

T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

7XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI  
KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM VE  
KARAKTERİZASYONLARININ İNCELENMESİ

Hazırlayan  
Figen KÖKLÜ

Danışman  
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Doktora Tezi

Aralık 2024  
KAYSERİ

T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

7XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI  
KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM VE  
KARAKTERİZASYONLARININ İNCELENMESİ

Doktora Tezi

Hazırlayan  
Figen KÖKLÜ

Danışman  
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Aralık 2024  
KAYSERİ

**BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

FİGEN KÖKLÜ



“7XXX Serisi Alüminyum Alaşımli Kompozit Malzemelerin Üretim ve Karakterizasyonlarının İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Figen KÖKLÜ

İmza

Danışman

Doç. Dr. Veysel ERTURUN

İmza

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Doç. Dr. Veysel ERTURUN

İmza

## TEŞEKKÜR

Tez alıŐma dönemim boyunca, bana yol gösteren, engin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaŐan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Veysel ERTURUN'a sevgi, saygı ve Őukranlarımı sunuyorum.

Laboratuvar çalıŐmalarımnda ihtiyaç duyduğum zamanlarda her türlü desteğini esirgemeyen Göksel BEHRET hocama ve kardeŐim Hüseyin KKLU'ye teŐekkürü bir borç bilirim.

Hayatımda her zaman yanımda olup, beni yetiŐtirip bu günlere gelmemdeki emekleri, sabır ve desteklerinden dolayı sevgili aileme teşekkür ederim.

Figen KKLU

Aralık 2024, KAYSERİ

# 7XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM VE KARAKTERİZASYONLARININ İNCELENMESİ

**Figen KÖKLÜ**

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Doktora Tezi, Aralık 2024**  
**Danışman: Doç. Dr. Veysel ERTURUN**

## ÖZET

Gelişen endüstri ile teknoloji, şehirleşme ve nüfus artışı alüminyum kullanımının artmasına neden olmaktadır. Alüminyumun hafif, sağlam, verimli, uzun ömürlü ve daha ekonomik olması tercih sebebidir.

Birçok farklı metal alaşımının mekanik özelliklerinin çeşitli seramik fazlarla iyileştirilebildiği metal matrisli kompozitler ileri mühendislik malzemelerindedir. Birçok teknikte üretilebilen metal matrisli kompozitler de toz metalurjisi yönteminde takviye elemanı olarak genellikle silisyum karbür, bor karbür, alüminyum oksit, matris malzemesi olarak alüminyum, bakır, nikel ve titanyum esaslı alaşımlar tercih edilmektedir. Üretimde kullanılan farklı teknikler üstün özellikli malzemelerin daha düşük maliyetlerle elde edilebilmesine imkân tanımaktadır.

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretim problemlerinin başında üretim ve bakım maliyetleri gelmektedir. Mekanik alaşımlama işlemi ile hem alaşımlama hem de kompozit malzeme üretimi eş zamanlı yapılabilmektedir. Bu çalışmada bilyeli öğütme ve mekanik alaşımlama yöntemleriyle ileri malzeme elde edilmesi amaçlanmıştır. Al malzemenin özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla Zn, Cu, Si elementleri, ağırlığı minimize etmek amacıyla grafen ve kompozit oluşturma özelliği iyi olan SiC seramik tozları eklenmiş, spex tipi bir karıştırıcı kullanılarak tozlar alaşımlandırılmıştır. Alaşımlandırılan tozlar sinterlenerek kompozit yapı elde edilmiştir. Elde edilen alüminyum matrisli kompozit yapıda kristal boyutların küçültülmesi, kafes gerilmelerinin artırılarak daha sert ve basma mukavemeti yüksek malzeme elde edilmesi hedeflenmiştir.

Yapılan XRD analizi ile alaşımlama süresi ve Zn miktarı arttıkça numunelerde alaşımlama meydana geldiği görülmüştür. EDS analizi sonuçları da XRD analizi

sonuçlarını desteklemektedir. Sinterlenmiş numunelerin mikrosertlik değerlerinin alaşımlanma süresi ve çinko miktarının artması ile arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalurjisi, Mekanik alaşımlama, Alüminyum matrisli kompozitler



# INVESTIGATION OF PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF 7XXX SERIES ALUMINUM ALLOY COMPOSITE MATERIALS

**Figen KÖKLÜ**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**PhD Thesis, December 2024**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Veysel ERTURUN**

## ABSTRACT

With the developing industry, technology, urbanization and population growth, the use of aluminum is increasing. Aluminum is preferred because it is light, strong, efficient, long-lasting and more economical.

Metal matrix composites, in which the mechanical properties of many different metal alloys can be improved with various ceramic phases, are among the advanced engineering materials. In metal matrix composites, which can be produced with many techniques, silicon carbide, boron carbide, aluminum oxide are generally preferred as reinforcement elements in the powder metallurgy method, and aluminum, copper, nickel and titanium-based alloys are preferred as matrix materials. Different techniques used in production allow superior materials to be obtained at lower costs.

Production and maintenance costs are the main production problems of aluminum matrix composite materials. With the mechanical alloying process, both alloying and composite material production can be done simultaneously. In this study, it is aimed to obtain advanced materials with ball milling and mechanical alloying methods. In order to improve the properties of the Al material, Zn, Cu, Si elements, graphene to minimize the weight and SiC ceramic powders with good composite forming properties were added, and the powders were alloyed using a spex type mixer. The alloyed powders were sintered to obtain a composite structure. In the obtained aluminum matrix composite structure, it was aimed to reduce the crystal sizes, increase the lattice strains and obtain a harder material with high compressive strength.

It was observed with the XRD analysis that alloying occurred in the samples as the alloying time and Zn amount increased. The EDS analysis results also support the XRD analysis results. It was determined that the microhardness values of the sintered samples increased with the increase in the alloying time and zinc amount.

**Keywords:** Powder metallurgy, Mechanical alloying, Aluminum matrix composites.



## İÇİNDEKİLER

### 7XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLI KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM VE KARAKTERİZASYONLARININ İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
ONAY.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
KISALTMALAR ve SİMGELER.....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
GİRİŞ.....	1

## 1.BÖLÜM

### LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1.Alüminyum ve Özellikleri.....	3
1.1.1.7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları.....	6
1.1.2.Al Alaşımlarında Si Etkisi.....	7
1.1.3.Alüminyum Alaşımlarında Grafen Etkisi.....	8
1.2.Kompozit Malzemeler.....	10
1.2.1.Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozitler.....	16
1.2.2.SiC.....	17
1.3.Toz Metalurjisi.....	18
1.3.1.Toz Metalurji Yönteminin Avantajları.....	20
1.3.2.Toz Metalurji Yönteminin Dezavantajları.....	21
1.3.3.Toz Metalurjisi İşlem Basamakları.....	21
1.4.Mekanik Alaşımlama.....	23
1.4.1.Öğütücüler.....	25
1.5.Sinterleme.....	28
1.5.1.Katı-Hal Sinterleme Teorisi.....	31

1.5.2.Sıvı Faz Sinterlemesi.....	32
1.5.3.Alüminyum Alaşımlarının Sinterlenmesi.....	33

## 2. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Gereç ve Yöntem .....	34
2.2. Numunelerin Hazırlanış Aşaması.....	34
2.3. XRD İşlemleri.....	35
2.4. Sinterleme.....	36
2.5. Parlatma .....	36
2.6. SEM Cihazı.....	37
2.7. Mikrosertlik Ölçümü .....	37

## 3. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. XRD Verileri .....	39
3.2.1. Sinterlenmiş Numunelerin SEM Görüntüleri.....	47
3.2.2. Sinterlenmiş Numunelerin SEM-EDS Görüntüleri .....	55
3.2.3. Mikrosertlik İncelemesi .....	65
3.2.4. Basma Deneyleri .....	66

## 4. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1.Sonuçlar.....	73
4.2.Öneriler .....	76
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ .....	86

**KISALTMALAR ve SİMGELER**

Al	: Alüminyum
Zn	: Çinko
Si	: Silisyum
GNP	: Grafen
Cu	: Bakır
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
SiC	: Silisyum Karbür
TM	: Toz Metalürjisi
MA	: Mekanik Alaşımlama
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
AMK	: Alüminyum Matrisli Kompozit
XRD	: X-Işını Kırınımı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi

**TABLolar LİSTESİ**

Tablo 1.1. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi .....	6
Tablo 1.2. Isıl işlem görmemiş AA7075 alaşımının genel özellikleri .....	7
Tablo 1.3. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları.....	14
Tablo 2.1. Hazırlanan numunelerdeki tozların ağırlıkça oranları.....	35
Tablo 3.1. A numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri .....	57
Tablo 3.2. B numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri .....	59
Tablo 3.3. C numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri .....	61
Tablo 3.4. D numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri .....	63
Tablo 3.5. E numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri .....	65

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yerkabuğunda bulunan elementlerin oranları [6].....	3
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerde kullanılan matris malzemeler .....	11
Şekil 1.3. Kompozit malzeme çeşitleri.....	12
Şekil 1.4 MMK üretim yöntemlerine ait genel akım şeması [47].....	15
Şekil 1.5. Toz metalurjisi akım şeması [4] .....	22
Şekil 1.6. Toz üretim teknikleri [13] .....	23
Şekil 1.7. Mekanik alaşımlamada başlangıç tozlarının tipik bileşenleri [62].....	24
Şekil 1.8. Spex tipi karıştırıcı.....	26
Şekil 1.9. Planetary tipi bilyeli değirmen [62].....	27
Şekil 1.10. Atritör tipi (dikey) bilyeli değirmen [51].....	27
Şekil 1.11. Sinterleme işlemi [2].....	28
Şekil 1.12. Sinterleme esnasında gözeneklerdeki değişim [10].....	29
Şekil 1.13. Sinterlemenin farklı kademelerinin şematik gösterimi [82].....	30
Şekil 1.14. Bağ oluşumu ve iki küre modeli [4, 82] .....	31
Şekil 1.15. Sıvı faz sinterlemesi ve mekanizması [4, 69].....	32
Şekil 2.1. Parlatma işlemi tamamlanmış numuneler .....	36
Şekil 3.1. A numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği .....	39
Şekil 3.2. B numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği .....	40
Şekil 3.3. C numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği .....	40
Şekil 3.4. D numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği .....	41
Şekil 3.5. E numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği .....	42
Şekil 3.6. Karıştırılmamış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği .....	42
Şekil 3.7. 45 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği .....	43

<i>Şekil 3.8.</i> 90 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği .....	44
<i>Şekil 3.9.</i> 135 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği.....	44
<i>Şekil 3.10.</i> 180 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği.....	45
<i>Şekil 3.11.</i> Numunelerin kristal boyutları .....	46
<i>Şekil 3.12.</i> Numunelerin Kafes Gerinimi .....	47
<i>Şekil 3.13.</i> Sinterlenmiş A numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınlanmamış b) 45 dakika alaşımınlanmış c) 90 dakika alaşımınlanmış d) 135 dakika alaşımınlanmış e)180 dakika alaşımınlanmış.....	48
<i>Şekil 3.14.</i> Sinterlenmiş B numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınlanmamış b) 45 dakika alaşımınlanmış c) 90 dakika alaşımınlanmış d) 135 dakika alaşımınlanmış e)180 dakika alaşımınlanmış.....	50
<i>Şekil 3.15.</i> Sinterlenmiş C numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınlanmamış b) 45 dakika alaşımınlanmış c) 90 dakika alaşımınlanmış d) 135 dakika alaşımınlanmış e)180 dakika alaşımınlanmış.....	51
<i>Şekil 3.16.</i> Sinterlenmiş D numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınlanmamış b) 45 dakika alaşımınlanmış c) 90 dakika alaşımınlanmış d) 135 dakika alaşımınlanmış e)180 dakika alaşımınlanmış.....	52
<i>Şekil 3.17.</i> Sinterlenmiş E numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınlanmamış b) 45 dakika alaşımınlanmış c) 90 dakika alaşımınlanmış d) 135 dakika alaşımınlanmış e)180 dakika alaşımınlanmış.....	54
<i>Şekil 3.18.</i> A numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımınlanmış b) 180 dakika alaşımınlanmış.....	56
<i>Şekil 3.19.</i> B numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımınlanmış b)180 dakika alaşımınlanmış.....	58
<i>Şekil 3.20.</i> C numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımınlanmış b) 180 dakika alaşımınlanmış.....	60
<i>Şekil 3.21.</i> D numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımınlanmış b) 180 dakika alaşımınlanmış.....	62
<i>Şekil 3.22.</i> E numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımınlanmış b) 180 dakika alaşımınlanmış.....	64
<i>Şekil 3.23.</i> Numunelerin mikrosertlik değerleri .....	65
<i>Şekil 3.24.</i> A numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği.....	67

<i>Şekil 3.25.</i> Basma testine tutulmuş A numunesi a) Alaşımınlanmamış b) 90 dakika alaşımınlanmış c) 180 dakika alaşımınlanmış.....	67
<i>Şekil 3.26.</i> B numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği.....	68
<i>Şekil 3. 27.</i> Basma testine tutulmuş B numunesi a) Alaşımınlanmamış b) 90 dakika alaşımınlanmış c) 180 dakika alaşımınlanmış.....	69
<i>Şekil 3.28.</i> C numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği.....	69
<i>Şekil 3.29.</i> Basma testine tutulmuş C numunesi a) Alaşımınlanmamış b) 90 dakika alaşımınlanmış c) 180 dakika alaşımınlanmış.....	70
<i>Şekil 3.30.</i> D numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği.....	70
<i>Şekil 3.31.</i> Basma testine tutulmuş D numunesi a) Alaşımınlanmamış b) 90 dakika alaşımınlanmış c) 180 dakika alaşımınlanmış.....	71
<i>Şekil 3.32.</i> E numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği.....	71
<i>Şekil 3.33.</i> Basma testine tutulmuş E numunesi a) Alaşımınlanmamış b) 90 dakika alaşımınlanmış c) 180 dakika alaşımınlanmış.....	72

## GİRİŞ

Son yüzyılda klasik malzemelerin ihtiyaçlara cevap vermemesinden dolayı kompozit malzemelere ve toz metalurjisine (TM) olan ilgi artmıştır. Kompozit malzeme çalışmalarında malzemelerin farklı özellikleri bir araya getirilerek gelişmiş özelliklere sahip yeni nesil malzemeler elde edilmektedir. Otomotiv, uzay, askeri ve sivil havacılık endüstrilerinde geliştirilen bu malzemeler yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. TM ise sağladığı kolaylık ve ayrıcalıklar sayesinde ön plana çıkmaktadır. Farklı malzeme tozlarından değişen oranlarda karıştırılarak yeni malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. TM özellikle 1800'lü yıllarda sanayi devriminin de etkisiyle hızla gelişmiştir [1].

Yeni malzemelerin ve yeni üretim yöntemlerinin kullanılması da artmıştır. Bunlara mekanik alaşımlama (MA) tekniği de dahildir. Katı, kuru ve toz halindeki malzemelerin mekanik bir öğütücü içerisinde çelik veya farklı malzemelerden üretilmiş bilyelerle birbirlerine çarptırılarak bağlanmasını ve bu bağların kırılıp tekrar yeni bağlar oluşturmasını ve bu işlemlerin tekrarlanmasını sağlayarak daha ince ve homojen mikro yapıya sahip mukavemeti yüksek malzemelerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [2, 3].

Günümüzün en yaygın kullanılan mühendislik malzemeleri alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyumun yoğunluğunun düşük, elektriksel iletkenliğinin ve korozyon dayanımının yüksek olması, manyetik özelliğinin olmaması, ısıl iletkenliğinin yüksek olması, kolay işlenebilirliği ve geri dönüşümünün kolay olması diğer mühendislik malzemelerine oranla daha fazla tercih edilmesine neden olmaktadır.

Bu doktora tez çalışmasında farklı oranlarda karıştırılan Al, Si, Zn, Cu, SiC ve grafen tozları spex tipi bir karıştırıcıda öğütülerek kompozit bir malzeme elde edilmiş olup Zn'nin malzeme içerisine farklı oranlarda katılmasıyla oluşan biletlerin mikro yapısı ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. XRD (X-IşığI Kırınımı) analizleri yapılmış, SEM-EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu- Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi) analizleri yapılmış, mikro sertlikleri ve basma dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm ve sonuçlar değerlendirilerek malzeme karakterizasyonu yapılmıştır.

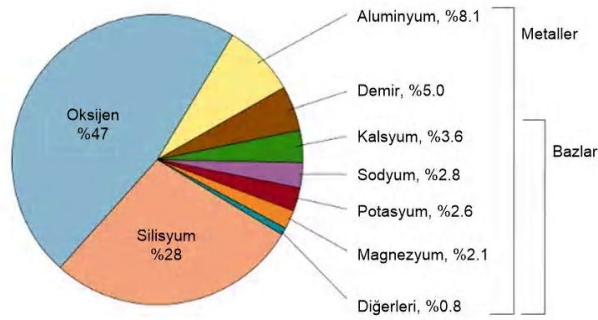


# 1.BÖLÜM

## LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 1.1.Alüminyum ve Özellikleri

Alüminyum doğada genellikle bileşikler halinde bulunur. Yerkabuğunda %8 civarındaki oranıyla en çok bulunan üçüncü elementtir [4] ve demirden sonra en fazla kullanılan metaldir [5]. Doğada oldukça çok bulunmasına rağmen ilk kez 1808 yılında tespit edilmiş ve ticari olarak üretimi 1886 yılında olmuştur. Ticari anlamda üretimi yaklaşık 136 yıl önce başlayan alüminyum, yüzlerce yıl boyunca kullanılan klasikleşmiş metallerin toplam üretimlerinden çok daha fazla miktarda üretilmektedir. Alüminyum toplam yıllık üretimi 1900 yılında 8.000 ton iken, 2003 yılında 25-27 milyon ton seviyelerine kadar yükselmiştir [4].



Şekil 1.1. Yerkabuğunda bulunan elementlerin oranları [6]

Saf alüminyumun yumuşak, sünek ve düşük dayanımlı olması mühendislik malzemesi olarak kullanılabilmesi için alaşımlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Jupp and Price, geleneksel alüminyum alaşımlarının büyük ölçekli gelişim potansiyelinin sınırlı olduğunu vurgulamışlardır. Nakliye uçakları ve sivil havacılıkta gelişmiş alüminyum alaşımlarının maliyetini optimize etme olanaklarına değinmişlerdir [7]. Uçak motorlarının ağırlığının azaltılmasında dökme demir ve çelikten daha hafif alaşımların kullanılması önem kazanmıştır. Özgül ağırlığı düşük ve kopma mukavemeti neredeyse dökme demirinkine eşit olan alüminyum alaşımlarının bu amaca uygun olduğu görülmüştür [8].

Alüminyumun mekanik mukavemetinin düşük sıcaklıklarda yüksek olması özellikle hava taşıtlarında ve uzay çalışmalarında kullanımına olanak sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlandırılarak, demire yakın mukavemette bir malzeme elde edilirken, demire göre neredeyse üç kat daha hafif olduğu görülmektedir. Alüminyum havacılık, yüksek katlı inşaat ve otomotiv endüstrisi gibi mukavemet/ağırlık oranı yüksek olması gereken uygulamalar için dikkat çekici yapısal malzemelerdendir [9, 10].

Uzun yıllar boyunca, alüminyum alaşımları uçak yapısal parçalarının ana malzemesi olmuştur. Bunun nedeni, güvenilir muayene teknikleri, köklü tasarım ve üretim teknikleri ile yüksek performanslarıdır. Kompozit malzemelerin kullanımının artmasıyla alüminyum alaşımlarının rolü bir miktar azalmış olsa da yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları uçak gövde yapımında önemini korumaktadır [11]. Yerleşik performans özellikleri, bilinen üretim maliyetleri, tasarım deneyimi ve yerleşik üretim yöntemleri ile tesisleri, alüminyum alaşımlarına olan güvenin devam etmesinin nedenlerinden sadece birkaçıdır. Bu nedenle önemli miktarlarda ve muhtemelen bu yüzyılın geri kalanında da kullanılacaktır. En önemlisi, alüminyumun uçak alaşımlarında sektörü rekabetçi tutmaya devam eden büyük ilerlemeler olmuştur. Alüminyum alaşımları uçağın yapısal özelliklerinde iyileşmelere yol açmıştır [12].

Alüminyumun başlıca alaşım elementleri Si, Mg, Zn, Cu ve Mn'dir. Bu elementler alaşımda belirli özelliklere ulaşmak için tek olarak ya da birkaç tanesi birlikte kullanılmaktadır [13].

Alüminyumun diğer metallere göre avantajlı olduğu özellikleri;

1. Hafifliği,
2. Mukavemet/Ağırlık oranı,
3. Geri dönüştürülebilirliği,

4. Korozyona dayanıklı olması,
5. Sünekliği,
6. Kolay şekillendirilebilmesi,
7. Dövülebilirliği,
8. İşleme kolaylığı,
9. Yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği,
10. İyi ısı ve ışık yansıtıcılığı
11. Alüminyum alaşımlarının çeşitliliği olarak sıralayabiliriz [4].

Alüminyum alaşımlarının mukavemeti ve sertliği yüksek yüklerde, titreşimli ortamlarda kullanılmak üzere alaşımlama ve ısıl işlem yoluyla önemli ölçüde artırılmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımları zorlu havacılık ortamında mükemmel performans sergileyerek farklı iklim koşullarında ve kimyasal korozyona maruz kaldığında uzun uçak ömrü sağlamaktadır [13].

Isıl işlem uygulaması alüminyum alaşımlarında istenilen mukavemet, tokluk, sertlik ve diğer mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlayabilmektedir. Düşük miktarlarda Mg, Si, Cu ve Zn ilavesi mukavemeti arttırırken, mekanik özelliklerin bu kadar değişken olması kullanım alanlarını genişletme konusunda büyük avantaj sağlamaktadır.

Alüminyumun döküm yoluyla üretilmesinde oksijenle teması mekanik özellikleri kötü yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca, takviye elamanları SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matris ıslatma problemi sebebiyle Al matrisli kompozitlerde iyi arayüzey bağı elde edilmesine engel teşkil etmektedir. Çinko, bakır, demir ve magnezyum içeren Al alaşımları kullanılarak veya üretimlerinde soy gazlardan (argon, helyum, azot,) oluşan atmosfer koruyucu olarak kullanılarak bu problemler minimuma indirilebilmektedir. Bunlara ilave olarak kaynak edilebilirliğinin kötü olması da dezavantajdır [15].

Alüminyum alaşımlarının yoğunluğu diğer metal malzemelere göre daha düşük olduğundan, alüminyum alaşımları kullanıldığında uçağın toplam ağırlığı azalmakta ve yakıt verimliliği artmaktadır [14]. Üretim maliyeti ve malzeme özelliklerinin kapsamlı anlaşılması göz önüne alındığında, Al alaşımları yüksek uygulama potansiyeline sahiptir. 2xxx, 7xxx ve 6xxx serisi Al alaşımları havacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

2000 serisi, 7000 serisi gibi Al bazlı alaşımların ve havacılık endüstrisi için geliştirilen Al-Li alaşımlarının özellikleri ticari olarak kullanılan konvansiyonel alaşımlarla karşılaştırıldığında alüminyumun malzeme kombinasyonları ile ağırlığın iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Alaşımlar ve hibrit malzemelerin geliştirilmesinin alüminyum ve havacılık endüstrisi için yeni malzeme seçenekleri sunabileceği öngörülmektedir [17].

### 1.1.1.7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları içerisinde 7xxx serisi alaşımlar en yüksek mukavemete sahip alaşımlardır. Bu nedenle, havacılık sektöründe uçakların özellikle kanat ve gövde yapılarında kullanılmaktadır. Zn, Mg, Cu, Mn ve Si bulunmaktadır [10, 18, 19]. 7xxx serisi alaşım grubunda yaygın olarak kullanılan elementler ve kimyasal bileşimleri, Tablo 1. 1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi [10]

7000 serisi	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Al
7050	6.2	2.25	2.3	-	≤15	≤12	Kalan
7055	7.6-8.4	1.8-2.3	2-2.6	0.005	0.15	0.1	Kalan
7075	5.1-6.1	2.1-2.9	1.2-2	0.3	0.5	0.4	Kalan
7150	5.9-6.9	2.2-2.7	1.9-2.5	0.1	0.15	0.12	Kalan
7475	5.2-6.2	1.9-2.6	1.2-1.9	0.06	0.12	0.10	Kalan

7055 Al alaşımı, uygun ısıl işlemlerden sonra daha yüksek mukavemet, kırılma tokluğu ve süneklik gibi mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak geleneksel şekillendirme yöntemiyle üretilen 7055 Al alaşımı, Zn'nin daha yüksek hacim fraksiyonu ve daha düşük soğuma hızı nedeniyle çatlaklar, makro segregasyon ve iri taneler sergilemektedir [20].

Havacılık sektöründe, uçak gövdesi ve kanadının imalatında kullanılan alüminyum alaşımlarının dayanımlarını artırmak için yaşlandırma (çökelti sertleştirme) ısıl işlemleri uygulanmaktadır. 7xxx serisi alüminyum alaşımları içerisinde AA7075 alaşımı öne çıkmaktadır [14, 21, 22].

AA7075 alaşımı düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek yorulma direncine sahip bir alüminyum alaşımıdır. Bu özelliklerinin yanısıra korozyon ve iyi işlenebilirlik

özellikleri ile havacılık endüstrisinde, uzay araçlarında ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca otomotiv ve denizcilik endüstrisinde de kullanımı vardır. Bu alaşım, çinko (%5-6), magnezyum (%2-2.9) ve bakır (%2) gibi elementlerin birleşiminden oluşmaktadır [11]. Isıl işlem uygulanmamış AA7075 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1. 2’de verilmektedir.

Tablo 1.2. Isıl işlem görmemiş AA7075 alaşımının genel özellikleri [23]

AA7075 alaşımı	Özellikler
Yoğunluk	2.81 g/cm <sup>3</sup>
Vickers Sertlik Değeri	68
Akma dayanımı	96.5 MPa
Çekme dayanımı	221 MPa
% uzama	9-10
Elastik modülü	71.7 GPa
Solüsyona alma sıcaklığı	466-482

### 1.1.2. Al Alaşımlarında Si Etkisi

Silisyum alüminyuma alaşım takviyesi olarak en sık uygulanan, maliyeti en düşük elementtir; alaşımın korozyon direncini ve aşınma direncini artırırken, termal genleşme katsayısını düşürmektedir [24].

Al matris yüksek ısıl genleşme katsayısı, zayıf yorulma dayanımına sahip olduğu için yapı içine silisyum partikülleri eklenmektedir. Silisyum alaşımın ısıl ve mekanik özelliklerini iyileştirirken fazla silisyum ilave edilmesi ters yönde etki meydana getirebilmektedir [4, 25-33].

Alüminyum-silisyum alaşımlarının iyi akışkanlığa, düşük ısıl genleşme katsayısına, iyi korozyon direncine ve mükemmel aşınma direncine sahip olması sayesinde; elektronik endüstrisi, otomotiv endüstrisi, uzay-havacılık ve askeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların dayanımı düşük ve işlenebilirliği zayıftır [4, 25-33]. Dayanıklılığı ve işlenebilirliğini artırmak için bakır ilavesi yapılmaktadır [4].

### 1.1.3. Alüminyum Alaşımlarında Grafen Etkisi

Grafen karbon esaslı takviye elemanlarından olup, karbon atomunun bal peteği örgülü yapısından oluşmaktadır. Grafen, yeryüzünde bilinen tek iki boyutlu malzemedir ve üstün özelliklere sahiptir. Dünyada bilinen en ince malzeme olduğu için, çeşitli fiziksel malzemelerin üzerine kaplama yapmak için kullanılmaktadır. Elmastan daha iyi ısı iletkenliği ve çelikten yüz kat daha fazla elastisite modülüne sahiptir [34, 35].

Zeng et al. TM aracılığıyla grafen takviyeli alüminyum (Al) matris kompozitleri hazırlayarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikro sertlik ve çekme testleri uygulayarak bunu saf Al alaşımıyla karşılaştırmış ve yalnızca ağırlıkça %0.3 grafen içeren grafen/Al kompozitinin, saf Al çekme mukavemetine kıyasla %25'lik bir artışa sahip olduğunu ortaya çıkarmışlardır [36]. Grafen miktarının artması homojen dağılıma olumsuz etki yapmamaktadır [37].

