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

MEKANİK ALAŞIMLAMA İLE ÜRETİLEN GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI MALZEME KARAKTERİZASYONU

Hazırlayan
Göksel BEHRET

Danışman
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Yüksek Lisans Tezi

Ekim 2020
KAYSERİ

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

MEKANİK ALAŞIMLAMA İLE ÜRETİLEN GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI MALZEME KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Göksel BEHRET

Danışman
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2020-10093 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ekim 2020
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.

Göksel BEHRET



YÖNERGEYE UYGUNLUK

"Mekanik alaşımlama ile üretilen Grafen takviyeli Alüminyum esaslı malzeme karakterizasyonu" adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Göksel BEHRET

Danışman
Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Veysel ERTURUN danışmanlığında **Göksel BEHRET** tarafından hazırlanan **"Mekanik alaşımlama ile üretilen Grafen takviyeli Alüminyum esaslı malzeme karakterizasyonu"** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Sivil Havacılık** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

… / … / 2020

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Veysel ERTURUN .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem KARCI .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Metin UZUN .....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...… tarih ve ……..……sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bana lisansüstü eğitimim ve çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Veysel ERTURUN' a, kendi doktora çalışmalarının arasında bana zaman ayırarak yardımını esirgemeyen değerli yol arkadaşım Sayın Arş. Gör. Oğuzhan ŞAHİN' e, akademik çalışmalar yapmam için beni uzun zamandır teşvik eden kıymetli hocalarım, arkadaşlarım ve kardeşlerime ve bu tez çalışmasını FYL-2020-10093 kodlu proje ile destekleyen Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca; yüksek eğitim hayatımın başından bu güne kadar her türlü desteği ile yanımda olan en kıymetlim sevgili eşime ve aileme en kalbi hislerimle teşekkür ederim.

Göksel BEHRET

Ekim 2020, KAYSERİ

MEKANİK ALAŞIMLAMA İLE ÜRETİLEN GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI MALZEME KARAKTERİZASYONU

Göksel BEHRET

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ekim 2020
Danışman: Doç. Dr. Veysel ERTURUN

ÖZET

Bu tez çalışmasında son yıllarda üstün mekanik özellikleri ile dikkat çeken grafen nano plakaların (GNP), mekanik alaşımlama (MA) ile üretilen alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzemelere hangi mekanik özellikleri katacağı araştırılmıştır. Çalışmada belirli oranlarda ve boyutlardaki alüminyum, çinko, magnezyum, bakır ve silisyum karbür tozları içerisine toz halinde grafen farklı miktarlarda katılmış ve farklı sürelerde MA işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlemde spex tarzda hareket eden ve yüksek frekansla çalışabilen Retsch MM 400 bilyeli öğütücü kullanılmıştır. Elde edilen farklı toz alaşımlar X-ışını kırınım (XRD) cihazında incelenerek analizler yapılmıştır.

Alaşımlama ile elde edilen bu farklı tozlar sonrasında bir kalıp içerisine alınıp koruyucu argon gazı ortamında belirli sıcaklıkta ve zaman aralığında sinterlenmiş ve toz numunelerden küçük billetler üretilmiştir. Üretilen billetler parlatılıp dağlandıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop altında görüntülenerek mikro yapı analizi yapılmıştır. Son olarak Vickers mikrosertlik testleri yapılmış ve billetlerin sertlik değerleri kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Grafen nano plaka, mekanik alaşımlama, alüminyum matrisli kompozit, bilyeli öğütücü, sinterleme.

CHARACTERIZATION OF GRAPHIC REINFORCED ALUMINUM BASED MATERIAL PRODUCED BY MECHANICAL ALLOYS

Göksel BEHRET

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, October 2020
Supervisor: Associate Professor Veysel ERTURUN

ABSTRACT

In this thesis, the mechanical properties of graphene nanoplates (GNP), which have attracted attention with their superior mechanical properties in recent years, will be added to aluminum matrix composite (AMC) materials produced by mechanical alloying (MA). In the study, in different amounts and sizes aluminum, zinc, magnesium, copper and silicon carbide powders were added in different amounts of graphene in powder form and subjected to MA treatment at different times. In this process, Retsch MM 400 ball milling, which moves in spex style and can operate with high frequency, is used. The different powder alloys obtained were analyzed on X-ray diffraction (XRD) device and analyzes were made.

These different powders obtained by alloying were taken into a mold and sintered at a certain temperature and time interval in protective argon gas environment and small billets were produced from powder samples. After the produced billets were polished and etched, microstructure analysis was performed by imaging under scanning electron microscope (SEM) and optical microscope. Finally, Vickers micro hardness tests were performed and the hardness values of the billets were compared.

Keywords: Graphene nanoplate, mechanical alloying, aluminum matrix composite, ball milling, sintering.

İÇİNDEKİLER

MEKANİK ALAŞIMLAMA İLE ÜRETİLEN GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI MALZEME KARAKTERİZASYONU

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... **ii**

YÖNERGEYE UYGUNLUK ..... **iii**

KABUL VE ONAY ..... **iv**

TEŞEKKÜR ..... **v**

ÖZET ..... **vi**

ABSTRACT ..... **vii**

KISALTMALAR ..... **x**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **xi**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xii**

GİRİŞ **1**

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1.Literatür Araştırması 3

2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler, Ekipmanlar ve Özellikleri 17

2.2. Kullanılan Tozların Miktarları ve Özellikleri 19

2.3. Retsch MM400 Öğütme Cihazı ve Mekanik Alaşımlama İşlemleri 19

2.4. Alaşımlanmış Tozların XRD Grafikleri ve Kristal Boyut Analizleri 22

2.5. Sinterleme İşlemleri ve Test Numunelerinin Üretimi 27

2.6. Test Numunelerinin Yüzey Parlatma İşlemleri 28

2.7. Test Numunelerinin Malzeme Karakterizasyonu ve SEM Görüntüleri 30

2.8. Numunelerin Sertlik Testleri 34

3. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

3.1 Sonuçlar..... 35
3.2 Öneriler..... 36
KAYNAKÇA..... 37
ÖZGEÇMİŞ..... 40

KISALTMALAR

GNP : Grafen Nano Plaka

MA : Mekanik Alaşımlama

MMK : Metal Matrisli Kompozit

AMK : Alüminyum Matrisli Kompozit

XRD : X-Işını Kırınım Spektrometresi

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

EDX : Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi

TEM : Transmisyon Elektron Mikroskobu

CNT : Karbon Nano Tüp

TM : Toz Metalürjisi

INCO : Uluslararası Nikel Şirketi

ASTM : Diskli Aşınma Test Makinesi

MPa : Megapascal

TPa : Terapascal

Nm : Nanometre

μm : Mikrometre

WC : Tungsten Karbür

NaOH : Sodyum Hidroksit

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Tek tabakalı grafenin genel özellikleri 5
Tablo 2.1. Malzemelerin ağırlıkça katılma oranları 19

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Grafen atom modeli (solda), elektron mikroskopla çekilmiş grafen görüntüsü (ortada), grafen plakanın bilgisayar gösterimi (sağda) 4
Şekil 1. 2. Grafenin bazı özelliklerinin bilinen başka malzemelerle karşılaştırılması 6
Şekil 1. 3. Tungsten karbür (WC) bilyeler arasında alaşımlanan magnezyum ve bor tozları 7
Şekil 1. 4. Spex tarzı (a) ve döndürerek (b) MA yapan bilyeli öğütme cihazlarında toz bilye etkileşimi 7
Şekil 1. 5. MA işleminde çelik bilye ve metal tozlarının çarpışma evreleri 8
Şekil 2. 1. Çalışmalarda uygulanan işlem basamakları..... 18
Şekil 2. 2. Çalkalayarak yüksek hızlı MA yapan titreşimli Retsch MM400 öğütücü ve onun hazne ve bilyeleri [23] 20
Şekil 2. 3. Toz ve bilyelerin tartılıp MA cihazına yerleştirilmesi 20
Şekil 2. 4. MA işlemi sonrası bilye ve tozların elekten geçirilip ayrılması 21
Şekil 2. 5. Grafen katkısız A90 numunesinin MA işleminde kullanılmış bilyeler..... 21
Şekil 2. 6. Grafen katkısız A90 numunesinin MA işleminde kullanılmış bilyeler..... 22
Şekil 2. 7. GNP takviyesiz A numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği 23
Şekil 2. 8. % 0,5 GNP takviyeli B numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği..... 23
Şekil 2. 9. % 1 GNP takviyeli C numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği..... 24
Şekil 2. 10. % 1,5 GNP takviyeli D numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği 24
Şekil 2. 11. 45 dakika MA işlemi yapılmış numunelerin XRD grafiği 25
Şekil 2. 12. MA süresine bağlı kristal boyut değişim grafiği..... 26
Şekil 2. 13. MA süresine bağlı kafes gerilmesi değişim grafiği..... 26
Şekil 2. 14. Sinterleme işleminde kullanılan fırın ve hidrolik pres 27
Şekil 2. 15. Sinterleme öncesi fırın içerisinde (solda) ve sonrası soğurken (sağda) H13 çelik malzemeden üretilmiş kalıp ve pistonu 28
Şekil 2. 16. Sinterleme sonrası elde edilen numune (billet) boyutları..... 28
Şekil 2. 17. Parlatma cihazı ve ekipmanları..... 29
Şekil 2. 18. Parlatma öncesi (solda) ve parlatma sonrası (sağda) numuneler 29
Şekil 2. 19. % 0,5 Grafen takviyeli B0 ve B45 (hiç MA yapılmamış ve 45 dakika MA yapılmış) numunelerinin 2000 kez büyütme altındaki SEM görüntüleri..... 30

Şekil 2. 20. 90 dakika MA yapılmış B90 numunesinin 2000 kez büyütme altında SEM görüntüsü 31
Şekil 2. 21. % 1,5 Grafen takviyeli, 45 dakika MA yapılmış D45 numunesinin 2000 kez büyütme altında SEM görüntüsü 31
Şekil 2. 22. 45 dakika MA yapılmış grafen takviyesiz ve % 0,5 – 1 – 1,5 grafen takviyeli numunelerin SEM-EDX görüntüsü 32
Şekil 2. 23. 90 dakika MA yapılmış grafen takviyesiz ve % 0,5 – 1 – 1,5 grafen takviyeli numunelerin SEM-EDX görüntüsü 33
Şekil 2. 24. MA süresine bağlı sertlik değerleri grafiği 34

GİRİŞ

Dünya genelindeki teknolojik gelişmeler, bilimsel çalışmaların yönünü birçok alanda yeni malzemeler bulmaya ve geliştirmeye çevirmiştir. Bu bilimsel çalışmaların malzeme konusu ile ilgili olanlarına, toz metalürjisi ve kompozit malzemeler çalışmaları ışık tutmaktadır. Toz metalürjisi (TM), araştırmaları mikro boyuta indirirken, kompozit çalışmaları da farklı malzemeleri bir araya getirerek bilinen malzemelerden çok farklı özelliklere sahip yeni nesil malzemeler geliştirmektedir. Malzeme bilimi içerisinde TM ve teknikleri, getirdiği yenilikler ve ayrıcalıklar sayesinde ön plana çıkmaktadır. TM istediğimiz malzeme tozlarından istediğimiz oranlarda karıştırarak yeni malzemeler geliştirmeyi kolaylaştırmaktadır. Özellikle yeni kompozit malzemeler üretebilmek için birbiri içerisinde çözünmeyen tozların istenilen oranlarda kullanılabilmesi büyük kolaylık sağlamaktadır.

Teknolojik gelişmelerdeki hızlı ilerleme ve yeni nesil malzeme geliştirme çalışmaları beraberinde yeni üretim tekniklerinin kullanımını artırmıştır. Mekanik alaşımlama (MA) tekniği de bunlardan birisidir. Bu doğrultuda MA ile elde edilen malzemelerin homojen yapısı ve üstün dayanım özellikleri bu tekniği bir adım öne çıkarmıştır. Bilhassa metal matrisli kompozit (MMK) malzeme üretiminde tercih edilen MA işlemi, metal matrisli malzeme özelliklerini bir adım daha iyileştirecektir.

Geliştirilen yeni nesil bir malzemede aranan özellikler şüphesiz yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, hafiflik, iyi termal özellikler, esneklik vb. özelliklerdir. Bu anlamda kompozit malzemeler diğer metal alaşımlı malzemelere göre ihtiyaç duyulan bu özellikleri daha iyi karşılamaktadır. Özellikle havacılık ve uzay gibi yüksek teknoloji gerektiren alanlarda yüksek mekanik özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Son yıllarda hafiflik, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direnci özellikleriyle ve iki boyutlu, süper ince, bal peteği atom yapısıyla dikkat çeken grafen nano plakalar (GNP), kompozit malzeme çalışmalarında ilgi çeker hale gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, toz halinde GNP ile alüminyum, çinko, magnezyum, bakır ve silisyum karbür gibi metal tozları yüksek hızlı MA işlemine tabii tutulmuş ve GNP takviyeli, alüminyum matrisli yeni nesil bir kompozit malzeme geliştirilmiştir. Grafenin diğer alaşım elemanları ile birlikte kompozite ne gibi özellikler kazandırdığı değerlendirilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

