

**Al-Si-Mg ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN Cu VE
Fe'İN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİ**

**2015
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Samet BAYOĞLU

**Al-Si-Mg ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN Cu VE Fe'İN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Samet BAYOĞLU

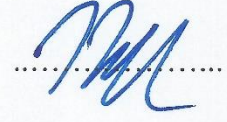
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2015**

Samet BAYOĞLU tarafından hazırlanan “Al-Si-Mg ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN Cu VE Fe'İN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliğinde Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 23/ 06/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Recep ÇALIN (KÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)

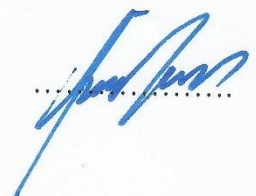


01/07/2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Samet BAYOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Al-Si-Mg ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN Cu VE Fe'İN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Samet BAYOĞLU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY

Haziran 2015, 79 sayfa

Bu çalışmada, Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen bakır (Cu) ve demirin (Fe), mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Döküm metodu ile Al-Si-Mg alaşımları üretildi (% 0,1-0,2 ve 0,4 Cu ve % 0,3-0,6 ve 1,2 Fe içeren) ve T6 ısıl işlemi uygulandı. Mikro yapı incelemelerinde, optik mikroskop, Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-ışınımı kırınımı analizi (XRD) kullanıldı. İlâveten, yoğunluk ve mikro sertlik ölçümleri yapıldı. Mekanik özelliklerin incelenmesinde çekme ve aşınma testi uygulandı. Çekme testinde çekme hızı 1 mmdk⁻¹ kullanıldı. Aşınma testlerinde 1 ms⁻¹ sabit hız altında 10-40 N yük altında, 500-2000 m. mesafelerinde uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, artan Fe miktarına bağlı olarak çekme mukavemetinin ve yüzde uzama miktarının azaldığı belirlenmiştir. Bunun sebebi, Fe miktarının artmasıyla yapıda oluşan Al-Si-Fe esaslı intermetaliklerin yapısının ve morfolojisinin değişimidir. Buna karşın Cu miktarının artmasıyla yapıda oluşan AlCu₂ fazının artmasından dolayı, çekme mukavemetinin ve uzamanın arttığı belirlenmiştir.

Aşınma testi sonuçlarına göre, demir ilave edilen gruplarda 10 ve 20 N yük altında % 0,6 Fe alaşımında en düşük ağırlık kaybı ölçüldü. 40 N yük altında ise % 0,2 Fe alaşımında en düşük ağırlık kaybı ölçüldü. Cu ilavesi ile 10 ve 20 N yük altında en düşük ağırlık kaybı % 0,2 Cu alaşımında, 40 N yük altında ise en düşük ağırlık kaybı % 0,4 Cu alaşımında ölçülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Metal döküm, alüminyum döküm, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 916.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECT OF Cu AND Fe ADDITION TO Al-Si-Mg ALLOYS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

Samet BAYOĞLU

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Tansel TUNÇAY

July 2015, 79 Pages

In this study, the effect of copper (Cu) and iron (Fe) added to Al-Si-Mg alloy on the microstructure and mechanical properties were investigated. Al-Si-Mg alloys (containing 0,1, 0,2 % and 0,4% Cu and 0,3, 0,6 and 1,2 % Fe) were produced by casting method and subjected to a T6 heat treatment. The micro-structure analyses were performed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-Ray diffraction analysis (XRD). In addition, density and micro hardness measurements were made. Tensile tests and wear tests were carried out for investigation of the mechanical properties and wear behaviour. In tensile tests, cross-head speed used was 1 mmmin.⁻¹. Wear tests were carried out at 1 ms⁻¹ sliding speed under 10-40 N loads. The results showed that the tensile strength and the percent elongation were reduced, as the amount of Fe increased. This was explained by the change in the structure and morphology of Al-Si-Fe based intermetallics with increasing Fe amount. However, it was determined that tensile strength and elongation

were increased due to formation of $AlCu_2$ phases with increasing Cu amount. According to wear test results, the lowest weight loss were measured for the alloy containing 0,6 % Fe under 10 and 20 N loads. Under 40 N load, the lowest weight loss was measured for the alloy containing 0,2 % Fe. Under 10 and 20 N loads, the lowest weight loss was measured for the alloy containing 0,2 Cu. However, Under 40 N, the lowest weight loss was measured for the alloy containing 0,4 % Cu.

Key Word : Metal casting, aluminium casting, mechanical properties.

Science Code : 916.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve tezimin oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın çok muhterem değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez süresi boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e, Arş. Gör. Mehmet Akif ERDEN'e ve Musa YILDIRIM'a, teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans öğrencilerinden Kadir İMDAT'a, Samet ÖZDEMİR'e, Fatma OMAÇ'a ve lisans öğrencilerinden Furkan KÜÇÜKAKARSU'ya, Seçkin CEBECİ'ye, İsmail BALKAN'a, Taşkın ERGÜN'e, Beytullah ÖZEN'e, Mehmet ÖZ'e, Cemal GÜRBÜZ'e ve Çağrı ÇOLPAN'a akademik hayatlarında başarılarının devamını dilerim. Ayrıca iş hayatımda kolaylık sağlayan değerli büyüğüm kıymetli abim Nebi ÖZTÜRK'e ve Hilmi GÜLER'e çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, KBÜ-BAP-14/1-YL-013 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP birimine teşekkür ederim.

Sevgili aile bireyim Hayri BAYOĞLU ve BAYOĞLU ailesine maddi manevi hiçbir yardımını esirgmeden yanımda oldukları için teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	4
DÖKÜM ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ.....	4
2.1. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ.....	7
2.1.1. Bakır.....	7
2.1.2. Silisyum.....	9
2.1.3. Magnezyum.....	10
2.1.4. Çinko.....	11
2.1.5. Krom.....	12
2.1.6. Kalay.....	12
2.1.7. Mangan.....	12
2.1.8. Demir.....	12
2.1.9. Nikel.....	13
2.1.10. Titanyum.....	13
2.1.11. Zirkonyum.....	13
2.2. Al-Si-Mg ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ.....	14
2.2.1. Döküm Kalitesine Etki Eden Faktörler.....	15
2.3. Al-Si-Mg ALAŞIMLARINDA MİKROYAPI KONTROLÜ.....	20
2.3.1. Tane Yapısı.....	21
2.3.2. Dentrit Kolları Aralığı.....	21

	<u>Sayfa</u>
2.3.3. Modifikasyon.....	21
2.3.4. Tane İnceltme İşlemleri.....	22
2.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA DÖKÜM YÖNTEMLERİ.....	23
2.4.1. Kum Kalıba Döküm	23
2.4.2. Kokil Döküm.....	24
2.4.3. Yüksek Basıncılı Döküm.....	24
2.4.4. Yarı Katı Metal Döküm.....	25
BÖLÜM 3	26
MALZEME VE METOT	26
3.1. MODEL.....	26
3.2. KALIPLAMA	28
3.3. SIVI METALİN HAZIRLANMASI VE DÖKÜM İŞLEMİ.....	29
3.4. T6 ISIL İŞLEMİ.....	31
3.5. KARAKTERİZASYON.....	32
3.5.1. Simülasyon Çalışması	32
3.5.2. Kimyasal Bileşimin Belirlenmesi.....	33
3.5.3. Metalografik İşlemler	33
3.5.4. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	33
3.5.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	34
3.5.6. X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri.....	34
3.5.7. Yoğunluk Ölçümleri.....	35
3.5.8. Sertlik Ölçümleri	35
3.5.9. Çekme Testleri.....	36
3.5.10. Aşınma Testleri	37
BÖLÜM 4	39
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	39
4.1. SİMİLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA	39
4.2. KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA	40
4.3. MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....	41
4.3.1. OM ve SEM Görüntülerinin İncelenmesi.....	41
4.3.2. XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	52
4.4. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ.....	54
4.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ	55

	<u>Sayfa</u>
4.6. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	56
4.6.1. Kırık Yüzey (SEM) İncelemeleri	61
4.7. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI	66
BÖLÜM 5	72
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72
5.1. SONUÇLAR	72
5.2. ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının üretiminde kullanılan elementler.	6
Şekil 2.2. Al-Cu denge diyagramı	8
Şekil 2.3. Alüminyum- silisyum denge diyagramı.	10
Şekil 2.4. Al-Mg denge diyagramı.	11
Şekil 2.5. Basit geometriye sahip döküm parça kötü ve iyileştirilmiş yolluk sistemi.....	16
Şekil 2.6. Sıvı fazdaki metalin, katılaşması esansındaki üç farklı şekilde çekmesi; sıvı, katılaşma ve katı çekmesi, katılaşma sırasında oluşan besleme mekanizmaları.	20
Şekil 2.7. Kum kalıbın şematik gösterimi.	23
Şekil 2.8. Kokil dökümün yöntemi.	24
Şekil 3.1. Kalıplamada kullanılan ahşap maça model, seramik köpük filtre 20 ppi	27
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan döküm numuneler ve yolluk sistemleri.	27
Şekil 3.3. Dökümde kullanılan kum kalıbı.	28
Şekil 3.4. Mikser.	29
Şekil 3.5. Döküme hazır hale getirilen kalıp.	29
Şekil 3.6. Ergitme ocağı, kum kalıp, döküm parça.....	31
Şekil 3.7. T6 ısıl işleme yapılan fırının görüntüsü.	31
Şekil 3.8. Döküm malzemenin karakterizasyonunda kullanılan numune konumları.	32
Şekil 3.9. Zımparalama ve polisaj cihazı.	33
Şekil 3.10. Optik mikroskop.	34
Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	34
Şekil 3.12. X-ışını kırınımı ölçüm cihazı (XRD).	35
Şekil 3.13. Yoğunluk ölçüm kiti.....	35
Şekil 3.14. Mikro sertlik cihazı.....	36
Şekil 3.15. Çekme deney numunelerin konumları ve hazırlanan çekme numuneleri.....	36
Şekil 3.16. Çekme cihazı.	37
Şekil 3.17. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü.	37

Şekil 4.1.	Sıvı metalin yolluk sistemini doldurması sırasındaki hızların simülasyon çıktısı görüntüsü.	40
Şekil 4.2.	Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Fe grubunun OM görüntüsü.	42
Şekil 4.3.	Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Cu grubunun OM görüntüsü.....	43
Şekil 4.4.	Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Fe grubunun SEM görüntüleri.	44
Şekil 4.5.	Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Cu grubunun SEM görüntüleri.	45
Şekil 4.6.	Döküm Al-Si-Mg ilave edilen % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe'in EDS sonuçları.	46
Şekil.4.7.	Döküm Al-Si-Mg ilave edilen % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu'nun EDS görüntüsü	47
Şekil 4.8.	Döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Fe grubunun EDS sonuçları.	50
Şekil 4.9.	Döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Cu grubun EDS sonuçları.	52
Şekil 4.10.	% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe, 0,1-0,2 ve 0,4 Cu numunelerine ait XRD analiz sonuçları.	53
Şekil 4.11.	Al-Si-Mg alaşımına katılan Fe (0,2-0,3-0,6-1,2) ve Cu (0,1-0,2-0,4) alaşımlarının yoğunluk sonuçları.	55
Şekil 4.12.	Al-Si-Mg-Cu ve Al-Si-Mg-Fe alaşımları sertlik değişimi.	56
Şekil 4.14.	Cu alaşımlarının ortalama çekme dayanımları ve yüzde uzama sonuçları.	59
Şekil 4.15.	Fe ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının ortalama çekme mukavemeti ve % uzama sonuçları.	60
Şekil 4.16.	Cu ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının ortalama çekme mukavemeti ve % uzama sonuçları.	60
Şekil 4.17.	Fe ilave edilen en düşük çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.....	63
Şekil 4.18.	Fe ilave edilen en yüksek çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.....	64
Şekil 4.19.	Cu ilave edilen en düşük çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.....	65
Şekil 4.20.	Cu ilave edilen en yüksek çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.....	66
Şekil 4.21.	Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ve % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu alaşımlarının, 10N, 20N, 40Nyük altında ağırlık kayıpları. .	67
Şekil 4.22.	Farklı oranlarda Fe ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının 40 N yük 2000 m kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri..	69
Şekil 4.23.	Farklı oranlarda Cu ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının 40 N yük 2000 m kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri...	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Ticari döküm Al alaşımlarının bileşimleri.	6
Çizelge 2.2. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.	15
Çizelge 2.3. Katılma sırasındaki beş besleme mekanizması.	20
Çizelge 3.1. Çalışmada tasarlanan yolluk sistem ölçüleri ve sıvı metal akış hızları.	28
Çizelge 3.2. Kullanılan silis kumunun özellikleri.	28
Çizelge 3.3. Al-Si-Mg ingot malzemesinin kimyasal bileşimi.	29
Çizelge 3.4. Kullanılan direnç ocağının teknik özellikleri.	30
Çizelge 3.5. Çalışmada hedeflenen Al-Si-Mg alaşımı kimyasal analizleri.	30
Çizelge 4.1. Döküm Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen elementlerin spektra analiz sonuçları.	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

°C	: Santigrat Derece
mm	: Milimetre
m	: Metre
kg	: Kilogram
g	: Gram
μ	: Mikron
μm	: Mikrometre
N	: Newton
P	: Yükleme Ağırlığı
S	: Kayma Yolu
XG	: Ağırlık Kaybı
D	: Yoğunluk
MPa	: Mega Paskal

KISALTMALAR

Ppi : İnc Başına Düşen Gözenek Boşluğu

EDS : Enerji Dağılımlı Spektrometresi

SEM : Spectron Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

XRD : X-Ray Diffraction (X-ışını kırınımı)

HMV : Hardness Micro Vickers (Mikro Sertlik Vickers)

OM : Optik Mikroskop

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Döküm alüminyum alaşımları, dökülebilme kabiliyetlerinin iyi olması ve korozyon dirençlerinin ve dayanım/ağırlık oranlarının yüksek olmasından dolayı, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır [1]. Otomotiv endüstrisinde bir Al-Si-Mg alaşımı olan A356 alaşımı, manifold, jant, silindir başlığı, transmisyon kutusu vb. parçaların üretiminde kullanılmaktadır [2,3]. Al-Si-Mg alaşımlarının, özellikle yüksek akıcılığa ve ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı döküm metodu ile üretimi tercih edilmektedir [4]. Bununla birlikte, döküm hataları mekanik özellikleri (çekme ve yorulma testi gibi) ve mikro yapıyı doğrudan etkilemektedir [5-7].

Döküm üretim metodu; ergitme, sıvı metalin rafine edilebilmesi, sıvı metalin transferi, yolluk sistemleri, filtrasyon ve katılaşma gibi parametrelerin göz önünde bulundurulduğu bir üretim metodudur [8,9]. Döküm malzemenin kalitesi ergitme ortamına, yolluk sistemine, şarj malzemenin kalitesine ve katılaşma şartlarına bağlıdır [10,11]. Son yıllarda, döküm üretim metodunda sıvı metal ve yüzey türbülansının mekanik özelliklere etkisi simülasyon modellemel ve deneysel çalışmalar ile araştırılmaktadır [12-15].

Birçok çalışmada, sıvı metalin kalıp boşluğuna transferi amacıyla tasarlanan yolluk sisteminin, döküm malzemenin mekanik özelliklerinde etkili olduğu belirtilmektedir [16,17]. Döküm parçaların yolluk sistemlerinin tasarımında yapılan hatalar, sıvı metalin akışın da süresizliğe (türbülansa), döküm havuzunda girdap etkisi ile hava sürüklenmesine, yatay ve dikey yolluklarda süresiz akışa sebep olduğu bilinmektedir. Sıvı metalin akışı sırasındaki bu süresizlik, beraberinde yüzey türbülansına da neden olmaktadır. Bu durum, türbülansı ile sıvı metalin yüzeyindeki koruyucu oksit film tabakasının türbülanslı akış durumunda kırılması, kendi üzerine katlanmasına ve yeni

oksit filmlerin oluşmasına yol açmaktadır [9]. Döküm hataları, genellikle şarj malzemesinden ve yolluk sisteminden kaynaklanan oksit ve inklüzyonların kalıp boşluğuna ulaşması, iyi bir yolluk sistemi tasarımıyla engellenebilmektedir [18,19]. Döküm işlemi sırasında, sıvı alüminyumun yüzeyinde oluşan oksit film tabakaları, sıvı metal ile beraber kalıp boşluğuna ulaşmaktadır. Katılma öncesi sıvı yüzeyinde yüzen bu oksitler, katılma sırasında döküm malzeme içinde oluşan dendritler arasında sıkışmaktadır. Bunun yanında, sıvıda çözünen hidrojen miktarı, katıda çözünen hidrojen miktarından daha yüksek olduğundan dolayı, dendritler arasına sıkışan oksit film (bifilm) katmaları, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak mikro yapıda gözeneklere sebep olmaktadır. Al-Si-Mg alaşımlarında, döküm sırasında şarj malzemesine, ergitme ortamı ve sıvı metalin aktarılması aşamalarında yüzeyde koruyucu bir film tabakası oluşmaktadır. Bu oksit film tabakasının kendi üzerine katlanması veya kırılması sonucu oluşan olumsuzluklar, döküm hatalarının temel sebebidir. Yolluk sistemi tasarımı, oksit film ve boşluk hatalarının oluşmasını engelleyebildiği için, mekanik özellikler üzerinde oldukça etkilidir [20].

Ayrıca, sıvı fazdan katı faza geçiş sırasındaki yoğunluk farkından dolayı, katılma çekmesinden kaynaklanan boşluklar meydana gelmektedir. Gaz ve çekme boşlukları birbirinden ayrı olarak görülebildiği gibi, birlikte de olabilmektedir. Mikro yapıda gaz boşlukları, çekme boşluklarına göre daha küresel ve düzgün bir morfolojiye sahiptir. Buna karşılık, çekme boşlukları daha karmaşık ve pürüzlü bir yüzeye sahiptirler [21].

Sıvı alüminyumun içerdiği oksit ve hidrojen miktarı, düşük basınç test cihazı ile belirlenebilmektedir. Fakat gözenek miktarı sadece hidrojen miktarına bağlı değil, aynı zamanda oksit film katman miktarına da bağlıdır [22]. Al-Si-Mg döküm alaşımlarının katılmasında α -Al dendritler, demirce zengin iğnemsiz plakalı β -Al₅FeSi, α -AlFeSi intermetalikler ve ısı işlem sonrasında Mg₂Si intermetalikliği oluşmaktadır [23]. Yapıda boşluk hatasına neden olan bifilm dendritler arasında sıkışarak çatlak veya beslenememe gibi farklı olumsuzluklara neden olmaktadır. Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Fe elementinin, mikro yapıda farklı kompozisyona sahip Al-Si-Fe intermetaliklerinin oluşmasına sebep olduğu bilinmektedir. Ayrıca çekme dayanımını ve % uzama miktarını azalttığı bilinmektedir. Fakat intermetaliklerin mekanik özellikler üzerine olumsuz etkisi, mikro yapıda olduğu

kusurlu (oksit inklüzyon vb.) bölgelerden kaynaklanmaktadır. Özellikle, oksijene karşı yüksek afinitesi olan metallerin dökümünde, sıvı metalin hazırlanması ve korunması ve sıvı metalde çözünen gazların çözünebiliriliğinin, katı fazda daha az olması önemli faktörlerdir. Al-Si-Mg alaşımı ve ilave edilen diğer alaşım elementlerinin oksijene karşı ilgisi mikro-makro yapıyı, mekanik özellikleri ve servis şartlarını doğrudan etkilemektedir [24,25]. Ayrıca soğuma hızının artmasıyla, toplam boşluk miktarı ve ortalama boşluk boyutu azalmaktadır [25].

Bu çalışmada, döküm metodu ile Al-Si-Mg alaşımına % 0,1-0,2 ve 0,4 bakır (Cu) ve % 0,3-0,6 ve 1,2 demir (Fe) elementleri ilave edilerek, alaşımın mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Mikro yapı incelemelerinde, optik mikroskop (OM), tarama elektron mikroskobu (SEM), X- ışını kırınımı kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve aşınma testi uygulanmıştır.

BÖLÜM 2

DÖKÜM ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ

Alüminyum yeryüzünde bol miktarda bulunmasına rağmen serbest halde çok nadir bulunmaktadır. 20. yüzyılın başlarına kadar alüminyum dökümün uygulama alanları sadece dekoratif ürünler ve mutfak gereçleri ile sınırlıydı. 2. Dünya Savaşı'ndan sonra alüminyum döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Alüminyuma çinko, magnezyum, silis, bakır, titanyum ve lityum gibi elementler ile alaşımlandırılıp istenilen mühendislik özelliklere sahip alaşımlar üretilmektedir. Makina elemanlarının üretiminde, yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyona dayanımı ve işleme kolaylığı gibi özellikler göz önünde bulundurulmaktadır. Hafifliği nedeniyle, büyük ve tek parçaların üretimi mümkündür [26].

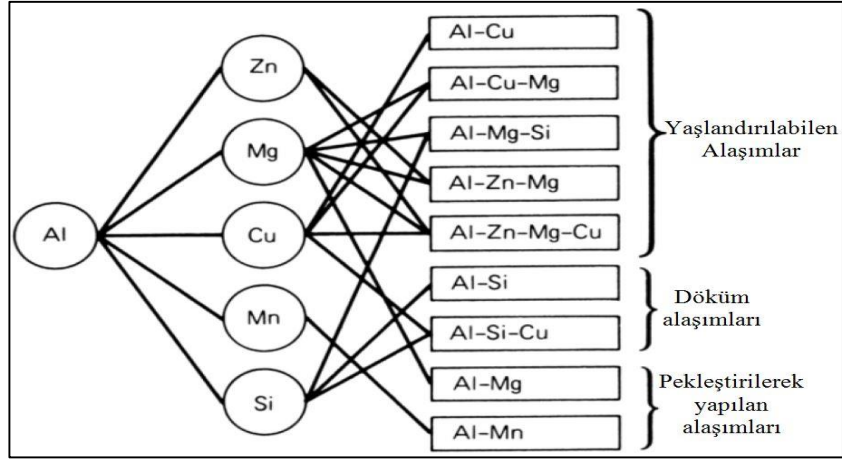
Alüminyum, periyodik cetvelin III A gurubunda bulunan ve atom numarası 13, atom ağırlığı 26,89 olan +3 değerlikli bir elementtir. 20 °C' deki yoğunluğu 2,7gr/cm³, ergime noktası 658 °C, kaynama noktası 2450 °C, ısınma ısısı 0,224 Cal/gr (1000 °C'de), erime ısısı 400 Cal/gr'dır. 20 °C'de ki elektriksel iletkenliği bakırın % 65'i, ısıl iletkenliği 0,5, ışık yansıtılabilirliği % 90 dır. Bu özellikler alaşım, elementleri ilave edilerek büyük ölçüde değiştirilebilmektedir. Alüminyumu diğer metallere göre avantajlı kılan en önemli özellikleri;

- hafifliği,
- hafifliğine karşın alaşımlandırıldığında yeterli mukavemeti,
- yüksek korozyon direnci,
- tekrar defalarca kullanılabilirliği,
- işlenebilirliği,
- şekillendirilebilirliği,
- dövülebilirliği,
- yüksek ısı ve elektriksel iletkenliğidir.

Demirden üç kat daha hafif olan alüminyum, alaşımlandırılmak suretiyle demire yakın mukavemette bir malzemeye dönüşebilmektedir. Böylece, alüminyumun otomotiv sanayinde kullanımı, araç ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte, buna karşılık yük kapasitesini arttırmaktadır. Alüminyum, normal atmosfer koşullarında oksijen ile reaksiyona girerek, kendi yüzeyinde doğal koruyucu bir film tabakası oluşturmaktadır. Ortalama kalınlığı 635×10^{-9} cm olan bu alümina tabakası, alüminyumu korozyondan korumaktadır [27]. Alüminyum alaşımlarında üretim metotlarına göre sınıflandırılmaktadır. Dövme ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana guruba ayrılmaktadır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alüminyum alaşımlarının mikro yapısı ve kimyasal içeriği, döküm alüminyum alaşımlarından oldukça farklıdır. Döküm alüminyum grubundaki alaşımlar, ısıtılabilir ve ısıtılabilir olmayan alaşımlar olmak üzere iki alt guruba ayrılmaktadır. Isıtılabilir alaşımlarda, mukavemet artışı yaşlandırma işlemi sağlanırken, ısıtılabilir olmayan alaşımlar ise, katı eriyik dağılım mukavemetlenmesi ile mukavemetlendirilmektedir [28]. Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri, malzemenin mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Başlıca alaşım elementleri silisyum, bakır, magnezyum, manganez, çinko, kurşun, nikel ve titanyumdur. Alaşım elementleri alüminyum içinde üç farklı halde bulunmaktadır.

- alüminyum içinde katı eriyik oluşturabilen,
- katı halde alüminyumda ergimeyip veya sınırlı ergiyip, yapıda ikincil faz şeklinde bulunur,
- alüminyumla veya birbirleriyle metaller arası veya kimyasal bileşik oluşturur [29].

Alüminyum alaşımları sayısal notasyonlar ile tanımlanmaktadır. İlk numara ana alaşım elementlerini, geriye kalan numaralar ise, alaşımın detaylı kompozisyonunu ifade etmektedir [27]. Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri belirli oranlarda yapılmaktadır. İstenerek ilave edilen alaşım elementlerinin yanında, istenmeyen elementlerde (impürateler) bulunabilmektedir. Bu impüratelerin mümkün oldukça minimum miktarda olması istenilmektedir [30]. Başlıca alüminyum alaşımlarının üretiminde kullanılan elementler, Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Çizelge 2.1’de ticari döküm Al alaşımlarının bileşimleri verilmektedir.



Şekil 2.1. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının üretiminde kullanılan elementler [23].

Günümüzde alüminyum alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet elde edilebilen alaşımlardır [31]. Alüminyum alaşımları, sahip oldukları özelliklerden dolayı otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi, birçok önemli üretim alanında kullanılmaktadır [32]. Havacılık sektöründe, hava araçlarının gövde yapılarının büyük bir kısmı alüminyum alaşımlarından üretilmektedir [33].

Çizelge 2.1. Ticari döküm Al alaşımlarının bileşimleri [23].

Alaşım Grubu	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
DÖKÜM ALAŞIMI									
1xxx(Al>99.0 %)	---	0,1-0,15	0,15-0,35	---	---	0,25-0,8	---	0,05-0,1	0,05
2xxx (Cu)	0,03-2,3	0,05-3,5	0,06-0,35	0,15-0,4	0,05-0,7	0,04-1,5	0,03-2,3	3,5-10,7	0,05-2,5
3xxx(Si+Cu/Mg)	0,3-1,5	4,5-23	0,04-0,25	0,05-0,35	0,03-0,8	0,06-1,5	0,1-3,0	0,03-5,0	0,03-4,5
4xxx(Si)	0,05-0,1	3,3-13	0,2-0,25	0,25	0,05-0,5	0,12-1,3	0,05-0,5	0,05-1,0	0,05-0,5
5xxx(Mg)	1,4-10,6	0,1-2,2	0,1-0,25	0,25	0,05-0,6	0,1-1,3	0,05-0,4	0,05-0,3	0,05-0,2
7xxx(Zn)	0,2-2,4	0,1-0,3	0,1-0,25	0,06-0,6	0,05-0,6	0,1-1,4	0,15	0,1-1,0	2,0-7,8
8xxx (Sn)	0,1-0,9	0,4-6,5	0,2	---	0,1-0,5	0,5-0,7	0,3-1,5	0,7-4,0	5,5-7,0

Alüminyum alaşımlarının, saflık derecesi azaldıkça, korozyona olan mukavemet değerleri düşer. Al alaşımlarına katılan yabancı elementler, korozyon direncini de azaltmaktadır [34]. Son yıllarda alüminyum dökümlerinin kalitesinin artırılmasına yönelik yeni yöntem arayışları, yarı katı şekillendirme tekniği gibi üstün mukavemet

özellikleri ve düşük maliyet ile ön plana çıkmaktadır [35]. Alüminyum endüstrisindeki hızlı büyüme bu metalin eşsiz özellik kombinasyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu özellikler alüminyumu, çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri haline getirmektedir [36].

