

**Al-Si-Mg ALAŞIMLARINDA Mg ORANININ
MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**2012
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Musa YILDIRIM

**Al-Si-Mg ALAŞIMLARINDA Mg ORANININ MALZEMENİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

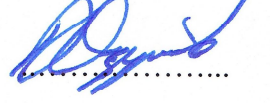
Musa YILDIRIM

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

**KARABÜK
Haziran 2012**

Musa YILDIRIM tarafından hazırlanan “Al-Si-Mg ALAŞIMLARINDA Mg ORANININ MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK




Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/ 06/ 2012

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası


Başkan : Doç. Dr. Recep ÇALIN (KÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)

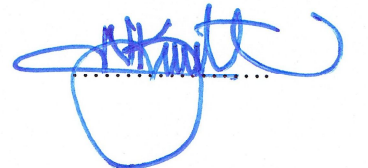


..../..../2012

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

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

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.”

Musa YILDIRIM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Al-Si-Mg ALAŞIMLARINDA Mg ORANININ MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Musa YILDIRIM

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Haziran 2012, 108 Sayfa

Bu çalışmada, ilk aşamada A356 alüminyum alaşımı farklı kalıp malzemelerinden (kum (silika), kromit ve seramik (lot607)) hazırlanan kalıplara dökülmüştür. Farklı kalıp malzemelerinden hazırlanan kalıplara yerleştirilen ısı çiftleriyle (termokopullarla) döküm sırasında ve sonrasında kalıpların soğuma hızları ölçülmüştür. İkinci aşamada ise A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Mg ilavesi yapılarak üç farklı (%0.43, %0.67, %0.86 Mg) alaşım plakalar halinde kum kalıba dökülmüştür. Dökülen tüm plakalar iç gerilimleri ve segregasyonları azaltmak için, 540 °C de 6 saat homojenizasyon ısı işlemi uygulanarak fırın ortamında soğutulmuştur. Daha sonra 540 °C de 8 saat solüsyona alınan numuneler oda sıcaklığında su verme işlemine tabi tutulmuş ve arkasından 24 saat oda sıcaklığında doğal yaşlandırma, 170 °C de 10 saat süreyle yapay yaşlandırma yapılarak T6 ısı işlemi uygulanmıştır. Tüm numunelerde oluşabilecek intermetalikleri belirlemek için optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD görüntüleri alınmıştır.

Farklı kalıp malzemeleri kullanılarak yapılan dökümler sonucu soğuma hızının (lokal katılaşma süresi) seramik kalıba yapılan dökümlerde en yavaş olduğu, bunu sırasıyla kum kalıp ve kromit kalıbın takip ettiği belirlenmiştir. Yapılan optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD incelemelerinde mikro yapı üzerinde demirce zengin intermetaliklerin olduğu, oluşan bu intermetaliklerin Mg oranına bağlı olarak şeklinin ve hacminin değiştiği görülmüştür. Kullanılan farklı kalıp malzemelerin, mekanik özelliklere etkisini belirlemek için yapılan sertlik ve çekme testi sonucu en yüksek sertlik ve çekme mukavemeti kum kalıba yapılan numunelerde, Mg oranının malzemenin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan sertlik ve çekme testleri sonucunda, Mg oranının artışı ile sertliğin ve çekme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca Mg oranı arttıkça alaşımda % uzama değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen numunelerin çekme testleri sonucunda yapılan weibull istatistiksel dağılım analizinde en yüksek weibull modülü kum kalıba yapılan dökümlerde görülürken bunu kromit ve seramik kalıba yapılan dökümlerin izlediği belirlenmiştir. Mg oranları farklı alaşımlarda ise Mg oranının artması ile weibull modülünde artış olduğu belirlenmiştir. Ayrıca üretilen alaşımların kırık yüzey incelemelerinde alaşımların içyapılarında oksit ve gözeneklerin olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Al-Si-Mg alaşımları, A356 alaşımı, farklı kalıp malzemeleri, Mg oranının etkisi, mikro yapı, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 710.1.194

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN INVESTIGATION THE EFFECT AMOUNT OF Mg ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL IN Al-Si-Mg ALLOYS

Musa YILDIRIM

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

June, 108 Pages

In this study, in the first stage A356 Aluminium alloy were casted to prepared using different mold materials (sand (silica) mold, chromite mold, and ceramic mold (Lot 607)). The cooling rates were measured by thermocouples placed in prepared different mold materials during and following casting. In the second stage three different alloys were produced by adding different amount of Mg (0,43 %, 0,67%, 0,86%) to A356 Aluminium alloy and produced alloys were casted as plates to prepared sand mold. Homogenisation heat treatment was carried out to all plates at 540 °C then, cooled in the furnace to decrease intrenal stres and segregation. Later, the plates were solution treated at 540 °C for 8 hours, quenched using water at room temperature and 24 hours naturally aged, artificially aged at 170 °C for 10 hours, T6 heat treatment was applied. in order to determine intermetalics ,which may occur, optical microscope, SEM, EDS and XRD images were got.

As a result of casting using different mold materials, it is determined that the effect of cooling rate (local solidification time) is the slowest ceramic mold, these followed silica sand mold, and chromite mold. Obtained of optical microscope, SEM, EDS and XRD analysis, it is observed some iron rich intermetallics are formed on the microstructure, shape and volume of these intermetallics change depend on amount of Mg, as a result of the hardness and tensile tests, the highest hardness and tensile strength values were measured on samples that casted silica sand mold to determine the effect of used different mold material on mechanical behaviour. The results of hardness and tensile tests, to determine the effect amount of Mg on mechanical behaviour, it was identified that increasing the hardness and tensile strength, increasing Mg content. Also elongation decreased, increasing Mg content. The results of tensile test of casted samples using different mold material, at the Weibull distribution statistical analysis, the highest Weibull modulus were found sand mold, these followed chromite mold and ceramic mold. It is determined that increasing with Mg content, increase Weibull modulus. In addition, it is observed some oxide and porosity at produced alloys' fracture surface.

Key Word : Al-Si-Mg alloys, A356 Alloy, different mold material, the effect amount of Mg, microstructure, mechanical properties.

Science Code : 710.1.194

TEŞEKKÜR

Bu tez alışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yrtlmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecbelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında Őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Çekme deneyleri sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ'e teşekkür ederim. Ayrıca döküm işlemleri sırasında beni yalnız bırakmayan her konuda destekleyen değerli arkadaşım Tansel TUNCAY'a Döküm ğretmenliğ son sınıf ğrencileri İsmail Fatih URHAN, Mert İNCE, Hasan OKTAY ve Samet BAYOğLU'na teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tez alışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından KB-BAP-C-11-Y-005 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Sevgili aileme, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemedi her zaman yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	3
ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUMA ETKİSİ.....	4
2.1.1. Silisyumun	4
2.1.2. Bakırın	5
2.1.3. Magnezyumun	5
2.1.4. Demirin.....	6
2.1.5. Manganın.....	6
2.1.6. Çinkonun	6
2.1.7. Titanyumun.....	6
2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	7
2.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	7
2.2.1.1. Alüminyum Bakır Alaşımları (2xxx Serisi)	8
2.2.1.2. Alüminyum Mangan Alaşımları(3xxx Serisi)	9
2.2.1.3. Alüminyum Silisyum Alaşımları (4xxx Serisi)	9
2.2.1.4. Alüminyum Magnezyum Alaşımları (5xxx Serisi)	9

Sayfa

2.2.1.5. Alüminyum Magnezyum Silisyum Alaşımları (6xxx Serisi)	10
2.2.1.6. Alüminyum Çinko Alaşımları (7xxx Serisi)	10
2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	10
2.2.2.1. Alüminyum Bakır Alaşımları (2xx.x Serisi)	11
2.2.2.2. Alüminyum Silisyum Magnezyum Alaşımları (3xx.x Serisi)	12
2.2.2.3. Alüminyum Silisyum Alaşımlar (4xx.x Serisi)	12
2.2.2.4. Alüminyum Magnezyum Alaşımlar (5xx.x Serisi)	13
2.2.2.5. Alüminyum Çinko Magnezyum alaşımları (7xx.x Serisi)	13
2.3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	14
2.3.1. Homojenleştirme	16
2.3.2. Tavlama	17
2.3.3. Gerilim Giderme Tavlaması	17
2.3.4. Yaşlandırma Isıl işlemi.....	17
2.3.4.1. Yaşlanmanın Tanımı	17
2.3.4.2. Çözeltiye Alma İşlemi	18
2.3.4.3. Su verme İşlemi.....	18
2.3.4.4. Yaşlandırma İşlemi.....	19
BÖLÜM 3.	22
ALÜMİNYUM SİLİSYUM MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	22
3.1. A356 ALÜMİNYUM ALAŞIMI	23
3.1. A356 ALAŞIMLARININ MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	23
3.2.1. Katılma ve Soğuma Hızının Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi... ..	24
3.2.2. Alaşım Elementlerinin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi	26
3.2.3. Modifikasyon ve Tane İnceltme İşleminin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi... ..	29
3.2.4. Gözenek Oluşumunun Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi	31
3.2.4.1. Gaz boşlukları.....	32
3.2.4.2. Çekmeye Bağlı Olarak Oluşan Boşluklar.....	33
3.2.5. Oksit Oluşumunun Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi	34

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4.	38
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
4.1. GİRİŞ.....	38
4.2. DÖKÜM AKIŞ SİMİLASYONU	38
4.3. KALIPLARIN HAZIRLANMASI.....	38
4.3.1. Kum Kalıpların Hazırlanması.....	38
4.3.2. Seramik Malzeme (Lod 607) ile Kalıbın Hazırlanması	40
4.3.3. Kromit Kalıbın Hazırlanması	41
4.4. ERGİTME İŞLEMİ.....	42
4.5. GAZ GİDERME İŞLEMİ.....	43
4.6. DÖKÜM İŞLEMİ.....	44
4.7. FARKLI KALIPLARIN ISI TANSFERLERİNİN ÖLÇÜLMESİ.....	45
4.8. ISIL İŞLEM	47
4.8.1. Homojenizasyon İşlemi	47
4.8.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi	47
4.9. METALOGRAFİK İNCELEMELER.....	48
4.9.1. Numune Hazırlama	48
4.9.2. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	48
4.9.3. İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafelerin Ölçümü.....	49
4.9.4. SEM ve EDS İncelemesi	49
4.9.5. X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri.....	50
4.9.6. Lazer Konfokal Mikroskop İncelemesi.....	50
4.9.7. Yoğunluk Ölçümleri.....	50
4.10. MEKANİK TESTLER.....	50
4.10.1. Sertlik Ölçümleri.....	50
4.10.2. Çekme Numunesinin Hazırlanması ve Çekme Testinin Yapılması.....	51
4.11. WEİBULL İSTATİSTİKSEL DAĞILIM ANALİZİ.....	52
BÖLÜM 5.	53
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	53
5.1. GİRİŞ.....	53
5.2. DÖKÜM AKIŞ SİMİLASYON DEĞERLENDİRMESİ.....	53

	<u>Sayfa</u>
5.3. FARKLI KALIPLARIN SOĞUMA HIZLARI	56
5.4. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	59
5.4.1. Farklı Kalıp Malzemeleri Kullanılarak Üretilen Alaşımların Mikro Yapı İncelemeleri	59
5.4.2. İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafelerin Ölçümü	60
5.4.3. Mg Oranları Farklı Olarak Üretilen Alaşımların Mikro Yapı İncelemeleri	62
5.4.4. SEM ve EDS İncelemeleri.....	66
5.5. XRD SONUÇLARI	75
5.6. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ.....	76
5.7. LAZER KONFOKAL MİKROSKOP İNCELEMELERİ	78
5.8. SERTLİK TESTİ.....	79
5.9. ÇEKME DENEYİ	82
5.10.WEIBULL İSTATİKSEL DAĞILIMI ANALİZİ	88
5.11.KIRIK YÜZEY SEM İNCELEMELERİ.....	91
BÖLÜM 6	100
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	100
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Al-Si alaşım denge diyagramı.....	13
Şekil 2.2.	Yaşlandırma ısıtıl işlem kademeleri.....	18
Şekil 2.3.	Yaşlandırma işleminde ilk kademe değişimi.....	20
Şekil 2.4.	Yaşlandırma ısıtıl işleminde ikinci kademe değişimi.....	21
Şekil 2.5.	Yaşlandırma ısıtıl işleminde son kademe	21
Şekil 3.1.	A356 Alüminyum alaşımı mikro yapı görüntüsü	24
Şekil 3.2.	Dendritik büyüme görüntüsü	25
Şekil 3.3.	İkincil dendrit kolları görüntüsü	25
Şekil 3.4.	İkincil dendrit kol mesafesinin mekanik özelliklere etkisi.....	26
Şekil 3.5.	Al-Si-Cu-Mg-Fe alaşımlarında meydana gelen intermetalik fazların görüntüsü	28
Şekil 3.6.	Al-Si-Mg diyagramlarında oluşan intermetalik faz- sıcaklık diyagramı	29
Şekil 3.7.	Al7SiMg alaşımına ait mikro yapı görüntüleri.....	30
Şekil 3.8.	Al7Si alaşımlarında modifikasyon ve tane inceltme işlemi sonucu elde edilen SEM görüntüleri	31
Şekil 3.9.	Gaz boşluğu görüntüsü.....	32
Şekil 3.10.	Hidrojen çözünürlüğü.....	33
Şekil 3.11.	Çekmeye bağlı olarak oluşan gözenekler	33
Şekil 3.12.	Bi film oksit katman oluşumunun şematik görüntüsü.....	35
Şekil 3.13.	Al 7Si 0,4Mg Alaşımında oluşan oksitlerin mikro yapı görüntüsü	35
Şekil 3.14.	Farklı döküm parametreleri kullanılarak dökülen Al 7Si 0,35Mg alaşımının mikro yapı görüntüleri.....	36
Şekil 4.1.	Kalıpların hazırlanmasında kullanılan model.....	39
Şekil 4.2.	Reçineli kumdan hazırlanan kalıp görüntüsü	40
Şekil 4.3.	Lod 607 Seramik malzeme ile hazırlanan kalıp görüntüsü	41
Şekil 4.4.	Kromit kalıp görüntüsü.....	42
Şekil 4.5.	Ergitme işleminde kullanılan elektrik direnç ocağı görüntüsü.....	43
Şekil 4.6.	Gaz giderme işlemi şematik görüntüsü	44

Sayfa

Şekil 4.7. Döküm sonrası kalıp görüntüsü	45
Şekil 4.8. Kalıba yerleştirilen ısıtıcı çiftlerin şematik görüntüsü	46
Şekil 4.9. Kalıba yerleştirilen ısıtıcı çiftlerin gerçek görüntüsü.....	46
Şekil 4.10. Yaşlandırma ısıtıcı işlemi yapılan fırın görüntüsü.....	47
Şekil 4.11. Zımpara ve polisaj cihazlarının görüntüsü	48
Şekil 4.12. Taramalı elektron mikroskop görüntüsü	49
Şekil 4.13. Makro sertlik cihazı görüntüsü	51
Şekil 4.14. Çekme numunesi görüntüsü	52
Şekil 4.15. Çekme testi cihaz görüntüsü.....	52
Şekil 5.1. 0.138 saniye sonraki simülasyon görüntüsü	54
Şekil 5.2. 0.786 saniye sonraki simülasyon görüntüsü	55
Şekil 5.3. 1.024 saniye sonraki simülasyon görüntüsü.....	55
Şekil 5.4. 1.972 saniye sonraki simülasyon görüntüsü.....	56
Şekil 5.5. Farklı kalıp malzemelerine yerleştirilen termokupol sıcaklık değerleri.	57
Şekil 5.6. Farklı kalıplara dökülen alaşım 1' in optik mikroskop görüntüleri	59
Şekil 5.7. Farklı kalıp malzemelerine dökülen numunelerin mikro yapı resimleri	61
Şekil 5.8. İkincil dendrit kolları arası mesafe ölçümleri.....	62
Şekil 5.9. Mg oranları farklı üretilen alaşımların mikro yapı görüntüleri.....	63
Şekil 5.10. Üretilen alaşımların mikro yapı görüntüsü.....	64
Şekil 5.11. İntermetalik bileşiklerin optik mikroskop görüntüsü.....	65
Şekil 5.12. Farklı Mg oranına sahip alaşımların SEM görüntüleri.....	66
Şekil 5.13. Silisyum parçacıklarının SEM ve çizgisel tarama (EDS) görüntüsü	67
Şekil 5.14. Si taneleri SEM görüntüleri	68
Şekil 5.15. Mg oranları farklı alaşımlarda oluşan intermetalik SEM görüntüsü.....	69
Şekil 5.16. Alaşım 1'e ait SEM ve EDS Mapping Analiz Görüntüsü.....	69
Şekil 5.17. Alaşım 1'e ait çizgisel tarama görüntüsü	71
Şekil 5.18. Alaşım 3'e ait SEM görüntüsü.....	72
Şekil 5.19. Alaşım 3'e ait SEM ve EDS Mapping analiz görüntüsü.....	73
Şekil 5.20. Alaşım 3' e ait nano SEM ve EDS görüntüsü	74
Şekil 5.21. Üretilen alaşımlara ait XRD görüntüsü	75

Sayfa

Şekil 5.22. Farklı kalıp malzemelerine dökülen alaşımın yoğunluk değerleri.....	76
Şekil 5.23. Farklı kalıplara dökülen numunelerin % gözenek değerleri	77
Şekil 5.24. Mg oranları farklı üretilen alaşımların yoğunluk değerleri	78
Şekil 5.25. Mg oranları farklı üretilen alaşımların % gözenek değerleri.....	78
Şekil 5.26. Alaşım 1'e ait lazer konfokal mikroskop görüntüsü	78
Şekil 5.27. Alaşım 1'e ait lazer konfokal mikroskop görüntüsü	79
Şekil 5.28. Soğuma oranları farklı kalıplara dökülen numunelerin T6 öncesi T6 sonrası sertlik değerleri	80
Şekil 5.29. Mg oranları farklı alaşımların T6 ısıtma işlem öncesi ve sonrası sertlik değerleri.....	81
Şekil 5.30. Farklı kalıplara dökülen numunelerin gerilim- uzama diyagramı	83
Şekil 5.31. Üç farklı kalıba dökülen numunelerin çekme dayanımları	84
Şekil 5.32. Farklı kalıp malzemelere dökülen numunelerin % uzama değerleri.....	85
Şekil 5.33. Mg oranları farklı üretilen alaşımlara ait gerilim-uzama diyagramı.....	86
Şekil 5.34. Mg oranları farklı üretilen alaşımların maksimum gerilim değerleri.....	87
Şekil 5.35. Mg oranları farklı üretilen alaşımların % uzama değerleri.....	88
Şekil 5.36. Farklı kalıp malzemesine dökülen alaşımın Weibull analizi.....	89
Şekil 5.37. Mg oranları farklı alaşımların Weibull analizi	90
Şekil 5.38. Kromit kalıba dökülen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüsü.....	91
Şekil 5.39. Seramik kalıba dökülen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüsü	92
Şekil 5.40. Alaşım 1'e ait kırık yüzey SEM görüntüsü	93
Şekil 5.41. Alaşım 2'ye ait kırık yüzey SEM görüntüsü	94
Şekil 5.42. Alaşım 3'e ait kırık yüzey SEM görüntüsü	95
Şekil 5.43. Alaşım 1 de tespit edilen dendritler arası oluşan demirce zengin intermetalik bileşiğin SEM ve çizgisel tarama görüntüsü.....	96
Şekil 5.44. Farklı büyütme oranlarında kırık yüzeylerde tespit edilen demirce zengin intermetalik bileşik görüntüleri.....	97
Şekil 5.45. Alaşım 1'de tespit edilen oksit filmi SEM ve BSE görüntüsü	97
Şekil 5.46. Alaşım 1' de kırık yüzeyde tespit edilen oksitin SEM ve EDS Mapping görüntüsü	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Saf alüminyuma ait fiziksel özellikler	3
Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi	7
Çizelge 2.3. Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması	8
Çizelge 2.4. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	11
Çizelge 2.5. Alüminyuma uygulanan ısı işlem kodları.....	15
Çizelge 3.1. 3xx.x serisinde kullanılan en yaygın alaşımlar ve kimyasal bileşimleri.....	22
Çizelge 3.2. A356 alüminyum alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri	23
Çizelge 3.3. Alüminyum alaşımlarında oluşabilecek inklüzyonlar	34
Çizelge 3.4. Farklı döküm parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi.....	36
Çizelge 4.1. Kromit kumun kimyasal analizi	42
Çizelge 4.2. Ergitmede kullanılan külçenin kimyasal analizi	43
Çizelge 4.3. Hazırlanan alaşımların kimyasal bileşimi.....	44
Çizelge 5.1. Likidüs solidüs sıcaklığına en yakın ölçülen sıcaklık-zaman değerleri	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: Alüminyum
Si	: Silisyum
Mg	: Magnezyum
Fe	: Demir
MPa	: Mega Paskal
Fw	: Hata oluşum Olasılığı

KISALTMALAR

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Yayınım Spektrometresi
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
DAS	: Dendrit Kolları Arası Mesafe
SDAS	: İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafe
HV	: Vickers Sertlik
ASTM	: American Society for Testing and Materials

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Demir ve çelikten sonra dünyada en çok kullanılan element olan alüminyum hafiflik, iyi işlenebilme kabiliyeti, dökülebilirliği, ısı ve elektrik iletkenliği, üstün korozyon dayanımı ve yaşlanma ile dayanımının artırılabilmesi gibi pek çok üstün özelliğinden dolayı elektrik-elektronik, gıda, tarım, inşaat, kimya, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Günümüzde petrol fiyatlarının artması ile otomotiv üreticileri ve kullanıcıları tarafından yakıt tasarrufu ön plana çıkmaktadır. Bu yüzden dayanıklı ve hafif bir malzeme olan alüminyum alaşımları araç ağırlıklarını azaltarak yakıt tasarrufu sağlamak amacıyla bu sektörde daha fazla kullanım alanı bulmuştur [3,4].

İkinci dünya savaşından sonra alüminyum ve alaşımlarının kullanımı büyük bir hızla artmıştır. Alüminyum ve alaşımları üzerine birçok araştırma yapılmakta, yeni alüminyum alaşımları geliştirilmekte ve bilinen alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri yapılan çalışmalarla iyileştirilmeye çalışılmaktadır [5].

Alüminyuma en çok ilave edilen element silisyumdur. Al-Si alaşımları, dayanım/ağırlık oranının yüksek oluşu, yüksek ısı ve elektriksel özellikleri ve kum kalıba dökümden basınçlı döküme kadar birçok farklı yöntemle dökülebilmelerine imkân veren mükemmel döküm kabiliyetleri nedeniyle otomotiv endüstrisinden havacılık sanayine kadar geniş bir alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [6]. Al-Si alaşımları ergiyik durumda yüksek akıcılık, katılaşma sırasında nispeten sıcak yırılmadan bağımsız davranış sergilemektedir. İkili Al-Si alaşımlarına ısı işlem uygulanamaz. Al-Si alaşımlarının dayanımının artırılması az miktarda bakır, magnezyum veya nikel ilavesii ile sağlanabilmektedir. Genellikle Al-Si alaşımlarına Mg ilave edilerek alaşımın dayanımı artırılabilir [7]. Yaşlandırma ısı işlemi sonrasında alaşımın magnezyum silikat (Mg_2Si) içeriği %0,5-0,6 arasındadır ve

dayanımdaki artış Mg_2Si fazından kaynaklanmaktadır. Kimyasal bileşime ilave edilen alaşım elementleri, miktarlarına bağlı olarak alaşımın dayanımında artış sağlarken, belirli limitlerin üzerine çıktığında dayanımı olumsuz etkilerler. Bu elementler içerisinde silisyum iyi döküm özellikleri sağlarken, bileşime ilave edilen Mg, alaşımın akma ve kopma mukavemetleri üzerinde önemli rol oynamaktadır [8]. Mg miktarındaki artışa paralel olarak malzemenin akma ve çekme dayanımları artarken süneklik ve kırılma tokluğunu azaltmaktadır. Bunun yanı sıra ötektik sıcaklığı düşürmekte ve ötektik fazını daha heterojen hale getirmektedir. Ayrıca Mg, Fe içerikli intermetalik bileşiklerin şeklini ve hacimsel oranını da etkilemektedir [8,9].

Bu çalışmada, farklı kalıp malzemeleri kullanılarak hazırlanan kalıplara dökülen A356 alaşımların soğuma hızlarının, meydana gelen mikro yapısal değişimlerin dentrit kolları arasında meydana gelen boşlukların ve mikro yapı morfolojisinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bunun yanında Al-Si-Mg alaşımlarında Mg oranının mekanik özelliklere etkisi, Mg oranına bağlı olarak oluşabilecek intermetalik bileşikler ve bu yapıların malzemenin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Alüminyum, yeryüzünün bileşiminde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Yer kabuğunun ağırlıkça % 8'i alüminyumdan oluşur. Periyodik cetvelde III. periyot III A gurubunda bulunan, atom numarası 13, atom ağırlığı 26.98 gr/mol olan, yoğunluğu 2,7 gr/cm³, ergime sıcaklığı 658 °C, +3 değerlikli, yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısına sahip, gümüş renginde ve Al simgesi ile gösterilen bir elementtir. Çizelge 2.1'de saf alüminyuma ait fiziksel özellikler verilmektedir [10,11].

Çizelge 2.1 Saf alüminyuma ait fiziksel özellikler [10,11].

Simgesi	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı (gr/mol)	26.98
Ergime Noktası (°C)	658
Yoğunluğu (gr/cm ³)	2,7
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Özgül Isısı (cal/gr (100 °C))	0,224
Elastisite Modülü (MPa)	72x10 ³
Poisson oranı	0.33
Kayma modülü (MPa)	27x10 ³
Çekme mukavemeti (MPa)	40–90
Akma mukavemeti (MPa)	10–30
Kopma uzaması	% 30–40

Mühendislik uygulamalarında ve insan yaşamında önemli ölçüde kullanım alanı bulan alüminyumun en belirgin özelliği hafifliğidir. Lityum, magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif metaldir. Buna karşılık alüminyum alaşımlarında ilave alaşım elementleri, yoğunluk ve miktara bağlı olarak mukavemeti önemli miktarda arttırmaktadırlar. Alüminyumun ısı ve elektrik iletkenliği bakırdan sonra gelmektedir. Al döküm alaşımları kolay dökülebilir ve işlenebilir. Ayrıca korozyona dayanıklıdırlar. Sıcak ve soğuk şekillendirilmesi kolaydır. Bu nedenle makine imalat, metal, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik - elektronik, uzay sanayi ve diğer birçok alanlarda kullanılmaktadır. Ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı üretim kolaylığı ve diğer metaller ile yüksek çekme mukavemetine sahip alaşımlar oluşturabilmesi diğer önemli hususlardır [12,13].

2.1. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUMA ETKİSİ

Saf alüminyumun kullanımı oldukça sınırlı olduğu için, mekanik özelliklerinin ve döküm özelliklerinin iyileştirilmesinde çeşitli elementlerle alaşımlandırma yapılmaktadır (Çizelge 2.2). Alüminyum alaşımlarında kullanılan başlıca alaşım elementleri bakır, silisyum, mangan, çinko, krom, kalay, magnezyum, demir, nikel, titanyum, zirkonyum, fosfor, sodyum ve lityumdur. Bu elementler tek başına veya birkaçı birden alüminyuma ilave edilebilirler. Alüminyuma belirli oranlarda ilave edilebilen bu elementler alüminyumun yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısında yer alarak katı eriyik mukavemetlenmesi ile alüminyumun dayanımını artırır. Matris yapı içerisinde alaşım elementi miktarının artması ile mukavemet de artar. Fakat alaşım elementi miktarının artmasıyla malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti azalmaktadır. Bunun yanında alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri uygulanan şekillendirme işlemi ile de büyük ölçüde arttırılabilir [13].

2.1.1. Silisyum

Döküm alaşımlarında, en yaygın olarak kullanılan alaşım elementi silisyumdur. Si alüminyumun akıcılığını arttırarak, kalıbın ince kanallarına kadar kolaylıkla ilerlemesini sağlamaktadır [14]. Özellikle kum ve kokil kalıplara yapılan dökümlerde silisyum en önemli alaşım elementidir. Kum kalıplara yapılan dökümlerde % 5 veya

daha fazla Si içeren alüminyum alaşımlarında, modifikasyona gerek duyulurken bu oranın altında modifikasyon işlemine gerek duyulmamaktadır. Silisyumun sağladığı bir diğer avantaj da Si oranı döküm malzemelerde katılaşmaya bağlı olarak oluşan hacimsel küçülmeyi (çekmeyi) de minimuma indirmektedir.

2.1.2. Bakır

Alüminyumla alaşım elementi olarak kullanılan ilk element bakırdır. Bakır, alaşıma sertlik kazandıran en önemli alaşım elementidir [15,16]. Bakır ilavesi, alaşıma, sağlamlık, sertlik ve daha iyi işlenebilme özelliği kazandırır. Döküm alaşımlarında ise en fazla % 12 oranında kullanılmaktadır. Bu orana kadar dayanımda meydana gelen artış bu orandan sonra dayanımın azalmasına sebep olur. Yapıda oluşan ikinci faz miktarının artmasıyla gevreklik de artmaktadır. Dövme alaşımlarında ise Cu miktarı % 3-5 arasındadır. Eğer dövme alaşımlarında miktar % 5'in üzerinde olursa mekanik işlemler sırasında yırtılmalara ve kırılmalara sebep olur. Ayrıca alaşımlama işlemleri elektrik iletkenliği ve korozyon direncini de azaltmaktadır [15]. Bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artar. Bakırın, alüminyum içerisinde maksimum çözünürlüğü ötektik sıcaklık olan 548 °C'de % 5,6'dır. Oda sıcaklığında ise maksimum % 0,1'dir. Bu nedenle Al-Cu alaşımları yaşlandırılabilir bir alaşımdır. Yaşlanma için gerekli zaman, alaşımın bileşimine ve sıcaklığa bağlıdır. Yaşlandırma ile yapıda oluşan çökeltiler boyutuna ve dağılımına bağlı olarak dayanımı arttırır [10].

2.1.3. Magnezyum

Magnezyum alüminyuma yüksek mukavemet, süneklik, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti sağlar. Al-Mg alaşımları yaşlandırılmamasına rağmen katı eriyik mukavemetlenmesi nedeniyle yüksek mukavemetlidir. Akıcılık problemleri olduğu için döküm alaşımı olarak çok fazla tercih edilmeyen bir alaşım grubudur [10].

2.1.4. Demir

Özellikle kokil kalıba dökümlerde alüminyum alaşımına demir ilavesiyle alaşımın metal kalıba yapışma eğilimi azaltılmış olur. Pres döküm alaşımlarının demir oranı % 1,0-1,3 arasındadır. Buna karşılık kuma dökümde demir oranı daha düşük tutulmaktadır [6].

2.1.5. Manganez

Alaşım içinde dökülebilirliği arttırmak için alaşıma demirle birlikte ilave edilir Aynı zamanda metaller arası bileşiklerin özelliklerini değiştirir. Alaşımın süneklik ve tokluk özelliklerini artırır ve işlenebilirliği olumlu yönde etkiler [16]. Manganez genellikle kum ve metal kalıba döküm uygulamalarında % 1'in altında olmak şartıyla olumlu etkiler sağlamaktadır. Ayrıca düşük miktarlarda (% 1'den az) kimyasal bileşiminde Mn bulunması, belirli miktarda demir ilavesine de imkân sağlamaktadır [10].

2.1.6. Çinko

Çinkonun, alüminyuma ilave edilmesiyle yüksek mukavemete sahip Al-Zn (7xxx) alaşımları elde edilir. Alüminyuma ilave edilen Zn alaşımın kopma mukavemetinin artmasını ve haddelenebilme kabiliyetini artırır. Al-Zn alaşımlarında Zn, sıcak yırtılmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementlerinden olan bakırın ilave edilmesiyle bu olumsuz özelliği giderilmiş olur [11]. Genellikle magnezyumla birlikte ilave edildiğinde ise haddeleme kabiliyetini arttırdığı gibi yüksek çekme ve darbe mukavemeti de sağlamaktadır. Al-Zn alaşımları % 20'ye kadar çinko içerebilirler. Bu alaşımlar genelde uzay ve havacılıkta kullanılmaktadır. [15,16].

2.1.7. Titanyum

Alüminyum alaşımlarına ilave edilen Ti tane küçültme etkisi sağlamaktadır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesini ve artmasını sağlar. Alüminyuma ilave edilme miktarı en fazla % 20'dir. En iyi etkisi bor ile beraber kullanıldığında görülür. Titanyum,

alaşımın çekme mukavemetini ve sünekliliği arttırır. Buna karşılık ısı iletkenliği düşürür [15].

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi [14].

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ti	Cr	Ni	Li	Zr	V	Sn	B	Bi	Pb
Yoğunluk	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
Akışkanlık	↓	↑	↑	↓	↓	≈	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sertleşme	↑	↑	↑	↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-	↓
Mukavemet Sürt.Muk.*	↑	↑	↑	↑*	↑↑*	↑↑↑	↑↑	-	↑*	-	-	-	↑*	↑	-	-
Elektrik İlet.	↓	↓↓	↓↓	↓↓↓	↓↓	↓	↓↓↓	↓↓↓	↓	↓↓↓	↓↓	↓↓	≈	↑↑↑	≈	-
Koroz. Muk.	-	↑	↑↑↑	↑↑	↓	↓	-	-	↓	-	-	-	↓	-	↓	↓
Isı. Gen. Kat.	-	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	-	↓	↓	-	-	-	-

2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Endüstride kullanılan alüminyum ve alaşımları dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

2.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Bu gruba giren alüminyum alaşımları Cu, Mg, Mn, Si ve Ni gibi elementler içerirler. Çoğu kez sürekli döküm yöntemi ile blok halinde elde edildikten sonra homojenleştirme ısı işlemine tabi tutulur ve sonra haddeleme veya ekstüzyon ile şekillendirilmektedir. Dövme alüminyum alaşımları 1954'te Alüminyum Birliği tarafından standartlaştırılmıştır [17]. Çizelge 2.3'de Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standartlara göre dövme alüminyum alaşımları sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.3. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [17].

Alüminyum Birliği No	Başlıca alaşım Elementi
1xxx	Min.99,0 veya daha fazla alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan Seriler

Dört rakamlı notasyonda ilk rakamı hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtir. 1xxx dizisi saf alüminyum (%99.00) belirtir. Son iki rakam %99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir. ikinci basamak ise özel olarak denetlenen impurite elementlerin sayısını belirtir ve 1 den 9 a kadar değişebilir. 2xxx'den 8xxx'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü ikinci rakam değişimleri (modifikasyon) simgeler. Son iki rakamın özel bir anlamı yoktur [5].

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanamayan türdedir ve yalnızca şekil değiştirme ile sertleştirilir. 2xxx, 6xxx, 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıl işleme tabi tutulabilir. 4xxx serisi alaşımlar (Al-Si) ısıl işlem kabiliyeti olmayan gruba girmektedir. Isıl işleme tabi tutulan alaşımlarda en iyi mekanik özellik çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilmektedir [17,18].

2.2.1.1. Alüminyum Bakır Alaşımları (2XXX Serisi)

Ana alaşım elemanı bakır olan bu alaşımın optimum özellikleri için çökelme ısıl işlemi uygulanır. Al-Cu alaşımlarının yaşlanma sırasında meydana gelen karmaşık yapılara rağmen diğer sistemlerden daha detaylı çalışılmıştır. İyi işlenme özellikleri

gereken yerlerde (2011 kodlu alařım), baęıl olarak artan sıcaklıklarda iyi sűrűnme dayanımıyla birlikte oda sıcaklıęında yűksek çekme mukavemetine ve çok dűřűk sıcaklıklarda yűksek saęlamlıęa sahip olması istenen yerlerde (2219 kodlu alařım), yaygın olarak kullanılmaktadır. Korozyon direnci dięer alařım grupları kadar iyi deęildir ve kaynak kabiliyeti sınırlıdır. Çoęunlukla araç ve uçak tekerlerinde, araçların sűspansiyon parçalarında, uçak gűvdelerinde ve 150  C'ye kadar olan sıcaklıklarda dayanım gerektiren parçalarda kullanılır [19].

2.2.1.2. Alűminyum Mangan Alařımları (3XXX Serisi)

Genellikle 3XXX serisi alaşımlar, orta derecede dayanımla birlikte műkemmek korozyon direnci gerektiğinde tercih edilmektedir. Levha şeklinde sunulan 3003 serisi yaygın olarak kullanılır [19]. Bu gruptaki alaşımlar içecek kutuları, mutfak gereçleri, ısı değiştiricileri, depolama tankları, mobilya, yűn levhaları ve işaretleri, çatı ve kenar kaplamalar ile diğer mimari uygulamalarda kullanılmaktadır [19,20].

2.2.1.3. Alűminyum Silisyum Alařımları (4xxx Serisi)

4xxx serisi Al alařımlarında ana alařım elemanı silisyumdur. Si alűminyuma % 12'ye kadar ilave edilerek alařımı gevrekleřtirmeden ergime derecesinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, Al-Si alařımları alűminyum birleřtirmede esas metalin ergime sıcaklıęından daha dűřűk ergime sıcaklıklarında sert lehim alařımı olarak ve kaynak telinde kullanılır. Bu gruptaki alařımların çoęuna ısıl iřlem uygulanmaz. 4032 alařımı dűřűk ısıl genleřme katsayısı ve yűksek ařınma direncine sahiptir ve bu nedenle bu alařım dűvme motor pistonlarının űretimine uygundur [21].

2.2.1.4. Alűminyum Magnezyum Alařımları (5xxx Serisi)

Al içinde Mg oranı % 0,8'den % 3,5'e kadar değişen oranlarda kullanılır. Koroziif ortamlarda gerilmeli korozyon atlamaşı riski ve deformatsiyonla sertleştirilmiş alaşımlarda yaşlanma yumuşamaşı olarak bilinen problemler olabilir. Al-Mg alaşımları yaygın olarak kaynaklı uygulamalarda kullanılır. Damperli kamyon

gövdeleri, petrol, süt ve tahıl taşımak için geniş tanklar ve özellikle düşük sıcaklıklarda depolama gerektiren basınçlı tanklar başlıca kullanım alanlarıdır [19].

2.2.1.5 Alüminyum Magnezyum Silisyum Alaşımları (6xxx Serisi)

Al-Mg-Si alaşımları orta derecede dayanımlı olmasının yanında iyi kaynak edilebilme, korozyona dirençli ve gerilim korozyon çatlamaına dayanımlı oldukları için yaygın olarak kullanılır. Mimari uygulamalar, ulaşım endüstrisi, köprüler ve kaynaklı yapılar bu alaşımların başlıca uygulama alanlarıdır [18,19].

2.2.1.6 Alüminyum Çinko Alaşımları (7xxx Serisi)

% 1-8 arasındaki çinko 7xxx grubundaki Al alaşımlarında önemli bir alaşım elemanıdır. Magnezyum ile beraber kullanıldığında yüksek dayanımlı ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar elde edilir. Çoğunlukla Cu ve Cr gibi diğer elementlerde küçük miktarlarda ilave edilir. 7xxx alaşımları uçak gövde yapılarında, yüksek gerilme altında çalışan parçalarda kullanılmaktadır [19].

