

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**GRAFEN KATKILI BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİT  
MALZEMELERİN MEKANİK VE ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Ahmed Basheer Mohammed ALBARTOULI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Doç. Dr. Arif UZUN**

**ARALIK - 2020**

**KASTAMONU**



## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*



**Ahmed Basheer Mohammed ALBARTOULI**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### GRAFEN KATKILI BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

AHMED BASHEER MOHAMMED ALBARTOULI

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:Doç. Dr. Arif UZUN

Bu çalışmada grafen katkı bakır matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Bu amaç için kompozit malzemelerin üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Bakır matris tozları içerisine ağırlıkça %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında grafen parçacıkları ilave edilerek bilyeli karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde karıştırma hızı 400 rpm, karıştırma süresi 120 dakika ve bilye/toz oranı 10:1 olarak belirlenmiştir. Karışım tozlar 500 MPa, 600 MPa ve 700 MPa basınç altında çelik bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler argon atmosferinde 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretim parametrelerinin numunelerin fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkilerini belirlemek amacıyla mikroyapı analizi, XRD analizi, sertlik ölçümü ve elektriksel iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mekanik karıştırmanın bir sonucu olarak küresel şekilli Cu tozları pulsu forma dönüşmüştür. Bununla birlikte grafen parçacıkları yapı içerisinde aglomere olarak üretilen ürünlerin özelliklerini etkilemiştir. Artan grafen ile birlikte mikro yapıda gözeneklilik ve aglomerasyon belirgin hale gelmiştir. Bunun sonucunda %87,4'e kadar bağıl yoğunlukta azalma meydana gelmiştir. Ayrıca kompozitlerin elektrik iletkenliği artan grafen miktarı ile birlikte azalmıştır. En yüksek elektrik iletkenliği 76,59 IACS ( %0 GNS-500 MPa- 950 °C) ve en düşük elektrik iletkenliği 43,49 IACS (%1,5 GNS-500 MPa- 850 °C) olarak belirlenmiştir. Grafen miktarı %1'e kadar sertlik, elastik modül ve akma dayanımında nispeten artış sağlamıştır. Sertlik ölçümlerinde uygulanan yükteki artışa bağlı olarak numuneler iz boyutu etkisi şeklinde eğilim sergilemişlerdir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kompozit bakır, grafen, toz metalurjisi, elektriksel iletkenlik

Aralık 2020, 76 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **MSC THESIS**

#### **INVESTIGATION OF MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF GRAPHENE REINFORCED COPPER MATRIX COMPOSITE MATERIALS**

**AHMED BASHEER MOHAMMED ALBARTOULI**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. Arif UZUN**

In this study, the mechanical and electrical properties of graphene reinforced copper matrix composite materials were investigated. For this purpose, powder metallurgy method has been used in the production of composite materials. Graphene particles of %0, %0,5, %1 ve %1,5 by weight were added into the copper matrix powders and mixed in a ball mixer. In the mixing process, the mixing speed was determined as 400 rpm, the mixing time as 120 minutes and the ball / powder ratio as 10: 1. The mixed powders were unidirectionally compressed in a steel mold under 500 MPa, 600 MPa and 700 MPa pressure. Samples produced after compression were subjected to sintering process in argon atmosphere at temperatures of 850 °C, 900 °C and 950 °C. Microstructure analysis, XRD analysis, hardness measurement and electrical conductivity analysis were performed to determine the effects of production parameters on the physical and mechanical properties of the samples. According to the results obtained, spherical shaped Cu powders transformed into flaky form as a result of mechanical grinding. In addition, graphene particles affected the properties of the products produced as agglomerates within the structure. With increasing graphene, microstructure porosity and agglomeration have become evident. As a result, a decrease in relative density of up to 87,4% occurred. In addition, the electrical conductivity of composites decreased with the increasing amount of graphene. The highest electrical conductivity was determined as 76,59 IACS (0% GNS-500 MPa- 950 °C) and the lowest electrical conductivity 43,49 IACS (1,5% GNS-500 MPa- 850 °C). When the amount of graphene increased up to 1%, there was a relative increase in hardness, elastic modulus and yield strength. The samples showed a trend as a trace size effect due to the increase in the applied load on the hardness measurements,

**KEYWORDS:** Composite copper, graphene, powder metallurgy, electrical conductivity

December 2020, 64 Page

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında bilgi ve deneyimleri ile katkı sunan değerli danışman hocam Do. Dr. Arif UZUN'a teőekkürlerimi bir bor bilirim. Ayrıca deneysel alıőmaların boyunca beni yalnız bırakmayan kıymetli arkadaşım Abdulbaset Ali Mohammed ZENDAH'a, Kastamonu Üniversitesi merkezi araştırma laboratuvarı çalıőanlarına, elektriksel iletkenlik ölçüm deneylerinde yardımlarını esirgemeyen TSE Deney ve Kalibrasyon Başkanlığı çalıőanlarına teşekkür ederim.

Son olarak bu süreçte gerek maddi gerekse manevi yönden her türlü desteği sağlayan aileme őükranlarımı sunarım.

Ahmed Basheer Mohammed ALBARTOULI

Kastamonu, 2020

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>ii</b>
<b>TAAHHÜTNAME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER</b> .....	<b>3</b>
2.2 Matris Seçimi .....	4
2.3 Takviye Seçimi.....	4
2.4 Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler.....	4
2.5 Kısa Elyaf Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler .....	5
<b>3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>6</b>
3.1 Sıvı Hal Üretim Yöntemi .....	6
3.1.1 İnfiltrasyon .....	6
3.1.2 Karıştırmalı Döküm.....	7
3.1.3 Basınçlı Döküm.....	8
3.2 Katı Hal Üretim Yöntemi .....	9
3.2.1 Toz Metalurjisi .....	9
<b>4. GRAFEN KATKILI METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER</b> .....	<b>15</b>
4.1 Grafen.....	15
4.1.1 Grafenin Yapısı .....	15
4.1.2 Termal Özellikler .....	16
4.1.3 Mekanik Özellikler.....	18
4.1.4 Elektriksel Özellikler.....	20
4.2 Grafen Katkılı Bakır Matrisli Kompozitler .....	21
<b>5. YÖNTEM</b> .....	<b>25</b>
5.1 Malzemeler.....	25
5.2 Grafen Katkılı Bakır Kompozitlerin Üretimi .....	25
5.2.1 Tozların Karıştırılması .....	25
5.2.2 Tozların Sıkıştırılması ve Sinterlenmesi .....	26
5.3 Karakterizasyon İşlemleri.....	28
5.3.1 Makro ve Mikro Yapısal Analizler .....	28
5.3.2 Yoğunluk Ölçümü .....	29
5.3.3 Mikrosertlik Ölçümü .....	30
5.3.4 Elektrik İletkenlik Ölçümü.....	31
<b>6. BULGULAR</b> .....	<b>32</b>
6.1 Toz Morfolojisi .....	32
6.2 Mikroyapısal Analiz.....	33
6.3 Yoğunluk Değişimi .....	37
6.4 XRD Analizi.....	38

6.5 Sertlik Değişimi.....	40
6.6 Elektriksel iletkenlik .....	52
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>55</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>64</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1	Metal matrisli kompozit çeşitleri .....	3
Şekil 3.1	İnfiltrasyon yöntemlerinin temel prensiplerinin şematik görünümü (a) vakum infiltrasyonu ve (b) basınç infiltrasyonu .....	7
Şekil 3.2	Karıştırmalı döküm tekniğinin şematik resmi.....	8
Şekil 3.3	Basıncılı döküm işleminin şematik görünümü.....	9
Şekil 3.4	Biye-toz-bilye çarpışma mekanizması ve nano ölçekte mikrokristallerin oluşumunun şematik gösterimi .....	11
Şekil 3.5	Üç parçacık çeşidindeki sinterleme mekanizmaları .....	13
Şekil 3.6	Sıcak presleme (HP), soğuk izostatik presleme (CIP), sıcak izostatik presleme (HIP) ve sinterlemenin şematik bir diyagramı .....	14
Şekil 4.1	Tüm grafitik formların temeli. Grafen 0D bucky-kürelere sarılabilir, 1D nanotüplere kaplanabilir veya 3D grafitte istiflenebilir .....	16
Şekil 4.2	Tek katmanlı grafene odaklanan lazer ışığını gösteren bir deney şeması .....	17
Şekil 4.3	Karbon malzemelerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi .....	18
Şekil 4.4	Atomik düzlem sayısının bir fonksiyonu olarak grafen tabakasının termal iletkenlikleri .....	18
Şekil 4.5	Dairesel deliklere sahip grafenin SEM görüntüsü (a) ve AFM kullanılarak grafen üzerinde nanoindentasyonun şematik bir gösterimi (b) .....	19
Şekil 4.6	Grafende bant boşluklarının şematik diyagramları. (a) ve (b) sırasıyla tek tabakalı ve iki tabakalı grafen, (c) iki tabakalı dik bir elektrik alanı uygulandığında iki tabakalı grafende bir bant boşluğunun açılımı.....	20
Şekil 5.1	Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü .....	25
Şekil 5.2	Karıştırma işleminde kullanılan ultrasonik banyo .....	26
Şekil 5.3	Karıştırma işleminde kullanılan bilyeli karıştırıcı .....	26
Şekil 5.4	Sıkıştırma işleminde kullanılan hidrolik pres .....	27
Şekil 5.5	Sıkıştırma işleminde kullanılan kalıp (a) ve üretilen numuneler (b) .....	27
Şekil 5.6	Sinterleme işleminde kullanılan fırın.....	28
Şekil 5.7	Zımparalama ve parlatma cihazı .....	29
Şekil 5.8	Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskop (a) ve optik mikroskop (b) .....	29
Şekil 5.9	Sertlik ölçüm cihazı .....	30
Şekil 5.10	Elektriksel iletkenlik ölçümü .....	31
Şekil 6.1	Karışım öncesi (a) ve karışım sonrası Cu tozların morfolojisi (b ve c) ..	32
Şekil 6.2	GNS içermeyen (%0) numunelerin optik mikroskop görüntüsü.....	34
Şekil 6.3	%0,5 GNS içeren numunelerin optik mikroskop görüntüsü .....	34
Şekil 6.4	%1 GNS içeren numunelerin optik mikroskop görüntüsü .....	35
Şekil 6.5	%1,5 GNS içeren numunelerin optik mikroskop görüntüsü .....	35
Şekil 6.6	600 MPa ve 900 °C'de yoğunlaştırılmış Cu-GNS kompozitlerin SEM görüntüsü .....	36
Şekil 6.7	600 MPa ve 900 °C'de yoğunlaştırılmış Cu-1,5 GNS kompozitlerin EDS çizgi tarama analizi .....	36
Şekil 6.8	Cu-GNS kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimi.....	38