2.1. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

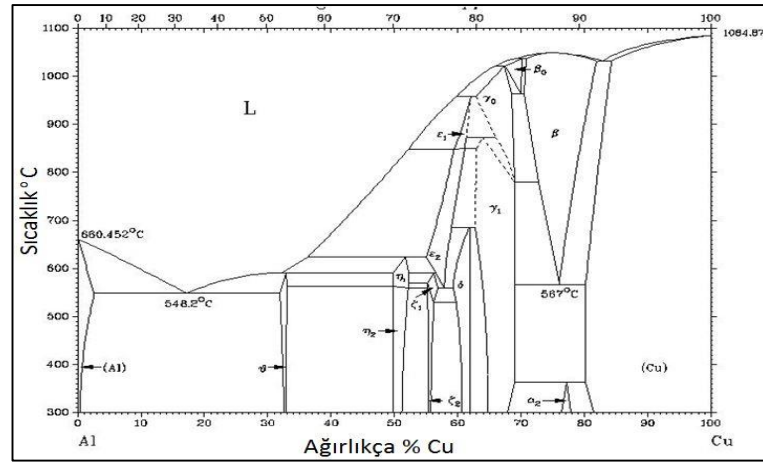
Ticari olarak, sadece yüksek elektrik iletkenliğinin arandığı uygulama alanlarında kullanılan saf alüminyumun mekanik ve döküm özelliklerini iyileştirmek için çeşitli alaşım elementleri kullanılmaktadır. Kullanılan alaşım elementleri bakır, silisyum, magnezyum, çinko, kalay, krom, manganez, titanyum, nikelidir [37]. Saf alüminyumun iyi olan birçok özelliğinin yanı sıra, döküm işlemi ve mekanik özellikleri yeterli değildir. Saf alüminyum dökümü sırasında alaşım elementi ilave edilmesinin iki nedeni vardır. Bunlar:

- akıcılığı arttırmak sıcak yırtılma eğilimi azaltmak ve benzeri özelliklerini geliştirmek.
- alaşımının korozyon, sertlik, mukavemet, işlenebilirlik ve kaynak edilebilirlik gibi mekanik özelliklerini geliştirmektir.

2.1.1. Bakır

Bakır, alüminyum alaşımlarında en çok kullanılan alaşım elementidir. Al-Cu denge diyagramı incelendiğinde (Şekil 2.2'de görüldüğü gibi) bakırın, alüminyum içinde eriyebilirliği, oda sıcaklığında % 0,5 iken, 548°C ötektik sıcaklıkta ise, % 5,65 dir [37]. Daha yüksek miktarlarda ise, sert bir faz olan β fazı oluşmaktadır. β fazı sünekliği hızla düşürmektedir. Bu sebeple, alüminyum alaşımlarında bakır miktarı % 12'yi geçmemelidir. Yüksek süneklik istenen uygulama alanlarında ise % 2-5 oranlarında Cu kullanılmaktadır. Sıcak yırtılmanın istenmediği durumlarda ise, % 4-12 Cu kullanılmaktadır. Alüminyum bakır alaşımlarında % 5,5'e kadar Cu ilavesi ile mukavemet artmakta ve süneklik azalmaktadır. Daha yüksek miktarlarda Cu ilavesinde ise, mekanik özellikler azalmaktadır. En iyi döküm özelliğine sahip Al-Cu alaşımı, % 8 Cu içermektedir. Al-4,5 Cu alaşımlarında yüksek demir ve silisyum,

mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Mg ve Mn, süneklığı olumsuz etkilemektedir. Yüksek kalay miktarı ise, sertliği ve korozyon direncini azaltmaktadır. Al-Cu alaşımları iyi işlenebilir ve yüksek mukavemetin gerektiği otomobil volanları, dingil muhafazaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Al-Cu alaşımlarında ideal bileşim 4,5 Cu, 1 Fe, 1,5 Si, 0,03 Mg, 0,3 Zn, 0,35 Mn, 0,25 Ti'dur. Döküm sıcaklığı 677-788 °C arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet istenen uygulamalarda ise, silisyum % 0,6-0,7 aralığında tutulmaktadır. Çok iyi işlenebilirlik özelliği, iyi döküm özelliği istenen uygulamalarda alanlarında CS 104A alaşımı tavsiye edilmektedir [38].



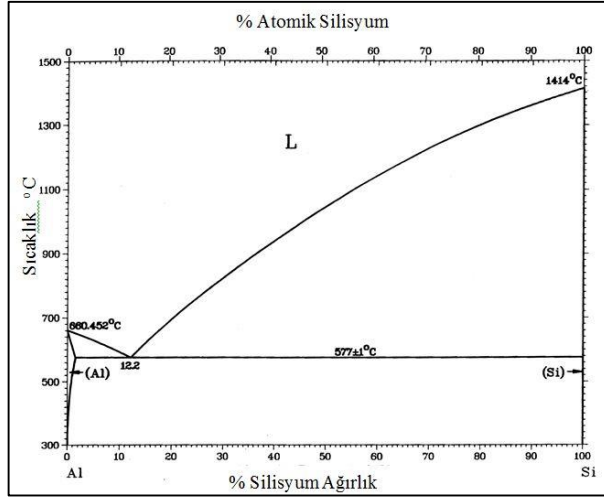
Şekil 2.2. Al-Cu denge diyagramı [30].

Al-Si-Mg alaşımları, Al-Cu döküm alaşımlarının yerini almaktadır. Al-Si alaşımlarının dökülebilirlik özelliğinin zayıf ve korozyon dirençlerinin iyi olmayışdır [29]. Al-Cu denge diyagramına göre bakırın alüminyum içinde çözünürlüğü, oda sıcaklığında % 0,5, 548 C ötektik noktasında ise % 5,65'dir. Yüksek süneklilik istenen uygulamalarda % 2-5 Cu, sıcak yırtılmanın önemli olduğu uygulamalarda ise % 4-10 Cu kullanılmaktadır [39]. Mg ilavesinin Al-Cu alaşımlarına en önemli etkisi, yaşlandırma ile mukavemet artışıdır. Yapay yaşlandırmayla mukavemette, özellikle akma mukavemetinde artış sağlanmaktadır. Fakat süneklilikte önemli bir azalma olmaktadır. Döküm ve mekanik işlem Al-Cu alaşımlarında, % 0,5 Mg yaşlandırma karakteristiklerini değiştirmede etkilidir. Doğal yaşlandırılmış malzemelerde, Mg ilavesinin mukavemete etkisi, soğuk işlemle azaltılabilmektedir. Al-Cu alaşımlarının korozyon direncine Mg'un etkisi, ısıl işleme bağlıdır. Al % 4Cu % 0,5 Mg mekanik

işlem alaşımında, demir (% 0,5 kadar düşük konsantrasyonlarda ısıtılma işlemi uygulanması durumunda) mekanik özelliklerini düşürmektedir. Yapı içerisindeki fazla demir bakır içerisinde Cu_2FeAl_7 fazını oluşturmaktadır. Ayrıca Si, magnezyumla Mg_2Si çökeltisi oluşturarak dayanımı arttırmaktadır. Gümüş, ısıtılma işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış Al-Cu-Mg alaşımlarının mukavemetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Nikel, yüksek sıcaklıklarda, döküm ve mekanik işlem Al-Cu-Mg alaşımlarının mukavemet ve sertliğini arttırmaktadır. Mg içeren alaşımlar, yüksek mukavemetli mekanik işlem Al-Cu-Mg alaşımlarını oluşturmaktadır. Genel olarak alaşımın çekme mukavemeti, Mg ve Mn ilavesiyle artmaktadır. Mg ve Mn ilavesi, Al-Cu alaşımlarının üretim karakteristiklerini azaltmakta ve sünekliği olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı bu elementin konsantrasyonu, ticari alaşımlarda %1'i geçmemektedir. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklar özelliklerini arttırmaktadır. Döküm ve kaynaklanabilirlik kabiliyetleri sahiptir. Düşük bakır içeren alaşımlar, otomotiv endüstrisinde ihtiyaç duyulan şekillenebilme özelliğini sağlamak için kullanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilmiş bakır-magnezyum alaşımları şekillenebilirlik, kaynaklanabilirlik ve iyi korozyon direncine sahiptir [40]. Al-Cu alaşımı % 5.5Cu, % 0,4 Bi ve % 0.4 Pb'li içeren alaşım vida ve makine parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. Bu alaşım, işlenebilirliği açısından bir referans olarak kabul edilmektedir. Cu, alüminyum için önemli bir alaşım elementidir. Çünkü Cu, yaşlandırma ısıtılma işlemi ile, çökelti oluşturmada ve alaşıma oldukça yüksek dayanım kazandırmaktadır [29].

2.1.2. Silisyum

Al alaşımlarında bakırdan sonra en çok kullanılan alaşım elementi silisyumdur. Oda sıcaklığında çok az silisyum miktarda alüminyumda çözünmektedir. Ötektik sıcaklığında ise, % 1,59 çözünürken, 577 °C de % 12,7 oranında ötektik ayrışması göstermektedir (Şekil 2.3) [40].

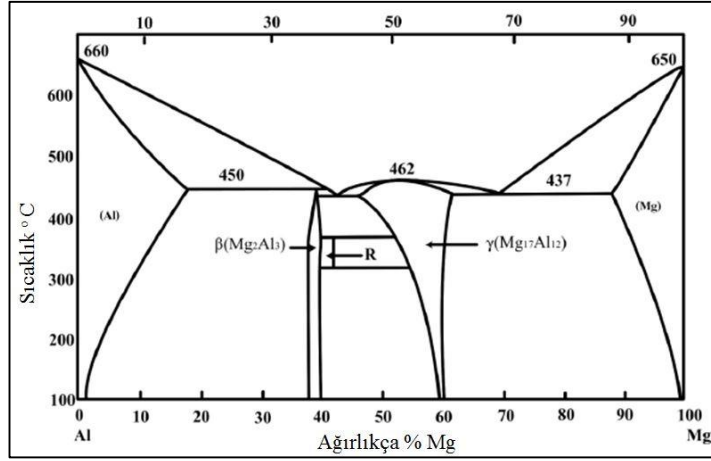


Şekil 2.3. Al- Si denge diyagramı [40].

Kokil dökümde ise, ötektik katılaşmanın 9 °C'lık bir aşırı soğuma sonucu oluştuğu ve matris içinde ince Si kristallerinin dağıldığı gözlenmektedir. Si miktarı % 7-12 aralığında Al-Si alaşımları yüksek mukavemet gerektiren, yüksek sıcaklıkta aşınma direnci istenen uygulamalarda tercih edilmektedir. Al-Si alaşımları genellikle kokil ve basınçlı dökümle şekillendirilmektedir. Si ilavesi ile alaşım döküm özellikleri ve korozyon direnci artmaktadır. Tane inceltme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme, korozyon direnci ve mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Bakır korozyon direncini, demir ve magnezyum ise sünekliği azaltmaktadır. Kum ve kokil döküm metodu ile üretilebilmektedir. SC 94 alaşımı ise sızdırmazlık istenen uygulamalar için geliştirilmiştir. Silisyum alüminyuma % 13-22 Si master alaşımı halinde ilave edilmektedir [37].

2.1.3. Magnezyum

Alüminyum alaşımlarında, Mg'un etkisi bakıra benzemektedir. Mg ötektik sıcaklıkta alüminyumda % 14,9 oranında çözünürken oda sıcaklığında % 2,9 oranında çözünmektedir. Daha yüksek Mg değerlerinde ise, kırılğan β fazı oluşmaktadır [41]. Mg ilavesi alaşıma yüksek mukavemet, korozyon direnci ve iyi kaynak kabiliyeti kazandırmaktadır. Özellikle denizcilik sektöründe yüksek mekanik özellikler ve ince taneli yapı tercih edilmektedir [42]. Şekil 2.4'de Al-Mg denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.4. Al-Mg denge diyagramı [30].

Döküm Al-Mg alaşımları genellikle, kum döküm metodu ile üretilmektedir. Bu alaşımların ergitme sırasında oksitlenme eğilimi yüksek olduğundan dolayı, ergitme kontrollü ortamlarda yapılmalıdır. Al-Mg alaşımlarında Cu ve Nikel kirliliği krozyon direncini düşürür. Demir ve mangan mekanik özelliklere olumsuz yönde etki etmektedir. Al-Mg alaşımlarına Si ilave edildiğinde, Mg_2Si metaller arası bileşiği oluşmakta ve alaşımların sertliği artmaktadır. İşlenebilirlik kabiliyeti yüksek olan bu alaşımların korozyon direnci de yüksektir [37].

2.1.4. Çinko

Alüminyum döküm alaşımlarında çinko, sıcak yırtılmaya sebebiyet verdiğinden dolayı, nadiren kullanılmaktadır. Çinkonun en önemli etkisi, alaşımların mukavemetini ve işlenebilirlik kabiliyetini artırmasıdır. Doğal yaşlandırma özelliğinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca kaynaklandırılabilirlik özelliğini arttırmaktadır. Çinko, bakır ile birlikte kullanılarak yeni alaşımlar geliştirilmiştir. % 10-15 arasında çinko, % 2-3 Cu içeren alüminyum alaşımlarında Zn mukavemeti arttırmakta, Cu ise, sıcak yırtılma ihtimalini azaltmaktadır. Silisyum bu alaşımlarda akıcılığı arttırmakta, sünekliği ise azaltmaktadır. Nikel, krom, mangan kullanıldığında ise, sıcak yırtılma azalırken, korozyon direncini arttırmaktadır. Mg mukavemeti arttırırken, sünekliği azaltmaktadır. Kadmiyum, kurgun, kalay dökülebilirlik ve işlenebilirlik özelliklerini geliştirmektedir. Bu alaşımların mikro yapıları basittir. Cu ve çinkonun büyük kısmı katı eriyik halindedir. Kalan kısmı tane sınırlarında ötektik ayrışması halindedir. Bu

gruptaki alaşımlarda Zn:Mg oranı birden büyüktür. Zn:Mg oranı yüksek olduğunda mukavemet artarken, gerilmeli korozyon direnci azalmaktadır. Cu, gerilmeli korozyona duyarlılığı azaltmaktadır. Çinko, magnezyum gibi ergitme sırasında saf olarak veya Al-% 25 Zn master alaşım halinde ilave edilebilmektedir.

2.1.5. Krom

Alüminyum içinde katı halde çok düşük çözünürlüğe sahiptir. $CrAl_7$ intermetaliğini oluşturmaktadır. Kaba bir metallar arası bileşik olan $CrAl_7$, titanyum, ilavesi ile inceltilmektedir. % 0,15-0,25 oranında krom, Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının gerilmeli korozyon direncini arttırmaktadır. Sıvı metale krom Al % 2 Cr master alaşım halinde ilave edilmektedir [37].

2.1.6. Kalay

Alüminyum döküm alaşımlarında sıcak yırtılma ve korozyon direnci üzerine olumsuz etkilere sahiptir. Yüksek ve düşük sıcaklıklarda korozyon direncini azaltmaktadır. Kalay içeren alaşımlar, özellikle yatak ve kovanlar için geliştirilmiştir.

2.1.7. Mangan

Alüminyum döküm alaşımlarına Mangan düşük miktarlarda ilave edilmektedir. Korozyon direncini azaltmadan, mekanik özellikleri arttırmaktadır. % 0,75'e kadar mangan ilavesi, döküm alaşımlarında sertliği arttırmakta ve sünekliği azaltmaktadır. Sıvı metale, Al % 10 Mn master alaşımı olarak ilave edilmektedir.

2.1.8. Demir

Alüminyumun retimi aşamasında, ergitme aşamasında ortamdaki bileşime dahil olan ve yapıda yaklaşık olarak % 0,8-2 miktarlarında bulunmaktadır. Fe, Al ile Fe-Al ara fazını oluşturmaktadır. Mikro yapıda gevrekleşmeye ve korozyon direncinin düşmesine sebep olmaktadır [37]. Artan demir miktarının diğer olumsuz bir etkisi de, alaşımın tane yapısının kabalaşmasına yol açmasıdır. Al alaşımında max. % 1,3

oranında bulunan demir, bu sınırın üzerinde ise, süneklığı azaltmaktadır. 220 alaşımında ise max % 0,30 Fe bulunmaktadır. Bunun üzerindeki değerler, çekme mukavemetini ve süneklığı azaltmaktadır. Fe, alüminyumda en çok bulunan impuritedir. Ergimiş alüminyumda çözünürlüğü ise çok yüksektir. Bundan dolayı ergitme, alaşımlandırma veya diğer işlemler sırasında kullanılan ekipmanlardan sıvıya geçebilmektedir. Demirin katı halde çözünürlüğü ise çok düşüktür (~0,05%). Alüminyumlarda bu miktardan daha fazla bulunan demir, alüminyum ve diğer elementlerle birleşerek, demirce zengin intermetalikler oluşturmaktadır. Sınırlı çözünürlüğünden dolayı Fe, mukavemette sınırlı bir artış ve orta derecede (yükseltilmiş) sıcaklıklarda daha iyi sürünme özelliği kazandırmaktadır. Fe ve Mn alaşımları ötektik bileşim civarında iyi bir mukavemet ve sünekliliğin kombinasyonu oluşturmaktadır. Demir “Al-Cu-Ni” alaşımlarına yüksek sıcaklıktaki mukavemet artırmak amacıyla da ilave edilir [39].

2.1.9. Nikel

Nikel yüksek sıcaklıklarda malzemeye mukavemet kazandırmak için ilave edilmektedir. Sıvı metale, Al-% 20 Ni master alaşımı halinde ilave edilmektedir.

2.1.10. Titanyum

Titanyum, genellikle boksitte çok az miktarda bulunan TiO_2 'den gelmektedir. Bunun haricinde döküm alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılmaktadır. Tablet veya master alaşımlar ile ilave edilmektedir.

2.1.11. Zirkonyum

Zirkonyum, tane inceltici gerilmeli korozyonu engelleyici ve yüksek sıcaklıklarda sürünme mukavemetini arttıran bir alaşım elementidir. Sıvı metale, Al-% 5 Zr master alaşım halinde ilave edilmektedir [42].

2.2. Al-Si-Mg ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ

Al-Si-Mg alaşımları, genel olarak yüksek mekanik özellikler, iyi işlenebilirlik, yüksek gerilme değerlerine sahip, sünek bir malzemedir. Yüksek gerilme değerlerine ihtiyaç duyulan yapısal parçalarda, uçak sanayisinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [36].

Al-Si-Mg döküm alaşımları grubunda en yaygın olarak kullanılan alaşımdır. Üretilen parçaların kalitesi, sıvı metalin hazırlanması ve yolluk sisteminin tasarlanması, katılma şartları gibi önemli parametrelerle çok yakından ilişkilidir [10,11].

Döküm Al-Si ikili alaşımlarının mekanik özellikleri, küçük miktarda (yaklaşık % 0,35) magnezyum ilavesi ile iyileştirilebilmektedir. En önemli alüminyum döküm alaşımı, Al-Si-Mg alaşımıdır. Bu alaşım dökülebilirlik özellikleri oldukça yüksektir. Alaşımın magnezyum silikat (Mg_2Si) içeriği % 0,5-0,6 arasındadır ve çökelti mukavemetlenmesi Mg_2Si 'nin kararlılığına atfedilmektedir.

Al-Si-Mg alaşımı, sıvı metale % 0,025 Na ilavesi ile modife edildiğinde, kum döküm ötektik yapısı incelmekte ve ötektikteki silisyum parçacıkları küçülmekte ve daha küçük tane yapısı olmaktadır. Sodyum ile modifiye edilmiş alaşımlarda, modife edilmemiş alaşımlara göre, üstün bir yüzey kalitesi ve dendrit kolları arasında daha az mikro boşluk oluşumu sağlanmıştır [29]. Bu alaşım grubu, bileşiminde % 1,3'ü kadar eşit oranda Si ve Mg bulundurmaktadır. Vidalar, makine parçaları, mobilya ve köprü taşıma elemanlarının üretiminde bu alaşım kullanılmaktadır [43]. Klasik döküm yöntemleri ile üretilen Al-Si alaşımlarının mukavemeti düşük miktarlarda Mg ilavesi ile iyileştirilebilmektedir. Al-Si alaşımları, içerisindeki silisyum miktarına paralel olarak tribolojik özellikleri değişmektedir. Yaşlandırma sırasında oluşturulan Mg_2Si çökeltileri, mekanik ve tribolojik özelliklerin artırılmasına katkı sağlamaktadır [44]. Al-Si-Mg alaşımları, iyi dayanım ve süneklik gerektiren karmaşık dökümler, transmisyon kutuları, kamyon aksları muhafazaları, kamyon jantları, silindir blokları, tren tankları gibi, birçok yerde kullanılmaktadır [29]. Al-Si-Mg alaşımları, yüksek miktarda ötektik içermesi nedeni ile yaşlandırma ısıl işlemi ile üstün mekanik özellikler sergileyebilmektedir [45].

2.2.1. Döküm Kalitesine Etki Eden Faktörler

Al-Si-Mg alaşımları, akıcılık ve beslemebilme yeteneği, dayanım, süneklik ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeni ile geliştirilmişlerdir. Bu nedenle, alaşımların kimyasal kompozisyonları, dövme Al-Si-Mg oldukça farklıdır. Kum kalıp, metal kalıp ve pres döküm yöntemleri ile üretilebilmektedir. Sayısal notasyon sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu şeklinde belirlemede kullanılır. İlk basamak alaşım gurubunu göstermektedir. Bir kesir işareti ile ayrılan son basamak ürünün biçimini göstermektedir. Orijinal alaşım veya impurite sınırları sayısal notasyondan önce bir seri harf ile gösterilmektedir [29].

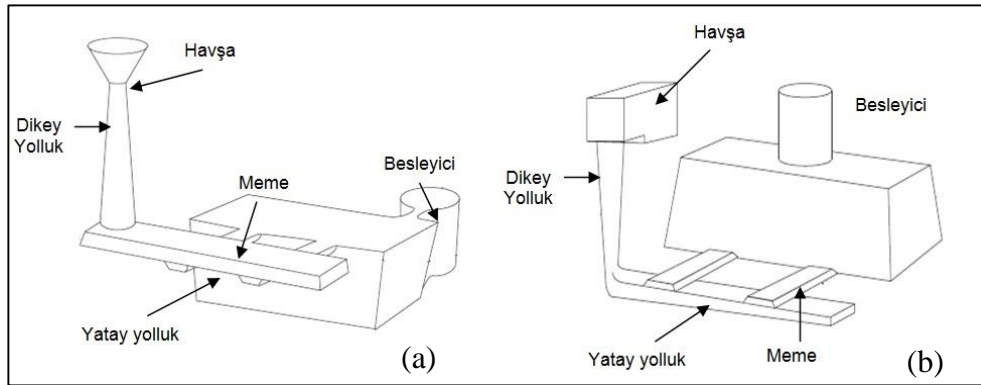
Alüminyumun Si ve Mg ile yaptığı alaşımlar, mekanik özellikleri iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir [28]. Al döküm alaşımlarının pek çoğu, ötektik reaksiyona neden olan düşük ergime sıcaklıkları, iyi akıcılık ve dökülebilirlik özelliğine sahiptir. Akıcılık, sıvı metalin bir kalıbı katılaşma olmadan doldurma yeteneğidir. Çizelge 2.2’de döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması verilmektedir. Üç haneli rakamdan sonra nokta konur ve noktayı takip eden sayı döküm veya ingot olduğunu gösterir. ‘0’ sayısı döküm, ‘1’ veya ‘2’ sayısı ingot olduğunu ifade etmektedir [46].

Çizelge 2.2. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [27].

Döküm Alüminyum Alaşımları	
1xx.x	Ticari saflıkta alüminyum-Yaşlandırılmaz
2xx.x	Al-Cu alaşımları-Yaşlandırılabilir
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Si-Mg alaşımları-Biraz yaşlandırılabilir
4xx.x	Al-Si alaşımları-Yaşlandırılmaz
5xx.x	Al-Mg alaşımları-Yaşlandırılmaz
7xx.x	Al-Mg-Zn alaşımları-Yaşlandırılabilir
8xx.x	Al-Sn alaşımları-Yaşlandırılabilir

2.2.1.1. Yolluk Sistemi

Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurmasını sağlayan dikey ve yatay kanalların toplamı, yolluk sistemi olarak adlandırılmaktadır. Yolluk sistemleri, dökülen parçanın geometrisi ve boyutları ile dökülen alaşımın kompozisyonuna göre farklılık göstermektedir. Potadan dökülen sıvı metal, yolluk sistemini oluşturan elemanlar sırasıyla, döküm havuzu (havşa), dikey yolluk, topuk, yatay yolluk ve meme kesit alanlarını kat ederek kalıp boşluğunu doldurmaktadır. İlâveten, filtrelerde yolluk sistemin üzerinde kullanılmaktadır [47]. Döküm parçaların üretimi için kalıplarda kullanılan yolluk sistemi, sıvı metalin kalıp boşluğuna doldurulması ve katılaşma işlemi ile yakından ilişkilidir. Katılaşma sırasında meydana gelmesi muhtemel hacimsel daralmaları tolere etmek için kalıp içerisine yerleştirilen sıvı metal depolarına besleyici denir [48]. Yolluk sistemi ve besleyici kullanımı döküm malzemenin kalitesinin tanımlanmasında önemli faktörlerdir. Şekil 2.5’de basit geometriye sahip bir parçanın kötü ve iyileştirilmiş yolluk sistemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.5. a) Basit geometriye sahip döküm parça kötü ve b) iyileştirilmiş yolluk sistemi [10].

Döküm Havuzu veya Havşa

Sıvı metalin potadan yolluk sistemine temas ettiği ilk kısımdır. Dikey yolluğun üst kısmı koni biçiminde genişletilerek uygulanmaktadır. Havşa, sıvı metalin kalıba rahat dökülmesini sağlamak için, uygun şekilde tasarlanmaktadır ve sıvı metalin kalıba rahat girişini sağlamaktadır [49].

Dikey Yolluk

Döküm havuzu veya havşaya dökülen sıvı metalin cürufluğa veya yatay kanala gidişini sağlayan düşey kanala gidici adı verilmektedir. En önemli özelliği sıvı metalin dikey yolluktan akması sırasında girdap etkisi oluşturmayacak bir akış oranına ve kesite sahip olmasıdır. Genelde dairesel, bazen dikdörtgen kesitli daralan kesit alanına sahip olarak uygulanmaktadır. Sıvı metalin cürufluk ve memelere uygun hızla girebilmesini sağlamak için gidici kesiti, yolluğun diğer kısımlarındaki kesitlerle bir uyumlu olmalıdır [47].