2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Al alaşımlarının en büyük avantajı düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Bunun yanında diğer bir avantajı ise düşük ergime sıcaklıklarına sahip olmalarıdır [8]. Alüminyum dökümlerin başlıca problemi katılma esnasında % 3,5 ile % 8,5 arasında oluşan yüksek hacimsel küçülmedir. (çekme) [22]. Döküm alüminyum alaşımları, dayanım artırıcı elementlerin yanında, akıcılık dökümlerde oluşan çekme boşluklarının giderilmesi için gereken miktarda katılarak ötektik oluşturucu ve akıcılığı arttıran elementleri de (örneğin silisyum) içermelidir. Döküm alüminyum alaşımları 1954'te Alüminyum Birliği tarafından standartlaştırılmıştır. Çizelge 2.4. de Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [17].

Alüminyum Birliği No	Başlıca alaşım Elementi
1xx.x	Min.99,0 veya daha fazla alüminyum
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum +bakır ve /veya Magnezyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

Dövme alaşımlarında olduğu gibi ilk hane alaşım grubunu ifade etmektedir. Üç haneli rakamdan sonra nokta konur ve noktayı takip eden sayı parçanın döküm mü ingot mu olduğunu gösterir. 0 sayısı dökümü, 1 ve 2 ise ingotu ifade eder. Örneğin 356.0 kum veya kokile dökülmüş parçayı ifade ederken 356.1 ve 356.2 ingotları ifade eder. 2xxx, 3xxx, 4xxx ve 7xxx serisi döküm alaşımları ısı işleme tabi tutulabilir alaşımlardır. 5xxx serisi döküm alaşımının çökelme sertleşmesi ile sertleşme kabiliyeti ve deniz suyunda korozyon direnci iyidir. Alüminyum döküm alaşımları genellikle şekil değiştirme ile sertleştirilemezler [22]. Önemli alüminyum döküm alaşımları aşağıda sırası ile açıklanmaktadır.

2.2.2.1. Alüminyum Bakır Alaşımları (2xx.x Serisi)

Grup olarak bu alaşımlar, sıcak yırtılma gibi döküm problemlerinin yanı sıra akıcılık (düşük döküm kabiliyeti) problemi de göstermektedir. Yaşlanma ile sertleştirilebilir alaşım grubudur [2]. Bu alaşımlar % 4-5 arasında Cu, Fe ve Si ve bazen de Mg içermektedir. Özellikle % 0,15'ten daha az Fe içeren ingotlarda üretildiklerinde oldukça yüksek dayanım ve sünekliliğe ulaşabilmektedir. Düşük miktarlarda Mn ilave edildiğinde, Fe ve Si ile birleşerek bu elementlerin gevrekleştirici etkisini azaltmaktadır. Bu alaşımlar çoğunlukla kum döküm yöntemi ile üretilmektedir. Metal kalıplara döküldüklerinde akıcılığı sağlamak için Si ilave edilmelidir. Ancak

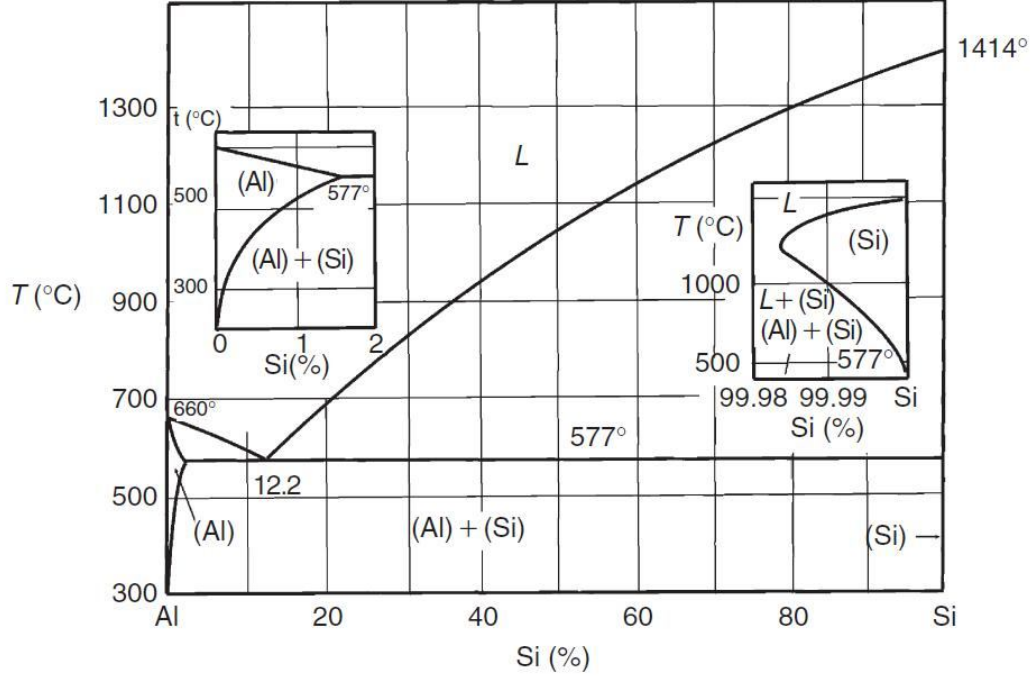
Si ilavesinin sünekliği önemli ölçüde azalttığı bilinmektedir. Korozyona karşı direnci, diğer alaşım gruplarına göre düşüktür. Kaynak kabiliyeti ise sınırlıdır [19].

2.2.2.2 Alüminyum Silisyum Magnezyum Alaşımları (3xx.x Serisi)

Al-Si alaşımları hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısıl genişleme özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bu alaşım içerisinde, silisyum iyi döküm özelliklerini sağlarken, magnezyum akma ve kopma mukavemetleri üzerinde rol oynamaktadır [7,8]. Bu serinin en önemli alaşımı A356'dır. A356 alaşımında % 7 oranında Si bulunduğu için dökülebilirlik özellikleri yüksek bir malzemedir. Bileşiminde bulunan yaklaşık % 0,35 Mg bu alaşımın yaşlanma ile mukavemetlenmesini sağlar. Yaşlanma ile yapıda oluşturulan Mg_2Si alaşımın dayanımını oldukça arttırmaktadır.

2.2.2.3. Alüminyum Silisyum Alaşımları (4xx.x Serisi)

Ana alaşım elementi olarak Si içeren döküm alaşımları, üstün döküm özelliklerinden dolayı en önemli ticari döküm alaşımıdır. Al-Si alaşımları ergiyik durumda yüksek akıcılık, katılma sırasında mükemmel akıcılık ve nispeten sıcak yırtılma gibi döküm hataları meydana gelmez. İkili alüminyum silisyum alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi sadece küçük bir miktar silisyum (maksimum % 1,65 Si) alüminyumda çözünebilir bu nedenle dayanımın artması katı eriyik mukavemetlenmesi ile gerçekleşir [13]. Şekil 2.1 de Al-Si denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1. Al-Si alaşım denge diyagramı [23].

2.2.2.4. Alüminyum Magnezyum Alaşımları (5xx.x Serisi)

Al-Mg döküm alaşımlarının en önemli avantajı özellikle deniz suyuna karşı yüksek korozyon direncine sahip olmalarıdır. Al-Mg alaşımlarının nispeten düşük döküm kabiliyeti ve magnezyumun oksitlenmeye eğilimi üretim maliyetini arttırır [19]. Kum kalıba dökümde, alaşımın yüzeyinin pürüzlenip kararmasına neden olan kalıp nemi, MgO ve hidrojen reaksiyonunun önlenmesi için ek önlemler almak gerekir [19].

2.2.2.5. Alüminyum Çinko Magnezyum Alaşımları (7xx.x Serisi)

Al-Zn-Mg alaşımlarının bileşimlerinde % 1-7,5 Zn ve % 3,3 Mg bulunabilmektedir. Cr ve Cu dayanımını arttırmak amacıyla alaşıma ilave edilebilmektedir. Dayanımı en yüksek alaşım grubu olduğu için genellikle uzay ve havacılık sektöründe yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır. Bu son eklemeler kaynak yeteneğini olumsuz yönde etkiler [10]. Al alaşımları içerisinde en yüksek dayanımda olan alüminyum alaşımları 7xx.x alaşımlarıdır. Uçak yapımında yapısal malzeme olarak kullanılırlar [11-13].

2.3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem, genellikle metal ve alaşımlarının mevcut özelliklerini iyileştirmek amacıyla katı halde uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanabilir [24]. Alüminyum ve alaşımları için geliştirilen ısıl işlem notasyonları malzemeye uygulanan ısıl işlemlerin tanımlanmasını kolaylaştırır. Temel ısıl işlemlerin kodlanması tekli büyük harflerden oluşur. Alt işlemler ısıl işlem harfini takiben bir veya daha fazla basamakta rakamlarla ifade edilir. Çizelge 2.5. de alüminyum ve alaşımlarına uygulanan ısıl işlem kodları verilmektedir.

Çizelge 2.5. Alüminyuma uygulanan ısıt işlemler kodları [22].

ISIL İŞLEM KO	AÇIKLAMA	
F	Üretildiği gibi (mekanik veya ısıt işlemler görmemiş)	
O	Tavlanmış	
H	Soğuk işlemler görmüş	
	H1	Sadece soğuk şekillendirilmiş
	H2	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
	H3	Soğuk şekillendirilmiş ve kararlı hale getirilmiş
W	Bu ısıt işlemlerden sonra açık havada doğal olarak yaşlandırılmış alaşımlara uygulanan kararlı olmayan temperleme olduğu için seyrek olarak rastlanır	
T	Yaşlandırma İşlemlerini göstermektedir.	
	T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
	T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
	T3	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
	T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
	T5	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
	T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
	T7	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş
	T8	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
	T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
	T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan genel ısıtma işlemlerinin amacı malzemelerde katılaşma şartlarına bağlı olarak oluşan segregasyonların giderilmesidir. Döküm yapılarının kimyasal segregasyonunu azaltmak ve işlenebilirliğini geliştirmek için ön ısıtma veya homojenleştirme ısıtma işlemi uygulanır.

- Deformasyon sertleşmesi (pekleşme) ve ısıtma işlemi görmüş alaşımlı yapıları yumuşatmak ve gerilimleri gidermek (tavlama)
- Alaşımın dayanımını arttırmak yapıda ikinci faz oluşturarak dayanımın artırılması (yaşlanma)

Ticari Al-Si-Mg alaşımlarında istenen mukavemet değerlerine ulaşmak için genellikle yaşlanma (T6) ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Döküm alaşımlarının, T6 işleminde katı çözelti içerisinde çökelti fazının oluşturulması için, belirli bir süre ötektik altı sıcaklık olan 545 °C'de çözeltiye alma, işlemi uygulanmaktadır. Yaşlanma işleminin ikinci aşamasında çözeltiye alınan alaşım hızlı soğutulur. Son aşama yaşlanma ile 150-200 °C civarında tamamlanır. Yaşlanma ile magnezyum ve silisyum alüminyum dendritleri içerisinde Mg_2Si olarak çökerek alaşımın dayanımının artmasını sağlar [7,25].

2.3.1. Homojenleştirme

Homojenleştirme katılaştırma şartlarına bağlı olarak yapıda bölgesel yoğunlaşma gösteren alaşım elementlerinin tane sınırlarından ve diğer çözelti zengini bölgelerden tane merkezlerine difüzyon yoluyla homojen dağılımını sağlayan bir ısıtma işlemidir. Tane boyutu (veya dendrit kol boşluğu) ve alaşım elementlerinin difüzyon hızına bağlı olarak gerekli süre değişir [11].

Dökülen ingotlar mekanik işlemlere gönderilmeden önce yaklaşık 450-600 °C arasında bir sıcaklıkta homojenize edilir. Bu işlem; mikro segregasyonların etkilerini azaltmak, döküm parçada farklı soğumadan dolayı oluşan gerilimleri gidermek amacıyla yapılmaktadır.

2.3.2. Tavlama

Isıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alüminyum alaşımlarında soğuk deformasyonun etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla 300-450 °C sıcaklık aralığında tavlama işlemi uygulanır.

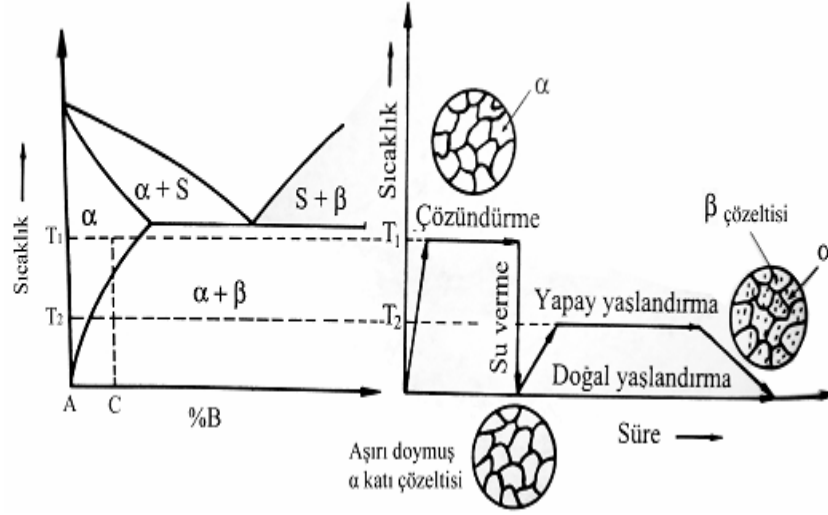
2.3.3. Gerilim Giderme Tavlaması

Bu tavlama işlemi, ısıl işlem uygulanabilen dövme alaşımlarda sadece deformasyon sertleşmesinden meydana gelen etkileri uzaklaştırmak için yaklaşık 345 °C civarında uygulanır. Gerilim giderme tavlaması işleminin sonucunda sadece toparlanma, kısmi yeniden kristalleşme veya tamamen yeniden kristalleşme de meydana gelebilir [19].

2.3.4. Yaşlandırma Isıl İşlemi (Çökelme Sertleştirme)

2.3.4.1. Yaşlanmanın Tanımı

Aşırı doymuş bir katı fazdan zaman ve sıcaklığın etkisi ile yeni bir fazın meydana gelmesi yaşlanma olarak adlandırılır. Yaşlanma ile yapıda oluşturulan ikili faz (üçlü ve daha fazla olabilir), bağımsız β şeklinde değil de α fazı içerisinde meydana gelir. Yaşlanma olayı da bir katı-hal reaksiyonudur [13]. Çökelme sertleşmesi denge diyagramında solvüs eğrisi içeren alaşım sistemlerine uygulanabilir [24]. Yaşlandırılan alaşımlarda da mekanik özellik önemli ölçüde artmaktadır. Şekil 2.2.'de yaşlanma ısıl işlem kademeleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yaşlanma ısıl işlemi kademeleri [11].

2.3.4.2. Çözeltiye Alma İşlemi

Çözeltiye alma işleminin amacı, tek fazlı katı çözelti elde etmektir. İlk sıcaklıkta β ve α fazı denge halinde değildir. Alaşım solvüs eğrisinin üzerindeki sıcaklığa çıkarılır ve bu sıcaklıkta β fazı, α fazı içerisinde tamamen çözününceye kadar işleme tabi tutulur [22,26]. Yapının tümü tamamen α fazına dönüştükten sonra ani olarak soğutulur. Çözeltiye alma sıcaklığı, alaşımın ergimesine sebep olmayacak şekilde seçilmelidir. Alüminyum da çözeltiye alma sıcaklığı 525 - 545 °C arasında olmalıdır.

Çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi mikro yapıya, parçanın kalınlığına ve fırın kapasitesine/yüküne göre değişiklik göstermektedir. Bu süre ince levhalar için, dakikalar ile ifade edilirken kesit kalınlığı arttıkça saatler ile belirtilmektedir.

2.3.4.3. Su Verme İşlemi

Su verme işleminin amacı, çözeltiye alınarak katı eriyik içerisinde tamamen çözüldürülen fazların aşırı doymuş yapıda kalmasıdır. Bu nedenle yapıda ikinci faz çökeltilerin oluşturulabilmesi için alaşımın (çözünen elementlerin difüze olmasına fırsat vermeden) hızlı bir şekilde soğutulması gerekir. Eğer alaşım kendiliğinden (yavaş soğuma) soğumaya bırakılırsa, β fazı çekirdeklenerek denge halinde bir $\alpha+\beta$ fazı oluşturmak için heterojen olarak çöker hızlı soğutma ile α içerisindeki β

fazının çökmesine imkân verilmez ve bu nedenle α fazı artık denge halinde değil aşırı doymuş haldedir.

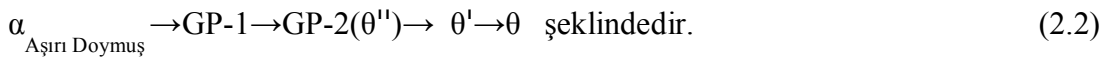
Hızlı soğutma işleminde genellikle su kullanılmaktadır. Ancak suyun yanı sıra, su verme ortamı olarak glikol-su karışımları, suda çözülebilen polimerik yağlar veya madeni yağlar da kullanılmaktadır. Al alaşımlarının ısı iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle, aynı parça ince ve kalın kısımlarda soğuma karakteristikleri farklı olduğu için deformasyonlar görülebilmektedir. Dolayısıyla, bu tür deformasyonları önleyebilmek için, su verme ortamı, bu ortamın sıcaklığı dikkatle seçilmeli, gerekli durumlarda ya su verme ortamı karıştırılmalı ya da parça ortam içerisinde hareket ettirilmelidir.

2.3.4.4. Yaşlandırma İşlemi

Aşırı doymuş katı çözeltili içerisinde çözünmüş halde bulunan β fazı, gibi sıcaklık ve zamanın etkisi ile kararlı bir faz olarak çökler. Bu dönüşüm;



Bu dönüşüm için, önce β fazının çekirdeklenmesi ve sonra difüzyon ile büyümesi gereklidir. Alaşım hızlı soğutmadan sonra oda sıcaklığında tutulursa, difüzyon hızı çok yavaş olduğundan β fazı genellikle oluşmaz veya çok uzun sürede oluşur [26]. Çökme, eğer oda sıcaklığında meydana geliyorsa yaşlanma işlemi “doğal”, alaşım yayınma hızını arttırmak için oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa tabi tutuluyorsa “yapay” yaşlandırma olarak adlandırılır. Yaşlanma sırasında meydana gelen ardışık yapı ;

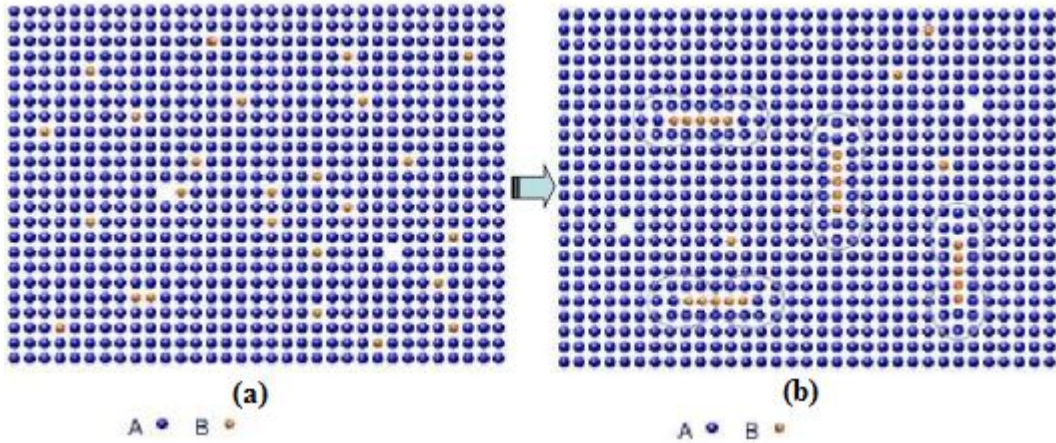


Bu teorik dönüşüm formülüne göre, yaşlanma sırasında aşırı doymuş katı çözeltiliden çökelti fazının oluşum aşamaları;

Çekirdek \rightarrow Ara Çökelti \rightarrow Kararlı Çökelti

şeklindedir. Çökelti oluşumunun ara kademeleri temel olarak alaşımın bileşimine, su verme ve yaşlandırma şartlarına bağlıdır.

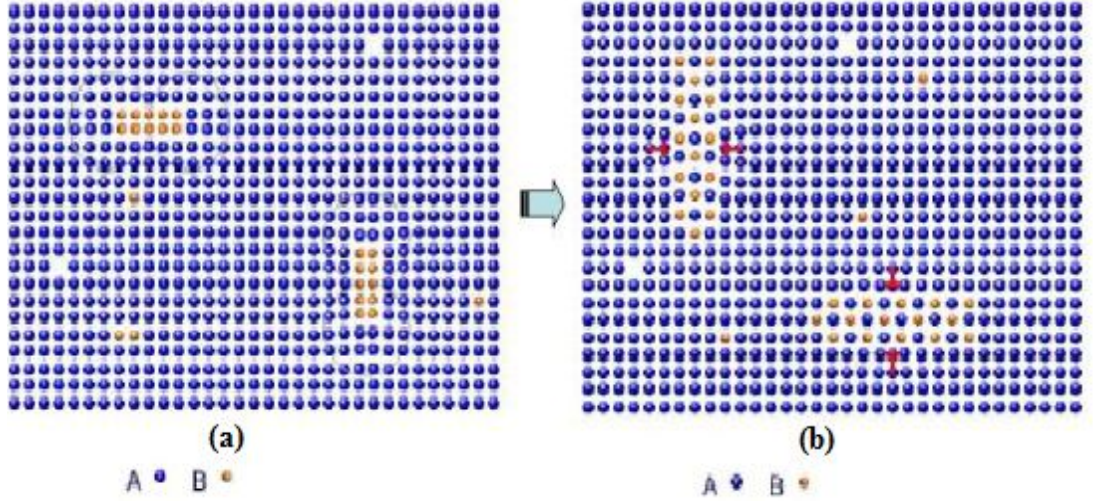
Solüsyona alma aşaması sonucunda aşırı doymuş yapı, denge yapısına geçişe eğilimlidir. Şekil 2.3' a'da görülen yapı, su verme sonucu A (Al) içerisinde aşırı doymuş B (Mg-Si) katı çözültüsü fazını ifade etmektedir [22]. Yaşlandırma işlemi sırasında gerçekleşen difüzyon sonucu B atomları, A latisi içerisindeki spesifik düzlemler üzerinde bölgesel konsantrasyonlar oluşturur (Şekil 2.3' b'de). Bu bölgeler GP (Guinier – Preston) bölgeleri olarak adlandırılır. Bazı sistemlerde GP bölgeleri disk, küre veya çubuk şekilli olabilir



Şekil 2.3. Yaşlandırma işleminde ilk kademe değişimi [27].

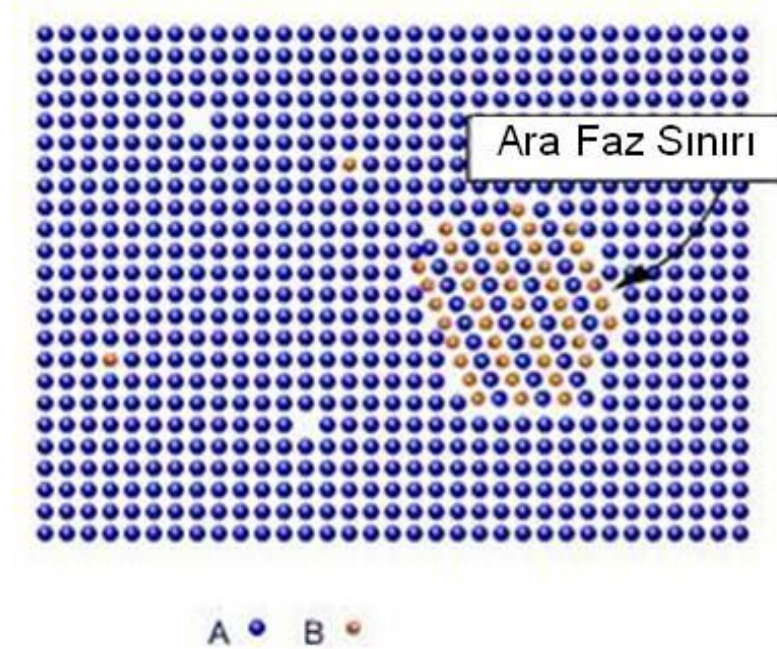
Daha sonra GP bölgeleri tutarlı bir ara faz oluşturmak için, çekirdeklenme siteleri oluştururlar. Bu düzlemin etrafındaki A atomları oluşan bu ara fazın ilerlemesi ve yerleşmesi için bozularak bu birleşme işleminden doğan kuvvetin etkisiyle, deformasyona uğrar ve bir yapışma baskısı oluştururlar (Şekil 2.4 a'da 2. ara kademe).

Çökelti büyüdükçe, büyümeden kaynaklanan sıkışmanın (coherency strain) bir kısmı, ara yüzdeki dislokasyon oluşumları tarafından giderilir (Şekil 2.4. b).



Şekil 2.4. Yaşlandırma işleminde ikinci kademe değişimi [27].

Yaşlandırma işleminin son kademesi denge aşamasıdır. Yeterli yaşlandırma işlemi sonucu en son aşama olarak denge fazı oluşur. Bu faz, ana matristen (A atomları) farklı bir kristal yapısına sahip olduğu halde bu faz içerisinde bileşik halde değildir. Böylece büyümeden kaynaklanan sıkışma elimine edilmiştir. Ancak, matris ve çökelti arasında yeni bir ara faz sınırı vardır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Yaşlandırma işleminde son kademe [27].

BÖLÜM 3

ALÜMİNYUM SİLİSYUM MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Al-Si-Mg alaşımları yoğunluğunun düşük, döküm kabiliyetinin, kaynaklanabilirliğinin ve korozyon direncinin yüksek olması nedeniyle başta otomotiv sanayi olmak üzere endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar [28]. Döküm alaşımları sınıflandırılmasında 3xx.x serisini oluşturan bu alaşımlarda tercih edilen döküm yöntemine bağlı olarak Si oranı %5-12 arasında değişmektedir. Kum kalıplarda düşük katılma hızı nedeniyle Si oranı yaklaşık %5-12 arasındadır. Çizelge 3.1'de 3xx.x serisinde en yaygın olarak kullanılan Al-Si-Mg alaşımları ve bu alaşımların kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. 3xx.x serisinde kullanılan en yaygın alaşımlar ve kimyasal bileşimleri [22].

Alaşım	Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Diğer
319.0	5,5-6,0	0,10	3-4	1,0	1,0	
332.0	8,5-10,0	0,5-1,5	2-4	1,2	1,0	
355.0	4,5-5,5	0,4-0,6	1,0-1,5	0,06	0,35	
A356	6,5-7,5	0,25-0,45	< 0,20	<0,2	<0,1	
A357	6,5-7,5	0,45-0,6	0,05	0,15	0,05	0,05 Be
359	8,5-9,5	0,50-0,7	0,20	0,20	0,10	0,05
383	10,0	0,10	2,5	1,3	3,0	0,15 Sn

3.1. A356 ALÜMİNYUM ALAŞIMI

3xx.x serisi Al-Si-Mg alaşımlarında en önemli alaşımlar A356 ve A357 alaşımlarıdır. A356 alaşımı iyi dayanım ve süneklik gerektiren karmaşık şekilli dökümler, transmisyon kutuları, kamyon aksları muhafazaları, kamyon jantları, silindir blokları, tren tankları gibi birçok yerde kullanılmaktadır [29]. A356 alaşımının fiziksel özellikleri ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2. de verilmektedir.

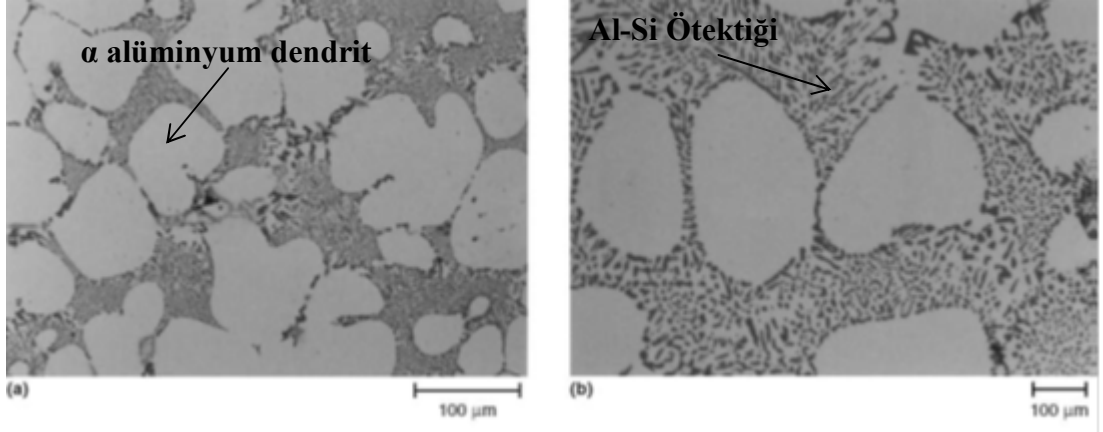
Çizelge 3.2. A356 Alüminyum alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri [30].

Yoğunluk (gr/cm ³)	2,67
Sertlik (Brinell)	100-105
Maksimum Çekme dayanımı	≥234
Akma dayanımı	165
% uzama (kopmada)	≥ 3,5
Elastisite modülü (GPa)	72.2
Termal iletkenlik (W/m-K)	151
Ergime Noktası (°C)	557-613
Likidüs Sıcaklığı (°C)	613
Solidüs Sıcaklığı (°C)	557
Solüsyona alma sıcaklığı (°C)	535-540,6
Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	152-157
Döküm Sıcaklığı (°C)	677-788

3xx.x serisinde bulunan alaşımlar yaşlanma ısıl işlemi uygulanabilen alaşımlardır. Bileşiminde bulunan Mg, T6 ısıl işlem sonrasında Mg₂Si fazını oluşturup oluşan Mg₂Si fazı Al dendritleri arasında çökelerek alaşımın dayanımını arttırmaktadır. (çökelme sertleştirme) [7, 31].

3.2. A356 ALAŞIMLARININ MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Al-Si-Mg alaşımlarında mikro yapı ve mekanik özellikler; malzemenin kimyasal bileşimi, ergitme şartları, döküm şartları ve soğuma şartları (hızı) gibi birçok parametreye bağlıdır [32]. Al-Si-Mg döküm alaşımlarında katılaşma sırasında birincil dendrit ağları büyümeye başlar. Şekil 3.1 de A356 alaşımına ait mikro yapı görüntüsü verilmektedir.

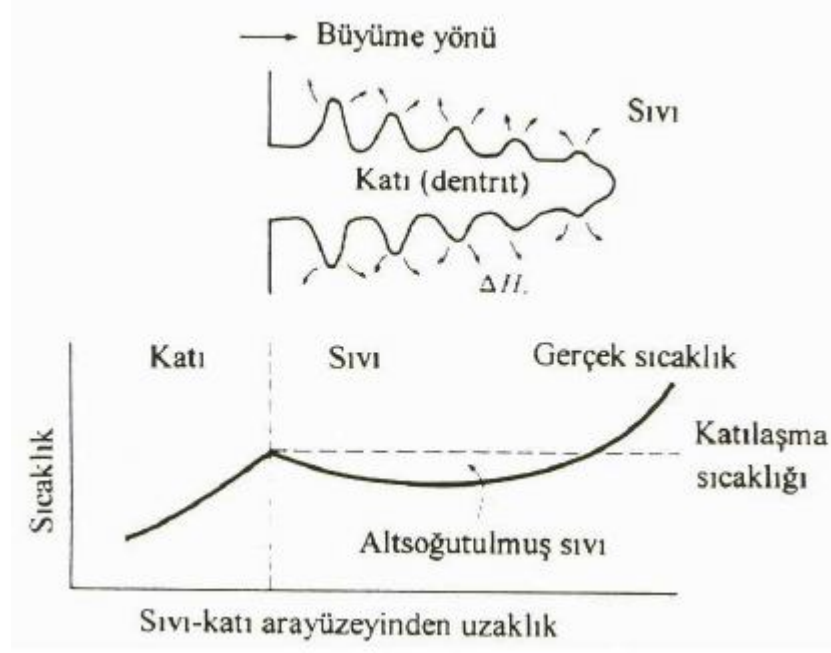


Şekil 3.1 A356 alüminyum alaşımı mikro yapı görüntüsü [33].

3.2.1. Katılaşma ve Soğuma Hızının Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

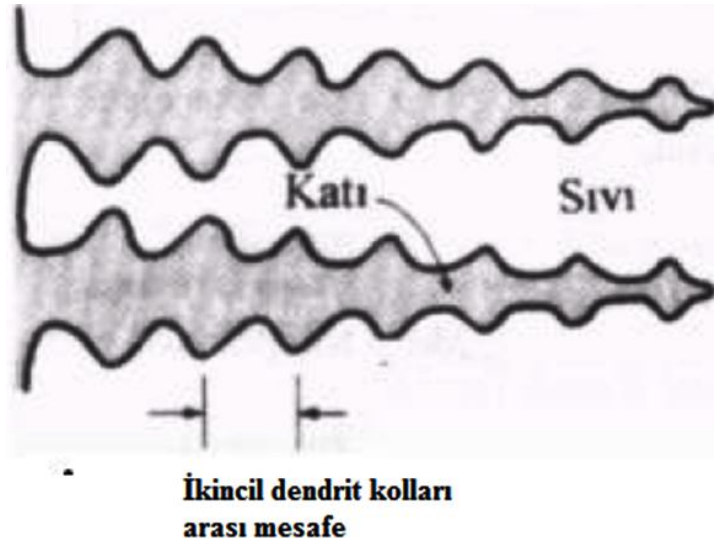
Dendrit oluşumu, yapısal aşırı soğuma sonucu kararsız ve düzlemsel olan katı-sıvı ara yüzeyinin kırılmasıyla başlamaktadır. Hücresel katılaşmadan dendritik katılaşmaya geçiş, hücrelerin yan yüzlerinin kararsız hale gelerek yanlara doğru çıkıntılar meydana getirmesiyle olmaktadır. Alaşımlarda katılaşma ile sıvı içine doğru itilen çözünen element, hücreler arasında birikir ve hücre aralarını çözünen elementlerce zenginleşmesine sebep olmaktadır. Bu konsantrasyonca farklılıkta yapısal aşırı soğumaya, (ara yüzeylerin kararsız hale gelmesine) ara yüzeylerde katı çıkıntılarının (ikinci kolların) meydana gelmesini yani dendritik katılaşmaya neden olmaktadır. Yüksek katılaşma hızı çözünen elementlerin hücre ve dendritler arasında yayılmalarına zaman vermediğinde ise hücre ve dendritler arasındaki mesafeler azalmaktadır [34,35].

Düzlemsel büyümede sıvının içinde bulunduğu kap veya kalıp ısıyı absorbe eder. Dendritik büyümede ise alt soğutulmuş sıvı ısıyı absorbe eder [35]. Şekil 3.2'de dendritik büyüme şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 3.2. Dendritik büyüme görüntüsü [34,35].

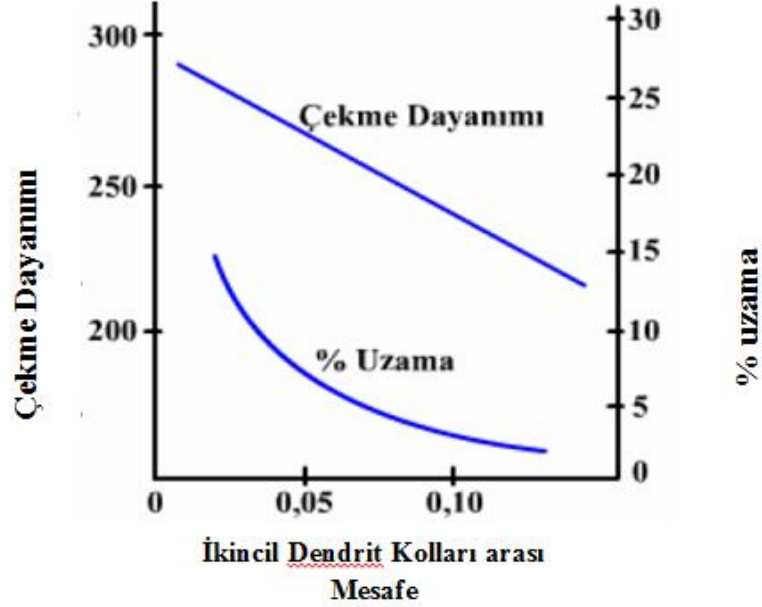
Dendrit büyüklüğü ikincil dendrit kolları arası mesafe ölçümü yapılarak belirlenir. Şekil 3.3. de ikincil dendrit kolları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3. İkincil dendrit kolları görüntüsü [34].

İkincil dendrit kolları arası mesafe alaşımın kimyasal bileşimine, soğuma hızına lokal katılma hızına ve sıcaklık gradyanına bağlıdır [32,36]. Oluşan Dendrit kolları arası mesafe, malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir [32]. Şekil 3.4.' de dendrit

kolları arası mesafenin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.4. İkincil dendrit kol mesafesinin mekanik özelliklere etkisi [34].

İkincil dendrit kolları arası mesafenin kısa olması malzemenin çekme dayanımını arttırmaktadır [32]. Katılaşma sırasında soğuma hızı malzemenin mikro yapısını etkilemektedir. İkincil dendrit kolları arasındaki mesafe ile soğuma oranı doğrudan ilişkilidir. Shabestari ve arkadaşlarının bakır ve katılaşma koşullarının Al-Si-Mg alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişler ve bu çalışmada, soğuma oranı farklı dört kalıp kullanılarak (kum, dökme demir, bakır ve grafit) soğuma hızını incelenmişlerdir. Soğuma hızı en fazla olan grafit kalıplarda ikincil dendrit kolları arası mesafenin en kısa ve en yüksek çekme dayanımının elde edildiğini belirtmişlerdir [32].

