



T.C.  
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al-Mg-Ti-Si ve Al-Mg-Ti-Si-B ALAŞIMLARININ MEKANİK  
ALAŞIMLAMA METODU İLE ÜRETİLMESİ VE  
MİKROYAPISAL VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**SERDAR KAPLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**KAHRAMANMARAŞ 2025**

T.C.  
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Al-Mg-Ti-Si ve Al-Mg-Ti-Si-B ALAŞIMLARININ MEKANİK  
ALAŞIMLAMA METODU İLE ÜRETİLMESİ VE  
MİKROYAPISAL VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

SERDAR KAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Fizik Ana Bilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2025

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

SERDAR KAPLAN

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 2022/7-7 YLS

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**Al-Mg-Ti-Si ve Al-Mg-Ti-Si-B ALAŞIMLARININ MEKANİK ALAŞIMLAMA  
METODU İLE ÜRETİLMESİ VE MİKROYAPISAL VE TERMAL  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ  
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**SERDAR KAPLAN**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında Mekanik Alaşım (MA) tekniği kullanılarak  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  kompozisyonuna sahip toz alaşımları 1 saat, 5 saat, 10 saat, 50 saat ve 100 saat süreyle öğütülmüştür. Üretilen toz alaşımların kristal yapısı, mikroyapısı ve ısıl özellikleri sırasıyla; X-ışını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazları kullanılarak incelenmiştir. XRD sonuçları 100 saat öğütme süresi sonunda alaşımların kararlı kristal yapıda olduğunu göstermiştir. SEM sonuçları, toz alaşımların öğütme işlemine bağlı olarak soğuk kaynaşma ve kırılma mekanizmasına maruz kaldığını ve bunun sonucu olarak morfolojik yapısının değiştiğini ve mikro yapının homojen hale geldiğini göstermiştir. Alaşımların 100 saat öğütülmesi sonrası tane boyutlarının 1  $\mu m$  ile 10  $\mu m$  arasında olduğu belirlenmiştir. 100 saatlik öğütme ile elde edilen alaşımların DTA sonuçları 100 °C ile 800 °C arasında herhangi bir endotermik ve ekzotermik pik göstermemiştir. Bu sonuç 100 saatlik öğütme işleminden sonra alaşımların ısıl olarak kararlı halde olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alaşım, Mekanik Alaşım, XRD, SEM, DTA

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Ana Bilim Dalı, Şubat / 2025

Danışman: Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan YAYKAŞLI

Sayfa sayısı: 97

**PRODUCTION OF Al-Mg-Ti-Si AND Al-Mg-Ti-Si-B ALLOYS BY MECHANICAL  
ALLOYING METHOD AND INVESTIGATION OF THEIR  
MICROSTRUCTURAL AND THERMAL PROPERTIES**

**(M.Sc. THESIS)**

**SERDAR KAPLAN**

**ABSTRACT**

In this thesis study, powder alloys with compositions of  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  and  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  were milled for 1 hour, 5 hours, 10 hours, 50 hours and 100 hours using the Mechanical Alloying (MA) technique. The crystal structure, microstructure and thermal properties of the produced powder alloys were examined using X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) and Differential Thermal Analysis (DTA) devices, respectively. XRD results showed that the alloys were in a stable crystal structure at the end of 100 hours of milling. SEM results showed that the powder alloys were exposed to cold welding and fracture mechanisms due to the milling process and as a result, their morphological structure changed and the microstructure became homogeneous. It was determined that the grain sizes of the alloys were between 1  $\mu m$  and 10  $\mu m$  after 100 hours of milling. DTA results of alloys obtained with 100 hours of milling did not show any endothermic or exothermic peaks between 100  $^{\circ}C$  and 800  $^{\circ}C$ . This result showed that the alloys were thermally stable after 100 hours of milling.

**Keywords:** Alloy, Mechanical Alloying, XRD, SEM, DTA

Kahramanmaraş Sütçü İmam University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physical, February/ 2025

Supervisor: Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Co-supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Hakan YAYKAŞLI

Page number: 97

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleőtirilmesinde, bana destek veren ve yon gosteren danışman hocam; Sayın Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN'a, çalıőmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen 2. Danışman hocam Sayın Dr. ÖĞr. Üyesi Hakan YAYKAŞLI'ya ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli eőim ve çocuklarıma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

SERDAR KAPLAN



# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Alaşım.....	2
1.1.1. Alaşımların Özellikleri .....	2
1.1.2. Alaşımların Çeşitleri ve Sınıflandırılması .....	3
1.2. Hafif Alaşımlar .....	4
1.3. Alüminyum.....	6
1.3.1. Alüminyumun özellikleri.....	6
1.3.2. Alüminyum Alaşımları .....	7
1.3.2.1. Al-Cu Alaşımları .....	9
1.3.2.2. Al-Mn Alaşımları .....	9
1.3.2.3. Al-Si Alaşımları.....	9
1.3.2.4. Al-Mg Alaşımları .....	9
1.3.2.5. Al-Mg-Si Alaşımları.....	9
1.3.2.6. Al-Zn Alaşımlar.....	10
1.3.2.7. Al-Li Alaşımları .....	10
1.4. Alüminyum Alaşımlarında elementlerinin Etkisi.....	10
1.4.1. Magnezyum .....	11
1.4.2. Silisyum.....	11
1.4.3. Bor .....	12
1.4.4. Titanyum.....	12
1.5. Alaşımların Üretim Teknikleri .....	13
1.5.1. İkame Alaşımlar .....	13
1.5.2. Boşluk Dolduran Alaşımlar .....	13
1.5.3. Alaşımların Yapısı ve Oluşturulma Süreçleri.....	14
1.5.4. Alaşımların Kullanım Alanları .....	14
1.5.5. Alaşım Örnekleri .....	15
1.5.6. Alaşımların Tarihçesi .....	15
1.5.7. İntermetalik Bileşikler .....	16
1.5.8. Elektron Bileşikleri.....	16

1.5.9. Katı Bileşikler.....	16
1.5.10. Ara Bileşikler.....	16
1.5.11. Denge Diyagramları .....	17
1.6. Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları.....	17
1.7. Tezin Amacı .....	21
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	22
3. MATERYAL METOT .....	30
3.1. Alaşımların Üretilmesi .....	31
3.2. Alaşımların İncelenmesi .....	36
3.3.1. X-Işını Difraksiyonu (XRD).....	36
3.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	37
3.3.3. Diferansiyel Termal Analizi (DTA) .....	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Al <sub>25</sub> Mg <sub>25</sub> Ti <sub>25</sub> Si <sub>25</sub> Alaşımlarının Analiz Sonuçları.....	40
4.1.1. XRD Analizi.....	40
4.1.2. SEM Analizi .....	47
4.1.3. DTA Analizi .....	53
4.2. Al <sub>20</sub> Mg <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> B <sub>20</sub> Alaşımlarının Analiz Sonuçları .....	58
4.2.1. XRD Analizi.....	58
4.2.2. SEM Analizi .....	64
4.2.3. DTA Analizi .....	70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	75
5.1. Sonuçlar.....	75
5.2. Öneriler.....	75
KAYNAKÇA .....	76
ÖZ GEÇMİŞ.....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Demir dışı bazı metaller .....	3
Şekil 1.2. İkame alaşımların özellikleri.....	13
Şekil 1.3. Al-Mg Denge Diyagramı .....	19
Şekil 1.4. Al-Si İkili Faz Diyagramı.....	19
Şekil 1.5. Al-Ti Denge Diyagramı .....	20
Şekil 1.6. Al-B Denge Diyagramı .....	20
Şekil 3.1. Tez çalışmasında üretim ve analiz aşamaları .....	30
Şekil 3.2. Fritsch Pulverisette 5 Marka Mekanik Alaşımlama Cihazı dış ve iç kısmının görüntüsü .....	32
Şekil 3.3. Silindirik bilyeli değirmende hareketin gösterilmesi .....	33
Şekil 3.4. Elementsel tozların Mekanik Alaşımlama işlemi sürecindeki deneysel çalışma mekanizmasının gösterimi .....	33
Şekil 3.5. Öğütme havanı iç kısmı, havan, mekanik alaşımlama havan kilit parçası ve bilyeler.....	34
Şekil 3.6. Argon atmosferli Glove Box.....	35
Şekil 3.7. Öğütme haznesinin ve bilyelerin hareketi .....	36
Şekil 3.8. Philips X'Pert PRO marka X-Işını Difraksiyonu (XRD) cihazı .....	37
Şekil 3.9. ZEISS EVO L10 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı .....	38
Şekil 3.10. ZEISS EVO L10 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı iç kısım.....	38
Şekil 3.11. Perkin-Elmer Diamond Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı.....	39
Şekil 4.1. MA ile 1 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ tozlarının XRD deseni .....	41
Şekil 4.2. MA ile 5 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ tozlarının XRD deseni .....	43
Şekil 4.3. MA ile 10 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının XRD deseni....	44
Şekil 4.4. MA ile 50 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının XRD deseni....	45
Şekil 4.5. MA ile 100 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının XRD deseni..	46
Şekil 4.6. MA ile 1, 5, 10, 50 ve 100 saat süreyle öğütülerek elde edilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının XRD deseni.....	47

<b>Şekil 4.7.</b> MA ile 1 saatlik süreyle öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	48
<b>Şekil 4.8.</b> MA ile 5 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	49
<b>Şekil 4.9.</b> MA ile 10 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	50
<b>Şekil 4.10.</b> MA ile 50 saat öğütülen üretilerek $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	51
<b>Şekil 4.11.</b> MA ile 100 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	52
<b>Şekil 4.12.</b> $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının SEM görüntüleri: .....	53
<b>Şekil 4.13.</b> MA ile 1 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının DTA grafiği ...	54
<b>Şekil 4.14.</b> MA ile 5 saat sürede öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının DTA grafiği .....	55
<b>Şekil 4.15.</b> MA ile 10 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının DTA grafiği .	56
<b>Şekil 4.16.</b> MA ile 50 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının DTA grafiği .	56
<b>Şekil 4.17.</b> MA ile 100 saat öğütülerek üretilen $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının DTA grafiği	57
<b>Şekil 4.18.</b> $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ alaşımının DTA grafiği: .....	57
<b>Şekil 4.19.</b> MA ile 1 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının XRD deseni .....	59
<b>Şekil 4.20.</b> MA ile 5 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının XRD deseni .....	60
<b>Şekil 4.21.</b> MA ile 10 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının XRD deseni .....	61
<b>Şekil 4.22.</b> MA ile 50 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının XRD deseni .....	62
<b>Şekil 4.23.</b> MA ile 100 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının XRD deseni.....	63
<b>Şekil 4.24.</b> MA ile 1-100 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının XRD deseni.....	64
<b>Şekil 4.25.</b> MA ile 1 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	65

<b>Şekil 4.26.</b> MA ile 5 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	66
<b>Şekil 4.28.</b> MA ile 50 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	68
<b>Şekil 4.29.</b> MA ile 100 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının SEM görüntüleri .....	69
<b>Şekil 4.30.</b> $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının SEM görüntüleri: <b>(a)</b> 1 saat, <b>(b)</b> 5 saat, <b>(c)</b> 10 saat, <b>(d)</b> 50 saat ve <b>(e)</b> 100 saat .....	70
<b>Şekil 4.31.</b> MA ile 1 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının DTA grafiği .....	71
<b>Şekil 4.32.</b> MA ile 5 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının DTA grafiği .....	72
<b>Şekil 4.33.</b> MA ile 10 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının DTA grafiği .....	72
<b>Şekil 4.34.</b> MA ile 50 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının DTA grafiği .....	73
<b>Şekil 4.35.</b> MA ile 100 saat öğütülerek üretilen $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının DTA grafiği .....	73
<b>Şekil 4.36.</b> $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$ alaşımının DTA grafiği: .....	74

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Elementlerin Yoğunlukları.....	5
<b>Çizelge 1.2.</b> Alüminyumun özellikleri .....	7
<b>Çizelge 1.3.</b> Alüminyum alaşımlarında elementlerin etkileri .....	11
<b>Çizelge 1.4.</b> Alaşım Elementlerinin Özellikleri .....	12
<b>Çizelge 3.1.</b> Alaşım elementlerinin bilgileri .....	31
<b>Çizelge 4.1.</b> Al <sub>25</sub> Mg <sub>25</sub> Ti <sub>25</sub> Si <sub>25</sub> alaşımını oluşturan elementlerin kristalografik parametreleri .....	41
<b>Çizelge 4.2.</b> Al <sub>25</sub> Mg <sub>25</sub> Ti <sub>25</sub> Si <sub>25</sub> alaşımının MA ile 5 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri.....	43
<b>Çizelge 4.3.</b> Al <sub>25</sub> Mg <sub>25</sub> Ti <sub>25</sub> Si <sub>25</sub> alaşımının MA ile 10 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri.....	44
<b>Çizelge 4.4.</b> Al <sub>25</sub> Mg <sub>25</sub> Ti <sub>25</sub> Si <sub>25</sub> alaşımının MA ile 50 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri.....	45
<b>Çizelge 4.5.</b> Al <sub>20</sub> Mg <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> B <sub>20</sub> alaşımının kristalografik parametreleri .....	59
<b>Çizelge 4.6.</b> Al <sub>20</sub> Mg <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> B <sub>20</sub> alaşımının MA ile 5 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri.....	60
<b>Çizelge 4.7.</b> Al <sub>20</sub> Mg <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> B <sub>20</sub> alaşımının MA ile 10 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri.....	61
<b>Çizelge 4.8.</b> Al <sub>20</sub> Mg <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> B <sub>20</sub> alaşımının MA ile 50 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri.....	62
<b>Çizelge 4.9.</b> Al <sub>20</sub> Mg <sub>20</sub> Ti <sub>20</sub> Si <sub>20</sub> B <sub>20</sub> alaşımının MA ile 100 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri.....	63

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al:	Alüminyum
Mg:	Magnezyum
Ti:	Tiyanyum
Si:	Silisyum
B:	Bor
XRD:	X ışını Kırınımı
SEM:	Taramalı Elektron Mikroskobu
DTA:	Diferansiyel Termal Analiz
MA:	Mekanik Alaşımlama
ICDD:	The International Centre for Diffraction Data

## 1. GİRİŞ

Hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan malzemeler günümüzde bilim insanlarının disiplinler arası çalışmasıyla birçok uygulama alanı için ilgi odağı olmuştur [1]. Bunun için bilim insanları daha kullanışlı malzemeler elde etmek ve/veya malzemelerin özelliklerini geliştirmek için araştırmalar yapmaya devam etmektedir. Metal, mühendislik malzemeleri arasında en çok kullanılanlar arasındadır. Metaller insanlık tarihi kadar eski ve binlerce çeşitli türevleri ile insanlığın günlük hayatını kolaylaştırmaya devam etmektedir. Metaller ilk olarak ateşin bulunmasıyla birlikte doğada keşfedilmiştir ve elementlerden ihtiyacı karşılayacak şekilde çeşitli malzemeler üretilmeye başlanmıştır [2]. Bu malzemeler arasında alaşımlar, özelliklerinden ve yaygın olarak kullanımlarından dolayı önemli bir yer işgal etmektedir. Birçok sektörde kullanılan alaşımlar saf elementlerden oluşmaktadır. Bu nedenle bir veya birden fazla elementin bir araya getirilmesiyle alaşımlar elde edilmektedir. Bu alaşımlar, saf metal elementlere kıyasla kimyasal, termal ve mekanik özellikleri daha iyi olmaktadır. Bununla birlikte teknolojinin sürekli gelişmesiyle yeni alaşımların arayışı devam etmektedir [3]. Son 20 yılda yapılan araştırmalarda yeni alaşımların üretilmesi ve/veya mevcut alaşımların özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine odaklanmaktadır [4].

Metaller, demir esaslı ve demir dışı olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Demir dışı alaşımlar kategorisinde özellikler hafif, özgül mukavemeti yüksek ve oksidasyon direnci yüksek olan alüminyum alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesi güncel araştırma konuları arasındadır. Alüminyum alaşımları havacılık, otomotiv, uzay ve metal mutfak eşyaları gibi birçok endüstriyel sektörde kullanımı yaygındır [5]. Bilim insanlarının ve araştırma yapan kişilerin bu alana yoğunlaşmasının sebebi üstün özellik gösteren alüminyum alaşımlarının endüstriyel alanda sıklıkla kullanmasıdır. Bundan dolayı farklı şekillerde üretilen alüminyum alaşımlarının özelliklerini araştırma ve hali hazırdaki özelliklerinin geliştirilip piyasaya daha ucuz yolla sürülmesi konusuna yoğunlaşmıştır. Oldukça yumuşak olan alüminyum metali kristal yapıları alaşımlar farklı türde mekanizmalar için iyileştirilip üretilmeye çalışılmaktadır. Alaşımların önemli olan bir boyutu da mikroyapılarıdır. Temel mekanizma haline gelen ve değişen mekanik özellikler alüminyum alaşımlarının mikroyapısından kaynaklanır [6].

## 1.1. Alaşım

Metal veya ametal olacak şekilde en az iki elementin ve bu elementlerden en az birinin metal olacak şekilde belirli oranlarda birleştirilerek üretilen, metal özellik gösteren bileşiklere alaşım adı verilir. Saf alüminyum, demir, bakır vb. elementler birçok metal elementi ile alaşım oluşturulabilir. Oluşan alaşımın özellikleri, alaşımı oluşturan elementlerin özelliklerinden farklıdır. Bu nedenle alaşımlar çok kullanılan önemli bir malzemedir ve araştırılıp geliştirmeye ihtiyaç vardır.

### 1.1.1. Alaşımların zellikleri

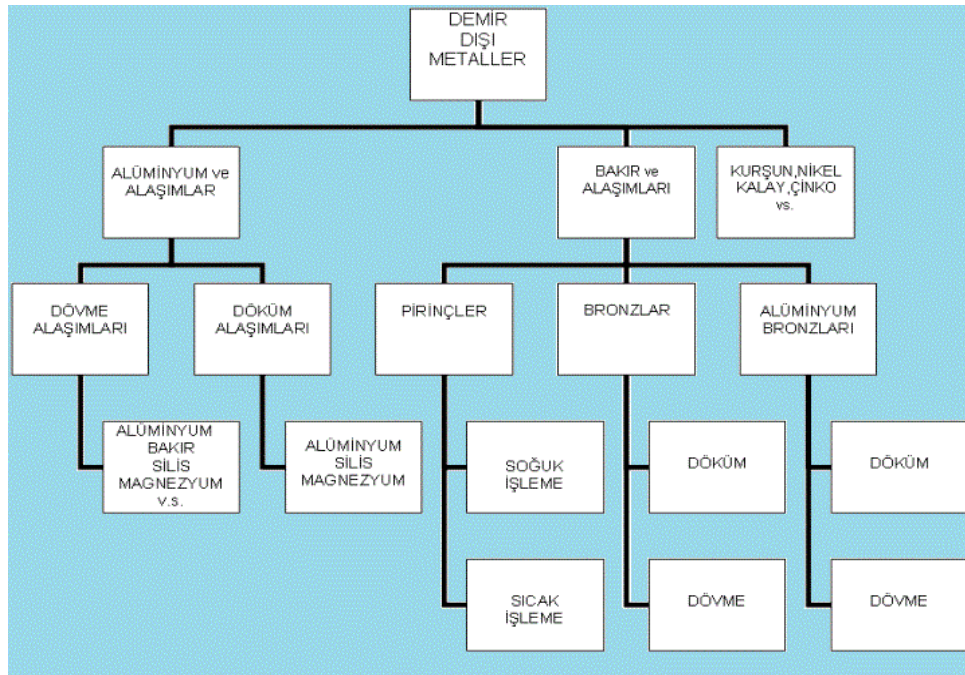
Elektriği ve ısıyı iyi ileten alaşımlar oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Alaşımlar farklı renklerde olabilir. Alaşımlar genel itibariyle yapısındaki elementlerden sertliği daha fazladır, işlenebilirliği daha azdır ve mukavemetli bu elementlerden daha fazladır. Işlenebilirlik özelliği yüksek olan altın; antimon ve kurşun gibi metallere birleştirildiği zaman çok daha kırılgan ve çok daha sert olur. Bazı metaller ise birleştiği zaman işlenebilme özelliğini kaybeder (Kalay-Bakır). Alaşımlar üretilirken elementlerin ikisi de katı ve sıvı halinde birbirlerinin içinde erirler. Metaller ise karışım üretilirken birbirlerinin içinde erimezler. Böylece gelişi güzel bir alaşım elde edilecektir. Bu tarz alaşımlar mikroskop ile incelendiği zaman çift kristal yapı gösterecektir (Antimon-Kurşun). Alaşım kristalleri iki elementin proton sayısı oranınca içermektedir (Sodyum malgaması, bakır-çinko, alüminyum-bakır, demir-karbon vb. alaşımlar). Fakat bu yapıya sahip olan alaşımlar mekaniksel olarak kullanıma elverişli yapıda değillerdir. Bu da kırıcılık özelliklerinin fazla olmasından kaynaklanır. Alaşımlar üretildikleri elementlerden genel olarak daha aktif özelliğe sahiptir. rnek olarak sodyum malgaması suyu biraz daha yavaş elektroliz eder. Normal şartlar altında sodyum elementi suya daha kuvvetli etki eder. Alaşımların erime sıcaklıkları üretildikleri elementlerden çok daha fazladır. Ancak bazı elementler ise üretildikleri elementlerden daha düşük bir erime sıcaklığına sahiptir. rnek olarak Pb 335 C, Bi 264 C, Sn 228 C, erime sıcaklığına sahip olduğu halde Bi<sub>8</sub>, Pb<sub>5</sub>, Sn<sub>3</sub> kısımlarından oluşan alaşımın erime sıcaklığı 335 C'dir. Bakır ve kalay alaşımı mukavemetini zaman içerisinde kaybeder. Bakır, çoğu alaşımın yapısına giren bir elementtir. Bakır, kıymetli maden olan gümüş ve altına sert bir özellik kazandırır ve renklerini ve parlaklıklarını bozmadan, inceliklerini korur [7].

Isı analizi yapılan madenleri bulunan alaşımların uçabilme özelliğine sahiptir. Gümüş ve altın gibi değerli metaller bu şekilde elde edilmektedir. Bu değerli metallerin

tozları öncelikle cıva ile karıştırılır. Daha sonra süzme işlemi yapılır ve cıva ayrıştırılır. Daha sonra alaşıma ısıtma işlemi uygulanır ve uçucu özelliğe sahip madde ayrıştırılır. Alaşımlar, kendini oluşturan maddelerden biraz daha az oksitlenme özelliği gösterir. Bu karışımlar asitlerden daha az etkilenir. Genel olarak alaşımlar oksitlenebilirler. Oksitlenme sonunda alaşımlardan biri asit oksit, bir diğeri ise baz oksit oluşturur. Bundan dolayı potasyum, kurşun, kalay ve antimon alaşımları yanıcıdır. Bu tarz alaşımlara başka türlü örnekler verecek olursak Alüminyum-Bakır, Bakır-Çinko, Sodyum-Cıva, Demir-Karbon bileşikleri gibi. Ancak tekniksel olarak bu tarz alaşımlar kullanım açısından elverişliliği düşüktür çünkü çok erken kırılabilirler. Bu tarz alaşımlar mikroskop ile incelendiğinde yüzeyine asit veya baz ayracı döküldüğünde alaşımın üzerinde çeşitli renkler görünür. Etki alanları birbirinden farklılık gösterir. Elementin çeşidine göre değişik boyutlarda çukur alanlar oluşur ve önceki haliyle karşılaştırılır. Resmi alınmak için tekrar mikroskop ile incelenir [8].

### 1.1.2. Alaşımların Çeşitleri ve Sınıflandırılması

Alaşımlar, içerdikleri elementlerin türüne ve atomların birbiriyle etkileşim biçimlerine göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, alaşımların geniş kullanım alanlarını ve farklı uygulamalarda nasıl tercih edildiklerini anlamamızı sağlar [9].



Şekil 1.1. Demir dışı bazı metaller

## 1.2. Hafif Alaşımlar

Çevre kirliliğinin artmasının yanı sıra enerji kaynaklarını sınırlı olması ile birlikte enerji tüketiminin azalması için tüketim ve ulaştırma gibi enerjinin çok tüketildiğı alanlarda tasarrufa gitme çabalara hız kazanmıştır. Yoğunluğı düşük olan elementlerden Alüminyum ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), Silisyum ( $2,33 \text{ g/cm}^3$ ), Magnezyum ( $1,74 \text{ g/cm}^3$ ), Lityum ( $0,534 \text{ g/cm}^3$ ), Titanyum ( $4,51 \text{ g/cm}^3$ ), Bor ( $2,34 \text{ g/cm}^3$ ) vb. metallerden elde edilen alaşımların hafif malzemeler olarak düşünülüyor.

Günümüzde alaşım malzemelerinin kalitesi ve teknolojik alandaki kullanımını değerlendirdiğimizde bu malzemeler üzerine yapılan araştırmaların gelecek yıllarda da artacağını söyleyebiliriz. Alaşım malzemelerinin nitelikleri ve teknolojideki kullanım uygulamasını göz önünde bulundurduğumuzda gelecekte de kullanım alanlarının daha da artacağı ön görülmektedir. İleri düzey metalik malzeme kategorisinde bulunan hafif alaşımlar, mukavemet/ağırlık oranı yüksek malzeme kategorisine girmektedir. Bu da mukavemet değeri yüksek aynı hacimli veya mukavemet değeri aynı daha az hacimli madde elde edilmesi demektir. Örnek olarak ulaşımda kullanılan araçların metal malzemelerinin hafifletilmiş olması, bu araçların ağırlığını azaltır ve yakıt tüketimi konusunda tasarruf sağlar. Otomotiv alanında araçların motor, gövde ve mekanik parçalarında hafif malzemelerin kullanımı enerji tasarrufu olarak değerlendirilmektedir. Günümüz teknolojisinde mevcutta kullandığımız metal malzemelerin niteliklerini daha da geliştirmek için yeni üretim teknikleri olan mekaniksel alaşımlama, toz metalurjisi, hızlı katılaştırma, ark ergitme vb. gibi teknikler gelişim göstermiştir. İstenilen düzeyde mekanik ve kimyasal özelliklere sahip malzeme üretilmesini sağlamak amacıyla ileri malzemelerin üretilme süreçleri ve atomik düzeyde değişimleri kontrol edilmektedir. Al, Ti, Si, Mg ve B gibi elementlerin oluşturduğu alaşımlar hafif alaşım özelliğı gösterir. Düşük yoğunluğa sahip olan Alüminyum ve Magnezyum alaşımları havacılık uygulamaları, otomotiv sektörü gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu da teknolojinin gelişmesi açısında bu alaşımları önemli bir yere koymaktadır. Bununla beraber metalurji sektöründe metal enjeksiyon, sıcak pres ve sinterleme tekniğı gibi çalışmalarla da hafif alaşım üretilebilmektedir. Buna benzer yöntemlerden biri de vakum ark ergitme yöntemidir. Bu yöntem ile üstün özellikte hafif alaşımlar üretilir. Havacılık ve otomotiv sektörü uygulamalarında önemli uygulama alanına sahip olmaktadır [10].

Üstün özelliklere sahip alaşımların endüstri alanında geniş bir kullanım alanına sahip olması alaşım üretimine verilen önemi kat kat arttırmaktadır. Özellikle de üretim

olarak hafif alaşımların üretilmesi, geliştirilmesi ve maliyetinin düşürülmesi konusunda araştırmacılar yoğun bir çalışma içerisindeyler. Bu tarz çalışmalar hızla devam etmektedir. Ayrıca üstün özelliklere sahip alaşımlar [11].

Hafif alaşımlar Alüminyum ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ), Magnezyum ( $1,74 \text{ g/cm}^3$ ), Silisyum ( $2,33 \text{ g/cm}^3$ ), Bor ( $2,34 \text{ g/cm}^3$ ), Titanyum ( $4,51 \text{ g/cm}^3$ ) gibi düşük yoğunluklu elementlerden oluştuğu biliniyor. Bu alaşımlardan magnezyum esaslı ve alüminyum esaslı olanlarının özgül ağırlıkları düşüktür, korozyon direnci, işlenebilme özeliği ve ısı iletkenliği yüksektir. Fiyat olarak da biraz daha düşük olmasından dolayı birçok endüstri uygulamalarında yoğun bir kullanım alanına sahiptir [12]. Örnek olarak Mg-Al-Ti-B gibi bazı dörütlü alaşımların yapısına titanyum borür karıştırıldığında bu alaşımın akma derecesinin yükseldiği ve hafif uygulamalarda üstün potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir [13].

Alüminyum-Magnezyum (Al-Mg) alaşımları daha dayanıklı, sünekliliği ve korozyona karşı direnci yüksek alaşımlardır. %8 oranında magnezyum içeriğine sahip Al-Mg alaşımlarına ısı işlem uygulandığında mekanik özellikleri genel olarak gelişim gösterebilmektedir. Alüminyum; titanyum alaşımlarına katıldığında tane inceltici özeliği gösterir. Böylelikle alüminyum esaslı alaşımların mekaniksel özellikleri geliştirilebilir. Böylece alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Titanyumu, bor ile birlikte alaşımlara ilave edildiğinde etkisinin daha da arttığı görülmektedir [14]. Titanyum elementi, alüminyum esaslı alaşımların çekme direncini ve sünekliliğini artırır. Isı iletkenliğini ise düşürür [15]. Çizelge 1.1'de alaşımı oluşturmada oldukça sık kullanılan bazı elementlerin yoğunlukları verilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Elementlerin Yoğunlukları

Elementler	Simge	Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )
Alüminyum	Al	2,70
Magnezyum	Mg	1,74
Silisyum	Si	2,33
Titanyum	Ti	4,51
Bor	B	2,34
Çinko	Zn	7,10
Kalay	Sn	7,30
Bakır	Cu	8,90
Mangan	Mn	7,43
Demir	Fe	7,85

### 1.3. Alüminyum

Simgesi Al olan Alüminyum elementinin atom numarası 13'tür. Periyodik tabloda 3A grubunda ve 3. Periyodunda bulunur. 26,982 g/mol atom ağırlığına ve 2,70 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir. Erime sıcaklığı 660 °C, olan alüminyum elementi gümüşe yakın beyaz bir renge sahiptir. Yüzey merkezli kübik bir kristal yapısı vardır. Hafif, sünek ve kolayca işlenebilir özelliğe sahiptir. Kristal yapısı kübik olan bir elementtir. Paramanyetik bir elementtir. Alüminyum elementi genelde doğada bileşikler halinde bulunur çünkü serbest halde bulunmaz. Yoğunluğu düşük olduğu için alüminyum elementi ve alüminyum esaslı alaşımlar birçok sektörde kullanılmaktadır. Gündelik hayatta kullanmakta olduğumuz malzemelerin birçoğu alüminyum ve alüminyum esaslı alaşımlardan yapılmıştır. Oldukça hafif bir malzeme olduğu için sanayinin birçok alanında, mutfakta kullanılan eşyalarda elektrik elektronik cihazlarda içecek kutularında iletim hatlarında kullanımı oldukça yaygındır. Yoğunluğunun düşük olması nedeniyle bu element ve alaşımları birçok alanda kullanılır.

#### 1.3.1. Alüminyumun özellikleri

Yeryüzünde en çok bulunan alüminyum elementi doğada daha çok boksit cevheri formunda bulunmaktadır. Alüminyum, elektroliz edilerek boksit cevherinden metale dönüştürülebilir. Saf halde bulunan alüminyumun fiziksel özelliklerinden biri de oldukça düşük bir sertlik değerine sahip olmasıdır. Başka metallerle alaşım yapan alüminyumun yaptığı alaşımların sertlik değeri yaklaşık olarak 15 kat artabilmektedir. Alüminyum (2,70 g/cm<sup>3</sup>) en düşük yoğunluklu metaller arasındadır. Çelik (7,89 g/cm<sup>3</sup>) ve bakır (8,96 g/cm<sup>3</sup>)'in yoğunluk değerinin yaklaşık üçte biri kadardır. Ayrıca alüminyum birçok üstün özelliğe sahip bir metaldir. Soğuk ve sıcak prosesler ile şekillendirilebilen bir metaldir. Alüminyumun korozyon direnci çok yüksektir. Isıl ve elektrik iletkenliği çok iyidir. Geri dönüşüm ile tekrar kullanıma hazır hale getirilebilir. Pek çok endüstriyel alanda alüminyum ve alüminyum esaslı alaşımlardan yararlanır. Otomotiv, uzay ve uçak sektörü gibi alanlarda yer bulur [16].

**Çizelge 1.2.** Alüminyumun özellikleri [17]

Özellikler	Alüminyum
Atom No	13
Atom Ağırlığı	26,98g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 °C
Yoğunluğu (Oda Sıcaklığında)	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Buharlaştırma Sıcaklığı	2450 °C
Kristalleştirme Sıcaklığı	150-300 °C
Özgül Isısı	94.5 cal/g (100 °C)
Elastik Modül	70 GPa
Çekme Mukavemeti	40-90 MPa
Uzama	%50
Sertlik	17 HB

### 1.3.2. Alüminyum Alaşımları

Saf halde bulunan alüminyumun mukavemeti düşük olduğu için çinko, bakır, magnezyum, lityum ve silisyum gibi metaller ile alaşım yapılarak kullanılır. Alüminyumun yapısına katılan alaşım elementinin cinsine göre ve ilave edilme oranına göre elde edilen alaşım değişik özellikler gösterir. Alüminyum elementinin yapısına katılan alaşım elementinin amacı alüminyumun uzama yeteneğini ve korozyona karşı dayanıklılığını etkilemeksizin mekaniksel özelliğini geliştirebilmektir. Alüminyum elementi sünek bir özeliğe sahiptir. Aşınmaya karşı direnci oldukça düşüktür. Bu yüzden alaşım elde etmek için kullanılan elementler arasında demirden sonra en çok tercih edilen elementlerin başındadır. Düşük yoğunluğa sahip olan alüminyum alaşımları pek çok endüstri alanında tercih edilir.