Şekil 6.9	700 MPa basınçta sıkıştırılmış ve farklı sıcaklıklarda (850, 900 ve 950 °C) sinterlenmiş saf Cu ve Cu-1,5 GNS kompozitlerinin XRD modelleri .....	40
Şekil 6.10	Saf Cu numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri .....	43
Şekil 6.11	Cu-0,5 GNS kompozit numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri .....	46
Şekil 6.12	Cu-1 GNS kompozit numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri.....	48
Şekil 6.13	Cu-1,5 GNS kompozit numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri .....	50
Şekil 6.2	Üretim parametrelerinin elektrik iletkenliği üzerine etkisi.....	53

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa

Tablo 1.1 Grafenin fiziksel ve mekaniksel özellikleri .....	1
Tablo 4.1 Farklı mühendislik takviye elemanlarının özellikleri .....	21
Tablo 4.2 Cu-Gr ve Cu- GNS kompozitlerin mekanik özellikleri .....	24
Tablo 6.1 Saf Cu numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler .....	44
Tablo 6.2 Cu-0,5 GNS numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler .....	47
Tablo 6.3 Cu-1 GNS numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler .....	49
Tablo 6.4 Cu-1,5 GNS numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler .....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$\lambda$	: Isıl iletkenlik
$\rho_s$	: Numune yoğunluğu
$\rho_t$	: Kompozit numunenin teorik yoğunluğu
$\rho^*$	: Bağıl yoğunluk
$H_v$	: Vickers sertliği
$E$	: Elastik modülü
$Y$	: Akma dayanımı

### Kısaltmalar

<b>TM</b>	: Toz metalurjisi
<b>HP</b>	: Sıcak pres
<b>HIP</b>	: Sıcak izostatik pres
<b>CIP</b>	: Soğuk izostatik pres
<b>MÖ</b>	: Mekanik öğütme
<b>MA</b>	: Mekanik alaşımlama
<b>0D</b>	: Boyutsuz
<b>1D</b>	: Tek boyutlu
<b>2D</b>	: İki boyutlu
<b>3D</b>	: Üç boyutlu
<b>CNT</b>	: Karbon nano tüp
<b>GNS</b>	: Grafen nano levha
<b>FLG</b>	: Birkaç katmanlı grafen
<b>AFM</b>	: Atomik kuvvet mikroskobu
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>CVD</b>	: Kimyasal buhar biriktirme
<b>SPS</b>	: Spark plazma sinterleme
<b>EDS</b>	: Enerji dağılımlı spektrometri
<b>İBE</b>	: İz boyutu etkisi
<b>TİBE</b>	: Ters iz boyutu etkisi

## 1. GİRİŞ

Metal matrisli kompozitler için grafen olağanüstü mekanik özelliklerinden dolayı potansiyel bir takviye elemanıdır. Özellikle metal matrisli kompozit olması durumunda çok işlevli kompozitler üretmek için çarpıcı bir dolgu maddesi haline getiren özel optik ve termal özelliklere de sahiptir. Son birkaç yılda, polimer ve seramik matrisli kompozitlere kıyasla grafen takviyeli metal matrisli kompozitler nispeten daha az dikkate alınmıştır. Grafene ait bir kaç fiziksel ve mekaniksel özellikler Tablo 1.1’de özetlenmiştir (Kumar ve Xavier, 2014).

Tablo 1.1 Grafenin fiziksel ve mekaniksel özellikleri.

Özellik	Birim	Veri
Çekme dayanımı	GPa	130
Elektron hareketliliği	$\text{Cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	1500
Elektron Özdirenci	$\Omega\text{cm}$	$10^{-6}$
Termal iletkenlik	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$5,3 \times 10^3$
Termal genleşme katsayısı	$\text{K}^{-1}$	$-8 \times 10^{-4}$
Spesifik yüzey alanı	$\text{m}^2\text{g}^{-1}$	2630

Metal matrisli kompozitlerde metalin sünekliği ve tokluğu, seramiğin yüksek mukavemeti ve elastik modülü bir araya gelir. Bundan dolayı daha yüksek özgül dayanım ve modülün arandığı otomotiv, havacılık ve uzay sanayii gibi alanlarda uygulama imkânı bulmuşlardır. Metal matrisli kompozitler alanında grafen gibi takviye elemanlarını homojen bir şekilde matris içerisinde üretmek ve dağıtmak için uygulanabilir birçok süreç geliştirilmiştir (Tabandeh-Khorshid vd. 2020). Mevcut çalışmamız ise toz metalurjisi yöntemini esas alarak metal matrisli kompozit üretimini esas almaktadır. Grafen / metal ara yüzeyinde bağlanma eksikliği gibi sorunlar zayıf ara yüzey yapışmasına neden olur ve elastik uyumsuzluk nedeniyle metal matrisin mekanik performansını azaltır. Bununla birlikte daha büyük ara yüzey temas alanı nedeniyle diğer takviye elemanlarına kıyasla grafenin dağılması daha zordur. Karıştırmalı döküm gibi geleneksel imalat yöntemleri ile bu sorunun üstesinden gelinmesi güçtür. Metal matrislerde grafenin homojen dağılımını sağlamak için, mekanik öğütmeye (ör. bilyalı öğütme) dayalı dispersiyon yöntemleri geliştirilmiştir (Xiang vd. 2016). Özellikle bulk bakır-grafen kompozitlerin üretilminde toz

metalurjisi (TM), mikrodalga sinterleme, sıcak presleme, spark plazma sinterleme, soğuk presleme, sıcak izostatik presleme vb. yöntemler kullanılabilir. Bakır-grafen kompozitlerinin özellikleri, katkı maddesi olarak seçilen grafen türevinin üretim yöntemine, konsantrasyonuna, biçimine ve mikro yapısına büyük ölçüde bağlıdır. Her yöntemin, kompozit malzemenin hedef uygulamasına bağlı olarak kendi ve sınırlamaları mevcuttur (Konakov vd. 2018).

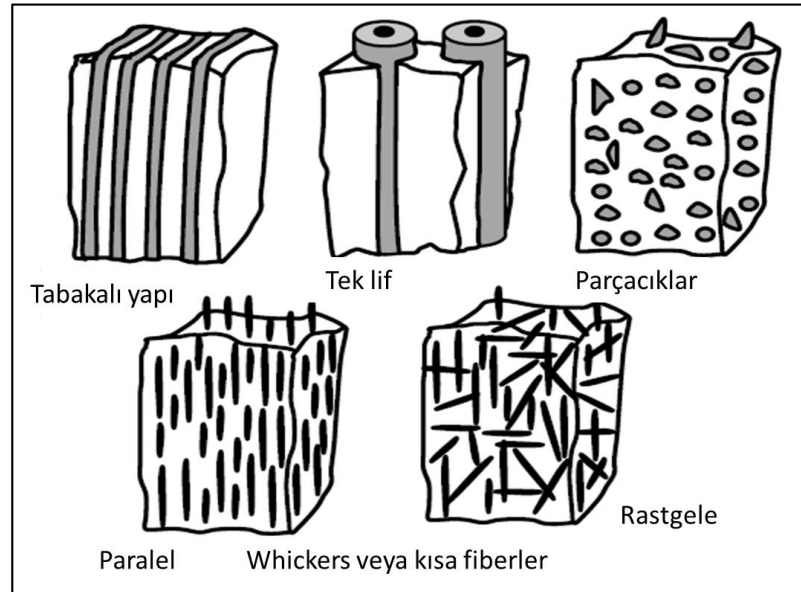
TM tekniği, metal matrisli kompozitlerin üretimi ve bakır esaslı kompozitler için oldukça basit bir yol sağlayan yaygın bir yaklaşımdır (Li vd. 2015a). Gezegene değirmeninde öğütme veya yüksek enerjili öğütme TM tekniğinin en verimli varyasyonu olarak kabul edilebilir. Bir karışımdaki grafen katkı maddesinin homojenliğine bilyalı öğütme durumunda öğütme süresi, öğütme hızı (rpm) ve ters çevrilen döngü sayısı gibi işlem koşullarının optimizasyonu ile ulaşılır (Konakov vd. 2018). Bununla birlikte kompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine ilişkin mevcut veriler oldukça değişkendir (Wang vd. 2016). Cu tozuna grafen katkı miktarları önemli ölçüde değişir (ağırlıkça %0,25 ila %10) ve bu miktar malzemenin hedef özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır (Varol ve Çanakçı, 2015; Dutkiewicz vd. 2015; Li vd. 2015a; Wang vd. 2016). Örnek olarak bakır matrise ağırlıkça %1-3 oranında grafen ilave edildiğinde bakır matrisin ortalama tane boyutunda belirgin bir azalma ile birlikte oda sıcaklığında 1,44 kat ve 600° C'de 2,2 kat sertlik artışı görülebilir (Wang vd. 2016).