3.2.2. Alaşım Elementlerinin Mikro yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Al-Si-Mg alaşımlarında mikro yapıyı ve mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden en önemlisi alaşımın kimyasal bileşimidir. Çizelge 3.1'de verildiği gibi A356 Alüminyum alaşımlarında % 6,5-7,5 oranında Si, % 0,25-0,45 Mg içermektedir. Bileşimde bulunan Si alaşımın akıcılığını arttırmakta, korozyon direncini ve mekanik

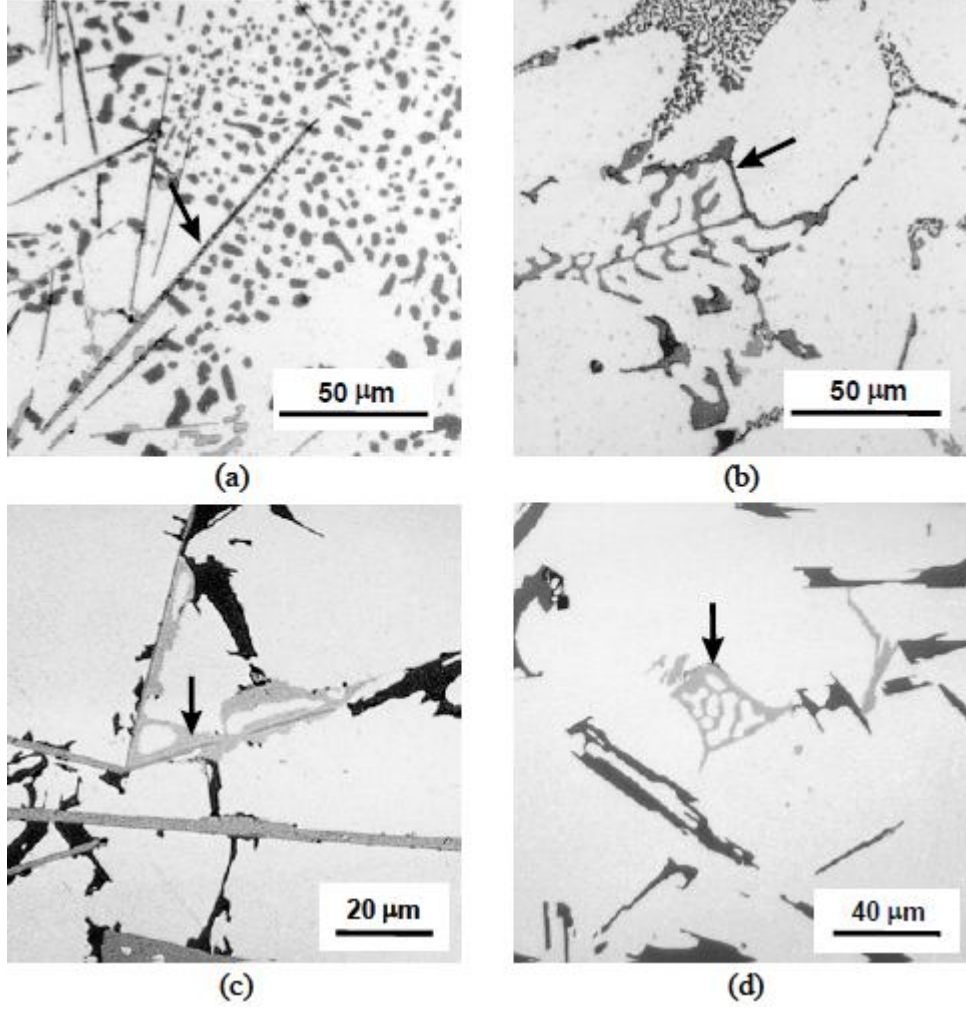
özellikleri geliştirmektedir [22]. Mg ise malzemenin akma, çekme dayanımı ve süneklilik üzerinde etkilidir [8].

4xx.x serisinde Al-Si alaşımları ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Ancak 3xx.x serisinde bulunan Al-Si-Mg alaşımlarında kimyasal bileşimde bulunan Mg alaşımın yaşlanma ısıtıl işlemi (çökeltme sertleşmesi) ile dayanımın artmasını sağlamaktadır. Uygulanan ısıtıl işlem sırasında mikro yapıda oluşturulan Mg_2Si çökelekleri malzemenin mekanik özelliklerini arttırmaktadır [29].

Al-Si-Mg alaşımlarında Mg miktarının artması ile malzemenin akma ve çekme dayanımının artarken, süneklilik azalmaktadır. Bunun yanında bileşimdeki Mg alaşımın ötektik sıcaklığını düşürerek ötektik silisyum yapılarını daha heterojen hale getirmektedir [8]. Al-Si-Mg alaşımlarında Fe ve Cr gibi diğer elementler de alaşımın dayanımında önemli rol oynamaktadır. Özellikle Fe'nin katkısıyla oluşan bu intermetalikler α (Fe_2SiAl_8) ve β (Al_5FeSi) olarak tanımlanmaktadır [37].

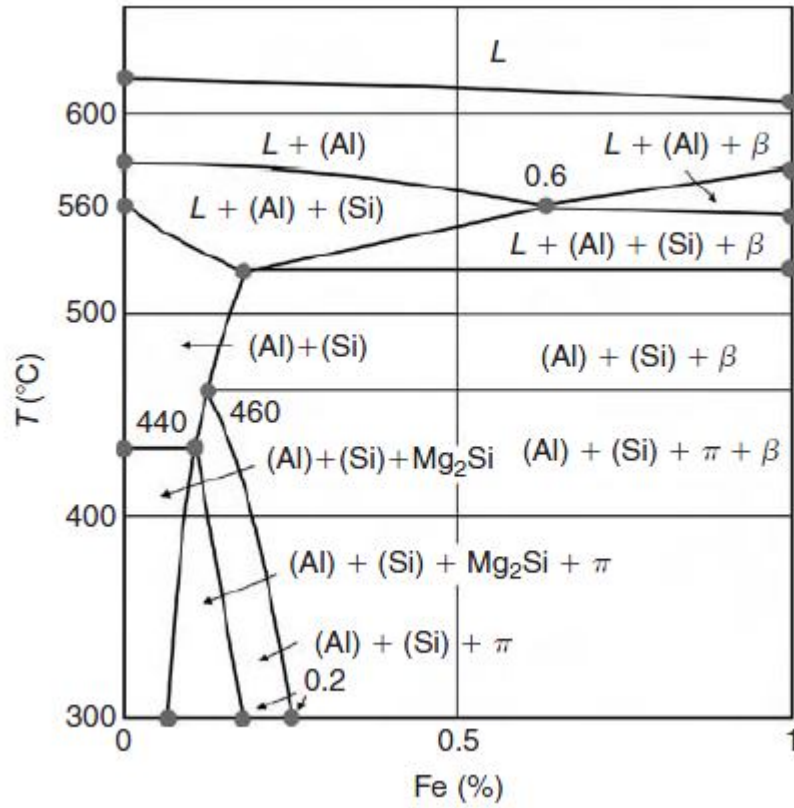
Caceres et al. yaptığı bir çalışmada alaşımın bileşimindeki Mg miktarının demirce zengin intermetalik bileşiklerin hacmini ve şeklini değiştirdiğini, düşük Mg miktarı içeren alaşımlarda β (Al_5FeSi) fazının oluştuğu, yüksek miktardaki Mg'un alaşımda β (Al_5FeSi) fazının yanında π ($Al_9FeMg_3Si_5$) fazının da oluştuğunu belirtmiştir [9]. Zhong wei et al. yaptıkları çalışmada π fazının içeriğinin $Al_8FeMg_3Si_6$ olarak tanımlamıştır [38].

Taylor'ın bir çalışmasında Al-Si alaşımlarında demirin etkisi incelenmiştir. Mikro yapı incelemelerinde demirce zengin intermetalik fazların meydana geldiği ve baskın fazın α (Al_8Fe_2Si) ve β (Al_5FeSi) fazının oluştuğu belirtmiştir. Bileşime ilave edilen Mg π ($Al_9FeMg_3Si_5$) intermetaliklerin oluşumuna neden olmaktadır [39]. Şekil 3.5'de A. Taylor'ın yaptığı çalışmada verdiği mikro yapı görüntülerinde, oluşan fazlar görülmektedir.



Şekil 3.5. Al-Si-Cu-Mg-Fe alaşımlarında meydana gelen intermetalik fazların görüntüsü a) β (Al_5FeSi) yaprakları b) α (Al_8Fe_2Si) c) β fazından gelişen π fazı d) $Al_8FeMg_3Si_6$ [39].

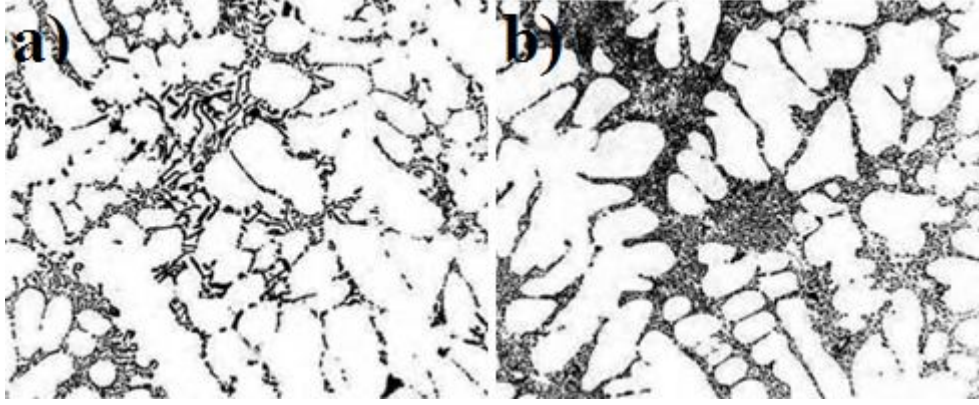
Şekil 3.5'den de anlaşılacağı üzere Mg miktarına bağlı olarak yapıda intermetalik fazlar oluşmaktadır. Demirce zengin intermetalik bileşiklerin malzemenin mekanik özelliklerini düşürmektedir [39]. Ayrıca Mg oranına bağlı olarak oluşan fazlar sünekliliği de düşürmektedir. Al-Si-Mg alaşımlarında (Al % 7Si % 0.3Mg) katılaşma sırasında oluşan demirce zengin fazların ve bu fazların meydana geldiği faz-sıcaklık diyagramı Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Al-Si-Mg diyagramlarında oluşan intermetalik faz- sıcaklık diyagramı [39].

3.2.3. Modifikasyon ve Tane İnceltme İşleminin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

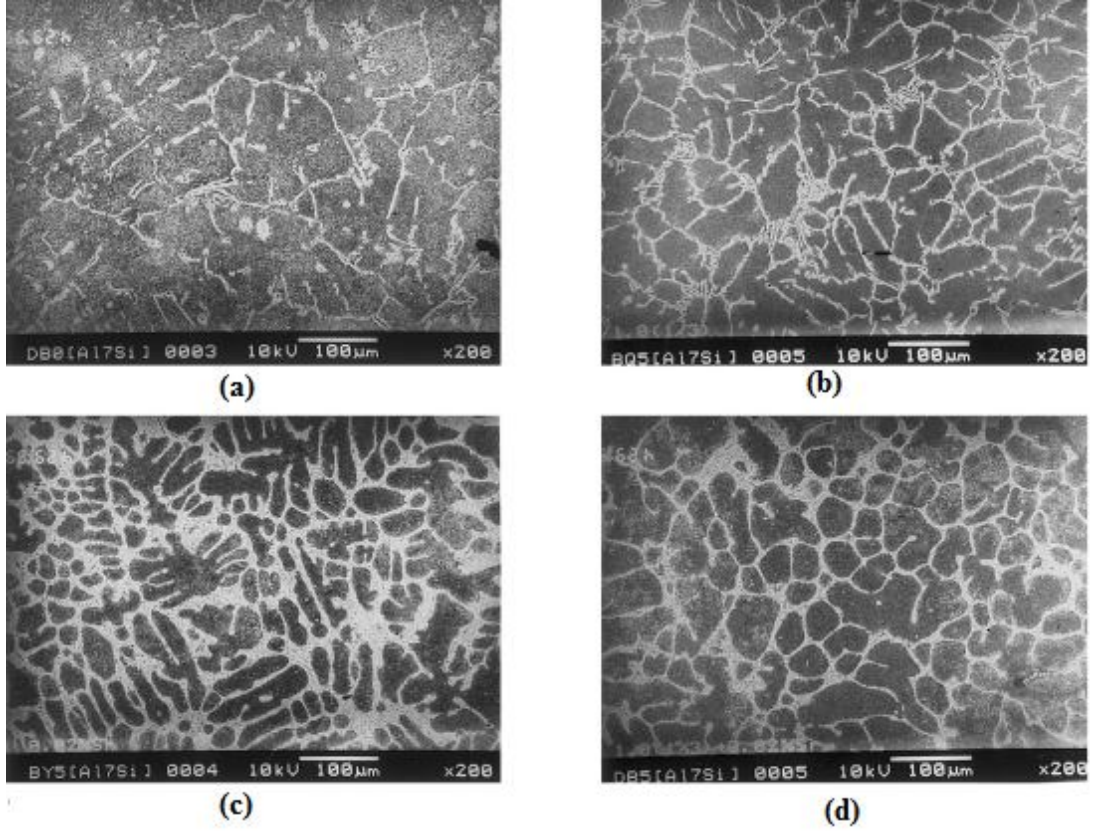
Al-Si-Mg alaşımlarında mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden birisi de alaşım içerisindeki Si parçacıklarının morfolojisidir. Modifikasyon işlemi ile ötektik içerisindeki Si parçacıkları lamelli yapıdan daha ince (fiberimsi) ve düzenli bir dağılım sağlayarak malzemenin mekanik dayanımını artırır [40]. Modifikasyon işlemi (kimyasal modifikasyon) sıvı metal içerisine Na, Sb, Sr, gibi elementlerin çok az miktarda ilave edilmesiyle (%0,01-0,02 oranında) Si parçacıklarının daha ince ve düzenli dağılım göstermesi amacıyla yapılmaktadır. Şekil 3.7 a'da modifiye edilmemiş, Şekil 3.7 b'de modifiye edilmiş Al-7Si-Mg alaşımının mikro yapı görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.7. Al7SiMg alaşımına ait mikro yapı görüntüleri a) modifiye edilmemiş modifiye edilmiş [33].

Al-Si alaşımlarında modifikasyon işleminin yanı sıra, oluşan birincil (α -Al) Al dendritlerinin daha küçük hale getirilmesi için sıvı metale titanyum, bor veya bu alaşımlardan oluşan master alaşımlar (%0,01) ilave edilerek tane inceltme işlemi yapılmaktadır. Yapılan tane inceltme işlemi malzemenin akma dayanımını arttırdığı gibi, alaşımda gözenek miktarını azaltmakta ve gözenek boyutunu da küçültmektedir. Ayrıca besleme kabiliyetini arttırmakta, segregasyonu azaltmakta, yüksek mekanik özellikler ve sızdırmazlık direnci sağlamaktadır [41,42].

Şekil 3.8'de Kori et al. yaptıkları çalışmada stronsyum ile modifiye edilmiş ve edilmemiş Al 7Si alaşımında, tane incelticinin (Al-1Ti-3B master alaşımı) mikro yapıya etkisini göstermek amacıyla kaydettikleri SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.8. Al 7Si alaşımında modifikasyon ve tane inceltme işlemi sonucu elde edilen SEM görüntüleri a) Modifiyer ve tane inceltici kullanılmamış, b) % 1 Al- Ti-3B master alaşımı kullanılarak tane inceltme yapılmış, c) % 0,02 Sb ile modifiye edilmiş d) % 0,02 Sb ve %1 Al-1Ti-3B ile tane inceltme yapılmış [41].

Şekil 3.8’de modifiyer ve tane inceltici kullanılmayan alaşımda Si tanelerinin ve α alüminyum dendritlerin, modifikasyon ve tane inceltici kullanılan alaşıma göre büyük olduğu görülmektedir. Modifiyer (%0,02 Sb) ve tane inceltici (% 1 Al-1Ti-3B) kullanılarak alaşımın akma dayanımını artırılmaktadır [41].

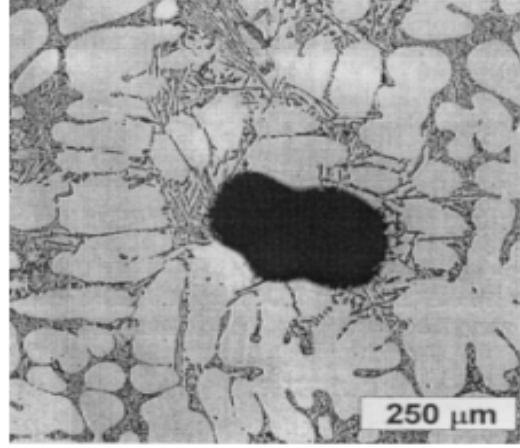
3.2.4. Gözenek Oluşumunun Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Al-Si-Mg alaşımlarında mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden birisi de katılma sırasında meydana gelen gözenek ve mikro boşluklardır. Oluşan bu gözenekler malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gibi yüzey kalitesi üzerinde de olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Yapıda oluşan bu gözenekler boyutlarına göre sınıflandırılmaktadır. 100 μ m boyutundan büyük gözenekler makro, 100 μ m dan daha küçük gözenekler ise mikro gözenekler olarak tanımlanmaktadır.

Döküm yöntemiyle üretilen alaşımlarda gözenek oluşumu, katılaşma sırasında yetersiz besleme ile oluşan çekme boşlukları veya sıvı içerisinde çözünmüş hidrojen gazı nedeniyle veya her ikisinin etkisiyle gerçekleşmektedir [43].

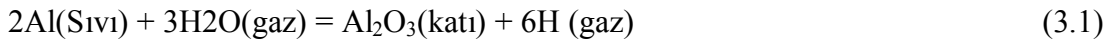
3.2.4.1. Gaz boşlukları

Sıvı alüminyumun içerisinde çözülmüş hidrojen katılaşma sonrasında gaz boşluğu oluşturabilmektedir. Gaz boşluğu daha çok yuvarlak ve düzenli bir görünüme sahiptir. Şekil 3.9'da tipik bir gaz boşluğu görüntüsü verilmektedir.

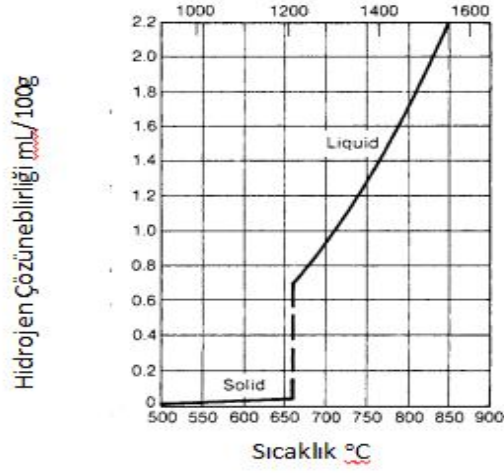


Şekil 3.9. Gaz boşluğu görüntüsü [43].

Hidrojen alüminyum içerisinde çözünebilirliği ölçülen tek gazdır. Hidrojenin katı haldeki alüminyum içerisindeki çözünebilirliği sıvı alüminyum içerisindeki çözünebilirliğinden çok azdır. Yapılan çalışmalarda 660 °C de sıvı alüminyum da hidrojen çözünürlüğü 0.7 ml/100g iken katı halde 0.04 ml/100g olarak ölçülmüştür [43]. Sıvı alüminyum, atmosferden;



hidrojen absorbe edebilmektedir. Şekil 3.10'da sıcaklık artışı ile alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü grafik olarak verilmektedir [43].

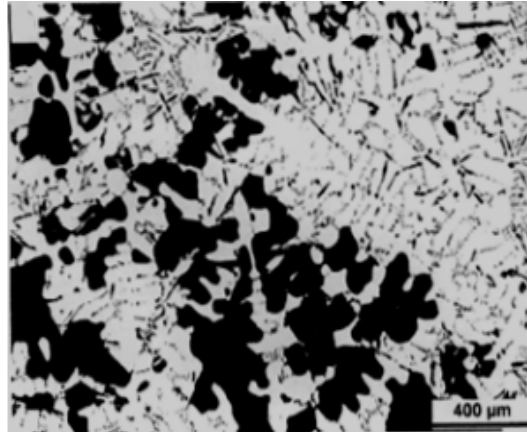


Şekil 3.10. Hidrojen çözünürlüğü [43].

Alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğü Şekil 3.10’da görüldüğü gibi sıcaklık artışı ile artmaktadır.

3.2.4.2. Çekmeye Bağlı Olarak Oluşan Boşluklar

Çekmeye bağlı olarak meydana gelen boşluklar katılaşma sırasında sıvı halden katı hale geçerken dendrit kolları arasında kalan sıvı bölgelerin yeterli derecede beslenememesi sonucu oluşan hacimsel daralmadan (çekmenin) kaynaklanmaktadır. Çekme boşlukları dendrit kolları arasında düzensiz bir dağılım sergilemektedir. Şekil 3.11’de çekmeye bağlı oluşan tipik bir boşluk görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.11. Çekmeye bağlı olarak oluşan gözenekler [43].

3.2.5. Oksit Oluşumunun Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Al-Si-Mg alaşımlarında mikro yapı ve mekanik özellikleri etkileyen parametrelerden biriside sıvı içerisinde oluşan inklüzyonlardır. Inklüzyonlar Al-Si-Mg alaşımlarında mekanik özellikleri önemli oranda etkilemektedir. Oluşan bu metalik olmayan fazlar (inklüzyonlar) alaşımda mekanik yükler altında çentik etkisine neden olmaktadır. Metalik olmayan bu inklüzyonlar mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemesinin yanı sıra alaşımın işlenebilirliği ve korozyon direncinide azaltmaktadır. Çekme ve yorulma testlerinde erken kırılmalara neden olmaktadır [43].

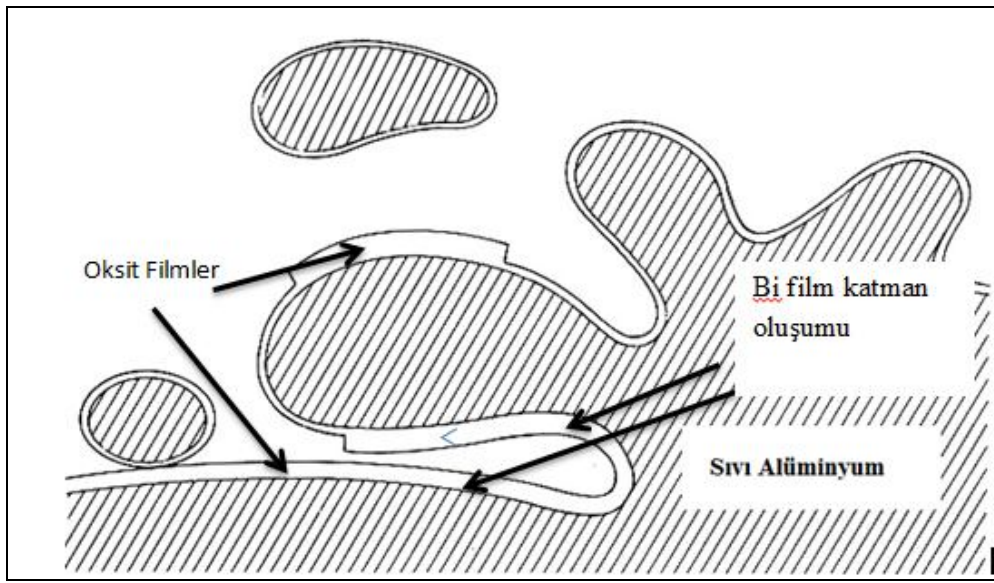
Alüminyumun oksijene karşı olan yoğun ilgisinden (afinitesinden) dolayı alüminyum alaşımlarında en sık karşılaşılan inklüzyonlar oksitlerdir. Alüminyum oksitler alaşımda farklı şekillerde ve boyutlarda görülebilir. Alüminyum içerisinde oluşabilecek çeşitli inklüzyonlar ve bunlara ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 3.3'de verilmektedir.

Çizelge 3.3. Alüminyum alaşımlarında oluşabilecek inklüzyonlar [43].

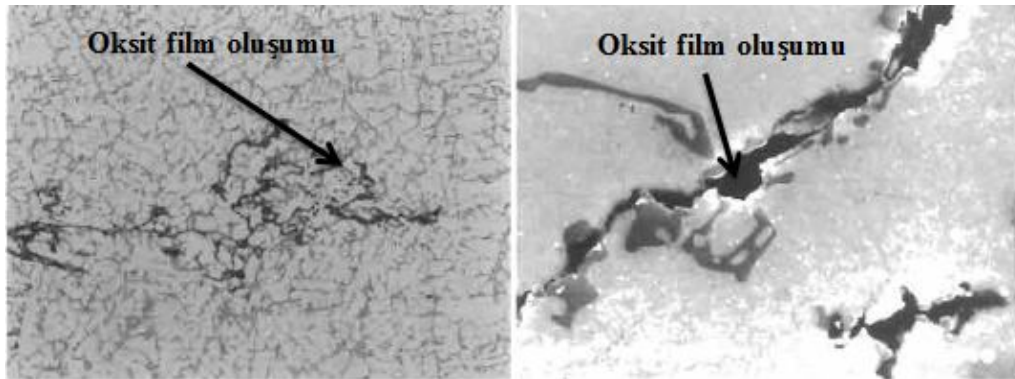
Inklüzyonlar	Şekli	Yoğunluğu (g/cm ³)	Boyutu (µm)	Ergime Derecesi (°C)
Al ₂ O ₃ Alüminyum oksit (α ve γ)	Partikül ve yaprak şeklinde	3,97	0.1-100, 10-5000	2047
MgAl ₂ O ₄ (Spinell)	Partikül, lastikimsi ve yaprak şeklinde	3,6	0.2-30, 10- 5000	2825
MgO	Partikül, lastikimsi	3,58	10-5000	2115
SiO ₂	Partikül	2,66	0.5-30	1650
CaO	Partikül	3,37	<5	2630
Al ₄ C ₃	Partikül	2.36	0.5-25	2100
SiC	Partikül	3,22	0,5-5	2540
AlB ₂	Partikül	3,19	0,1-3	2160

α - Al₂O₃ (alüminyum oksit) yüksek sıvı sıcaklıklarında, γ Al₂O₃ tipi oksitler ise döküm esnasında meydana gelmektedir. Magnezyum oksitler (MgO) yüksek oranda Mg içeren Al alaşımlarında oluşurken spinell (MgAl₂O₄) orta oranda magnezyum içeren Al alaşımlarında meydana gelmektedir [43].

Alüminyum oksitler parçacıklar şeklinde oluşmaktadır. Kalıplarda yanlış yolluk ve besleyici tasarımları döküm işlemi sırasında sıvı Al'un oksijenle temasını artırarak oksitlerin sıvı Al içerisine karışmasına neden olmaktadır. Sıvıya karışan bu oksitlerin döküm işlemi sırasında meydana gelen türbülans dolaylı katlanması halinde bir birini ıslatmayan oksit film katmanlarının (bifilm) oluşumuna yol açmaktadır. Oluşan bi-film katmanlar katılma sırasında gözeneklere neden olmaktadır. Şekil 3.12'de bifilm oluşumu şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 3.13'de ise Al 7Si 0,4Mg alaşımında oluşan oksitlerin mikro yapı üzerindeki görüntüsü verilmektedir.

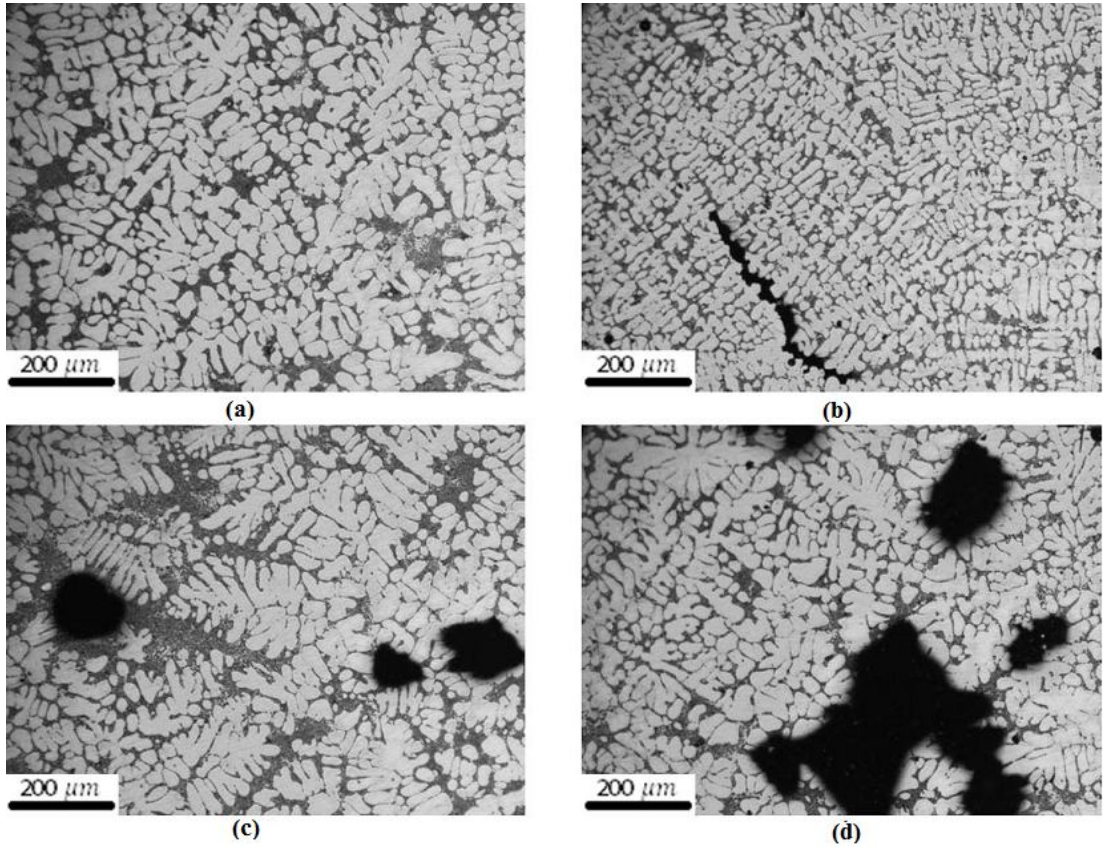


Şekil 3.12. Bi film oksit katman oluşumunun şematik görüntüsü [43].



Şekil 3.13. Al 7Si 0,4Mg alaşımında oluşan oksitlerin mikro yapı görüntüsü [44].

Eisaabadi et al. yaptıkları bir çalışmada, farklı döküm parametrelerinin inklüzyon oluşumuna etkisi incelenmiştir. Döküm işlemleri sırasında ortama bağlı olarak oluşturulan (düşük hidrojen-düşük oksit, yüksek hidrojen-düşük oksit, düşük hidrojen-yüksek oksit, yüksek hidrojen-yüksek oksit) inklüzyon oluşumları nedeniyle mekanik özelliklerde azalma meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 3.14’de yapılan bu çalışmadan elde edilen mikro yapı görüntülerinde görülmektedir.



Şekil 3.14. Farklı döküm parametreleri kullanılarak dökülen Al 7Si 0,35Mg alaşımının mikro yapı görüntüleri a) Düşük oranda H ve oksit b) Yüksek oksit düşük H c)düşük oksit yüksek H d)yüksek H yüksek oksit [44].

Çizelge 3.4.Farklı döküm parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi [44].

Düşük oranda oksit- düşük oranda Hidrojen		Düşük oranda oksit - yüksek oranda Hidrojen		Yüksek oranda oksit- Düşük oranda Hidrojen		Yüksek oranda oksit -yüksek oranda Hidrojen	
Maksimum Çekme dayanımı (MPa)	% uzama	Maksimum Çekme dayanımı (MPa)	% uzama	Maksimum Çekme dayanımı (MPa)	% uzama	Maksimum Çekme dayanımı (MPa)	% uzama
297.96	4.71	274.78	2.16	280.07	2.28	265.81	1.79

Yine döküm işlemi sırasında ortama bağı olarak oluşturulan (düşük hidrojen-düşük oksit, yüksek hidrojen-düşük oksit, düşük hidrojen-yüksek oksit, yüksek hidrojen-yüksek oksit) mekanik özelliklere etkisi Çizelge 3.4’de verilmiştir. Alaşımda bulunan oksit ve hidrojen varlığının alaşımın çekme dayanımı ve yüzde uzama değerlerini düşürdüğü görülmektedir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, ilk aşamada A356 alaşımının farklı kalıp malzemelerine (kum kalıplara, seramik kalıplara ve kromit kalıplama kumu) dökülmesi sonucunda meydana gelen mikro yapısal değişimlerin, dentrit kolları arasında meydana gelen boşlukların ve mikro yapı morfolojisinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada ise A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda (%0.43, %0.67 ve %0.86) ilave edilen Mg'un alaşımın mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

4.2. DÖKÜM AKIŞ SİMÜLYASYONU

Döküm akış simülasyonu Kardökmak A.Ş de NovaFlow & Solid Gravity döküm simülasyon programında simüle edilmiştir. Simülasyonda kullanılan toplam hücre sayısı 18017180 ve döküm hücre sayısı ise 1068425 dir. Sıvı metalin kalıp boşluğunu ve yolluk sistemini doldurması esnasındaki iki boyutlu vektörel hızı ve üç boyutlu akış hali üzerinden türbülans ve yüzey türbülansı değerlendirilmiştir.

4.3. KALIPLARIN HAZIRLANMASI

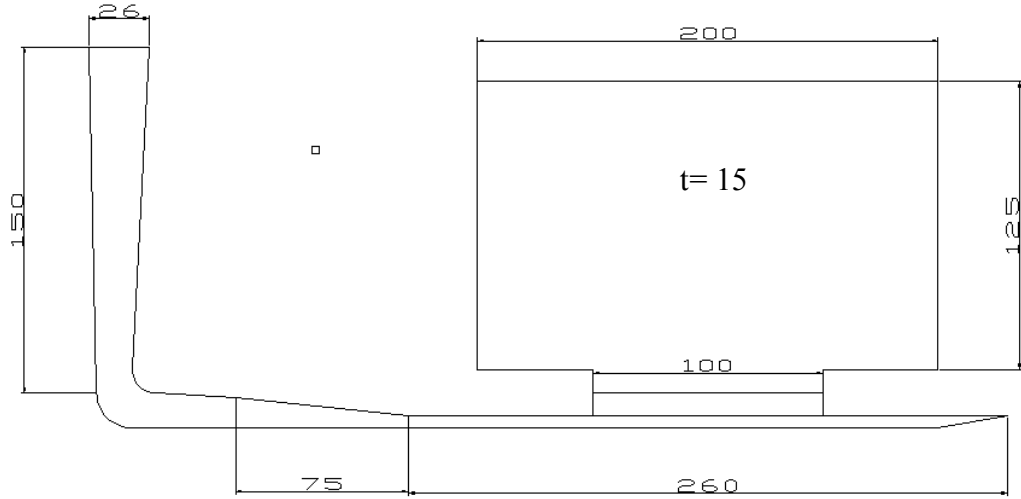
4.3.1. Kum Kalıpların Hazırlanması

Kum kalıpların hazırlanmasında AFS 60-65 numaralı silis kumu (SiO_2) kullanılmıştır. Kalıpların hazırlanması sırasında her bir kalıp yüzeyi için 11 Kg Silis kumu, kumun % 2 si kadar havada sertleşen UNİSET A1 alkali fenolik reçine (bağlayıcı olarak) ve kullanılan reçine miktarının %25 i kadar UNİSER AK 26 reçine

sertleştirici kullanılmıştır. Kum hazırlama işlemleri için Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim Dalında bulunan maça kumu hazırlama mikseri kullanılmıştır. Şekil 4.1’de kalıplama için kullanılan modelin görüntüsü ve ölçüsü verilmektedir. Reçineli kumdan hazırlanan kalıpların görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir.

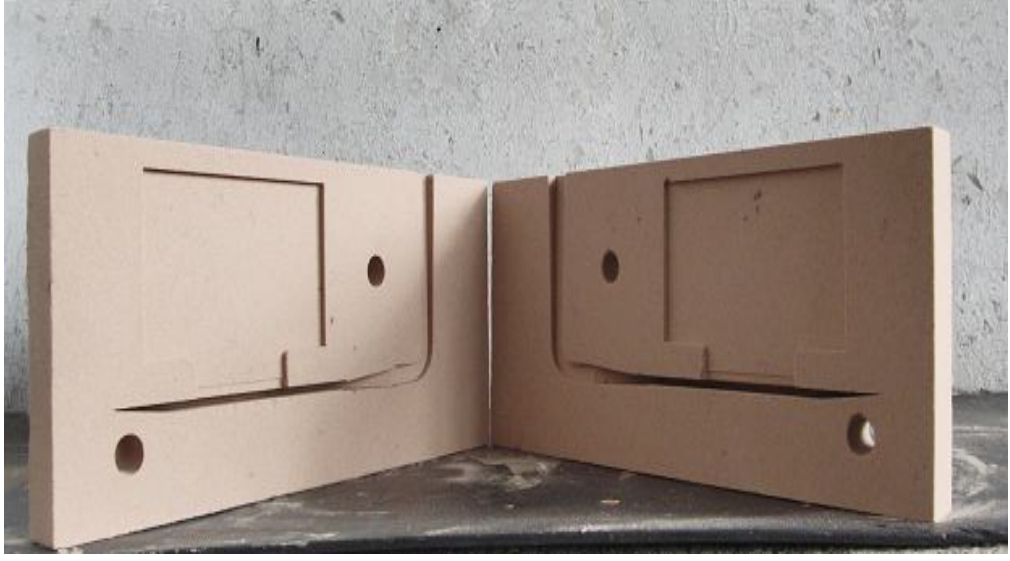


(a)

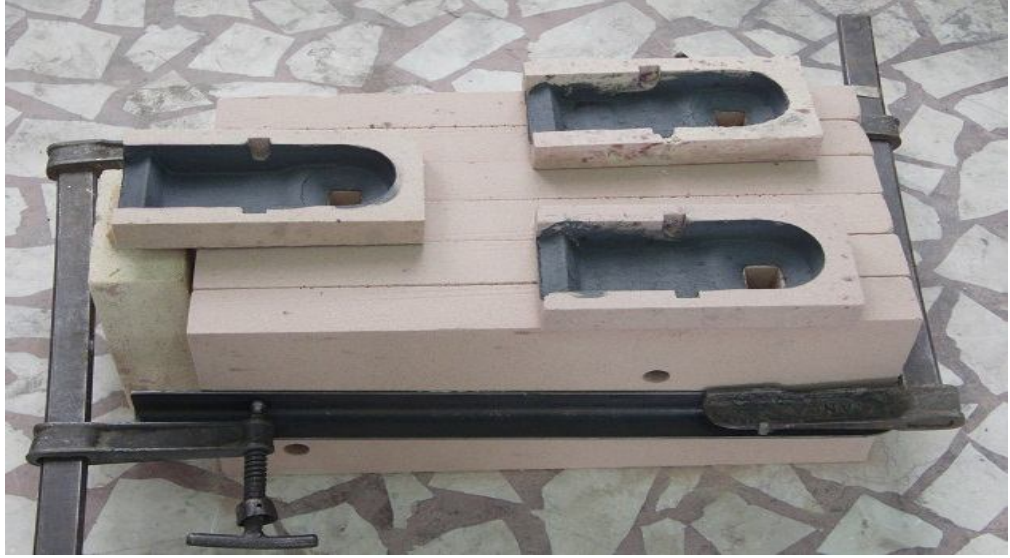


(b)

Şekil 4.1. Kalıpların hazırlanmasında kullanılan model; a) model görüntüsü, b) kullanılan model ölçüleri (mm).



(a)



(b)

Şekil 4.2. Reçineli kumdan hazırlanan kalıp görüntüsü; a) kalıpların kapatılmadan önceki hali, b) kalıpların döküme hazır hali.

4.3.2. Seramik Malzeme (Lod 607) ile Kalıbın Hazırlanması

Kalıplama için 1100°C ' sıcaklığa kadar bozunmayan ve termal şok dayanımı yüksek, ısı iletkenliği çok düşük, doğada çözülebilen alkali doğal silika esaslı izolasyon malzemesi kullanılmıştır. Kalıplar hazırlanırken her bir yüzey için 1,5 Kg LOD 607 termal seramik malzeme ve bu malzemenin % 90'ı kadar su kullanılmıştır. Seramik malzemedan hazırlanan kalıbın görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Lod 607 Seramik malzeme ile hazırlanan kalıp görüntüsü.

4.3.3. Kromit Kalıbın Hazırlanması

Kromit kalıpların hazırlanması için 50-55 AFS tane iriliğine sahip kimyasal analizi Çizelge 4.1'de verilen kromit bazlı kalıplama kumu kullanılmıştır. Kalıpların hazırlanması sırasında her kalıp yüzeyi için 20 Kg Kromit bazlı kalıp kumu kullanılan kum kütlelerinin % 2'si kadar havada sertleşen UNİSET A1 alkali fenolik reçine (bağlayıcı olarak) ve kullanılan reçine miktarının %25 i kadar UNİSER AK 26 reçine sertleştirici kullanılmıştır. Kum hazırlama işlemleri için Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim Dalında bulunan maça kumu hazırlama mikseri kullanılmıştır. Kromit bazlı kumdan hazırlanan kalıpların görüntüleri Şekil 4.4. de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kromit kumun kimyasal analizi

Kimyasal bileşimi	% Miktar
Cr ₂ O ₃	55
Fe ₂ O ₃	15
SiO ₂	1.5
CaO	0.5
Al ₂ O ₃	12
MgO	16



Şekil 4.4. Kromit kum kalıbın görüntüsü.