Grafen saf alüminyum ve alüminyum alaşımları ile kullanılmasının yanı sıra seramik malzemelerle birlikte takviye elemanı olarak da kullanılabilir. Takviye elemanı olarak SiC ve grafen birlikte kullanıldığında, seramiğin yüksek aşınma dayanımından yararlanılabilirken, grafenin yağlayıcı özelliği de kullanılabilir [34, 38, 39]. Ames and Alpas (1995), A356 alüminyum alaşımında SiC ve grafit içeren hibrit kompozitlerin aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışmada, %20 SiC ve %3-10 grafit içeren kompozitler üretilmiş ve aşınma testleri yapılmıştır. Bulgular düşük yüklerde hibrit kompozitlerin aşınma direncinin yüksek olduğunu, yüksek yüklerde ise grafit içeriğinin aşınma direncini artırdığını göstermiştir. Tribolayer oluşumu, malzeme yüzeyinde sürtünme kaynaklı ısınmayı azaltmış ve aşınma geçişlerini önlemiştir [40].

Manohar et al. (2021), AA7075 matrisli grafit ile hem grafit hem SiC içeren hibrit kompozitlerin geleneksel sinterleme ve mikrodalga sinterleme ile üretilmesini ve özelliklerini incelemişlerdir. Mikrodalga sinterleme, geleneksel sinterlemeye kıyasla daha homojen bir mikro yapı, düşük porozite ve yüksek mekanik dayanım sağlamıştır. %7.98 kırılma uzaması ve yüksek çekme dayanımı gibi özellikler, bu yöntemin üstünlüğünü göstermektedir. Optimal grafen ve SiC oranlarının belirlenebilmesi için değişen oranlarda grafen ve SiC içeren kompozit yapılar sertlik, basma ve çekme özellikleri açısından kıyaslanmıştır. Sadece grafit içeren kompozitlerde en iyi sonuçlar %8 grafit içeriği ile alınırken, daha yüksek oranlarda özelliklerin negatif etkilendiği

görülmüştür. Hem grafen hem de SiC içeren yapılarda ise %8 grafen içeriğine değişen oranlarda SiC eklenmiş, %2 SiC oranında en iyi sonuçlar alınmıştır [41].

Daha iyi bir nihai özellik homojen dağılıma ve grafen ile Al matrisi arasındaki güçlü arayüzey bağına bağlıdır. Grafenin matris içinde iyi bir şekilde dağılıma kabiliyeti nedeniyle, grafen takviyeli Al kompozit üretiminde TM tercih edilmektedir. Grafen miktarı aynı zamanda nihai kompozit performansını belirlemektedir [42].

Kumar et al. (2020), Mg tabanlı metal matris kompozitlerin mekanik özelliklerini farklı toz metalurjisi parametreleri ile analiz etmişlerdir. Çalışmada takviye türü, ağırlık oranı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi faktörlerin etkileri incelenmiştir. Bulgular seramik takviyelerin sertlik ve mukavemeti artırdığını ancak sünekliği azalttığını göstermiştir. Grafen, karbon nanotüpler (CNT) gibi karbonlu takviyelerin hem sünekliği hem mukavemeti artırdığı ancak parçacıklar arası aglomerasyon problemleri olduğuna değinmişlerdir [43].

Zhang et al. (2018) 2009Al alaşımına toz metalurji ve sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) uygulamaları ile %1 oranında GNP ilavesi yapmışlardır. SKİ sayısının artması ile homojen bir GNP dağılımı elde edilmiştir. SKİ uygulama sayısının artması dayanım ve süneklik özelliklerinde azalmaya yol açmıştır. Daha fazla SKİ uygulamasının GNP'lerin boyutunu küçülterek (~500 nm'den 100 nm'ye) mekanik özelliklerde azalmaya neden olduğu, homojen olarak dağılmış olan GNP'lerin büyük özgül yüzey alanının kompozitlerin güçlendirilmesinde esas faktör olduğunu göstermişlerdir [44].

Khan et al. (2021) Al6061 toz matrise %0.1 GNP ve % 1 B<sub>4</sub>C ile takviye ekleyerek malzeme özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Mikroyapıda GNP ve B<sub>4</sub>C'nin homojen bir şekilde dağıldığı ve gözeneklerin küçüldüğü, T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerde ise yapısal homojenlik ve tane boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Sertlik 0.5 kg yük ile Vickers yöntemi uygulanarak ölçülmüş ve T6 ısıl işlemlenmiş numunelerde 90HV değerine ulaşılmıştır [45].

Hsieh et al. (2020), A6061 tozu içerisine değişen oranlarda grafen nanosheetleri ultrasonik işleme yöntemi ile eklemişler; mekanik, mikroyapı ve tribolojik özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir. %0.25 grafen oranlı numunelerde homojen dağılım elde edilmiş, mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ancak daha yüksek grafen oranı olan numunelerde sertlik, dayanım ve aşınma performanslarının olumsuz etkilendiği; buna ise aglomerasyonun sebep olduğu

gözenmiştir. Cylone modeli kullanılarak tahmin edilen mekanik özellikler %0.25 grafen için deneysel veriler ile uyumlu iken %0.50 grafen içeren numunelerde modelleme ve deneysel sonuçlar arasında sapma olduğunu tespit etmişlerdir. Daha yüksek grafen oranlarının aglomerasyon ve mikroyapısal bozulmalara neden olabileceği belirtilmiştir [46].

Zamani et al. (2019), Alüminyum-Grafit kompozitlerinin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi ve tribolojik davranışlarının değerlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın sonuçları, %3 grafit içeren kompozitin en iyi mekanik özelliklere ve aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Artan grafit içeriği mekanik özelliklerde düşüşe neden olurken, aşınma oranını ve sürtünme katsayısını azaltmıştır. %3 grafit içeriği, düzgün bir grafit tabakasının oluşumuyla aşınmayı önlemiş ve yüzeyde sabit bir tribolayer oluşturmuştur [47].

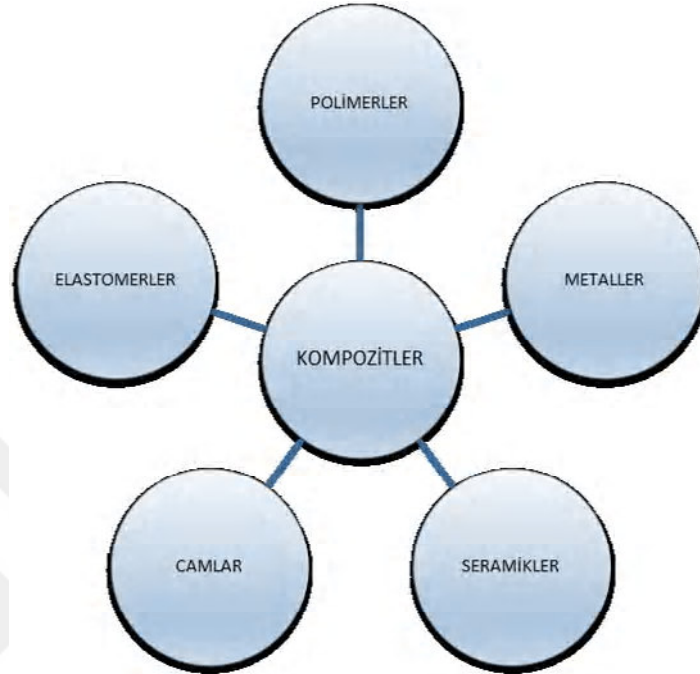
Liu et al., (2023), farklı oranlarda grafen nanoparçacıkların (GNP) 2024 Al matrisli kompozitlerin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bulgular, %0,5 GNP içeriğinin optimum sertlik (161.74 HV) ve çekme dayanımı (476 MPa) sağladığını göstermiştir. Ancak grafen içeriğinin artışı, korozyon direncini düşürmüştür. SEM ve XRD analizleri GNP'lerin homojen bir şekilde dağıldığını gösterirken, grafen artışının aglomerasyona neden olduğu görülmüştür [48].

Duntu et al, belirli oranlarda grafen, zirkonya ve alümina tozları homojen dağılım sağlamak için mekanik karıştırıcı ve ultrasonik işleme tabi tutmuşlardır. Grafen ve zirkonya miktarlarının dikkatli bir şekilde ayarlanması, istenen özelliklerin elde edilmesi için kritik öneme sahiptir. Grafen ve zirkonya, alümina matrisli kompozitlerde sinerjik etkiler göstermiştir. Zirkonyanın eklenmesi mikroyapısal bütünlüğü korurken, grafen dağılımı yüksek sıcaklıklarda sinterleme sırasında aglomerasyonu önlemiştir. Ancak grafenin miktarındaki artış belirli bir noktadan sonra aglomerasyon ve yüzey bozulmalarına yol açmaktadır [49].

## **1.2.Kompozit Malzemeler**

Klasik mühendislik malzemeleri olarak ifade edilen polimer, metal ve seramik malzemelerin yanı sıra kompozit malzemeler de mühendislik malzemelerinin bir alt kategorisi olarak değerlendirilmektedir.

Kompozitler, "iki ya da fazla metal olan veya olmayan ya da biri metal diğeri metal olmayan malzemenin iyi özelliklerinin başka bir malzemede bir araya getirilmesi ile oluşturulan yeni özellikteki malzemeler" olarak tanımlanır [50].



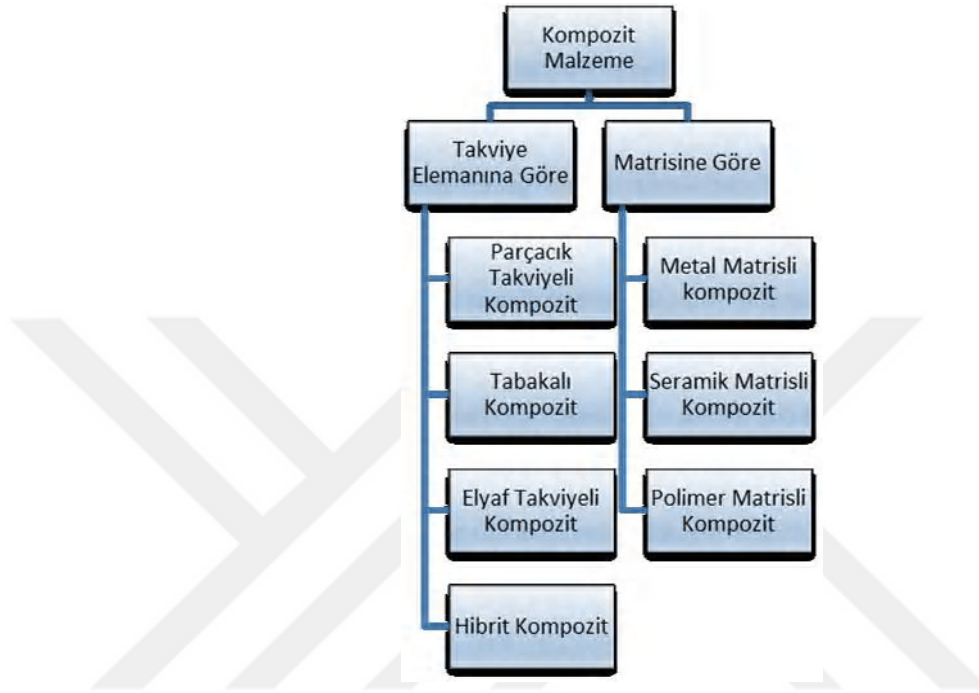
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerde kullanılan matris malzemeler

Kompozit üretiminde temel amaç, bileşenlerinden daha iyi özelliklere sahip malzeme üretilmesidir [51]. Malzeme mikroskobik olarak heterojen özellik gösterirken, makroskobik olarak homojen bir yapıya sahiptir.

Kompozit malzemelerde farklı malzeme sistemlerinin (metal, seramik, metal dışı) bir araya getirilebilmesiyle sınırsız olasılık oluşturulabilmesi en büyük avantajlarından. Üretilen yeni malzemeler özelliklerini bileşenlerin özelliklerinden almaktadır [51]. Metalik alaşımların aksine kompozit malzemelerde bileşenler kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korumaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılan matris malzemeler Şekil 1.2’de verilmiştir.

Kompozit malzemelerin ilk örnekleri çok eskilere dayansa da kompozit malzeme kavramının ortaya çıkması ile mühendislik alanı olarak kabul görmesi 1940’lı yıllarda olmuştur [4, 51]. 1960’lı yıllarla birlikte özellikle polimerik esaslı kompozit malzeme kullanımı artmıştır. Böylece teknolojiye bağlı olarak uygulama alanları da gelişmiştir [4].

Üretilen kompozit çeşitleri ve üretim yöntemlerindeki farklar nedeniyle ayrıca bir sınıflandırmaya ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 1.3'te kompozit malzeme çeşitleri verilmiştir.



Şekil 1.3. Kompozit malzeme çeşitleri

Matris malzemelerine göre gruplandırıldığında polimer, seramik ve metal matrisli kompozit malzemeler olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. SMK malzemeler yüksek sıcaklık direncine sahiptir ancak aynı zamanda kırılığandır.

PMK malzemeler MMK malzemelere göre daha düşük özgül malzeme dayanımı, düşük özgül rijitlik ve yüksek sıcaklıkta daha düşük mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca seramiklere göre daha yüksek tokluk gösterirler ve genellikle iyi aşınma ve sürtünme direncine sahiptirler [50].

MMK malzemeler seramikler gibi yüksek tokluk özelliğine sahiptirler. MMK'ler uzun yıllardır kullanılmalarına rağmen 20. yüzyılın ikinci yarısı itibarıyla yüksek performanslı kompozit malzemeler olarak kabul görmeye başlamışlardır [4]. Metal matris kompozitlerin genel olarak üstün özellikleri;

- Yoğunluğun düşük olması,
- Tekrar üretilebilir içyapı ve özellikler,

- Mukavemet ve esneklik modülünün iyi olması,
- Tokluk ve darbelere karşı yüksek dayanım,
- Yüzey sertliğinin yüksek ve yüzey çatlaklarına karşı hassasiyetin düşük olması,
- Sıcaklık değişikliklerine veya ısı şoklarına karşı oldukça duyarlı olması,
- Elektriksel ve ısı iletkenliğin yüksek olması,
- Aşınma direncinin yüksek olması,
- Yorulma direncinin iyi olması,
- Isıl genleşme katsayısının düşük olması,
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürtünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri,
- Mukavemet/yoğunluk oranının yüksek olması (spesifik mukavemet),
- Esneklik modülü/yoğunluk oranının yüksek olması (spesifik modül) olarak ifade edilebilir [52].

Al ve Al alaşımları MMK'lerde sıklıkla kullanılan matrislerdir. Alüminyum haricinde matris malzemeleri başta titanyum ve magnezyum olmak üzere çinko, bakır, demir, kurşun, gümüş, kalay, silisyum, nikel gibi metaller ve alaşımlardan oluşmaktadır [52].

Yaygın olarak kullanılan takviye elemanları SiC, Al<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, Bor ve grafitir. Takviye elemanı seçimi elastikiyet modülü, ergime sıcaklığı, yoğunluk, çekme dayanımı, kimyasal kararlılık, matris malzemesi ile uyumluluk ve maliyet dahil olmak üzere çeşitli faktörlere göre kategorize edilebilmektedir [53].

Tablo 1.3. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları [53]

<b>Matris</b>	<b>Takviye</b>	<b>Muhtemel Uygulamalar</b>
Alüminyum Magnezyum Kurşun Bakır	Grafit	Helikopter, uydu ve roket parçaları Uzay ve uydu parçaları Akümülatör klişeleri Elektrik kontaktı ve bağlantıları
Alüminyum Magnezyum Titanyum	Bor	Kompresör bıçakları ve yapı desteği Anten yapıları Jet motoru fan bıçakları
Alüminyum Titanyum	Bor	Jet motoru fan bıçakları Yüksek sıcaklık motoru ve fan bıçakları
Alüminyum Kurşun Magnezyum	Alümina	Füzyon güç reaktörlerinde süper iletken sınırlayıcısı Akümülatör klişeleri Helikopter iletim yapıları
Alüminyum Titanyum Co esaslı süper alaşım	Silisyum karbür	Yüksek sıcaklık yapıları Yüksek sıcaklık yapıları Yüksek sıcaklık motor parçaları
Süper alaşım	Molibden	Yüksek sıcaklık motor parçaları
Süper alaşım	Tungsten	Yüksek sıcaklık motor parçaları

MMK üretimi için farklı matris ve takviye fazlarının kullanılması, çeşitli tekniklerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Şekil 1.4 üretim sürecinde matrisin katı, sıvı veya buhar fazında bulunmasına bağlı olarak MMK üretim yöntemlerini göstermektedir [52].

Üretim yönteminin seçilirken üretilecek metal matrisli kompozitte aranan fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Aşağıda verilen değişkenler yöntem belirlenmesi yapılırken dikkate alınmalıdır;

- Çalışmanın yapılacağı sıcaklık
- Takviye malzeme şekli



genleşme sıcaklığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi, parçacık takviyeli AMK'lerin üretiminde diğer üretim yöntemlerine göre daha etkilidir. TM yöntemiyle üretilen AMK'de daha homojen bir mikro yapı elde edilir [55]. MMK'ler, otomotiv, uçak, savunma, spor ve cihaz endüstrilerinde geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Alüminyum ve SiC tozlarının bilyalı değirmen/mechanik alaşımlama sonucu homojen kompozit bir yapı oluşturmuşlardır. Ağırlıkça yüzde 5 ila 30 oranında SiC parçacıkları içeren AlSiCp kompozitlerinin sertlik, basınç dayanımı ve çekme dayanımında iyileşme gözlenmiştir [56].

Karaoglu et al. (2021), havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum MMK özelliklerini ve uygulamalarını incelemiştir. Bu çalışma; malzemelerin düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve termal performans gibi avantajlarını vurgulamaktadır. Havacılıkta kullanılan malzemelerin %80'inin alüminyum olduğu belirtilmiş, alüminyum MMK'lerin özel yapısal ve termal gereksinimlere uygun olarak tasarlandığı açıklanmıştır. SiC ve karbon gibi takviye malzemelerinin alüminyum ile birleştirilmesiyle elde edilen MMK'lerin sertlik, mukavemet ve aşınma direnci açısından önemli ölçüde gelişim sağladığı belirtilmiştir [57].

### **1.2.1. Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozitler**

Alüminyum esaslı metal matris kompozit (AMMK) malzemeler, hafif ve mekanik özellikleri iyi malzemelerdir. AMMK malzemelerde matris malzemesi olarak Al ve alaşımları, takviye malzemesi olarak ise genellikle SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, TiC ve grafit kullanılmaktadır. Al esaslı kompozitler mukavemeti ve elastiklik modüllerinin yüksek olması, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kapasitesi, yoğunluğunun ve ısıl genleşme katsayısının düşük olması, aşınma direncinin iyi olması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [50, 53].

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına seramik malzemelerin takviyesi malzeme mukavemetini ve aşınma direncini arttırmaktadır. Bu da matris içerisinde homojen ve uniform olarak dağılan takviye malzemesi ile mümkün olmaktadır. Aksi takdirde malzeme içerisinde meydana gelen topaklanma ve/veya homojen olmayan takviye dağılımı süneklik, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklerin bozulmasına neden olacaktır [50].

Mikro/nano SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve grafit parçacıklarıyla güçlendirilmiş mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştiren mikroyapısal özellikler kazanan alüminyum

bazılı kompozit malzemeler otomotiv ve havacılık endüstrileri başta olmak üzere piston, silindir, motor bloğu ve fren gibi parçaların ekonomik olarak üretilmesine olanak sağlamaktadır. Matris malzemesinin takviye içeriği arttıkça kompozit malzemenin sertliğinin yanı sıra darbe dayanımı, aşınma direnci ve termal özellikleri de iyileşmektedir. Sinterleme ayrıca TM'nin özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [58]. Kullanılan alaşım sistemleri elementlerin güvenli çözümleri sıcaklıklarında katı çözünürlüğü ile sınırlı olduğundan, iyileştirmeler sınırlı olmaktadır. TM tarafından üretilen fiber takviyeleri ve hızlı katılaştırma teknikleri sayesinde bu sınırlamalar ortadan kaldırılmıştır [59].

Zhou et al. (2021), 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının havacılık yapılarına yönelik gelişmelerini ve uygulamalarını incelemiştir. Çalışmada bu alaşımların yüksek özgül mukavemet, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca 7xxx alaşımlarının ısı işlem süreçleri karşılaştırılarak çözümleri alma, yaşlandırma ve söndürme işlemlerinin mukavemet ve tokluk üzerindeki etkileri incelenmiştir. Alaşımların korozyon direnci ve mukavemet dengesini iyileştirmek için yeni nesil ısı işlem rejimlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [60].

### 1.2.2.SiC

SiC Metal matrisli kompozitlerde kullanılan önemli takviye elemanlarından biridir [61]. Parçacık ve kırpıntı (whisker) tipinde SiC takviyeleri kullanılarak yapılan metal matrisli kompozit malzemelere plastik şekillendirme uygulanabilmektedir [62].

MMK üretiminde geniş yer bulan silisyum karbürün en belirgin özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Sertlik ve aşınma direncinin iyi olması,
- Korozyon direncinin iyi olması,
- Ani sıcaklık değişimlerine karşı dirençli olması,
- Isıl iletiminin çeliğe göre daha yüksek olması,
- Isıl genleşmesinin çok düşük olması [63]

Günümüzde kaliteli ve ucuz parçacıklar ile kısa fiberlerin geliştirilmesi MMK.'ların daha ucuz olarak üretilmesine olanak sağlamıştır [63]. Termal, mekanik ve kimyasal özellikleri son derece zorlu ortamlarda kullanılabilmesine de olanak sağlamıştır [64]. Takviye elemanı olarak SiC veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmış alüminyum alaşımlı kompozitler

uzay ve otomotiv endüstrilerinde, contalarda, gerilmeye maruz kalan rulmanlarda, valflerde, pompa parçalarında kullanılmaktadır [65].

Wang et al. (2008), SiC/Cu-Al kompozitlerinin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve özelliklerini analiz etmişlerdir. Çalışmada 700°C'de maksimum sertlik (80 MPa) elde edilmiş ancak daha yüksek sıcaklıklarda SiC ayrışması ve mikroyapısal bozulmalar gözlenmiştir. XRD ve SEM analizleri faz oluşumlarını ve parçacık ayrışmasını doğrulamış; mikroyapısal stabilite ve mekanik dayanım arasında güçlü bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Hem sünek hem de gevrek kırılma özellikleri gözlenmiştir [66].

Rofman et al. (2022), AA2024 matrisli SiC takviyeli metal matrisli kompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmesini incelemişlerdir. Çalışmada, SiC oranlarının (%2, %10 ve %20) yoğunluk, sertlik ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, artan SiC oranının sertliği artırırken, yüksek oranlarda gevrek kırılmaya neden olduğunu göstermiştir. Sıkıştırma testleri bu kompozitlerin termomekanik işlemler için uygun bir süneklik sergilediğini ortaya koymuştur [67].

Sahin and Erturun (2024), Al-Cu-Mg-Zn matrisli SiC takviyeli kompozitlerde bakır içeriği ve alaşımlama süresinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada yüksek enerjili bilyeli öğütme yöntemi kullanılarak alaşımlar üretilmiş ve sinterleme işlemleri argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri bakır içeriğinin artmasının kristal boyutu küçülttüğünü ve kafes deformasyonunu artırdığını göstermiştir. SEM analizleri homojen mikro yapılar ve kuvvetli ara yüzey bağları tespit etmiştir. Vickers sertlik testleri bakır içeriğinin mekanik dayanımı artırdığını, ancak süneklikte azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur [68].

Surya et al, AlSiC malzemelerin üretimini incelemiş ve SiC oranı %15'in üzerine çıktığında yüksek kırılma gösterdiklerini, alüminyum parçacıklarında bağ oluşumunun azaldığını göstermişlerdir [69]. SiC takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin değişen mekanik alaşımlama sürelerinden önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir [70].

### **1.3.Toz Metalurjisi**

Toz metalurjisi metal tozlarının üretimini ve ardından bunların katı nesnelere halinde konsolidasyonunu içeren bir üretim sürecidir. Bu işlem diğerlerinin yanı sıra dişliler,

yataklar, mıknatıslar ve yapısal parçalar gibi çok çeşitli metalik bileşenleri üretmek için kullanılmaktadır.

Toz metalurjisi malzemelerin sentezi, işlenmesi ve şekillendirilmesi için geliştirilmiş bir işlemler grubudur. Günümüzde toz üretimi ve konsolidasyonu için birçok teknoloji mevcuttur. Mekanik alaşımlama toz üretiminde önemli bir rol oynar [71]. Belirli bir tozun özelliklerini belirlemek için kullanılan farklı ölçümler vardır. Tozlar saf elementler, alaşımlar veya elementel tozlar, alaşımlı tozlar ile hem elementel hem de alaşımlı tozların bir kombinasyonu olabilir. Malzeme ve toz üretim yöntemi bir tozun özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir [72].

Metalik, seramik veya kompozit tozlardan parça üretimine olanak sağlayan toz metalurjisi tekniği hemen hemen her malzemeye uygulanabilir ve dökümde olduğu gibi net şekilli parçalar üretilebilir. Toz metalurjisi birbiri içerisinde çözünmeyen tozlar, refrakter malzemeler, sermetler, bakırlı çelikler, intermetalikler, refrakter malzemeler ve karışık fazlı bileşimlerden oluşan yüksek ergime sıcaklığına sahip seramikler üretmek için kullanılabilir [13].

Malzemelerde istenilen özelliklerin elde edilebilmesi oluşan fazların boyut, şekil ve miktarları bakımından mikroyapısı kontrol edilerek sağlanabilmektedir.

Sudha et al. (2020), toz metalurjisi ile üretilen alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve aşınma davranışını kapsamlı bir şekilde gözden geçirmişlerdir. Çalışma çeşitli takviye türlerinin ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ) kompozitlerin sertlik, dayanıklılık ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini vurgulamıştır. Takviye içeriğinin artması aglomerasyon sebebiyle sertliğin azalmasına, yüksek sıcaklıkta sinterleme taneciklerin irileşmesine neden olmaktadır. Toz metalurjisinin düşük maliyetli üretim ve yüksek performanslı malzeme elde etmek için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır [73].

Chouhan et al. (2021), toz metalurjisi ile üretilen alüminyum numunelerin yüksek gerinim hızlarındaki davranışını incelemiştir. Çalışmada dört farklı örnek sinterlenmiş ve gerinim hızlarına karşı mukavemet özellikleri analiz edilmiştir. Bulgular öğütme işleminin mukavemeti artırdığını ve gevrek hasar moduna neden olduğunu ortaya koymuştur. Kaya tuzu içeriği yoğunluğu düşürmüş ve kırılma davranışını gevrek hale getirmiştir. Çalışma toz metalurjisinde kullanılan işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki kritik etkilerini vurgulamaktadır [74].

Danninger et al. (2017), toz metalurjisi ve sinterleme yöntemlerinin tarihçesini, üretim süreçlerini ve endüstriyel uygulamalarını detaylandırmışlardır. Çalışmada toz metalurjisinin ekonomik avantajları, şekillendirme teknolojileri ve sinterleme mekanizmaları ele alınmıştır. Ayrıca yüksek performanslı alüminyum ve titanyum alaşımları gibi malzemelerin üretiminde toz metalurjisinin önemine değinilmiştir. Çalışma enerji tasarrufu ve yeşil üretim gibi avantajlarıyla toz metalurjisinin modern endüstrideki rolünü vurgulamaktadır [75]. Oveisi and Garamipour (2019), alumina takviyeli alüminyum nanokompozit metal köpüklerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada hafif ve dayanıklı malzemelerin üretiminde toz metalurjisinin önemi vurgulanmaktadır [76].

### **1.3.1.Toz Metalurji Yönteminin Avantajları**

TM yönteminin tercih edilmesindeki en büyük etken parça üretimindeki avantajlarıdır. Yöntemin avantaj ve dezavantajlarının kavranabilmesi bazı parametreler incelenmelidir. Bu parametreler arasında maliyet, fiziksel ve mekanik özellikler, toleranslar, malzeme sistemleri, şekil boyutları ve şekil karmaşıklığı yer alır. Bu parametreler göz önüne alındığında dövme ve döküm gibi yöntemlere göre toz metalurjisi yönteminin hem avantajları hem de dezavantajları vardır.

