



**DÖKÜM Al-Cu-Mg ALAŞIMINDA TANE  
İNCELTME METODUNUN MİKROYAPI VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Ali Yiğit AY**

**2020  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışman  
Doç. Dr.Tansel TUNÇAY**

**DÖKÜM Al-Cu-Mg ALAŞIMINDA TANE İNCELTME METODUNUN  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Ali Yiğit AY**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Tansel TUNÇAY**

**KARABÜK  
Kasım 2020**

Ali Yiğit AY tarafından hazırlanan “ DÖKÜM Al-Cu-Mg ALAŞIMINDA TANE İNCELTME METODUNUN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Tansel TUNÇAY .....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/04/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi. Mehmet AKKAŞ (KÜ) .....

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

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....

Lisansüstü Eğitim 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.”*

Ali Yiğit AY

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DÖKÜM Al-Cu-Mg ALAŞIMINDA TANE İNCELTME METODUNUN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Ali Yiğit AY

Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Tansel TUNÇAY

Kasım 2020, 63 sayfa

Bu çalışmada, Al-Cu-Mg alaşımı Al10Sr alaşımı ile modifikasyon, AlTi5B master alaşımları ile (ağırlıkça % 0,25, 0,5 ve 1,0) tane inceltme işlemi yapılmıştır. Hazırlanan sıvı metal kum ve metal kalıba döküm metodu ile dökülmüştür. Döküm Al-Cu-Mg alaşımları çekme numunleri hazırlandıktan sonra T06 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Al-Cu-Mg alaşımların mikroyapı incelemeleri, optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) ve X-ışınım kırınımı metodu (XRD) ile karakterize edilmiştir. Mekanik özellikleri, çekme testi, mikro ve makro sertlik sonuçları ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, optik ve tarama elektron mikroskopu görüntülerinde, kalıp malzemesine bağlı olarak morfolojinin değiştiği, EDS ve XRD analizlerinde mikro yapıda;  $\alpha$ -Al fazı ile birlikte Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si, Al-Cu-Fe, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sr bileşikleri belirlenmiştir. Döküm yoluyla elde edilen Al-Cu-Mg alaşımı Al10Sr ile modifikasyonunda Al-Cu, Al-ana matris içinde uzandığı görülmüştür. Modifikasyon ve tane inceltme işlemi uygulanan alaşımlarda iplikli parçaların kısa ve ana matris

üzerinde homojen dağıldığı görülmüştür. Al5TiB tane incelticinin ilavesi ile intermetalğin morfolojisinde bozucu etkisi görülmektedir. Ayrıca miktara bağı olarak partiküllerin birleşmesi sonucu Al-Cu-Mg alaşımında topaklanmalar meydana gelmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Al-Cu-Mg alaşımları, modifikasyon, tane inceltme, mikroyapı, mekanik özellikler.

**Bilim Kodu** : 91530



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE EFFECT OF GRAIN REFINEMENT METHOD ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CASTING AL-CU-MG ALLOY**

**Ali Yiğit AY**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Manufacturing Engineer**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Tansel TUNÇAY**

**November 2020, 63 pages**

In this study, Al-Cu-Mg alloy, Al10Sr alloy modification, AlTi5B master alloys (0.25, 0.5 and 1.0 % by weight) grain refinement processes were performed. The prepared liquid was poured by metal sand and metal mold casting method. Casting Al-Cu-Mg alloys were subjected to T06 heat treatment after tensile test samples produced. Microstructure studies of Al-Cu-Mg alloys are characterized by optical microscope and scanning electron microscope and X-ray diffraction method. Mechanical properties were evaluated with tensile test, micro and macro hardness results. As a result, in the optical and scanning electron microscopy images, in the structure of EDS and XRD, in which morphology changes depending on the mold material; Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si, Al-Cu-Fe, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sr compounds were determined with the  $\alpha$ -Al phase. Al-Cu-Mg alloy obtained by casting has been found to extend in Al-Cu, Al-main matrix in its modification with Al10Sr. In alloys where modification and grain refinement are applied, it is observed that the filaments are short and homogeneously distributed on

the main matrix. With the addition of Al<sub>5</sub>TiB grain refinement, the disruptive effect can be seen in the morphology of the intermetallic. In addition, due to the amount of particles combined, lumps have formed in the Al-Cu-Mg alloy.

**Key Word** : Al-Cu-Mg alloys, modification, grain refinement, microstructure, mechanical properties.

**Science Code** : 91530



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca desteğini, bilgi, tecrübe, güler yüzü ve sabrı ile çalışmama ışık tutan değerli hocam Doç. Dr. Tansel TUNÇAY'a, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim laboratuvar altyapı, cihaz ve olanaklarını, bilgi ve tecrübeleri ile destek sağlayan Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e, çekme testi için imkan ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ ve Arş. Gör. Demet TAŞTEMUR'e, ihtiyaç duyduğumda gerekli azim ve motivasyonumu düşürmeme engel olan Arş. Gör. Atakan Oğuz OCAK'a, çalışma arkadaşlarıma ve özellikle Ülkü Aslı ÇELİK'e ve Fatih Emre KOÇ'a,

Bu yüksek lisans tez çalışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri koordinatörlüğü (BAP) birimi tarafından 18-YL-172 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri koordinatörlüğü (BAP) birimine teşekkür ederim.

Bugüne kadar benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayıp attığım her adımda yanımda olan anneme ve babama,

Teşekkür ve Saygılarımla....

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI .....	3
2.1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ.....	3
2.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TARİHÇESİ.....	5
2.2.1. Alüminyum ve Saf Alüminyum Döküm Alaşımları.....	6
2.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	6
2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUMA ETKİSİ .....	9
2.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI .....	11
2.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA ISIL İŞLEM UYGULAMALARI .....	14
2.7. Al-Cu-Mg ALAŞIMI .....	15
2.7.1. Al-Cu-Mg Alaşım Grubunda Isıl İşlem.....	16
BÖLÜM 3 .....	18
DÖKÜM ÜRETİM METALURJİSİ .....	18
3.1. DÖKÜM METODU .....	18
3.2. GAZ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ VE GAZ GİDERME.....	19

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.3. ERGİTME OCAKLARI.....	20
3.3.1. Direnç Ocakları.....	20
3.4. ALAŞIMLARDA KATILAŞMA .....	21
3.4.1. Katılma Sırasında Oluşan Hacim Azalmaları.....	22
3.5. MODELLER .....	23
3.5.1. Model Renk Kodları .....	23
3.6. KUM KALIPLAR.....	24
3.7. METAL KALIPLAR .....	25
3.8. DÖKÜM PARÇA KUSURLARI.....	27
BÖLÜM 4 .....	28
MODİFİKASYON VE TANE İNCELTME.....	28
4.1. MODİFİKASYON .....	28
4.1.1. Modifikasyon Metotları .....	28
4.2. TANE İNCELTME İŞLEMİ.....	29
4.2.1. Tane Boyutunun Küçültürerek Sertleştirme .....	32
BÖLÜM 5 .....	34
MALZEME VE METOT .....	34
5.1. MODEL VE KALIPLAMA AŞAMASI.....	34
5.1.1. Model Tasarımı.....	34
5.1.2 Kalıp Tasarımları / İmalatı .....	35
5.2. DÖKÜM VE ISIL İŞLEM .....	35
5.3. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI .....	36
5.3.1. Spektral Analiz .....	36
5.3.2. Metalografi İncelemeleri .....	37
5.3.3. Sertlik Testleri .....	38
5.3.4. Çekme Testi.....	39
BÖLÜM 6 .....	41
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMALAR .....	41
6.1. KİMYASAL ANALİZ SONUÇ VE TARTIŞMA.....	41

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.2. METALOGRAFİ İNCELEMELERİ VE TARTIŞMALAR .....	42
6.2.1. Optik Mikroskop Görüntülerinin İncelenmesi.....	42
6.2.2. SEM ve EDS Görüntülerinin İncelenmesi.....	44
6.2.3. X-Işını Dağılımı Analizi .....	51
6.3. MEKANİK TEST SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR .....	52
6.3.1. Sertlik Ölçümleri Sonuçları ve Tartışmalar .....	52
6.3.2. Çekme Testi Sonuçları ve Tartışmalar.....	53
BÖLÜM 7 .....	56
SONUÇLAR .....	56
KAYNAKLAR .....	58
ÖZGEÇMİŞ .....	63

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Yıllara göre dünya birincil alüminyum üretimi. ....	7
Şekil 2.2. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları dağılımı.....	8
Şekil 2.3. Alüminyum üretiminin ürün çeşitlerine göre dağılımı. ....	8
Şekil 2.4. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması. ....	12
Şekil 2.5. Dövme alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kabiliyeti.....	12
Şekil 2.6. Döküm alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kabiliyeti.....	12
Şekil 2.7. Dövme alaşımları için isimlendirme kriterleri.....	14
Şekil 2.8. Yaşlandırma veya çökelti sertleştirilmesi ısıl işleminin aşamaları.....	17
Şekil 3.1. Üretim yöntemleri.....	18
Şekil 3.2. Metal içinde çözünen gaz miktarının sıcaklık ile değişimi. ....	19
Şekil 3.3. Direnç ocakları.....	21
Şekil 3.4. Ni-Cu Alaşımının katılaşma grafiği.....	21
Şekil 3.5. Katılaşma sırasında hacim değişimleri. ....	22
Şekil 3.6. Çekme ve büzülme olaylarının şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.7. Model renkleri ve anlamları.....	24
Şekil 3.8. Kum kalıp hazırlama safhaları.....	24
Şekil 3.9. Kum kalıp kesiti.....	25
Şekil 3.10. Metal kalıp kesiti.....	25
Şekil 3.11. Metal kalıbın döküm aşamaları.....	26
Şekil 4.1. Al-5Ti-1B ve Al-3Ti-0,75C alaşımlarının tane inceltme performansı. ...	31
Şekil 4.2. Tane sınırında kayma düzlemleri.....	32
Şekil 4.3. Cu-Zn alaşımında tane büyüklüğünün akma dayanımına etkisi.....	33
Şekil 5.1. Döküm boşluğu CAD görüntüsü. ....	34
Şekil 5.2. Metal kalıbın CAD görüntüsü (a) ve kum kalıp modelin maça sandığı görüntüsü (b).....	35
Şekil 5.3. Spektral analiz cihazı. ....	37
Şekil 5.4. Optik mikroskop. ....	37
Şekil 5.5. Mikro sertlik cihazı. ....	38
Şekil 5.6. Makro sertlik cihazı. ....	39
Şekil 5.7. Çekme test numunesi ölçüleri.....	40

Şekil 5.8. Çekme test cihazı. ....	40
Şekil 6.1. Al-Cu-Mg alaşımı ve modifikasyon ve uygulanan tane inceltme işlemi sonrası optik mikroskop görüntüleri. ....	43
Şekil 6.2. Al-Cu-Mg Alaşımı ve modifikasyon ve uygulanan tane inceltme işlemi sonrası kum kalıp sem görüntüleri. ....	45
Şekil 6.3. Al-Cu-Mg Alaşımı ve modifikasyon ve uygulanan tane inceltme işlemi sonrası metal kalıp sem görüntüleri. ....	46
Şekil 6.4. Kum kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS'li SEM görüntüleri (a)Al-Cu-Mg, (b) Al-Cu-Mg+Sr, (c) Al-Cu-Mg+Sr+%0,5Al <sub>5</sub> TiB, (d) Al-Cu-Mg+Sr+%1 Al <sub>5</sub> TiB, (e) Al-Cu-Mg+Sr+%1,5Al <sub>5</sub> TiB. ....	47
Şekil 6.5. Metal kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS'li SEM görüntüleri , (a)Al-Cu-Mg, (b) Al-Cu-Mg+Sr, (c) Al-Cu-Mg+Sr+%0,5Al <sub>5</sub> TiB, (d) Al-Cu-Mg+Sr+%1 Al <sub>5</sub> TiB, (e) Al-Cu-Mg+Sr+%1,5Al <sub>5</sub> TiB. ....	49
Şekil 6.6. Al-Cu-Mg alaşımlarının XRD sonuçları. ....	51
Şekil 6.7. Al-Cu-Mg alaşımları ortalama çekme mukavemeti. ....	54
Şekil 6.8. Al-Cu-Mg alaşımları ortalama kopma uzama % değerleri. ....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Çeşitli metallerin yoğunlukları. ....	4
Çizelge 2.2. Alüminyum kimyasal özellikleri. ....	5
Çizelge 2.3. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi. ....	11
Çizelge 2.4. Al-Cu-Mg Alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık). ....	15
Çizelge 3.1. Bazı metallerin hacimce % çekmesi. ....	23
Çizelge 4.1. Tane inceltici master alaşımlar. ....	30
Çizelge 5.1. Al-Cu-Mg alaşımı, Al10Sr ve Al5TiB kimyasal bileşimi. ....	36
Çizelge 6.1. Al-Cu-Mg alaşımlarının döküm işlemi sonrası kimyasal analiz sonuçları.....	41
Çizelge 6.2. Kum kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS analizleri.....	47
Çizelge 6.3. Metal kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS analizleri. ....	50
Çizelge 6.4. Al-Cu-Mg Alaşımlarına ait mikro ve makro sertlik değerleri. ....	52
Çizelge 6.5. Al-Cu-Mg alaşımlarına ait ortalama çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri.....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

AA : alüminyum alaşımı

Al : alüminyum

Cu : bakır

Mg : magnezyum

C : karbon

Si : silisyum

Mn : mangan

P : fosfor

S : kükürt

Fe : demir

Ni : nikel

Fe<sub>3</sub>C : sementit

°C : santigrat derece

N : azot

Zn : çinko

vb : ve benzeri

kg : kilogram

mm : milimetre

$\alpha$  : faz diyagramında gösterilen primer alaşımlandırma elementi

$\beta$  : faz diyagramında gösterilen sekonder alaşımlandırma elementi

MPa : mega-pascal

$\theta$  : guinier – preston çökelti

$\theta'$  : guinier – preston çökelti fazı 1. ara kademe

$\theta''$  : guinier – preston çökelti fazı 2. ara kademe

## **KISALTMALAR**

XRD : X-ray Diffraction (X-Işınımı Difraksiyonu)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

OM : Optik Mikroskop

ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

GP : Guiner – Preston Zonu

YMK : Yüzey Merkez Kübik

CAD : Computer Aided Desing (Bilgisayar Destekli Tasarım)

CNC : Computer Nümeric Control (Bilgisayarlı Nümeric Kontrol)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Havacılık, savunma ve endüstriyel alanlarında döküm metodu ile üretilip kullanılan Al-Cu-Mg alaşımları ısıtılma işlemine uygun alaşım grubudur. Al-Cu ve Al-Mg bileşikleri, kendi aralarında intermetalik bileşik ve/veya çökelti oluşturularak, mukavemetlendirilmesi mümkündür. Demir dışı malzemeler kategorisinde iki serisi alüminyum grubu olarak bilinen, Al-Cu-Mg alaşımlarından en yaygın kullanılan AA2024 alüminyum alaşımıdır [1]. Döküm alüminyum alaşımları, dökülebilirlik, korozyon dirençleri ve dayanım/ağırlık oranları sebebiyle, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedirler [2]. Bir çok parçanın imalatında, havacılık endüstrisinde Al-Cu-Mg alaşımı tercih edilir. Al-Cu-Mg alaşımları akıcılığının yüksek ve ergime sıcaklığının düşük olması sebebiyle döküm metodu ile üretimi tercih edilmektedir [3,4]. Ancak döküm hataları mekanik özellikleri ve mikro yapıyı etkilediği daha önceki çalışmalarda vurgulanmıştır [5,6]. Döküm hataları, genellikle ergitmede kullanılan şarj malzemesi ve yolluk sisteminden kaynaklanan oksit, metal dışı inklüzyonların kalıp boşluğuna ulaşması, uygun tasarlanan yolluk sistemi tasarımıyla engellenebilmektedir [7,8]. Sıvı fazdan katı faza geçiş esnasında, katılma çekmesinden kaynaklanan boşluklar meydana gelmektedir. Bu durumun nedeni yoğunluk farkıdır. Gaz ve çekme boşlukları birbirinden ayrı veya bir arada da olabilmektedir. Gaz boşlukları mikro yapıda, çekme boşluklarına göre daha küresel ve düzgün bir şekle sahiptir fakat çekme boşlukları daha karmaşık ve pürüzlü bir şekle sahiptirler [9]. Döküm malzemelerde meydana gelen mekanik değişimlerden bir tanesi de uygulama esnasında yapılan tane inceltme işlemidir. Yapılan tane inceltme işleminin malzemenin mekanik özelliklerine, mukavemet değerine gibi birçok parametresine etkisi gözlenmiştir [10].

Sıvı haldeki alüminyuma ilave edilen tane incelticiler, heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşmaktadır. Heterojen çekirdeklenme, yapının daha ince taneli olmasını sağlar. Alüminyum alaşımlarında tane inceltmenin, daha az gözenekli bir yapıya neden olduğu, mekanik özellikleri iyileştirdiği, alaşımın katılaşması sırasında sıcak yırtılma ve çatlama hatalarını en aza indirdiği, yorulma ve sızdırmazlık dirençlerini artırdığı bilinmektedir [11]. Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemi, ilk olarak titanyum ve bor içeren tuz flaksların, eriyik haldeki alaşım içerisine eklenmesi ile başlamıştır. Uygulamanın hidrojen miktarını artırma, inceltme işleminin tam olarak yapılamaması ve gaz oluşması gibi olumsuz etkileri meydana çıkmıştır. Alüminyum döküm alaşımlarında en verimli şekilde tane inceltme işlemi, Al-Ti ve Al-Ti-B master alaşımlarının ilavesi ile başlamıştır [12].

Bu çalışmada, Al10Sr ile modifikasyon ve AlTi5B tane inceltme işlemi Al-Cu-Mg alaşımına uygulanmıştır. Hazırlanan alaşımlar kum ve metal kalıba döküm metodu ile dökülmüştür. Modifikasyon ve tane inceltme işlemi uygulanmış Al-Cu-Mg alaşımlarına döküm sonrasında T06 ısıl işlemi yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde optik, taramalı elektron mikroskobu ve X-ışınım kırınımı metodu ile faz dönüşümleri incelenmiştir. Mekanik özellikleri, çekme testi, mikro ve makro sertlik sonuçları ile değerlendirilmiştir.

## BÖLÜM 2

### ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

#### 2.1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Alüminyum (Al) alaşımları YMK kafes sistemine sahiptir. Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri, alaşımın istenilen mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Al ve Al alaşımları yer kabuğunda demir esaslı malzemelerden sonra en önemli malzeme grubunu oluşturmaktadır. Yoğunluğu düşük diğer metaller arasında da gerek saf gerekse alaşım halinde oldukça çok kullanılmaktadır [13,14]. Mekanik dayanımın yoğunluğa oranının düşük olmasından dolayı ilk olarak konstrüksiyon uygulamalarında ve düşük karbondioksit salınımı yüzünden otomobil sektöründe taşıt ağırlığının azaltılmasından sıklıkla tercih edilen malzeme grubundandır. Elektrik iletkenliği diğer alaşım gruplarına göre daha yüksek olan Al ve alaşımlar özellikle, yüksek gerilim hatlarında bakıra alternatif olmuştur. Atmosfere ve birçok korozif ortama karşı korozyon direnci yüksektir. Parlak ve yarı parlak yüzey elde edilebilmesinden dolayı dekoratif görünüm sağlanabilmektedir. İlave olarak alüminyum ve alüminyum alaşımlarının soğuk deformasyon işlemi ile kolay şekillenebilmesi, film veya şerit halinde getirilebilmesi diğer öne çıkan özelliğidir. Bütün bu avantajları ile birlikte, saf halde, çekme ve akma mukavemetinin düşük olması, oksijene karşı ilgisinden dolayı döküm kabiliyetinin nispeten az veya zor olması, kaynak ve lehimleme kabiliyetinin düşük oluşu, bazlara, hidroksitlere karşı dirençsizliği dezavantajı olarak sayılabilir. Alaşımlama ile istenilen özelliklerin önemli oranda iyileşme sağlanmaktadır. Uçak ve otomotiv endüstrisinde ağırlık önemli bir parametredir. Çeşitli metallerin alüminyuma göre yoğunlukları Çizelge 2.1’ de verilmiştir. Çizelgeden anlaşılacağı gibi alüminyum ve alaşımları diğer metallere göre oldukça düşük yoğunluğa sahiptir. [13].

Çizelge 2.1. Çeşitli metallerin yoğunlukları.