4.4. ERGİTME İŞLEMİ

Ergitme işlemi için Şekil 3.5’de gösterilen Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim Dalında bulunan elektrik direnç ocağı kullanılmıştır. Ergitme için Eti Alüminyum A:Ş den temin edilen A356 Alüminyum alaşımı külçeler kullanılmıştır. Kullanılan külçelerin kimyasal analizi Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kullanılan külçeler ocak için uygun parçalar halinde kesilerek ocak şarj edilmiştir.



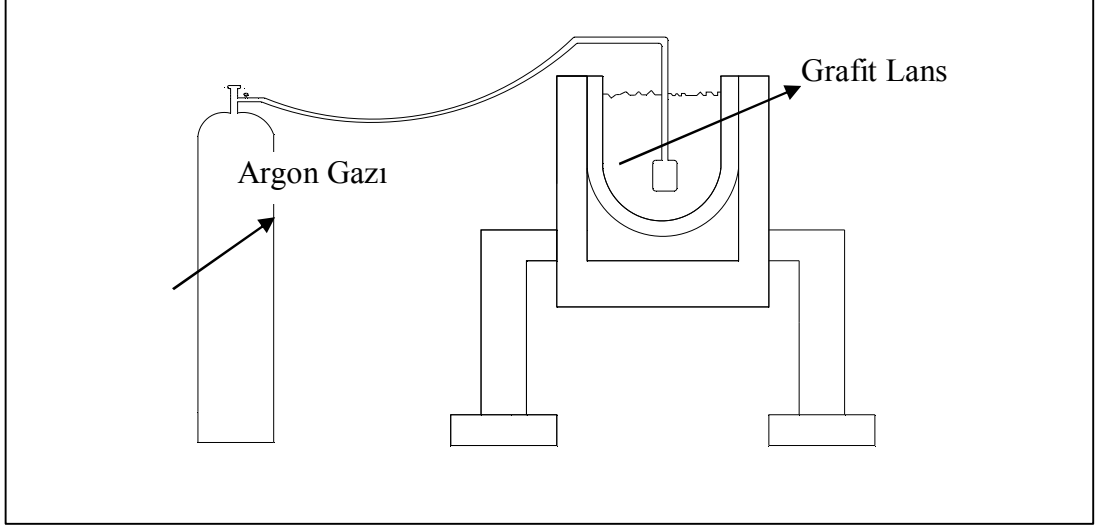
Şekil 4.5. Ergitme işleminde kullanılan elektrik direnç ocağı görüntüsü.

Çizelge 4.2. Ergitmede kullanılan A356 Alüminyum külçenin kimyasal bileşimi.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Na	Al
7.53	0.15	0.0023	0,0303	0.403	0.00002	0.11	0.002	Kalan

4.5. GAZ GİDERME İŞLEMİ

Gaz giderme işlemi, 750 °C ye ulaşan sıvı metale elektrik direnç ocağı içerisinde 1 bar basınçta 5 dakika süreyle argon gazı verilerek yapılmıştır. Şekil 4.6'da gaz giderme işlemi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.6. Gaz giderme işleminin şematik görüntüsü.

4.6. DÖKÜM İŞLEMİ

Potaya alınan sıvı metal sıcaklığı 750 °C olarak ölçülmüştür. Potaya alınan sıvı metale istenilen kimyasal bileşimi elde etmek için hesaplanan miktarlarda Mg ilavesi yapılmıştır. İstenilen kompozisyonda hazırlanan sıvı alaşım hazırlanan kalıplara dökülmüştür. Mg ilave edilerek hazırlanan alaşımın kimyasal analizi Çizelge 4.3’de verilmiştir. Verilen analizde Fe oranının artışı degasing (gaz giderme) sırasında argon verilen çelik borudan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.7’de döküm sonrası kalıp görüntüsü verilmiştir.

Çizelge 4.3. Hazırlanan alaşımların kimyasal analizi.

ALAŞIM KODU	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Na	Al
1	7.07	0.32	0,003	0.032	0.43	0.033	0.113	0.0002	Kalan
2	6.89	0.306	0.003	0.0342	0.67	0.009	0.111	0.0005	Kalan
3	7.147	0.355	0,007	0.0328	0.86	0.038	0.093	0.0001	Kalan



(a)



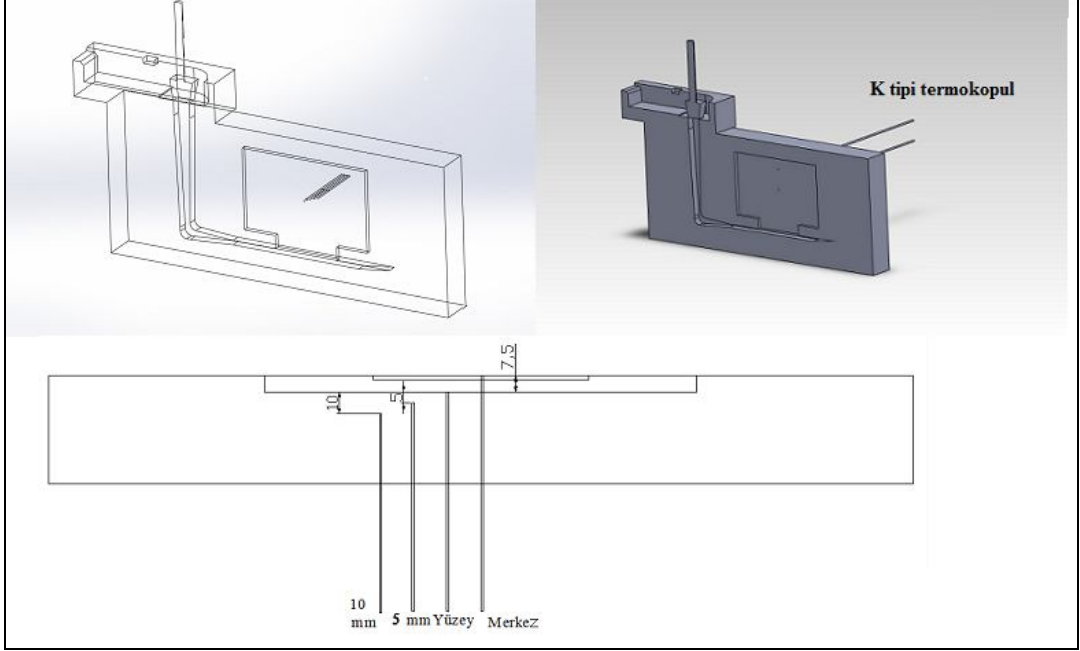
(b)

Şekil 4.7. Döküm sonrası kalıp görüntüsü; a) dökülmüş hali, b) döküm parçanın kalıp içerisindeki hali.

4.7. FARKLI KALIPLARIN ISI TANSFERLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Farklı kalıp malzemeleri (kum kalıp, kromit bazlı kum kalıp ve seramik kalıp) kullanılarak hazırlanan kalıpların ısı transferlerini ölçmek için Şekil 4.8'de şematik görüntüsü Şekil 4.9'da gerçek görüntüsü verilen kalıplara K tipi ısı çiftleri

yerleştirilerek veri kaydedicisi (data logger) yardımı ile kalıpların ısı transferleri ölçülmüştür.



Şekil 4.8. Kalıba yerleştirilen ısı çiftlerinin şematik görüntüsü.



Şekil 4.9. Kalıba yerleştirilen ısı çiftlerinin gerçek görüntüsü.

4.8. ISIL İŞLEM

4.8.1. Homojenizasyon İşlemi

Homojenizasyon ısıt işleml Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim dalında bulunan ısıt işleml fırınında yapılmıştır. Dökülen bloklar 540 °C de 6 saat tavlanaarak fırın ortamında soğutulmuştur.

4.8.2. Yaşlandırma Isıt İşleml

Yaşlandırma ısıt işleml, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde bulunan Şekil 4.10. da gösterilen PROTHERM marka ve PLF 120/27 model fırında yapılmıştır. Yaşlandırma ısıt işlemlinde numuneler 540 °C de 8 saat solüsyona alınmış, solüsyona alınan numuneler oda sıcaklığında su verme işlemline tabi tutulmuş, daha sonra 24 saat oda sıcaklığında doğal yaşlandırma, 170 °C de 10 saat süreyle yapay yaşlandırma işlemline tabi tutularak yaşlandırma ısıt işleml tamamlanmıştır.



Şekil 4.10. Yaşlandırma ısıt işleml yapılan fırın görüntüsü.

4.9. METALOGRAFİK İNCELEMELER

4.9.1. Numune Hazırlama

Metalografik incelemeler için hazırlanan numuneler, soğuk gömme ile polyestere alınmıştır. Zımparalama ve polisaj işlemlerinin bir kısmı Çek Cumhuriyeti'nde University of Defence'de Makine Mühendisliği bölümünde bulunan ve Şekil 4.11'de görüntüsü verilen zımparalama ve otomatik polisaj cihazı kullanılarak yapılmıştır. University of Defence'de hazırlanan numuneler 400-4000 Mesh arasında SiC zımpara kullanılarak zımparalanmış, otomatik polisaj cihazında 1µm elmas pasta ile maksimum 15 N yük uygulanarak yaklaşık 2 saat süreyle parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Diğer kısmı ise Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim Dalında bulunan zımpara ve polisaj cihazında yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler ultrasonik temizleyici cihazında alkol ile temizlenmiştir. Optik mikroskop incelemeleri için numuneler, 95 ml H₂O, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl ve 1 ml HF karıştırılarak hazırlanan çözelti ile 15 sn süreyle dağlanmıştır.



Şekil 4.11. Zımpara ve polisaj cihazlarının görüntüsü.

4.9.2. Optik Mikroskop İncelemeleri

Hazırlanan numunelerin bir kısmı Çek Cumhuriyeti'nde University of Defence de Makine Mühendisliği bölümünde bulunan OLYMUPUS GX51 marka mikroskop kullanılarak mikro yapı görüntüleri çekilmiştir. Diğer Numuneler Karabük

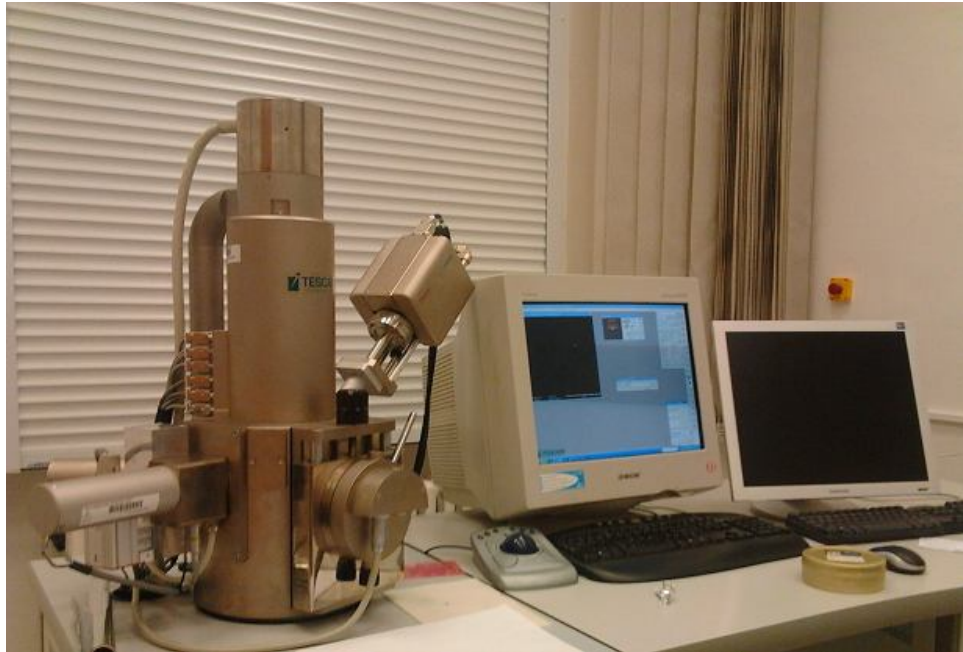
Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim dalında bulunan 4X-100X büyütme kapasitesine sahip MEIJI marka mikroskopta incelenmiştir.

4.9.3. İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafelerin Ölçümü

Dentrit kolları arası mesafe ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Anabilim Dalında bulunan MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz sisteminde yapılmıştır.

4.9.4. SEM ve EDS İncelemesi

SEM ve EDS incelemelerinin bir kısmı Çek Cumhuriyeti'nde University of Defence'de Makine Mühendisliği bölümünde bulunan ve Şekil 4.12'de görüntüsü verilen TESCAN marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analiz sisteminde yapılmıştır. Diğer kısmı İstanbul Teknik Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği laboratuvarında bulunan JEOL JSM 7000 marka Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca Alaşım 3'e ait nano SEM görüntüleri Bilkent Üniversitesi UNAM laboratuvarlarında bulunan FEI NovananoSEM 600 marka cihazı kullanılarak alınmıştır.



Şekil 4.12. Taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

4.9.5. X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri

Üretilen alaşımların XRD incelemeleri INEL EQUINOX 100 marka cihaz kullanılarak yapılmıştır.

4.9.6. Lazer Konfokal Mikroskop İncelemeleri

Üretilen Alaşım 1 ve Alaşım 3'e ait numunelerin lazer konfokal mikroskop incelemeleri Çek Cumhuriyeti'nde University of Defence'de Makine Mühendisliği bölümünde bulunan OLYMPUS LEXT OLS 3000 marka lazer konfokal mikroskop kullanılarak yapılmıştır.

4.9.7. Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluk ölçümleri Arshimeds' prensibine göre Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde bulunan Precisa XB 200h marka 1/10000 hassasiyetteki hassas teraziye bağlı yoğunluk ölçüm kiti ile her parametreden 5'er adet numuneden yoğunluk alınarak ortalamaları hesaplanarak % porozite oranı bulunmuştur.

4.10. MEKANİK TESTLER

4.10.1. Sertlik Ölçümleri

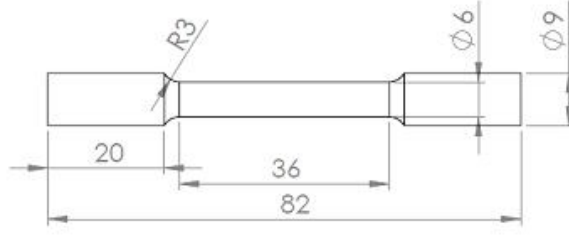
Sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Döküm laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.13'de görünümü verilen AFFRI SYSTEM marka VRSD-251 model universal makro sertlik cihazında Vickers olarak (HV) olarak ölçülmüştür. Her numuneden beşer adet ölçüm alınarak, bu ölçümlerin ortalaması sertlik değeri olarak kullanılmıştır. Ölçümler sırasında 136 ° tepe açısına sahip elmas piramit uça 2 kg (HV2) yük uygulanmıştır.



Şekil 4.13. Makro sertlik cihazı görüntüsü.

4.9.2. Çekme Numunesinin Hazırlanması ve Çekme Testinin Yapılması

Homojenizasyon işleminden sonra dökülmüş bloklardan çekme numunesi elde etmek için dikey olarak 12x15x150 mm boyutlarında 5 er adet parça kesilerek ASTM E 8M-04 standartlarında Şekil 4.14’de gösterilen boyutlarda çekme numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulduktan sonra çekme deneyi Şekil 4.15’de görüntüsü verilen SHİMADZU AG-IS marka 50 kN kapasitesine ayarlanabilen çekme cihazında ve 2 mm/dk çekme hızında yapılmıştır.



Şekil 4.14. Çekme numunesi görüntüsü.



Şekil 4.15. Çekme testi cihaz görüntüsü.

4.11. WEIBULL İSTATİSTİKSEL DAĞILIMI ANALİZİ

Farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen alaşımın ve Mg oranları farklı olarak dökülen alaşımların çekme değerleri weibull istatistiksel dağılım analizinde, weibull modülü ile değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

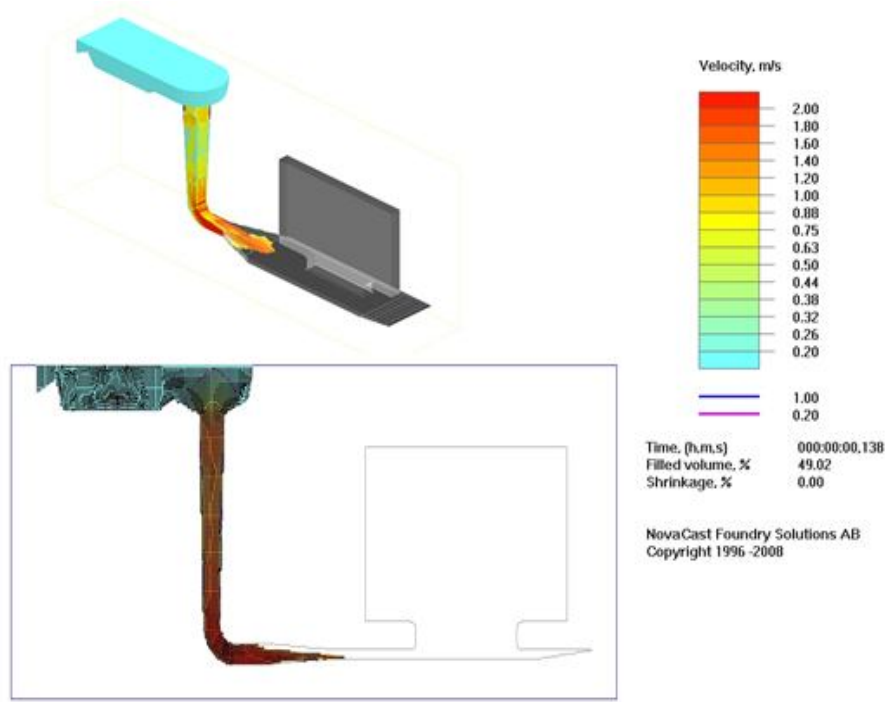
5.1. GİRİŞ

Bu çalışma, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Eti Alüminyum A.Ş'den külçe olarak temin edilen A356 Alüminyum Silisyum Magnezyum alaşımı farklı kalıp malzemeler (kum kalıp, seramik kalıp ve kromit kalıp) kullanılarak hazırlanan kalıplara dökülmüştür. Kimyasal bileşimi aynı olarak dökülen parçaların soğuma hızları kalıplara yerleştirilen ısı çiftleriyle ölçülerek, dendrit kolları arasında meydana gelen boşlukların ve mikro yapı morfolojisinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada ise alaşıma farklı oranlarda Mg ilavesi yapılarak kimyasal analizleri Çizelge 3.3'de verilen 3 farklı alaşım üretilmiştir. Çalışma doğrultusunda üretilen alaşımlar homojenizasyon ve yaşlandırma ısı işlemine tabi tutularak, Al-Si-Mg alaşımlarında Mg oranının mekanik özelliklere etkisinin yanında, Mg oranına bağlı olarak oluşabilecek intermetalik bileşiklerin ve bu yapıların malzemenin mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi amacıyla; mikro yapı, SEM, EDS ve XRD görüntüleri alınmış, sertlik testleri uygulanmış ve standartlara uygun çekme numuneleri hazırlanarak çekme deneyleri yapılmıştır.

5.2. DÖKÜM AKIŞ SİMİLASYON DEĞERLENDİRMESİ

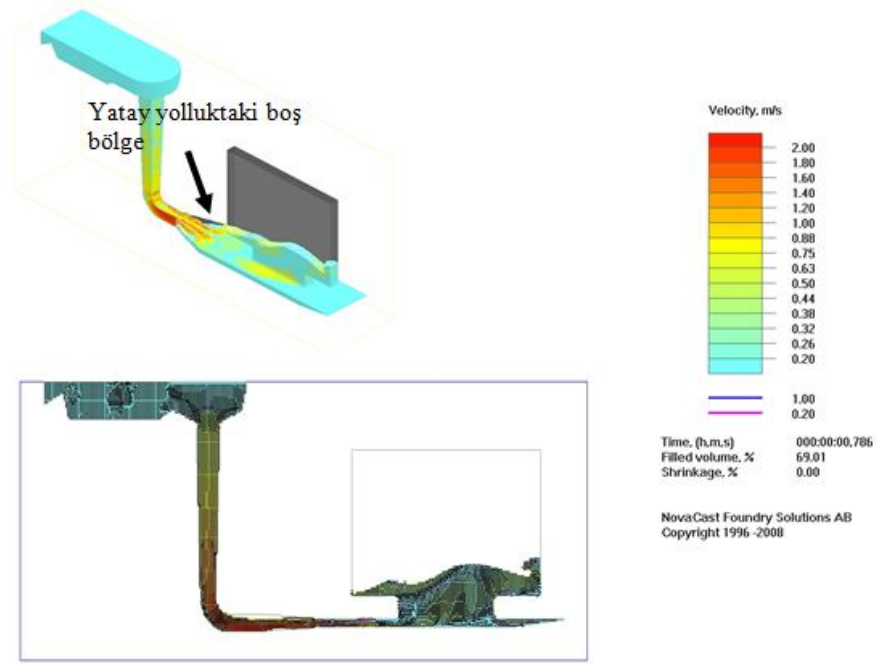
Sıvı metalin yolluk sistemi ve kalıp boşluğunu doldurması sırasındaki akış durumu, döküm malzemenin kalitesini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu amaçla döküm yapılan yolluk sisteminde oluşan akış durumu similasyon programı ile öngörülme çalışılmıştır. Kalıbın tam ortasından iki boyutlu vektörel hızları ve üç boyutlu hız görüntüleri alınmıştır.

Şekil 5.1’de verilen similasyon görüntüsünde döküm işlemi başladıktan 0.138 saniye sonra sıvı metal dikey yolluktan dikdörtgen kesitli yatay yolluğa ulaşmıştır. Dikdörtgen kesitli yatay yolluğun kesit alanı (450 mm^2) kare kesitli dikey yolluğun kesit alanından (225 mm^2) daha büyük olduğundan sıvı metalin hızı azalmaktadır. Fakat döküm esnasında sıvı metalin başlangıçtaki akış durumunun süreksizliğinden dolayı kalıp duvarlarından ayrılma ve saçılma oluşmaktadır.



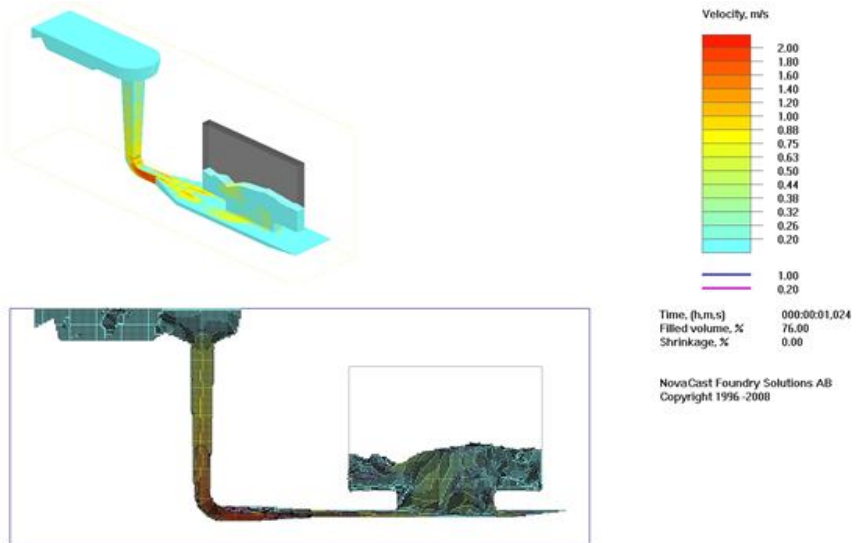
Şekil 5.1. 0.138 saniye sonraki simülasyon görüntüsü.

Şekil 5.2’de verilen similasyon görüntüsünde döküm işlemi başladıktan sonra yatay yolluğu kısmen dolduran sıvı metal (0.786 sn.) meme kesit alanından yaklaşık olarak 0.20-0,40 m/s hız ile kalıp boşluğunu doldurmaya başlamıştır. Bu aşamada döküm kalıp hacminin % 69 u sıvı metal ile doldurulmuştur. Fakat kare kesitli dirsek çıkışından dikdörtgen kesitli yatay yolluğun birleştiği kısımda sıvı metalin yatay yolluğu tamamen doldurmadığı görülmektedir.



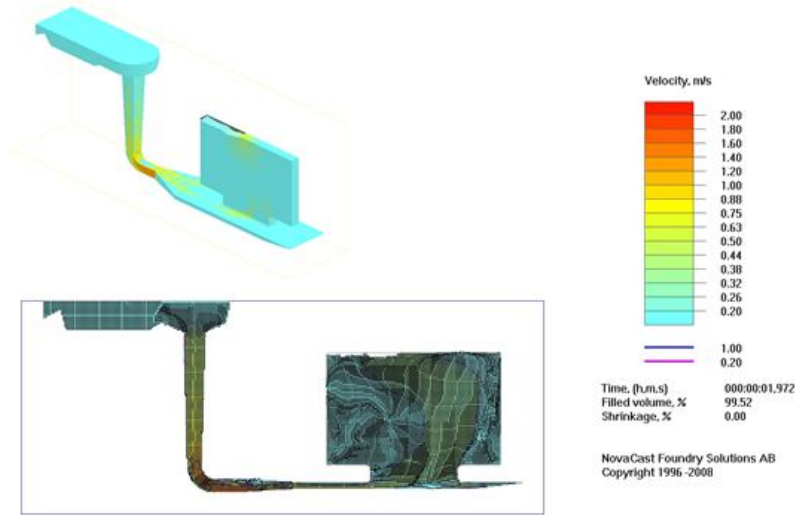
Şekil 5.2. 0.786 saniye sonraki similasyon görüntüsü.

Şekil 5.3’de verilen similasyon görüntüsünde döküm başladıktan sonra 1.024 sn sonra sıvı metal kalıbın % 76 sının doldurmuştur. Yatay yolluktaki bir önceki zaman aralığında alınan similasyon görüntüsüne (Şekil 5.2.) bakıldığında sıvı metalin dolduramadığı kısımların tamamen dolduğu görülmektedir. Akış kalıp boşluğundaki artan sıvı metal yüksekliği ve hacmine bağlı olarak kısmen düzenli bir akış sergilemektedir.



Şekil 5.3. 1.024 saniye sonraki similasyon görüntüsü.

Şekil 5.4’de görüntüsü verilen similasyon görüntüsünde sıvı metal yolluk sistemini ve kalıp boşluğunun % 99.52 ini 1.972 sn de doldurmuştur. en son kalıp boşluğuna ulaşan sıvı metalin hızı yaklaşık olarak 0.26-0.32 m/s hız ile kalıbı doldurmuştur.

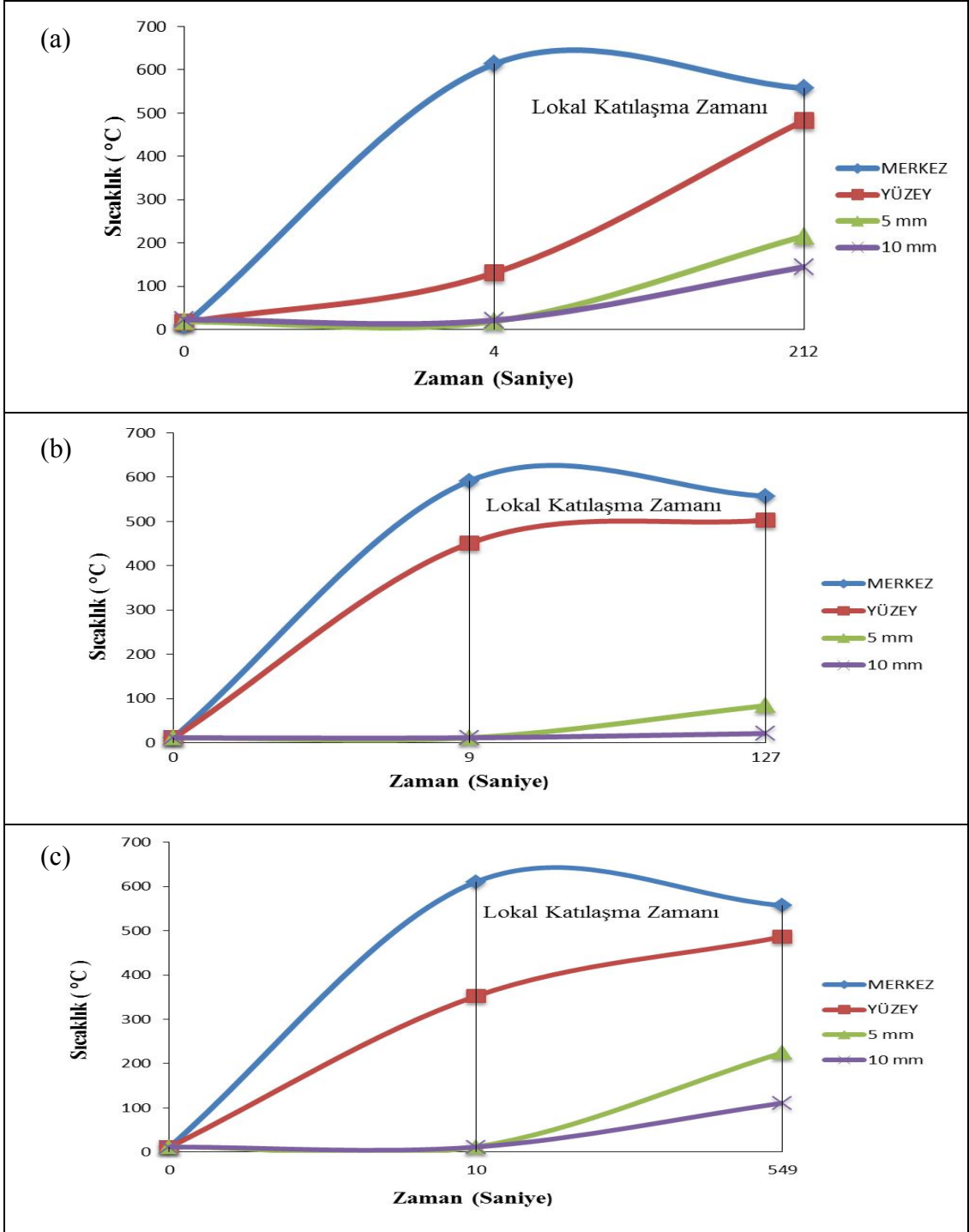


Şekil 5.4. 1. 972 saniye sonraki simülasyon görüntüsü.

Yapılan simülasyon sonucu toplam döküm süresi 1.994 sn olarak hesaplanmıştır. Ancak gerçek döküm süresi 3-3.5 sn aralığında gerçekleşmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışma sonucunda herhangi bir çekme (hacimsel daralma) meydana gelmemiştir.

5.3. FARKLI KALIPLARIN SOĞUMA HIZLARI

Şekil 5.5.’ de a da kum, b de kromit ve c de lod kalıba yerleştirilen 4 er adet ısı çiftten alınan sıcaklık değerleri grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5.5. Farklı kalıp malzemelerine yerleştirilen ısıl çift sıcaklık değerleri a) kum kalıp, b) kromit kalıp, c) seramik kalıp.

Grafiklerde görüldüğü gibi döküm sırasında ve sonrasında kalıba yerleştirilen tüm ısıl çiftlerden alınan verilere göre, sıcaklık kalıp merkezine yerleştirilen ısıl çiftde en yüksek değere ulaşmıştır. Isı akışı merkezden kalıba doğru ilerlerken bunu sırasıyla yüzeyde bulunan ısıl çift, kalıp duvarına 5 mm mesafe uzaklığa yerleştirilen ısıl çift

ve kalıp duvarına 10 mm mesafe uzaklığa yerleştirilen ısı çiftinde sıcaklık artışı takip etmektedir. Kalıp duvarlarına temas eden sıvı metal, sıcaklığını kaybederek katılaşmaya başladıktan ve ortamdaki ısı kalıptan uzaklaştıkça merkezde ve yüzeyde bulunan ısı çiftlerindeki sıcaklık değerleri düşmektedir.

Alüminyum Silisyum Magnezyum alaşımlarında likidüs sıcaklığı 612 °C solidüs sıcaklığı 557 °C dir [30]. Bu iki sıcaklık arasında geçen zaman lokal katılaşma zamanı olarak adlandırılır. Farklı kalıp malzemeleri ile hazırlanan kalıplara yerleştirilen ısı çiftlerinden alınan sıcaklık verilerine göre Çizelge 5.1’de likidüs ve solidüs sıcaklığına en yakın ölçülen sıcaklık, zaman, ve bu sıcaklıklar aralığındaki zaman farkı verilmektedir.

Çizelge 5.1. Likidüs ve solidüs sıcaklığına en yakın ölçülen sıcaklık-zaman değerleri.

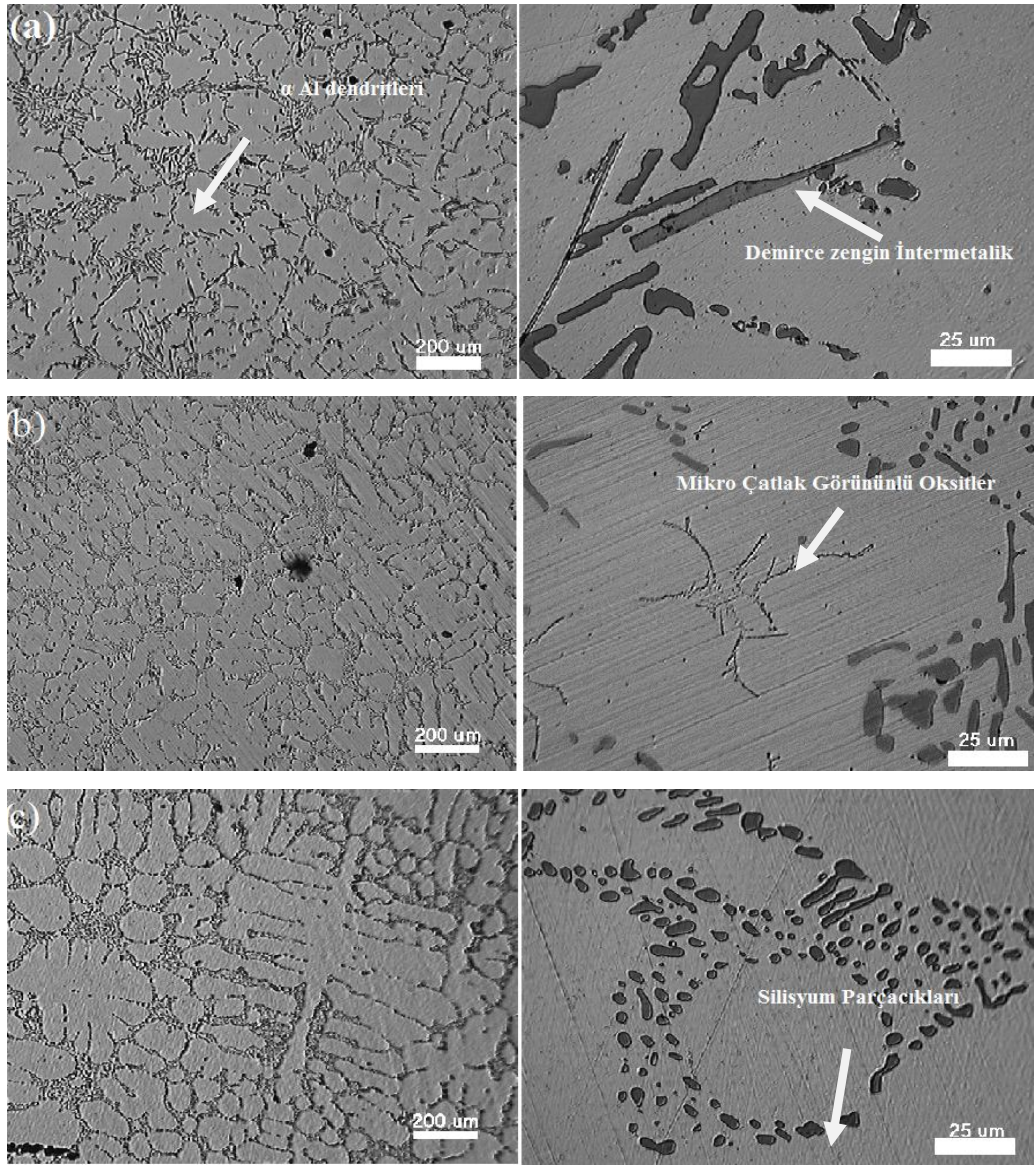
Kalıp malzemesi	Liküdüs Sıcaklığına en yakın ölçülen sıcaklık	Lik.Sıcaklığına en yakın ölçülen sıcaklık zamanı (sn)	Solidüse en yakın ölçülen sıcaklık	Solidüs sıcaklığına en yakın ölçülen sıcaklık zamanı (sn)	Süre farkı (sn)
Kum kalıp	613	4	557,69	212	208
Seramik kalıp	610	10	557,2	549	539
Kromit kalıp	591,8	9	557,1	127	118

Çizelge 5.1’den de anlaşılacağı gibi katılaşma arasında geçen zaman (lokal katılaşma süresi) aralığı en az ısı iletkenlik katsayısı en yüksek olan kromit bazlı kalıp kumu ile hazırlanan kalıpta olurken, en yüksek zaman aralığı ısı iletkenlik katsayısı en düşük olan seramik kalıpta görülmektedir.

5.4. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

5.4.1. Farklı Kalıp Malzemeleri Kullanılarak Üretilen Alaşımın Mikro Yapı İncelemeleri

Farklı kalıp malzemesi kullanılarak hazırlanan (kum kalıp, kromit kalıp, seramik kalıp) kalıplara yapılan dökümler sonucu hazırlanan alaşım 1'e ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.6. Farklı kalıplara dökülen alaşım 1' in optik mikroskop görüntüleri; a) kum kalıp, b) kromit kalıp, c) seramik kalıp.