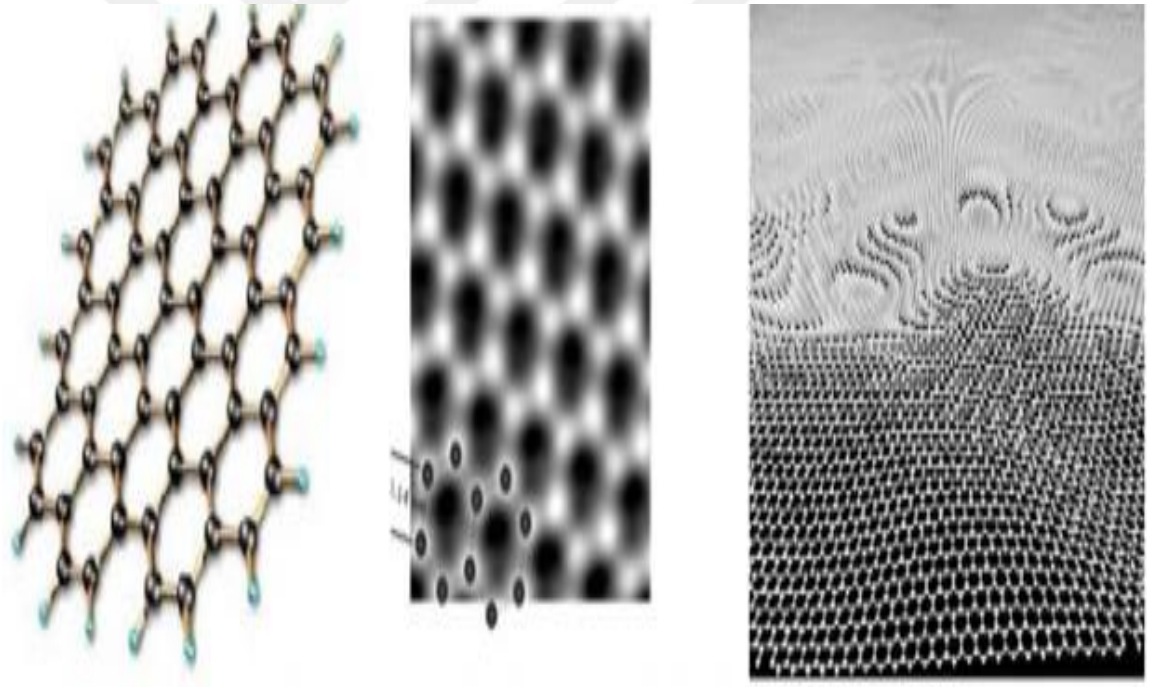
1.1.Literatür Araştırması

Toz metalürjisi (TM) ve parçacıklı malzeme işlemleri, döküm metotlarında olduğu gibi net şekilleri olan parçaların üretimine olanak tanır. Fakat dökümden farklı olarak toz teknikleri hemen hemen her malzemeye uygulanabilir. Kompozitler, yüksek sıcaklık seramikleri, bakırlı çelikler, bazı polimerler, refrakter metaller ve karışık fazlı bileşimler döküm yoluyla üretilemezken, TM yoluyla üretilebilirler. TM işlemleri toz metaller, seramikler, parçacık takviyeli kompozitler ve metal dövme gibi birçok farklı tekniğin birlikte kullanılmasından meydana gelir. Oldukça geniş bir uygulama alanı bulan seçeneklerden birisi de kompozit oluşturmak amacı ile birbiri içerisinde çözünmeyen tozları çeşitli oranlarda karıştırmaktır. TM uygulamaları o kadar farklı sahaya yayılmıştır ki, bugün sinterlenmiş ürünler hemen hemen her mühendislik sisteminde kullanılmaktadır. Daha önceden toz esaslı parçalar yalnızca ucuz olduğu için tercih edilirken, günümüzde kalite, homojenlik ve üretilebilirlik tercih sebebi olmaktadır. Güncel bileşimler, jet motorundan biyomedikal parçalara kadar farklı alanlarda ve istenilen özellikleri daha iyi karşılamak amacı ile genellikle kompozit haldedirler [1].

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı yapıda malzemenin makroskobik seviyede ve birbirleri içinde çözünmeyecek şekilde birleştirilmesiyle meydana gelmekte olup, matris malzemesine göre; polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler (MMK) şeklinde sınıflandırılmaktadır [2]. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde, ana katkı malzemesi matris ve takviye malzemelerinin özellikleri, hacim oranları, matris ve takviye malzemeleri arasında oluşan bağın özellikleri, takviye malzemesinin şekli, yapısı ve kompozit yapı içerisinde nasıl yönlendiği gibi çeşitli parametreler etkili olmaktadır [3]. Metal matris kompozitlerde matris malzeme olarak

kullanılan malzemelerden olan alüminyum, demirden sonra dünyada en çok tüketilen madendir. Alüminyumun yoğun bir şekilde kullanılması, yumuşaklığından, hafifliğinden, iyi bir ısı ve elektrik iletkeni olmasından kaynaklanmaktadır

Günümüzde alüminyum ve alaşımları, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv sanayi ve inşaat sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Karbon esaslı takviye elemanlarından olan grafen ise bir atom kadar kalınlığıyla, mekanik, elektrik, termal ve optik özellikleri yeni keşfedilmiş bir karbon allotropudur. Grafen, karbon atomunun bal peteği örgülü yapısından oluşmaktadır (Şekil 4.1). Bu yapı, altıgen hücrelerden oluşan grafit yapısının tek katmanıdır. Ayrıca grafen; ileri derecede esnek, sağlam, hafif ve ince bir malzeme olup, günümüzün en dikkat çeken bilimsel gelişmelerinden biri olarak görülmektedir [4-5] .



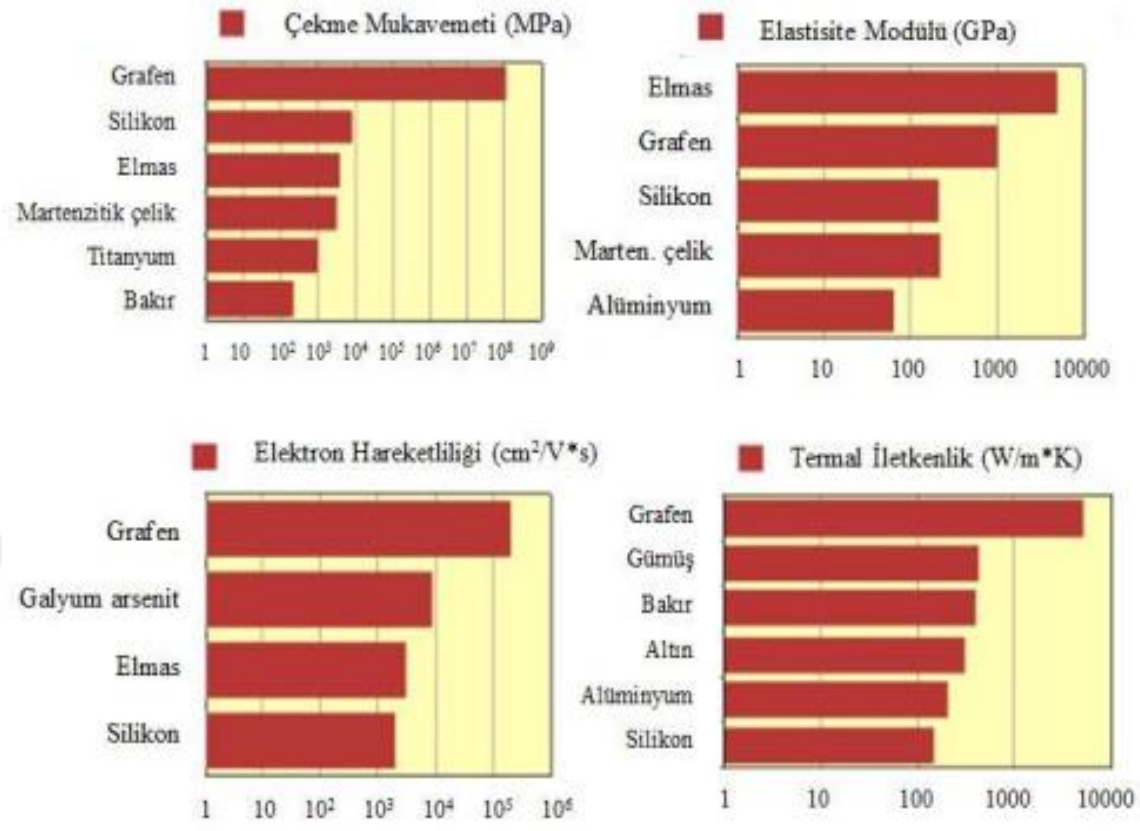
Şekil 1. 1. Grafen atom modeli (solda), elektron mikroskopla çekilmiş grafen görüntüsü (ortada), grafen plakanın bilgisayar gösterimi (sağda)

İdeal bir tek katmanlı grafen yapının tahmin edilen yüzey alanı 2600 m2/gr, kalınlığı 1-2 nm, termal iletkenliği 4840-5300 W/(m°K), gerçek yoğunluğu 2.25 g/cm3, elastisite modülü 1 TPa olup, grafenin diğer özellikleri Tablo 1.1 ’de verilmiştir [7].

Tablo 1.1. Tek tabakalı grafenin genel özellikleri [7]

Özellikler	**Değer**
Hibrit şekli	sp2
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Saflık derecesi (%)	99
Kütlesel (bulk) yoğunluk (g/cm3)	~0.3
Gerçek yoğunluk (g/cm3)	2.25
Kalınlık (nm)	~1-2
Yüzey alanı (m2/g)	2600
Yüksek sıcaklık direnci	-75 +200 °C arasında özellikleri değişmiyor.
Termal iletkenliği (WK-1/m)	4840-5300
Elektron hareketliliği cm2/(V.s)	~2.5x105
Elastisite modülü (TPa)	~1

Karbon kökenli altıgen yapıda iki boyutlu bu atom dizilişi, yeryüzünde bilinen iki boyutlu tek malzeme olmasının yanı sıra, grafene süper özellikler de kazandırmaktadır. Bilinen en ince malzeme olmasıyla beraber, güçlü karbon bağları, grafeni bilinen en güçlü malzemelerden biri yapmaktadır. Şekil 1.2 de açıkça görüldüğü gibi, grafenin elsastisite modülü, çelikten yaklaşık 100 kat daha fazladır ve elmastan daha iyi bir ısı iletkenidir. Ayrıca grafen, esnekliğinden dolayı değişik fiziksel formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolaylıkla kaplanabilmektedir. Grafen, bu sebeplerden dolayı dünyada önemli değişikliklere sebep olabilecek bir malzeme olarak görülmektedir [8, 9, 10].

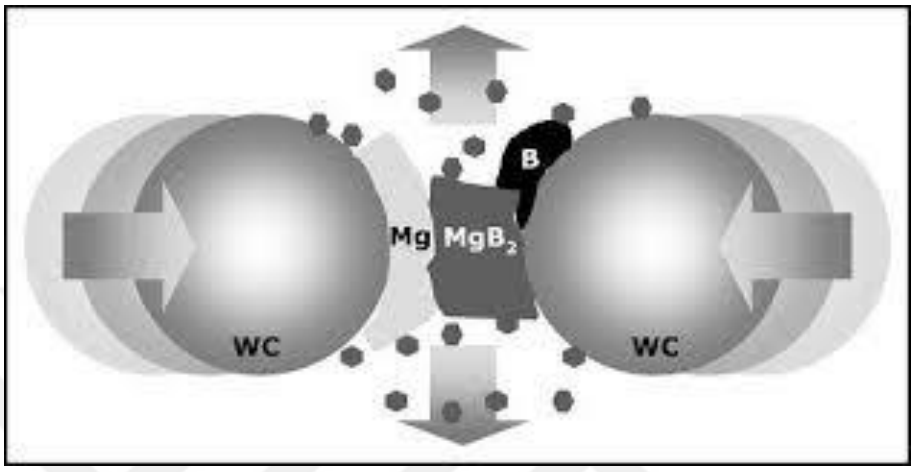


Şekil 1. 2. Grafenin bazı özelliklerinin bilinen başka malzemelerle karşılaştırılması [7]

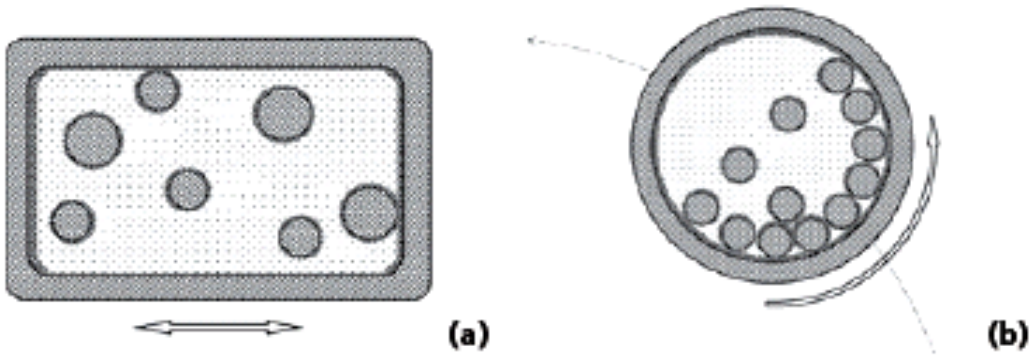
Saf alüminyuma takviye olarak kullanılmasının yanı sıra grafen, alüminyum alaşımlarıyla da kullanılabilmektedir. Grafen, son yıllarda seramik malzemelerle birlikte, alüminyum matris içerisinde takviye elemanı olarak kullanılabilmektedir. Seramik bir malzeme olan SiC ve grafen birlikte takviye elemanı olarak kullanıldığında seramiğin yüksek aşınma dayanımından, grafenin ise yağlayıcı özelliğinden dolayı aşınma dayanımı yüksek kompozit malzeme üretilebilmektedir [7].

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemlerden biri olan mekanik alaşımlama (MA), toz halindeki malzemelerden, homojen yeni bir malzeme üretimine imkan veren bir alaşımlama tekniğidir. MA John Benjamin tarafından 1960'lı yıllarda Uluslararası Nikel Şirketi (INCO)' nun gaz türbin çalışmalarında kullanılacak olan nikel esaslı alaşımlar elde etmek için geliştirilen bir tekniktir. Gün geçtikçe geliştirilen bu teknik sayesinde daha homojen ve dayanımı yüksek malzemeler üretilmiştir. MA yönteminde kapalı bir hazne içerisine atılan metal tozları ile birlikte çelik bilyeler, haznenin çalkalanmaya başlamasıyla birlikte birbirlerine çarpmaya başlamaktadır (Şekil 1.3). Bu çarpışmaların etkisiyle bilyeler arasındaki tozlar sürekli olarak maruz kaldıkları

darbeden kaynaklanan basıncın etkisiyle birbirlerine yapışacaklar sonrasında yine birbirlerinden ayrılacaklardır (Şekil 1.5). Bu olayın peş peşe devam etmesi kullanılan tüm malzeme tozlarının eşit tane büyüklüğüne yaklaşmasına ve homojen bir alaşımlama olmasına imkan sağlayacaktır.