<b>Çeşitli Metallerin Yoğunlukları</b>		
<b>Metaller</b>	<b>Özgül Ağırlık</b>	<b>İzafi Ağırlık</b>
Al- Alaşımları	2,8	1,00
Mg- Alaşımları	1,8	0,64
Çinko	7,1	2,60
Kalay	7,3	2,66
Çelik	7,9	2,82
Pirinç	8,5	3,03
Bronz	8,8	3,14
Nikel	8,9	3,18
Bakır	8,9	3,18
Kurşun	11,3	4,03

Alüminyum alaşımları ısı işlemler ile istenilen mekanik özelliklere (çekme mukavemeti, tokluk, sertlik vb.) geliştirilebilmektedir. Alüminyum alaşımlarının en büyük ayrıcalığı mekanik özelliklerin iyileştirilebilir olmasıdır. Alüminyum alaşımlarının korozyon direnci oldukça iyidir. Oksidasyona maruz bırakılan alüminyum alaşımlarını korumak için kaplama ve boya gibi işlemler gerektirmemektedir. Alüminyum ve alaşımları ayrıca, kimyevi maddelere dirençli olduğu için petrol ve kimya endüstrisinde kullanımı oldukça fazladır. Alüminyum ve alaşımlarının ısı ve elektrik iletkenliği yüksektir. Isı iletiminin gerektiği parçalarda, bilgisayar, otomasyon vb. elektronik soğutucu sistemlerinde, pistonlar, silindir kafaları, mutfak eşyaları, kalorifer radyatörlerinde kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının, işlenebilme kabiliyeti, sıcak ve soğuk şekil alabilme yeteneği bulunmaktadır. Alüminyum alaşımları birçok uygulamada haddeleme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu yüzden birkaç mikron kalınlığında folyo şekli alabilmektedir. Ayrıca diğer metallerle nazaran hem daha hafif ve hem de düşük ergime sıcaklığı (660°C) avantaj sağlamaktadır. Çizelge 2.2' de alüminyum malzemelere ait kimyasal özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri.

<b>Temel Özellikler</b>	
Atom numarası	13
Element serisi	Metal
Grup, Periyot, Blok	13, 3, p
Atom ağırlığı	2,99g/mol
Görünüş	Grimsi
<b>Fiziksel Özellikler</b>	
Maddenin hali	Katı
Yoğunluk	2,70 g/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	660,32 °C
Kaynama noktası	2519 °C
<b>Atomsal Özellikler</b>	
Kristal yapısı	Yüzey Merkez Kübik
İyonlaşma enerjisi	577,5 Kj/mol
<b>Diğer Özellikler</b>	
Elektrik direnci	26,50 nΩ·m (20°C'de)
Isıl iletkenlik	237 W/(mK) (25°C'de)
Vickers sertliği	167
Brinel sertliği	245

## 2.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TARİHÇESİ

Alüminyum - silisyum alaşımları çok tercih edilen alaşımlardır, fakat elde edilen alaşımın titiz elde edilmemesi ve çok az miktarda elde edilmesi alüminyum alaşımının özelliklerinin belirlenememesinin sebebi olmuştur. 1825’de az miktarda Dersted, alüminyum - silisyum alaşımı hazırlamıştır. Alman Wöhler gri pudra benzeri alüminyumu 1827’de elde etmiştir. 1854 ve 1856 yıllarında sırasıyla saf alüminyum ve alüminyum – silisyum alaşımlarını elde edip ve özelliklerini de ortaya Saintre - Claire DEVİLLE koymuştur. Alüminyum ve alaşımlarına su verilmesiyle alakalı bulgular 1905 senesinde Conrad CLAESSEN tarafından belgelenmiştir. Su verme sıcaklığının 525°C olduğu ve alaşım içinde %4 bakır olduğunu belirtmiştir. 1 yıl sonra % 4 bakır alaşımları çalışan Alfred WILM bu alaşım grubunda yaşlanma mekanizması üzerine çalışmıştır.1907’de Almanlar tarafından AL-Cu alaşımlarına Mg ekleyerek ısıtma işlemi

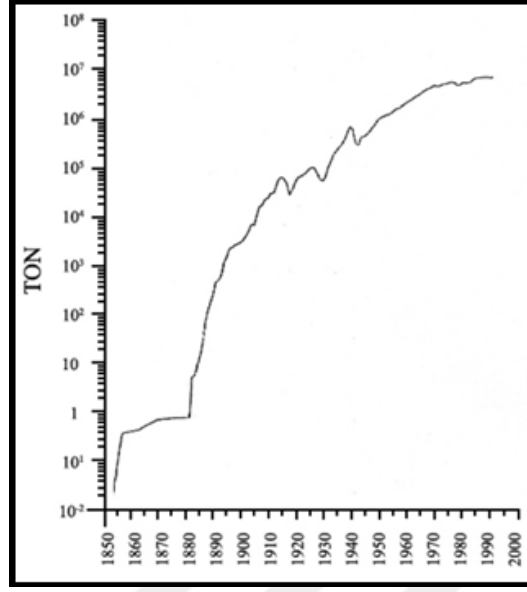
tabii tutulamayan Al-Cu-Mg alaşımı elde etmişlerdir. Alfred WILM, 1911'de alaşımlar üzerine yaptığı çalışmalar ile ilgili söz konusu alaşımın % 3,5 bakır % 0.25 Mg içerdiğini su verme sıcaklığının ise 500°C olduğunu, işlem sonrası alaşımın az sert olduğunu zamana bağlı olarak sertleşme meydana geldiğini, başlangıçta hızlı sonrasında yavaş olduğunu farketmişlerdir [14,15].

### **2.2.1. Alüminyum ve Saf Alüminyum Döküm Alaşımları**

Alüminyum dünyada en çok bulunan elementlerden biridir. Saf alüminyumun kullanımı ise pek yaygın olmamakla birlikte elektrik ve elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır. Alüminyuma çoğunlukla bakır, magnezyum, silisyum ve çinko gibi elementlerle alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Alüminyum modern inşaat, otomotiv, havacılık, enerji gıda ve diğer sanayi türlerinde yaygın olarak kullanılan elementtir. Alüminyum döküm halinde bulunduğu zaman ergime sıcaklığının düşük olması, iyi akıcılık, tane yapısını kontrol etme kabiliyeti, düzgün yüzey kalitesi, gaz geçirgenliğinin düşmesi, talaşlı imalatta işlenebilirlik kazanması, ısıl işlem ile mekanik özelliklerde artış gibi bazı avantajlara sahiptir.

### **2.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI**

Al ve alaşımları imalat işlenebilme kabiliyeti, süneklik, teminat kolaylığı, maliyetinin uygun, korozyon dayanımı ve alaşımlanabilirliği nedeniyle birçok sektörde kullanılan bir metaldir. Demir ve bakır kullanımı, çeşitli konstrüksiyonların tasarımında, elektrik endüstrisinde, iletkenlerde ve taşıt araçlarının ağırlıkların önemli lde azaltılması nedeniyle alüminyum tercih edilerek kullanımı artmıştır. Bu yüzden alüminyum ve alaşımları geniş ürün yelpazesinde kullanım ve uygulama alanına sahiptir [14]. Şekil 2.1'de birincil alminyu üretimi yıllar referans alınarak verilmiştir [16].



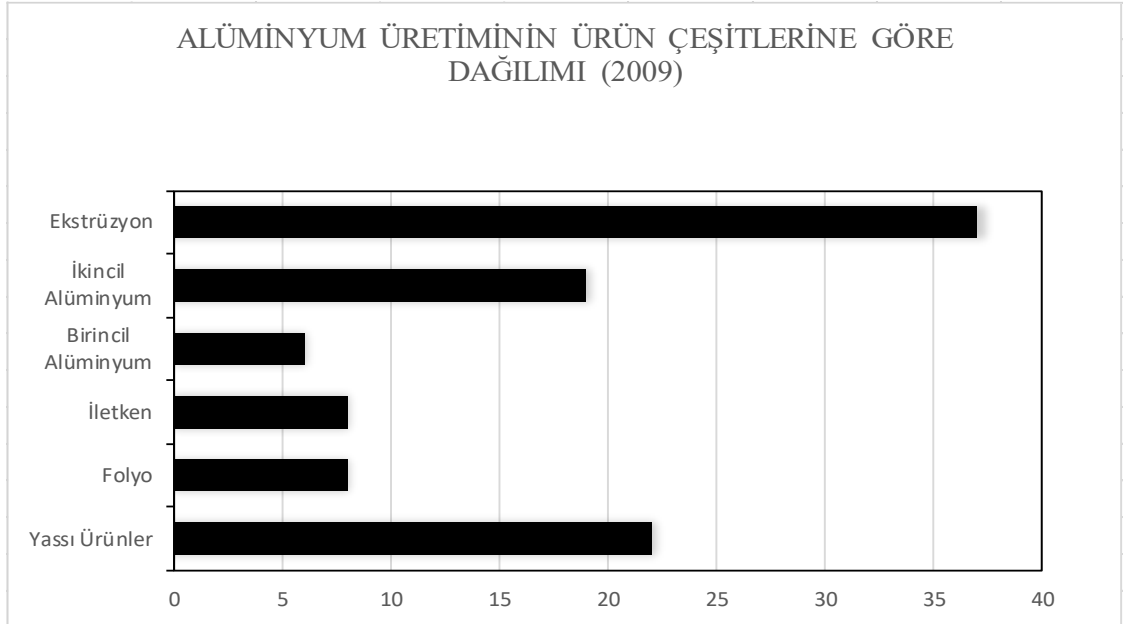
Şekil 2.1. Yıllara göre dünya birincil alüminyum üretimi.

Şekil 2.1' den anlaşılacağı gibi 1850-2000 yılları arasında Al ihtiyacı gittikçe artmıştır. Günümüzde de durum böyledir. Son yıllarda arz ve talep dengeleri değişmiştir [16]. Kullanım sebeplerini daha somut açıklamak adına örnek verecek olursak genel olarak hızlı soğuyan ve ısı kapasitesi yüksek bir demir dışı malzeme olması nedeniyle soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde geniş bir kullanım alanı mevcuttur. Ayrıca Al ve alaşımları genel anlamda, otomasyon ve bilgisayar teknolojisinde soğutucu yapımında, havacılık ve otomobil motorlarında tercih edilmektedir. Bunun yanında sanayide çok kullanılan demir dışı malzeme olan Al günlük hayatta her zaman karşımıza çıkan bir demir dışı metaldir. Basınçlı döküm yöntemi ile üretilen saf Al (% 99.7 Al içermektedir.) asenkron motorların rotor üretiminde kullanılır [17-19]. Al ve alaşımlarının genel kullanım alanları; inşaat sanayi, kimya sanayi, demir-çelik sanayi, metalürji sanayi, silah sanayi, uçak sanayi, savunma sanayi, gemi sanayi, beyaz eşya sanayi, uzay araçları, pencere sistemleri ve elektrikli araçlardadır. Şekil 2.2' de Alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanlarındaki kullanım miktarı yüzde halinde verilmiştir [20,21].



Şekil 2.2. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları dağılımı.

Şekil 2.2’ de Al ve alaşımlarının sektörler göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Şekil 2.3.’ te alüminyum alaşımları üretim ürün çeşidi göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur [21].



Şekil 2.3. Alüminyum üretiminin ürün çeşitlerine göre dağılımı.

## 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUMA ETKİSİ

Bakır (Cu) % 1-12 oranları arasında Al eklenen temel alaşım elementidir. Alaşımdaki Cu miktarı sıcak yırtılmaya karşı mukavemeti azalttığından dökümü zorlaştırmakla beraber Cu miktarı arttıkça alaşımın akıcılığı, çekme mukavemeti değerleri ve sertlik değeri artmaktadır. Bakır termal genleşmeyi azaltır, alaşımın işlenebilme yeteneğini artırır. Dövme Al. alaşımlarda bakır oranı % 3-5 oranlarındadır. Eğer % 5'ten fazla Cu bulunur ise, malzemenin talaşlı imalat yeteneğini, elektrik iletkenliği ve korozyon direnci olumsuz yönde etkilenmektedir. Döküm alaşımlarda ise Silisum miktarı % 10-12 civarındadır, bazı uygulamalarda Si miktarı % 20 oranına kadar ilave edilmektedir. Alüminyum döküm alaşımlarda % 12 ve üzerinde Si alüminyum alaşımının akıcılık kabiliyetine ve yüksek sıcaklıktaki mukavemet dayanımını artırmaktadır. Eğer alaşıma, eser miktarda Mg' da ilave edilirse, ısıtma işlemi uygulanabilen Al-Si alaşımlarında  $Mg_2Si$  çökeltileri meydana gelerek alaşımın mukavemeti artırılabilir. Mg ilavesi ile alaşımın, korozyon dirençleri, ısıtma ve elektrik iletkenlikleri olumlu, fakat termal büzüşme ve işlenebilme kabiliyetini olumsuz etkilemektedir. Alüminyuma Mg ilavesi bir oksit oluşumuna sebep olmaktadır. Mg elementinin, Al elementine nazaran oksijene karşı büyük ilgisi alaşımın dökümünü zorlaştırır. Bu durumun önüne geçmek amacıyla alaşıma berilyum ilave edilir. Oksitlenen Al ve/veya alaşımı Mg kaybetme eğilimindedir bu nedenle özel döküm teknikleri ile dökümün gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Mg ilavesi ile alüminyum ve alaşımlarında oluşan  $Al_2O_3$  oksitlerinin yanında spinel yapıda oksitler oluşmaktadır. Oluşan bu oksitleri engellemek veya minimize etmek için ergiyik metale klor gazı verilmesi gerekmektedir. % 8 Mg içeren alüminyum alaşımlarının korozyon dayanımları yüksektir. Mangan (Mn) Al ve alaşımlarında tane inceltici element olarak kullanılmaktadır. Alaşımın korozyon direncini etkilemeksizin çekme test sonuçlarını (çekme ve akma dayanımı, yüzde uzama) ve ergime derecesini artırır. Fakat Mn' ın demirle birleşmemesi gerekir, şayet birleşmesi durumunda kaba taneli yapıya sebep olur ve alaşımın mukavemetini olumsuz etkilemektedir. Al ve alaşımlarına ilave edilen manganın ısıtma işlemi üzerine bir etkisi yoktur. Al-Mn alaşımları ısıtma işlemi cevap vermeyen alaşımlardandır. Çinko Al ve alaşımlarında istenmeyen bir alaşım elementidir. Genellikle sarj malzemesi üretiminden gelmektedir. Sadece haddeleme kabiliyetini artırmaktadır.

Özellikle magnezyumla birlikte alaşıma eklenirse haddelenme kabiliyetini artıracak gibi çekme ve darbe mukavemeti artırmaktadır. Artan çinko miktarı al ve alaşımın soğuma esnasında çekme miktarını ve akıcılığı artırmakla beraber, yüksek sıcaklıktaki servis şartlarında mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Bu sonuçtan kaçınmak için dökümün hızlı soğutulması ve çıkıcıların geniş kesitte kullanılması gerekir. Titanyum (Ti) Alüminyum alaşımlarında tane inceltici bir etki göstermektedir. Genellikle alüminyum ve alaşımlarına Al-Ti-B master alaşımı ilave edilmektedir. Al ve alaşımlarında titanyum miktarı genellikle, % 0,05-0,2 aralığında ilave edilmektedir. Ti ilavesi akışkanlığı azaltmakta ve kalıbın dolmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle basınçlı döküm alaşımlarına Ti ilaveli alaşımların dökümü uygun değildir, ayrıca basınçlı dökümlerde soğuma hızı yüksek olduğundan küçük taneler kendiliğinden oluşmaktadır. Titanyum çekme ve akma dayanımını ayrıca sünekliliği arttırmaktadır [21-23]. Demir bazı uygulamalarda mukavemeti, yüksek sıcaklıklarda sertliği, döküm kalıplarının sıcak yırtılmaya olan direncini artırmak gibi alaşım özelliklerini iyileştirici özelliğe sahiptir. Sıvı-katı bölgedeki çekme miktarını azaltmak için alaşıma demir ilave edilmektedir. Fakat demir ilavesi ile mikro yapıda farklı kimyasal kompozisyonlara sahip Al-Si-Fe intermetalikleri oluşmaktadır, bu intermetaliklerin morfolojisi plaka şeklinde olduğundan dolayı mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Nikel (Ni) Al alaşımlarına düşük miktarlarda ilave edildiğinde dayanım ve sertliği artırır. Alaşıma parlaklık ve yansıtıcılık vererek yüzey kalitesini yükseltir. Kalay (Sn) genellikle metal ergidikten sonra eklenen alaşım elementidir. Alüminyum alaşımlarına Cu ve Ni ilave edildiğinde dayanıklı bir alaşım meydana getirir. Kalay servis sıcaklığını düşünmeksizin mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Alaşıma ilave edilen toplam Cu ve Ni miktarı % 0,5-1 arasında olduğunda süneklilik azaltmaktadır. Ana matris Al alaşımlarının en önemli alaşım elementlerinde birisi de kalaydır. Kurşun, Sn ile birlikte alaşıma ilave edildiğinde alaşımın işlenebilirlik kabiliyeti arttırmaktadır. % 0,5 oranından az miktarlarda ilave edilmesi uygundur. Alüminyuma göre daha katodik olduğundan alaşımının korozyon direncini düşürür. Alüminyum içerisindeki çözünürlüğü düşürür. Krom % 0,1-0,6 miktarında ilavesi uygundur. Tane küçültmek için ve Ti ile beraber kullanılır. Al-Zn-Mg alaşımlarına, korozyona karşı dayanımını artırmak ve gerilimden kaynaklı çatlak oranını düşürmek için ilave edilir. Cr, Alüminyum alaşımlarında afinitesi çok düşüktür. İkinci faz çökmesine rastlanmadığından Alüminyum ve alüminyum alaşımları, krom

alaşımaları ısıtıl işlem için uygun değildirler. Mikroyapıda oluşan gelen Cr-Al bileşikleri yüksek sıcaklıklarda mukavemeti arttırırlar ve korozitif ortama karşı dayanıklı hale getirirler. Bor (B) % 0,01 oranında kullanılması uygundur. Ti ile eklendiğinde tane küçültücü olarak kullanılır. Bor kullanılmadığında ergitme esnasında Ti tane inceltme etkisi azalmaktadır. Titanyum, bor gibi akma dayanımı ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerde sünekliliği artırır. Başlıca alaşım elementlerinin alüminyum alaşımlarına etkisi Çizelge 2.3’ da tabloda verilmiştir [23,24].

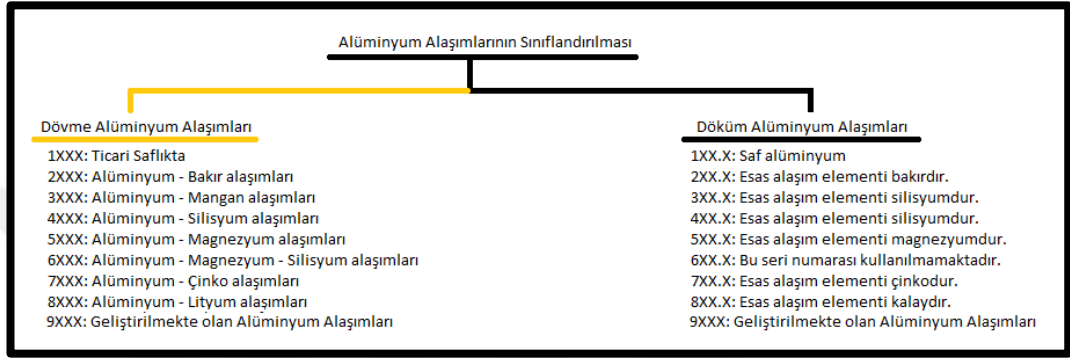
Çizelge 2.3. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi.