Topuk

Cürufluğu bulunmayan basit yolluk sistemlerinde tercih edilmektedir. Uygulanması memenin arka kısmını derinleştirilmesi şeklindedir. Gidicinin tabanına rastlayan bu kısım topuk olarak adlandırılmaktadır. Topuk, gidiciden düşen sıvı metal yön değiştirirken, hızının yaklaşık olarak 1/2 oranında azaltılmaktadır. Aynı zamanda, ilk dökülerek katılan sıvı metal parçacıklarının kalıp boşluğuna girmesini engellemektedir [47].

Yatay Yolluk

Sıvı metalin kalıp boşluğuna transferi sırasında, çoğunlukla yatay doğrultuda hareketini sağlayan yolluk sistemi elemanıdır. Sıvı metalin kalıp boşluğuna iletilmesinde gerekli sıvıyı meme bağlantılarını taşımaktadır. Yatay yolluk sistemi üzerindeki meme bağlantı elemanı sayısı ve durumuna göre, gerekli akış oranını memelerde eşit sağlayabilmesi için kademeli veya kesit alanı inceltirilerek, sıvı akışı kontrol edilebilmektedir [10].

Cürufluk

Cürufluklar mala yüzeyinde bulunan yatay kanallardır. Dikey yolluktan inen sıvı metalin yönünü yataya dönüştüren yatay yolluğun üzerindedir. Sıvı metalin yüzeyindeki oksit ve inklüzyonların kalıp boşluğuna ulaşmasını engellemektedir.

Cüruf tutma görevleri yüzünden cürufluk ismini alırlar. Üst derecede veya alt derecede açılan yatay kanallardır [47].

Meme

Yolluğun kalıp boşluğuna açılan kısmı, meme bağlantısı olarak adlandırılmaktadır. Memeler, dökülen parçaların geometrisine ve döküm şartlarına göre farklılık göstermektedir. Özellikle meme kesit alanındaki sıvı metal hızı kritik sıvı metal hızı olarak m/sn olması gerekmektedir. Meme bağlantıları kendi aralarında üçgen, kare, dikdörtgen, bıçak ağzı, yamuk çapak ağzı, balıksırtı ve yarım yuvarlak meme olarak ifade edilmektedir [47].

Filtre

Yolluk sisteminin iyileştirilmesinde sıvı metal akışını, akış hızını kontrol etmek, cüruf, ve inklüzyonların kalıp boşluğuna girişini engellemek için filtre kullanılmaktadır [50]. Her ne kadar uygun yolluk sistemi kullanılarak döküm parçalarda inklüzyonların girişi minimize edebilmekle beraber, fitrelerin kullanımı inklüzyonların giderilmesini sağlamakta ve onarım maliyetini azaltmaktadır [49]. Filtrasyon işleminde preslenmiş seramik filtreler, köpük filtreler, ekstrüze filtreler, dokuma filtreler ve çelik elekler kullanılmaktadır [51]. Alüminyum alaşımlarından filtrasyon ile inklüzyonların giderilmesi, döküm parçaların yapısına, özelliklerine ve işlenebilirliğine katkı sağlamaktadır. Filtrasyonun kullanılması ile hasarlı döküm parça sayısında önemli miktarda azalma sağlanabilmektedir. Filtre kullanımında genel problem, kalıp boşluğuna nasıl yerleştirileceği, kalıp dolma zamanına etkisi ve filtre edilen inklüzyon tipidir [52].

2.2.1.2. İkincil Fazlar

Ötektik alaşımlarda, alaşım elementlerinin ilavesi ile yapıda oluşan metalik fazlardır. Alaşımı oluşturan elementlerin kafes sistemlerinde herhangi bir değişim olmaz. Alüminyum alaşımlarında ikinci fazlar genellikle dispersoid ve çökelti halinde ikincil fazlar küçük miktarlarda bulunabileceği gibi, daha büyük ölçülerde de olabilmektedir.

Örneğin Fe'in yapıda demir bazlı intermetalikleri, Mg ilavesinin Mg₂Si çökeltilerini oluşturması gibi. Elementler alaşımda kendi kafes sistemlerini aynen muhafaza ederler. İlave oranına bağlı olarak homojen bir yapıda her iki fazın da kendine özgü karakterislik özellikleri gösterdiğini ortaya koymaktadır [53].

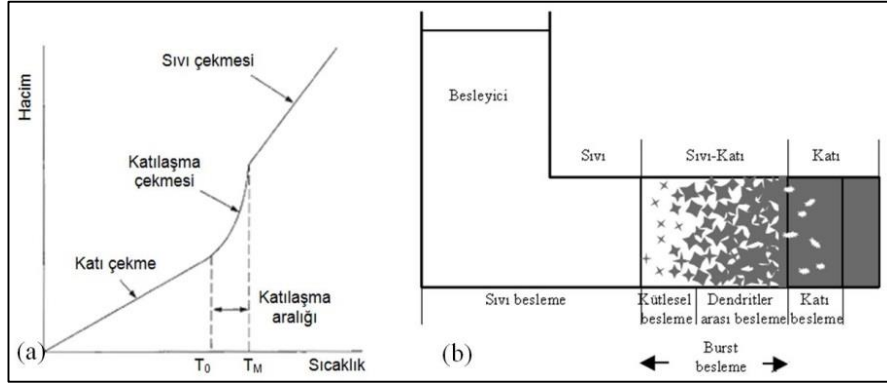
2.2.1.3. İnküzyonlar

İnküzyonlar, sıvı metal içerisinde, çevresel faktörlerin etkisiyle oluşan safsızlıklar olarak tanımlanmaktadır. İnküzyonların sıvı metalden tamamen giderilmesi mümkün değildir. Özellikle atmosferik şartlara bağlı olarak oluşan iç inküzyonların belirli bir kısmı, filtrasyon işlemleri ile sıvı metalden ayrılabilir. Bunlar oksit türü inküzyonlardır. Süfür ve nitrür tipi iç inküzyonların sıvı metalden tamamen giderilmesi söz konusu olur değildir. Ancak ilave ısı işlemleri yapıda oluşan etkileri minimize edebilmektedir [54].

2.2.1.4. Boşluk oluşumu

Çekme boşlukları (hacimsel daralma), alaşımın katılaşması sırasında katı ve sıvı fazlarının yoğunluk farklarından kaynaklanmaktadır. Saf alüminyum, sıvı ve katı fazların yoğunluk farkından dolayı, sıvı hacminin yaklaşık % 7'si kadar hacimsel daralma (çekme) göstermektedir [10,11]. Alüminyum alaşımlarının sıvı-katı faz dönüşümü sırasındaki hacimsel daralma miktarı yaklaşık % 5-6'dır. Döküm parçalarda hacimsel daralmayı engellemek ve dendritler arası boşlukları azaltmak için, sıvı metal ile takviye edilmesi gereklidir. Şekil 2.6.a'da döküm sıcaklığından oda sıcaklığına soğuyan alaşımın hacimsel değişimi görülmektedir. Çekme boşlukları mikron olan milimetreye kadar geniş aralıkta olabilmektedir. Yapıda çekme boşluğu oluşumunun engellenmesi için (Şekil 2.6.b'de görüldüğü gibi) döküm parçanın beslenmesi gerekir. Katılaşma sırasında beş farklı besleme mekanizması oluşmaktadır. Çizelge 2.3'te katılaşma sırasında oluşan besleme mekanizmaları verilmektedir [10]. Ayrıca döküm malzemelerdeki bifilmelerden kaynaklanan boşlukların oluşmasında, iki önemli mekanizma olduğu öne sürülmektedir. Bu durum yeterli ve yetersiz besleme olmak üzere iki kısımda ele alınmaktadır. Eğer yeterli besleme var ise, bifilmin çevresindeki basınç, metalostatik basınç ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir ve bifilmin içine

difüze olan gaz basıncı, sadece katılaşma oranı ile kontrol edilebilmektedir. Yetersiz beslenme durumunda ise, ortalama büyüme oranı, çekme (hacimsel daralma) ve kompozisyonun içerdiği hidrojen miktarı tarafından kontrol edilmektedir [22].



Şekil 2.6. a) Sıvı fazdaki metalin, katılaşması esansındaki üç farklı şekilde çekmesi; sıvı, katılaşma ve katı çekmesi, b) katılaşma sırasında oluşan besleme mekanizmaları [10].

Çizelge 2.3. Katılaşma sırasındaki beş besleme mekanizması [10].

Besleme Mekanizması	Mekanizma
Sıvı besleme	Sıvı metalin hacimsel hareketi ile oluşan çekmenin beslenmesi.
Kütlesel besleme	Eşeksensel tanelerin ve sıvının hacimsel hareketinin birleşiminden oluşan çekmenin beslenmesi
Dendritler arası besleme	Dendritler arasında oluşan çekmenin birincil dendrit kolları arasındaki boşlukların beslenmesi
Burst besleme	Süreksiz besleme ve dendritler arasında hapsolan sıvı bölgelerin beslenmesi
Katı besleme	Katı malzemede oluşan çekmenin beslenmesi.

2.3. Al-Si-Mg ALAŞIMLARINDA MİKROYAPI KONTROLÜ

Yapıda oluşan intermetalik fazlar ve bu fazların dağılımı, boyutu gibi değişkenlerin, malzemenin mikro yapısal özelliklerini özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bununla beraber kimyasal kontrol, intermetalik fazların kontrolü ve intermetaliklerin boyutu ve dağılımın üniform olarak sağlanması için, katılaşma şartlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan tane incelticiler Al-Si alaşımlarında ötektik ve hiperötektik yapıları etkilemek için ilave edilmektedir. Tane incelticilerin kullanımı, makro ve mikro yapıların döküm işlemleriyle kontrol edilebilmesine bir örnektir [55].

2.3.1. Tane Yapısı

İngot alüminyum döküm alaşımlarında yapı, dışta chill bölgesi, sonra sütunsal bölge ve merkezde eşksenel taneli bölgeden oluşmaktadır. İzotropik özelliklerin sağlanması için, genellikle eşksenel taneli yapı tercih edilmektedir. Master alaşımların ilavesiyle, katılma esnasında, heterojen tane çekirdeklenme ile intermetalik faz parçacıkları tane boyutu şekillenir. Ayrıca, katılma oranı ve alaşımın birleşimi de tane yapısının üzerine etkilidir. Döküm işleminde normal katılma şartlarında tane incelticiler kullanıldığında yapı, kaba sütunsal veya eşksenel tanelerden oluşmaktadır. Alaşımın inceltmiş tane yapısı, katılma sırasındaki çatlak direnci ve katılma sonrası soğuma ile ilişkilidir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda çekme kuvveti dayanımını azalttığından dolayı, kaba taneli yapılarda tane sınırı oluşumlarının hassasiyeti de artmaktadır. Etkili tane inceltme işleminin avantajları;

- besleme niteliğinin artması,
- sıcak yırtılma dayanımının artması,
- mekanik özelliklerinin geliştirilmesi,
- basınç sızdırmazlığını ve ısı işlemlere tepkiyi geliştirmesi [55].

2.3.2. Dentrit Kolları Aralığı

Bu durum bütün ticari alaşımları için alaşımlarda sıvı metalin katılması, sıvı çözültide dentritlerin oluşumuyla başlamaktadır. Birinci dentrit kollarının yönlü ayrışmasına benzeyen ve sadece tek bileşime sahip olan dentritik yapı hücreler, katılmaya etki eden parametreler kullanılarak kontrol edilmektedir. Çekirdeklenme aşamasında kritik yarıçapa ulaşan katı sayısının az olması durumunda dentritik yapı oluşumu ihtimali artmaktadır [55].

2.3.3. Modifikasyon

Hipoötektik Al-Si alaşımları, yapısal olarak geliştirilebilen alaşım grubuna girmektedir. Genelde % 5 silisyum içeren alaşımlarda, yapısal gelişimler

kaydedilmektedir. Hipoötektik Al-Si alaşımlarında ötektik ağ içinde çok ince lameller veya lifler halinde bulunmaktadır. Ayrıca katılma oranındaki artışın, benzer yapılar içinde yarar sağladığı görülmüştür. Birçok araştırmada silisyum kristallerinin ötektik ile birlikte büyüme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ötektiğin gelişmesi, ince lamellerin iyi dağılımı ile olmaktadır. Kalsiyum ve sodyum ergimiş alüminyuma metalik veya tuz halinde ilave edilebilir. Çoğunlukla vakumlanmış veya paketlenmiş sodyum kullanılmaktadır. Bazen stronsiyumda kullanılabilir ve yaklaşık olarak da % 10-90 arasında stronyum içeren alüminyum ve stronsiyum master alaşımları kullanılmaktadır. Antimon yapısal değişikliklerin sürekliliğini korumaktadır. Bu durumda farklı yapısal değişiklikler ile inceltmiş ötektikle, iğnemsiz düzenli bağın mukayese edilmesini sağlamaktadır. İki durumda modifiye elementleri görevini sağladığında, yapısal inceltme gerçekleşir. Hiperötektik Al-Si alaşım kompozisyonlarının makine imalatı ve parçaların dökümünde, tane inceltme temel işlemdir. Ergiyik alaşım içerisinde fosfor ilavesi, silisyum ötektik bileşiminden metalik fosfor veya fosfor içeren bileşikler oluşturur. Düşük fosfor konsantrasyonları, inceltmiş yapı elde etmede sonuç vericidir [55].

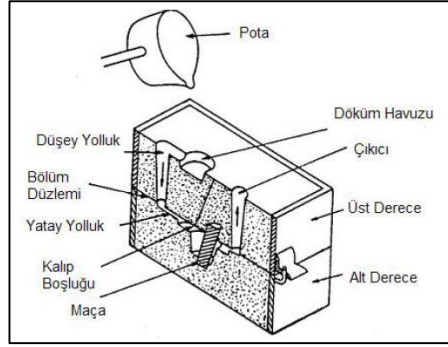
2.3.4. Tane İnceltme İşlemleri

Bütün alüminyum alaşımlarında uygun tane incelticiler kullanıldığında alaşımın tamamen eşeksenel ve ince taneli yapılı olması sağlanabilmesidir. Al alaşımlarında en yaygın kullanılan tane incelticiler, titanyum ve bor'dur. Al-Ti incelticileri, genellikle % 3-10 titanyum içermektedir. Aynı aralıklarda Al-Ti-B incelticileri ile, % 0,2 bor içeriği ve yaklaşık %5-50 titanyum-bor oranı kullanılmaktadır. Tane inceltmenin temel ilkelerinin bilinmesine rağmen, laboratuvarı ortamındaki teori veya mekanizmalar henüz endüstriyel alana uygulanamamıştır. $TiAl_3$, alüminyumun kristal çekirdeklenmesinde aktif bir faz olarak bilinmektedir. Çünkü kristolografik olarak benzerlik göstermektedir. Tane inceltme, önceden tahmin edilen çok düşük titanyum konsantrasyonlarından Al-Ti'un % 0,15 bileşiminin peritektik nokta teorileri ile yapılabilir. Ti-Al-B tipi tane çekirdeklenmesinde çok karmaşık yapılı borların aktif olduğunu göstermektedir [55].

2.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA DÖKÜM YÖNTEMLERİ

2.4.1. Kum Kalıba Döküm

Metalik parçaların üretiminde kum kalıba döküm yöntemi, oldukça yaygın kullanılan bir metottur. Kum kalıbın şematik gösterimi, Şekil 2.7’de verilmiştir. Üretimi planlanan olan döküm parçası, sıvı metalin kumdan hazırlanan kalıp boşluğuna dökülmesi ile elde edilmektedir. Ancak döküm parçasının kalitesi için, metal ve kalıp arasında meydana gelebilecek olan etkileşimler minimum olmalıdır. Bu sorun, kumda bulunan nem seviyesi minimuma indirilerek veya kalıp yapımında kullanılan kum karışımına uygun inhibitörler ilave edilerek giderilebilmektedir [56].

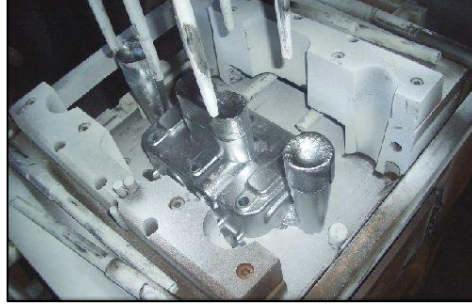


Şekil 2.7. Kum kalıbın şematik gösterimi [57].

Yüksek sıcaklıklarda yapılan dökümlerde, metal ve kalıp arasındaki etkileşimin de yüksek olması beklenmektedir. Dolayısıyla, kalıp kumuna ilave edilen inhibitör miktarı da bu oranda yüksek olmalıdır. Ayrıca, ilave edilen alaşım elementleri, alaşımının öz kütlesini değiştireceği için, ilave edilecek inhibitör oranı da değişmektedir. Döküm parçanın kalın kesitleri yavaş soğuduğu için bu kısımlarda inhibitörün yanma riski bulunmaktadır [56].

2.4.2. Kokil Döküm

Kokil döküm, aynı zamanda permanent döküm olarak da adlandırılmaktadır. Kokil döküm yönteminin gösterimi, Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Kokil dökümün yöntemi [58].

Katılaşma sırasında kalıp içerisindeki sıvı metale, 40-1000 MPa arasında bir basınç uygulanmaktadır. Bu işlev sıvı metalin içinde sıkışıp kalmış olan gaz boşluklarının giderilmesini ve katılaşma sırasında meydana gelen hacimsel daralmanın (çekmenin) en aza indirilmesini sağlamaktadır. Buna ilaveten, dökülen metalin yüksek hızlarda (100-1000 °C/s) soğuması ile, ince taneli mikroyapı elde edilmektedir. Dökülen parçanın kolayca kalıptan çıkarılabilmesi ve kalıba yapışmasını önlemek için yağlayıcılar kullanılmaktadır. Kokil döküm, istenilen şekle en yakın ölçülerde ürünün elde edilmesi, yüksek hızlarda üretim yapılması, elde edilen ürünün mukavemet değerlerinin yüksek olması, yüksek yüzey kalitesi ve üretilen parçanın işleme gereksiniminin minimum olması gibi avantajlara sahiptir [58].

2.4.3. Yüksek Basınçlı Döküm

Doğrudan yüksek basınçlı ve dolaylı yüksek basınçlı olmak üzere, iki farklı döküm yöntemi vardır [59]. Sıvı metal, bir kalıbın alt yarısı içine dökmek, kalıbın üst kısmı kalıbı tamamen kapatacak şekilde indirilmektedir. Sıvı metal, (tek yönlü basınç altında) kalıbın şeklini alarak katılaşmaktadır. Bu yöntem, metal matrisli kompozit üretiminde ve özellikle de fiber takviyeli metal matrisli kompozit üretiminde kullanılmaktadır [60]. Katılaşma sırasında uygulanmakta olan yüksek basınç, katılaşma çekmesi, gaz ile ilgili gözenekler ve metal takviye ara yüzey boşluklarının

engellenmesine yardımcı olmaktadır. Dolaylı yüksek basınç döküm, kokil döküme benzer şekilde uygulanmaktadır. Farklı olarak sıvı metal, yüksek basınçlı döküm kolu yardımı ile kalıba dökülmektedir. Piston hızını kontrol edilerek, sıvı metal doldurma hızı değiştirilebilmektedir. Sıvı metal doldurma hızı, gözeneksiz döküm elde etmek ve türbülans akışın oluşumunu en aza indirmek için önemlidir. Doğrudan yüksek basınçlı döküm ile dolaylı yüksek basınçlı döküme mukayese edildiğinde, daha fazla malzeme kaybı olması sebebi ile veriminin daha düşük olduğu anlaşılmaktadır [59].

2.4.4. Yarı Katı Metal Döküm

Yarı katı metal dökümün tercih edilme sebepleri, yüksek üretim verimliliği, yüksek üretim hacmi ve düşük üretim maliyetleridir. Bütün bunlara rağmen, bu yöntemle üretilen parçalarda da üretim hataları oluşmaktadır. Kalıbın, yarı-katı ile doldurulması sırasında oluşan gazların tahliye edilememesi sonucu gözenekler oluşmaktadır. Ayrıca kalıbın içinde (katılaşma sırasında) sıcak yırtılma meydana gelmektedir [61]. Malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatmanın yanında alaşımın mekanik özelliklerini arttırmak için ısıl işlemlerin de başarılı olmasını engellemektedir. Bu sorunun giderilmesinde genellikle yarı katı metal döküm yöntemi kullanılmaktadır. Yarı katı bir bulamacın sıcaklığı düşüktür ve aynı alaşımın eriyik hali ile kıyaslandığında daha yüksek viskoziteye sahiptir. Düşük sıcaklık, daha kısa sürede katılaşma ve daha büyük bir enerji verimliliği sağlamakla beraber, kalıp ömrünün uzamasına da neden olmaktadır. Ayrıca daha yüksek bir viskoziteye sahip olan sıvı metal, döküm boşluğunda daha az türbülansa ve gözenek oluşumuna imkan verip parçanın mükemmel mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır [62].

BÖLÜM 3

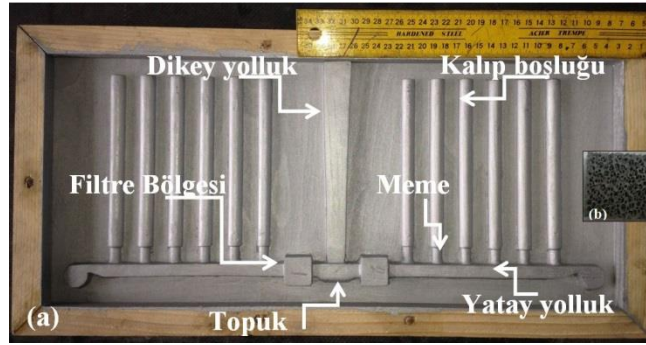
MALZEME VE METOT

Bu çalışmada, döküm Al-Si-Mg alaşımına farklı miktarlarda Cu (% 0,1-0,2 ve 0.4) ve Fe (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) ilave edilerek üretilen alaşımların mekanik özellikleri incelenmiştir. Yolluk sisteminde 20 ppi hücre boşluğuna sahip seramik köpük filtrelele kullanılarak, 7 farklı döküm alaşımı üretilmiştir. Her alaşım grubundan 12 adet çekme testi numunesi hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan yolluk sistemi elemanlarının kesit alanları, hızları süreklilik ve enerjinin korunumu yasalarına göre hesaplanmıştır. İkinci aşama, farklı bakır ve demir miktarına sahip Al-Si-Mg alaşımının ergitmesi ve sıvı metalin hazırlanmasını ve döküm işlemini kapsamaktadır. Üçüncü aşamada, farklı Cu ve Fe miktarına sahip alaşımların karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilen alaşımlar optik mikroskop (OM), Tarama Elektron Mikroskobu (SEM), yoğunluk ve sertlik (makro ve mikro) ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Çekme testi yapılan numunelerin kırık yüzeylerinde, kırılmaya sebep olan mikro ve makro döküm hataları, oksit film hataları ve intermetalik fazların etkileri araştırılmıştır. Ayrıca üretilen alaşımların mekanik özellikleri (çekme ve aşınma testleri ile) incelenmiştir.

3.1. MODEL

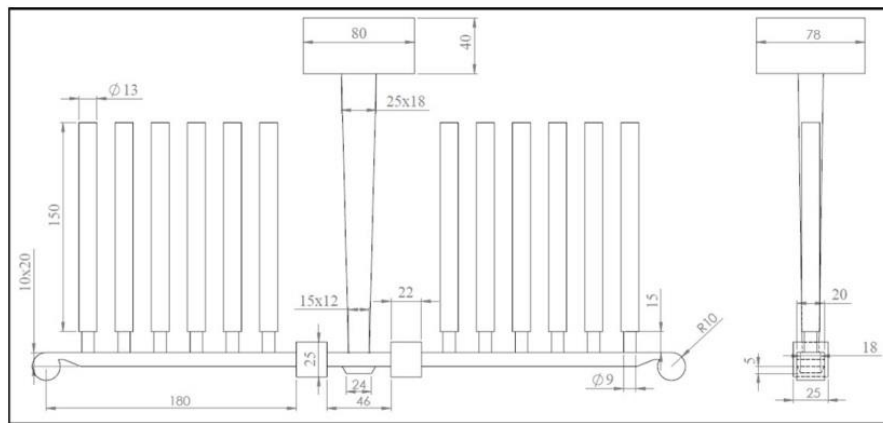
Yolluk sistemi ölçülerinin hesaplanmasında, enerjinin korunumu ve süreklilik denklemleri kullanılmıştır. Dikey yolluğun kesit alanının hesaplanmasında, enerjinin korunumu denklemi ile etkin döküm yüksekliği ve toplam dikey yolluk yüksekliği kullanılmıştır. Yolluk sistemlerinin ve kalıp boşluğunun oluşturulması için ahşap model maça sandığından yararlanılmıştır. Etkin döküm yüksekliği 0,04 m, toplam döküm yüksekliği 0,25 m olarak seçilmiştir. Dikey yolluk kesiti, özellikle hava emişini engellemek ve döküm havuzundaki girdap etkisini azaltmak amacı ile, inceltmiş olarak tasarlanmıştır. Dikey yolluktan düşen sıvının çarpma hızı ve kesit alanına göre topuk tasarlanmıştır. Yatay yollukların uç kısımlarında, sıvı metalin geri dönmesi ile

kendi üzerine katlanmasını engellemek için, uç kısımlara tuzaklar ilave edilmiştir. Ek olarak, sıvı metalin içerdiği inklüzyon ve usulsüzlüklerin uzaklaştırılması ayrıca sıvı metal hızının azaltılması için yolluk sisteminde seramik köpük filtreler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ahşap maça model Şekil 3.1.a'da, dökümde kullanılan Vesuvius İstanbul Refrakter San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilen 20 ppi tane aralığına sahip FOSECO SIVEX silisyum karbür (25x25x22) ölçülerinde seramik köpük filtre Şekil 3.1.b'de gösterilmiştir



Şekil 3.1. a) Kalıplamada kullanılan ahşap maça model, b) seramik köpük filtre 20 ppi.

Çalışmada kullanılan döküm numuneleri ve yolluk sistemlerinin ölçüleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Çizelge 3.1'de ise yolluk sistemlerinin ölçüleri ve sıvı metalin akış hızları verilmiştir.



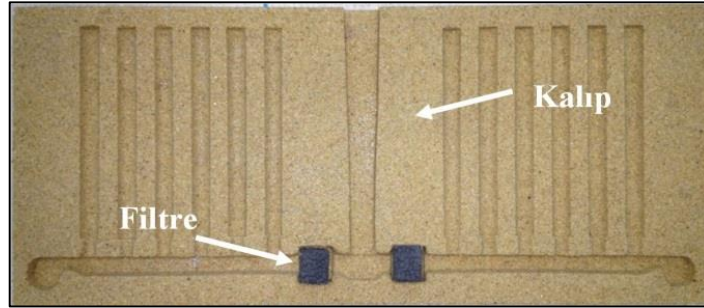
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan döküm numuneleri ve yolluk sistemleri.

Çizelge 3.1. Çalışmada tasarlanan yolluk sistem ölçüleri ve sıvı metal akış hızları.