Bu çalışmanın amacı, grafen nano levhacıklar ile güçlendirilmiş bakır matrisli kompozitlerin TM yöntemiyle üretilmesi ve üretim parametrelerinin mekanik, mikro yapı ve elektriksel özellikler üzerine etkisinin araştırılmasıdır. Bunun için grafen içeriklerinin, uygulanan sıkıştırma kuvveti ve sinterleme sıcaklıklarının etkileri detaylıca belirlenmiştir.

## 2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozitler, mikro veya nano boyutta lifli veya parçacıklı (metalik veya metalik olmayan) fazlarla takviye edilmiş bir metal matris fazından oluşur. Matris saf metal veya bir alaşım olabilir. Metal matrisli kompozitler, yüksek sıcaklık uygulamaları, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde uygulama potansiyeli bulunan ilgi çekici yeni malzemelerdir (Huda vd. 1995). Yüksek sönümlenme kapasitesi, aşınma direnci, düşük termal genleşme ve yüksek sıcaklık yetenekleri gibi özelliklere sahiptir.

TM yöntemi ile mikro veya nano parçacıklar ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler yapılarında meydana gelen plastik deformasyon ile güçlendirilir. Şekil 2.1’de dört ana metal matrisli kompozit alt grubu (parçacık takviyeli, süreksiz fiber takviyeli, sürekli fiber takviyeli, lamine veya katman takviyeli) gösterilmektedir (Clyne, 2000). Bu metal matrisli kompozitlerin temel özellikleri yüksek mukavemet ve elastikiyetleri, yüksek kırılma tokluğu ve darbe dayanımları, yüksek termal iletkenlikleri, mükemmel aşınma dirençleri ve yüksek elektrik iletkenliği ve öz direnç içermeleidir (Terry ve Jones, 1990; Clyne, 2000; Miracle, 2005; Nishida, 2013).



Şekil 2.1 Metal matrisli kompozit çeşitleri

## 2.2 Matris Seçimi

Matris, kompozitlerin baskın ve en yüksek hacim fraksiyonuna sahip olan fazıdır. Bunun nedeni takviye fazının eşit olarak dağıldığı temel bölgedir. Genellikle daha yüksek gerilme mukavemeti, daha yüksek kesme modülü, daha düşük termal genişleme, daha yüksek süneklik, daha yüksek tokluk ve kararlı boyutlara sahip yumuşak bir metaldir. Metal matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan matrisler arasında Al, Cu, Ni, Mg, Zn, Pb ve Ti bulunur. Bunların arasında Al ve Cu hafif, yüksek ısı iletkenliği, daha düşük erime noktası, uygun maliyetli üretim, korozyon direnci ve makul mekanik özellikler içeren benzersiz özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır ve araştırılır (AL-Mosawi, 2017).

## 2.3 Takviye Seçimi

Takviye malzemeleri kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini geliştirir. Başka bir ifade ile modülü, mukavemeti, aşınma direncini, sıcaklık direncini, sertliği, basma mukavemetini, termal kararlılığı ve sertliği artırır. Takviye fazı farklı boyutlarda, şekillerde ve hacim fraksiyonlarında elyaf veya parçacık şeklinde olabilir. Elyaflar sürekli veya süreksiz olabilir (kısa elyaf, whiskers, öğütülmüş elyaf) ve parçacıklar mikro veya nano boyutlarda kullanılabilir. Kompozitlerin daha önce bahsedilen özellikleri matris fazı içerisinde ara yüzey bağlama ve dispersiyonun fizibilitesi ile ilgilidir. Kısa elyaf ve parçacıklar ucuz imalat teknikleri ile üretilebilir ve izotropik özellikler sağlanabilir (AL-Mosawi, 2017).

## 2.4 Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler

Parçacıklar ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitler (Al, Cu ve alaşımları başta olmak üzere) çok çeşitli endüstriyel potansiyele sahip olmalarından dolayı araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir. Al ve Cu matrisler için takviye parçacıkları olarak, en yaygınları  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$ , TiC, SiC, BN, CuO, WC,  $TiB_2$ ,  $ZrO_2$ , grafit ve grafendir. Bu malzemelerin özellikleri ve işlenmesi, hacim fraksiyonları, parçacık boyutları ve morfolojileri, ıslanabilirlikleri, kimyasal reaksiyon ve güçlendirme mekanizmaları araştırılmaktadır. Parçacıklar, her iki fazın fiziksel ve kimyasal olarak ayırt edilebileceği şekilde matris fazında eşit olarak dağıtılır. Ayrıca

bu parçacıklar matris fazına ilave edilebilir veya metal matris ile metal oksit reaksiyonu arasındaki kimyasal bir ikame reaksiyonu ile yerinde oluşturulabilir. Parçacık takviyesinin temel amacı daha düşük bir imalat maliyeti ile sertliği, tokluğu, mukavemeti ve modülü geliştirmektir. Bu takviyeler, yüksek bir sıcaklıkta çözünmeden veya irileşmeden matrisi güçlendirir. Güçlendirme mekanizmaları, takviye parçacıklarının boyutuna, şekline ve hacimsel fraksiyonlarına bağlıdır (Clyne, 2000; Chawla, 2012).

## **2.5 Kısa Elyaf Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler**

Bir otomobil motorundaki alüminyum kompozit pistonlar için kısa elyaf takviyeli metal matrisli kompozitler son derece ilgi çekicidir. Bu takviyeler, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu kısa elyaflar genellikle 10 µm'den daha küçük bir çapa sahiptir ve birkaç yüz mikron uzunluğundadır. TM ve ergiyik yöntemler ile üretilebilen kompozitlerden dolayı kısa elyaflar, özelliklerin gelişimi ve üretilebilirliğin kombinasyonunu sunmaktadır. Kısa elyafların mukavemet ve güçlendirme etkisi elyafların uzunluğu, çapı, oryantasyonu ve hacim fraksiyonuna göre analiz edilebilir (Clyne, 2000).

### **3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

Son zamanlarda Al ve Cu esaslı kompozitlerin üretimi için çeşitli imalat teknikleri geliştirilmiştir. Temel olarak bu teknikler sıvı hal ve katı hal yöntemler olarak kategorize edilebilir. Ürünlerin gelişimi için birden fazla yöntem denenmiştir. İlk odaklanılan nokta özelliklerin değiştirilebildiği ticari, uygun maliyetli ve verimli bir üretim yöntemi sağlamaktır.

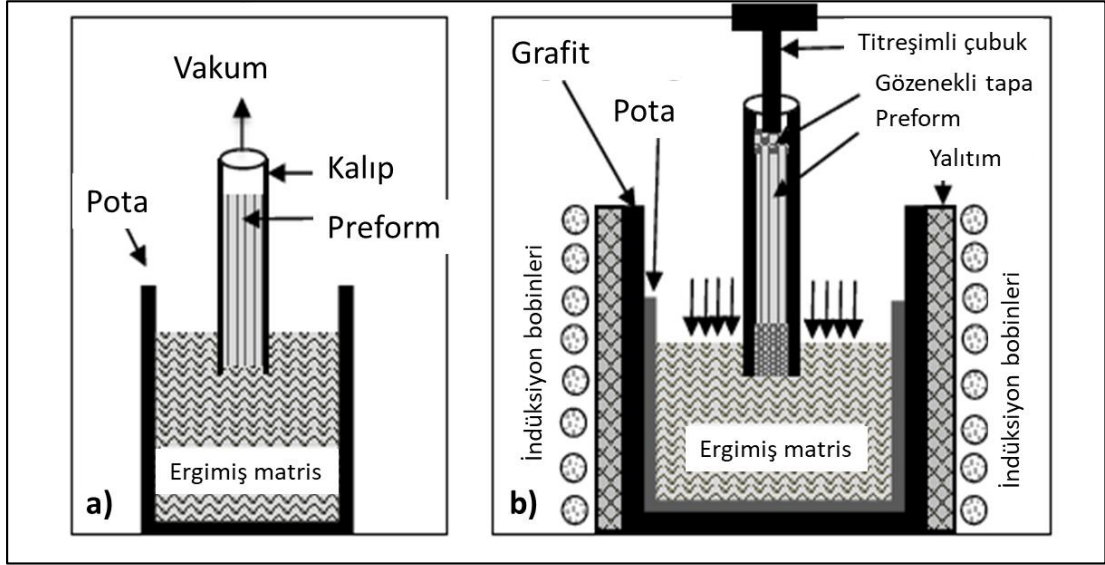
Sıvı hal üretim yöntemlerine infiltrasyon, yarı-katı ergiyik üretim yöntemi, yerinde üretim (in-situ), katılaşma ve dahili oksidasyon örnek olarak verilebilir. Katı hal üretim yöntemlerine ise toz metalurjisi, mekanik alaşımlama, ekstrüzyon, haddeleme, dövme, sıcak pres (HP), sıcak izostatik pres (HIP) ve soğuk izostatik pres (CIP) gibi işlemler örnek olarak verilebilir. Bu yöntemlerin, nihai ürünün talepleri ve özellikleri ile sınırlı avantajları ve dezavantajları mevcuttur (Surappa, 2003; Seal vd. 2004; Koli vd. 2013, 2014).