Nitelikler ve Alaşım Elementleri	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	C	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma mukavemeti	++	+	+	++	+	+	+			-
Elastik sınır	++	+	-	+	-					
Sertlik	++		-	-	+			+	+	
Isıya dayanıklılık	++		++		+				+	
Kaynak kabiliyeti	-	++	+	-	-		+	+		+
İşlenebilirlik	++	-	+	+	+		++	+	++	+
Elastikiyet modülü	+	++	-	+	+	++		+	-	
Döküm kabiliyeti	+	++	-	+			+	-	-	
Süneklilik	-	--	+				+		--	
Korozyon dayanımı	-	+	++	+				-	--	++
Anodizasyon elverişsizlik	-	+	++	+				-		
++ Önerilir, + İyi, - Ortanın altında, -- Kaçınılması gerekli										

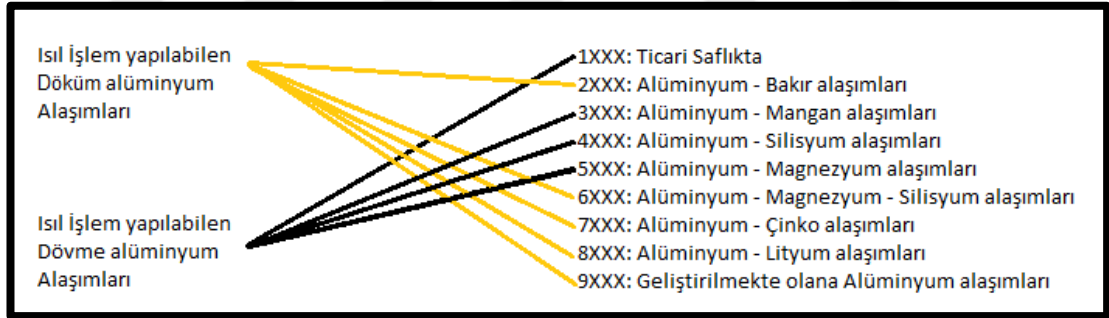
## 2.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Alüminyum alaşımlarından döküm alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesi ve sınıflandırılması kimyasal yapı göz önüne alınarak yapılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının isimlendirme kriteri, üç rakam ve virgülden sonra bir tane rakamla yapılmaktadır. İşlenecek alüminyum için de dört haneli rakam dizilimi kullanılarak yapılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri değişir. Alüminyum alaşımları, dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları iki gruba ayrılır. Dövme

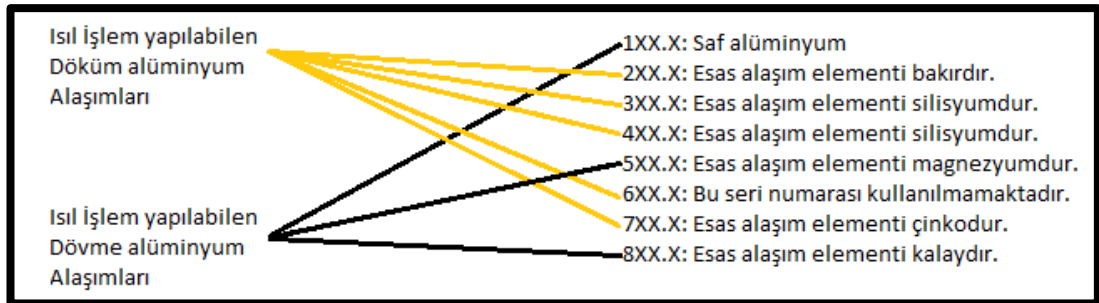
alüminyum alaşımlarının, plastik deformasyona uygundur ve kolayca şekillendirilebilirler. Şekil 2.4. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılmasında dövme ve döküm alüminyum alaşımları resmedilmiştir. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıl işlem uygulanabilmektedir. Şekil 2.5. ve Şekil 2.6'te dövme ve döküm alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kabiliyetleri resmedilmiştir [22-26].



Şekil 2.4. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.



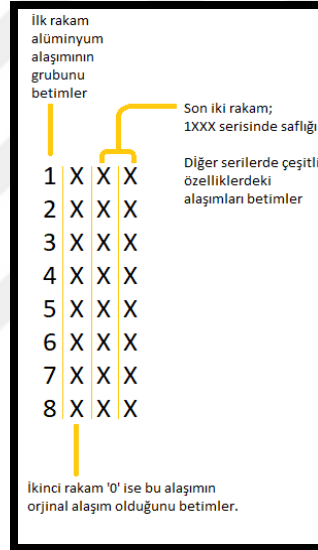
Şekil 2.5. Dövme alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kabiliyeti.



Şekil 2.6. Döküm alüminyum alaşımlarının ısıl işlem kabiliyeti.

1XXX: Ticari saflıktaki alüminyumlardır, alüminyum saflıkları % 99,3-99,7 arasındadır. Elektrik/elektronik ve kimya sanayinde tercih edilmektedir. 2XXX: Bakır ana alaşım elementi olan Al-Cu alaşımlarında diğer alaşım elementlerini de içermektedir. Havacılık sektöründe ve yüksek mukavemet beklentisinin bulunduğu parçaların imalatında kullanılır. Isıl işleme uygun olan bu seri korozyon dayanımı, düşük akıcılığa, düşük sünekliliğe sahiptir. Bu alaşımların yaşlandırma ile % 100 mukavemet artışı sağlanabilir. Bu serinin kullanım alanları ise otomotiv ve uçakların silindir kafalarında dizel motorların pistonlarında ve egzoz sistemlerinde kullanılan parçalarda görülmektedir. 3XXX: Mangan ana alaşım elementi olan Al-Mn alaşımları boru, sıvı ve gaz tankları, mimari restorasyon ve temel tasarım uygulamalarında tercih edilirler. Bu seriye ısıl işlem uygulanabilir. 4XXX: Al-Si ısı karşısında hacimsel genişleme miktarı düşüktür. Kaynaklı konstrüksiyon yapılarında, levha üretiminde ve otomobil parçaları üretiminde aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek olduğu için kullanılmaktadır. Ana alaşım elementi silisyumdur. Yüksek dayanım, düşük süneklilik, iyi akıcılık, iyi işlenebilirlik ve iyi aşınma dayanımı özellikleri göstermektedir. Bu serinin kullanım alanları ise otomobil silindir blokları, otomobil jantları, havacılıkta birleştirme elemanları, kompresör veya pompa parçalarında kullanıldığı görülmektedir. Alüminyum silisyum alaşımı olan bu seriye ısıl işlem uygulanamaz. 5XXX: Ana alaşım elementi magnezyum olan Al-Mg alaşımlarının Mg miktarı arttıkça mekanik özelliklerinde artma gözlenmektedir. Denizcilike güçlü korozyon ortamlarında kullanılacak olan parçalarda kullanılmaktadır. Alüminyum magnezyum alaşımı olan bu seriye ısıl işlem uygulanmaz. Bakır ilavesi ile ısıl işlem kabiliyeti kazandırılabilir. Ayrıca anodize edilerek iyi yüzey görünümü elde etmek mümkündür. Bu serinin kullanım alanları ise kum kalıba döküm yöntemi ile elde edilen parçalarda kullanıldığı görülmektedir. 6XXX: Magnezyum ve siliyum ana alaşım elementi olan Al-Mg-Si alaşımları şekillendirilebilirliği iyidir. Al-Mg-Si alaşımları ekstrüzyon metodu ile üretilen parçaların imalatında kullanılmaktadır. Alüminyum çinko alaşımı olan bu seriye ısıl işlem uygulanabilir. İyi boyutsal kararlılık, iyi korozyon dayanımı, kötü döküm özellikleri, iyi işlenebilirlik (bakır ilavesi ile) özellikleri göstermektedir. Bu serinin kullanım alanları ise boyutsal kararlılık ve korozyon direnci istenen parçaların imalatında kullanılır. 8XXX: Ana alaşım elementi Lityum olan Al-Li alaşımlarına kalay ilavesi yapılabilmektedir. Yorulma direnci yüksek ve yüksek tokluk özelliklerine sahiptirler. Uzay ve havacılık

sektöründe kullanılmaya başlanan bu 8 serisi alüminyum diğer Al alaşımlarına göre maliyetlidir. 9XXX: Geliştirilmekte olan alaşımlardır. Alüminyum dövme (mekanik işlem) alaşımları: 2XXX, 6XXX, 7XXX, 8XXX serisi alüminyum alaşımlarının ısıtılma kabiliyeti vardır. Çökme sertleşmesi ısıtılma işlemi ile mukavemet artırılabilir. 1XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX serisi alüminyum alaşımlarının ısıtılma kabiliyeti yoktur. Bu seri alaşımlar şekil değiştirmeye maruz bırakılarak mukavemet kazandırılır. Alüminyum döküm alaşımları: 2XX.X, 3XX.X, 4XX.X, 7XX.X serisi alüminyum alaşımlarının ısıtılma kabiliyetleri vardır. Bu alaşımlar ısıtılma işlemi yoluyla mukavemet kazandırılabilirler. 1XX.X, 5XX.X, 8XX.X serisi alaşım grubu ısıtılma işlemine uygun değildir. Şekil 2.7’te dövme alaşımları için isimlendirme kriterleri resmedilmiştir [27].



Şekil 2.7. Dövme alaşımları için isimlendirme kriterleri.

## 2.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA ISIL İŞLEM UYGULAMALARI

Alüminyum alaşımlarında ısıtılma işleminin farklı uygulamaları vardır. Bu uygulamalar; O: Tavlanmış, F: ham halde, H: Sertleştirme işlemi yapılmış, T: Isıtılma işlemi uygulanmış T01: Sıcak şekillendirme işleminden sonra doğal yaşlanma yapılmış. T02: Sıcak şekillendirme işleminden sonra yaşlanma yapılmış. T03: Solüsyona alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlanma yapılmış. T04: Solüsyona alma işlemi ve doğal yaşlanma yapılmış. T05: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış. T06: Solüsyona alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış. T07: Solüsyona alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma

yapılmış. T08: Solüsyona alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış. T09: Solüsyona alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş. T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmıştır [28-29].

## 2.7 Al-Cu-Mg ALAŞIMI

Al-Cu-Mg alaşım grubu mukavemet ve yüzde uzama değerleri ısı işlem durumuna göre değişmektedir. Tipik olarak çekme mukavemeti 470MPa, akma mukavemeti 325MPa ve yüzde uzaması 20' dir. Al-Cu-Mg alaşımı korozyon direnci diğer alaşımlar kadar iyi olmayıp kaynaklanabilme kabiliyeti kötüdür. Daha çok mekanik olarak birleştirilir. Al-Cu-Mg alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 2.4'te verilmiştir [30,31].

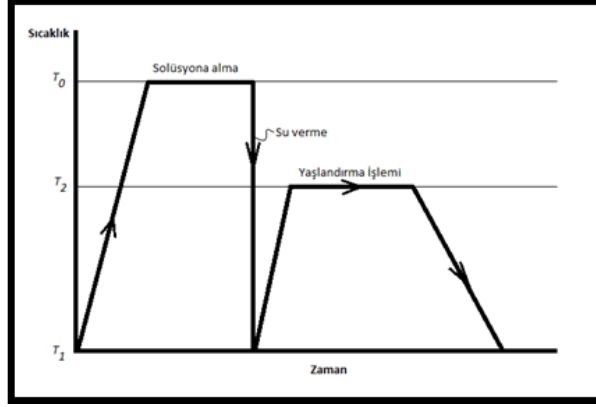
Çizelge 2.4. Al-Cu-Mg Alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).

%Al	%Cu	%Si	%Mn	%Mg	%Fe	%Cr	%Ti	%B	%Diğer
90 – 92	4-5	0,3-0,4	0,4- 0,6	1,25- 1,35	0,4- 0,6	3,4-4	<0,02	<0,01	2,6-2,8

Al-Cu-Mg alaşım grubu soğutma plakaları için idealdir. Yüksek ısı iletkenliği ve dökülebilirlikte kolaylık nedeni ile tercih edilirler. Uçak imalatında teknolojik farklılıkları ortaya çıkaran en önemli unsur uygun çalışma koşullarında hafif olmasıdır. Bu nedenle 2 serisi Al alaşımları havacılık sanayinde kullanılmaktadır. Otomobillerde yapının enerjisi absorbe yeteneği, malzemenin mekanik özelliklerini, tasarım ve montaj şekilleriyle belirlenmektedir. Çarpışma testlerinde, enerji absorbe karakteristiklerinin Al alaşımlarıyla iyileştirilebildiğini göstermektedir. Bu sebeple alüminyum ön darbe sistemlerinde kullanım için idealdir. Tasarımlarda ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş alüminyum parçaları ile konstrüksiyonu daha güçlü hâle getirmek mümkündür. Yarı yarıya kadar ağırlık kazancı elde edilebilir. Al-Cu-Mg alaşım grubu avantajlarından biri de alüminyumun doğasından gelen yapısal kararlılıktır. Taşıta meydana gelen ani hız ve yön değişiklikleri yüzeyine temas eden kuvvetlerde değişime ve makro skalada zorlanma, burkulma vb. gerilmelere sebep olmaktadır. Taştın ağırlığının az olması ve yapısal kararlılığa sahip alüminyum alaşımı bu gerilmelere dayanmaktadır [31,32].

### 2.7.1. Al-Cu-Mg Alaşım Grubunda Isıl İşlem

Isıl işlem: Metal malzemelerde istenilen özellikleri kazanmak amacı ile ısıtma/soğutma işlemi ve/veya işlemler zinciri olarak bilinmektedir. İlgili malzemenin kimyasal yapısını değiştirmeden mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi işlemi/işlemleridir [31,32]. Alüminyum alaşımlarına ilave edilen alaşım elementleri ile ısıtma işlemi uygulanmasına cevap verebilmektedir. Isıl işlem sonrası yapıda oluşan çökeltiler, mekanik dayanımı arttırdığı bilinmektedir. Bundan dolayı, alüminyum alaşımları, ısıtma işlemine uygun ve uygun olmayan alüminyum alaşımları, olarak sınıflandırılabilir. Al alaşımları uygun kompozisyon dahilinde ikinci faz çökeltilerinin oluşması ve bu çökeltilerin boyutuna ve dağılımına bağlı olarak istenilen mekanik özellikler iyileştirilebilir. Bu iyileştirme veya sertleştirme yöntemi “çökelme sertleşmesi” olarak isimlendirilmektedir [32,33]. Al-Cu-Mg alaşım grubu iyi döküm ve mekanik özelliklerine sahip değildir. Bu özellikleri sağlayan alaşım elementleri Mg ve Si'dir. Mg; korozyon ve tribolojik fonksiyonlarda direncini ve dayanımını arttırmaktadır. Si; akıcılığı ve şekillendirilebilirliği olumlu yönde etkiler. Çökelme sertleştirilmesi metodu ile sertleştirilebilen Al alaşımları ilave edilen elemente bağlı olarak farklı çökeltiler ve bileşikler oluşmaktadır [32-35]. Çökelme sertleşmesi ile yapıda  $CuAl_2$  bileşiği ile Al-Cu alaşımları mekanik özellikleri iyileşmektedir. Al-Cu-Mg alaşımları, Mg miktarına bağlı olarak  $CuAl_2$  bileşiği ile birlikte  $Mg_2Si$  bileşiklerini oluşturur ve mekanik dayanım artırılmaktadır [23,27]. Yaşlandırma ısıtma işlemi, üç temel aşamadan oluşmaktadır. Plastik şekil değiştirmesine ihtiyaç duyulmadan ve üretimi sürecini kısaltması çökelme sertleşmesi yöntemini avantajlı kılar. Çökelme sertleşmesi, faz diyagramına göre, solvus eğrisi alaşım gruplarında uygulanabilir. Alaşım elementinin matris fazda çözünme miktarı sıcaklıkla artmaktadır [23]. Çökelme sertleşmesi, solüsyona alma işlemi, su verme (soğutma) ve doğal ve/veya yapay yaşlandırma işlemi ile sonlanmaktadır. Şekil 2.8' de yaşlandırma veya çökelti sertleştirilmesi ısıtma işleminin aşamaları verilmiştir [35].



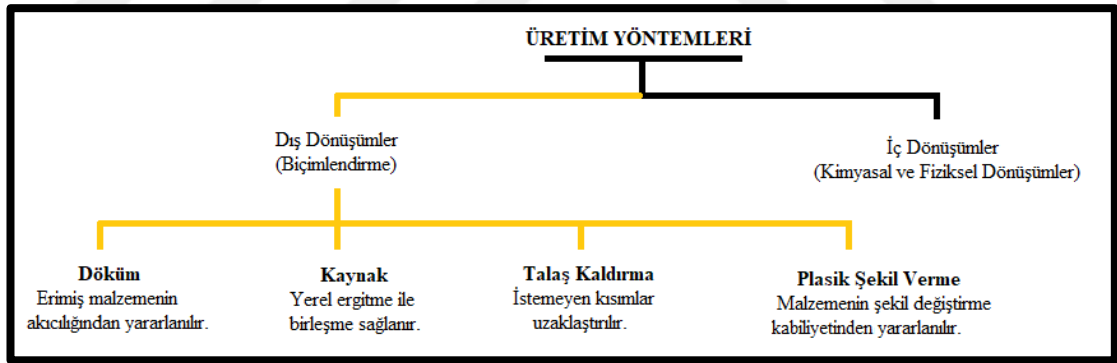
Şekil 2.8. Yaşlandırma veya çökelti sertleştirilmesi ısıl işleminin aşamaları.

## BÖLÜM 3

### DÖKÜM ÜRETİM METALURJİSİ

#### 3.1. DÖKÜM METODU

Arzu edilen parçanın biçiminde kalıp boşluğu bulunan refrakter malzemeden yapılmış kalıba sıvı metalin dökülmesi işlemine döküm işlemine denir. Kalıp boşluğundaki boyutların, istenilen parça boyutlarına uygun olması için alaşım kompozisyonuna bağlı olarak çekme ve termal değişimleri telafi edebilecek şekilde ölçülendirilmesi önemlidir. Sıvı metalin katılaşması ve soğuması sırasındaki boyutsal değişimler bu fazlalıklar ile dengelenmelidir. Sıvı metalin doldurulduğu kalıp açık veya kapalı olabilir. Üretim yöntemleri Şekil 3.1’de resmedilmiştir.



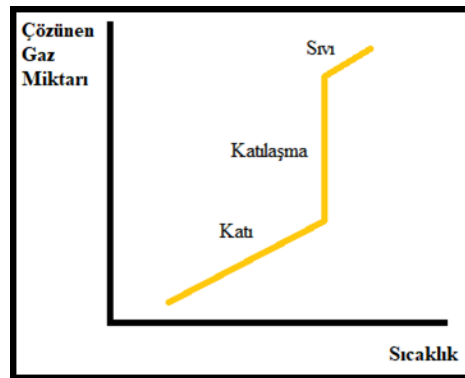
Şekil 3.1. Üretim yöntemleri.

Döküm işleminden önce metal ergitilir ve ergitme derecesinde yaklaşık 50°C - 60°C üstüne çıkarılarak döküm sıcaklığına getirilir. Gerekirse kalıp ısıtılır ve döküm işlemi sıvı metalin kalıp boşluğuna doldurulması ile tamamlanır. Kalıba dolan metalin soğumasıyla katılaşma başlar. Bu safhada önemli miktarda ısı uzaklaşır ve faz dönüşümleri meydana gelebilir. Döküm sonrasında parçaya ait olmayan kısımlar (besleyici, yolluk, meme bağlantıları vb.) temizlenir. Gerekliyse son imalat işlemleri

yapılarak imalat tamamlanır. Döküm kalitesini kalıp türü, kalıp hazırlığında gösterilen titizlik ve döküm tekniği belirler. Kalıp çeşidi seçerken üretilecek parça sayısı, üretim hızı, hassasiyet, yüzey kalitesi vb. dikkate alınır [25]. Bozulur kalıplar döküm işlemi sonrasında tekrar kullanılamaz. Her döküm işlemi için tekrar kalıbın hazırlanması gereklidir. Bozulmayan kalıplarda döküm işlemi sonrasında oluşturulan kalıp tekrar kullanılabilir. Her döküm işlemi için tekrar kalıbın hazırlanması gerekli değildir. Döküm yönteminin üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir: Yöntemin sınırları çok geniştir. Çok küçük parçaların üretiminde ve ton bazlı üretimi yapılan parçalar için uygundur. Ürün çeşidine göre farklı teknikler tercih edilerek üretilirler. Karmaşık şekilli ve içi boş parçalar için üretim yöntemi olarakta seçilebilir. Çok geniş yelpazede metal ve alaşımlarının dökümüne uygundur. Bir takım malzemeler yalnızca döküm yoluyla elde edilebilirler. Seri üretim için uygun döküm yöntemleri mevcuttur. İnce kesitli parçaların üretiminde ve az sayıda parça üretimi için kısıtlıdır ve ekonomik değildir.

### 3.2. GAZ ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ VE GAZ GİDERME

Gazların, sıvı metal içinde çözünürlüğü basınç ve sıcaklıkla ilgilidir. Çözünürlük, sıvı metalin soğuması ve katılaşması sırasında büyük miktarda düşer (Şekil 3.2), çözülmüş gazların soğuma ve katılaşma esnasında metal eriğinin ayrılması gerekmektedir. Katılaşma esnasında açığa çıkan gazların, metalin içinde kalması halinde parça içinde gözenekler meydana gelir. Malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [36]. Plastik şekil verme metotları ile üretilmiş ürünlere kıyasla dayanım parametresi göz önüne alınırsa daha iyidir.



Şekil 3.2. Metal içinde çözünen gaz miktarının sıcaklık ile değişimi.