Alüminyum alaşımlarının kullanım alanlarına her gün yeni bir yer açılmaktadır. Ev eşyası yapımında, otomotiv sektöründe, uzay araçlarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum esaslı ve magnezyum esaslı alaşımların mikroyapısı tamamen farklıdır. Yarı kararlı malzemeler olarak bilinirler. Bu alaşımlar kuazkristal, nanokristal ve amorf yapıda üretilir. Bu malzemeler üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Alüminyum esaslı alaşım üretiminde genel olarak bakır, titanyum, magnezyum, çinko ve silisyum elementleri kullanılmaktadır. Bu saydığımız elementler ile

alüminyum esaslı ikili, üçlü, dörtlü alaşım gibi alaşımlar üretilebilir. Bu alaşım içerisindeki elementin oranı alaşımın özelliğini büyük ölçüde etkiler. Ayrıca üretilen alaşımın mikroyapısı ve özelliği arasında doğrudan bir etki olduğu tespit edilmiştir. Bu alaşımların mikroyapısı çoklu ya da tekli fazlardan meydana gelir. Mikroyapıyı meydana getiren fazların boyutu, sayısı ve alaşım içerisindeki dağılım oranı gibi mevzular o alaşımın özelliğini etkiler. Nano boyuttaki fazların alaşım boyunca homojen olarak dağılması alaşımın teknik özellikleri gibi birden fazla özelliğine olumlu olarak etki edecektir [18]. Alüminyum esaslı ve mikroyapısı nano parçacıklardan oluşan bir alaşımın teknik özelliği, kristal yapıyla alaşımların teknik özelliğinden üç kate kadar daha iyidir [19].

Hafif metaller arasında yer alan titanyum, çinko, alüminyum, bakır magnezyum ve silisyum gibi elementler aşınmaya karşı dayanıklı, sertlik ve korozyon direnci yüksek olduğundan dolayı bu alaşımlar sanayinin birçok alanında en verimli olacak şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlara baktığımız zaman çelik yerine hafif alaşımların daha çok tercih edildiği görülmektedir. Sağlık alanından inşaat sektörüne kadar hafif alaşımların kullanımı çok daha mümkündür. Uzay ve havacılıkta ise hafif alaşımların kullanımı neredeyse zorunlu hale gelemeğe başlamıştır. Alüminyum alaşımlarına en çok havacılık ve uzay teknolojisinde kullanılır. Magnezyum alaşımları en çok titreşim söndürmede kullanılır. Bakır alaşımlarının titreşime katkısı büyüktür. Nikel bazlı alaşımlar daha çok ısı dayanımı yüksek malzeme üretiminde kullanılır. Kobalt bazlı alaşımlar daha çok gaz türbinlerinin yapımında kullanılır. Kalay-Niobyum alaşımları daha çok nükleer reaktör yapımında kullanılır. Titanyum-nikel alaşımları ise daha çok yapay protez yapımında kullanılır. Hafif alaşımın kullanımındaki amaç sadece ağırlığı düşük malzeme üretmek değildir. Ayrıca yapılan malzemenin teknik özelliğini de geliştirmek amaçlanmıştır. Sürekli gelişmekte olan bilim dallarından biri de malzeme bilimidir. Hafif malzeme üretimine olan ilgi son yıllarda daha da çok artmıştır. Bunun sebebi mevcut malzemelerin özelliklerini daha da geliştirilmek istenmesidir. Alaşım üretiminde kullanılan madenlerin 90 çeşidinden 73 çeşidi Türkiye’de bulunur. Bu madenlerin rezervleri ülkemizde önemli bir yer kapsamaktadır. Ülkemizde dünya metal maden kaynaklarının %0,4’ü bulunmaktadır. Yurt dışından ithal edilen metallerin başında kobalt, titanyum ve magnezyum gibi metaller gelmektedir. Bunun için ülkemizde hafif malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmalar malzeme temini yüzünden oldukça zor olmaktadır. Dünya genelinde birçok endüstriyel alanda kullanıldığı için hafif malzeme üretimi çok önem arz etmektedir. Alaşımların mikro yapı ve özelliği tespit edildikten sonra istenilen mikro yapı

düzeyinde alaşımları üretme ile ilgili birçok üretim tekniği bulunmuştur. En çok kullanılan tekniklerin başında mekaniksel alaşımlama, gaz atomizasyonu, ark-ergitme ve hızlı katılaştırma gelmektedir. Bu teknikler sayesinde çok sayıda alüminyum esaslı alaşım elde edilmiştir ve bu alaşımların kuazkristal, nano kristal ve amorf yapıdadır [20].

#### **1.3.2.1. Al-Cu Alaşımları**

Bu alaşımların esas elementi bakırdır. Magnezyum ve diğer alaşım yapabilen elementleri de içerebilir. Oldukça yüksek mukavemet gerektiren havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### **1.3.2.2. Al-Mn Alaşımları**

Bu alaşımların esas elementi mangandır. Düşük mukavemet gereksinimleri olan uygulamalarda ve ayrıca korozyon dirençleri nedeniyle kimyasal gıda ile ilgili ortamlarda kullanılır. Mimari uygulamalar dahil olmak üzere sıvı tanklarının üretimi, boru üretimi ve ayrıca mimari uygulamalarda kullanım alanı bulunur.

#### **1.3.2.3. Al-Si Alaşımları**

Bu alaşımların esas elementi silisyumdur. Bu alaşımların sıcaklık genleşme katsayısı düşüktür. Korozyona karşı mukavemeti ve aşınmaya karşı direnci oldukça yüksektir. Matris alaşım elementi silisyum olmalıdır. Isıl genleşme katsayısı düşük ve korozyon dayanımı yüksektir. Otomobil parçalarının üretiminde, kaynak yapılmış yapılarda ve levha üretiminde kullanım alanları vardır.

#### **1.3.2.4. Al-Mg Alaşımları**

Bu alaşımların esas elementi magnezyumdur. Bu alaşımlarda magnezyumun oranı arttığında alaşımın mukavemeti ve sertliği artar ancak sünekliği azalır. Deniz etkisinin oluşturduğu korozyona karşı olan direnci oldukça yüksektir. Bu yüzden bu tarz ortamlardaki yapıların üretiminde kullanılır.

#### **1.3.2.5. Al-Mg-Si Alaşımları**

Bu alaşımların esas elementi silisyum ve magnezyum elementleridir. Bu alaşımların şekillendirme özelliği yüksektir. En çok ekstrüzyon ile üretilen malzemelerin üretiminde çoğunlukla kullanılmaktadır.

### **1.3.2.6. Al-Zn Alaşımlar**

Bu alaşımların esas elementi çinkodur. Zirkonyum, krom ve magnezyum ilave edilerek üretilen alaşımlardır. Bu alaşımlar alüminyum alaşımlarının en mukavemetli olanıdır. Yüksek mukavemetli yerlerde ve uçak parçası üretiminde kullanılmaktadır.

### **1.3.2.7. Al-Li Alaşımları**

Bu alaşımların esas elementi lityumdur. Bu alaşımlara kalay elementi de eklenebilmektedir. Uzay ve uçak alanında kullanılan bu tarz malzemeler iyi bir direnç ve tokluk özelliğine sahiptir. Bu alaşımlar diğer alüminyum alaşımlarının maliyetinden daha yüksektir.

## **1.4. Alüminyum Alaşımlarında elementlerinin Etkisi**

Alüminyum alaşımları elde edildiğinde alüminyumun yapısına katılan elementler alüminyum elementinin korozyon direncini, sertliğini ve mukavemetini arttırmaktadır. Alaşımın yapısına katılan elementler alaşım içinde üç farklı fazda bulunur. Bunlar alüminyum içinde katı eriyik, sınırlı erime yapısına sahip mekanik karışım veya kimyasal bileşik oluşturabilir. Alüminyum alaşımlarının yapısına katılan elementlerin başında manganez, çinko, bakır, titanyum, krom, magnezyum ve lityum gelmektedir. Bu elementler alüminyuma düşük oranda katılırsa deformasyon direncinde artış gösterir. Katı özelti oluşturur. Kübik kafes yapıda, yüzey merkezli ara yer bileşiği oluşturur. Sonuç olarak yapıya katılan bu elementler alüminyum elementinin akma ve çekme mukavemetini arttırır. Alüminyum elementleri yüksek oranlarda yapıya katılırsa alaşım elementleri ve alüminyum katı çözelti oluşturamaz. Böylelikle kırılğan ve sert bileşikler oluşturur. Bunun sonucunda alaşımın dayanımı artar ancak işlenebilme özelliği azalır. izelge1.3'de elementlerin alüminyum ile alaşım üretiminde katkı özelliklerinin detaylı olarak verilmiştir. Alüminyumun yapısına katılan magnezyum oranı azaltıldığında alaşımın korozyona karşı direnci, sertliği ve mukavemeti artar.

**Çizelge 1.3.** Alüminyum alaşımlarında elementlerin etkileri

Özellikler	Mg	Si	Ti	B
Yoğunluk	+	-	-	+
Mukavemet	+	+	+	
Korozyon Direnci	+	-	+	-
Sertleştirme	+	+	+	+

#### 1.4.1. Magnezyum

Magnezyum elementini rengi gümüş beyaza yakındır. Metal sınıfında yer alan bir elementtir. Evrende en çok bulunan elementler arasındadır. Doğada en fazla bulunan elementler arasında dördüncü sıradadır. Magnezyum elementini simgesi Mg'dır. Atom numarası 12'dir. Periyodik tabloda 3. Periyot 2A grubunda bulunur. Atom ağırlığı 24,12 g/mol'dür. Özgül ağırlığı 1,738 g/cm<sup>3</sup>'tür. Toprak alkali metal sınıfında en düşük erime sıcaklığına sahip metaldir. Erime sıcaklığı 649,85 °C ve kaynama sıcaklığı 1089,85 °C'dir. Oksijen ile teması durumunda oksitlenip hafifçe kararır. Doğadaki en hafif metallerden biridir. Bu özelliği sayesinde kullanım açısından önemi artarak devam etmektedir. Kolayca yanabilen bir elementtir. Yanma esnasında parlak bir ateş çıkarır. Bu özelliğinden dolayı teknoloji gelişmeden önce de kullanılmıştır. Yoğunluğu düşük olduğu için hafif malzeme üretmede de çokça kullanılmaktadır. Bunların en başında alüminyum alaşımları yer alır. Alüminyum alaşımları içerisinde kalıp döküm ve demir-çelik üretiminde kullanılır. Süper güçlü malzeme üretiminde de magnezyum elementinin kullanımı oldukça yaygındır.

#### 1.4.2. Silisyum

Simgesi Si olan silisyum elementi karbon elementler sınıfında yer alır. Metal olmayan kimyasal bir elementtir. Periyodik tablonun on dördüncü elementidir. Dünya'nın yaklaşık olarak %28'lik kısmını silisyum elementi oluşturur. Dünya'da oksijenden sonra en çok bulunan elementtir. Atom ağırlığı 08,085 g/mol'dür. Özgül ağırlığı 2,42 g/cm<sup>3</sup>'tür. Erime sıcaklığı 1410 °C'dir. Kaynama sıcaklığı 3265 °C'dir. Atom numarası 14'tür. Periyodik tablonun 3. Periyot 4A grubunda bulunur. İki adet alotropi vardır. Kristal formunda gri metal renge sahiptir. Amorf formunda kahverengi toz görünümünde bulunur. Silisyum elementi metal bir parlaklığa sahiptir. Ayrıca da ser ve koyu gri renkte bulunur. Karbonun elmas formu ile hem fiziksel hem de kimyasal açıdan benzerliğe sahiptir.

### 1.4.3. Bor

Simgesi B olan bor elementinin atom numarası 5'tir. Atom ağırlığı 10,81 g/mol'dür. Yoğunluğu 2,34 g/cm<sup>3</sup>'tür. Bor elementinin erime sıcaklığı 2079 °C, kaynama sıcaklığı 4000 °C'dir. Sert kırılğan bir yapısı vardır. Parlak siyah renklidir. Yarı metal sınıfında yer alır. Periyodik tablonun 2. Periyot 3A grubunda bulunur. Rombohedral kristal yapıya sahiptir. Bor elementi yer yüzünde daha çok borik asit ve boraks olarak bulunur. Diyamanyetik bir elementtir. Dünya'nın ortalama milyonda on birim oranında bulunmaktadır. Türkiye bor bakımından oldukça zengin bir ülke konumunda bulunur.

### 1.4.4. Titanyum

Simgesi Ti olan titanyum elementinin atom numarası 22'dir. Atom ağırlığı 47,9'dur. Periyodik tablonun 4. Alt grubunda yer almaktadır. Çok sert bir yapıya sahiptir. Parlak, gümüşe çalan beyaz bir renge sahip bir elementtir. Alüminyum, demir gibi elementler ile alaşım yapabilme özelliğine sahiptir. Yoğunluğu düşüktür. Hafif ve oldukça güçlü bir metaldir. Titanyum elementinin erime sıcaklığı 1660 °C'dir. Kaynama sıcaklığı ise 3287 °C'dir. Özgül ağırlığı 4,2-4,3 g/cm<sup>3</sup>'tür. Titanyum elementi üstün özellikte kimyasal ve fiziksel özelliğe sahip, oldukça pahalı, işlenebilirliği zor ve hafif bir metaldir. Pahalı olmasına karşın alternatifi olmadığı durumlarda kullanılmak zorunda kalınabilir; örneğin uzay aracı, füze yapımı ve uçak yapımı gibi alanlarda; yüksek hız, titreşim ve yüksek ısı gerektiren araç parçalarında ve türbin kanatlarında kullanılır.

**Çizelge 1.4.** Alaşım Elementlerinin Özellikleri

Element	Atom Numarası	Atom Ağırlığı (akb)	Yoğunluk 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	Kristal Yapı 20 °C	Atom Yarıçapı (nm)	Valans (değerlik)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Alüminyum	13	26,98	2,71	YMK	0,143	3 <sup>+</sup>	660
Magnezyum	12	24,31	1,74	SPH	0,160	2 <sup>+</sup>	649
Silisyum	14	28,08	2,33	SPH	0,111	4 <sup>+</sup>	1414
Titanyum	22	47,87	4,51	SPH	0,145	4 <sup>+</sup>	1668
Bor	5	10,81	2,34	Romb	0,023	3 <sup>+</sup>	2076

## 1.5. Alaşımların Üretim Teknikleri

Birden çok madenin eritilerek birbirlerinin yapısına katılması sonucu alaşımlar üretilir. Madenlerin hava ile temas ederek oksitlenmesinin önüne geçmek için bu madenler önce kömür tozu ile kapatılır ve toprak pota içerisinde eritme işlemi uygulanır. Eğer madenler arasında uçucu özelliğe sahip bir maden varsa madenlerden biri erirken diğeri ilave edilir Uçma sonucunda oluşan eksiklik tamamlanmak için biraz daha çok maden eklenir. Daha fazla alaşım üretmek istenirse madenlerin reverber fırında eritilmesi gerekir.

### 1.5.1. İkame Alaşımlar

İkame alaşımlar, kristal yapıda bir metalin atomlarının başka bir metalin atomları ile değiştirdiği alaşımlardır. Bu tür alaşımlar genellikle benzer atom boyutuna ve kristal yapıya sahip metaller arasında oluşturulur. En meşhur örneği pirinçtir. Pirinç, bakır ve çinkonun birleşiminden oluşur. Bu alaşımlar homojen yapıya sahiptir ve genellikle metalik özelliklerini korurlar. Belli oranlarda karıştırılarak istenilen özellikler elde edilir [21]. İkame alaşımlara ait bazı özellikler Şekil 1.2’de verilmektedir.

	5083 Hadde Plaka	6082 Hadde Plaka
Çekme Mukavemeti (MPa)	275 - 300	310 - 340
Akma Mukavemeti (MPa)	125 - 145	260 - 310
Uzama (Rp 0.2%)	22	19
Sertlik (HB)	70 - 75	95

Şekil 1.2. İkame alaşımların özellikleri [22]

### 1.5.2. Boşluk Dolduran Alaşımlar

Boşluk dolduran alaşımlar ise, bir metalin atomik kafes yapısındaki boşluklara, daha küçük atomların yerleşmesiyle oluşur. Bu alaşımlar, genellikle yüksek sertlik ve dayanıklılık özellikleri gösterir. Klasik bir örnek olarak çelik verilebilir; demirin atomik kafes yapısında karbon atomlarının yerleşmesi sonucu oluşur. Çelik, mükemmel mukavemeti ve işlenebilirliği ile inşaat, otomotiv ve pek çok diğeri endüstriyel alanda kullanılan bir malzemedir [23].

### **1.5.3. Alaşımların Yapısı ve Oluşturulma Süreçleri**

Alaşımların yapıları ve oluşturulma süreçleri, onların endüstriyel uygulamalardaki performansını ve kullanım alanlarını büyük ölçüde etkiler. Alaşımın yapısı, içerdiği elementlerin atomik düzenlenmesi ve birleşme Őekilleriyle belirlenir. Bu düzenlenme, alaşımın fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Alaşımların oluşturulması sırasında gerçekleşen kimyasal süreçler, alaşımın atom düzenlemelerini ve dolayısıyla son özelliklerini belirler. Örneğin, elik üretiminde demir ve karbonun belirli oranlarda karıştırılması, son ürünün sertliğini ve dayanıklılığını etkiler. Bu süreçler, alaşımın içyapısını değiştirerek, saf metallerin ulaşamayacağı özellikleri kazandırır. Fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi de alaşım üretiminin önemli bir parçasıdır. Alaşımlar, genellikle dayanıklılık ve sertlik gibi özellikler kazandırmak için tercih edilir. Örneğin, uçak gövdelerinde kullanılan alüminyum alaşımları, hafifliğinin yanı sıra yüksek mukavemet ve korozyon direnci sağlar. Ayrıca, alaşımlar elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci gibi özelliklerle de ön plana çıkar. Bu zellikler, alaşımları elektronik ve tıbbi cihazlar gibi çeşitli alanlarda vazgeçilmez kılar.

### **1.5.4. Alaşımların Kullanım Alanları**

Alaşımlar, günlük hayatımızdan endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Günlük yaşamda, mutfak aletlerinden elektronik cihazlara kadar pek çok üründe alaşımlar kullanılmaktadır. Özellikle, dayanıklılık ve estetik açıdan üstün özellikler sundukları için tercih edilirler. Endüstriyel alanda ise, alaşımların kullanımı çok daha kritik öneme sahiptir. Uçak gövdeleri, otomobil parçaları, köprüler ve binalar gibi yapıların inşasında kullanılan alaşımlar, mukavemet ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için hayati önem taşır. Örneğin, alüminyum alaşımları, hafifliği ve yüksek mukavemeti sayesinde havacılık endüstrisinde sıklıkla tercih edilir. Elektronik ve tıbbi cihazlarda alaşım kullanımı ise, bu cihazların performansını ve güvenilirliğini artırır. Elektriksel iletkenlik özellikleri nedeniyle, elektronik devrelerde sıklıkla kullanılan bakır alaşımları, bu alanın vazgeçilmezleri arasındadır. Tıbbi alanda ise, biyoyumlu alaşımlar, cerrahi aletlerin ve implantların üretiminde kullanılarak, vücut ile uyum sağlar ve uzun süreli kullanıma olanak tanır.

### 1.5.5. Alaşım rnekleri

Karbon ve demir elementlerinin alaşımlanması ile elik alaşımı elde edilir. Bu elementlerin yapısı ve oranına göre farklı yapılarda elik alaşımları üretilebilir. Bakır ve kalay elementlerinin alaşımlanması ile bronz alaşımı üretilir. Bronz, insanların farklı türden metaller kullanarak yapmış olduğu ilk alaşımdır. Alaşımı oluşturan bakır ve kalay elementlerinin erime sıcaklığının düşük olmasından dolayı bronz alaşımının ilk üretilen alaşım olmasını sağlamıştır. Lehim alaşımı, kurşun ve kalay elementlerini alaşımlandırılması ile üretilen bir alaşımdır. Lehim alaşımında %64 oranında kalay elementi ve %36 oranında kurşun elementi bulunmaktadır. Pirinç alaşım, çinko ve bakır elementlerinin alaşımlandırılması sonucu üretilen bir alaşımdır. Pirin alaşımındaki çinko oranı en çok %46'dır. Bakır oranı ise değişiklik gösterebilmektedir. Amalgam alaşımı, cıva elementini farklı çeşit metaller ile üretildiği alaşımlara örnek verilebilir. rnek olarak diş hekimleri diş dolgusu yapımında gümüş amalgam alaşımı kullanırlar. Aşınmaya karşı dirençli ve vücut sıvısına karşı dayanıklı malzeme üretiminde kobalt ile alaşımları kullanılır. Kobalt alaşımları protez yapımında da kullanılmaktadır. Berilyumun yoğunluğu çok düşüktür. Elastiklik derecesi çelikten daha çok olduğu için hafiflik düzeyinin önem arz ettiği alanlarda berilyum alaşımları kullanılmaktadır. Uzay sanayisinde önemli bir yeri sahiptir. Alüminyum-Lityum alaşımları dayanıklılığı ve hafifliği alüminyumdan daha iyi olan alaşımlardır. Uzay aracı yapımında da alüminyum-Lityum alaşımları tercih edilir. Kurşun-arsenik alaşımlarından mermi ve saçmalar üretilir. Bunlara kurşun adı verilmektedir. Kurşun-antimon-kalay alaşımlarından sert ve basına dayanıklı matbaa harfleri yapılır. Antimon ve kurşun alaşımları sert ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Yüksek basına karşı pek dayanıklı değildir. Bu kırılğanlığı azaltmak için kalaydan yararlanılmıştır. Çinko, bakır ve nikel elementlerini alaşımlandırılması ile Alman gümüşü alaşımı üretilir. Renk olarak gümüş rengine takın bir alaşımdır.

### 1.5.6. Alaşımların Tarihçesi

Alaşımların retim tarihi milattan önce rt binli yıllara dayanmaktadır. Mezopotamya ve İnan bölgelerinde tunç alaşımı bulunmuştur. Tunç alaşımı demirden daha serttir. Ss ve mutfak eşyası yapımında çokça kullanılır. Ayrıca kesici, delici alet ve silah üretiminde de tunç alaşımına rastlamak mümkündür. Devam eden arkeolojik çalışmalar neticesinde in devletinin Sincan bölgesinde, Hindistan'ın Merkez Ganj Vadisinde ve Doğu Vindhya bölgesinde tarihi milattan önce binli yıllara dayanan elik kalıntılara

rastlanılmıştır. Bulunan bu kalıntılar elik kullanımının tarihinin en az  binlik yıllık olduğunu göstermektedir. elik alaşımı tunç alaşımından daha dayanıklı ve sert bir yapıya sahip olduğu için kullanım alanı tunç alaşımına göre daha yaygındır [24].

### **1.5.7. İntermetalik Bileşikler**

Değişik elektronegatifliği olan elementlerin aralarında oluşturduğu bileşiklere intermetalik bileşik denir. Bu tür bileşikler kovalent veya iyonik bağlara sahip olabildikleri için oldukça dayanıklı özelliğe sahip olurlar. Bu tür bileşiklere örnek olarak titanyum-alüminyum, nikel-alüminyum,  $Mg_2Sn$ ,  $Al_2Cu$ ,  $Al_3Ni$ ,  $Cu_2Se$  ve  $Ni_3Sn_4$  bileşiklerini verebiliriz [25].

### **1.5.8. Elektron Bileşikleri**

Erime sıcaklığı yüksek olan titanyum, nikel ve krom gibi elementler, erime sıcaklığı düşük olan alüminyum, çinko ve magnezyum gibi elementler ile alaşım yaparak oluşturdukları bileşiklere elektron bileşiği adı verilir. Elektron bileşikleri oluştuğu zaman bu bileşiklerin sahip olduğu atom sayısı ve dış yörüngesinde bulunan elektron sayısı arasında sabit bir oran olduğu belirlenmiştir. Bu benzerliğin tanımını İngiliz bilim insanı Hume Rothery yapmış ve açıklamıştır. Bu bilim insanı elektron bileşiklerinin sahip olduğu atom sayısı ve dış yörüngede bulunan elektron sayısının oranı ile ilgili olduğunu belirtmiştir [26].

### **1.5.9. Katı Bileşikler**

Kafes yapısı içerisinde olan belirli sayıda yabancı atomlar bulunduran bu metallerin büyük çoğunluğu katı bileşikler sınıfına girmektedir. Asal yer katı bileşiklerde yabancı atomlar asıl metal atomlarının yerini alır. Ara yer katı bileşiklerde ise yabancı atomlar kafes aralığında bulunan boşluklara yerleşir [27].

### **1.5.10. Ara Bileşikler**

Atomlar arasındaki bağlar kimyasal bağ ve metalik bağ arasında değişen bir yapıda bulunuyorsa buna ara bileşik adı verilmektedir. Kimyasal yapıda bileşiklere benzer şekilde bileşikler oluşturulur. Bu bileşikler karmaşık yapılı bileşiklerdir. Birim hücrede yüzlerce sayıda atom bulundurabilir. Oldukça sert bir yapıya sahiptir. Erime sıcaklığı çok yüksek olan bu bileşikler sert yapılıdır. Ara bileşiklerde kullanılan karbon, bor, azot gibi elementlerin metallere ile yaptığı bileşiklerde kimyasal bağın önemi oldukça fazladır. Bu

bileşiklere örnek olarak ZrC, WC, TaC, NbC ve VC verilebilir. Bu bileşikler çeliğin yapısında bulunmasını istediğimiz sert ve kararlı bileşiklerdir [28].

### **1.5.11. Denge Diyagramları**

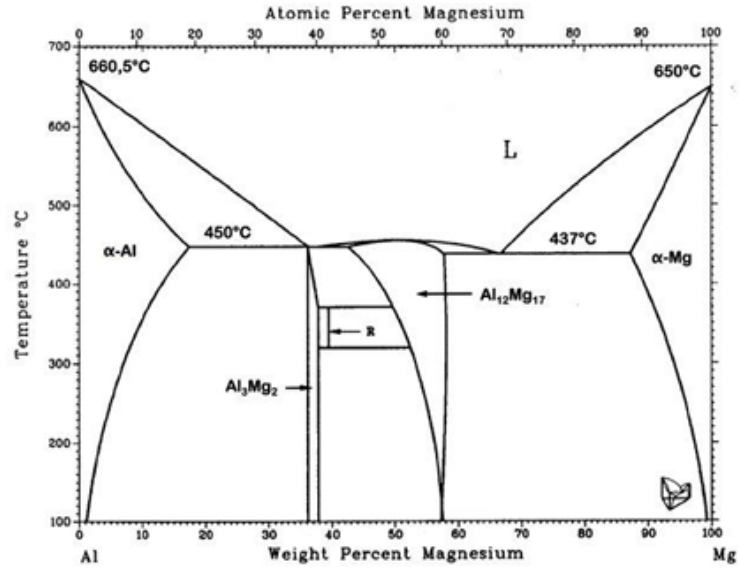
Denge diyagramlarında bulunan faz alanlarının sınırını belirlemek için alaşımların konsantrasyonuna ve sıcaklık değerine bağlı olarak durum değiştirmeleri gerekmektedir. Homojen yapı ve özelliklerini birçoğu birbirlerinden farklı olan bölgelere faz denir [29]. Maddenin üç temel hali birer adet fazdır. Ayrıyeten bu tür fazların içinde birden çok faz bulunma ihtimali de vardır. Alaşımlar sıcaklığın yaptığı etki ile belli bir yoğunlaşmanın altında olduğu için katı, sıvı ve gaz hallerine dönüşebilmektedir. Kristal yapısı değişen katı fazlar faz değişikliğine uğrayabilir. Bu değişimler yoğunlaşmaya bağlı bir şekilde belirlenir. Bu tür alaşımların denge diyagramları bu şekilde çıkarılabilir. Alaşımı oluşturacak elementlerin birbirlerini yapısına katılarak erimelerine göre denge diyagramlarını üç grupta inceleyebiliriz [30]. Tam çözünürlük, tam çözünmez ve sınırlı çözünürlük olarak bilinmektedir.

### **1.6. Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları**

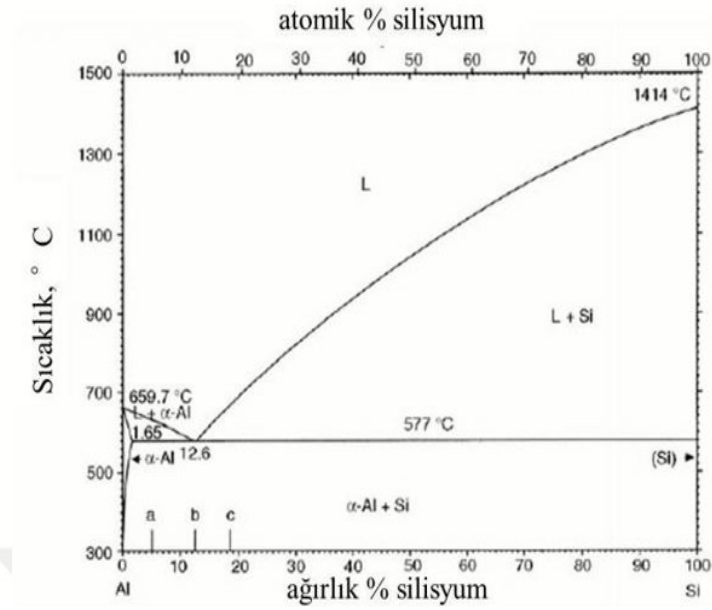
Alaşımlarda var olan fazların dönüşüm ve oluşum şartlarını mikro yapılarındaki özellikler belirlemektedir. Bundan dolayı fazların ne tür koşullar altında oluştuğunu ve ne tür durumlarda dönüşmüş olduğunu bilmekte fayda vardır. Alaşım sistemlerindeki faz diyagramları farklı sıcaklık, farklı basınç ve farklı bileşiklerde ne tür fazların olduğunu çizgi yöntemiyle gösteren şekillerden oluşur. Çoğu faz diyagramı denge koşullarına uygun bir şekilde çizilmiştir. Bilim insanları ve mühendisler malzemelerin davranışlarını tüm yönleri ile anlayabilmek ve tahmin edebilmek için faz diyagramlarını kullanmaktadır. Örnek olarak metal bir element eritildiği zaman faz değişimine uğrar ve katı faz durumundan sıvı faz durumuna dönüşür. Başka türlü faz dönüşümlerinde ise kaynama sıcaklığındaki sıvı faz dönüşerek gaz fazını oluşturacaktır. Süblimleşme sıcaklığında bulunan katı faz dönüşerek gaz fazı oluşturabilir. Allotropik dönüşüm sıcaklığında bulunan katı fazlar dönüşerek farklı tür bir katı faz oluşturabilir. Basıncın sabit olduğu durumlarda saf metallerdeki faz dönüşümleri izotermal bir yapıda oluşur. Bunların erime ve kaynama sıcaklıkları sabit bir sıcaklık altında olur. Demek oluyor ki alaşımların faz dönüşümleri sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşmektedir. Ancak faz dönüşümleri tek bir noktadan ziyade daha geniş bir sıcaklık aralığına yayılarak oluşur. Örnek olarak erime sıcaklığı aralığında

katı fazdan sıvı faz oluşmaktadır. Alaşım malzemelerinde karışık olan faz dönüşümleri hem izotermal dönüşümler hem de izotermal olmayan dönüşümler sonucunda oluşur. Bir faz dönüşüm noktasında genel olarak iki adet faz birlikte bulunur. Böylelikle erimiş metal madde değişik katı fazlar oluşturarak tekrar katı hale geçer [31].

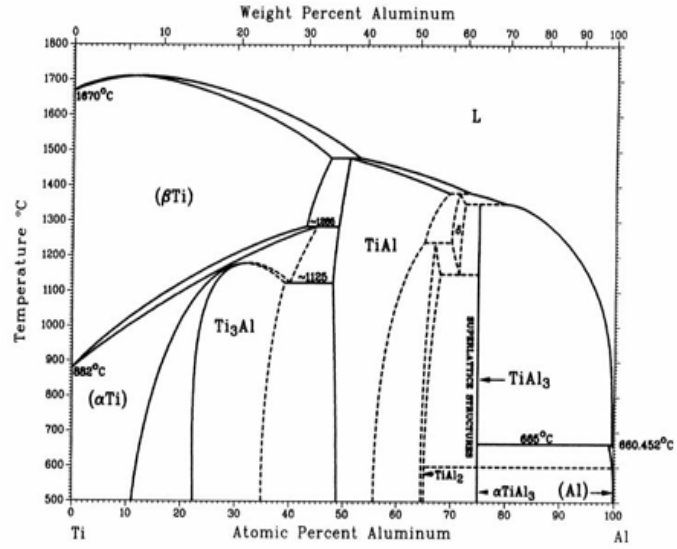
Saf haldeki alüminyumun ve alaşımlarının yüksek sıcaklık gerektiren uygulama alanlarında kullanımın uygun olamadığı belirtilmiştir. Bununla beraber düşük sıcaklıkta ise fiziksel özelliğini koruduğu için oldukça önemli bir malzeme konumundadır. Alüminyum esaslı alaşımlar, kaynak yapma becerisi düşük olduğu halde güçlü yapıştırmacıların yapımında kullanılarak daha geniş bir kullanım alanına yayılmıştır. Günümüz teknolojisinde arabaların dişli kutuları, teker jantları, tamponları ve günlük hayatta kullandığımız koltukların rayları alüminyum esaslı alaşımlardan üretilmiştir. Bir uçağın ağırlığının yaklaşık olarak %70'i alüminyum elementinden oluşur. Alüminyum esaslı alaşımlar hafif olduğu için ve özgül mukavemeti uygun düzeyde olduğu için havacılık sektörünün vazgeçilmez malzemesi haline gelmiştir. Alaşımlar seriler halinde kullanılmaktadır. Örneğin askeri, uçak ve uzay endüstrisinde 2 ve 7 serisi alaşımlar kullanılır. Taşımacılık endüstrisinde ise 1, 3 ve 5 serisi alaşımlar kullanılır. İçeriğinde %10 oranında magnezyum bulunan 520 alaşımı; korozyon direnci yüksek, mukavemet ve işlenebilirlik özelliği yönünden üstün olan bir alaşımdır. İçeriğinde %7 oranında silisyum metali ve %0,3 oranında magnezyum metali bulunan 356 alaşımı ise döküm işlemine elverişli ve korozyon direnci yüksek hafif bir alaşımdır. Alaşımların üretiminde faz diyagramları bir yol haritası niteliği taşımaktadır. Bundan dolayı bu tez çalışmamızda ürettiğimiz alaşımlarımız için kullanacağımız faz diyagramları Al-Mg, Al-Si, Al-Ti, Al-B ve ikili faz diyagramlarıdır. Bu faz diyagramları Şekil 1.2, Şekil 1.3, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'de sırasıyla verilmiştir.