#### **3.1 Sıvı Hal Üretim Yöntemi**

##### **3.1.1 İnfiltrasyon**

Bu yöntemle metal matrisli kompozit üretimi için farklı basınçlarda ergiyik hale getirilen matris fazı takviye fazı içeren gözenekli bir preforma infiltre edilir. Vakum ve basınç uygulaması takviye tipinin ve hacim fraksiyonunun bir fonksiyonudur. %70'e kadar hacim fraksiyonu ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitleri üretmek mümkündür. Nihai ürün bir miktar gözenekliliğe ve takviye topaklanmalarına sahip bölgeler içerirse de bu teknik hala Al bazlı kompozitleri üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de metal matrisli kompozitleri üretmek için kullanılan infiltrasyon yöntemlerinin temel prensiplerinin şematik bir görünümünü gösterilmektedir (Surappa, 2003). Ancak bu basınç infiltrasyon yöntemleri farklı konfigürasyonlara sahiptir. İnfiltrasyon işleminin temel hedefleri arasında matris ile takviye elemanı ara yüzeyinde kimyasal etkileşimin az olması, geliştirilmiş mikro-yapılar ve minimum mikro-yapısal kusurların varlığıdır. Bu yöntem ile çeşitli takviye

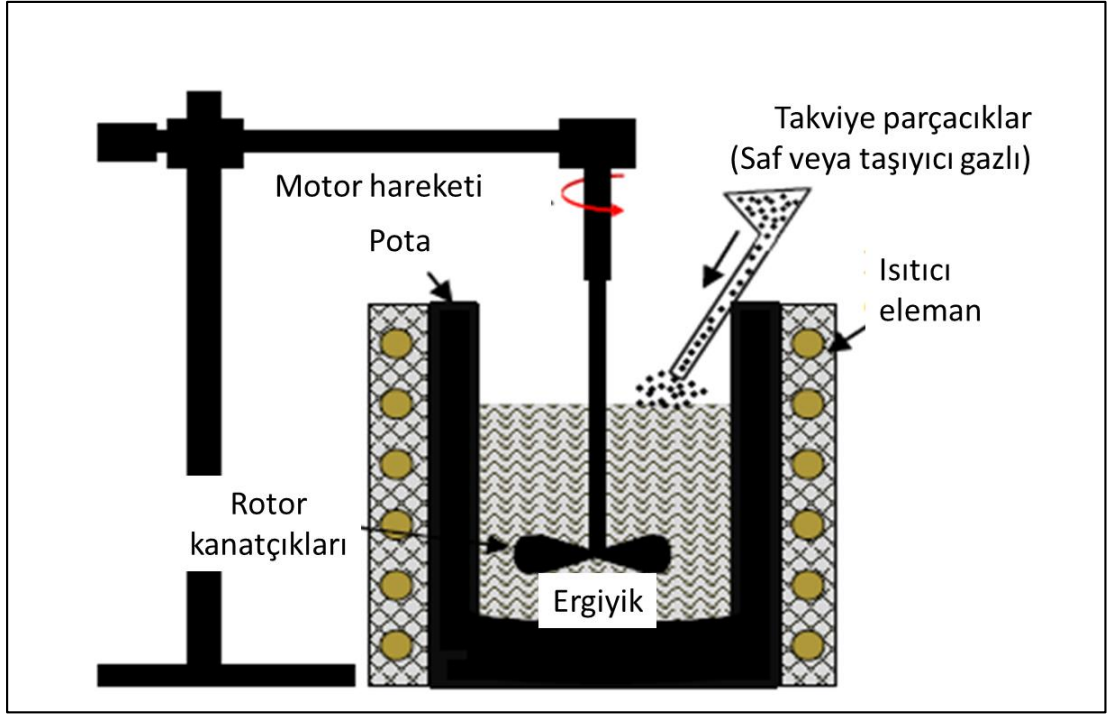
elamanları kullanılarak muhtemel net şekle yakın ürünler elde edilebilir (Asthana, 1998; Chawla, 2012).



Şekil 3.1 İnfiltasyon yöntemlerinin temel prensiplerinin şematik görünümü (a) vakum infiltasyonu ve (b) basınç infiltasyonu

### 3.1.2 Karıştırmalı Döküm

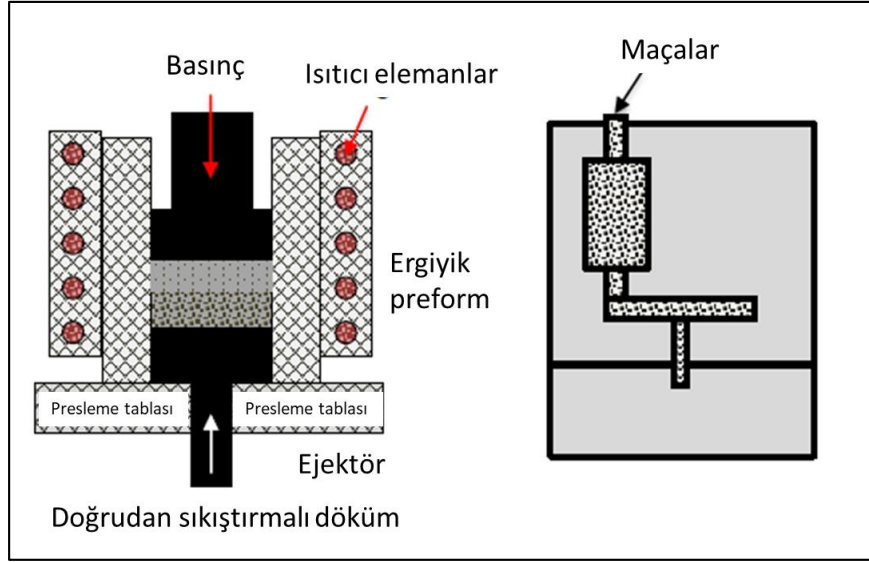
Karıştırmalı döküm, parçacık ve elyaf takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretimi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde vorteks veya bulamaç döküm de denilmektedir. Şekil 3.2’de basitleştirilmiş bir karıştırma döküm tekniğinin şematik bir resmini göstermektedir (Shirvanimoghaddam vd. 2017). Bazı karıştırma dökümlerde daha üstün sonuçlar elde etmek için ultrasonik karıştırma teknikleri kullanılmaktadır. Takviye malzemeleri, erimiş metale hemen hemen aynı sıcaklıkta ilave edilir ve daha sonra parçacıkların veya liflerin yığılmasını önlemek için tamamen karıştırılır. Karıştırma kolu daha sonra çıkarılır ve karışımın potada oda sıcaklığına katılması sağlanır veya belirli boyutlarda başka bir kalıba dökümü sağlanır. Ergiyik metale takviye elemanlarının eklenmesi ile ergiyik viskozitesi artabilmektedir. Bu viskozite artışı takviye elemanın hacimsel fraksiyonunun bir sonucudur ve karıştırma zorluklarına neden olabilmektedir. Bu yöntemde takviye elemanlarının ayrıştırılmaması nedeniyle nihai üründe homojen olmayan bir mikro yapı elde edilebilir (Ezatzpour vd. 2014; Kala vd. 2014; Shirvanimoghaddam vd. 2017).



Şekil 3.2 Karıştırmalı döküm tekniğinin şematik resmi

### 3.1.3 Basınçlı Döküm

Basınçlı döküm sıvı metalin bir ekstrüzyon kalıbına yerleştirildiği ve hızlı katılma sonrası net şekilli ürünler elde etmek için yüksek basınçta sıkıştırıldığı bir metal şekillendirme işlemidir. İmalatta doğrudan veya dolaylı basınçlı döküm işlemleri kullanılır. Şekil 3.3'te basınçlı döküm işleminin şematik bir resmi gösterilmektedir (Chawla, 2012). Doğrudan basınçlı dökümde, ön kalıbı doldurmak için infiltrasyon basıncı doğrudan ergiyiğe uygulanır. Buna karşın dolaylı yöntemde ergiyik öncelikle bir piston yardımı ile kalıba yüklenir ve basınç, bir kızak sistemi vasıtasıyla ergiyiğe iletilir (Chawla, 2012; Shirvanimoghaddam vd. 2017).