Toz metalurjisinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [77]:

- İyi yüzey kalitesi ve dar boyut toleransı elde edilebilmesine olanak sağlaması,
- Dövme ve döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek dayanım, sertlik ve yoğunlukta daha kaliteli ve daha ekonomik malzemeler üretilebilmesine olanak sağlaması,
- Ham malzemelerin %99'unun kullanılması sayesinde malzeme kaybını azalması,
- Gözenekli yapıya sahip malzemelerin istenilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmasını sağlaması,
- Termal dayanımı ve mukavemeti yüksek kristal ve amorf yapıların yalnızca bu yöntem kullanılarak üretilebilmesi,
- Küçük boyutlu karmaşık yapıları şekillerin seri bir şekilde üretilmesine olanak sağlaması,
- Başka yöntemle üretilmesi mümkün olmayan, ergime sıcaklığı yüksek refrakter (tantalyum, tungsten, molibden vs.) ve sert metallerin üretimine ekonomik olarak olanak sağlaması,

- Kompozit malzemelerin rahatlıkla üretilmesine olanak sağlaması,
- Yüksek kalitede ve hızlı parça imalarına olanak sağlaması diğer klasik yöntemlere göre daha kullanılabilir kılmıştır.

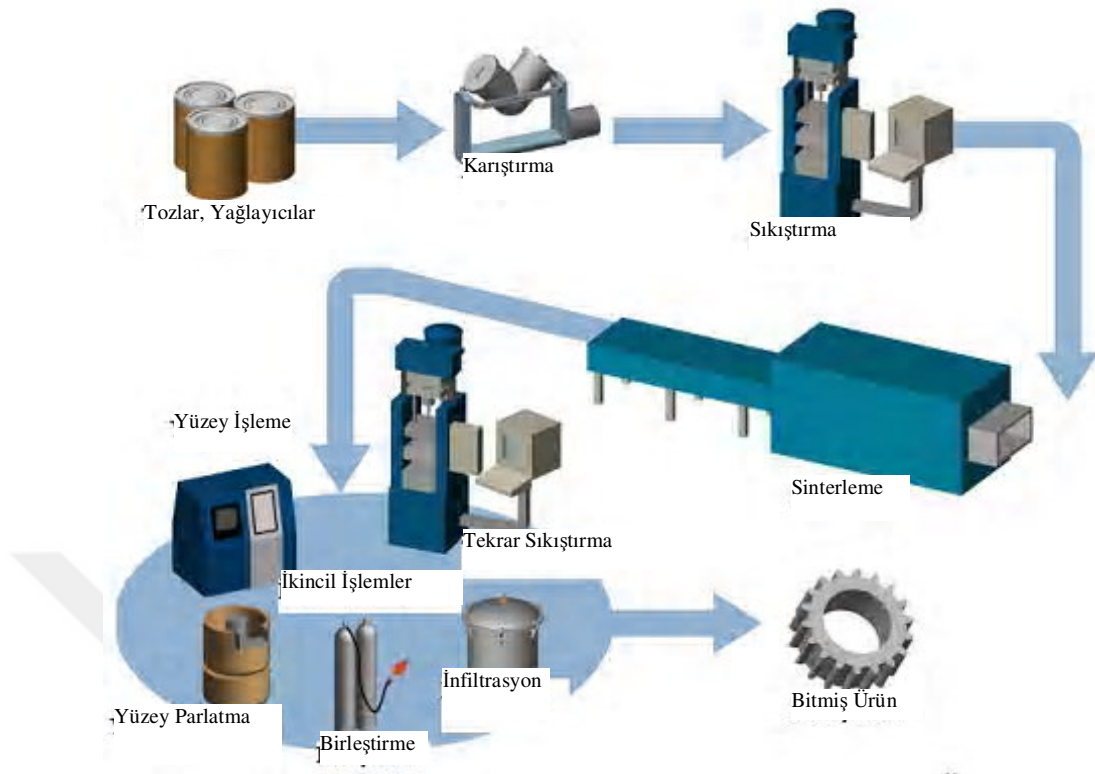
### **1.3.2.Toz Metalurji Yönteminin Dezavantajları**

TM yönteminin avantajları gibi çeşitli dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmaktadır;

- Yüksek mukavemet gerektiren malzemelerde gözenek doldurma ve infiltrasyon gibi ikincil işlemler gereklidir; aksi takdirde diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha kötü mekanik özellikler elde edilebilir.
- Seri üretim yapılmadığı takdirde ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir, (özellikle sıkıştırma ve sinterleme maliyetleri),
- İngot malzemenin metal tozlardan daha ucuz olması,
- Çok büyük boyutlu parçaların üretilmemesi [77].
- Sinterleme sırasında hacim küçülmesi olması (kalıp tasarımında boyut toleransı)
- Seri üretimde tozların kalıplara zor akması şeklindedir [13].

### **1.3.3.Toz Metalurjisi İşlem Basamakları**

Toz metalurjisi tekniğinde bir ürün oluşturulabilmesi için beş aşamalı bir süreçten geçilmesi gerekmektedir. Toz metalürjisi işlemi tipik olarak; toz üretimi, toz karıştırma, sıkıştırma, sinterleme ve bitirme işlemlerinden oluşmaktadır. Şekil 1.5'te TM yöntemine ait üretim basamakları şema şeklinde gösterilmektedir.

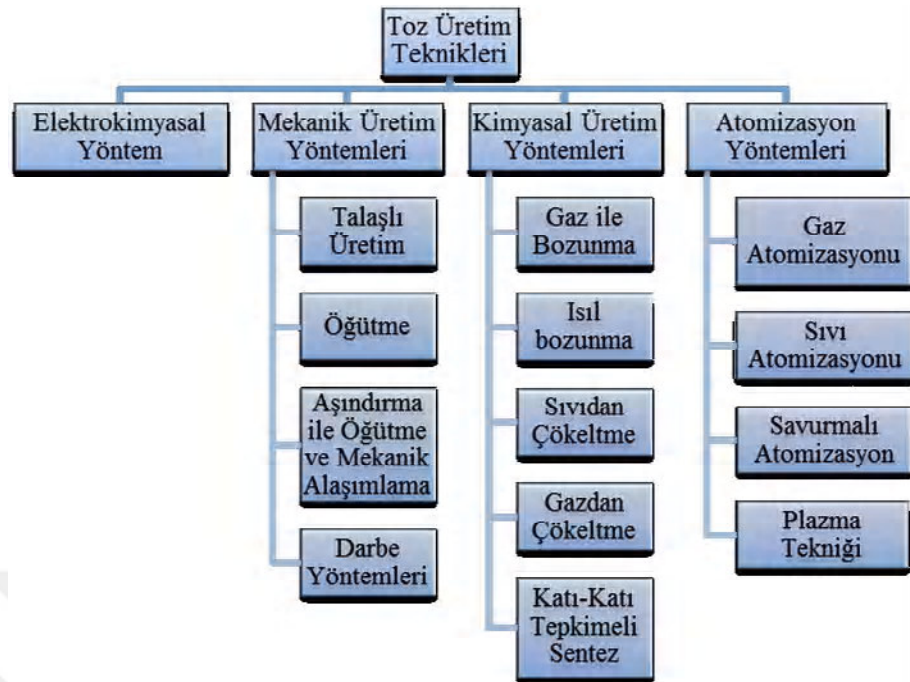


Şekil 1.5. Toz metalurjisi akım şeması [4]

Güncel teknolojik gelişmeler toz metalürjisinin geleceği konusunda belirleyici niteliktedir. Özellikle otomotiv endüstrisinin ihtiyacı olan yorulma dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [78]. Bunun yanısıra bilgisayar, ev ekipmanları ve medikal uygulamalarda da tercih edilen yöntemlerden biridir.

Gelişen teknolojiler 200 µm hatta daha küçük boyutlarda metal tozları kullanarak üretim yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Dünyada bilinen elementlerin birçoğu toz haline getirilebilmektedir. Tozların üretiminde kullanılan yöntemler tozun şekli, boyutu, mikro yapısı, maliyeti ve diğer birçok özelliklerinde değişkenlik olmasına sebep olmaktadır. Şekil 1.6'da bu yöntemlerden bazıları belirtilmiştir [13].

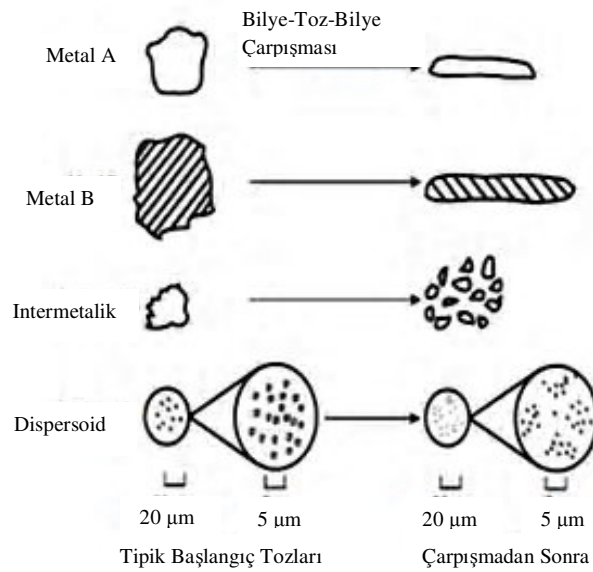


Şekil 1.6. Toz üretim teknikleri [13]

#### 1.4.Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama düşük sıcaklıkta alaşımların sentezlendiği, toz malzemeler için homojen mikroyapılar oluşturmak amacıyla öğütme, soğuk kaynaklanma, yeniden kırılma ve kaynamaya maruz kaldığı bir süreçtir [13, 79]. Bu teknikle uniform ve ince taneli yapı elde edilmektedir. Oda sıcaklığında kontrollü mikro yapılara sahip kompozit metal tozları üretmek için etkili ve çok yönlü bir yöntemdir [79]. Mikro sertlik testi sonuçlarına göre alaşımlama süresi arttıkça sertliğin arttığı gözlemlenmiştir. Yumuşak Al matrisinde sert seramik parçacıklarının artması ve Al matris ile seramik parçacıkları arasında iyi bir arayüz oluşması nedeniyle kompozitlerin sertliği artmaktadır [80].

1966 yılında JS Benjamin tarafından mekanik alaşımlama tekniği geliştirilmiştir [79].



Şekil 1.7. Mekanik alaşımlamada başlangıç tozlarının tipik bileşenleri [62]

Şekil 1.10’da görüldüğü gibi sünek metal tozları (Metal A ve Metal B) yassılaştırmaktadır. Buna karşılık gevrek intermetalik ve dispersoid parçacıkları malzeme içerisinde daha küçük partiküller halinde ve eşit dağılmaktadır [79].

Mekanik alaşımlamanın avantajları aşağıda verilmiştir.

- Homojen yapı elde edilmesi sayesinde segregasyon ve aglomerasyon problemlerinin ortadan kalkması
- Termodinamik olarak alaşımlamada kompozisyon sınırlaması olmaması büyük ve üretimi zor olan malzemelerin üretimine olanak sağlaması
- Tek seferde çok miktarda toz üretimi ve alaşımlamasını mümkün kılması
- Ayrıca bu toz ve alaşımların fabrikasyonunun da kolay olması
- Termomekanik işlem sırasında tane yapısının kontrol edilebildiğinden dolayı farklı özelliklere sahip malzemelerin üretimine olanak sağlaması
- Kompozit üretiminde takviye malzemesinin tane boyutunun ortalama olarak küçültülmesi ve matris içerisinde homojen olarak dağıtılması [62].

Mekanik alaşımlamanın dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Tozun kirlenmesi öğütme sırasında yeni yüzeylerin oluşması, toz zerreciklerinin küçük boyutu ve geniş yüzey alanı gibi bir dizi faktörden kaynaklanmaktadır.
- Kalıp içerisinde sınırlı toz akışı olması
- Aşınmaya karşı öğütme haznesinin öğütülen tozdan dayanıklı olması

- Karmaşık şekilli parçalarda yoğunluğun her yerde aynı olmaması
- Çok fazla parametre olması en büyük dezavantajlarından [62].

#### 1.4.1.Öğütücüler

Mekanik alaşımlama işleminde istenilen mikroyapı ve fazın elde edilebilmesi için çok sayıda değişkenin kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Bu faktörlerin bazıları; öğütücü türü, öğütme hızı, öğütme kabı, öğütücü boyutu, öğütücü türü, bilye/toz oranı, öğütme kabı doluluk oranı, öğütme atmosferi, işlem kontrol etkenleri ile öğütmenin gerçekleştiği sıcaklıktır [79].

Kullanılan öğütme kabının şekli düz ve konkav olmak üzere iki çeşittir. Düztabanlı kaplarda konkav kaplara kıyasla 3 ve 6 saatlik öğütme sürelerinde alaşımlanma miktarı daha yüksektir. Düztabana ait öğütme kabında 9 saatte elde edilen alaşımlamanın konkav tabanlı öğütme kabında 15 saatlik öğütme süresinde elde edildiği görülmüştür [81].

Mekanik alaşımlamada kullanılan farklı öğütücüler tek eksenli ve yüksek enerjili bilyeli öğütücüler olmak üzere iki ana sınıf altında toplanmaktadır.

Yüksek enerjili öğütücüler atritörler, spextm (çalkalayıcı öğütücüler), gezegen tipi öğütücüler olarak sınıflandırılmaktadır [2, 13].

Spex tipi çalkalayıcı değirmenler tek seferde ortalama 10-20 gram civarında toz öğütebilen laboratuvar tipi öğütücülerdir [2, 13]. Haznesi tozu, öğütmede kullanılan bilyeleri tutmakta ve dakikada birkaç bin defa ileri-geri ve sağ-sol hareketi yapmaktadır. Haznenin her salınımında bilyeler ile tozlar çarpışmakta ve haznedeki toz hem öğütülmekte hem de karışmaktadır. Spex tipi değirmenlerdeki yüksek enerji sıcaklık artışı ve koruyucu atmosfer problemlerine sebep olabilmektedir [62, 79]. Spex değirmen Şekil 1.8'de görülmektedir.



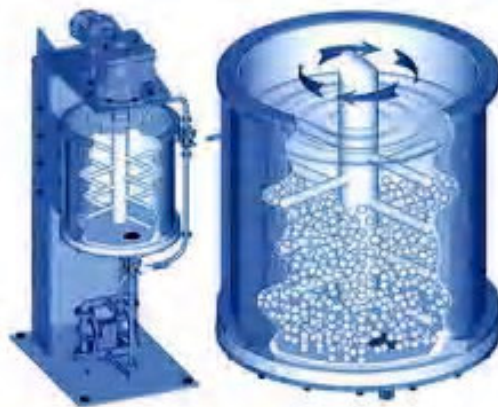
Şekil 1.8. Spex tipi karıştırıcı

MA amacıyla kullanılan bir diğer öğütücü tipi de “planetary” yani bilyeli değirmenlerdir (Şekil 1.9). Bu tip değirmenlerde spex tipinden farklı olarak birkaç yüz gram toz tek seferde öğütülebilmektedir. Bu değirmenlerin hazneleri gezegen gibi hareket ettiğinden "gezegen" olarak adlandırıldı. Dönen bir destek diski üzerine yerleştirilmiştir ve özel bir mekanizmanın yardımıyla kendi eksenleri etrafındaki hareketlerini almaktadır. Hazne içinde alaşımlanan malzeme ve öğütme bilyeleri; kendi eksenleri etrafında dönen haznelerin merkezkaç kuvveti ve dönen destek diskinin ilave kuvveti tarafından etkilenir. Hazne ve destek diski oluşan merkezkaç kuvvetler sırasında aynı ve zıt yönde hareket eder. Bilyeler bu sistemde haznenin iç duvarlarından aşağıya doğru hareket eder. Sürtünme etkisi alaşımlanan malzeme ve öğütme bilyelerinin serbest kalıp hazne içinde dolaşması ve karşı duvara çarpmasıdır. Spex değirmenleri daha az enerji gerektirmektedir [62, 79].



Şekil 1.9. Planetary tipi bilyeli değirmen [62]

Bir diğer MA değirmeni çeşidi olan atritör (Şekil 1.10) birkaç gramdan 45 kg'a kadar toz öğütülebilen öğütücülerdir. Atritörlerin enerjisi düşüktür ve hızı spex öğütücülerden çok düşüktür. Farklı boyut ve kapasiteli çeşitleri vardır. Öğütme tankları veya kapları alümina, silisyum karbür, silisyum nitür, zirkonya, kauçuk ve poliüretan malzemedendir. Cam, çakmaktaşı, silisyum karbür, silisyum nitür, alümina, zirkonyum silikat, zirkonya, paslanmaz çelik, karbon çeliği, krom çeliği ve tungsten karbür gibi öğütme ortamları da mevcuttur [2]. Bununla birlikte işlem sırasında sıcaklığın kontrolü dış kazan etrafında soğutma sıvısı dolaştırılarak kontrol edilebilmektedir [62, 79].



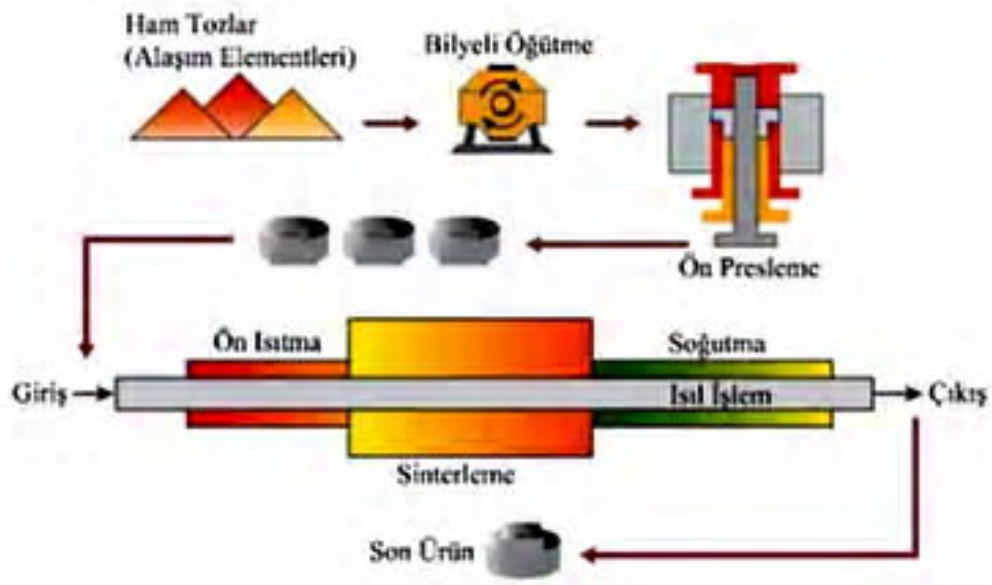
Şekil 1.10. Atritör tipi (dikey) bilyeli değirmen [51]

Tek eksenli öğütücüler; düşük enerjili öğütücüler, tumbler bilyeli öğütücü, tumbler rod öğütücü olarak genellenebilmektedirler [3].

### 1.5.Sinterleme

Sinterleme işlemi yüksek sıcaklıkta ham toz parçanın istenilen kalite, şekil ve boyuta sahip bir ürüne dönüştürülmesi işlemidir. Sinterleme belirli morfolojideki tozların boyutları ve gözeneklilik oranı değiştirilerek malzemeye fiziksel ve mekanik özelliklerini kazandırabilmek, daha az gözenekli veya %100 yoğunluğa yakın malzeme üretilebilmesi amacıyla metal ya da seramik ham malzemelere uygulanmaktadır. Atomların hareketi katı maddenin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir. Sinterleme işlemiyle sıkıştırılan tozların mukavemetli bir şekilde bağlanması amaçlanmaktadır [78].

Sinterleme işleminin şematik gösterimi Şekil 1.11’de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Sinterleme işlemi [2]

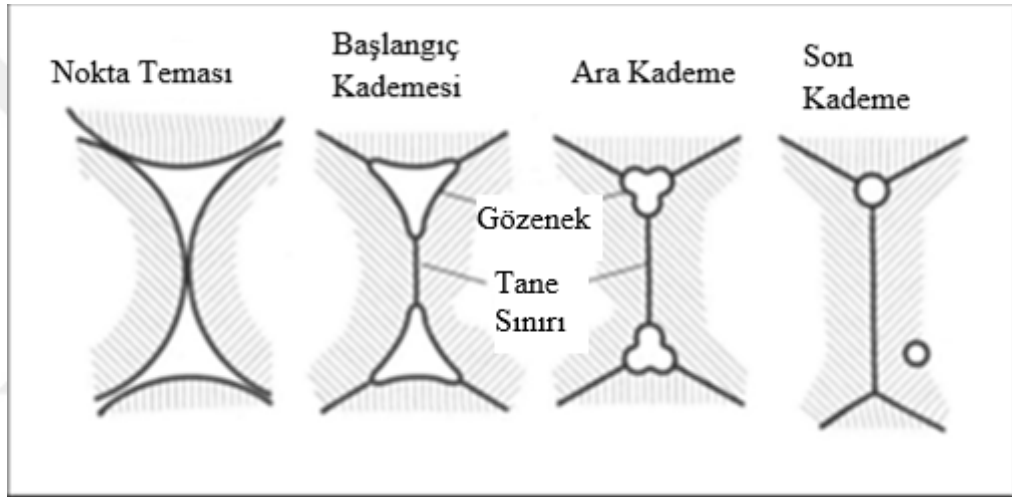
Sinterleme süreçleri malzemelerde istenen veya istenmeyen değişikliklere neden olmaktadır [4]. Sinterleme ile meydana gelen en büyük değişiklikler aşağıdaki gibidir;

- Dayanım, elastik modül,
- Sertlik, kırılma tokluğu,
- Elektrik ve termal iletkenlik,
- Gaz ve sıvı geçirgenliği,
- Ortalama olarak tane sayısı, boyutu ve şekli,

- Tane şekli ve sınırları,
- Kimyasal bileşim ve kristal yapı.

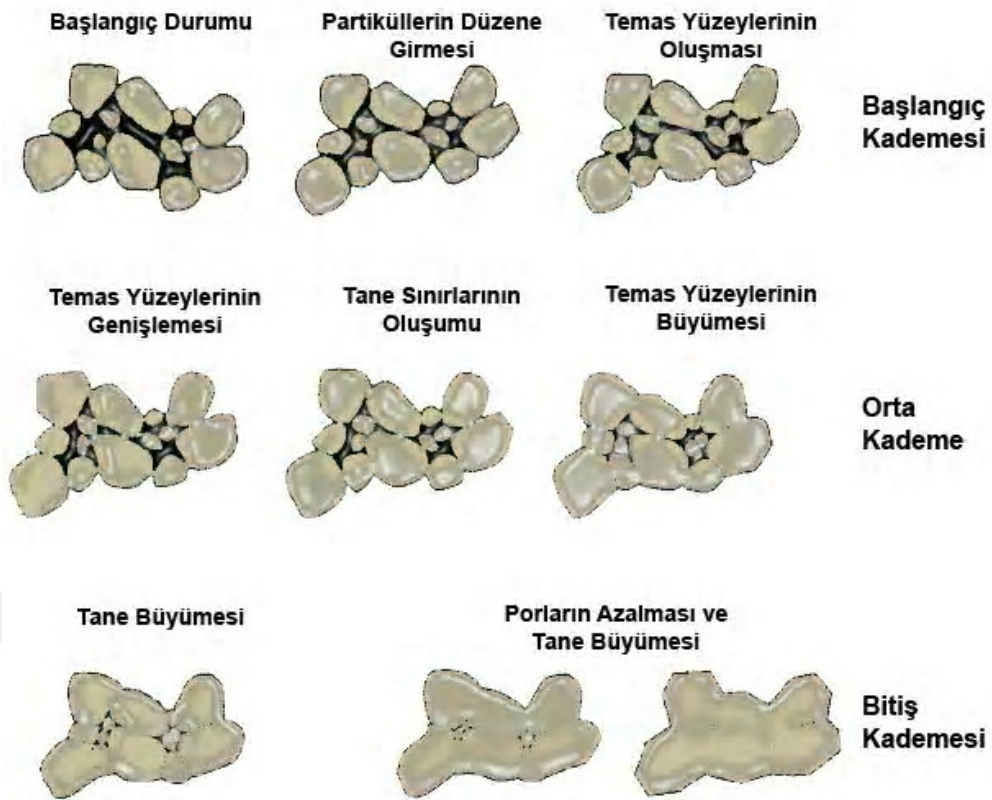
Sinterleme işleminde verilen ısı enerjisi ile parçacıklar arasında oluşan bu bağlar mukavemeti artırırken sistemin enerjisi ise düşmektedir. Taneler büyümekte, tane sınırları azalmakta, serbest yüzeyler ve yüzey enerjisi azalmaktadır [4, 10, 54].

Nokta teması ile küresel şekilli toz parçacıklarının etkileşimi başlamakta ve parçacıklarda boyun büyümesi ile tane sınırı oluşmaktadır. Tane sınırı köşeleri zamanla büzülmeye başlamakta ve oluşan gözenek kanalları kapanarak kapalı gözenekler meydana gelmektedir.



Şekil 1.12. Sinterleme esnasında gözeneklerdeki değişim [10]

Şekil 1.12'de Sinterleme esnasında gözenek yapısındaki değişim aşamaları görülmektedir. Sinterlemenin ilk aşamalarında toz sınırları kalkar ve tane büyümeye devam ederken sinterlemenin son aşamasında gözenek dairesel hal almaktadır. Sinterlemenin farklı kademelerinin şema olarak gösterimi Şekil 1.13'de gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Sinterlemenin farklı kademelerinin şematik gösterimi [82]

Sinterleme toz boyutu, sıcaklık, alaşım elementlerinin ham yoğunluğu ve sinterleme atmosferi gibi birçok faktör tarafından etkilenir. Sinterleme döngüsünde birincil amaç tozlar arası bağın istenilen seviyeye getirilmesidir. Preslenerek sinterlenecek tozların yüzeyinde oksit veya sinterlemeyi etkileyecek tabakaların bulunmaması ikinci amaca hizmet eder. Oksit tabakasının oluşması durumunda sinterleme çok verimsiz olacaktır [82].

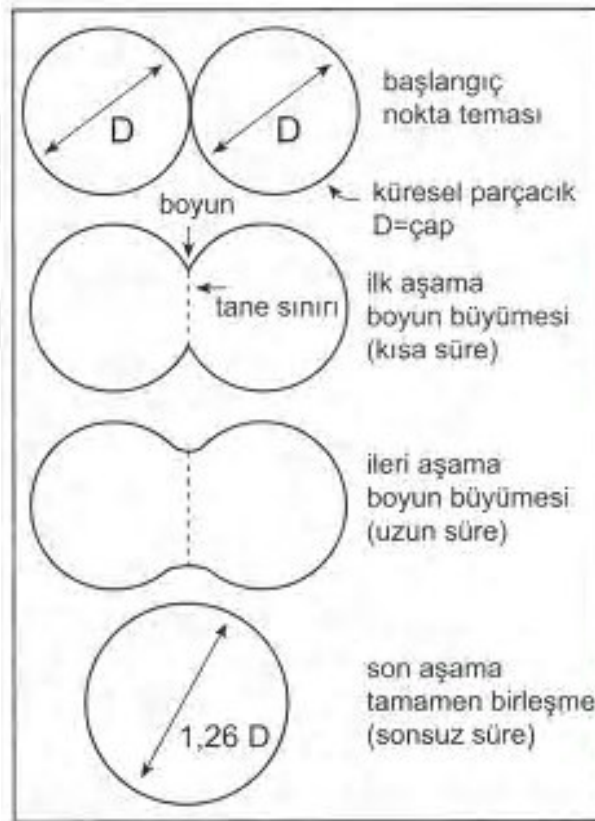
Sinterleme sırasında kullanılan atmosfer çok önemlidir. Sinterleme atmosferinin birincil görevi yüksek sıcaklıkta oluşan kimyasal tepkimelerin kontrol edilerek istenmeyen fazların engellenmesidir [4]. Ek olarak atmosfer, bağlayıcı veya yağlayıcı giderme, numunelere ısı iletilmesi, zararlı katkıların oluşumunun önlenmesi ve kimyasal bileşimin son halinin (karbon ve azot seviyeleri gibi) kontrol edilmesi gibi faktörlerin kontrol edilmesinde kritik öneme sahiptir [4, 82].

Herhangi bir malzeme grubunun belirli bir ideal sinterleme atmosferi yoktur [4]. Sinterleme için hava, azot, argon, oksijen, hidrojen ve gaz içeren atmosfer kullanılır. Bu kimyasal reaksiyonları kontrol altında tutabilmek için atmosferin safsızlık seviyesi bilinmelidir.