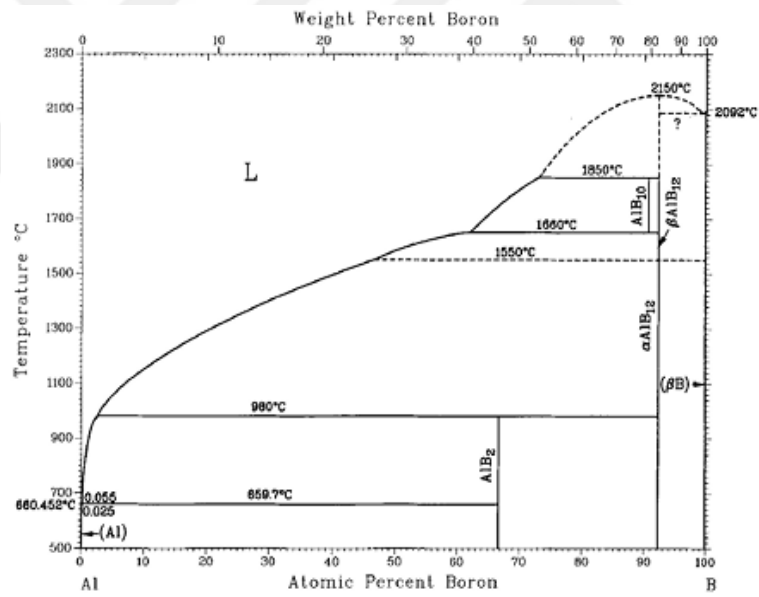
Şekil 1.3. Al-Mg Denge Diyagramı [32]



Şekil 1.4. Al-Si İkili Faz Diyagramı [33]



Şekil 1.5. Al-Ti Denge Diyagramı [34]



Şekil 1.6. Al-B Denge Diyagramı [35]

## 1.7. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasını hazırlarken özellikleri oldukça üstün olan alüminyum alaşımlarını üretmeyi amaç edindik. Alaşımlarımızı üretebilmek için  $Al_{25}Mg_{25}Si_{25}Ti_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Si_{20}Ti_{20}B_{20}$  alaşımlarını seçtik. Alaşımlarımızı mekanik alaşımlama yöntemi ile üreteceğiz ve mikro yapılarındaki değişimi inceleyeceğiz. Çelik ve demirden sonra alüminyum ve alaşımları en çok tercih edilen malzemelerdir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte alüminyum alaşımlarının kullanıldığı alanlar da gelişerek artmaktadır. Farklı şekillerde üretilen alüminyum alaşımları konfor açısından daha iyi ve daha ucuz malzemelerdir. Bundan dolayı bu malzemeler yıllar geçtikçe hep araştırma konusu olmaya devam etmiştir. Biz de tüm bunları göz önünde bulundurarak bu çalışmamızda daha yeni alüminyum alaşımlarını üreteceğiz. Üreteceğimiz alaşımlar düşük yoğunluğa sahip silisyum, magnezyum, titanyum ve bor gibi hafif elementler içerecektir. Bu elementler belli oranlarda eklenecek ve daha üstün özellikli yeni alaşımlar üretmektir. Böylelikle alaşımların üretiminde kullanılan Al, Mg, Si, Ti ve B elementlerinin etkisi fiziksel ve mekanik olarak incelemektir. Bunun sonucunda fiziksel ve mekanik özelliği en iyi olan alaşım tespit edilmiştir. Tez çalışmamız içeriğinde  $Al_{25}Mg_{25}Si_{25}Ti_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Si_{20}Ti_{20}B_{20}$  alaşımları üretilip incelenmek için belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen bu alaşımların mikro yapıları ve mikro yapılarındaki değişim X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Üretilen alaşımların ısıl özellikleri de diferansiyel termal analiz (DTA) ile incelenmiştir. Bununla birlikte alaşımların mikro yapısını etkileyen faktörler ve bu faktörlerin üretilen alaşımların özelliklerine ne etki yaptığı araştırılmıştır. Elde ettiğimiz neticeler daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılacaktır ve bulunan sonuçların ne kadar tutarlı olduğu test edilmiştir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1994 yılında yapılan bir çalışmada Al +Fe<sub>78</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>10</sub> alaşımı mekanik öğütme tekniği ile üretilmiştir. Bu alaşımlar, XRD, SEM ve TEM gibi ileri seviye cihazlar ile araştırılmıştır. Alaşım üretiminde alüminyum (%75 ile 82) içerdiğinde amorf alaşım elde edilirken bunun aksine alüminyum içeriği %90 ve üzerinde olduğu takdirde nanokristal alaşımlar elde edilmektedir. Üretimin ilk basamağında Al tozlar yüksek hızlı bilyelerin oluşturduğu yoğun deformasyondan dolayı Fe<sub>78</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>10</sub> matrisi içerisinde çözülebilmektedir. Bu alaşımların XRD desenlerinde Al piklerinin kaybolması ve yeni faz piklerinin oluşmasıyla amorf yapı doğrulanmıştır. Alaşımında Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> ve AlFe<sub>3</sub> türü fazlar XRD ile tespit edilmiştir [36].

Fect 1996 yılında yaptığı çalışmada Mg<sub>2</sub>Si fazlarını mekanik alaşımlama ile elde etmiştir. Mg<sub>2</sub>Si tozlarını mekanik alaşımlama tekniği ile sentezlemiş ve mikroyapısal ve termal olarak karakterize etmiştir. Mekanik alaşımlama oda sıcaklığında 33:1'lik yüksek bir bilye/toz oranı kullanarak elde etmiştir. Alaşım işlemini takip etmek için bir X-ışını kırınım tekniğini kullanmıştır. Alüminyum matrisin çözülmesiyle Al-Mg<sub>2</sub>Si iki fazlı alüminyum üçlü alaşımından elde edilen tozları da referans intermetalik bileşikler olarak elde etmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetri ve termogravimetrik ile intermetalik maddenin termal karakterizasyonu, düşük bir termal stabilite olduğunu gösterdiğini tespit etmiştir [39].

Wilkes, Goodwin, Ward-Close, Bagnall ve Steeds 1997 yılında yapmış oldukları çalışmada Mg ve Si tozlarını planet bilyeli değirmende mekanik olarak alaşımlamışlardır. Öğütülmüş tozlarda magnezyum silisit oluşumunu ve magnezyum oksit ve hidrit oluşumunu XRD ve DSC ile ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Magnezyum silisit Mg<sub>2</sub>Si'nin doğrudan oluşumunun 10 saatlik öğütme sonrasında gerçekleştiği ve Mg<sub>2</sub>Si içeriğinin öğütme süresinin uzamasıyla arttığını bulmuşlardır. Mg<sub>2</sub>Si oluşumu için aktivasyon enerjisi Kissinger yaklaşımı ile 215 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Mekanik alaşımlama sırasında ayrılmış organik katkı maddeleri tarafından Mg'nin oksitlenmesi ve hidrasyonunun yanı sıra, öğütme süresinin artmasıyla çelik ve alümina öğütme takımlarından kaynaklanan tozların kirlenmesinin arttığını tespit etmişlerdir [40].

2004 yılında yapılmış olan bir çalışmada Si ilavesinin amorf bir AlYNi alaşımının kristalleşme davranışı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Al<sub>85</sub>Y<sub>5</sub>Ni<sub>10</sub>'un bir baz alaşımına, Y yerine Al<sub>85</sub>Y<sub>4</sub>Ni<sub>10</sub>Si<sub>1</sub> oluşturularak veya Ni yerine

$Al_{85}Y_5Ni_9Si_1$  oluşturarak 1 at% Si eklenmiştir. Üç alaşım da DSC analizinde üç ekzotermik tepe göstermiştir. İlk ekzotermik tepe için tepe sıcaklığı karşılaştırıldığında, daha düşük sıcaklığa doğru önemli bir kayma meydana geldiği tespit edilmiştir [42].

Hu, Wu ve Chen 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada, mekanik alaşımlama tekniği ile sentezlenen amorf Mg-Cu-Ti esaslı alaşımların davranışını incelemişlerdir. Karışık tozların mekanik alaşımlaması sırasında mikro yapısal evrim hem XRD hem de SEM ile incelenmiştir. Öğütülmüş tozların faz kararlılıkları DTA ile analiz edilmiştir. 12 saatlik öğütülmüş üçlü Mg-Cu-Ti tozları üzerinde yapılan DTA analizi sonucunda,  $Mg_{40}Cu_{40}Ti_{20}$  ve  $Mg_{40}Cu_{35}Ti_{25}$ 'te yaklaşık 550 K'de endotermik pikler ortaya koymuştur ve diğer üçlü bileşimlerde böyle bir pik gözlenmemiştir. Üçlü ve kuarterner Mg-Cu-Ti esaslı alaşımlar için, birkaç amorf tozun kristalleşmeden önce geniş bir aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi sergilediği bulunmuştur [46].

Cai, Wang, Zhang 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada Zn ilaveli ve ilavesiz Al-Mg-Si-Cu alaşımları geleneksel külçe metalurjisi yöntemi ile üretmişlerdir. Mikro yapıları ve özelliklerini optik mikroskopi (OM), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM), çekme testi, sertlik testi ve elektriksel iletkenlik ölçümü kullanılarak incelemişlerdir. Döküm halindeki Al-Mg-Si-Cu-Zn alaşımının kaba dendritik taneciklerden, uzun iğne benzeri  $\beta/\delta-AlFeSi$  beyaz intermetaliklerden ve Çince yazı benzeri  $\alpha-AlFeSi$  bileşiklerinden oluştuğunu bulmuşlardır. Zn ilavesi, eski yaşlandırma aşamasındaki yaşlandırma sertleştirme tepkisini iyileştirir ve tepe yaşlandırılmış sertliği uzun bir yaşlandırma süresine erteler. T4 koşulunda, Zn ilavesi akma dayanımını belirgin bir şekilde artırmaz ve uzamayı azaltmaz, ancak boya pişirme döngüsü sırasında boya pişirme sertleştirme tepkisini belirgin bir şekilde iyileştirir. %0,5 ağırlıkça Zn ilavesi, boya pişirme döngüsünden sonra Zn içermeyen alaşım için 69 MPa değerine kıyasla akma dayanımında 99 MPa'lık bir artışa yol açabilir [50].

2016 yılında yapılan bir çalışmada 0,1 ağırlıkça % Ti ile mikro alaşımlama yoluyla ötektik yakın yüksek performanslı bir Al-Si-Mg alaşım profili geliştirilmiştir. Karşılaştırma için farklı işleme koşullarında Ti içeren ve içermeyen ötektik yakın Al-Si-Mg alaşımının çekme özellikleri test edilmiştir. Mikro yapı evrimi optik, taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile gözlemlenmiştir. Sonuçlar, %0,1 ağırlık Ti alaşımlı A2 alaşımının akma dayanımı (YS), nihai çekme dayanımı (UTS) ve uzamasının sırasıyla 193 MPa, 296 MPa ve %12,3'e

ulaştığını, çekme dayanımının ekstrüde edilmiş taban alaşımının çekme dayanımından yaklaşık %50 daha yüksek ve hatta %0,1 ağırlık Zr veya %0,1 ağırlık V ile mikro alaşımlanmış taban alaşımının çekme dayanımından bile daha güçlü olduğunu göstermiştir. %0,1 ağırlık Ti ilavesi, döküm halindeki Al-Si-Mg alaşımının mikro yapısında belirgin bir inceltme etkisine sahip olduğu ancak döküm halindeki mekanik özellikler üzerinde küçük bir güçlendirme etkisine sahip olduğu da belirtilmiştir [53].

Rajabi, Sedighi, Rabiee 2016 yılında yapmış oldukları çalışmalarında Mekanik alaşımlama yoluyla hazırlanan nanokristalin  $Mg_{-6}Al_{-1}Zn$  ve  $Mg_{-6}Al_{-1}Zn_{-1}Si$  alaşımlarının termal kararlılığını ve tane büyüme kinetiğini araştırmışlardır. Ayrıca bu çalışmada çeşitli analitik teknikler kullanılarak, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve enerji dağılımlı spektrometri kullanılarak elementel tozlarla başlanmıştır. İzotermal tavlama tane büyüme kinetiğini araştırmışlardır. XRD sonuçları, her iki malzeme sisteminin tane boyutlarının tavlama sıcaklığı arttıkça artmasına rağmen, Si içeren sistemin 1 saat boyunca 350 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra nispeten daha küçük bir tane boyutu (yani  $Mg_{-6}Al_{-1}Zn$  sistemindeki 72 nm'ye kıyasla 60 nm) gösterdiğini tespit etmişlerdir [54].

An, Liu, Ye, Wang, Wang 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada erimiş Al ile Al-Ti-B<sub>4</sub>C sisteminden kendi kendine yayılan yüksek sıcaklık (SHS) reaksiyonuyla yeni bir Al<sub>5</sub>Ti<sub>0.75</sub>B<sub>0.2</sub>C ana alaşımını başarıyla hazırlamışlardır. Hazırlanan Al<sub>5</sub>Ti<sub>0.75</sub>B<sub>0.2</sub>C ana alaşımının mikro yapısı ve faz karakterizasyonu, neredeyse küresel TiC parçacıklarının, altıgen veya dikdörtgen TiB<sub>2</sub> parçacıklarının ve blok benzeri TiAl<sub>3</sub> parçacıklarının alüminyum matrisinde düzgün bir şekilde dağıldığını göstermişlerdir. Ticari saf alüminyum üzerinde yapılan tane inceltme testi, Al<sub>5</sub>Ti<sub>0.75</sub>B<sub>0.2</sub>C ana alaşımının Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ana alaşımından daha iyi bir tane inceltme performansı sergilediğini göstermişlerdir. %0,2 ağırlık oranında Al<sub>5</sub>Ti<sub>0.75</sub>B<sub>0.2</sub>C ana alaşımının eklenmesiyle, α-Al'nin ortalama tane boyutu yaklaşık 3000 µm'den 160 ± 5 µm'ye etkili bir şekilde rafine edilebilir ve tane rafine edilmesi nedeniyle çekme mukavemeti ve uzama sırasıyla yaklaşık %20 ve %14,1 oranında arttığını gözlemişlerdir [55].

Kurşun, Gögebakan, Eskalen, 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada  $Mg_{65}Ni_{20}Y_{15-x}Si_x$  (X = 1, 2, 3) alaşımlarının mikroyapısı, termal ve mekanik özellikleri üzerinde mekanik alaşımlamanın etkisine dair bir araştırma yapmışlardır. Mg esaslı alaşımlarını, saf kristalin Mg, Ni, Y ve Si tozlarının karışımlarından mekanik alaşımlama

tekniki ile üretmişlerdir. Bu alaşımları, XRD), SEM), EDX ve DSC dahil olmak üzere çeşitli analitik teknikleri kullanarak incelemişlerdir. Alaşımların mekanik özelliklerini ise Vickers mikrosertlik (HV) test cihazı ile incelemişlerdir. 75 saatlik öğütme süresinden sonra üç farklı intermetalik faz elde etmişler ve bu fazları, XRD verilerine göre  $Mg_{24}Y_5$ ,  $Mg_2Ni_3Si$  ve  $Mg_2Ni$  olarak tanımlamışlardır [57].

2018 yılında yapılmış olan bir çalışmada  $Ti-x Zr-10Si-5B$  ( $x = 2$  ve  $5$  at. %) ve  $Ti-x Zr-20Si-10B$  ( $x = 5, 7, 10, 15$  ve  $20$  at. %) toz karışımlarının bilyeli öğütme ve sıcak presleme sırasındaki mikro yapı değişimi araştırılmıştır. Mekanik alaşımlama  $300$  rpm ve  $10:1$  bilye-toz oranında  $600$  dakika öğütülmüştür. Tozlar  $1100$  °C'de  $60$  dakika vakumda sıcak preslenmiştir. Öğütülmüş tozlar XRD, SEM, DSC ve EDS ile incelenmiştir. XRD analiz sonuçlarında elde edilen desenlerde Si ve Zr pikleri sırasıyla  $60$  ve  $180$  dakika öğütülen tozlarda kaybolmuştur. Aşırı doymuş katı çözültisi ve  $\alpha$ -Ti fazı  $300$  dakika öğütme sonunda oluştuğu tespit edilmiştir. Sıcak presleme sonunda alaşımlarının mikro yapısında %10'a kadar  $Ti_6Si_2B$  çözüldüğü bulunmuştur. Ayrıca sıcak preslenmiş alaşımlarının mikro yapısında  $Ti_3Si$  fazının oluştuğu tespit edilmiştir [59].

2019 yılında yapılan bu çalışmada mekaniksel alaşımlama ile elde edilen ve daha sonra elektriksel direnç sinterlemesi ile konsolide edilen amorf  $Al_{50}Ti_{50}$  alaşımı için yeni bir işleme yöntemi araştırılmıştır. Tozların karakterizasyonu ve amorf fazın varlığının doğrulanması lazer kırınımı, SEM, XRD, DSC ve TEM ile gerçekleştirilmiştir.  $75$  saat öğütülen amorf  $Al_{50}Ti_{50}$  tozları yüksek sertliğe ve küçük plastik deformasyon kapasitesine sahiptir ve geleneksel sinterleme ile yeşil kompaktlar elde etmenin mümkün olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca geleneksel sinterlemenin uzun zaman alacağı ve kristalleşmeyi önlemenin de mümkün olmadığı belirtilmiştir. Amorf tozlar elektriksel direnç sinterlemesi ile konsolide edilmiştir. Farklı akım yoğunlukları ( $7-8$  kA) ve işleme süreleri ( $0,8-1,6$  s) ile elektriksel olarak sinterlenmiş kompaktlar %16,5 ile %20 arasında bir gözeneklilik göstermektedir. En yüksek Vickers sertliği olan  $662$  HV, amorf  $Al_{50}Ti_{50}$  tozundan  $8$  kA ve  $1,2$  s ile elektriksel olarak sinterlenmiş bir kompaktın merkezinde elde edilmiştir [60].

Goyal, Ravi, Bakshi, Soni 2019 yılında yapmış oldukları bu çalışmada mekaniksel alaşımlama yöntemini AA6061 tozunda bulunan %10 ağırlık oranında titanyum tozunu dağıtmak için kullanmışlardır. Elde edilen tozu gazdan arındırıp titanyum alüminid ( $Al_3Ti$ ) oluşumu için sıcaklığı belirlemek üzere DSC analizi gerçekleştirmişlerdir. Mekaniksel alaşımlama tozunu, alan emisyonlu SEM, XRD ve TEM ile karakterize etmişlerdir. Daha sonra, mekaniksel alaşımlama tozunu  $50$  MPa basınç altında  $500$  °C'de kıvılcım plazma

sinterleme (SPS) ile konsolide etmişlerdir. Kıvılcım plazma sinterlenmiş kompaktın XRD ve x-ışını enerji dağılımlı spektroskopisi, Al<sub>3</sub>Ti'nin yerinde oluşumunu ortaya koyduğunu tespit etmişlerdir. Kıvılcım plazma sinterlenmiş numunenin TEM mikrogramları, AA6061 matrisinde dağılmış Al<sub>3</sub>Ti (ortalama boyut 200 nm) ile birlikte Al nano granülleri (ortalama boyut 50 nm) sergilediğini gözlemişlerdir [61].

2020 yılında hazırlanan bir çalışmada Ti ve Mg element tozları mekanik alaşımlama ile işlenerek nominal Ti<sub>x</sub>Mg<sub>(100-x)</sub> ( $x = 100, 75, 50, 25$  ve 0 at.%) kompozisyonları sentezlenmiştir. Katı çözünürlük başarıyla genişletildiği ve metastabil bir fcc fazına sahip nano yapılı malzemelerin elde edildiği gözlenmiştir. Bu fazın kafes parametresinin, Mg içeriğindeki artışla birlikte arttığı tespit edilmiştir ve saf Ti, Ti (fcc) ve Ti (hcp) fazlarının bir arada bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca Ti<sub>75</sub>Mg<sub>25</sub> ve Ti<sub>50</sub>Mg<sub>50</sub> kompozisyonları fcc fazına tam bir faz dönüşümü gösterirken, Ti<sub>25</sub>Mg<sub>75</sub> kompozisyonu Ti-Mg (fcc) ve Mg (hcp) fazlarının bir arada bulunduğunu da göstermiştir. Metastabil fcc fazı, bilyalı öğütme işlemi sırasında ağır plastik deformasyonun neden olduğu kısmi çukuk birikimi nedeniyle oluştuğu belirtilmiştir [62].

Jia, Wang, Shu, 2020 yılındaki çalışmalarında Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ana alaşım ekleme seviyesinin 7055 alüminyum alaşımının tane boyutu üzerindeki etkisini standart T-golf yöntemi ve serbest büyüme modeli ile incelemişlerdir. Ticari Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ana alaşımının özelliklerini XRD, OM ve SEM ile analiz etmişlerdir. 7055 alüminyum alaşımının soğuma eğrisini bir termokupl ile ölçmüşlerdir. Rafine edici içeriği %0,5 ağırlıkça değerini aştığında tane boyutu sabit olma eğiliminde ve rafinasyon sınırı yaklaşık 40 µm'dir. Tane boyutlarını, soğutma hızını, çözünen madde konsantrasyonunu, Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ana alaşımının ekleme seviyesini ve TiB<sub>2</sub> parçacıklarının boyut dağılımı girdileriyle serbest büyüme modeli ile hesaplamışlardır. Tahmin sonuçlarının temelde deneysel sonuçlarla tutarlı olduğunu bulmuşlardır [63].

Yadav, Siddiquee, Khan, 2021 yılında Al<sub>60</sub>Ti<sub>40</sub>'ın (ağırlıkça %) mekanik alaşımlamasını (MA), element tozunun kristalit boyutunu rafine etmek ve AlTi'nin yeni MAed fazını elde etmek için 5 mm ve 15 mm çapında karışık bilyalara sahip bir planet bilyalı değirmen kullanılarak başarıyla yapmışlardır. Elementel ve işlenmiş tozun mikro yapısal ve morfolojik analizini, Taramalı Elektron Mikroskobu ve X-ışını Kırınımı tekniği yardımıyla yapmışlardır. Elementel Al ve Ti'nin mekanik alaşımlaması, α-Ti<sub>3</sub>Al ve TiAl<sub>3</sub> yansımasıyla AlTi fazlarının oluşumuyla sonuçlanmış ortalama parçacık boyutu, 60 saatlik

öğütme sonrasında yaklaşık 7 kat azaldığını tespit etmişlerdir. Bu tozun ortalama kristalit boyutu da kontrollü koşullar altında 60 saatlik mekanik alaşımlama sonrasında 85 nm'ye kadar azaldığını görmüşlerdir [64].

Sünbül 2022 yılında hazırlamış olduğu tez çalışmasında  $Al_{60}B_{20}Mg_{20}$  ve  $Al_{50}B_{25}Si_{25}$  alaşımları, mekaniksel alaşımlama (MA) yöntemi ile argon atmosferi altında sentezlemiştir. Bu alaşımların mikro yapıları, termal davranışları ve mekaniksel özelliklerini; XRD, DTA, SEM ile incelemiştir. XRD ve SEM sonuçlarının; mekaniksel alaşımlama ile üretilen alaşımların nanokristal yapıda olduğunu göstermiştir. Mekaniksel alaşımlama işlemi süresinde alaşımı oluşturan elementsel tozların morfolojik yapıları ve kristal boyutlarının değiştiğini gözlemiştir. Elementsel tozların kristal boyutlarının öğütme süresinin artmasıyla azaldığını tespit etmiştir [65].

Yaykaşlı, Eskalen, Kavun, Gögebakan 2022 yılında hazırlamış oldukları çalışmada Alüminyum, bor ve magnezyumun en yaygın havacılık altyapı malzemelerinden olduğu konusuna değinmişlerdir. Bu nedenle radyasyon kalkanındaki etkinliklerini bilmenin önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmada, nominal bileşimi  $Al_{50}B_{25}Mg_{25}$  olan Al-B-Mg toz alaşımı, alüminyum esaslı mühendislik malzemesi olarak potansiyel kullanım için argon gazı atmosferi altında mekanik alaşımlama (MA) işlemini kullanarak sentezlemiştir. Mekanik alaşımlı tozların mikro yapısal evrimini, termal davranışı ve mekanik özelliklerini, öğütme süresine bağlı olarak XRD, DSC, geçirgenlik elektron mikroskobu ve SEM kullanarak incelemiştir. XRD ve SEM sonuçlarının, toz malzemelerin mikro yapısının MA sırasında değiştiğini ortaya koymuştur. Al-B-Mg tozlarının kristalit boyutu, öğütme süresinin artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Ortalama kristalit boyutu belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, 300 °C'de tavlanan ve hazırlanan  $Al_{50}Mg_{25}B_{25}$  alaşım tozunun radyasyona karşı daha iyi koruma sağladığı gösterilmiştir [66].

Murmu, Ghosh, Seikh, Alnaser, Abdo, Alowaysi, Ghosh 2022 yılında bilyeli öğütülmüş Cu, Ti ve B tozlarından Cu-2wt% B-4 wt% Ti ve Cu-5wt% B-10wt% Ti alaşımının üretimini ve karakterizasyonunu (mikro yapısal, mekanik ve elektriksel) temsil etmektedir.  $TiB_2$ 'nin yerinde oluşumu, DSC ve XRD ışığında da tartışılmıştır. Bu mevcut çalışma, çeşitli parametrelerin toz üretimi ve termo-mekanik rota aracılığıyla yerinde  $TiB_2$  oluşumu üzerindeki etkisini araştırmaktadır. İki tip alaşım kompoziti için metastabil faz oluşumu sırasında görünen aktivasyon enerjisi, Johnson-Mehl-Avramani (JMA) denklemi kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla 567,46 ve 626,37 (KJ/mol) olarak bulunmuştur.

Ancak, bu çalışmanın bulguları, kompozitin mekanik özelliklerinin Cu matrisindeki TiB<sub>2</sub> parçacıklarının yerinde oluşumundan kaynaklandığını göstermektedir. Isıl işlemden sonra kompozitlerin özellikleri mekanik ve elektriksel özellikler kullanılarak tartışıldı ve daha yüksek Ti ve B ilavesi yüzdesi için nihai çekme dayanımı (UTS) (~375 MPa), akma dayanımı (~300 MPa) ve sertlik (~150 Hv) ölçüldü. Ti iletkenliği olumsuz etkilediğinden elektriksel iletkenlik de %53 IACS'ye düştü [67].

Zhao, Song, Wang, Li, Chen, Sun, Wang, Zhai, Fu, Wang, Liu, Du, Zhang 2022 yılında yaptıkları çalışmada Al-Cu-Fe(-Si) alaşımlarının katılaşması sırasında Al-Ti-B'nin etkisi altında Fe açısından zengin fazların çekirdeklenme ve büyüme mekanizmaları, termodinamik hesaplama ve deneysel tekniklerle sistematik olarak incelemiştir. SEM, XRD, DSC, odaklanmış iyon demeti (FIB), TEM ve yerinde senkrotron X-ışını radyografisi. SEM ve yerinde senkrotron X-ışını radyografisi deneyleri, Al-Ti-B ilavesinin birincil Al<sub>3</sub>(CuFe) fazlarının boyutunu ve sayısını önemli ölçüde azalttığını ve Al-Cu-Fe-Si alaşımındaki α-Fe'nin boyutunu, tiplerini değiştirmeden iyileştirdiğini ortaya koyduğu tespit etmişlerdir. Bu, katılaşma sırasında birincil Al<sub>3</sub>(CuFe) fazlarının çekirdeklenmesini ve büyümesini sınırlayan Al eriyiklerindeki Ti çözünen atomlarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. FIB ve TEM sonuçları, daha önce oluşturulmuş TiB<sub>2</sub> parçacıklarının Al-Cu-Fe alaşımı ve Al-Cu-Fe-Si alaşımında sırasıyla Al<sub>6</sub>(CuFe) fazı ve α-Fe fazı için çekirdek bölgeleri olduğunu göstermiştir [68].

Yaykaşlı ve Gögebakan 2023 yılında yaptıkları çalışmalarında, Al<sub>86-x</sub>Mg<sub>10</sub>Ti<sub>4</sub>B<sub>x</sub> (x=1, 2, 3 ve 4) alaşımlarını döküm yöntemi ile üretmişlerdir. Mikroyapı, ısıl ve mekanik özelliklerini kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Alaşımların, mikroyapısal özelliklerini XRD, Taramalı SEM, EDX ile karakterize etmişlerdir. Kompozisyon oranlarını XRF kullanarak incelemiştir. Termal davranışları DSC analizi ile değerlendirmişlerdir. Mekanik özellikleri Vickers mikrosertlik (HV) ölçümü ve çekme testi yaparak araştırmışlardır. Alaşımların XRD analizlerinde, α-Al, β-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> gibi fazlar tespit etmişlerdir[69].

Yaykaşlı ve Gögebakan 2023 yılında yaptıkları çalışmalarında Al<sub>50</sub>Si<sub>25</sub>B<sub>25</sub> alaşımını ark ergitme yöntemini kullanarak külçe alaşım üretmişlerdir. Al<sub>50</sub>Si<sub>25</sub>B<sub>25</sub> alaşımının faz analizini XRD, morfolojik özellikleri SEM ile termal özellikleri ise DTA ve DSC ile araştırmışlardır. Alaşımın mekaniksel özelliklerini ise Vickers mikrosertlik (HV) testi ile incelemiştir. XRD analizinden, Bor (B) ve Silisyum (Si) atomlarının Al kafesi içerisinde çözünerek α-Al(B,Si) katı çözeltilisini oluşturduğunu tespit etmişlerdir. XRD ve

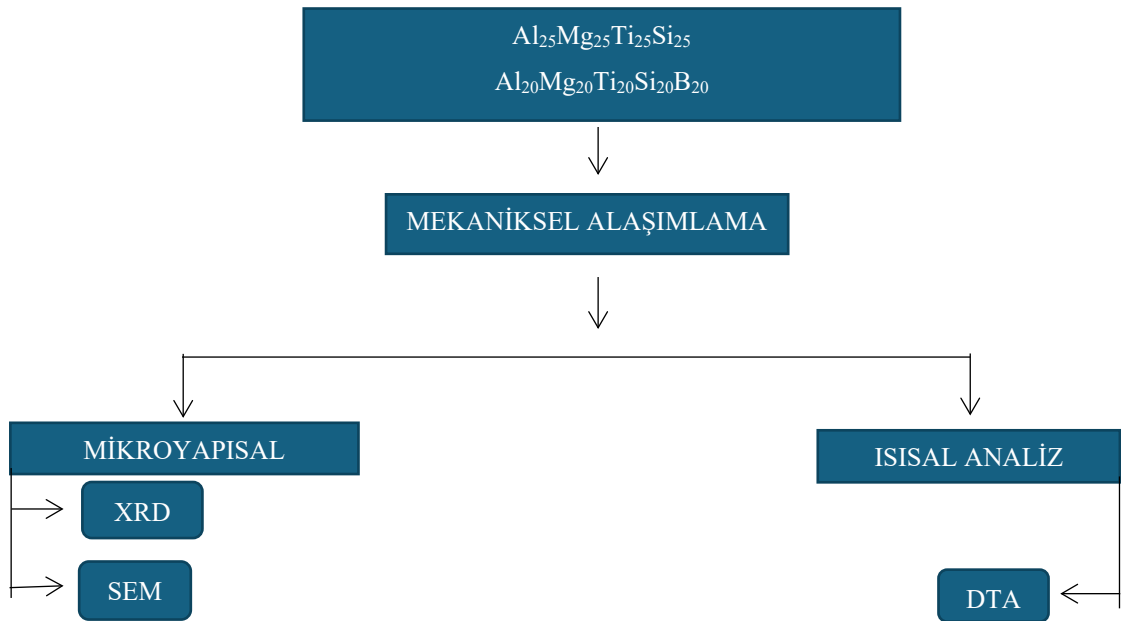
SEM sonuçları, alaşımın mikro yapısının,  $\alpha$ -Al(B,Si) katı çözültüsü, AlB<sub>2</sub> intermetalik fazı ve Si fazlarından oluştuğunu gösterdiğini tespit etmişlerdir. SEM sonuçlarının alaşımların morfolojik yapısının dendritik ve ötektik yapılar şeklinde oluştuğunu gösterdiğini gözlemlemişlerdir. DSC ve DTA sonuçları,  $\alpha$ -Al(B,Si) fazının ergimesini ifade eden bir endotermik pik gösterdiğini fark etmişlerdir [70].