Şekil 3.3 Basınçlı döküm işleminin şematik görünümü

## 3.2 Katı Hal Üretim Yöntemi

### 3.2.1 Toz Metalurjisi

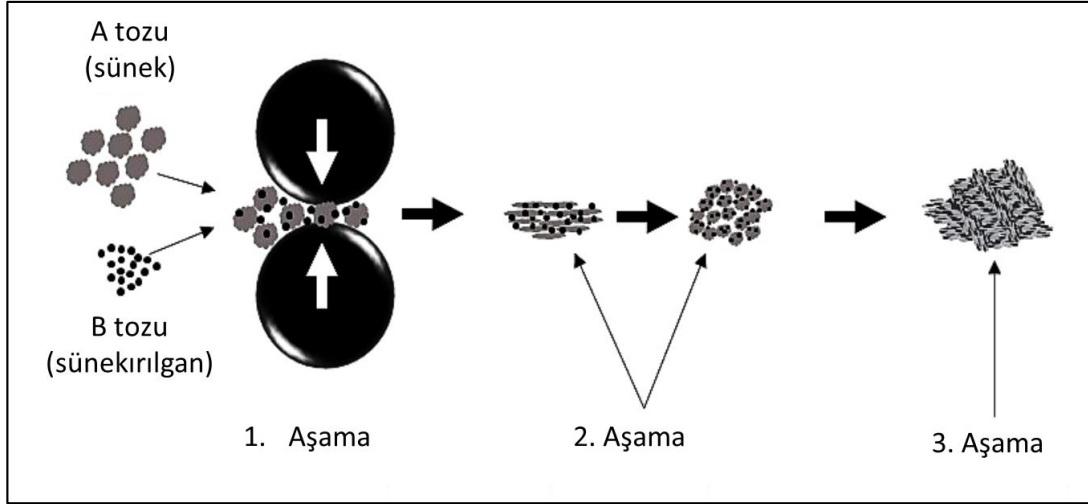
Toz metalurjisi elemental tozlar (saf metal veya alaşım) ile takviye elemanı tozların (parçacıklar veya lifler) karıştırılması, soğuk preslenmesi ve sinterlenmesi işlemlerinden oluşur. TM işlemleri genellikle düşük bir sıcaklıkta ve matris - takviye elemanı arasında minimum etkileşim ile gerçekleştirilir. Üstün bir mikroyapıya ve mekanik özelliklere sahip kompozitler takviye elemanının matris fazı içerisinde düzgün bir şekilde dağıtılmasıyla elde edilebilir. Buna karşın kısa liflerin veya whiskerslerin kullanılması durumunda mikro yapının dağılımının geliştirilmesi için ince parçacıklara ihtiyaç duyulabilir. TM yöntemleri, karıştırma, öğütme, soğuk izostatik presleme, sıcak izostatik presleme ve sinterleme gibi işlemleri içermektedir (Torralba vd. 2003).

#### 3.2.1.1 Karıştırma ve Öğütme

Karıştırma veya öğütme, tozların bir karıştırıcı veya öğütücü ile karıştırılması işlemidir. Yuvarlanma, çalkalama, gezegensel hareket, ultrason ve titreşim hareketi gibi belirli cihazın tasarımına ve verimliliğine dayanan farklı mekanik karıştırma stilleri ve sistemleri vardır. Ancak karıştırma toz parçacıklarının özelliklerinde

herhangi bir değişiklik olmadan yalnızca karıştırılmasıdır. Mekanik öğütme (MÖ), mikro ve nano boyutlu kristalimsi ve amorf tozların üretebildiği ve malzemelerin sentezlendiği ilgi çekici bir katı hal yöntemidir (Nishida, 2013). Öğütme mikro yapıda önemli bir değişiklik olmadan öğütmeyi, parçacık boyutunu küçültmeyi ve morfolojideki değişiklikleri içerir. Öğütmenin aksine, gelişmiş yüksek enerjili öğütme mekanik alaşımlama (MA) işlemi intermetalik fazların veya yeni malzemelerin üretimi için toz parçacıklarının alaşımlanmasını ve reaksiyonunu içerir. Halbuki bu işlem atomik seviyede bileşenlerin karışımına, parçacık inceltmesine ve plastik deformasyona neden olur. Öğütme, toz tipine ve öğütme ortamına göre ıslak veya kuru olarak gerçekleştirilebilir. MÖ ve MA mekanizması, metalik ve metalik olmayan toz parçacıklarının bilyalı öğütme yoluyla sık sık soğuk birleştirme, kırılma ve yeniden birleştirilmesini içerir. Öğütme ayrıca ikincil bir faz olarak oksitin dağılımını, nano taneli ve kristalin bir fazın üretimini, amorf fazların gelişmesini ve ayrıca belirlenmiş intermetaliklerin dağılımını sağlar (Murty ve Ranganathan, 1998; Suryanarayana vd., 2001; Gnjidic vd., 2003; Suryanarayana, 2011; Rezvani ve Shokuhfar, 2012).

İki çarpışan bilye arasında miligram ölçeğinde toz tutulur ve öğütme ortamının (bilya) kinetik enerjisi bu toz parçacıklarına aktarılır. Böylece toz parçacıkları daha ince boyutlara bölünür. Buradaki kinetik enerji, bilyelerin kütesinin ve hızının bir fonksiyonudur. Şekil 3.4'te bilye-toz-bilye çarpışma mekanizması ve nano ölçekte mikrokristallerin oluşumu şematik olarak gösterilmektedir (AL-Mosawi, 2017). Öğütme veya MA esnasında sünek metal parçacıkları düzleştirilir, dövülerek sertleştirilir, soğuk kaynak yapılır ve ağır şekilde deforme ile kırılır. Bununla birlikte işlem sürecinde ana malzeme ağırlık fraksiyonlarına sahip katmanlı bir mikroyapı ile homojen bir karışım elde edilir. Sürekli dövme daha fazla kaynak, partikül deformasyonu ve lamel boşluklarındaki azalma nedeniyle mikro yapıyı iyileştirir.



Şekil 3.4 Biye-toz-bilye çarpışma mekanizması ve nano ölçekte mikrokristallerin oluşumunun şematik gösterimi

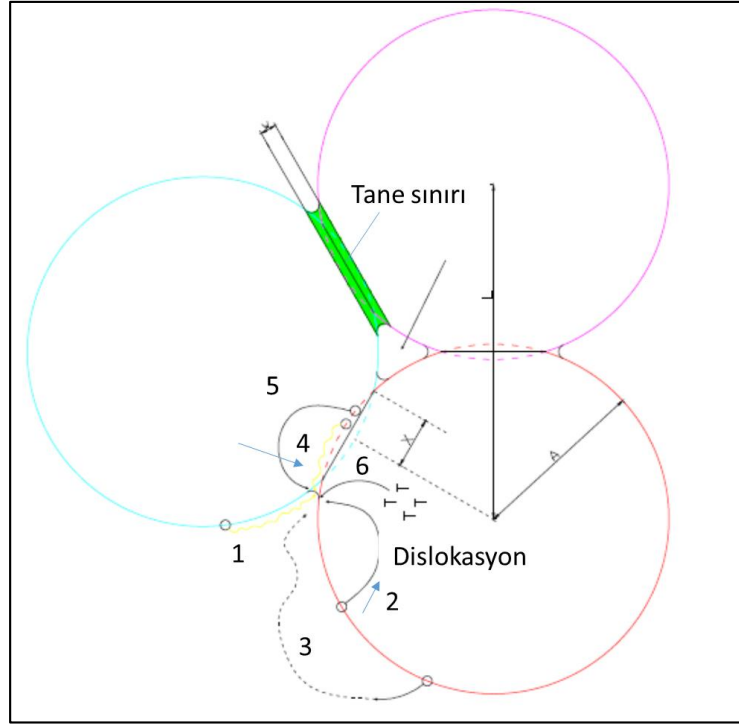
1. Aşama: A ve B tozu önceden karıştırılır. 2. aşama (geçici aşama): A tozu tabakalı bir şekilde dönüştürülür ve B tozunun boyutu küçültülür. 3. aşama: B tozu A'ya homojen olarak dağıtılır veya B tozu mikro ya da nano yapılar içinde A'ya eşit olarak dağılır (Torralba vd. 2003). Uzun öğütme süreleri sertlik arttığından aglomerasyonu azaltır. Bununla birlikte temaslı parçacıklar arasındaki difüzyon reaksiyonunu da aktive eder. Sünek kırılğan sistemlerin öğütülmesi sırasında, sünek parçacıklar bilyeler çarpıştıkça düzleştirilir ve kırılğan parçacıklar sünek parçacıklar tarafından kaplanarak öğütülür. Daha fazla öğütme gevrek fazın homojen olarak dağıldığı sünek parçacıkların incelmesine ve düzleşmesine yol açar. Bununla birlikte metal matris boyunca homojen bir dağılıma meydana gelir ve çözünür tozlarla bir alaşım elde edilir (Suryanarayana vd. 2001; El-Eskandarany, 2013).

### 3.2.1.2 Soğuk Presleme ve Sinterleme

Harmanlanmış veya karıştırılmış tozlar gerekli boyutlara sahip ham bir parça haline getirmek için preslenir. Bu işlemde güçlü ve yoğun kompaktlar oluşturmak için nispeten yüksek basınçlara ihtiyaç duyulur. Toz karışımı, preslemeyi kolaylaştırmak için uygun bir yağlayıcı veya bağlayıcı madde (organik malzeme) ile karıştırılabilir. Bağlayıcı malzeme sinterleme ve ısıl işlem sırasında kaybolur, böylece geriye kalan tek şey minimum düzeyde tutulan karbon izleridir. Uygun izostatik basıncın uygulanması homojen yoğunluk dağılımına sahip kompaktların üretimini sağlar.

Ham yoğunluğa sahip numuneler bağlayıcıyı yakmak ve tam yoğunluk sağlamak için yüksek bir sıcaklıkta sinterlenirler. Sinterleme sırasında numuneler çatlamaya ve hidrostatik gerilimlere neden olabilecek büzölmelere maruz kalabilirler. Bu kusurlar ayrıca matris ve takviye malzemelerinin termal genişleme katsayılarındaki farklılıklardan da kaynaklanabilir (Castro ve Van Benthem, 2012).