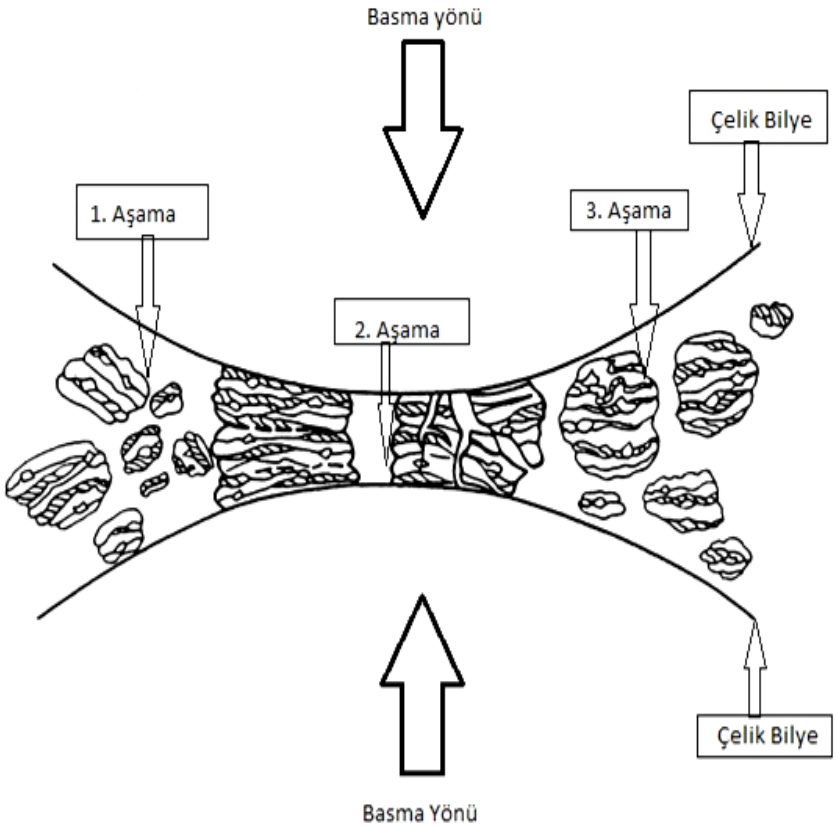
Şekil 1. 3. Tungsten karbür (WC) bilyeler arasında alaşımlanan magnezyum ve bor tozları [11]



Şekil 1. 4. Spex tarzı (a) ve döndürerek (b) MA yapan bilyeli öğütme cihazlarında toz bilye etkileşimi [12]

MA işleminde bazı parametrelerin değişimi, elde edilen malzemenin özelliklerini olumlu ya da olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda da bu parametrelerin değişimleri yapılarak yeni sonuçlar elde edilmektedir. Bu parametreleri aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

- Öğütücünün dönüş devri veya çalkalama frekansı
- Öğütücüde kullanılan bilyelerin çapı, sayısı ve malzemesi
- Öğütücü haznesinin malzemesi ve boyutu
- Bilye/toz ağırlık oranı
- Karıştırma süresi
- Öğütücünün dönüş yönü
- Sıcaklık
- Haznenin doluluk oranı [13]



Şekil 1. 5. MA işleminde çelik bilye ve metal tozlarının çarpışma evreleri [14]

Sıralanmış bu etkenlerin değişimi, MA ile oluşan yeni toz taneciklerinin ve bu tozların sinterleme işlemi sonrasında oluşturacakları alaşımların özelliklerini de etkilemektedir.

Etki faktörünün çeşitliliği bu alanda yapılacak çalışmaların sayısını artırmış, araştırmacılara daha fazla olanak sunmuştur. MA' nın sağlamış olduğu avantajları genel olarak şöyle sıralayabiliriz;

- Düşük sıcaklıklarda kimyasal tepkimeler oluşturabilme
- Katı çözünürlük sınırlarının aşılması,
- Tane boyutunun nanometre seviyesine kadar inceltilebilmesi
- Üretim sonrası oluşan taneciklerde daha kararlı yapı
- Alaşımlanması zor olan elementlerin bu yöntem ile alaşımlanması
- Oluşan ikincil fazların (oksit vb.) ince dağılımlı olarak üretilmesi
- Malzeme oluşturma yöntemleri açısından daha çok çeşitlilik sunması
- Amorf fazların elde edilmesi
- Taneler arasında yüksek enerjili yapışma sağlaması
- Oldukça ince bir mikro yapı oluşturması [14]

MA işleminden sonra birbiriyle mekanik birleşme oluşturan malzeme tozlarının zayıf olan kafes bağ yapılarını güçlendirmek için sinterleme işlemi yapılır.

Sinterleme işlemi, toz parçacıklarına belirli bir basınç altında ergime noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıl işlem uygulanmasına ve tozların birbirine değdikleri noktadan kaynaşmasıyla birlikte istenilen bütünlüğün oluşmasını sağlayan işlemdir. Bu işlemde toz karışımının sinterleme sıcaklığı artırıldıkça sinterleme süresinde de ters orantılı olarak azalma göstermektedir. Tek bileşenli malzeme toz karışımlarında sinterleme sıcaklığı metalin ergime sıcaklığının 2/3'ü veya 4/5'i olarak belirlenirken birden fazla bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığı düşük olan toz bileşeninden büyük bir değerde, ergime sıcaklığı büyük olan toz bileşeninden ise düşük bir değerde seçilmektedir [1].

Konuyla ilgili olarak MA işlemi ve grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar araştırılmış ve sonuçları ile birlikte aşağıda sıralanmıştır;

Bustamante vd. (2014) MA ile grafen nano plaka (GNP) takviyeli alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzeme üretmişlerdir. Çalışmalarında, matris malzemesi olan Al tozu içerisine kalınlığı 10 nm den az olan GNP' ler ilave etmişlerdir. GNP' ler ağırlıkça % 0.0, 0.25, 0.50 ve % 1.0 olacak şekilde dört farklı oranda ilave edilmiştir. Kompozitlerin üretimi Spex 8000 M model bilyeli öğütücüde 1, 3 ve 5 saatlik MA sürelerinde yapılmıştır. Numune üretimi için 8.5 g toz kütlesi kullanmış ve bilye-toz oranını 5:1 olacak şekilde ayarlamışlardır. MA sonrasında öğütülmüş tozları 950 MPa basınç altında, 6.7 mm çapında ve 1 mm yüksekliğinde disk numuneler üretmek için sinterlemişler. Sinterleme işlemini 500 °C' de 0.5, 1, 2, 3, 4 ve 5 saat boyunca argon atmosferinde yapıp ve 5 °C / dak soğutma hızında işlemi bitirmişlerdir. Ayrıca aynı koşullar altında MA yapılmamış bir Al örneği hazırlamışlar ve öğütülmüş tozların mikro yapısını taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Sinterleme işleminden sonra kompozitlere ilave gözlemler yapmışlardır. GNP / Al kompozit tozların kristal yapılarındaki değişimleri, Raman spektroskopisi, XRD ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntülerini inceleyip yorumlamışlar. Sonrasında numunelerin sertlik davranışı Vickers mikro-sertlik testi ile değerlendirmişlerdir. Sertlik testi koşulları 200 g yük ve 15 s bekleme süresidir. Her örnekte en az 10 girintinin ortalama değeri alınmıştır. Sonuç olarak MA süresinin kompozit numunelerinin üzerinde olumlu etkisi olduğunu ve öğütme süresindeki artışın 2 saatlik sinterleme işleminde sert kompozitlerin oluşumuna sebep olduğunu gözlemlemişlerdir [15].

Bastwros vd. (2014) Al6061 kompozit malzeme tozuna GNP takviyesi katarak MA yapmışlar ve grafenin etkilerini araştırmışlardır. Matris faz olarak alüminyum alaşımı 6061 (Al6061) tozunu seçmiş ve ağırlıkça % 1.0 oranda grafen ile birlikte Spex 8000 bilyeli öğütücüde MA yapmışlardır. 10, 30, 60 ve 90 dakikalık dört farklı zaman için hem Al6061 tozunu tek olarak hem de Al6061 + % 1.0 grafen karışımını MA işlemine tabi tutmuşlardır. Bir karıştırma haznesine 0.05 g grafen, 4.95 g Al6061 ve her biri 7.5 g ağırlığında iki adet öğütücü bilyesi koymuşlar ve bu da 2.6' lık bilye-toz oranına karşılık gelmiştir. Öğütücü, aşırı ısınmayı önlemek için her 10 dakikalık çalışmadan sonra 30 dakika boyunca durdurulmuştur. Daha sonra H13 çeliğinden yapılmış bir kalıp ile

sinterleme işlemi yapılmıştır. İlk önce alaşımlı toza oda sıcaklığında 50 MPa lık bir ön sıkıştırma basıncı uygulamış ve sonrasında 630 °C' de 10 dakika boyunca 100 MPa basınç altında sıcak presleme yapmışlardır. Bu sıcaklıktaki sıvı faz oranı yaklaşık % 18 olmuştur. Elde edilen kompozitler, düşük hızlı bir elmas testere kullanılarak kesilmiş ve üç noktalı bir büküm testi yapmak için gereken son boyutlara (0.9 mm kalınlık ve 1.2 mm genişlik) getirilerek parlatılmıştır. Sonra elde edilen numunelerin kırılma yüzeyleri ve öğütülmüş toz karışımı, bir taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Alaşımlama sırasında karbür oluşumunu kontrol etmek için bir XRD analizi ve MA' nın grafen yapısının evrimi üzerindeki etkisini incelemek için bir Raman spektroskopi analizi yapılmıştır. Sonuç olarak MA işlemini 10 ila 90 dakikalık zaman aralığında yapmışlar ve 10 ile 30 dakikalık MA sürelerinin, grafeni Al6061 matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtmak için yeterli olmadığını görmüşlerdir. 10 dakikalık MA süresi bükülme mukavemetinin bozulmasına neden olmuş ve 30 dakikalık MA süresi numunede hiçbir iyileştirme yapamamıştır. Al6061 + % 1.0 grafen kompozit için mukavemet artışını, referans Al6061 numunesine kıyasla 60 dakika ve 90 dakika sürelerde % 47 ve % 34 olarak gözlemlemişlerdir [16].

Yu vd. (2019) toz halindeki Al6063 kompozit matris malzeme içerisine grafen tozu takviye ederek MA yapmışlar ve sonrasında oluşan karışıma sıcak ekstrüzyon uygulamışlardır. Al6063 tozunu ortalama 4.7 μm olarak, grafeni ise ortalama yaklaşık 7.05 μm parçacık çaplı ve 146.7 m2 / g yüzey alanlı olacak şekilde seçmişlerdir. İlk olarak 0.25 g grafen ve 49.75 g Al6063 tozu, 500 ml hacimli zirkonyum karıştırma şişesine, 5 mm çaplı zirkonyum öğütme bilyeleriyle beraber konulmuştur. Bilye-toz oranı 5:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. MA işlemi Fritsch "Pulverisette 5" model gezegensel tip bilyeli öğütücüde, 150 rpm de 1, 2, 3 ve 4 saatlik farklı zamanlarda yapılmıştır. Sonra üretilen toz karışımı bir ön kalıp oluşturmak üzere çelik bir kalıpta önceden sıkıştırılmış ve daha sonra 500 °C sıcaklık altında 13 ekstrüzyon oranı ve 0.25 mm / sn.' lik ram hızı ile ekstrüze edilmiştir. Karşılaştırma için aynı işlem ve parametrelerle referans alüminyum alaşım matrisi de üretilmiştir. Farklı bilyeli öğütme sürelerine sahip ekstrüze edilmiş kompozitler, sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 saat boyunca C1, C2, C3 ve C4 olarak belirtilmiş ve referans alüminyum alaşımları da aynı prensiple M1, M2, M3 ve M4 olarak belirtilmiştir. Sonuç olarak, grafen ile güçlendirilmiş alüminyum matris kompozit malzemeye MA ve sıcak ekstrüzyon işlemleri başarıyla uygulanmıştır. MA işleminin, grafeni Al matrisine

homojen bir şekilde dağıtabildiği ve daha kalın ölçüdeki grafen partiküllerini küçülterek incelttiği gözlemlenmiştir. En iyi sonuç MA süresi 3 saat olduğunda alınmıştır. Ağırlıkça % 0.3 grafen katkısı ile maksimum gerilme mukavemeti ~ 276 MPa elde edilmiştir. Ayrıca, süneklik neredeyse Al matris ile aynı kalmıştır. Bununla birlikte daha uzun MA süresiyle (4 saat), kırılgan fazların ve azalan grafen çaplarının oluşması, daha iyi dağılma olsa bile gerilme mukavemetinin ciddi şekilde düşmesine neden olmuştur [17].

Kandemir (2018) AlSi10Mg alaşımına grafen takviyesi yaparak MA işlemine tabii tutmuş sonra da elde ettiği toz karışımı ergimiş haldeki AlSi10Mg alaşımına katmış ve kalıba dökerek numuneler elde etmiştir. Kullandığı grafeni 50-100 nm kalınlığa ve 5 µm uzunluğa sahip mikro levhalar şeklinde seçmiştir. Bu grafen partiküllerini, % 99 saflıkta ve ortalama çapları 75 µm den küçük boyutlarda alüminyum ve magnezyum tozları ile bilyeli öğütme işlemine tabii tutmuştur. MA için 1 g grafen ile 6 şar g Al ve Mg tozu, gezegen tipi Retsch PM 200 model öğütücüde 350 devir / dak.' da 2 saat öğütülmüştür. İşlemde yaklaşık 9.5 mm çapında bilye kullanmış ve bilye-toz oranını 4:1 olarak belirlemiştir. Sonra toz karışımını 250 MPa basınç altında, 30 mm çapında ve yaklaşık 4-5 mm yüksekliğinde tabletler oluşturacak şekilde preslemiş ve tabletler oluşturmuştur. Öte yandan 200 g AlSi10Mg alaşımı elektrikli ergitme ocağında grafit bir pota içinde 650 °C de ergitilmiş ve argon gazı altında 1000 devir / dak.' da grafit bir karıştırıcıyla karıştırılmaya başlanmıştır. Daha önceden hazırlanan grafenli tabletlerden iki tanesi bu eriyiğin içine atılmış ve 15 dakika daha karıştırılmıştır. Sonra mekanik karıştırıcı çıkarılmış ve titanyumdan yapılmış ultrasonik prob sıvı alaşımın içine, yüzeyden 15 mm kadar derinliğe daldırılmıştır. Sıvı alaşım, grafenin homojen dağılımı için 15 dakika boyunca 650 °C de ve 80 W çalışma gücünde, argon gazı altında ultrasonik prosese tabi tutulmuştur. Son olarak sıvı alaşım, çekme deneyi numunelerin üretimi için çelik kalıba dökülmüştür. Üretilen numunelerdeki grafen % 0.25 olarak hesaplanmıştır. Aynı yollar izlenerek grafensiz referans numuneleri de üretilmiştir. Sonuçta yapılan incelemelerde, MA işleminin grafenin daha homojen yapıda dağılmasını sağladığı, grafen takviyesinin alaşımın tane boyutunu küçülttüğü, % 0.25 grafen takviyesinin, alaşımın % 0.2 akma ile çekme mukavemetini yaklaşık olarak sırasıyla % 15 ve % 22.5 oranında arttırdığı fakat sünekliği yaklaşık % 8 oranında azalttığı gözlemlenmiştir [18].