Yolluk sistemi elemanı	Alan (mm ²)	Kesit ölçüleri (m)	Sıvı metal hızı (m/sn)	Debi (m ³ /sn)	Alan (mm ²)
Dikey yolluk giriş	450	0,025x0,018(Π)	0,88	0,000399	450
Dikey yolluk çıkış	180	0,015x0,012(Π)	2,21		180
Yatay yolluk giriş	400	0,040x0,010(Π)	1		200x2
Meme	800	0,009 (Ø)	0,5		66,66x12
Döküm Parça	1600	0,013 (Ø)	0,25		133,33x12

3.2. KALIPLAMA

Çalışmada kalıp malzemesi olarak, SILTAŞ A.Ş.'den temin edilen 60-70 AFS tane iriliğine sahip silis kumu kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak, alfaset reçine ve serter UNIKON Metalürjiden temin edilmiştir. Kalıplar birbirlerine kelepçe ile bağlanıp, 24 saat bekletilmiştir. Şekil 3.3'de çalışmada kum kalıpları görülmektedir. Kullanılan silis kumun özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir



Şekil 3.3. Dökümde kullanılan kum kalıbı.

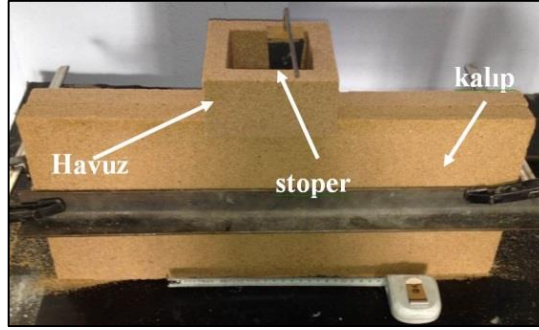
Çizelge 3.2. Kullanılan silis kumunun özellikleri.

Kum Cinci	AFS T. Boyut	Kil Mik.	% SiO ₂	Sinterleşme Sıcaklığı	Yanma Kaybı	Kumun Köşegenliği
Silis kumu	60-70	%0,15	98	1500 °C	0,015 0,030	1,25 1,30

Silis kumu içine, reçine ağırlığının % 0,25 kadar sertleştirici (TH 11) silis kumu ağırlığının % 0,02 kadar reçine (TPA38) ilave edilerek kalıp kumu hazırlanmıştır. Kalıp kumun hazırlandığı mikser Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Kalıbın döküme hazır hali ise Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Mikser.



Şekil 3.5. Döküme hazır hale getirilen kalıp.

3.3. SIVI METALİN HAZIRLANMASI VE DÖKÜM İŞLEMİ

Deneysel çalışmada kullanılan Al-Si-Mg alaşımı, ETİ Alüminyum A.Ş.'den temin edilmiştir. Al-Si-Mg alaşımı ingotlar 15-17 kg ağırlığa ve $2,68 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. 75 Fe 25 Flux yüksek demir içerikli tabletler Bilginoğlu Endüstri A.Ş.'den temin edilmiştir. İngot Al-Si-Mg alaşımın, Fe tabletin ve katot bakırın kimyasal analizleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Al-Si-Mg ingot malzemesinin kimyasal bileşimi.

Malzeme	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Cu	Zn	Ni	B
Al-Si-Mg Alaşım	91,7	7,38	0,40	0,14	0,10	0,016	0,18	0,0087	0,0002	0,0016
Katot Cu	-	-	-	-	-	-	99,9	-	-	-
Fe Tablet	-	0,18	-	75,5	-	0,34	-	-	-	-

İngotlar, Karabük Üniversitesi Döküm Atölyesinde bulunan elektrik direnç ocağı Çizelge 3.4’de gösterilen özelliklerde kullanılarak ergitildi. Ergitme işlemi öncesinde sıvı metal içerisindeki yabancı madde oluşumunu engellemek amacıyla ingotlar temizlendi. Çalışmada hedeflenen Al-Si-Mg bileşimleri, Çizelge 3.5’te verilmiştir. Sıvı metal döküm sıcaklığı 740-745 °C olarak, K-tipi mineral izoleli ısı çift ve kızıl ötesi ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. İstenilen bileşime sahip Al-Si-Mg alaşımları pota transferi olmadan, doğrudan hazırlanan kalıplara alttan akıtmalı olarak aktarılmıştır.

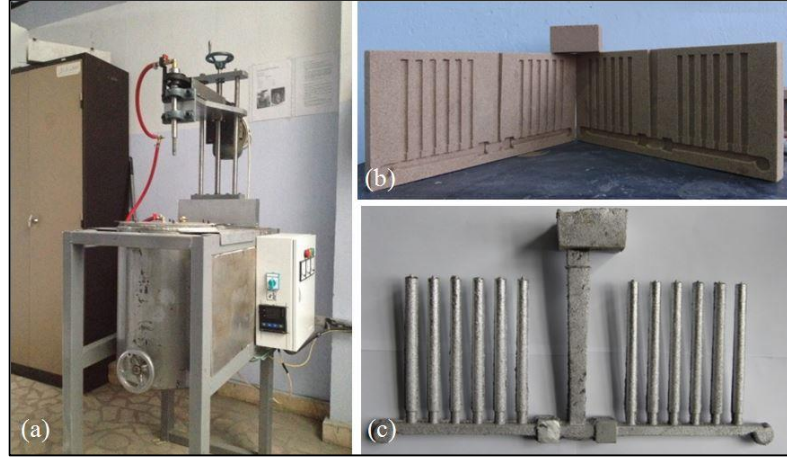
Çizelge 3.4. Kullanılan direnç ocağının teknik özellikleri.

Kullanılan Direnç Ocağının Teknik Özellikleri	
Kapasite	10 Kg Alüminyum ve Alaşımları Ergitme.
Üretim Yılı	2014
Frekans	50 Hz
Çalışma Gerilimi	380 V-30 Kw
Pota	Grafit

Çizelge 3.5. Çalışmada hedeflenen Al-Si-Mg alaşımı kimyasal analizleri.

Malzeme	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Cu	Zn	Ni	B
Al-Si-Mg	91,7	7,38	0,40	0,14	0,1	0,016	0,001	0,008	0,0002	0,001
1 Fe 0,2				0,20						
2 Fe 0,3				0,30						
3 Fe 0,6				0,60						
4 Fe 1,2				1,2						
5 Cu 0,1							0,1			
6 Cu 0,2							0,2			
7 Cu 0,4							0,4			

Sıvı metal yaklaşık 740-745 °C de ergitildikten sonra, potaya Fe (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) ve Cu (% 0,1-0,2 ve 0,4) oranlarında ilave edilerek, 5 dk karıştırılmıştır. Sıcaklıklar K-tipi mineral izoleli ısı çift ve kızıl ötesi ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Daha sonra hazırlanan kalıplara döküm havuzları yardımıyla sıvı metal dökülmüştür. Döküm işlemlerinde, sıvı Al-Si-Mg metalinin taşınması ve dökümü (havşaya aktarılması) sırasında oksijenle teması sonucu oluşan oksit film tabakalarının engellenmesi ve inklüzyonları minimuma indirmek için, stoperli döküm havuzu kullanılmıştır. Şekil 3.6.a’ da ergitme ocağı, Şekil 3.6.b’ de, dökümü yapılacak kalıp, Şekil 3.6.c’de ise çalışmada dökülen döküm numunelerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.6. a) Ergitme ocağı, b) kum kalıp, c) döküm parça.

3.4. T6 ISIL İŞLEMİ

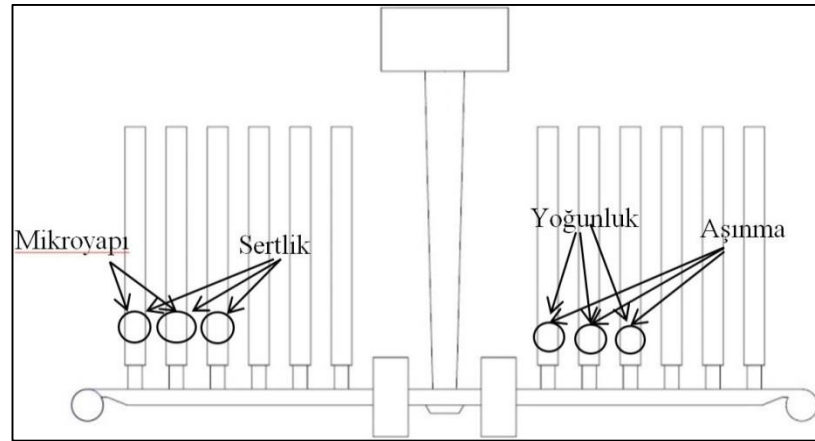
Al-Si-Mg alaşımlarında T6 ısıl işlemi ile yapıda çökelti sertleşmesi ile mekanik özellikler iyileştirilmektedir. T6 Isıl işlemleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan PROTHERM marka ve PLF 120/27 model sıcaklık kontrollü ısıl işlem fırınında yapılmıştır. Çekme numuneleri 540 °C'de 8 saat solüsyona alındıktan sonra, suda hızlı soğutulmuştur. Numuneler oda sıcaklığında 24 saat doğal yaşlandırıldıktan sonra 170 °C'de 10 saat yapay yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminin yapıldığı fırın, Şekil 3.7'da verilmiştir.



Şekil 3.7. T6 ısıl işlemi yapılan fırının görüntüsü.

3.5. KARAKTERİZASYON

İlk aşamada döküm kalıplarda kullanılan yolluk sistemlerinin uygunluğu simülasyon programı ile değerlendirilmiştir. Hedeflenen kimyasal kompozisyona uygunluk, spektral analiz cihazı ile belirlenmiştir. Döküm Al-Si-Mg alaşımların mikro yapı karakterizasyonunda optik mikroskop (OM) ve tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Yapıda oluşan fazların tespit edilmesi için X-Işını Difraktometresi (XRD) kullanıldı. Döküm alaşımların yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapıldı. Farklı Cu ve Fe miktarına bağlı olarak döküm Al-Si-Mg alaşım malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için, çekme ve aşınma testleri yapılmıştır. Döküm malzemelerin yoğunluk, aşınma deneyi, mikro yapı ve sertlik içinde numune parçaları kesilmiştir. Şekil 3.8’de yoğunluk, aşınma deneyi, mikro yapı ve sertlik numune konumları gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Döküm malzemenin karakterizasyonunda kullanılan numune konumları.

3.5.1. Simülasyon Çalışması

Sıvı metal hareketinin boşluk oluşumu üzerine etkisi bilinmektedir. Çalışmada farklı Cu ve Fe miktarına sahip Al-Si-Mg alaşımlarında sıvı metal hareketinden kaynaklanan katlanma ve oksitlenmeleri engellemek için MAGMASoft simülasyon programında, hesaplanan ve SolidWorks programında üç boyutlu olarak çizilen döküm parça ve yolluk sistemleri çizilerek simüle edilmiştir.

3.5.2. Kimyasal Bileşimin Belirlenmesi

Döküm Al-Si-Mg alaşımı döküm malzemenin kimyasal analizleri Yıldız Metal SAN. TİC. LTD. şirketinin Foundry-Master Compact marka spektra analiz cihazında yapılmıştır.

3.5.3. Metalografik İşlemler

Döküm metodu ile üretilen yedi farklı kimyasal bileşime sahip Al-Si-Mg alaşımı mikro yapı incelemeleri için numuneler ASTM E04.01 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Metalografik işlemler için kesilen numuneler, soğuk gömme ile polyestere alınmıştır. Zımparalama ve polisaj işlemlerinde K.B.Ü. İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRESI MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılmıştır. Zımparalama işlemi tamamlanan, numuneler parlatma cihazında Metkom marka 1µm elmas pasta ve 1µm yağlayıcı ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler Keller solusyonu ile 30-45 s. dağlanmıştır. Şekil 3.9' da zımparalama ve polisaj cihazın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Zımparalama ve polisaj cihazı.

3.5.4. Optik Mikroskop İncelemeleri

Mikro yapının belirlenmesinde için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan MEIJI marka optik mikroskop ve MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz programı ile yapılmıştır. Şekil 3.10'de mikroyapı incelemelerin yapıldığı optik mikroskop gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Optik mikroskop.

3.5.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numunelerin SEM incelemeleri, Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü Laboratuvarı'nda bulunan, CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI (FEG) marka taramalı elektron mikroskobunda (Şekil 3.11) yapılmıştır.



Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

3.5.6. X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri

Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numunelerin XRD incelemeleri, Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü Laboratuvarı'nda bulunan, "RİGAKU ULTİMA IV X-RAY DIFFRACTOMETER" marka cihazla yapılmıştır. Şekil 3.12'de XRD cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.12. X-ışını kırınımı ölçüm cihazı (XRD).

3.5.7. Yoğunluk Ölçümleri

Döküm kalitesinin bir ölçüsü olan yoğunluk, döküm malzemenin içerdiği boşluk miktarını belirlenmesinde kullanılmaktadır. Al-Si-Mg alaşımından filtreli yolluk sistemleri ile dökülen Cu (% 0,1-0,2 ve 0,4) ve Fe (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) alaşımların yoğunlukları ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümleri K.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği laboratuvarların da bulunan “PRECİSA” markalı XB22A modele sahip 1/10000 hassasiyetteki yoğunluk ölçüm kiti ile ölçülmüştür. Şekil 3.13’de yoğunluk ölçüm kitinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.13. Yoğunluk ölçüm kiti.

3.5.8. Sertlik Ölçümleri

Mikro yapının incelemeleri için hazırlanan numunelerin sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri K.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan “SHIMADZU” marka mikro sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Her bir numuneden elde edilen 10 adet sertlik ölçümünün ortalaması alınarak, sertlik değerleri

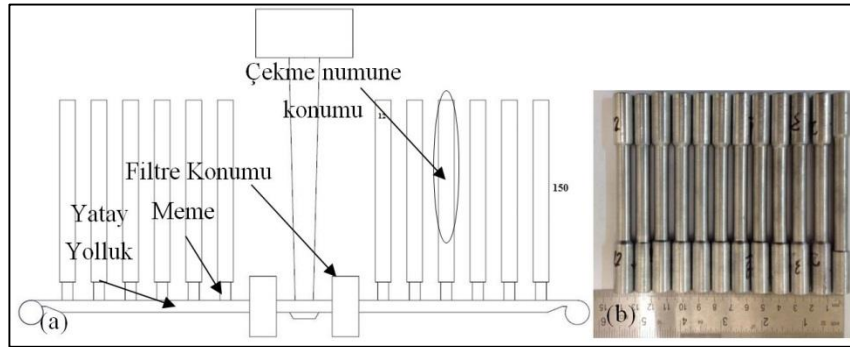
belirlenmiştir. Şekil 3.14’de sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik ölçüm cihazının görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.14. Mikro sertlik cihazı.

3.5.9. Çekme Testleri

Çekme numunelerin konumları Şekil 3.15.a’da gösterilmiştir. Çekme testleri için numuneler ASTM: B557M-10 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Torna tezgâhında talaşlı imalatı sonrasında çeltik etkisinin ortadan kaldırılması için yüzeyler zımparalanmış ve çekme testi için hazırlanmıştır. Hazırlanan çekme test numunelerinin görüntüsü Şekil 3.15.b’de verilmiştir. Çekme testleri, Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan, AG-IS 50 kN kapasiteli SHIMADZU AG-IS model çekme cihazında, 1 mm/dk hızında yapılmıştır. Çekme test cihazının görüntüsü, Şekil 3.16’te verilmektedir.



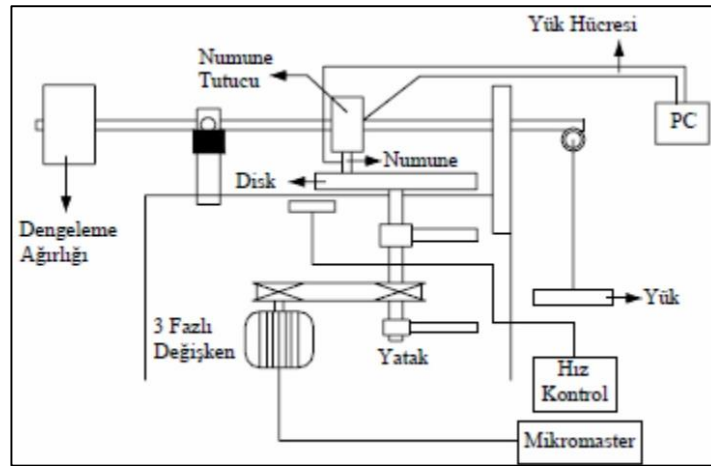
Şekil 3.15. a) Çekme deney numunelerin konumları ve b) hazırlanan çekme numuneleri.



Şekil 3.16. Çekme cihazı.

3.5.10. Aşınma Testleri

Aşınma testleri, Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan standart pin-on tipi aşınma test cihazında yapılmıştır. Aşınma testi numuneleri, döküm yöntemi ile dökülen, boyu 150 mm ve çapı 13 mm olan çubuklardan, 9x10 mm boylarında hazırlanmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan pin-on-disk tipi standart aşınma test cihazının şematik görüntüsü, Şekil 3.17’de verilmiştir. Aşınma testleri 1m/s kayma hızı, 3 farklı yük (10-20-40 N) ve 4 farklı kayma mesafesinde (500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m) yapılmıştır.



Şekil 3.17. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü.

Al-Si-Mg testlerinde AISI 4140 malzemeden yapılmış \varnothing 230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde çelik disk kullanılmıştır. Deney cihazı devrinin

ölçülmesi için Compact marka takometre (0-1000 dv/dk, 0,5 V çıkışlı) kullanılmıştır. Aşındırılan numuneler 1/10000 hassasiyetli Prescia marka terazide tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma oranının hesaplanmasında kullanılan bağıntı Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$Wa = \frac{\Delta G}{d \cdot P \cdot S} \quad (3.1)$$

Burada;

Wa : Aşınma oranı (mm³/Nm)

S : Kayma yolu (m)

ΔG : Ağırlık kaybı (mg)

D : Yoğunluk (g/cm³)

P : Yükleme ağırlığı (N)

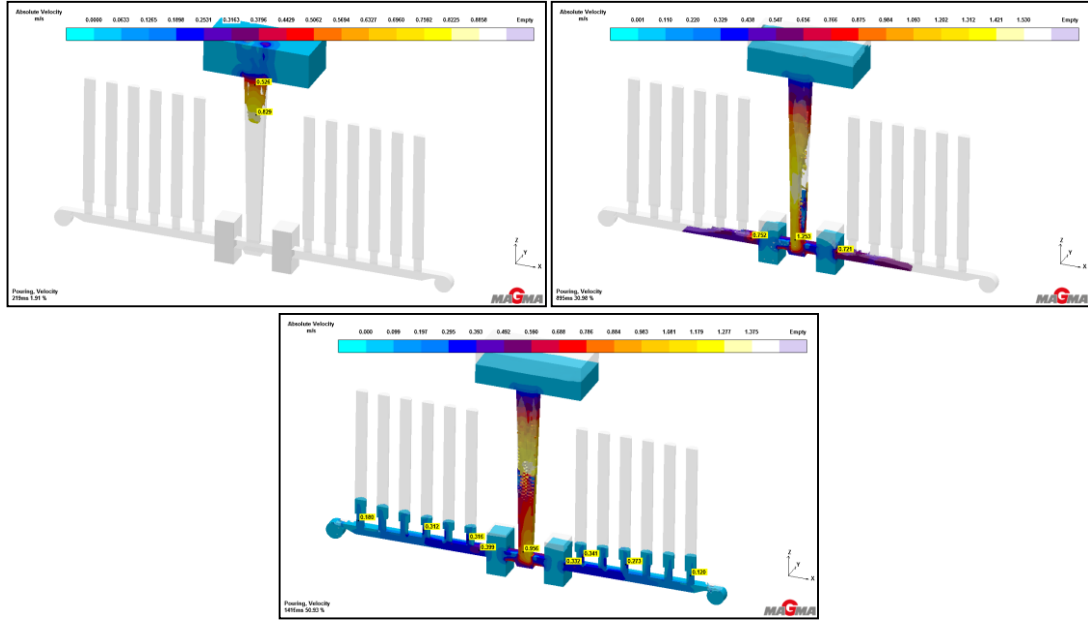
BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Cu ve Fe elementlerinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle, farklı bileşime sahip döküm Al-Si-Mg alaşımlarının üretiminde kullanılan, döküm parça ve yolluk sistemi simülasyon sonuçları irdelenmiştir. Daha sonra sırasıyla kimyasal analiz, mikroyapı incelemeleri optik (OM) ve taramalı elektron mikroskop (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS), X-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri, gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin araştırılması için de çekme ve aşınma testleri uygulanmıştır.

4.1. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Döküm numunelerin ve yolluk sistemi elemanlarının iki boyutlu çizimleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Döküm numune ve yolluk sistemleri için hesaplanan sıvı metal hızları, MAGMASoft simülasyon programı çalışmaları ile desteklenmiştir. MAGMASoft simülasyon programında sonlu elemanlar yöntemi ile hazırlanan sanal ortamda, sıvı metalin hareketi simüle edilmiştir. Sıvı metal hareketinin döküm malzemenin mekanik özelliklerinde etkili olduğu birçok çalışmada belirtilmektedir. Yolluk sistemi elemanlarının oksit oluşumuna ve mekanik özellikler üzerine etkisi bulunmaktadır [12-16]. Sıvı metalin hızı, döküm yüksekliğine bağlı olarak artmaktadır. Sıvı metalin dikey yolluktan düşme hızı başlangıçta 1,23 m/sn iken, seramik filtre ve yatay yolluğa doğru iletilmesinden dolayı yaklaşık 0,9 m/sn'ye düşmektedir. Sıvı metalin ayrıca kalıp malzemesi ile temasından kaynaklanan hız kaybı da hızın azalmasında etkindir. Meme kesit alanında ise, sıvı metal hızları değişerek (0,18-0,30 m/sn aralığında), kalıp boşluğunu doldurduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Sıvı metalin yolluk sistemini doldurması sırasındaki hızların simülasyon çıktısı görüntüsü.

4.2. KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Döküm Al-Si-Mg alaşımımızdan yolluk sisteminden alınan parçaların spektral analiz sonuçları, Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen spektral analiz sonuçları hedeflenen bileşimlere ulaşıldığını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Döküm Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen elementlerin spektra analiz sonuçları.

Alaşım elementi (%)	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Diğer
Fe grubu									
0,2 Fe	92,1	7,13	0,375	0,166	0	0,001	0,117	0,005	0,106
0,3 Fe	91,5	7,67	0,335	0,313	0	0,001	0,113	0,005	0,21
0,6 Fe	91,6	7,18	0,412	0,59	0	0,001	0,11	0,005	0,143
1,2 Fe	91,1	7,27	0,27	1,14	0	0,001	0,114	0,005	0,1
Cu grubu									
0,1 Cu	91,1	7,83	0,259	0,093	0,103	0,001	0,106	0,005	0,503
0,2 Cu	91,4	7,6	0,379	0,14	0,218	0,001	0,108	0,005	0,149
0,4 Cu	91,2	7,64	0,35	0,129	0,392	0,001	0,106	0,0051	0,132

4.3. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

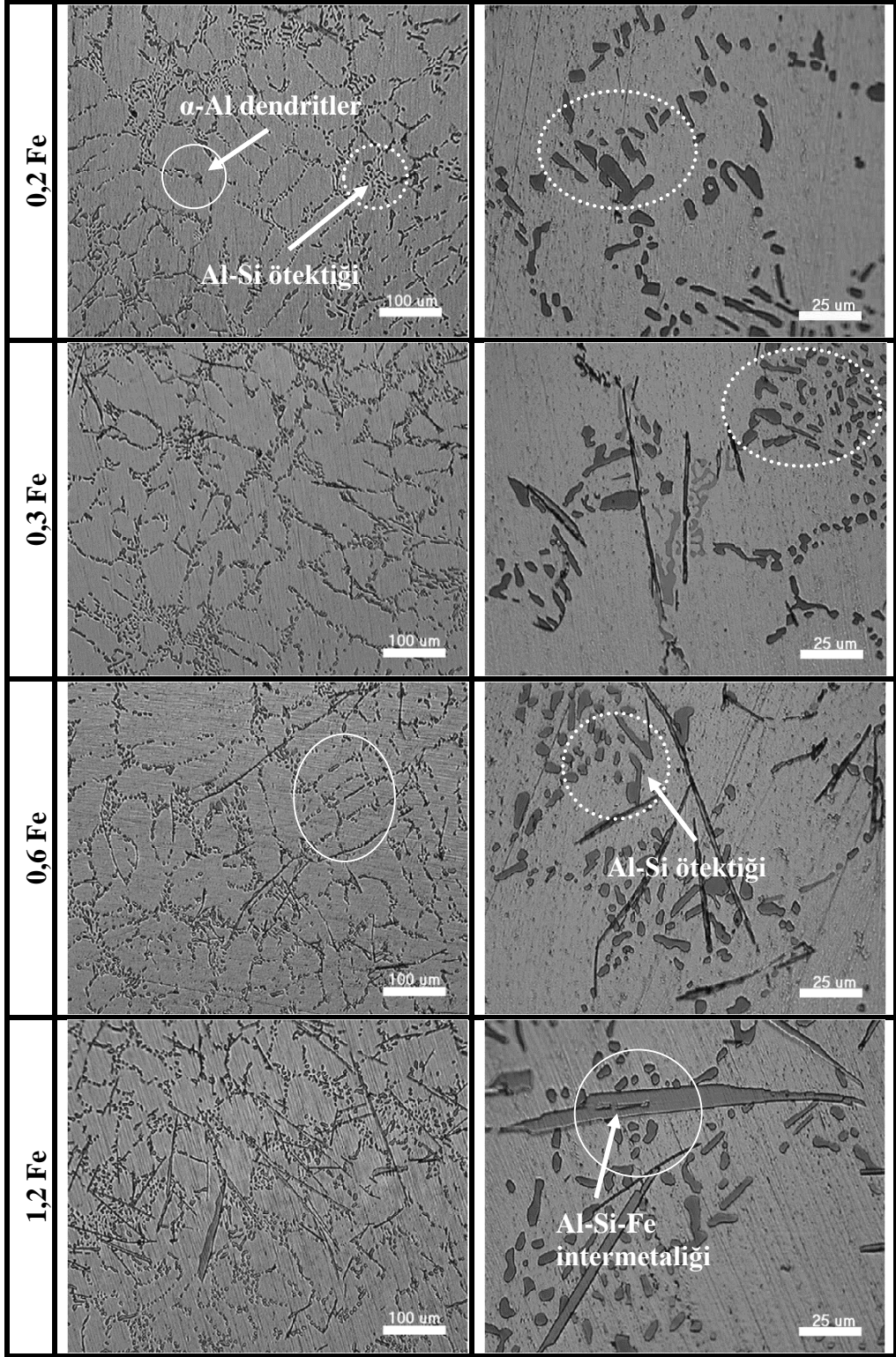
Bu çalışmada döküm metodu ile üretilen ve farklı miktarlarda % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ve % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu ilave edilen Al-Si-Mg alaşımının OM, SEM-EDS ve XRD analizlerinin sonuçlarına bağlı olarak yapıda oluşan Fe ve Cu intermetalik fazları incelenmiştir.

4.3.1. OM ve SEM Görüntülerinin İncelenmesi

Döküm Al-Si-Mg alaşımına farklı oranlarda (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) Fe ilave edilen alaşımların OM görüntüleri Şekil 4.2'de, farklı oranlarda (% 0,1-0,2 ve 0,4) Cu ilave edilen alaşımların OM görüntüleri ise Şekil 4.3'de verilmiştir.