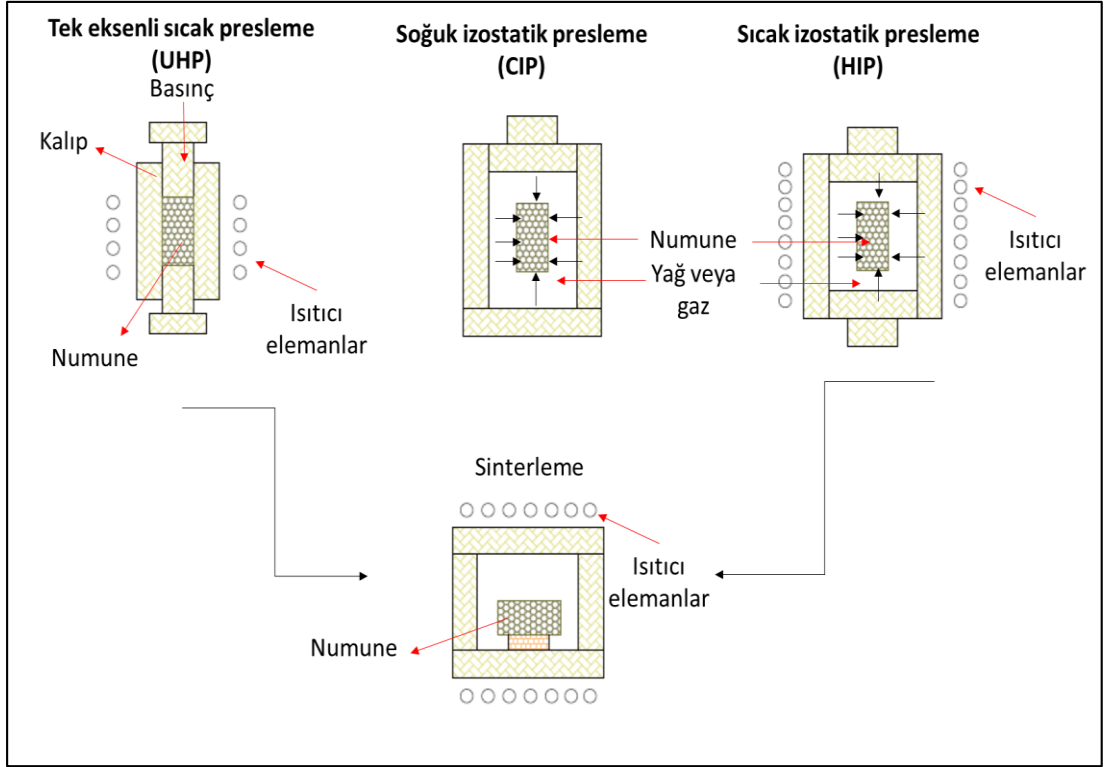
Toz parçacıklarının ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta monolitik bir kompakt haline dönüştürüldüğü sinterleme işleminde parçacıklar difüzyon mekanizmaları, kütle aktarımı ve termal aktivasyon işlemleri ile birbirine bağlanır. Yüksek sıcaklık sinterlemeyi hızlandırır ve bağların oluşma süresini kısaltır. Termodinamik teori, sinterlemenin arkasındaki itici gücün, parçacık aglomeratının ( $\Delta G_{\text{yüzey}} < 0$ ) serbest yüzey enerjisinin en aza indirilmesi olduğunu belirtmektedir. Sinterlemede dört aşama mevcuttur. Bunlar; ön parçacık bağlanması, parçacıklar arasında boyun oluşumu, gözeneklerin boyutunda azalma ve daha fazla tane büyümesi ve son olarak boyun bölgesinde parçacıklar arasında gelişen tane sınırları. Şekil 3.5'te geleneksel sinterleme sırasında ortaya çıkan dört aşama gösterilmektedir. Sıvı bir fazı olmayan üç taneli bir düzeneğe bakıldığında olası sinterleme mekanizmaları, (i) hacim difüzyonu veya boşluk hareketi, (ii) tane sınırının difüzyonu, (iii) yüzey difüzyonu, (iv) yüzey gerilimi ve iç gerilmelerden kaynaklanan viskoz veya plastik akış ve (v) yüzeyler üzerindeki atomların buharlaşması ve yoğunlaşması (Castro ve Van Benthem, 2012).



Şekil 3.5 Üç parçacık çeşidindeki sinterleme mekanizmaları

### 3.2.1.3 Sıcak Presleme

Metal matrisli kompozitler nispeten yüksek basınç ve sıcaklık kullanılarak üretilirler. Nihai ürünün neredeyse tam yoğunlukta, gözeneksiz, ince taneli bir mikro yapıya ve net şekle yakın olması istenir. Uygulanan basınç tek eksenli sıcak presleme (HP tekniği), sıcak izostatik basınç (HIP tekniği) ve soğuk izostatik basınç (CIP tekniği) olabilir. Bu yöntemlerle üretilen kompozitler kaliteli ve gelişmiş özelliklere sahiptirler. Ancak ön karıştırma esnasında matris veya takviye elemanınca zengin olan homojen olmayan bölgeler meydana gelebilir. Şekil 3.6'da TM'de kullanılan bu tekniklerin şematik bir görünümü verilmiştir (Asthana, 1998; Chawla, 2012). HP ve CIP tekniklerini genellikle daha ince bir mikro yapı ve daha iyi mekanik özellikler elde etmek için sinterleme takip etmektedir (Torralba vd. 2003; Chawla, 2012).



Şekil 3.6 Sıcak presleme (HP), soğuk izostatik presleme (CIP), sıcak izostatik presleme (HIP) ve sinterlemenin şematik bir diyagramı

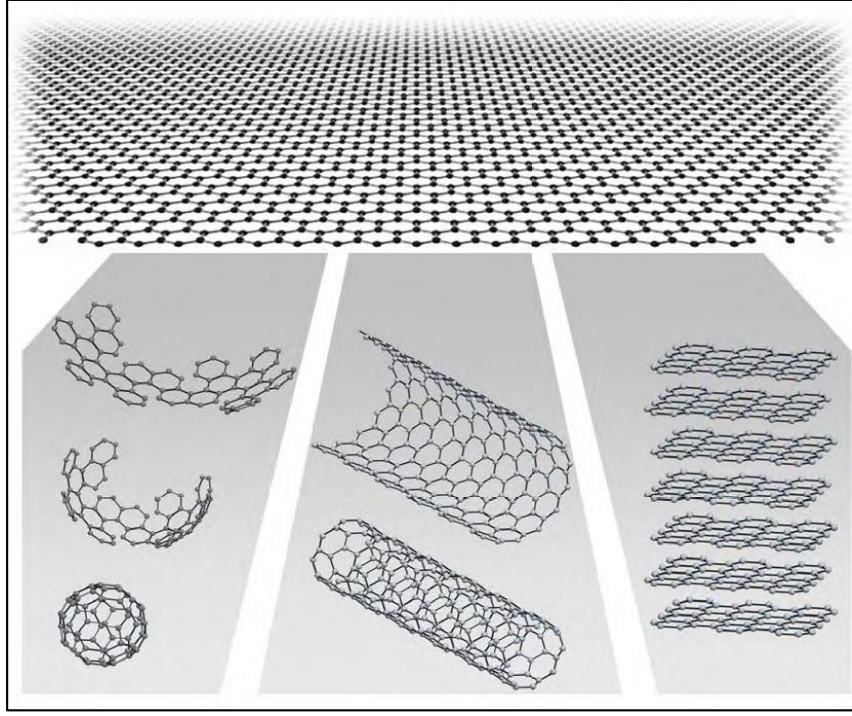
## 4. GRAFEN KATKILI METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

### 4.1 Grafen

Son onbeş yılda grafenle ilgili yayınlarda çarpıcı bir artış görülmektedir. CNT'nin yerini almak için iyi bir aday olmasını sağlayan dikkate değer mekaniksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle grafen ile ilgili araştırmalara çok fazla çaba harcanmaktadır. Elektronik gibi birçok endüstride devrim yaratma potansiyeli olduğuna inanılmaktadır. Biyo bilim ve tıp bilimi gibi birçok ilgili alanın grafen araştırmalarından faydalanması beklenmektedir (Liu, 2014).

#### 4.1.1 Grafenin Yapısı

Grafen, iki boyutlu (2D) petek örgüsüne sıkıca paketlenmiş düz bir karbon atomu katmanıdır ve diğer bütün boyutlardaki grafitik malzemeler için temel bir yapı taşıdır. Grafen, karbonun birkaç tek katmanlı allotroplarından biridir. Diğer karbon allotropları arasında Şekil 4.1'de gösterildiği gibi 0D fullerenler, 1D karbon nanotüpleri ve 3D grafit bulunur (Geim ve Novoselov, 2010). Grafen içindeki karbon-karbon bağ uzunluğu yaklaşık 0,142 nm'dir. Grafen farklı yapısal kusurlar içeren işlevselleştirilmiş ve istiflenmiş birçok farklı şekilde ortaya çıkabilir. Her grafen tipinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve belirli uygulamalar için kullanılabilir. Tek katmanlı grafen ile karşılaştırıldığında grafenin istiflenmesi ile oluşturulan çok katmanlı grafenler yaklaşık 100 nm'ye kadar bir kalınlığa ve 0,335 nm arası düzlemler arası aralığa sahiptir (Liu, 2014).