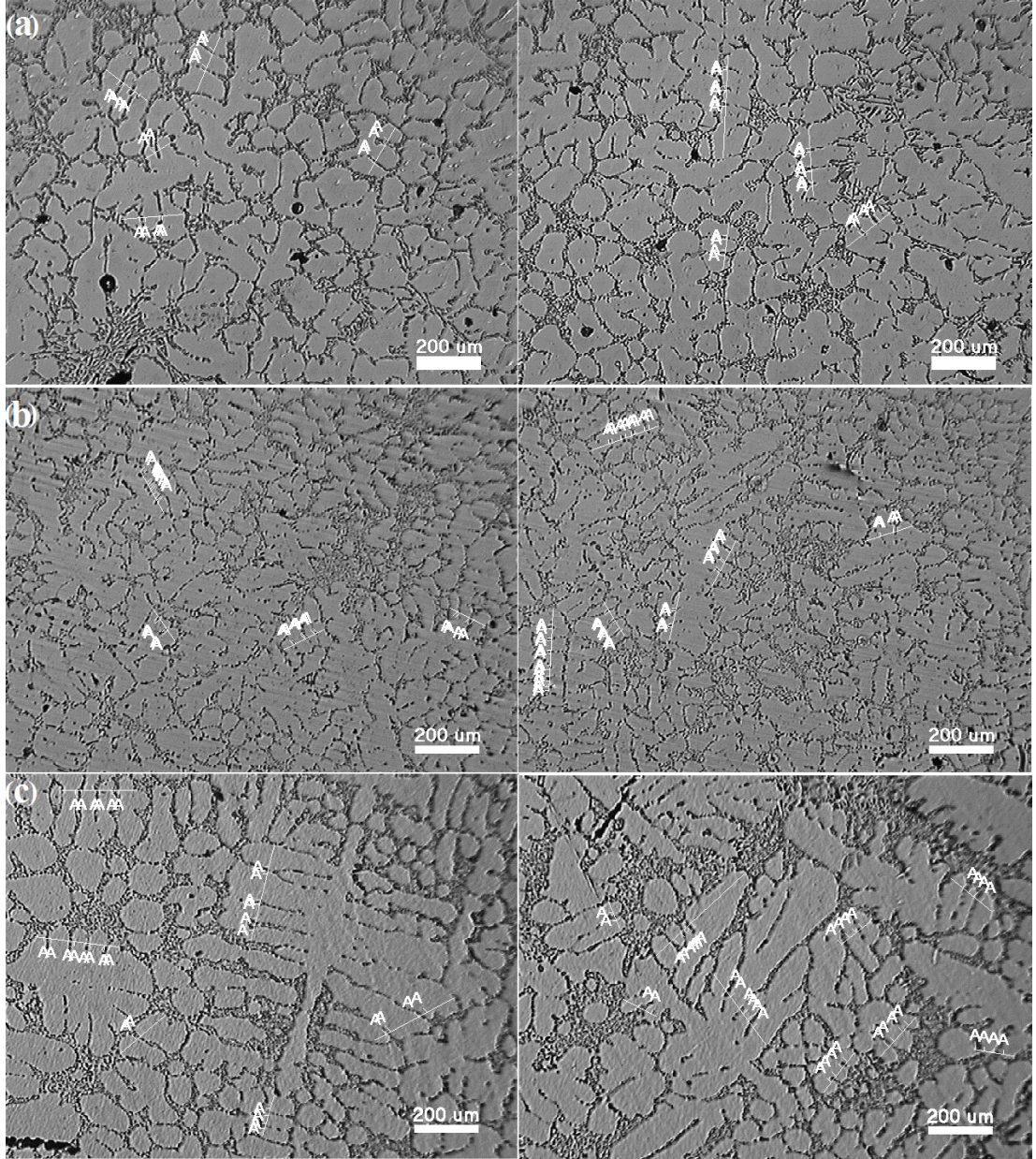
Her üç kalıba yapılan dökümler sonucu hazırlanan numunelerden alınan mikro yapı görüntülerinde α -Al dendritleri belirgin olarak görülmektedir. Alüminyum dendritleri arasında Si yapıları bulunmaktadır. Ayrıca intermetalik bileşiklerin olduğu görülmektedir. Şekil 5.6. b' de gösterildiği gibi kromit bazlı kuma yapılan dökümler sonucu malzeme içyapısında mikro çatlak görünümlü oksitlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Oluşan bu oksitler, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemesinin yanı sıra alaşımın işlenebilirliği ve korozyon direncinide azaltmaktadır. Çekme ve yorulma testlerinde erken kırılmalara neden olmaktadır [43,44].

Soğuma hızı farklı kalıplarda dökülen numunelerde soğuma hızı en yavaş olan seramik kalıba yapılan ve Şekil 5.6. c'de gösterilen mikro yapı görüntüsünde dendritik yapıların daha büyük ve belirgin olduğu görülmektedir. Nitekim Şekil 5.7'de verilen ölçümlerden ikincil dendrit kolları arası mesafelerin daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Soğuma hızı arttıkça oluşan ikincil dendrit kolları arası mesafeler daha kısadır [45].

5.4.2. İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafelerin Ölçümü

Al-Si- Mg döküm alaşımlarında mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerden birisi de malzemede meydana gelen dendrit yapı ve dendrit kolları arası mesafedir. Dendrit kolları arası mesafe ölçümü çok zor olduğundan ikincil dendrit kolları arası mesafe ölçümü yapılmaktadır. Dendritik yapı kalıbın soğuma hızı ve katılma şartlarıyla bağlantılıdır [46].

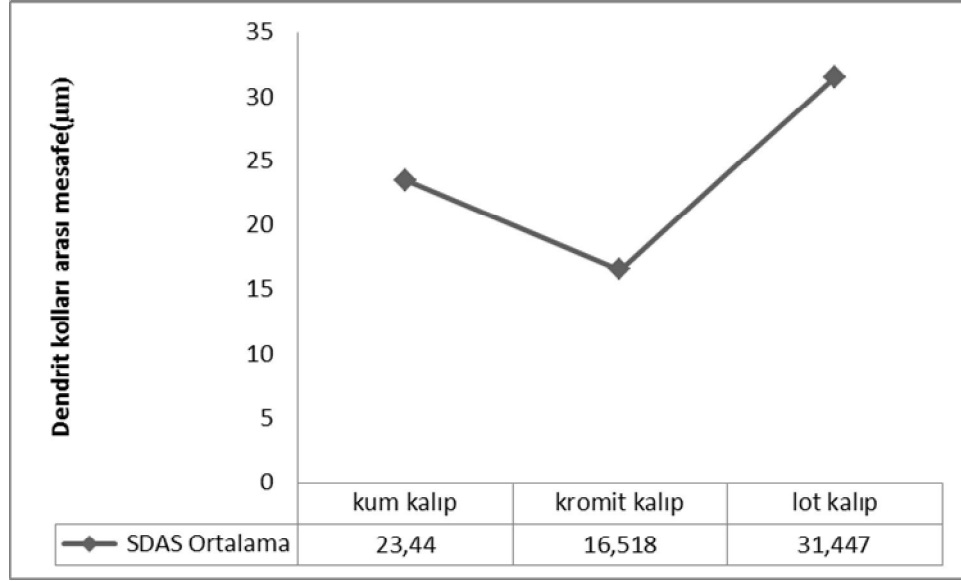
Şekil 5.7'de farklı kalıp malzemeleri (kum kalıp, kromit kalıp, seramik kalıp) kullanılarak dökülen alaşım 1'e ait mikro yapı görüntüleri verilmektedir. Optik mikroskopta 40 büyütmede alınan bu görüntüler üzerinde görüntü analiz sistemi yardımıyla ikincil dendrit kolları arası mesafe ölçümleri yapılmıştır. Dökülen her kalıp malzemesi için farklı mikro yapı görüntülerinden toplam 50'şer adet ölçüm yapıp ortalaması alınarak dendrit kolları arası mesafeler belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Farklı kalıp malzemelerine dökülen numunelerin mikro yapı resimleri a) kum kalıp b)kromit kalıp c) seramik kalıp.

Şekil 5.7.' a 'da kum kalıba dökülen numunelerin ikincil dendrit kolları arası mesafe (secondary dendrite arm spacing, (SDAS)) ölçümlerinin yapıldığı mikro yapı görüntülerinden bazıları verilmektedir. Üç farklı mikro yapı görüntüsünde yapılan SDAS ölçümleri sonucunda minimum 6,28 μm olarak ölçülürken maksimum 63,772 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.7. b'de kromit bazlı kalıplama kumundan hazırlanan kalıplara dökülen numunelerin SDAS ölçümlerinin yapıldığı mikro yapı görüntülerinden bazıları verilmektedir. Üç farklı mikro yapı görüntüsünde yapılan

SDAS ölçümleri sonucunda minimum 4,306 μm olarak ölçülürken, maksimum 43,072 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.8.c'de görüntüsü verilen seramik kalıba dökülen numunelerden yapılan ölçümlerde SDAS ise minimum 12,62 μm iken maksimum 98,909 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.8'de her üç kalıp malzemesi için yapılan SDAS ölçümlerinin ortalama değerleri grafik olarak verilmektedir.

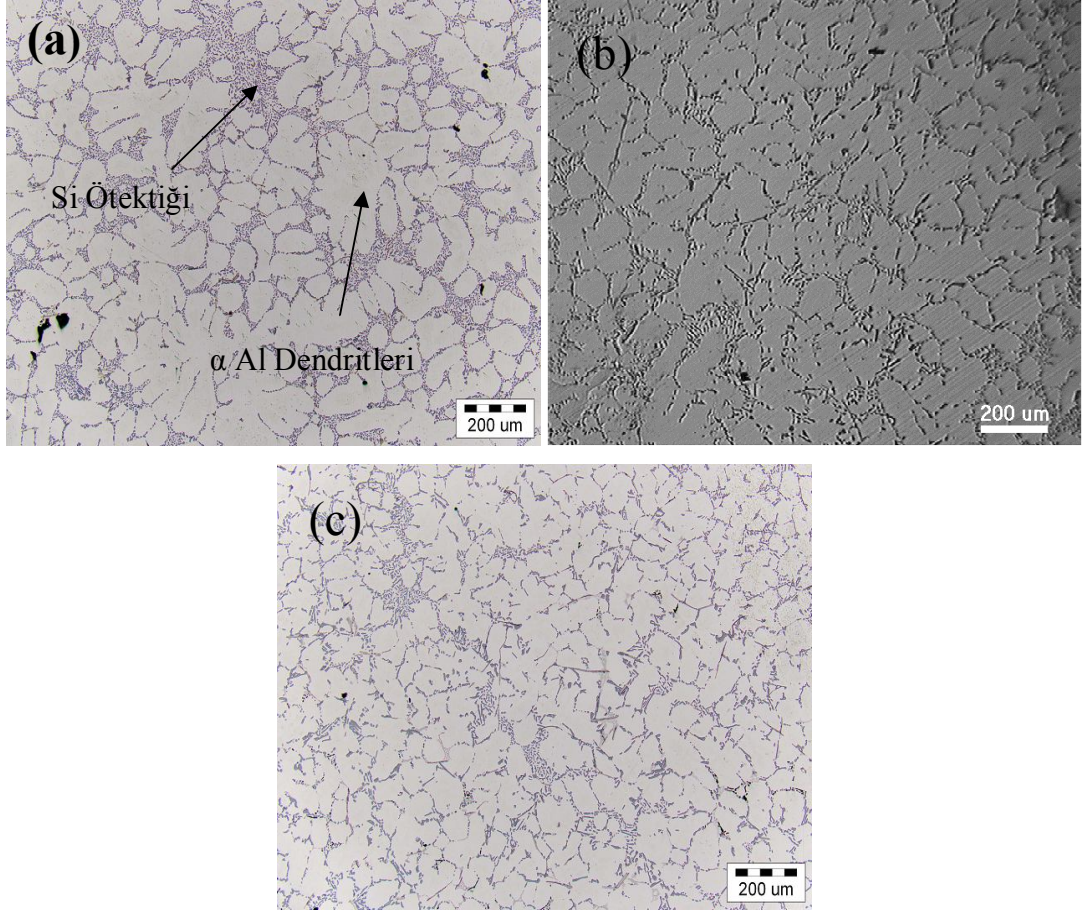


Şekil 5.8.İkincil Dendrit kolları arası mesafe ölçümleri.

Şekil 5.8'den de anlaşıldığı gibi farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen aynı alaşıma ait ikincil dendrit kolları arası mesafeler değişmektedir. Kum kalıba yapılan döküm sonucu oluşan ortalama SDAS 23,44 μm iken kromit kalıpta 16,518 μm seramik (lot) kalıpta 31,447 μm olarak hesaplanmıştır. İkincil dendrit kolları arası bu mesafe değişimi döküm yapılan kalıpların soğuma hızlarının farklılığından kaynaklanmaktadır [32].

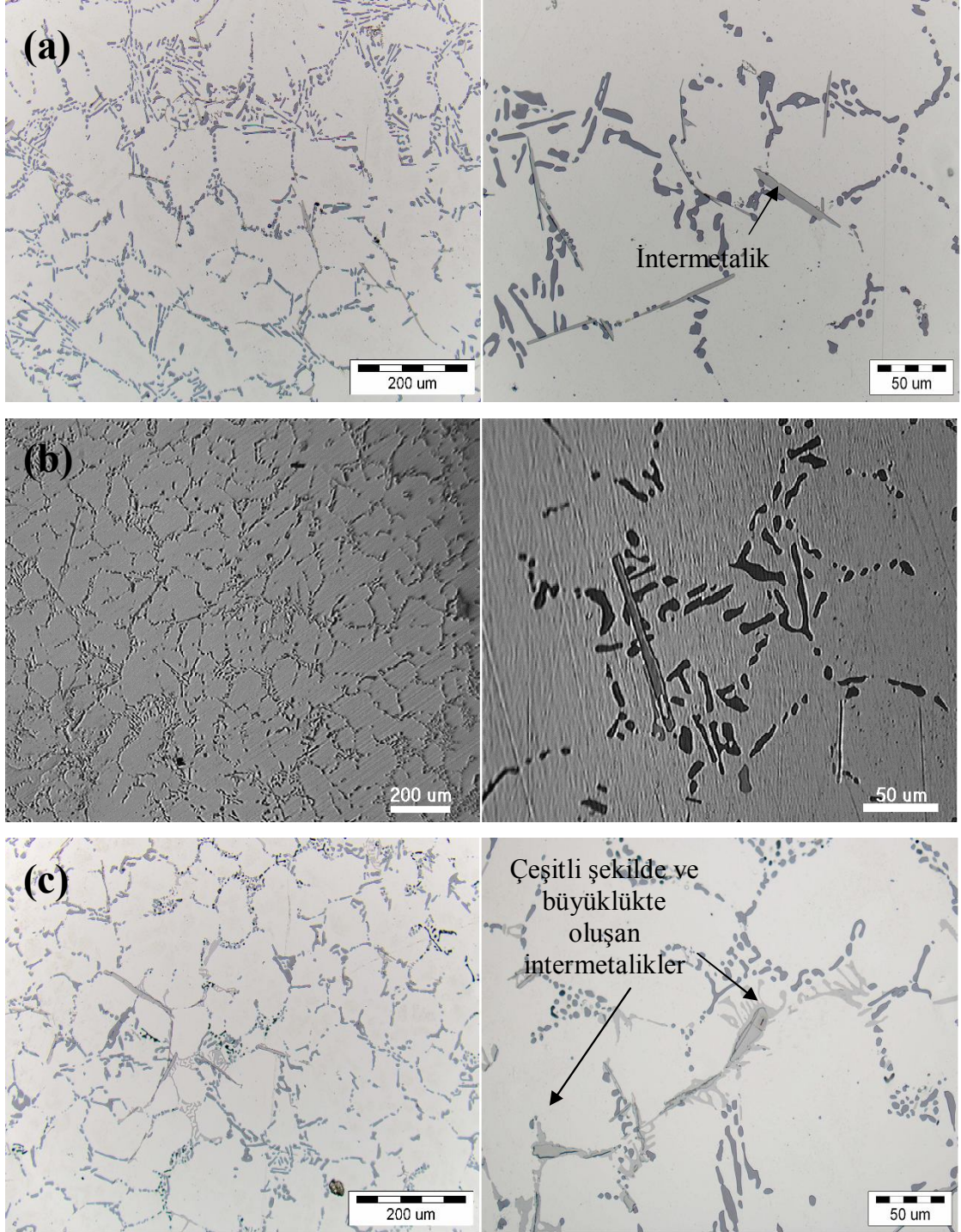
5.4.3. Mg Oranları Farklı Olarak Üretilen Alaşımların Mikro Yapı İncelemeleri

Mg oranları farklı (% 0.43, % 0.67, %0.86) olarak üretilen üç farklı alaşım için hazırlanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Mg oranları farklı üretilen alaşımların mikro yapı görüntüleri; a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3.

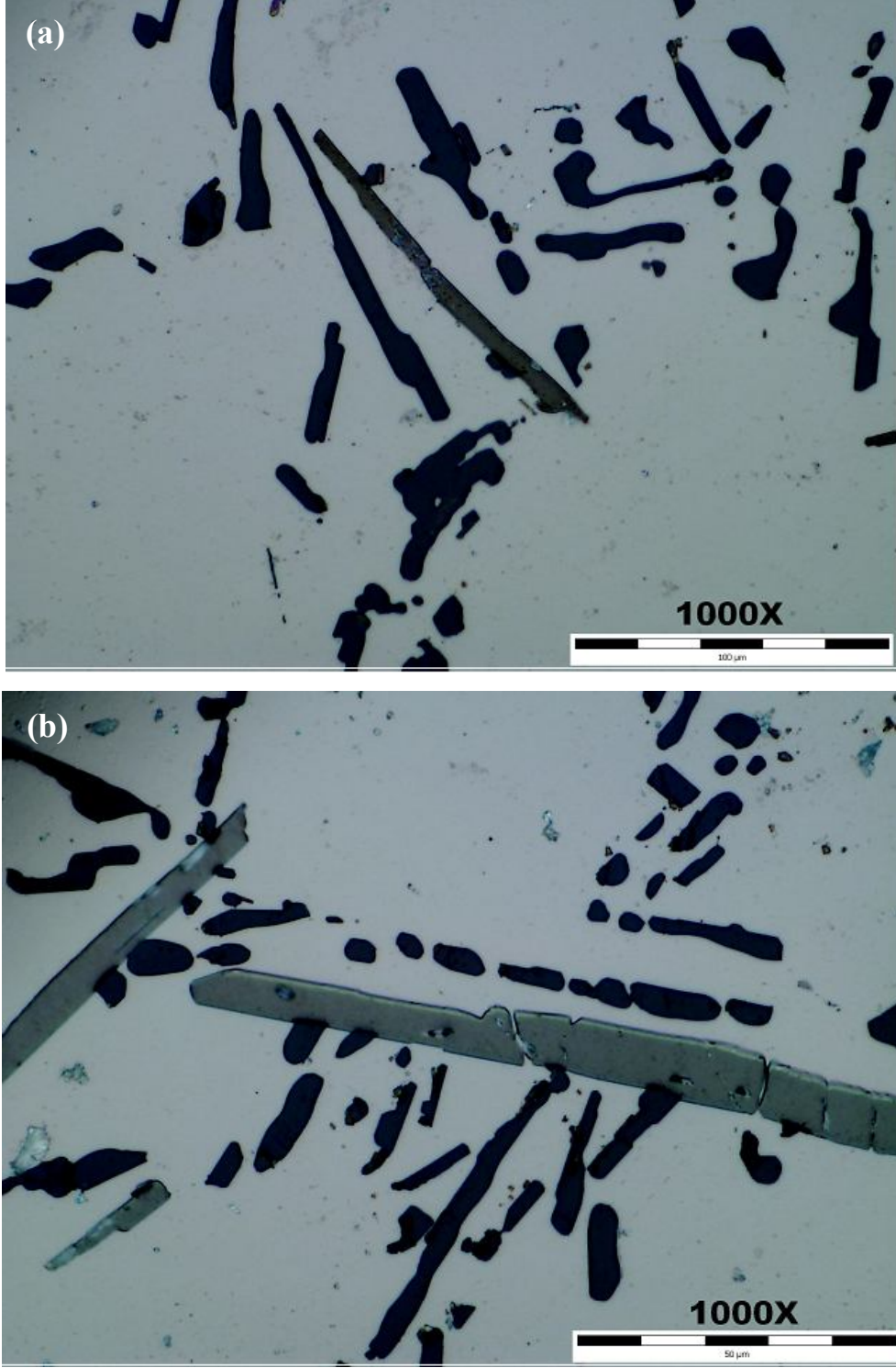
Yapılan mikro yapı incelemelerinde α -Al dendritleri belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca alüminyum dendritleri arasında silisyum yapıları bulunmaktadır. Üretilen üç alaşıma ait daha yüksek büyütmede alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.10'da verilmektedir.



Şekil 5.10. Üretilen alaşımların mikro yapı görüntüleri; a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3.

Optik mikroskop incelemelerinde daha büyük büyütmede alınan görüntülerde alaşıma ilave edilen Mg miktarı arttıkça mikro yapı üzerinde oluşan intermetaliklerin şeklinin ve hacminin değiştiği görülmektedir. Şekil 5.11’de Alaşım 1 ve Alaşım 3’de

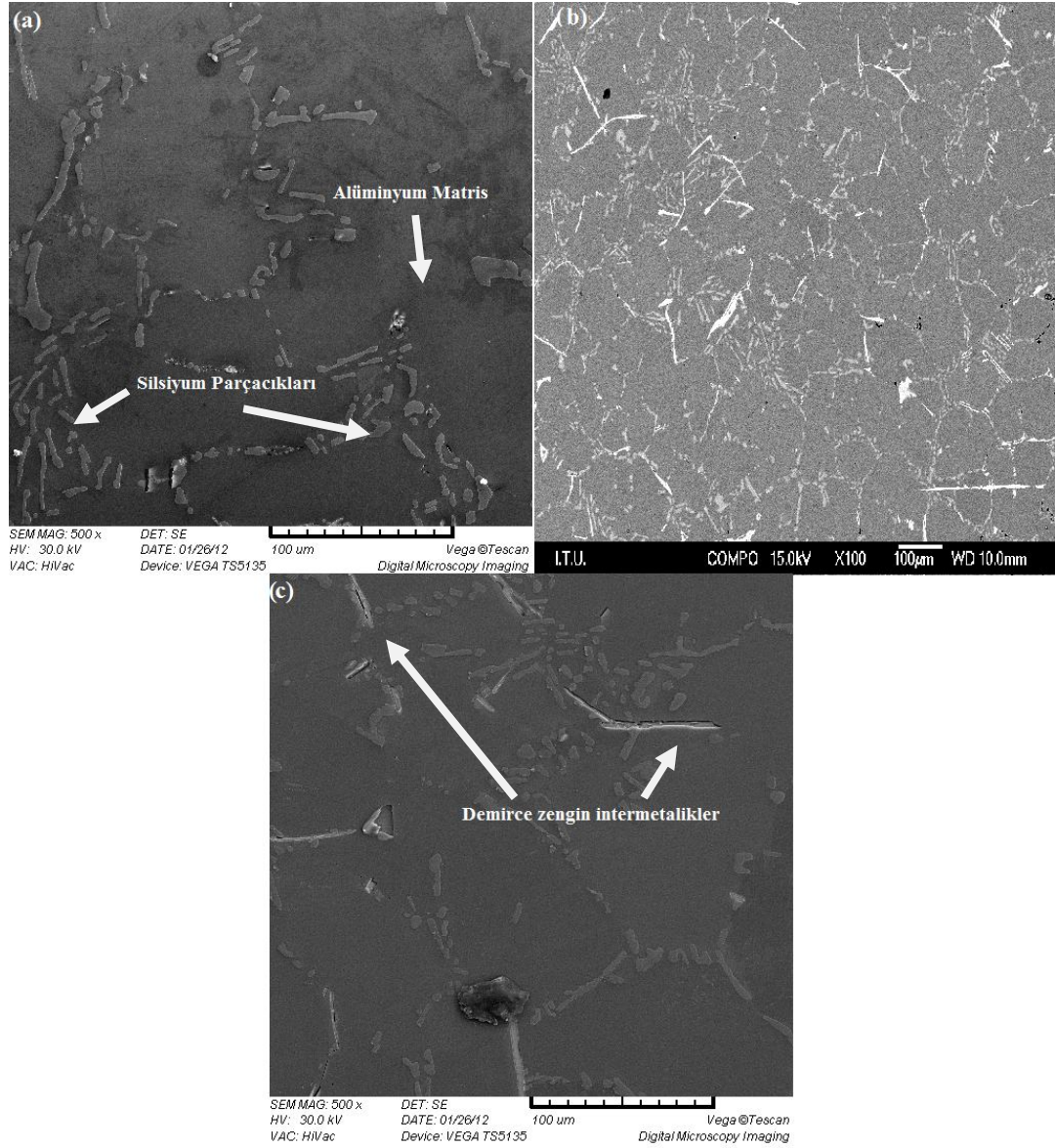
tespit edilen intermetalik bileşiklerin yüksek büyütmede alınan optik mikroskop görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.11. İntermetalik bileşiklerin optik mikroskop görüntüsü; a) Alaşım 1, b) Alaşım 3.

5.4.4. SEM ve EDS İncelemeleri

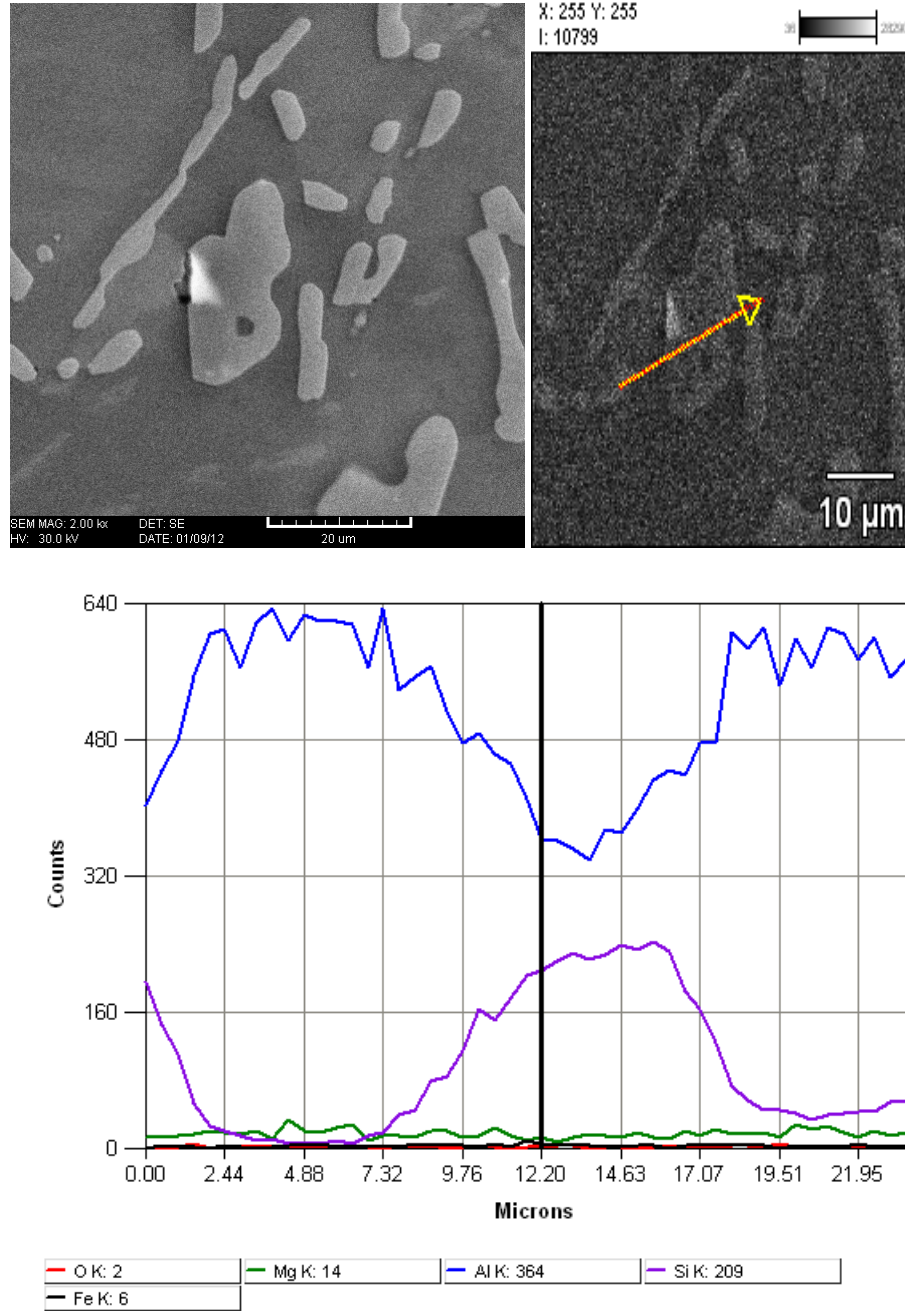
Magnezyum oranları farklı olarak üretilen, Şekil 5.12. a'da alaşım 1, b'de alaşım 2'e ve c'de alaşım 3'e ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.12. Farklı Mg oranına sahip alaşımların SEM görüntüleri; a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3.

Görüntülerden de anlaşıldığı gibi üretilen alaşımlarda alüminyum matris üzerinde silisyum parçacıkları görülmektedir. Ayrıca matris üzerinde demirce zengin

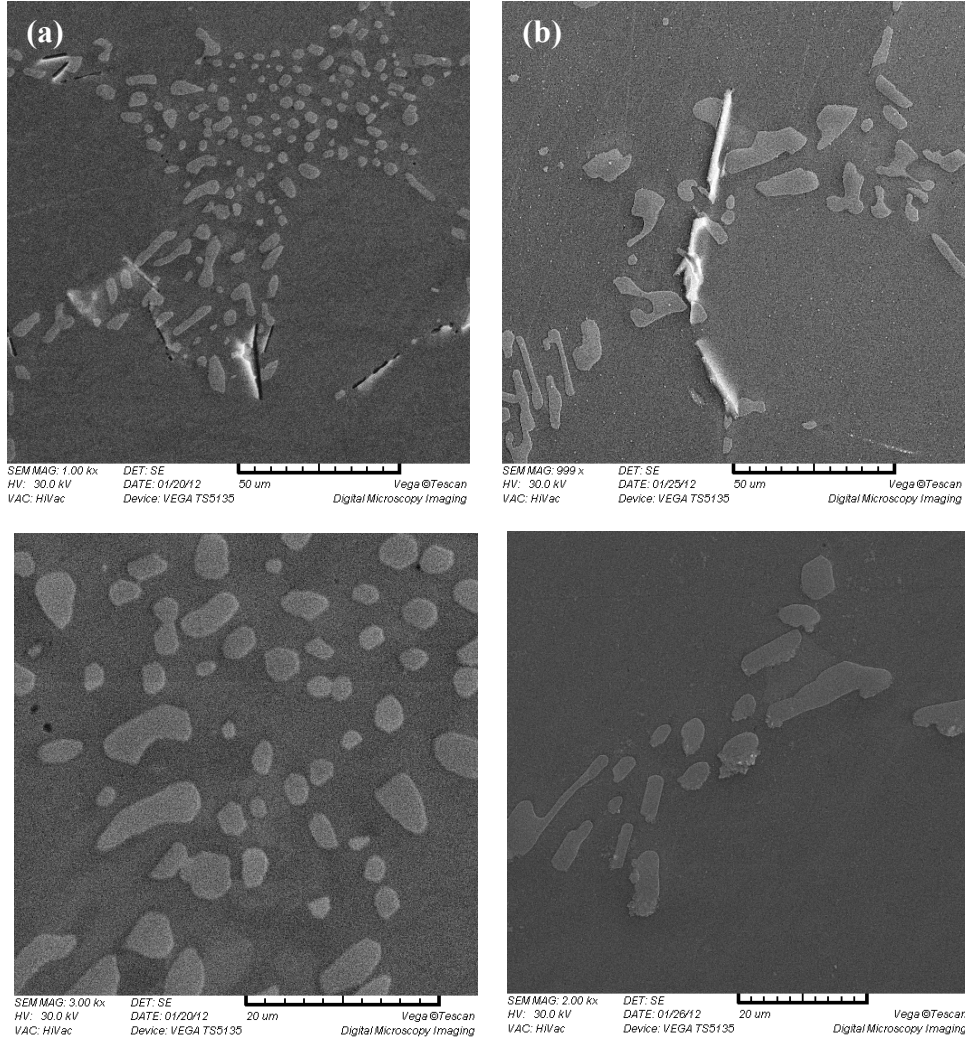
intermetalik bileşikler olduğu görülmektedir. Şekil 5.13.'de Al-Si ötektiği içerisinde bulunan Si parçacıklarının SEM ve çizgisel tarama görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.13. Silisyum parçacıklarının SEM ve çizgisel tarama (EDS) görüntüsü.

Şekil 5.13'de anlaşılacağı gibi ok yönünde EDS analizi alındığında matriste alüminyum pikinin en yüksek olduğu, silisyum parçacığı üzerine yaklaşıldığında silisyum pikinin yükseldiği, silisyum parçacığının tam ortasında bu elemente ait pikin maksimuma ulaştığı görülmektedir. Ayrıca EDS analizinde matris üzerinde

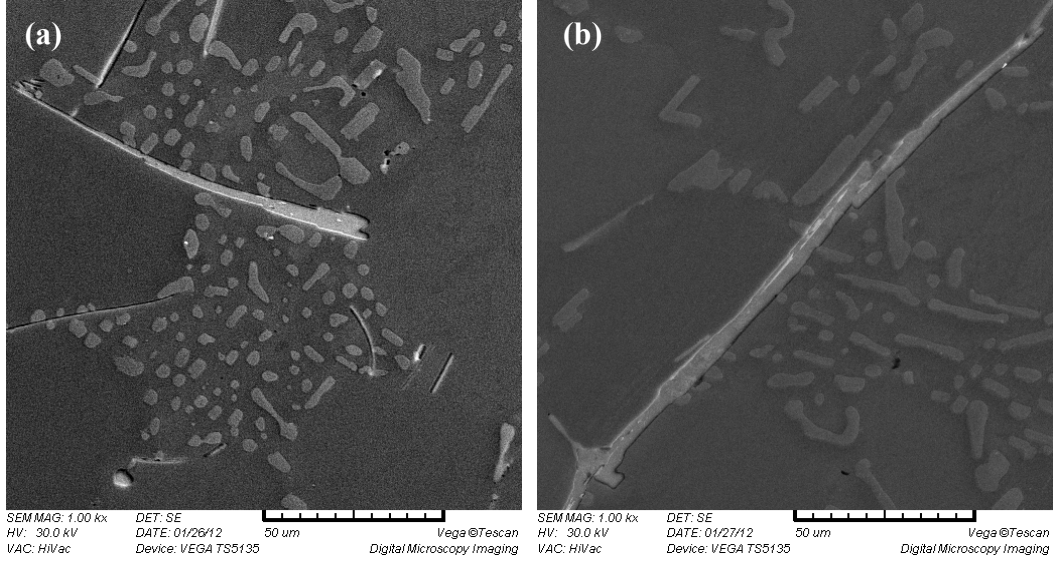
magnezyum, demir ve oksijen olduğu belirlenmiştir. Çeşitli boy ve şekillerde mevcut olan silisyumun tane uçlarının modifikasyon işlemi yapılmamasına rağmen keskin köşelere sahip olmadığı görülmektedir. Şekil 5.14 a'da üretilen alaşım 1 ve Şekil 5.14 b'de alaşım 3 de bulunan silisyum tanelerinin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.14. Si taneleri SEM görüntüleri; a) Alaşım 1, b) Alaşım 3.

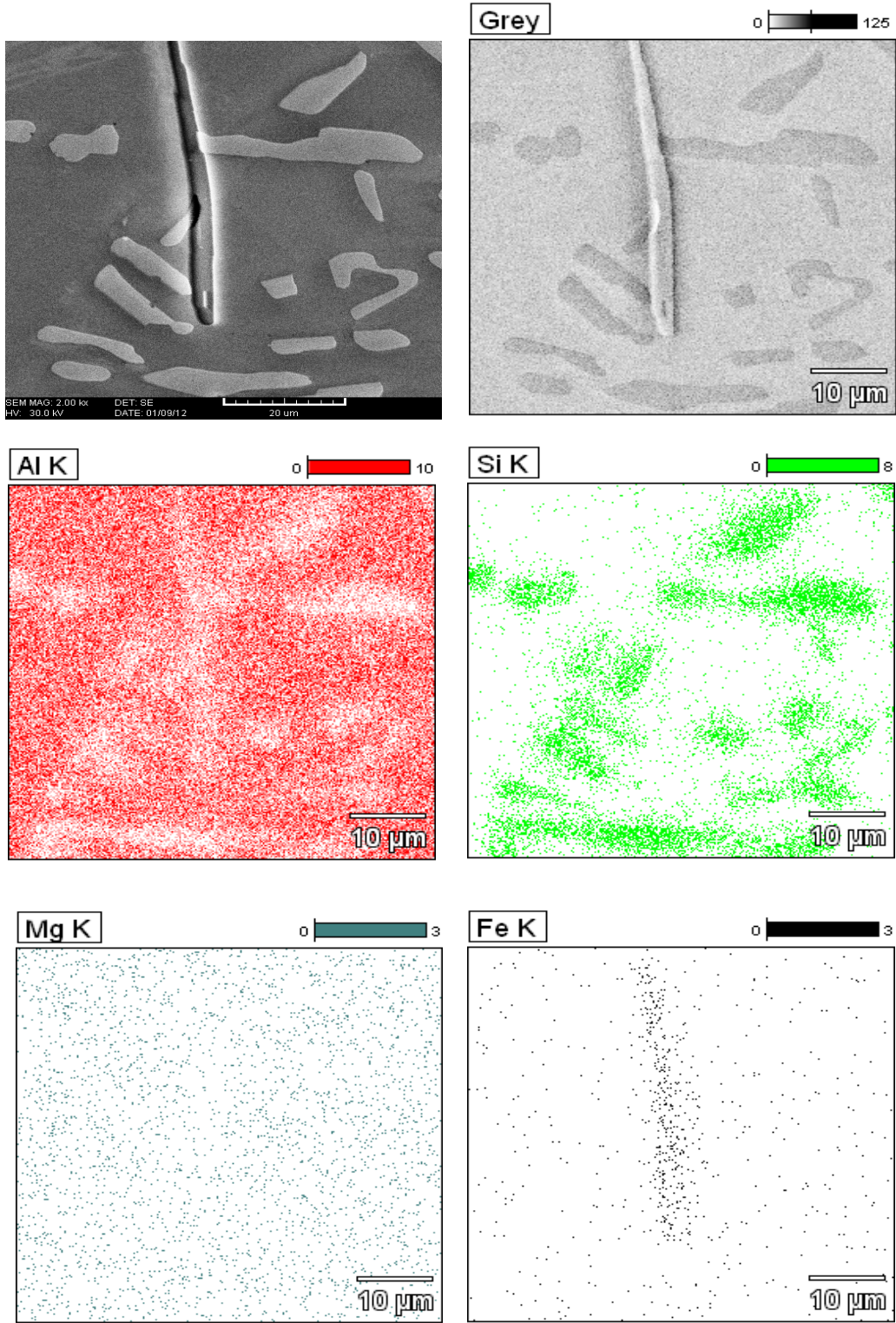
Üretilen alaşımlarda optik mikroskopta da görülen çeşitli intermetalik bileşiklerin daha net anlaşılabilmesi için Şekil 5.15 a'da Alaşım 1'e ait, b'de Alaşım 3'e ait SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerden de anlaşıldığı gibi üretilen alaşımlarda alüminyum matris üzerinde intermetalik bileşikler bulunmaktadır. Oluşan bu

intermetalikler üretilen alaşımdaki Mg oranına bağlı olarak şekil ve hacim olarak değişmektedir [8,9].



