hale gelmesinde oldukça önemlidir.

Her üç fazın tamamlanmasının ardından kalıbın hareketli bölgesi açılarak parça çıkartılır. Kalıp, yağlama ve üfleme işlemlerinin ardından bir sonraki döküm için hazır hale getirilir. Kalıp hazırlık işlemlerinden, dökümün tamamlanma aşamasına kadar geçen sürece çevrim adı verilmektedir. Çevrim süresi, dökümü yapılacak parçanın et kalınlığına, projeksiyon alanına ve ağırlığına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.

2.3.2 Kalıp tasarımı ve döküm simülasyonu

Simülasyon çalışması, teorik ya da fiziksel oluşu farketmeksizin bir sistemin, bilgisayarda modellenmesinin ardından bu model ile sistemin işletilmesine yönelik, değişen deneysel parametrelere bağlı olarak davranışını anlayabilmek, değerlendirebilmek ve elde edilen sonuçları bilgisayar vasıtasıyla değerlendirebilmek için geliştirilen bir tekniktir.

Döküm simülasyonlarında ise bir yazılım vasıtasıyla döküm prosesi sırasında gerçekleşebilecek olay ve durumların girilen parametrelere bağlı olarak hesaplanmasıyla gerçeğe en yakın sonuç elde edilmesi temeline dayanmaktadır. Bu hesaplamaların gerçekleştirilmesi sırasında sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve sonlu farklar yöntemi (FDM) kullanılmaktadır. Döküm simülasyonu çalışmalarında

kullanılmak üzere Procast, Novacast, MagmaSoft, Vulcan ve Click2Cast gibi birçok yazılım çözümü bulunmaktadır.

Döküm simülasyonu çalışmalarında ilk aşamada dökümü yapılacak parçanın 3D CAD modeli oluşturulmaktadır. 3D model, yapılacak analiz çalışmasının içeriğine bağlı olarak gridlere (meshleme) bölünür. Ardından simülasyon programına, dökümü yapılacak alaşımın mekanik ve termal özellikleri ve döküm denemesinde kullanılacak olan kalıp malzemesine ait mekanik ve termal özellikler girilmektedir. Bu parametreler, simülasyon çalışmasının sınır şartlarını oluşturmaktadır. Bilgisayar destekli analiz çalışmaları kapsamında döküm simülasyonu özelinde termal analiz, akış analizi ve gerilme analizleri gerçekleştirilmektedir. Analiz sonuçlarına bağlı olarak sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, katılaşma oranı ve katılaşma zamanı gibi sonuçlar elde edilmektedir. Proses parametreleri, gerçek üretim parametreleri ile ne kadar benzer olursa simülasyon programından elde edilen sonuçlar da o kadar gerçeğe yakınsamaktadır. Bu da üretim esnasında oluşabilecek hataların önceden tespit edilmesi sağlayarak enerji ve hurda maliyetininin minimize edilmesini sağlamaktadır.

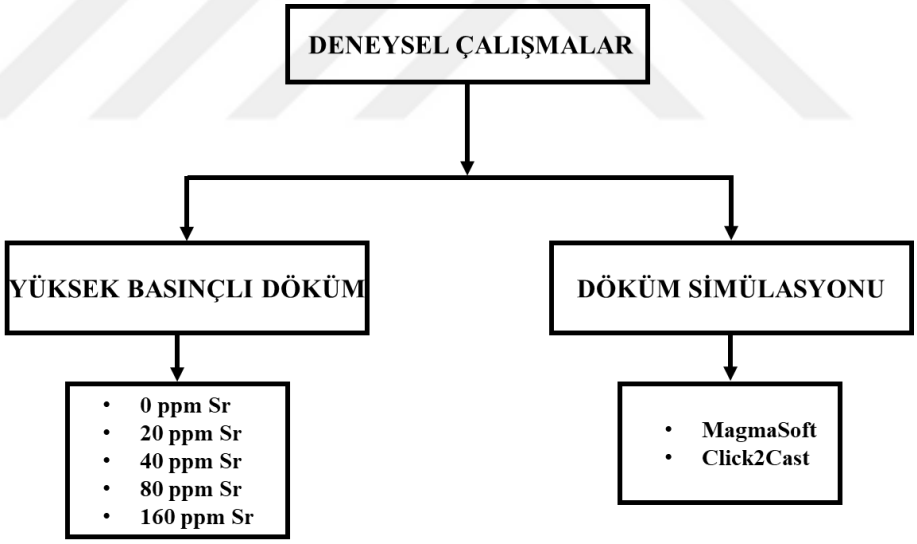
Döküm simülasyon programları kullanımıyla ilgili proses parametreleri ve döküm parçanın CAD tasarımı ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları; kalıp sıcaklığı, döküm sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve basıncı, soğuk birleşme, hava kapması, porozite, kalıp dolum ve katılaşma süresi gibi proses için kritik önem arz eden döküm hatalarının üretim öncesinde tespit edilmesi ve önlenmesi noktasında oldukça kritik bir öneme sahiptir.

1.3 Hipotez

Sıvı metal temizliği yapılmış ergiyik için, ötektik alaşım olan ve yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen AlSi12(Fe) alaşımının, Sr kullanımıyla birlikte % uzama değeri iyileştirilecektir. ISO EN 1706 standardında % uzama özelinde beklentisi %1 olan alaşıma ait uzama değeri minimum %4 mertebelerine çıkartılacaktır. % uzama değerinin yüksek olması beklenmeyen döküm parçaların süneklik özelliği iyileştirilecektir. Artan bu değer ile paralel olacak şekilde darbe dayanımı özelliğinin de iyileştirilmesiyle alaşımın tokluk özelliği iyileştirilmiş olacaktır. Deneme çalışmaları süresince alaşımın akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlik özelliklerinden taviz verilmeden süneklik ve tokluk özellikleri iyileştirilecektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, ergiyik AlSi12(Fe) alaşımına Sr takviyesi yapılarak Sr miktarının ötektik alaşımın mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sr modifikasyonunun, yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen alüminyum çekme çubukları üzerindeki etkisinin detaylı bir şekilde incelenmesi için 0 ppm (Sr ilavesiz), 20 ppm, 40 ppm, 80 ppm ve 160 ppm oranlarında master alaşım denemesi yapılmıştır. Yapılan döküm çalışması sektörde yaygın olarak kullanılan iki farklı döküm simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiştir. Dökümü yapılan ve çekme çubuklarının bulunduğu salkımın dijital ikizi yaratılarak, simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar ile dökümden alınan parçaların X ışını görüntülerinin karşılaştırma imkanı yaratılmıştır. Deneysel çalışmanın genel özeti Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Deneysel çalışma şematik gösterimi.

Sr ilavesiz, ağırlıkça 20, 40, 80 ve 160 ppm Al10Sr master alaşımı için 4 ayrı döküm yapılmıştır. 45 dakikalık döküm süresi içerisinde her 3 dakikada 1 kez olmak üzere bir şarjdan toplamda 15 salkım elde edilmiştir. Dökümle paralel olacak şekilde ergiyikten numune alınıp; metal kalitesinin hesaplanması için VAK testi gerçekleştirilmiştir. VAK için alınacak olan ergiyik numuneler, döküm kepçesi ile birlikte eş zamanlı olarak alınmıştır. Cihazın katılaştırma süresi, numune hazırlama – numuneyi çıkarma süreleri de baz alındığında 1 şarj için toplamda 3 adet VAK numunesi ve 3 adet vakum

altında katılaştırılmadan elde edilmiş döküm numunesi olacak şekilde toplamda 6 adet VAK numunesi elde edilmiştir. 4 şarj için toplamda 60 adet çekme testi, 60 adet çentik darbe testi ve 24 adet VAK numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen numuneler için planlanan deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen testler Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların şematik gösterimi.

2.1 Kullanılan Alaşım ve Malzemeler

Deneysel çalışmada sekonder AlSi12(Fe) alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın uluslararası standartlarda karşılığı AlSi12(Fe) (DIN EN 1676), EN AC 44300 (EN), ETİAL140 (Eti Alüminyum), LM6 (UK) ve A413 (USA) olarak bilinmektedir. Sr katkısı yapılmadan önce alaşıma ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.1'de verilmektedir. Elde edilen spektral analiz sonuçlarının, TS EN 1706 standardında paylaşılan EN AC 44300 (AlSi12(Fe)) alaşımının kimyasal kompozisyon aralık değerlerine uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Deneme çalışmalarında kullanılan AlSi12(Fe) alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).

Sr Miktarı	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Sr (ppm)
0 ppm Sr	88,41	10,58	0,35	0,09	0,14	0,02	9

2.2 Kullanılan Modifiye Edici Malzeme

AlSi12(Fe) alaşımı özelinde modifiye edici olarak stronsiyum (AlSr10) master alaşımı kullanılmıştır. Döküm çalışmasında kullanılan master alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.2'de verilmektedir. AlSr10 master alaşımı, 10 mm çapında 500 mm uzunluğunda çubuk formunda kullanılmıştır.

Çizelge 2.2 : Deneme çalışmalarında kullanılan Al10Sr master alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).

Master Alaşım	Al	Sr	Fe	Si	Ca	Mg
AlSr10	Kalan	9-11	<0,30	<0,30	<0,10	<0,10

AlSi12(Fe) alaşımı özelinde gerçekleştirilen Sr modifikasyonu çalışmasında, artan Sr miktarına bağlı olarak döküm sırasında ergiyik metalden alınan kimyasal analizden elde edilen kompozisyon değerleri Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3 : Döküm denemelerinde kullanılan alaşımın artan Sr miktarına bağlı olarak değişen kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).

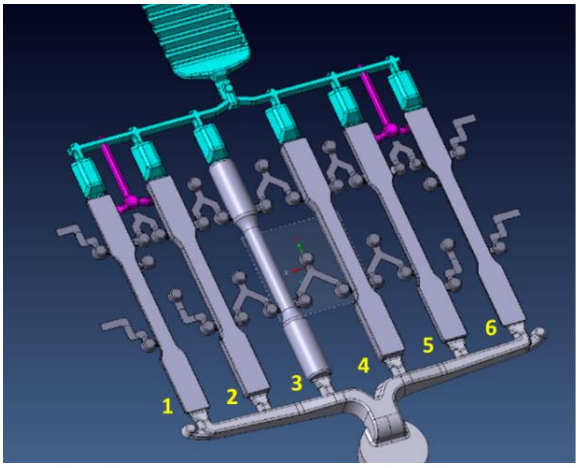
Sr Miktarı	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Sr (ppm)
20 ppm	87,07	10,72	0,40	0,15	0,19	0,04	22
40 ppm	88,16	10,61	0,39	0,16	0,19	0,06	45
80 ppm	88,20	10,55	0,40	0,15	0,17	0,31	86
160 ppm	88,19	10,64	0,39	0,13	0,18	0,03	174

2.3 Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi ile Çekme Çubuğu Üretimi

Yapılan çalışma kapsamında, 5 adet sırasıyla 1,5 mm, 3 mm, 6 mm, 10 mm ve 12 mm kesit kalınlığına sahip lama çekme çubuğu ve 1 adet 12 mm çapa sahip silindirik çekme çubuğunun bulunduğu salkıma ait kalıp ile üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen çekme çubuklarının görüntüsü ve numunelerin kesit kalınlığı değerleri Şekil 2.3-a'da gösterilmektedir. Kesit kalınlıkları ve geometrisini dışında bütün ölçüleri aynı olan numunelerden silindirik çekme çubuğuna (Şekil 2.3-a 3 no'lu numune) ait numune

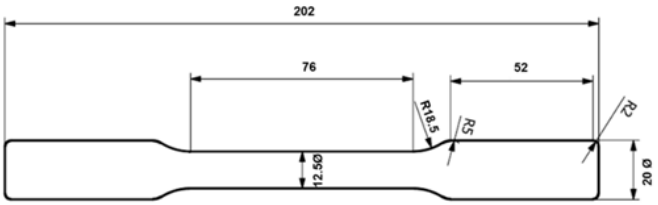
boyutları Şekil 2.3-b'de gösterilmektedir. Döküm sonucunda elde edilen salkıma ait görüntü ise Şekil 2.3-c'de gösterilmektedir.

a)

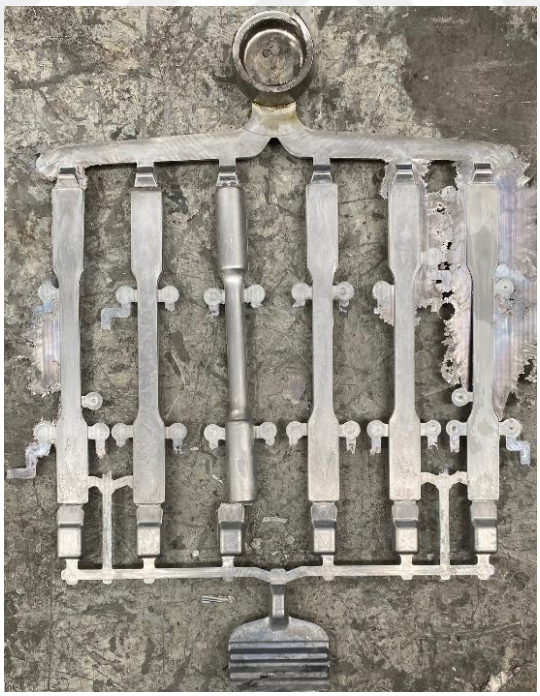


Numune No.	Et kalınlığı / Numune çapı
1	3 mm
2	10 mm
3	12 mm Ø
4	12 mm
5	6 mm
6	1,5 mm

b)



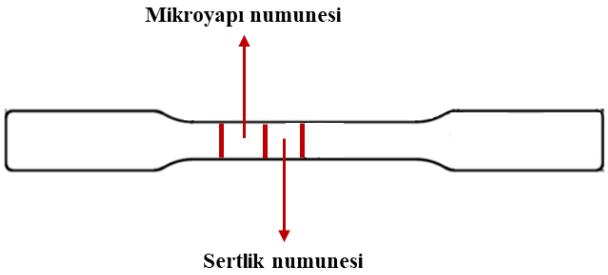
c)



Şekil 2.3 : Üretimi yapılan a) Üretilen Çekme çubuklarının görüntüsü ve kesit kalınlığı değerleri, b) Silindirik çekme test çubuğunun ölçüleri, c) Çekme çubuğu salkımı.

Döküm sonrasında elde edilen salkımdan Şekil 2.3-a'da gösterilen numunelerden; 2 no'lu numune çentik darbe testi için, 3 no'lu numune çekme testi için ve 5 no'lu numune ise orta bölgelerinden kesilerek mikroyapı ve sertlik ölçüm numunesi olarak

kullanılmıştır. 5 no'lu numuneden alınan mikroyapı ve sertlik numunelerinin temsili gösterimi Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : 5 no'lu numuneden alınan mikroyapı ve sertlik numunelerinin kesim sırasının temsili şematik gösterimi.

AlSi12(Fe) alaşımı, alaşıma özel ergitme ocağında ergitildikten sonra 300 kg kapasiteye sahip taşıma potasına alınmıştır. Ergitme ocağından taşıma potasına alınan ergiyik AlSi12(Fe) alaşımı, döner gaz giderme sisteminde bulunan döner çarkın ergiyiğe uygulanan azot gazı üflemesi sayesinde 3 dakika boyunca sıvı metal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. döner gaz giderme sistemi ile gerçekleştirilen gaz giderme işlemine ait görsel Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : Döner gaz giderme sistemi ile gerçekleştirilen gaz giderme prosesi.

Temizlenen sıvı metal, 400 ton kapasiteye sahip Metal Pres marka enjeksiyon presinin tutma potasına taşınmıştır. Döküm denemelerinin gerçekleştirildiği prese ait görsel

Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Alaşımın döküm sıcaklığı, her ne kadar 685 °C değerinde sabit tutulmaya çalışılsa da tutma potasında bulunan ergiyik metalin ısı kaybının engellenebilmesi adına 700 ± 5 °C olarak ölçülmüştür. İlk aşamada ilavesiz döküm çalışması gerçekleştirilmiştir. İkinci döküme geçerken potada kalan sıvı metale gaz giderme prosesinden gelen sıvı metal transfer edilmiştir. 20 ppm Sr değerinin elde edilebilmesi için 40 gram AlSr10 çubuk sıvı metale eklenmiştir. Çözünmesi için 10 dakika beklendikten sonra spektral analiz yapılarak kimyasal kompozisyonu kontrol edilmiştir. Sr değeri hedeflenen değerde olduğunda ise döküm denemeleri başlatılmıştır. Döküm çalışmasının 45 dakika içerisinde bitirilmesi için gerekli özen gösterilmiştir. Aynı işlem adımları; 40 ppm, 80 ppm ve 160 ppm Sr ilavesi için gerçekleştirilen üç ayrı döküm çalışmasında da gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 40 ppm Sr hedefinin yakalanabilmesi için 60 gram, 80 ppm Sr hedefi için 140 gram ve 160 ppm Sr hedefi için ise 180 gram AlSr10 çubuk kullanılmıştır.



Şekil 2.6 : Döküm çalışmalarının gerçekleştirildiği 400 ton kapasiteli Metal Pres marka enjeksiyon presi.

2.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Cihazlar

2.4.1 Numune hazırlamada kullanılan cihazlar

Makro kesme cihazı;

Yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen; farklı kesit kalınlığına ve geometrisine sahip çekme çubuğu salkımına gerekli testleri gerçekleştirmek üzere kesim işlemi Şekil 2.7'de gösterilen makro kesim cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Makro kesim cihazı, parçaların kesiminde ekseri olarak kullanılmıştır. Numune alınacak parçalar cihaza sabitlendikten sonra, cihazın sağ tarafında bulunan ve diskin hareket yönünü belirleyen kol sayesinde kesim işlemi gerçekleştirilmektedir. Kesme işlemi, cihazın içerisinde, kapalı atmosferde ve numunede gerçekleşebilecek aşırı ısınmanın önlenebilmesi adına soğutma sıvısının kullanımı ile gerçekleşmektedir. Kesme cihazının kapak kısmında bulunan ve darbe direnci yüksek olan cam sayesinde kesim işlemi kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.7 : Numune kesiminde kullanılan Bulucut marka makro kesme cihazı.

Zımparalama ve parlatma cihazı;

Numunelerin makro kesme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen numunelerde testlerin sağlıklı sonuç verecek şekilde gerçekleştirilebilmesi için numunelerin test yapılacak yüzeylerine zımparalama işlemi yapılmıştır. Gerçekleştirilecek tüm testler için yapılan zımparalama ve parlatma işlemleri Şekil 2.8'de gösterilen cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Cihazın yapılacak zımparalama ya da parlatma işlemine uygun olacak şekilde devir ayarı yapılabilmekle beraber yapısında bulundurduğu su tesisatı ile su kullanılarak zımpara uygulaması yapabilme imkanı sağlamaktadır. Cihazın teçhizatında bulundurduğu otomatik kafa sayesinde eş zamanlı

olarak bakaliteye alma işlemi görmüş tüm numuneler otomatik olarak zımparalanabilmektedir. Ancak yapılan bu çalışma kapsamında numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri manuel olarak yapılmıştır.



Şekil 2.8 : Zımparalama ve parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği Struers marka cihaz.

Bakalite alma cihazı;

Mikroyapı incelemesi ve sertlik ölçümü yapılacak numunelerin düzgün geometride olmasını sağlama amacıyla numunelere bakaliteye alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin bakaliteye alma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Tüm numunelerde kullanılan bakalite tozunun pişirilme aşamasında ortak parametre olarak 145 ºC'de 15 dakika kullanılmıştır.



Şekil 2.9 : Numunelerin bakaliteye alınmasında kullanılan Bulumount marka cihaz.