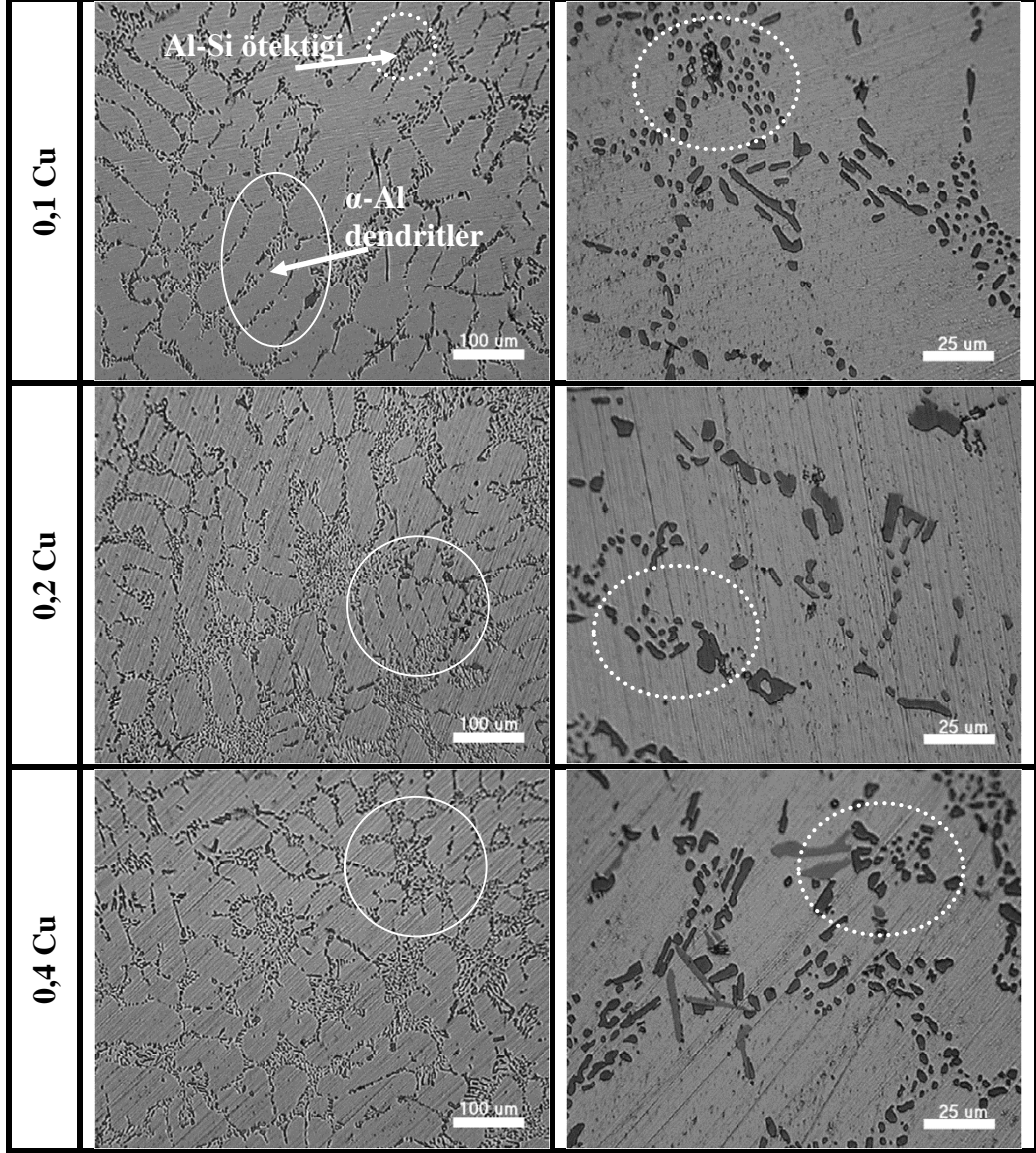
Şekil 4.2'de verilen OM görüntülerinde, (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) Fe alaşımlarının yapısında, Al dendritler, Al-Si ötektiği ve iğnesel şekilli Fe intermetaliklerin olduğu görülmektedir. SEM görüntüleri EDS analizlerinde farklı demir içeriğine sahip Fe-bazlı intermetaliklerin olduğu belirlenmiştir. Al-Si ötektiğinin çevresinde ve alfa-Al dendritleri arasında Fe-bazlı intermetalikler oluşmaktadır. Ayrıca Al-Si-Mg alaşım sisteminde Fe miktarının artmasıyla, yapıda oluşan Fe fazının kalınlaştığı belirlenmiştir. Buna karşın SEM görüntülerinde kalın demir intermetaliklerin çevresinde daha ince ve kesik çizgiler halinde farklı kimyasal bileşime sahip Fe-bazlı intermetaliklerin olduğu gözlenmektedir. Ayrıca her iki grupta da T6 ısıtım işlemi sonrasında yapıda Mg₂Si çökeltilerinin olduğu, SEM görüntülerinde görülmüştür.

Şekil 4.2'de verilen OM görüntüleri ve Şekil 4.4'deki SEM görüntüleri incelendiğinde, ilave edilen % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe alaşımlarının yapılarında Al-Si ötektiğinin incelendiği ve Fe intermetaliklerin (iğnesel şekilli) büyüdüğü ve tane yapısının incelendiği tespit edilmiştir. Warmuzek ve Ark.'nın yaptığı çalışmalarda da belirtildiği gibi, demirce zengin iğnemsiz plakalı β -Al₅FeSi, α -AlFeSi intermetalik yapı ve ısıtım işlem sonrasında Mg₂Si intermetalik fazları oluşmaktadır [23]. Bu görüntülere göre, demir oranının artması ile yapıda oluşan Fe fazının (iğnesel) büyümesi ile, tanelerin incelendiği görülmektedir.



Şekil 4.2. Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Fe grubunun OM görüntüsü.

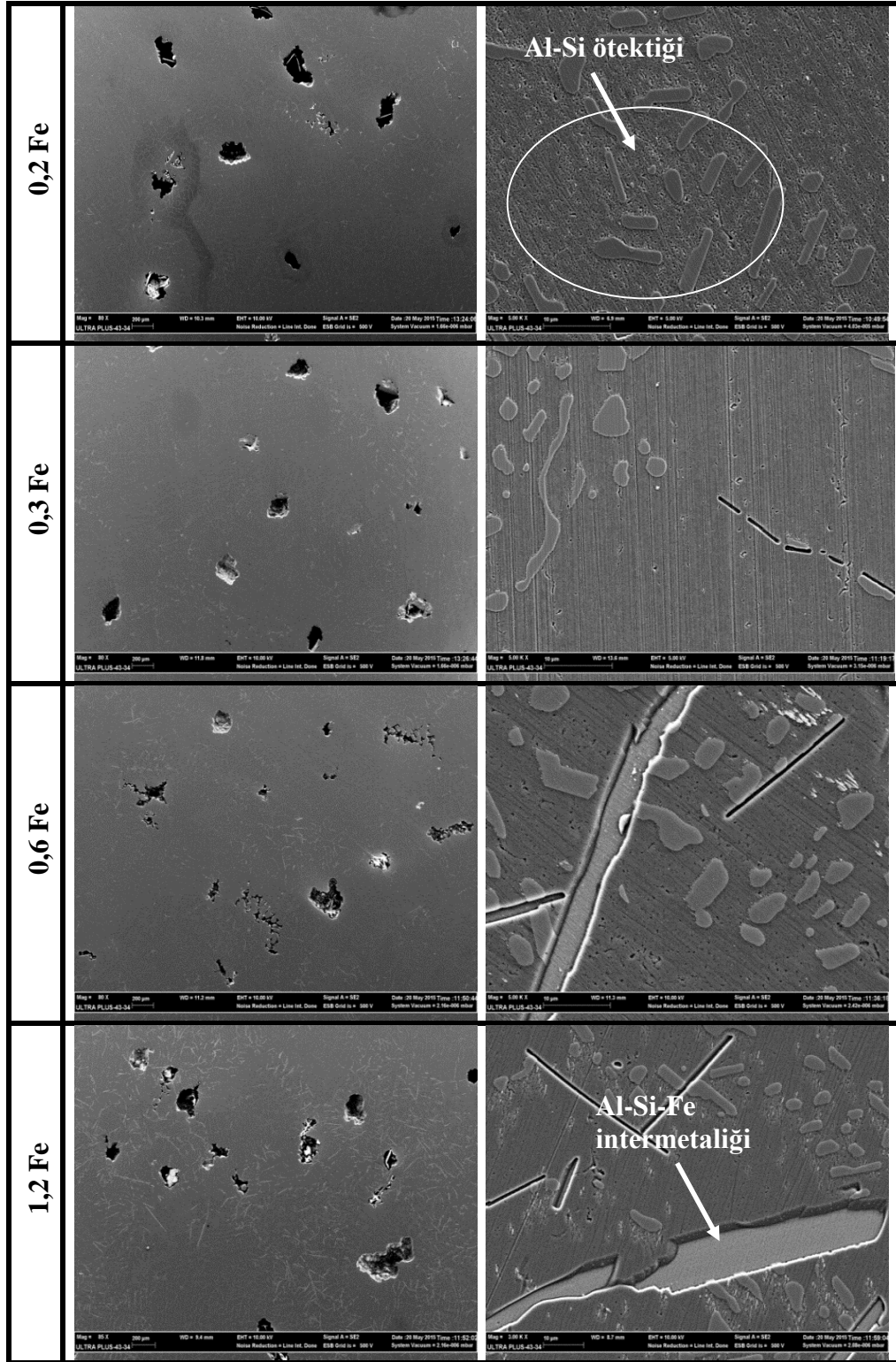
Şekil 4.3’de verilen OM görüntülerinde % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu ilave edilen alaşımlarının mikro yapıları da, farklı oranlarda demir ilave edilen alaşıma benzerdir. Fakat en belirgin yapı değişikliği, Al-Si ötektikinin Cu miktarının artması ile ötektik Al-Si fazının incelmesidir.



Şekil 4.3. Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Cu grubunun OM görüntüsü.

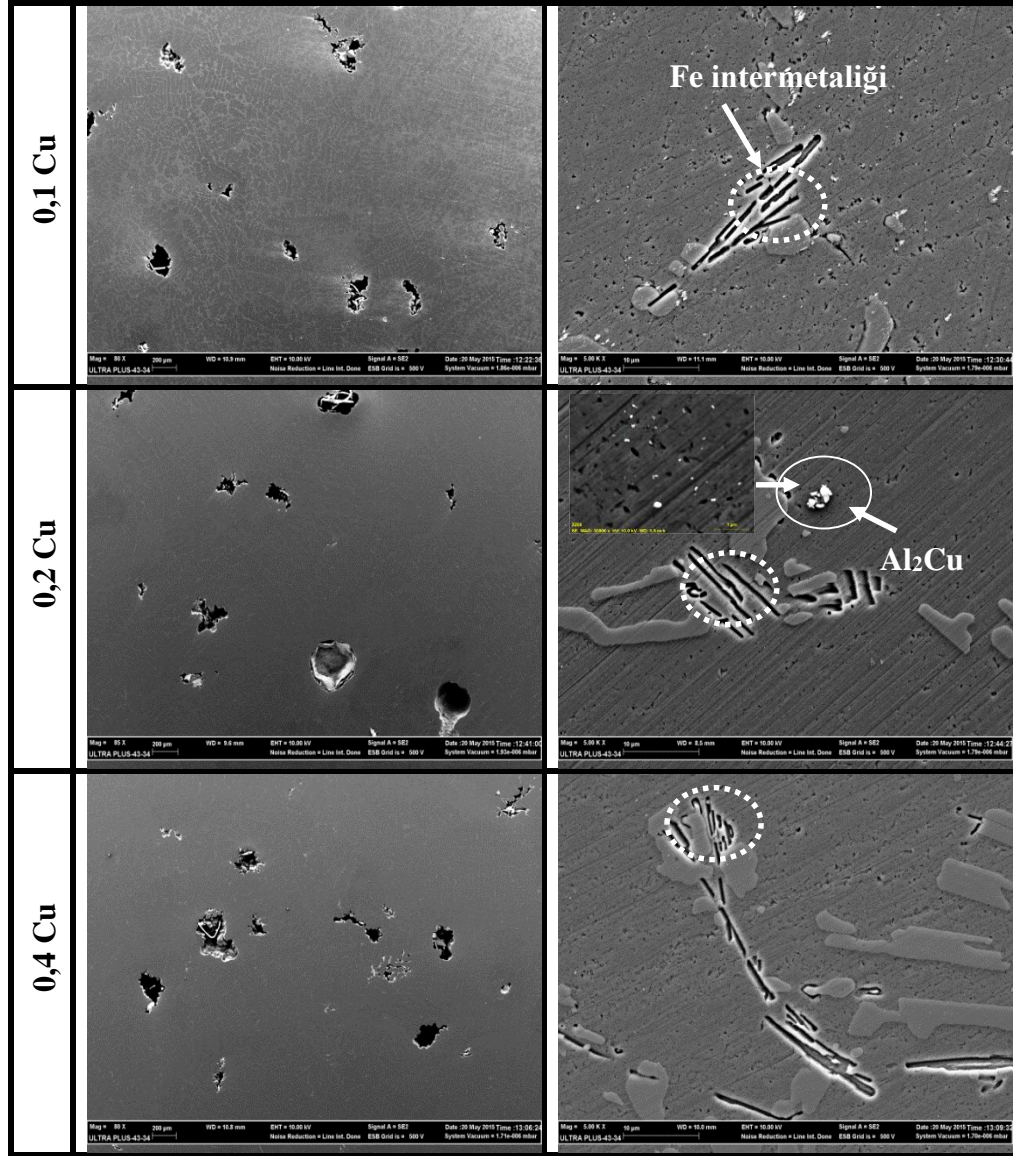
Döküm Al-Si-Mg alaşımına farklı oranlarda (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) Fe ilave edilen alaşımlarının Şekil 4.4’te verilen SEM görüntülerinde, oranının artması ile tanelerin incelendiği, ayrıca Fe-bazlı intermetaliklerin büyüdüğü ve morfolojisinin değiştiği görülmektedir. Fe, Al ve diğer elementlerle bir araya gelerek intermetalik ikinci fazların oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca alüminyum ve alaşımlarında demirin

çözünürlüğünün sınırlı olmasından dolayı, dendritik kollar arası mesafeyi azaltmakla ve tane boyutu küçültmektedir [40]. Mikro yapı SEM görüntüleri incelendiğinde, demir intermetalinin iğnemi plakalı bir yapıda olduğu da görülmektedir.



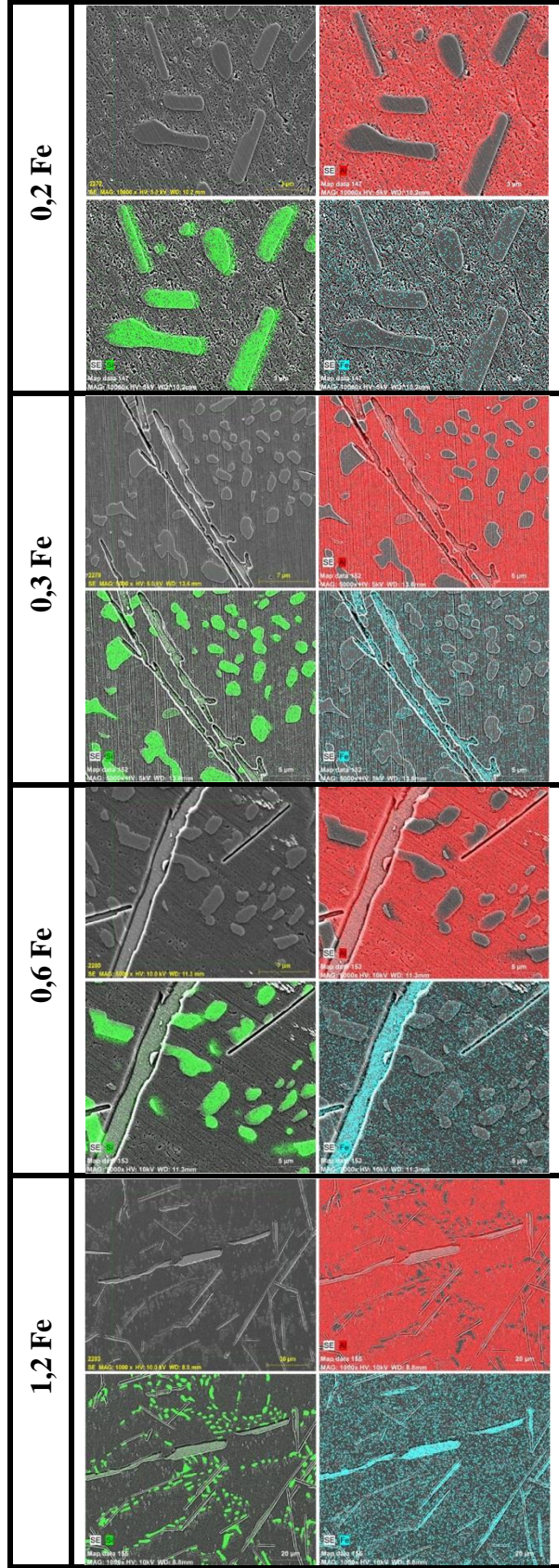
Şekil 4.4. Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Fe grubunun SEM görüntüleri.

Döküm Al-Si-Mg alaşımına farklı oranlarda (% 0,1-0,2 ve 0,4) ilave edilen Cu alaşımlarının Şekil 4.5'te ve SEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi, bakır oranının artması ile tanelerin azda olsa incelme Cu-bazlı intermetaliklerin oluşmaktadır. Ayrıca kesik çizgi morfolojisinde Cu intermetalik fazların, Fe grubu alaşım sistemine benzer şekilde yapı içinde oluştuğu görülmektedir.



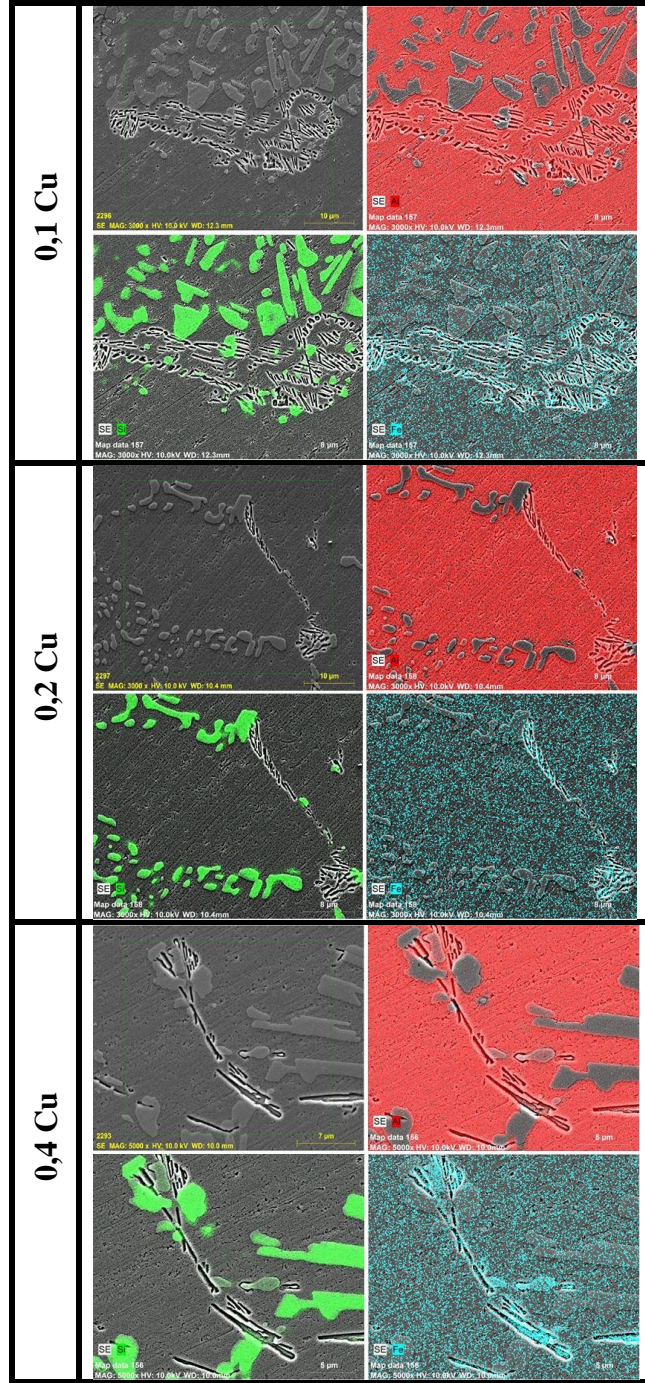
Şekil 4.5. Döküm Al-Si-Mg ilave edilen Cu grubunun SEM görüntüleri.

Şekil 4.6'da verilen EDS sonuçları incelendiğinde, Al, Si, Fe'in yapı içerisindeki dağılımı verilmektedir Döküm Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Fe oranının artması ile, Fe intermetaliklerin iğneli yapıda oluşan içeriğindeki Fe miktarının da değiştiği belirlenmiştir. Fe-bazlı intermetaliklerin tane yapısına etkisini görülmektedir.



Şekil 4.6. Döküm Al-Si-Mg ilave edilen % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe'in EDS sonuçları.

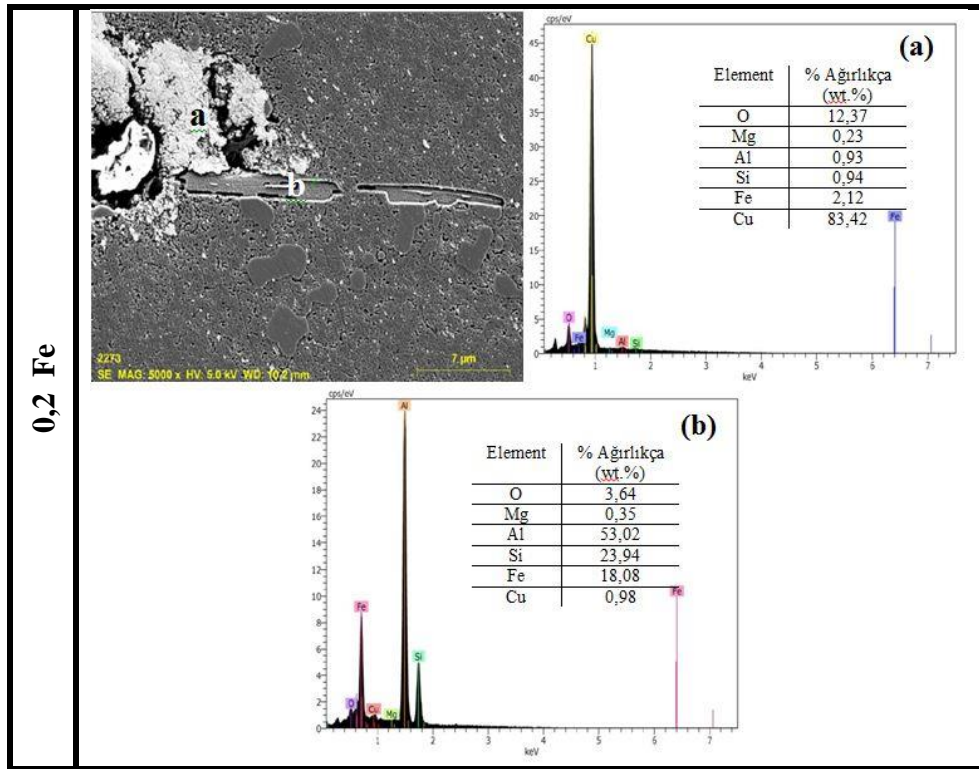
Şekil 4.7'deki döküm Al-Si-Mg alaşımına farklı oranlarda (% 0,1-0,2 ve 0,4) ilave edilen Cu'nun EDS sonuçları incelendiğinde, Al, Si, Fe'in yapı içinde dağılımını görülmektedir. Sonuç olarak, Cu ilave edilen alaşım sistemlerinde, Fe ilave edilen alaşım sistemlerine göre yapı içinde Fe intermetalığının olduğu ve Al-Si ötektiklerinin nispeten incelmesi anlaşılmaktadır.



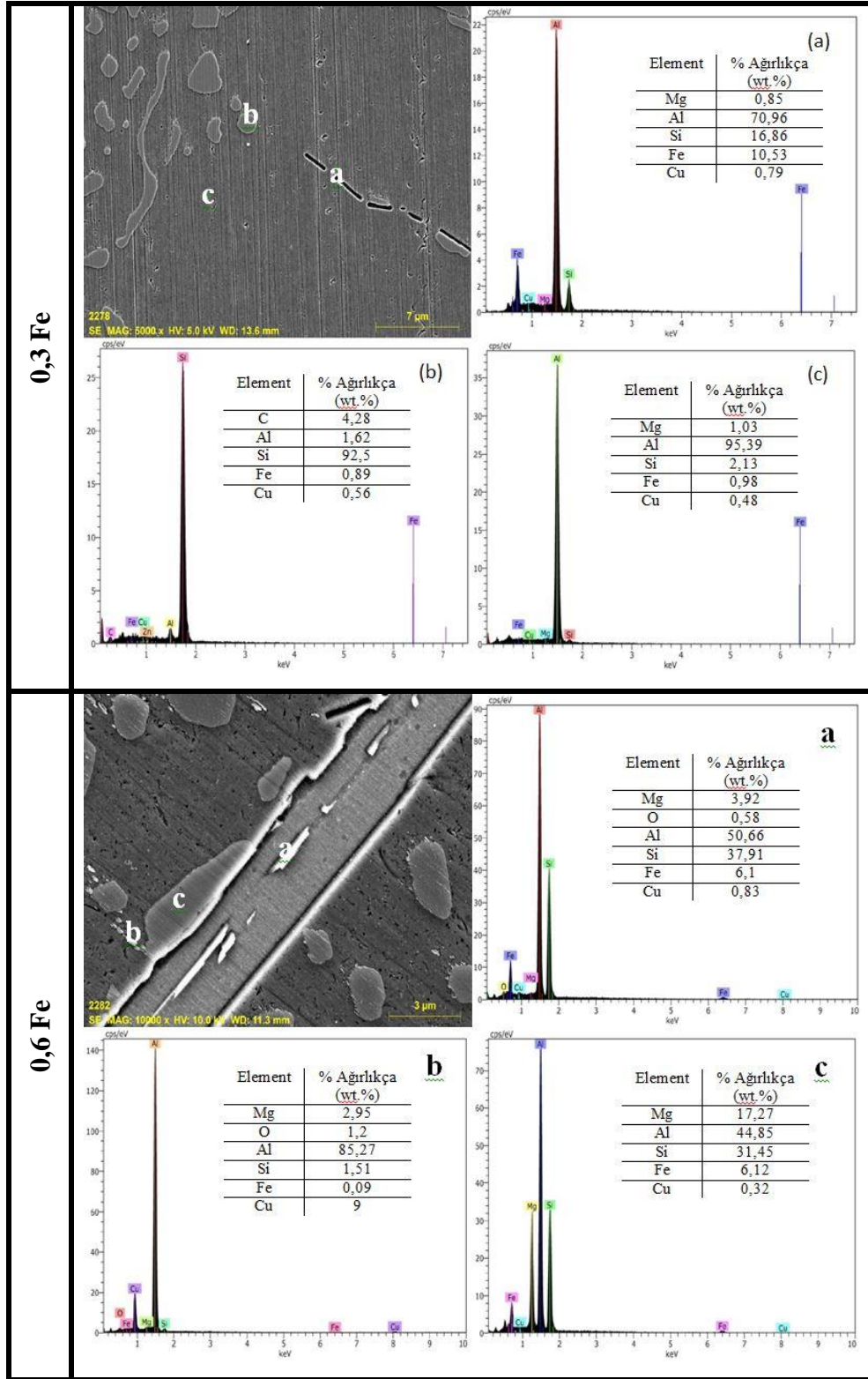
Şekil.4.7. Döküm Al-Si-Mg ilave edilen % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu'nun EDS sonuçları.