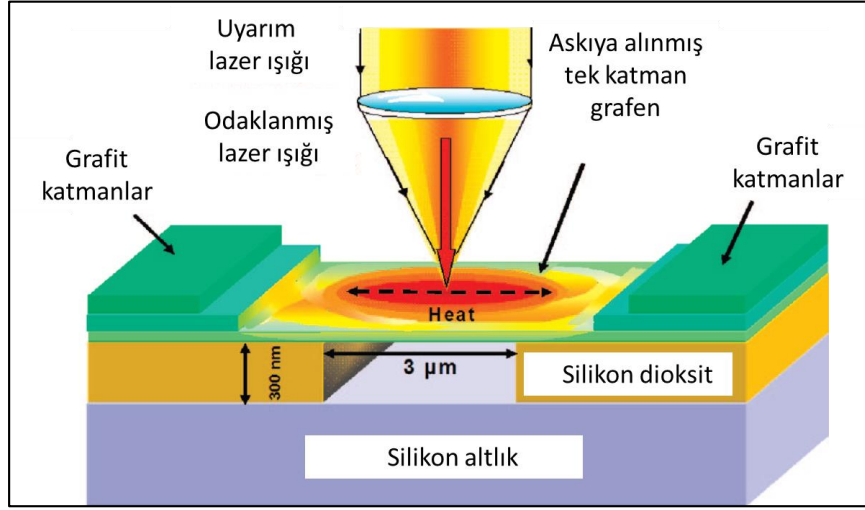


Şekil 4.1 Tüm grafitik formların temeli. Grafen 0D bucky-kürelere sarılabilir, 1D nanotüplere kaplanabilir veya 3D grafitte istiflenebilir

#### 4.1.2 Termal Özellikler

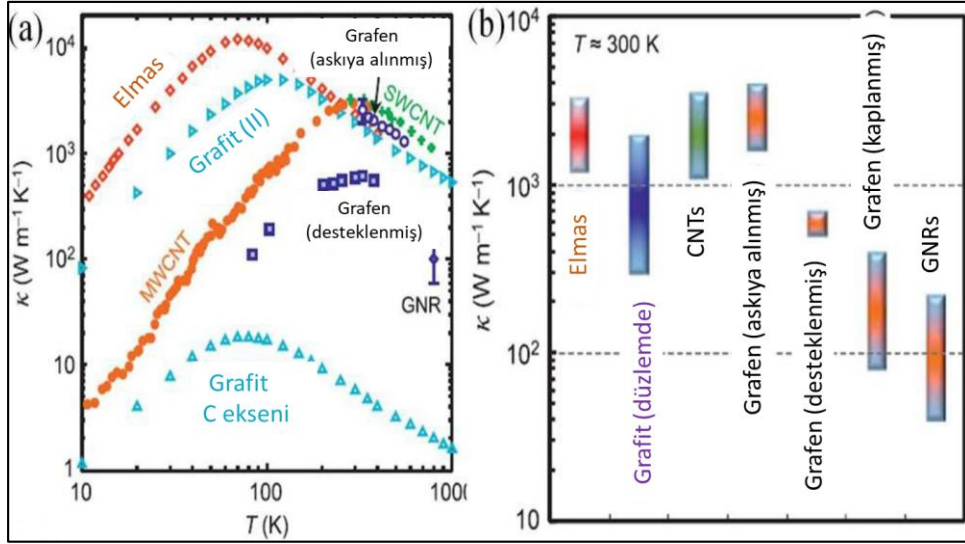
Karbon ve CNT, grafit ve elmas gibi allotropları çok iyi termal iletkenliklere sahiptir ve çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Grafenin ortaya çıkışı, karbon ailesini zenginleştirir ve termal iletkenliğin yüksek değerlendirildiği alanlarda iyi bir alternatif sunar (Liu, 2014). Berber vd. (2000) sıcaklığa bağlı olarak karbon nanotüplerin ısı iletkenliğini ( $\lambda$ ) belirlemek için denge ve denge dışı moleküler dinamik simülasyonların sonuçlarını doğru karbon potansiyelleriyle birleştirmiştir. Araştırmacılar oda sıcaklığında izole edilmiş bir nanotüp için olağandışı yüksek bir  $\lambda \approx 6,600 \text{ W / m} \cdot \text{K}$  değeri elde etmişlerdir. Bu değer izole bir grafen tek tabakasının veya grafitin termal iletkenliği ile karşılaştırılabilir seviyede olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca elde edilen bu yüksek  $\lambda$  değerlerinin, bu sistemlerdeki geniş fonon ortalama serbest yolları ile ilişkili olduğu kanaatine varmışlardır. Grafendeki ana ısı taşıyıcılar olan fononlar grafen gibi iki boyutlu (2D) kristallerde üç boyutlu (3D) grafitten önemli ölçüde farklı olduğu gösterilmiştir. Chen vd. (2012) grafenin termal özellikleri üzerindeki izotop etkilerine ilişkin deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada optotermal raman tekniği ile belirlenen izotopik olarak saf C (%0,01 C) grafenin termal iletkenliği,  $T_m \sim 320 \text{ K}$  ölçüm sıcaklığında

4 000 W/mK 'den daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Balandin vd. (2000) tek katmanlı grafenin ısıl iletkenliğinin ilk deneysel çalışmasını bildirmişlerdir. Temassız optik tabanlı bir teknik kullanarak yapılan ölçümde (Şekil 4.2) grafenin  $(5,30 \pm 0,48) \times 10^3$  W / mK'ye kadar olağanüstü yüksek bir termal iletkenlik sergilediği keşfedilmiştir (Balandin vd. 2000).

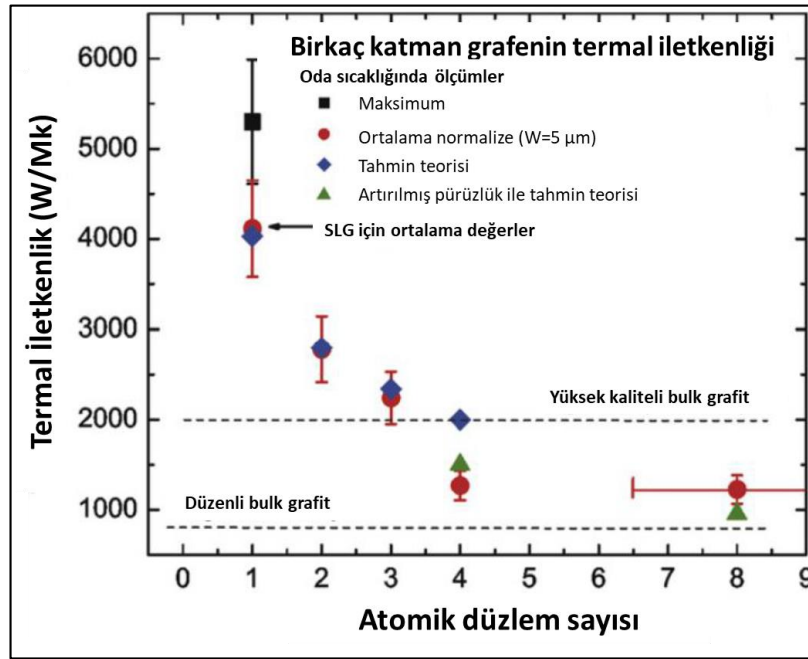


Şekil 4.2 Tek katmanlı grafene odaklanan lazer ışığını gösteren bir deney şeması

Şekil 4.3 sıcaklığın bir fonksiyonu olarak farklı malzemelerin termal iletkenliğini göstermektedir (Pop vd. 2013). Grafenin, grafen nano-şeritlerden (GNR) daha yüksek ve elmas, grafit veya CNT'nin iletkenlikleriyle karşılaştırılabilen çok iyi bir termal iletkenlik sunduğu görülebilir (Şekil 4.3a). Özellikle, askıya alınmış grafen, oda sıcaklığında tüm iletken malzemeler arasında en yüksek termal iletkenliği gösterir (Şekil 4.3b). Grafitte çapraz düzlem yönünden ısı transferi, van der Waals kuvvetinden ciddi şekilde etkilenmiştir (Pop vd. 2013). Ayrıca fonon termal iletkenliği sistem boyutsallığı 2D'den 3D'ye değiştiğinde ilginç bir değişim sergilemektedir. Bu değişim artan kalınlık (H) – atomik düzlem sayısı (n) ile asılı birkaç katmanlı grafen (FLG) yardımı ile değerlendirilebilir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi grafen tabakalarının termal iletkenliği atomik düzlem sayısının artmasıyla azalmıştır (Nika ve Balandin, 2012).