2.4.2 Mikroyapı analizinde kullanılan cihazlar

Optik mikroskop;

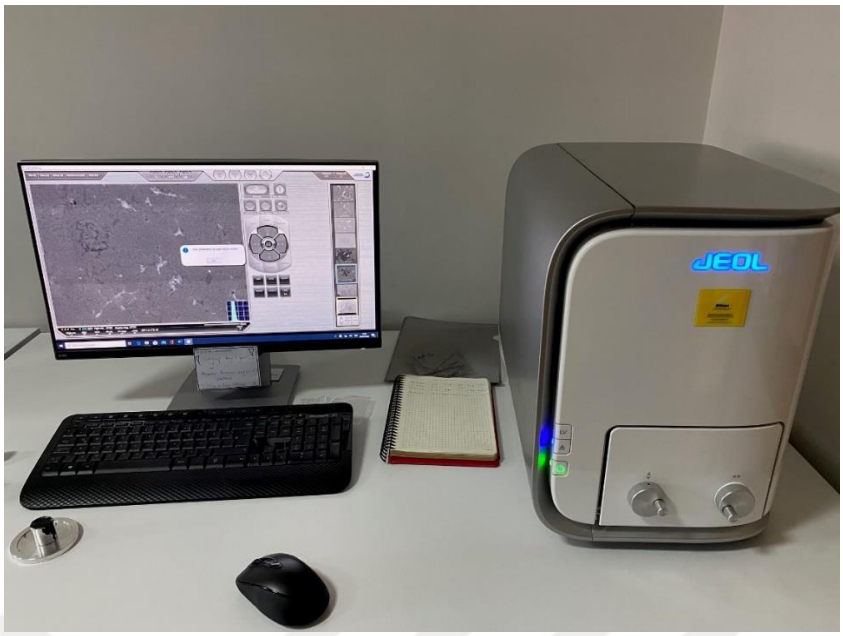
Mikroyapısal inceleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi için bakaliteye alma, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçerek hazırlık işlemine tabi tutulan numuneler optik mikroskop ile incelenmiştir. Mikroyapı inceleme çalışmalarının gerçekleştirilmesinde kullanılan optik mikroskop Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Nikon Eclipse marka cihaz ile numunelerin mikroyapısal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlgili optik mikroskop, bilgisayar ile entegre bir şekilde çalışmakta olup; mikroskopta yazılım çözümü olarak Clemex marka analiz programı kullanılmaktadır. 50, 100, 200 ve 500 büyütme kapasitesine sahip mikroskop ile 200 ve 500 büyütme kullanılarak mikroyapı görüntüleri alınmıştır.



Şekil 2.10 : Mikroyapısal incelemelerin gerçekleştirildiği Clemex yazılımının kullanıldığı Nikon Eclipse marka optik mikroskop.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM);

Mikroyapı numunelerinde oluşan intermetalik fazların incelemeleri SEM ile gerçekleştirilmiştir. SEM analizinin gerçekleştirilmesinde kullanılan elektron mikroskobu Şekil 2.11'de gösterilmektedir. İlgili elektron mikroskobu; hem yüksek hem de düşük vakum çalışma modları, ikincil ve geri saçmalı elektron dedektörleri (SED ve BSED), gerçek zamanlı 3D görüntüleme, elementel analiz ve haritalama yapabilmektedir.



Şekil 2.11 : Deneysel çalışmada kullanılan Jeol JCM 6000 marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.

2.4.3 Vakum altında katılaştırma (VAK) cihazı

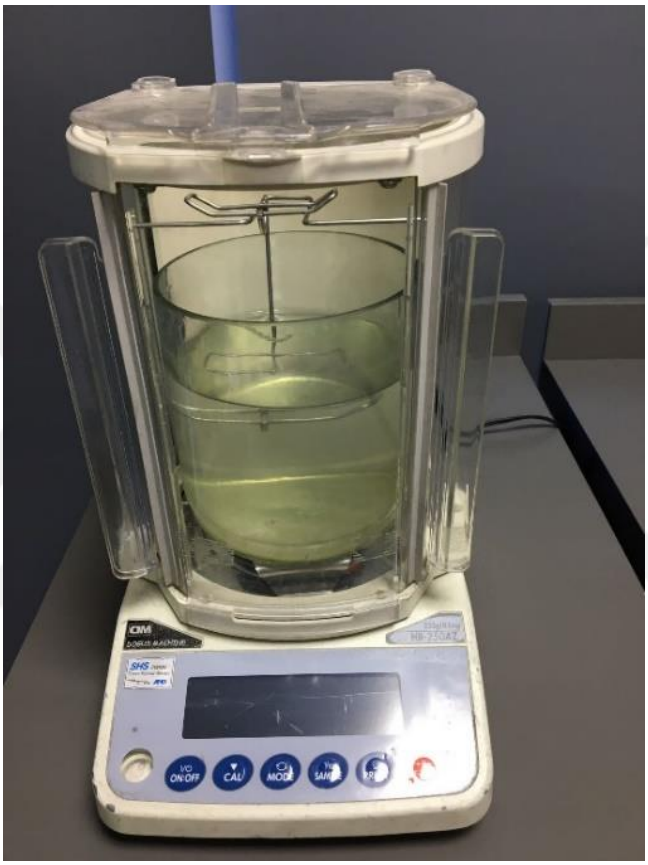
Metal kalitesi belirleme çalışmalarında kullanılan ve ergiyik metalin vakum altında katılaşmasını sağlayan cihaz Şekil 2.12'de gösterilmektedir. İlgili cihazda, bir göze koyulan numune vakum altında katılaştırılırken diğer göze koyulan numune ise normal katılaşma göstermektedir. İki numune elde edilmesinin sebebi ise yoğunluk indeks hesaplamasında kullanılmasıdır.



Şekil 2.12 : Doğuş Makine marka vakum altında katılaştırma test cihazı.

2.4.4 Yoğunluk ölçümü için kullanılan Arşimet ölçüm cihazı

VAK numunelerinin yoğunluk indeks hesaplamaları Arşimet ölçüm cihazı kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Metal kalitesi belirleme çalışmalarında kullanılacak VAK numunelerinin ölçümünde kullanılan Arşimet ölçüm cihazı Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Yapılan ağırlık ölçümü sonuçlarına bağlı olarak cihaz numunelerin yoğunluk indeks değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.13 : Yoğunluk indeks ölçümünde kullanılan Doğuş Makine marka Arşimet ölçüm cihazı.

2.4.5 Tahribatsız görüntülemede kullanılan X ışını radyografi cihazı

Çekme ve çentik darbe testlerine tabi tutulacak çekme çubuklarının ve VAK numunelerinin porozite analizlerinin gerçekleştirilebilmesi adına, tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan X ışını radyografi yöntemi kullanılmıştır. X ışını görüntüleme işlemlerinde kullanılan cihaz Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.14 : Numunelerin X ışını radyografi görüntülerinin alınmasında kullanılan SRE HEX (160 kW) marka radyoskopi cihazı.

2.4.6 Sertlik test cihazı

Sertlik ölçüm test cihazı, Sr modifikasyonunun alaşımın sertlik özelliği özelinde etkisinin incelenmesi için kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan cihaz Şekil 2.15'te gösterilmektedir. İlgili ölçüm cihazı ile hem brinell hem de vickers ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Cihazın yazılımında, yapılacak sertlik ölçüm türüne ve ölçümü yapılacak malzeme türüne göre programlar bulunmaktadır. Ölçüm öncesinde yazılımdan hangi malzeme olduğu ve ölçümü yapılacak test türünün girilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.15 : Brinell sertlik ölçümlerinde kullanılan BMS Digirock markalı cihaz.

2.4.7 Çekme test cihazı

Döküm denemelerinden elde edilen silindirik çaplı numunelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama özelliklerinin belirlenmesi için numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. İlgili testler, Shimadzu AG – IS marka 250 kN kapasiteli cihazda gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinin gerçekleştirildiği cihaza ait görsel Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Çekme testleri sırasında % uzama değerlerinin doğru tespit edilebilmesi için Epsilon marka ekstensometre kullanılmıştır.



Şekil 2.16 : Çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan Shimadzu marka 250 kN kapasiteli cihaz.

2.4.8 Darbe test cihazı

Döküm denemelerinin uygun ebatlarda işlenmesi ile elde edilen çentik darbe test numunelerinin tokluk özelliğinin tespit edilebilmesi için numuneler darbe testine tabi tutulmuştur. İlgili testler, Alşa marka 300 J kapasiteli Charpy model cihazda gerçekleştirilmiştir. Darbe testlerinin gerçekleştirildiği cihaza ait görsel Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17 : Çentik darbe testlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan Alşa marka 300 J kapasiteli cihaz.

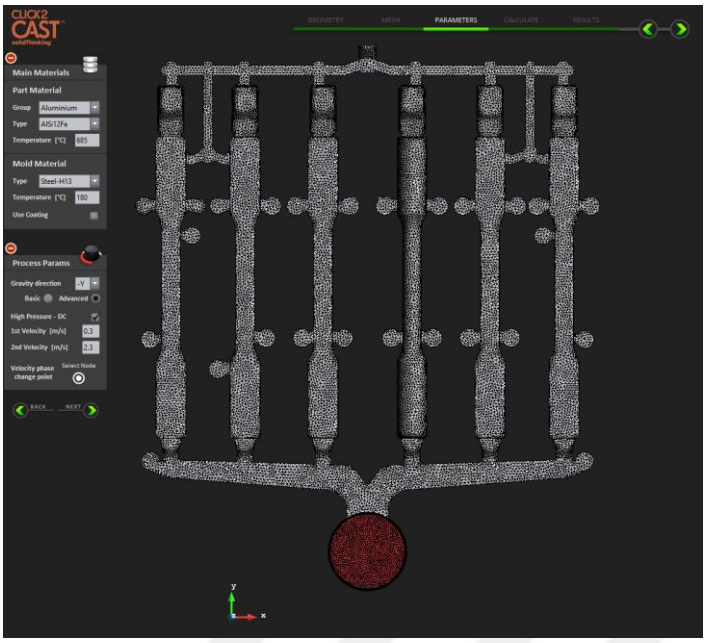
2.5 Deneysel Çalışmada Kullanılan Simülasyon Programları ve Yapılan Analiz Çalışmaları

Tasarlanan kalıbın yüksek basınçlı döküm prosesine uygunluğunun değerlendirilmesi için MagmaSoft ve Click2Cast yazılımları ile simülasyon ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Her iki yazılım kullanılarak çekme çubuğu kalıbına ait tasarımın dolum ve katılaşma performansının incelenmesi ve olası porozite problemlerinin tespiti incelenmiştir. Kullanılan her iki yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Porozite oluşumu özelinde deneysel çalışmada elde edilen X ışını görüntüleri ile döküm simülasyon programı sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Döküm simülasyon analizlerinde MagmaSoft ve Click2Cast programları tercih edilmiştir. MagmaSoft programının tercih edilmesindeki en büyük etken mevcut tüm simülasyon programları arasında yaklaşık % 95 doğruluk oranı ile en güvenilir sonuçları vermesi olup; Click2Cast programının tercih edilmesinin nedeni kullanıcı dostu arayüze sahip olmasıyla diğer programlara kıyasla daha hızlı sonuç verebiliyor olmasıdır.

Her iki yazılımda gerçekleştirilen analiz çalışmaları için aynı döküm parametreleri tercih edilmiştir. Click2Cast ve MagmaSoft programlarında kullanılan döküm dolum analizi parametreleri Çizelge 2.4'te gösterilmektedir. Click2Cast yazılımının proses parametrelerinin girildiği arayüzüne ait örnek görüntü ise Şekil 2.18'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.4 : Click2Cast ve MagmaSoft programlarında kullanılan döküm dolum analizi parametreleri.

Ana Malzeme		**Kalıp Malzemesi**		**Proses Parametreleri**	
Metal	Alüminyum	Tür	H13 Çelik	Yerçekimi yönü	-Y
Alaşım	AlSi12(Fe)	Sıcaklık	180 °C	1.Hız	0,3 m/s
Sıcaklık	685 °C	Kaplama	Yok	2. Hız	2,3 m/s



Şekil 2.18 : Click2Cast ve MagmaSoft yazılımlarında gerçekleştirilen döküm dolum analizlerinde kullanılan parametreler.

2.6 Yapılan Testler

2.6.1 VAK numunelerinin hazırlanması ve yoğunluk ölçümü

Vakum altında katılaştırma test cihazında 80 mbar vakum değerinde 180 saniye süresince katılaştırılan numuneler VAK numunesi olarak elde edilmiştir. Elde edilen VAK numuneleri, dikey olacak şekilde ortadan ikiye kesilmiştir. Kesilen numune yüzeyi Şekil 2.19'da gösterilmektedir. İki adet numune yüzeyinden uygun olanı için numune hazırlık işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlık süresince 180, 240, 600 ve 800 grid SiC kağıtlarla zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyi inceleme işlemine hazır hale gelen numunelerin incelenecek yüzeyleri, scanner kullanımıyla taranarak bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 2.19 : Yüzeyi hazırlanmış VAK numunesi görseli.

Yoğunluk ölçümü için Arşimet ölçüm cihazı kullanılmıştır. Vakum altında katılaştırılmış VAK test numunesinin ve atmosferde katılaştırılmış numunelerin havada ve suya daldırılmış haliyle ağırlıkları ölçülmektedir. İlgili ölçüm cihazı, numunelerin yoğunluk değerlerini vermektedir. Numunelerin yoğunluk değerleri kullanılarak aşağıda paylaşılan formülasyon ile numunelere ait yoğunluk indeks değeri denklem 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$DI = (D_{atm} - D_{80mbar} / D_{atm}) \times 100 \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de görüleceği üzere D_{atm} havada katılaştırılan numuneye ait yoğunluk değerini, D_{80mbar} 80 mbar vakum altında katılaştırılan numuneye ait yoğunluk değerini, DI ise yoğunluk indeksi değerini ifade etmektedir.

2.6.2 VAK analizi ile metal kalitesinin belirlenmesi

VAK numunelerinden metal kalitesi belirleme çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için görüntü analiz programında taranmış yüzey görüntüleri için bazı ayarlamalar yapılması gerekmektedir. Numunelerin yüzeylerinde bulunan porozitelerin tanımlanması özelinde gerçekleştirilen renk ayarlaması yapıldıktan sonra numune yüzey görüntüleri analiz programına aktarılmıştır. Analiz programında VAK numunesi özelinde boyutsal ölçülendirme kalibrasyonu ve numune yüzeyinde bulunan porozitelerin farklı renkte görülmesinde kullanılan "Treshold" uygulaması yapılmıştır. Tüm bu uygulamalardan sonra, metal kalitesinin tayin edilmesi özelinde ihtiyaç duyulan tüm parametrelerin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

2.6.3 Sertlik testi

Sertlik ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için 6 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuğundan elde edilecek test numuneleri ölçüm için hazır hale getirilmiştir. Sertlik ölçümü öncesinde numuneler metalografik hazırlık işlemlerinden geçmiştir. 180, 240, 400, 600 ve 800 grid zımpara kağıtları kullanılarak numune yüzeyleri sertlik ölçümlerine hazır hale getirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde numunenin yüzeyin düz olması ölçüm doğruluğunun sağlanmasında kritik olduğu için numune hazırlık aşamalarında bu kritere dikkat edilmiştir. 5 farklı döküm parametresi için (0 ppm Sr, 20 ppm Sr, 40 ppm Sr, 80 ppm Sr, 160 ppm Sr) her bir numuneden 10 adet ölçüm alınmıştır. Sertlik ölçümü işleminde, numunenin yüzeyine belirli bir miktar ön yük uygulandıktan sonra nihai yük uygulaması uygulama kolu vasıtasıyla yarı manuel

olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler için cihaz içerisinde Alüminyum-Brinell (Al-HB) olarak kodlanan program seçildikten sonra numunenin yüzeyine toplamda 62,5 kg yük uygulanmıştır. Yük kaldırıldıktan sonra numunenin yüzeyinde oluşan izin çapı, optik gözlemleyici sayesinde hem x hem de y ekseninde olacak şekilde ölçülmüştür. İki eksende de ölçülen çap değerlerinin sisteme girilmesiyle sertlik değerleri elde edilmiştir.

2.6.4 Çekme testi

Silindirik çekme çubukları için gerçekleştirilen çekme testleri, ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bundan dolayı kullanılan çekme hızı standarta bağlı olarak 1,2 mm/dk olarak belirlenmiştir. Her bir parametre için 10 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. İlgili test sonucunda numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri hesaplanmıştır.

2.6.5 Çentik darbe testi

Çekme çubuklarının bulunduğu salkımdan 10 mm kesit kalınlığına sahip lama numunenin CNC ile işletilmesi sonucunda 10x10x55 mm boyutlarına ve v çentiğe sahip darbe testi numuneleri elde edilmiştir. İlgili testler, Konya Selçuk Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında TS EN ISO 148 standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her parametre için 5 adet numuneye çentik darbe testi yapılmıştır.

2.6.6 X ışını radyografi analizi

Çekme testi ve çentik darbe testi gerçekleştirilecek her bir numune X ışını radyografi cihazı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen görüntülerden porozite miktarı, boyutu ve dağılma eğilimi incelenmiştir. Dökümü yapılan parçalar, müşteri ürünü olmayıp çekme çubuğu salkımı olduğu için ASTM E505 standardına göre porozite değerlendirmesinin yapılmasına gerek duyulmamıştır.

2.6.7 Mikroyapı analizi

Sertlik ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için 6 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuğundan elde edilecek test numuneleri ölçüm için hazır hale getirilmiştir. Her bir numune sırasıyla 180, 240, 400, 800, 1200 ve 2400 grid derecelerine sahip zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Bu sayede numunelerin hem yüzeyi düz hale

getirilmiş hem de alüminyumun yüzeyinde doğası gereği oluşan oksit tabakası yok edilmiştir. Zımparalama işlemi esnasında su kullanıldığı için test numunelerinden zımparalama sonucu kopan parçaların tekrar numune yüzeyini çizmeleri gibi bir problemle karşılaşılmamıştır. Su kullanımı aktif soğutma sağladığı için numunelerde herhangi bir ısınma söz konusu olmamıştır. Isınma olmadığı için numunelerde mikroyapısal olarak herhangi bir değişim gerçekleşmesine imkan tanınmamıştır. Zımparalama işlemine tabi tutulan her bir numune parlatılmıştır. Parlatma işlemi için kolloidal silika kullanılmıştır. Parlatma sonrasında istenilen görüntü elde edilebildiği için dağlama işlemine gerek duyulmamıştır. Mikroyapısal inceleme işlemine hazır olan numuneler Nikon Eclipse marka optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda 200 büyütme ve 500 büyütme için görüntüler alınmıştır.

2.6.8 SEM analizi

Artan Sr miktarına bağlı olarak mikroyapı numunelerinde oluşan intermetalik fazların incelemeleri SEM ile gerçekleştirilmiştir. SEM analizinin gerçekleştirilmesinde kullanılan elektron mikroskobunda bulunan geri saçmalı elektron dedektörü (BSED) kullanılarak görüntüler alınmıştır. İlgili dedektör kullanılarak alınan görüntülerden; noktasal, alansal ve çizgisel EDS analizi grafikleri elde edilmiştir. Bu sayede yapıda oluşan intermetaliklerin kimyasal kompozisyonları hakkında genel olarak fikir sahibi olunmuştur.