Rashad vd. (2015) AZ31 magnezyum alaşımını (magnezyum-alüminyum-çinko), GNP ve karbon nanotüp (CNT) takviyeleriyle MA, sinterleme ve ekstrüzyon işlemlerine tabii

tutmuşlardır. Takviye edilecek olan CNT' lerin dış çapı ve uzunluğu sırasıyla ortalama 50 nm ve 10-30 μm, GNP' ların ise ortalama kalınlığı ve büyüklüğü sırasıyla 4-20 nm ve 5-10 μm olarak seçilmiştir. İlk başta, ağırlıkça % 0.3 CNT, 1 saat boyunca etanol içerisinde bekletilmiş. Aynı zamanda AZ31 alaşım tozu da etanole katılmış ve mekanik bir karıştırıcıyla karıştırılmıştır. CNT çözeltisi, AZ31 alaşımlı toz bulamacına damla damla eklenmiş ve homojen bir yapı elde etmek için karışım 0.5 saat daha karıştırılmıştır. Mekanik olarak karıştırılan bileşik karışım süzülmüş ve 60 °C de 12 saat boyunca vakumla kurutulmuştur. Son olarak, CNT-AZ31 karma tozları elde edilmiştir. Sonra bu karışımına MA işlemi uygulanmıştır. Çelik bir karıştırma kabına 100 g toz konulmuş ve bilye-toz oranı 10:1 olarak seçilmiştir. Kap saf argon gazıyla doldurulmuş ve 4 saat boyunca 250 rpm dönme hızında MA yapılmıştır. İşlem, ısınmayı önlemek için 30 dakikada bir 6 dakika duraklatılmıştır. Aynı işlemler GNP-AZ31 tozları için ve sadece AZ31 alaşım tozu için uygulanmıştır. MA yapılmış AZ31, CNT-AZ31 ve GNP-AZ31 tozları, test numunelerini üretmek için 580 MPa basınçta, 83 mm çap ve 20 mm yükseklikte çelik bir kalıpta preslenmiştir. Sonrasında sağlamlığı arttırmak için numuneler grafit tozuna gömülerek argon gazı atmosferinde 630 °C de sinterlenmiştir. Numuneler ekstrüzyon öncesi 1 saat boyunca 400 °C de fırınlanmış ve sonra 400 °C de, 9 mm çaplı çubuk numuneler elde etmek için, 500 tonluk hidrolik preste 9:1 oran ve 1 m / dak. ram hızında ekstrüzyon yapılmıştır. Elde edilen numuneler sertlik testine, çekme ve basma deneyine tabii tutulmuşlardır. Sonuç olarak, her iki takviye malzemesi de sertliği arttırmıştır. Hem GNP hem de CNT bileşik matris boyunca beta fazlarını eritmiş ve boyutunu 50 mikrondan 4 mikrona düşürmüştür. GNP-AZ31 kompozitinde saf AZ31 alaşımına göre çekme dayanımı artarken, basma dayanımında önemli bir artış görülmemiştir. Öte yandan CNT-AZ31 kompozitinde hem çekme hem de basma mukavemetinde artış gözlemlenmiştir [19].

Şenel vd. (2017) saf alüminyum içerisine % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında üç farklı grafen takviyesi yaparak MA işlemiyle kompozit üretmişlerdir. Kullanılan Al tozu % 99 saflıkta ve 8-15 μm boyut aralığındadır. Takviye elemanı olarak kullanılan grafen plakaları ise % 99 saflıkta, yaklaşık 5-8 nm kalınlığa, 5 μm çapa ve 120-150 m2 / g yüzey alanına sahiptir. İlk önce grafen ultrasonik dağıtıcı ile etanol içerisinde dağıtılmış ve yapışık tabakalar ayrıştırılmıştır. Bu esnada matris malzemesi Al ise etanol içerisinde mekanik karıştırıcıyla karıştırılmış ve sonra bu karışıma grafen-etanol karışımı azar azar ilave

edilmiş ve tekrar karıştırılmıştır. Al-GNP karışımı daha sonra etanol ile birlikte bir karıştırma kabına alınmış ve zirkonyum malzemeden yapılmış öğütme bilyeleri eklenerek MA işlemine tabii tutulmuştur. Karışımdan etanolü uzaklaştırmak için MA sonrasında filtreleme işlemi yapılmış sonrasında filtrelenen karışım 50 °C de fırınlanıp kurutulmuştur. Kurutulmuş Al-GNP toz karışımı, ϕ130x30 mm boyutlarındaki bir kalıp içerisinde, 600 MPa basınç altında preslenerek farklı süre ve sıcaklıklarda sinterlenmiştir. İlk sinterleme işleminde, fırın içerisinde 630 °C sinterleme sıcaklığına çıkıldıktan sonra, numuneler fırına direkt tepe sıcaklığında yerleştirilmiştir. Numuneler fırında 180 dakika bekledikten sonra fırından çıkarılarak hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulmuştur. İkinci sinterleme işleminde ise, 10 °C / dak. ısıtma hızıyla sinterleme sıcaklığına (630 °C) çıkılmış ve bu sıcaklıkta 180 dakika bekledikten sonra 10 °C/dak. soğutma hızıyla oda sıcaklığına soğutulmuştur. Son olarak, PCE-LS serisi yoğunluk ölçüm cihazıyla üretilen kompozit malzemelerin yoğunlukları belirlenmiştir. Sertlik ölçümü ise HV1000B mikro Vickers sertlik ölçme cihazıyla 200 gf yük altında ve 10 saniye süresince gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları SEM ve XRD ölçüm cihazlarıyla değerlendirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, en iyi yoğunluk ve sertlik değerine ağırlıkça % 0.1 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Bu oranın üstünde ise sertliğin ve yoğunluğun düştüğü belirlenmiştir. 630 °C sıcaklıkta direkt sinterlenen ve ani soğutulan kompozitlerin sertliklerinin daha yüksek olduğu ve maksimum sertlik değerini veren en uygun sinterleme süresinin 180 dakika olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça % 0.1 grafen takviyeli ve 550 °C, 600 °C, 630 °C sinterleme sıcaklıklarında sinterlenen kompozitlerin sertlikleri sırasıyla 36 HV, 39 HV, 57 HV olarak belirlenmiştir. Sinterleme sıcaklığındaki artışın AMK malzemenin sertliğini arttırdığı sonucuna varılmıştır [20].

Xavior vd. (2018) matris malzemesi olan AA2024 alaşımına grafen ve karbon nanotüp (CNT) takviyesi ile sırasıyla MA, sinterleme ve ekstrüzyon yapmışlar ve ürettikleri numuneleri sertlik, sürtünme ve aşınma testine tabii tutmuşlardır. Grafen ve CNT' nin etkisini gözlemlemek için pin tribometresi kullanarak numune diskler üzerinde kuru sürtünme ve aşınma testi yapmışlardır. Böylece elde edilen sertlik, kütle kaybı ve sürtünme katsayısı değerleri, çeşitli takviye elemanları ve AA2024 alaşım kombinasyonları ile karşılaştırılmıştır. Bazı numunelere MA işlemi yapılırken bazıları sadece AA2024 ile karışım halinde sinterlenmiştir. MA yapılan numuneler hazırlanırken, partikül büyüklüğü yaklaşık 2-10 μm olan AA2024 matrise, daha önceden aseton içinde

karıştırılıp sonra da 60 °C de 24 saat fırınlanıp kurutulan grafen ve CNT, ağırlıkça her numuneye % 0.4 oranında takviye edilmiştir. Sonra bu karışım 15:1 bilye-toz oranında 60 dakika MA işlemine tabii tutulmuştur. Sonra AA2024–grafen / CNT karışımına 480 °C de ve 240 MPa basınç altında ekstrüzyon yapılmıştır. Elde edilen numunelerin yüzeyleri parlatılmış ve 400 gf yük altında 10 saniyelik bekleme ile Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Tribolojik testler, disk üzerinde sürtünme ve diskli aşınma test makinelerinde ASTM G 99-95 standartlarına göre, farklı kayma hızlarında (0.5, 1.0, 1.5 m / s) her numune için gerçekleştirilmiştir. Testler argon atmosferi altında yapılmış ve kullanılan pin, etanol içerisinde temizlenmiştir. Kütle kaybı değerleri testten önce ve sonra numunelerin tartılmasıyla belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (Ra), maksimum tepe, (Rp) ve maksimum vadi (Rv) değerleri, yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür. Sonuç olarak, MA işlemi yapılmış AA2024–grafen / CNT kompozitinin mekanik özelliklerinin (sertlik, yüzey pürüzlülüğü, aşınma direnci), AA2024 alaşımına ve diğer alaşım kombinasyonlarına göre (MA işlemi uygulanmamış AA2024 / CNT, AA2024 / grafen ve AA2024-grafen / CNT) daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [21].

Mirjavadi vd. (2018) Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu içerisine, farklı oranlarda GNP takviyesi yaparak (ağırlıkça % 0.1, 0.3, 0.7 ve 1.0) MA, sıvı metalurji ve sıcak ekstrüzyon teknikleriyle kompozit üretmişlerdir. Başlangıçta % 99 saflıkta ve ortalama ~45 μm büyüklükteki alüminyum tozuna, % 99 saflıkta ve ortalama ~25 μm büyüklükte GNP tozu etanol içerisine katılmış ve karıştırılmıştır. İlk önce grafen eklenip 30 dakika karıştırılmış sonra Al tozu ilave edilerek 60 dakika daha karıştırılmıştır. Karışım yaklaşık 6 saat boyunca 100 °C de vakumla kurutulmuş ve 2 saat boyunca gezegensel bilyeli öğütücüde, 10:1 bilye-toz oranında ve 250 rpm hızda MA işlemine tabii tutulmuştur. Sonra karışım 350 MPa basınçta preslenmiş ve 4 saat boyunca 560 °C de vakumlu bir fırında sinterlenmiştir. Bir sonraki adımda ise Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu alaşımlı külçelerden küçük parçalar kesilmiş ve grafit bir döküm potasına yerleştirilerek 750 °C de ergitilmiştir. Önceden hazırlanmış Al / GNP Kompozit numunelerde eklendikten sonra sıvı alaşım 15 dakika karıştırılmış ve ekstrüzyon işlemi için bir kalıba dökülmüştür. Ekstrüzyon, 30 tonluk pres kullanılarak 6:1 oran ve 1 mm / saniye ram hızında 320 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Sonrasında elde edilen numunelere T6 ısıl işlem uygulanmış ve son olarak kompozit numuneler 1 mm / dak. gerilme hızında SANTAM üniversal test makinesi kullanılarak çekme testine tabi tutulmuştur. Sonuçta elde edilen numuneler

içerisinde en iyi çekme mukavemetinin ve nispeten daha küçük tane boyutunun, % 0.7 grafen takviyeli Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu / GNP kompozit alaşımında olduğu gözlemlenmiştir [22].

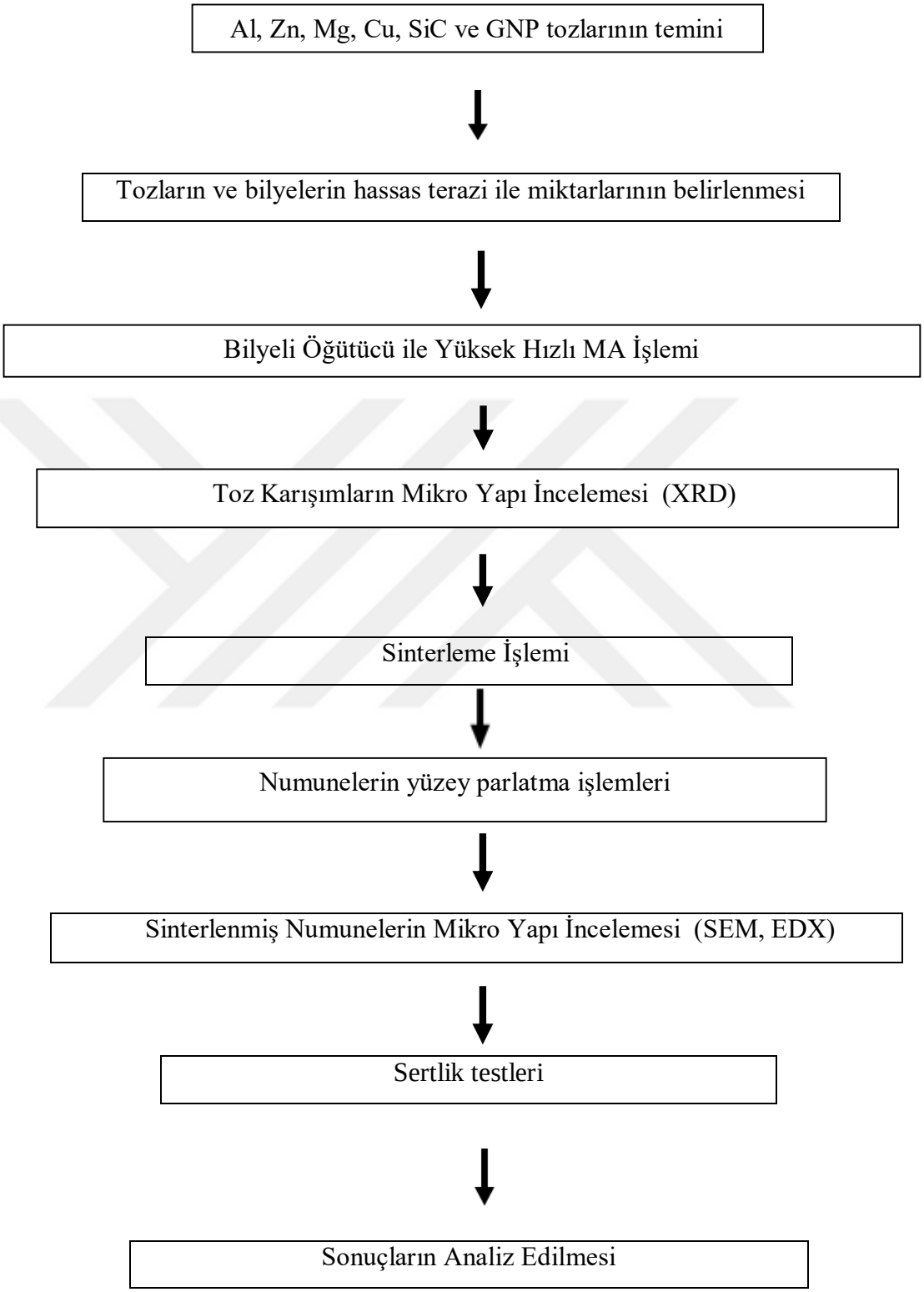
2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler, Ekipmanlar ve Özellikleri

Tez çalışması kapsamında, grafen nano plakaların (GNP), MA ile üretilen alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzemelere ne gibi mekanik özellikler kazandıracağı ve mikro yapıyı nasıl etkileyeceği araştırılmıştır. Çalışmada belirli oranlarda ve boyutlardaki alüminyum, çinko, magnezyum, bakır ve silisyum karbür tozları içerisine toz halinde grafen farklı miktarlarda katılmış ve farklı sürelerde MA işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlemde spex tarzda hareket eden ve yüksek frekansla çalışabilen Retsch MM 400 bilyeli öğütücü kullanılmıştır. Elde edilen farklı toz alaşımlar XRD cihazında incelenerek analizler yapılmıştır. MA işlemi sonrası bu farklı tozlar bir kalıp içerisine alınıp koruyucu argon gazı ortamında belirli sıcaklıkta ve zaman aralığında sinterlenmiş ve toz numunelerden küçük billetler üretilmiştir. Üretilen billetler parlatılıp dağlandıktan sonra SEM ve optik mikroskopla görüntülenerek mikro yapı analizi yapılmıştır. Son olarak Vickers mikrosertlik testleri yapılmış ve billetlerin sertlik değerleri kıyaslanmıştır. Çalışmalar sonucunda Retsch MM400 öğütücü kullanılarak Al matrisli, GNP takviyeli, Zn, Mg, Cu ve SiC alaşımlı kompozit malzeme üretilmiştir. Yüksek hızlı MA cihazı kullanımı çalışmalarda zamandan yana bir hayli kolaylık ve tasarruf sağlamıştır.