Döküm Al-Si-Mg ilave edilen farklı Fe miktarına sahip alaşım sistemlerindeki demir bazlı intermetalik fazlarının noktasal EDS sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir.

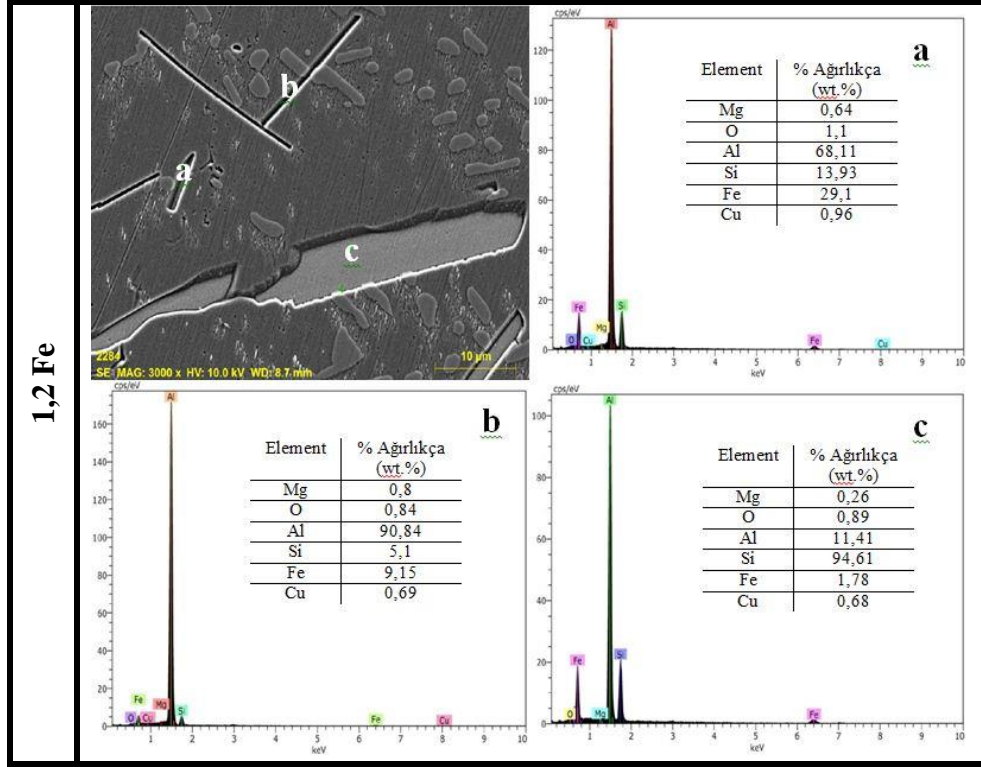
Şekil 4.8’de verilen EDS sonuçları incelendiğinde, demir miktarının artmasıyla Fe-zengin intermetalik fazın kalınlaştığı ve bu fazların döküm hatalarının olduğu bölgelerde yoğunlaştığı gözlenmektedir. % 0,2 Fe içeren alaşımda, bakır oksit çevresinde oluşan Fe bazlı intermetalik faz görülmektedir. Fe miktarının artmasıyla intermetalik fazın morfolojisinin değiştiği görülmektedir. % 0,3-0,6 ve 1,2 Fe içeren alaşım sisteminde, Fe-zengin intermetaliklerin oluşumu ve morfolojisindeki farklılıklar olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.8. Döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Fe grubunun EDS sonuçları.

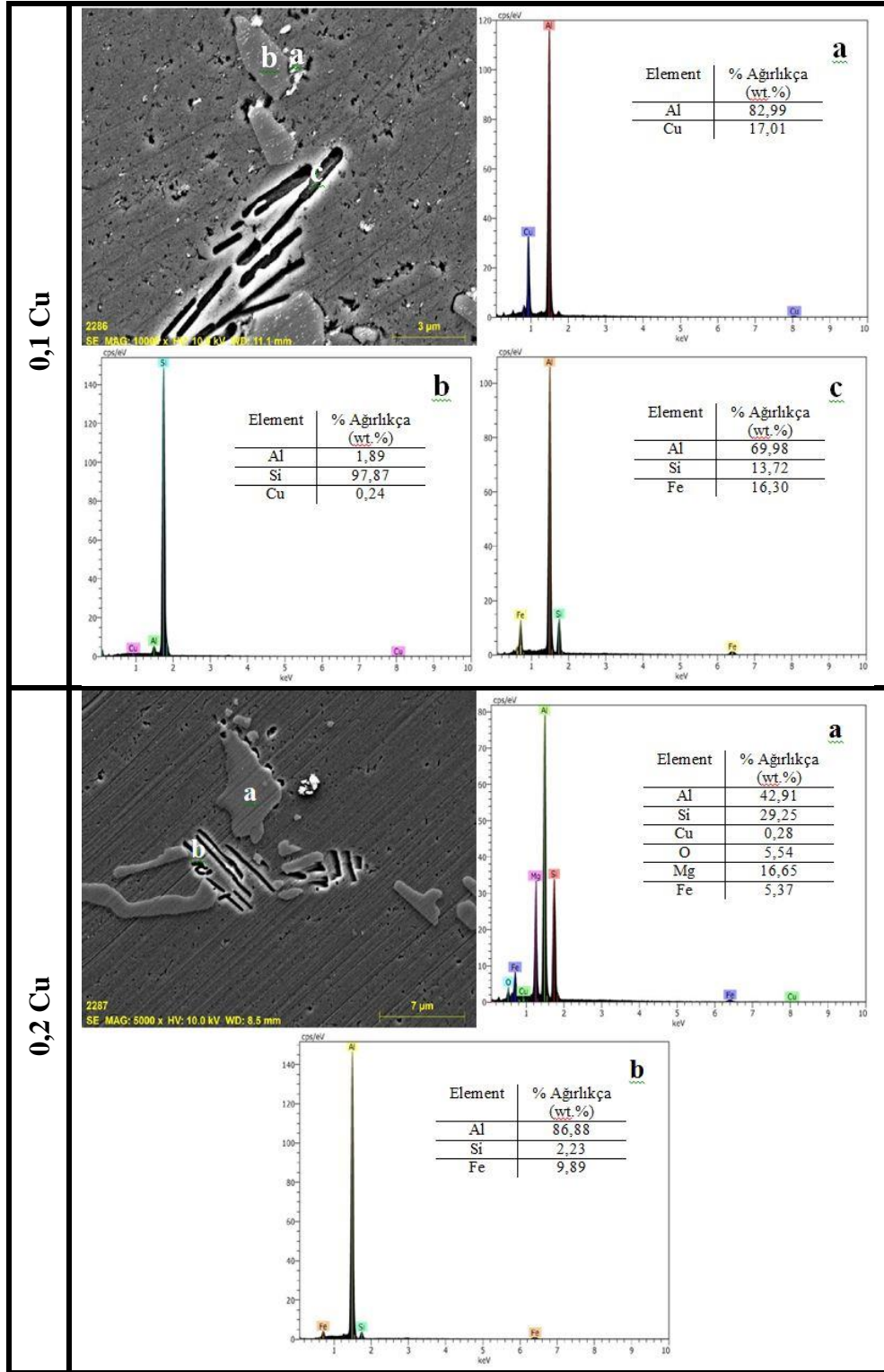


Şekil 4.8. (devam ediyor).

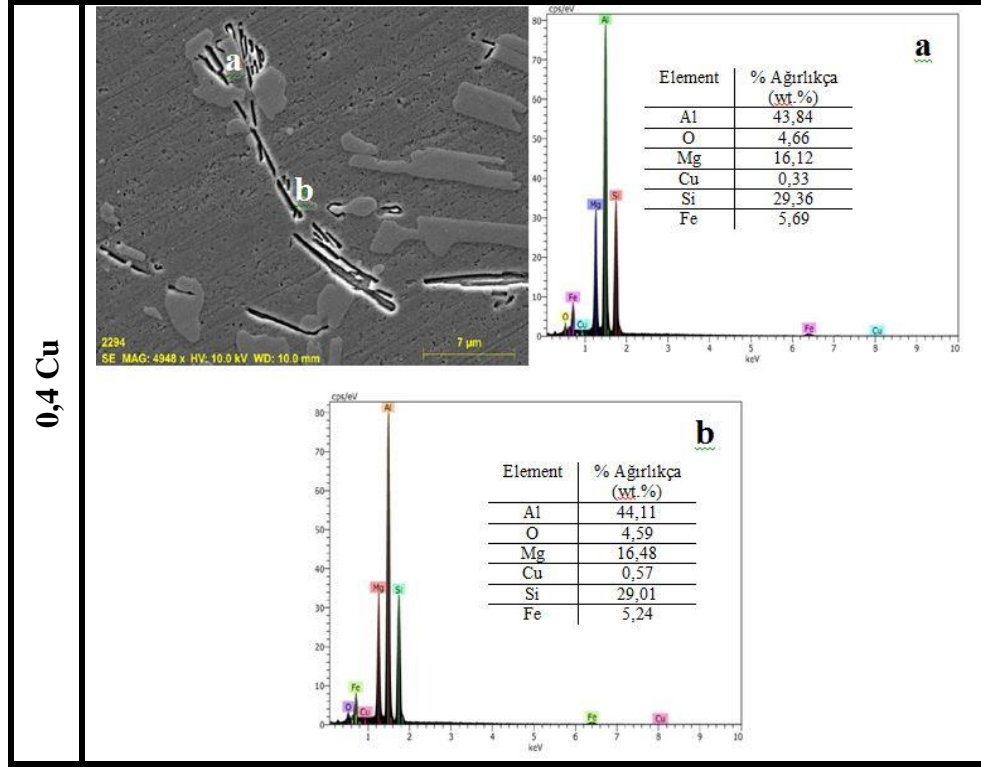


Şekil 4.8. (devam ediyor).

Şekil 4.9’da verilen farklı oranlarda Cu ilave edilen döküm Al-Si-Mg alaşımlarda Fe bazlı intermetalik fazlara ilaveten yapıda Al_2Cu çöktellerinin oluştuğu, anlaşılmaktadır. Şekil 4.9’da verilen noktasal EDS sonuçları incelendiğinde, bakır miktarının artmasıyla intermetalik fazın incelendiği görülmektedir. Ayrıca Al-Si ötektikliğinin ve tane yapısının da incelendiği, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te verilen optik mikroskop görüntülerinde de görülebilmektedir. Bakır miktarının artmasıyla yapı içinde küresel şekilli Al_2Cu çöktellerinin arttığı belirlenmiştir. Fe bazlı intermetaliklerin yapısı ise demir grubu (% 0,6 ve 1,2) alaşım sistemindeki alaşımlara benzemektedir. Cu, sadece ötektik Al-Si fazı üzerinde değil, ayrıca Fe bazlı intermetalik fazların yapısında değişime sebep olmuştur.



Şekil 4.9. Döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Cu grubun EDS sonuçları.

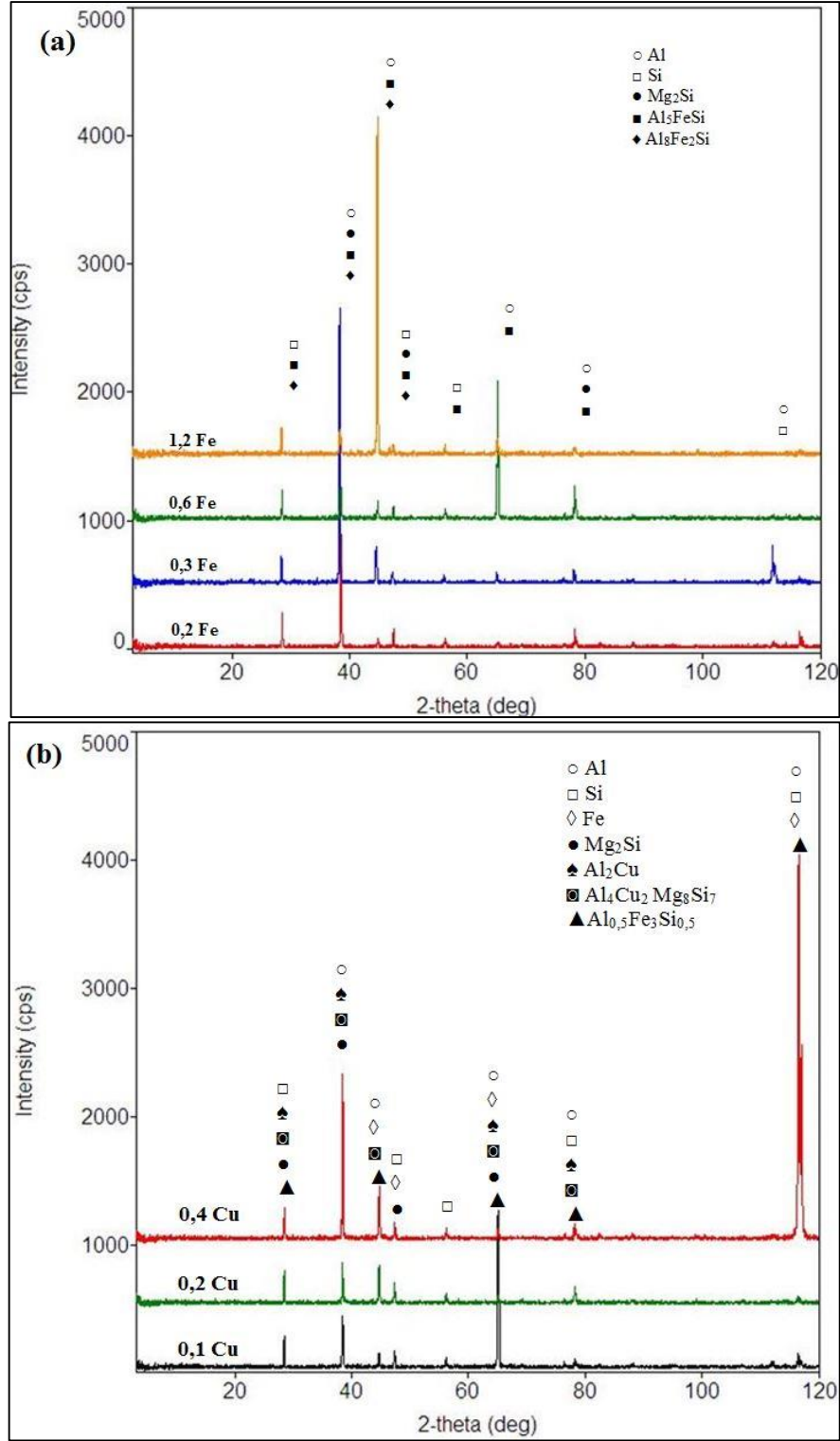


Şekil 4.9. (devam ediyor).

4.3.2. XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Döküm Al-Si-Mg alaşımına ilave edilerek üretilen 7 farklı alaşımda (% 0,1-0,2 ve 0,4 Cu ve % 0,1-0,2 ve 0,4 Fe'in yapısında) oluşan fazların ve kırınım düzlemlerinin belirlenmesi için, XRD analizleri yapılmıştır. % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ilave edilen alaşımlarının XRD sonuçları Şekil 4.10.a'da, % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu alaşımlarının XRD sonuçları ise, Şekil 4.10.b'de verilmiştir. Şekil 4.10 a'da verilen XRD sonuçlarına göre, % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ilave edilen alaşımların yapısında aynı fazların, farklı miktarda olduğu görülmektedir. Demir miktarının artması ile alaşımın içerdiği Fe bazlı intermetalik fazların piklerinin arttığı ve farklı Fe-zengin intermetaliklerin oluştuğu belirlenmiştir. Fe elementinin yapıda Fe-bazlı intermetalikler oluşturduğu ve T6 ısıl işlem ile Mg_2Si çökeltilerini oluştuğu bilinmektedir [54]. % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu ilave edilen alaşımlarda (benzer olarak) (38-43-64-115) 2-theta derecede Al, (30-43-46-56-115) 2-theta derecede Si, (38-46-78) 2-theta derecede Mg_2Si fazlarının oluştuğunu görülmektedir. Ayrıca % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu alaşımı ilave edilen alaşımlarında

bulunmayan (30-38-43-46-56-64-78) 2-theta derecede Al_5FeSi ve (30-38-43-46) 2-theta derecede $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ fazlarının oluştuğu belirlenmiştir.



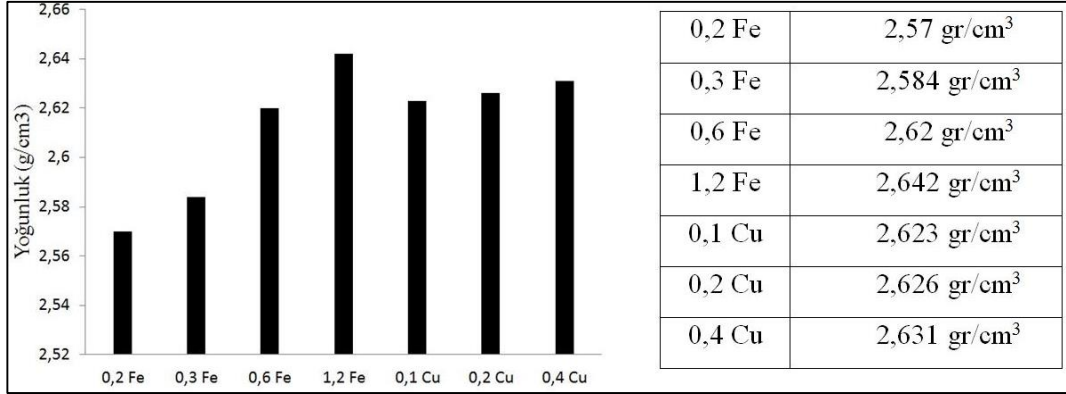
Şekil 4.10. a) % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe, b) 0,1-0,2 ve 0,4 Cu numunelerine ait XRD analiz sonuçları.

Şekil 4.10.b’de verilen XRD sonuçlarına göre ise, % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu ilave edilen alaşımların yapısında (38-45-65-79-118) 2-theta derecede Al, (30-48-79-118) 2-theta derecede Si, (30-38-48-65) 2-theta derecede Mg_2Si aynı fazların oluştuğu belirlenmiştir. Cu miktarının artmasıyla alaşımın içerdiği Cu bazlı intermetalik fazların arttığı ve farklı Cu-zengin intermetaliklerin oluştuğu belirlenmiştir. Daha önceki yapılan bir çalışmada alüminyum-bakır alaşımlarının yaşlandırma ile mukavemet ve sertlik artış, süneklikte azalma olduğu belirtilmektedir [40]. % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ilave edilen alaşımlarında bulunmayan (30-38-65-79) 2-theta derecede Al_2Cu , (30-38-43-65-79) 2-theta derecede $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$, (30-43-65-79-118) 2-theta derecede $Al_{0,5}Fe_3Si_{0,5}$ fazlarının oluştuğu belirlenmiştir.

4.4. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Çalışmada döküm metodu ile üretilen farklı oranlarda Cu ve Fe ilave edilen Al-Si-Mg alaşımında döküm işlemleri sırasında oluşması muhtemel boşluk miktarının belirlenmesinde, her yolluk sisteminde aynı bölgelerden alınan numunelerin yoğunlukları ölçülerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Al-Si-Mg döküm alaşımına ilave edilen Fe ve Cu elementlerin gözenek oluşumuna etkisi incelenmiştir.

Yoğunluk sonuçları incelendiğinde % 0,2 Fe alaşımının yoğunluk aralığının 2,571-2,591 gr/cm^3 , % 0,3 Fe alaşımının yoğunluk aralığının 2,557-2,579 gr/cm^3 ve % 0,6 Fe yoğunluk aralığının 2,612-2,631 gr/cm^3 , % 1.2 Fe alaşımının yoğunluk aralığının 2,624-2,656 gr/cm^3 olduğu belirlenmiştir. Cu ilave edilen alaşımların % 0,1 Cu alaşımının yoğunluk aralığının 2,614-2,634 gr/cm^3 , % 0,2 Cu grubunun yoğunluk aralığı 2,614-2,676 gr/cm^3 , % 0,4 Cu alaşımının yoğunluk aralığının 2,621-2,50 gr/cm^3 olduğu belirlenmiştir. Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Fe (% 0,2-0,3-0,6-1,2) ve Cu (% 0,1-0,2-0,4) alaşımlarının ortalama yoğunluk değerleri ise Şekil 4.11’de verilmiştir.

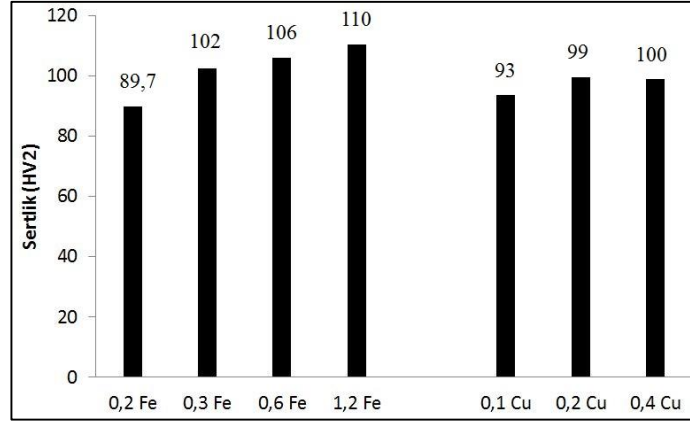


Şekil 4.11. Al-Si-Mg alaşımına katılan Fe (% 0,2-0,3-0,6-1,2) ve Cu (% 0,1-0,2-0,4) alaşımlarının yoğunluk sonuçları.

Şekil 4.11’de verilen farklı oranlarda Fe ve Cu ilave edilen alaşımların yoğunluk değişimleri incelendiğinde, Fe ilave edilen alaşımlarda en yüksek yoğunluk değerinin % 1,2 Fe alaşımına, en düşük değerinin % 0,2 Fe alaşımına ait olduğu görülmektedir. Fe miktarının artmasına bağlı olarak döküm Al-Si-Mg alaşımının yoğunluğu artmaktadır. Fakat Fe bileşimin artmasına bağlı olarak (optik mikroskop görüntülerinden anlaşılacağı gibi) boşluk oluşumunun da arttığı gözlenmektedir. Cu elementi ilave edilerek dökülen numunelerin en yüksek yoğunluk değerinin % 0,4 Cu alaşımına ait olduğu görülürken, en düşük değerinin % 0,1 Cu alaşımına ait olduğu görülmektedir. Şekil 4.11’de, Al-Mg-Si alaşımına Cu ilave edilmesi ile birlikte yoğunluk değerlerinde Fe’in etkisi kadar olmasa da Cu ilave edilen alaşımların yoğunluklarında bir artış olduğu görülmektedir.

4.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada Al-Si-Mg alaşımına Cu ve Fe’in ilave edilerek dökülen malzemelerin sertlik değerinin değişimini incelenmiştir. Döküm sonrası uygulanan yaşlandırma ısı işlemi sonrasında (T6) alaşımların sertliklerinin arttığı Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. Al-Si-Mg-Cu ve Al-Si-Mg-Fe alaşımları sertlik değişimi.

Döküm Al-Si-Mg alaşımına Cu ve Fe ilave edilen alaşımların birbirleriyle (Fe ve Cu ilave edilen alaşımlar) karşılaştırıldığında en yüksek sertlik değeri, Fe ilave edilen alaşımlarda elde edilmiştir. Sınırlı çözünürlüğünden dolayı, mukavemette bir artış kazandırarak, ısıl işlem sonrası tane boyutunu küçültmektedir [40]. Sertliğin T6 ısıl işlemi sonrasında Al-Si-Mg alaşımının sertliğinde %58'lik bir artış söz konusudur. T6 ısıl işlem sonrası ilave edilen Fe oranına göre arttığı (% 0,2 Fe'de 89.7 HV2, % 0,3 Fe'de 102 HV2, % 0,6 Fe'de 106 HV2 ve % 1,2 Fe'de 110 HV2) gözlenmektedir. Şekil 4.2'de ki mikro yapı görüntüleri ile sertlik sonuçları ilişkilendirildiğinde ilave edilen Fe miktarı arttıkça, iğnesel Fe intermetalik fazların miktarlarında artış olduğu görülmektedir. Ana matrise göre daha sert olan Fe intermetalik fazların artması, sertliğin artmasına neden olmaktadır. Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Cu (% 0,1-0,2-0,4), (demirden farklı olmaksızın) Cu oranının artması ile sertliğin arttığı gözlenmiştir. Fe bazlı intermetalikler ve T6 ısıl işlemi sonrasında yapıda çökeltilen olarak Mg_2Si çökeltileri ile birlikte, Cu ilavesi ile yapıda oluşan Al_2Cu fazı da sertliğinin artmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca yapıda meydana gelen tane incelmesi de sertliği arttırmaktadır. Bakır, oldukça iyi katı eriyik oluşturmada ve uygun ısıl işlemle, çökelti oluşmasına katkı sağlayarak yüksek dayanım sağlayabilmektedir [29].

4.6. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

Döküm Al-Si-Mg alaşımlarının çekme mukavemetleri ve % uzama sonuçları, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de numune konumuna bağlı olarak çekme mukavemeti ve % uzama grafiklerinden, döküm işlemleri ve

alaşımının katılaşması sırasında ki soğumaya şartlarına bağlı olarak meydana gelen değişim görülmektedir. Kalıp kumunun ısıl iletkenliğine ve yolluk sistemine bağlı olarak, yolluk sistemine yakın bölgelerde katılaşan sıvı metalin çekme mukavemeti ve % uzama değerlerindeki azalma net bir şekilde görülmektedir. Fe ilave edilen alaşım grubunda Fe'in miktarının artmasına ve faz morfolojisinin değişimine bağlı olarak çekme mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık kalıp içerisinde oluşan soğuma hızı farkı nedeniyle, kalıp dış yüzeyine yakın bölgelerden alınan numunelerin çekme mukavemetinde bir miktar artış olduğu gözlenmiştir. Fe miktarın artması ile çekme mukavemetin de azalma gözlenirken, hem soğuma hızına bağlı olarak ta tane boyutunda ve boşluk oluşumundaki değişim olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle, hızlı soğumanın yapı içerisindeki erken çekirdeklenen demir bazlı intermetaliklerin daha ince ve homojen dağıldığı ve çekme testleri sırasında daha az çentik etkisine neden olduğu düşünülmektedir. Döküm yöntemi ile üretilen Al-Si-Mg alaşımın Cu elementinin ilave edilmesi ile çekme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Fe ilave edilen alaşımların çekme mukavemeti ve % uzama değerlerinde olduğu gibi, Cu ilave edilen alaşımlarda da katılaşma hızına bağlı olarak, merkez'e ve merkeze yakın bölgelerden hazırlanan numunelerin çekme mukavemetlerinin bir miktar azaldığı gözlenmiştir.