.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Döküm Simülasyonu Sonuçları

Click2Cast ve MagmaSoft yazılımları kullanılarak yüksek basınçlı döküm kalıp dolum ve katılaşma analizleri aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Click2Cast yazılımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

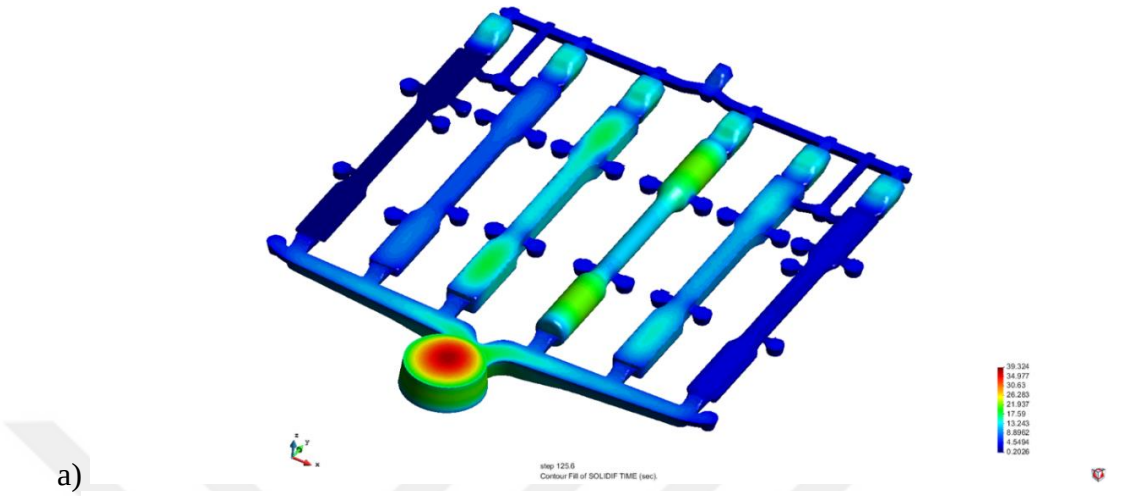
Click2Cast yazılımı kullanılarak elde edilen ve katılaşma süresini gösteren görsel Şekil 3.1-a'da gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, dökümün başlangıç anından kalıbı tamamen doldurarak katılaşması için gerekli olan sürenin yaklaşık 40 saniye olduğu görülmektedir. İlgili görselden; kalıbın sağ ve sol köşelerinde bulunan 1,5 mm ve 3 mm kalınlığa sahip çekme çubuklarından başladığı, ardından salkıma dağılarak dolum yaptığı anlaşılmaktadır. 40 saniye içerisinde silindirik çekme çubuğu ile 12 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuklarının köşelerinin katılaşmasının en geç tamamlanan bölgeler olduğu gözlemlenmektedir.

Click2Cast yazılımı kullanılarak elde edilen ve döküm süreksizliğini gösteren görsel Şekil 3.1-b'de gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, katılaşmanın en son tamamlandığı lokal bölgelerde, silindirik ve 12 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuklarının çene bağlantı kısımlarında döküm süreksizliği tespit edilmiştir. Numunelerin orta bölümlerinde herhangi bir döküm süreksizliğine rastlanmamaktadır.

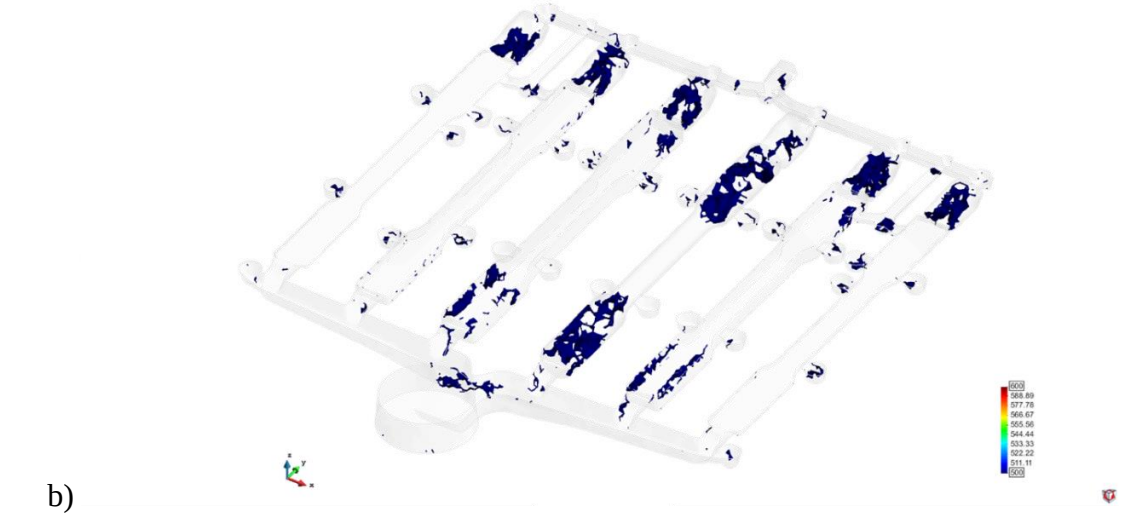
Click2Cast yazılımı kullanılarak elde edilen ve hava sıkışma bölgelerini gösteren görsel Şekil 3.1-c'de gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, kalıp revizyonu gerektirecek majör hava sıkışması problemiyle karşılaşılmamaktadır.

Click2Cast yazılımı kullanılarak elde edilen ve porozite oluşum bölgelerini gösteren görsel Şekil 3.1-d'de gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, döküm sırasında oluşabilecek porozitelerin çene bağlantı bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. Simülasyon sonucuna göre, katılaşmanın

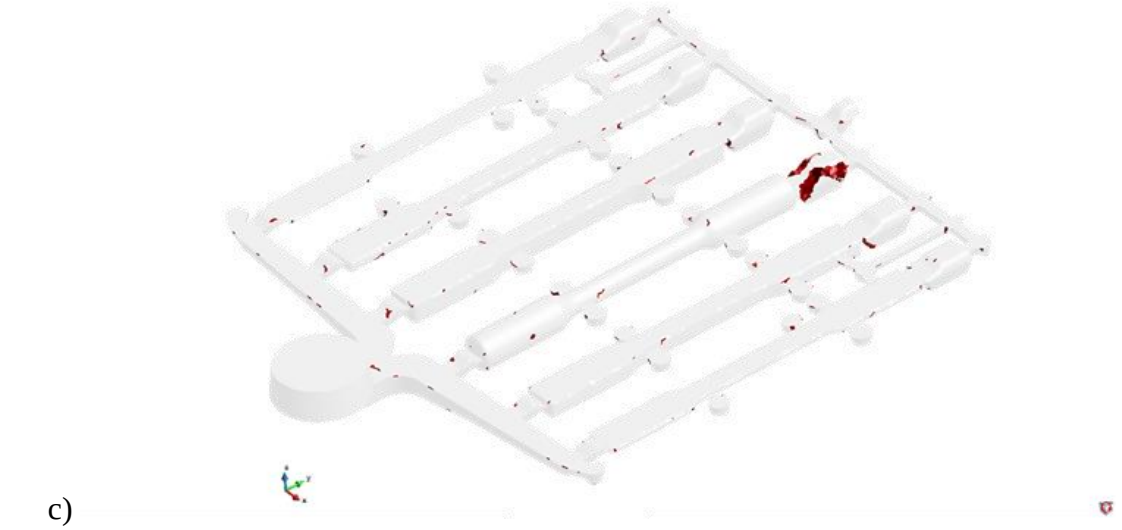
en son tamamlandığı numune bölgeleri de dahil olmak üzere porozite oluşumu için potansiyel bölgelerin çene bağlantı bölgeleri olduğu sonucuna varılmaktadır.



a)

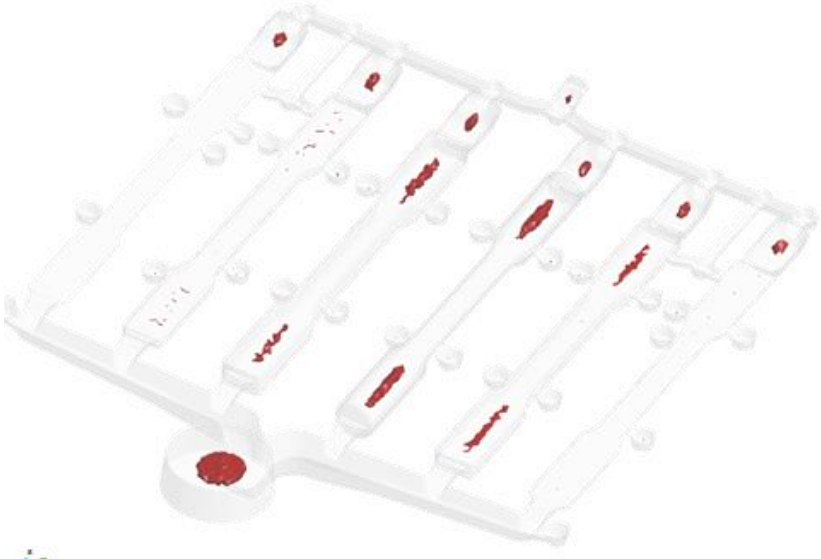


b)



c)

Şekil 3.1 : Click2Cast analiz sonuçları; a) Katılaşma süresi, b) Döküm süreksizliği, c) Hava sıkışması, d) Porozite oluşumu.



d)

Şekil 3.1 (devam) : Click2Cast analiz sonuçları; a) Katılaşma süresi, b) Döküm süreksizliği, c) Hava sıkışması, d) Porozite oluşumu.

Click2Cast ve MagmaSoft yazılımları kullanılarak yüksek basınçlı döküm kalıp dolum ve katılaşma analizleri aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MagmaSoft yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen kalıp dolum ve katılaşma analizi çalışmaları sonucunda elde edilen veriler Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

MagmaSoft yazılımı kullanılarak elde edilen ve katılaşma süresini gösteren görsel Şekil 3.2-a'da gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, dökümün başlangıç anından kalıbı tamamen doldurarak katılaşması için gerekli olan sürenin yaklaşık 19 saniye olduğu görülmektedir. İlgili görselden; kalıbın sağ ve sol köşelerinde bulunan 1,5 mm ve 3 mm kalınlığa sahip çekme çubuklarından başladığı, ardından salkıma dağılarak dolum yaptığı anlaşılmaktadır. 19 saniye içerisinde silindirik çekme çubuğu ile 12 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuklarının köşelerinin katılaşmasının en geç tamamlanan bölgeler olduğu gözlemlenmektedir. Her iki yazılımdan elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, katılaşma süresinde belirgin bir süre farkı çıktığı tespit edilmiştir. Onun haricinde yazılımların öngördüğü dolum ve katılaşma görselleri arasında korelasyon kurulabileceği sonucuna varılmaktadır.

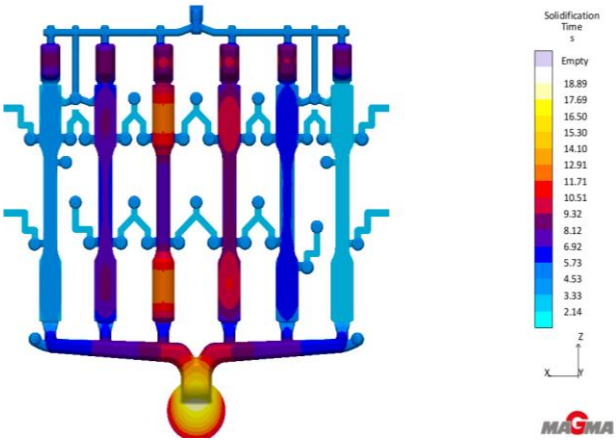
MagmaSoft yazılımı kullanılarak elde edilen ve döküm süreksizliğini gösteren görsel Şekil 3.2-b'de gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması

sonucunda, katılaşmanın en son tamamlandığı lokal bölgelerde, silindirik ve 12 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuklarının çene bağlantı kısımlarında döküm süreksizliği tespit edilmiştir. Numunelerin orta bölümlerinde herhangi bir döküm süreksizliğine rastlanmamaktadır. Her iki yazılımdan elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen görsellerin ve temsili olarak gösterilen süreksizliklerin bulunduğu bölgelerin benzerlik gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

MagmaSoft yazılımı kullanılarak elde edilen ve hava sıkışma bölgelerini gösteren görsel Şekil 3.2-c'de gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, kalıp revizyonu gerektirecek majör hava sıkışması problemiyle karşılaşılmamaktadır. Her iki yazılımdan elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, Click2Cast analiz programında hava sıkışmasının gözlemlenebileceği bölgelerin daha fazla olduğu sonucuna varılmaktadır. Hava sıkışması odağında her iki analiz programının sonuçları arasında herhangi bir korelasyon kurulamamaktadır.

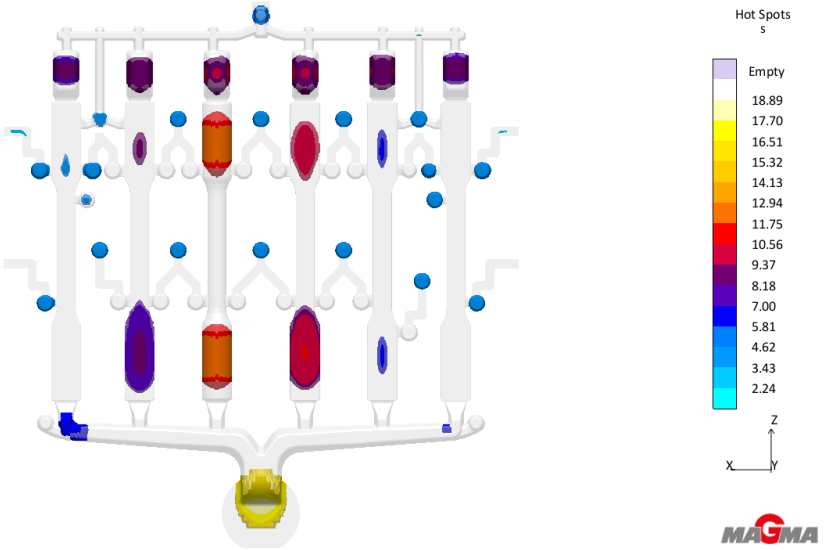
MagmaSoft yazılımı kullanılarak elde edilen ve porozite oluşum bölgelerini gösteren görsel Şekil 3.2-d'de gösterilmektedir. İlgili yazılım ile gerçekleştirilen analiz çalışması sonucunda, döküm sırasında oluşabilecek porozitelerin çene bağlantı bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. Simülasyon sonucuna göre, katılaşmanın en son tamamlandığı numune bölgeleri de dahil olmak üzere porozite oluşumu için potansiyel bölgelerin çene bağlantı bölgeleri olduğu sonucuna varılmaktadır. Her iki yazılımdan elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen görsellerin ve temsili olarak gösterilen porozite oluşum bölgelerinin benzerlik gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

a)

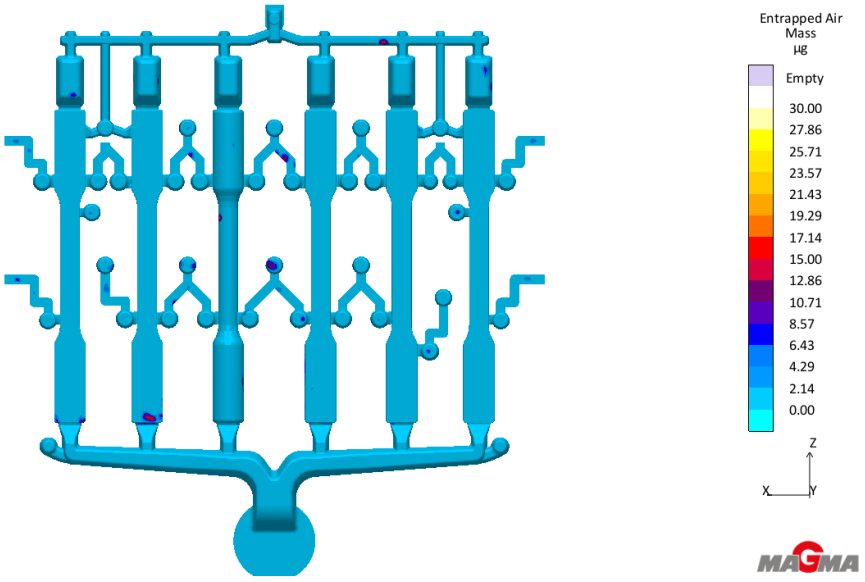


Şekil 3.2 : MagmaSoft analiz sonuçları; a) Katılaşma süresi, b) Döküm süreksizliği, c) Hava sıkışması, d) Porozite oluşumu.

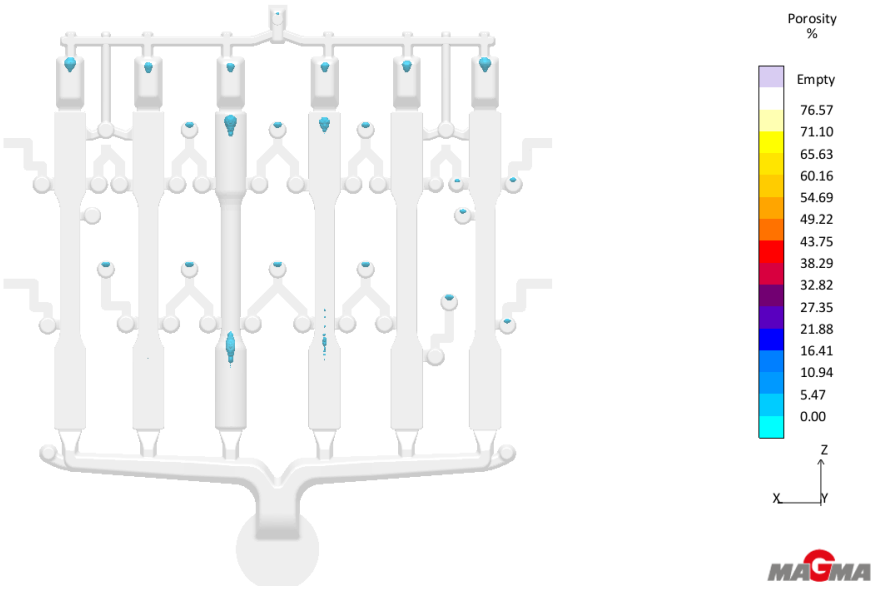
b)



c)



d)



Şekil 3.2 (devam) : MagmaSoft analiz sonuçları; a) Katılaşma süresi, b) Döküm süreksizliği, c) Hava sıkışması, d) Porozite oluşumu.

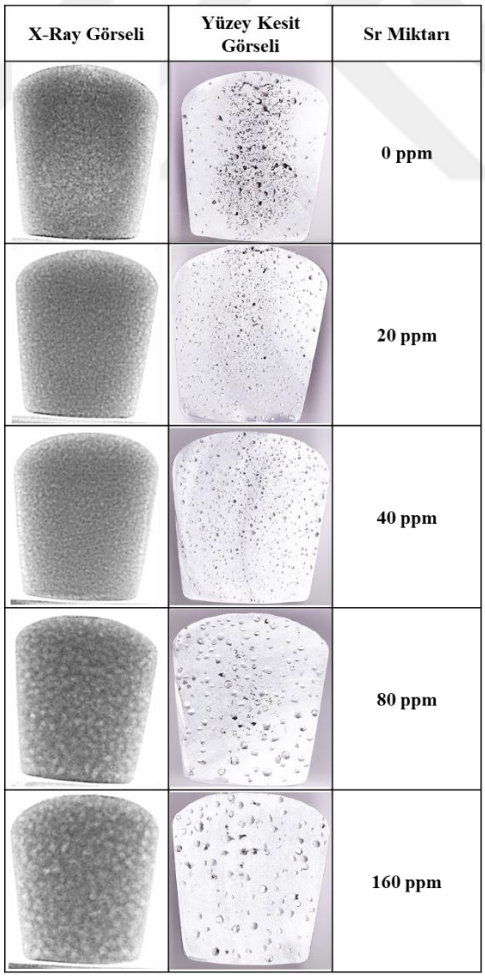
3.2 Metal Kalitesi Sonuçları

Metal kalitesinin belirlenmesi için ilk aşamada Vakum altında katılaştırma (VAK) cihazı ile üretilen numunelerin Arşimet Metodu ile yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen yoğunluk indeksi (DI) değerleri Çizelge 3.1'de verilmektedir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre, 80 ppm Sr ilavesine kadar artan Sr ilavesi ile birlikte VAK numunelerinin DI değerlerinde artış görülmektedir. Artan Sr ilavesi, alaşımın yapısındaki hidrojen miktarında artışa sebep olduğu için 80 ppm mertebesine kadar olan DI değerindeki artış normal karşılanmaktadır [68]. Ancak 160 ppm Sr ilavesiyle birlikte alaşımın DI değerinde belirgin bir düşüş meydana gelmektedir.

Çizelge 3.1 : Sr miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk indeksi (DI) değerleri.