2024 yılında Yaykaşlı ve Göğebakan, yaptıkları çalışmada, Al<sub>93-x</sub>Mg<sub>5</sub>Ti<sub>2</sub>B<sub>x</sub> ( $x = 1,2,3,4\%$ ) kuaterner alaşımlarını döküm yöntemi ile üretmişlerdir. Alaşımların mikroyapı özelliklerini XRD, SEM ve enerji dağılımlı EDS) analizleri ile gerçekleştirmişlerdir. Alaşımların termal özelliklerini DSC ile incelemişlerdir. Alaşımların mekanik özelliklerini ise Vickers mikrosertlik ve çekme testleri ile gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca alaşımlara çekme testleri uygulanmış ve kopma yüzeyinin SEM görüntülerini elde etmişlerdir. Üretilen alaşımların XRD analiz sonuçlarında  $\alpha$ -Al,  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> fazlarını gözlemlemişlerdir. Alaşımların SEM ve EDS analizleri faz dağılımının homojen olduğunu tespit etmişlerdir [71]

### 3. MATERYAL METOT

Bu tez çalışmamızda  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımlarının mekanik alaşımlama metodu ile tozlar halinde üretilerek mikro yapıları ve termal özellikleri incelenmiştir.  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımlarının seçilmesinin nedeni bu alaşımların oluşturduğu elementlerin yoğunluklarının düşük olmasıdır. Mekanik alaşımlama yöntemi ile toz halinde üretilen alaşımların özelliklerine Al, Mg, Ti, Si ve B elementlerinin alaşım içindeki oranlarının etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında üretilen alaşımlarını oluşturan fazların belirlenmesinde X-ışını Difraksiyonu (XRD) ve mikro yapısal özelliklerini incelemek için Taramalı Elektron Mikroskopunu (SEM) kullanılmıştır. Alaşımların ısısal davranışlarını ise Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile incelenmiştir. Böylelikle alaşımların mikroyapısında değişiklik olup olmadığı, olduğu zaman da bu değişikliğin hangi sıcaklık derecesinde veya aralığında olduğu incelenmiştir. Bunun yanı sıra alaşımların mikro yapısını etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin alaşımların özelliklerinin üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Bu araştırmaların planlanması Şekil 3.1’de sunulmuştur. Mekanik alaşımlama tekniğinde kullandığımız toz saf metallerin saflık yüzdeleri, boyutları ve temin edilen firmalar Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tez çalışmasında üretim ve analiz aşamaları

**Çizelge 3.1.** Alaşım elementlerinin bilgileri

Element	Firma	Safılık Yüzdesi (%)	Parçacık Boyutu
Al	Alfa Aesar	≥ 99,5	325 mesh (45µm)
Mg	Alfa Aesar	≥ 99,8	325 mesh (45µm)
Ti	Alfa Aesar	≥ 99,9	325 mesh (45µm)
Si	Alfa Aesar	≥ 99,5	325 mesh (45µm)
B	Alfa Aesar	≥ 99,5	325 mesh (45µm)

### 3.1. Alaşımların Üretilmesi

$Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımları mekanik alaşımlama yöntemiyle toz halinde üretilmiştir. Mekanik alaşımlama yapmak adına toz halindeki metallerin başlangıç elementlerinin oksitlenmemeleri için Glove Box (Eldivenli Kutu) argon gazı atmosferinde 0,001 gr hassasiyetli Schimadzu Ax200 markalı tartıda tartılıp üretimden önce yapılması gereken hazırlık işlemleri tamamlanmıştır. Mekanik alaşımlama yöntemini kullanarak alaşımlarımızı toz halinde ürettik. Kimyasal ve ısı işlemlere girilmeden metallere alaşım oluşturulmasına mekanik alaşımlama denilmektedir. Homojen mikro yapıda alaşım üretmek için yoğun bir atmosfer altında veya sabit bir atmosfer altında öğütme işlemi, deformasyon, soğuk kaynak, kırılma ve kaynaklama işlemleri kullanma gibi işlemler mekanik alaşımlama yöntemleridir [72].

Mekanik alaşımlama yöntemi nanokristal ve amorf malzeme üretiminde de çok fazla kullanılır. İstenilen mikro yapıda malzeme üretimi süreci rahat bir şekilde kontrol edildiği için mekanik alaşımlama tekniği daha çok tercih edilir. Bu tekniğin kullanılmasının başka bir amacı ise erime sıcaklığı daha yüksek, erime sıcaklığı arasındaki farkın daha fazla olduğu elementlerin eritme işlemi uygulanmadan alaşım üretimini sağlamaktır. Ayrıca mekanik alaşımlama yöntemi ile erime sıcaklığı birbirinden çok farklı elementlerin birbirlerinin içerisinde homojen bir şekilde karışması ve yüksek düzeyde çözünebilme limitine ulaşma zorluğu ile baş edebilme gibi başka yöntemler ile elde edilmesi daha zor olan nanokristal ve amorf alaşımlar bu yöntem ile istenilen düzeyde üretilmektedir [73].

Maliyeti düşük ve kolay olan bu yöntem ile toz haindeki elementler soğuk kaynak işlemine ve şiddetli plastik deformasyon işlemine maruz bırakılıp homojen bir şekilde daha başka türlü, yeni ve üstün alaşımlar üretilir. Mekanik alaşımlama yönteminde üretimin kolay olmasından başka daha kompleks bir işlem süreci bulunmaktadır. Bunun için

retilmesi istenilen alaşımın mikro yapısının daha üstün bir Şekilde retilmesi için daha çok parametrenin en uygun olacak Şekilde ayarlanması gerekir. Mekanik alaşımlama yöntemi ile alüminyum esaslı hem ikili hem l hem de çoklu bileŐenli alaşım sisteminde nanoyapı amorf ve kristal yapılı alaşım üretebilmek için birden çok çalışma içerine girilmiştir. Detaylı literatür tarama yapıldığı zaman tez çalışmamızda mekanik alaşımlama yöntemi ile elde edilen Al-Mg-Ti-Si ve Al-Mg-Ti-Si-B alaşımları bulunuyor. Bu yüzden bu alaşım kompozisyonunda mekanik alaşımlama yöntemi tercih edilmiştir [74].

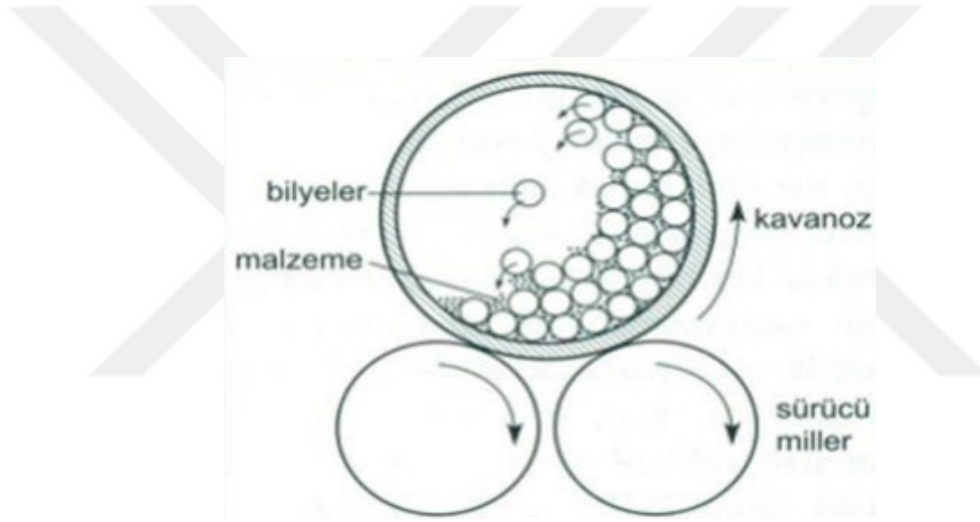
Tez alışmamızda  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımlarını üretmek için Kahramanmaraş Stc İmam Üniversitesi Katihal Fiziği Laboratuvarında bulunan Fritsch Pulverisette-5 markalı mekanik alaşımlama cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın görseli Şekil 3.2’de verilmiştir.



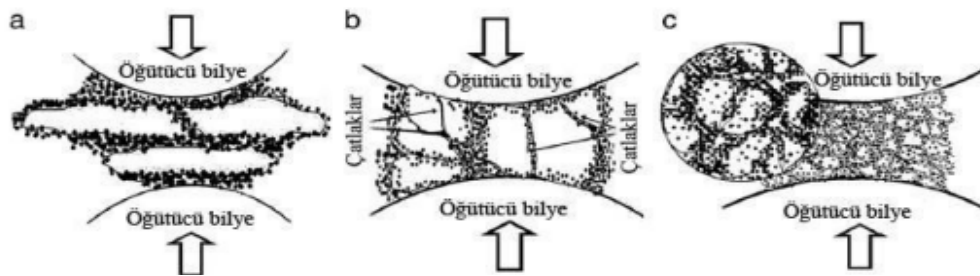
**Şekil 3.2.** Fritsch Pulverisette 5 Marka Mekanik Alaşımlama Cihazı dış ve iç kısmının görüntüsü

Alaşımı oluşturmuş olan başlangıç toz elementlerinin belirlenen kompozisyona göre tartım işlemi yapıldıktan sonra paslanmaya karşı dirençli krom elik malzemeden yapılmış olan bilyeler ile beraber havanların içine bırakılıp kapakları kapatıldı. Daha sonra havanlar mekanik alaşımlama cihazının içine konuldu. Mekanik alaşımlama cihazında alaşımların üretilmesi için bazı deneysel parametreler belirlenerek cihazda programlandı. Cihaz belirlenen süre ve hızda döndürülerek istediğimiz alaşımlar üretildi. Alaşımların yapısında bulunan elementlerin havanda bulunan bilyeler ile havanın erperlerine çarpışması sonucu ile önce alaşım tozlarının boyutlarında küçülmeler meydana gelmiştir. Boyutlarında azalma meydana gelen tozlar sonrasında birbirlerine tutunup kümelenmeye başlarlar. En sonunda alaşımlar homojen bir Şekilde elde edilmiş olurlar. Şekil 3.3’de mekanik alaşımlamada kullanılan bilyeler ve öğütücü değirminin görseli verilmiştir.

Cihazın içerisinde bulunan silindirin dönmesi sonucu bilyeler aşağıya doğru düşer ve malzemeleri öğütüp toz haline getirir. Mekanik fazlar bu çarpışma sırasında düzleşir ve üst üste biner. Atomik yapılı ve temiz olan yüzeyler birbirine temas ederler ve soğuk bir şekilde birbirleriyle kaynarlar. Bu aşama esnasında fazlar kaynamış olan bu yüzeyler arasına sıkıştırılarak kaplanır ve alaşımın yapısına karışmış olur. Mekanik alaşımlama bu şekilde gerçekleşmiş olur. Şekil 3.4’de mekanik alaşımlama yönteminde elementsel tozlardan üretilmiş olan bir alaşımın deneysel çalışma mekanizmasına ait görsel verilmiştir. Şekil 3.4 a, alaşımın başlangıç tozlarının hiçbir işlem olmadan önceki durumunu temsil etmektedir. Şekil 3.4 b ve Şekil 3.4 c ise ilerleyen öğütme süresi sonrası bilyelerin ve bilye havan çeperleri çarpışmaları sonrası elementsel tozların boyutlarının azalması ve kaynaşmaları sonucu alaşımın oluşumunu göstermektedir.



Şekil 3.3. Silindirik bilyeli değirmende hareketin gösterilmesi [75]



Şekil 3.4. Elementsel tozların Mekanik Alaşımlama işlemi sürecindeki deneysel çalışma mekanizmasının gösterimi [76]

Mekanik alaşımlama tekniği ile alaşımların üretilmesi sürecini etkilemekte olan birden çok parametre bulunur. Bu parametrelerin belirlenmesinde çok dikkatli davranılması gerekir. Mekanik alaşımlamanın başlangıcında kullanılan element tozlarının bulunduğu öğütme havanları ve öğütücü bilyelerin görseli Şekil 3.5 (a ve b)'de verilmiştir. Öğütücü bilyeler ve havanlar paslanmaya karşı dirençli krom çelik malzemeden yapılmıştır. Havanların hacmi 250 mL'dir. Element tozlarını öğütebilmek için kullanılan öğütücü bilyelerin çapları 9,5 mm ve 19,5 mm'dir. Her bir bilyenin kütlesi sırasıyla 3 gr ve 9 gr'dır. Mekanik alaşımlama bu şekilde başlatılmış olur.



**Şekil 3.5.** Öğütme havanı iç kısmı, havan, mekanik alaşımlama havan kilit parçası ve bilyeler

Safılık oranları çok fazla olan Al-Mg-Ti-Si ve Al-Mg-Ti-Si-B tozlarının tane boyutu ve yoğunluğu oldukça düşüktür. Bu toz parçacıklar arasında magnezyumun oksijen ile tepkimeye girme olasılığı çok yüksektir. Magnezyumda bulunan bu durum alaşımların üretilmesi esnasında istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkar. Çünkü alaşımda oksit tabakalarının oluşması malzemede istenilen özelliklerin olmasını zorlaştırır. Bu nedenle alaşım tozlarının tartım işlemleri sırasında oksitlenmeyi engellemek için yüksek saflıkta Ar (argon) gazı altında vakumlu Glove Box kullanılarak yapılmıştır. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan Glove Box görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Argon atmosferli Glove Box

Mekanik alaşımlama yönteminde en önemli parametreler toz-bilye oranı, elementlerin öğütülme süresi ve hızıdır. Daha önce yapılan çalışmalarda elementlerin öğütülme oranları genel olarak 1:20, 1:15, 1:10 ve 1:5 olarak belirlendiği görülmüştür. Bu çalışmamızda toz alaşımların toz-bilye ağırlık oranını 1:15 olarak belirledik. Malzemelerin öğütülme esnasında açığa çıkarılan ısıdan dolayı fazındaki yapının değişime uğramaması için uygun bir süre ve uygun bir hız değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı yapılmış olan araştırma ve incelemelere bakılarak toz alaşımları öğütmek için 300 devir/dk (rpm) hız, öğütme süresi olarak 30 dk ve öğütme esnasında artan ısının tekrar soğuması için beklenen süre olarak da 30 dk belirlendi. Element tozlarının bilye ve çeperlerine yapışmaması için metanol işlem elemanı olarak kullanıldı. Toz alaşımlarının öğütülme sürelerini 1, 5, 10, 50 ve 100 saat olarak belirledik. Glove Box'da argon gazı atmosferinde yeterli miktarda numune almak tüm öğütme sürelerinde incelemek için cihaz durduruldu.

Şekil 3.7'de öğütme haznesinin ve bilyelerin dönme hareketinin görseli verilmiştir. Şekil 3.7 'a' öğütücünün dönme yönünü, 'c' havanın dönme yönünü temsil etmektedir. Cihazın ve havanın ters yönlere dönmesiyle havanın içerisinde oluşan merkez kaç kuvveti sayesinde bilyeler 'b' yönünde havanın merkezinden geçerek havanın çeperine çarpmaktadır. Öğütücü değirmendeki silindir döner ve aşağıya düşen bilyeler malzemeleri öğütürken toz haline getirir. Metalik yapıda bulunan fazlar bu çarpışmalar sırasında düzleşip üst üste bindikçe temiz yüzeyler atomik düzeyde birbiri ile temas edecek ve birbirine soğuk bir şekilde kaynayacak. Aynı aşamada kırılabilir fazlar bu kaynayan yüzeyler arasında sıkışır, kaplanır ve alaşımların yapısına karışır. Böylece mekanik alaşımlama olmuş olur.



Şekil 3.7. Öğütme haznesinin ve bilyelerin hareketi [77]

### 3.2. Alaşımların İncelenmesi

Alaşımların araştırılmasında kullanılan cihazlar ve parametreleri aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

#### 3.3.1. X-Işını Difraksiyonu (XRD)

Bu çalışmamızda; mekanik alaşımlama yöntemi ile elde ettiğimiz alaşımların kristal yapı analizini X-ışını difraksiyonu (XRD) cihazı ile yaptık. Bu incelemeleri yapmak için Kayseri Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümündeki X-ışını laboratuvarında bulunan XRD (X-ışını Difraksiyonu) cihazını kullandık. Şekil 3.8’de X-ışını difraksiyonu (XRD) cihazının dış görüntüsü ve Şekil 3.9’da bu cihazın iç görüntüsü verilmiştir. Analiz parametreleri, 30mA ve 40kV ayarlı monokromatik  $\text{CuK}_\alpha$  radyasyonu ( $\lambda = 0.154056 \text{ nm}$ ) altında kullanılmıştır. XRD analizleri için; 293 K’ de  $20^\circ$ ’ den  $100^\circ$ ’ ye kadar  $0.01^\circ$  adım aralığında ve her adımda 1 s bekletilerek ölçümler alınmıştır.

X-ışını kırınımı analizi alaşımların kristal fazlarını tanımlamak ve belirlemek amacıyla kafes düzlemler arasında bulunan ölçekler tarzı çalışmalar için yapılır. Numunelerin saflık değerlerine safsızlık oranı ve kompozisyonu göz önüne alınarak kırılma desenine erişilebilir. Alaşım malzemelerinin katı hal özelliğinin belirlenmesi için en çok kullanılan cihazların başında XRD cihazı gelmektedir. XRD cihazı bir kristal yapı içinde bulunan bazı kusurların görüntülerini algılar ve bilgisayar aracılığı ile verilen verileri spektrum grafiğine döker. Alaşım numunelerinin kalitatif ve kalitatif çok fazlı analizlerinin hızlı ve doğru sonuçlarını sağlamak adına güçlü bir teknik olan XRD kullanılmaktadır. XRD analizlerinde elde edilen kırınım desenli grafikler, dünya genelinde geçerliliği bulunan ICDD (International Centre for Diffraction Data) veri tabanı ile belirlenen bir malzemenin referans alınan modeli ile karşılaştırılıp kristal malzemenin faz tanımlaması yapılmıştır [78].



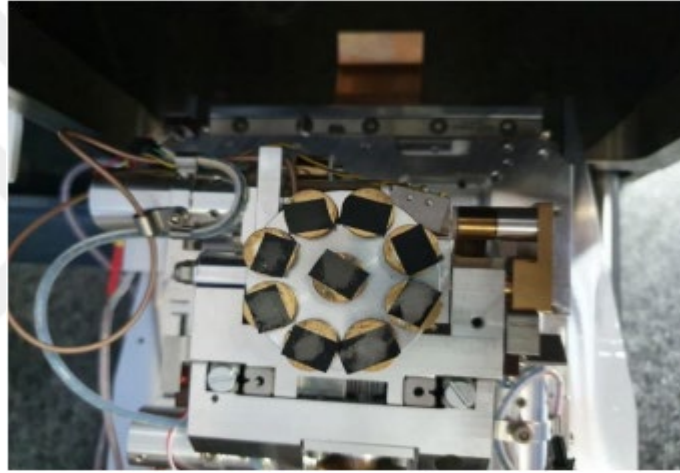
**Şekil 3.8.** Philips X'Pert PRO marka X-Işını Difraksiyonu (XRD) cihazı

### **3.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi**

Mekanik alaşımlama tekniği ile ürettiğimiz alaşımların mikroyapısal özelliklerini ve faz yapılarını Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sanayi Kamu İş Birliği Araştırma, Geliştirme ve Uygulama Merkezi (ÜSKİM)'de bulunan ZEISS EVO LS10 marka SEM cihazını kullanarak, EHT:20 keV enerjisinde backscatter elektron detektörü (BSD) ve elektron tabancası olarak Lab6 filament kullanarak inceledik. SEM'in dış görüntüsü Şekil 3.10'da iç görüntüsü ise Şekil 3.11'de verilmiştir. Ürettiğimiz alaşımların numunelerini karbon bant ile numune tutucu (sub holders) üzerine yapıştırarak yerleştirdik. Sonra elektron mikroskobunun tablasına (stage) vidalanarak hızlandırılmış elektron demeti ile numune yüzeyi arasındaki açı  $90^\circ$  olacak şekilde sabitledik Daha sonra ise SEM cihazının, numunelerin bulunduğu oda (system chamber) turbo moleküler pompaları çalıştırarak çalışma ortamında bulunan havayı vakumlama yolu ile boşalttık. Numune bölümünde bulunan hava basıncı yeterli düzeye gelene kadar bekledik. Vakum uygun seviyeye geldiğinde elektron tabancası (beam gun) çalıştırılarak numune ile elektron iletim etkileşimi başlamış oldu. Numuneden saçılan backscatter elektronları BSD detektöründe toplanarak dijital amplifikatör devreler sayesinde bilgisayarda iki boyutlu siyah beyaz görüntü olarak morfolojik fotoğraflar elde edildi.



**Şekil 3.9.** ZEISS EVO L10 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı



**Şekil 3.10.** ZEISS EVO L10 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Cihazı iç kısım

### **3.3.3. Diferansiyel Termal Analizi (DTA)**

Bu tez çalışmamızda ürettiğimiz alaşımların ısısal özelliklerini Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Araştırma Laboratuvarında bulunan Perkin-Elmer Diamond marka Diferansiyel Termal Analizi (DTA) cihazı ile yaptık. DTA cihazının görseli Şekil 3. 13'de verilmiştir. DTA analiz yaptığımızda, alaşımlarımızın faz dönüşümlerini belirleyebilmek için, toz alaşımları 5-10 mg aralığında tartımını yaparak ağzı açık yüksek sıcaklığa dayanıklı bakır numune kaplarına bıraktık. DTA cihazını bağlantılı olduğu bilgisayar aracılığı ile yüksek saflıkta azot gazı tüpü ile birlikte açıldı. Cihazın açılmasıyla birlikte cihazın ayarlarının sabit tutulması için bir süre bekleyerek boş referansı numune kısmına yerleştirdik. Azot gazı akışını 2 mL/dak'ya ayarlayarak analiz işlemine başladık. Cihazın bağlı olduğu bilgisayardan DTA cihazının programı Pyris'den

analiz parametrelerini ayarladık. Analiz parametrelerini 50 °C'den 900 °C olarak belirledik. Isıtma hızı olarak da 10 °C/dak olarak ayarladık. Alaşım numunelerinin DTA ölçümlerinin sonucunda erime piklerinin sıcaklığı ( $T_e$ ) ve camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) termal özelliklerini belirledik.



**Şekil 3.11.** Perkin-Elmer Diamond Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, tezin amacına ve kapsamına uygun olarak Mekanik alaşımlama (MA) tekniği kullanılarak  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  toz alaşımları 1 saat, 5 saat, 10 saat, 50 saat ve 100 saat öğütülmüştür. Üretilen toz alaşımların faz içeriği, mikroyapısı ve ısıl özellikleri sırasıyla XRD, SEM ve DTA analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

### 4.1. $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$ Alaşımlarının Analiz Sonuçları

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımı 1 saat, 5 saat, 10 saat, 50 saat ve 100 saat öğütülmüştür. Üretilen toz alaşımların kristal yapısı, mikroyapısı ve termal özellikleri sırasıyla XRD, SEM ve DTA analizleri ile araştırılmıştır.

#### 4.1.1. XRD Analizi

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1 saat süreyle öğütülen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  tozlarının XRD analiz yapılmış ve XRD deseni Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde Al, Mg, Ti ve Si elementlerinden yansıyan pikler belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu sonuç 1 saatlik öğütme süresinin alaşımın oluşması için yeterli olmadığını göstermektedir.

Al, Mg, Ti ve Si elementlerinin ICDD kartlarından XRD deseni incelendiğinde aşağıda belirtilen kartlar ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

*Alüminyum*, ICDD kart numarası: **89-2837** [79],  $2\theta = 38,42^\circ, 44,63^\circ, 65,01^\circ, 78,18^\circ$  ve  $82,34^\circ$ .

*Magnezyum*, ICDD kart numarası: **89-4244** [80],  $2\theta = 32,15^\circ, 36,57^\circ, 62,99^\circ, 69,08^\circ, 70,55^\circ$  ve  $78,18^\circ$ .

*Titanyum*, ICDD kart numarası: **89-2762** [81],  $2\theta = 35,07^\circ, 38,42^\circ, 40,10^\circ, 52,95^\circ, 62,99^\circ, 70,55^\circ, 76,35^\circ, 82,64^\circ$  ve  $86,67^\circ$ .

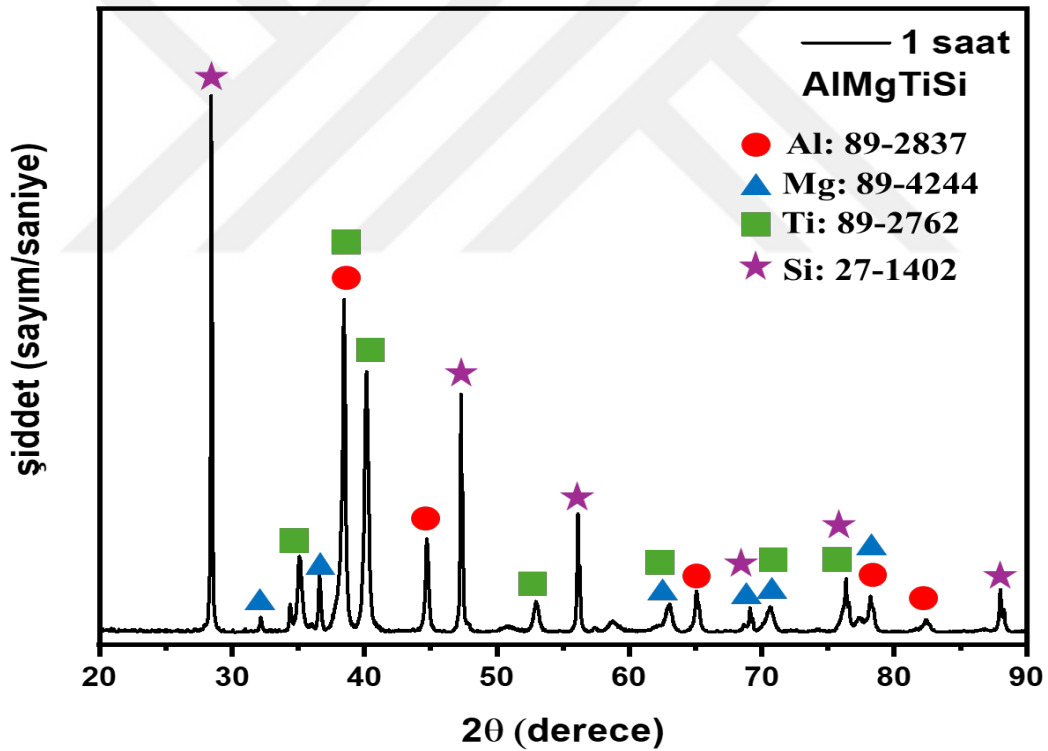
*Silisyum*, ICDD kart numarası: **27-1402** [82],  $2\theta = 28,44^\circ, 47,27^\circ, 56,07^\circ, 69,08^\circ, 76,35^\circ$  ve  $87,65^\circ$ .

1 saatlik öğütme sonrası alaşım oluşmamıştır. Ancak homojen olarak karışım meydana geldiği düşünülmektedir. Bu kartlar literatür ile karşılaştırılmıştır ve uyumlu olduğu görülmüştür [79–82].

Çizelge 4.1 de Al, Mg, Ti ve Si elementlerinin kristalografik parametreleri verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> alaşımını oluşturan elementlerin kristalografik parametreleri

Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
Alüminyum 01-089-2837	Kübik	Fm-3m	225	4,0592	4,0592	4,0592	90	90	90
Magnezyum 01-089-4244	Hekzagonal	P63/mmc	194	3,2094	3,2094	5,2108	90	90	120
Titanyum 01-089-2762	Hekzagonal	P63/mmc	194	2,9511	2,9511	4,6843	90	90	120
Silisyum 00-027-1402	Kübik	Fm-3m	227	5,4309	5,4309	5,4309	90	90	90



**Şekil 4.1.** MA ile 1 saat öğütülerek üretilen Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> tozlarının XRD deseni

1 saatlik öğütme işlemi, Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> tozlarının alaşım haline gelmesi için yeterli olmadığı için, öğütme süresi 5 saate çıkarılmıştır. Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> tozlarının 5 saat öğütülme sonrası XRD deseni Şekil 4.2’de verilmektedir.

XRD pikleri incelendiğinde Al, Ti ve Si elementlerinden yansıyan piklerle birlikte, Mg<sub>2</sub>Si ve AlTi<sub>3</sub> gibi intermetalik fazlardan yansıyan pikler de gözlenmiştir. Bu fazlar grafik içinde belirtilmiştir. Ayrıca, ICDD kartlarından XRD deseni incelendiğinde aşağıda belirtilen kartlar ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

*Alüminyum*, ICDD kart numarası: **89-2837** [79],  $2\theta=44,63^\circ$ .

*Silisyum*, ICDD kart numarası: **27-1402** [82],  $2\theta=28,5^\circ, 47,4^\circ, 56,1^\circ, 69,1^\circ, 76,4^\circ$  ve  $88,1^\circ$ .

*Titanyum*, ICDD kart numarası: **89-2762** [81],  $2\theta=35,1^\circ, 38,5^\circ, 40,3^\circ, 53,1^\circ, 62,8^\circ, 70,5^\circ, 76,4^\circ$ .

*Mg<sub>2</sub>Si fazı*, ICDD kart numarası: **65-0690**,  $2\theta=24,3^\circ, 58,3^\circ, 66,1^\circ$  ve  $72,1^\circ$ .

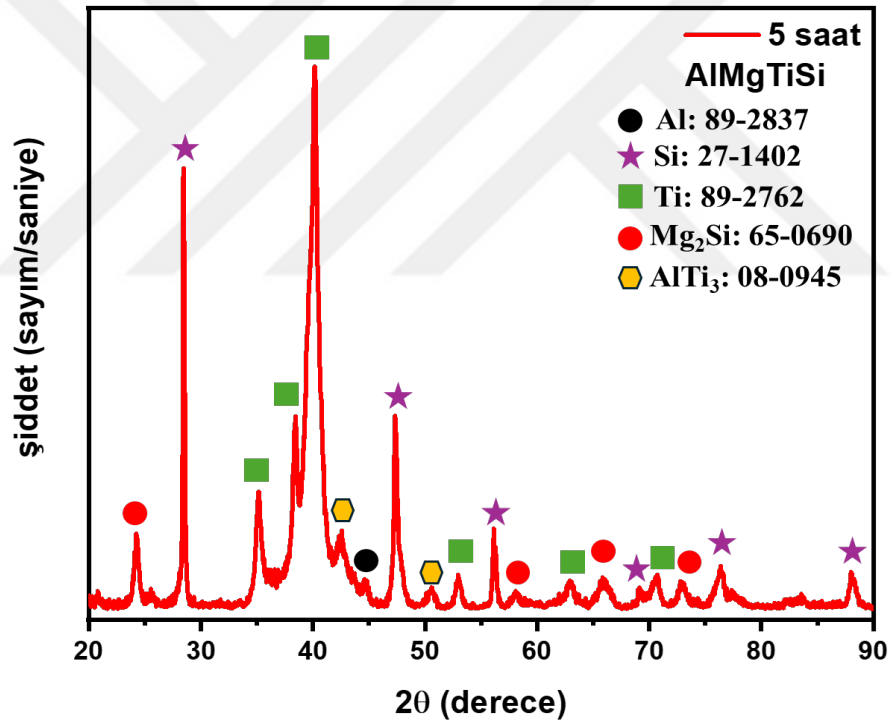
*AlTi<sub>3</sub> fazı*, ICDD kart numarası: **08-0945**,  $2\theta=42,6^\circ, 50,49^\circ$ .

5 saatlik öğütme sonrası alışımda Mg<sub>2</sub>Si ve AlTi<sub>3</sub> gibi intermetalik fazların oluşumları gözlenmiştir. Bu sonuç alışı oluşumunun başladığını göstermektedir. Diğer taraftan, 5 saat öğütme ile Si ve Ti birincil XRD piklerinin varlığını sürdürdüğü gözlenmiştir. Bunun yanı sıra Al, Mg, Ti ve Si elementlerinin mekanik alışımlama sırasında oluşan enerjinin difüzyona neden olduğu ve bunun bir sonucu olarak Mg<sub>2</sub>Si ve AlTi<sub>3</sub> fazları oluşmuştur. Ancak 5 saatlik öğütme işlemi hedeflenen homojen yapıda bir alışı oluşumu için yeterli olmamıştır. MA ile 5 saat öğütme sonrasında Si ve Ti birincil ve ikincil piklerinin tam olarak kaybolmadığı ancak kısmi olarak pik şiddetlerinde düşüşler olduğu görülmektedir. Bu durum Si ve Ti tozlarının alışı oluşumunun sağlanması için gerekli kinetik enerji oluşumuna ulaşmadığını ifade etmektedir. Bunun yanı sıra  $2\theta=44,63^\circ$ 'de Al ikincil piklerinden bir tanesinin kısmi olarak pik oluşumu gözlendi. Öğütme süresinin ilerlemesiyle bu başlangıç elementlerinin birbirleri ile reaksiyona gerekerek yeni fazlar oluşturarak alışı oluşumunun tamamlanması takip edilmiştir. Ayrıca bu kartlar literatür ile karşılaştırılmıştır ve uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2 de Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> alışımlının MA ile 5 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> alaşımlarının MA ile 5 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri

Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
Alüminyum 01-089-2837	Kübik	Fm-3m	225	4,0592	4,0592	4,0592	90	90	90
Titanyum 01-089-2762	Hekzagonal	P63/mmc	194	2,9511	2,9511	4,6843	90	90	120
Silisyum 00-027-1402	Kübik	Fm-3m	227	5,4309	5,4309	5,4309	90	90	90
Mg <sub>2</sub> Si 03-065-0690	Kübik	Fm-3m	225	6,3510	6,3510	6,3510	90	90	90
AlTi <sub>3</sub> 98-008-0945	Hekzagonal	P63/mmc	194	5,7640	5,7640	4,6640	90	90	120



**Şekil 4.2.** MA ile 5 saat öğütülerek üretilen Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> tozlarının XRD deseni

10 saat öğütme ile elde edilen Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> toz XRD ile analiz edilmiştir ve XRD deseni Şekil 4.3’de verilmektedir. XRD pikleri incelendiğinde bu toz alaşımlarının yapısında Si<sub>3</sub>Ti<sub>5</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> fazları gözlemlenmiştir. ICDD kartlarından XRD deseni incelendiğinde aşağıda belirtilen kartlar ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

$Si_3Ti_5$  fazı, ICDD kart numarası: **65-3597**,  $2\theta = 24,1^\circ, 27,7^\circ, 28,38^\circ, 29,4^\circ, 34,7^\circ, 37,1^\circ, 40,7^\circ, 42,4^\circ, 50,2^\circ, 54,2^\circ, 61,8^\circ, 66,1^\circ, 68,5^\circ, 69,9^\circ, 73,4^\circ, 75,4^\circ, 78,5^\circ, 83,6^\circ$ , ve  $87,7^\circ$ .