Sinterleme süreci katı hal sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesi olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerin yanısıra geçici sıvı faz sinterlemesi ve viskoz akış sinterlemesi gibi yöntemler kullanılabilir [4].

### 1.5.1.Katı-Hal Sinterleme Teorisi

Sıkıştırılan tozlar ısıtıldığı zaman parçacıklar arasında bağlar oluşmaya başlamaktadır. Mikro boyutta toz taneciklerinin temas noktalarında kohezif boyun büyümesi bağlanmayı açıklamaktadır. Bu mekanizma iki küre modeli (Şekil 1.14) ile açıklanabilmektedir [82].

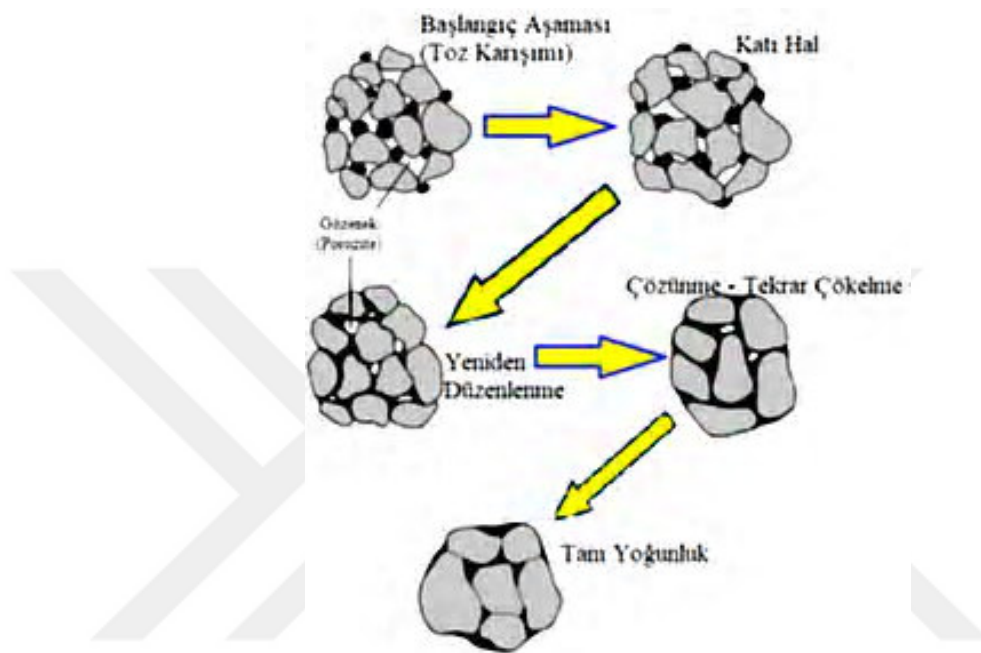


Şekil 1.14. Bağ oluşumu ve iki küre modeli [4, 82]

Parçacıklar arası temas noktasındaki boyun büyümesi ile tane sınırları oluşmaktadır. Birbiriyle temas halindeki iki partikül birleşerek iri bir partikül oluşturmaktadır. Toz malzemeyi oluşturan yapı içerisinde her bir partikülün birbirine temas ettiği birçok nokta vardır. Her bir temas noktasında katı-buhar ara yüzeyinin yerini alan farklı bir tane sınır oluşmaktadır. Sinterleme süresi yeterli olursa birleşen iki partikülün başlangıç çapının 1,26 katı olan tek bir küresel partikül oluşmaktadır [4].

### 1.5.2.Sıvı Faz Sinterlemesi

Katı tozlar ve sıvı fazın aynı ortamda bulunması sonucunda parçacıklar arası bağ oluşmaktadır. Sinterleme sıcaklığında malzemenin belirli bir kısmı eriyerek sıvı hale gelmektedir. Sıvı fazın kılcal çekim kuvvetleri parçacıkları birbirine çekmekte ve herhangi bir basınç olmaksızın hızlı bir yoğunlaşma gerçekleşmektedir (Şekil 1.15) [4].



Şekil 1.15. Sıvı faz sinterlemesi ve mekanizması [4, 69]

Sıvı faz sinterlemesinde kimyasal olarak birbirlerinden farklı yapılardaki tozlar kullanılmaktadır. Erime noktası düşük olan elementin sıvılaşarak katı taneleri ıslatarak bir çözünme ortamı oluşturması ile meydana gelmektedir. Sıvı faz taneler arasındaki sınırları ve boşlukları doldurarak yoğunlaşmayı sağlamaktadır [4].

Sıvılardaki difüzyon hızlarının yüksek olması katı hal mekanizmasına göre hızlı bağlanmaya ve yoğunlaşmaya sebebiyet vermektedir. Bu sinterleme sisteminde ısıtma ile yapıda kısmen katı hal sinterlemesi oluşmaktadır. Sıvı faz oluşumundan sonra yoğunlaşma yeniden düzenleme, çözelti-yeniden çökme ve son aşama sinterlemesi olmak üzere üç aşamada olmaktadır [83].

Sıvı faz sinterlemenin gerçekleşmesi için bazı sağlanması gereken bazı koşullar vardır. Bu koşullar;

- Başlangıçtaki katıların kompozisyonu ayarlanırken ısıtma neticesinde belli bir miktar sıvı oluşturulacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

- Katı fazlar oluşan sıvı ile belirli oranda çözülebilmelidir.
- Katı taneler oluşan sıvı ile tamamen ıslatılabilmelidir [4].

Sıvı faz sinterlemenin katı hal sinterlemeye kıyasla çok daha hızlı gerçekleşmesi ile uniform ve tam yoğunluk sağlaması iki önemli avantajıdır [4].

### **1.5.3.Alüminyum Alaşımlarının Sinterlenmesi**

Alüminyum tozunun yaklaşık 600-650 °C'ye ısıtılarak birleştirilmesi işlemidir. Sinterleme işlemi toz halindeki alüminyum malzemenin yoğunlaştırılması amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Alüminyum alaşımlarının farklı bileşimlerde ve şekillerde üretilmesine olanak sağlayan yöntem aynı zamanda alüminyum alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesine ve üretim maliyetlerinin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. Sinterleme işlemi ile alüminyum alaşımları yüksek mukavemet, sertlik, düşük yoğunluk ve iyi yorulma direnci gibi özellikler kazanmaktadır.

Alüminyum alaşımları yüksek sıcaklıkta sinterlenirken oksitlenme eğilimi gösterirler; bu nedenle sinterleme işlemi vakum altında veya inert gaz atmosferi altında gerçekleştirilmelidir. Sinterleme işlemi genellikle iki adımdan oluşur; presleme ve sinterleme. Presleme adımında toz karışımı kalıplara yerleştirilmekte ve yüksek basınç altında sıkıştırılmaktadır. Sinterleme adımında ise sıkıştırılan tozlar, yüksek sıcaklıkta fırınlanarak alaşım parçaları elde edilmektedir. Bu işlem alüminyum alaşımlarının çeşitli endüstrilerde kullanılmasını sağlamaktadır. Örneğin; sinterleme otomotiv endüstrisinde fren balatalarında, debriyaj disklerinde, hidrolik frenler ve diğer bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca havacılık endüstrisinde uçak parçaları ve diğer bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır.

## 2. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 2.1. Gereç ve Yöntem

Deneysel işlemler sırasıyla tozların karıştırılması, XRD verilerinin alınması, sinterleme işleminin yapılması, parlatma, SEM-EDS görüntülerinin alınması, mikro sertlik ve basma testlerinin yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

#### 2.2. Numunelerin Hazırlanış Aşaması

Al<sub>7xxx</sub> alüminyum alaşımının içeriğine benzer olacak şekilde toz seçimi yapılmış ve bu toz karışımlarına aşınma dayanımını artırmak için grafen ve SiC eklenmiştir. Seçilen tozların ve kompozit katkının ortalama tane büyüklüğü 7 µm, bakırın tane büyüklüğü 10 µm 'dur. Hazırlanan numunelerdeki tozların ağırlıkça oranları Tablo 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Hazırlanan numunelerdeki tozların ağırlıkça oranları

Numune adı	Malzemelerin ağırlıkça katılma oranları					
	Al	Cu	Zn	Si	Gnp	SiC
A	%92	%1.5	-	%0.5	%1	%5
B	%90	%1.5	%2	%0.5	%1	%5
C	%88	%1.5	%4	%0.5	%1	%5
D	%86	%1.5	%6	%0.5	%1	%5
E	%84	%1.5	%8	%0.5	%1	%5

Al, Cu, Zn, Si, GNP ve SiC Retsch MM 400 bilyeli öğütme cihazında 15 Hz. frekansta 45, 90, 135 ve 180 dakika sürede mekanik alaşımlama yapılmıştır. Her bileşim için alaşımlanmamış formları da hazırlanmıştır. Toz karışımlarının XRD verileri alınmış, sinterlenen numunelerin SEM incelemeleri ve elemental analizleri EDS haritalama tekniği kullanılarak görsel olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sinterlenmiş durumları SEM görüntüleme yöntemi ile incelenmiş ve elemental analizleri EDS haritalama tekniği kullanılarak görsel olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra mikrosertlik ve basma testleri uygulanarak mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Alaşımlama işleminde kullanılan bilyeler 3 mm çapında ve yaklaşık olarak 0.110 gram ağırlığındadır. Öğütücü cihazın her iki başlığı birlikte çalıştığından bir numune için gerekli tozlar iki şişeye bölünerek konulmuştur. Alaşımlama işlemi için en uygun bilye/toz ağırlık oranı olarak 10 belirlenmiş ve her bir şişeye 5 gram toz ile yaklaşık olarak 50 g bilye konulmuştur. Bu şişelerin hacmi belirlenirken bilyelerin şişenin yaklaşık olarak yarısını dolduracağı bir ebat belirlenmiştir.

Alaşımlama işlemine hazır hale getirilen plastik şişeler hacim olarak %50 bilye, %25 toz ile doludur. İçerisine bilye ve toz karışımı konulan şişelere en az 30 saniye argon gazı uygulanarak kapağı kapatılmış ve elektrik bandı ile kuşatılmıştır. Argon gazı ve elektrik bandı uygulamasının yapılmasındaki amaç toz karışımının oksitlenme riskini ortadan kaldırmaktır.

Alaşımlanan numuneler sinterlenerek 20 mm çapında, 10 mm yüksekliğinde billetlere dönüştürülmüştür. Billetler parlatma işlemine tabi tutulmuş ve akabinde ZEISS GEMINI 500 bilgisayar kontrollü SEM cihazı ile görüntüleri alınmıştır. Daha sonra numunelerin mikro sertlik verilerini bulmak için EMCO TEST DUROSCAN cihazında mikro sertlikleri ölçülmüştür.

### **2.3. XRD İşlemleri**

Alaşımlama işlemi sonrasında elde edilen toz numunelerin iç yapısında meydana gelen değişikliklerin belirlenmesi için XRD ölçümleri Panalytical Empyrean model cihazda yapılmıştır.

## 2.4. Sinterleme

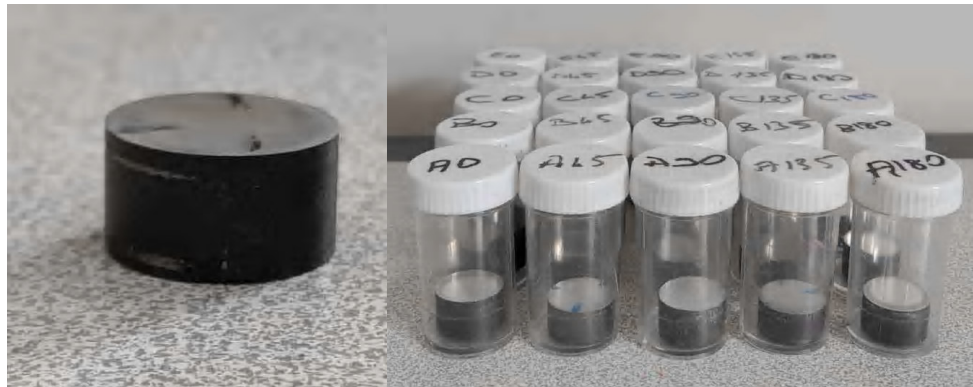
Sinterlemenin öncesinde yapışmayı önlemek amacıyla kalıplara sogelub uygulanmış, daha sonra elenerek bilyelerden ayrıştırılan tozlar kalıba alınmıştır. Alaşımlanmış tozlar soğuk olarak kalıplara yerleştirilmek amacıyla kalıba yerleşecek kadar basınçla preslenmiştir. Sinterleme işleminin yapılmasında H13 çelikten üretilmiş kalıplar kullanılmıştır.

Sinterleme işlemi her bir numune için 200 MPa basınç altında 600 °C'de 45 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum ve alaşımlarının sinterlenmesinde sinterleme atmosferinin seçimi önemli bir kriterdir. Alüminyumun oksijen tutma kapasitesinin yüksek olması sebebiyle koruyucu atmosfer olmadan yapılan sinterleme işlemlerinde, alüminyum parçacıkları üzerinde alüminyum oksit tabakası oluşumu meydana gelmektedir. Bu nedenle tüm sinterleme işlemleri argon atmosferinde gerçekleştirilerek oksijen kontaminasyonu engellenmeye çalışılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası numune kalıptan çıkarılmadan 40 dakika oda sıcaklığında bekletilmiş, daha sonra kalıptan çıkarılmıştır.

## 2.5. Parlatma

Sinterleme işleminin ardından numuneler sırasıyla 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 ve 4000'lik zımpara kağıtlarıyla Metkon Forcipol 1V cihazında zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra çiziksiz, net bir mikro yapı elde etmek amacıyla 1 mikron SiC içeren elmas solüsyon kadife çuhaya dökülerek yüzeyler parlatılmıştır. Şekil 2.1'de sinterlendikten sonra parlatma işlemine tabi tutulmuş numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Parlatma işlemi tamamlanmış numuneler

## 2.6. SEM Cihazı

Parlatma işleminden sonra sinterlenmiş numunelerin SEM ve EDS görüntüleri ZEISS GEMINI 500 model taramalı elektron mikroskobunda alınmıştır. SEM analizi ile tane sınırları, ikincil fazların boyut ve dağılımları incelenmiştir. EDS analizi ile mikro yapıların elemental dağılımlarına odaklanılmıştır.

## 2.7. Mikrosertlik Ölçümü

Billetlerin mikrosertlik ölçümleri DuraScan G5 cihazında Vickers uç kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler yapılırken ön yük olarak 300 gram ve 10 m/sn değerleri kullanılmıştır.



### 3. BÖLÜM

#### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

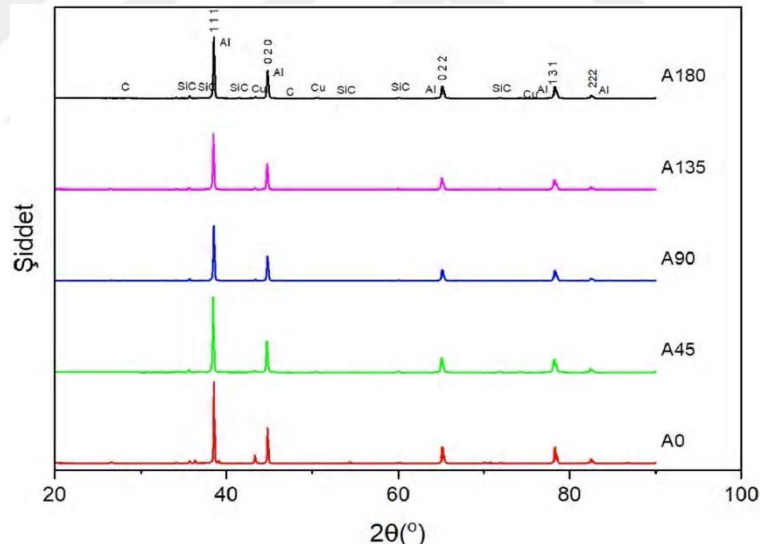
MA yüksek enerjili bilyeli bir değirmende toz parçacıklarının tekrarlanan kaynaklanması, kırılması ve yeniden kaynaklanmasını içeren bir katı hal toz işleme tekniğidir. Çarpışan çelik bilyeler arasında sıkışan tozların çarpma şiddeti ile plastik olarak deforme olması, sertleşmesi ve kırılması esasına dayanmaktadır [79, 84, 85].

MA ile sünek-sünek, sünek-gevrek ve tamamen gevrek toz karışımlarının öğütülmesiyle yeni alaşımlar üretilebilmektedir. Sünek-sünek veya sünek-gevrek malzeme kombinasyonunda öğütmenin erken aşamalarında parçacıklar yumuşaktır ve birbirine kaynak yaparak büyük parçacıklar oluşturma eğilimleri yüksektir. Deformasyonun devam etmesiyle parçacıklar işlendikçe sertleşir ve yorulma kırılma mekanizması ile kırılmaktadırlar. Bu aşamada, kırılma eğilimi soğuk kaynaklamaya göre baskındır. Bilyelerin hareketinin etkisi ile parçacıkların yapısı yenilenirken parçacık boyutu değişmez. Belirli bir süre öğütme ile kaynaklanma hızı ve kırılma hızı arasında sabit durum dengesi elde edilmektedir [79, 84, 85]. Bu aşamada parçacıklar, başlangıç bileşenlerinin hemen hemen hepsini içerir ve gerinme enerjisinin birikmesiyle doyma sertliğine ulaşmaktadır. MA sırasında parçacıkların ağır deformasyona maruz kaldığı dislokasyonlar, boşluklar, istifleme hataları ve artan tane sınırı sayısı gibi çeşitli kristal kusurlarının varlığıyla ortaya çıkmaktadır. Bu kusur yapısının varlığı, çözünen elementlerin matrise yayılmasını artırmaktadır. Öğütme sırasında kırılma bileşenler parçalanarak daha yumuşak olan bileşene gömülmektedir. Ancak, çok küçük parçacık boyutlarında toz parçacıkları sünek şekilde davranmaktadır. Boyutta daha fazla küçülmenin mümkün olmadığı bu sınır parçalanma sınırı olarak adlandırılmaktadır [79, 84, 85].

Bilye hareketinin sağladığı enerji ısı ile harcanırken küçük bir kısmı toz parçacıklarının elastik ve plastik deformasyonunda kullanılır. Sıcaklıktaki artış ile difüzyon davranışı kolaylaşmaktadır ve elementler arasında alaşımlama meydana gelmektedir [66,101,102]. Alaşımlamanın ilerlemesi, mikro yapısal değişiklikler, sertlik değişiklikleri, x-ışını kırınımı vb. takip edilerek ayrıntılı olarak incelenmiştir.

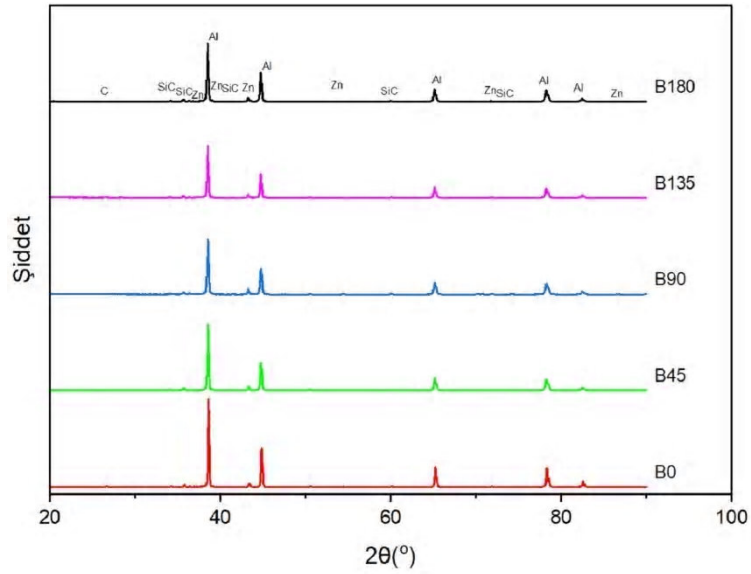
### 3.1. XRD Verileri

XRD verilerinden yola çıkılarak A numunesinin 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış ve hiç karıştırılmamış hallerinin grafiği Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu grafikten karıştırma süresi arttıkça en yüksek dereceli alüminyum piklerinin boylarında bir miktar kısalma ve genişliklerinde artış meydana geldiği görülmektedir. XRD piklerinin zamanla şiddetinin azalması ve genişlemesinin artması, kristal boyutta küçül, mikro gerilmelerde artma, faz dönüşümleri veya kristal yapıdaki kusurlardaki artış gibi mikro yapısal değişimleri göstermektedir. Öğütme süresinin artması ile yapı içerisinde bir miktar alaşımlama meydana geldiği görülmektedir.



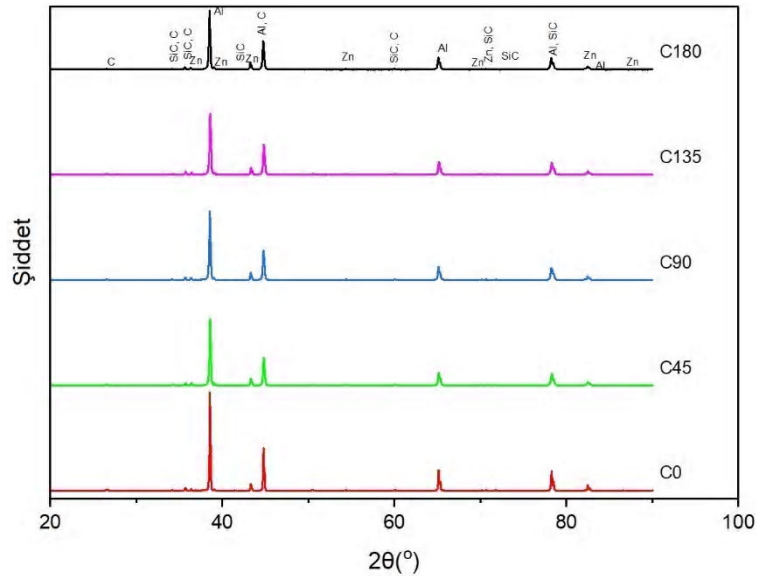
Şekil 3.1. A numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği

B numunesinin 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış ve hiç karıştırılmamış hallerinin XRD grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında numunelerin en yüksek dereceli alüminyum piklerinde karıştırma süresinin artmasıyla azalma meydana geldiği görülmektedir. B numunesinde en düşük ve en yüksek pik şiddetleri arasında yaklaşık binde 2 oranında fark olduğu görülmüştür. Sürenin artması ile alaşımlama oranı da artmıştır.



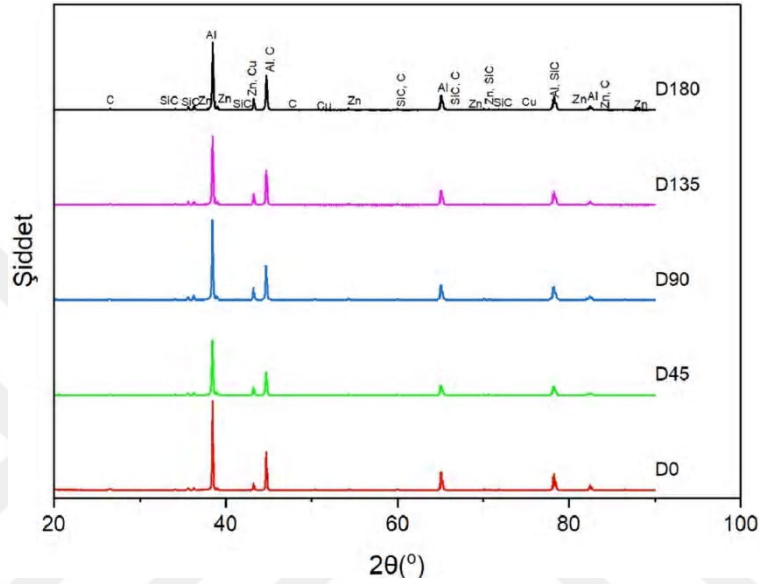
Şekil 3.2. B numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği

C numunesinin 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış ve hiç karıştırılmamış hallerinin XRD grafiği Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde de karıştırma süresi ile en yüksek dereceli pik boylarının ters orantılı olarak değiştiği gözlenmektedir. Karıştırma süresi arttıkça alaşım oranı artmıştır. Yüzdesinin artmasıyla da bağlantılı olarak kompozit yapı içerisinde alaşım oluşturmamış Zn tozları görülmektedir.



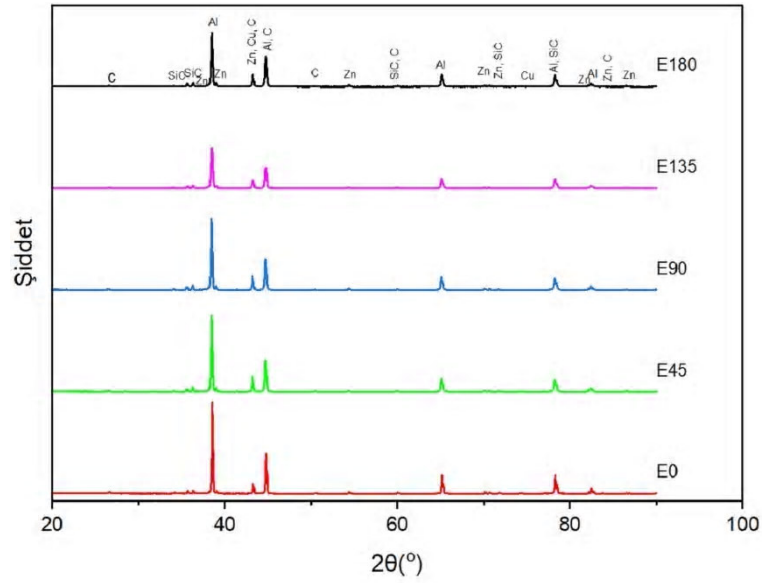
Şekil 3.3. C numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği

D numunesinin 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış ve hiç karıştırılmamış hallerinin XRD grafiği Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu grafikten de A, B ve C numunelerindeki gibi en yüksek dereceli pik boylarında karıştırma süresinin artmasıyla genel olarak düşüş gözlemlenmektedir. Ancak 135 dakikalık numunede pik boyu 90 dakikaya göre daha yüksek ve genişliği daha dar olduğu görülmektedir. D numunesi için en fazla alaşımlamanın meydana geldiği alaşımlama süresinin 180 dakika olduğu görülmüştür.



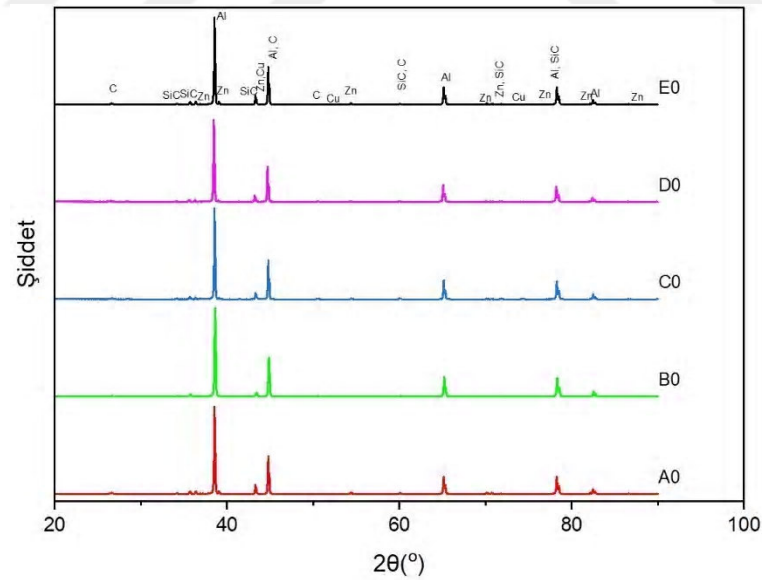
Şekil 3.4. D numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği

E numunesinin 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış ve hiç karıştırılmamış hallerinin XRD grafiği Şekil 3.5'te verilmiştir. Bu grafikten A, B, C ve D numunelerindeki gibi genel olarak en yüksek dereceli pik boylarında karıştırma süresinin artmasıyla düşüş gözlenmiştir. Ancak 180 dakika karıştırılmış numuneye göre 135 dakika karıştırılmış numunenin pik boyunda daha fazla düşüş olduğu görülmektedir. 135 dakika alaşımlama süresi ile 180 dakika alaşımlama süresinde elde edilen pik değerleri incelendiğinde 45 dakikalık alaşımlama süresi artışının pik şiddetinde binde 2 gibi bir yükselmeye neden olduğu görülmüştür. Grafiğe göre ağırlıkça %8 çinko içeren karışım için en fazla alaşımlamanın olduğu karıştırma süresinin 135 dakika olduğu görülmüştür.