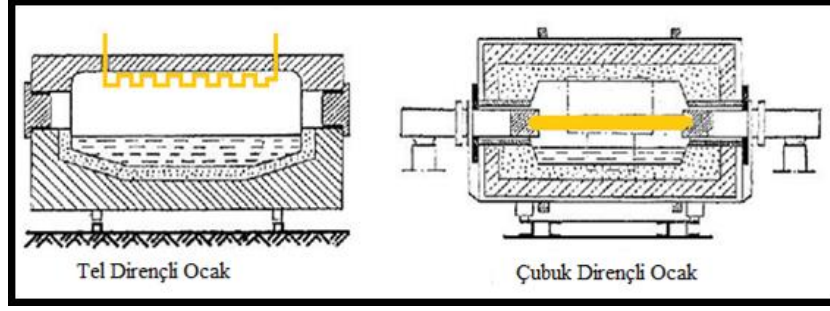
Şekil 3.2' de görüldü gibi gazın en büyük kısmı katılaşma sırasında açığa çıkar. Gazların çıkmasını önleyen diğer önemli neden basınçtır. Yüksek basınç altında sıvı metalde gaz çözünürlüğü yüksektir. Bu nedenle gazların ergiyi terk etmesi mümkün değildir. Bu gazlar katılaşma ve soğuma sonrasında malzeme içinde kalırlar. İçerisinde gazla beraber katılaşmış parçalara sonradan eritme, elektroliz veya ısıtma bir işlem uygulanamaz. Malzeme içinde bu gazlar kaçmaya çalışacakları için kusurlara sebep olacaktırlar. Gaz çözünmesini önlemek için maddeler her metal için farklılıklar gösterir [37]. Döküm sıcaklığı mümkün olduğu kadar düşük seçilmelidir. Sıvı metal ile temas edecek tüm parçaların yüzeyleri nemden arındırılmalıdır. Eriyik döküm sıcaklığında uzun süre bekletilmemelidir. Eriyik gerekmedikçe (flaks eklemek gibi) karıştırılmamalıdır. Üzerindeki koruyucu örtü (curuf tabakası) döküm işleminden önce alınmalıdır. Bütün bu önlemlere karşın eriyik içindeki gazların çözünmesine tam anlamıyla engel olunamaz. Gerekli durumlarda gaz giderme işlemleri uygulanır. Bu işlemlerde sıvı metal, klor, azot, argon gibi soy gazlar yardımıyla engellenmektedir. Gaz giderme çok etkin ve maliyetli bir yöntemdir [37].

### **3.3. ERGİTME OCAKLARI**

Döküm işleminde malzemenin eritilebilmesi için endüstriyel ocaklara ihtiyaç duyulur. Kullanım amacı, kullanım koşulları, malzeme cinsi, malzeme miktarı, işletme giderleri, kontrol imkanları gibi etkenlere bağlı olarak kullanılan ocaklar değişkenlik gösterir. Ergitme ocakları çeşitleri; potalı ocaklar, kupol ocaklar, alevli ocaklar, elektrikli ark ocakları, endüksiyon ocakları ve elektrik direnç ocaklarıdır.

#### **3.3.1. Direnç Ocakları**

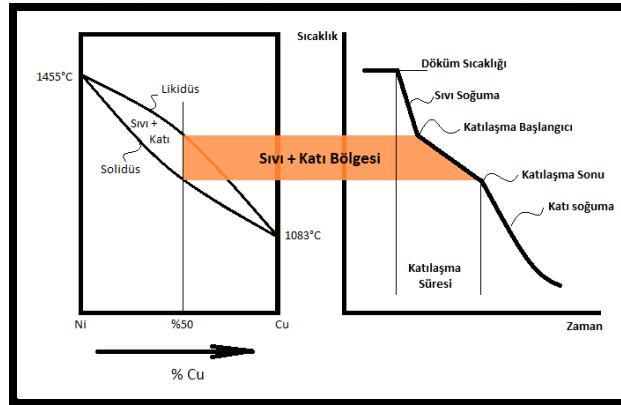
Direnç malzemeleri üzerinden geçirilen akım nedeni ile ısı meydana gelir. Direnç ocaklarının kullanım alanları sınırlıdır. Ergime noktası düşük malzemelerde kullanılan direnç ocaklarında direnç için tel veya grafit silisyum karbür çubukları kullanılır. Şekil 3.3' te direnç ocaklarının kesit görüntüsü verilmiştir [36].



Şekil 3.3. Direnç ocakları.

### 3.4. ALAŞIMLARDA KATI LAŞMA

Alaşimlarda katılaşıma saf metallere farklıdır. Sıvı + Katı bölgesinde katılaşıma iki ve/veya daha fazla tür atomun birlikte bulunduğu alaşımlarda belli sıcaklık aralığında gerçekleşir. Alaşımlar arasında yalnız ötektik bileşimli alaşımlar sabit sıcaklıkta katılaşırlar. Döküm malzemesi olarak ötektik bileşimlerin tercih edilmesinin asıl sebebi budur. Örnek niteliğinde verilen Şekil 3.4. Ni-Cu Alaşımasının katılaşıma grafiğinde katılaşıma safhaları resmedilmiştir [17].

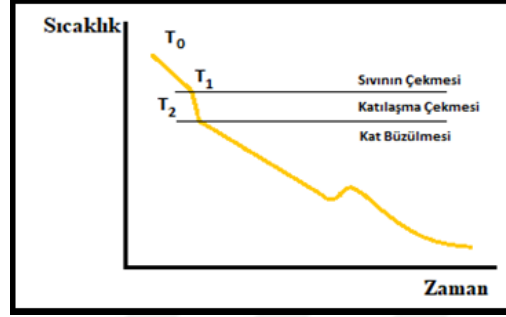


Şekil 3.4. Ni-Cu Alaşımasının katılaşıma grafiği.

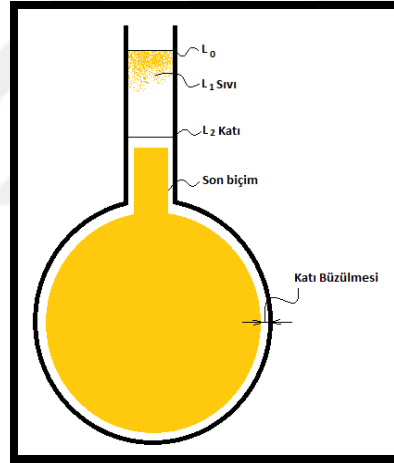
Şekil 3.4.' te görülen likidüs eğrisi malzemenin sıvılaştığı ısı eğrisini göstermektedir ve bu eğrinin üstünde kalan alan tamamen sıvıdır. Likidüs ve solidüs eğrisi arasında kalan alanın bir kısmı sıvı bir kısmı katıdır. Bu alanda sıvı ve katı faz aynı anda ortamda bulunur. Solidüs eğrisi ise katılaşıma ısı eğrisidir. Bu eğride kısmi ergime başlar. Eğrinin altında kalan alan tamamen katıdır.

### 3.4.1. Katılma Sırasında Oluşan Hacim Azalmaları

Sıcaklığın düşmesi ile birlikte malzemede meydana gelen çekme çeşitleri Şekil 3.5.' de verilmiştir [17]. Çekme ve büzülme oluşumu Şekil 3.6.' de resmedilmiştir [16].



Şekil 3.5. Katılma sırasında hacim değişimleri.



Şekil 3.6. Çekme ve büzülme olaylarının şematik gösterimi.

Katılma ve soğuma sırasında metal malzemelerde büzülme meydana gelir ve kalıp boşluğu ölçülerinden düşer. Sıvı çekmesi döküm sıcaklığı ve katılma sıcaklığını farkında, soğuma esnasındaki hacim azalmasıdır (T<sub>0</sub> ve T<sub>1</sub> aralığı). Katılma çekmesi Sıvı fazdan katı faza geçiş esnasında atomların yeniden düzenlenmesi ile meydana gelen hacim azalmasıdır. Katının katılmasını tamamlamış parçanın oda sıcaklığına kadar soğuması sırasındaki hacim azalmasıdır. (T<sub>1</sub> ve T<sub>Oda Sıcaklığı</sub> aralığında) Sıvı çekmesi ve katılma çekmesinden dolayı döküm boşlukları, gözenekler, sıcak yırtılmalar ve iç gerilmeler gibi döküm hataları ortaya çıkabilmektedir. Katının büzülmesi ise parçanın hacmen küçülmesine neden olur.

Bu sebeple kalıp boşluğu oluşturmak için kullanılan modelin tasarımında dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Çizelge 3.1' de bazı metallere ait hacimce % çekmeleri verilmiştir [39,40].

Çizelge 3.1. Bazı metallerin hacimce % çekmesi.






Malzeme	Katılaşma çekmesi %	Katının büzülmesi %
Gri dökme demir	1,80	3,00
Basit C'lu çelik	3,00	7,20
Al alaşımları	7,00	5,00
Cu alaşımları	5,00	6,00

### 3.5. MODELLER

Kalıp boşluğunu elde etmek üzere hazırlanan kalıp elemanıdır. İstenen ürün ölçülerine çok yakın değerlerde üretilir. Model üretirken katı çekmesi, sıvı çekmesi, katılaşma çekmesi, talaşlı imalat payı, maça varsa yuvaları ve modelin kalıptan çıkması gibi parametreler göz önüne alınarak hazırlanır. Model kalıpta en önemli öğedir zira hatalı model döküm işleminin tamamen başarısız olmasına sebep olabilir. Modelde dikkat edilmesi gereken unsurlar serbest modeller, levhalı modeller, özel model ve model tertibatlar olarak sınıflandırılırlar. Model seçimi ürünün revize edilip edilmeyeceği, üretim sayısı, kalıplama tekniği, model tasarımı, istenen boyut, istenen hassasiyet, parçanın biçimi gibi etkenler göz önüne alınarak seçilirler. Model yapımında ahşap, metal, strafor, plastik, mum gibi malzemeler kullanılabilir. Model tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli unsurlar mevcuttur.

#### 3.5.1. Model Renk Kodları

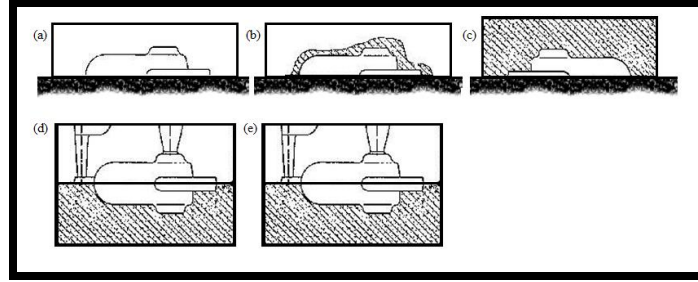
Özellikle ahşap modellerin nemden ve ortamın kötü koşullarından korunması için boyanması gereklidir. Bu sırada modelin farklı yüzeylerine farklı renkler ile standartlara uygun halde boyanması gereklidir. Şekil 3.7.'de model renkleri ve anlamları verilmiştir [16].

	<b>Sarı:</b> Döküm işlemi sonrasında talaşlı imalat yapılmayacak yüzeyler
	<b>Kırmızı:</b> Döküm işlemi sonrası talaşlı imalat yapılacak yüzeyler
	<b>Metalik:</b> Serbet parça yuvaları veya oturtulacağı yerler
	<b>Siyah:</b> Maça yuvaları
	<b>Yeşil:</b> Modelin dayanımını arttırmak için ilave takviye, kalıpta bıraktığı boşluk doldurulacak

Şekil 3.7. Model renkleri ve anlamları.

### 3.6. KUM KALIPLAR

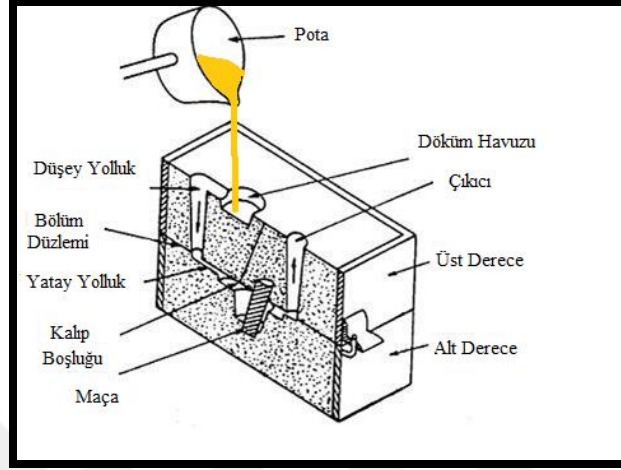
Metallerin dökümünde refrakter özelliğe sahip kum kalıplar yaygındır. Katılaşma sonrasında kalıp bozularak ürün çıkarılır. Üretilecek her parça için kalıp hazırlanmalıdır. Döküm kumunun model etrafına sıkıştırılıp sonra modelin sıkıştırılmış kumdan çıkarılması ile kalıp boşluğu oluşturulur. Genellikle iki parça olan kalıpta, yolluk ve besleyici sistemi, çıkıcılar gibi elemanlar sıkıştırma esnasında veya sonrasında oluşturulur. Çok fazla emek sarfiyatı gerektiren bu yöntemin kullanılması zorunlu ise otomasyon sistemi kullanarak imal edilir. Kum kalıp hazırlama safhaları aşağıda bulunan Şekilde 3.8’ de aşamaları ile resmedilerek anlatılmıştır.



Şekil 3.8. Kum kalıp hazırlama safhaları.

İki parçalı modelin parçası alt derecenin içine yerleştirilir. Model ile derecenin kenarları arasında 0,5-1 santimetre boşluk bırakılır. Model kalıp kumundan daha ince silis kumu, kömür tozu vb. ince tozlarla tozlanır model ve zemine yapışması önlenir. Kalın kum ile tabaka tabaka sıkıştırılır. Alt ve üst derece yüzeyi düzlenerek temizlenir. Gaz geçirgenliği için yüzeyi bozmadan şişlenir. Bu işlem alt ve üst dereceye uygulanmaktadır. İki derecenin ara yüzeyi yapışmasın diye kuru kum serpilir. Modelin pimli tarafı yolluk ve çıkıcı modelleri üst dereceye yapılır.

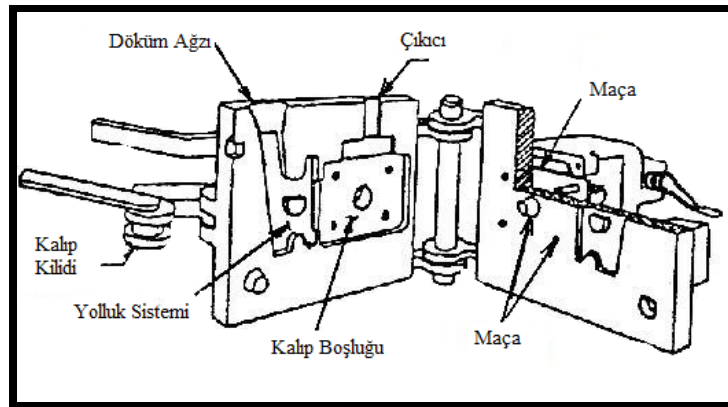
Kalıplama sonunda yolluk ve çıkıcılar çıkarılır. Üst ve alt derece sıkılmamış kumlardan temizlenerek üst üste konur ve sabitleştirilir. Şekil 3.9' de kum kalıp kesiti verilmiştir.



Şekil 3.9. Kum kalıp kesiti.

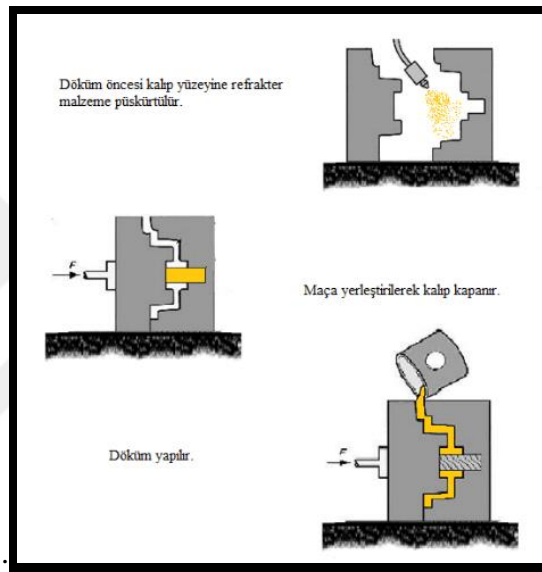
### 3.7. METAL KALIPLAR

Dökümcülükte genellikle metal kalıplar kullanılır. Metal kalıplar ürün sayısı yüksek olan malzemelerin imalatında kullanılır. Metal kalıplar yüksek kaliteli çeliklerden veya dökme demirlerden üretilirler. Düşük ergime derecesine sahip metal malzemelerden metal kalıp imalatı yapılamaz. Kalıp malzemesi olarak bronz da kullanılabilir. Genellikle demir dışı metallerin dökümü için kullanılır. Metal kalıp kesiti Şekil 3.10' da verilmiştir.



Şekil 3.10. Metal kalıp kesiti.

Metal kalıplarda katılaşma hızı, kum kalıplarda katılaşma hızından yüksek olduğu için üretilen malzeme daha ince taneli yapılar elde edilir. Metal kalıplarda talaşlı imalat gerektirmeyecek kadar parça yüzeyleri yüksek kalitededir. Kullanılan maçalar kum, alçı veya metal malzemeden üretilirler. Ancak metal kullanılması durumunda maçalar ürün içerisinden çıkarılabilmesi için % çekme oranına dikkat edilmesi gerekir. Kalıp ömrünü arttırmak, ürünün kalıptan kolay ayrılması ve kalıbı korumak için refrakter malzeme ile kaplanır. Metal kalıplara döküm aşamaları aşağıda bulunan Şekil 3.11’ de verilmiştir.



Şekil 3.11. Metal kalıbın döküm aşamaları.

Kalıbın imalatında kalıp boşluğu, yolluk sistemleri, gaz çıkış kanalları talaşlı imalat ile açılır. Metal malzeme kum gibi geçirgen olmadığı için gaz kanallarının açılması zorunludur. Döküm işleminden önce kalıbın ısıtılması gereklidir. Metal kalıplar dişi ve erkek olmak üzere en az iki, model şekli gibi nedenlerden dolayı maça vb. öğeler eklenmesiyle daha çok parçadan meydana gelirler. Kalıp kapandıktan sonra döküm ağzında ergimiş metal kalıp boşluğuna dökülür. Döküm sonrası parça tam soğumadan kalıptan çıkarılması önerilir. Bu sayede parçanın durgun havada serbestçe büzülmesi sağlanır. Metal kalıpların ince taneli yapıya sahip olması mekanik özellikleri daha iyidir, boyut hassasiyetine ve toleranslara uygundur, temiz bir yüzey elde edilir, temizleme masrafları daha makuldür, seri üretim için ekonomik bir uygulamadır. Metal kalıplarda, kalıp üretimi maliyetlidir, yalnızca seri üretim içindir. Her malzeme

metal kalıp kullanılarak dökülemez, döküm sonrası ürünü kalıptan çıkarmak zor olabilir, büyük parçaların dökümüne uygun değildir.

### **3.8. DÖKÜM PARÇA KUSURLARI**

Döküm parçalarda da üretimden kaynaklı hatalar mevcuttur. Bu hatalar farklı sebeplerden meydana gelir. Hatalı tasarım, hatalı model tasarımı ve imalatı, hatalı kalıp tasarımı ve kalıp malzeme seçimi, döküm işlemi icraatı, malzeme seçim, son işlemlerdir [38]. Döküm işleminden kaynaklı kusurlar eksik döküm, çatlaklar, gaz boşlukları, çekmeden kaynaklı boşluklar, soğuk birleşme, hızlı döküm kaynaklı sıçramalar, sıcak yırtılmalar, çatlaklar ve çarpımalardır [17].

## BÖLÜM 4

### MODİFİKASYON VE TANE İNCELTME

#### 4.1. MODİFİKASYON

Son yıllarda, dökme Al-Si alaşımlarının mikro yapısını inceltmek için çeşitli modifikasyon ve ısıl işlem metotları geliştirilmiştir. Bu metotlarda Si parçacıklarının morfolojisini değiştirerek, ötektik silisyumun inceltmesi amaçlanmıştır. Modifikasyon metotları içinde, kimyasal modifikasyon ve ısıl işlem yöntemi ile kaba iğnemi Si parçacıklarının ince ve küresel parçacıklara dönüşümü sağlanmaktadır. Modifikasyon, silisyumun plaka benzeri bir yapıdan, ince lifli bir morfolojiye dönüşmesine sağlar. Modifikasyonun olumlu etkilerinin yanında, sıcak yırtılma, porozite ve pürüzlü yüzey gibi, olumsuz etkileri de vardır. Bu sebeplerden dolayı, her zaman tavsiye edilmez [40-42].

##### 4.1.1. Modifikasyon Metotları

Modifikasyon işlemi element ilavesi ile modifikasyon, çill ile modifikasyon, vibrasyon ile modifikasyon, yüksek basınç altında modifikasyon ve ısıl işlem ile yapılmaktadır.

##### 4.1.1.1. Stronsiyum ile Modifikasyon

Modifiye uygulanmış Al-Si ötektik yapısı kararsız yapılardır. Kararsız yapı kararlı hale dönmek ister. Kararlı hale dönen Al-Si ötektik yapısının modifiyesi bozulmuş olur. Sıvı metal içerisine stronsiyum ilavesinden döküm yapılmaya kadar geçen süre bekletme süresidir [43]. Sodyum ile modifiye olan alaşımlara göre stronsiyum ile modifiye olan alaşımlar daha çok dökülebilirlik özelliğine sahip olduğunu bunu nedeni ise kalın oksit tabakalarının sodyum ile modifiye edilen sıvı üzerinde oluşmasından kaynaklandığını ileri sürmektedirler. Modifikasyon için birbiri ile etkileşim

göstermeyen, bir birinin verimini düşürmeyen stronsiyum ile sodyum birlikte kullanılabilir.