Çalışmaların başından sonuna kadar yapılacak olan işlemler yukarıda anlatılmış ve birbiri ardına bir düzenle yapılan bu işlem basamakları aşağıda sırasıyla verilmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2. 1. Çalışmalarda uygulanan işlem basamakları

2.2. Kullanılan Tozların Miktarları ve Özellikleri

Çalışmalarda toz halinde alüminyum, magnezyum, bakır, çinko, silisyum karbür ve grafen tozu kullanılmıştır. Seçtiğimiz toz halindeki elementlerin toz boyutları; Al 7-15 µm, Mg 45 µm, Cu 7 µm, Zn 4-7 µm, SiC 7 µm ve GNP 7 µm (5 nm kalınlığında ve 170 m2/g yüzey alanına sahip) büyüklüğündedir.

Aşağıda Tablo 2.1 'de açık bir şekilde kullanılacak tozların ağırlıkça yüzde oranları verilmiştir. Alüminyum matris, alaşım elementi çinko ve karışım miktarları uçak yapılarında en fazla kullanılan alaşımlardan olan 7000 serisi alaşımları dikkate alınarak seçilmiştir. 0-45-90 dakikalık 3 farklı MA süresi için 4 farklı yüzde oranında GNP katkısıyla 12 adet numune üretilmiştir.

Tablo 2.1. Malzemelerin ağırlıkça katılma oranları

MA süresine göre numune No [0 - 45 - 90 (dk.)]	Malzemelerin Ağırlıkça Katılma Oranı (wt. %)					
	Al	Zn	Mg	Cu	SiC	GNP
A_0 - A_{45} - A_{90}	%85	%5	%3	%2	%5	%0
B_0 - B_{45} - B_{90}	%84.5	%5	%3	%2	%5	%0.5
C_0 - C_{45} - C_{90}	%84	%5	%3	%2	%5	%1
D_0 - D_{45} - D_{90}	%83.5	%5	%3	%2	%5	%1.5

2.3. Retsch MM400 Öğütme Cihazı ve Mekanik Alaşımlama İşlemleri

Belirli oranlarda katılarak oluşturulan karışımlar 900 devir / dak.' ya karşılık gelen 15 hertz frekansta Retsch MM400 öğütücüde (Şekil 2.2) 45 ve 90 dakika karıştırma süresinde iki farklı süreyle MA işlemine tabii tutulmuştur.



Şekil 2. 2. Çalkalayarak yüksek hızlı MA yapan titreşimli Retsch MM400 öğütücü ve onun hazne ve bilyeleri [23]

MA işleminde 3 mm çapında çelik bilye kullanılmış ve ağırlıkça bilye-toz oranı 10:1 olarak seçilmiştir. Öğütücünün hazneleri yaklaşık 22 mm çapında ve 55 mm yüksekliğinde silindir şeklindedir ve çalışma esnasında iki tutucu çene de kullanılmaktadır. Bu, cihazın dengeli çalışması için şarttır. Üretilecek olan test numunesi ağırlıkça 10 gram olarak belirlenmiş ve tozlarla bilyeler bu ağırlığa göre ayarlanmıştır. Bilye-toz oranı 10:1 olduğundan 10 gram toz karışım için 100 gram bilye seçilmiştir. İşlemler yapılırken hassas terazi kullanılmıştır. 100 gramlık ağırlığa 910 adet bilye karşı gelmiştir ve öğütücünün haznelerine 455 er adet bilye konulmuştur. Öte yandan tozlar da yüzde ağırlıklarına göre tartılmış ve iki eşit gramajda haznelere yerleştirilmiştir. Ayrıca öğütücünün haznesinin içerisine argon gazı basılarak tozların oksitlenmesi önlenmiştir.



Şekil 2. 3. Toz ve bilyelerin tartılıp MA cihazına yerleştirilmesi

MA işlemi sonrasında toz ve bilyeler hazneden çıkarılıp bir elek vasıtası ile birbirinden ayrılmıştır. Her bir numuneden az bir miktar alınarak mikro yapı incelemeleri için

silindirik plastik koruma kutularında muhafaza edilmiştir. Geriye kalan alaşımlı tozlar da sinterleme yapmak için kutulara yerleştirilip üzerlerine numune kodları yazılmıştır. Bilyeler ise her bir MA işleminden sonra üzerlerine yapışan özellikle alüminyum metal tozlarından arındırılarak yeniden kullanılmıştır. Arındırma ve temizleme işlemi için kostik olarak da bilinen sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.



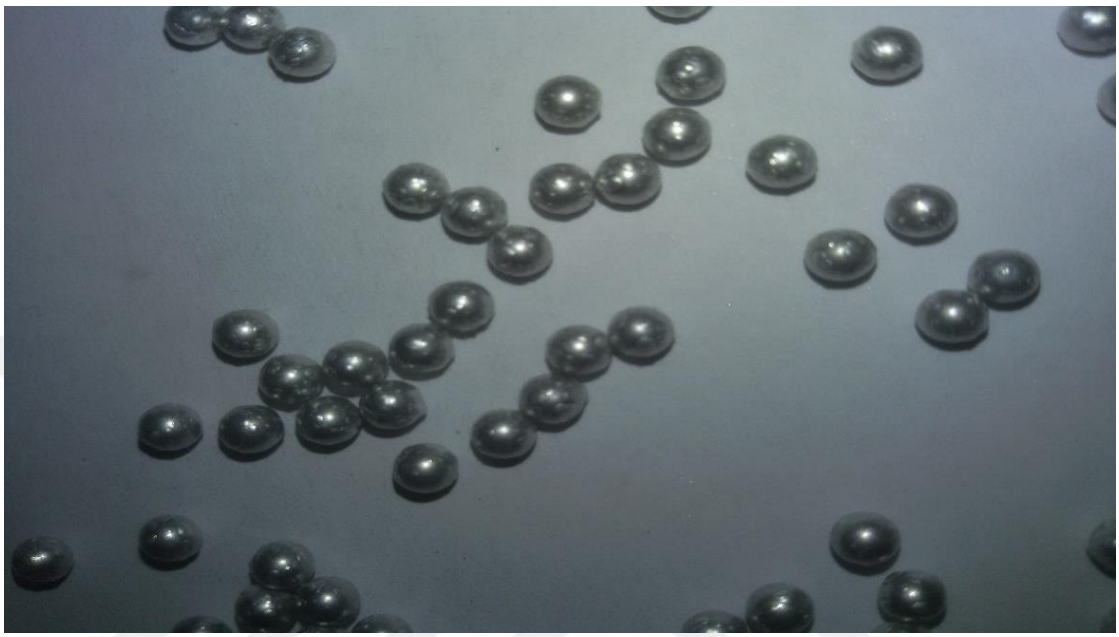
Şekil 2. 4. MA işlemi sonrası bilye ve tozların elekten geçirilip ayrılması

Çalışmalarda MA işleminde kullanılan bilyeler üzerinde alaşımlama sonrasında özellikle alüminyumdan kaynaklanan sıvanma ve yapışmalar görülmüştür (Şekil 2.5). Bu yapışık toz artıkları sodyum hidroksit ile bilyelerden temizlenmiş ve bilyeler tekrar kullanılmıştır.



Şekil 2. 5. Grafen katkısız A90 numunesinin MA işleminde kullanılmış bilyeler

Grafen takviyeli olan numunelerde yapışma ve sıvanmanın çok daha az olduğu görülmüştür (Şekil 2.6). Burada grafen tozlarının yağlayıcı özelliğinin etkili olduğu düşünülmüştür.

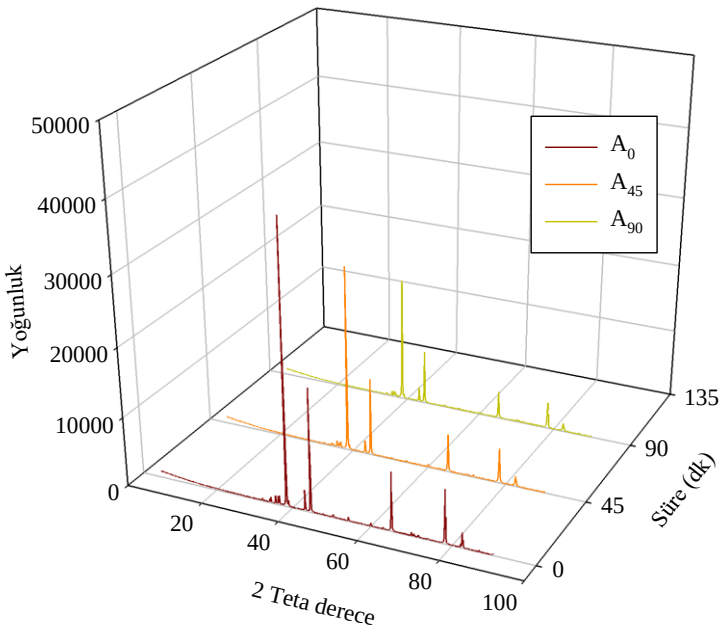


Şekil 2. 6. % 1 Grafen katkılı C90 numunesinin MA işleminde kullanılmış bilyeler

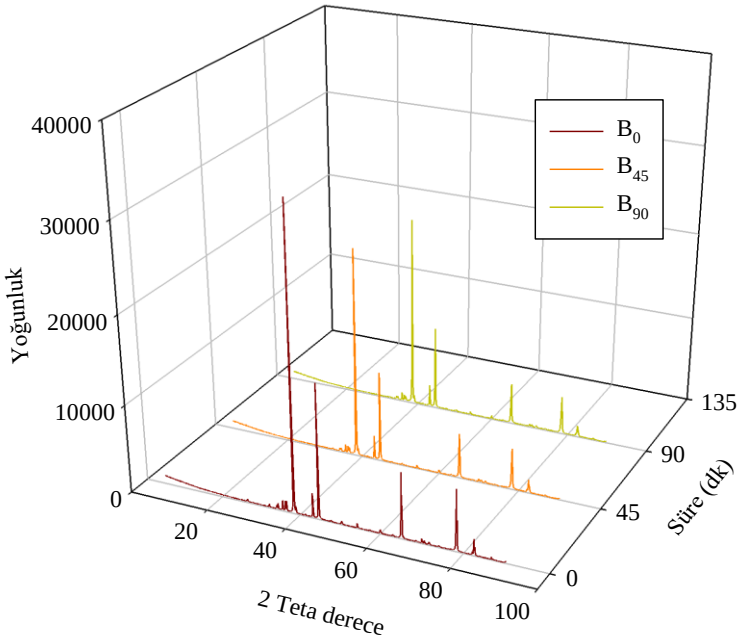
2.4. Alaşımlanmış Tozların XRD Grafikleri ve Kristal Boyut Analizleri

MA işlemi sonrasında birer miktar ayrılan toz numunelerin XRD grafikleri çizilmiş ve tozların alaşım oluşturup oluşturmadığı incelenmiştir. MA işleminin süresine bağlı olarak kristal boyuttaki değişim araştırılmıştır.

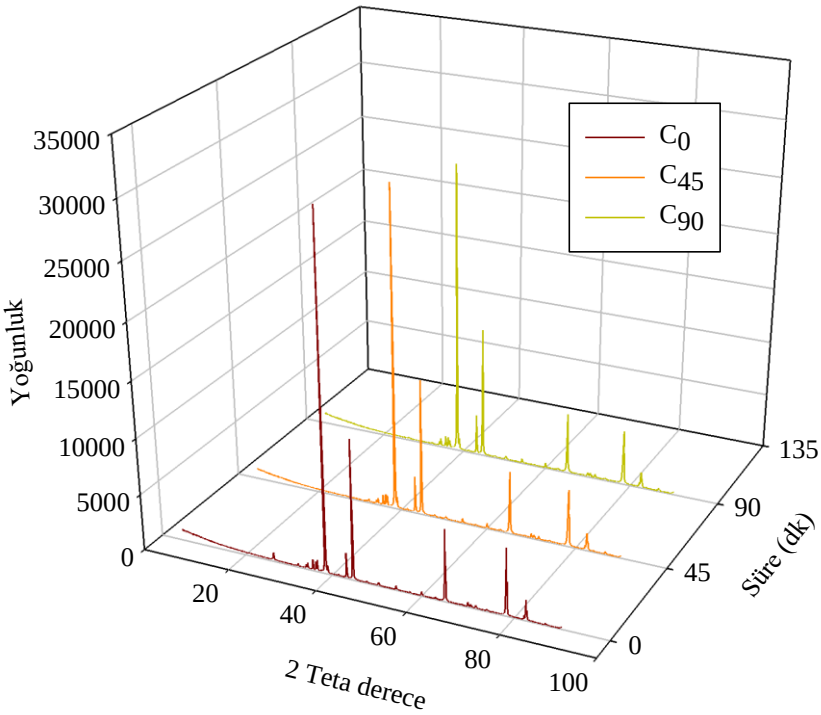
Şekillerde de görüldüğü üzere MA süresine ve toz oranlarına bağlı olarak farklı grafikler çizilmiştir. Grafiklerdeki pikler matris malzemesi olan alüminyumun yoğunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Piklerin genişlediği ve pik boylarının düştüğü yerlerde yoğunlukta düşüş meydana gelmektedir. Bu da çarpışma enerjisinden dolayı mekanik bir alaşımlanmanın meydana geldiğinin göstergesidir.