Şekil 3.5. E numunesinin 0, 45, 90, 135 ve 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği.

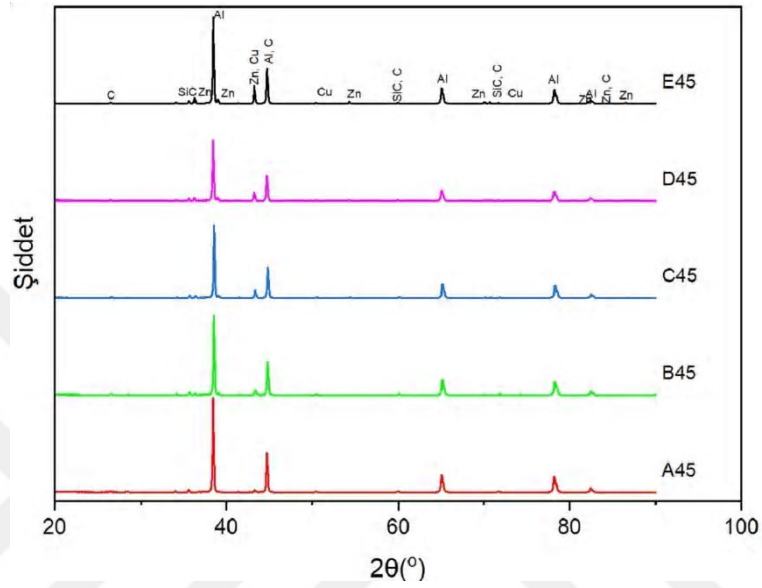
XRD verilerinden A, B, C, D ve E numunelerinin hiç karıştırılmamış hallerinin grafiği Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Karıştırılmamış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği

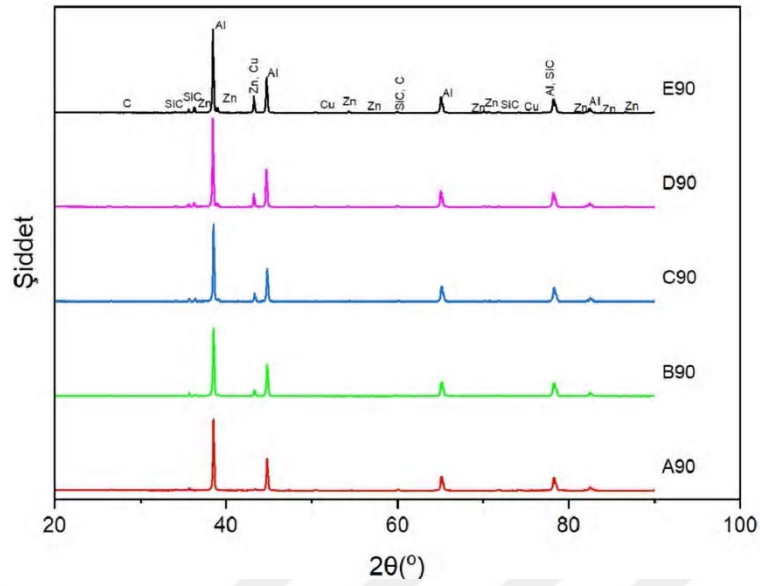
Şekil 3.6 incelendiğinde malzemelerin oransal olarak bileşimlerinin değişmesi ile Zn miktarı arttıkça XRD pik şiddetlerinin yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Bütün numunelerin 45 dakika süre ile karıştırıldıkları hallerinin XRD grafiği Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde hiç karışmayan hallerine göre XRD piklerinde azalmanın olduğu görülmüştür. Grafiğe göre en fazla alaşımlanma ağırlıkça %6 Zn içeren D numunesinde görülmüştür.



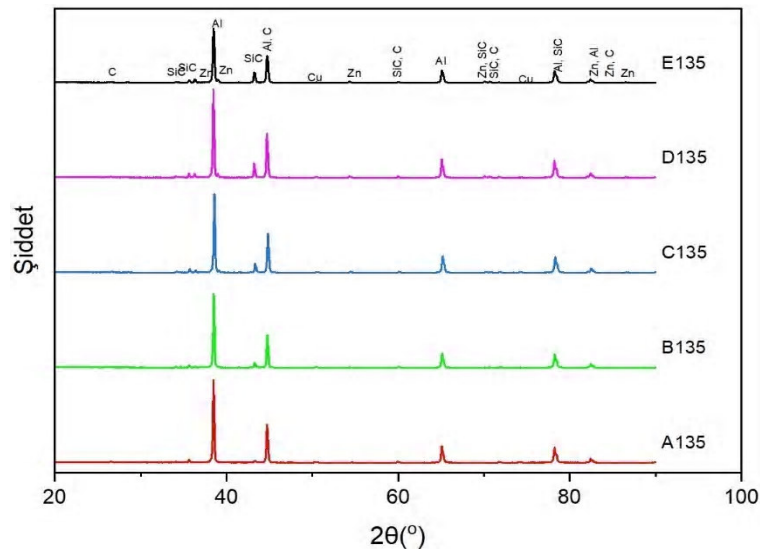
Şekil 3.7. 45 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği

Bileşimlerin 90 dakika karıştırılmış tozlarının XRD grafiği Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 45 dakika karıştırılan numunelere göre piklerde azalma meydana gelmiştir. 90 dakika alaşımlanmış numuneler içerisinde B ve D numuneleri en fazla alaşımlamanın olduğu, C numunesi ise en az alaşımlamanın olduğu numuneler olmuştur. Karışım içerisinde Zn yüzdesinin artmasıyla Zn piklerinin şiddetinin arttığı gözlenmiştir.



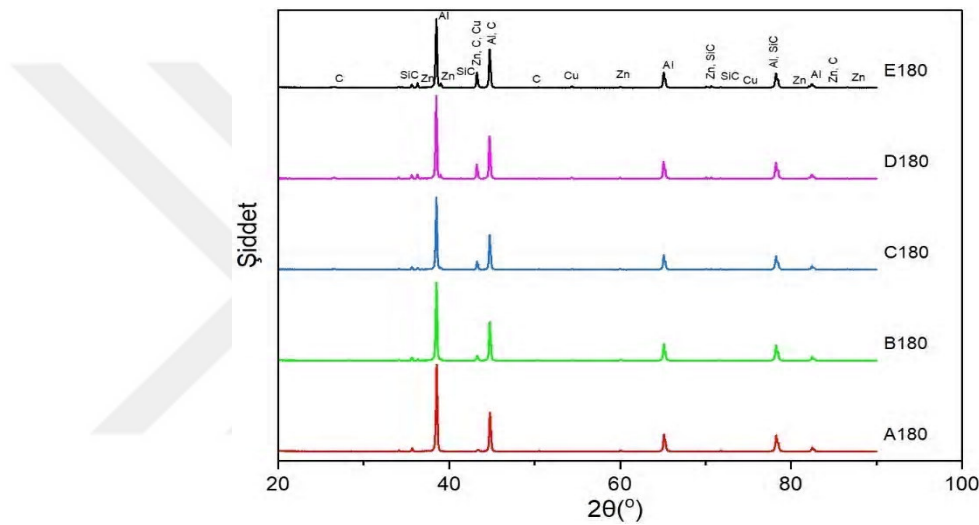
Şekil 3.8. 90 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği

A, B, C, D ve E numunelerinin 135 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Bu grafikten de Zn miktarının artmasına bağlı olarak Al maksimum piklerinde azalma meydana gelmiştir. B, C, D ve E numunelerinde artan Zn miktarıyla orantılı şekilde Zn piklerinin küçüldüğü ve Zn'nin alaşıma katıldığı görülmektedir. 135 dakika alaşımlanmış numuneler içerisinde en fazla alaşımlamanın E numunesinde, en az alaşımlamanın ise C numunesinde meydana geldiği görülmektedir. C ve D numuneleri arasındaki Zn miktarındaki ağırlıkça %2'lik değişimin alüminyumun maksimum pik değerleri arasında yaklaşık binde 3 oranında fark meydana getirdiği görülmüştür.



Şekil 3.9. 135 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği

A, B, C, D ve E numunelerinin 180 dakika karıştırılmış hallerinin XRD grafiği Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu grafikten de Zn miktarının artmasına bağlı olarak maksimum Al pik şiddetlerinde azalma meydana gelmesine rağmen bileşiminde ağırlıkça %8 Zn bulunan E numunesinde pik şiddeti %6 Zn bulunan D numunesi ile aynı kalmıştır ve 135 dakika karışan E numunesi ile kıyaslandığında genel olarak alaşımlanma miktarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. 135 dakika alaşımlanmış numunelere göre 180 dakika alaşımlama süresinde D numunesi maksimum pik seviyesi yaklaşık binde 2 oranında daha düşük değerdedir. %6 Zn içeren D numunesi için en fazla alaşımlama 180 dakikalık öğütme süresinde elde edilmiştir.

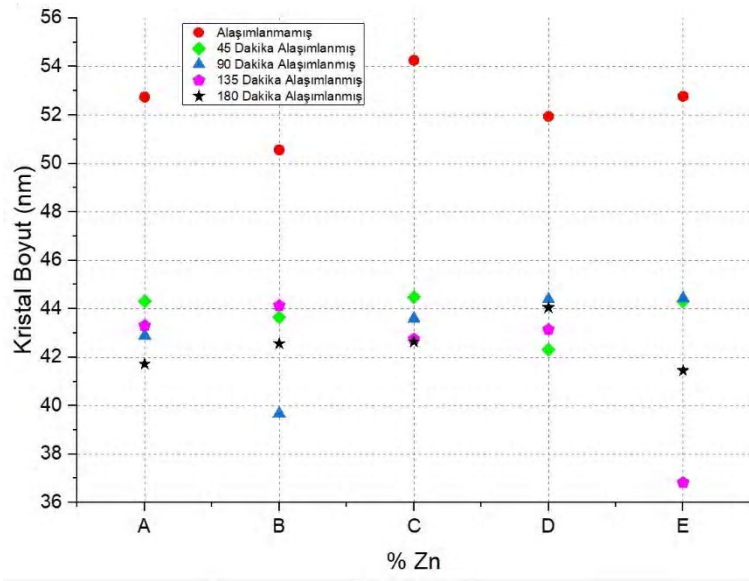


Şekil 3.10. 180 dakika karıştırılmış A, B, C, D ve E numunelerinin XRD grafiği

Bu grafiklerdeki (Şekil 6-10) veriler Scherrer eşitliğinde (1) bir araya getirilerek numunelerin kristal boyutlarını bir arada gösteren grafik Şekil 3.11'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; kristal boyut  $\tau$ , şekil faktörü  $k$ , XRD dalga boyu  $\lambda$ , XRD'de en yüksek dereceli zirvenin yarı noktasındaki dalga genişlemesi  $\beta$  ve kırınım açısı  $\theta$  ile ifade edilmiştir. ( $k$  şekil faktörü 0.9 olarak hesaba katılmıştır.)



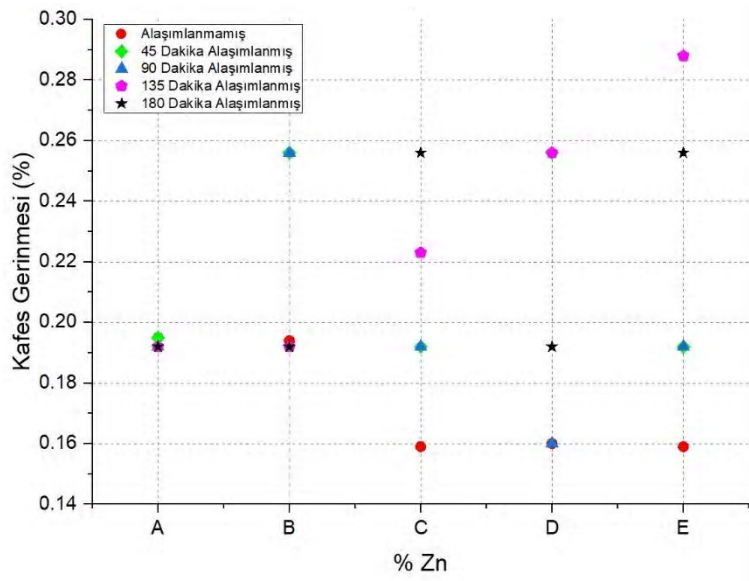
Şekil 3.11. Numunelerin kristal boyutları

Şekil 3.6-3.10'deki veriler kafes gerinmesi hesaplaması için Hall eşitliğinde (2) kullanılarak bir grafik çizildiğinde Şekil 3.11.'deki grafik elde edilmiştir.

$$\beta_g^2 = \beta_s^2 - \beta_T^2 \quad (2)$$

$$\beta_g \cos\theta = \frac{k\theta}{\tau} \eta s \tan\theta$$

Bu eşitliklerde;  $\tau$  kristal boyutu,  $k$  0 ile 1 arasında şekil faktörünü,  $\lambda$  XRD dalga boyunu,  $\beta_s$  XRD grafiğindeki en yüksek dereceli zirvenin yarı noktasındaki dalga genişlemesini,  $\beta_T$  XRD grafiğinde yapay zekâ ile hesaplanan en yüksek dereceli zirvenin yarı noktasındaki dalga genişlemesini,  $\beta_g$  gerçek hesaplamada kullanılan en yüksek dereceli zirvenin yarı noktasındaki dalga genişlemesini,  $\theta$  kırınım açısını ve  $\eta$  kafes gerinmesini ifade etmektedir. ( $k$  şekil faktörü yüzey merkezli kübik alüminyum için 0.9 olarak hesaba katılmıştır.) Gerçek genişlik hesaplanırken cihazın neden olduğu genişlemenin çıkarılması gerekir. XRD grafiklerinin çizildiği program yardımı ile Gaussian veya Lorentzian fonksiyonlarına uydurularak yapılan hesaplamalar sonucu bulunan  $\beta_T$  değeri ve grafikten elde edilen  $\beta_s$  değeri (2) numaralı denklemde yerlerine yazılarak  $\beta_g$  değerinin hesaplaması yapılmalıdır.



Şekil 3.12. Numunelerin Kafes Gerinimi

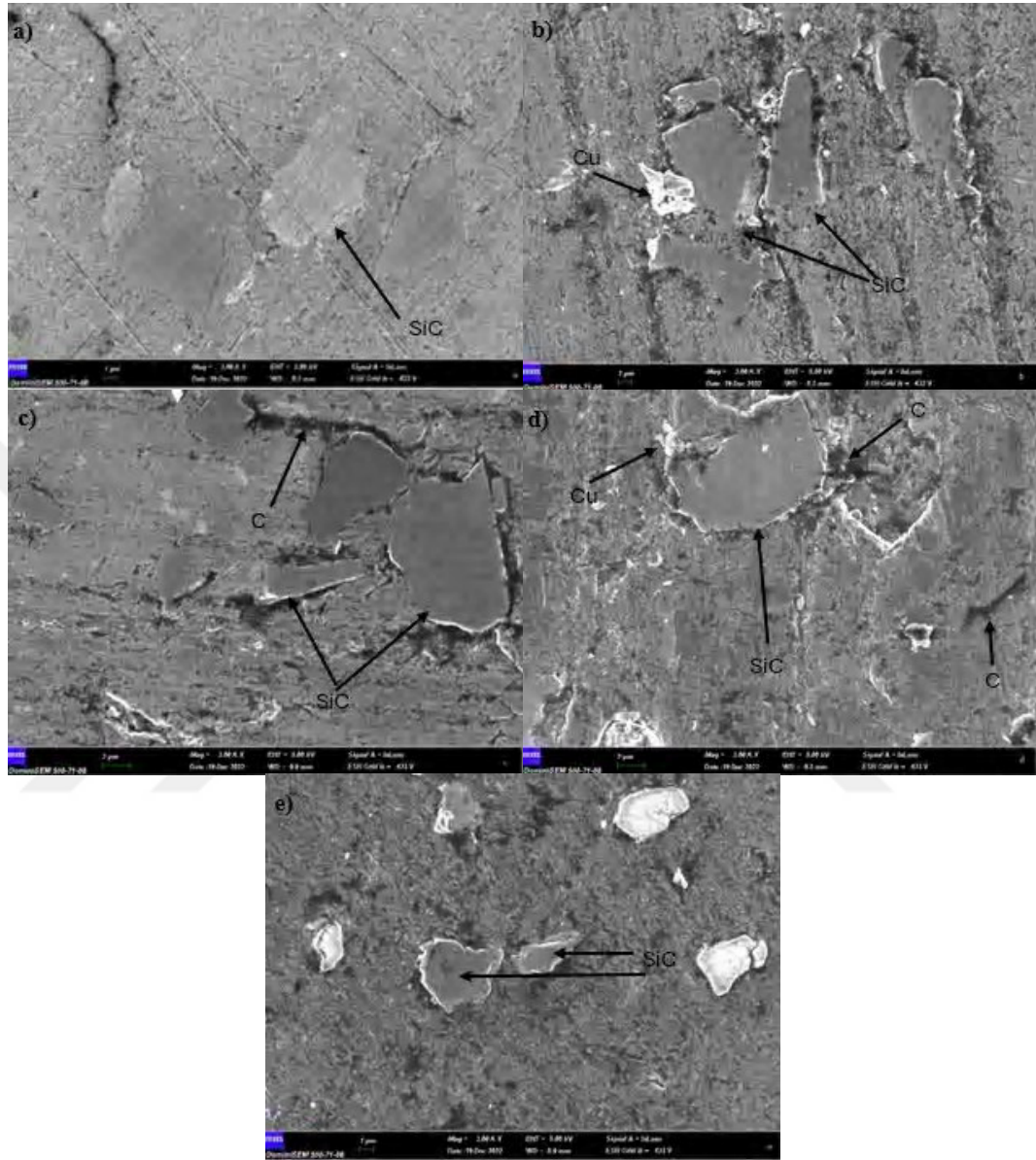
Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 incelendiğinde alaşımlanan numunelerin alaşımlanmayan numunelere göre kristal boyutlarında düşüş, kafes gerinimlerinde ise artış olduğu görülmektedir. Sadece Zn içermeyen A numunesinde kafes gerinim değerleri karıştırma süresinden etkilenmemiştir. Ağırlıkça %2 Zn içeren B numunesinde alaşımlanmamış numune ile 180 dakika alaşımlanmış numunenin kafes gerinim değerlerinin neredeyse aynı olduğu, kristal boyutta ise alaşımlanmamış numunenin kristal boyutunun yüksek olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %4 Zn içeren C numunesinde kristal boyut birbirine yakın iken kafes geriniminin arttığı görülmüştür. 45 ve 135 dakika alaşımlanmış ağırlıkça %6 Zn içeren D numunelerinde en yüksek kafes gerinmesi ve düşük kristal boyut gözlenmiştir. 135 dakika alaşımlanmış ağırlıkça %8 Zn içeren E numunesinde en düşük kristal boyut ve en yüksek kafes gerinmesi görülmüştür. Numunelerde kristal boyutun küçülmesi alaşım elementlerinin bileşime katıldığını; ikincil fazlar, intermetalik fazlar ve/veya seramik fazlar oluştuğunu göstermektedir. Kristal boyutun azaldığı noktalarda artan kafes düzensizlikleri ve mikro gerinimin artması kafes geriniminin yükselmesine neden olmuştur. En yüksek kafes gerinimi ve en düşük kristal boyut değerleri 135 dakika alaşımlama süresinde E serisinde elde edilmiştir.

## 3.2. SEM Görüntüleri ve EDS İncelemeleri

### 3.2.1. Sinterlenmiş Numunelerin SEM Görüntüleri

Numunelerin sinterlenmiş hallerinin SEM görüntüleri alınmış ve EDS haritalama tekniği ile elementel analizi görsel olarak yapılmıştır.

Şekil 3.13'te A numunesine ait sinterlenmiş malzemelerin SEM cihazında üç bin kez büyütülmüş görüntüleri verilmiştir.

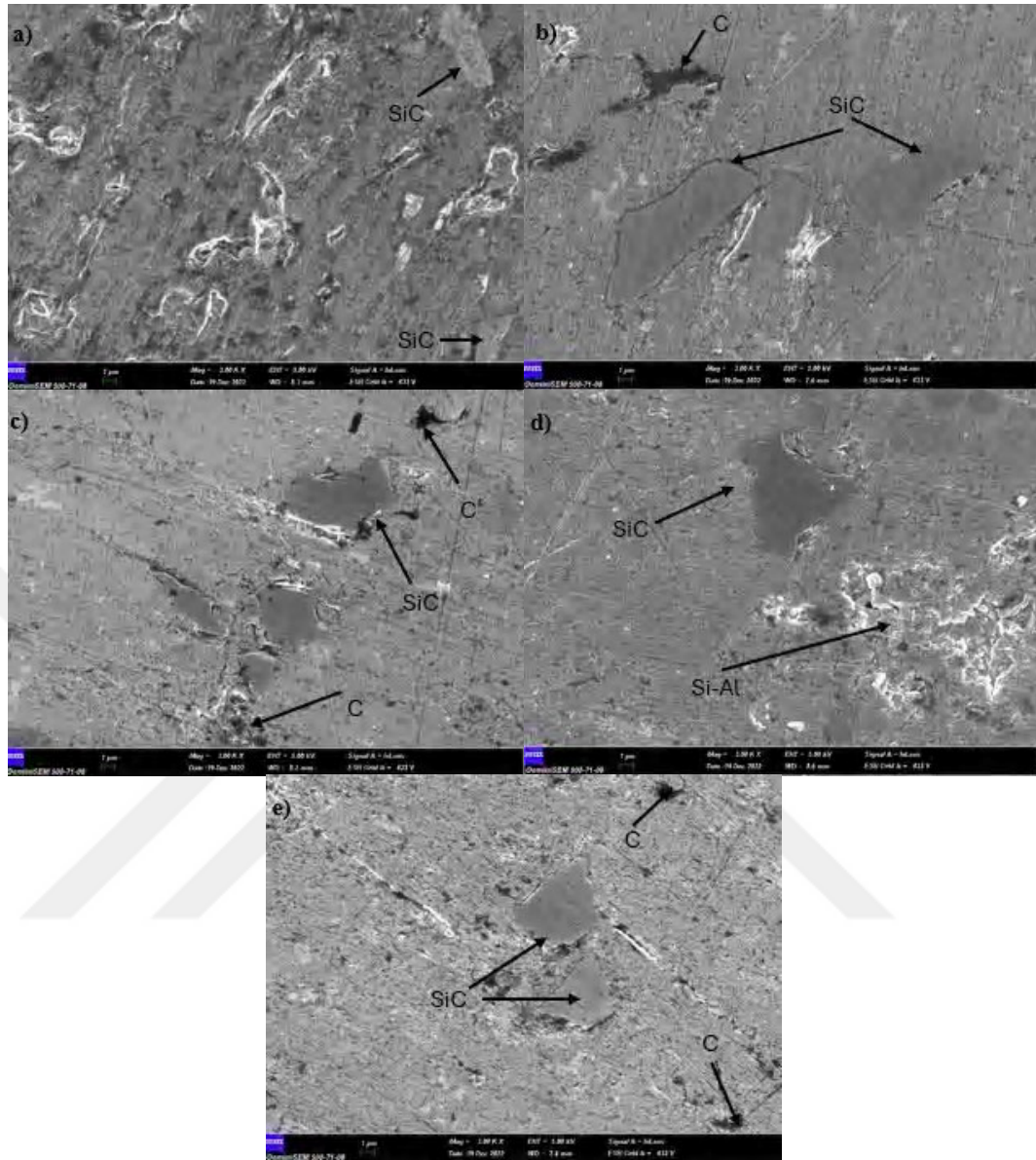


Şekil 3.13. Sinterlenmiş A numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınlanmamış b) 45 dakika alaşımınlanmış c) 90 dakika alaşımınlanmış d) 135 dakika alaşımınlanmış e)180 dakika alaşımınlanmış

Şekil 3.13'te A numunesine ait sinterlenmiş malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde alaşımlama süresine bağlı olarak tane sınırları, yapının homojenliği, aglomerasyon özellikleri gibi farklılıklar görülmektedir. A0'a ait görüntülerde tane sınırları belirgin değildir. A45 numunesinden alınan görüntülerde görülen büyük kümelerin etrafındaki küçük parça kümelenmeleri gözlemlenmektedir. Numunede görülen açık renkli kısımlar metalik fazları, ağır atom numarasına sahip elementleri;

koyu renkli bileşikler ise karbon, grafen tabanlı yapıları ya da pürüzlü yüzeyleri göstermektedir. Yapıdaki görülen farklı renkler bize farklı fazların oluştuğunu göstermektedir. Görüntüde SiC yapıların alaşımınmamış numuneye göre daha küçük yapıda olduğu gözlenmektedir. A90 numunesinden alınan görüntülerde tane sınırları belirgin şekilde görülebilmektedir. Keskin kenarları olan büyük taneler SiC partiküllerini göstermekte, tane sınırlarının çevresinde gözlenen koyu alanlarda mikro boşluklar ve gözenekler gözlenmektedir. A135 numunesinde tane sınırları belirgin şekilde görülmektedir. Tane sınırlarının çevresinde koyu hatlar mevcut, bazı sınır bölgelerinde boşluklar veya kopukluklar görünmektedir. A180 numunesinde tane sınırları yer yer keskin bir şekilde görülmektedir. Küçük parçacıklar homojen dağılmış iken homojen yapıyı büyük SiC parçacıkların bozduğu gözlenmektedir.

Şekil 3.14'te B numunesine ait sinterlenmiş malzemelerin SEM cihazında üç bin kez büyütülmüş görüntüleri verilmiştir.

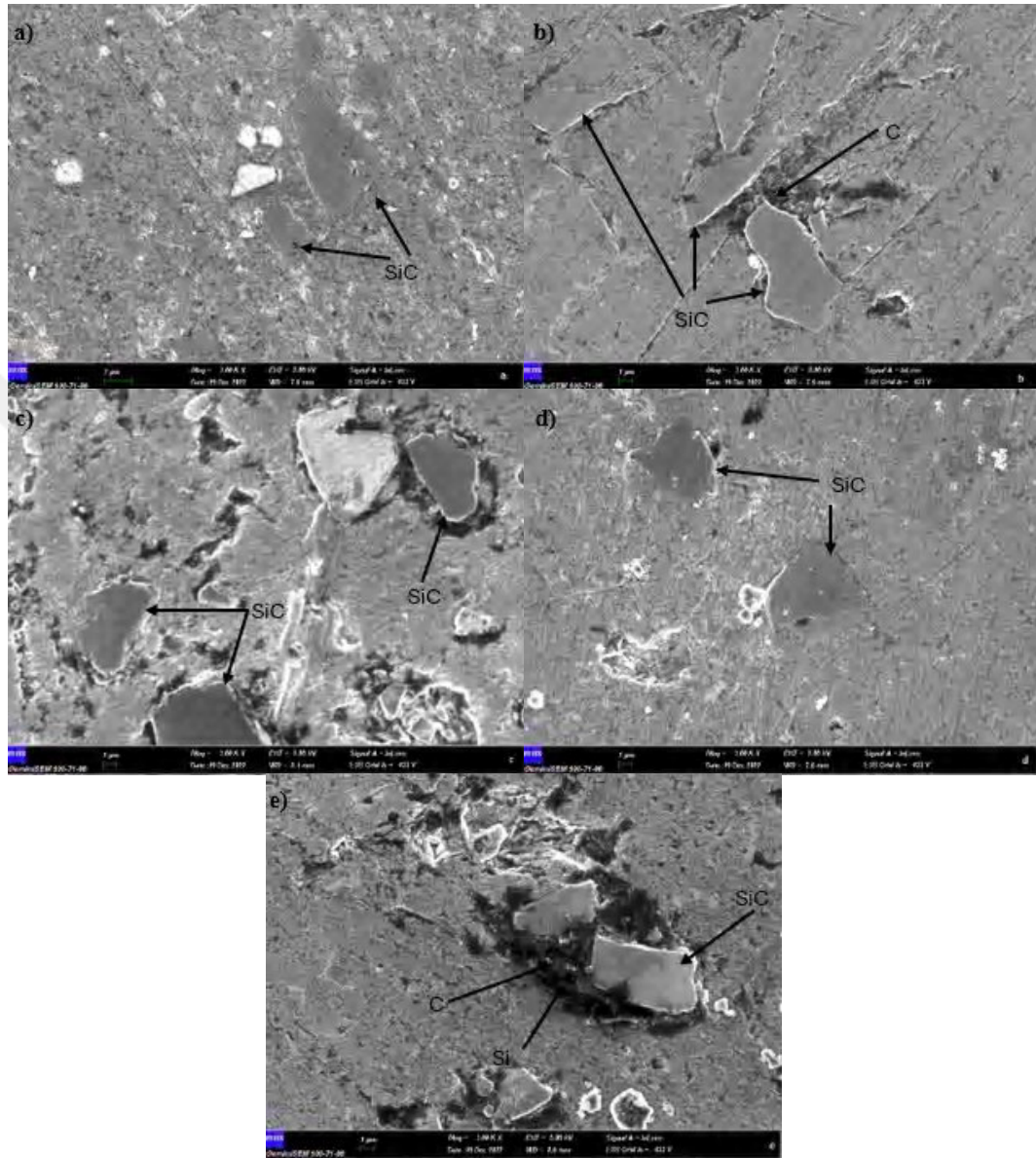


Şekil 3.14. Sinterlenmiş B numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımınmamış b) 45 dakika alaşımlanmış c) 90 dakika alaşımlanmış d) 135 dakika alaşımlanmış e) 180 dakika alaşımlanmış

Şekil 3.14'te B0 numunesine ait sem görüntülerinde mikroyapı, tane boyutları ve tane sınırları düzensiz görülmektedir. B45 numunesindeki görüntüde partiküller daha düzenli dağılmış görülmektedir. Alaşımlama süresinin artması ile yapıda Si-Al fazların oluştuğu görülmektedir. B90 numunesinde daha küçük boyutlu partiküller gözlenmektedir. Yapıda boşluk görülmektedir. B135 numunesinde homojen dağılım olan ve olmayan bölgeler göze çarpmaktadır. Tanecik sınırları ve boyut farkları yapıda farklı fazlar olduğunu göstermektedir. B180 numunesinde yapının daha homojen hale geldiği görülmektedir. Görüntüdeki iri partiküller Si-Al fazları, çizgi halindeki parlak ve

koyu renkli bölümler ise EDS analizinde de görülen alaşımlanmamış az miktardaki tozu göstermektedir.