Brunhuber, sodyumun etkili bir şekilde modifiye işlemini başlattığını ve aktif olarak stronsiyumun bekleme süresini azalttığını görüşünü belirtmiştir. Modifikasyon işlemleri ile ilgili sorunlardan biri de elementlerin gaz porozitelerini yükseltmeye meyilli olmasıdır. Sodyum daha geniş poroziteye sebep olurken, makro ve mikro porozitenin dağılımını sağlayan stronsiyumdur. Stronsiyumun ve sodyumun kum dökümlerde çıkarmış olduğu gazı, kumun ıslaklığını düşük tutmakla yok edilebileceğini belirtilmiştir. Ayrıca kuma dökülen Al alaşımlarında poroziteyi, modifiye alaşımlarının miktarını azaltmak suretiyle giderileceğini kesin olarak belirtilmiştir [44].

## **4.2. TANE İNCELTME İŞLEMİ**

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, dökümün tane yapısına bağlıdır. Tane inceltme, alaşımın mekanik özelliklerini geliştirmek için en önemli yöntemlerden biridir. Taneleri inceltmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır; katılaşma işlemi sırasında alüminyum alaşımlarının iyileştirilmesi, Al alaşımlarının eritilmesi sırasında tane incelticilerin eklenmesi, mekanik-fiziksel tane inceltme olarak kabul edilir [44,45]. Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemi, mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde 20. yüzyılın yarısından sonra ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tane inceltme işleminin tercih sebepleri, mekanik özelliklerin artırılması, daha gözeneksiz bir yapı elde edilmesi, sıcak yırtılmalara karşı direnç, makro porozitede azalma ve mikro yapının homojenliği olarak sayılabilir [46]. Al-Si alaşımlarında tane inceltme işlemi katılaşma esnasında beslenebilirliği iyileştirmektedir. Kütlesel besleme çekme porozitesini azaltarak daha küçük porozite dağılımını sağlamaktadır. Bunun yanında tane inceltme işlemi, sıvı içindeki çözünmüş gazların oluşturduğu gözeneklere eklenerek, ikincil intermetalik fazların oluşmasına sebep olur [46]. Dökümü yapılacak alaşımda en uygun mekanik ve fiziksel özellikleri elde etmek için, sıvı metalin kimyasal bileşiminin hidrojen içeriği ve temizliğinin kontrol edilmesi önemli bir parametredir. Alüminyum dökümlerinde döküm sıcaklığı, silisyum morfolojisi ve soğuma hızı gibi diğer parametreler tane inceltme işleminin

verimliliğini arttırmaktadır [47]. Alüminyum döküm alaşımlarında tane boyutu ile orantılı olan çekme ve gaz boşluklarının en az seviyede olması istenmektedir.

Sıvı alaşım içindeki tane incelticiler heterojen çekirdeklenme noktaları oluşturur ve tane yapısı inceler. İnce taneli dökümlerde mukavemet daha yüksektir. Bunun neden ise ince taneli dökümlerde tane arasındaki boşluklar daha küçüktür. Sıcak yırtılma ve çekme hatalarının da ince taneli yapıda oluşma oranı düşüktür [47]. Alüminyum alaşımlarına tane inceltici olarak Al-Ti, Al-Ti-B ve Al-B gibi master alaşımları ilave edilebilir. Al-Ti-B türü master alaşımları içinde Al<sub>5</sub>TiB master alaşımı en çok tercih edilendir. Günümüzde Al-Ti-B tane inceltici olarak kullanılan % 99,7 oranında saf birincil alüminyum tel, değişik bileşimlerdeki florür tuzlardan imal edilmektedir. Alaşım içerisine katılan Al-Ti-B' nin en üst düzeyde tane inceltme yeteneğinin ölçüsü bekleme süresi ile ilişkilidir [48]. Araştırmacılar, tane inceltici Al-Ti-B' nin alüminyum alaşımlarında en etkili Ti/B oranı için yapmış oldukları çalışmada, % 0,1-1 oranında bor ile % 3-10 oranında titanyum içeren değişik ürünler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar neticesinde 5/1 Ti-B oranı en çok kullanılan oran olmuştur. Çizelge 4.1' de en çok tercih edilen tane incelticiler verilmiştir [49,50].

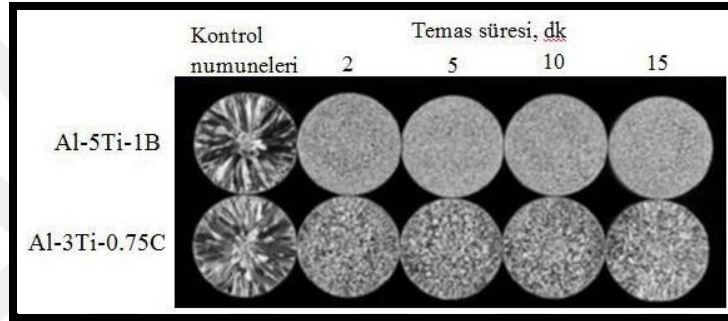
Çizelge 4.1. Tane inceltici master alaşımlar.

Tane İnceltici Master Alaşımlar		
AlTiB 6	Al %6 Ti	-
AlTiB 10	Al %10 Ti	-
AlTiB 5/0,2	Al %5 Ti	% 0, B
AlTiB 5/0,6	Al %5 Ti	% 0,6 B
AlTiB 5/1	Al %5 Ti	% 1 B
AlTiB 3/1	Al %3 Ti	% 1 B

Al-Ti tane inceltici master alaşımları 700 °C' de sıvı metal içinde kolayca erir ve alaşım içerisinde tane oluşumunu hızlandırır [51]. Al-Ti alaşımlarına bor'un ilave edilmesi ile yeni oluşan Al-Ti-B master alaşımının tane inceltme etkisini artırdığı tespit edilmiştir. Al-Ti-B üçlü alaşım sistemi kaba olan TiAl<sub>3</sub> kristalleri ve TiAl<sub>3</sub>'ün etkisini artıran çok ince TiB<sub>2</sub> kristallerini içerir [52]. Al-Ti-B üçlü master alaşımlarının çok az alaşım elementi içeren alaşımlara ilavesinde tane inceletme işlemi zorlaşmaktadır. Al alaşımlarına tane inceltme işlemini pozitif yönde etkileyen demir, mangan, titanyum, bor ve silisyum gibi elementler eklendiğinde tane inceltme işlemi

daha kolaylaşmaktadır. Zirkonyum ve krom gibi tane inceltme işlemlerini negatif yönde etkileyen master alaşımlarının ilavesinde tane inceltme çok daha zorlaşmakta ve yüksek miktarlarda ilaveler gereklidir.

Şekil 4.1' de Al-5Ti-B alaşımı ile Al-3Ti-0,75C alaşımı ile performansları gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde Al-3Ti-0,75C master alaşımına göre Al-5Ti-1B master alaşımının farklı temaslarda küçük tane yapıları verdiği görülmektedir. Al-3Ti-0,75C master alaşımı tane yapısı küçültürken tane küçültme başarısının istenilen düzeyde olmadığı görülmektedir [53].



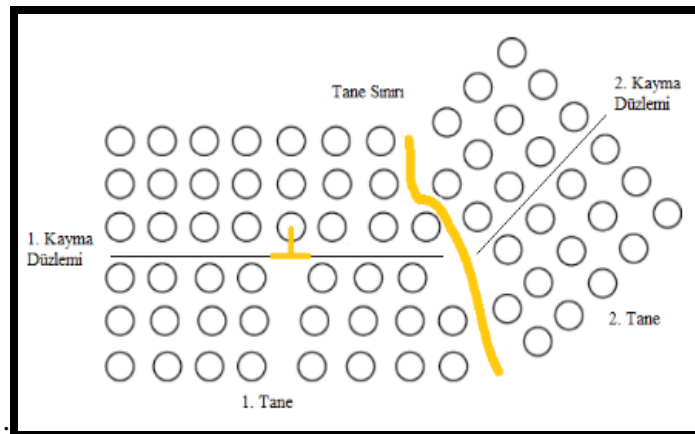
Şekil 4.1. Al-5Ti-1B ve Al-3Ti-0,75C alaşımlarının tane inceltme performansı.

Alüminyum alaşımlarına tane inceltici Al-Ti, Al-Ti-B ve Al-B gibi master alaşımları ilave edilebilir. Al-Ti-B master alaşımları içinde Al<sub>5</sub>TiB master alaşımı en çok tercih edilendir. Tane inceltme işleminde istenilen özelliklerin elde edilebilmesi master alaşımı ilave miktarı ve sonrasında bekleme süresi gibi önemli değişkenlere bağlıdır. Alaşımlara uygulanan tane inceltme yöntemleri termal, mekanik ve kimyasal yöntem olarak sayılabilir. Termal yöntemde tane boyutunun küçük olması için sıvı metal veya alaşım hızlı bir şekilde soğutulur. Kum kalıplarda ve döküm kesitlerinin kalınlaştığı durumlarda termal yöntemi uygulamak oldukça zordur. Mekanik yöntemle tane boyutu kontrolü sıvı metal veya alaşımın karıştırılması ile meydana gelen dendritlerin kırılarak çoğalması ile sağlanır [54]. Kimyasal yöntem de tane boyutu kontrolünü sağlamak için, sıvı metal veya alaşım içerisine tane inceltici element veya master alaşım ilavesi yapılır. Kimyasal yöntemle yapılan tane inceltme işlemi en çok tercih edilen yöntemdir. Kimyasal tane inceltme işleminde alüminyum alaşımlarına sıvı halde çok az oranda titanyum ve bor elementleri ilavesi ile yapılır. Sıvı metal içerisine çok az oranda Ti etki edecek şekilde ortalama % 0,01 Al<sub>5</sub>TiB master alaşımı ilavesi yapılır.

Alüminyum atomlarının B ve Ti elementleri ile tepkimeye girerek oluşturdukları Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> intermetalik bileşikleri katı çekirdeklenme merkezleri olarak görev yaparlar. Burada amaç, en yüksek sayıda heterojen çekirdeklenme oluşumunu sağlamak ve en küçük boyutta tane dağılımına sahip olmaktır [54].

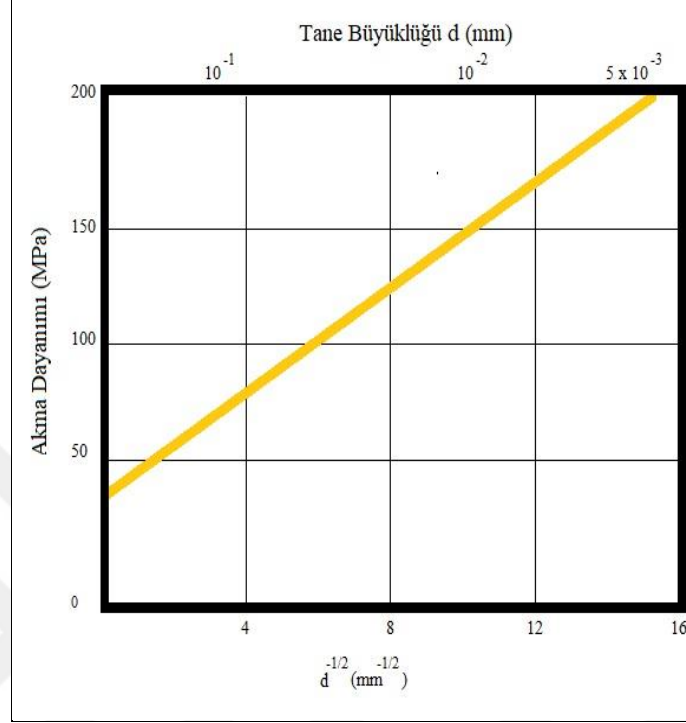
#### 4.2.1. Tane Boyutunun Küçülterek Sertleştirme

Tane boyutu veya ortalama tane çapının çok kristalli metallerde mekanik özelliklere etkisi büyüktür. Tanelerin farklı kristal yönlenmesine sahip olması, doğal olarak bitişik tane sınırlarının ortak olması gibi bir durum ortaya çıkarır [21]. Plastik deformasyon sırasında, kayma veya dislokasyon hareketi, dislokasyon hareketlerinin sınırlandırılmasına sebep olur. Çizgisel kusur olarak isimlendirdiğimiz dislokasyonlar harekete zorlandığı takdirde farklı hareket yönüne yönelecektir. Bu hareket yönünün değişmesi atomsal boyutta düzensizliğe neden olacaktır. Tane sınırlarından geçemeyen dislokasyonların yığılma adını verdiğimiz durumlar oluşturur. Bitişik tanede biriken gerilme yığılmaları yeni dislokasyonlara neden olur. İnce taneli (küçük çaplı) bir malzemenin, dislokasyonları engelleyen toplam tane sınır alanı daha fazla olduğundan, kaba taneli olana göre sertliği ve dayanımı yüksektir. Hareket kabiliyeti olmayan veya sınırlı olan dislokasyonlar malzemede sertleşmeye neden olur [22-24]. Şekil 4.2.' de taneler içerisinde dislokasyon hareketi verilmiştir [24].



Şekil 4.2. Tane sınırında kayma düzlemleri.

Şekil 4.3.' de Cu – Zn Alaşımlarında tane büyüklüğünün akma dayanımına etkisi verilmiştir [25].



Şekil 4.3. Cu-Zn alaşımında tane büyüklüğünün akma dayanımına etkisi.

Hall - Petch Denklemi ' $\sigma_{Ak} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ '. Bu denklemde d, ortalama tane çapını,  $\sigma_0$  ve  $k_y$ , malzemeye özgü sabitlerdir. Büyük taneli veya çok küçük taneli ve çok kristalli malzemeler için Hall – Petch denklemi kullanılmaz [18].

## BÖLÜM 5

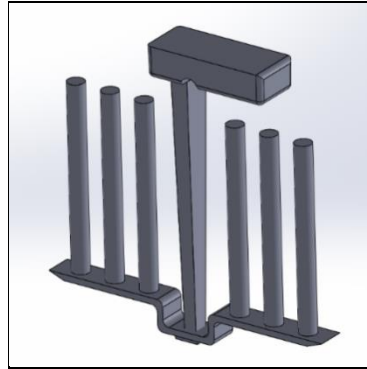
### MALZEME VE METOT

Bu çalışmada, Al-Cu-Mg alaşımı, Al10Sr alaşımı ile modifikasyon, AlTi5B master alaşımları ile tane inceltme işlemi yapılmıştır. Hazırlanan sıvı metal kum ve metal kalıba döküm metodu ile dökülmüştür. Döküm Al-Cu-Mg alaşımları çekme numuneleri hazırlandıktan sonra T06 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Al-Cu-Mg alaşımların mikroyapı incelemeleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda ve X-ışınım kırınımı metodu ile karakterize edilmiştir. Mekanik özellikleri, çekme testi, mikro ve makro sertlik sonuçları ile değerlendirilmiştir.

#### 5.1. MODEL VE KALIPLAMA AŞAMASI

##### 5.1.1. Model Tasarımı

Model tasarımı kalıp boşluğunu oluşturacağı için tasarlana modelde % çekme miktarını, talaşlı imalat payı, besleyici ve yolluk hesabı yapılarak SolidWorks programında oluşturulmuştur. Şekil 5.1. Döküm Boşluğu CAD Görüntüsü. Tüm kalıplar Şekil 5.1' de bulunan tasarıma göre yapılmıştır.



Şekil 5.1. Döküm boşluğu CAD görüntüsü.

### 5.1.2 Kalıp Tasarımları / İmalatı

Çalışmada döküm boşluğuna uygun olarak St52 kalite metal kalıp Şekil 5.2 (a)' da ve kum kalıpların imal edileceği kestamitten yapılmış maça kalıp görüntüsü Şekil 5.2 (b)' de verilmiştir.



Şekil 5.2. Metal kalıbın CAD görüntüsü (a) ve kum kalıp modelin maça sandığı görüntüsü (b).

Kum kalıpların yapımında, SİLTAŞ A.Ş.' den temin edilen ve 60–70 AFS tane boyutuna sahip silis kumu kullanılmıştır. UNIKON Metalürji' den temin edilmiş Alfaset reçine (TPA38) ve UNIKON Metalürji ' den temin edilmiş serter (TH9) ile silis kumu homojen karıştırılarak maça sandığında sıkıştırılmıştır.

### 5.2. DÖKÜM VE ISIL İŞLEM

Çalışmada kullanılan Al-Cu-Mg alaşımı ingot, Al10Sr ve AlTi5B master alaşımı kimyasal analizleri Çizelge 5.1' de verilmiştir. Ergitme aşamasında 10 kW gücünde direnç fırını kullanılmıştır, direnç fırınının potası 304-L kalite paslanmaz çelik olduğundan dolayı sıvı metal ile temas eden iç yüzeyleri BN boya ile kaplanmıştır. Ergitme sonrasında sıvı metale önce modifikasyon daha sonra tane inceltme işlemi için gerekli master alaşımlar eklenmiştir. Sıvı metalin hazırlanması aşamasında modifikasyon ve tane inceltme için gerekli master alaşımlar 10 dakika ara ile yapılmıştır. Sıvı metalin kum ve metal kalıba döküm sıcaklığı 740-760°C civarındadır.

Çizelge 5.1. Al-Cu-Mg alaşımı, Al10Sr ve Al5TiB kimyasal bileşimi.

Alaşım	Al	Cu	Mg	Fe	Mn	Si	Ti %	B %	Sr %	Diğer
Al-Cu-Mg	90 – 92	4-5	0,3- 0,4	0,4- 0,6	1,25- 1,35	0,4- 0,6	3,4-4	<0,0 2	<0,01	2,6- 2,8
Al10Sr	84-8	-	-	-	-	-	-	-	1,4-1,6	-
Al5TiB	93,9	-	-	-	-	-	4,5-6	<1,5	-	-

Çalışmada kullanılan Al-Cu-Mg alaşımı, Al10sr ve Al5TiB kimyasal bileşimin verileri Çizelge 5.1.' de verilmiştir. döküm ve talaşlı imalat sonrasında Al-Cu-Mg alaşımlarının tamamına T06 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme laboratuvarlarında bulunan PROTHERM marka ve PLF 120/27 kontrollü ısıtma fırını kullanılmıştır. Al-Cu-Mg alaşımı numuneler, 495°C' de 4 saat çözündürme işlemi sonrasında suda soğutulmuştur. Daha sonra fırın sıcaklığı 190°C' de 10 saat ısıtıldı yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

### 5.3. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada, döküm Al-Cu-Mg alaşımları mikroyapısal ve mekanik özellikleri uygulanan modifikasyon ve tane inceltme işleminin etkileri araştırılmıştır. Al-Cu-Mg alaşımlarının tamamı döküm sonrası spektral analiz cihazı ile kimyasal bileşimleri kontrol edilmiştir. Her kalıpta 6' şar adet numune elde edilmiştir (Şekil 5.1). Döküm sonrası Al-Cu-Mg alaşımların mikroyapı incelemeleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda ve X-ışınım kırınımı metodu ile karakterize edilmiştir. Mekanik özellikleri, çekme testi, mikro ve makro sertlik sonuçları ile değerlendirilmiştir.

#### 5.3.1. Spektral Analiz

Her gruba ait yolluktan üçer numune hazırlanmıştır. Her (kum - metal) gruptan üçer adet GNR ML300 marka spektral analiz cihazından kimyasal analiz testi yapılmıştır. Şekil 5.3.' te Spektral analiz cihazı görünmektedir.

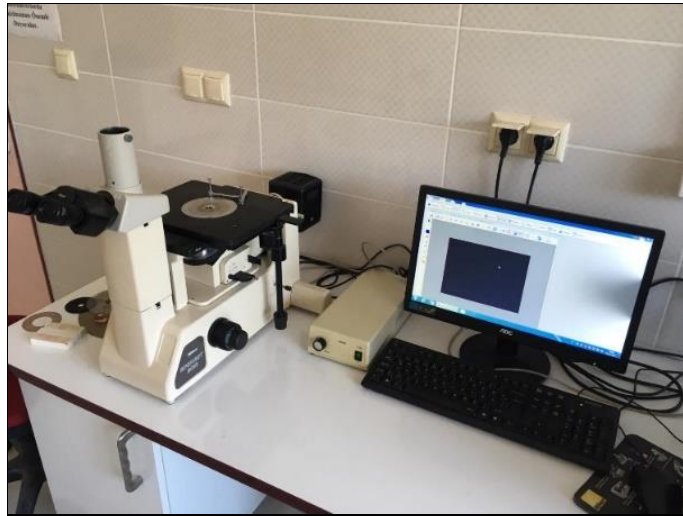


Şekil 5.3. Spektral analiz cihazı.

## 5.3.2. Metalografi İncelemeleri

### 5.3.2.1. Optik Mikroskop

Metalografi uygulamalarında ASTM E04.01 standartlarına uygun biçimde numuneler hazırlandı. Metalografi numunelerini yüzeyleri Keller solüsyonu ile 30-45 saniye dağlandı. Al-Cu-Mg alaşımı numune yüzeyleri optik mikroskobu (NIKKON EPIPHON 200) ile 50X, 100X, 200X, 500X ve 1000X 'de görüntülenmiştir. Şekil 5.4' te optik mikroskop görünmektedir.



Şekil 5.4. Optik mikroskop.

### 5.3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu

Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) incelemelerinde Karabük Üniversitesi, Demir Çelik enstitüsü laboratuvarlarında bulunan “CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI (FEG)” (EDS’li) marka cihaz ile gerçekleştirildi.