Grup Adı		D_{ATM}	D_{80MBAR}	DI
0 ppm Sr	1. Numune	2,617	2,349	10,225
	2. Numune	2,611	2,354	9,860
	3. Numune	2,616	2,292	12,383
	Ortalama	**2,615**	**2,332**	**10,823**
20 ppm Sr	1. Numune	2,624	2,312	11,901
	2. Numune	2,621	2,280	13,027
	3. Numune	2,613	2,273	13,009
	Ortalama	**2,619**	**2,288**	**12,646**
40 ppm Sr	1. Numune	2,602	2,260	13,143
	2. Numune	2,609	2,256	13,530
	3. Numune	2,598	2,253	13,279
	Ortalama	**2,603**	**2,256**	**13,317**
80 ppm Sr	1. Numune	2,583	2,214	14,285
	2. Numune	2,591	2,253	13,045
	3. Numune	2,594	2,221	14,378
	Ortalama	**2,589**	**2,229**	**13,903**
160 ppm Sr	1. Numune	2,592	2,212	14,651
	2. Numune	2,596	2,285	11,979
	3. Numune	2,592	2,272	12,360
	Ortalama	**2,593**	**2,256**	**12,997**

VAK numuneleri, metal kalitesi çalışması öncesinde X ışını radyoskopi yöntemi ile tahribatsız olarak muayene edilmiş; ardından ortadan kesilerek numunelerin yüzey kesitleri incelenmiştir. VAK numunelerinin X ışını ve yüzey kesit görüntüleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Yüzey kesit görüntülerine göre, artan Sr ilavesi ile birlikte VAK numunelerinin yapısında oluşan porozitelerin daha küresel forma sahip olduğu görülmektedir [68]. Ayrıca numune yüzeyinde bulunan poroziteler, 0 ppm Sr içeren numune ile kıyaslandığında artan Sr miktarı ile birlikte poroziteler merkezde lokalize olmaktan ziyade numune yüzeyinde daha geniş bir alanda dağılım göstermektedir. 20 ve 40 ppm Sr ilavesi yapılan numunelerde oluşan porozite çaplarının daha küçük olduğu; ancak 80 ve 160 ppm Sr içeren numunelerde ise porozitelerin çapında belirgin bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, Sr artışına bağlı olarak VAK numunelerinin yapısında oluşan porozitelerin küreselleşme eğilimi gösterdiği, belirli bir alandan ziyade daha geniş bir alanda dağılım gösterdiği ve sayıca daha az ancak daha büyük çaplara sahip porozite oluşturduğu görülmektedir.

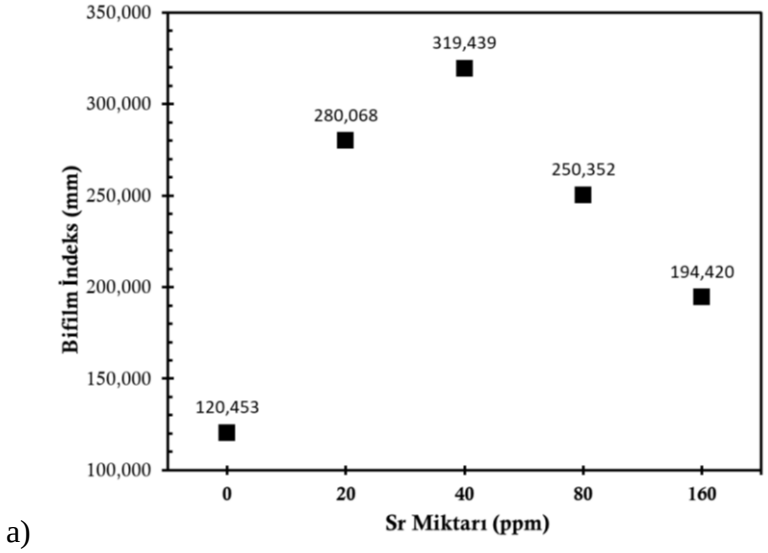


Şekil 3.3 : Artan Sr miktarına bağlı olarak VAK numunelerinin X ışını ve yüzey kesit görüntüleri.

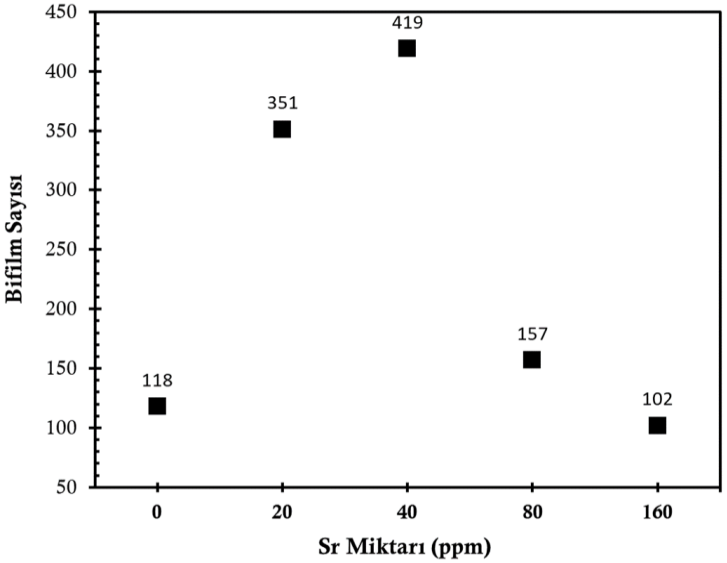
VAK numunelerinin kesit yüzeyleri metal kalitesi hesaplamalarının gerçekleştirilebilmesi için yüzey hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Yapılan incelemelerin sonuçlarına bağlı olarak bifilm hesaplamaları ve ortalama bifilm özellikleri gibi sonuçlar elde edilmiştir. Metal kalitesinin belirlenmesinde kritik rol oynayan bifilm indeks değerleri Şekil 3.4-a'da gösterilmektedir. Grafiğe göre Sr ilavesi 40 ppm mertebesine ulaşana kadar indeks değerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bifilm indeks değerindeki artış, sıvı metal kalitesinin negatif etkilendiğine işaret etmektedir [37]. Ancak bu trend, 80 ppm ve 160 ppm mertebelerinde belirgin bir düşüş trendi göstermektedir. Sr miktarındaki artışa bağlı olarak değişen bifilm sayısı Şekil 3.4-b'de gösterilmektedir. Bifilm indeks değeri ile bifilm sayısının, sıvı metal kalitesi üzerinde etkisinin benzer olduğu söylenebilmektedir. Bifilm indeks değeri ile benzer şekilde bifilm sayısının da 40 ppm Sr ilavesi ile birlikte arttığı; 80 ppm ve 160 ppm Sr ilavesiyle birlikte bifilm sayısının azalma trendi gösterdiği görülmektedir. 80 ppm ve 160 ppm Sr ilavesinde numunelerin yapısında oluşan porozitelerin sayıca azaldığı, VAK numunelerinin kesit görselleri ile benzerlik göstermektedir.

Sr miktarındaki artışa bağlı olarak, metal kalitesi belirleme çalışmalarının gerçekleştirildiği VAK numunesi kesit yüzeyinde bulunan tüm porozitelerin ortalama uzunluğu Şekil 3.4-c'de gösterilmektedir. 40 ppm Sr ilavesine kadar porozitelerin ortalama uzunluğunda azalma gözlemlenmektedir. Sr değeri 80 ppm ve 160 ppm olduğunda ise porozitelerin ortalama uzunluğunda belirgin artış görülmektedir. Gerek VAK numunelerinin kesit görüntülerine gerekse de diğer grafiklerde paylaşılan sonuçlara göre, numunelerde bulunan porozitelerin ortalama uzunluğundaki artışın sebebi olarak porozitelerin 80 ve 160 ppm Sr ilavesinde sayıca azalıp; çaplarının daha büyük olması olarak gösterilebilmektedir.

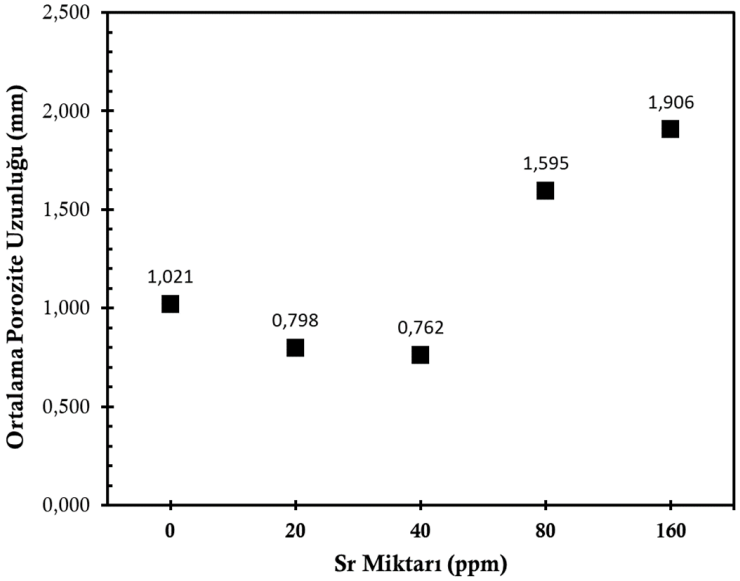
Sr miktarındaki artışa bağlı olarak, metal kalitesi belirleme çalışmalarının gerçekleştirildiği VAK numunesi kesit yüzeyinde bulunan tüm porozitelerin ortalama alanı Şekil 3.4-d'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 40 ppm Sr değerine kadar ortalama porozite alanı değeri düşüş trendi göstermektedir. Sr değeri 80 ve 160 ppm mertebelerine çıkartıldığında ise ortalama alan değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bunun nedeni ise 80 ppm Sr ilavesinden itibaren numunelerin yapısında oluşan porozitelerin daha küreselleşmiş, az sayıda ve daha büyük çapa sahip olmaları gösterilebilmektedir.



a)

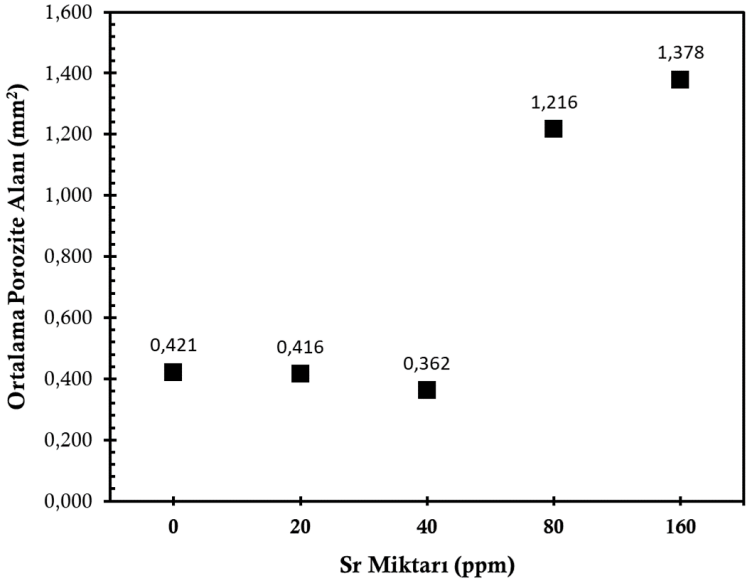


b)



c)

Şekil 3.4 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasına ait metal kalitesi hesaplamaları: a) Bifilm indeks, b) Bifilm sayısı, c) Ortalama porozite uzunluğu, d) Ortalama porozite alanı.



d)

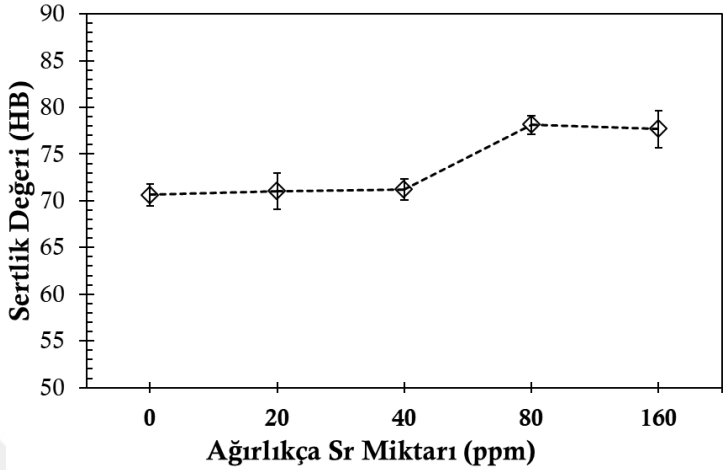
Şekil 3.4 (devam) : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasına ait metal kalitesi hesaplamaları: a) Bifilm indeks, b) Bifilm sayısı, c) Ortalama porozite uzunluğu, d) Ortalama porozite alanı.

Sonuç olarak artan Sr miktarına bağlı olarak alaşımdan elde edilen metal kalitesi sonuçlarına göre bifilm indeks değeri belirgin bir azalma trendi göstererek metal kalitesinin iyileştiği söylenebilmektedir. Uludağ ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Sr kullanımının metal kalitesini iyileştirdiğini ve yapıda homojen dağılım sağladığını belirtmiştir [38]. Elde edilen sonuçlar yapılan çalışma ile benzerlik göstermektedir.

3.3 Sertlik Testi Sonuçları

Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen test numunelerinin sertlik değerleri Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, 40 ppm Sr ilavesine kadar numunelerin sertlik değerinde belirgin bir değişiklik meydana gelmemiştir. Ancak Sr miktarı 80 ppm olduğunda alaşımın sertlik değerinde artış gözlemlenmektedir. 160 ppm Sr kullanıldığında ise sertlik değerinde düşük oranda bir düşme eğilimi görülmektedir. 20 ppm ve 160 ppm Sr için yapılan sertlik ölçümlerinde maksimum ve minimum değerler arasındaki fark daha fazla olduğu için hata barlarının da daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Literatürde Sr modifikasyonu için, gevrek Si partiküllerini modifiye ettiği ve alaşımın yapısının daha sünek hale getirilmesinde etkili olduğundan dolayı malzemenin sertlik değeri üzerinde etkili olmadığı sonuçları paylaşılmaktadır. Moustafa, M. A. ve ekibi [69], Sr modifikasyonu ile A413 alaşımının sertlik değerinin %13 mertebesinde düşürdüğünü belirtmiştir. Ancak

yüksek basınçlı dökümde AlSi12(Fe) alaşımı özelinde yapılan 80 ppm Sr ve üzeri modifikasyon uygulaması ile alaşımın sertlik değerinin yaklaşık 8 Brinell artığı görülmektedir.

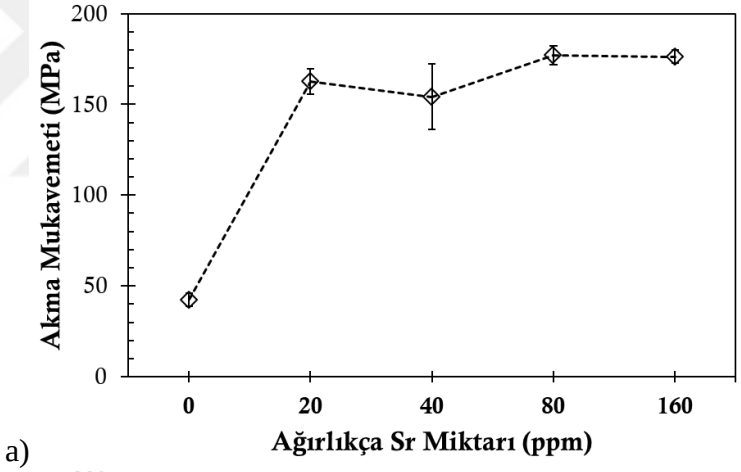


Şekil 3.5 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait sertlik değerleri.

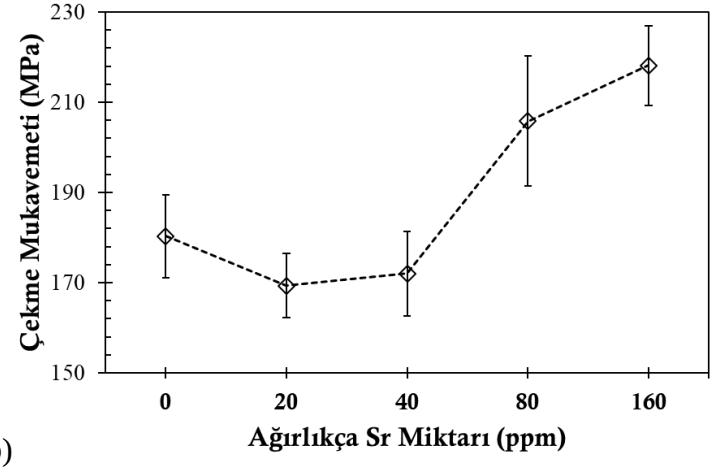
3.4 Çekme Testi Sonuçları

Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen çekme testi numunelerine ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Çekme testleri sonucunda elde edilen akma mukavemeti değerleri Şekil 3.6-a'da gösterilmektedir. Yapılan 20 ppm Sr ilavesi ile alaşımın akma mukavemeti değeri 120 MPa mertebesinde belirgin bir şekilde iyileştirilmiştir. 40 ppm Sr ilavesi ile alaşımın yaklaşık 8 MPa azaldığı görülmektedir. 80 ppm ve 160 ppm Sr ilavesinde ise değerlerin oldukça yakın olmakla beraber bu iki Sr miktarının diğer denemeler arasında en yüksek akma mukavemeti değerinin elde edilmesini sağladığı gözlemlenmektedir. 40 ppm Sr için yapılan sertlik ölçümlerinde maksimum ve minimum değerler arasındaki fark daha fazla olduğu için hata barlarının da daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Hata barının en düşük ve elde edilen sonuçların en güvenilir olduğu Sr miktarının ise 160 ppm olduğu sonucuna varılmaktadır. Çekme testleri sonucunda elde edilen çekme mukavemeti değerleri Şekil 3.6-b'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 20 ppm Sr ilavesi yapıldığında alaşımın çekme mukavemetinde düşme trendi gözlemlenmektedir. Ancak artan her bir farklı Sr ilavesi için çekme mukavemeti değerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Çekme mukavemeti ile akma mukavemeti değerleri artan Sr değerine bağlı olarak benzer bir trend göstermemektedir. Çekme mukavemeti sonuçlarında her bir Sr ilavesi için hata

barlarının oldukça büyük olduğu görülmektedir. Ancak çekme mukavemeti sonuçların arasındaki farklılığın en fazla olduğu parametre 80 ppm Sr olarak verilebilmektedir. Çekme testleri sonucunda elde edilen % uzama değerleri Şekil 3.6-c'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerlerinde gözlemlenen trendden farklı olarak Sr miktarının artışına bağlı olarak % uzama değerinin düzenli bir artış trendi gösterdiği görülmektedir. 80 ppm Sr için elde edilen % uzama değerlerinde maksimum ve minimum değerler arasındaki fark daha fazla olduğu için hata barlarının da daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Diğer Sr değerleri için % uzama değerleri özelinde elde edilen hata barlarında değerler elde edilmektedir. Yapılan Sr modifikasyonu, alaşımın sünekliğini arttırdığı için % uzama değerini de arttırmaktadır. Literatürde Sr modifikasyonunun, akma mukavemetini ve çekme mukavemetini düşürme etkisi olduğu paylaşılmaktadır. Ancak gerçekleştirilen çalışma kapsamında artan Sr miktarına bağlı olarak, alaşımın genel olarak çekme özelliklerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmektedir.

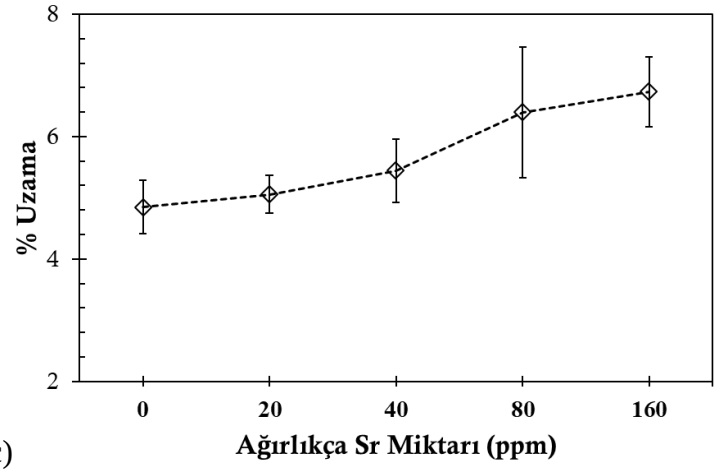


a)



b)

Şekil 3.6 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait çekme özellikleri; a) Akma mukavemeti (MPa) , b) çekme mukavemeti (MPa), c) % uzama değerleri.