Şekil 3.15'te C numunesine ait üç biner kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir.

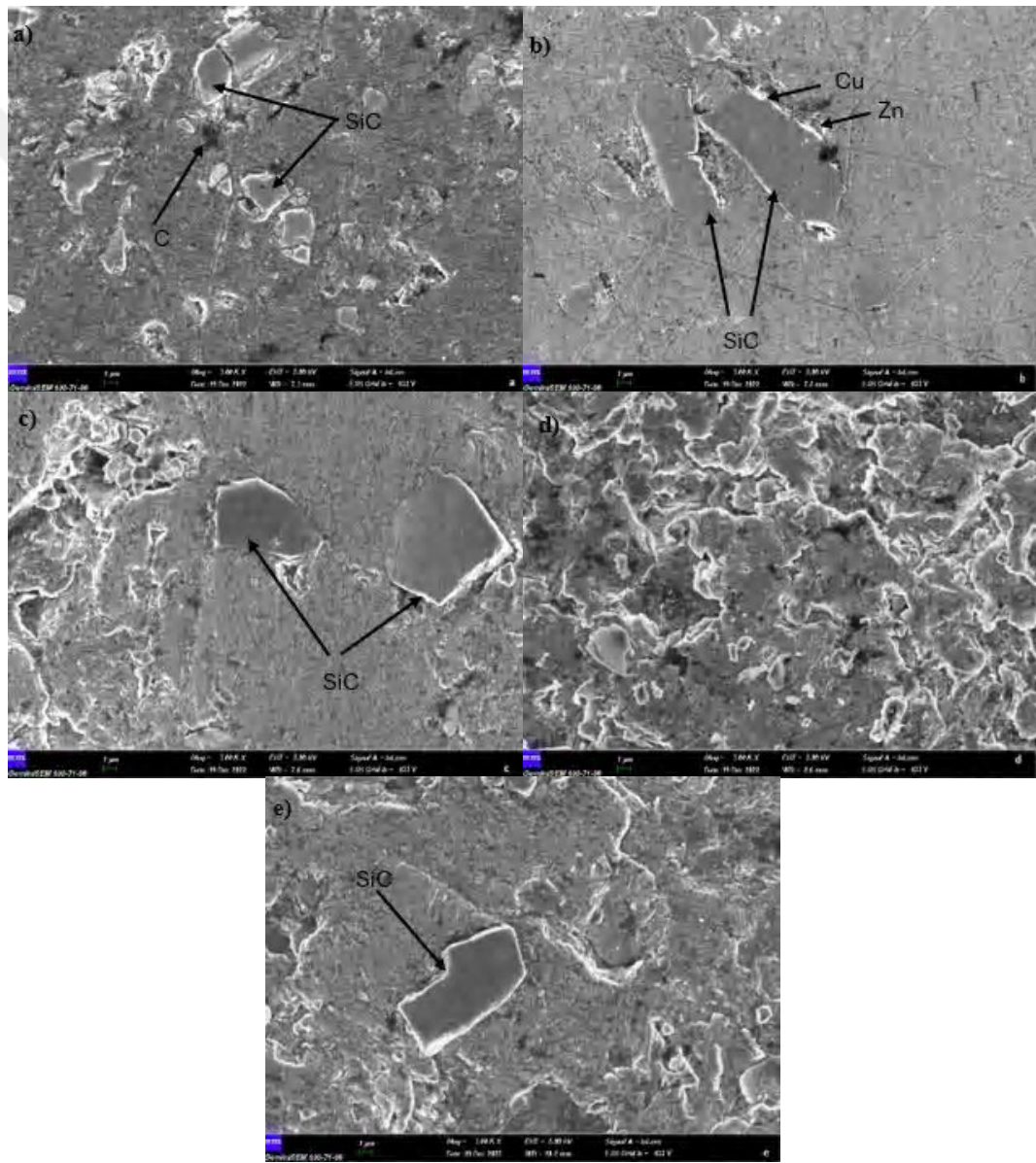


Şekil 3.15. Sinterlenmiş C numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımlanmamış b) 45 dakika alaşımlanmış c) 90 dakika alaşımlanmış d) 135 dakika alaşımlanmış e) 180 dakika alaşımlanmış

Şekil 3.15'te C0 numunesine ait sem görüntülerinde alüminyum matris içerisinde partiküllerin heterojen dağıldığı görülmektedir. C45 numunesine ait görüntülerde tane sınırları keskin olan büyük partiküller gözlenmektedir. Bu partiküller Al-Si, Si-Al fazları ve aralarında görülen koyu renkli bölge ise aglomerasyon olabileceğini göstermektedir. C90 numunesinde partiküller büyük ve dağınık şekilde

konumlanmışlardır. C135 ve C180 numunelerinde düz ve yassı yapıdaki Si-Al fazlar, açık ve koyu renkli bölgeler dikkat çekmektedir. Açık renkli, parlak bölgeler yapıdaki çinko ve bakır tozlarını, koyu bölgeler ise karbon, silisyum ve alüminyum tozlarının varlığını göstermektedir. Özellikle C180 numunesindeki siyah renkli bölge alaşıma katılmayan karbon ve silisyum tozlarını (ağırlıkça %34), parlak bölgeler ise çinko ve bakır tozlarının (ağırlıkça %12) dağılımını göstermektedir.

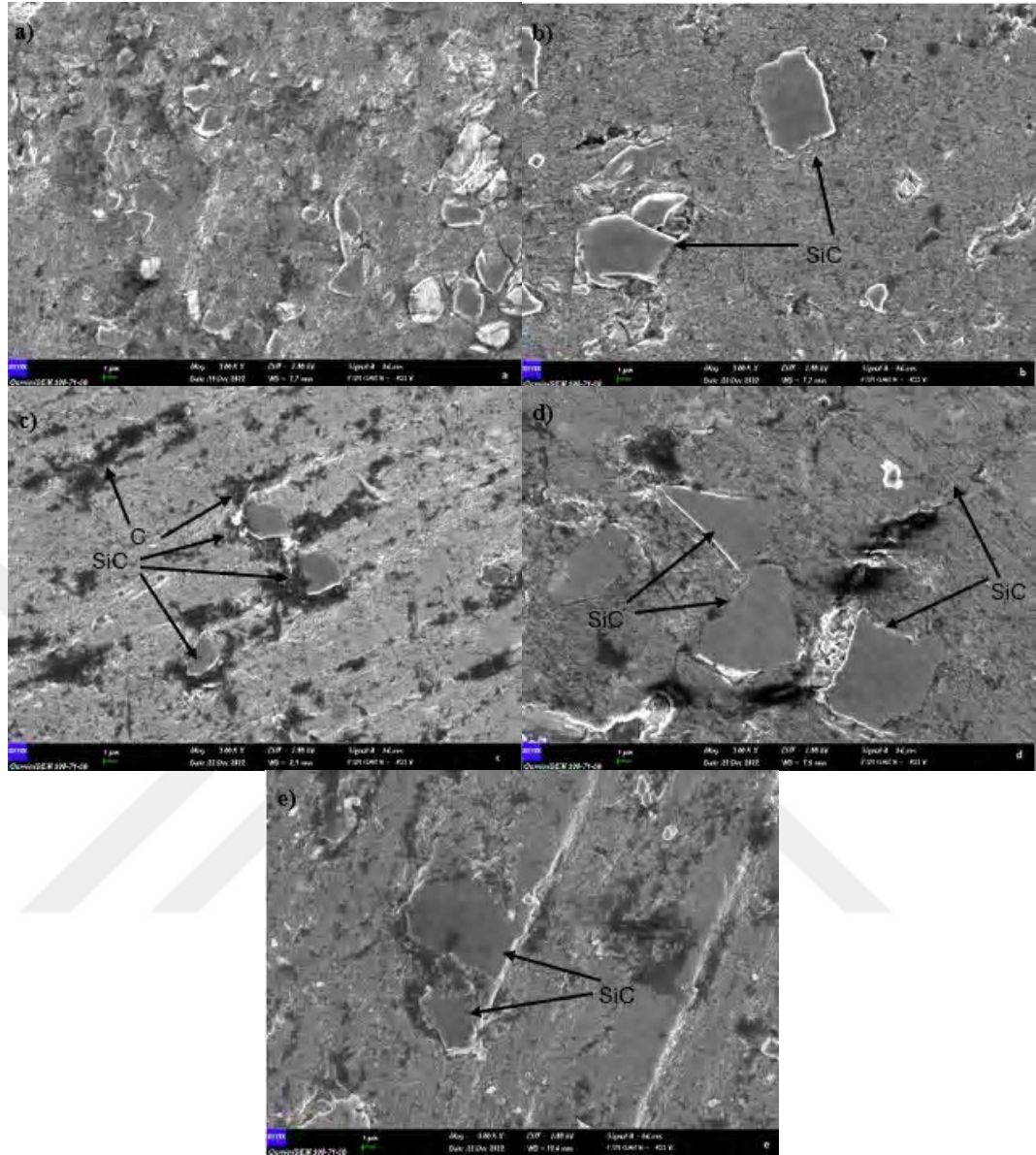
Şekil 3.16'da D numunesine ait üç biner kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.16. Sinterlenmiş D numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımlanmamış b) 45 dakika alaşımlanmış c) 90 dakika alaşımlanmış d) 135 dakika alaşımlanmış e)180 dakika alaşımlanmış

Şekil 3.16' da D0 numunesine ait görüntüde yüzeyde dağınık duran partiküller heterojen bir yapı oluşturmaktadır. Parçacıkların tane sınırlarındaki renk değişiklikleri aglomerasyon varlığını göstermektedir. D45 numunesinde yapı daha homojen görünmektedir. Büyük ve düzgün kenarlı partiküller ve bu partiküllerin kenarlarında açık renkli toplanmalar görülmektedir. Parlak renkli bu toplanmalar EDS analizinde de görülen alaşımlanmamış bakır ve çinko partiküllerini göstermektedir. D90 numunesinin D45 numunesi kadar homojen olmadığı, görüntüde olan renk farklılıkları ve taneciklerin yapısı farklı fazların oluştuğunu göstermektedir. Görüntünün sol üst kısmında daha küçük tanecikler ve bu taneciklerin etrafında Zn, Cu gibi tozların varlığından söz edilebilmektedir. Görüntünün orta ve sağ tarafındaki iri partiküller ise sinterlemede oluşan Al-Si ve Si-Al fazlarını göstermektedir. D135 numune görüntüsünde belirgin tane sınırları ve farklı büyüklükteki partiküller, yapıda farklı fazların oluştuğunu göstermektedir. D180 numunesinde tane sınırları büyümesinden ve farklı fazlar görülmesinden daha iyi bir alaşımlama olduğu görülmektedir.

Şekil 3.17'de E numunesine ait üç biner kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri verilmiştir.



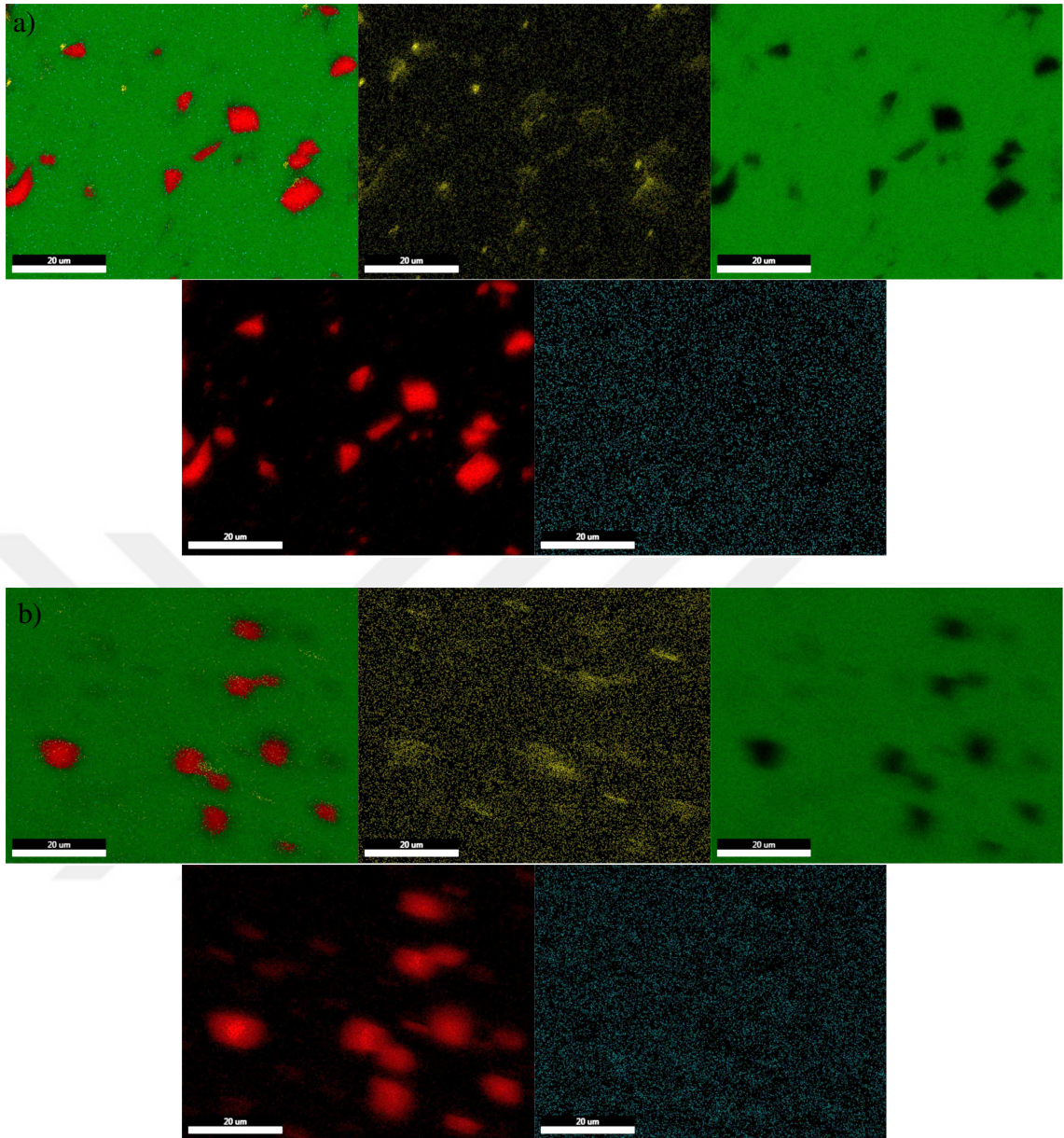
Şekil 3.17. Sinterlenmiş E numunesine ait SEM görüntüleri a) Alaşımlanmış b) 45 dakika alaşımlanmış c) 90 dakika alaşımlanmış d) 135 dakika alaşımlanmış e) 180 dakika alaşımlanmış

Şekil 3.17' de E0 numunesine ait görüntüler incelendiğinde heterojen yapıda ve rastgele dağılmış iri taneciklerden oluştuğu görülmektedir. E45'de ise alaşımlamanın başladığı ve yapının daha homojen olduğu görülmektedir. E90 numunesinde parçacıkların boyutu E45, E135 ve E180'e kıyasla daha küçük ve homojen bir dağılım göstermektedir. Parçacıklar ve matris arasındaki bağlanma bölgeleri ise daha keskin ve belirgin görünmektedir. E135 numunesinin görüntüsünde belirgin, düzgün kenarlı büyük parçacıklar görünmektedir. Bu parçacıkların çevresinde boşluklar bulunmaktadır. E90'a göre parçacık-matris arayüzlerinde boşluklar daha belirgin, düzgün kenarlı ve belirgin

parçacıklar vardır. E180 numunesinin görüntülerinde düzlemsel ve tabakalı yapılar ile farklı boyutlarda partiküller görünmektedir. Bu yapı içerisinde farklı fazlar olduğunu göstermektedir. Ayrıca görüntü üzerinde malzeme üzerindeki bazı düzensiz boşluklar göze çarpmaktadır. E135'e göre parçacık boyutları daha değişken ve düzensiz görünmektedir.

### **3.2.2. Sinterlenmiş Numunelerin SEM-EDS Görüntüleri**

Üretilmiş numunelerin her birinin SEM görüntülerinde renklendirme yapılarak element dağılımları incelenmiştir. Bu incelemelerle alaşımlama süresinin alaşımlamaya ve karışımın homojenleşmesine etkisi incelenmiştir. SEM görüntüleri element dağılımlarına göre renklendirilmiştir. Bu renklendirmelerde yeşil renk alüminyumu, sarı renk karbonu, kırmızı renk silisyumu, magenta renk çinkoyu ve turkuaz renk bakırı temsil etmektedir.



Şekil 3.18. A numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımlanmış b) 180 dakika alaşımlanmış

Şekil 3.18 incelendiğinde alaşımlanmamış A numunesine ait renklendirilmiş görüntülerde Şekil 3.18-a'da verilen görüntülerde Si-Al yapıları ile çok az miktarda alaşımlanmamış toz, Şekil 3.18-b'de ise Si-Al ve Al-Si yapılarının oluştuğu görülmektedir. Her iki grupta da silisyum elementinin bölgesel yüzdelерinin kütsel olarak %38 ve üzerinde olması yapı içerisinde homojen dağılmadığını göstermektedir. Kırmızı renkle gösterilen silisyum taneleri bileşimde bulunan silisyum elementi ile silisyum karbüre aittir. Karbon elementi bileşime grafen ve SiC taneleri ile dahil olmuştur. Kompozit yapı içerisinde karbon dağılımında 45 dakikalık alaşımlanmış

numunelerde öbikleşmeler görülür iken artan alaşımlanma süresi ile yapı içindeki dağılımının homojen hale geldiği görülmüştür. Bakır elementinin hem 45 dakika hem 180 dakika alaşımlanmış numunelerde iyi bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür.

Alaşımlanmamış A numunesine ait SEM-EDS analizinde elementlerin kütlece ve atomik yüzdeleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

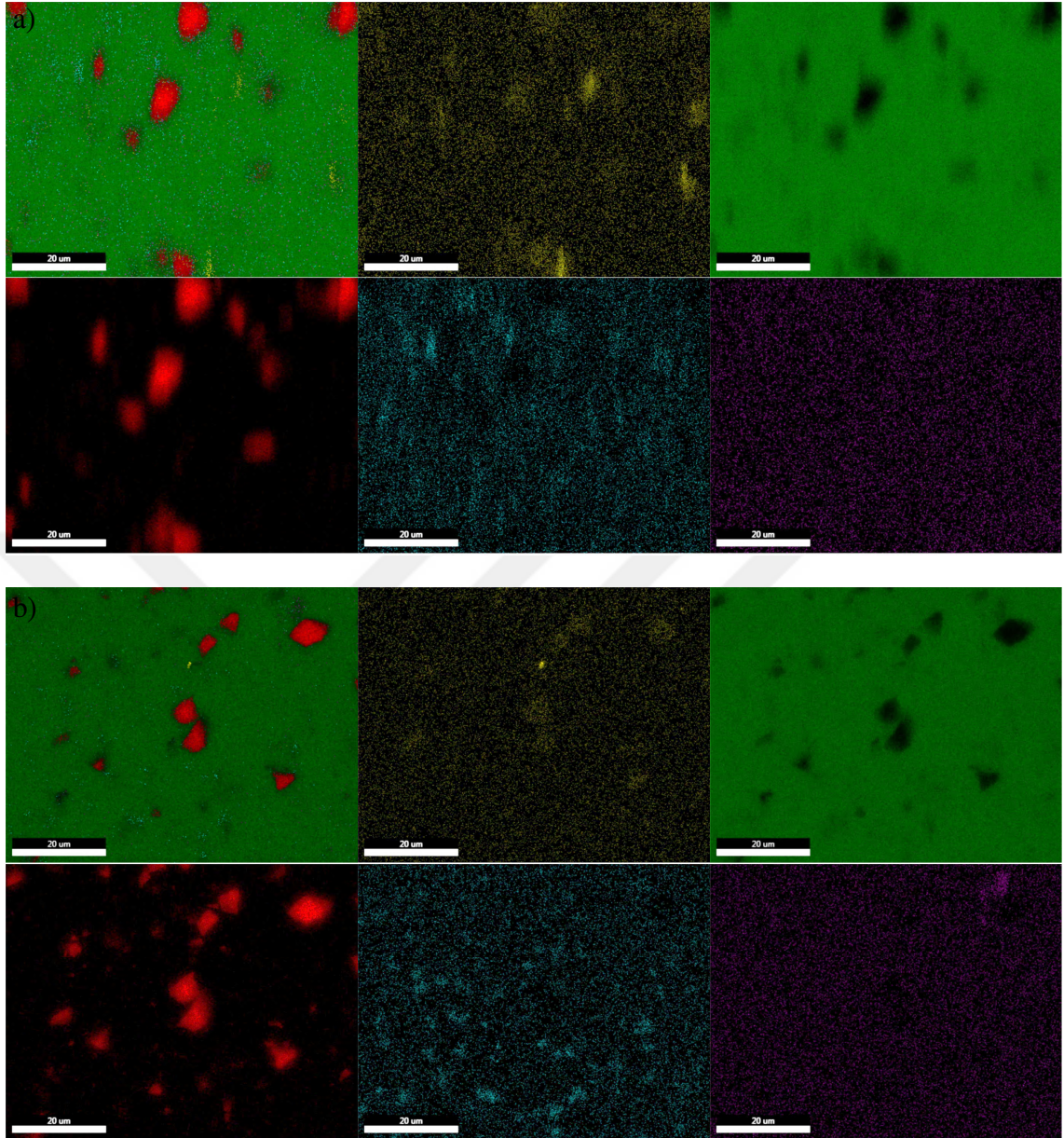
Tablo 3.1. A numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri

45 dakika alaşımlanmış

180 dakika alaşımlanmış

Element	Ağırlık %	Atomik %	Element	Ağırlık %	Atomik %
C	8.22	16.85	C	4.94	10.56
Al	82.35	75.15	Al	84.62	80.57
Si	8.88	7.78	Si	9.12	8.34
Cu	0.55	0.21	Cu	1.33	0.54

Şekil 3.19’da B numunesine ait SEM-EDS görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde bakır ve çinko elementlerinin iki alaşımlanma süresi için de iyi dağıldığı görülmüştür. Ancak bakır elementinde artan süreyle birlikte toplanmalar olduğu görülmüştür. Her iki grupta da Si-Al yapıları olduğu ve bu yapılar içerisinde silisyum oranının yapı genelinden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca 180 dakika alaşımlanmış numunelerde az miktarda (%0) alaşımlanmamış C ve Al tozları olduğu gözlenmiştir. Karbon elementinin dağılımının Şekil 3.18’deki dağılıma göre daha homojen olduğu görülmüştür.



Şekil 3.19. B numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımlanmış b)180 dakika alaşımlanmış

B numunesine ait SEM-EDS analizinde elementlerin kütlece ve atomik yüzdeleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. B numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri

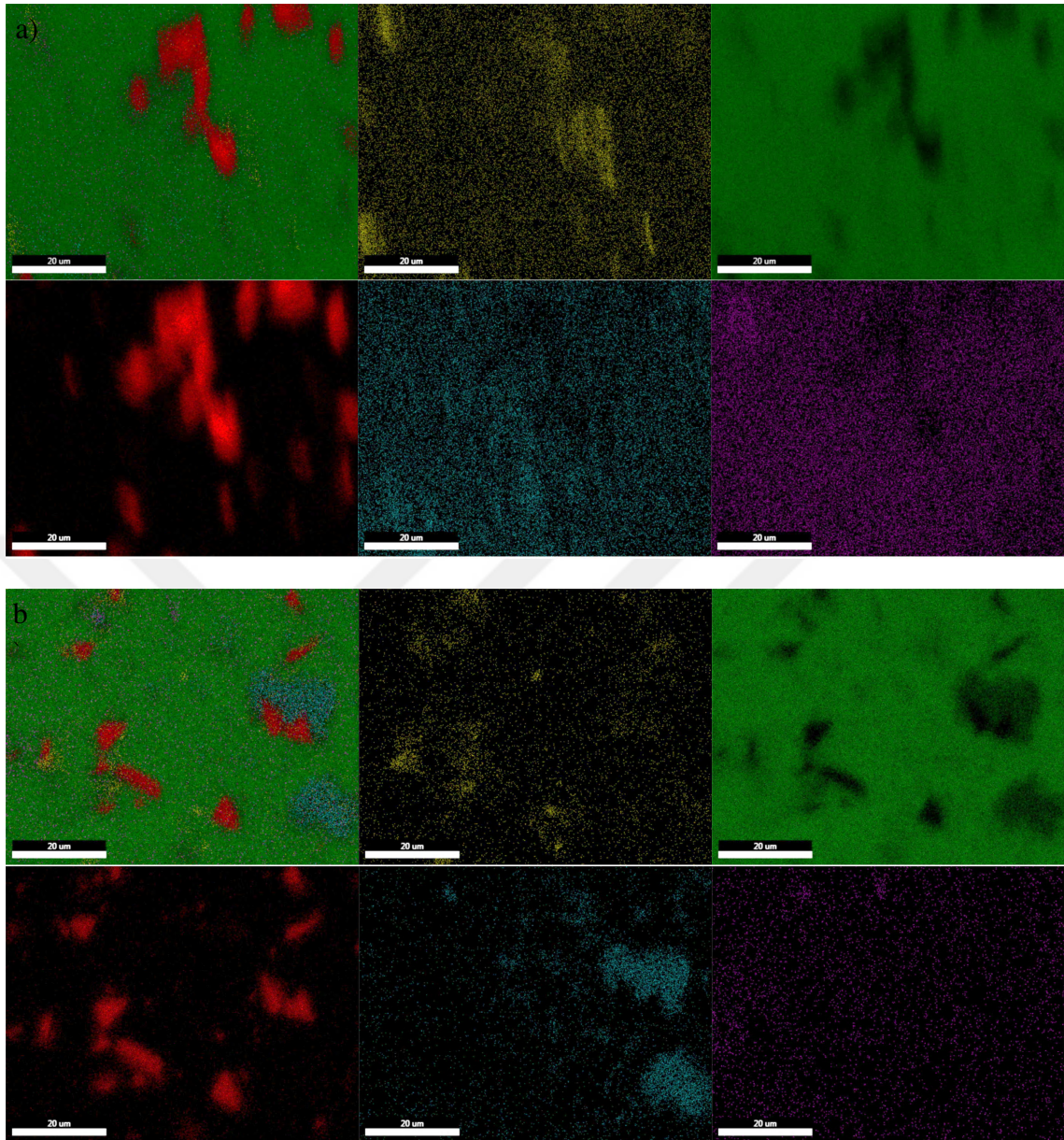
45 dakika alaşımlanmış

180 dakika alaşımlanmış

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	5.35	11.44
Al	83.41	79.43
Si	8.99	8.22
Cu	1.67	0.68
Zn	0.58	0.23

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	3.91	8.52
Al	87.15	84.56
Si	6.25	5.83
Cu	1.11	0.46
Zn	1.58	0.63

Şekil 3.20'da C numunesine ait SEM-EDS görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.20. C numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımlanmış b) 180 dakika alaşımlanmış

Şekil 3.20-a incelendiğinde Si-Al, Al-Si oluşumları görülmektedir. Karbon ve Silisyum tanelerinin yer yer yoğunlaştığı yer yer seyrekleştiği görülmektedir. Şekil 3.20-b numunesi genel görünümünde ise Si-Al oluşumları ve alaşımlanmamış tozlar dikkat çekiyor. Alaşımlanmamış tozların varlığı ve Si-Al oluşumlarının çevresinde toplanmaları, Si-Al yapılarının olduğu bölgelerde Si oranının ağırlıkça %56'ya kadar çıkması silisyumun yapı içerisinde homojen bir dağılım göstermediğini ifade etmektedir. Sürenin artışı ile ortaya çıkan bu yapı başlangıç tozlarının optimize edilmediğini veya sinterleme esnasında bir problem meydana geldiğini göstermektedir.