### 5.3.2.3. X-Işını Dağılım Analizi

Bu çalışmada Al-Cu-Mg alaşımlarının yapılarında oluşan fazların belirlenmesi amacıyla, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Laboratuvarındaki 'Rigaku' marka cihazında,  $2\theta$  kırınım açısı ve  $\text{CuK}\alpha$  ışınımı kullanılarak X-ışını kırınımı analizi yapılmıştır.

### 5.3.3. Sertlik Testleri

#### 5.3.3.1. Mikro Sertlik

Çalışma kapsamında modifikasyon ve tane inceltme işleminin Al-Cu-Mg alaşımı sertliği üzerine etkisini belirlemek için her alaşım grubundan üç farklı noktadan SHIMADZU HMV marka sertlik cihazından mikro sertlik testleri yapılmıştır. Her gruptan üç farklı noktadan mikro vickers sertlik testi, Hv 0,2 mikro sertlik şartlarında, 1,961 Newton yük altında 10 saniyelik yükleme altında alınmıştır. Mikro sertlik cihazı Şekil 5.5’ te görülmektedir.



Şekil 5.5. Mikro sertlik cihazı.

### 5.3.3.2. Makro Sertlik

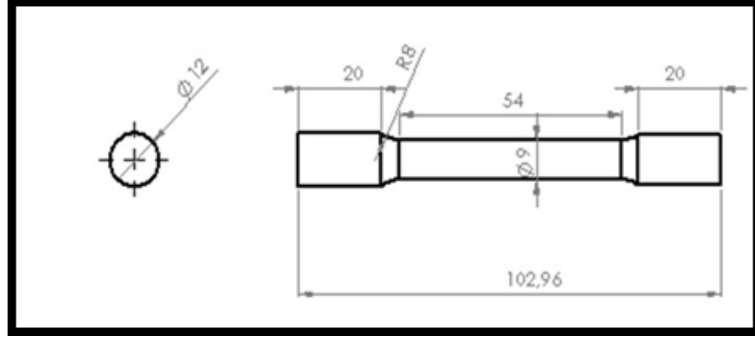
Çalışma kapsamında modifikasyon ve tane inceltme işleminin Al-Cu-Mg alaşımı sertliği üzerine etkisini belirlemek için her alaşım grubundan üç farklı noktadan AFFRİ VRSD251 marka makro sertlik testleri yapılmıştır. Makro sertlik testinde, 2,5 mm küresel bilye çapında 31,25 kgf yük altında Brinell değeri cinsinden sertlikler alınmış ve ortalamaları alaşımların sertliği olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan makro sertlik cihazının görüntüsü Şekil 5.6' da görülmektedir.



Şekil 5.6. Makro sertlik cihazı.

### 5.3.4. Çekme Testi

Çalışma kapsamında modifikasyon ve tane inceltme işleminin Al-Cu-Mg alaşımı mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri için çekme test numuneleri, ASTM: B557M-10 standartlarına uygun olarak hazırlandı. Çekme test numuneleri, SHIMADZU AG-IS (50kN) marka çekme cihazında 1mm/dk hızında test edildi. Çekme test numuneleri ölçüleri Şekil 5.7' de ve çekme test cihazı Şekil 5.8' de verilmiştir.



Şekil 5.7. Çekme test numunesi ölçüleri.



Şekil 5.8. Çekme test cihazı.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMALAR

Deneysel çalışmada Al-Cu-Mg alaşımına uygulanan modifikasyon ve tane inceltme işleminin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Al-Cu-Mg alaşımlarının, kimyasal analiz, mikro yapı incelemeleri optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), mekanik özellikler için makro sertlik, mikro sertlik ve çekme testi uygulanmıştır.

#### 6.1. KİMYASAL ANALİZ SONUÇ VE TARTIŞMA

Al-Cu-Mg Alaşımını Al110Sr, Al5TiB master alaşımlarının kimyasal bileşimine göre hesaplanan ağırlıklara uygun olarak ilave edilmiştir. Al-Cu-Mg alaşımlarının döküm işlemleri sonrası kimyasal analiz verileri, Çizelge 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Al-Cu-Mg alaşımlarının döküm işlemi sonrası kimyasal analiz sonuçları.


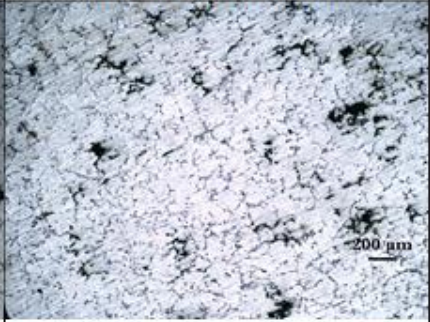

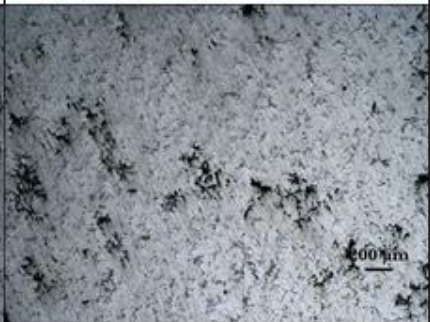


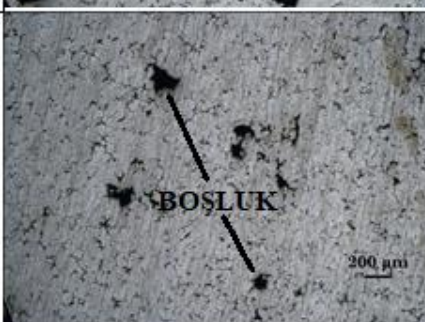


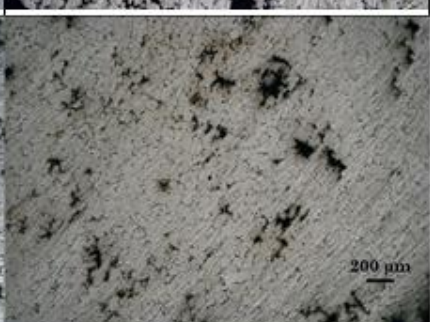
Gruplar	Alaşım Elementleri									
	%Al	%Cu	%Mg	%Fe	%Mn	%Si	%Ti	%B	%Sr	%Diğer
Al-Cu-Mg	91,27	4,82	1,30	0,52	0,55	0,28	0,018	0,007	<0,0005	2,73
Al-Cu-Mg+Sr	91,45	3,90	1,35	0,6	0,54	0,30	0,0170	0,0052	0,0035	1,83
Al-Cu-Mg+Sr+ % 0,5 Al5TiB	86,24	4,05	1,41	0,5	0,49	0,31	0,0265	0,0069	0,0030	6,96
Al-Cu-Mg+Sr+ % 1 Al5TiB	91,20	3,64	1,37	0,5	0,48	0,28	0,0595	0,0090	0,0031	2,45
Al-Cu-Mg+Sr+ % 1,5 Al5TiB	92,30	3,42	1,36	0,44	0,49	0,44	0,082	0,0121	0,0029	0,7

## 6.2. METALOGRAFİ İNCELEMELERİ VE TARTIŞMALAR

Al-Cu-Mg alaşımlarının mikroyapı incelemelerinde, optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), XRD analizi sonuçlarına göre karakterize edilmiştir.

### 6.2.1. Optik Mikroskop Görüntülerinin İncelenmesi

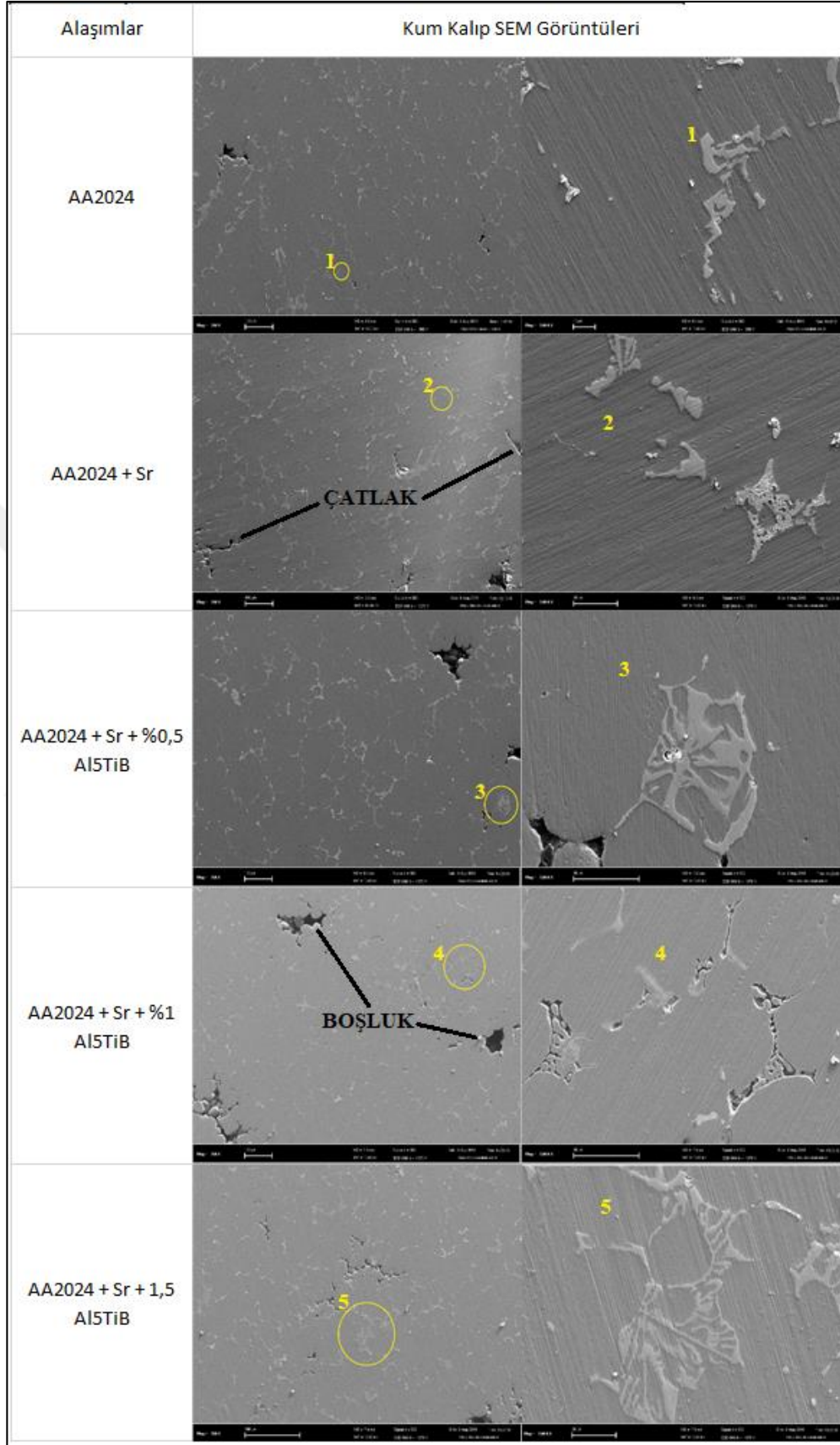
Bu çalışmada, döküm metodu ile kum ve metal kalıba dökülen ve modifikasyon (Al10Sr) ve tane inceltme (Al5TiB) işlemine tabii tutulan Al-Cu-Mg alaşımlarına, mikro yapı üzerine etkisi, optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.1. verilmiştir. Kum kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının, metal kaba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarına göre daha büyük ve kaba dentritlerden oluştuğu görülmektedir. Dendritler arasındaki boyut farklılığın döküm işleminde kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği ve soğuma üzerine etkisinden oluştuğu bilinmektedir. Metal kalıplarda soğuma hızı kum kalıplara göre daha yüksektir. Bununla birlikte, kum ve metal kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının tamamında dendritler arasında çekme boşlukları porozite olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca metal kalıplarda bazı bölgelerde bu çekme boşluklarını birbirine bağlayan çatlak görüntüsünde oluşumlar belirlenmiştir. Li Yanleia ve arkadaşları, yarı katı işlem ile Al-Cu-Mg (AA2024) alaşımının mikro yapısında alüminyum dendritleri ile birlikte, Al<sub>2</sub>Cu çökelilerini ve Al<sub>2</sub>CuMg intermetalik fazını belirlemişlerdir [55]. Tanyel, Al-4,5Cu (A206) üzerinde tane inceltme çalışmasında % 0,01, % 0,02, % 0,03, % 0,05, % 0,1, % 0,2 ve % 0,3 oranlarını Al5TiB master alaşımı ile uygulamıştır. Mikro yapı incelemelerinde tane boyutunun 970,1 µm'dan yaklaşık 80 µm'ye düştüğü belirtmektedir [56].

Alaşımlar	OM	
	Kum Kalıba Döküm	Metal Kalıba Döküm
AA2024		
AA2024 + Sr		
AA2024 + Sr + %0,5 Al5TiB		
AA2024 + Sr + %1 Al5TiB		
AA2024 + Sr + 1,5 Al5TiB		

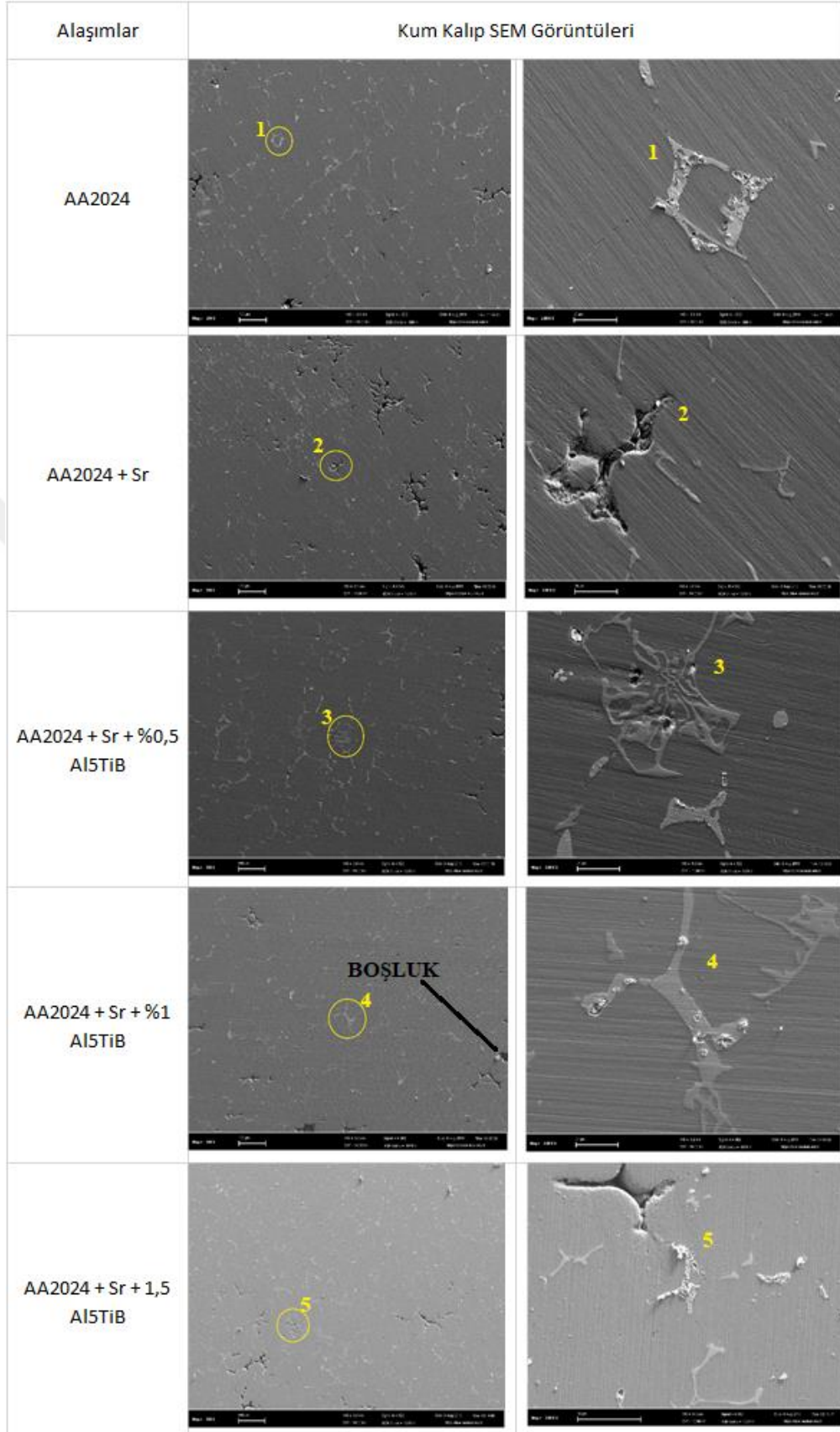
Şekil 6.1. Al-Cu-Mg alaşımı ve modifikasyon ve uygulanan tane inceltme işlemi sonrası optik mikroskop görüntüleri.

## 6.2.2. SEM ve EDS Görüntülerinin İncelenmesi

Al-Cu-Mg alaşımına uygulanan modifikasyon ve tane inceltme işlemlerinde oluşan fazları ve mikro yapı üzerine etkisini gözlemek için SEM çalışması yapılmıştır. Şekil 6.2' de kum kalıba ve Şekil 6.3' te metal kalıba dökümü yapılan Al-Cu-Mg alaşımına Al10Sr ile uygulanan modifikasyon ve Al5TiB ile uygulanan tane inceltme işlemi, Al-Cu-Mg alaşımına etkisi SEM görüntülerinde  $\alpha$ -alüminyum dendritler ve intermetalik fazlar görülmektedir. Xie ve arkadaşları, farklı Cu miktarına sahip Al-Cu-Mg alaşımlarının mikroyapı incelemelerinde, alüminyum dendritlerinde yüksek miktarda Cu ve Mg elementi çözüldüğünde  $\alpha$ - alüminyum dendritleri arasında oluşan çatlaklar olduğunu belirtmektedirler [57]. Tanyel yaptığı çalışmada, modifikasyon ve tane inceltme işlemi uygulanmayan Al-Cu-Mg alaşımında, Cu, Mg elementleri bileşikler halinde ve fiber şeklinde Alüminyum-matris içinde görülmüştür [56]. Modifikasyon ve tane inceltme işlemi uygulanan görüntülerde ise ipliksi parçaların daha kısa ve ana matris üzerinde hemen hemen eşit mesafede dağıldığı gözlenmiştir. Ti, B elementleri bileşikler halinde görülmüştür. Al5TiB tane incelticinin ilavesi ile intermetalik morfolojisine etkisi görülmektedir. Tanyel yaptığı çalışmada Cu miktarına bağlı olarak partiküllerin birleşmesi sonucu topaklanmalar meydana gelmiştir. Yaptığı çalışmada bu sonucun partikül çökmesine ve sönümüne neden olacağını ortaya koymuştur [56]. Amerioon ve arkadaşları, Al-% 8 Mg alaşımına Al5TiB master alaşımı ile % 0,01-0,03-0,05-0,1-0,3-0,5 ve % 1 miktarlarında ilave ederek alaşımın mikroyapısı üzerine etkisini incelemiştir. Al-%8 Mg alaşımına Al5TiB master alaşımı ilave edildiğinde alüminyum tane morfolojisini küçüldüğünü ve tane inceltme işleminin başarılı olduğunu bildirmişlerdir [58]. Tane inceltme işlemi ile beraber kolonlu (a) dentritlerinin yarı küresel hale ve rozet benzeri morfolojide oluştuğunu gözlemlemişlerdir [58].