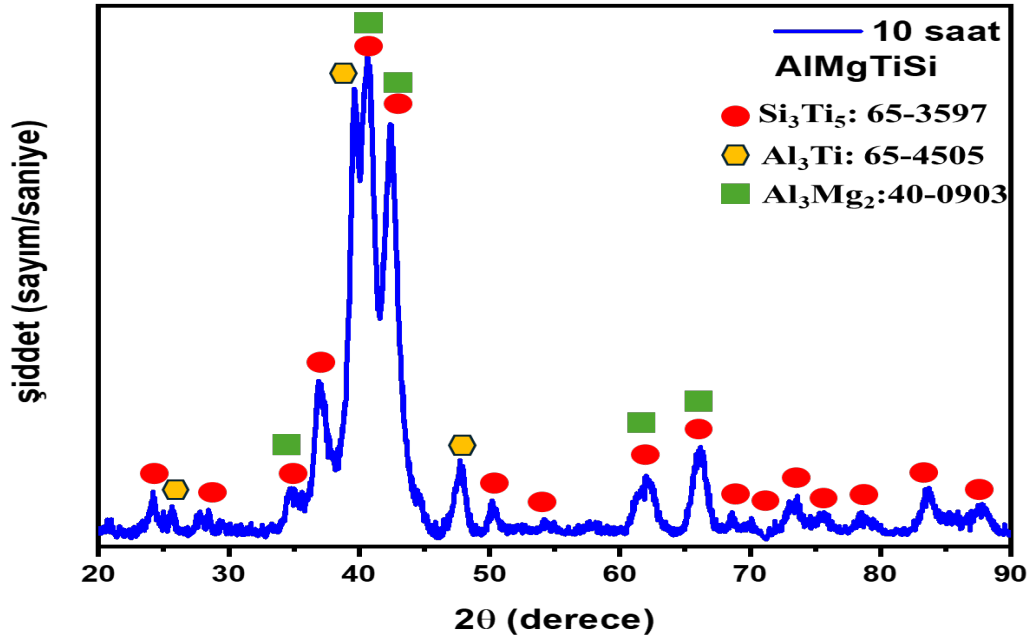
$Al_3Ti$  fazı, ICDD kart numarası: **65-4505**,  $2\theta = 25,5^\circ, 39,6^\circ, 42,4^\circ, 47,7^\circ, 54,2^\circ, 66,1^\circ, 68,5^\circ, 69,9^\circ, 73,4^\circ, 75,4^\circ, 78,5^\circ$  ve  $83,6^\circ$ .

$Al_3Mg_2$  fazı, ICDD kart numarası: **40-0903**,  $2\theta = 37,1^\circ, 40,7^\circ, 42,4^\circ, 61,8^\circ$  ve  $66,1^\circ$ .

Çizelge 4.3 de  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının MA ile 10 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri verilmiştir.

**Çizelge 4.3.**  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının MA ile 10 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri

Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
$Si_3Ti_5$ 03-065-3597	Hekzagonal	P63/mcm	193	7,4650	7,4650	5,1620	90	90	120
$Al_3Ti$ 03-065-4505	Tetragonal	I4/mmm	139	3,8360	3,8360	8,57980	90	90	90
$Al_3Mg_2$ 00-040-0903	Hekzagonal	-	-	5,7300	5,7300	9,5400	90	90	120



**Şekil 4.3.** MA ile 10 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının XRD deseni

50 saat öğütme ile elde edilen  $Al_2Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımının XRD sonucu Şekil 4.4’de verilmiştir. Bu alaşımın XRD pikleri incelendiğinde  $Si_3Ti_5$ ,  $Al_3Mg_2$  ve  $AlTi$  fazlarının oluştuğu görülmektedir. Bu fazların ICDD kartlarından aşağıda belirtilen durumlar ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

$Si_3Ti_5$  fazı, ICDD kart numarası: **65-3597**,  $2\theta= 23,7^\circ, 27,7^\circ, 30,1^\circ, 35,6^\circ, 37,3^\circ, 41,5^\circ, 43,2^\circ, 52,7^\circ, 54,1^\circ, 57,8^\circ, 62,5^\circ, 67,4^\circ, 69,7^\circ, 74,8^\circ, 79,05^\circ, 85,2^\circ, \text{ve } 88,6^\circ$ .

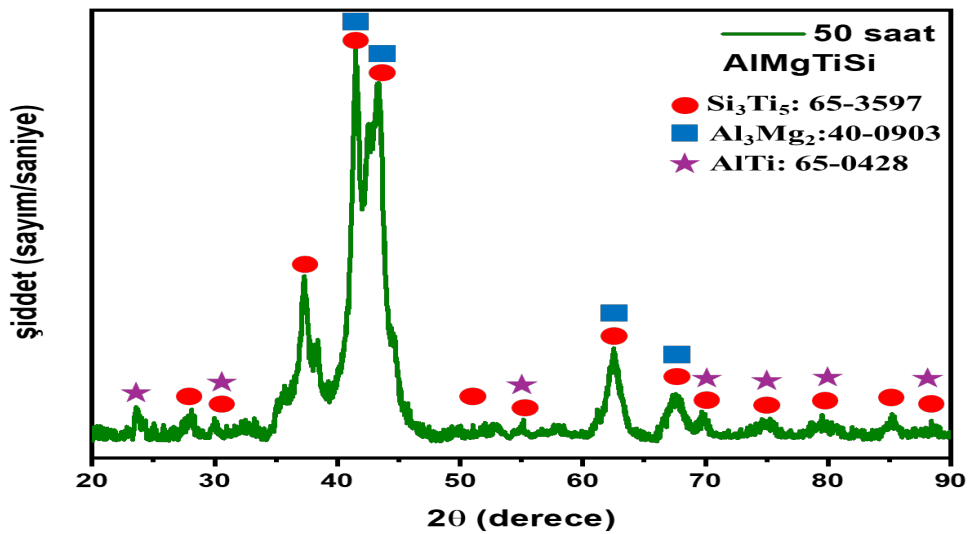
$Al_3Mg_2$  fazı, ICDD kart numarası: **40-0903**,  $2\theta=32,6^\circ, 35,6^\circ, 37,3^\circ, 41,5^\circ, 43,2^\circ, 62,5^\circ$ .

$AlTi$  fazı, ICDD kart numarası: **65-0428**,  $2\theta= 21,5^\circ, 32,6^\circ, 54,1^\circ, 62,5^\circ$ .

Çizelge 4.4 de  $Al_2Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının MA ile 50 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri verilmiştir

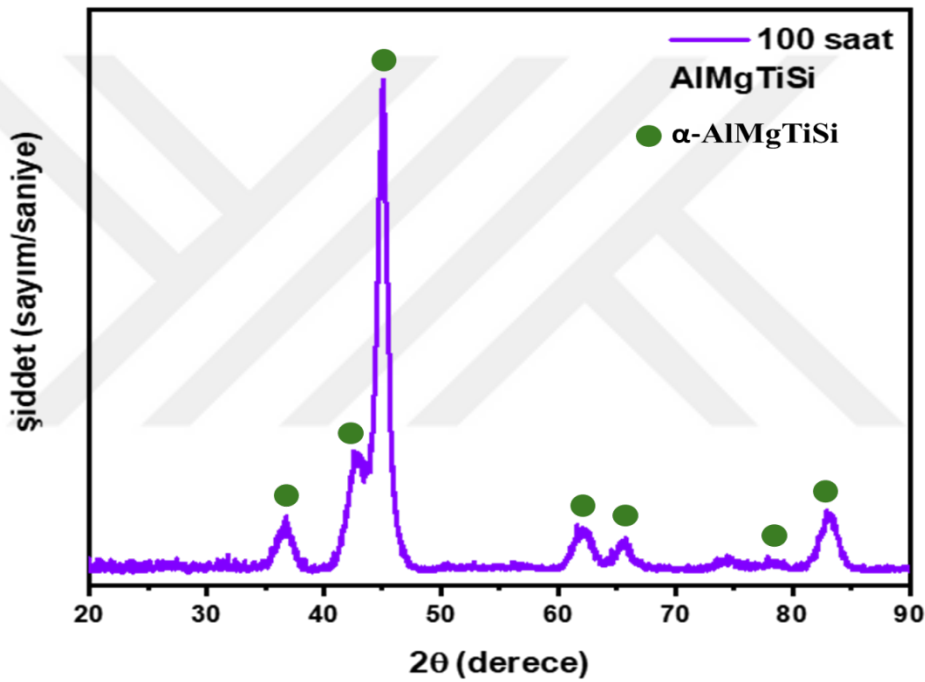
**Çizelge 4.4.**  $Al_2Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının MA ile 50 saat öğütülme sonrası kristalografik parametreleri

Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
$Si_3Ti_5$ 03-065-3597	Hekzagonal	P63/mcm	193	7,4650	7,4650	5,1620	90	90	120
$Al_3Mg_2$ 00-040-0903	Hekzagonal	-	-	5,7300	5,7300	9,5400	90	90	120
$AlTi$ 03-065-0428	Tetragonal	P4/mmm	123	4,0010	4,0010	4,0710	90	90	90



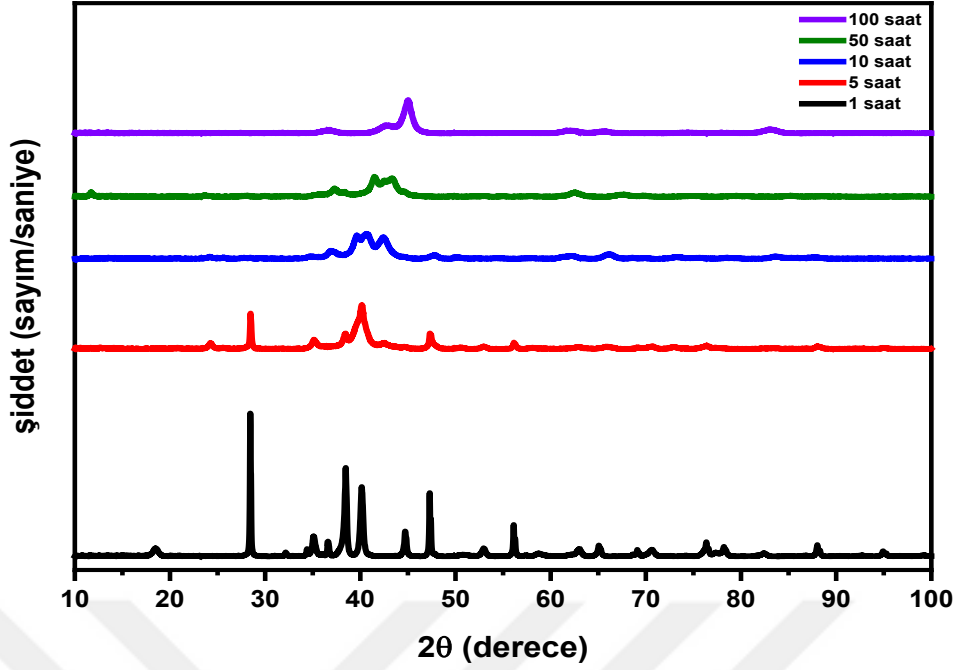
Şekil 4.4. MA ile 50 saat öğütülerek üretilen  $Al_2Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının XRD deseni

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımının faz yapısında bir değişikliğin olup olmadığını anlamak ve mikro yapının mekanik öğütme süresine bağlılığını anlamak için tozlar 100 saat süreyle öğütülmüş ve tekrar XRD ile incelenmiştir. 100 saatlik öğütme ile elde edilen alaşımın XRD sonuçları Şekil 4.5 de görülmektedir. Bu alaşımın Şekil 4.5 deki XRD pikleri incelendiğinde elementlerde yansıya piklerin kaybolduğu ve daha önce gözlenen intermetalik fazların  $\alpha$ -AlMgTiSi katı çözeltili fazına dönüştüğü görülmektedir. Bu sonuç daha önce yapılan benzer çalışmalarla uyum içerisindedir. Yüksek entropilli alaşımlarda gözlenen tek fazın, bu alaşımda da gözlenmesi bu tezin en önemli sonuçlarından birisidir.



Şekil 4.5. MA ile 100 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının XRD deseni

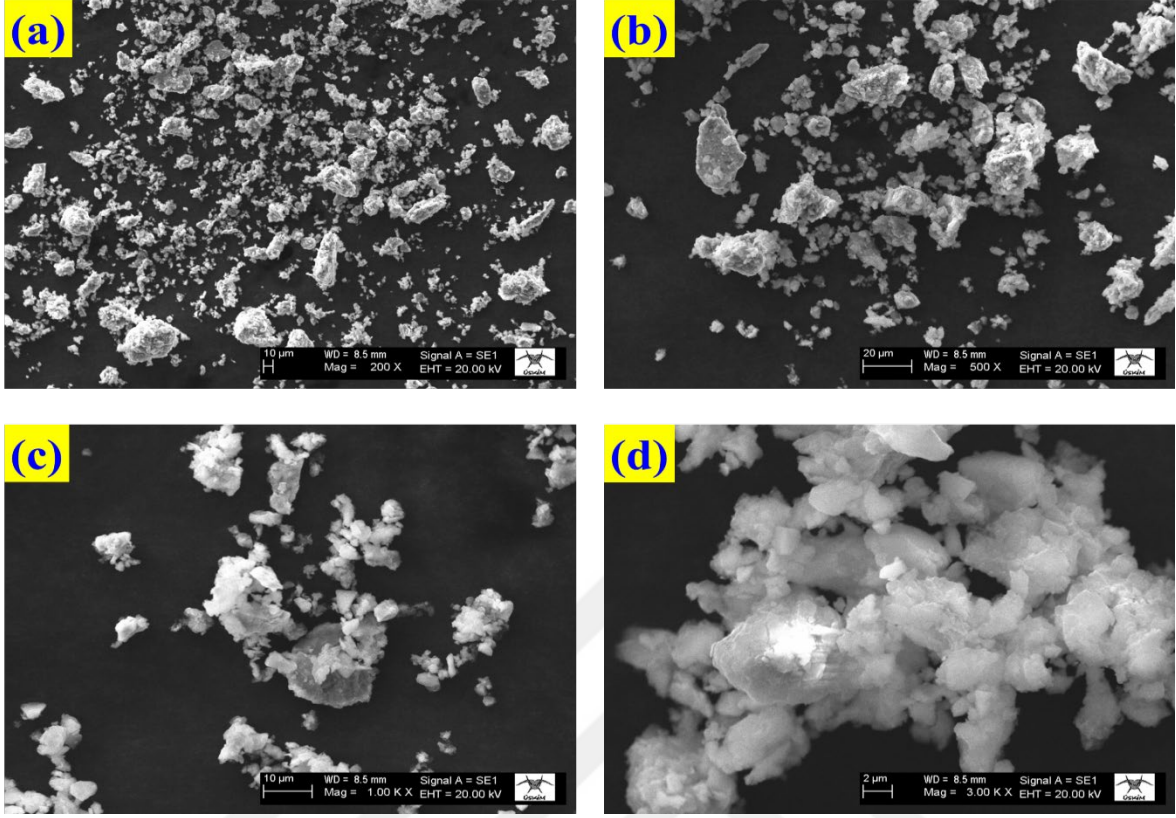
Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saat sürelerde öğütme işlemine tabi tutulan  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  tozlarının faz yapılarında meydana gelen değişimi daha iyi anlayabilmek için XRD sonuçları Şekil 4.6'da toplu olarak verilmiştir. Şekil 4.6 da fazları temsil eden piklerin değişimi açık bir şekilde görülmektedir. Öğütme işleminin başlangıç safhasında Al, Si, Ti, Mg elementlerinde yansıyan pikler görülmektedir. Öğütme süresinin artması ile bu piklerin şiddeti azalmakta ve farklı açılarda  $Mg_2S$ ,  $Al_3Ti$ ,  $Al_3Mg_2$  ve  $Si_3Ti_5$  fazlarından yansıyan pikler gözlenmektedir. Öğütme işleminin son safhası olan 100 saatlik öğütme işleminden sonra ise sadece  $\alpha$ -AlMgTiSi katı çözeltili fazını temsil eden pikleri gözlenmiştir.



**Şekil 4.6.** MA ile 1, 5, 10, 50 ve 100 saat süreyle öğütülerek elde edilen Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> alaşımının XRD deseni

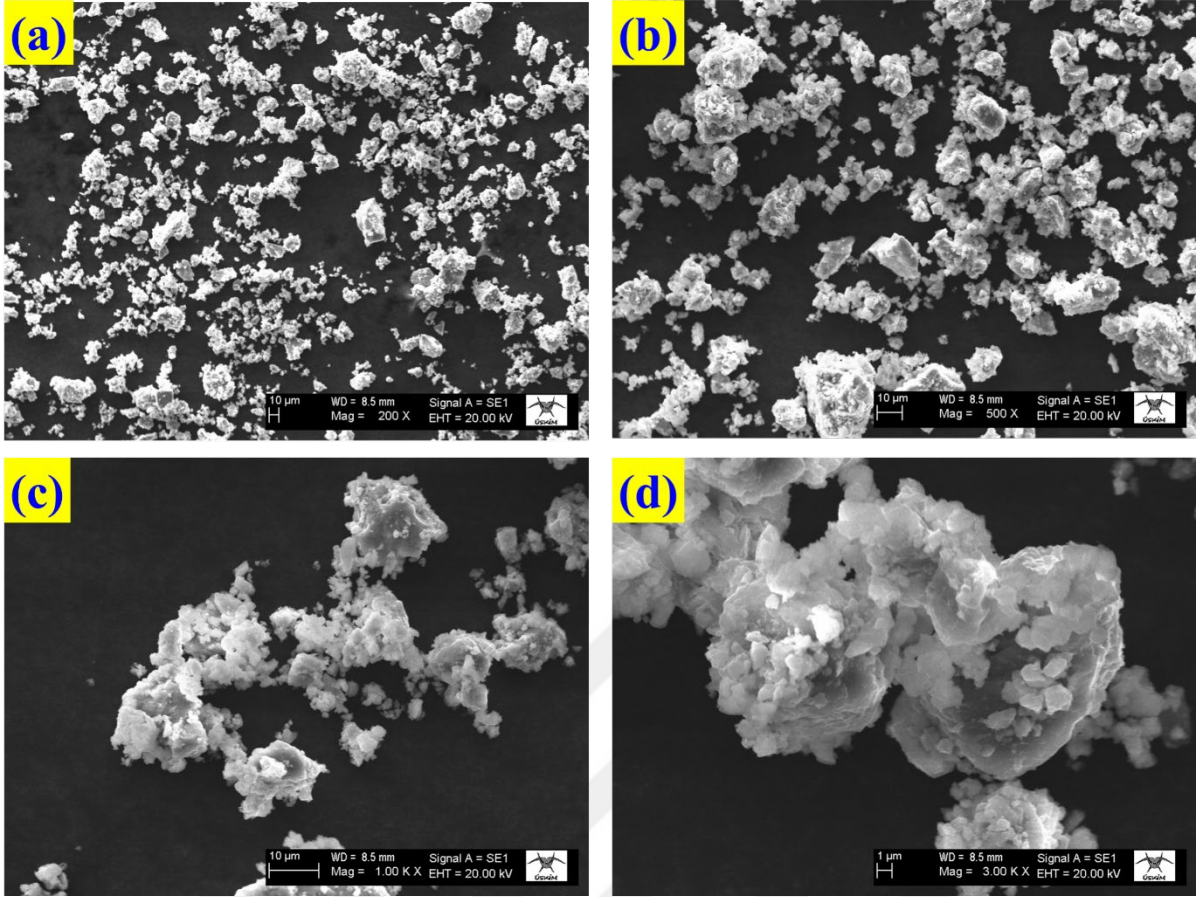
#### 4.1.2. SEM Analizi

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saat zaman aralığında üretilen Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> toz alaşımlarının mikroyapısal değişimlerini anlayabilmek için SEM analizleri yapılmıştır. Toz alaşımların 200x, 500x, 1000x ve 3000x büyütme yapılarak alınan SEM görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.7a’da 1 saat öğütme işlemi sonrası Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> alaşımının SEM görüntülerinde alaşımı oluşturan elementlerin homojen bir dağılımı görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi alaşımı oluşturan elementlerin başlangıçta farklı büyüklükte ve farklı geometrik yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 4.7b’de alaşımı oluşturan Al, Mg, Ti ve Si saf toz elementlerinin karakteristik görüntüsü daha belirgin bir hale gelmiştir. Şekil 4.7c-d’de toz elementlerinin detaylı görüntülerinde elementlerin morfolojik yapılarında herhangi bir değişikliğin olmadığı gözlenmiştir. Bunun yanında elementlerin birbirleriyle reaksiyona girecek miktarda enerjinin açığa çıkmadığı ve bunun bir sonucu olarak da yeni fazların oluşmadığı gözlenmiştir. Bu durum bu alaşımların XRD sonuçları ile uyumludur.



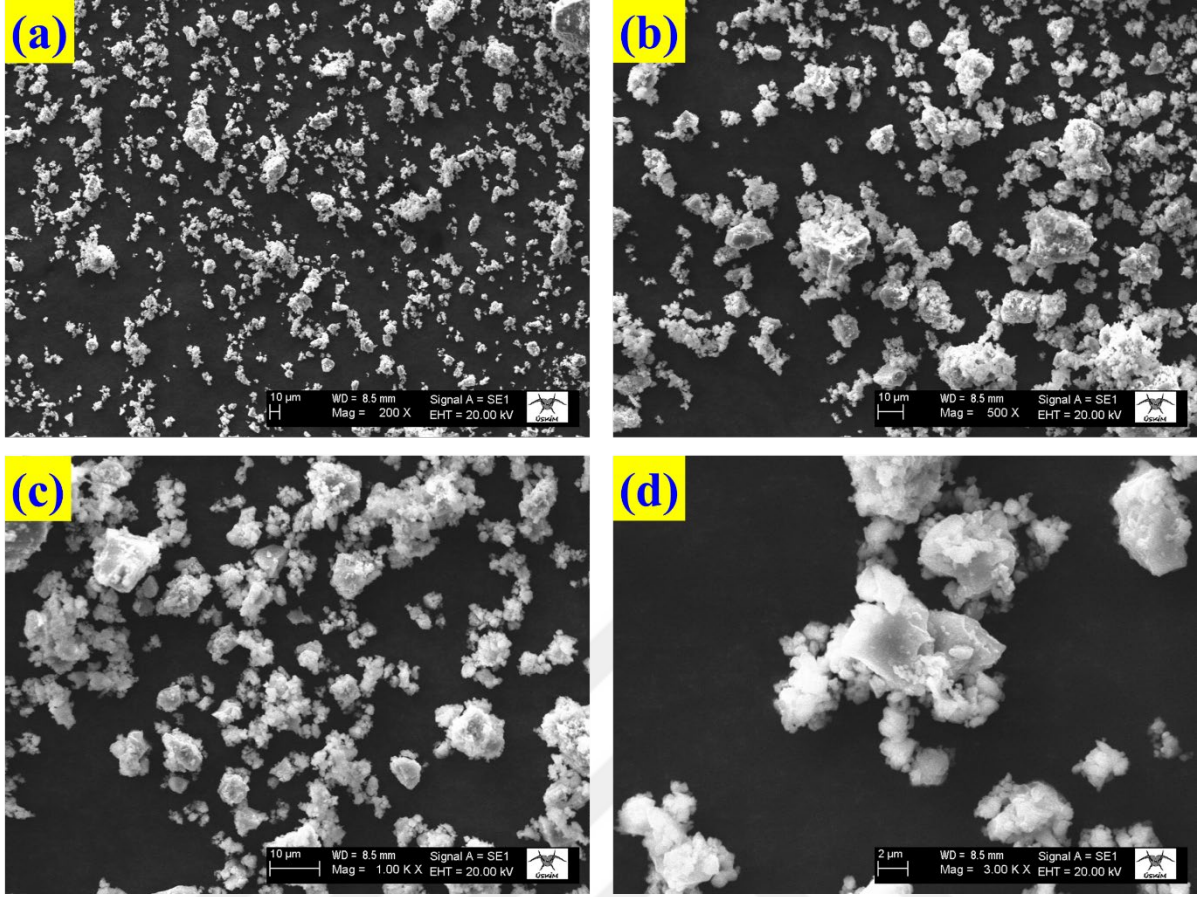
**Şekil 4.7.** MA ile 1 saatlik süreyle öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri

MA tekniği ile 5 saat öğütme işlemi sonrası  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  SEM görüntüleri Şekil 4.8.'de sunulmuştur. Şekil 4.8a'da görüldüğü gibi 5 saatlik öğütme işleminden sonra toz parçacıklarında kırılma meydana geldiği görülmektedir. Al, Mg, Ti ve Si Elemental parçacıkların deforme olarak saf toz elementlerinin başlangıçtaki karakteristik görüntüsü kaybolduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum öğütme işlemi sonucu ortaya çıkan enerji nedeni ile soğuk kaynaklanmanın ilk aşamasını göstermektedir.



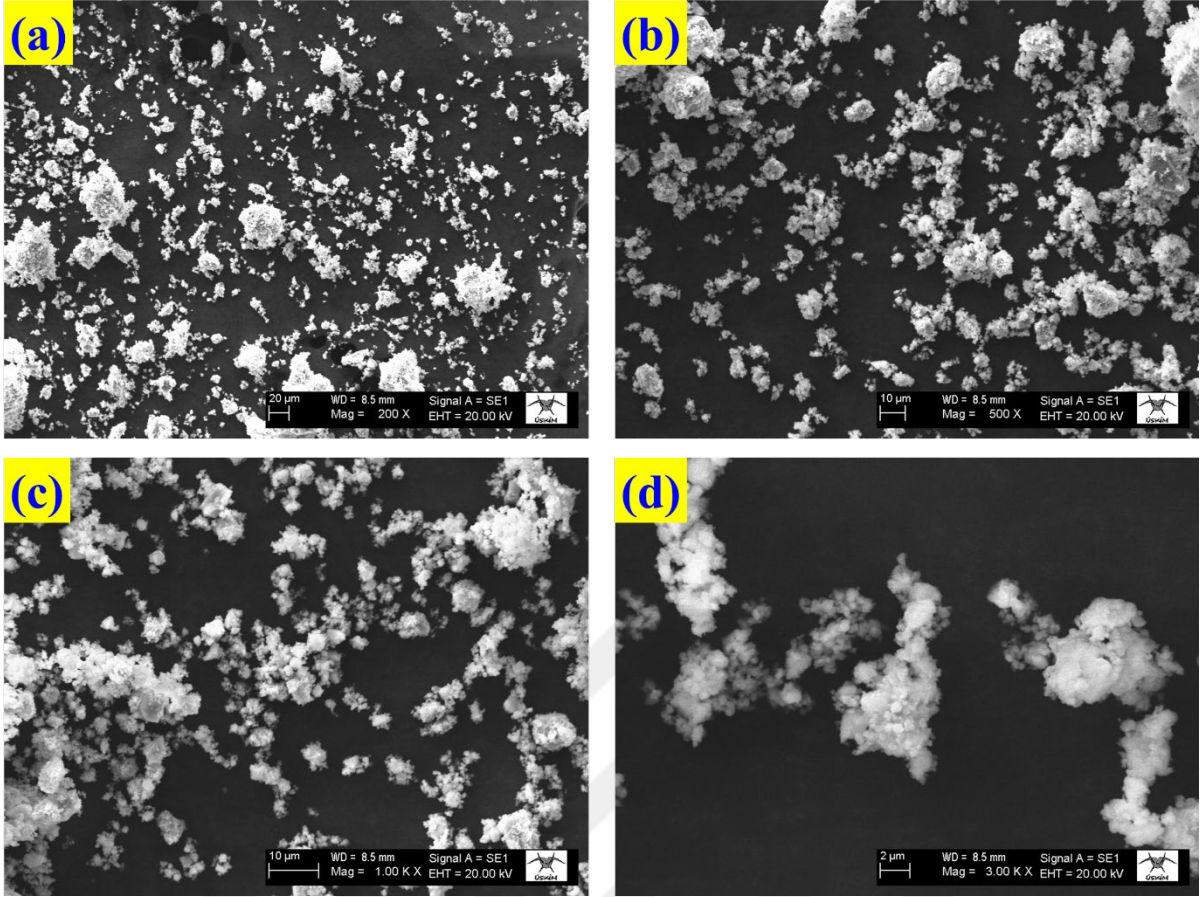
**Şekil 4.8.** MA ile 5 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri

MA tekniği ile 10 saat öğütme işlemi sonrası  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri Şekil 4.9.'da görülmektedir. Şekil 4.9a'da görüldüğü gibi toz parçacıklarında kırılma mekanizmasının devam ettiği ve parçacıkların daha küçük boyutlarda homojen yapılar haline geldiği görülmektedir. Saf toz elementlerinin soğuk kaynaşma mekanizmasının gerçekleştirme aşamasının devam ettiği Şekil 4.9b'de gözlenmiştir. Şekil 4.9c-d'de toz elementlerinin detaylı morfolojik görüntülerinde elementlerin 10 saatlik öğütme sonrasında toz parçacıklarında soğuk kaynaşmanın tam olarak sona ermediği sonucuna varılmıştır. Öğütme işleminin bu aşamasında  $Si_3Ti_5$ ,  $Al_3Ti$  ve  $Al_3Mg_2$  gibi intermetalik fazlarının oluştuğunu teyit eden parçacıklar görülmektedir ki bu sonuç XRD analizlerinde tespit edilen fazlarla uyumludur. Bu durumu SEM görüntülerinde soğuk kaynaşmanın gerçekleştiğini doğrulamaktadır.



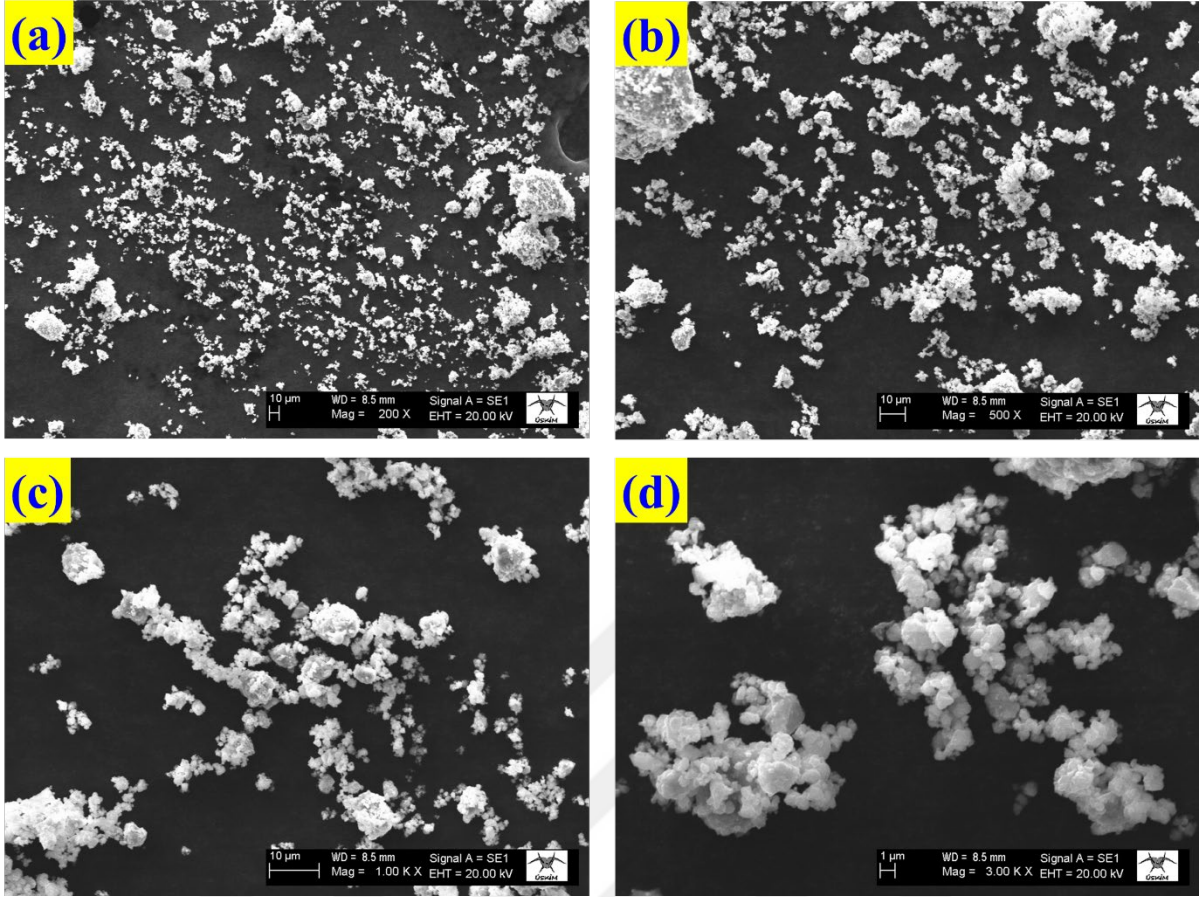
**Şekil 4.9.** MA ile 10 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri

$Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının mekanik alaşımlamaya bağlı olarak morfolojik ve mikroyapısal değişimin daha detaylı analiz edebilmek için toz alaşımları 50 saatlik süreyle öğütülmüştür. 50 saat öğütme işlemi sonrası  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri Şekil 4.10.'da görülmektedir. Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi parçacıkların soğuk kaynaşması tamamlanmış ama kırılmalar hala devam etmektedir. Soğuk kaynaklanma neticesinde belli büyüklüklerde kümeleşmenin olduğu Şekil 4.10c-d'de açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumda öğütme neticesinde kırılmanın ne zamana kadar devam edeceği ve tanecik boyutunun ne kadar azalacağını anlamak için daha uzun süreli öğütme işleminin yapılması gerekmektedir. 100 saatlik süre ile öğütülen alaşımların SEM fotoğrafları Şekil 4.11.'de sunulmuştur.