Çinko ve bakır elementleri ise konsantrasyon olarak düşük miktarlarda olmalarına rağmen belirgin halde oldukları görülmektedir.

C numunesine ait SEM-EDS analizinde elementlerin kütlece ve atomik yüzdeleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

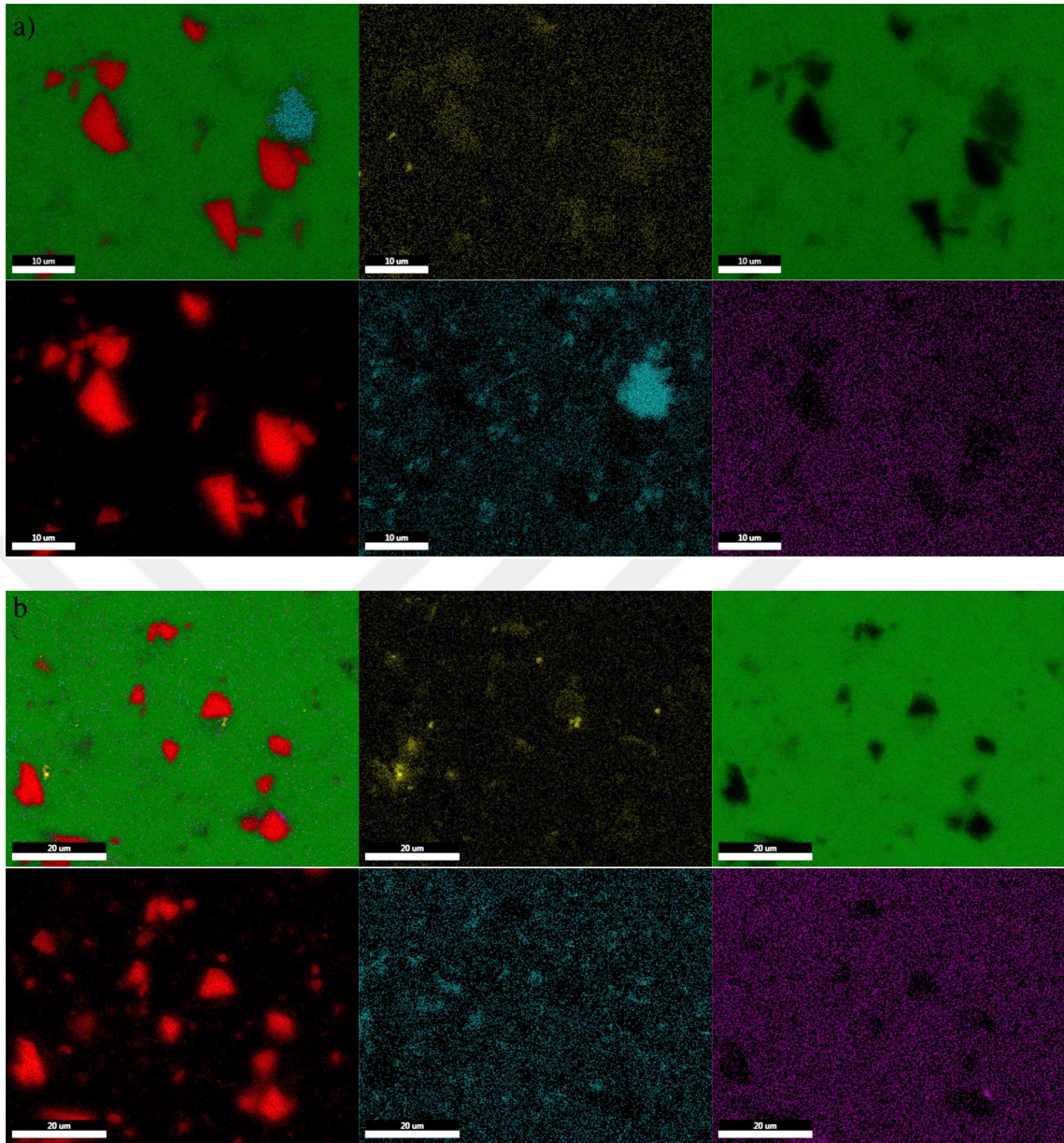
Tablo 3.3. C numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri

45 dakika alaşımlanmış

180 dakika alaşımlanmış

Element	Ağırlık %	Atomik %	Element	Ağırlık %	Atomik %
C	7.94	16.79	C	13.52	26.77
Al	75.38	70.97	Al	73.97	65.22
Si	11.12	10.05	Si	7.07	5.99
Cu	1.84	0.74	Cu	3.81	1.42
Zn	3.73	1.45	Zn	1.63	0.59

Şekil 3.21'de D numunesine ait SEM-EDS görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.21. D numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımlanmış b) 180 dakika alaşımlanmış

45 dakika alaşımlanmış D numunesinin görüntüsü incelendiğinde Al-Si ve Si-Al yapılar ve alaşımlanmamış tozlar dikkat çekmektedir. Alaşımlanmamış tozun (%0) kütleli olarak içeriğine bakıldığında C (%10), Al (%36), Si (%2), Cu (%44.9) ve Zn (%5.7) olduğu görülmektedir. 5. Resimden de anlaşılacağı üzere özellikle Cu'da topaklanmalar görülmektedir. 180 dakika alaşımlanmış D numunesinin görüntüsü incelendiğinde Al-Si-C ve Si-Al yapılar ve az miktarda alaşımlanmamış tozlar olduğu görülmektedir.

D numunesine ait SEM-EDS analizinde elementlerin kütlece ve atomik yüzdeleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

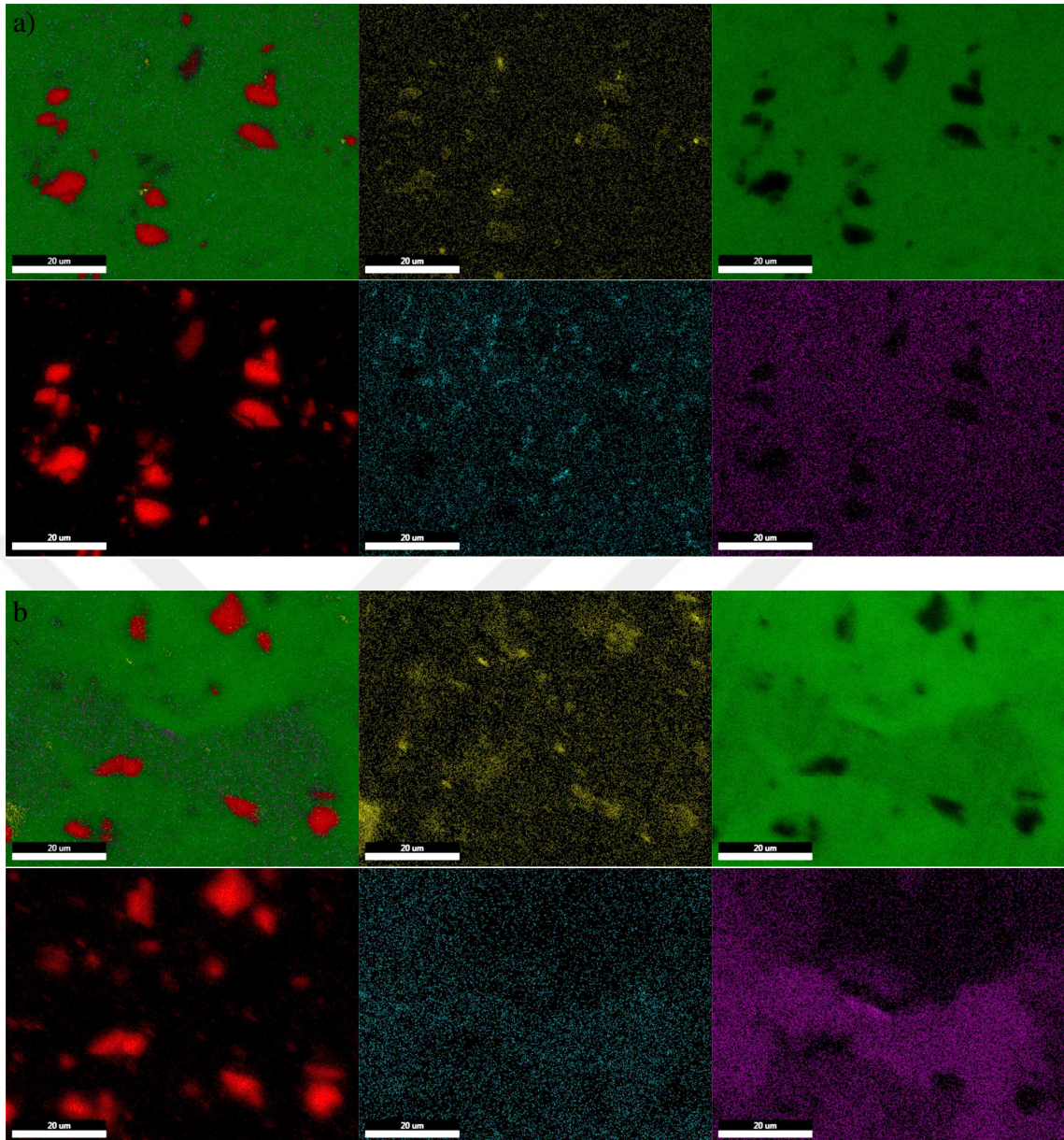
Tablo 3.4. D numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri

45 dakika alaşımlanmış

180 dakika alaşımlanmış

Element	Ağırlık %	Atomik %	Element	Ağırlık %	Atomik %
C	6.15	13.33	C	58.36	78.06
Al	76.08	73.36	Al	23.64	14.08
Si	11.75	10.89	Si	10.48	5.99
Cu	3.05	1.25	Cu	2.34	0.59
Zn	2.96	1.18	Zn	5.17	1.27

şekil 3.22'de E numunesine ait SEM-EDS görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.22. E numunesine ait SEM-EDS görüntüleri a) 45 dakika alaşımlanmış b) 180 dakika alaşımlanmış

E numunesinin 45 dakika alaşımlanmış halinin SEM görüntülerinde Si-Al yapılar ve alaşımlanmamış tozlar olduğu görülmektedir. Alaşımlanmamış toz içerisinde ağırlıkça %42 C, %9.9 Al, %4.55 Si, %9.8 Cu ve %33.14 Zn olduğu görülmektedir. 180 dakika alaşımlanmış yapılarda Al yapının yanında sadece Si-Al yapılar olduğu gözlenmiştir. Zn, Cu, C ve Si genel olarak iyi dağılım göstermektedir.

E numunesine ait SEM-EDS analizinde elementlerin kütlece ve atomik yüzdeleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. E numunesine ait SEM-EDS toplam spektrum verileri

45 dakika alaşımlanmış

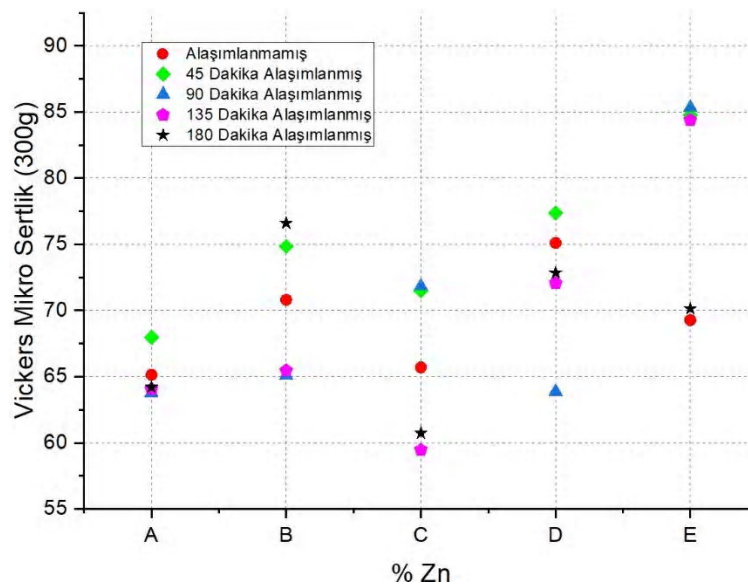
Element	Ağırlık %	Atomik %
C	6.27	13.70
Al	76.58	74.46
Si	9.28	8.66
Cu	1.79	0.74
Zn	6.07	2.44

180 dakika alaşımlanmış

Element	Ağırlık %	Atomik %
C	7.54	16.20
Al	81.14	77.57
Si	3.36	3.09
Cu	0.59	0.24
Zn	7.36	2.90

### 3.2.3. Mikrosertlik İncelemesi

Üretilen tüm numunelere DuraScan G5 cihazında mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler yapılırken ön yük olarak 300 gram ve 10 m/s değerleri kullanılmıştır. Bu incelemelerde lens görüntüsünde alüminyum renginde olan yerlerde sertlik ölçümleri her bir numune için beşer kez yapılmış, elde edilen sonuçlarda en yüksek ve en düşük değerler atılarak kalan üç değer aritmetik ortalaması alınmıştır. Mikrosertlik incelemesinden elde edilen veriler Şekil 3.23'te gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Numunelerin mikrosertlik değerleri

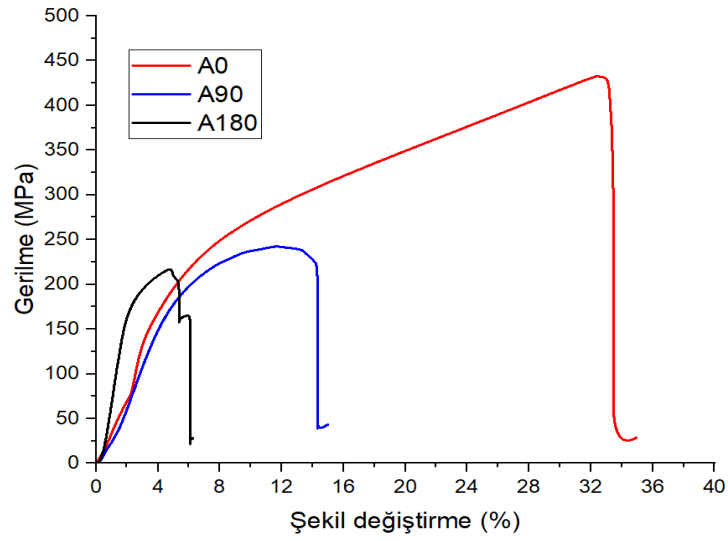
Ağırlıkça %4 Zn içeren C numunesinde 45 ve 90 dakika alaşımlanmış numuneler benzer sertlik değerine sahipken; 135 ve 180 dakika alaşımlanmış numunelerin birbirine benzer sertlik değerinde olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %8 Zn içeren E numunesinde alaşımlanmamış ve 180 dakika alaşımlanmış numunelerde yakın sertlik değerleri görülmüştür. 45, 90, 135 dakika alaşımlanmış numunelerde ise sertlik değeri daha yüksek ve birbirine benzer değerlerde olduğu görülmüştür.

135 dakika alaşımlanmış numunelerde ağırlıkça %4 ve üzerinde Zn içeren numunelerde sertlik değerlerinde belirgin bir artış görülmüştür. 90 dakika alaşımlanmış numunelerde ağırlıkça %0-6 Zn içeren numunelerde benzer sertlik değerleri görülürken, ağırlıkça %8 Zn içeren E numunesinde sertlikte belirgin bir artış görülmüştür. 45 dakika alaşımlanmış numunelerde Zn artışıyla birlikte genellikle sertlik değerinde artış görülmüştür. Alaşımlanmamış ve 180 dakika alaşımlanmış numunelerde Zn oranıyla bağlantılı anlamlı bir değişim görülmemiştir.

#### **3.2.4. Basma Deneyleri**

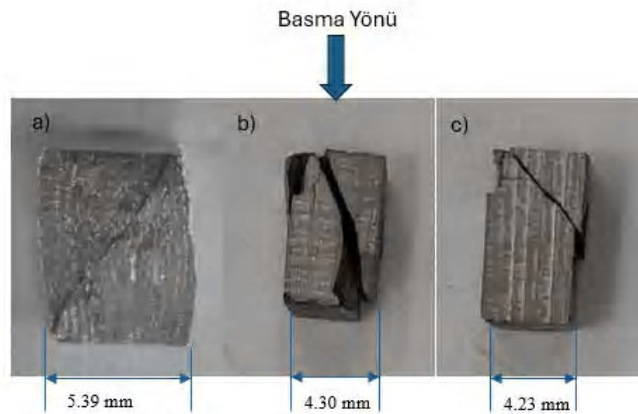
Sinterlenmiş numunelerden elde edilen dikdörtgenler prizması şeklinde kesilmiş parçalara basma mukavemeti testleri Shimadzu AG-X cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden 3'er adet 4x4x8 mm ölçülerinde dikdörtgenler prizması şeklinde parçalar çıkarılmış ve cihazın test hızı 1 mm/dak. olarak ayarlanmıştır.

A numunesine ait alaşımlanmamış, 90 dakika alaşımlanmış ve 180 dakika alaşımlanmış hallerinin basma deneylerine ait gerilme % şekil değişim grafiği Şekil 3.24'te gösterilmektedir.



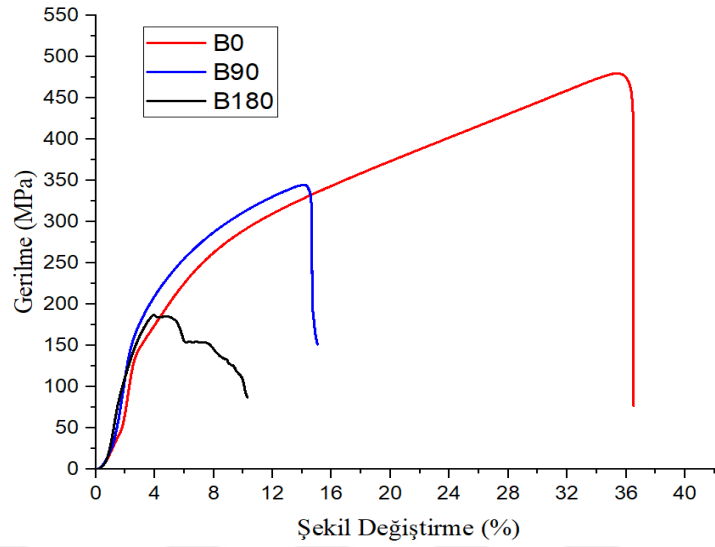
Şekil 3.24. A numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği

Çinko içermeyen A numunesine ait gerilme % şekil değişim grafiği incelendiğinde mekanik alaşımlama işleminin hem maksimum gerilmeye hem de şekil değiştirmede negatif bir etki bıraktığı gözlenmiştir. 180 dakika alaşımlanmış olan numunede meydana gelen Al-Si yapısı yapıyı kırılgan bir hale getirmiştir. Basma testi uygulanan numunelerde kırılma meydana geldiği görülmektedir. Basma testi uygulanan A numunelerinin görüntüleri Şekil 3.25'te verilmiştir.



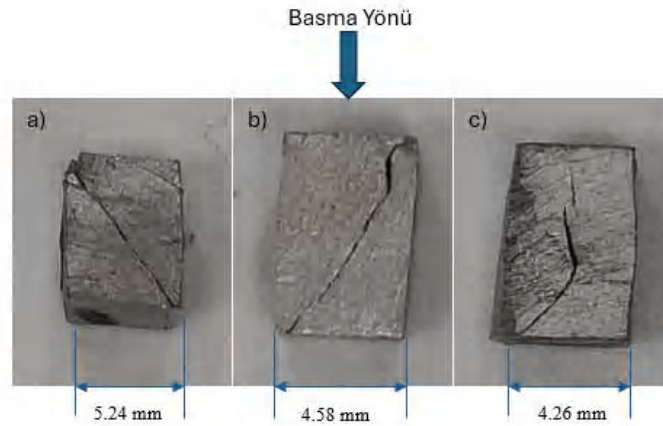
Şekil 3.25. Basma testine tutulmuş A numunesi a) Alaşımlanmamış b) 90 dakika alaşımlanmış c) 180 dakika alaşımlanmış

Ağırlıkça %2 miktarda Zn içeren B numunesinin 90 ve 180 dakika alaşımlanmış ve alaşımlanmamış hallerinin gerilme-% şekil değişim grafiği Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



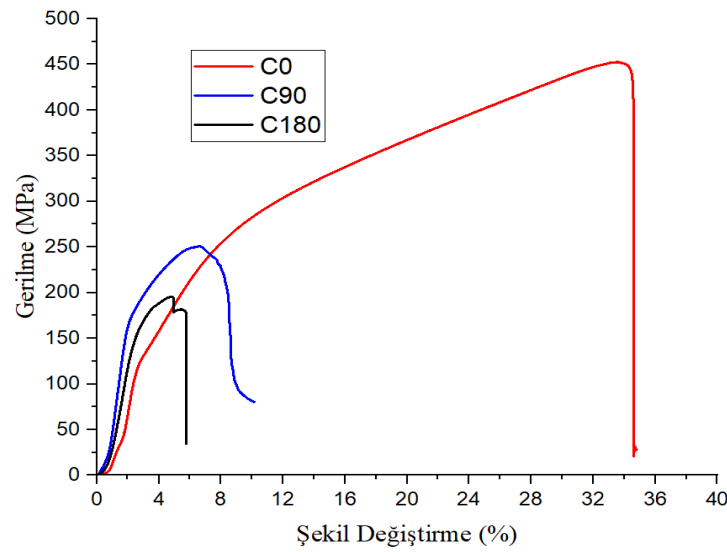
Şekil 3.26. B numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği

B numunesine ait gerilme-% şekil değişim grafiği incelendiğinde, 90 dakika alaşımlamanın B numunesinde A numunesine göre hem maksimum gerilme hem de şekil değiştirme parametrelerinde daha yüksek değerler görülmektedir. 180 dakika alaşımlanmış B numunesinin A numunesine göre alaşımlama işlemiyle basma mukavemetinin azaldığı görülmüştür. EDS analizlerinde görülen alaşımlanmamış toz ve Si-Al içeriği yapıyı kırılgan hale getirmiştir. Bileşime eklenen %2 Zn katkısı ile alaşımlanmamış numunede ve 45 dakika alaşımlanmış numunede malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti yaklaşık %10 oranında artarken, 90 dakika alaşımlanmış numunenin dayanabileceği maksimum gerilme değeri yaklaşık %40 artmıştır. Basma testi uygulanan B numunelerinin test sonrası hasar görüntüleri Şekil 3.27’de verilmiştir.



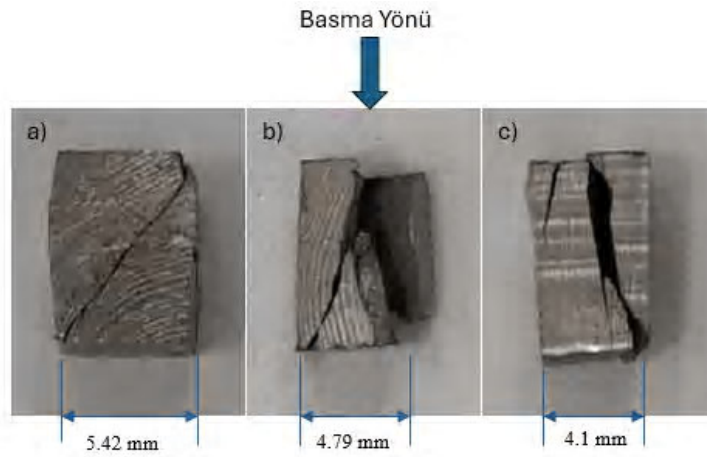
Şekil 3. 27. Basma testine tutulmuş B numunesi a) Alaşımınmamış b) 90 dakika alaşımınmış c) 180 dakika alaşımınmış

C numunesine ait gerilme-% şekil değişim grafiği Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



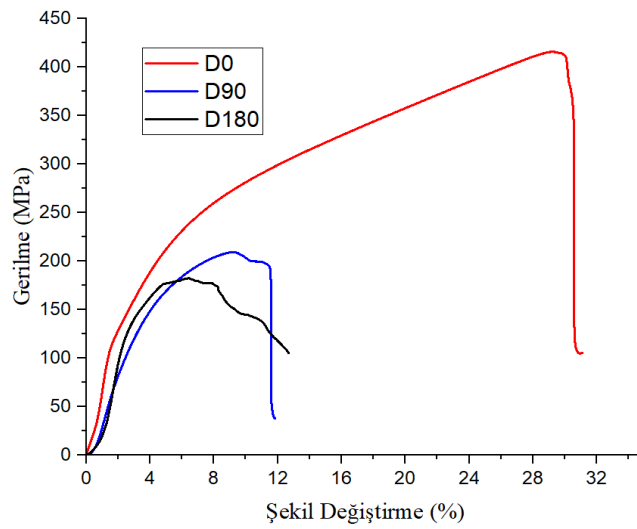
Şekil 3.28. C numunesinin gerilme-% şekil değişim grafiği

C numunesine ait gerilme-% şekil değişim grafiği incelendiğinde bütün alaşımlama sürelerinde hem gerilme hem de şekil değişim parametrelerinde alaşımınmamış numuneye göre düşüş olduğu görülmektedir. C numunelerinde gözlemlenen Si-Al, Al-Si yapıları ve alaşımınmamış tozların varlığı yapının kırılgan hale gelmesine neden olmuştur. Alaşımınmamış tozlar içerisinde C (%22) önemli yer tutmaktadır ve yapının kırılgan hale gelmesine neden olmuştur. Basma testi uygulanan C numunelerin hasar görüntüleri Şekil 3. 29’da verilmiştir.