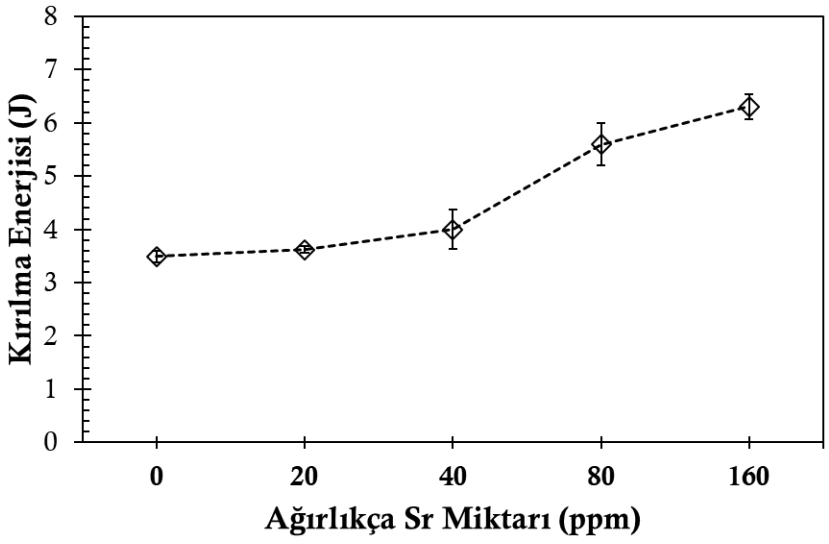


c)

Şekil 3.6 (devam) : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait çekme özellikleri; a) Akma mukavemeti (MPa) , b) çekme mukavemeti (MPa), c) % uzama değerleri.

3.5 Çentik Darbe Test Sonuçları

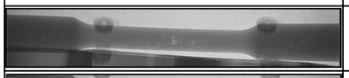
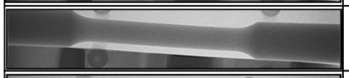
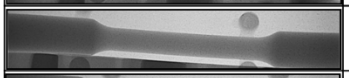
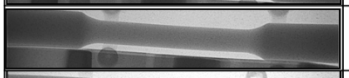
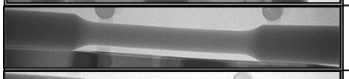
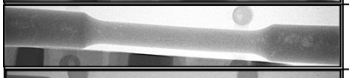
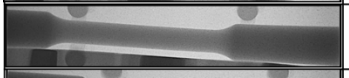
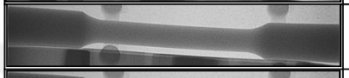
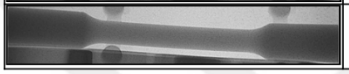
Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen çekme testi numunelerinden işlenen çentik darbe test numunelerine ait kırılma enerjisi değerleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, artan Sr ilavesine bağlı olarak alaşımın yapısında sönümleyebildiği enerji miktarının arttığı görülmektedir. Çentik darbe testi sonucunda elde edilen kırılma enerjisi ile çekme testi sonucunda elde edilen % uzama değerinin benzer sonuç gösterdiği sonucuna varılmaktadır. Yapılan Sr modifikasyonu, alaşımın sünekliğini arttırdığı için enerji sönümleme yeteneğini de beraberinde arttırmaktadır.



Şekil 3.7 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait kırılma enerjisi değerleri.

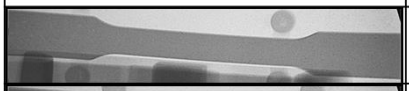
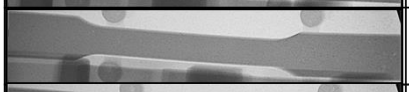
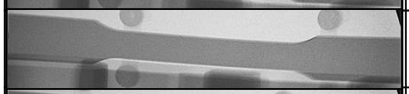
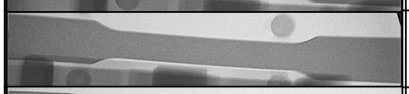
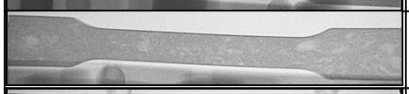
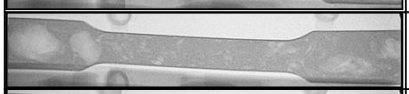
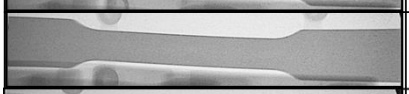
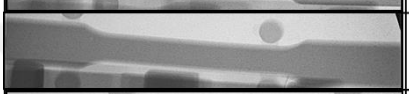
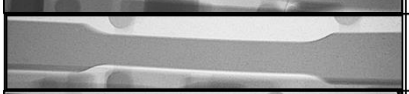
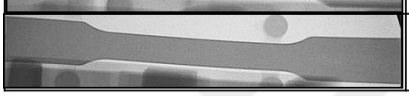
3.6 X Işını Radyografi İnceleme Sonuçları

Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen çekme testi numunelerine ait X ışını görüntüleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir. İlgili görselde gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda % uzama değerlerine bağlı olarak en iyi ve en kötü sonuç veren numunelerin X ışını görüntüleri ile birlikte çekme testi sonucunda elde edilen çekme özellikleri de paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 0 ppm Sr ilavesinde numunede büyük boyutlu poroziteler tespit edilmektedir. En iyi sonuç veren numunesinde de aynı bölgede porozite bulunduğu görülmektedir. 20 ppm Sr ilavesine sahip numunelerin X ışını görüntüleri incelendiğinde, en kötü numunede küçük boyutlu porozitelerin olduğu görülmektedir. İyi numunesinde ise herhangi bir poroziteye rastlanmamaktadır. 40 ppm Sr ilavesine sahip numunelerin X ışını görüntüleri incelendiğinde, kötü numunede porozite oluşumları belirgin bir şekilde tespit edilebilmektedir. İyi numunesinde ise boyutları küçük ve görüntüde belirgin olmayan porozite bulunduğu tespit edilmiştir. 80 ppm Sr ilavesi yapılan numunelerin X ışını görüntüleri incelendiğinde kötü numunenin köşe bölgelerinde ve numunenin köşe bölgesinden orta bölgesine geçiş alanında bulunan radyusun başladığı bölgelerde porozite oluşumu gözlemlenmektedir. İyi numunede ise herhangi bir porozite oluşumu ile karşılaşılmamıştır. 160 ppm Sr ilavesine sahip numunelerin X ışını görüntüleri incelendiğinde ise kötü numunede çok küçük boyutlu porozite bulundurduğu; iyi numunesinde ise porozite bulunmadığı tespit edilmiştir.

X-Ray Görseli	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Durum	Sr Miktarı
	51,363	146,168	3,319	Minimum % uzama	0 ppm
	38,781	204,963	6,275	Maksimum % uzama	0 ppm
	147,225	162,245	4,249	Minimum % uzama	20 ppm
	170,525	180,367	5,936	Maksimum % uzama	20 ppm
	90,143	110,130	2,817	Minimum % uzama	40 ppm
	177,791	186,272	6,871	Maksimum % uzama	40 ppm
	174,234	155,517	3,569	Minimum % uzama	80 ppm
	191,806	243,234	11,481	Maksimum % uzama	80 ppm
	181,839	235,131	4,823	Minimum % uzama	160 ppm
	168,201	222,900	7,967	Maksimum % uzama	160 ppm

Şekil 3.8 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen çekme testi sonuçlarına ait en iyi – en kötü test numunesinin çekme özellikleri ve X ışını görüntüleri.

Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen çentik darbe testi numunelerine ait X ışını görüntüleri Şekil 3.9'da gösterilmektedir. İlgili görselde gerçekleştirilen çentik darbe testleri sonucunda ortalama kırılma enerjisi değerlerine bağlı olarak en iyi ve en kötü sonuç veren numunelerin X ışını görüntüleri ile birlikte kırılma açısı değerleri de paylaşılmıştır. 0 ppm Sr ilavesi için numunelerin orta bölgesinden ziyade köşe bölgelerinde porozite yoğunluğu olduğu görülmektedir. Sr miktarı 20 ppm olduğunda ise gerek iyi gerek kötü numunelerin orta bölgesinde porozite yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. Ancak oluşan porozitelerin boyutlarının küçük ve sayıca fazla olmadığı gözlemlenmektedir. 40 ppm Sr ilavesinde kötü numunenin orta bölgesinde sayıca fazla ve boyutları büyük olan poroziteler tespit edilmektedir. Ancak en iyi numunede ise herhangi porozite tespit edilememiştir. 80 ppm Sr ilavesi yapılan numunelerin kötü olanında merkez bölgede sayıca az küçük boyuta sahip poroziteler gözlemlenmiştir. İyi numunede ise az sayıda ve küçük boyutlu olan porozitelerin uç kısımlarda bulunduğu görülmektedir. Son olarak 160 ppm Sr ilavesi yapılan numunelerin en az sayıda ve küçük boyutta poroziteye sahip olduğu ve bu porozitelerin numunenin uç kısımlarında oluştuğu söylenebilmektedir.

X-Ray Görseli	Ortalama Kırılma Enerjisi (J)	Kırılma Açısı (°)	Durum	Sr Miktarı
	3,285	156,700	Minimum Kırılma Enerjisi	0 ppm
	3,770	156,250	Maksimum Kırılma Enerjisi	0 ppm
	3,610	156,400	Minimum Kırılma Enerjisi	20 ppm
	3,860	156,170	Maksimum Kırılma Enerjisi	20 ppm
	3,210	156,770	Minimum Kırılma Enerjisi	40 ppm
	5,050	155,100	Maksimum Kırılma Enerjisi	40 ppm
	4,575	155,520	Minimum Kırılma Enerjisi	80 ppm
	6,683	153,700	Maksimum Kırılma Enerjisi	80 ppm
	5,645	154,580	Minimum Kırılma Enerjisi	160 ppm
	6,862	153,550	Maksimum Kırılma Enerjisi	160 ppm

Şekil 3.9 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen çentik darbe test sonuçlarına ait en iyi – en kötü test numunesinin ortalama kırılma enerjisi, kırılma açısı ve X ışını görüntüleri.

X ışını görüntülerine göre numunelerin kesit kalınlıklarına göre porozite oluşma bölgeleri ile gerek MagmaSoft gerekse Click2Cast yazılımlarıyla yapılan analiz çalışmalarında tespit edilen porozite bölgelerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmektedir.

3.7 Mikroyapı Analiz Sonuçları

Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapısal incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Artan Sr miktarına bağlı olarak numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

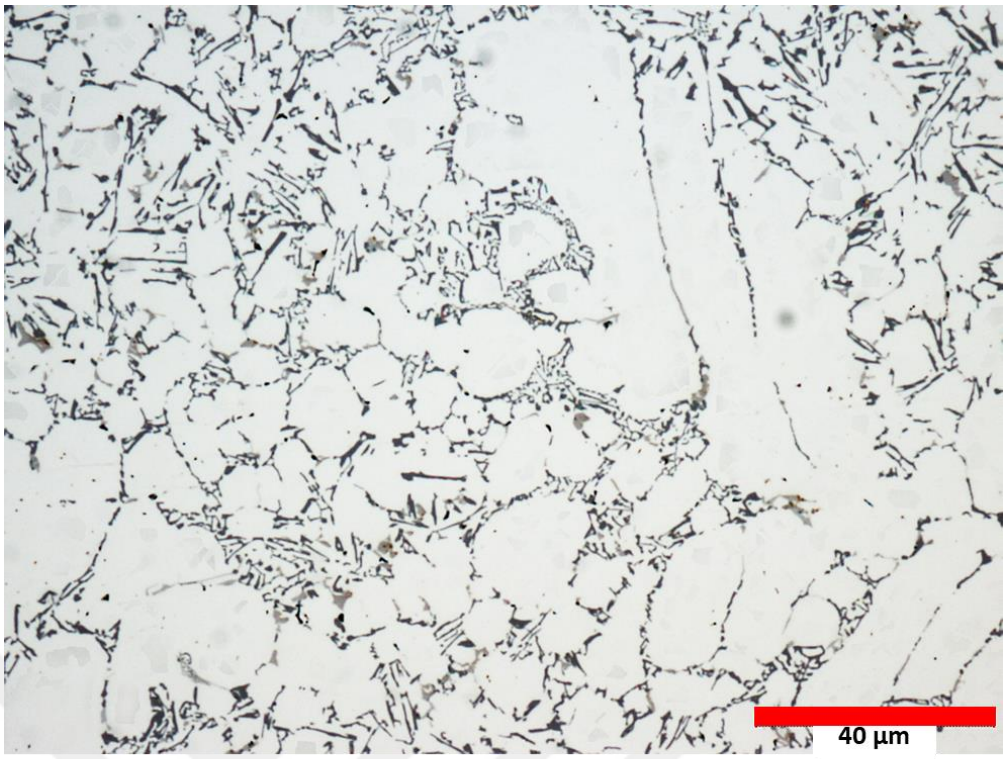
Şekil 3.10-a'da verilen Sr ilavesiz – 0 ppm Sr ile yapılan döküm sonucunda elde edilen mikroyapı numuneleri incelendiğinde, mikroyapıda iğnesel formda kaba ötektik silis fazlarının ve fazla büyümüş α-alüminyum fazının hakim olduğu görülmektedir. İğnesel ötektik silis fazının belli bölgelerde kümelenme eğilimi gösterdiği gözlemlenmektedir. Mikroyapısal incelemede yapıda eser miktarda porozite ile karşılaşılmıştır.

Şekil 3.10-b'de verilen ve Sr modifikasyonunun 20 ppm Sr ile yapıldığı döküm sonucunda elde edilen mikroyapı numuneleri incelendiğinde, ötektik silis fazının kümelenme eğilimini devam ettirdiği ancak iğnesel olan morfolojisinin kırılmaya başladığı gözlemlenmektedir. Yapıda büyük boyutta ve heterojen dağılım gösteren α-alüminyum fazının ise daha küçük boyutta ve küresel form almaya başladığı görülmektedir.

Şekil 3.10-c'de verilen ve Sr modifikasyonunun 40 ppm Sr ile yapıldığı döküm sonucunda elde edilen mikroyapı numuneleri incelendiğinde, ötektik silisin kümelenme eğiliminin durduğu ve morfolojik olarak iğnesel formunun iğnesel ve lamelsi form karışık olacak şekilde değişiklik gösterdiği görülmektedir. Yapısında hala kısmi büyük boyutta α-alüminyum fazı bulunsa da α-alüminyumun küreselleşerek yapıda homojen dağılım gösterme eğiliminin arttığı gözlemlenmektedir.

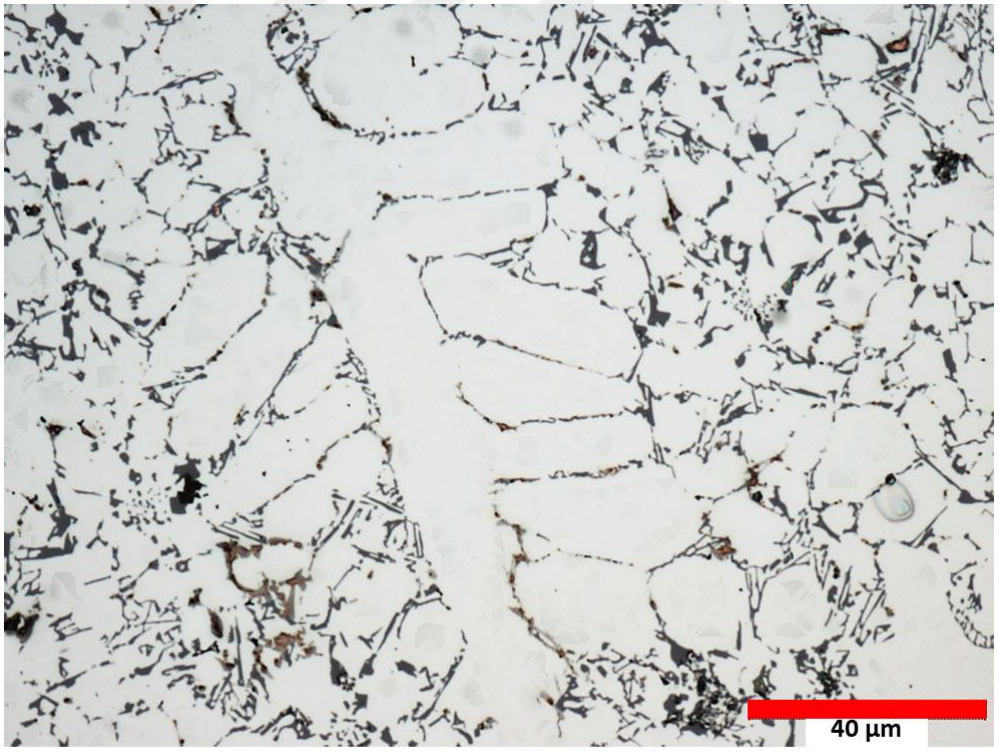
Şekil 3.10-d'de verilen ve Sr modifikasyonunun 80 ppm Sr ile yapıldığı döküm sonucunda elde edilen mikroyapı numuneleri incelendiğinde, yapının belirgin bir şekilde iyileştiği görülmektedir. Yapıdaki ötektik silis fazının fibröz bir form aldığı ve α-alüminyumun küreselleşerek yapıda homojen dağılım gösterdiği gözlemlenmektedir. 40 ppm Sr ilavesi ile gerçekleştirilen modifikasyon işlemine kıyasla α-alüminyumun heterojen dağılma miktarı azalarak küçük küresel formu sayesinde yapıda hacimce arttığı fark edilir şekilde değişiklik göstermektedir.

Şekil 3.10-e'de verilen ve Sr modifikasyonunun 160 ppm Sr ile yapıldığı döküm sonucunda elde edilen mikroyapı numuneleri incelendiğinde, AlSi12(Fe) alaşımı özelinde en başarılı Sr modifikasyonu işleminin gerçekleştiği görülmektedir. Ötektik silis fazının, yapıdaki iğnesel formunu tamamen kaybettiği ve fibröz yapıda lokal olarak kümeleşme eğilimi göstermeksizin bulunduğu görülmektedir. α-alüminyum fazı yapıda küçük küresel ve homojen bir dağılım sergileyerek hacimsel oranının en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir.