	Numune konumu çekme test sonuçları	Ort.
0,2 Fe	<p>Çekme Muk. (●-MPa)</p> <p>Uzama (×-%)</p> <p>Numune Konumu</p>	183 MPa 8,6 % uzama
0,3 Fe	<p>Çekme Muk. (●-MPa)</p> <p>Uzama (×-%)</p> <p>Numune Konumu</p>	176 MPa 6,6 % uzama
0,6 Fe	<p>Çekme Muk. (●-MPa)</p> <p>Uzama (×-%)</p> <p>Numune Konumu</p>	171 MPa 7,7 % uzama
1,2 Fe	<p>Çekme Muk. (●-MPa)</p> <p>Uzama (×-%)</p> <p>Numune Konumu</p>	146 MPa 6,7 % uzama

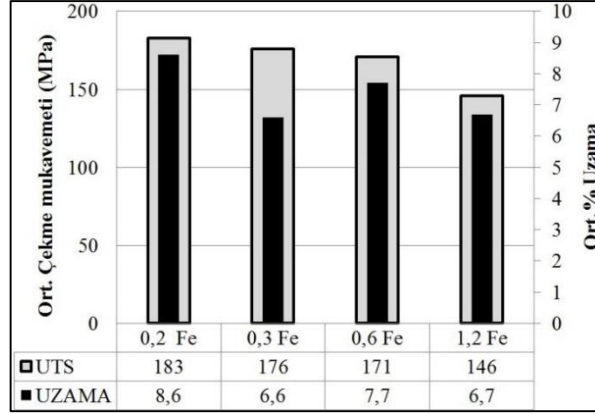
Şekil 4.13. Fe alaşımlarının ortalama çekme dayanımları ve % uzama sonuçları.

	Numune konumu çekme test sonuçları	Ort.
0,1 Cu		163 MPa 7,7 % uzama
0,2 Cu		175 MPa 6,6 % uzama
0,4 Cu		185 MPa 8,6 % uzama

Şekil 4.14. Cu alaşımlarının ortalama çekme dayanımları ve % uzama sonuçları.

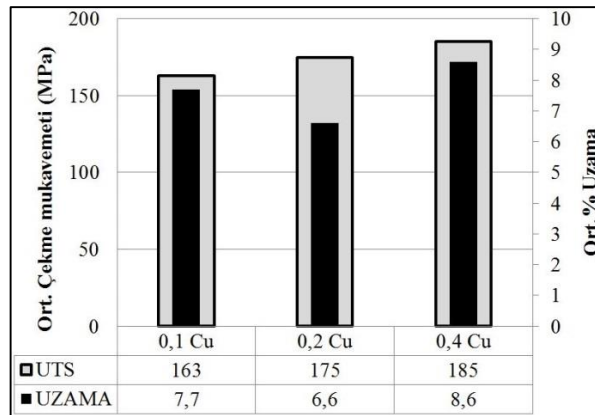
Al-Si-Mg alaşımına edilen Fe oranına göre en yüksek ortalama çekme mukavemeti % 0,2 Fe 183 MPa, yüzde uzama % 8,6, % 0,3 Fe ilave edilen alaşımının ortalama çekme mukavemeti 176 MPa, yüzde uzaması % 6,6, % 0,6 Fe ilave edilen alaşımının ortalama çekme mukavemeti 171 MPa, yüzde uzaması % 7,7, en düşük çekme mukavemeti % 1,2 Fe ilave edilen alaşımında 146 MPa, yüzde uzaması % 6,7 elde edilmiştir. Moustafa ve ark ve Ma ve ark, yaptığı çalışmalarda, Al-Si-Mg alaşımlarına eklenen demirin mikro yapıda farklı bileşimlere sahip Al-Si-Fe intermetaliklerinin oluşmasına

sebepe olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çekme testleri sonuçlarında demir miktarına bağlı olarak çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerinin azaldığını belirtmişlerdir [24,25]. Şekil 4.15’de Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Fe oranlarının ortalama çekme mukavemeti ve % uzama grafik olarak verilmektedir.



Şekil 4.15. Fe ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının ortalama çekme mukavemeti ve % uzama sonuçları.

Şekil 4.16’da Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Cu oranlarının ortalama çekme mukavemeti ve % uzama gösterilmiştir. Döküm yöntemiyle üretilen Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Cu oranına göre çekme test sonuçlarından, en düşük ortalama çekme mukavemeti ve % uzama değeri % 0,1 Cu ilave edilen alaşımda 163 MPa, yüzde uzama % 7,7, % 0,2 Cu ilave edilen alaşımda ortalama çekme mukavemeti 175 MPa, yüzde uzama % 6,6 ve en yüksek ortalama çekme mukavemeti % 0,4 Cu ilave edilen alaşımda 185 MPa, yüzde uzama % 8,6 olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.16. Cu ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının ortalama çekme mukavemeti ve % uzama sonuçları.

Döküm malzemenin, içerdiği oksitler, boşluk miktarı, katılaşma sonrasında oluşan intermetalikler ve tane yapısı, alaşımların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Çekme test sonuçları incelendiğinde Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Fe miktarının artmasıyla mekanik özelliklerin azaldığı belirlenmiştir. Sıvıda çözünen hidrojen miktarı katıda çözünen hidrojen miktarından (20 kat) daha yüksek olduğundan dolayı, dendritler arasına sıkışan oksit film (bifilm) katmaları, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak mikro yapıda gözeneklere sebep olmaktadır. Bu durum, Al-Si-Mg döküm alaşımlarında oluşan mikro gözeneklerin sebebini de açıklamaktadır [20]. Ayrıca Fe ilavesi arttıkça oluşan Fe-zengin fazlarının büyümesi nedeniyle, alaşımın çekme dayanımının da azaldığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.6 ve 4.7’de verilen EDS sonuçları ve Şekil 4.8’de verilen XRD sonuçları ile çekme mukavemeti sonuçları ilişkilendirildiğinde, Al_5FeSi ve Al_8Fe_2Si fazlarının çekme mukavemetini düşürdüğü, Al_2Cu , $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$, $Al_{0,5}Fe_3Si_{0,5}$ fazlarının çekme mukavemetini arttırdığı ifade edilebilir.

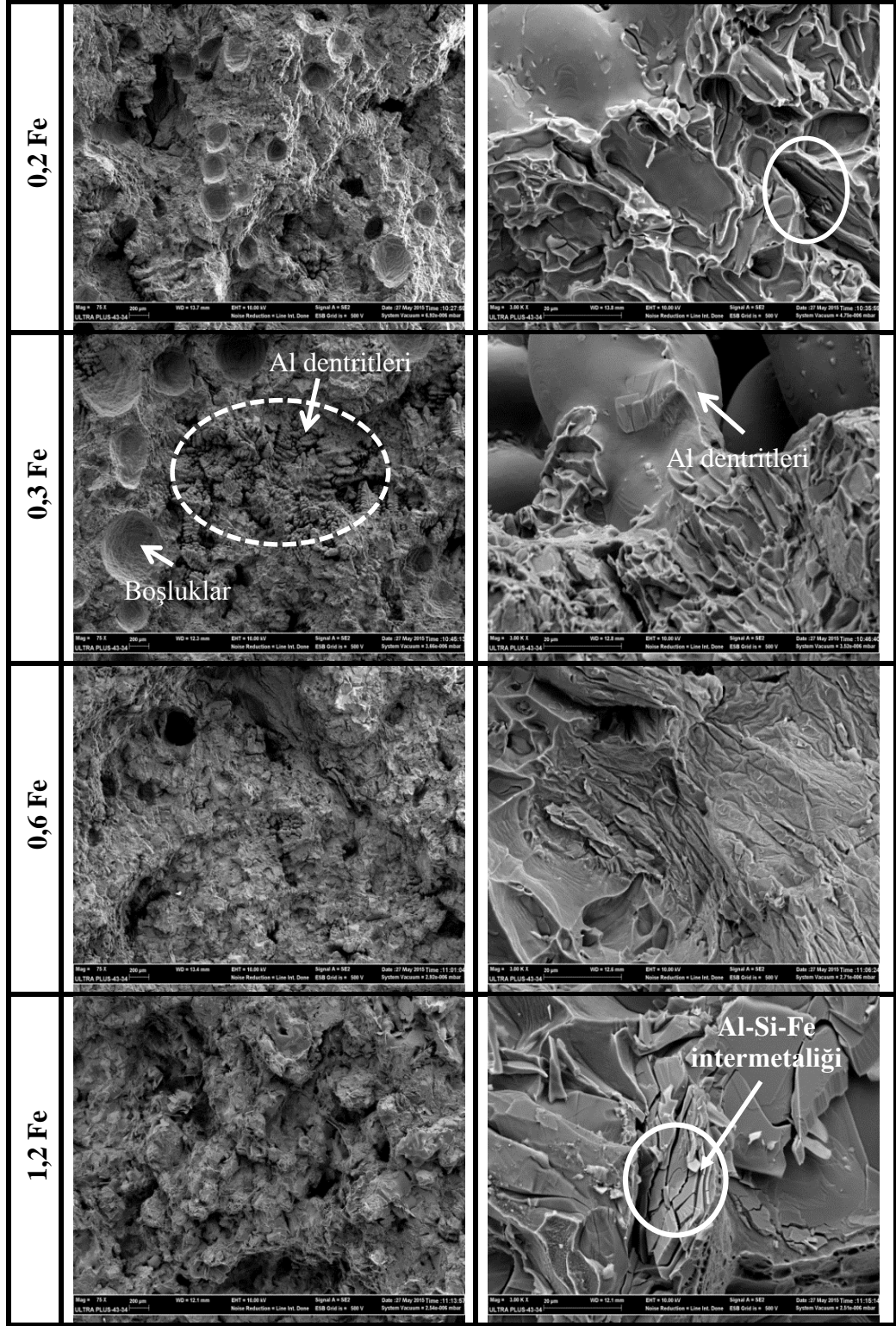
4.6.1. Kırık Yüzey (SEM) İncelemeleri

Döküm Al-Si-Mg alaşımına Fe ilave edilerek üretilen alaşımlarda en düşük çekme mukavemetine sahip numunenin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 4.17’de, en yüksek çekme mukavemetine sahip numunenin kırık yüzey SEM görüntüleri ise Şekil 4.18’de verilmiştir. Ayrıca Al-Si-Mg alaşımına Cu ilave edilen alaşımlarında en düşük çekme mukavemetine sahip numunenin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 4.19’de, en yüksek çekme mukavemetine sahip numunenin kırık yüzey SEM görüntüleri ise Şekil 4.20’de verilmiştir.

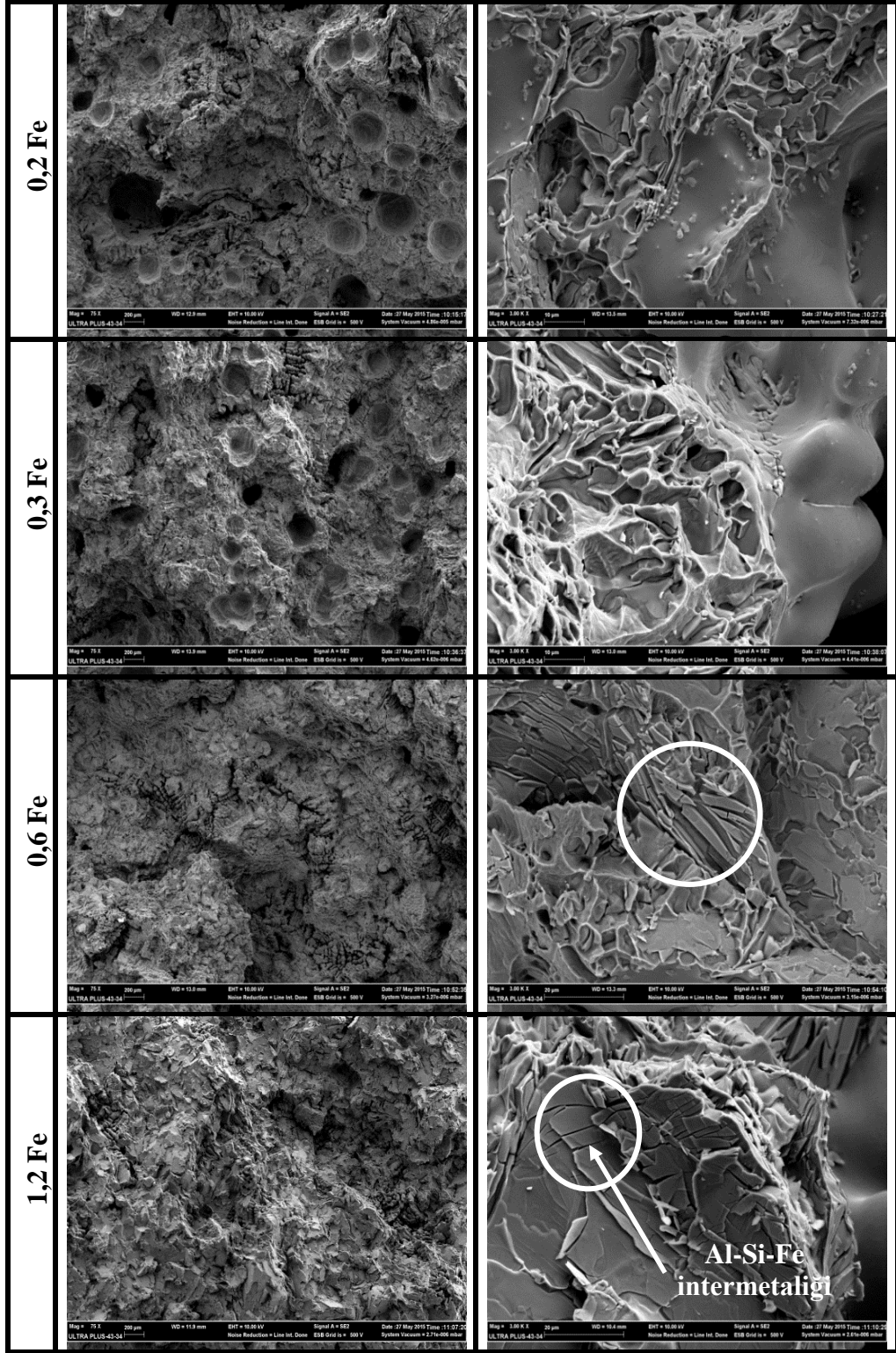
Fe ilave edilen alaşımların kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, yapıda bazı oksitlerin oluştuğu görülmektedir. Al ve alüminyum alaşımları dökümünde, sıvı metalin hazırlanması ve yolluk sistemindeki akış sırasında, sıvı metalin oksitlendiği bilinmektedir. Döküm işlemi sırasında sıvı alüminyumun yüzeyinde oluşan oksit film tabakaları, sıvı metal ile beraber kalıp boşluğuna girmektedir [20]. Kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılmanın tane sınırları boyunca ve sonrasında ise, tane içlerinde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca yapıda oluşan boşlukların çevrelerinde, intermetalik fazların ve çökeltilerin yoğunlaştığı belirlenmiştir. Fe-bazlı

intermetalikler genellikle boşluk çevresini oluşturan dendritlerin kesiştiği kısımlarda çekirdeklenmiştir.

Döküm işlemleri sırasında yapıda oluşan intermetaliklerin (fiziksel ve mekanik özellikleri matris yapıyla farklı oldukları için), yük altındaki kalıcı plastik deformasyonu (kırılma gibi), matris-intermetalik ara yüzelerindeki uyumsuz bölgelerden başlamaktadır. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiş olan Fe ilave edilen alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntülerindeki matris-intermetalik faz uyumsuzluğu nedeniyle kırılmaların bu bölgelerde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca Fe oranının artması ile kırık yüzeylerin gevrek kırılma olup, yapının içindeki Fe intermetalik fazların tane içi kırılımları yüzey topografından da anlaşılmaktadır.

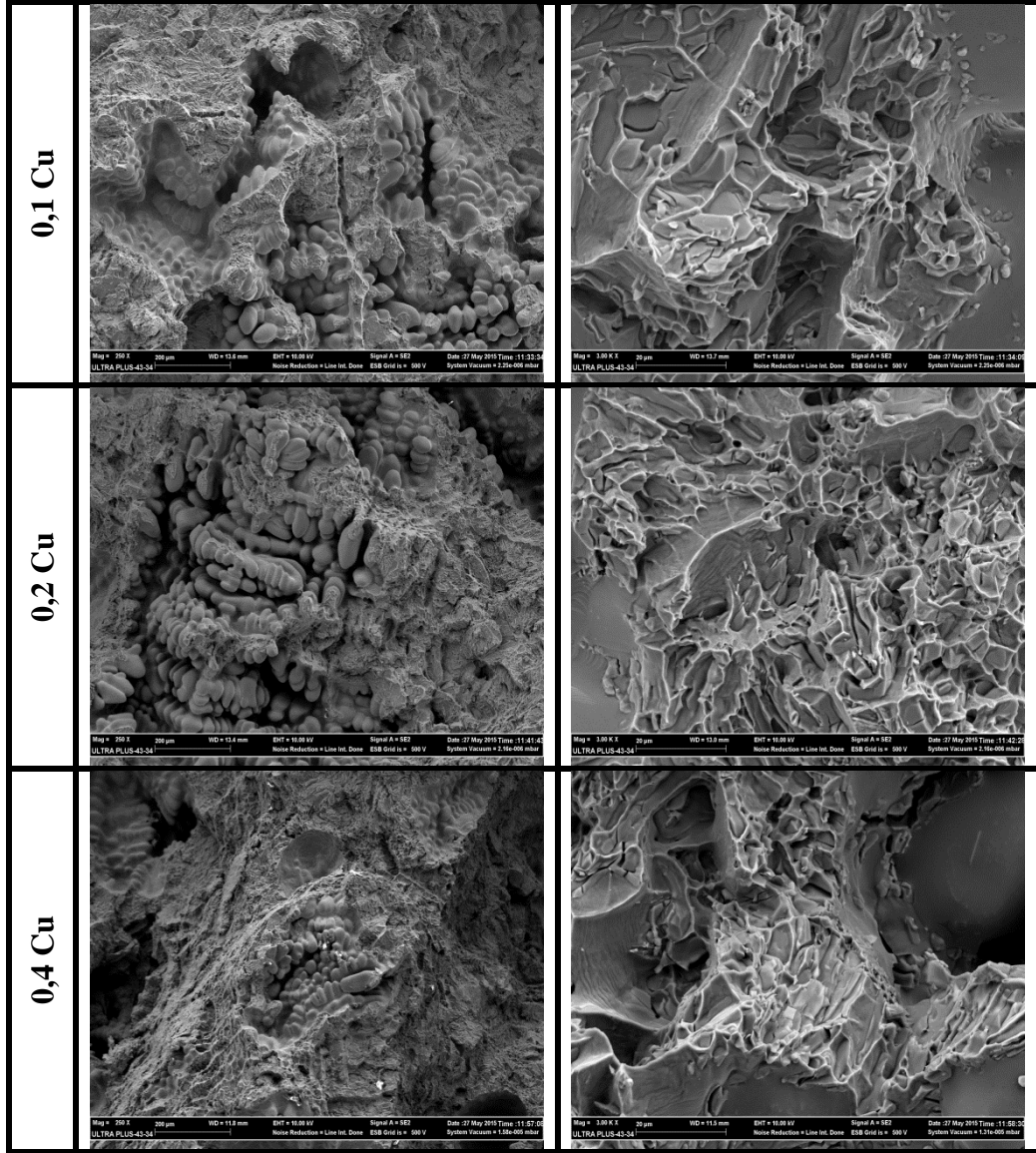


Şekil 4.17. Fe ilave edilen en düşük çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.



Şekil 4.18. Fe ilave edilen en yüksek çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.

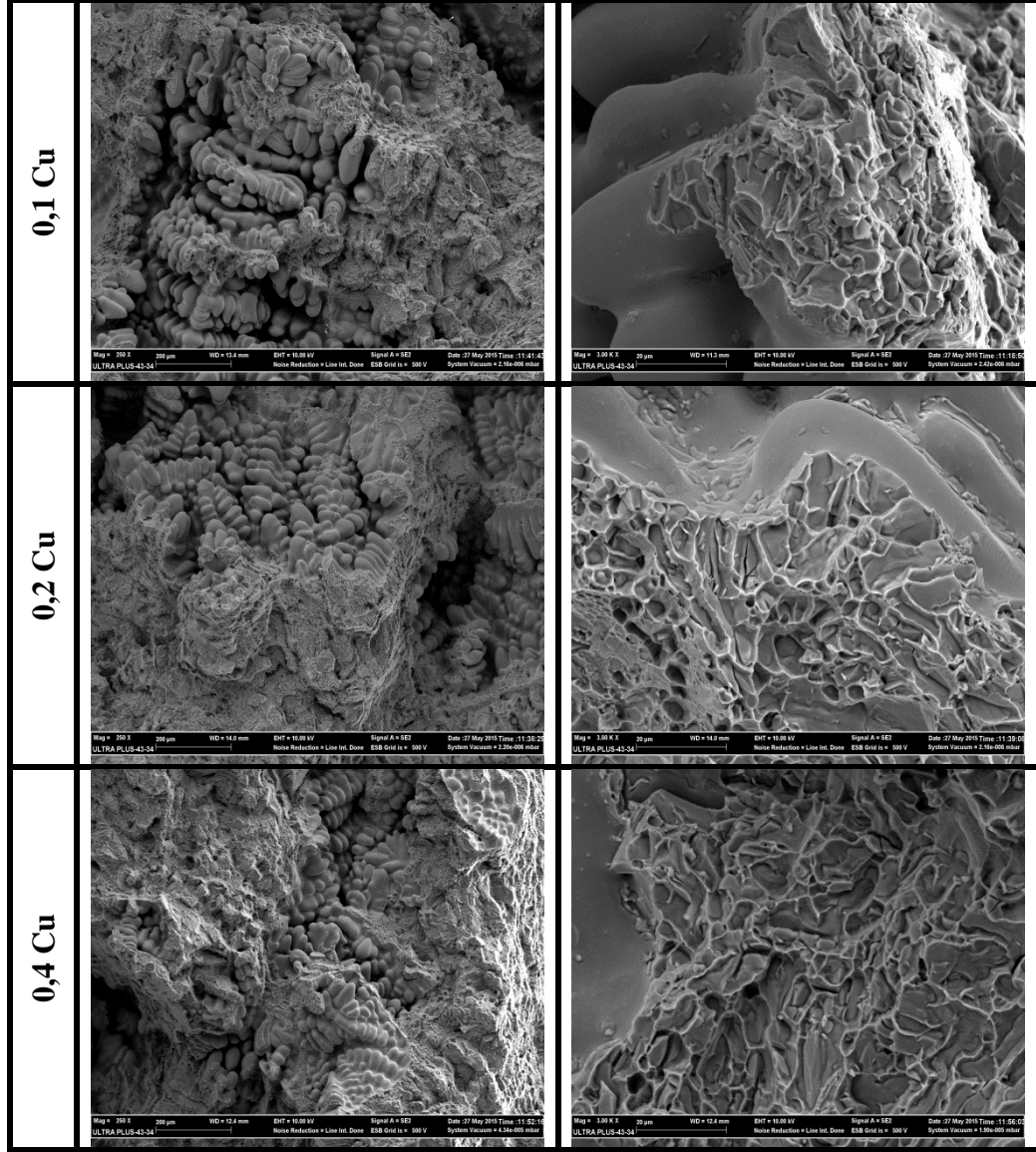
Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de Cu ilave edilen alaşımların çekme testi sonucunda oluşan kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, yapıda oksit türü fazların bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. Cu ilave edilen en düşük çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.

Bozchaloei ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, sıvı metalin kalıba transferi sırasında, yüzey oluşur. Oksit film tabakasının kendi üzerine katlanması veya kırılması sonucu, kırılmaların bu bölgelerde olduğu belirtilmektedir [20]. Fe ilave edilen alaşımlarının kırık yüzeylerinde belirtildiği gibi, Cu ilave edilen alaşımlarda da bakır ve alüminyum oksitlerin matrisle uyumsuzluğundan kaynaklanan kırılmalar oluşmaktadır. Ayrıca kırılma bölgelerinde oksitlerin çevresinde demir bazlı

intermetaliklerin ve çökeltilerin oluştuğu görülmektedir. Tüm numunelerin topografyasından da kırılmaların gevrek karakterli olduğu anlaşılmaktadır.

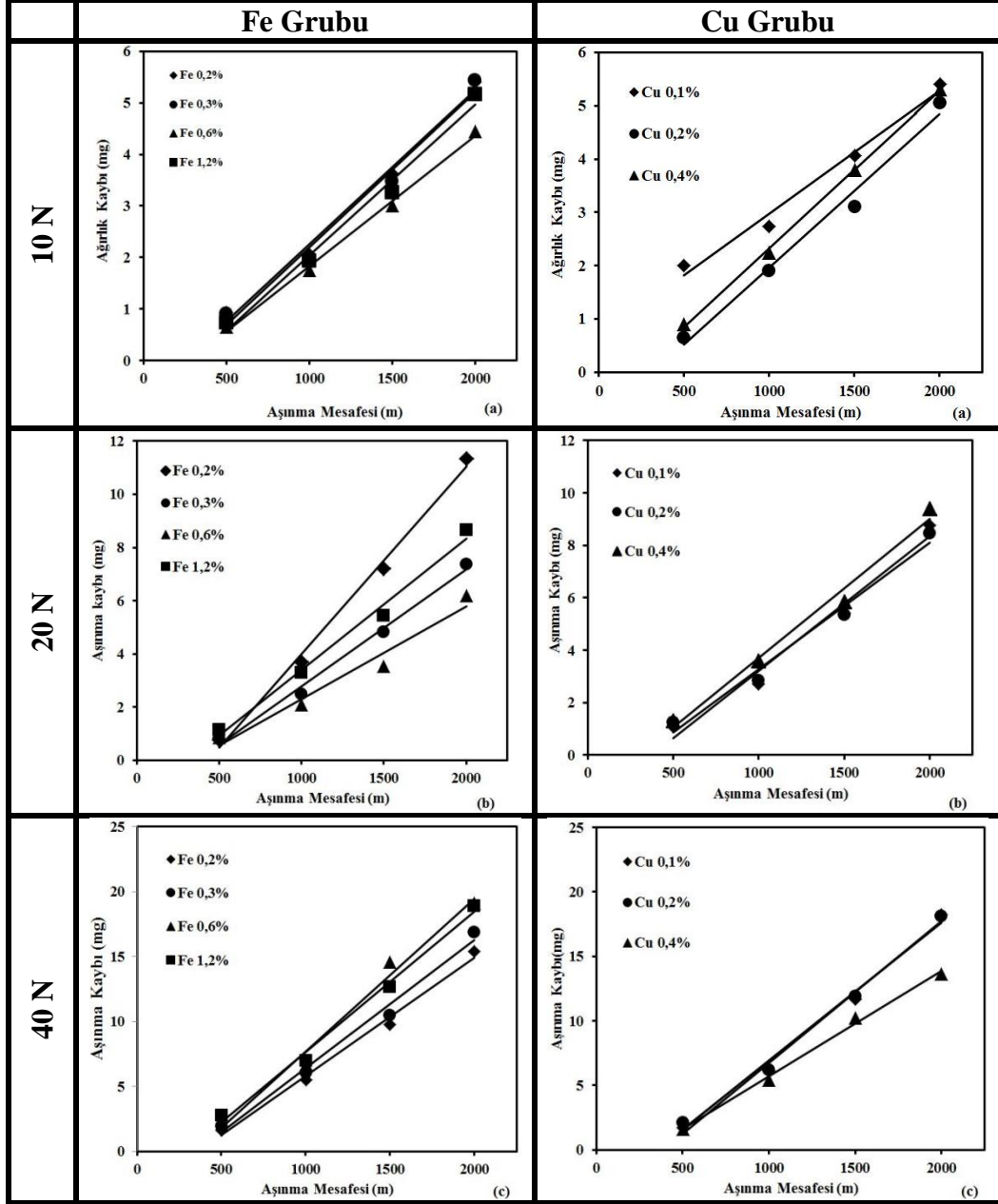


Şekil 4.20. Cu ilave edilen en yüksek çekme dayanımlı numunelerin SEM görüntüleri.