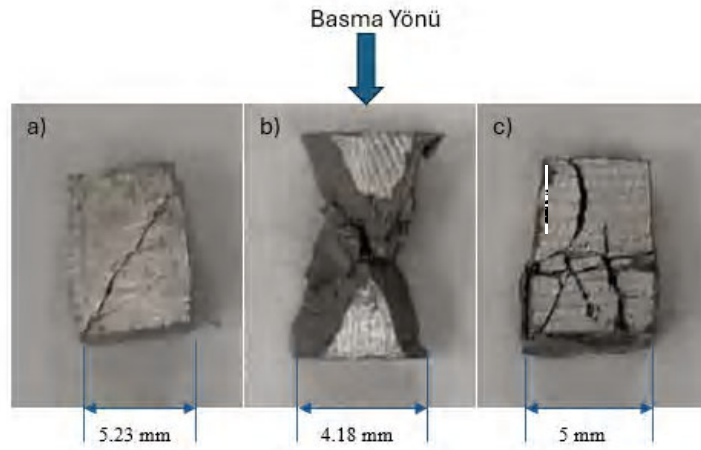
Şekil 3.29. Basma testine tutulmuş C numunesi a) Alaşımınmamış b) 90 dakika alaşımınmış c) 180 dakika alaşımınmış

D numunesinin alaşımınmamış, 90 ve 180 dakika alaşımınmış hallerinin basma deneylerinden elde edilen grafik Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



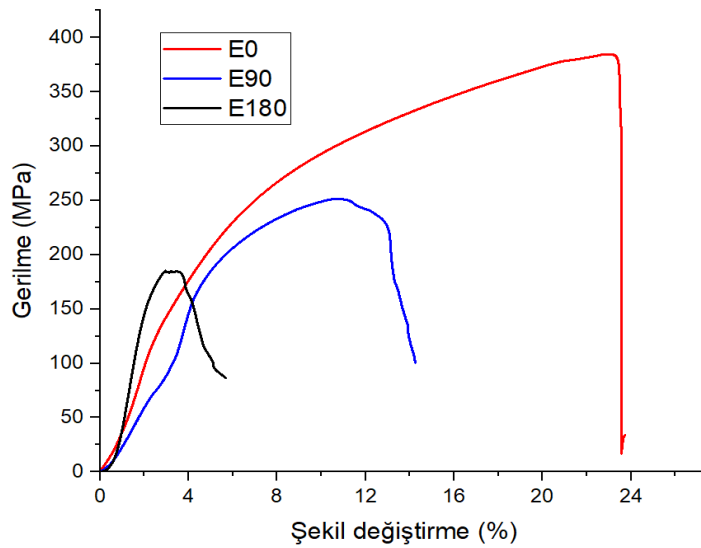
Şekil 3.30. D numunesinin gerilme-% şekil değişirme grafiği

90 ve 180 dakika alaşımınmış D numunesinde C numunesine göre basma mukavemeti azalırken elastikiyetlerinin arttığı görülmüştür. D numunelerinde de tıpkı C numunesinde olduğu gibi Al-Si, Si-Al ve alaşımınmamış tozlar yapının homojenliğini bozmuştur. Basma testine tabii tutulan D numunelerinin hasarları Şekil 3.31'de verilmiştir.



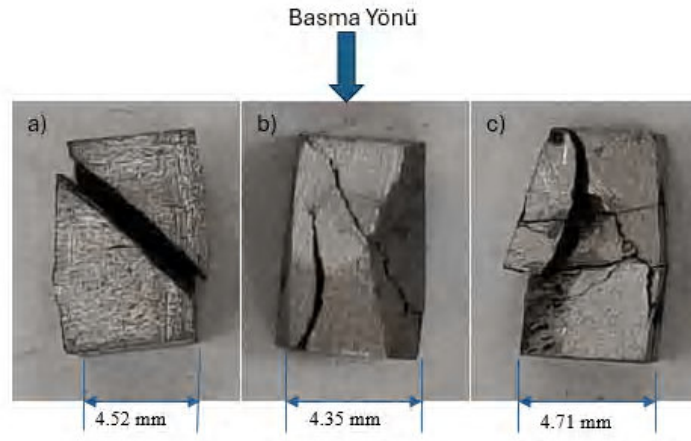
Şekil 3.31. Basma testine tutulmuş D numunesi a) Alaşımlanmamış b) 90 dakika alaşımlanmış c) 180 dakika alaşımlanmış

E numunesine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.32’de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. E numunesinin gerilme-% şekil değiştirme grafiği

E numunesinin gerilme-% şekil değişim grafikleri incelendiğinde 90 dakika alaşımlanmış numunelerin elastikiyetleri D numunesine göre artarken, alaşımlanmamış numunenin elastikiyetinde D numunesine göre düşüş gözlenmiştir. E serisinde gözlenen Si-Al yapılar ve alaşımlanmamış tozlar yapıyı kırılgan hale getirmiştir. Basma testi uygulanan numunelerin hasar resimleri Şekil 3.33’te verilmiştir.



Şekil 3.33. Basma testine tutulmuş E numunesi a) Alaşımınlanmamış b) 90 dakika alaşımınlanmış c) 180 dakika alaşımınlanmış

## 4. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 4.1.Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, yeryüzünde en fazla kullanılan elementlerden biri olan alüminyuma bakır, silisyum ve çinko metal tozları, grafen tozu ve silisyum karbür seramik tozu ilave edilerek yeni bir malzeme üretilmesi amaçlanmıştır. Metal elementlerin kendi aralarında alaşımlanması ve bu alaşımların seramik ile birleşerek kompozit malzeme ortaya çıkarması amacıyla yüksek enerjili bilyeli öğütme ve mekanik alaşımlama yöntemi kullanılmıştır. Öğütme işlemi hareketi spex şeklinde ileri geri hareket yapan karıştırıcı cihazda yapılmıştır. Karışıma eklenen tozlar Al7xxx serisi alaşımlara uygun olacak şekilde seçilmiş ve çinko elementinin alaşımlama üzerinde nasıl bir etkisi olacağı, nihai ürüne nasıl katkı sağlayacağı incelenmiştir. Değişen Çinko oranlarının yanı sıra farklı öğütme sürelerinin de malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- A numunesinin tüm alaşımlama süreleri için XRD grafikleri incelendiğinde alaşımlama süresinin artması ile en yüksek dereceli Al pik boylarında ve genişliklerinde kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Scherrer eşitliği ile hesaplanan kristal boyut değerinde de kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmüştür. B numunesi incelendiğinde alaşımlanmamış numunenin A numunesi ile benzerlikler gösterdiği, 90 dakika alaşımlanmış numunenin iyi alaşım oluşturduğu, 135 dakika ve 180 dakika alaşımlanmış numunelerin ise 90 dakika alaşımlanmış B numunesi ile benzer sonuçlar gösterdiği görülmüştür. C, D ve E numunelerinin XRD grafiklerinde de alaşımlanma süresi arttıkça

alüminyumun alaşıma katıldığı gözlenmiştir. C, D ve E numunelerinde karbon ve karbonlu yapılar görülmüştür.

- Değişen çinko oranlarına göre XRD grafikleri incelendiğinde; %2 çinko içeren B serisinde çinkonun alaşıma katılma oranı oldukça iyi iken, daha yüksek oranlarda 45 dakika alaşımlanmış numunelerde alaşıma katılma oranları düşmüştür. Özellikle %8 çinko içeriğine sahip E serisinde alaşımlanmamış tozlar içerisinde çinko oranı %33 seviyesine ulaşmıştır. 180 dakika alaşımlanmış numunelerde ise D ve E gruplarında tamamen alaşıma katılmış, C numunesinde ise alaşımlanmamış toz içeriğinde bulunmaktadır.
- XRD analizi genel olarak alaşımlama süresi ve Zn miktarı arttıkça yapıda intermetalik fazlar oluştuğunu ve numunelerde alaşımlamanın meydana geldiği görülmektedir.
- A numunesinde alaşımlama süresi arttıkça daha büyük fazlar meydana gelmiş, tane sınırları belirginleşmiş, intermetalik ve dispersoid parça oluşumu artmıştır. B numunesinde alaşımlama süresi arttıkça homojenliğin arttığı, kısa alaşımlama sürelerinde aglomerasyon olasılığının yüksek olduğu görülmüştür. En düzensiz olan yapı B0 iken, en homojen yapının B180 olduğu görülmektedir. C numunesinde artan alaşımlama süresi ile alaşıma katılma oranının düştüğü görülmektedir. 180 dakika alaşımlanmış C numunesinin EDS sonuçları da %31 gibi yüksek bir oranda alaşımlanmamış toz varlığını göstermektedir. Oluşan Si-Al fazları malzemenin özelliklerini iyileştirirken, alaşıma katılmayan tozların oranının yüksek olması malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatmaktadır. Sertlik testi sonuçları da SEM ve EDS görüntülerini desteklemektedir.
- D numunesinde alaşımlama süresi arttıkça fazlar arasında çözünme artmakta ve 180 dakika karıştırılmış numunede görülen Al-Si-C fazlar hafif ve kararlı bir malzeme tasarımının yanısıra yapının sertliğini ve tribolojik performansını da arttırmaktadır. Vickers sertlik testi sonuçları da sertliğin arttığını göstermekte ancak numune basma testinde aynı performansı göstermemektedir. EDS sonuçlarında görülen alaşımlanmamış tozlar ve Al-Si-C fazının yeterli miktarda oluşmaması malzemenin dayanımının düşük olmasına neden olmaktadır. E numunesinde parçacık boyutu alaşımlama süresi arttıkça büyümekte, yapı daha az homojen hale gelmekte ve yüzey düzensizlikleri artmaktadır. Boşluklar ve yüzey düzensizlikleri en fazla 180 dakika alaşımlanmış E numunesinde

mevcut iken en homojen ve güçlü yapı 90 ve 135 dakika alaşımlanmış E numunelerinde elde edilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri de sonuçlarımızı doğrulamaktadır.

- Sinterlenen numunelerin SEM-EDS görüntüleri değişen çinko oranına göre incelendiğinde silisyumun E numuneleri hariç hiçbir numunede homojen dağılım göstermediği görülmüştür. Bakır ve çinko genel olarak iyi dağılım göstermiştir. Genellikle alaşımlanma süresinin artması alaşıma katılmamış tozların görülmesine neden olmuştur. Numunelerde Al-Si ve Si-Al yapılar oluştuğu görülmüştür, 180 dakika alaşımlanmış D numunesinde Al-Si-C yapı oluşumu gözlenmiştir. Silisyum ve karbonun aglomerasyon eğilimi yapının kırılğan olmasına neden olmuştur. Çinko miktarının ve alaşımlanma süresinin artışının aglomerasyonu önlediği, daha homojen bir dağılım sağladığı görülmüştür.
- Sinterlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri incelendiğinde, alaşımlanma süresi ve çinko miktarının artması ile sertliğin arttığı gözlenmiştir.
- En uygun kristal boyut 36.8nm ile 135 dakika alaşımlanmış E numunesinde elde edilmiştir.
- Alaşımlanmamış, 90 ve 180 dakika alaşımlanmış numuneler 4\*4\*8 mm'lik basma numuneleri haline getirilerek basma dayanımları incelenmiştir. Alaşımlanmamış numuneler için çinko oranı arttıkça basma dayanımının düştüğü görülmüştür. 90 dakika alaşımlanmış numunelerde %2 ve %4 çinko oranına sahip numunelerde basma dayanımlarının %6 çinko içeren numunelere göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. 180 dakika alaşımlanmış numunelerde ise en iyi basma dayanımı çinko içermeyen A numunesinde görülmüş, diğer numunelerde yakın değerlerde seyrettiği izlenmiştir.
- Basma testi sonrası numuneler incelenmiş ve yapılarda meydana gelen kırılmaların gevrek kırılma olduğu görülmüştür. Artan alaşımlanma süreleri bazı kompozisyonlarda tozların alaşıma katılmasına mâni olmuştur. Hemen hemen tüm numunelerde meydana gelen Si-Al, Al-Si gibi yapıların varlığı, karbon ve silisyumun yapıda homojen dağılmaması gibi etkenlerin yapıyı kırılğan hale getirdiği görülmüştür.

#### 4.2.Öneriler

- Sinterleme işlemi farklı sıcaklık ve basınç altında yapılarak daha mukavemetli malzemelerin üretilmesi sağlanabilir.
- Mikrodalga sinterleme yöntemi uygulanarak malzemede aglomerasyon ve istenmeyen fazların oluşması engellenebilir.
- Karıştırma işlemi ultrasonik karıştırma yöntemleri ile iyileştirilebilir.
- Grafenin daha homojen dağılması için karıştırma parametreleri, soğutma hızı optimize edilebilir.
- Grafenin Si-Al, Al-Si fazları ile etkileşimini anlamak için TEM analizi gibi detaylı analizler yapılabilir.
- Tozların oksitlenmelerini engelleyip, safsızlığını koruyabilmesi için oksijensiz ortam gerektiren işlemler için glove box kullanılması daha uygun olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Çetin, S., 2018. Alüminyum Esaslı Seramik Takviyeli Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilmiş Kompozit Malzemenin Mikro Yapısının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 47 s.
2. Şahin, O., 2020. Yüksek Enerjili Bilyeli Öğütme ile SiC Takviyeli Al-Cu-Mg Kompozit Malzemenin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 96 s.
3. El-Eskandarany M.S., 1995. Structural evolution of rod milled Cu<sub>2</sub>O and Ti powders during mechanical solid state reduction. **Materials Transactions, JIM**, **36** (2): 182-187.
4. Gökçe, H., 2013. Mekanik Alaşımlama Süreçleri ile Al-20Si Esaslı Toz ve Sinter Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 206 s.
5. Yağci, T., Korkmaz, A., 2021. Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış ve Değerlendirme. **Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi** **26(3)**: 1191-1210.
6. <https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/yerkabugu-kta-kabugu-okyanus-kabugu.html>  
(Erişim tarihi: Haziran 2024)
7. Jupp, J. A., & Price, H. J., 1998. Transport aircraft - a challenge for aluminum alloys for the 21st century. **Aeronautical Journal**, **102**(1014), 181–188.
8. Lea, F. C., 1919. Aluminium Alloys for Aeroplane Engines. **Aeronautical Journal (London, England: 1897)**, **23**(107), 545–607.
9. Inoue, M., Nagao, H., Sukanuma, K. and Niihara, K., 1998). Fracture properties of Fe-40 at. % Al matrix composites reinforced with ceramic particles and fibers, **Materials Science & Engineering, A** (258), 298-305.
10. Davis, J.R., 2001. Alloying: Understanding the Basics. ASM International, Ohio, 647 pp.

11. Dursun, T., Soutis, C., 2014. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. **Materials and Design** **56**: 862-871.
12. Starke, E. A., & Staley, J. T. (1996). Pro 9. **Aerospace Sci (Vol. 32)**.
13. Prakash, D.S., Mariappan, R., Anand, J.V., Sundar, D.J., Dinesh, K., 2018. A review on latest development of aluminium alloy metal matrix composite through powder metallurgy route. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development Special Issue:235-241**.
14. Li, S. S., Yue, X., Li, Q. Y., Peng, H. L., Dong, B. X., Liu, T. S., ... Jiang, Q. C., 2023. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of Materials Research and Technology*.
15. Karabulut, H., 2011. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, B<sub>4</sub>C Takviyeli Al Matrisli Kompozit Üretiminde Mekanik Alaşım Süresinin Kompozit Özelliklerine Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 136s.
16. Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., & Vafadar, A., 2020. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. **Journal of Materials Research and Technology**, **4**, 43-55
17. Jini Raj, R., Panneer Selvam, P., & Pughalendi, M., 2021. A Review of Aluminum Alloys in Aircraft and Aerospace Industry Aerodynamic. **Journal of Huazhong University of Science and Technology**, **50(4)**,56-65
18. Özyürek, D., Yıldırım, M., Çiftçi İ., 2012. The tribological properties of A356-SiCp metal-matrix composites fabricated by thixomoulding technique. **Science and Engineering of Composite Materials**, **19(4)**: 351-356.
19. Clark, R., Coughran, B., Traina, I., Hernandez, A., Scheck, T., Etuk, C., Peters, J., Lee, E. W., Ogren, J. and Es-Said, O. S.,2005. On the correlation of mechanical and physical properties of 7075-T6 Al alloy. **Engineering Failure Analysis**, **12**: 520-526.
20. Khan, M. A., Wang, Y., Yasin, G., Malik, A., Nazeer, F., Khan, W. Q., ... Ahmed, T. 2019. Microstructure characteristic of spray formed 7055 Al alloy

subjected to ballistic impact by two different steel core projectiles impact. **Journal of Materials Research and Technology**, **8**(6), 6177–6190.

21. Li, X., Yang, Y. and Cheng, X., 2004. Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites, **Journal of Materials Science**, **39**: 3211-3212.
22. Mahathaninwong, N., Plookphol, T., Wannasin, J. and Wisutmethangoon, S., 2012. T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy, *Materials Science and Engineering A* (532): 91-99.
23. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da98aea5e9de44138a7d28782f60a836> (Erişim Tarihi: Haziran 2024)
24. Chandrashekharaiyah, T. M., Kori, S.A., 2009. Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al-Si alloys, *Friction and wear of aluminium-silicon alloys*, **Tribology International**, **42**, 59-65.
25. Heiberg G, Arnberg L., 2001. Investigation of the microstructure of the Al-Si eutectic in binary aluminum-7 wt% silicon alloy by electron backscatter diffraction (EBSD), **Journal of Light Metals**, **1** (1), 43-49.
26. Ng E.G., Szablewski, D., Dumitrescu M., Elbestawi M.A., Sokolowski J.H., 2004. High speed face milling of a aluminium silicon alloy casting, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **53** (1), 69-72.
27. Ibrahim M.F., Samuel E., Samuel A.M., Al-Ahmari A.M.A., Samuel F.H., 2011. Metallurgical parameters controlling the microstructure and hardness of Al-Si-Cu-Mg base alloys, **Materials & Design**, **32** (4), 2130-2142.
28. Taek-Soo, K., Byong-Taek, L., Lee C.R, Chun B.S., 2001. Microstructure of rapidly solidified Al-20Si alloy powders *Materials Science and Engineering: A*, **304-306** (31), 617-620.
29. Rajabi M., Vahidi M., Simchi, A., Davam, P., 2009. Effect of rapid solidification on the microstructure and mechanical properties of hotpressed Al-20Si-5Fe alloys original research article **Materials Characterization**, **60** (11), 1370-1381.

30. Feng, W., Zhang Jishan, Xiong B., Zhang, Y., (2009. Effect of Fe and Mn additions on microstructure and mechanical properties of spraydeposited Al–20Si–3Cu–1Mg alloy **Materials Characterization**, **60** (5), 384-388."
31. Soon-Jik H., Suryanarayana C., Chun, B.S., 2004. Section-dependent microstructure and mechanical properties of rapidly solidified and extruded Al–20Si alloy **Materials Research Bulletin**, **39** (3), 465-474.
32. Taek-Soo, K., Suryanarayana C., Chun, B.S., 1999. Effect of alloying elements and degassing pressure on the structure and mechanical properties of rapidly solidified Al–20Si–5Fe–2X (X=Cr, Zr, orNi) alloys **Materials Science and Engineering A**, **278** (1-2), 113-120.
33. Yang, B., Wang, F., Zhang, J. S. 2003. Microstructural characterization of in situ TiC/Al and TiC/Al–20Si–5Fe–3Cu–1Mg composites prepared by spray deposition, **Acta Materialia**, **51** (17), 4977-4989.
34. Behret, G., 2020. Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Malzeme Karakterizasyonu. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 39 s.
35. Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. "Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler". **Mühendis ve Makina**, **cilt 56**, sayı 669: 36-47.
36. Zeng, X., Teng, J., Yu, J. gang, Tan, A. shuang, Fu, D. fa, & Zhang, H. 2018. Fabrication of homogeneously dispersed graphene/Al composites by solution mixing and powder metallurgy. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, **25**(1), 102–109.
37. Behret, G., Sahin, O., & Erturun, V. 2023. Production and characterization of GNPsreinforced Al-based composite material by mechanical alloying. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, **95**(7), 1137–1144.
38. Savage, N. 2012. "Materials science: super carbon". **Nature Materials**, 482: 30-31.
39. Başçıl, M. 2015. "Geleceğin malzemesi grafen," *Bilişim Dergisi*, 177: 156-165.
40. Ames, W., & Alpas, A. T. (1995). Wear mechanisms in hybrid composites of Graphite-20 Pct SiC in A356 Aluminum Alloy (Al-7 Pct Si-0.3 Pct Mg). **Metallurgical and Materials Transactions A**, **26**(1), 85–95.

41. Manohar, G., Maity, S. R., & Pandey, K. M. (2021). Microstructural and Mechanical Properties of Microwave Sintered AA7075/Graphite/SiC Hybrid Composite Fabricated by Powder Metallurgy Techniques. **Silicon**, **14**(5179), 5189.
42. Afifah, Md. A., Mohd, Z.O., Hanizam, H., Mohd, S.S., Intan, F.M., 2021. Recent development in graphene-reinforced aluminum matrix composite: A review. **Reviews on Advanced Materials Science** **60**: 801-817.
43. Kumar, N., Bharti, A., & Saxena, K. K. (2020). A re-analysis of effect of various process parameters on the mechanical properties of Mg based MMCs fabricated by powder metallurgy technique. *Materials Today: Proceedings*, **26**, 1953–1959.
44. Zhang, Z.A., Liu, Z.Y., Xiao, B.L., Ni, D.R., Ma, Z.Y. (2018). High efficiency dispersal and strengthening of graphene reinforced aluminum alloy composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing. **Carbon** **135**: 215-223.
45. Khan, M., Din, R.U., Basit, M.A., Wadood, A., Husain, S.W., Akhtar, S., Aune, R.E. (2021). Study of microstructure and mechanical behaviour of aluminium alloy hybrid composite with boron carbide and graphene nanoplatelets. **Materials Chemistry and Physics** **271**, 124936.
46. Hsieh, C.T., Ho, Y.C., Wang, H., Sugiyama, S., Yanagimoto, J. (2020). Mechanical and tribological characterization of nanostructured graphene sheets/A6061 composites fabricated by induction sintering and hot extrusion. *Materials Science and Engineering A*, **786**, 138998.
47. Zamani, N. A. B. N., Iqbal, A. A. K. M., & Nuruzzaman, D. M. 2019. Mechanical and Tribological Behavior of Powder Metallurgy Processed Aluminum–Graphite Composite. **Russian Journal of Non-Ferrous Metals**, **60**(3), 274–281.
48. Liu, J., Gao, F., Liu, C., Liu, X., Zhao, Z., Zhang, Y., Li, C., Zhu, X., Zheng, L. (2023). Influence of graphene content on the microstructure and properties of GNPs/2024Al composites. **International Journal of Electrochemical Science**, **18**, 100327.

49. Duntu, S.H., Tetteha, F., Ahmadb, I., Islam, M., Boakye-Yiadoma, S., (2021). Characterization of the structure and properties of processed alümina-graphene and alumina-zirconia composites. **Ceramics International** **47**, 367–380.
50. Şahin, Y., 2006. Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, Ankara, 424 s.
51. <https://idp.scientific.net/login> (Erişim Tarihi: Haziran 2024)
52. Kalemtaş, A., 2014. Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech&Composites*, Ekim-Kasım-Aralık Sayısı, 18-30 s.
53. Mindivan, H., 2007. Silisyum Karbür Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 224 s.
54. Uraylı, Ç., 2018. Cu-B4C Kompozit Malzemelerdeki Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması. Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu, 94 s.
55. Vani, V. V., & Chak, S. K., 2018. The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy. *Manufacturing Review*.
56. Purohit, R., Rana, R. S., Verma, C. S., 2012. Fabrication of Al-Sic P Composites Through Powder **Metallurgy Process and Testing Of Properties**, *2*(3), 420–437.
57. Karaoglu, S. Y., Karaoglu, S., & Unal, I. (2021). Aerospace industry and aluminum metal matrix composites. **International Journal of Aviation Science and Technology**, *2*(2), 73–81.
58. Koli, D. K., Agnihotri, G., Purohit, R., 2015. Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields. In *Materials Today: Proceedings (Vol. 2)*, pp. 3032–3041).
59. Peel, C. J., McDarmid, S., 1981. Application Of Improved Aluminium Alloys And Steels In Aircraft Structures. **Aeronautical Journal**, *85*(847), 320–326.
60. Zhou, B., Liu, B., & Zhang, S. (2021). The advancement of 7XXX series aluminum alloys for aircraft structures: **A review. Metals**, *11*(718).

61. Gan, K., Gu, M., 2008. The Compressibility of Cu/SiCp Powder Prepared by High-Energy Ball Milling. **Journal of Materials Processing Technology** **199**: 173-177.
62. Nazik, C., 2013. Alüminyum Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 107 s.
63. <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/> (Erişim Tarihi: Haziran 2024)
64. Keçeli, Z., 2007. Characterization Investigations of Powder and Sintered Al-SiC and Al-B4C Composites Developed via Mechanical Alloying / Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilmiş Al-SiC ve Al-B4C Kompozitlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 155s.
65. Rodopoulos, C.A., Wessel, J.K., 2004. Metal matrix composites, pp. 165-215. In: *The Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs* (Eds: J. K., Wessel). John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
66. Wang, H., Zhang, R., Hu, X., Wang, C. A., & Huang, Y. (2008). Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu–Al composite. **Journal of Materials Processing Technology**, **197**(1–3), 43–48.
67. Rofman, O. V., Prosviryakov, A. S., Kotov, A. D., Bazlov, A. I., Milovich, P. O., Karunakaran, G., & Mikhaylovskaya, A. V. (2022). Fabrication of AA2024/SiCp metal matrix composite by mechanical alloying. **Metals and Materials International**, **28**(811–822).
68. Sahin, O., & Erturun, V. 2024. Effect of Cu content and alloying time on mechanical alloyed Al-Cu-Mg-Zn&SiC composites. **Trans Indian Institute of Metals**, **77**(2), 379–387.
69. Surya, M. S., & Prasanthi, G. 2017. Manufacturing and Micro structure study of Al-SiC Functionally graded material. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 4, pp. 621–627). Elsevier.

70. Sahin, O., & Erturun, V., 2024. Effect of Cu Content and Alloying Time on Mechanical Alloyed Al-Cu-Mg-Zn&SiC Composites. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, **77**(2), 379–387.
71. Novák, P., 2020. Advanced powder metallurgy technologies. *Materials*.
72. Panda, A., Dobránsky, J., Jančík, M., Pandová, I., & Kačalová, M., 2018. Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies. **Metalurgija**, **57**(4), 353–356.
73. Sudha, G. T., Stalin, B., Ravichandran, M., & Balasubramanian, M. (2020). Mechanical properties, characterization and wear behavior of powder metallurgy composites - A review. *Materials Today: Proceedings*, **22**, 2582–2596.
74. Chouhan, T., Chouhan, H., & Soni, M. (2019). High strain rate behavior of aluminum produced by powder metallurgy. **Procedia Structural Integrity**, **14**, 883–890.
75. Danninger, H., De Oro Calderon, R., & Gierl-Mayer, C. (2017). Powder metallurgy and sintered materials. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
76. Oveisi, H., & Geramipour, T. (2019). High mechanical performance alumina-reinforced aluminum nanocomposite metal foam produced by powder metallurgy: fabrication, microstructure characterization, and mechanical properties. *Materials Research Express*, **6**(1250c2).
77. Ayata, A., 2014. Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Mikrodalga Enerjisi ile Sinterlenebilirliğinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 103 s.
78. Duggirala, R., Shivpuriv R., 1992. Effects of Processing Parameters in P/M Steel Forging on Part Properties: A Review Part I Powder Preparation, Compaction and Sintering. **JMEPEG** **1**: 495–503.
79. Suryanarayana C., 2001. Mechanical alloying and milling. **Progress in Materials Science**, **46** (1-2): 1-184.

80. Erturun, V., Çetin, S., & Sahin, O., 2021. Investigation of Microstructure of Aluminum Based Composite Material Obtained by Mechanical Alloying. **Metals and Materials International**, **27**(6), 1662–1670.
81. Haringa, J.L., Cook, B.A., Beaudry, B.J., 1992. Effects of Vial Shape on the Rate of Mechanical Alloying in Si<sub>80</sub>Ge<sub>20</sub>. **Journal of Materials Science** **27**: 801-804.
82. Kang, S.J.L., 2005. Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure. Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington, p 279.
83. German, R.M., 1996. Sintering Theory and Practice. Wiley Interscience Publication, p 568.
84. Benjamin, J. S., & Volin, T. E., 1974. The mechanism of mechanical alloying. **Metallurgical Transactions**, **5**(8), 1929–1934.
85. Neikov, O. D., 2019. Mechanical alloying. 91-124pp. In: *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders (Second Edition)*. Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00003-8>

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Figen KÖKLÜ  
**Uyruğu:** Türkiye (Türk-T.C)

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Anadolu Üniversitesi, İşletme	2016
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde Motor	2010
Lise	Etimesgut Anadolu Lisesi, Ankara	2004

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2013-Halen	Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi	Arş. Gör.
2012-2013	Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Uçak Teknolojisi	Öğr. Gör.
2011-2012	Kapadokya Üniversitesi, Uçak Teknolojisi	Ücr. Öğr. Gör.

### YABANCI DİL

İngilizce

### YAYINLAR

- Öztürk, O., & Köklü, F., & Can, D. (2020). The Importance of Quality Management in Aircraft Maintenance Area. *Proceedings of the 3rd International Erciyes Scientific Research Congress.*
- Öztürk, O., & Köklü, F., & Can, D. (2020). Evaluation of Training Hangars Used in Aviation System in Terms of Occupational Health and Safety. *Proceedings of the 3rd International Erciyes Scientific Research Congress.*

### BİLDİRİLER

- Köklü, F., & Erturun, V., (2024). Production and Characterization of 7xxx Series Composite Material by Powder Metallurgy Method. *4. International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies.*