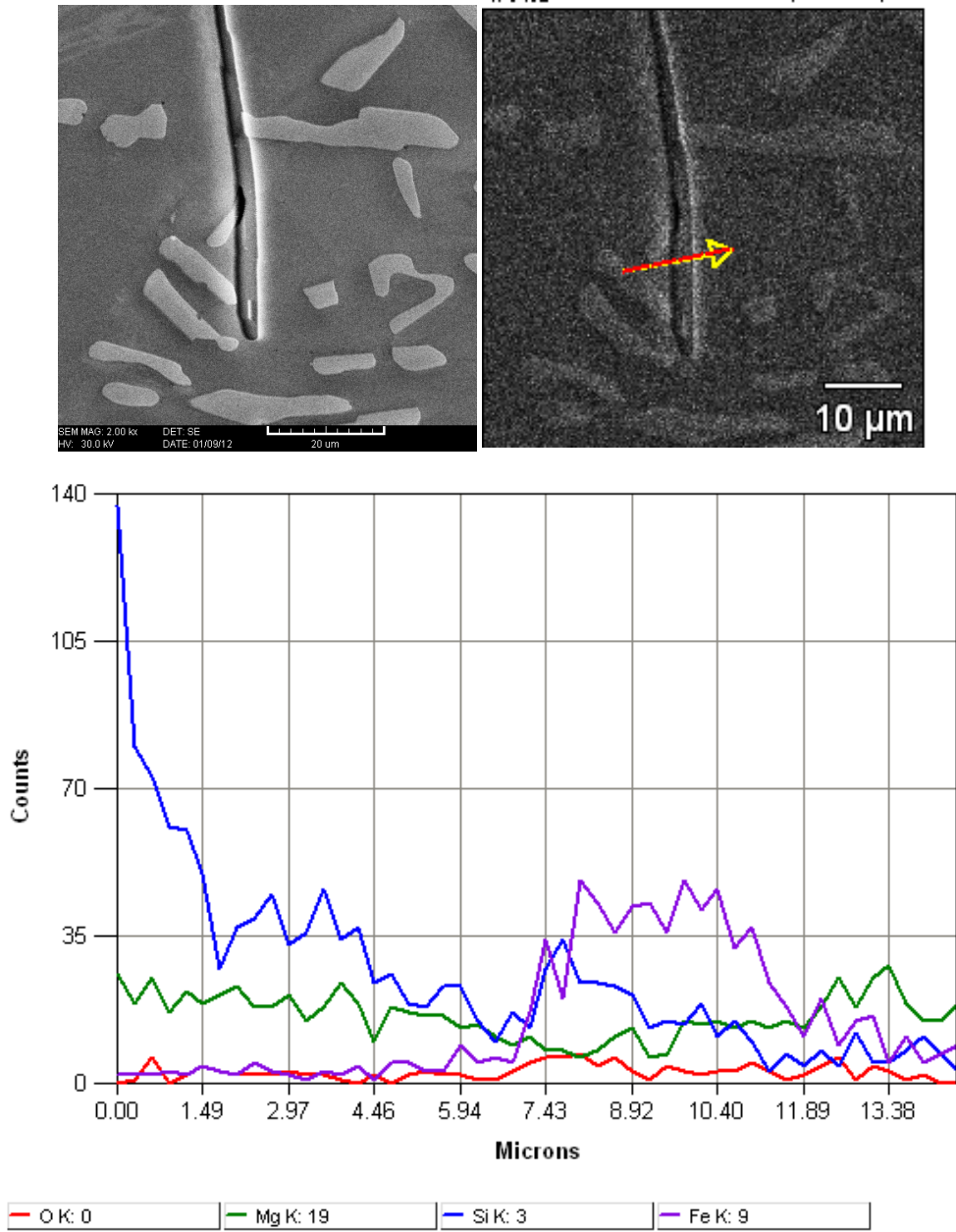
Şekil 5.15. Mg oranları farklı alaşımlarda oluşan intermetalik SEM görüntüleri; a)Alaşım 1, b) Alaşım 3.

Şekil 5.15 b' de gösterilen ve Mg oranı % 0,86 olarak üretilen Alaşım 3' de oluşan intermetaliklerin daha büyük olduğu görülmektedir. Oluşan bu intermetalikler malzemenin akma ve çekme dayanımını olumsuz yönde etkilemekte, alaşımdaki magnezyum oranı arttıkça süneklik azalmaktadır. Ayrıca süneklikteki bu azalma alaşımdaki dendrit boyutunun ve alaşımdaki Si parçacıklarının şekli ve boyutuyla ilişkili olabilmektedir [8]. Şekil 5.16'da Mg oranı % 0.43 olan alaşım 1 e ait SEM ve EDS haritalama (mapping) analizi verilmektedir.



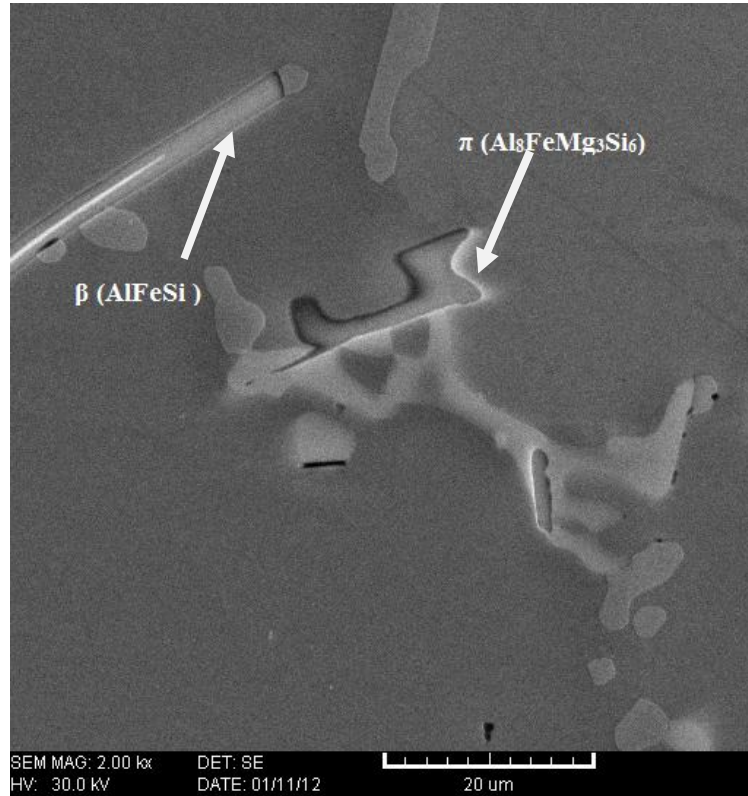
Şekil 5.16. Alaşım 1'e ait SEM ve EDS mapping analiz görüntüsü.

Şekil 5.16'da verilen SEM görüntüleri ve EDS Mapping analizlerinde kırmızı renk alüminyumu, yeşil renk silisyumu, mavi renk magnezyum ve siyah renk demiri temsil etmektedir. Al matris element olduğu, Si parçacıklarının rastgele dizildikleri, Mg'un matriste genel olarak homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Demirin ise bazı bölgelerde yoğunlaştığı ve bu bölgelerde demirce zengin intermetalik bileşikler oluşturduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.17'de bu alaşıma ait EDS çizgisel tarama (Line Scan) tarama görüntüsü verilmektedir.

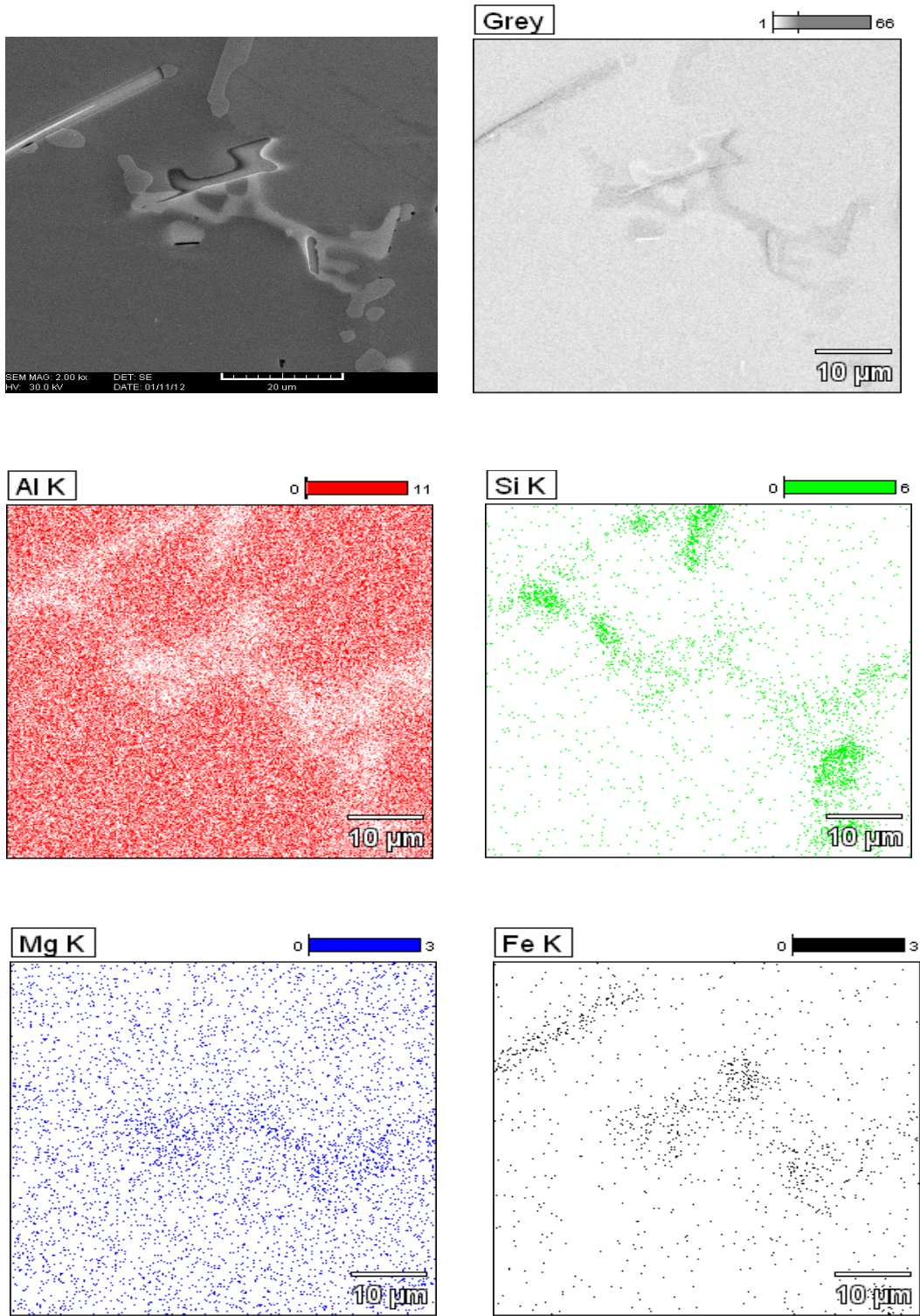


Şekil 5.17. Alaşım 1'e ait çizgisel tarama görüntüsü.

Şekil 5.17’de yapılan çizgisel taramada Al dışındaki elementlerin piklerini daha net görebilmek amacıyla alüminyum tarama dışında tutulmuştur. Ok yönünde taramaya başlandığında Si pikinin maksimum olduğu, tarama ok yönünde ilerledikçe Si pikinin düştüğü, intermetalik üzerine geldiğinde demire ait pikin yükseldiği intermetalik bileşiğin üzerinde maksimum seviyeye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca alaşım içerisinde Mg’un ve bir miktar oksijenin olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.18.’de Mg oranı %0,86 olarak üretilen alaşım 3’e ait SEM görüntüsü verilmektedir. Alaşıma ilave edilen Mg miktarı arttıkça mikro yapı üzerinde oluşan intermetaliklerin şeklinin değiştiği görülmektedir. Bu intermetalikler β (AlFeSi) ve π ($\text{Al}_9\text{FeMg}_3\text{Si}_5$ veya $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$) olarak adlandırılmaktadır [8,9,37,38]. Alaşıma magnezyum ilavesi sonucunda oluşan β fazının büyüdüğü bunun yanında π fazında oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.20.’de verilen XRD sonuçları da oluşan bu fazların β (AlFeSi) ve π ($\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$) olduğunu göstermektedir. Şekil 5.19’ da bu görüntüye ait EDS Mapping analizi verilmektedir.



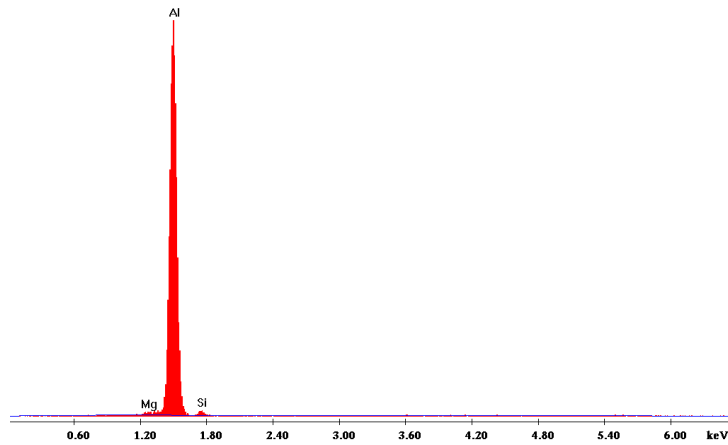
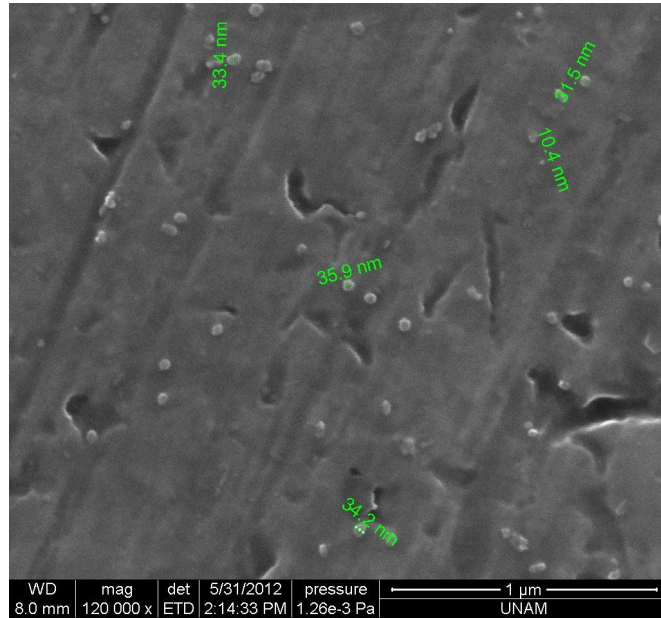
Şekil 5.18. Alaşım 3’ e ait SEM görüntüsü.



Şekil 5.19. Alaşım 3'e ait SEM ve EDS mapping analiz görüntüsü.

Şekil 5.19'da verilen SEM görüntüleri ve EDS Mapping analizlerinde kırmızı renk Al, yeşil renk Si, mavi renk Mg ve siyah renk Fe temsil etmektedir. Al matris element olduğu, Si parçacıklarının rastgele dizildikleri, Mg matriste genel olarak homojen bir dağılım sergilemekle beraber demirce zengin intermetalik bileşiğin bulunduğu bölgede biraz daha yoğun olduğu görülmektedir. Demirin ise bazı bölgelerde yoğunlaştığı ve bu bölgelerde demirce zengin intermetalik bileşikler oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 5.20.'de Alaşım 3'e ait T6 ısıl işlemi sonucu alüminyum dendritleri arasında oluşan çökelti ve çökelti boyutları nano SEM ve EDS analizi verilmektedir.

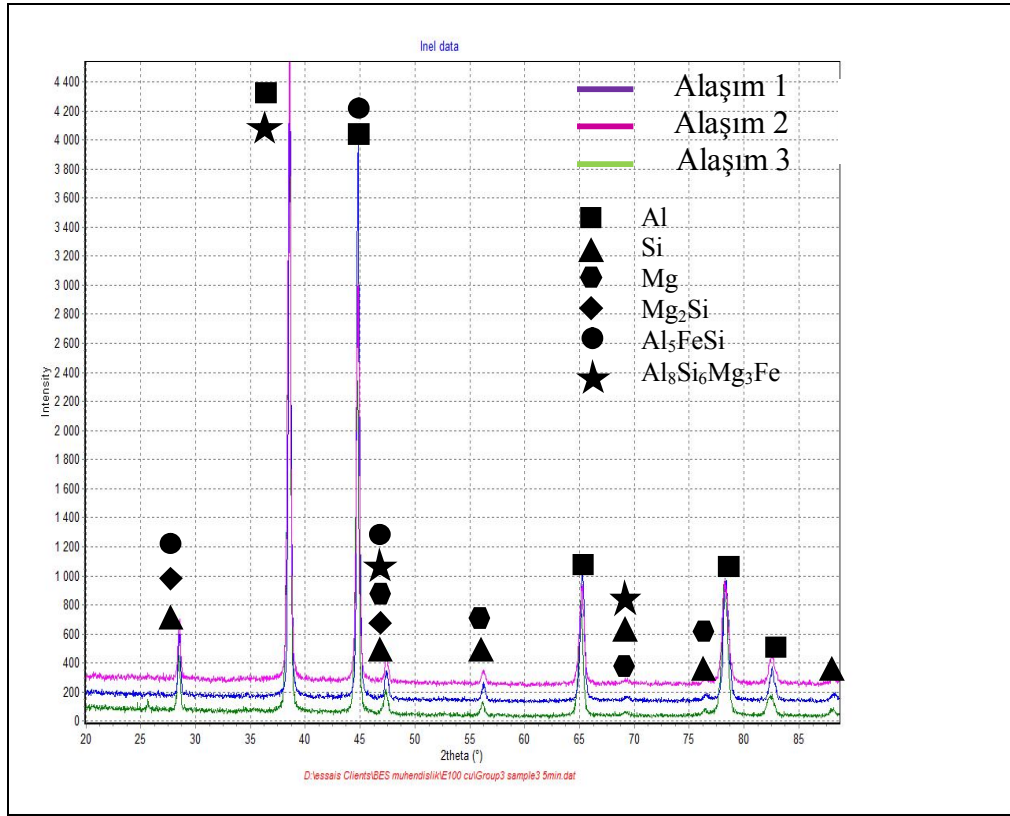


Şekil 5.20. Alaşım 3' e ait nano SEM ve EDS görüntüsü.

Çökelti üzerinde yapılan EDS analizinde Al pikinin yanında Si ve Mg piki bulunmaktadır. Analiz sonucu T6 ısıl işlemi sonucu oluşan bu çökeltilerin Mg_2Si fazı olduğu anlaşılmaktadır. Oluşan bu Mg_2Si çökeltilerin mikro yapıda homojen bir şekilde dağılım sergilediği görülmektedir. Nano SEM görüntüsünde yapılan ölçümler sonucu bu çökeleklerin 10-35 nanometre arasında değişen farklı büyüklüklerde olduğu görülmektedir.

5.5. XRD SONUÇLARI

Şekil 5.21’de Mg oranları farklı olarak üretilen Alaşım 1, alaşım 2 ve alaşım 3’ e ait numunelerden elde edilen X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları verilmektedir.



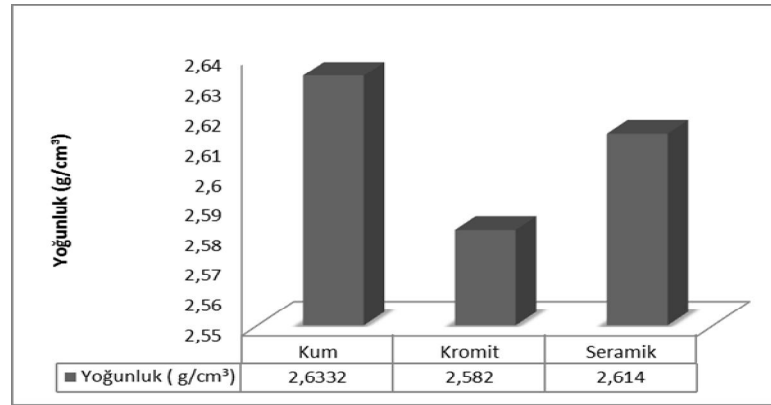
Şekil 5.21. Üretilen alaşımlara ait XRD görüntüsü.

XRD incelemeleri sonucunda her üç numunede de matris element alüminyum olduğundan dolayı aynı 2θ açılarında Al piki en yüksek değeri vermiştir. Daha sonra malzemede kütlece en fazla olan silisyum piki görülmektedir. Üretilen her üç

alaşımında da magnezyum oranı çok düşük olduğundan (maksimum %0.86) keskin bir pik görülememektedir. Ancak yapılan 2θ açı element ve intermetalik bileşiklerin görülme oranları incelendiğinde yüksek miktarda bulunan elementler ile (Al, Si) düşük miktarda bulunan element ve intermetalik bileşiklerin aynı 2θ açılarında çakıştığı görülmektedir. Yapılan incelemelerde kütlece düşük oranda bulunan (Mg, Mg₂Si, Al₅FeSi, Al₈Si₆Mg₃Fe) element ve intermetalikler belirlenmiştir.

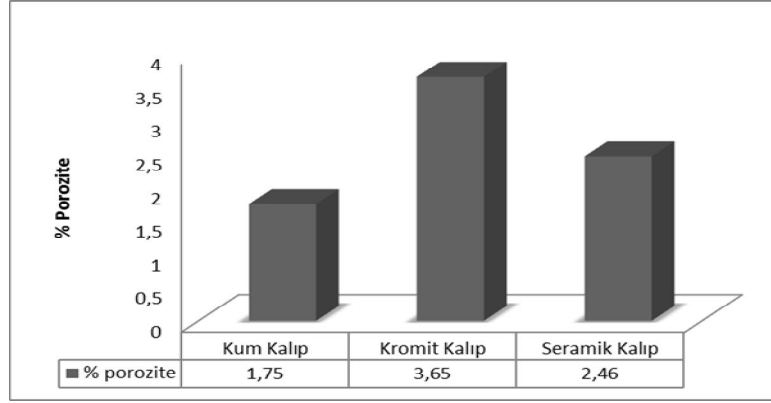
5.6. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Soğuma oranları farklı olan kum kalıp, seramik kalıp ve kromit kalıplama kumu kullanılarak hazırlanan kalıplara yapılan dökümler sonucu elde edilen numunelerden alınan yoğunluk ölçümleri Şekil 5.22’de histogram olarak verilmektedir.



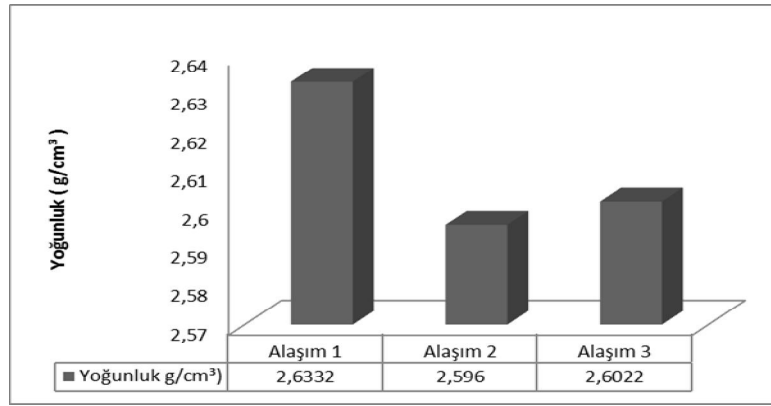
Şekil 5.22. Farklı kalıp malzemelerine dökülen alaşımın yoğunluk değerleri.

Yapılan ölçümler sonucu farklı kalıp malzemelerine dökülen numunelerde en düşük yoğunluk kromit kalıba dökülen numunelerde görülmüştür. Farklı kalıplara dökülen numunelerde hidrojen çözünmesi veya oluşan çekme boşlukları gözeneklere (porozitelere) neden olmaktadır. Şekil 5.23’de farklı kalıp malzemelerine dökülen numunelerden hesaplanan % gözenek oranları histogram olarak verilmektedir.



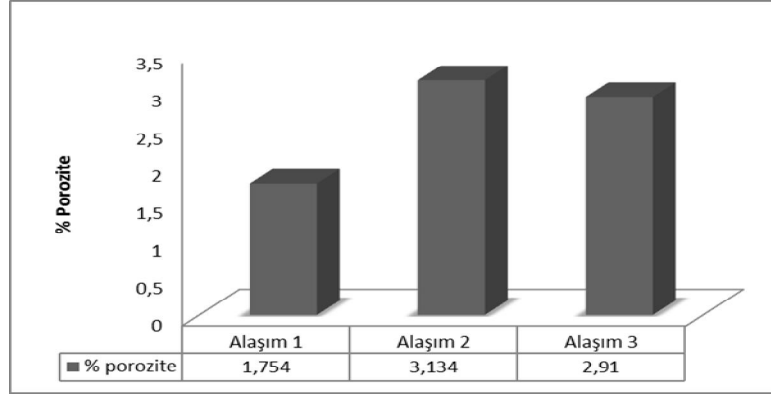
Şekil 5.23. Farklı kalıplara dökülen numunelerin % porozite değerleri.

Şekil 5.24'de Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlara ait yoğunluk ölçümleri verilmektedir.



Şekil 5.24. Mg oranları farklı üretilen alaşımların yoğunluk değerleri.

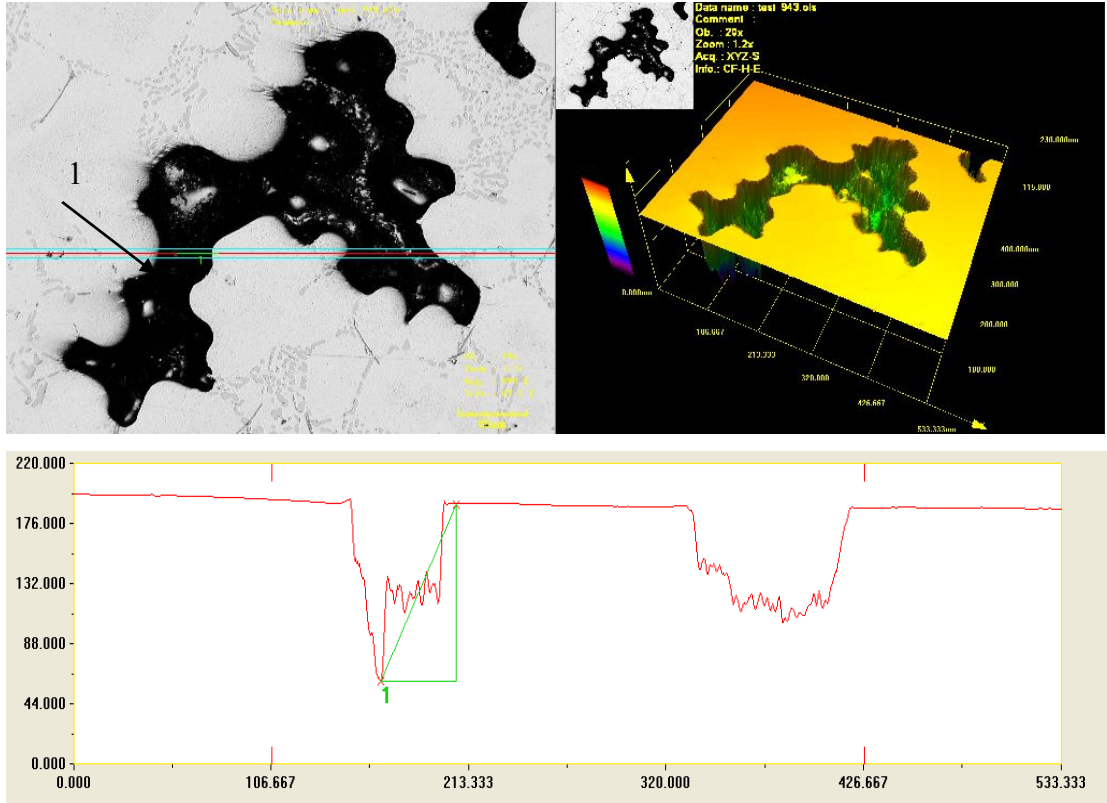
Yapılan ölçümler sonucu Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlarda Mg ilavesi ile alaşımın yoğunluğu düşmektedir. Bunun yanı sıra üretilen alaşımlar içerisinde oluşan gözeneklerin % oranı hesaplanarak histogram olarak Şekil 5.25'de verilmektedir. Gözenek oluşumu, hidrojen miktarı, katılaşma aralığı, besleme ve sıvı katı yüzey enerjileri arasında karmaşık bir ilişkiye bağlıdır [8].



Şekil 5.25. Mg oranları farklı üretilen alaşımların % gözenek değerleri.

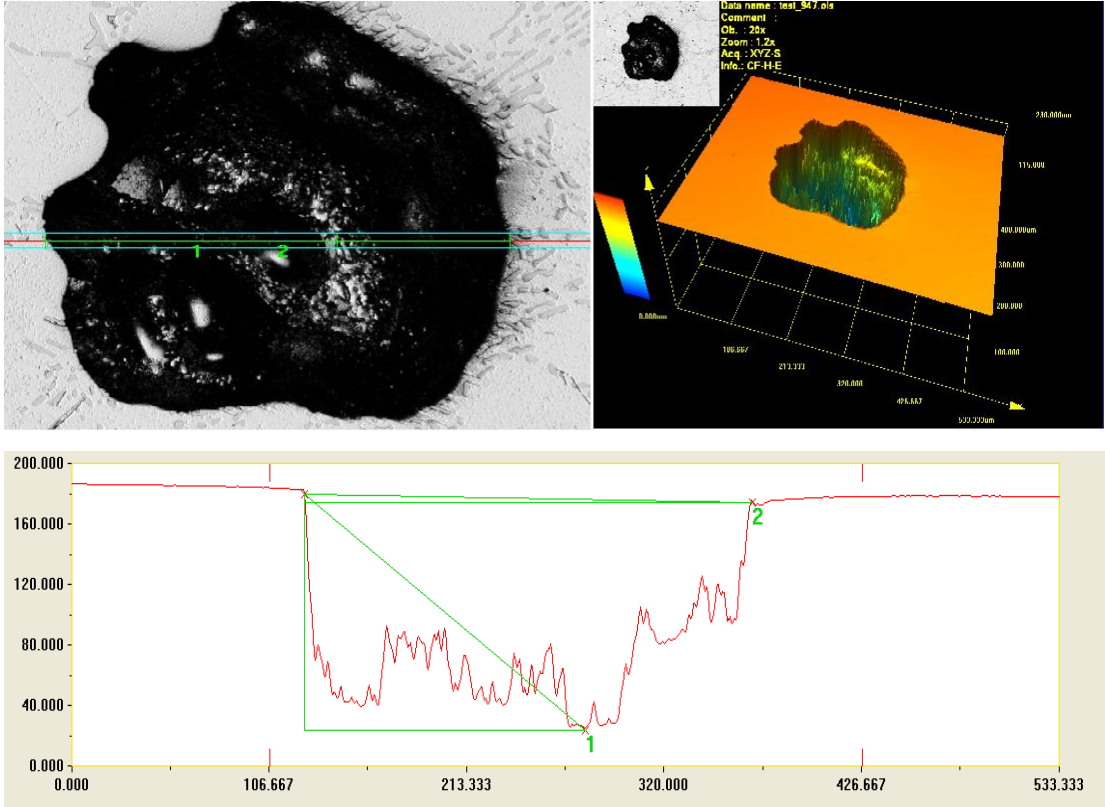
5.7. LAZER KONFOKAL MİKROSKOP İNCELEMELERİ

Üretilen alaşımlardan alaşım 1'den hazırlanan numunelerin lazer konfokal mikroskop görüntüleri Şekil 5.26'da verilmektedir.



Şekil 5.26. Alaşım 1'e ait lazer konfokal mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.26'da görüldüğü gibi yapıda farklı gözenekler görülmektedir. Oluşan bu gözeneklerin lazer konfokal mikroskop incelemesi sonucu 1 numaralı bölgede yapılan ölçümde en derin yerinin 129,584 μm , genişliğinin 40,737 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.27'de Alaşım 3'e ait lazer konfokal mikroskop görüntüsü verilmektedir.



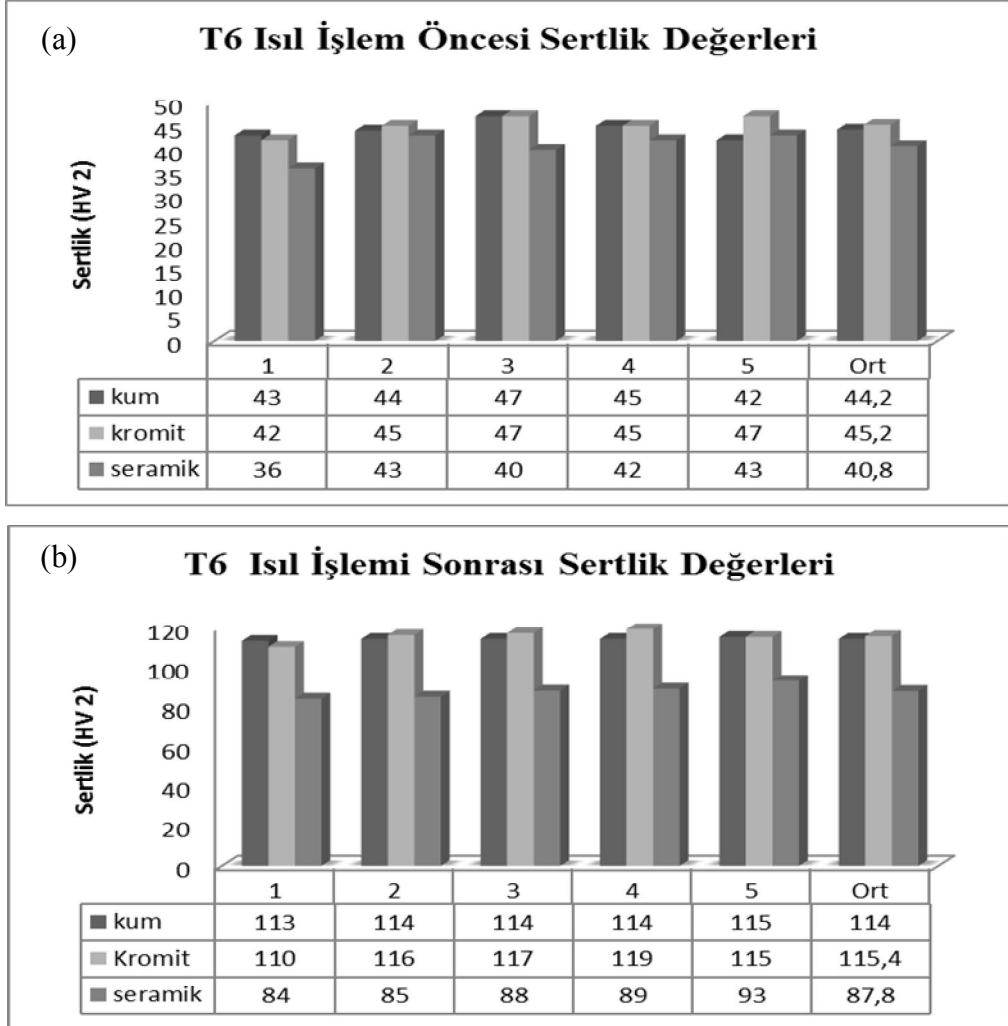
Şekil5.27. Alaşım 3'e ait lazer konfokal mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.27'de görüldüğü gibi yapıda gözenek görülmektedir. Oluşan bu gözeneklerin lazer konfokal mikroskop incelemesi sonucu 1 numaralı bölgede yapılan ölçümde en derin yerinin 155,356 μm genişliğinin 242,33 μm olarak ölçülmüştür. Her iki alaşımda da var olan bu gözenekler üretilen alaşımların mekanik dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

5.8. SERTLİK TESTİ

Soğuma oranları farklı olan kum kalıp, seramik kalıp ve kromit kalıplama kumu kullanılarak hazırlanan kalıplara yapılan dökümler sonucu elde edilen numunelerden

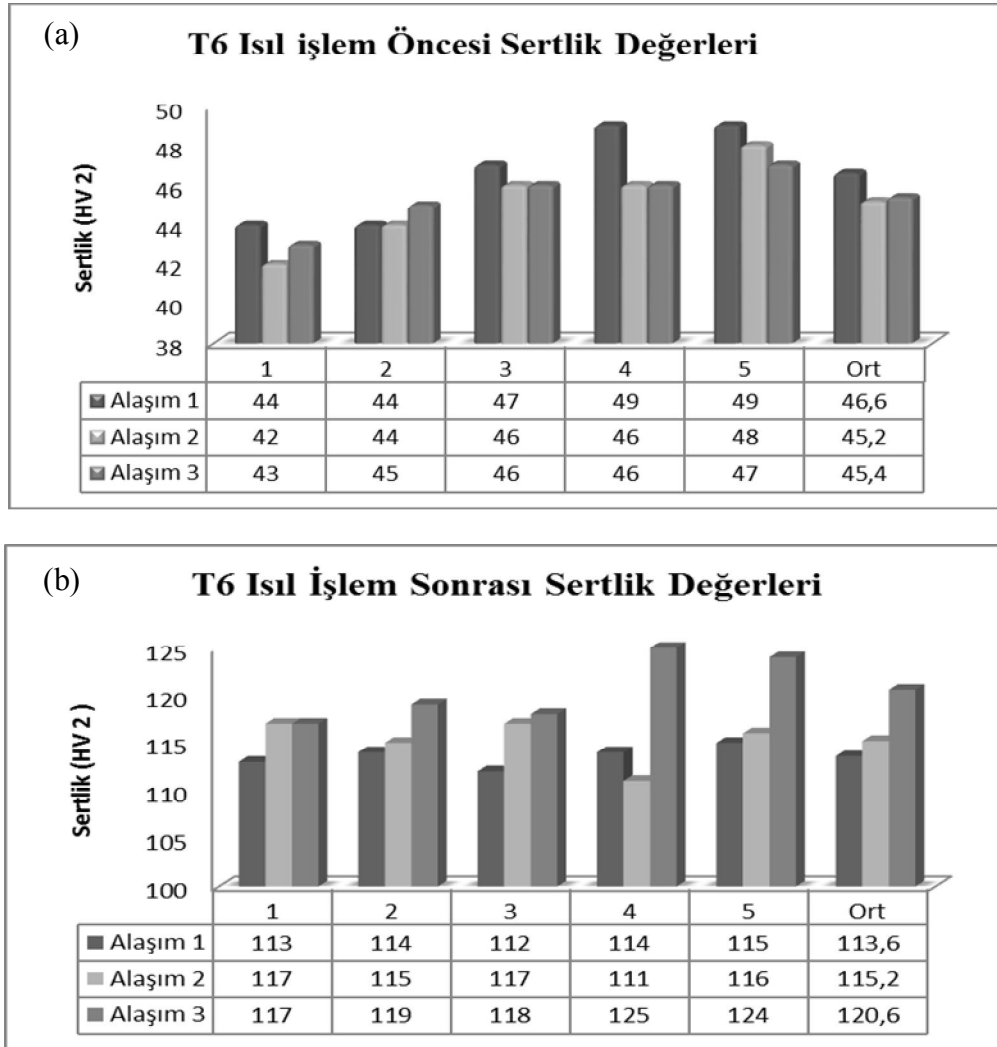
T6 ısıtım işlem öncesi ve T6 ısıtım işlem sonrası alınan sertlik sonuçları Şekil 5.28.'de histogram olarak verilmiştir.



Şekil 5.28. Soğuma hızları farklı kalıplara dökülen numunelerin sertlik değerleri; a) T6 öncesi, b) T6 sonrası.