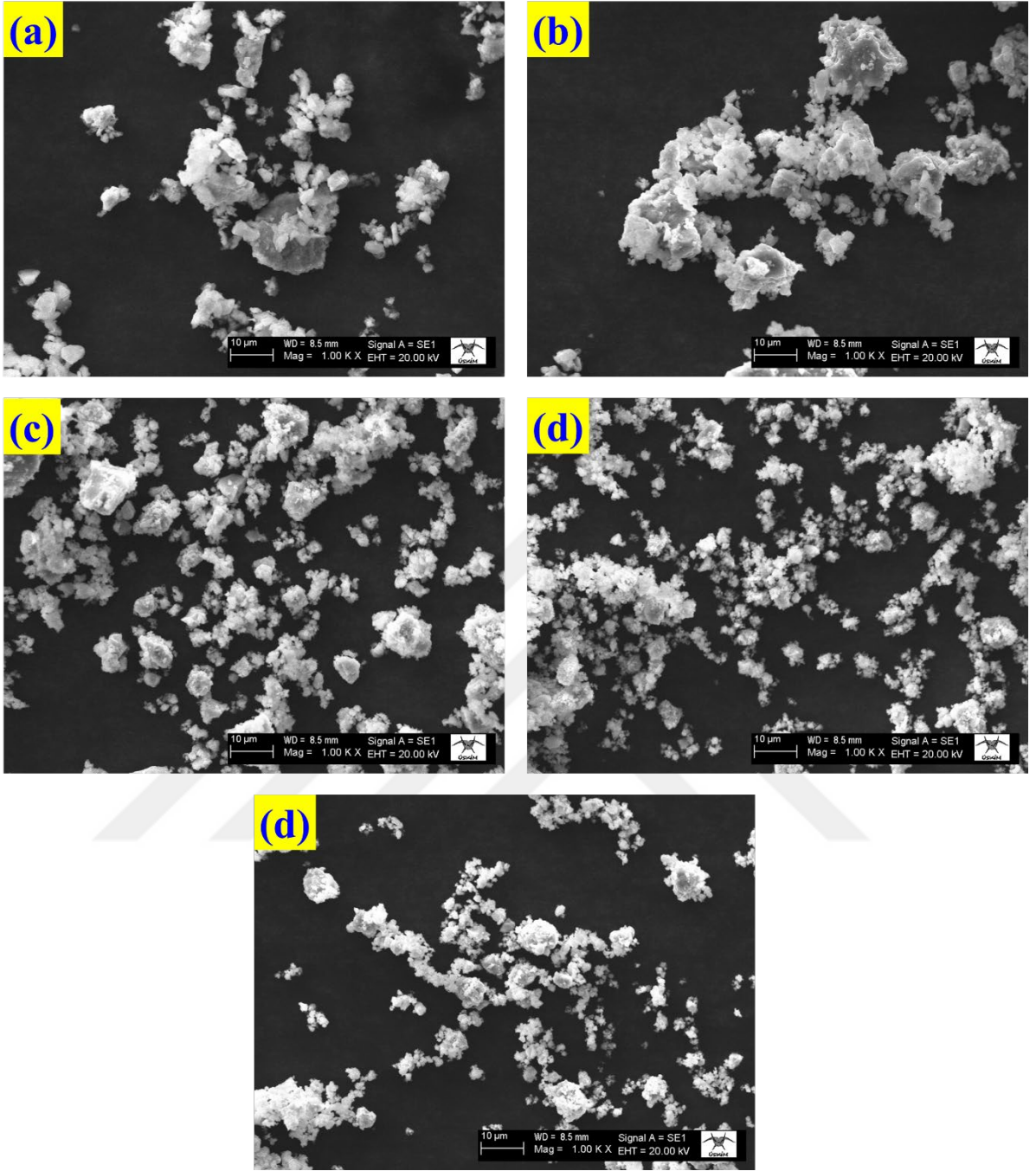
**Şekil 4.10.** MA ile 50 saat öğütülen üretilerek  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri

MA tekniği ile 100 saat öğütme işlemi sonrası  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri Şekil 4.11.'de verilmiştir. Şekil 4.11a'da başlangıç elementlerinin birbirleri ile reaksiyona girerek kompozisyon içinde tamamen katı çözelti oluşturduğu ve bu katı çözeltilerin farklı boyutlarda taneciklerden oluştuğu gözlenmiştir. 100 saat öğütme sonrasında soğuk kaynaşma (cold welding) mekanizmasının ve kırılma (fracture) aşamasını tamamladığı ve nano yapıda  $\alpha-AlMgTiSi$  katı çözelti fazının oluştuğu Şekil 4.11b'de gözlenmiştir. Alaşımı oluşturan saf elementlerin birbirleri ile reaksiyona girerek tek fazlı bir mikro yapı oluşturmaları oldukça önemlidir. Bu tür malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri çok fazlı malzemelerden daha iyidir. 100 saatlik öğütme sonrasında toz parçacıklarında 1  $\mu m$  ile 10  $\mu m$  boyutlarında homojen bir mikro yapıda olduğu tespit edilmiştir. Gözlenen bu SEM sonuçları XRD analizi ile uyum içerisindedir.



**Şekil 4.11.** MA ile 100 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri

Farklı zaman aralığında öğütülerek elde edilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımlarının morfolojik ve mikro yapısal değişimini karşılaştırmak amacı ile 1-100 saat öğütülmüş toz alaşımların SEM görüntüleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.12 de görüldüğü gibi mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak soğuk kaynaşma ve kırılma mekanizmalarının gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir.



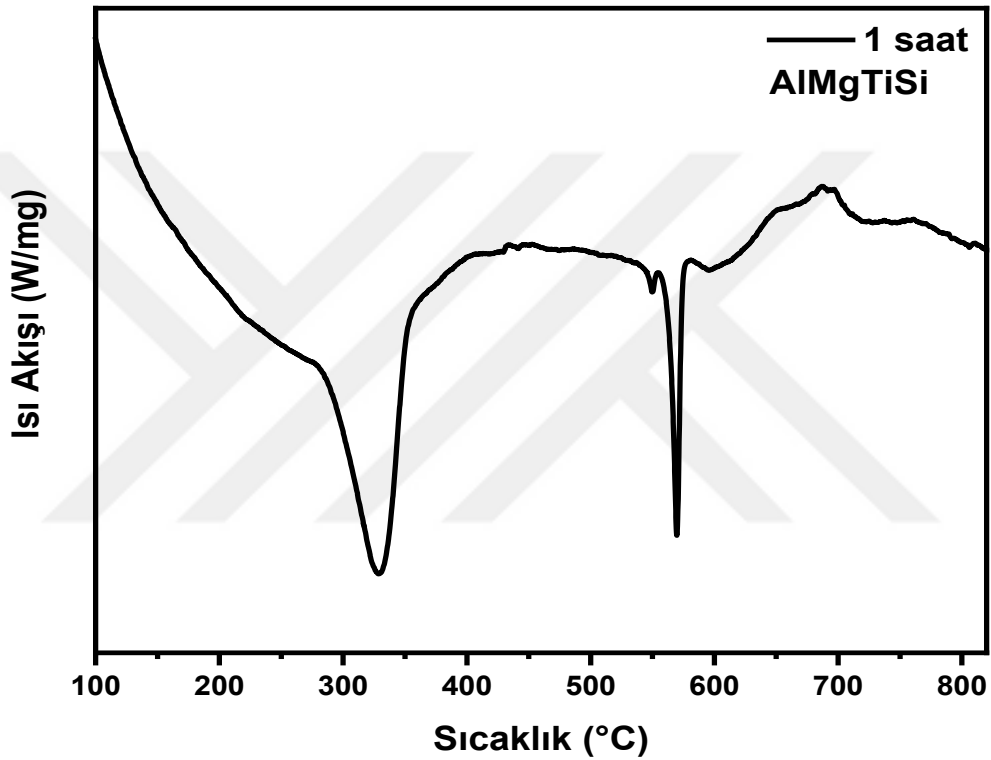
**Şekil 4.12.**  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının SEM görüntüleri:

(a) 1 saat, (b) 5 saat, (c) 10 saat, (d) 50 saat ve (e) 100 saat.

#### 4.1.3. DTA Analizi

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1 saat, 5 saat, 10 saat, 50 saat ve 100 saat süreyle üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımlarının ısı özellikleri DTA analizleri ile incelenmiştir.

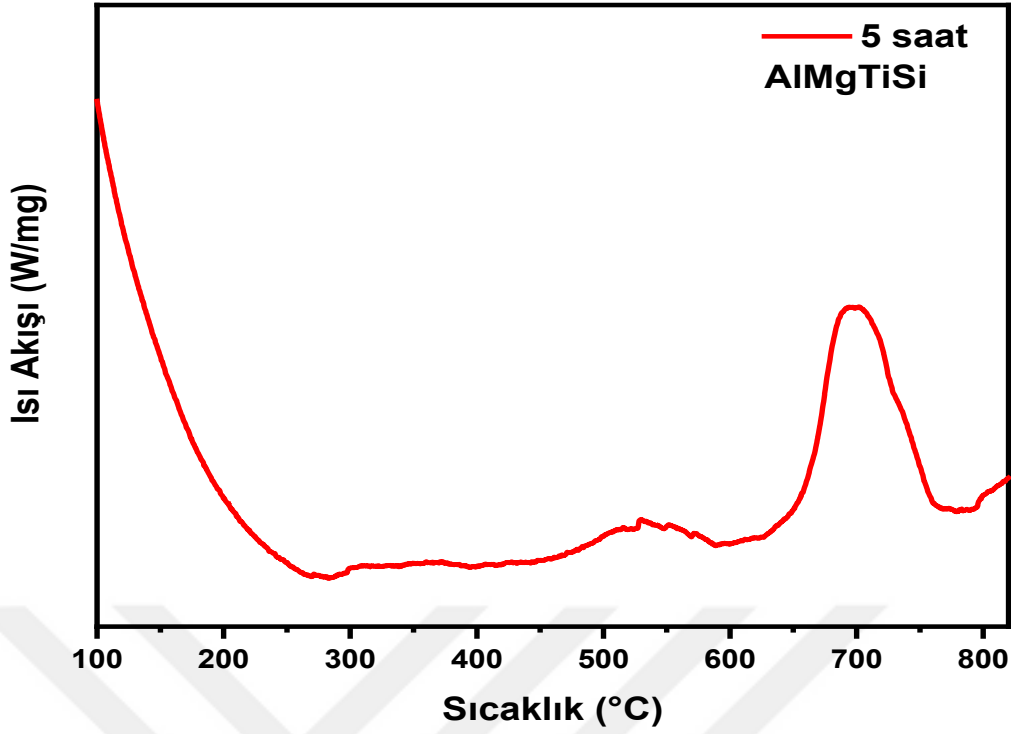
MA tekniği ile 1 saat öğütme işlemi sonrası  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği Şekil 4.13.'de verilmiştir. DTA ölçümleri,  $10\text{ }^{\circ}C/dak$  ısıtma hızında ve  $100\text{ }^{\circ}C$  ile  $800\text{ }^{\circ}C$  aralığında yapılmış. Şekil 4.13.'de DTA analizinde iki endotermik pik gözlenmiştir. Bu piklerden  $330\text{ }^{\circ}C$ 'de gözlenenin elementlerin birbirleri ile reaksiyona girmesi sonucu olduğu tahmin edilmektedir.  $580^{\circ}C$ 'de gözlenen ikinci endotermik pikin ise, Al ve Mg'nin ergime sıcaklığına karşılık geldiği düşünölmektedir. Si ve Ti elementlerini temsil eden herhangi bir pik gözlenmemiştir. Bunun nedeni DTA analizinin termal aralığının en fazla  $800\text{ }^{\circ}C$  ile sınırlı olmasıdır.



Şekil 4.13. MA ile 1 saat öğütölerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği

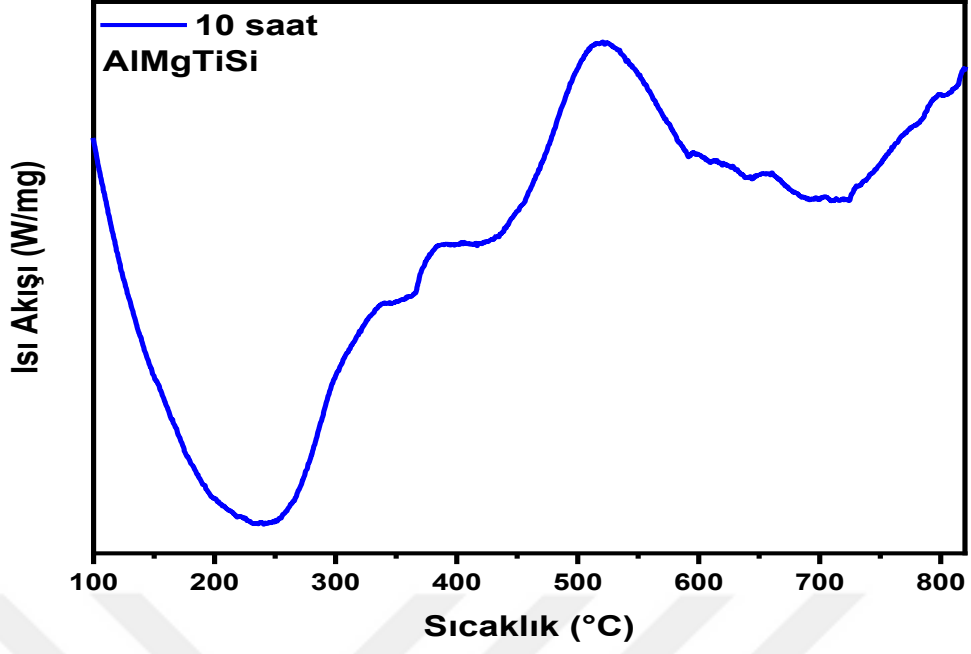
$Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımının 5 saat öğütme işlemi sonrası DTA grafiği Şekil 4.14.'de verilmiştir. Bu alaşımın DTA analizinde  $710\text{ }^{\circ}C$  civarında bir ekzotermik pik tespit edilmiştir

Bu ekzotermik pikin XRD analizinde tespit edilen  $Mg_2Si$  ve  $AlTi_3$  fazlarının dönüşümüne karşılık geldiği düşünölmektedir. Bu durum, 5 saat öğütme sonrası Mg, Si ve Al, Ti elementlerinin oluşturduğu intermetalik fazların  $710\text{ }^{\circ}C$  civarında çözüldüğu anlamını taşımaktadır.

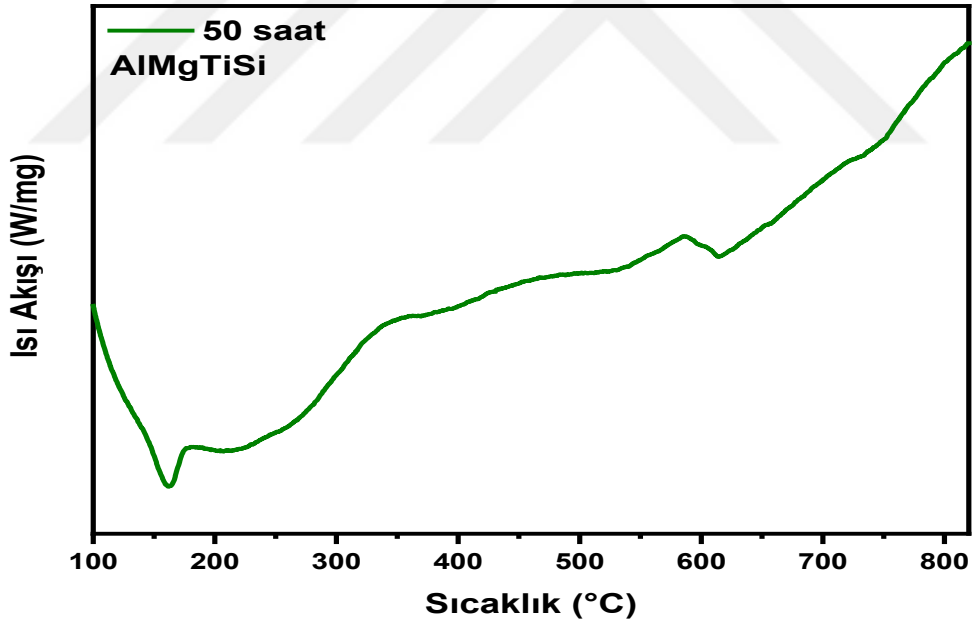


**Şekil 4.14.** MA ile 5 saat sürede öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği

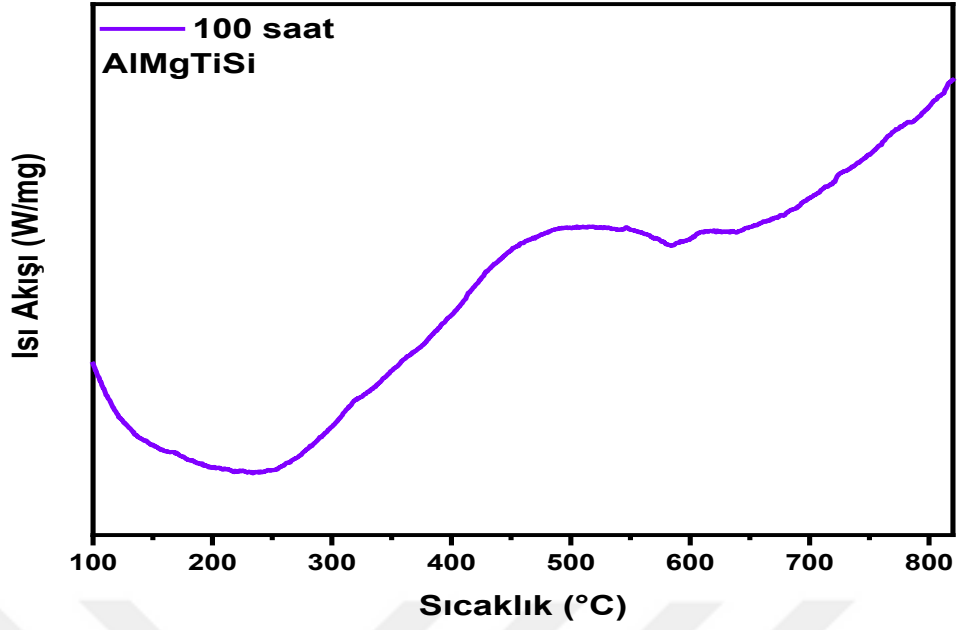
MA tekniği ile 10, 50 saat ve 100 saat süreyle öğütülen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımlarının DTA grafikleri sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 de görülmektedir. Bu grafiklerde farklı sıcaklıklarda endotermik ve ekzotermik pikler gözlenmiştir. Bu pikler alaşımlama işlemi sırasında oluşan intermetallik piklerin erimesi veya sıcaklık nedeni ile oluşan farklı tip reaksiyonlar sonucu oluşmuştur. Ancak erime sıcaklıkları 800 °C'den daha yüksek olan fazları temsil eden herhangi bir reaksiyon gözlenmemiştir. Şekil 4.17 de görüldüğü gibi 100 saatlik süreyle öğütülerek elde edilen alaşımların DTA grafiklerinde herhangi bir reaksiyonu temsil eden pik gözlenmemiştir. Bunun nedeni 100 saat öğütme sonrası  $\alpha$ -AlMgTiSi katı çözelti fazının oluşumu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu fazın erime sıcaklığı 800 °C'den daha yüksektir. Bu sonuç  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının 100 saat öğütülmesi sonrası 800 °C'ye kadar ısıl olarak kararlılığını koruyan bir alaşım oluştuğunu göstermektedir. Bu sonuçlar XRD ve SEM analizleri ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.15. MA ile 10 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği

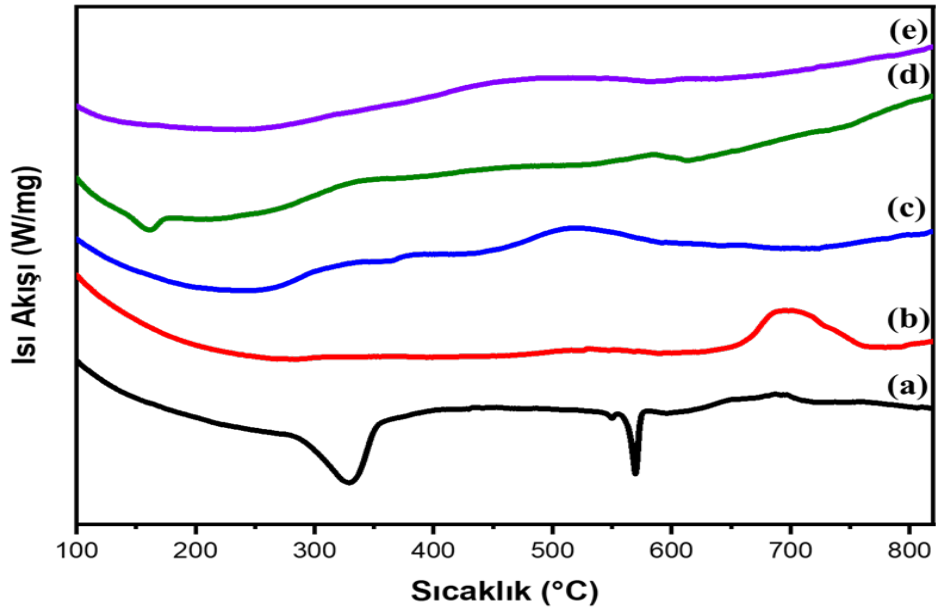


Şekil 4.16. MA ile 50 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği



Şekil 4.17. MA ile 100 saat öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saat aralığında öğütülerek üretilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  toz alaşımının DTA sonuçları toplu olarak Şekil 4.18.'de verilmiştir. Bu grafikte toz alaşımın öğütme süresinin artması ile ısıl olarak kararlı hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.18.  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  alaşımının DTA grafiği:

(a) 1 saat, (b) 5 saat, (c) 10 saat, (d) 50 saat ve (e) 100 saat.

## 4.2. Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> Alaşımlarının Analiz Sonuçları

Tez çalışmasının bu ikinci kısmında, Bor (B) elementinin etkisini araştırmak amacıyla, Al<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub>Ti<sub>25</sub>Si<sub>25</sub> alaşımına B eklenerek Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> toz alaşımı aynı metotla üretilmiş ve aynı özellikleri aynı cihazlar kullanılarak incelenmiştir.

### 4.2.1. XRD Analizi

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saatlik ğütölme süreleriyle üretilen Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> toz alaşımlarının XRD grafikleri sırasıyla, Şekil 4.19- Şekil 4.24'da verilmiştir. Bu alaşımların XRD pikleri incelendiğinde alaşımla işleminin ilk safhasında Al, Mg, Ti, Si ve B elementlerden yansıyan pikler belirgin bir Şekilde görülmektedir. Alaşımlama süresinin artması ile elementler birbirleri ile reaksiyona girerek intermetalik faz oluşturduğu görülmektedir. Al<sub>4</sub>Si, AlTi<sub>3</sub> ve Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>Al fazları 5 ve 10 saatlik öğütme işleminde sonra gözlenirken, Si<sub>3</sub>Ti<sub>5</sub>, AlB<sub>2</sub> ve MgB<sub>2</sub> fazları 50 ve 100 saatlik öğütmeden sonra gözlenmiştir.

Mg, Ti, Si ve B elementlerinin ve intermetalik fazların ICDD kartlarından XRD deseni incelendiğinde aşağıda belirtilen kartlar ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

*Alüminyum*, ICDD kart numarası: **89-2837** [79], 2 $\theta$ = 38,42°, 44,63°, 65,01°, 78,18° ve 82,34°.

*Magnezyum*, ICDD kart numarası: **89-4244** [80], 2 $\theta$ = 32,15°, 36,57°, 62,99°, 69,08°, 70,55° ve 78,18°.

*Titanyum*, ICDD kart numarası: **89-2762** [81], 2 $\theta$ =35,07°, 38,42°, 40,10°, 52,95°, 62,99°, 70,55°, 76,35°, 82,64° ve 86,67°.

*Silisyum*, ICDD kart numarası: **27-1402** [82], 2 $\theta$ =28,44°, 47,27°, 56,07°, 69,08°, 76,35° ve 87,65°.

*Bor*, ICDD kart numarası: **23-0073** 2 $\theta$ =28,44°, 47,27°.

*Al<sub>4</sub>Si*, ICDD kart numarası: **24-0035**, 2 $\theta$ = 62,41°, 79,01° ve 89,76°.

*AlTi<sub>3</sub>*, ICDD kart numarası: **52-0859**, 2 $\theta$ = 30,07°, 35,42°, 53,52°, 62,41°, 79,01°.

*Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>*, ICDD kart numarası: **40-0903**, 2 $\theta$ =30,07°, 35,42°, 43,07°, 53,52°, 57,04°, 62,41°, 73,99°, 79,01°.

*AlB<sub>2</sub>*, ICDD kart numarası: **08-2203**, 2 $\theta$ = 27,79°, 34,59°, 44,90°, 57,21°, 61,50°, 68,78°, 72,37°, 73,37°, 79,42°, 88,78°.

$Si_3Ti_5$ , ICDD kart numarası: **07-2157**,  $2\theta = 27,79^\circ, 30,09^\circ, 34,59^\circ, 36,76^\circ, 40,69^\circ, 44,90^\circ, 57,21^\circ, 61,50^\circ, 64,76^\circ, 65,95^\circ, 68,78^\circ, 72,37^\circ, 73,37^\circ, 75,77^\circ, 79,42^\circ, 83,57^\circ, 88,57^\circ$ .

$MgB_2$ , ICDD kart numarası: **06-4237**,  $2\theta = 34,31^\circ, 65,77^\circ, 83,31^\circ$ .

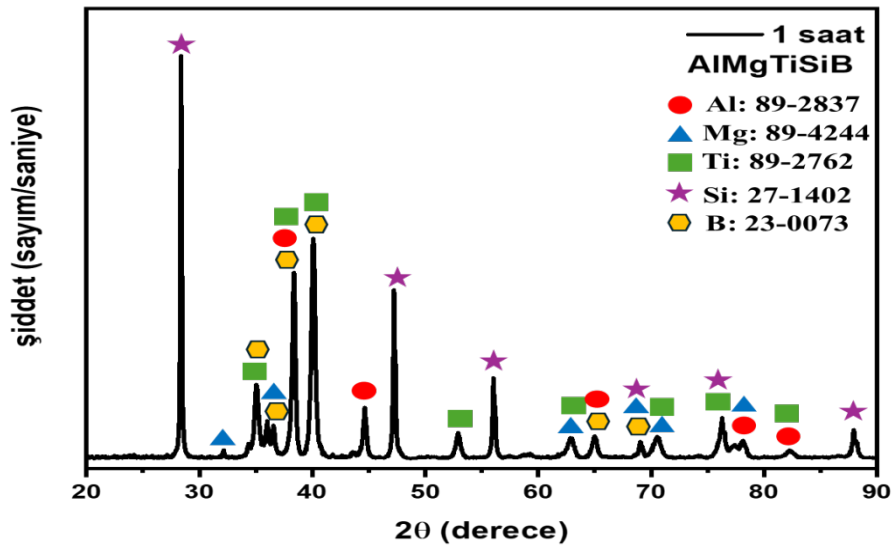
$Ti_5Si_4$ , ICDD kart numarası: **23-1079**,  $2\theta = 31,48^\circ, 34,31^\circ, 36,64^\circ, 44,90^\circ, 61,49^\circ$ .

Bu kartlar literatür ile karşılaştırılmıştır ve uyumlu olduğu görülmüştür [79–82].

$Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımını oluşturan elementlerin ve intermetalik fazların kristalografik parametreleri; Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’ da verilmiştir.

**Çizelge 4.5.**  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının kristalografik parametreleri

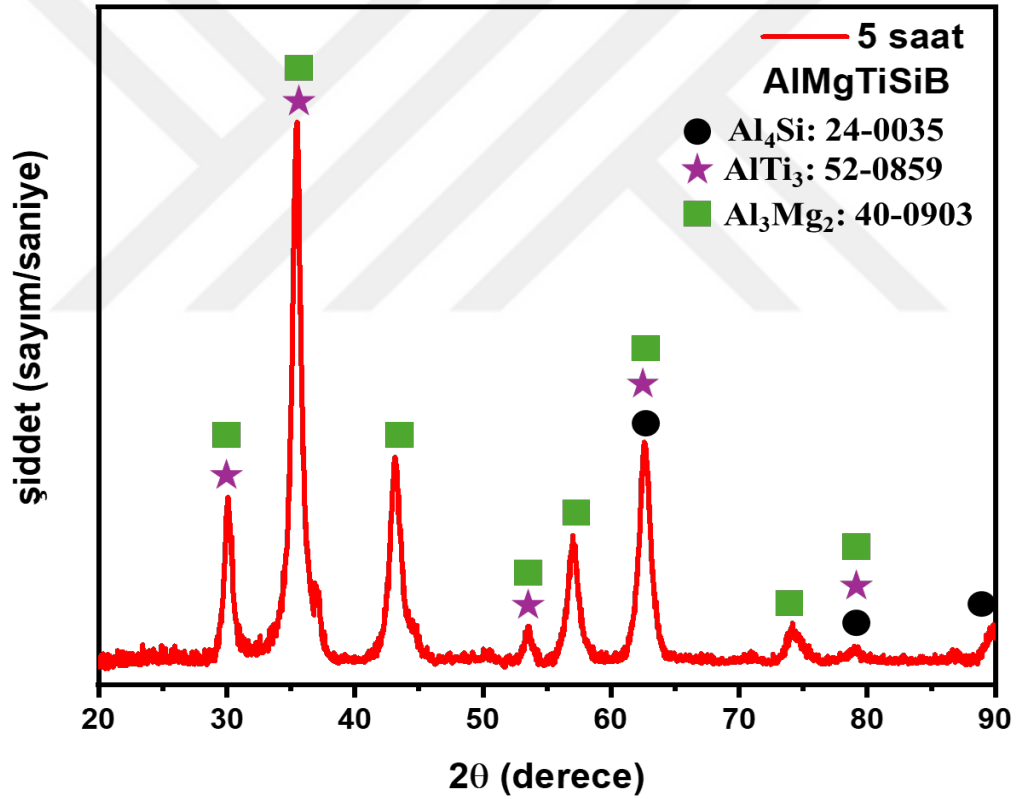
Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
Alüminyum 01-089-2837	Kübik	Fm-3m	225	4,0592	4,0592	4,0592	90	90	90
Magnezyum 01-089-4244	Hekzagonal	P63/mmc	194	3,2094	3,2094	5,2108	90	90	120
Titanyum 01-089-2762	Hekzagonal	P63/mmc	194	2,9511	2,9511	4,6843	90	90	120
Silisyum 00-027-1402	Kübik	Fm-3m	227	5,4309	5,4309	5,4309	90	90	90



**Şekil 4.19.** MA ile 1 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının XRD deseni

**Çizelge 4.6.** Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> alaşımlarının MA ile 5 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri

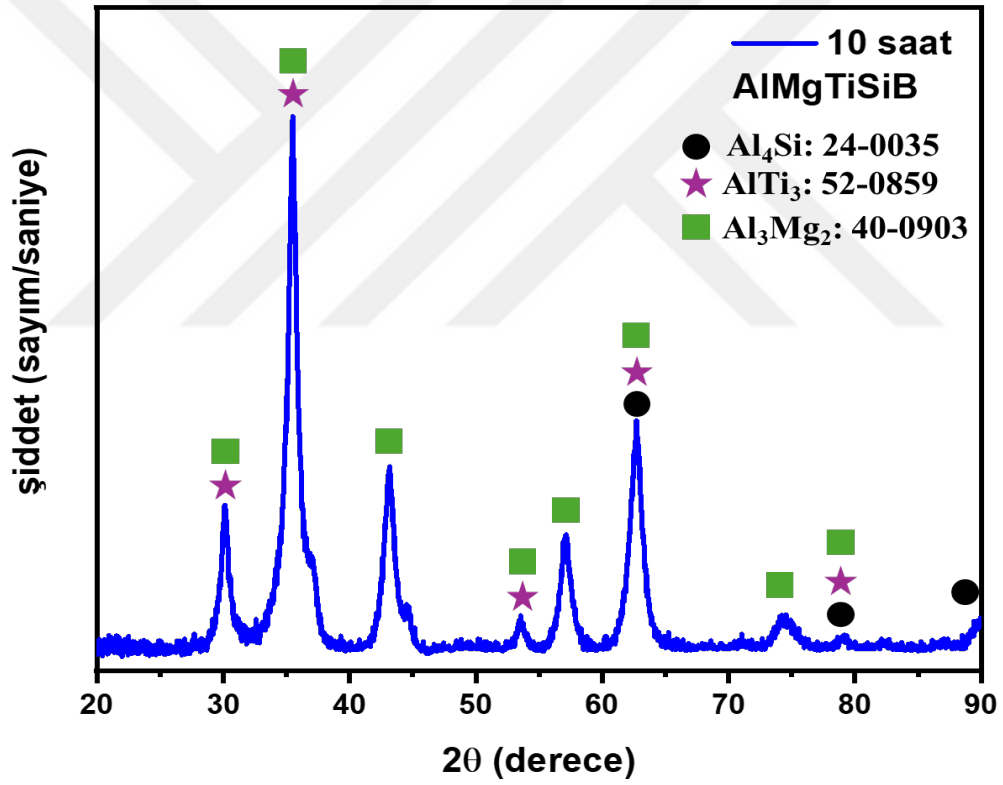
Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
Al <sub>4</sub> Si 00-024-0035	Kübik	-	-	6,9890	6,9890	6,9890	90	90	90
AlTi <sub>3</sub> 00-052-0859	Hekzagonal	P63/mmc	194	5,7930	5,7930	4,6490	90	90	120
Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> 00-040-0903	Hekzagonal	-	-	5,7300	5,7300	9,5400	90	90	120