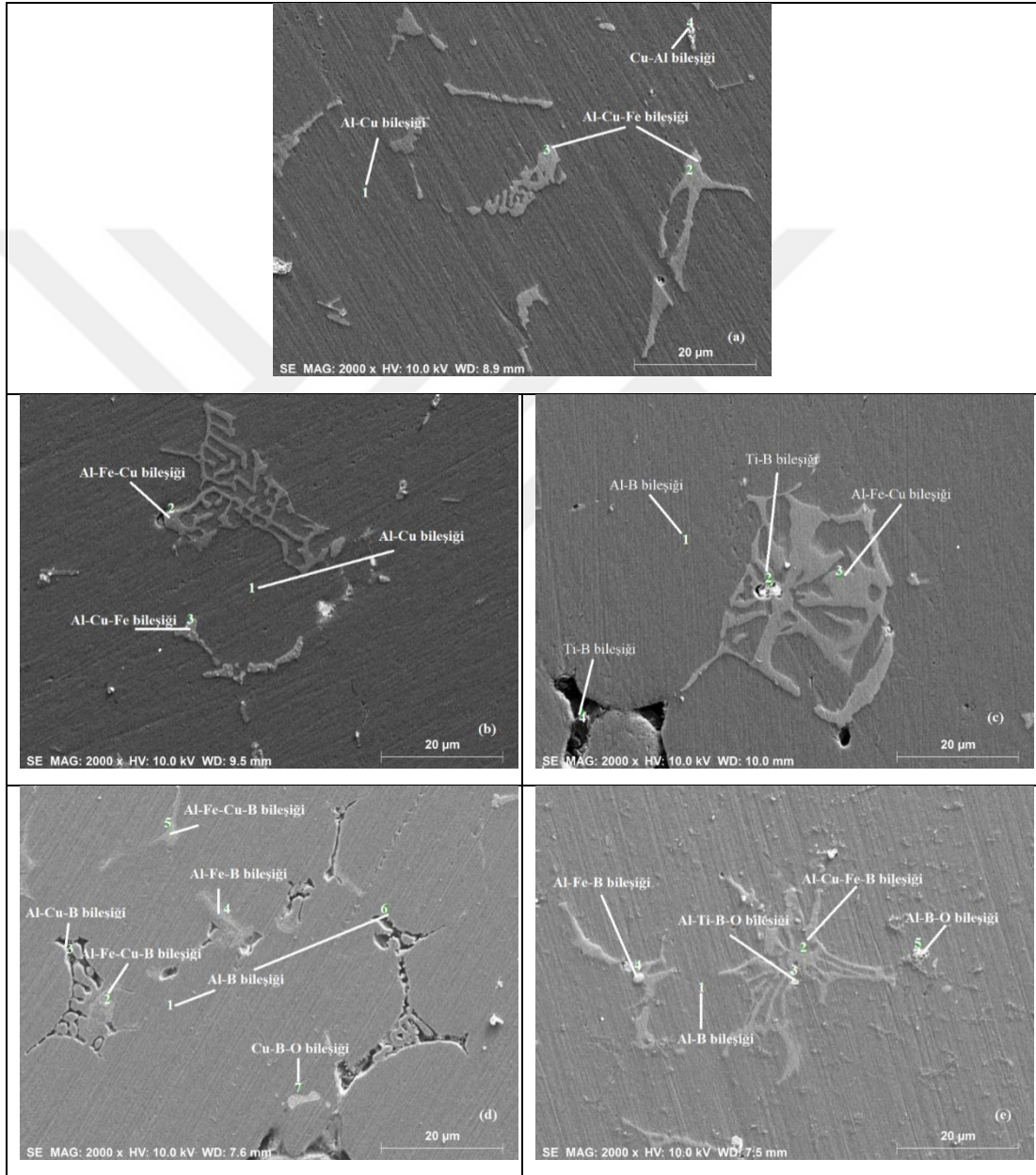


Şekil 6.2. Al-Cu-Mg Alaşımı ve modifikasyon ve uygulanan tane inceltme işlemi sonrası kum kalıp SEM görüntüleri.



Şekil 6.3. Al-Cu-Mg Alaşımı ve modifikasyon ve uygulanan tane inceltme işlemi sonrası metal kalıp SEM görüntüleri.

Al-Cu-Mg alaşımına uygulanan modifikasyon ve tane inceltme işlemlerinde oluşan fazları ve mikroyapı üzerine etkisini gözlemek için EDS’li SEM alışması yapılmıştır. Şekil 6.4’ de kum kalıba ve Şekil 6.5’ te metal kalıba dökümü yapılan Al-Cu-Mg alaşımına Al10Sr ile uygulanan modifikasyon ve Al5TiB ile uygulanan tane inceltme işlemi Al-Cu-Mg alaşımına etkisi EDS’li SEM görüntüleri verilmiştir.

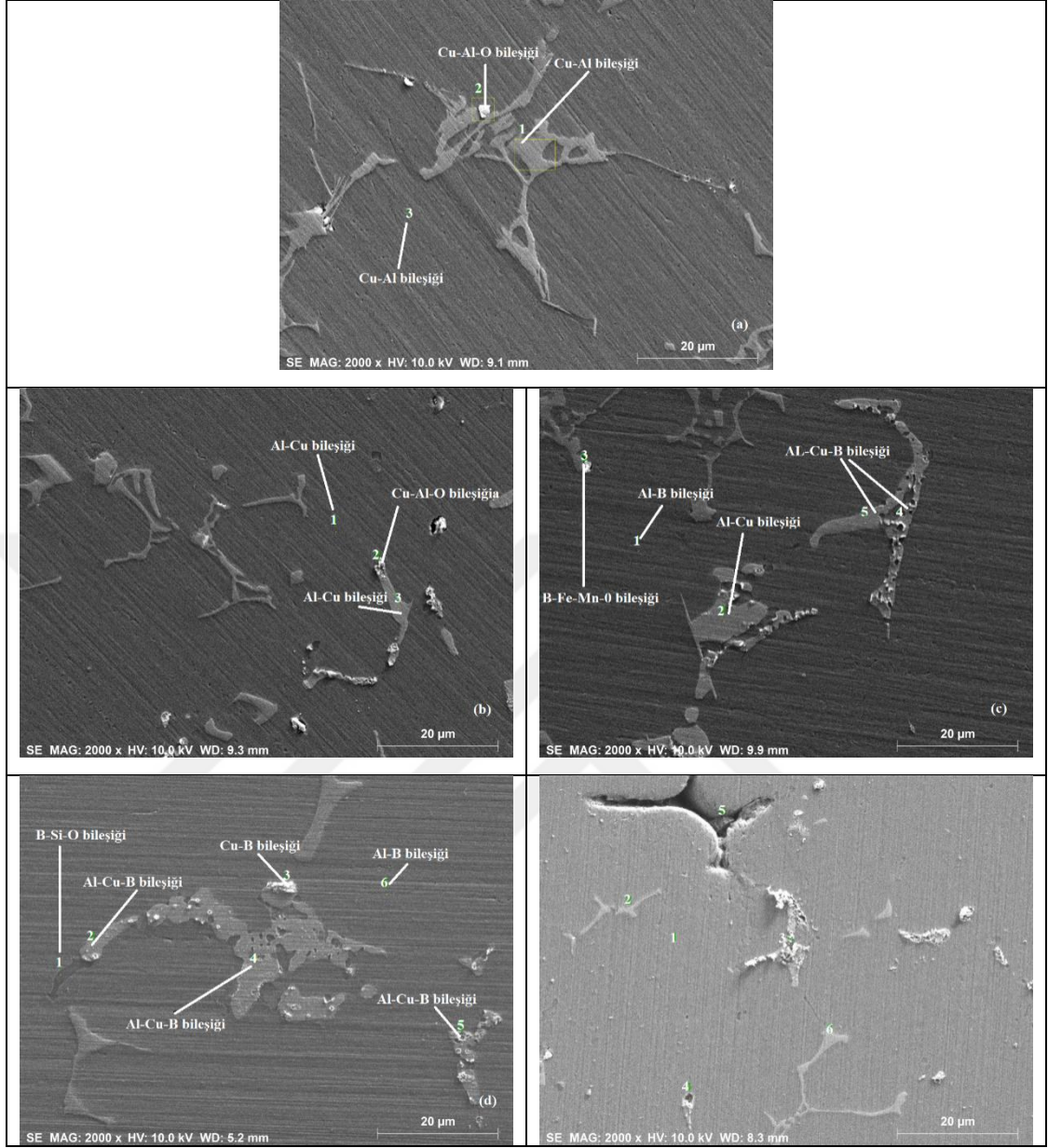


Şekil 6.4. Kum kalıba dklen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS’li SEM grntleri (a)Al-Cu-Mg, (b) Al-Cu-Mg+Sr, (c) Al-Cu-Mg+Sr+%0,5Al5TiB, (d) Al-Cu-Mg+Sr+%1 Al5TiB, (e) Al-Cu-Mg+Sr+%1,5Al5TiB.

Çizelge 6. 2. Kum kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS analizleri.

Konum	Elementler (% ağırlık)								
	Al	Cu	Fe	O	Mn	Si	Mg	B	Ti
a-1	89,80	6,11	-	1,96	0,18	0,13	1,82	-	-
a-2	34,19	49,09	-	16,16	0,08	0,06	0,43	-	-
a-3	39,18	59,08	0,1	0,75	0,07	0,17	0,64	-	-
b-1	91,05	5,19	0,32	1,32	0,12	0,22	1,78	-	--
b-2	73,48	7,19	10,98	1,32	3,05	2,79	1,19	-	
b-3	70,56	15,36	6,07	4,36	1,80	0,63	1,22	-	-
c-1	80,64	4,76	-	1,63	0,32	0,09	1,55	11,02	-
c-2	6,81	4,15	0,89	10,18	0,43	0,20	0,06	39,64	37,65
c-3	47,19	9,71	20,23	1,94	8,34	4,95	0,3	7,30	-
c-4	3,31	1,39	-	19,57	-	-	1,47	74,50	-
d-1	78,65	4,59	-	0,81	0,55	0,04	1,50	13,86	-
d-2	43,11	14,77	16,94	3,86	16,94	4,25	0,28	9,85	0,11
d-3	44,51	40,36	-	4,57	-	0,29	0,8	8,96	-
d-4	45,88	12,48	18,07	3,54	18,07	3,72	0,36	10,02	-
d-5	41,18	15,55	18,48	4,02	18,48	4,14	0,35	10,49	-
d-6	77,22	5,9	0,21	2,34	0,21	0,09	1,34	12,6	-
d-7	2,19	84,89	-	5,70	-	0,39	0,07	6,75	-
e-1	79,83	4,32	0,08	1,67	0,23	0,08	1,33	12,46	-
e-2	47,97	10,37	6,44	1,23	6,44	5,34	0,53	8,46	0,16
e-3	18,70	58,42	1,30	14,91	1,30	0,66	0,99	4,64	0,38
e-4	66,98	11,01	-	6,67	-	0,12	1,16	13,29	0,15
e-5	9,82	2,25	-	18,16	-	0,25	1,27	66,88	0,08
e-6	46,91	11,40	20,02	1,29	6,81	5,12	0,42	8,04	-

Şekil 6.4.a.1, Şekil 6.4.a.2 ve Şekil 6.4.a.3 konumunda, Al-Cu-Mg bileşiği Şekil 6.4.b.1 konumunda, Al-Cu-Fe bileşiği Şekil 6.4.b.2, Şekil 6.4.b.3, Şekil 6.4.d.2 ve Şekil 6.4.e.6 konumunda Al-Cu-B bileşiği Şekil 6.4.c.1, Şekil 6.4.d.1, Şekil 6.4.d.3 ve Şekil 6.4.d.6 konumunda, B-Ti-O bileşiği Şekil 6.4.c.2 konumunda, Al-Fe-Mn bileşiği Şekil 6.4.c.3 konumunda, Al-B bileşiği Şekil 6.4.c.4 ve Şekil 6.4.e.1 konumunda, Cu-B-O bileşiği Şekil 6.4.d.7 konumunda, Al-B-O bileşiği Şekil 6.4.e.5 konumunda, Al-Cu-Fe-B bileşiği Şekil 6.4.d.4 ve Şekil 6.4.d.5 konumunda, Al-Cu-B-Ti bileşiği Şekil 6.4.e.2, Şekil 6.4.e.3 ve Şekil 6.4.e.4 konumundadır.



Şekil 6.5. Metal kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS'li SEM görüntüleri, (a) Al-Cu-Mg, (b) Al-Cu-Mg+Sr, (c) Al-Cu-Mg+Sr+%0,5Al5TiB, (d) Al-Cu-Mg+Sr+%1 Al5TiB, (e) Al-Cu-Mg+Sr+%1,5Al5TiB.

Çizelge 6.2. Metal kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının EDS analizleri.

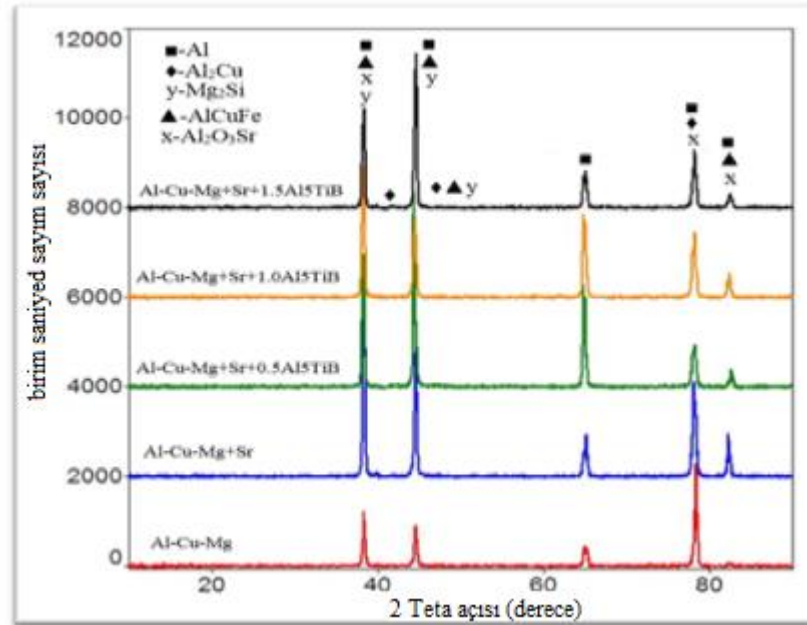
Konum	Elementler (% ağırlık)								
	Al	Cu	Fe	O	Mn	Si	Mg	B	Ti
a-1	38,1	57,45	0,14	0,75	0,04	0,11	3,41	-	-
a-2	36,2	44,1	1,3	15,4	0,07	0,13	0,8	-	-
a-3	40	3,55	3,37	1	0,06	0,17	1,4	-	-
b-1	89,80	6,11	-	1,96	0,18	0,13	1,82	-	--
b-2	34,19	49,09	-	16,6	0,08	0,06	0,43	-	-
b-3	39,18	59,08	0,1	0,75	0,07	0,17	0,64	-	-
c-1	81,07	5,37	-	1,23	0,16	0,06	1,67	10,44	-
c-2	35,7	55,63	-	1,40	-	0,13	0,58	6,50	-
c-3	1,19	1,34	22,52	18,90	16,36	-	0,29	39,03	2,38
c-4	34,02	53,43	0,17	5,03	0,17	0,55	0,55	6,07	0,02
c-5	36,01	56,4	0,29	0,72	0,07	0,11	0,56	6,21	-
d-1	15,92	1,09	1,84	22,77	2,78	22,03	1,04	32,53	-
d-2	26,98	45,03	-	1,87	0,36	0,25	0,11	25,18	0,21
d-3	9,8	54,29	0,42	9,56	0,58	0,77	0,4	24,12	-
d-4	25,68	42,82	0,77	2,06	-	0,19	0,06	28,19	0,25
d-5	12,22	52,73	2,66	4,63	1,61	0,03	0	25,87	0,26
d-6	55,38	4,65	0,15	2,39	0,10	-	1,7	34,85	0,78
e-1	79,83	4,32	0,08	1,67	0,23	0,08	1,33	12,46	-
e-2	47,97	10,37	6,44	1,23	6,44	5,34	0,53	8,46	0,16
e-3	18,70	58,42	1,30	14,91	1,30	0,66	0,99	4,64	0,38
e-4	66,98	11,01	-	6,67	-	0,12	1,16	13,29	0,15
e-5	9,82	2,25	-	18,16	-	0,25	1,27	66,88	0,08
e-6	46,91	11,40	20,02	1,29	6,81	5,12	0,42	8,04	-

Şekil 6.5.a.1, Şekil 6.5.a.3, ve Şekil 6.5.b.3 konumunda, Al-Cu-O bileşiği Şekil 6.5.e.1 konumunda, Al-Cu-O bileşiği Şekil 6.5.a.2, Şekil 6.5.b.1, Şekil 6.5.b.2, Şekil 6.5.c.2, ve Şekil 6.5.c.5 konumunda, Al-B-O bileşiği Şekil 6.5.c.1, Şekil 6.5.d.1, ve Şekil 6.5.e.5 konumunda, Fe-B-Ti-O bileşiği Şekil 6.5.c.3 konumunda, Al-Cu-B-Ti bileşiği Şekil 6.5.c.4, ve Şekil 6.5.d.2 konumunda, Cu-B-O bileşiği Şekil 6.5.d.3 konumunda, Al-Cu-B-Ti-O bileşiği Şekil 6.5.d.4, Şekil 6.5.d.5, Şekil 6.5.d.6, Şekil 6.5.e.3, ve Şekil 6.5.e.4 konumunda, Al-Cu-Fe-B-Mn bileşiği Şekil 6.5.e.6 konumundadır.

Lin ve arkadaşları Al-Si-Mg-Fe alaşımlarına % 6-12 ve % 20 oranında Al<sub>5</sub>TiB master alaşım ilave etmişlerdir. EDS'li SEM analizlerinde hızlı soğumadan dolayı çekirdeklenmeler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu bölgelerde β-Fe içerisinde Al-Si ve Ti-B bileşiklerini bulduklarını ifade etmişlerdir [59]. Tunçay yapığı çalışmada Al-Si-Cu (LM24) alaşımına Sr ile modifikasyon ve Al<sub>5</sub>TiB ile tane inceltme işlemi sonrası EDS'li SEM analizlerinde Al<sub>5</sub>TiB master alaşım miktarının artmasıyla kum kalıba dökülen alaşımının, A<sub>2</sub>Cu çökeltilerinin büyüdüğü belirlenmiştir. Metal kalıpta ise kum kalıba kıyasla ince A<sub>2</sub>Cu çökeltilerinin oluştuğu belirlenmiştir. Isıl işlem ile çökelti fazın artırdığı belirtmişlerdir [60].

### 6.2.3. X-Işını Dağılımı Analizi

Çalışmada modifikasyon ve tane inceltme işlemi uygulanmış Al-Cu-Mg alaşımlarının kuma döküm sonrası numunelerden elde edilen XRD sonuçları Şekil 6.6.' de verilmiştir. Al-Cu-Mg alaşımlarının x-ışını kırınımı analizi sonucunda, 2 teta açısı 38 derecede Al, Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si, AlCuFe ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sr bileşiği, 2 teta açısı 44-45 derece arasında Al, Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si ve AlCuFe bileşikleri, 2 teta açısı 64-65 derece arasında Al elementi, 2 teta açısı 78 derece Al, Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sr bileşiği belirlenmiştir.



Şekil 6.6. Al-Cu-Mg alaşımlarının XRD sonuçları.

XRD sonuçlarında modifikasyon işlemi uygulanan Al-Cu-Mg alaşım gruplarında ilave edilen Sr master alaşımından dolayı yapıda  $Al_2O_3Sr$  bileşiklerine rastlanmıştır. Göğebakan ve arkadaşları, Al-Cu-Fe alaşımlarının katılaştırılması üzerine yaptıkları çalışmada XRD sonuçlarında, kübik  $\beta$ -AlFe (Cu) fazı, tetragonal yapıda  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu fazının ( $\theta$  fazı) ve az miktarda tetragonal yapıda  $\omega$ -Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe fazını belirlemişlerdir. Medrano-Prieto ve arkadaşları, Al-Si-Cu alaşımlarını geçiş elementleri ile modifikasyon işlemi uygulamışlar ve XRD sonuçlarında barkıca zengin bileşime sahip (Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>2</sub>CuMg) fazını, Fe bileşimine bağlı olarak (Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ve AlFeSi) bileşiklerini belirlemişlerdir [61]. Zamani ve arkadaşları, Al-Cu-Mg-Ag Alaşımının ısıtılmasının optimizasyon Al-Cu-Mg alaşımlarında a-Al, Al<sub>2</sub>Cu, Al<sub>2</sub>CuMg ve Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe bileşiklerini belirlemişlerdir [62].

### 6.3. MEKANİK TEST SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

#### 6.3.1. Sertlik Ölçümleri Sonuçları ve Tartışmalar

Döküm yöntemiyle metal ve kum kalıba dökülen; modifikasyon (Al<sub>10</sub>Sr) işleminin ve Al<sub>5</sub>TiB ile tane inceltme işlemlerinin sertlik üzerine etkisi incelenmiştir. Çizelge 6.5’ te Al-Cu-Mg alaşımlarının mikro ve makro sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.3. Al-Cu-Mg Alaşımlarına ait mikro ve makro sertlik değerleri.

Alaşım grubu	Mikro Sertlik		Makro Sertlik	
	Kum Kalıp.	Metal Kalıp .	Kum Kalıp.	Metal Kalıp
Al-Cu- Mg	141	160	104	110
Al-Cu- Mg + Sr	143	170	111	112
Al-Cu- Mg +Sr + % 0,5 Al <sub>5</sub> TiB	159	173	114	115
Al-Cu- Mg + Sr + % 1 Al <sub>5</sub> TiB	135	132	111	106
Al-Cu- Mg + Sr+ % 1,5 Al <sub>5</sub> TiB	131	107	103	114

Mikro sertlikler sonuçlarına göre, modifikasyon işlemi ile Al-Cu-Mg alaşımının kalıp malzemesine bağlı olmaksızın mikro ve makro sertlik değerlerinde artış belirlenmiştir.

Tane inceltme işleminde tane ineltici Al5TiB master alaşım ilavesinin artmasıyla mikro ve makro sertlik değerlerinde belirgin bir düşüş söz konusudur.