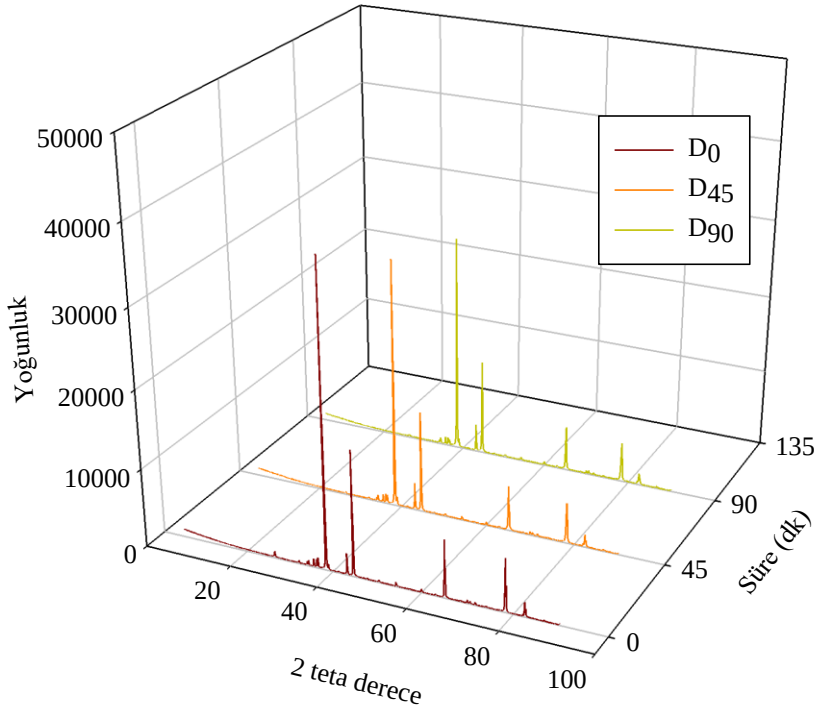
Şekil 2. 7. GNP takviyesiz A numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği



Şekil 2. 8. % 0,5 GNP takviyeli B numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği

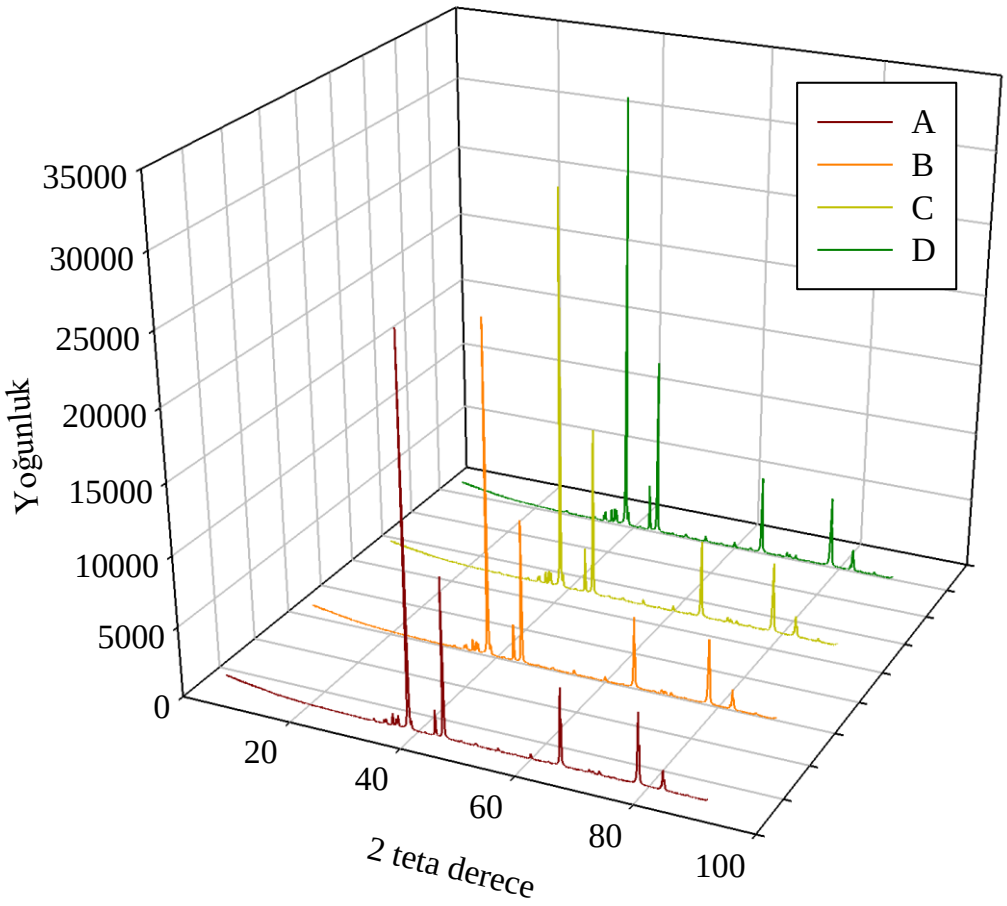


Şekil 2. 9. % 1 GNP takviyeli C numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği



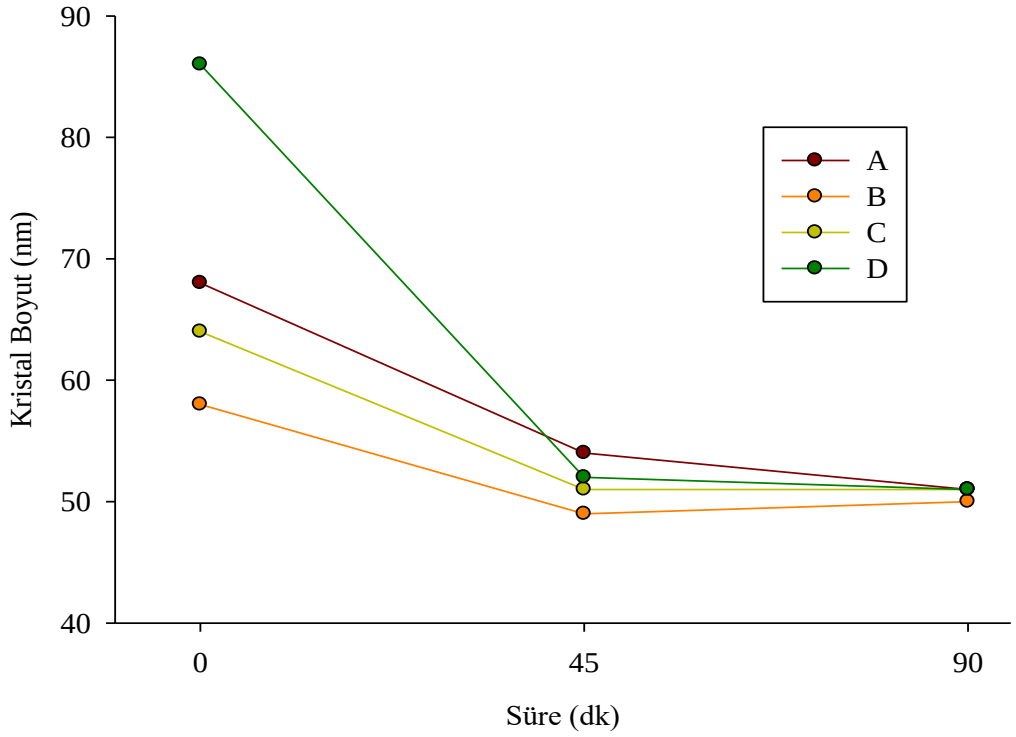
Şekil 2. 10. % 1,5 GNP takviyeli D numunesinin MA süresine bağlı XRD grafiği

Grafiklerde de görüldüğü gibi neredeyse bütün numunelerde en düşük yoğunluklar ve en iyi alaşımlamalar 45 dakika civarında meydana gelmiştir. Şekil 2.11 de grafen takviyesine göre bütün numunelerin 45 dakikalık MA işlemi sonrası XRD grafiği verilmiştir.

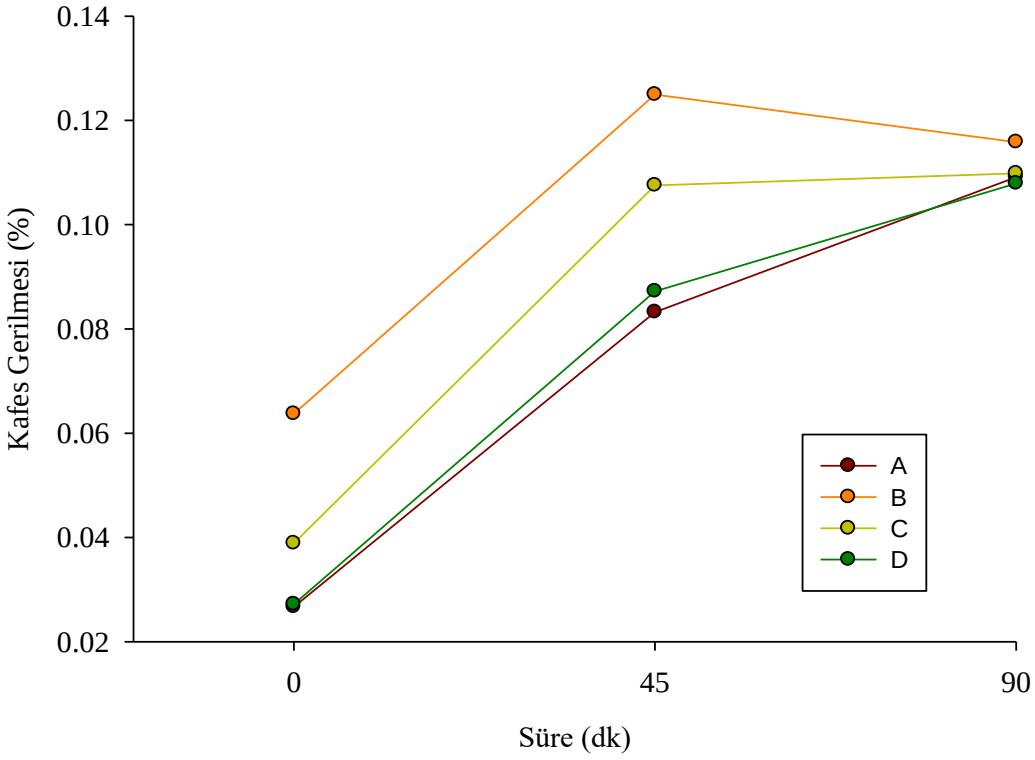


Şekil 2. 11. 45 dakika MA işlemi yapılmış numunelerin XRD grafiği

XRD grafiklerinden de görüldüğü gibi pik yoğunluğundaki azalma ve genişleme kristal boyutunda küçülmeye neden olmuştur. MA süresine bağlı olarak da yine süre arttıkça kristal boyut küçülmektedir. Ancak grafen takviyesiz numunede bu böyle olurken, grafen takviyeli numunelerde 45 dakikalık MA süresinden sonra kristal boyutta düşüş olmamıştır (Şekil 2.12). Ayrıca mikro yapı incelemelerinde en iyi kafes gerilmesi değeri % 0,5 GNP takviyeli B numunesinde 45 dakikalık MA süresinde elde edilmiştir (Şekil 2.13). Bu da en iyi alaşımlamanın % 0,5 grafen katkısında elde edildiğinin göstergesidir. Diğer numuneler de MA süresi arttıkça alaşımlama devam etmiş fakat B numunesi kadar olmamıştır.



Şekil 2. 12. MA süresine bağlı kristal boyut değişim grafiği



Şekil 2. 13. MA süresine bağlı kafes gerilmesi değişim grafiği

2.5. Sinterleme İşlemleri ve Test Numunelerinin Üretimi

MA işlemi sonrasında elde edilen karışımlar, H13 çelik malzemeden yapılmış kalıp ve pistonlardan oluşan mekanizmaya yerleştirilmiş, bir sinterleme fırını ve bir hidrolik pres yardımıyla sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Fakat sinterleme öncesinde 100 MPa basınçta soğuk olarak preslenerek sinterlemeye uygun hale getirilmiş ve bu karışımlar aynı kalıp içerisinde 200 MPa basınç altında 600 °C'de 30 dakika süre ile sinterlenmiştir.



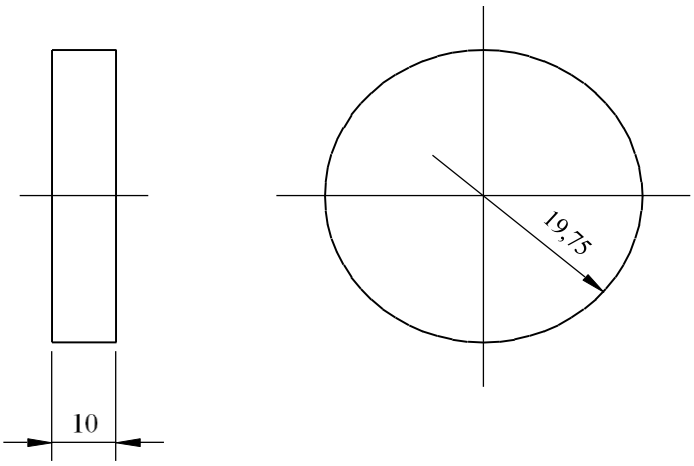
Şekil 2. 14. Sinterleme işleminde kullanılan fırın ve hidrolik pres



Şekil 2. 15. Sinterleme öncesi fırın içerisinde (solda) ve sonrası soğurken (sağda) H13 çelik malzemeden üretilmiş kalıp ve pistonu

2.6. Test Numunelerinin Yüzey Parlatma İşlemleri

Elde edilen toz karışımlardan, sertlik ve mikro yapı incelemeleri için sinterleme işleminden sonra 10 mm yüksekliğinde ve 19.75 mm çapında numuneler oluşturulmuştur (Şekil 2.16).