**Şekil 4.20.** MA ile 5 saat öğütülerek üretilen Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> alaşımlarının XRD deseni

**Çizelge 4.7.** Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> alaşımının MA ile 10 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri

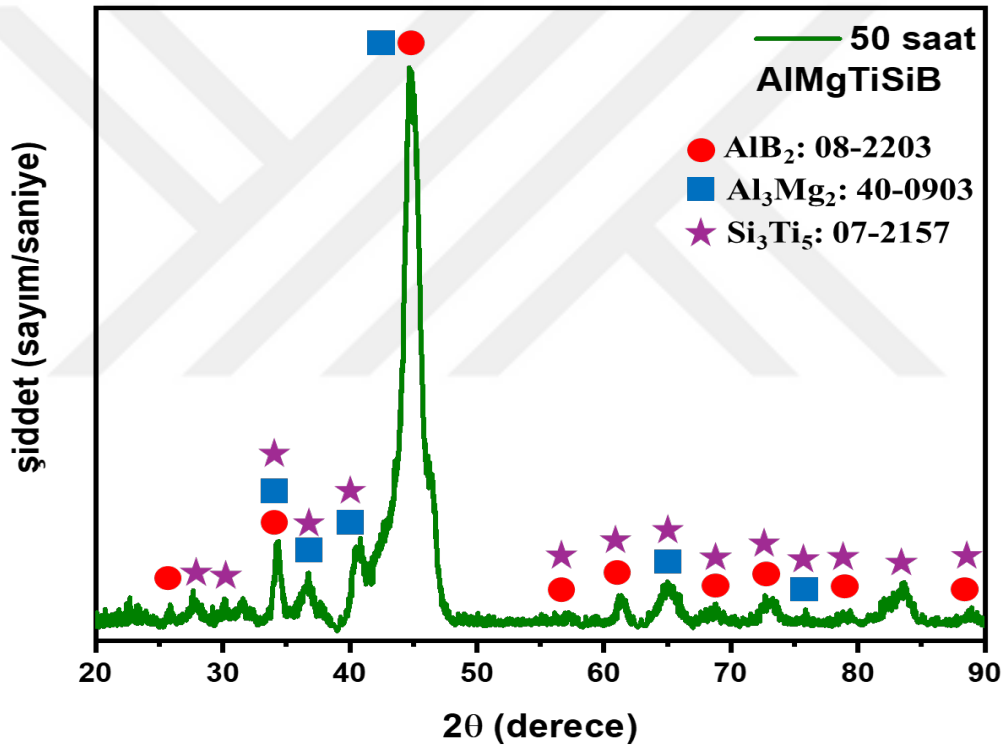
Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
Al <sub>4</sub> Si 00-024-0035	Kübik	-	-	6,9890	6,9890	6,9890	90	90	90
AlTi <sub>3</sub> 00-052-0859	Hekzagonal	P63/mmc	194	5,7930	5,7930	4,6490	90	90	120
Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> 00-040-0903	Hekzagonal	-	-	5,7300	5,7300	9,5400	90	90	120



**Şekil 4.21.** MA ile 10 saat öğütülerek üretilen Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> alaşımının XRD deseni

**Çizelge 4.8.**  $\text{Al}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Si}_{20}\text{B}_{20}$  alaşımının MA ile 50 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri

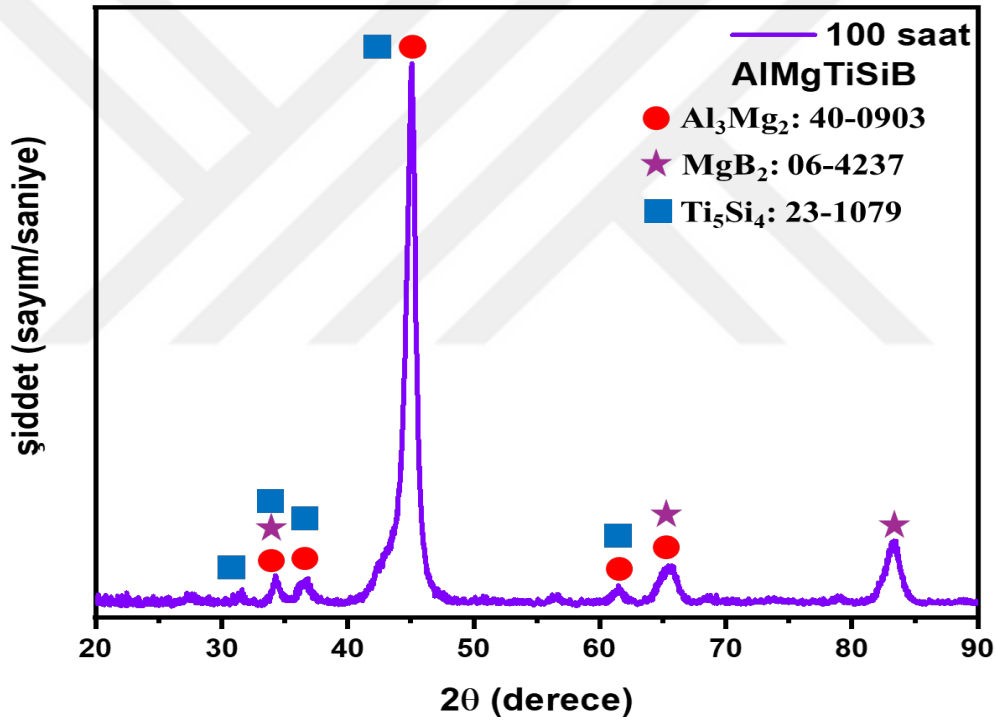
Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
$\text{AlB}_2$ 98-008-2203	Hekzagonal	P6/mmm	191	3,0060	3,0060	3,2470	90	90	120
$\text{Al}_3\text{Mg}_2$ 00-040-0903	Hekzagonal	-	-	5,7300	5,7300	9,5400	90	90	120
$\text{Si}_3\text{Ti}_5$ 98-007-2157	Hekzagonal	P63/mcm	193	7,4610	7,4610	5,1510	90	90	120



**Şekil 4.22.** MA ile 50 saat öğütülerek üretilen  $\text{Al}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Si}_{20}\text{B}_{20}$  alaşımının XRD deseni

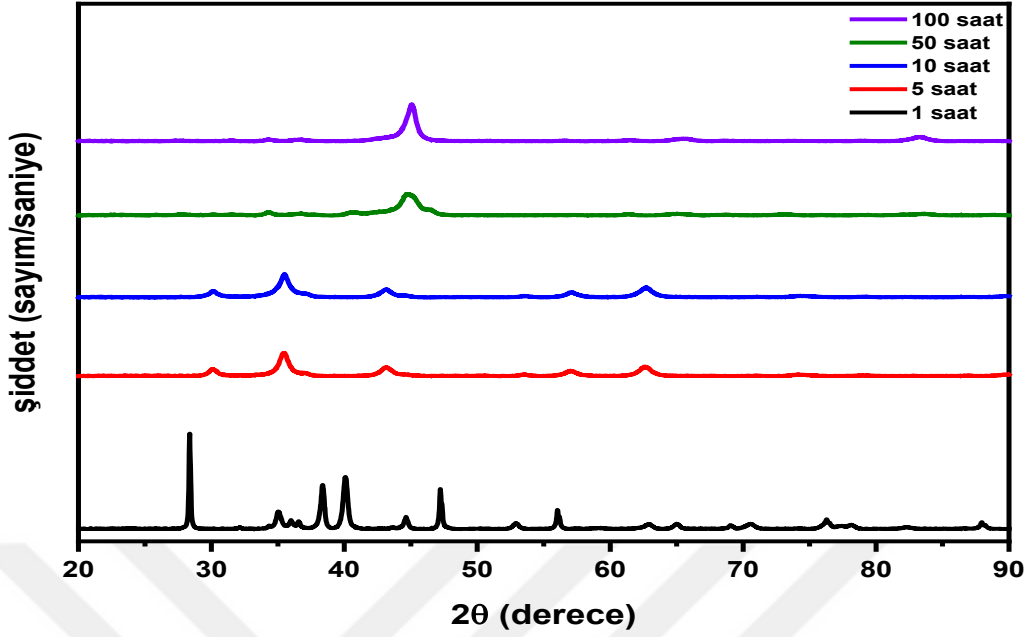
**Çizelge 4.9.** Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> alaışımının MA ile 100 saat öğütme sonrası kristalografik parametreleri

Fazlar	Kristalografik parametreler								
	Kristal Sistem	Uzay Grup	Uzay Grup Numarası	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Alpha (°)	Beta (°)	Gamma (°)
Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> 00-040-0903	Hekzagonal	-	-	5,7300	5,7300	9,5400	90	90	120
MgB <sub>2</sub> 98-006-4237	Hekzagonal	P6/mmm	191	3,0810	3,0810	3,5180	90	90	120
Ti <sub>5</sub> Si <sub>4</sub> 00-023-1079	Ortorombik	Pbnm	62	6,6450	6,6450	12,6900	90	90	90



**Şekil 4.23.** MA ile 100 saat öğütülerek üretilen Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> alaışımının XRD deseni

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saatlik sürelerle öğütülerek üretilen Al<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Si<sub>20</sub>B<sub>20</sub> toz alaşımlarının XRD desenleri toplu olarak Şekil 4.24’de verilmiştir. Şekil 4.24’de, öğütme süresine bağlı olarak faz dönüşümlerinin olduğu görülmektedir. Öğütme işleminin başlangıç safhasında elementlerden yansıyan pikler belirgin bir şekilde gözlenirken, öğütme işleminin son safhasında sadece inermetalik fazdan yansıyan pik gözlenmektedir.

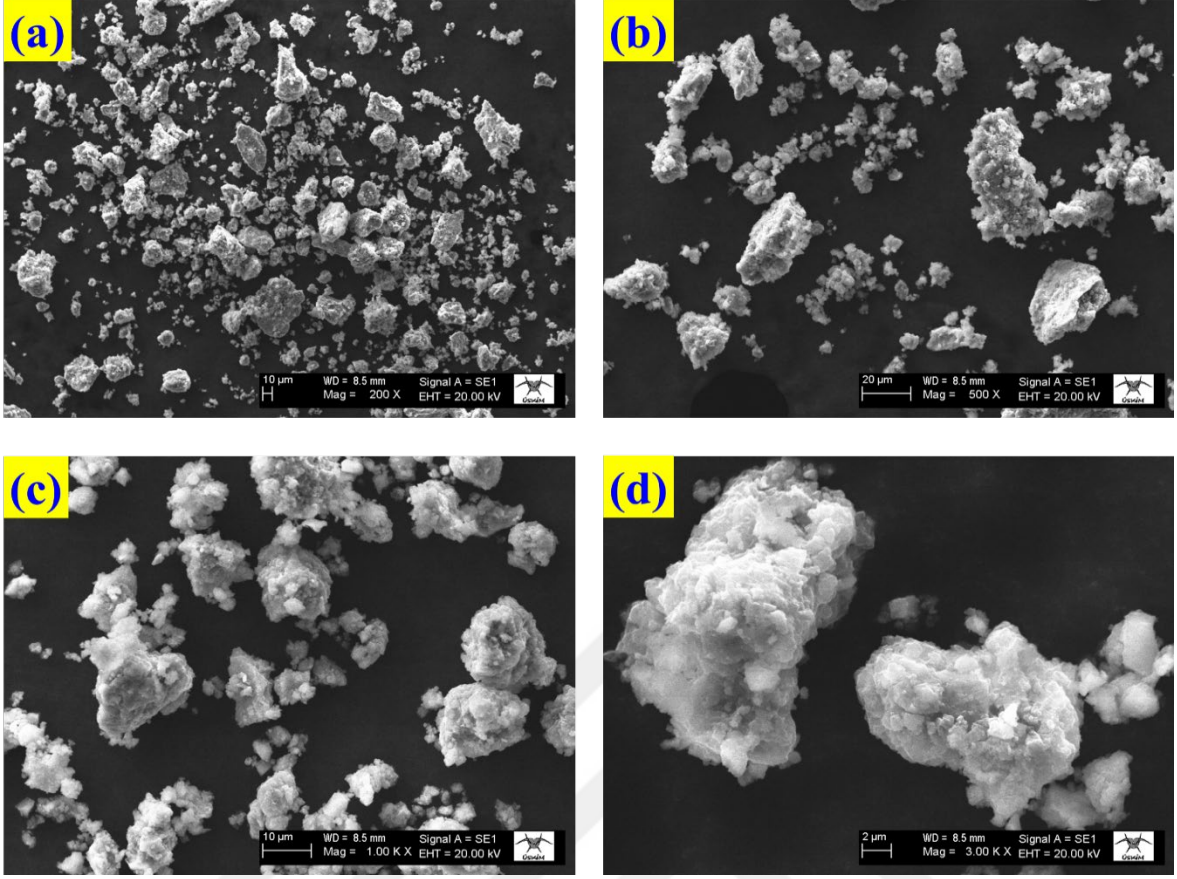


Şekil 4.24. MA ile 1-100 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının XRD deseni

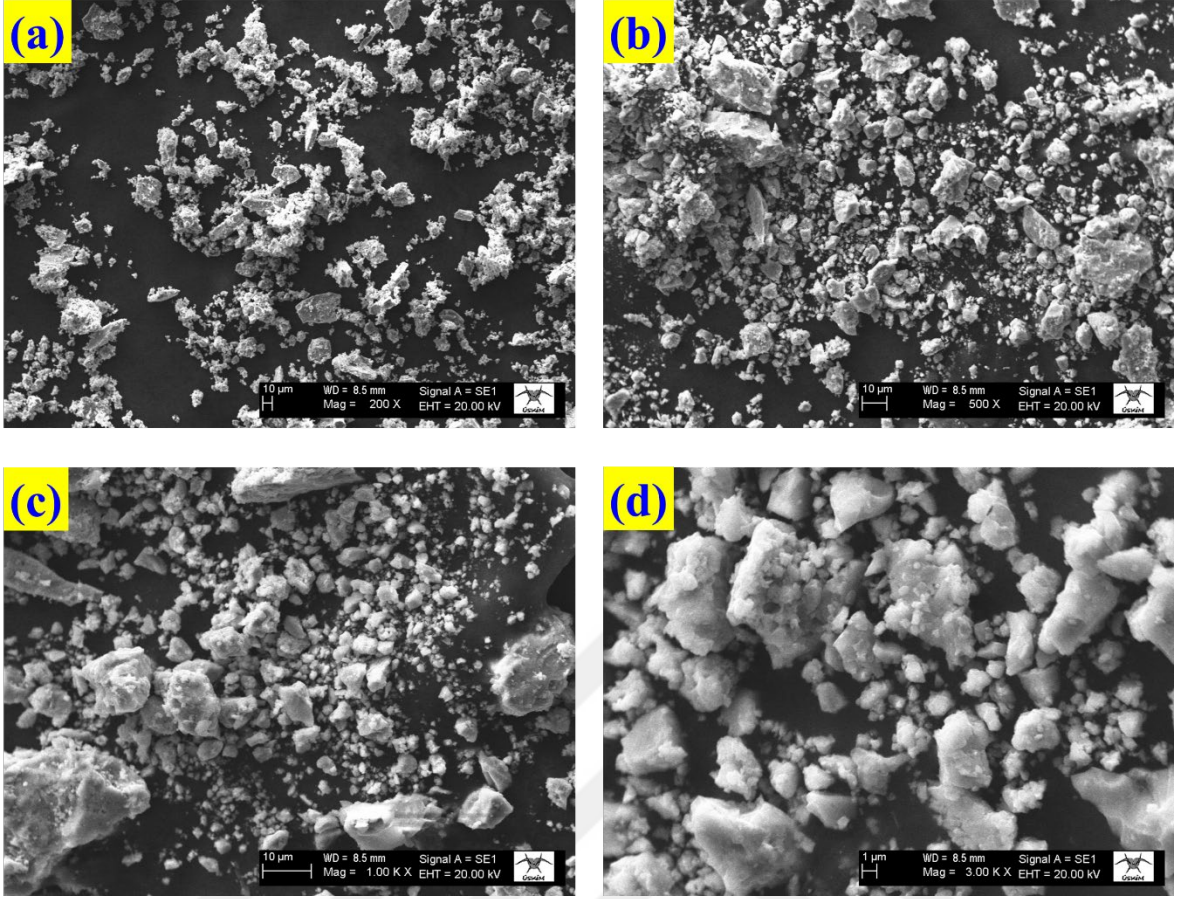
#### 4.2.2. SEM Analizi

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saatlik sürelerle öğütülerek elde edilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  toz alaşımının SEM fotoğrafları Şekil 4.25-Şekil 4.29'da sunulmuştur.

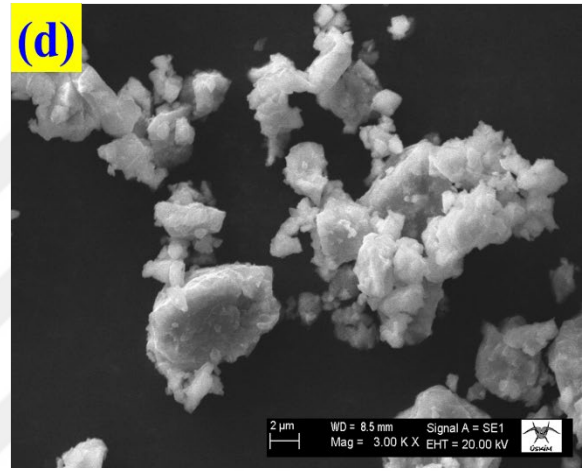
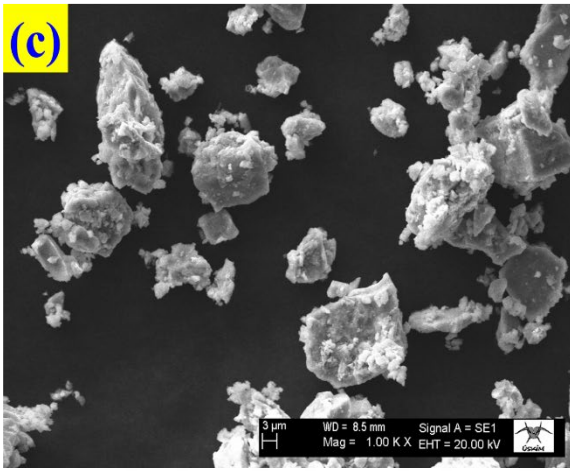
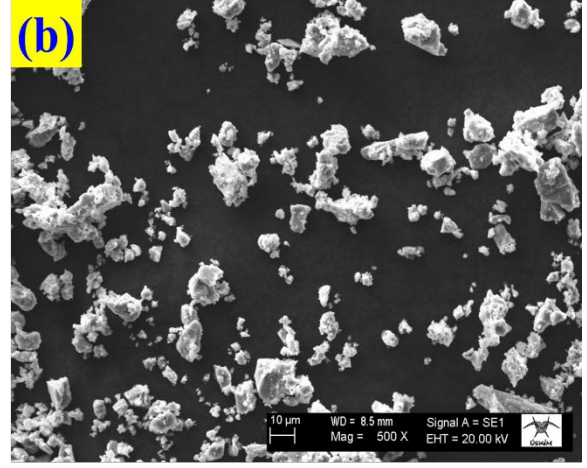
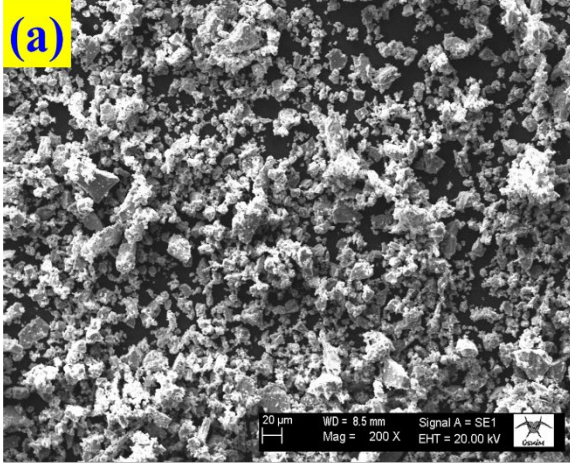
Şekil 4.25'de farklı büyüklükteki başlangıç Al, Mg, Ti, Si ve B saf elementlerinin homojen dağılımı görülmektedir. Alaşımlama süresi kısa olduğu için parçacıkların herhangi bir deformasyona maruz kalmadıkları görülmektedir. Öğütme süresinin artması ile soğuk kaynaklanma ve kırılma neticesinde morfolojik yapının değiştiği, mikro yapının homojen hale geldiği görülmektedir. Alaşımlama işleminin ilk safhasında soğuk kaynaşma etkin olurken, son safhada kırılma daha etkin hale gelmiş ve parçacıkların boyutunda belirgin bir azalma gözlenmiştir. 100 saatlik öğütme sonrasında toz parçacıklarında  $2 \mu m$  ile  $10 \mu m$  boyutlarında homojen olarak dağılımı sahip olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar mekanik alaşımlama ile elde edilen alaşımların mikro yapısı ile uyumludur.



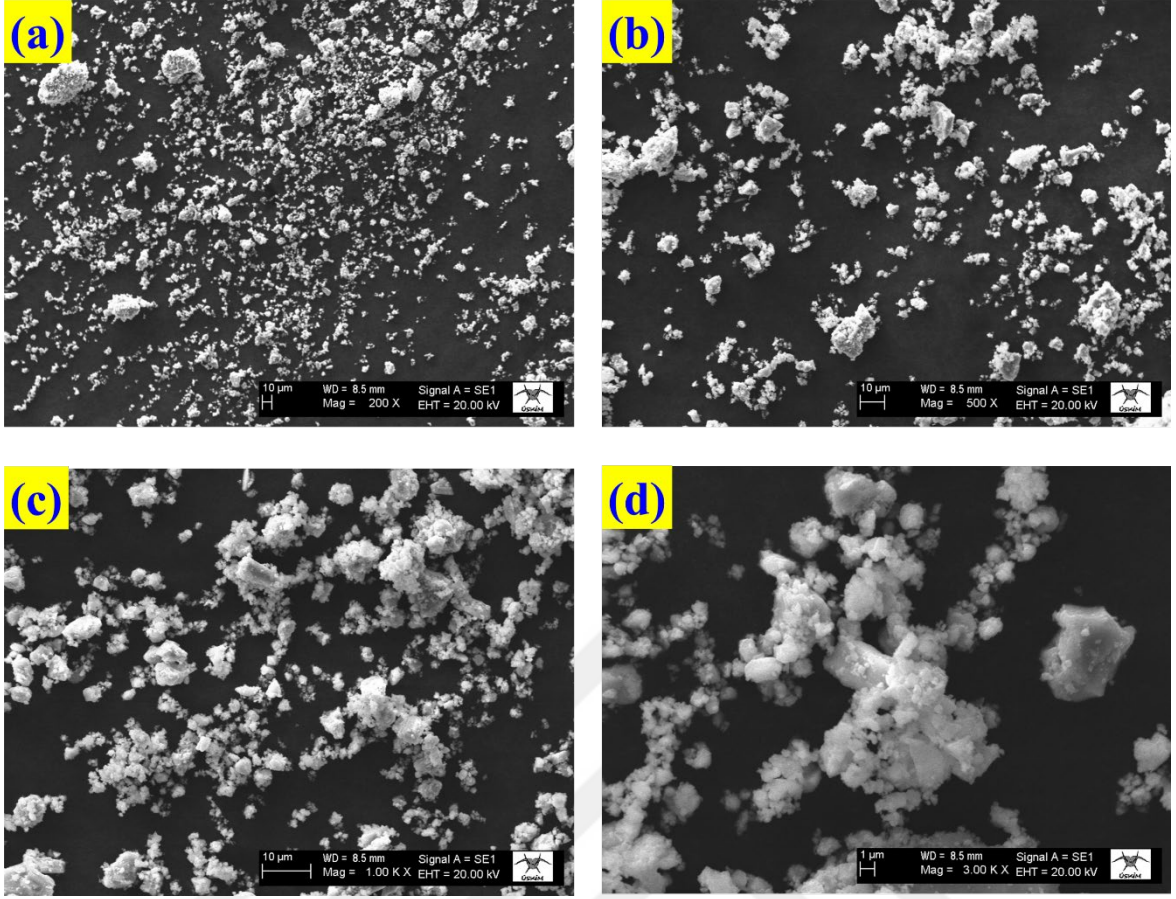
Şekil 4.25. MA ile 1 saat öğütülerek üretilen  $\text{Al}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Si}_{20}\text{B}_{20}$  alaşımının SEM görüntüleri



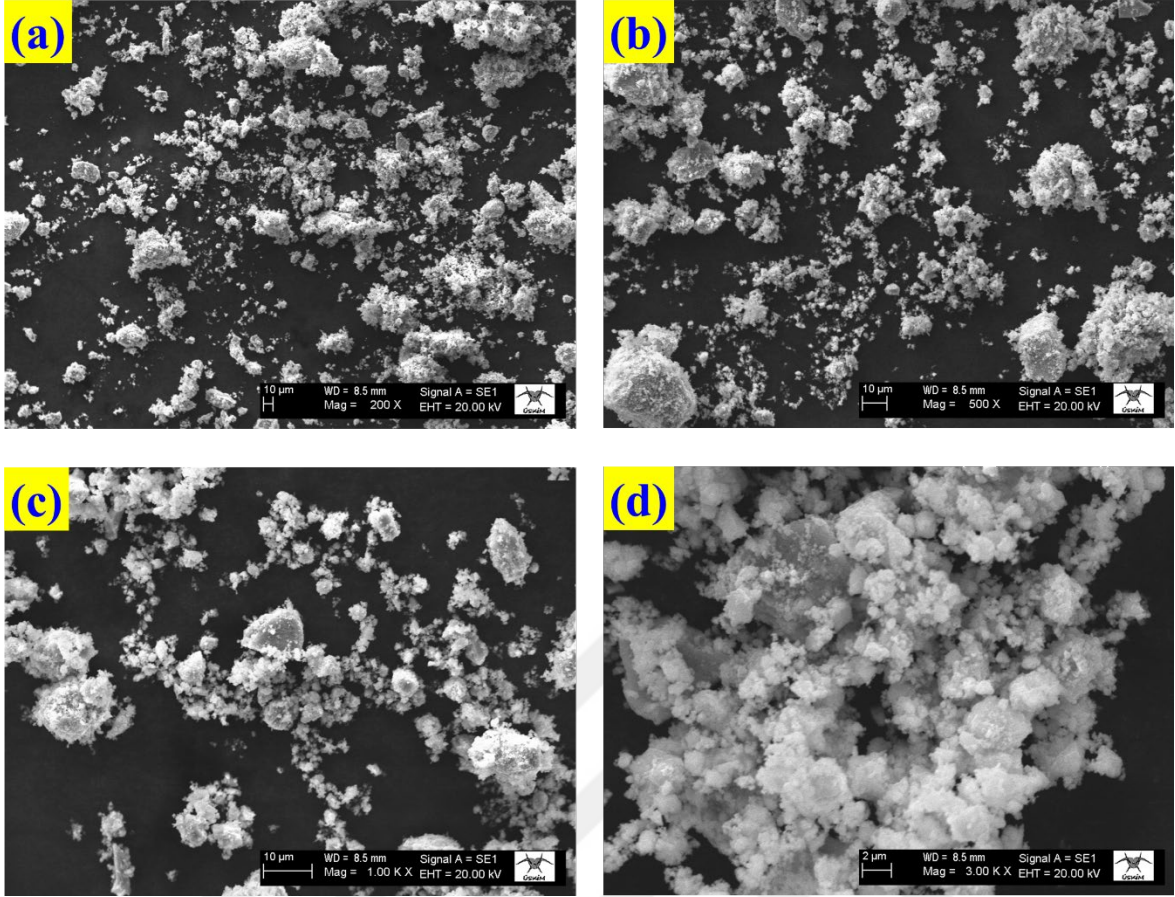
Şekil 4.26. MA ile 5 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının SEM görüntüleri



Şekil 4.27. MA ile 10 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının SEM görüntüleri

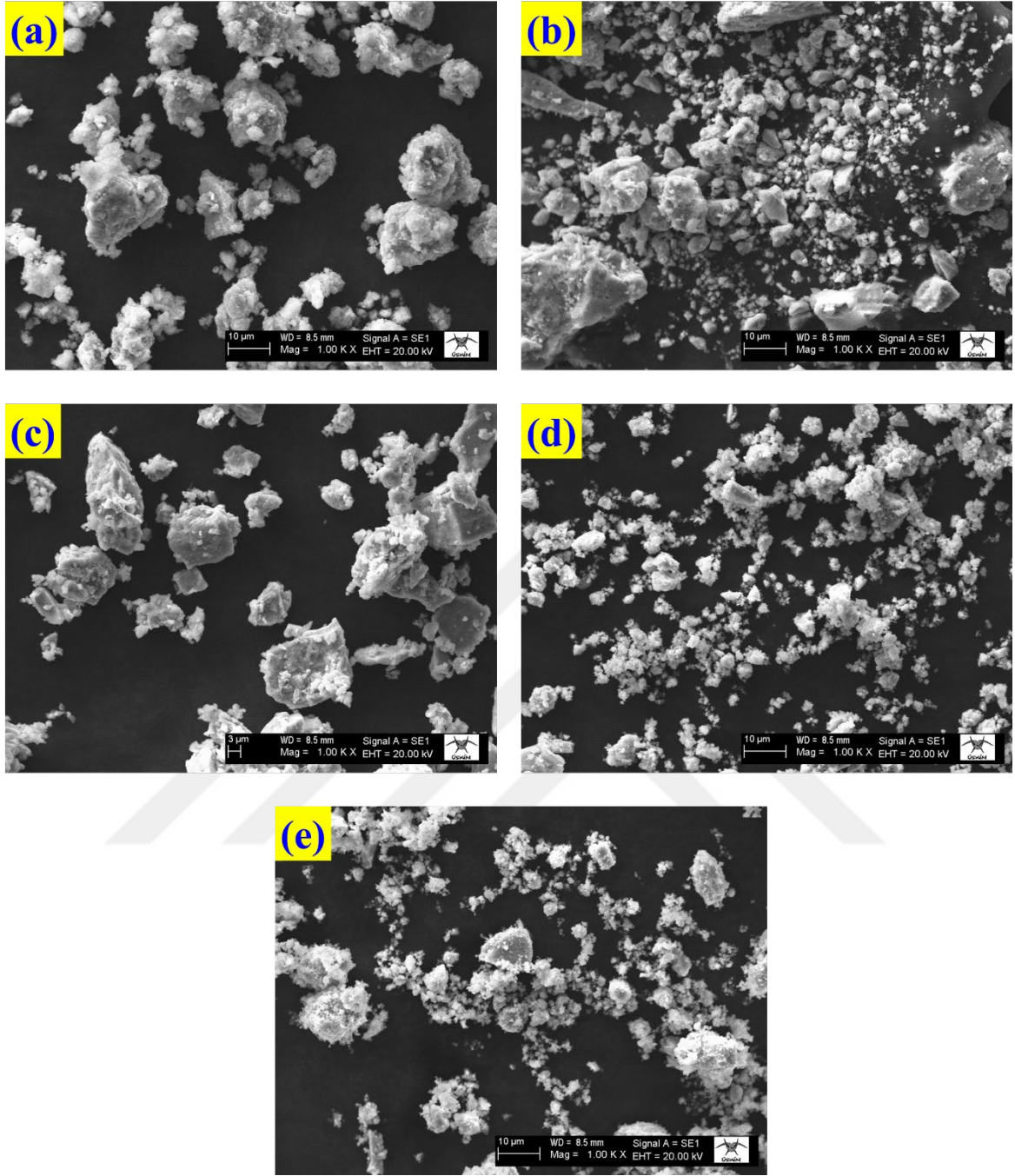


Şekil 4.28. MA ile 50 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının SEM görüntüleri



**Şekil 4.29.** MA ile 100 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının SEM görüntüleri

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saatlik sürelerle üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  toz alaşımlarının SEM görüntüleri toplu olarak Şekil 4.30'de verilmiştir. SEM analiz sonuçları MA tekniği ile üretilen alaşımların soğuk kaynaşma ve kırılma mekanizmalarının gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar Literatürde MA ile üretilen toz alaşımların sonuçları ile uyum içerisindedir.