0 ppm Sr – 500x büyütme

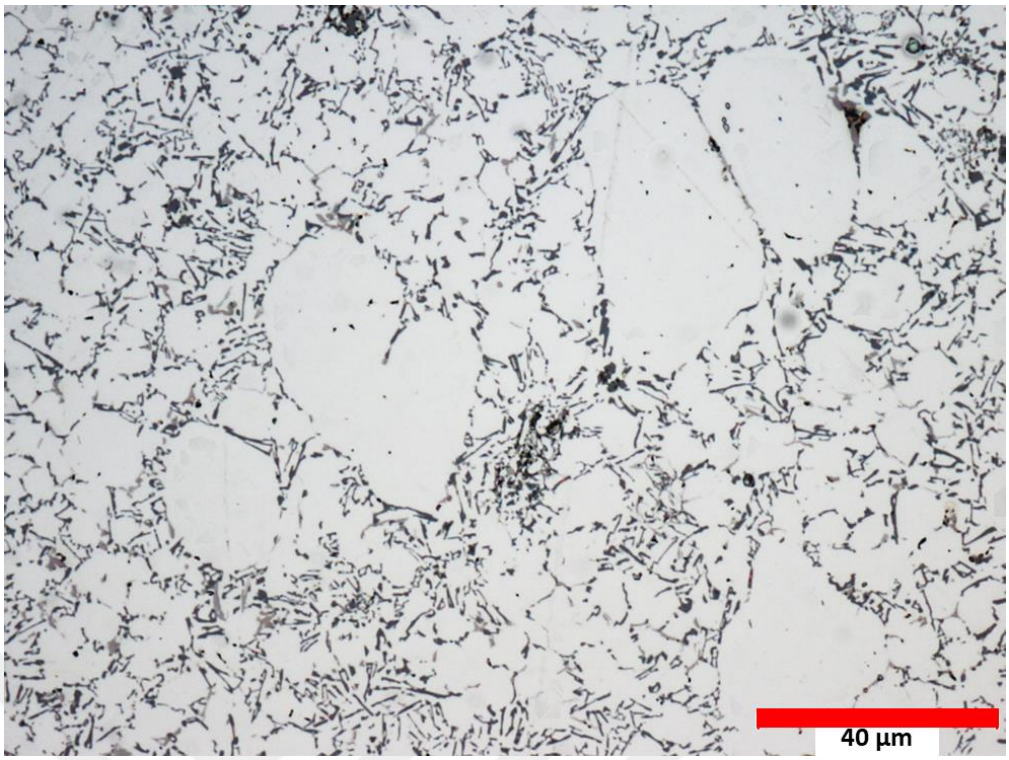
a)



20 ppm Sr – 500x büyütme

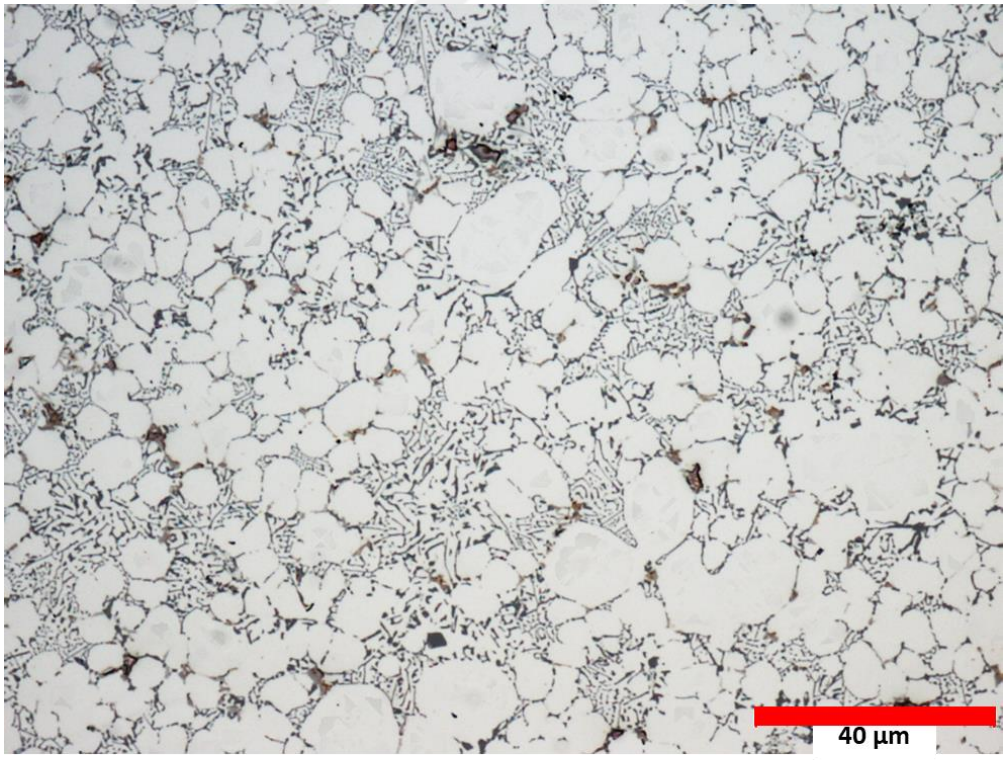
b)

Şekil 3.10 : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait mikroyapı görüntüleri: a) 0 ppm Sr ilavesi, b) 20 ppm Sr ilavesi, c) 40 ppm Sr ilavesi, d) 80 ppm Sr ilavesi, e) 160 ppm Sr ilavesi.



40 ppm Sr – 500x büyütme

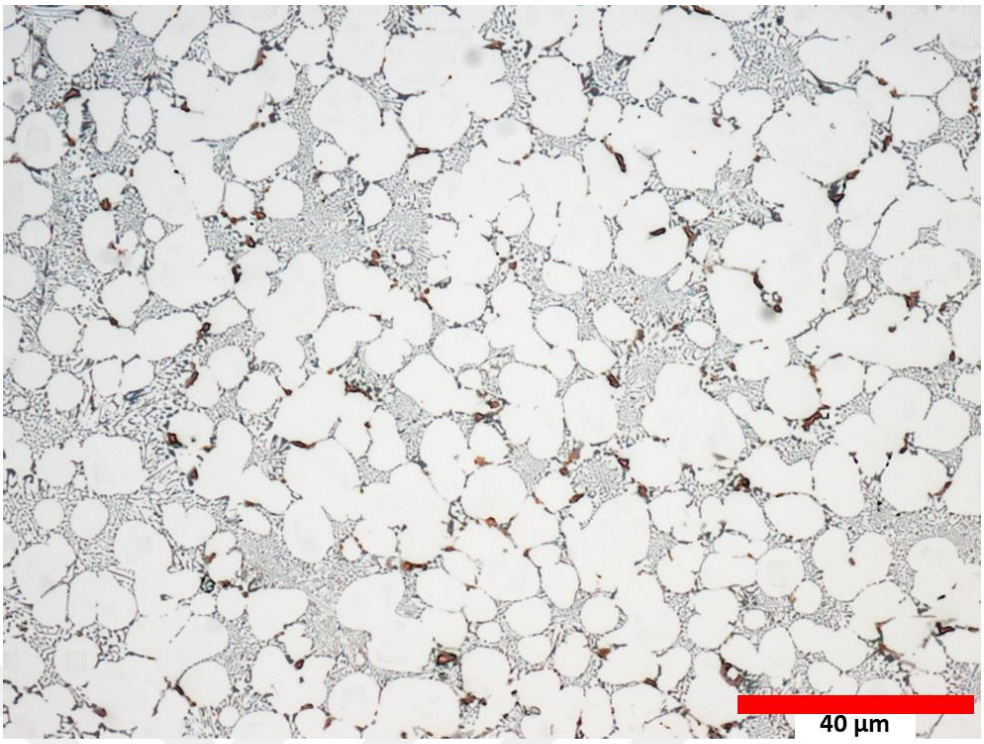
c)



80 ppm Sr – 500x büyütme

d)

Şekil 3.10 (devam) : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait mikroyapı görüntüleri: a) 0 ppm Sr ilavesi, b) 20 ppm Sr ilavesi, c) 40 ppm Sr ilavesi, d) 80 ppm Sr ilavesi, e) 160 ppm Sr ilavesi.



160 ppm Sr – 500x büyütme

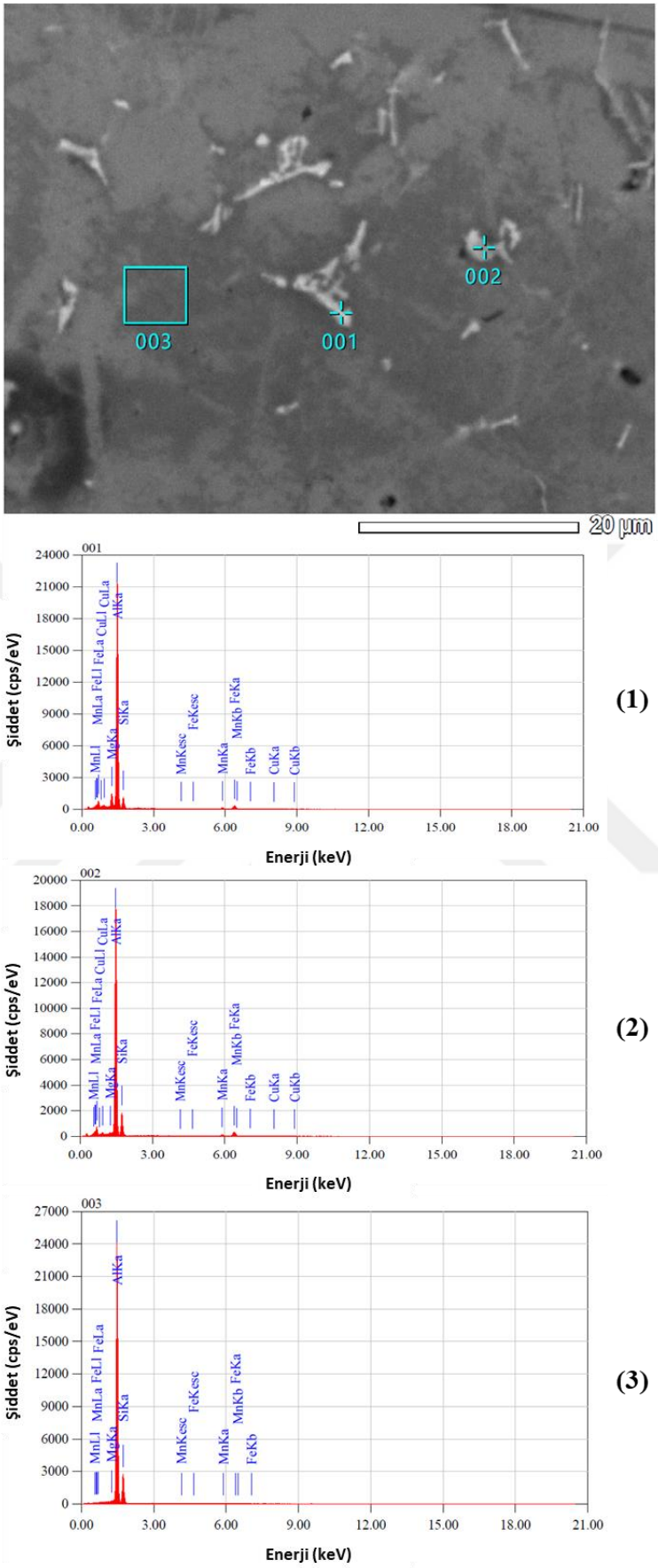
e)

Şekil 3.10 (devam) : Artan Sr değerine bağlı olarak döküm çalışmasında elde edilen numunelere ait mikroyapı görüntüleri: a) 0 ppm Sr ilavesi, b) 20 ppm Sr ilavesi, c) 40 ppm Sr ilavesi, d) 80 ppm Sr ilavesi, e) 160 ppm Sr ilavesi.

3.8 SEM Analizi Sonuçları

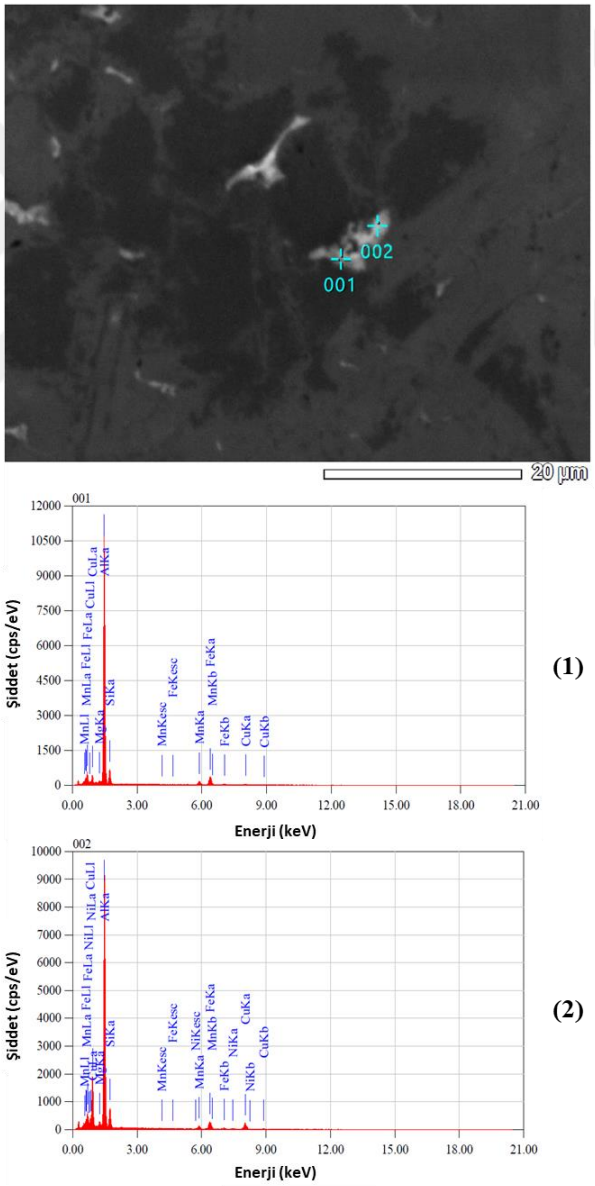
Farklı Sr parametreleri ile yapılan dökümler sonucunda elde edilen numunelerin SEM incelemeleri ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

Modifiye edilmemiş – 0 ppm Sr ile yapılan döküm mikroyapı numunesine ait BSE – SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Alınan BSE – SEM görüntüsünde yapılan 1 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe ve Si; ağırlıkça %4'ün altında Mg, Mn ve Cu olduğu görülmektedir. İlgili intermetalik fazın Al-Si-Mg-Fe ailesinden olabileceği sonucuna varılmaktadır [70]. Görüntüden alınan 2 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin Al, Fe ve Si; ağırlıkça %4'ün altında Mn olduğu görülmektedir. İlgili intermetalik fazın Al-Mn-Fe ailesinden olabileceği sonucuna varılmaktadır [70]. Görüntüden alınan 3 no'lu alansal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden sadece Al ve Si elementlerinin çıktığı görülmektedir. İlgili fazın alaşımın doğası gereği yapısında oluşan Al-Si esaslı faz olduğu sonucuna varılmaktadır.



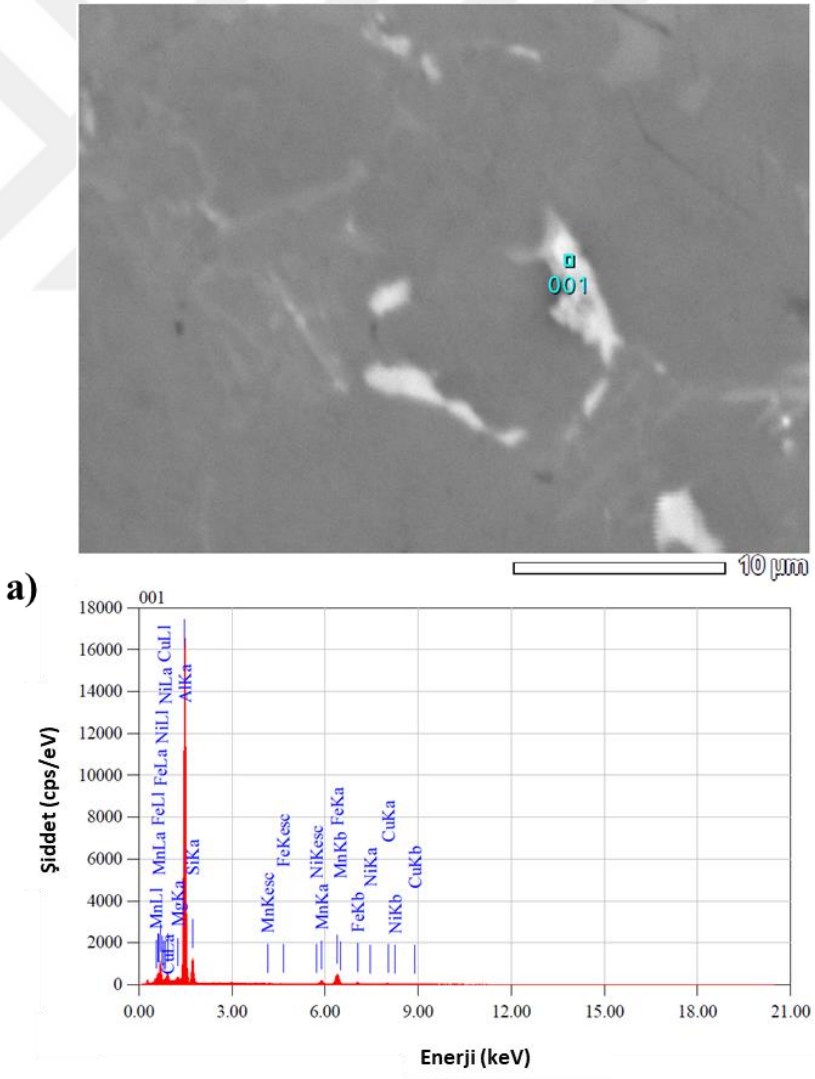
Şekil 3.11 : 0 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları.

20 ppm Sr ile yapılan döküm mikroyapı numunesine ait BSE – SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Alınan BSE – SEM görüntüsünde yapılan 1 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe, Si, Mn ve ağırlıkça %4'ün altında Cu olduğu görülmektedir. İlgili intermetalik fazın Al-Si-Mn-Fe ailesinden olabileceği sonucuna varılmaktadır [70]. Görüntüden alınan 2 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Cu, Fe ve Si; eser miktarda Mg olduğu görülmektedir. Ağırlıkça yaklaşık %20 Cu ve %10 Fe bulunduran intermetaliğin, Al-Si-Cu-Mg ailesinden olabileceği ön görülmektedir [70].

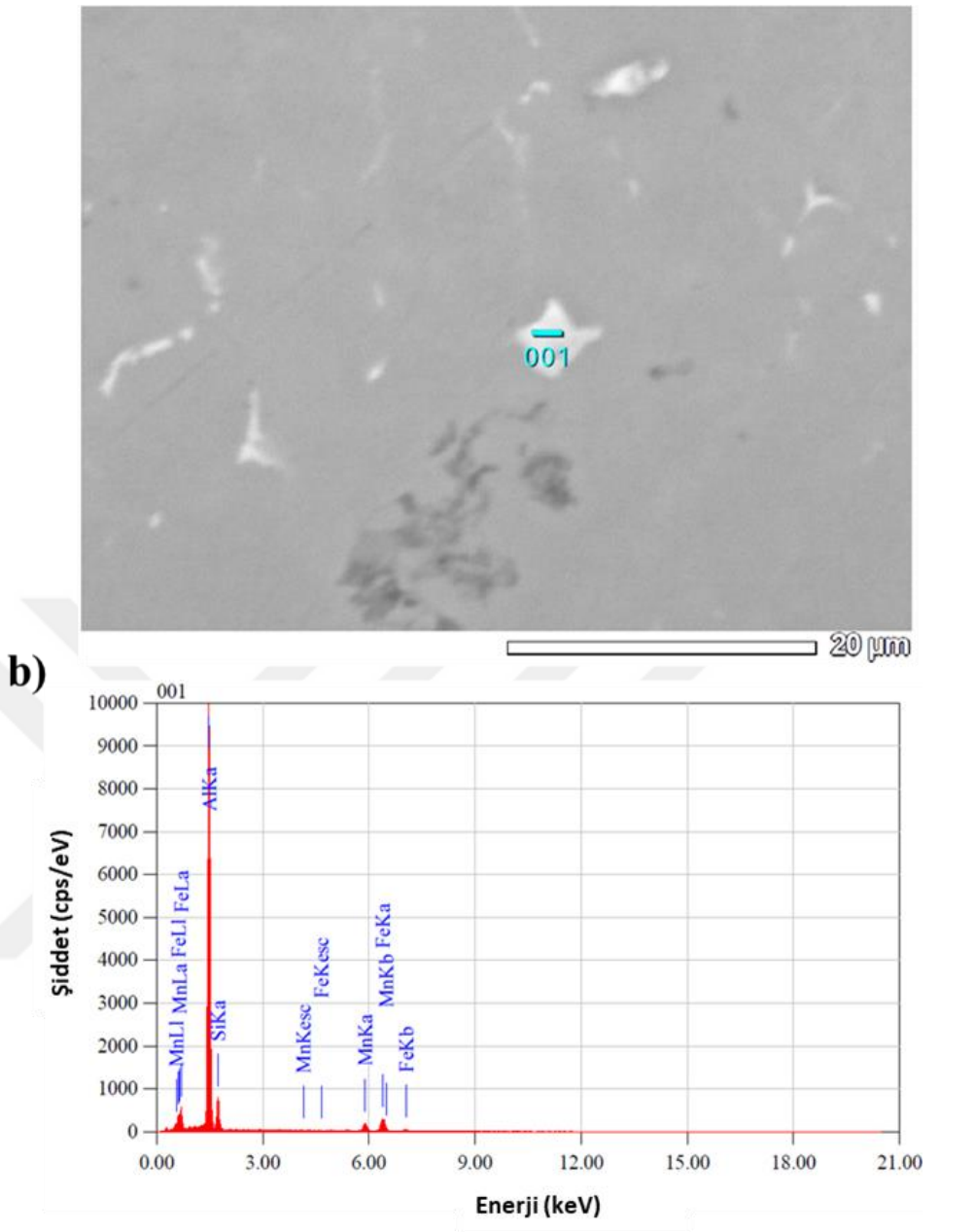


Şekil 3.12 : 20 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen noktasal EDS analiz sonuçları.