En yüksek mikro ve makro sertlik değeri modifikasyon ve % 0,5 Al5TiB ile tane inceltme işlemi uygulanan Al-Cu-Mg alaşımında yakalanmıştır. En düşük mikro ve makro sertlik değeri modifikasyon ve % 1,5 Al5TiB tane inceltme işlemi uygulanmış Al-Cu-Mg alaşımında elde edilmiştir. Kalıp malzemesine bağlı olarak değerlendirildiğinde, Al-Cu-Mg alaşımı, modifikasyon işlemi uygulanmış Al-Cu-Mg alaşımı ve modifikasyon, % 0,5 Al5TiB ile tane inceltme uygulanmış Al-Cu-Mg alaşımında metal kalıba dökülen alaşımların daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun tam aksine, modifikasyon ve % 1-1,5 Al5TiB ile tane inceltme uygulanmış Al-Cu-Mg alaşımlarda metal kalıba dökülen numunelerin sertlik değerleri kum kalıba dökülen numunelerin sertlik değerlerine nazaran daha düşüktür. Tunçay yaptığı çalışmada Al-Si-Cu (LM24) alaşımına Sr ile modifikasyon ve Al5TiB ile tane inceltme işlemi sonrası mekanik test çalışmalarında elde ettiği sertlik sonuçlarında alaşımın Sr modifikasyonun makro sertliğinin kalıp türüne bağlı olarak değişmediğini belirtmişlerdir. Al5TiB master alaşım miktarı arttıkça makro sertlik değerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir [60].

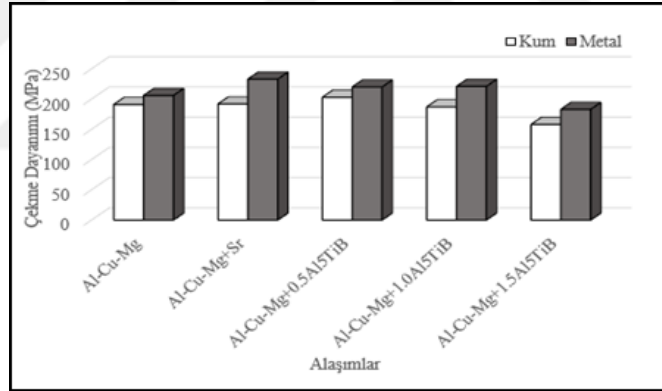
### **6.3.2. Çekme Testi Sonuçları ve Tartışmalar**

Al-Cu-Mg alaşımlarına uygulanan modifikasyon (Al10Sr) ve Al5TiB ile tane inceltme sonrasında çekme test numuneleri ile maksimum çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri incelenmiştir. Al-Cu-Mg alaşımları çekme test sonuçları, maksimum çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri altı numunenin aritmetik ortalaması üzerinden değerlendirilmiştir. Kum ve metal kalıp malzemesine göre (soğuma hızına bağlı olarak) metal kalıplarda elde edilen ortalama maksimum çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri daha yüksektir. Çizelge 6.6' da Al-Cu-Mg alaşımlarının metal ve kum döküm ortalama maksimum çekme mukavemetleri ve yüzde uzama değerleri verilmiştir. Şekil 6.7' de Al-Cu-Mg alaşımların ortalama maksimum çekme dayanımlarındaki ortalamaları ve Şekil 6.8' de ortalama yüzde uzama değerlerinde modifikasyon ve tane inceltme işleminin etkisi verilmiştir.

Çizelge 6.4. Al-Cu-Mg alaşımlarına ait ortalama çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri.

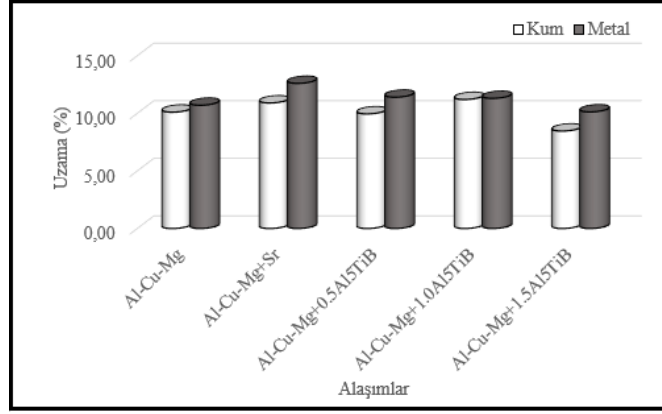
Alaşım grupları	UTS		% ε	
	Kum k.	Metal k.	Kum k.	Metal k.
Al-Cu- Mg	190	206	10,14	10,73
Al-Cu- Mg + Sr	192	233	10,96	12,6
Al-Cu- Mg +Sr+ % 0,5 Al5TiB	203	220	9,95	11,48
Al-Cu- Mg + Sr + % 1 Al5TiB	188	221	11,21	11,36
Al-Cu- Mg + Sr+ % 1,5 Al5TiB	158	183	8,46	10,12

Campbell, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin döküm işleminde kalıp içerisine giren sıvı metalin kalıp cinsine bağlı olarak soğuma hızı bağlı olduğunu belirtmiştir. Soğuma hızı yani ısıl iletkenliği yüksek kalıp malzemesine alınan tane inceltme işleminde tanelerin daha küçük olmasına neden olmaktadır [9,63].



Şekil 6.7. Al-Cu-Mg alaşımları ortalama çekme mukavemeti.

Kum kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+% 1,5 Al5TiB alaşımında 182,99 N/mm<sup>2</sup> ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 0,5 Al5TiB alaşımında 213,96 N/mm<sup>2</sup> ölçülmüştür. Metal kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 1,5 Al5TiB alaşımında 158,43 N/mm<sup>2</sup> ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 1 Al5TiB alaşımında 219,71N/mm<sup>2</sup> ölçülmüştür. Şekil 6.7' de Al-Cu-Mg alaşımların metal ve kum döküm gruplarının maksimum uzama ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 6.8. Al-Cu-Mg alaşımları ortalama kopma uzama % değerleri.

Kum kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+% 1,5 Al5TiB alaşımında % 8,46 ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 0,5 Al5TiB alaşımında % 11,48 ölçülmüştür. Metal kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 0,5 Al5TiB alaşımında % 9,95 ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 1 Al5TiB alaşımında % 12,6 ölçülmüştür Zhu ve arkadaşları döküm yöntemiyle elde edilen AA2024 alaşımına tane inceltme işlemi uygulamışlardır. Mekanik test çalışmalarında çekme testinde ortalama gerilme mukavemetini 236 MPa ortalama akma gerilimini 186 MPa ve % uzama miktarını ortalama %13,9 olarak bulmuşlardır [64].

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, Al-Cu-Mg alaşımına uygulanan modifikasyon ve tane inceltme işlemi sonrasında mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen mikroyapı görüntüleri ve mekanik test sonuçları ile aşağıdaki sonuçlar not edilmiştir.

- Kum kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının, metal kaba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarına göre daha büyük ve kaba dentrilerden oluştuğu görülmektedir. Dendritler arasındaki boyut farklılığın döküm işleminde kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğine bağlı olarak soğuma hızına etkisinden oluştuğu düşünülmektedir.
- Kum ve metal kalıba dökülen Al-Cu-Mg alaşımlarının tamamında, optik mikroskop ve SEM mikroskobu görüntülerinde dendritler arasında çekme boşlukları ve porozite oluştuğu görülmüştür. Ayrıca metal kalıplarda bazı bölgelerde bu çekme boşluklarını birbirine bağlayan çatlak görüntüsünde oluşumlar belirlenmiştir.
- Al-Cu-Mg alaşımına Al10Sr ile uygulanan modifikasyon ve Al5TiB ile uygulanan tane inceltme işlemi Al-Cu-Mg alaşımına etkisi SEM görüntülerinde  $\alpha$ -alüminyum dentritler ve intermetalik fazlar elde edilmiştir.
- Al-Cu-Mg alaşımlarının XRD sonuçları x-ışını kırınımı analizi sonucunda, Al, Al<sub>2</sub>Cu, Mg<sub>2</sub>Si, AlCuFe ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sr bileşiklerine rastlanmıştır.

- Tane inceltme işleminde tane inceltici Al<sub>5</sub>TiB master alaşım ilavesinin artmasıyla mikro ve makro sertlik değerlerinde belirgin bir düşüş söz konusudur.
- Alınan makro sertlikler sonucunda, mikro sertlikte de olduğu gibi Al-Cu-Mg alaşımında kum ve metal kalıplarda da Al<sub>5</sub>TiB master alaşım ilavesin % 0,5' e sertlikte artış görülmüştür. Kum dökümlerde % 0,5' ten sonra sertlik düşmüştür. Fakat metal dökümde % 1 Al<sub>5</sub>TiB ilavesinde bir miktar düşmüş, % 1,5 Master alaşım ilavesinde tekrar artmıştır.
- Kum kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+% 1,5 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında 182,99 N/mm<sup>2</sup> ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg +Sr+% 0,5 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında 213,96 N/mm<sup>2</sup> ölçülmüştür. Metal kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+% 1,5 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında 158,43 N/mm<sup>2</sup> ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+% 1 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında 219,71 N/mm<sup>2</sup> ölçülmüştür.
- Kum kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+%1,5 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında %8,46 ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+%0,5 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında % 11,48 ölçülmüştür. Metal kalıplara dökülen Al-Cu-Mg alaşımında en düşük maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+%0,5 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında % 9,95 ölçülürken en yüksek maksimum çekme mukavemeti Al-Cu-Mg+Sr+%1 Al<sub>5</sub>TiB alaşımında % 12,6 ölçülmüştür.
- Döküm yolu ile elde edilen Al-Cu-Mg alaşımlarında sertlik değerleri ele alındığında ideal alaşımın Al-Cu-Mg+Sr+%0,5 Al<sub>5</sub>TiB olduğu, maksimum çekme dayanımı değerleri ele alındığında kum kalıplarda Al-Cu-Mg+Sr+%0,5 Al<sub>5</sub>TiB, metal kalıplarda ise Al-Cu-Mg +Sr+%1 Al<sub>5</sub>TiB, % uzama miktarı değerleri ele alındığında Al-Cu-Mg +Sr+%1 Al<sub>5</sub>TiB istenilen mekanik özellikleri sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: “Bartın Üniversitesi”, <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/intermetalikmalzemeler1.pdf>
2. Çolak, M., Kayıkçı, R., “Alüminyum dökümlerde tane inceltme”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1): 11-17 (2009).
3. Erkal, S., “AA2024 alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısıl işlemlerinin mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2011).
4. Türköz, M., “Al2024 ve Al5754 alaşımlı alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2009).
5. Campbell, J., “Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design”, *Butterworth-Heinemann* (2015).
6. İnternet: “Erdogan Döküm”, <http://www.erdogandokum.com/uretim.html> (2015).
7. Sirrell, B. and Campbell, J., “Mechanism of filtration in reduction of defects due to surface turbulence during mold filling”, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 105: 645-654 (1997).
8. Hsu, F.Y. and Lin, H.J., “foam filters used in gravity casting”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 42(6): 1110-1117 (2011).
9. Campbell, J., “Entrainment defects”, *Materials Science and Technology*, 22(2): 127-145 (2006).
10. Wang, X., Liu, Z., Dai, W. and Han, Q. “On the understanding of aluminum grain refinement by Al-Ti-B type master alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 46(4): 1620-1625 (2015).
11. Bryant, M. and Fisher, P., “Grain refining and the aluminium industry (past, present and future)”, *Aluminium Casthouse Technology*, Melbourne, 4-8 (1993).
12. Baypınar, F., “Alüminyum Döküm Alaşımlarında Al5Ti1B ile Tane İnceltme İşlemi Uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-20 (2005)

13. İnternet: “Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri”, <https://www.metalurjik.net/aluminyum-alasimlarinin-ozellikleri#more-703> (2018).
14. Yılmaz, M., “Al ve Alaşımların Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1996).
15. Tımaç, G., “Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Tıg Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).
16. Türker, E., “Alüminyum ve Alaşımlarının Dökümünde Rafinasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü* (2005).
17. Properties, ASM Metals HandBook, “Selection: nonferrous alloys and special-purpose materials”, *ASM International*, 2: 78-79 (1990).
18. Yükler, İ., “Alüminyum alaşımlar ve ısıl işlemleri”, İstanbul, 150-200 (2000).
19. Kayayıldız, I., “Al7075 alaşımının şekillenme ve ısıl işlemle özelliklerinin iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2005).
20. Kılıç, N., “Bol ve kullanışlı bir madde: alüminyum”, A&G Bülten Araştırma ve Meslekleri Geliştirme Müdürlüğü, Şubat, 15-20 (2003).
21. İnternet: “Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu” [https://www.tobb.org.tr/Documents/yayinlar/Tobb\\_Demir\\_Sektor\\_rapor2011.pdf](https://www.tobb.org.tr/Documents/yayinlar/Tobb_Demir_Sektor_rapor2011.pdf) (2010).
22. Ak, M., “AA206 alüminyum döküm alaşımında empürite demirin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2012).
23. İnternet: “Demir Dışı Metallerin Kaynağı”, [https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/aluminyumda\\_alasim\\_elementlerinin\\_ etkilesimi.pdf](https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/aluminyumda_alasim_elementlerinin_ etkilesimi.pdf) (1990).
24. İnternet: “Alüminyumun İstatiksel İncelenmesi”, <https://www.aluminum.org/aluminum-statistical-review-annual-fact-book> (2017).
25. Güven, O., “Alüminyum silisyum magnezyum döküm alaşımlarının yapı incelemesi”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
26. Su, S., “2XXX grubu alaşımlarda katı eriyiğe almada sıcaklık ve sürenin yaşlanma sonrası özelliklere etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (1988).
27. Erdoğan, M., “Al-Li-Cu-Mg alaşımlarında yaşlandırma mekanizması ve ısıl işlemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 146 (1996).

28. Kareva, N. T. and Koryagin, Y.D., “Thermomechanical treatment of aging aluminum alloys”, *Metal Science and Heat Treatment*, 56(9-10): 483-488 (2015).
29. Vishwakarma, K.R., Richards, N.L. and Chaturvedi, M.C., “Microstructural analysis of fusion and heat affected zones in electron beam welded Allvac 718Plus super alloy”, *Materials Science and Engineering*, 480(1-2): 517-528 (2008).
30. Türköz, M., “Al2024 ve Al5754 alaşımlı alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2009).
31. Güngören, M., “AA2014 alüminyum alaışımının mikro yapısının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ (2015).
32. Aydın, H., Bayram, A., “Farklı ısıl işlem koşullarındaki 2024 alüminyum alaışımının korozyon sonrası mekanik özelliklerindeki kaybın belirlenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1) (2010).
33. Doğan, M., “Alüminyumların ısıl işlemi”, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1989).
34. Askeland, D.R., “The Science and engineering of materials”, *Wadsworth Publishing Company*, 812 (1994).
35. Birol, Y., “AlB<sub>3</sub> Master Alloy to Grain Refine AlSi<sub>10</sub>Mg and AlSi<sub>12</sub>Cu Aluminium Foundry Alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 513: 150–153 (2012).
36. İnternet: “Döküm Teknolojisi İmal Usulleri Ders Notları” <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/dokum.pdf> (2007).
37. Tunçay, T., Özyürek, D., “Döküm yöntemi ile üretilen parçalarda yolluk sistemlerinin parça kalitesi ve döküm hataları üzerindeki etkisine genel bakış”, *Metal Dünyası*, 198: 88-90 (2009).
38. Takemoto, S., Hattori, M., Yoshinari, M., Kawada, E., Asami, K. and Oda, Y., “Corrosion mechanism of Ti-Cr alloys in solution containing fluoride”, 25(4): 467-472 (2009).
39. Sigworth, G.K., “Theoretical and practical aspect of the modification of Al-Si alloys”, *A.F.S. Trans*, 91(715.2) (1983).
40. Akbey, A., “Al-Si alaışımalarında metalik sodyum ve antimon ilavesinin mikro yapıları üzerine etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2013).
41. Ma, Z.Y., Sharma, S.R. and Mishra, R.S., “Microstructural modification of As-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(11): 3323-3336 (2006).
42. Dahle, A.K., Nogita, K. and McDonald, S.D., “Eutectic modification of Al-Si alloys with rare earth metals”, *Materials Transactions*, 45(2): 323-326 (2004).

43. Kanani, N., Abbaschican, G.R. and Gainesuille, F.L., “Modification of aluminium- silicon alloys”, *Aluminium*, 8: 505-509 (1984).
44. Uludağ, M., “Farklı şartlarda dökülmüş modifiyeli Al-12Si alaşımlarında yapı ve özellikler”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2011).
45. Zhu, Z.F. and Lan, Y.F., “The research about actuality and tendency on grain refinement of aluminum and alloys”, *Research Studies on Foundry Equipment*, 2: 51-54 (2004).
46. Muter, S., “Alüminyum döküm parçalarında mekanik özelliklerin geliştirilmesi”, *4. Ulusal Metalürji Kongre ve Sergisi*, Seydişehir, 664-678 (1986).
47. Çakmak, H.F., “Eritilmiş alüminyumun özelliklerinin iyileştirilmesi ve nitelik denetimi”, *2. Alüminyum Sanayi Kongresi*, Seydişehir, 215-239 (1984).
48. Bryant, M. and Pearson, J., “Tane inceltme ve alaşımlandırma”, *Alüminyum Dergisi*, 7: 15-18 (1990).
49. Akgündüz, B., Altıntaş, S., “Al-5Ti-1B alaşımlarının alüminyum ingotlar üzerine tane inceltme etkileri”, *4. Ulusal Metalürji Kongre ve Sergisi*, Seydişehir, 1090-1108 (1986).
50. Serdaroğlu, R., “Alüminyum dökümlerde tane inceltme”, *Alüminyum Dergisi*, 4: 35-38 (1990).
51. Lieserberg, O. and Drossel, G., “Casting aluminium handbook 2”, *Aluminium Verlag GMBH*, Düsseldorf, 386-388 (2001).
52. Uygun, G., Bozkurt, N., Geçkinli, E., “Alüminyum bor ile tane küçültme ve bor dağılımının otoradyografi ile tespiti”, *4. Ulusal Metalürji Kongre ve Sergisi*, Seydişehir, 753-765 (1986).
53. Birol, Y., “Tane küçültme uygulamaları için yüksek karbonlu Al-Ti-C alaşımlar”, *Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 1497-1504 (2003).
54. Çolak, M., Kayıkçı, R., “Alüminyum alaşımlarının dökümünde tane inceltme”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1): 11-17 (2009).
55. Yuandong, Li., Yanlei, Li., Yuandong, Li., Chun, Li. and Huihui, Wu., “Microstructure characteristics and solidification behavior of wrought aluminum alloy 2024 rheo-diecast with self-inoculation method”, *China Foundry* 9(4) (2012).
56. Tanyel, Z., “Al-4,5Cu döküm alaşımında tane inceltme işleminin etkisinin zamanla değişiminin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2014).
57. Xie, F.Y., Kraft, T., Zuo, Y., Moon, C.H. and Chang, Y.A., “Microstructure and microsegregation in Al-rich Al-Cu-Mg alloys”, *Acta Materialia* 47(2): 489-500 (1999).

58. Amerioona, A., Emamyya, M. and Ashuria, G.H., “Investigation the affect of Al-5Ti-1B grain refiner and T6 heat treatment on tensile properties of Al-8%Mg”, *Procedia Materials Science*, 11: 32-37 (2015).
59. Lin, B., Li, H., Xu, R., Shi, Y, Xiao, H., Zhang, W. and Liu, K., “Precipitation of iron-rich intermetallics and mechanical properties of Al–Si–Mg–Fe alloys with Al–5Ti–B”, *Materials Science and Technology* 34(17): 2145-2152 (2018).
60. Tunçay, T., “AlSiCu (LM24) alüminyum alaşımında modifikasyon ve tane inceltmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8:21-28 (2019).
61. Göğebakan, M., Avar, B., Uzun, O., “Quasicrystalline phase formation in the conventionally solidified Al-Cu-Fe system”, *Materials Science*, 27(3): 0137-1339 (2009).
62. Zamani, M., Toschi. S., Morri, A., Ceschini, L. and Seifeddine, S, “Optimisation of heat treatment of Al–Cu–(Mg–Ag) cast alloys” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 1-14 (2019).
63. Campbell, J., “Casting(second edition)”, *Butterworth-Heinemann*, Oxford, United Kingdom, 17-98 (2003).
64. Zhu, C., Zhao Z., Wang G., Zhu Q. and Wang, S., “Effect of 2024Al alloy insert on the grain refinement of a 2024 Al alloy prepared via insert mold casting” *Metals*, 9(10): 1126 (2019).

## ÖZGEÇMİŞ

Ali Yiğit AY 1993 yılında Bursa’da doğdu; ilk öğretim ve orta öğrenimini Bursa’da bitirdi. Ali Osman Sönmez Anadolu Teknik Lisesi’ nde Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri Bölümü’nden 2011 yılında mezun oldu. Ardından 2011 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başladı. 2017 yılında iyi derece ile mezun oldu ve 2017 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel : (553) 548 2969

E-posta : alygt.ay@gmail.com – aliyigitay93@gmail.com