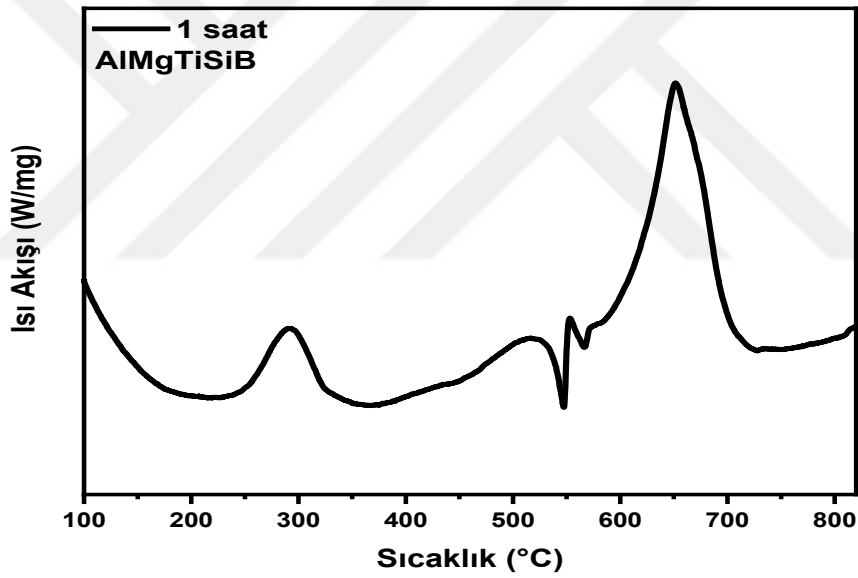
**Şekil 4.30.**  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının SEM görüntüleri: (a) 1 saat, (b) 5 saat, (c) 10 saat, (d) 50 saat ve (e) 100 saat

#### 4.2.3. DTA Analizi

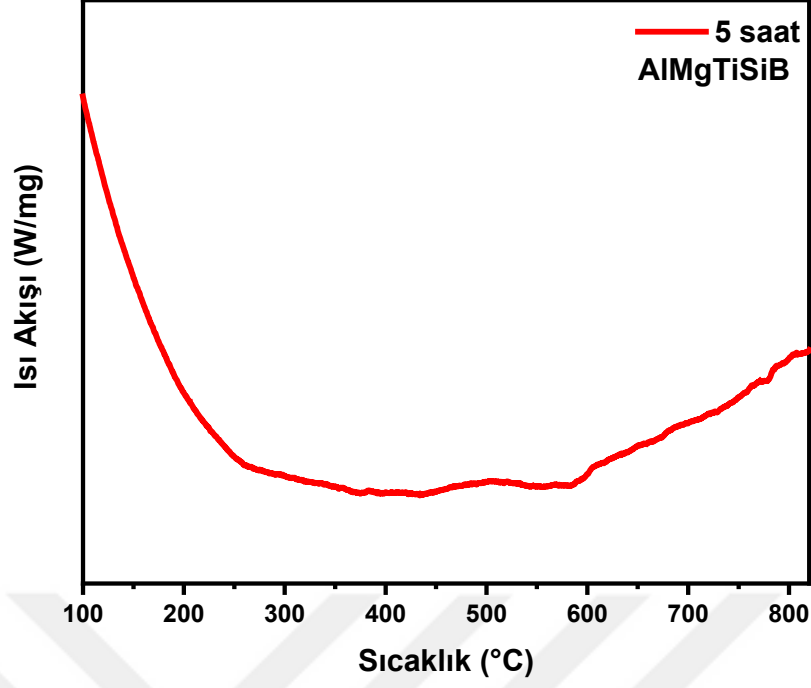
Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1 saat, 5 saat, 10 saat, 50 saat ve 100 saat sürelerde öğütülerek elde edilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  toz alaşımının ısıl özellikleri DTA analizleri ile incelenmiştir. DTA analizleri  $10\text{ }^{\circ}C/dak$  ısıtma hızında ve  $100\text{ }^{\circ}C$  ile  $800\text{ }^{\circ}C$  aralığında yapılmış.

DTA sonuçları Şekil 4.31- Şekil 4.35 'de verilmiştir.

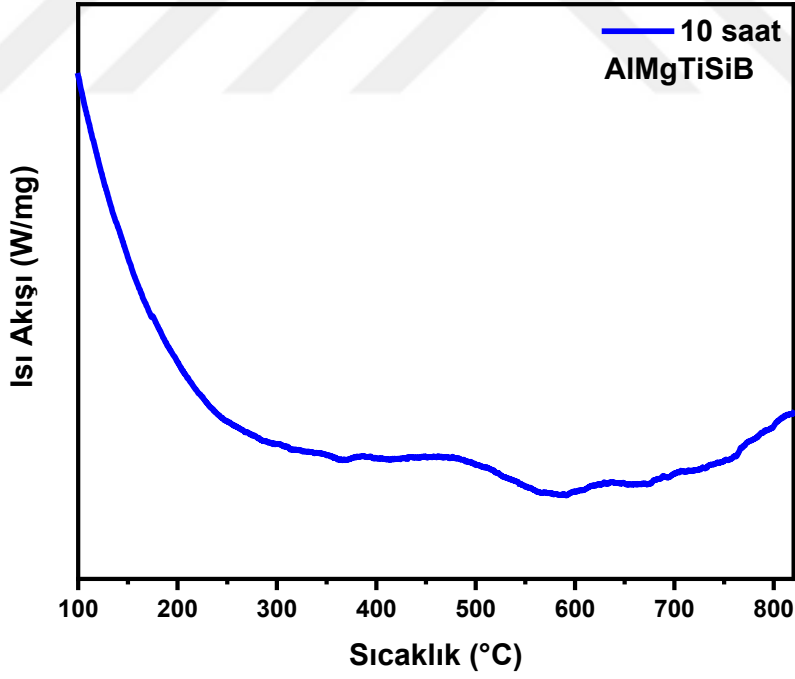
$Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  toz alaşımının ısıl özelliklerini ifade eden DTA sonuçları incelendiğinde ğtme süresine bağlı olarak belli sıcaklıklarda endotermik ve ekzotermik pikler gözlenmiştir. Kısa sürede ğtme ile elde edilen toz alaşımlarında gözlenen endotermik pikler alaşımı oluşturan ve eğrime sıcaklığı düşük olan Al ve Mg gibi elementlerin erimesi sonucu oluşmuştur. Bu araştırma için kullanılan DTA cihazının termal aralığının 800 C ile sınırlı olması ergime sıcaklıkları 800 C' den daha yüksek olan Ti, Si ve B elementlerine karşılık ergime pikleri doğal olarak gözlenmemiştir. ğtme süresinin 5 saat ve 10 saat olduğu durumlarda belirgin pikler gözlenmemiştir. Bu sonuç alaşımda gözlenen intermetalik fazların ergime sıcaklıklarının yüksek olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Daha uzun süreli (50, 100 saat) ğtme işleminden sonra elde edilen toz alaşımlarında herhangi bir reaksiyonu ifade eden pik gözlenmemiştir. Bu sonuç alaşımın incelenen sıcaklık aralığında ısıl kararlılığa ulaştığını ifade etmektedir.



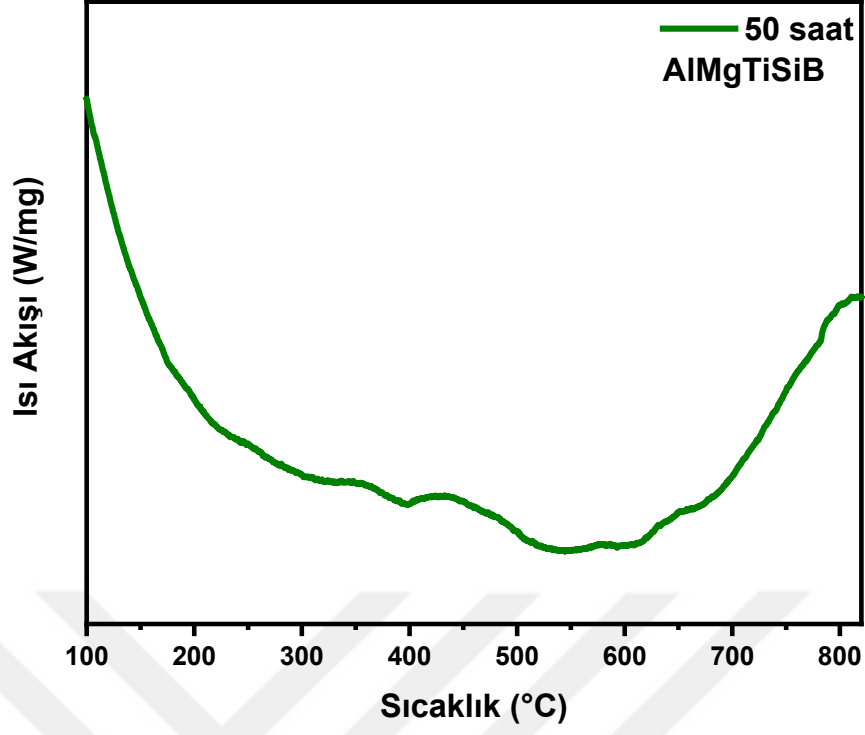
**Şekil 4.31.** MA ile 1 saat ğtlerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının DTA grafiği



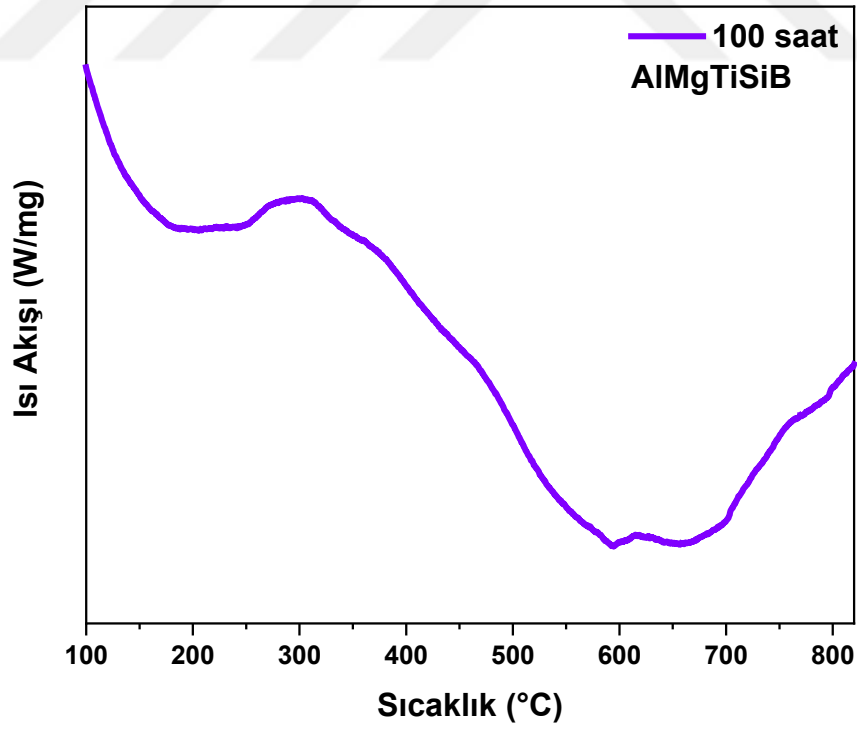
Şekil 4.32. MA ile 5 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının DTA grafiği



Şekil 4.33. MA ile 10 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının DTA grafiği

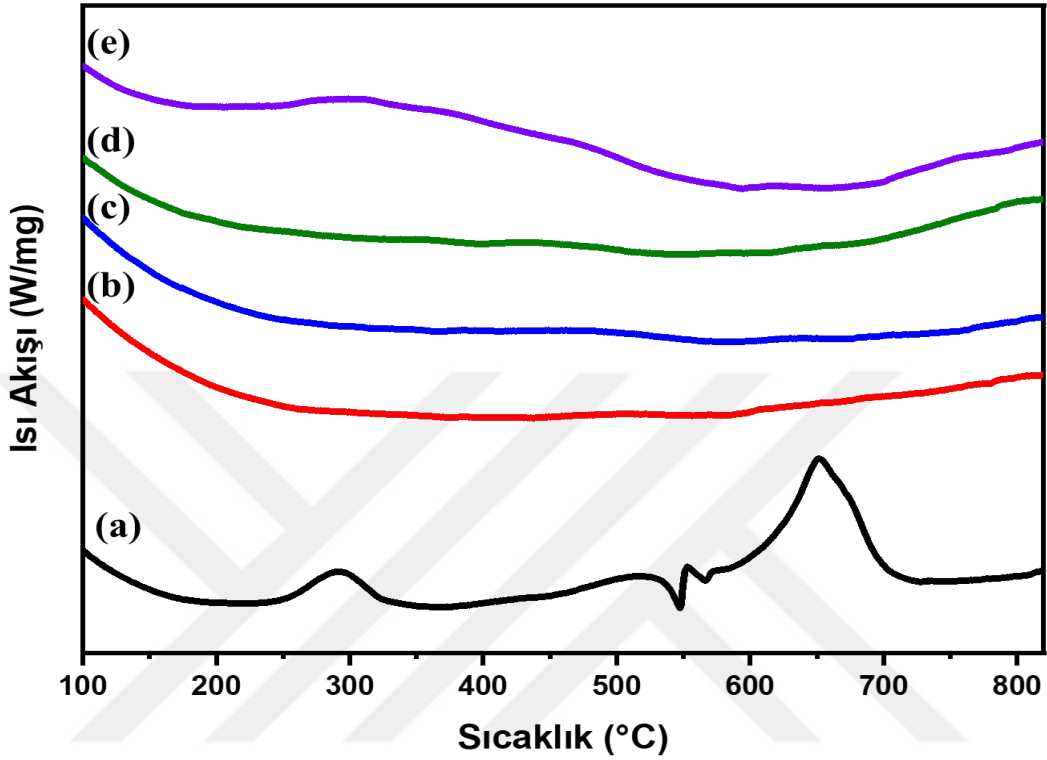


Şekil 4.34. MA ile 50 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının DTA grafiği



Şekil 4.35. MA ile 100 saat öğütülerek üretilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının DTA grafiği

Mekanik alaşımlama tekniği kullanılarak 1-100 saat sürelerle öğütölerek elde edilen  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  toz alaşımlarının DTA sonuçları toplu olarak Şekil 4.36.'da görölmektedir. Bu şekilde göröldüğü gibi 100 saatlik öğütmeden sonra alaşım ısı kararlılığa ulaşmıştır.



Şekil 4.36.  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımının DTA grafiği:

(a) 1 saat, (b) 5 saat, (c) 10 saat, (d) 50 saat ve (e) 100 saat

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Mekanik alaşımlama (MA) tekniği kullanılarak  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  kompozisyonuna sahip toz alaşımları 1 saat, 5 saat, 10 saat, 50 saat ve 100 saat öğütülmüştür. Üretilen toz alaşımların faz yapısı, mikroyapısı ve termal özellikleri sırasıyla X-ışını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazları ile incelenmiştir. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Öğütme süresinin düşük olduğu durumlarda parçacıkların ciddi bir deformasyona maruz kalmadığı ve morfolojik yapının bozulmadığı gözlenmiştir. Bu durumda intermetalik faz gözlenmemiştir.
- Öğütme süresinin artması ile soğuk kaynaşma mekanizması başlamış ve parçacıkların belli boyutlarda kümeler oluşturduğu gözlenmiştir. Alaşımı oluşturan parçacıklar birbirleri ile reaksiyona girerek intermetalik fazlar oluşturmuşlardır.
- Alaşımların 50 ve 100 saat gibi daha uzun sürelerde öğütülmesi durumda kırılma mekanizması etkili olmaya başlamış ve parçacık boyutlarının 1  $\mu m$  ile 10  $\mu m$  arasında olduğu ve mikro yapının homojen hale geldiği tespit edilmiştir.
- 10 saatlik öğütme işleminde sonra elementler birbirleri ile reaksiyona girerek intermetalik fazları oluşturmuşlardır. Gözlenen başlıca intermetalik fazlar  $Al_3T$ ,  $Al_3Mg_2$ ,  $Si_3Ti_5$ ,  $AlTi$ ,  $Mg_2Si$  ve  $\alpha-AlMgTiSi$  katı çözeltili fazı şeklindedir.
- Alaşımların DTA analizlerinde öğütme süresine bağlı olarak belli sıcaklıklarda ekzotermik ve endotermik pikler gözlenmiştir. Öğütme süresinin 50 saat ve 100 saat olması ile alaşım ısıl kararlılığa ulaşmıştır.

### 5.2. Öneriler

Elde edilen  $Al_{25}Mg_{25}Ti_{25}Si_{25}$  ve  $Al_{20}Mg_{20}Ti_{20}Si_{20}B_{20}$  alaşımlarının mekanik özellikleri inceleyebilir. Özellikleri daha iyi olan alaşım sanayide kullanılabilir potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKÇA

- [1] C.L. Palmer, *Work at the boundaries of science: Information and the interdisciplinary research process*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*, Elsevier, 2012.
- [3] L.G. Sun, G. Wu, Q. Wang, J. Lu, Nanostructural metallic materials: Structures and mechanical properties, *Materials Today* 38 (2020) 114–135.
- [4] C. Veiga, J.P. Davim, A.J.R. Loureiro, Properties and applications of titanium alloys: a brief review, *Rev. Adv. Mater. Sci* 32 (2012) 133–148.
- [5] Z. Huda, Z. Huda, *Materials in engineering, Mechanical Behavior of Materials: Fundamentals, Analysis, and Calculations* (2022) 81–106.
- [6] M. Kabak, *X-ışınları kristalografisi*, Bıçaklar Kitabevi, 2004.
- [7] F. Habashi, *Alloys: preparation, properties, applications*, John Wiley & Sons, 2008.
- [8] H.R. Ogden, R.I. Jaffee, *The effects of carbon, oxygen, and nitrogen on the mechanical properties of titanium and titanium alloys*, (1955).
- [9] F. Habashi, *Alloys: preparation, properties, applications*, John Wiley & Sons, 2008.
- [10] I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, M. Qian, *Light alloys: metallurgy of the light metals*, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [11] Y.H. Cai, C. Wang, J.S. Zhang, Microstructural characteristics and aging response of Zn-containing Al-Mg-Si-Cu alloy, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 20 (2013) 659–664. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0780-x>.
- [12] P. cheng Ma, D. Zhang, L. zhong Zhuang, J. shan Zhang, Effect of alloying elements and processing parameters on the Portevin-Le Chatelier effect of Al-Mg alloys, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 22 (2015) 175–183. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1058-2>.
- [13] L. Lu, M.O. Lai, Y.H. Toh, L. Froyen, Structure and properties of Mg-Al-Ti-B alloys synthesized via mechanical alloying, 2002. [www.elsevier.com/locate/msea](http://www.elsevier.com/locate/msea).
- [14] F. Bilimleri Enstitüsü, H. İbrahim Kurt, Marmara Üniversitesi Alüminyum-Magnezyum-Titanyum (Al-Mg-Ti) Alaşımlarının Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Magnezyum Ve Titanyum Elementlerinin Etkisinin Araştırılması, N.D.
- [15] S. Çetintürk, A206. 0 alüminyum bakır alaşımlarının farklı aşılama ile tane boyutunun inceltilmesi ve T6 ısıl işlemi uygulayarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, (2021).

- [16] H. Ehrenreich, H.R. Philipp, B. Segall, Optical properties of aluminum, *Physical Review* 132 (1963) 1918.
- [17] A.J. Nathan, A. Scobell, How China sees America: The sum of Beijing's fears, *Foreign Aff.* 91 (2012) 32.
- [18] I. V. Povstugar, A.N. Streletskii, D.G. Permenov, I. V. Kolbaney, S.N. Mudretsova, Mechanochemical synthesis of activated Me-BN (Me{double bond, long}Al, Mg, Ti) nanocomposites, *J Alloys Compd* 483 (2009) 298–301. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.07.185>.
- [19] M. Gögebakan, Mechanical properties of AlYNi amorphous alloys, *Journal of Light Metals* 2 (2002) 271–275. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(03\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00011-7).
- [20] F. Ozturk, Ülkemizde Hafif Metal Alaşımlarının Kullanımı Ve Geliştirilmesi, 2008. <https://www.researchgate.net/publication/282571344>.
- [21] J.L. Beeby, Electronic structure of alloys, *Physical Review* 135 (1964) A130.
- [22] P. Soven, Coherent-potential model of substitutional disordered alloys, *Physical Review* 156 (1967) 809.
- [23] H.J. Goldschmid, *Interstitial alloys*, Springer, 2013.
- [24] D.B. Wagner, Early iron in China, Korea, and Faculty of Humanities. 24 Mart 2007. 17 Şubat 2013 tarihinde kaynağından (PDF), 2007. <https://web.archive.org/web/20130217112817/http://www.staff.hum.ku.dk/dbwagner/EARFE/EARFE.html>.
- [25] Ö. Özdemir, Ni-Al İntermetalik Malzemeler, Sakarya Üniversitesi (2004).
- [26] U. Mizutani, H. Sato, M. Inukai, E. Zijlstra, Theoretical foundation for the Hume-Rothery electron concentration rule for structurally complex alloys, *Acta Phys Pol A* 126 (2014) 531–534.
- [27] R.M. Marcé, F. Borrull, Solid-phase extraction of polycyclic aromatic compounds, *J Chromatogr A* 885 (2000) 273–290.
- [28] N. Ohba, K. Miwa, M. Aoki, T. Noritake, S. Towata, Y. Nakamori, S. Orimo, A. Züttel, First-principles study on the stability of intermediate compounds of LiBH<sub>4</sub>, *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 74 (2006) 075110.
- [29] A. Gökçe, Toz metalurjisi yöntemiyle Mg-Sn alaşımı üretimi ve karakterizasyonu, *Academic Platform-Journal of Engineering and Science* 8 (2020) 112–119.
- [30] A. Aran, Mal 201-Malzeme Bilgisi, İTÜ Makine Fakültesi, Ders Notları, İstanbul (2008).
- [31] Y. Yapılacağı, M. Başaranel, N. Saklakoğlu, C.B. Üniversitesi, M.M. Bölümü, M. Mühendislik dergisi Cilt, D. Üniversitesi, M. Fakültesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi mühendislik dergisi SIMA prosesiyle üretilmiş ETİAL 180

alüminyum alaşımına eser miktarlarda magnezyum ve kalay ilavesinin etkilerinin incelenmesi, 2012.

- [32] A.S.M. Handbook, Alloy phase diagrams, ASM International 3 (1992) 2.
- [33] A.-S. Provisional, J.L. Murray, A.J. McAlister, The Al-Si (Aluminum-Silicon) System 26.98154 28.0855 Equilibrium Diagram, n.d.
- [34] A.S.M. Handbook, volume 3, Alloy Phase Diagrams, ASM International, ed, The Materials Information Company (1992).
- [35] O.N. Carlson, The Al-B (Aluminum-Boron) System, n.d.
- [36] CambridgeCore\_Citation\_23Jul2024, (n.d.).
- [37] J.A. Spittle, S. Sadli, Effect of alloy variables on grain refinement of binary aluminium alloys with Al-Ti-B, Materials Science and Technology 11 (1995) 533–537.
- [38] D.M.J. Wilkes, P.S. Goodwin, C.M. Ward-Close, K. Bagnall, J. Steeds B', Solid solution of Mg in Ti by mechanical alloying, 1996.
- [39] 37\_1602, (n.d.).
- [40] X. Niu, L. Lu, Formation of Magnesium Silicide by Mechanical Alloying, Advanced Performance Materials 4 (1997) 275–283. <https://doi.org/10.1023/A:1008673004625>.
- [41] L. Dias, C. Coelho, B. Trindade, F.H. Froes, Mg-rich light alloys synthesised by mechanical alloying, Key Eng Mater 230 (2002) 283–286.
- [42] M. Gögebakan, The effect of Si addition on crystallization behavior of amorphous Al-Y-Ni alloy, in: J Mater Eng Perform, 2004: pp. 504–508. <https://doi.org/10.1361/10599490419171>.
- [43] A. Thirugnanam, K. Sukumaran, U.T.S. Pillai, K. Raghukandan, B.C. Pai, Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al-7Si-Mg alloys, Materials Science and Engineering: A 445 (2007) 405–414.
- [44] J.C. Crivello, T. Nobuki, T. Kuji, Limits of the Mg-Al  $\gamma$ -phase range by ball-milling, Intermetallics (Barking) 15 (2007) 1432–1437. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2007.05.001>.
- [45] P. Sundar, Structures And Properties Of Al-Based Al-Si-Ni Nanostructures Developed By Mechanical Alloying A Thesis Submitted In Partial Fulfillment Of The Requirement For The Award Of Degree Of Master Of Technology In Metallurgical & Materials Engineering, 2009.
- [46] C.J. Hu, H.M. Wu, T.Y. Chen, Synthesis of Mg-Cu-Ti based amorphous alloys by mechanical alloying technique, in: J Phys Conf Ser, Institute of Physics Publishing, 2009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/144/1/012020>.

- [47] J.K. Rana, D. Sivaprahasam, K. Seetharama Raju, V. Subramanya Sarma, Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline high strength Al-Mg-Si (AA6061) alloy by high energy ball milling and spark plasma sintering, *Materials Science and Engineering: A* 527 (2009) 292–296. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.041>.
- [48] K. Asano, H. Enoki, E. Akiba, Synthesis process of Mg-Ti BCC alloys by means of ball milling, *J Alloys Compd* 486 (2009) 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.140>.
- [49] Z. Hu, L. Wan, S. Wu, H. Wu, X. Liu, Microstructure and mechanical properties of high strength die-casting Al-Mg-Si-Mn alloy, *Mater Des* 46 (2013) 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.020>.
- [50] Y.H. Cai, C. Wang, J.S. Zhang, Microstructural characteristics and aging response of Zn-containing Al-Mg-Si-Cu alloy, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 20 (2013) 659–664. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0780-x>.
- [51] F. Bilimleri Enstitüsü, H. İbrahim Kurt, Marmara Üniversitesi Alüminyum-Magnezyum-Titanyum (Al-Mg-Ti) Alaşımlarının Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Magnezyum Ve Titanyum Elementlerinin Etkisinin Araştırılması, n.d.
- [52] M. Türkmen, O. Akdemir, Y. Taşpınar, M. Yıldız, S. Gündüz, The Effect of Cooling Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Si (6063) Alloy, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 21 (2015) 11–14. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.30075>.
- [53] Y. Wu, J. Zhang, H. Liao, G. Li, Y. Wu, Development of high performance near eutectic Al-Si-Mg alloy profile by micro alloying with Ti, *J Alloys Compd* 660 (2016) 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.083>.
- [54] M. Rajabi, R.M. Sedighi, S.M. Rabiee, Thermal stability of nanocrystalline Mg-based alloys prepared via mechanical alloying, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 26 (2016) 398–405. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64128-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64128-6).
- [55] X.G. An, Y. Liu, J.W. Ye, L.Z. Wang, P.Y. Wang, Grain refining efficiency of SHS Al-Ti-B-C master alloy for pure aluminum and its effect on mechanical properties, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 29 (2016) 742–747. <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0452-8>.
- [56] V. Erturun, Uçak Gövde-Motor Bölümü, Kayseri erturun@erciyes, 2018.
- [57] C. Kursun, M. Gogebakan, H. Eskalen, Mechanical properties, microstructural and thermal evolution of Mg<sub>65</sub>Ni<sub>20</sub>Y<sub>15</sub>-xSi<sub>x</sub> (X = 1, 2, 3) alloys by mechanical alloying, *Mater Res Express* 5 (2018) 036512. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab405>.
- [58] Y. Çevirir, S. Necip, M. Yıldırım, Effect Of Annealing Time On Mechanicalproperties Of Hypo-Eutectic Al-Si Alloys, Afyon Kocatepe University

- [59] I. Rossi Bertoli, L. Moreira Ferreira, B. Xavier De Freitas, C. Angelo Nunes, A. Saraiva Ramos, M. Filgueira, C. Dos Santos, E. Coaglia Trindade Ramos, Mechanical alloying and hot pressing of Ti-Zr-Si-B powder mixtures, *Metals (Basel)* 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/met8020082>.
- [60] P. Urban, F. Ternero, E.S. Caballero, S. Nandyala, J.M. Montes, F.G. Cuevas, Amorphous Al-Ti powders prepared by mechanical alloying and consolidated by electrical resistance sintering, *Metals (Basel)* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/met9111140>.
- [61] V. Goyal, R. Ravi, S.R. Bakshi, P.R. Soni, Development and Mechanical Properties of In Situ Al<sub>3</sub>Ti-Reinforced Nanostructured AA6061 via Mechanical Alloying, *J Mater Eng Perform* 28 (2019) 117–122. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3729-4>.
- [62] A. Tejada-Ochoa, N. Kametani, C. Carreño-Gallardo, J.E. Ledezma-Sillas, N. Adachi, Y. Todaka, J.M. Herrera-Ramirez, Formation of a metastable fcc phase and high Mg solubility in the Ti-Mg system by mechanical alloying, *Powder Technol* 374 (2020) 348–352. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.053>.
- [63] Y. Jia, S. Wang, D. Shu, Grain size prediction and investigation of 7055 aluminum alloy inoculated by Al–5Ti–1B master alloy, *J Alloys Compd* 821 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153504>.
- [64] M.K. Yadav, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, Characterization of Ti–Al Intermetallic Synthesized by Mechanical Alloying Process, *Metals and Materials International* 27 (2021) 2378–2386. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00603-w>.
- [65] A.-B.-S.V. Al-B-Mg, A. Mekaniksel, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, N.D.
- [66] H. Yaykaşlı, H. Eskalen, Y. Kavun, M. Gögebakan, Microstructural, thermal, and radiation shielding properties of Al<sub>50</sub>B<sub>25</sub>Mg<sub>25</sub> alloy prepared by mechanical alloying, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 33 (2022) 2350–2359. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07434-9>.
- [67] U.K. Murmu, A. Ghosh, A.H. Seikh, I.A. Alnaser, H.S. Abdo, N.S. Alowaysi, M. Ghosh, Mechanical Alloying of Ball-Milled Cu–Ti–B Elemental Powder with the In Situ Formation of Titanium Diboride, *Metals (Basel)* 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/met12122108>.
- [68] Y. Zhao, D. Song, H. Wang, X. Li, L. Chen, Z. Sun, Z. Wang, T. Zhai, Y. Fu, Y. Wang, S. Liu, Y. Du, W. Zhang, Revealing the nucleation and growth mechanisms of Fe-rich phases in Al–Cu–Fe(-Si) alloys under the influence of Al–Ti–B, *Intermetallics (Barking)* 146 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107584>.
- [69] H. Yaykaşlı, M. Gögebakan, Almg<sub>2</sub>ib Alaşımının Yapısal, Isısal Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 13 (2023) 572–581. <https://doi.org/10.21597/Jist.1159904>.

- [70] H. Yaykaşlı, M. Göğebakan, Al<sub>50</sub>Si<sub>25</sub>B<sub>25</sub> alaşımının mikroyapısal, termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi Investigation of microstructural, thermal and mechanical properties of Al<sub>50</sub>Si<sub>25</sub>B<sub>25</sub> alloy, *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci* 12 (2023) 310–316. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1089483>.
- [71] H. Yaykaşlı, M. Göğebakan, Effect of Boron Addition on the Microstructure, Thermal, and Mechanical Properties of Al-5%Mg-2%Ti Alloy, *Metallography, Microstructure, and Analysis* 13 (2024) 296–306. <https://doi.org/10.1007/s13632-024-01046-5>.
- [72] B. Avar, M. Göğebakan, Mekanik Alaşımın Süresince Al<sub>85</sub>Co<sub>7</sub>Y<sub>8</sub> Alaşımının Faz Değişimi, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi* (2017). <https://doi.org/10.7240/marufbd.292305>.
- [73] Z. Hu, L. Wan, S. Wu, H. Wu, X. Liu, Microstructure and mechanical properties of high strength die-casting Al-Mg-Si-Mn alloy, *Mater Des* 46 (2013) 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.020>.
- [74] J. Safari, G.H. Akbari, A. Shahbazkhan, M. Delshad Chermahini, Microstructural and mechanical properties of Al-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite prepared by mechanical alloying, *J Alloys Compd* 509 (2011) 9419–9424. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.07.061>.
- [75] R.M. German, *Powder metallurgy science*, (No Title) (1994).
- [76] Z. Wang, W. Wu, G. Qian, L. Sun, X. Li, J.A.F.O. Correia, In-situ SEM investigation on fatigue behaviors of additive manufactured Al-Si<sub>10</sub>-Mg alloy at elevated temperature, *Eng Fract Mech* 214 (2019) 149–163.
- [77] Endüstriyel Amaçlı Almg<sub>10</sub> Hafif Alaşımının Üretilmesi, Yapısal, Isısal Ve Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi Hakan Yaykaşlı Doktora Tezi Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Kahramanmaraş 2020, n.d.
- [78] M. De Graef, M.E. McHenry, *Structure of materials: an introduction to crystallography, diffraction and symmetry*, Cambridge University Press, 2012.
- [79] M. Ye, Z. Wang, H.A. Butt, M. Yang, H. Chen, K. Han, M. Cui, Y. Lei, Enhancing the joint of dissimilar aluminum alloys through MIG welding approach assisted by ultrasonic frequency pulse, *Mater Lett* 330 (2023) 133289. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.133289>.
- [80] C. Zhao, X. Wang, C. Li, Y. Liu, S. Sun, S. Yang, Y. Sun, Z. Peng, Q. Yu, M. Cai, B. Yu, F. Zhou, W. Liu, Superior tribological and anti-corrosion performance of corrosion inhibitors intercalated LDH-MAO coating on AZ31 Mg alloys, *Tribol Int* 191 (2024) 109126. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2023.109126>.
- [81] P. Muthusamy, M. Mohanraj, T. Ramkumar, M. Selvakumar, Microstructure, High-Temperature Wear, and Corrosion Behaviors of UNS R56320-xWC Composite Fabricated through Powder Metallurgy, *J Mater Eng Perform* 33 (2024) 8460–8467. <https://doi.org/10.1007/S11665-024-09415-5/FIGURES/8>.

- [82] S. Wang, Z. Cai, Q. Wu, Q. Li, Z. Ahsan, Y. Ma, H. Jing, G. Song, W. Yang, C. Wen, Microstructural Characteristics and Electrochemical Performance of Core-Shell-Structured Si Powders Fabricated by Ball Milling with Different Process Control Agents, *J Mater Eng Perform* 33 (2023) 9084–9094. <https://doi.org/10.1007/S11665-023-08649-Z/TABLES/1>.