40 ppm Sr ile yapılan döküm mikroyapı numunesine ait BSE – SEM görüntüleri ve EDS analiz grafikleri Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Alınan BSE – SEM görüntüsünde yapılan ve Şekil 3.13-a'da paylaşılan 1 no'lu alansal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe, Si, Mn ve Cu olduğu görülmektedir. Elementel olarak 0 ppm Sr ilavesinde karşılaşılan intermetalik kompozisyonu ile benzerlik gösterdiği söylenebilmektedir. Bir diğer görüntü olan ve Şekil 3.13-b'de paylaşılan 1 no'lu çizgisel analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe, Si ve Mn olduğu görülmektedir. İlgili intermetalik fazın Al-Si-Mn-Fe ailesinden olabileceği sonucuna varılmaktadır [70]. 40 ppm Sr ilavesi ile 20 ppm Sr ilavesi yapıldıktan sonra yapılan EDS analizlerinde de aynı intermetalik ailesinde bulunan fazlarla karşılaşıldığı görülmektedir.



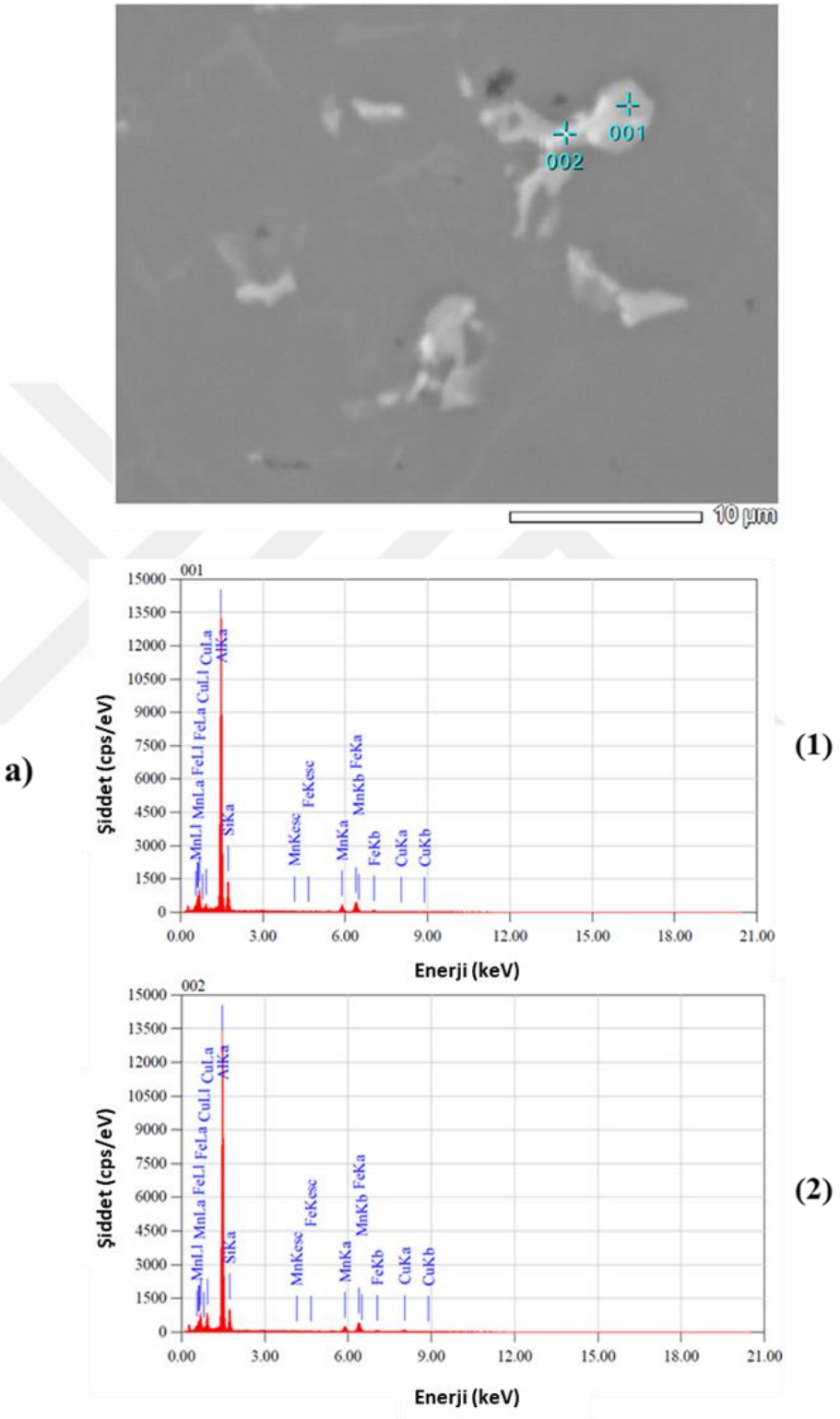
Şekil 3.13 : 40 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüleri ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları; a) alansal, b) çizgi.



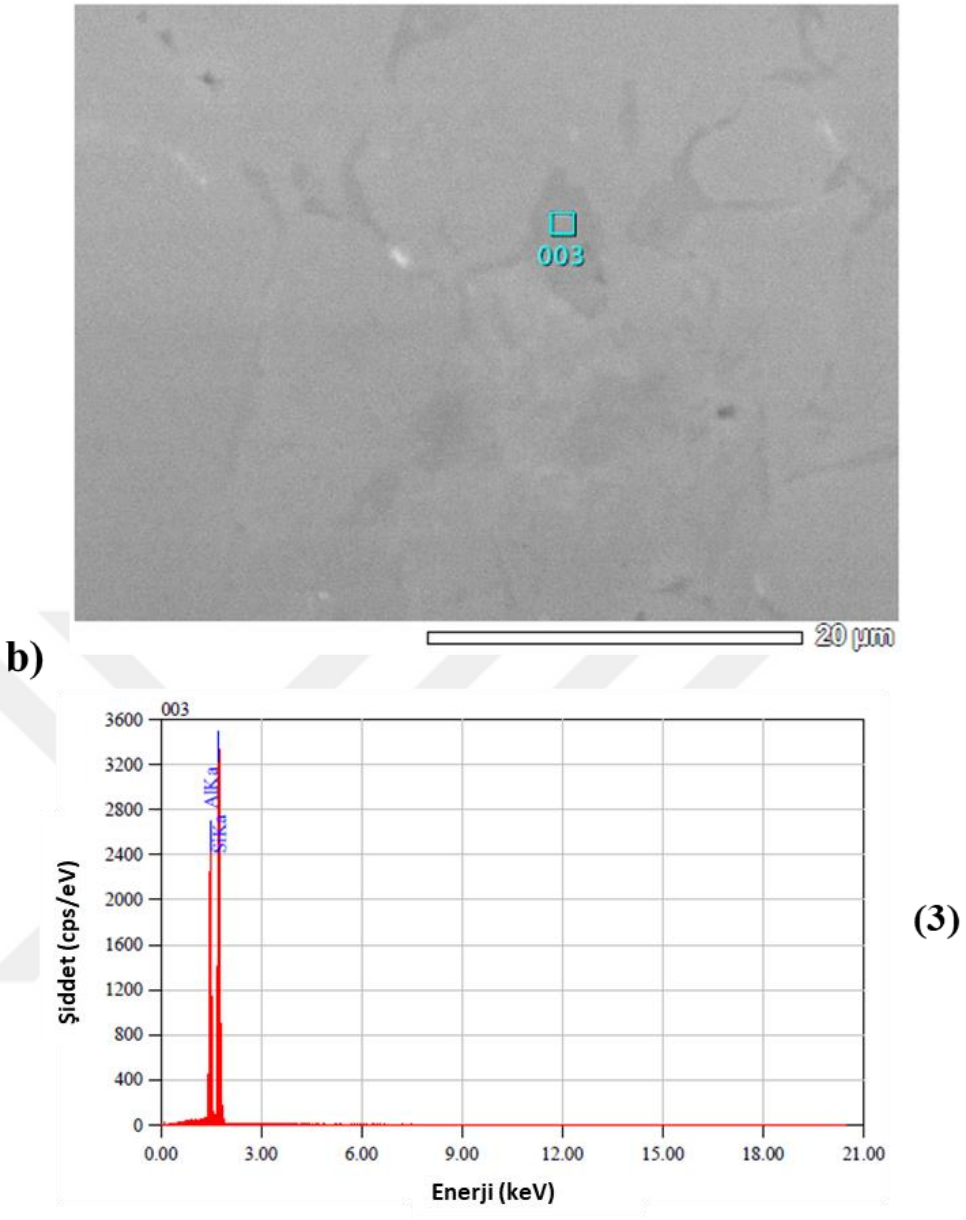
Şekil 3.13 (devam) : 40 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüleri ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları; a) alansal, b) çizgi.

80 ppm Sr ile yapılan döküm mikroyapı numunesine ait BSE – SEM görüntüleri ve EDS analiz grafikleri Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Alınan BSE – SEM görüntüsünde yapılan ve Şekil 3.14-a'da paylaşılan 1 ve 2 no'lu noktasal analiz sonuçları farklılık göstermektedir. Aynı intermetalik üzerindeki renk farklılıkları, intermetalikte farklı elementel içeriğe sahip farklı bileşiklerin bulunduğunu işaret etmektedir. 1 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe, Si ve Mn olduğu görülmektedir. 2 no'lu analiz sonucuna göre ise ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe, Si, Mn ve Cu olduğu görülmektedir. Şekil 3.14-b'de paylaşılan

alansal analiz sonucuna göre ise ilgili faz için elde edilen piklerden sadece Al ve Si elementlerinin çıktığı görülmektedir. İlgili fazın, alaşımın doğası gereği yapısında oluşan Al-Si esaslı faz olduğu sonucuna varılmaktadır.

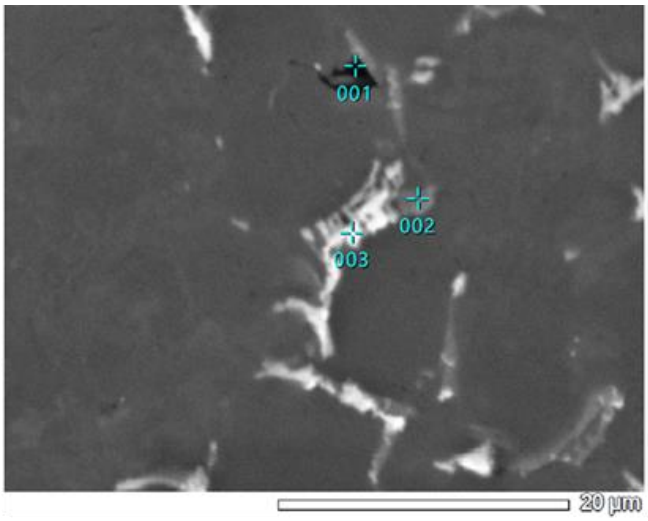


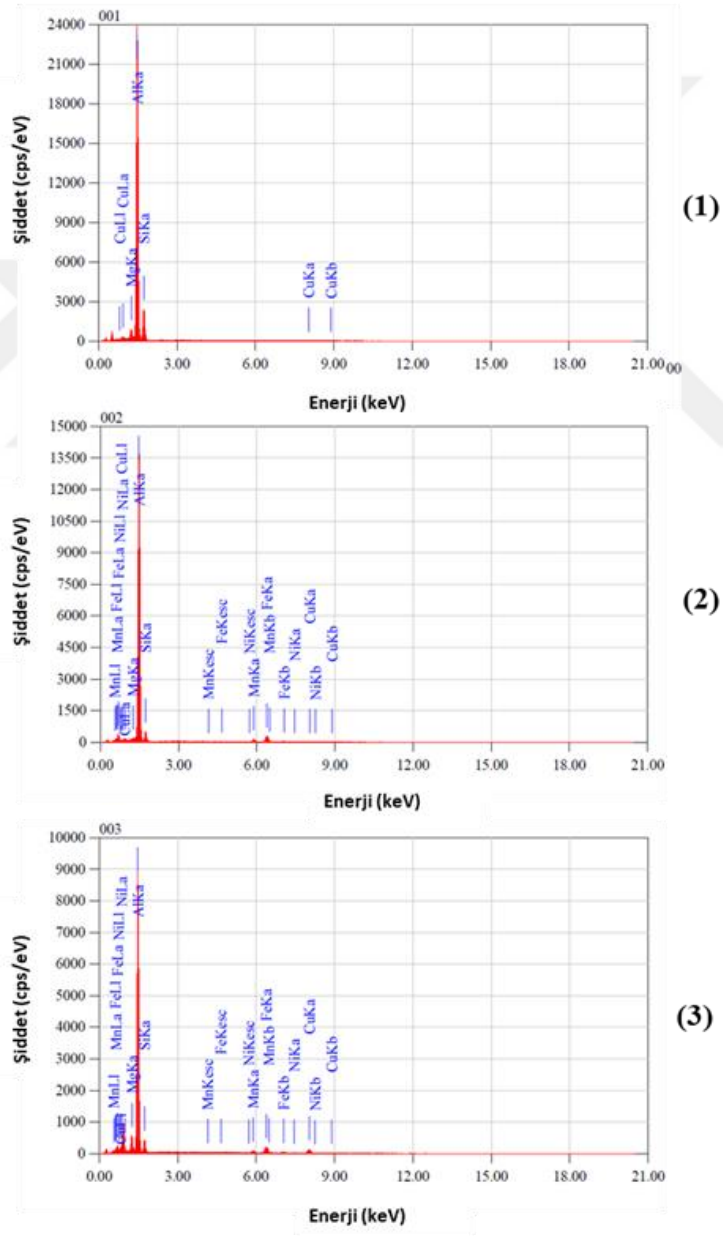
Şekil 3.14 : 80 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüleri ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları: a) 1 ve 2 no'lu analiz, b) 3 no'lu analiz.



Şekil 3.14 (devam) : 80 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüleri ve bu görüntüden elde edilen noktasal ve alansal EDS analiz sonuçları: a) 1 ve 2 no'lu analiz, b) 3 no'lu analiz.

160 ppm Sr ile yapılan döküm mikroyapı numunesine ait BSE – SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Alınan BSE – SEM görüntüsünde yapılan 1 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al ve Si; eser miktarda Mg ve Cu olduğu görülmektedir. Görüntüden alınan 2 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Fe, Si ve Mn olduğu görülmektedir. Son olarak 3 no'lu noktasal analiz sonucuna göre, ilgili faz için elde edilen piklerden en yüksek çıkan elementlerin ağırlıklı olarak Al, Cu, Fe, Si, Mg ve eser miktarda Mn olduğu görülmektedir.





Şekil 3.15 : 160 ppm Sr değeri için alınan BSE – SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen noktasal EDS analiz sonuçları.

Yapılan SEM görüntülemeleri ve EDS analizleri sonucunda optik mikroskop ile gerçekleştirilen mikroyapı analizlerinde karşılaşılan parlak intermetaliklerin sebebinin yapısında içerdiği Cu sebebiyle olduğu sonucuna varılmaktadır. Yapılan Sr ilaveleriyle birlikte yapıda karşılaşılan intermetaliklerin morfolojik olarak benzerlik göstermese de kimyasal içerik olarak benzerlik gösterdiği görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Yüksek basınçlı döküm prosesi özelinde AlSi12(Fe) alaşımı için MagmaSoft ve Click2Cast simülasyon programları ile kalıp dolum ve katılaşma analizleri gerçekleştirildiğinde; elde edilen katılaşma süresi değerlerinde belirgin bir farklılık gözlemlenmiştir. Click2Cast simülasyon programı, MagmaSoft programından 2 kat daha uzun katılaşma süresi öngörmüştür. Her iki programda da silindirik çekme çubuğu ile 12 mm kesit kalınlığına sahip çekme çubuklarının köşelerinin katılaşmasının en geç tamamlanan bölgeler olduğu sonucuna varılmaktadır. Döküm süreksizliği analizinde ise her iki simülasyon programının benzer sonuç verdiği görülmektedir. Hava sıkışma bölgelerinin tespiti için yapılan analiz sonucunda da elde edilen sonuçlar arasında herhangi bir korelasyon kurulamamıştır. Son olarak porozite analizinde ise iki simülasyon programında da elde edilen porozite oluşum bölgelerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Artan Sr değerine bağlı olarak alaşımda gerçekleştirilen metal kalitesi tespiti çalışmalarında ise artan Sr değerine bağlı olarak alaşımın yoğunluk indeksinin belirgin bir şekilde yükselerek yapısında meydana gelen porozite miktarının azalma trendi gösterdiği ve alaşımın buna bağlı olarak yoğunluk indeksinin arttığı görülmektedir. Yapılan metal kalitesi analizlerine bağlı, artan Sr miktarına bağlı olarak alaşımın sıvı metal kalitesinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Artan Sr miktarının sertlik özelliği üzerinde 40 ppm değerine kadar belirgin bir etkisi tespit edilmemiştir. Ancak Sr miktarı 80 ppm ve 160 ppm mertebelerine ulaştığında ise sertlik değerinde artış trendi gözlemlenmiştir.

Çekme testi sonuçlarıyla elde edilen akma mukavemeti grafiğinde ise artan Sr miktarıyla birlikte alaşımın yapısında gerçekleşen modifikasyonun da etkisiyle akma mukavemeti belirgin bir şekilde iyileştirilmiştir. 80 ppm ve 160 ppm Sr kullanımı ile gerçekleşen modifikasyon işlemi ile akma mukavemeti özelinde yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çekme mukavemetinde ise akma mukavemeti özelliğinden farklı olarak 20

ppm Sr ilavesiyle alaşımın çekme mukavemeti değerinde azalma trendi gözlemlenmiş; ardından gerçekleştirilen diğer tüm Sr ilavelerinde alaşımın çekme mukavemetinde belirgin bir artış görülmüştür. Son olarak alaşımın artan Sr değerine bağlı olarak alaşımın % uzama değerinin iyileştiği sonucuna varılmaktadır.

Yapılan çentik darbe test sonucuna göre ise Sr ile gerçekleştirilen silis modifikasyonunun, akma mukavemeti ve % uzama değeri ile paralel olarak ve kırılma enerjisini arttırarak enerji sönümleme yeteneğini de beraberinde iyileştiği görülmektedir.

Çentik darbe ve çekme testi numuneleri için gerçekleştirilen X ışını radyografi görüntülemeleri sonucunda, simülasyon programlarından elde edilen potansiyel porozite oluşma bölgeleriyle X ışını görüntülerinden elde edilen porozite oluşum bölgeleri arasında benzerlik tespit edilmiştir. Numunelerde oluşan porozite boyutu ve miktarı, artan Sr miktarı ile azalma trendi göstermektedir. Porozitelerin çoğunlukla gözlemlendiği yerler ise çekme çubuklarının çene bağlantı bölgeleri olarak söylenebilmektedir.

Elde edilen mikroyapı görüntülerine bağlı olarak artan Sr miktarı ve maksimum Sr modifikasyon değeri olan 160 ppm Sr ile birlikte ötektik silis fazında gözlemlenen iğnesel yapı, fibröz formda yapıda homojen bir dağılım göstermiştir. α-alüminyum fazı ise yapıda küçük küresel ve homojen bir dağılım sergileyerek hacimsel oranının en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. İlgili Sr miktarı ile gerçekleştirilen modifikasyon işlemi sonucunda mikroyapıda gerçekleşen modifikasyon ile alaşımın çekme, çentik darbe ve sertlik özellikleri arasındaki korelasyon başarılı bir şekilde kurulabilmiştir. Başarılı bir şekilde modifiye edilen alaşımın mekanik özelliklerinde de fark edilir iyileşme gözlemlenmiştir.