4.7. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

Bu çalışmada, döküm Al-Si-Mg alaşımı malzemelerine ilave edilen Cu (% 0,1-0,2 ve 0,4) ve Fe (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) alaşım elementlerinin mekanik özellikler üzerine etkisinin belirlenmesi için, aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri numuneleri 10-20-40 N yük altında, 1 ms^{-1} kayma hızında ve 4 farklı (500 m, 1000m, 1500 m ve 2000

m) kayma mesafesinde yapılmıştır. Aşınma testleri sonucunda, numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları, Şekil 4.21’de gösterilmektedir.

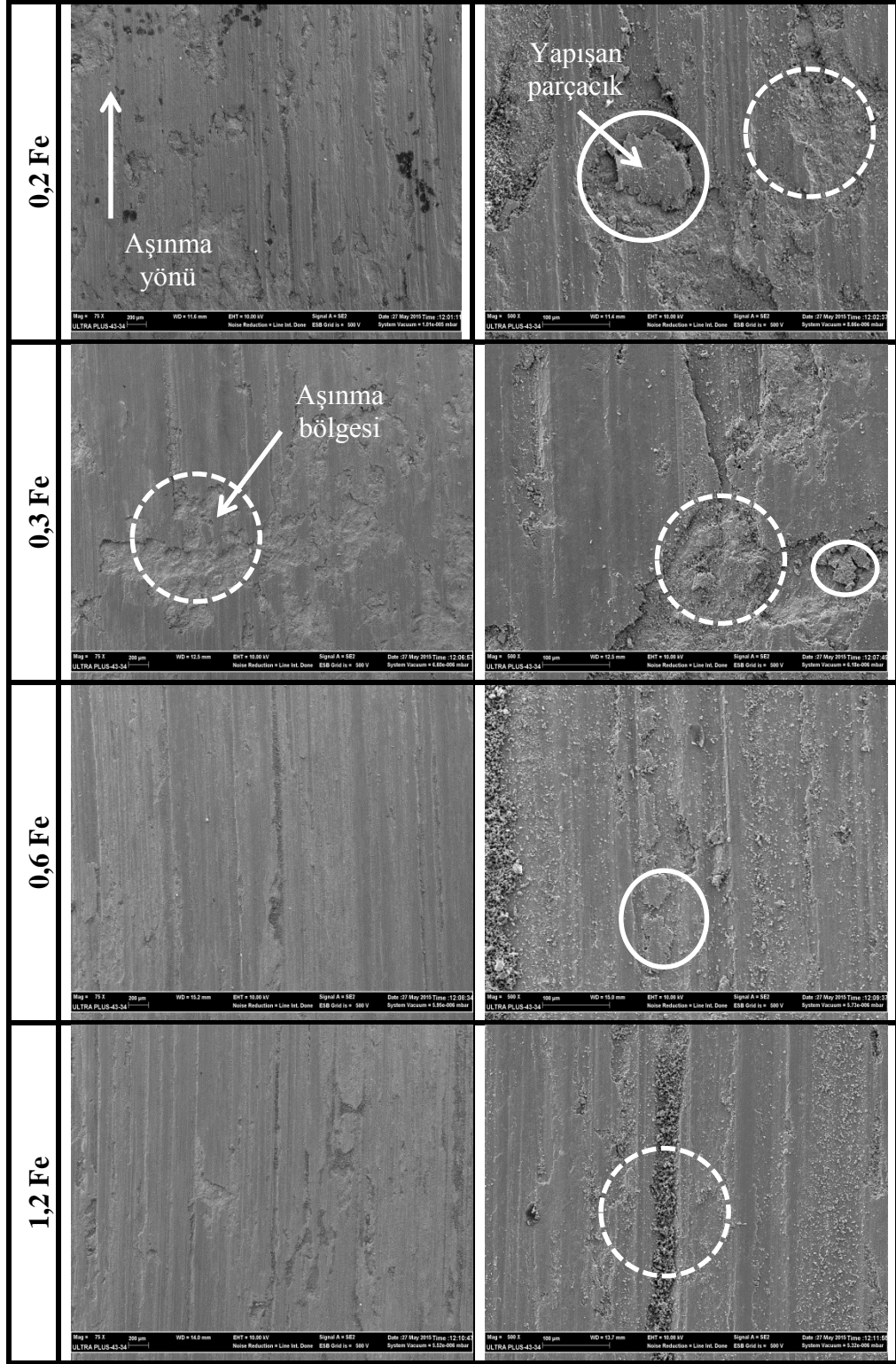


Şekil 4.21. Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ve % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu alaşımlarının, a)10N, b)20N, c)40N yük altında ağırlık kayıpları.

Şekil 4.21’de verilen döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Cu (% 0,1-0,2 ve 0,4) ve Fe (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) oranlarına sahip alaşımların ağırlık kayıpları incelendiğinde, kayma mesafesindeki artışa bağlı olarak ağırlık kayıplarının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, malzeme içindeki intermetalik demir fazlarının matris

fazdan kopması olduğu düşünülmektedir. Uygulanan yük miktarının artması ile ağırlık kaybının arttığı gözükmektedir. Şekil 4.20’de verilen sonuçlar incelendiğinde, en düşük ağırlık kaybı 10-20 N % 0,6 Fe demir miktarına sahip alaşımda elde edilmiştir. Bununla birlikte 40 N yük altında ise, en düşük ağırlık kaybı % 0,2 Fe miktarına sahip alaşımda elde edilmiştir. Bu sebebi Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te verilen optik mikroskop ve Şekil 4.4, Şekil 4.5’de SEM görüntüleri ile beraber incelendiğinde, ağırlık kaybının demir bazlı intermetaliklerin kalınlıkları ve morfolojiyle yakın ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yapıda oluşan diğer ikincil fazların (Mg_2Si ve Al_2Cu çökeltilerin) etkisi net olarak görülememiştir. 10, 20 ve 40 N yükler altında hemen hemen en yüksek ağırlık kaybı % 1,2 Fe alaşımda meydana gelmiştir. Bunun sebebinin, intermetalik Fe fazları ve Al ana matris ile arasındaki ara yüzeyin uyumsuzluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

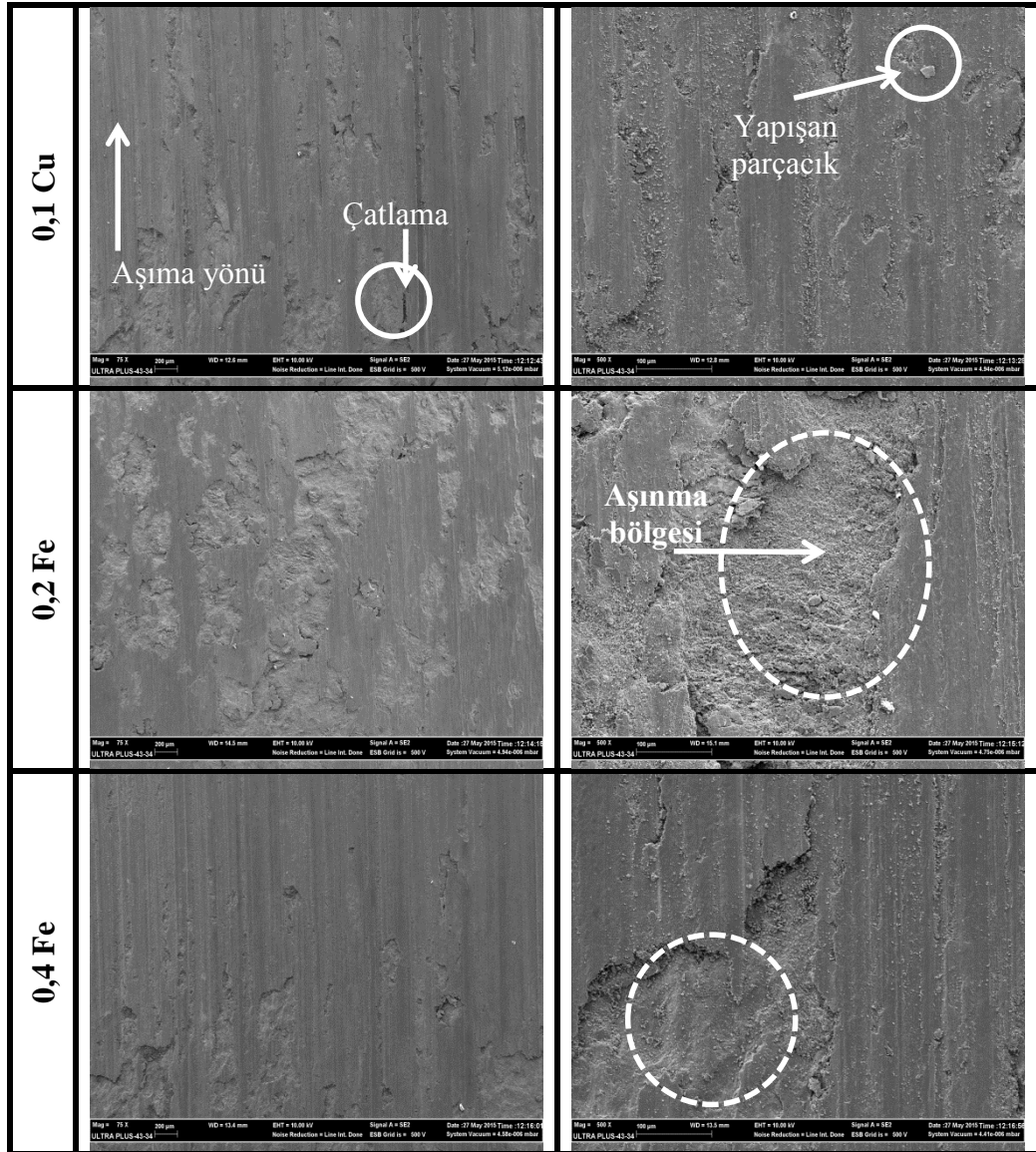
Al-Si-Mg alaşımına farklı miktarlarda Cu ilave edilen alaşımlarda ise, 10 ve 20 N yük altında % 0,2 Cu alaşımında en düşük ağırlık kaybının elde edilmiştir. % 0,4 Cu alaşımı, % 0,2 Cu alaşımına yakın bir aşınma kaybı elde edilmiştir. 40 N yük altında % 0,4 Cu alaşımında en düşük ağırlık kaybı, % 0,1 ve 0,2 Cu alaşımlarında ise, hemen hemen eşit miktarda aşınma kaybı elde edilmiştir. Yapıda oluşan Al_2Cu çökeltilerinin etkisi bu alaşımda görülmüştür. Fakat Cu ilavesinin aşınma üzerine etkisi net olarak belirlenememiştir. Şekil 4.22’de farklı oranlarda Fe ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.22. Farklı oranlarda Fe ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının 40 N yük 2000 m kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 4.22’de verilen % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe ilave edilen alaşımlarına ait (10-20-40) N yük altında, % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe alaşımında aşınma testleri sırasında meydana

gelen kayma yönleri net olarak görülebilmektedir. Ayrıca alaşımlarda (belirli bölgelerde) adhesiv aşınma olduğu görülmektedir. Şekil 4.22’de Fe oranı miktarına bağlı olarak aşınma sırasında oluşan aşınma çiziklerinin artışı görülmektedir. Bunun sebebi, alaşımda artan Fe miktarına bağlı olarak oluşan intermetaliklerin aşınma sırasında kırılarak yumuşak alüminyum matrisi deforme etmektedir. Ayrıca yapıda yüzeyden kopan mikro parçacıklarının azaldığı da görülmüştür. % 0,2-0,3-0,6 ve 1,2 Fe alaşımların aşınma yüzeylerinde de bir miktar oksidasyon olduğu görülmektedir. Cu ilave edilen Al-Si-Mg alaşımların aşınma yüzeyi SEM görüntüleri, Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23. Farklı oranlarda Cu ilave edilen Al-Si-Mg alaşımlarının 40 N yük 2000 m kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 4.23’de verilen % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu alaşımlarına ait (10-20-40) N yük altında, % 0,1-0,2 ve 0,4 Cu alaşımlarda, aşınma sırasındaki deformasyondan dolayı aşınma çizgileri oluşmaktadır. Cu bazlı Al-Si-Mg alaşımlarının belirli bölgelerde adhesiv mekanizma sonucunda oluşan sıvanmalar, kopmalar ve çatlamlar olduğu gözlenmektedir. Kayma yönüne bağlı olarak yüzeyden kopan mikro parçacıklarının tekrar yüzeye yapıştığı görülmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. SONUÇLAR

Bu çalışma ile elde edilen genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Döküm Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Fe (% 0,2-0,3-0,6 ve 1,2) elementinin miktarının artmasıyla, iğne şeklinde Fe intermetalik fazların oluştuğu ve tane yapısının incelendiği OM, SEM görüntüleri (EDS sonuçları) ve XRD analizleri ile belirlenmiştir.
- Fe elementinin miktarının artması ile, Fe intermetaliklerinin morfolojisin değiştiği, intermetalik fazın kalınlaştığı ve farklı bileşime sahip (demirce artan) olduğu belirlenmiştir.
- Fe ilave edilen alaşımlarda, Al_5FeSi ve Al_8Fe_2Si intermetaliklerinin oluştuğu görülmüştür.
- XRD incelemeleri sonucunda Cu ve Fe alaşımlarında alaşım elementine bağlı olarak demir ilavesi ile, $Al_{0,5}Fe_3Si_{0,5}$ fazının ve farklı demir bazlı intermetaliklerin oluşmuştur. Buna karşın, bakır ilavesi ile Al_2Cu çökeltilerinin ve $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$ intermetalik fazın oluştuğu görülmüştür.
- Döküm Al-Si-Mg alaşımına Cu ve Fe'in sertlik değerleri karşılaştırıldığında, ilave edilen Cu ve Fe miktarına bağlı olarak artmaktadır. Fe grubu alaşımlarında en yüksek sertlik değeri % 1,2 Fe alaşımında (110 HV2) ve Cu grubu alaşımlarında en yüksek sertlik değeri % 0,4 Cu alaşımında (100 HV2) ölçülmüştür.
- Çekme test sonuçlarına göre, döküm Al-Si-Mg alaşımına ilave edilen Fe elementi miktarının artması ile, max. çekme mukavemeti ve yüzde uzama miktarı düşmüştür. Buna karşın ilave edilen Cu elementi miktarının artması ile, max. çekme mukavemeti ve yüzde uzama miktarının artmaktadır.

- Yoğunluk ölçüm sonuçlarına göre, ilave edilen Fe ve Cu miktarının artmasıyla yoğunluğun arttığı belirlenmiştir.
- Aşınma testleri göre, döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Cu miktarına bağlı olarak bir etki görülmemiştir. 10-20 N yük altında en az aşınma 0,2 Cu alaşımında, 40 N yük altında ise, en az aşınma 0,4 ve 0,1 Cu alaşımlarında (hemen hemen aynı) ölçülmüştür.
- Aşınma testleri göre, döküm Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Fe miktarına bağlı olarak değişen Fe intermetalığının morfolojisinden dolayı, Fe'in aşınma testleri üzerine net bir etkisi görülmüştür. 10-20 N yük altında en az aşınma 0,6 Fe alaşımında, 40 N yük altında ise, en az aşınma 0,2 Fe alaşımında ölçülmüştür.

5.2. ÖNERİLER

İleride yapılacak araştırmalar için öneriler;

- Al-Si-Mg alaşımlarına farklı alaşım elementlerinin (Cr, Mn vb.) mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir.
- Al-Si-Mg alaşımlarına ilave edilen Fe ve Cu miktarlarında boşluk oluşumu ve mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.
- Farklı bileşimde Fe ve Cu içeren alaşım sistemlerinde tane inceltici kullanımının mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.
- Aşınma deneyleri farklı kayma hızları ve yükleri test edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Hirsch, J. and Al-Samman, T., "Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications" *Acta Materialia* 61, 818–843 (2013).
2. Miller, W. S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A.J., De Smet P., Haszler A. and Vieregge A., "Recent development in aluminium alloys for the automotive industry", *Materials Science and Engineering*, 280, 37–49 (2000).
3. Edwards, K. L., "Strategic substitution of new materials for old: applications in automotive product development", *Materials and Design*, 25, 529-533 (2004).
4. Capus, J., "PM light alloys gaining applications in automotive sector", *Metal Powder Report*, 68 (6): 12–15 (2013).
5. Campbell, J., "Complete Casting Handbook", *Published by Elsevier Ltd.*, (2011).
6. Eisaabadi, G. B., Davami, P., Kim, S.K. and Varahram, N., "Effects of hydrogen and oxides on tensile properties of Al–Si–Mg cast alloys", *Materials Science and Engineering A*, 36– 47 (2012).
7. Akhtar, S., Arnberg, L., Sabatino M.D., Dispinar, D. and Syvertsen, M., "A comparative study of porosity and pore morphology in a356 alloy", *American Foundry Society.*, 39-52 (2008).
8. Tunçay, T., Tekeli, S., and Özyürek, D., "The effect of diffuser and non-diffuser runner systems on the mechanical properties of a356 alloy ", *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol.28 (2), 241-249 (2013).
9. Eisaabadi, G., Davami P., Kim S. K. and Tiryakioğlu, M., "The effect of melt quality and filtering on the Weibull distributions of tensile properties in Al–7%Si–Mg alloy castings" *Materials Science and Engineering A.*, 64–70 (2013).
10. Campbell, J., "Casting", *Butterworth- Heinemann, Oxford*, United Kingdom (2003).
11. Campbell, J., "Castings Practice The 10 Rules of Castings", *Butterworth-Heinemann, Oxford*, United Kingdom (2004).

12. Dai, X., Yang, X., Campbell, J. and Wood, J., "Effect of runner system design on the mechanical strength of Al-7Si-Mg alloy casting", *Materials Science Engineering A*, 315-325 (2003).
13. Reilly, C., Green, N. R. and Jolly, M. R., "Surface oxide film entrainment mechanisms in shape casting running system", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Volume 40B, 850-858 (2009).
14. Mbuya, T. O., Oduori, M. F., Rading G. O. and Wekesa M.S., "Effect of runner design on mechanical properties of permanent mould aluminium", *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 19 (2006).
15. Mi J., Harding, R.A. and Campbell, J., "Effects of the entrained surface film on the reliability of castings", *Metallurgical And Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science 35A*, 9, 2893-2902 (2004).
16. Hsu, F. Y., Jolly, M. R. and Campbell, J., "A Multiphase runner system for gravity casting", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, 17, 5736-5750 (2009).
17. Pavlak, L., "Effect of filling conditions on the quality of cast aluminum cylinder heads", *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, 31-39 (2008).
18. Sirrell, B. and Campbell, J., "Mechanism of filtration in reduction of defects due to surface turbulence during mold filling", *AFS*, 645-654 (1997).
19. Hsu, F. Y. and Lin, H. J., "Foam filters used in gravity casting", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Volume 42B, 1110-1117 (2011).
20. Bozchaloei, G. E., Varahram, N., Davami, P. and Kim, S. K., "Effect of oxide bifilms on the mechanical properties of cast Al-7Si-0.3Mg alloy and the role of runner height after filter on their formation", *Materials Science and Engineering A*, 99-105 (2012).
21. Campbell, J., "Entrainment defects", *Materials Science and Technology*, Volume 22, No 2, 127-145 (2006).
22. Tunçay, T., and Özyürek, D., "The effect on microstructure and mechanical properties of filtration in Al-Si-Mg alloys", *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol.29 (2), 271-279 (2014).
23. Warmuzek, M., "Metallographic techniques for aluminum and its alloys", *ASM Handbook*, Volume 9, 711-751 (2004).
24. Moustafa, M. A., "Effect of iron on the formation of β -Al₅FeSi and porosity in Al-Si Eutectic alloys", *Journal of Processing Technology*, 605-610 (2009).

25. Ma, Z., Samuel, A. M., Samuel, F. H., Doty, H. W. and Valtierra, S., “A study of tensile properties in Al–Si–Cu and Al–Si–Mg alloys: effect of β -iron intermetallics and porosity”, *Materials Science and Engineering A*, 36–51 (2008).
26. Ammar, H. R. and Samuel, A.M., “Porosity and fatigue behavior of hypereutectic and hypereutectic aluminium” silicon casting alloys, *Materials Science and Engineering*, 1024-1035 (2008).
27. Askeland, D. R., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri kitabı”, Cilt 2., Çeviri: Erdoğan, M., *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara 271-272 (1998).
28. Akça, H., “Tig yöntemi ile kaynak edilen alüminyum ve alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16-40 (2006).
29. Smith, W. F., “Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikler” Demir Dışı Alaşımlar, Cilt 2., Çeviri: Erdoğan, M., *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara (2000).
30. Özer, A. ve Şen, A. “Alüminyum alaşımlarında filtrasyon uygulaması” Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi *Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Karabük 3-15 (2000).
31. Erdoğan, M., Tekin, R. ve Kaya, M., “Mikrodalga fırında suni yaşlandırılan 6013 alüminyum alaşımının korozyon davranışının incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (1): 25-30 (2014).
32. Maddox, S.J., “Review of Fatigue Assessment Procedures For Welded Aluminium Structures”, *Int. J. Fatigue*, 25 (12): 1359-1378 (2003).
33. Rooy, E.L., “Properties and selection non ferrous alloys and special–purpose materials, introduction to aluminum and aluminum alloys, Vol. 2, A.S.M Handbook”, *American Society For Metals*, Ohio (1995).
34. Chong, P. H., Liu, Z., Skeldon, P., ve Thompson G. E., “Corrosion behavior of laser surface melted 2014 aluminium alloy in T6 and T451 tempers”, *The Journal Of Corrosion Science And Engineering*, 6, 12 (2003).
35. Çolak, M. ve Kayıkcı, R., “A356 Döküm alaşımında elektromanyetik karıştırmanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 15 (3): 345-351 (2009).
36. Sigworth, G. K. and Kuhn, T. A., “Refinement of aluminium casting alloys”, *AFS Transactions*, Vol. (115), 1-12 (2007).
37. Eruslu, N., “Alüminyum alaşımlarının dökümü ve yapı kontrolü”, *SEGEM Yayınları*, İstanbul (1984).

38. Kır a, M., “Alüminyum alaşımları”, *İT  Kimya-Metalurji Bölümü*, İstanbul (1983).
39. Ateş, M., "Basıncılı döküm yöntemiyle  retim OHTEA tekniği uygulaması ile ürün ve proses optimizasyonu” *İstanbul Teknik Üniversitesi*, 54 (2): 40-44 (1995).
40. A.S.M., “Metals Handbook”, *Alloy Phase Diagrams, Binary Alloy Phase Diagrams*, Vol. 3, 52. (1992).
41.  işik, A. H., “Alüminyum alaşımları”, *İTÜ Maden Bölümü*, İstanbul (1978).
42. Őenel, L., “Al-Si Döküm alaşımlarının sıkıştırma döküm yöntemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2004).
43. Er, M., “Yüksek frekanslı, genlik ayarlı eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve 1100-H14 alüminyum levhasının eğilme yorulması davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi *Balıkkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkkesir, 1-20 (2006).
44. Dey, A. K., Poddar, P., Singh, K. K, and Sahoo, K. L., “Mechanical and wear properties of rheocast and conventional gravity die cast a356 alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 435–436, 521–529 (2006).
45. Youn, S. W. and Kang, C. G., “Characterization of agehardening behavior of eutectic surface on rheocast a356-t5 alloy by using nano/microindentation, scratching and atomic force microscopy” *Materials Chemistry and Physics*, 100, 117–123 (2006).
46. Fakıoğlu, A. “Yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi ” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük  niversitesi fen bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 4-20 (2012).
47. S zen, C. ve Duran A., “Genel Dökümcülük Bilgisi Temel Ders Kitabı Cilt 1”, *MEB*, Ankara 208-243 (1991).
48. Yu K. O., “Modeling for Casting and Solidification Processing”, *Marcel Dekker*, New York. 1-54 (2002).
49. Stefanescu, D.M., “Science and Engineering of Casting Solidification”, *Springer*, New York, 1-3 and 75-125 (2009).
50. İnternet: Vesuvius, “Feseco”, http://www.foseco.com.tr/tr/downloads/brochures/SEDEX_tr_final.pdf f. (2015).

51. Liu, Q., Smith, L. W. and AHOO, M. S., “Influence of filtreingi degassing and mish metal addition on hot tearing of c83609 cupper alloy” *AFS Tran.*, 756-770 (1993).
52. Nikolai, M.F., “Effect of metal filtration on ASTM test bars” *APS Transactions* (96-145), 1017-1029 (1996).
53. Baydur. G., “Malzeme Ders Kitabı Cilt 1”, *Milli Eğitim Bakanlığı*, Ankara 208-243 (1979).
54. Suschil, A.L, “Gating Design” ASM Metals *Handbook Vol 15*, 589-597 (1994).
55. ASM Handbook, “Casting, aluminum and aluminum alloys” Vol 15, *Aluminum Company of America*, 749-753 (1988).
56. İnternet: Research in China, “China Magnesium Iudustry Report 2010”, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/mes-2011-mgmet.pdf>, 98-99 (2011).
57. İnternet: “Erdogan Döküm”, <http://www.erdogandokum.com/uretim.html> (2015).
58. İnternet: “Şirvanlı Alüminyum Döküm”, <http://www.xn--alminyumdkm-zfb4ej.com/aluminyum/kokil-kalip-nedir> (2015)
59. Chawla, N. and Chawla, K. K., “Metal matrix composites”, *Springer*, New York (2006).
60. Rohatgi, P K., “Metal-matrix composites”, *Defence Science Journal*, 43 (4): 323-349 (1993).
61. Fan, Z., “Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys” *Materials Science and Engineering A*, 413-414: 72-78 (2005).
62. Buschow, K. H. J., Chan, R. W., Flemings, M. C., Ilschner, B, Kramer, E. J., Mahajan, S. and Veyssiere, P., “Encyclapedia of Materials Science and Technology”, *Elsevier*, New York, 8432-8437 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Samet Bayoğlu 1987 yılında Adapazarı ilinde doğup, ilkokul ve ortaokul eğitimini Bilgin Özkaynak İlköğretim Okulunda (1993-2001) başarıyla tamamlamıştır. Lise öğrenimini Şehit Albay Günay Ekici Lisesinde (2001-2004) başarıyla tamamlamıştır. Telif adlı program adı altında Sakarya Endüstri Meslek Lisesini metal işleri bölümünü (2004-2005) başarıyla tamamlamıştır. Sakarya Hendek Meslek Yüksek Okulunda Makine teknikerliği bölümünü (2006-2008) başarıyla tamamlamıştır. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitim Bölümü Döküm Öğretmenliğini kazanmış ve Federal Mogul Türkiye Ltd. Şti. Firmasının'da 25 iş günü stajını başarıyla tamamladıktan sonra, lisans eğitimini Karabük üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitim Bölümü Döküm Öğretmenliği programını tamamlamıştır. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres.....: Yavuz selim mah. No:19 Kurtköy
Sapanca / SAKARYA

Tel.....: 0537 679 34 34

e-mail.....: sametbayoglu@gmail.com