Yapılan sertlik ölçümlerinde T6 ısıtım işlemi uygulanmayan kum kalıba yapılan döküm sonucu elde edilen alaşımın ortalama sertlik değeri 44,2 HV, kromit kalıba dökülen alaşımın ortalama sertlik değeri 45,2 HV, seramik kalıba dökülen alaşımda ise 40,8 HV olarak ölçülmüştür. T6 ısıtım işlemi uygulanan numunelerde ise sırasıyla ortalama sertlik değerleri kum kalıpta 114 HV, kromit bazlı kumda 115,4 HV, seramik kalıpta ise 87,8 HV olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu T6 ısıtım işleminin malzemelerin sertlik değerlerini yaklaşık 2,5 kat kadar arttırdığı görülmüştür. Bu artışın nedeni yaşlandırma ısıtım işlemi sonucu çökelen Mg₂Si fazından kaynaklanmaktadır

[47,48]. Soğuma hızları farklı olan kalıplara yapılan dökümler sonucu sertlik değerinin soğuma hızı en hızlı olan kromit kalıba dökülen numunelerde elde edilirken en düşük sertlik değeri soğuma hızı en yavaş olan seramik kalıba dökülen numunelerde elde edilmiştir. Yapılan dökümler sonucunda Mg oranları farklı olarak üretilen Alaşım 1, Alaşım 2 ve Alaşım 3'ün T6 ısıtma işlem öncesi ve T6 ısıtma işlem sonrası elde edilen sertlik sonuçları sırasıyla Şekil 5.29'de histogram olarak verilmiştir



Şekil 5.29. Mg oranları farklı alaşımların sertlik değerleri; a) T6 ısıtma işlem öncesi, b) T6 ısıtma işlem sonrası sertlik değerleri.

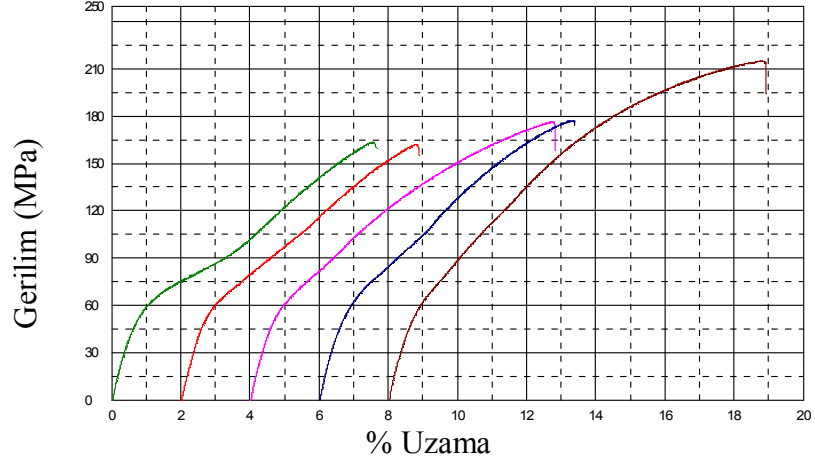
Yapılan sertlik ölçümlerinde T6 ısıtma işlemi uygulanmayan alaşım 1'in ortalama sertlik değeri 46,6 HV alaşım 2'nin ortalama sertlik değerinin 45,2 HV ve alaşım

3'ün ortalama sertlik değerinin 45,4 HV dir. Ölçümler sonucu sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görölmüştür.

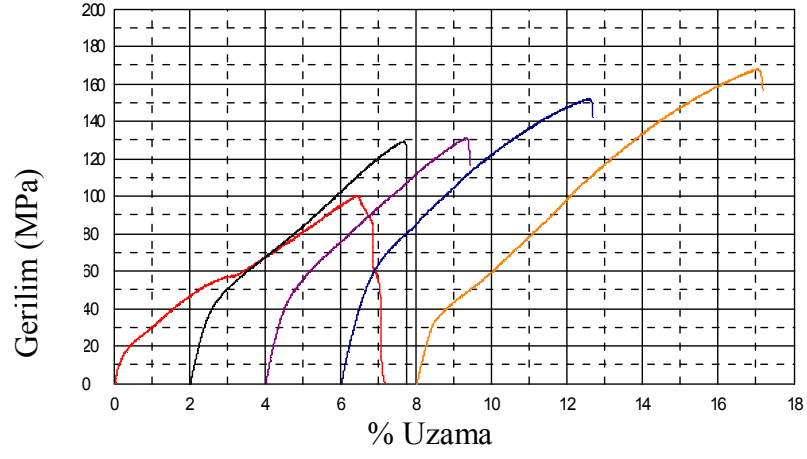
T6 ısıt işlemleri uygulanan alaşım 1, alaşım 2 ve alaşım 3'de ortalama sertlik değerleri sırasıyla 113,6 HV, 115,2 HV ve 120,6 HV olarak ölçölmüştür. Yapılan ölçümler sonucu üretilen alaşımın sertlik değerlerinde T6 öncesi yapılan ölçümlere göre yaklaşık 2.5 kat kadar bir artış olduğu görölmektedir. Bu artışın nedeni yaşlandırma ısıt işlemleri sonucu çökelen Mg₂Si fazından kaynaklanmaktadır [47,48]. Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımın magnezyum oranı arttıkça alaşımın sertliğinde bir artış meydana geldiği görölmektedir.

5.9. ÇEKME DENEYİ

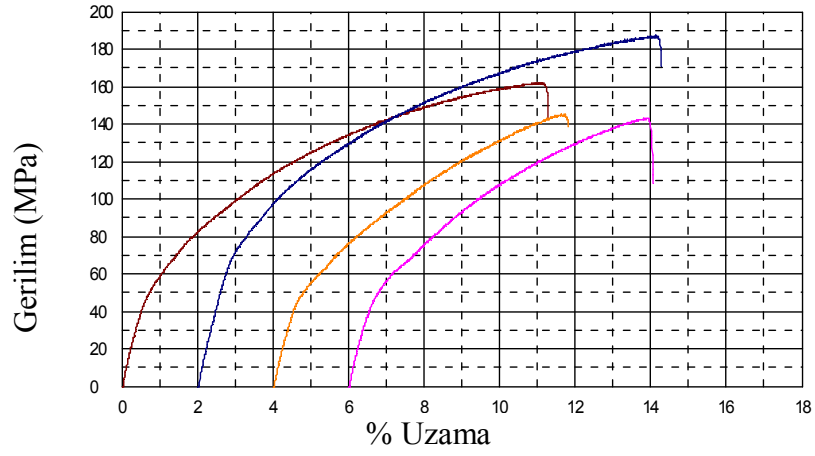
Farklı kalıp malzemeleri kullanılarak (kum kalıba, kromit kalıba, seramik kalıba) kimyasal bileşimi aynı olarak dökölen alaşım için çekme gerilim uzama diyagramları Şekil 5.30.'da verilmektedir.



(a)



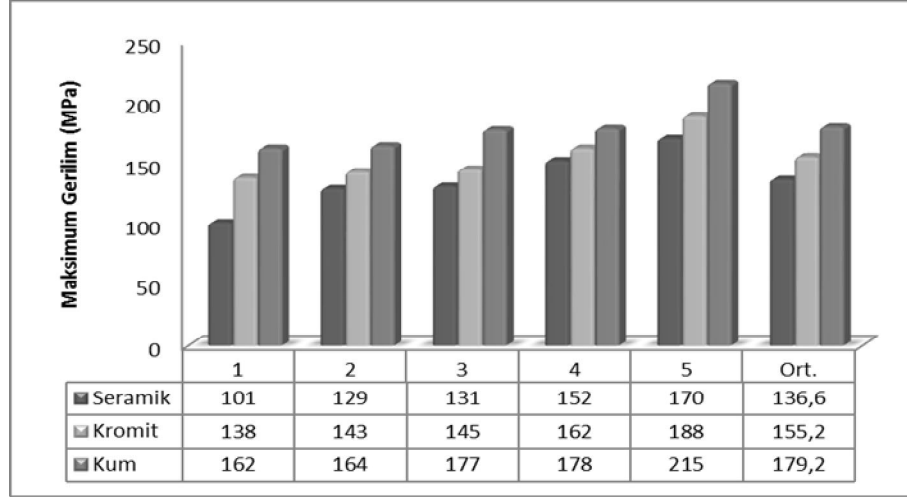
(b)



(c)

Şekil 5.30. Farklı kalıplara dökülen numunelerin gerilim- uzama diyagramı; a) kum kalıp, b) kromit kalıp, c) seramik kalıp.

Şekil 5.31’de üç farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen numunelerden elde edilen çekme dayanımları histogram olarak verilmektedir.



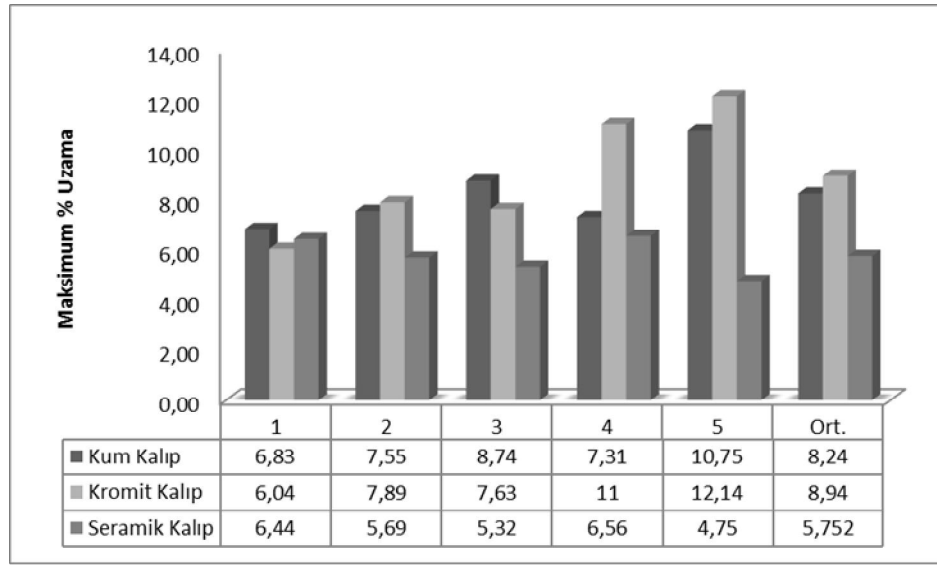
Şekil 5.31. Üç farklı kalıba dökülen numunelerin çekme dayanımları.

Yapılan çekme testleri sonucu seramik kalıba dökülen numunelerde en yüksek çekme dayanımı 170 MPa, en düşük 101 MPa bulunurken ortalama çekme dayanımı 136,6 MPa olarak hesaplanmıştır. Kromit kalıplama kumuna dökülen numunelerde en düşük çekme dayanımı 138 MPa iken en yüksek çekme dayanımı 188 MPa dır. Ortalama çekme dayanımı ise 155,2 MPa dır. Kum kalıba dökülen numunelerde en yüksek çekme dayanımı 215 MPa, en düşük çekme dayanımı 162 MPa dır ortalama çekme dayanımı ise 179,2 MPa olarak hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda seramik kalıba (Lod) dökülen ve ikincil dendrit kolları arası mesafesi en yüksek olan numunelerin çekme dayanımının en düşük olduğu görülmektedir. İkincil dendrit kolları arası mesafe ölçümleri kum kalıba nazaran daha kısa olan kromit kalıba dökülen numunede çekme dayanımı kum kalıba dökülen numuneye nazaran daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeninin mikro yapı incelemelerinde tespit edilen ve görüntüsü Şekil 5.6’da verilen çatlak görümlü oksitlerin olduğu düşünülmektedir.

Soğuma hızı arttıkça oluşan ikincil dendrit kolları arası mesafeler daha kısadır. Dendrit kolları arasındaki mesafenin kısa olması malzemenin çekme dayanımını

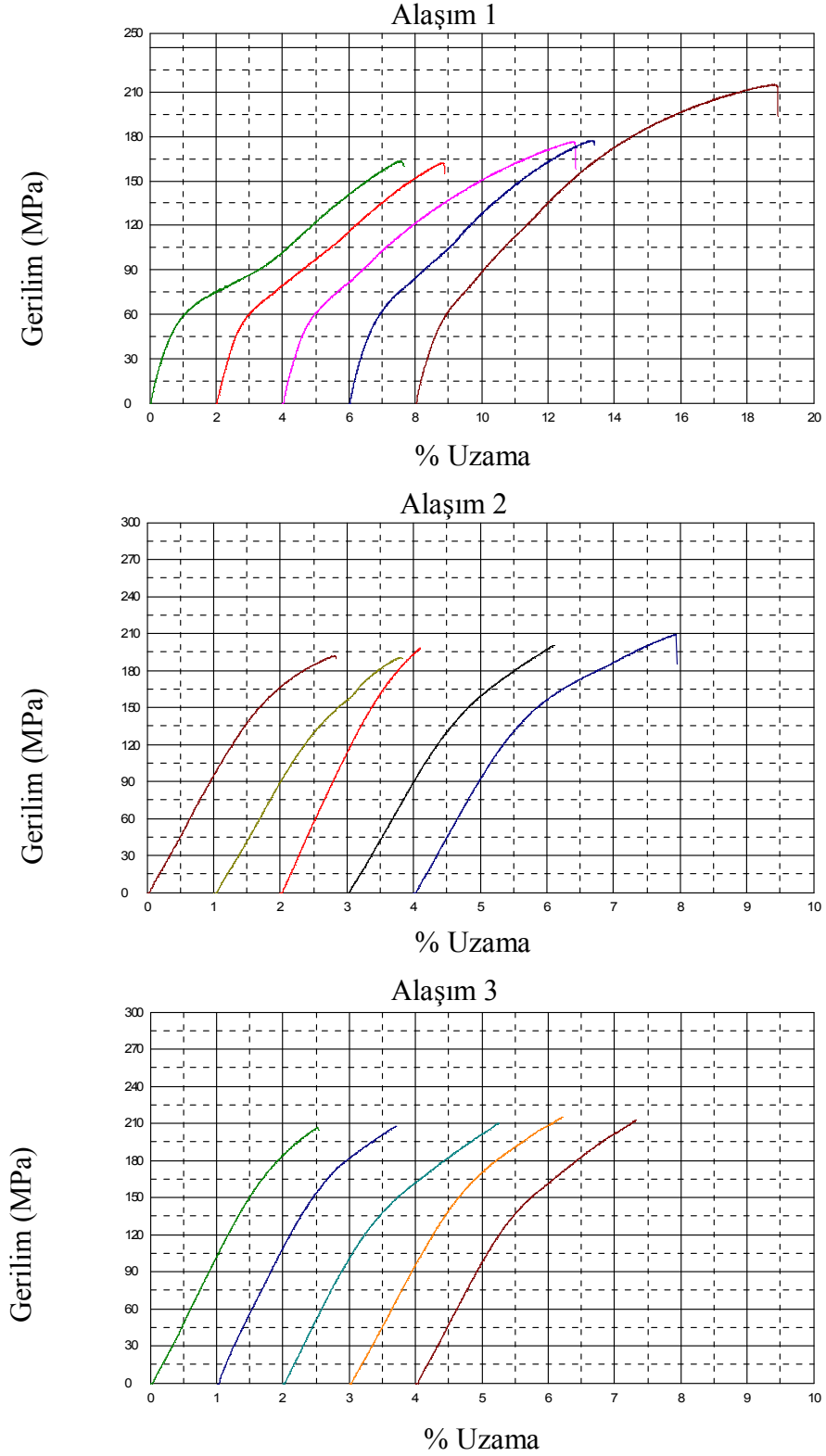
arttırmaktadır [8]. Ancak yapılan çekme testleri sonucunda en yüksek çekme dayanımı soğuma hızı yüksek olan kromit kalıba dökülen numunelerde beklenirken en yüksek çekme dayanımı kum kalıba dökülen numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedeni şekil 5.6 b’de de mikro yapı görüntüsü verilen kromit kalıba dökülen numunelerde görülen mikro çatlak görünümlü oksitler olduğu düşünülmektedir. Mikro yapıda oluşan oksitler malzemenin mekanik dayanımlarını düşürmektedir [43]. Şekil 5.32’de farklı kalıp malzemeleri kullanılarak hazırlanan kalıplara dökülen numunelerin maksimum % uzama değerleri histogram olarak verilmektedir.



Şekil 5.32. Farklı kalıp malzemelere dökülen numunelerin % uzama değerleri.

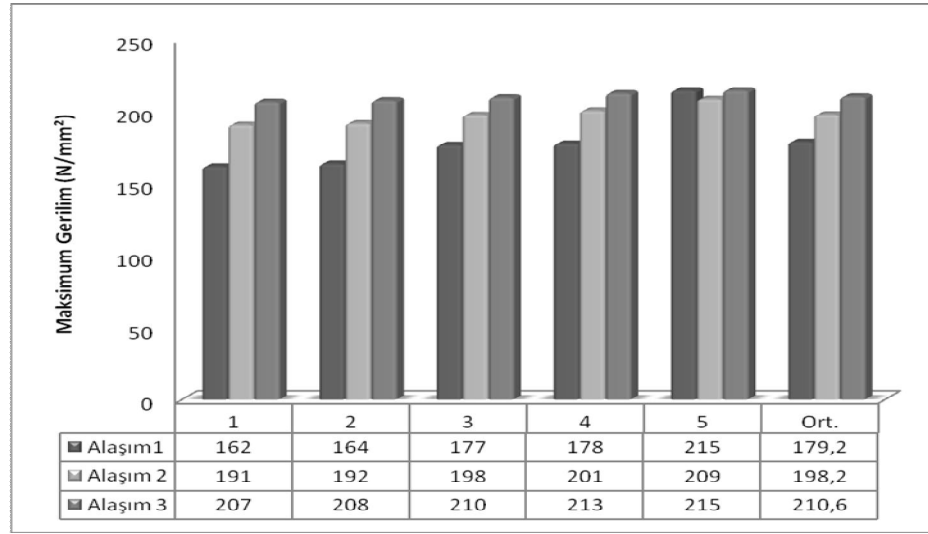
Kum kalıba yapılan dökümler sonucu elde edilen maksimum yüzde uzama değeri 10,75 iken en düşük % 6,83 ortalama % 8,24 olarak bulunmuştur. Kromit kalıp için en yüksek değer 12,14 en düşük % 6,04 ortalama % 8,94, seramik kalıp için en yüksek değer % 6,56 en düşük % 4,75 ortalama % 5,752 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kalıpların soğuma hızı azaldıkça süneklik azalmaktadır.

Mg oranları farklı olarak üretilen üç farklı alaşım için elde edilen çekme deneyi gerilim uzama diyagramları sırasıyla Şekil 5.33'de verilmektedir.



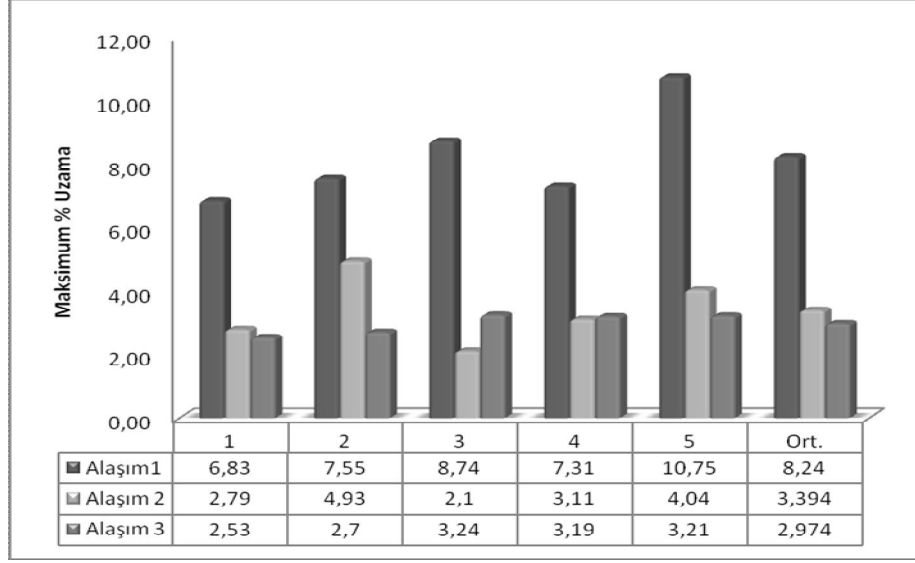
Şekil 5.33. Mg oranları farklı üretilen alaşımlara ait gerilim-uzama diyagramı.

Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde en yüksek çekme mukavemetinin Mg oranı % 0,86 olan Alaşım 3’de elde edilirken, bunu Mg oranı %0,67 olan Alaşım 2 ve % 0,43 Mg içeren Alaşım 1’de takip etmektedir. Mg oranının Al-Si-Mg alaşımlarında çekme ve akma dayanımını arttırmakta, sünekliliği düşürmektedir [8,9]. Şekil 5.34’de üretilen alaşımlar ve gösterdikleri çekme mukavemetleri histogram olarak verilmiştir.



Şekil 5.34. Mg oranları farklı üretilen alaşımların maksimum gerilim değerleri.

Alaşım 1 için en yüksek çekme mukavemeti 215 MPa olarak ölçülürken en düşük çekme mukavemeti 162 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan çekme deneyleri sonucu Alaşım 1 için ortalama çekme mukavemeti 179,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Alaşım 2 için en yüksek çekme mukavemeti 209 N/mm², en düşük çekme mukavemeti 191 MPa ortalama 198,2 MPa ve Alaşım 3 için maksimum 215 MPa minimum 207 MPa ortalama 210,6 MPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.35’de üretilen Alaşım 1, Alaşım 2 ve Alaşım 3 e ait % uzama değerleri verilmektedir.



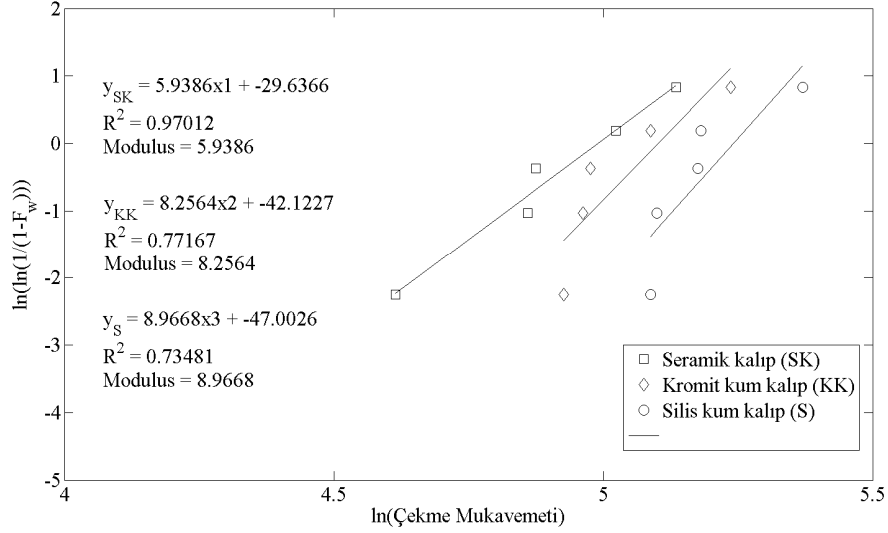
Şekil 5.35. Mg oranları farklı üretilen alaşımların % uzama değerleri.

Alaşım 1 için en yüksek % uzama 10,75 en düşük % 6,83 ortalama % 8,24 olarak bulunmuştur. Alaşım 2 için en yüksek değer 4,04 en düşük 2,79 ortalama 3,39 Alaşım 3 için maksimum 3,21 minimum % 2,53 ortalama % 2,97 olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucu üretilen alaşımlarda Mg oranı arttıkça sünekliliğin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeninin Mg oranının artması ile oluşan demirce zengin intermetalik bileşiklerin hacminin artması ve şeklinin değişmesidir. Özellikle oluşan Mg oranının artışıyla oluşan π ($Al_9FeMg_3Si_5$ veya $Al_8Si_6Mg_3Fe$) fazı etkili olabilmektedir [8]. Ayrıca süneklilikteki bu düşüşün dendrit boyutu ve sayısı ile, aynı zamanda ötektik alüminyum içerisindeki silisyum parçacıklarının sayısı ve boyutuyla alakalı olabilmektedir [27, 28].

5.10. WEIBULL İSTATİSTİKSEL DAĞILIMI ANALİZİ

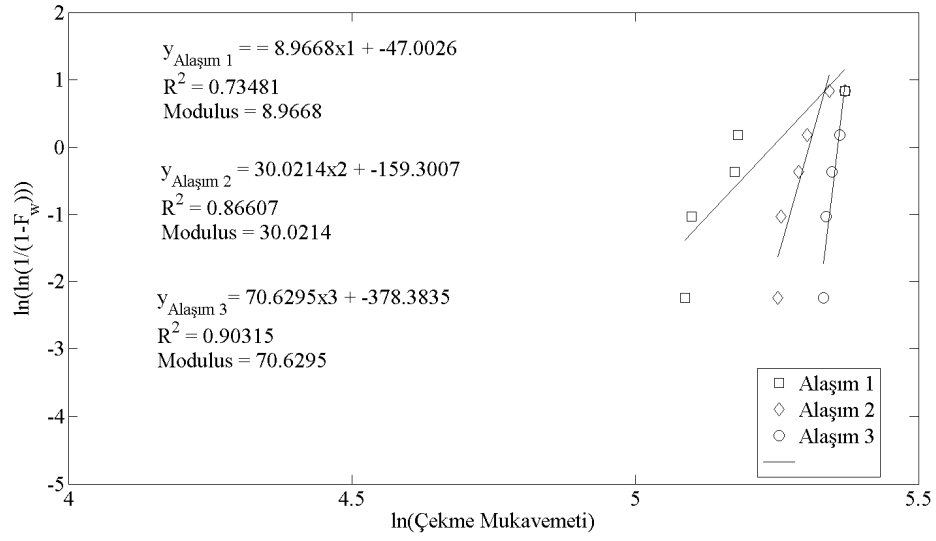
Weibull istatistiksel dağılımı analizi, malzemelerin üretim süreç parametrelerinin malzemenin kalitesi üzerine etkisinin anlaşılmasında kullanılmaktadır. İlk kez Wallodi Weibull Bofors çeliklerinin akma mukavemet değerlerine uygulanmıştır [49]. Sıvı metalin akışı sırasında oluşan oksit film tabakalarının mekanik özellikler üzerine etkisinin belirlenmesinde Weibull modülü, elde edilen çekme test sonuçlarının logaritmik değerinin $\ln(\ln(1/(1-F_w)))$ değerine karşı çizilen doğrunun

eğimi olarak ifade edilir [50,51,52]. Şekil 5.36'da farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen Alaşım 1'e ait Weibull istatistiksel dağılım analizi verilmiştir.



Şekil 5.36. Farklı kalıp malzemesine dökülen alaşımın Weibull analizi.

Farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen alaşımın çekme değerleri weibull modülü ile değerlendirilmiştir. Kum kalıp kullanılarak yapılan dökümler sonucu weibull modülü 8,96 iken kromit kalıba ve seramik kalıba yapılan numunelerin weibull modülü sırası ile 8,25 ve 5,93 olarak bulunmuştur. Bu düşüşün nedeni kromit kalıpta mikro çatlak görünümlü oksit iken, seramik kalıpta soğuma hızının en yavaş olmasıdır (Şekil 5.6). Şekil 5.37'de Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımların weibull modülleri verilmiştir.

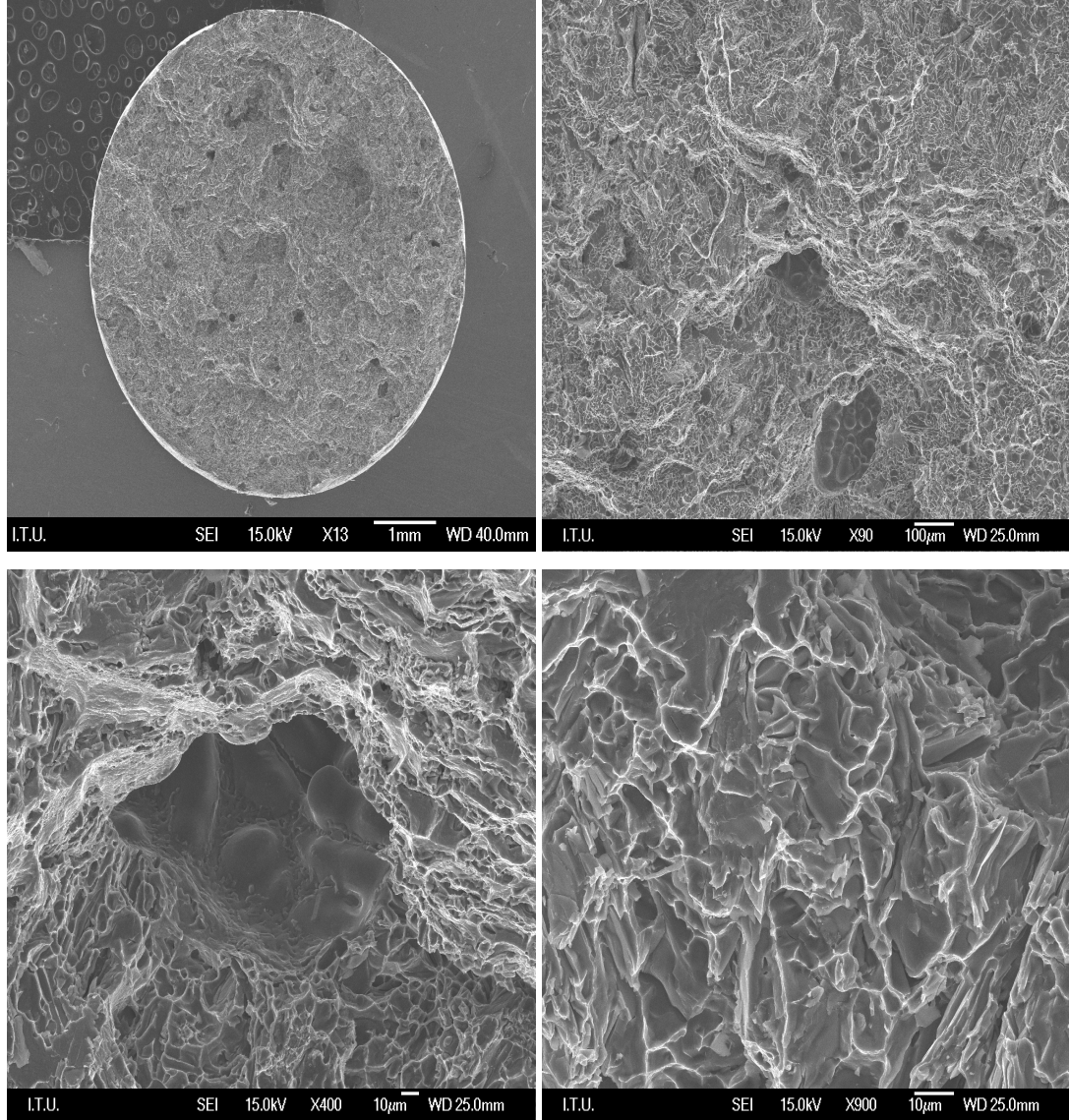


Şekil 5.37. Mg oranları farklı alaşımların Weibull analizi.

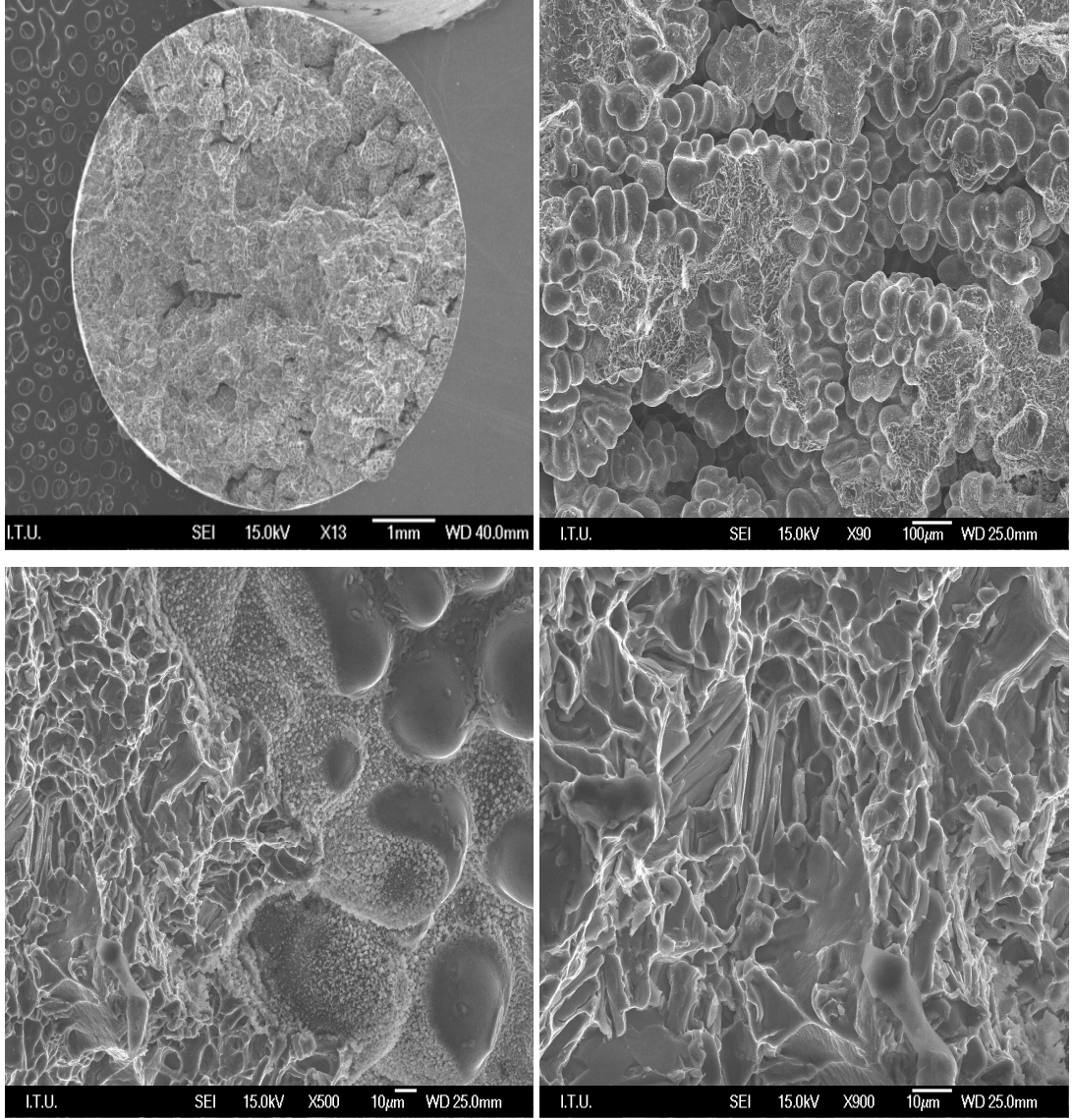
Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımların çekme değerleri weibull modülü ile değerlendirilmiştir. Mg oranı % 0,43 olan Alaşım 1'in weibull modeli 8,96 iken Mg oranı 0,67 olan Alaşım 2'nin weibull modülü 30,02 ve Mg oranı %0,86 olan Alaşım 3'ün weibull modülü 70,63 olarak bulunmuştur. Alaşıma ilave edilen Mg oranı arttıkça çekme dayanımının artmasına paralel olarak weibull modüllerinde de artış olmaktadır. Bu artışın sebebi alaşıma ilave edilen Mg oranının artışı ve T6 ısıl işlem sırasında dendritler arasında Mg_2Si intermetalik fazının artmasıdır.

5.11. KIRIK YÜZEY SEM İNCELEMELERİ

Farklı kalıp malzemesi kullanılarak hazırlanan (kromit kalıp, seramik kalıp) kalıplara yapılan dökümler sonucu hazırlanan numunelerin çekme testleri sonunda oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 5.38. ve 5.39.'da verilmektedir.



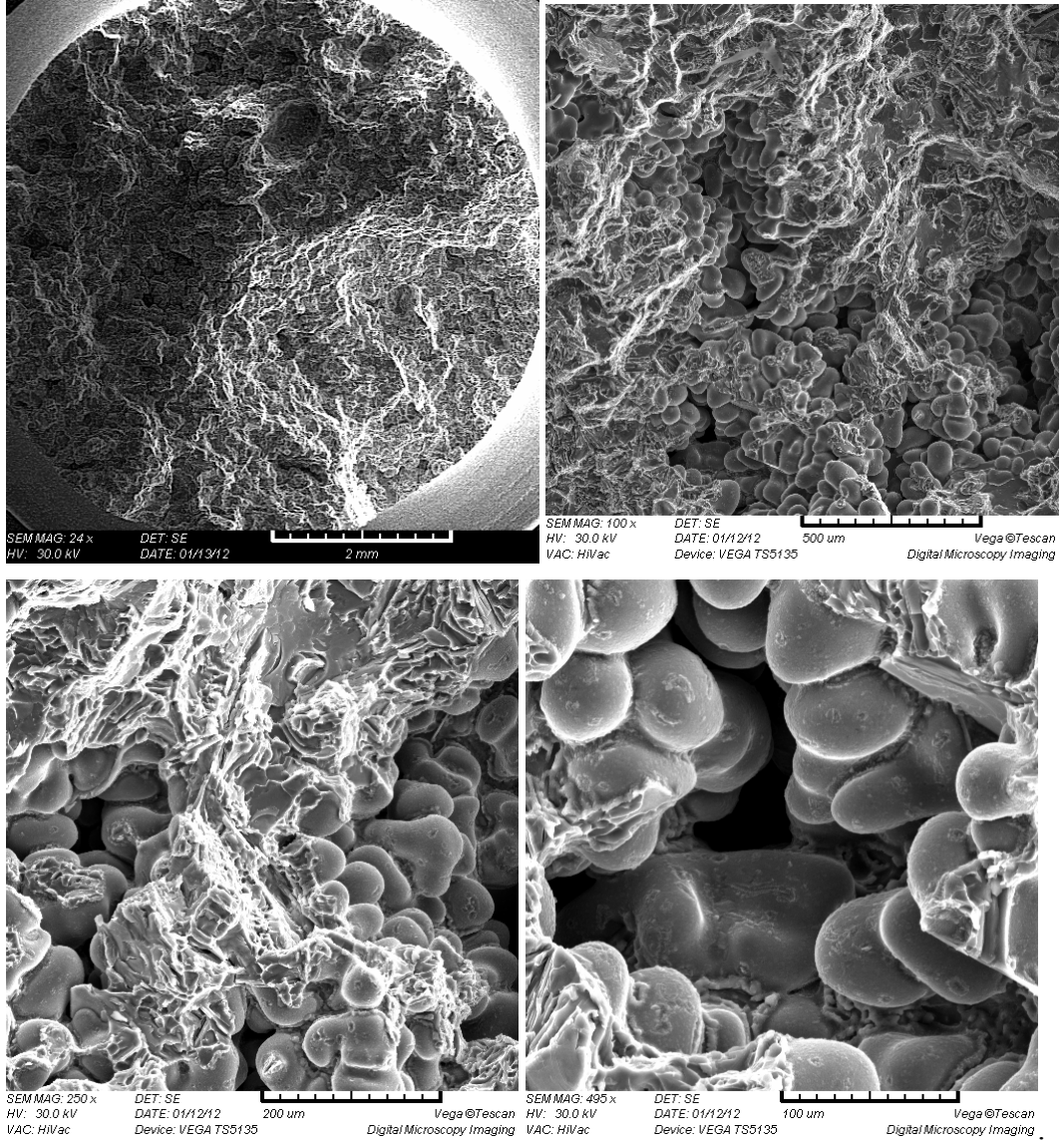
Şekil 5.38. Kromit kalıba dökülen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüsü.