Yapılan SEM – EDS incelemelerinde mikroyapı görüntülerinde de görüntülenen parlak renkli intermetaliklerin nedeninin içeriğindeki Cu elementinden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Alaşımın yapısında oluşan intermetaliklerin elde edilen EDS analizi sonuçlarına bağlı olarak; Al-Si, Al-Si-Mg-Fe, Al-Mn-Fe, Al-Si-Cu-Mg ve Al-Si-Mn-Fe ailesine mensup intermetalikler olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında ilerleyen dönemde yapılması planlanan çalışmalar için aşağıdaki tavsiyeler yapılabilir.

a) Stronsiyum kullanımının alaşımın süneklik özelliği üzerine etkisi; üç nokta eğme testi, yorulma testi gibi kritik testler yapılarak daha detaylı şekilde incelenmesi ve sonuçların istatistiksel olarak yorumlanması sonuçların daha doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlayabilmektedir.
b) Yapılan her bir deneme çalışması için metal kalitesi belirleme çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçların istatistiksel olarak yorumlamalarının yapılması gerekmektedir.
c) Deneme çalışmaları yapılırken ergiyik metaldeki stronsiyuma ait etkinlik süresine dikkat edilmesi gerekmektedir. Stronsiyumun etkin olma süresi gerek metal kalitesi gerekse mekanik özelliklere doğrudan etki edebilmektedir.
d) Farklı modifiye edicilerin ve bu modifiye edicilerin stronsiyum ile birlikte kullanımının incelenmesi gerekmektedir. Bu döküm çalışmalarından elde edilen numunelerin hem metal kalitesi hem de mekanik testler ile detaylı bir şekilde incelenmesi için deneme yapılabilir.
e) Tez çalışmasında sabit parametre olarak kullanılan gaz giderme prosesi özelinde gaz giderme süresi ve kullanılan gazın debisi üzerine farklı döküm denemeleri yapılabilir. Yapılan denemelerde, farklı stronsiyum kullanımıyla birlikte belirlenen farklı gaz giderme parametrelerinin metal kalitesine etkisi doğrudan incelenebilir.

KAYNAKÇA

[1] **Anyalebechi, P. N.** (1995). Analysis of the effects of alloying elements on hydrogen solubility in liquid aluminum alloys. *Scripta metallurgica et materialia*, *33*(8), 1209-1216.

[2] **Dispinar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., & Arnberg, L.** (2010). Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356. *Materials Science and Engineering: A*, *527*(16-17), 3719-3725.

[3] **Dispinar, D., & Campbell, J.** (2004). Critical assessment of reduced pressure test. Part 1: Porosity phenomena. *International Journal of Cast Metals Research*, *17*(5), 280-286.

[4] **Hegde, S., & Prabhu, K. N.** (2008). Modification of eutectic silicon in Al–Si alloys. *Journal of materials science*, *43*(9), 3009-3027.

[5] **Davis, J. R.** (Ed.). (2001). Alloying: Understanding The Basics. *Light Metals and Alloys-Aluminum and Aluminum Alloys* (1st ed., pp.351-416). ASM international.

[6] **ASM International.** (1990). Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials (Vol. 2). ASM HandBook.

[7] **Kaufman, J. G.** (2000). *Introduction To Aluminum Alloys and Tempers*. ASM international.

[8] **Hernandez, F. C. R., Ramírez, J. M. H., & Mackay, R.** (2017). Al-Si Alloys: Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Springer.

[9] **Sigworth, G. K.** (2014). Fundamentals of solidification in aluminum castings. *International Journal of Metalcasting*, *8*(1), 7-20.

[10] **Shankar, S., Riddle, Y. W., & Makhlouf, M. M.** (2004). Nucleation mechanism of the eutectic phases in aluminum–silicon hypoeutectic alloys. *Acta Materialia*, *52*(15), 4447-4460.

[11] **Kaufman, J. G., & Rooy, E. L.** (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. Asm International.

[12] **Uzun, O., Karaaslan, T., & Keskin, M.** (2001). Production and structure of rapidly solidified Al-Si alloys. *Turkish Journal of Physics*, *25*(5), 455-466.

[13] **Eiken, J., Apel, M., Liang, S. M., & Schmid-Fetzer, R. (**2015). Impact of P and Sr on solidification sequence and morphology of hypoeutectic Al–Si alloys: Combined thermodynamic computation and phase-field simulation. *Acta Materialia*, *98*, 152-163.

[14] **Seifeddine, S., & Svensson, I. L**. (2010). Prediction of mechanical properties of cast aluminium components at various iron contents. *Materials & design*, *31*, S6-S12.

[15] **Mbuya, T. O., Odera, B. O., & Ng'ang'a, S. P.** (2003). Influence of iron on castability and properties of aluminium silicon alloys: literature review. *International Journal of Cast Metals Research*, *16*(5), 451-465.

[16] **Qian, Z., Liu, X., Zhao, D., & Zhang, G.** (2008). Effects of trace Mn addition on the elevated temperature tensile strength and microstructure of a low-iron Al–Si piston alloy. *Materials Letters*, *62*(14), 2146-2149.

[17] **Shabestari, S. G., Mahmudi, M., Emamy, M., & Campbell, J.** (2002). Effect of Mn and Sr on intermetallics in Fe-rich eutectic Al-Si alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, *15*(1), 17-24.

[18] **Darvishi, A., Maleki, A., Atabaki, M. M., & Zargami, M.** (2010). The mutual effect of iron and manganese on microstructure and mechanical properties of aluminium–silicon alloy. *Metallurgical and Materials Engineering*.

[19] **Gustafsson, G., Thorvaldsson, T., & Dunlop, G. L.** (1986). The influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al-Si-Mg alloys. *Metallurgical Transactions A*, *17*(1), 45-52.

[20] **Timelli, G., & Bonollo, F.** (2010). The influence of Cr content on the microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 (Fe) die-casting alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(1), 273-282.

[21] **Zanini, E., Barison, S., Capra, L., Timelli, G., & Voltazza, F.** (2012). Microstructure and bending properties of die-casting alloys at various chromium contents. *La Metallurgia Italiana*.

[22] **Kocatepe, K.** (1988). *Al-Si12 alaşımının metalik sodyum ile modifikasyonu.* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[23] **Zamani, M., Seifeddine, S., & Jarfors, A. E.** (2014). Effects of Microstructure and Defects on Tensile and Fracture Behaviour of a Hpdc Component: Potential Properties and Actual Outcome of En AC-44300 Alloy. *In Light Metals 2014* (pp. 1077-1082). Springer, Cham.

[24] **Zovko Brodarac, Z., Dolić, N., & Unkić, F.** (2014). Influence of copper content on microstructure development of AlSi9Cu3 alloy. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, *50*(1), 53-60.

[25] **Katgerman, L**. (2011). Principles of solidification, *Materials Today-Kidlington, 14*(10), 502.

[26] **Makhlouf, M. M., & Guthy, H. V. (**2002). The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of light metals*, *1*(4), 199-218.

[27] **Li, J., Hage, F. S., Liu, X., Ramasse, Q., & Schumacher, P.** (2016). Revealing heterogeneous nucleation of primary Si and eutectic Si by AlP in hypereutectic Al-Si alloys. *Scientific reports*, *6*(1), 1-8.

[28] **Lu, L. M., Nogita, K., McDonald, S. D., & Dahle, A. K**. (2004). Eutectic solidification and its role in casting porosity formation. *Jom*, *56*(11), 52-58.

[29] **Abu-Dheir, N., Khraisheh, M., Saito, K., & Male, A.** (2005). Silicon morphology modification in the eutectic Al–Si alloy using mechanical mold vibration. *Materials Science and Engineering: A*, *393*(1-2), 109-117.

[30] **Gariboldi, E., Bonollo, F., & Rosso, M**. (2007). Proposal of a classification of defects of high-pressure diecast products. *La Metallurgia Italiana*.

[31] **Juriani, A.** (2015). Casting defects analysis in foundry and their remedial measures with industrial case studies. *IOSR Journal of Mechanical And Civil Engineering*, *12*(6), 43-54.

[32] **Rajkolhe, R., Khan, J. G.** (2014). Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process: A Review. *International Journal of Research in Advent Technology*, *2*(3), 2321-9637.

[33] **Fiorese, E., Bonollo, F., Timelli, G., Arnberg, L., & Gariboldi, E.** (2015). New classification of defects and imperfections for aluminum alloy castings. *International Journal of Metalcasting*, *9*(1), 55-66.

[34] **Birch, J. M.** (2016). High pressure die casting of non-ferrous alloys high pressure alloys. *Materials science and technology*.

[35] **Campbell, J.** (2006). Entrainment defects. *Materials science and technology*, *22*(2), 127-145.

[36] **Campbell, J.** (2006). An overview of the effects of bifilms on the structure and properties of cast alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *37*(6), 857-863.

[37] **Dispinar, D.** (2005). *Determination of metal quality of aluminium and its alloys* (Doctoral dissertation).Retrieved from https://etheses.bham.ac.uk//id/eprint/10/4/Dispinar06PhD01.pdf

[38] **Uludağ, M., Cetin, R., Dişpinar, D., & Tiryakioğlu, M.** (2018). On the interpretation of melt quality assessment of A356 aluminum alloy by the reduced pressure test: the Bifilm index and its physical meaning. *International Journal of Metalcasting*, *12*(4), 853-860.

[39] **Dispinar, D., & Campbell, J.** (2011). Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings. *Materials Science and Engineering A*, *528*(10-11), 3860-3865.

[40] **Mostafaei, M., Ghobadi, M., Eisaabadi, G., Uludağ, M., & Tiryakioğlu, M.** (2016). Evaluation of the effects of Rotary degassing process variables on the quality of A357 aluminum alloy castings. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *47*(6), 3469-3475.

[41] **Uludağ, M., Cetin, R., & Dispinar, D**. (2018). Freezing range, melt quality, and hot tearing in Al-Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *49*(5), 1948-1961.

[42] **Yüksel, Ç.** (2020). *Al ve alaşımlarında sıvı metal temizliğinin garanti altına alınması*, [PowerPoint slides] Retrived from

https://www.researchgate.net/publication/339240799_Aluminyum_ve_alasimlarinda_sivi_metal_kalitesi

[43] **Duygun, İ.K.** (2017). *Al-Si alaşımlarında stronsiyum modifikasyonu ile döküm kalitesi arasındaki ilişkinin karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[44] **Taghiabadi, R., Ghasemi, H. M., & Shabestari, S. G. (**2008). Effect of iron-rich intermetallics on the sliding wear behavior of Al–Si alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *490*(1-2), 162-170.

[45] **Tahiri, H., Samuel, A. M., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H.** (2018). Effect of Sr–Grain Refiner–Si interactions on the microstructure characteristics of Al–Si hypereutectic alloys. *International Journal of Metalcasting*, *12*(2), 307-320.

[46] **Ebhota, W. S., & Jen, T. C.** (2017). Aluminium Alloys-Recent Trendsin Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications. *Properties of Al-Si Cast Alloys Effects of Modification Techniques on Mechanical Properties of Al-Si Cast Alloys* (1st ed., pp. 59-80). IntechOpen.

[47] **Shamsuzzoha, M., & Hogan, L. M**. (1986). The crystal morphology of fibrous silicon in strontium-modified Al-Si eutectic. *Philosophical Magazine A*, *54*(4), 459-477.

[48] **Paramo, V., Colás, R., Velasco, E., & Valtierra, S.** (2000). Spheroidization of the Al-Si eutectic in a cast aluminum alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *9*(6), 7-14.

[49] **Zuo, Y., Li, H., Xia, M., Jiang, B., Scamans, G. M., & Fan, Z.** (2011). Refining grain structure and porosity of an aluminium alloy with intensive melt shearing. *Scripta Materialia*, *64*(2), 209-212.

[50] **Radwan, B**. (2020). T*reatment of a liquid al-si alloy: quality control and comparison of two melt degassing processes* (Master thesis). Jönköping University, School of Engineering, Sweden. Retrived from https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1427868/FULLTEXT01.pdf

[51] **Jenkinson, D. C., & Hogan, L. M.** (1975). The modification of aluminium-silicon alloys with strontium. *Journal of Crystal Growth*, *28*(2), 171-187.

[52] **Darlapudi, A., McDonald, S. D., Terzi, S., Prasad, A., Felberbaum, M., & StJohn, D. H**. (2016). The influence of ternary alloying elements on the Al–Si eutectic microstructure and the Si morphology. *Journal of Crystal Growth*, *433*, 63-73.

[53] **Shin, S. S., Kim, E. S., Yeom, G. Y., & Lee, J. C.** (2012). Modification effect of Sr on the microstructures and mechanical properties of Al–10.5 Si–2.0 Cu recycled alloy for die casting. *Materials Science and Engineering: A*, *532*, 151-157.

[54] **Asensio-Lozano, J., & Suarez-Pena, B.** (2006). Effect of the addition of refiners and/or modifiers on the microstructure of die cast Al–12Si alloys. *Scripta Materialia*, *54*(5), 943-947.

[55] **Hekimoğlu, A. P., Çalış, M., & Ayata, G.** (2019). Effect of strontium and magnesium additions on the microstructure and mechanical properties of Al–12Si alloys. *Metals and Materials International*, *25*(6), 1488-1499.

[56] **Devappa, T. M., Roopa, D. N., & Hiremath, S.** (2018). Effect of Structural Changes on Microstructure, Mechanical Properties and Fractographical Analysis of Binary Al-12si Base Alloy. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*, 2321–2705.

[57] **Basavakumar, K. G., Mukunda, P. G., & Chakraborty, M.** (2008). Impact toughness in Al–12Si and Al–12Si–3Cu cast alloys—Part 1: Effect of process variables and microstructure. *International Journal ff İmpact Engineering*, *35*(4), 199-205.

[58] **Tan, P., Yang, Y., Sui, Y., Wang, Q., & Jiang, Y.** (2019). The influence of Al–10Sr or/and Al–5Ti–1B on microstructure and mechanical properties of Al–12Si–4Cu–2Ni–0.8 Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, *809*, 151856.

[59] **Eguskiza, S., Niklas, A., Fernández-Calvo, A. I., Santos, F., & Djurdjevic, M.** (2015). Study of strontium fading in Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-Cu alloy by thermal analysis. *International Journal of Metalcasting*, *9*(3), 43-50.

[60] **Uludağ, M., Gemi, L., & Dışpınar, D**. (2016). A356 Alaşımında katılaşma hızı ve sıvı durumda bekletme süresinin mekanik özellikler üzerine etkisi. In *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016).* Turkey: Alanya/Antalya, November 3-5.

[61] **Uludağ, M., Lokman, G. E. M. İ., Eryılmaz, M. R., & DIŞPINAR, D.** (2015). The effect of Sr modification and holding time on Si morphology and mechanical properties of ETIAL 195 alloy. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *21*(8), 348-351.

[62] **Sezgin, Y. A. Ş. A., Kabil, A., Bayrak, Y., & Çiğdem, M.** (2020). The effect of holding time after Sr addition on microstructural and mechanical properties of A356 alloy. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *26*(4), 634-637.

[63] **ASM International.** (1988). Casting (Vol. 15). ASM HandBook.

[64] **Poli, C.** (2001). Design For Manufacturing: A Structured Approach. *Metal Casting Processes* (1st ed., pp.115-125). Butterworth-Heinemann.

[65] **Bonollo, F., Gramegna, N., & Timelli, G.** (2015). High-pressure die-casting: contradictions and challenges. *Jom*, *67*(5), 901-908.

[66] **Tsoukalas, V. D.** (2003). The effect of die casting machine parameters on porosity of aluminium die castings. *International Journal of Cast Metals Research*, *15*(6), 581-588.

[67] **Dańko, R., & Stojek, J.** (2013). Model testing of the 2nd phase of die casting process. *In Solid State Phenomena* (Vol. 208, pp. 52-62). Trans Tech Publications Ltd.

[68] **Zhang, Z., Bian, X., & Liu, X.** (2000). Effect of strontium addition on hydrogen content and porosity shape of Al-Si alloys. *In Materials science forum* (Vol. 331, pp. 361-366).

[69] **Moustafa, M. A., Samuel, F. H., & Doty, H. W.** (2003). Effect of solution heat treatment and additives on the hardness, tensile properties and fracture behaviour of Al-Si (A413. 1) automotive alloys. *Journal of materials science*, *38*(22), 4523-4534.

[70] **Ebhota, W. S., & Jen, T. C.** (2018). Intermetallics formation and their effect on mechanical properties of Al-Si-X alloys. *Intermetallic Compounds-Formation and Applications, IntechOpen*, 21-41.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** İrem Sapmaz

Doğum Tarihi ve Yeri **:**

E-posta **:**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** Mayıs – 2018, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** **:** 2021 (Devam Ediyor), Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler – Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- Yeşilova Holding Ar-Ge Merkezi – Ar-Ge Proje Mühendisi (Kasım, 2018)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sapmaz, İ.,** Tekin, G., Uludağ, M., (2020). The Effect of Degassing Duration on Properties of EN AC 44300 HPDC Alloy. Soldification&Crystallization of Metals 2020 Poland – Online
- **Sapmaz, İ.,** Uludağ, M., (2020). The Effect of Sr Modification on Microstructure and Mechanical Properties in AlSi12(Fe) HPDC Alloy. Soldification&Crystallization of Metals 2020 Poland – Online

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR, PATENTLER:

- **Sapmaz, İ.,** Vardar, Ö., Zeybek, A., Şen, E., Tekin, G., Uludağ, M. (2019). Oksijen Atmosferinin AlSi9Cu3 Yüksek Basınçlı Döküm Alaşımının Metal Kalitesi Üzerine Etkisinin Araştırılması. International Conference on Material Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, Cappadocia, Turkey (718 – 722)
- **Sapmaz, İ.,** Vardar, Ö., Zeybek, A., Şen, E., Tekin, G., Uludağ, M. (2019). Yüksek Basınçlı Dökümde Kullanılan Ergiyik Tutma Potası Sistemlerine Göre EN AC 46000 Yüksek Basınçlı Döküm Alaşımının Döküm Kalitesinin Belirlenmesi. International Conference on Material Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, Cappadocia, Turkey (713 – 717)
- **Sapmaz, İ.,** Vardar, Ö., Zeybek, A., Şen, E., Tekin, G., Uludağ, M. (2019). Effect of Oxygen Atmosphere in High Pressure Die Casting Melt Holder Crucible on Metal Quality and Cast Part of AlSi9Cu3. TMS – Liquid Metal Processing & Casting (LMPC) Conference, Birmingham, UK
- **Sapmaz, İ.,** Vardar, Ö., Zeybek, A., Tekin, G., Uludağ, M. (2019). Yüksek Basınçlı Dökümünde Kullanılan Tutma Potası Sistemlerinin ve Potalardaki Ergiyik AlSi9Cu3 alaşımı Seviyesinin Döküm Kalitesi Üzerine Etkisi. Alüminyum Sempozyumu (ALUS), İstanbul, Turkey.
- **Sapmaz, İ.,** Vardar, Ö., Zeybek, A., Tekin, G., Uludağ, M. (2019). Yüksek Basınçlı Dökümünde Tutma Potası Seviyesinin 46000 Alaşımının Ergiyik ve Döküm Kalitesi Üzerine Etkisi. Alüminyum Sempozyumu (ALUS), İstanbul, Turkey.
- **Sapmaz, İ.,** Vardar, Ö., Zeybek, A., Tekin, G., Uludağ, M. (2019). Effects of High Pressure Die Casting Melt Holder Crucible Systems on Metal Quality in EN AC 46000 Alloy. International Conference on Light Materials – Science and Technology (LightMAT), Manchester, UK
- **Sapmaz, İ.,** Kurtuluş, E., Zeybek, A., Özdoğru, E.F. (2021). Comparison of Effects of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructural Behavior of Extruded AZ31 and AM50 Magnesium Alloys. Magnesium 2021 TMS – Online
- **Kurtuluş, E.**, Sapmaz, İ., Özdoğru, E.F. (2021). Investigation of the Effect of Extrusion Speed on Mechanical and Microstructural Characteristics in a Tubular Profile Extruded from AM50 Magnesium Alloy. Magnesium 2021 TMS – Online
- **Kurtulus, E.**, Sapmaz, I., Karpat, F. (2021). Effect of the cooling process on the mechanical properties and microstructural behavior of extruded AZ31 and AM50 Mg alloys. Materials Testing, vol. 63, no. 7, pp. 654-661. https://doi.org/10.1515/mt-2020-0107