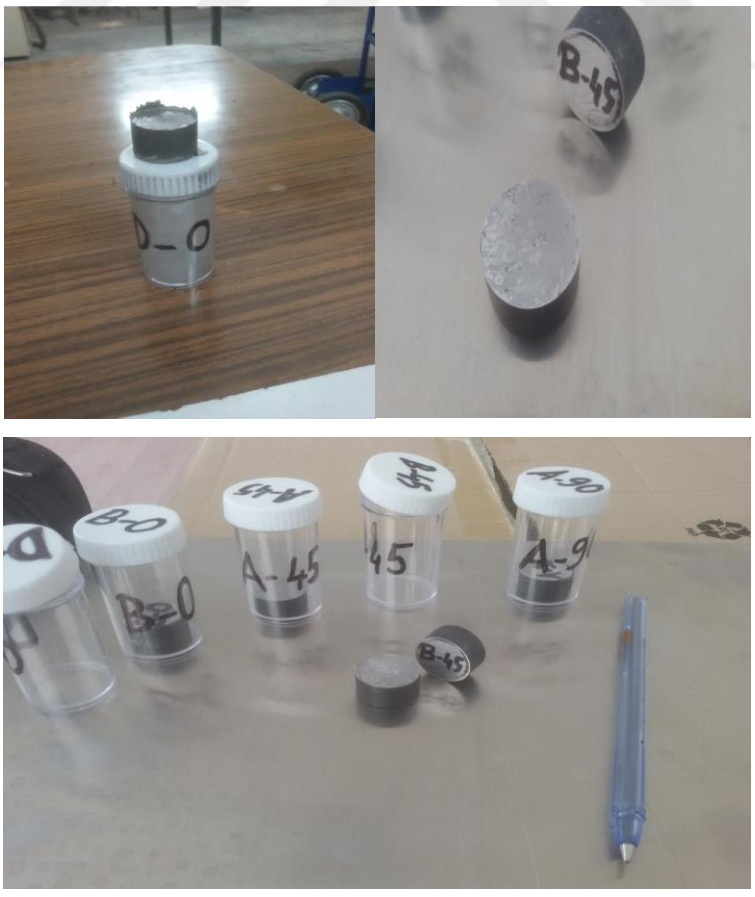
Şekil 2. 16. Sinterleme sonrası elde edilen numune (billet) boyutları

Elde edilen herbir numunenin yüzeyleri şekil 2.17 de gösterilen cihaz kullanılarak parlatılmıştır.



Şekil 2. 17. Parlatma cihazı ve ekipmanları

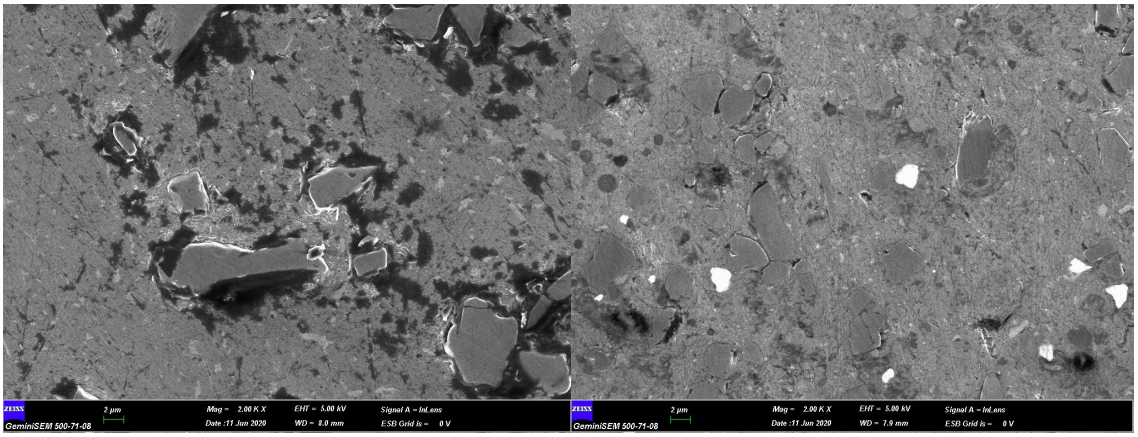
Ayrıca her numunenin üzerine kod numarası yazılarak yine aynı numara yazılı olan plastik koruma kutusuna alınmış ve kapakları hava almaması için bantlanmıştır (Şekil 2.18)



Şekil 2. 18. Parlatma öncesi (solda) ve parlatma sonrası (sağda) numuneler

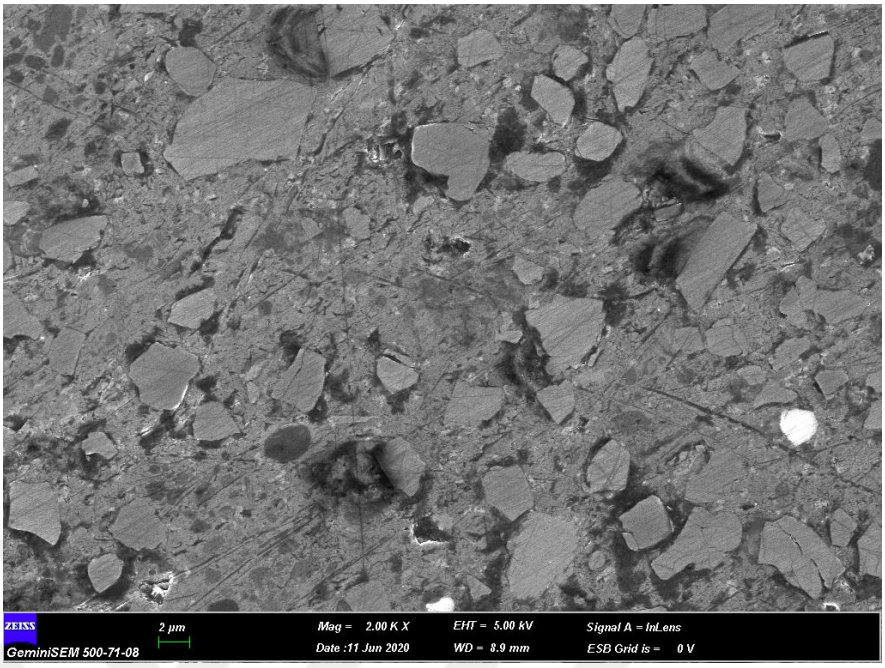
2.7. Test Numunelerinin Malzeme Karakterizasyonu ve SEM Görüntüleri

MA işleminden sonra sinterleme öncesinde her bir numuneden alınan bir miktar toz karışımının mikro yapı incelemesi yapılmış, XRD grafikleri çizilmiştir. Böylece MA süresine göre alaşım içerisindeki elementlerin hangi oranlarda tam olarak çözünme gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Sonra sinterlenen numuneler (billetler) üzerinde analiz yapabilmek için SEM görüntülerine bakılmıştır. Bu görüntüler sayesinde hem birbirleriyle kıyaslama sağlanmış hem de numunelerin içyapı karakterizasyonu belirlenmiştir.



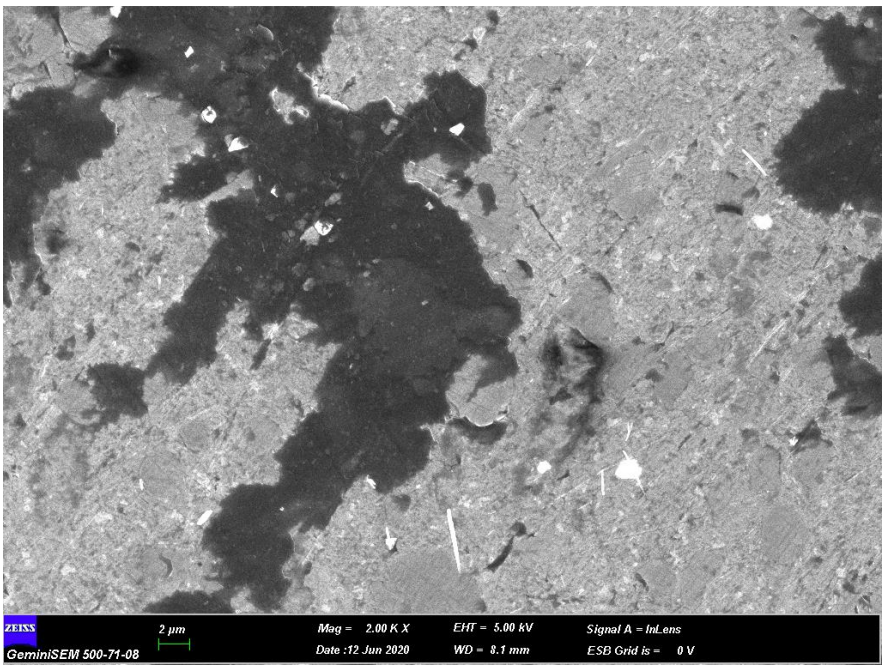
Şekil 2. 19. % 0,5 Grafen takviyeli B0 ve B45 (hiç MA yapılmamış ve 45 dakika MA yapılmış) numunelerinin 2000 kez büyütme altındaki SEM görüntüleri

MA işlemi yapılmamış numunede parçacık boyutunda herhangi bir değişim yoktur. Tozlar ve bilyeler plastik kutu içerisinde sadece birkaç kez elle çalkalanmış ve bırakılmıştır. Ayrıca siyah olan bölgelerde dağılım göstermeyen grafen tozlar görülmektedir. 45 dakika MA yapılan B45 numunesinde ise homojen bir dağılım söz konusudur. Parçacık boyutu da görülür şekilde küçülmüştür. Siyah bölgenin olmayışı da grafenin dağılım yaptığını göstermektedir.



Şekil 2. 20. 90 dakika MA yapılmış B90 numunesinin 2000 kez büyütme altında SEM görüntüsü

Görüldüğü gibi 90 dakikalık sürede parçacık boyutu daha da küçülmüş fakat grafen tozlarında topaklanmalar meydana gelmiştir.

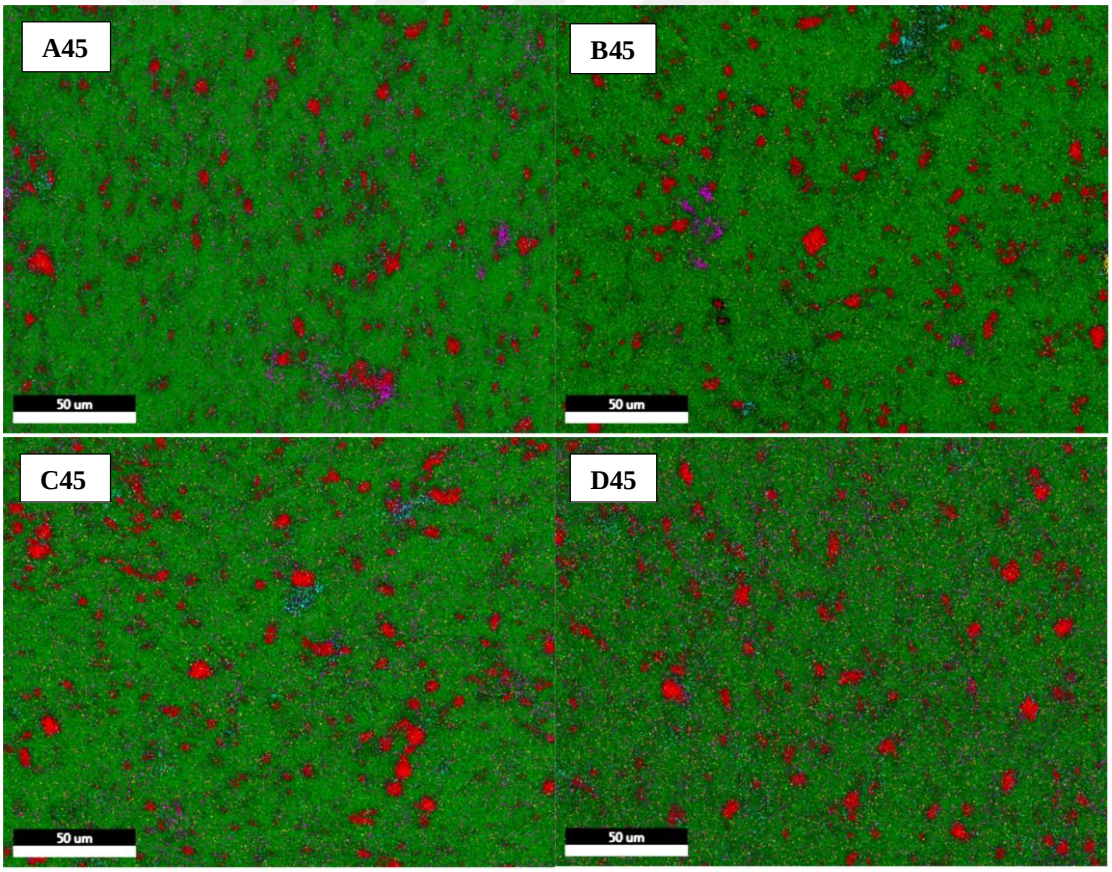


Şekil 2. 21. % 1,5 Grafen takviyeli, 45 dakika MA yapılmış D45 numunesinin 2000 kez büyütme altında SEM görüntüsü

Şekil 2.21 de ise % 1,5 grafen takviyesi yapılmış ve 45 dakika MA işlemi gerçekleştirilmiş D45 numunesindeki topaklanmalar görülmektedir. Hem grafen miktarında hem de MA süresindeki artış topaklanmalara neden olmuştur. Siyah bölgeler topaklanmış grafenin göstergesidir.

Sinterleme sonrası elde edilen numuneler parlatıldıktan sonra SEM' de görüntüleri alınarak, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopi (EDX) analizleri yapılmıştır. EDX analizleriyle, SEM görüntüsü alınırken analizin yapıldığı noktada bulunan elementlerin birbirine ne oranda karıştıkları saptanmaya çalışılmıştır.