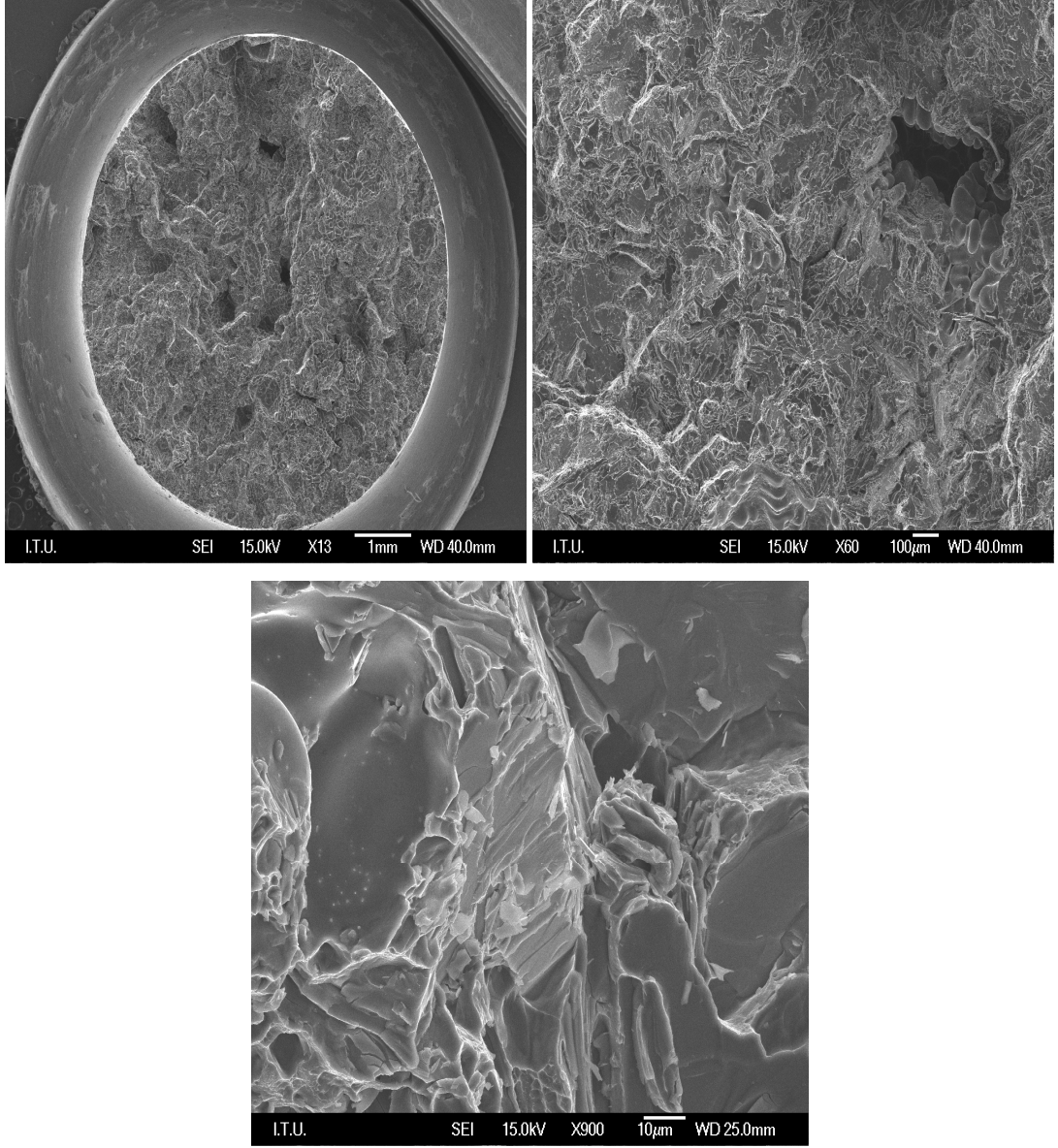
Şekil 5.39. Seramik kalıba dökülen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüsü.

Çekme numuneleri kırık yüzey SEM görüntülerinde kromit kalıba ve seramik kalıba dökülen A356 alaşımın soğuma şartlarına bağlı olarak kırık yüzeylerde kırılmanın farklı olduğu görülmüştür. Yapılan incelemeler sonucu çekme numunelerine ait kırılma yüzeylerinde, seramik kalıba dökülen numunelerde, soğuma hızıyla bağıntılı olarak kromit kalıba dökülen numunelerin kırık yüzey görüntülerine göre daha fazla çukurcuk ve tepelik oluşumu bu malzemenin daha sünek bir kırılım sergilediğini göstermektedir. Ayrıca yüksek oranda büyütmelemlerden alınan görüntülerde oluşan Al-Si ötektiğinin homojenizasyon ısıl işleminde tamamen homejen olarak dağıtılamadığı (kırılma bölgelerinde) dendritler arası kırılmaya sebep olduğu görülmüştür.

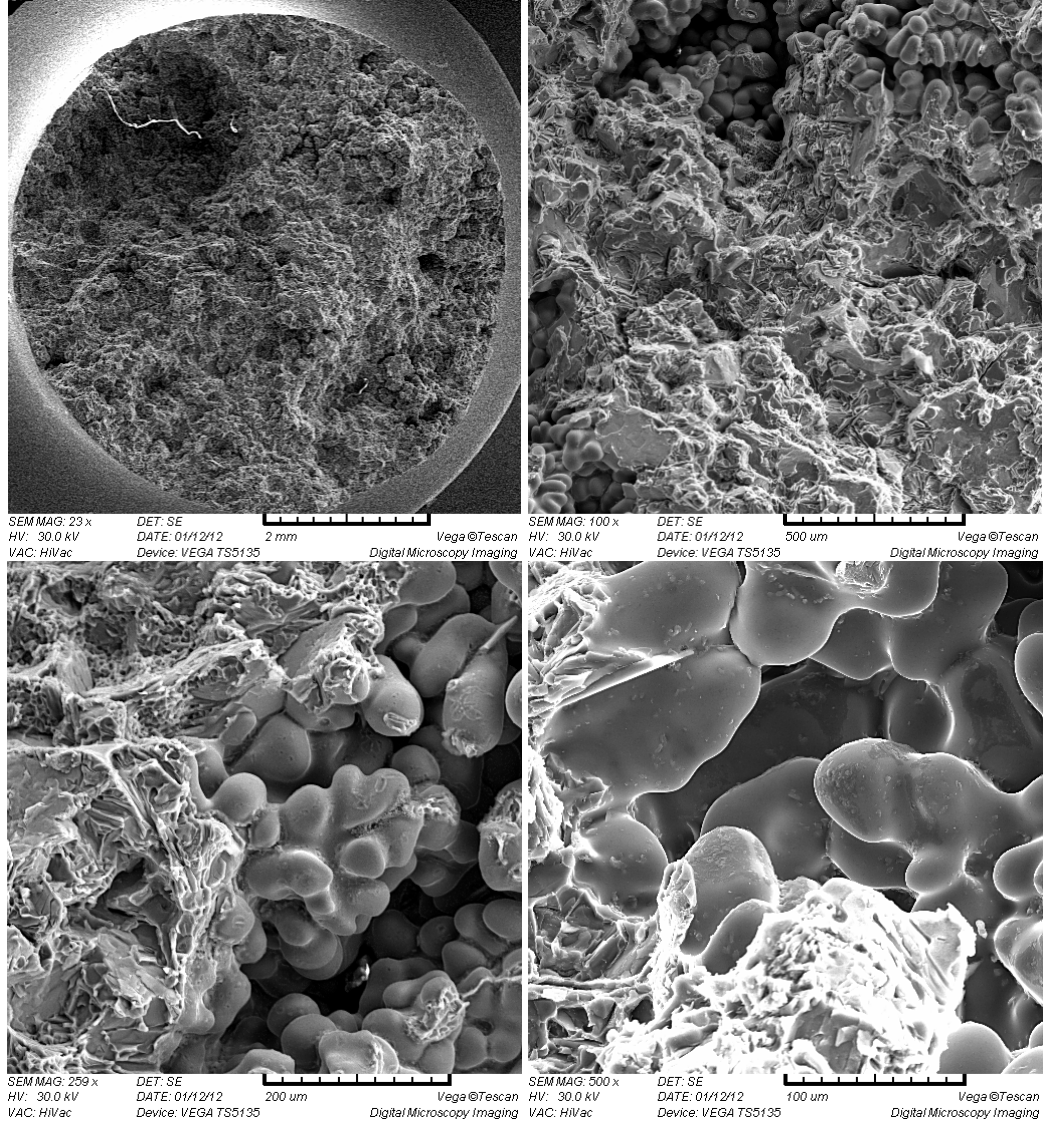
Mg oranları farklı olarak üretilen (% 0,43, % 0,67 ve % 0,86) Alaşım 1, Alaşım 2 ve Alaşım 3 'e ait numunelerin çekme testleri sonunda oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 5.40., 5.41. ve 5.42'de verilmektedir.



Şekil 5.40. Alaşım 1'e ait kırık yüzey SEM görüntüsü.



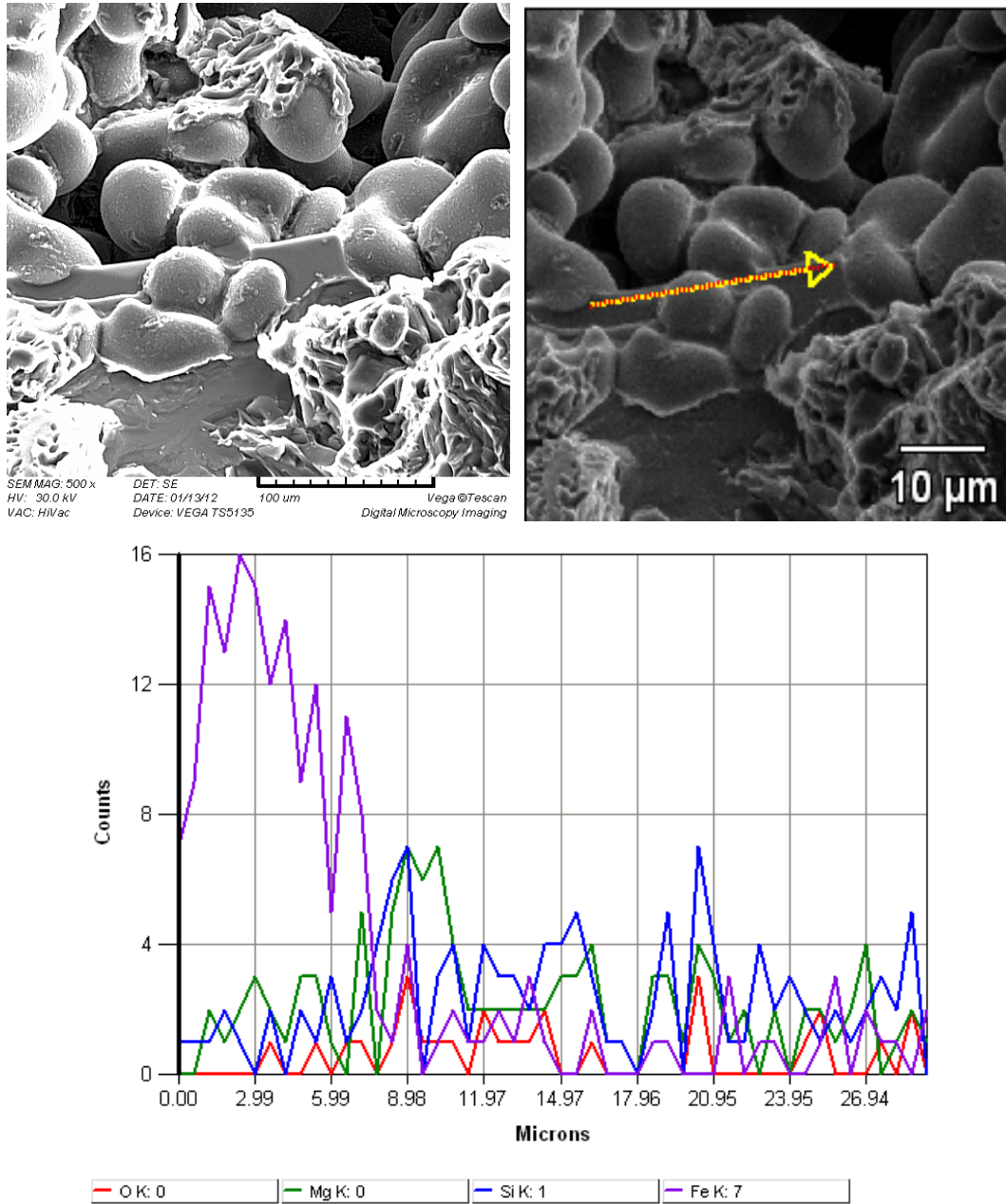
Şekil 5.41. Alaşım 2'ye ait kırık yüzey SEM görüntüsü.



Şekil 5.42. Alaşım 3'e ait kırık yüzey SEM incelemeleri.

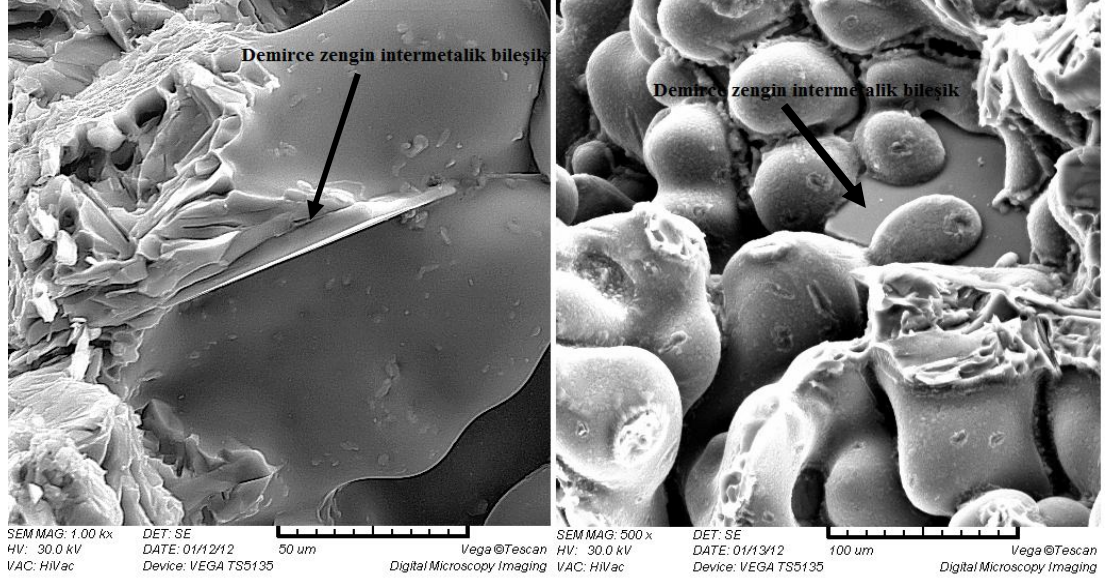
Yapılan incelemeler sonucu çekme numunelerine ait kırılma yüzeylerinde, her üç alaşımda da sünek kırılmalara ve kütleli kopmalara rastlanmıştır. Ayrıca kopma yüzeylerinden de anlaşılacağı üzere bu bölgelerde döküm hatalarına (gözenek) rastlanmaktadır. Oluşan bu gözenekler bu bölgede çatlakların başlamasına malzemenin mekanik dayanımının düşük olmasına neden olmaktadır [43]. Yapılan incelemeler sonucu üretilen alaşımlarda Alaşım 1 ve Alaşım 3'de meydana gelen ve sırasıyla Şekil 5.43. ve 5.44.'de görüntüsü verilen kırık yüzey görüntülerinde Al dendritler arasında tespit edilen intermetalik bileşiklerin görüntüsü verilmektedir.

Şekil 5.43’de Alaşım 1’e ait kırık yüzey SEM görüntülerinde Al dendritler arasında oluşan yapıların tespiti için çizgisel tarama yapılmıştır. Yapılan taramada matris olan Al piki, diğer element piklerinin daha net görülebilmesi amacıyla tarama dışında tutulmuştur. Yapılan çizgisel tarama sonucu bu yapıların demirce zengin intermetalik bileşik olduğu görülmektedir. Oluşan bu demirce zengin intermetalik bileşikler çekme deneyi sırasında çentik etkisi yaratarak erken kırılmalara neden olmaktadır. Ayrıca bu intermetalik bileşikler alaşımın sünekliliğini düşürmektedir [8].



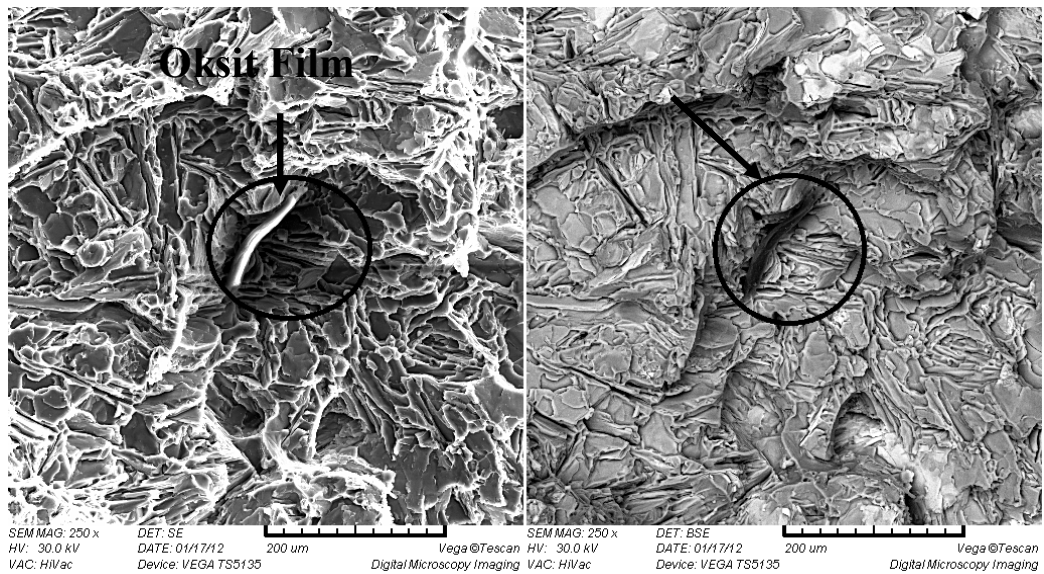
Şekil 5.43. Alaşım 1 de tespit edilen dendritler arası oluşan demirce zengin intermetalik bileşiğin SEM ve çizgisel tarama görüntüsü.

Şekil 5.44’de Alaşım 3’e ait kırık yüzeylerde çeşitli büyütmelerde tespit edilen demirce zengin intermetalik bileşik görüntüleri verilmektedir.

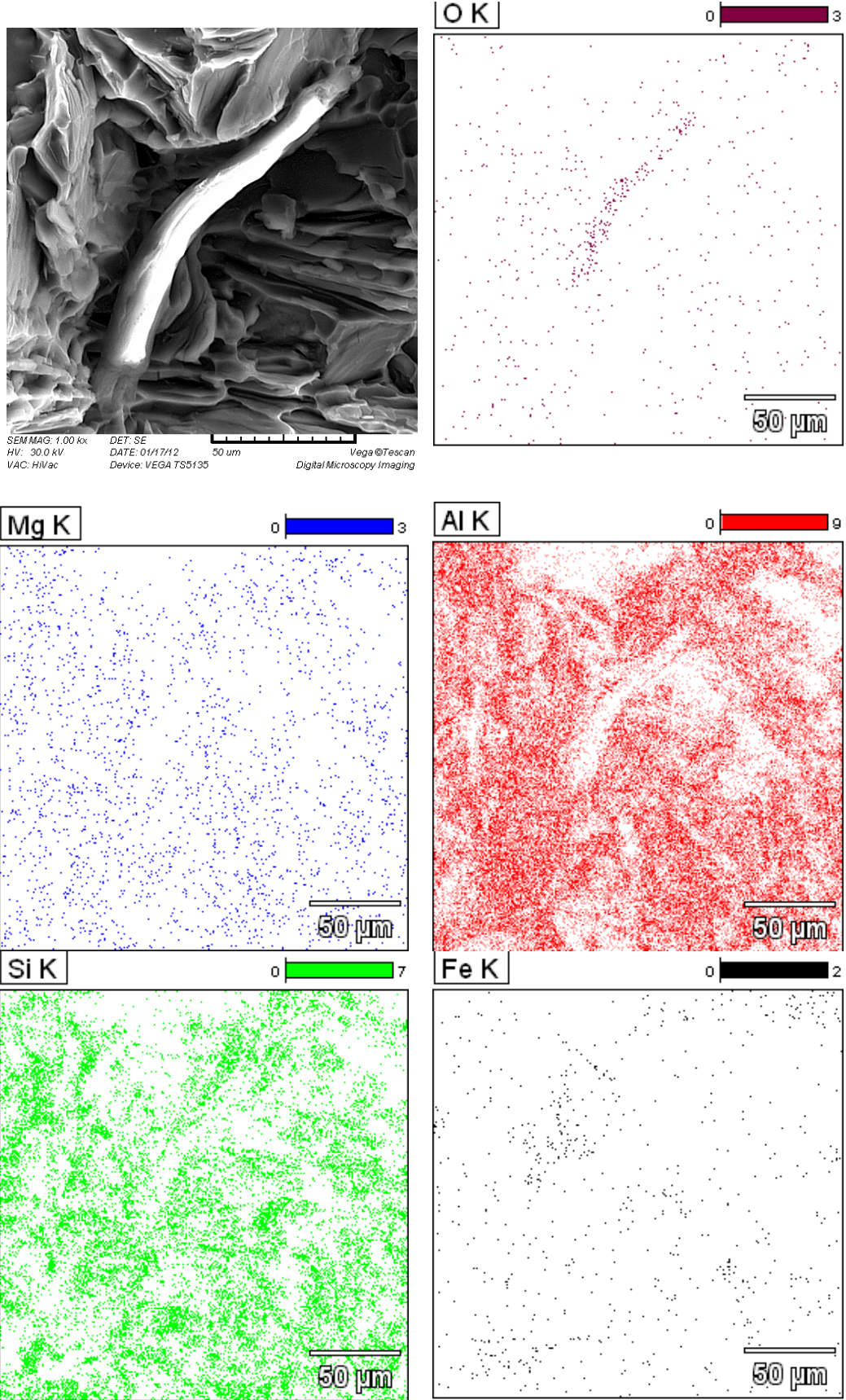


Şekil 5.44. Farklı büyütmelerde kırık yüzeylerde tespit edilen demirce zengin intermetalik bileşik görüntüleri.

Üretilen alaşımlardan alaşım 1 için kırık yüzey incelemeleri sırasında tespit edilen oksit filmi SEM ve BSE görüntüsü Şekil 5.45.’de verilmektedir.



Şekil 5.45. Alaşım 1’de tespit edilen oksit filmi SEM ve BSE görüntüsü.



Şekil 5.46. Alaşım 1' de kırık yüzeyde tespit edilen oksitin SEM ve EDS mapping görüntüsü.

Şekil 5.46.'de Alaşım 1'de tespit edilen oksit filmi SEM görüntüsünden yapılan EDS mapping analizi verilmektedir. Alınan analizde kırmızı renk Al, mavi renk Mg, yeşil renk Si, siyah renk Fe ve bordo renk O₂ simgelemektedir. Analiz sonucunda kırık yüzey içerisinde Al, Si, Mg elementleri homojen bir şekilde dağılım sergilediği görülmektedir. Ancak alaşım içerisinde bulunan Fe in yanısıra O₂'inde belirli bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Oluşan bu oksit filmi malzemenin mekanik dayanımını düşürmektedir [43].

BÖLÜM 6

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk aşamada NovaFlow & Solid Gravity döküm simülasyon programında simüle edilen model, A356 alaşımı kullanılarak farklı kalıp malzemelerine (kum kalıplara, seramik kalıplara ve kromit kalıplama kumu kullanılarak hazırlanan kalıplara) dökülmesi sonucunda, meydana gelen mikro yapısal değişimlerin dendrit kolları arasında meydana gelen boşlukların, mikro yapı morfolojisinin alaşımın mekanik özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Soğuma hızları farklı olan kalıplara yapılan döküm sonucu alaşımda meydana gelen ikincil dendrit kolları arası mesafeler görüntü analiz sisteminde ölçülmüş, ikincil dendrit kolları arası mesafenin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda (%0.43, %0.67 ve %0.86) ilave edilen Mg 'un alaşımın mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Mg oranının malzemenin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için sertlik ve çekme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca Mg oranına bağlı olarak oluşabilecek intermetaliklerin tespiti için optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD görüntüleri alınmıştır. Yapılan tüm çekme testleri sonucunda weibull istatistiksel dağılım analizleri yapılarak weibull modülleri hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda;

- NovaFlow & Solid Gravity döküm simülasyon programında simüle edilen model de herhangi bir çekme (hacimsel daralma) görülmemiştir. Nitekim döküm sonucu üretilen bloklarda da herhangi bir çekme meydana gelmemiştir. Ayrıca simülasyon sonucu döküm süresi 1,994 sn olarak hesaplanırken, reel ortamda bu süre 3-3,5 sn olarak ölçülmüştür.
- Farklı kalıplama malzemeleri kullanılarak yapılan dökümler sonucu soğuma hızı (lokal katılaşma süresi) en hızlı kromit kalıp da ölçülürken bunu kum kalıp ve seramik kalıbın (Lod607) takip ettiği belirlenmiştir.

- Farklı kalıplama malzemeleri kullanılarak yapılan dökümler sonucu mikro yapılarda soğuma hızına bağlı olarak meydana gelen ikincil dendrit kolları arası mesafeler değişmektedir. Yapılan ikincil dendrit kolları arası mesafe ölçümlerinde en yüksek değerler, soğuma hızı en yavaş olan seramik kalıpta ölçülürken en düşük değerler soğuma hızı en yüksek olan kromit kalıba yapılan numunelerde elde edilmiştir.
- Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlarda alaşım içerisinde bulunan Mg oranına bağlı olarak mikro yapıda çeşitli şekillerde ve hacimlerde demirce zengin intermetalik bileşikler oluştuğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu intermetalik bileşiklerin şekli ve hacmi alaşımda bulunan Mg oranındaki artışa paralel olarak arttığı belirlenmiştir..
- SEM incelemelerinde mikro yapıda oluşan çökelekler (Mg_2Si) tespit edilmiş ve boyutlarının 10-35 nm aralığında değiştiği belirlenmiştir.
- XRD incelemelerinde mikro yapı ve SEM görüntülerinde tespit edilen intermetalik bileşikler (Mg_2Si , Al_5FeSi , $Al_8Si_6Mg_3Fe$) tanımlanmıştır.
- Üretilen tüm alaşımların yoğunluk ölçümleri yapılmış, % gözenek (porozite) oranları hesaplanmıştır. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde farklı kalıp malzemeleri kullanılarak dökülen numunelerde en düşük yoğunluk kromit kalıba yapılan malzemede ölçülürken bunu seramik ve kum kalıba yapılan numuneler takip etmektedir. Bu numunelerin yoğunluk ölçümlerine göre yapılan % gözenek oranı hesabı en düşük kum kalıpta bulunurken bunu seramik kalıp ve kromit kalıbın izlediği anlaşılmıştır.
- Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlarda ise en düşük yoğunluk Mg oranı % 0.67 Mg içeren Alaşım 2’de ölçülürken, bunu Alaşım 3 ve Alaşım 1 takip etmektedir.
- Dökülen tüm numunelerde T6 ısıl işlem öncesi ve T6 ısıl işlem sonrası yapılan sertlik ölçümlerinde T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerde sertliğin yaklaşık 2,5 kat kadar arttığı tespit edilmiştir. Farklı kalıp malzemelerine dökülen alaşımda en yüksek sertlik değeri kum kalıba yapılan numunelerde ölçülürken bunu sırasıyla kromit kalıba dökülen ve seramik kalıba dökülen numuneler takip etmektedir. Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlarda ise en yüksek sertlik değeri Mg oranı en yüksek olan Alaşım 3’de ölçülürken bunu sırasıyla

Alaşım 2 ve Alaşım 1 takip etmektedir. Alaşıma ilave edilen Mg oranı arttıkça alaşımın sertliğinde bir artış meydana geldiği belirlenmiştir.

- Farklı kalıp malzemelerine yapılan dökümler sonucu hazırlanan çekme numunelerinde en yüksek çekme dayanımı kum kalıba yapılan numunelerde görülmüştür. Bunu kromit kalıba yapılan numuneler ve seramik kalıba yapılan numuneler takip etmektedir. Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlarda ise en yüksek çekme dayanımı Alaşım 3'de ölçülürken bunu Alaşım 2 ve Alaşım 1 takip etmektedir. Mg oranı arttıkça alaşımın çekme dayanımının arttığı belirlenmiştir.
- Farklı kalıp malzemelerine yapılan dökümler sonucu malzemede % uzama oranı en yüksek kromit kalıpta gözlenirken bunu sırasıyla kum ve seramik kalıba dökülen numuneler takip etmektedir. Mg oranları farklı olarak üretilen alaşımlarda ise en yüksek % uzama değeri Alaşım 3'de görülürken bunu sırasıyla Alaşım 2 ve Alaşım 1 takip etmektedir. Alaşımda bulunan Mg oranı arttıkça % uzama değerinin düştüğü belirlenmiştir.
- Dökülen tüm alaşımların çekme dayanımı değerleri kullanılarak yapılan Weibull istatistiksel dağılım analizinde, farklı kalıp malzemelerine dökülen numunelerde en yüksek weibull modülü kum kalıpta elde edilirken bunu kromit kalıp ve seramik kalıba dökülen numuneler takip etmektedir. Mg oranları farklı üretilen alaşımlarda ise en yüksek weibull modülü Mg oranı en yüksek Alaşım 3'de bulunurken, bunu Alaşım 2 ve Alaşım 1 takip etmektedir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- Farklı yolluk sistemleri olan modeller kullanılarak yapılan dökümlerde yolluk sisteminin mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.
- Farklı oranlarda Mg ilavesini yanında Cu katılarak elde edilen alaşımın mekanik özellikleri incelenebilir.
- Kontollü katılaştırma, yönlü katılaştırma yapılarak katılma koşullarının mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.
- Oluşan çökeltilerin daha net incelenebilmesi için TEM (Geçirgen Elektron Mikroskobu) incelemeleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- 1- Bolton, W., "Engineering Materials Technology 2nd. edition" *B.H Newness*, Oxford, 271-280 (1993).
- 2- Sharma, R., Anesh. and Dwivedi, D. K., "Influence of silicon (wt.%) and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast Al-Si-Mg alloys" *Materials Science and Engineering A*, 408: 274-280 (2005).
- 3- Hekmat, A.A., Liu X., Ajersch F. and Chen X.G., "Wear behaviour of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg casting alloys with variable Mg contents" *Wear*, 269: 684-692 (2010).
- 4- İnternet: Aluminium Federation "Aluminium In Transport, Aluminium Industry Fact Sheet" [http://www.alfed.org.uk/downloads/documents/XN6LU4R3TW1 aluminium in transport.pdf](http://www.alfed.org.uk/downloads/documents/XN6LU4R3TW1_aluminium_in_transport.pdf) (2012).
- 5- Değirmencioğlu, P., "Alüminyum alaşımlarının dökümünde gaz oluşumu ve gaz giderme tekniklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-22 (2002).
- 6- Wislei, R. O., Garcia, L. R., Goulart, P. R. and Garcia, A., "Effects of eutectic modification and T4 heat treatment on mechanical properties and corrosion resistance of an Al-9 wt%Si casting alloy", *Materials Chemistry and Physics*, 106: 343-349 (2007).
- 7- Zhu, M., Jian, Z., Yang, G. and Zhou, Y., "Effects of T6 heat treatment on the microstructure tensile properties and fracture behavior of the modified A356 alloys" *Materials and Design*, 36: 243-249 (2012).
- 8- Thirugnanam, A. Sukumaran, K. Pillai, U.T.S., Raghukandan, K. and Pai, B.C., "Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al-7Si-Mg alloys", *Materials Science and Engineering A*, 445: 405-414 (2007).
- 9- Caceres, C.H., Davidson, C.J., Griffiths, J.R. and Wang, Q.G., "The Effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg Casting Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30 (A): 2611-2618, (1999).
- 10- Smith W. F., "Structure and Properties Of Engineering Alloys 2.nd ed." Çev: Erdoğan, M., *Nobel Yayınları*, Ankara, 345-390 (2001).

- 11- Fakioğlu, A., “Yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 3-15 (2012).
- 12- İnternet: Australian Aluminium Council, “Aluminium Material, Properties & Sustainability”<http://aluminium.org.au/propertiesandsustainability> (2012).
- 13- Güteryüz, K. “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 5-12 (2011).
- 14- Kocabıçak, G. “Malzeme seçiminde bilgi tabanlı sistemler ve alüminyum döküm alaşımlarına uygulanması” Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 5-13 (1996).
- 15- Sun Y., “Yaşlanabilir alüminyum alaşımlarının aşınma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 58-69 (1998).
- 16- Büyükdoğan, S., “Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımının aşınma davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 4-25, (2011).
- 17- Savaş, Ö., “Alüminyum silisyum döküm alaşımlarında mikro porozite etki eden faktörlerin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 3-27, (2005).
- 18- Taban, E.ve Kaluç, E., “Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının endüstriyel kullanım alanları” **Metal Dünyası**,141: 107-114 (2005).
- 19- Kumru, N., “Etial-141, 145 ve 160 tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 13-26 (2007).
- 20- Toktaş, A. “Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin aa 6063 alüminyum alaşımına uygulanması ve kaynak parametrelerinin malzeme içyapısı ile mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir (2006).
- 21- ASM Handbook Committee, Metals Handbook, “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals 9th edition” 2: **American Society for Metals, Metals Park**, Ohio, 484-487 (1979).
- 22- Demir, E., “Alüminyum alaşımlarda ısıl işlem etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 23-30 (2008).

- 23- ASM Handbook Committee, Metals Handbook, “Alloy Phase Diagram, 9th. Ed.” 3: *American Society for Metals, Metals Park*, Ohio, 84-86 (1979).
- 24- Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, *Derya Kitabevi*, Trabzon, 193-195 (2004).
- 25- Hengcheng, L., Yu, S. and Guoxiong, S., “Restraining effect of strontium on the crystallization of Mg₂Si phase during solidification in Al- Si- Mg casting alloys and mechanisms”, *Materials Science and Engineering A* 358: 164-170 (2003).
- 26- Askeland, R.D., “The Science and Engineering Of Materials, 3rd. ed.” Çeviri Editörü, Erdoğan, M., *Nobel Yayınları*, 238-245 (1998).
- 27- İnternet: “Precipitation From A Supersaturated Solid Solutions” <http://www.aluminium.mater.org.uk/content/html/eng/default/.asp?catid=70&pageid=1382067080>, (2012).
- 28- Zhang, L.Y., Zhou, B.D., Zhan, Z.J., Jia Y.Z. , Shan, S.F., Zhang, B.Q. and Wang, W.K. “Mechanical properties of cast A356 alloy, solidified at cooling rates enhanced by phase transition of a cooling medium” *Materials Science and Engineering A*, 448: 361–365 (2007).
- 29- Özyürek D., Kibar, E. ve Yılmaz, R., “Toz metalurjisi ile üretilen A356 alüminyum alaşımının aşınma davranışlarının incelenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- 30- İnternet: Material Property Data, “Online Materials Information” <http://www.matweb.com/serach/DataSheet.aspx?MatGUID=d524d6bf305c4ce99414cabd1c7ed070&ckck=1> (2012).
- 31- Ji-hua P., Xiao-long T., Jian-ting H. and De-ying X., “Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of A356 alloys”, *Trans. Nonferrous Met.Sec.China*, 1950-1956, (2011).
- 32- Shabestari, S.G. and Moemeni, H., “Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 153: 193-198 (2004).
- 33- Malgorzata W, “Aluminium Silicon Casting Alloys Atlas of Micrographs” *The materials of society, Metals Park*, Ohio, 57-60 (2004).
- 34- İnternet: İstanbul Teknik Üniversitesi “Malzeme Bilimi Ders Notları” http://web.itu.edu.tr/ozgulkeles/malzeme_bilimi_06_2010.pdf (2012).
- 35- Gündüz. S., “Metalurjide Faz Diyagramları”, *Seçkin Yayıncılık*, 26-27 (2012).

- 36- Mi, G. F., Pu, X. and Songyan, Z., “Effect of Solidification Condition on Secondary Dendrite Arm Spacing of the A357 Alloy under Counter-pressure Casting” *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 119-122, (2009).
- 37- Gustafson, G., Thorvaldson, T. and Dunlop G.L., “The influence of Fe,Cr on the microstructure of Cast Al-Si-Mg Alloys” *Metalurgical Transactions A* 17-A: 45-52, (1986).
- 38- Zhong, C., Wei, Shan, L.J., J. Wan-Qi J., Lin, L. and Heng-Zhi F., “Solidification behaviour of Al7SiMg Casting Alloys” *Trans. Nonferrous Met.Soc. China*, 15: 40-44, (2005).
- 39- Taylor, J. A. and J Couzner “The effect of iron in Al-Si casting alloys in., casting concepts” *35th. Australian Foundry Institute National Conference*, Australia, 148-157 (2004).
- 40- Chandrashekharaiyah, T.M. and Kori, S.A., “Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al- Si alloys”, *Tribology International* 42: 59-65 (2009).
- 41- Kori, S.A. Murty, B.S. and Chakraborty, M., “Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium” *Materials Science and Engineering A* 283: 94-104 (2000).
- 42- Kayıkçı, R. ve Çolak M., “Kuma dökülen etial 160 alüminyum alaşımında tane inceltmenin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelenmesi” *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Türkiye, (2009).
- 43- Bangyikhan, K, “Effects of oxide film, fe-rich phase, porosity and their interactions on tensile properties of cast Al-Si-Mg alloys” Phd Thesis, *School of Metallurgy and Materials Faculty of Engineering*, University of Birmingham, (2005).
- 44- Eisaabadi, B. G., 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*, Accepted Manuscript, (2012)
- 45- Mi, G. F, Liu X. Y., Zhu, Z. J, Zeng S. Y. and Wang H. W., “Effect of chill casting processes on secondary dendrite arm spacing and densification of A357” *Trans. Nonferrous Met. Society of China*, 17: 1012-1017 (2007).
- 46- Dobrzanski, L.A., Maniara, R. and Sokolowski, J.H., “The effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of AC AlSi9Cu alloy” *Archives of Materials Science and Engineering*, 28: 105-112 (2007).
- 47- Shivkumar, S., Keller C. and Apelian D., “Aging behavior in cast Al-Si-Mg alloys” *AFS Trans.*, 179: 905-911 (1990).

- 48- Shabestari, S. G. and Shahri, F., "Influence of modification, solidification conditions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy" *Journal of Materials Science* 39: 2023-2032 (2004).
- 49- Weibull, W. "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", *Journal of Applied Mechanics*, 18: 293-297 (1951)
- 50- Nyahumwa, C., Green, N. R. and Campbell, J., "Effect of mold-filling turbulence on fatigue properties of cast aluminium alloys", *AFS Transactions*, 106: 215-223 (1998).
- 51- Mbuya, T. O., Oduori, M. F., Rading, G. O. and Wekesa, M. S., "Effect of runner design on mechanical properties of permanent mould aluminium castings", *International Journal of Cast Metals Research*, 19: 357-360 (2006).
- 52- Green, N. R. and Campbell, J., "Statistical distribution of fracture strength of Cast Al-7Si-Mg alloy" *Materials Science and Engineering* , 137 (A): 261-266, (1993).

ÖZGEÇMİŞ

Musa YILDIRIM 1984 yılında Kayseri’de doğdu; ilkokulu ve ortaokul öğrenimini sırasıyla Karakuyu Köyü ilköğretim okulunda ve Pınarbaşı İmam Hatip lisesinde tamamladı. Ortaöğrenimini Kayseri Anadolu Meslek Lisesi’nde tamamladı. 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliği bölümünde öğrenime başlayarak 2008 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres :100. Yıl Mah. Erdem Sitesi B blok No 5 KARABÜK
Tel : (507) 7766954
E-posta : yildmus@gmail.com