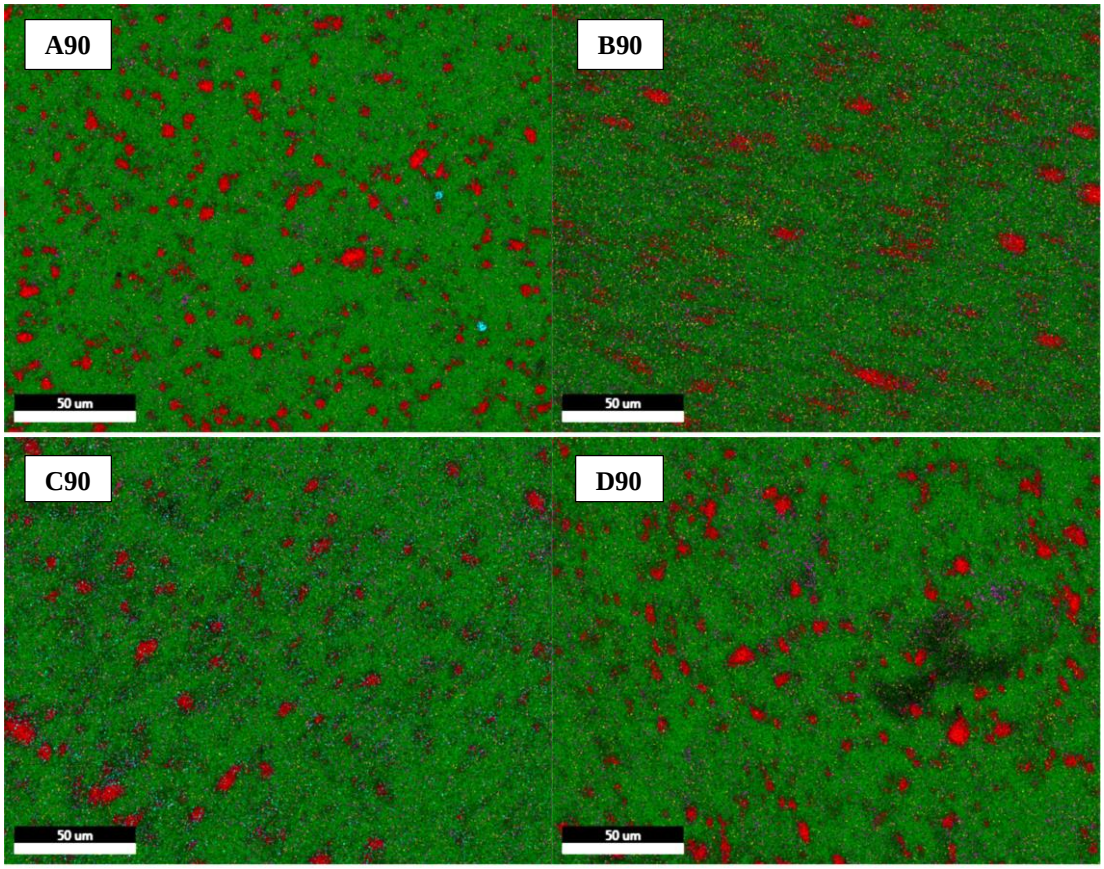
Şekil 2.22 ve 2.23 ise toz karışımların % olarak dağılımlarını gösteren SEM-EDX görüntüleridir.



Şekil 2. 22. 45 dakika MA yapılmış grafen takviyesiz ve % 0,5 – 1 – 1,5 grafen takviyeli numunelerin SEM-EDX görüntüsü

Al – SiC – Mg – Cu – Zn – GNP

45 dakikalık MA süresinden sonra en iyi alaşımlama ve dağılımın B45 numunesinde olduğu görülmüştür. A45 numunesinde SiC ve Mg parçacıklarında yer yer topaklanma görülmektedir. C45 ve D45 numunesinde ise SiC etrafında toplanan grafen ve Mg parçacıklar dikkat çekmektedir. Grafen miktarındaki artış homojen dağılıma ve tane büyüklüğüne olumsuz etki etmiştir.



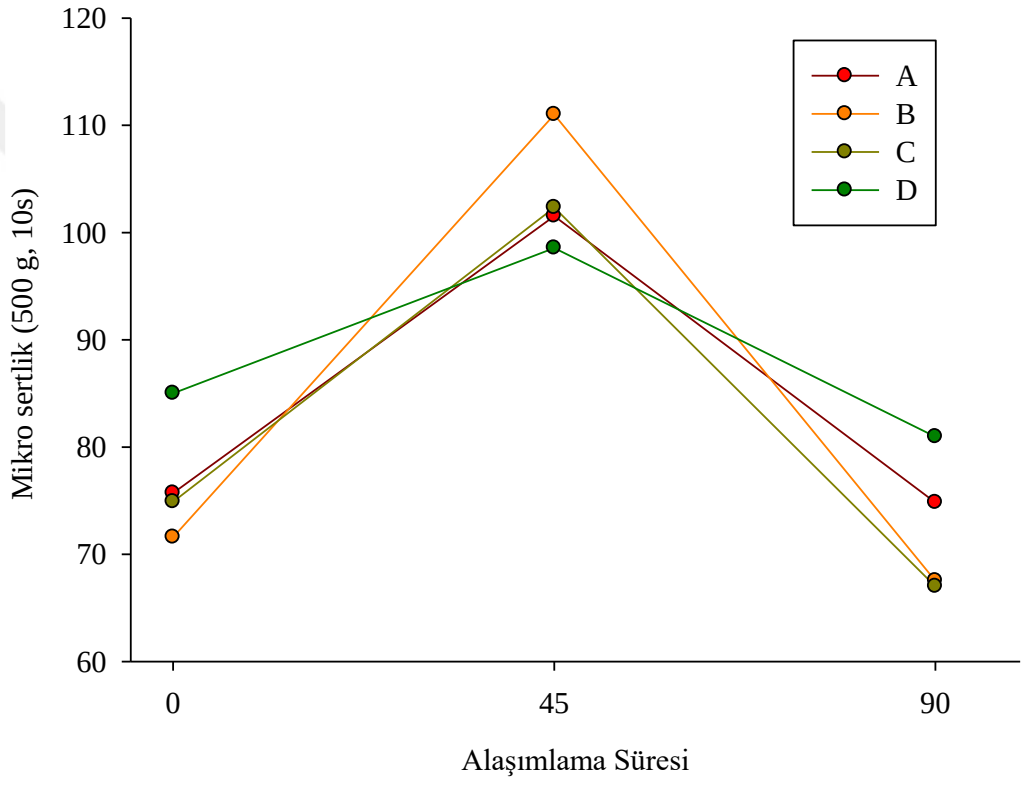
Şekil 2. 23. 90 dakika MA yapılmış grafen takviyesiz ve % 0,5 – 1 – 1,5 grafen takviyeli numunelerin SEM-EDX görüntüsü

Al – SiC – Mg – Cu – Zn – GNP

Şekil 2.23 de ise artan MA süresinin numunelerde tane büyüklüğünde olumlu etki gösterdiği dikkat çekmektedir. Özellikle SiC ve Mg tozlarında tane büyüklüğünde azalma olmuştur. Fakat grafen yüzdesi yüksek olan C90 ve D90 numunelerinde yer yer topaklanmalar ve homojen olmayan dağılımlar meydana gelmiştir. Grafen takviyesiz A90 numunesinde ise daha düzgün bir homojenlik ve daha küçük bir tane yapısı görülmektedir.

2.8. Numunelerin Sertlik Testleri

Sinterleme sonrası parlatılan numunelerin 10 saniyelik 500 gram yüklemede Vickers mikro sertlik değerleri incelenmiştir. Bu incelemelerde 0 – 45 – 90 dakika süre ile alaşımlanmış numunelerin sertlik değerleri Şekil 2.24 de gösterilmiştir. Sertlik grafiğinde de görüldüğü gibi alaşımlama süresi arttıkça sertlik de artmaktadır. En düşük sertlik değeri 45 dakika alaşımlanmış D45 numunesinde gözlemlenirken, en yüksek sertlik değeri 45 dakika alaşımlanmış B45 numunesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 2. 24. MA süresine bağlı sertlik değerleri grafiği

3. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

3.1 Sonuçlar

Yapılan tez çalışmalarında son yıllarda üstün özellikleri ile dikkat çeken grafenin alüminyum matrisli kompozit üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kompozit üretim metodu olarak mekanik alaşımlama işlemi seçilmiş ve numuneler yüksek hızda alaşımlama yapan cihaz ile üretilmiştir. Tüm çalışmaların sonunda şu sonuçlar ile karşılaşılmıştır:

- Elde edilen toz karışımlarının XRD grafikleri bize MA süresinin arttırıldığında, Al yoğunluğunda azalma meydana geldiğini göstermiştir. Bu azalış alaşımlamanın gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca kristal boyut ve kafes gerilmesi grafikleri de alaşımlama süresine bağlı olarak olumlu değerlendirilmiştir. Ancak % 0 ve % 1,5 grafen takviyeli numunelerde kristal boyutta azalma ve kafes gerilmesinde artış 45 dakika sonrasında devam ederken, % 0,5 ve % 1 grafen takviyeli numunelerde 45 dakika sonrasında değişiklik neredeyse olmamıştır.
- Toz karışımlarının SEM görüntüleri incelendiğinde özellikle 90 dakika MA yapılan % 1 ve % 1,5 grafen takviyeli karışımlarda topaklanma meydana geldiği görülmüştür. Grafen miktarındaki artış homojen dağılıma ve tane büyüklüğüne olumsuz etki etmiştir.
- Sinterleme sonrası elde edilen numunelerin EDX analizlerinde MA süresi arttıkça grafen takviyesiz numunede olumlu gelişmeler gözlemlenirken, % 1 ve % 1,5 grafen takviyeli karışımlarda topaklanmalar ve olumsuz gelişmeler görülmüştür. Özellikle 45 dakikalık MA sonrasında grafeni fazla olan numunelerde yükselen değerler tekrar düşmeye başlamıştır.

- Numunelerin Vickers mikro sertlik değerleri incelendiğinde 45 dakikalık MA süresine kadar tüm numunelerin sertlik değeri artmış, 45 dakikanın üzerindeki sürelerde azalmıştır.

3.2 Öneriler

Yapılan tüm çalışmalar boyunca bazı tespit ve öneriler göze çarpmıştır. Bunlar şöyledir;

- Tozların tartılması, karıştırılması ve plastik kutulara alınması esnasında oksijensiz ortam sağlayan glove box cihazı kullanılması, tozları oksitlenmeden koruyup saflıklarını muhafaza etmelerini sağlayacaktır.
- MA cihazı yüksek frekansla çalışıp hızlı alaşımlama yapabildiği için 45 dakikanın 15 dakika öncesinde ve sonrasındaki süre aralıklarında da deneyler yapmanın farklı sonuçlar verebileceği düşünülmüştür.

KAYNAKÇA

1. German, R.M. 2007. Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri. Ankara: Uyum Ajans.
2. Pul, M. 2010. " Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi ". Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. Hull, D., Clyne, T.W. An introduction to composite materials, 2nd Edition, Cambridge University Press, İngiltere, 1996.
4. Tjong, S. C. 2013. " Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets ". **Materials Science and Engineering, 74:** 281–350.
5. Geim, A.K., Novoselov, K.S. 2007. " The rise of graphene ''. **Nature Materials, 6:** 183–191.
6. http://www.cekmekoy2023.com (Erişim Tarihi: Ekim 2020)
7. Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. " Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler ". **Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 669:** 36-47.
8. Savage, N. 2012. " Materials science: super carbon ". **Nature Materials, 482:** 30-31.
9. Adams, J., Pendlebury, D. 2011. Global Research Report Materials Science and Technology, Thomsons Reuters, UK.
10. Başçı, M. 2015. "Geleceğin malzemesi grafen," **Bilişim Dergisi, 177:** 156-165.
11. http://www.ryamanoglu.com/index_htm_files/TozMetalurjisi_Bolum_3.pdf (Erişim Tarihi: Ekim 2020)
12. https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/self-propagating-reactions.html (Erişim Tarihi: Ekim 2020)
13. Oztas, M.K., Sarıkan, B., Ubeyli, M., Camus, N., Keles, O. 2011.'' Production of the functionally gradient material based on an aluminum alloy ''. The eleventh international scientifically-practical conference, Saint Petersburg, Russian Federation. 283–5.

14. Suryanarayana, C. 2001. " Mechanical alloying and milling". **Progress in Materials Science. 46:** 1-184

15. Bustamante, R.P., Morales, D.B., Martínez, J.B., Guel, I.E., Sánchez, R.M. 2014. '' Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying ''. **Journal of Alloys and Compounds, 615:** 578-582.

16. Bastwros, M., Kim, G. Y., Zhu, C., Zhang, K., Wang S., Tang X., Wang X. 2014. '' Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering ''. **Composites: Part B 60:** 111–118.

17. Yu, Z., Yang, W., Zhou, C., Zhang, N., Chao, Z., Liu, H., Cao, Y., Sun, Y., Shao, P., Wu, G**.** 2019. '' Effect of ball milling time on graphene nanosheets reinforced Al6063 composite fabricated by pressure infiltration method ''. **Carbon, 141:** 25-39.

18. Kandemir, S. 2018. '' Grafen Nanolevha Takviyesinin AlSi10Mg Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi ''. **GU J Sci, Part C, 6(1):** 177-187.

19. Rashad, M., Pan, F., Zhang, J., Asif M. 2015. '' Use of high energy ball milling to study the role of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes reinforced magnesium alloy ''. **Journal of Alloys and Compounds, 646:** 223-232.

20. Şenel, M.C., Gürbüz, M., Koç, E. 2017. '' Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu ''. **Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 23(8):** 974-978.

21. Xavior, A., Kumar, M.P., Kumar, A. 2018. '' Tribological studies on AA 2024 – graphene/CNT nanocomposites processed through powder metallurgy ''. **Materials Today: Proceedings 5:** 6588–6596

22. Mirjavadi, S.S., Alipour, M., Hamouda, A.M.S., Kord, S., Koppad, P.G., Abuzin, Y.A., Keshavamurthy, R. 2018. '' Effect of hot extrusion and T6 heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu nanocomposite reinforced with graphene nanoplatelets ''. **Journal of Manufacturing Processes 36:** 264–271.

23. https://www.retsch.com.tr (Erişim Tarihi: Ekim 2020)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı:	Göksel BEHRET
Uyruğu:	Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:	22.02.1977 - KAYSERİ
Medeni Durum:	Evli
e-mail:	gbehret@erciyes.edu.tr
Yazışma Adresi:	Yıldırım Beyazıt Mah. Uzay Cad. Önder APT. No:26/16 Melikgazi/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erc. Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık ABD.	2020
Lisans	Erc. Üniv. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2007
Ön Lisans	Erc. Üniv. Sivil Havacılık MYO., Uçak Gövde Bölümü	2001
Lise	Merkez Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi-KAYSERİ	1995

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2016-Halen	Erc. Üniv. Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi	15
1997-2001	Özel Sektör	5

YABANCI DİL

İngilizce