Şekil 4.3 Karbon malzemelerin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değışimi

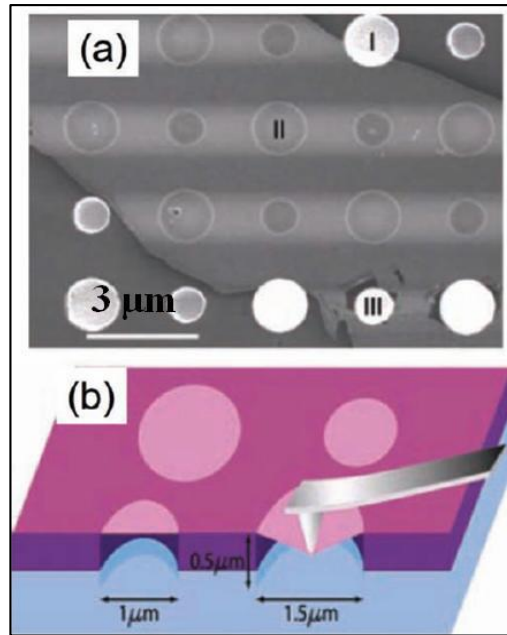


Şekil 4.4 Atomik düzlem sayısının bir fonksiyonu olarak grafen tabakasının termal iletkenlikleri

### 4.1.3 Mekanik Özellikler

Grafen üretildiğinde dikkate değer esnekliği ile bilim camiasını etkilemiştir. Araştırmacılar daha sonra mekanik özelliklerini araştırmakla ilgilenmeye başladılar ve CNT kadar güçlü olabileceğini düşünmüşlerdir. Tek tabakalı grafenin mekanik özellikleri üzerine ilk çalışmalar sayısal simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Van Lier vd. (2000) grafenin mekanik davranışını simüle ederek grafenin elastik modülünün

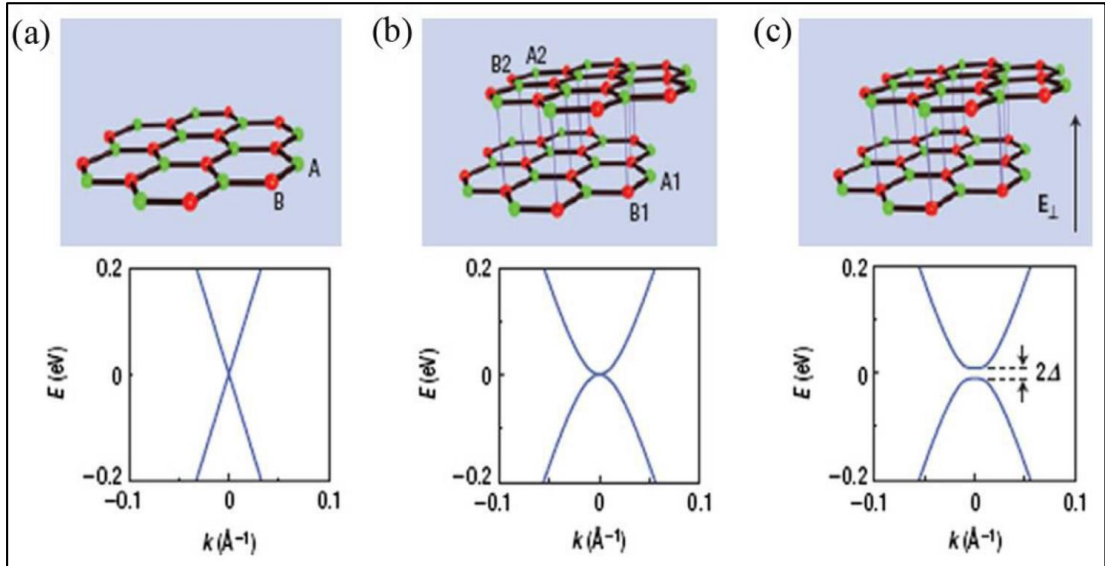
yaklaşık 1,11 GPa olabileceği sonucuna varmıştır. Diğer taraftan Reddy vd. (2006) grafenlerin elastik modülünü 0,669 TPa olarak tahmin etmişlerdir. Son yıllarda araştırmacılar gerçek elastik modülü ortaya çıkarmak için deneysel yöntemler geliştirmişlerdir. Bu deneyler öncelikle atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanımına dayanmaktadır. Örneğin, bir grafen şeridindeki kuvvet-deplesmanı ölçmek ve birkaç grafen tabakasının elastik modülünü belirlemek için Frank vd. (2007) tarafından AFM kullanılmıştır. Birkaç katmanlı grafenin dairesel membranlarının karakterizasyonu AFM ile kuvvet hacim ölçümü yoluyla da yapılmıştır (Poot ve van der Zant, 2008). Tek tabakalı grafenin elastik özellikleri ve kopma mukavemeti Şekil.4.5'te gösterildiği gibi AFM kullanılarak nano-indentasyon ile belirlenmiştir. Elde edilen elastik modülünün ve kırılma mukavemetinin sırasıyla 1 TPa ve 130 GPa olduğu bildirilmiştir (Lee vd. 2008). Kimyasal yöntemle üretilen grafen tabakalarının elastik özellikleri de incelenmiştir (Gómez-Navarro, 2008). Tek tabakalı grafenin elastik modülü, bir AFM'nin ucuyla indüklenen deformasyon deneyleri ile belirlenmiş ve grafenin elastik modülü 0,25 TPa olarak rapor edilmiştir. İnceleme ayrıca 2-8 nm kalınlığında çok katmanlı grafen üzerinde yapılmış ve elastik modülünün yaklaşık 0,5 TPa olduğu bulunmuştur (Frank vd. 2007).



Şekil 4.5 Dairesel deliklere sahip grafenin SEM görüntüsü (a) ve AFM kullanılarak grafen üzerinde nanoindentasyonun şematik bir gösterimi (b)

#### 4.1.4 Elektriksel Özellikler

Üç boyutlu iletken malzemelerle karşılaştırıldığında grafen benzersiz elektriksel özelliklere sahiptir. Grafenin elektronik yapısını anlamak için grafitin bant yapısı hakkında temel bilgilere sahip olmak gerekmektedir. Böylece yeni elektronik endüstrilerinin gelişimine zemin hazırlanabilir. Geim ve Novoselov (2010), oda sıcaklığında grafenin  $15\ 000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ 'den yüksek bir elektron hareketliliğine sahip olduğunu bildirmiştir. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi yapısı gereği el değmemiş grafen, iki boyutlu bir bal peteği karbon kafes formunda sıfır boşluklu bir yarı iletkenidir (Singh vd. 2011). Morozov vd. (2008) grafende ve çift tabakasında elektron hareketliliğinin sıcaklık bağımlılıklarını incelemişlerdir. Araştırmacılar oda sıcaklığında olası yük taşıyıcı hareketliliğine ilişkin temel sınırı belirleyen son derece düşük elektron-fonon saçılma oranı elde etmişlerdir. Buna göre sonuçlar dışsal bozukluklar ortadan kaldırılırsa  $200\ 000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ 'den daha yüksek hareketliliklerin elde edilebileceğini göstermiştir. Bolotin vd. (2008) benzer şekilde tek katmanlı grafeni askıya alarak  $\sim 2 \times 10^{11}\ \text{cm}^2$  elektron yoğunluklarında  $200\ 000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ 'i aşan hareketlilikler elde etmişlerdir.



Şekil 4.6 Grafende bant boşluklarının şematik diyagramları. (a) ve (b) sırasıyla tek tabakalı ve iki tabakalı grafen, (c) iki tabakalı dik bir elektrik alanı uygulandığında iki tabakalı grafende bir bant boşluğunun açılması

Grafenin mekanik ve fonksiyonel özellikleri Tablo 4.1'de özetlenmiş ve diğer malzemelerin özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Grafenin çeşitli şekillerde birçok

malzemeden daha üstün olduğu ve çeşitli endüstriyel alanlarda uygulama potansiyelin çok yüksek olduğu kanısına varılabilir (Liu, 2014).

Tablo 4.1 Farklı mühendislik takviye elemanlarının özellikleri

Takviye malzemesi	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çap veya kalınlık	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)	Termal iletkenlik (W/Mk)	Elektriksel iletkenlik (S/m)
<b>Grafen</b>	1,3-2,1	0,33-100 nm	500-1000	130	4840-5300	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>
<b>CNT</b>	1,3-2,1	0,01-0,04 µm	1300	20-63	1800-6000	10 <sup>7</sup>
<b>Cam</b>	2,56	11 µm	76	2	0,05-13	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-12</sup>
<b>Bor</b>	2,6	2,3-2,5 µm	400	4	38	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,4	3-20 µm	300	2	5	10 <sup>-13</sup>

## 4.2 Grafen Katkılı Bakır Matrisli Kompozitler

Bakır ve alaşımlarının mükemmel elektriksel ve termal özelliklerle donatıldığı göz önüne alındığında, bunlar elektrik kontak malzemeleri, entegre devreler ve direnç kaynağı elektrotları gibi elektrikli ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Qin vd. 2015; Abd-Elwahed vd. 2020). Bununla birlikte, bakır alaşımlarının mukavemeti ve sertliği oda sıcaklığında genellikle düşüktür. Sertlikteki bu durum, bakır alaşımlarının daha yüksek aşınma oranlarına yol açarak yapısal malzemelerdeki birçok uygulamasını sınırlamaktadır (Huang vd. 2019). Çoğunlukla seramik elyaflar, seramik parçacıklar ve karbon elyaf gibi yapılar, Cu matris kompozitlerinde takviye malzemesi olarak kullanılır (Güler ve Bağcı, 2020). Bu takviyelerin çoğu kompozitin mukavemetini artırırken, bakırın elektriksel ve termal özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Zhang vd. 2015a, 2015b). Son zamanlarda bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için takviye elemanı olarak CNT'ler tercih edilmiştir. Karbon nanotüpler, geleneksel malzemelere kıyasla benzersiz özelliklere sahip yeni nesil bir malzemedir. Karbon nanotüpler bakırın mukavemetini artırırken, aynı zamanda elektriksel ve termal iletkenliklerini de artırmaktadırlar. Bununla birlikte, karbon nanotüplerin üretimindeki zorluklar ve kompozit içindeki homojen dağılım problemleri, araştırmacıların karbon nanotüpler yerine farklı bir takviye elemanına yönlendirmiştir. Son zamanlarda, karbon nanotüplerin fiziksel özelliklerine benzer özellik gösteren grafenler Cu matrisli kompozitler için potansiyel hale gelmiştir (Güler

ve Bağcı, 2020). Oksitler ve grafit parçacıkları gibi geleneksel dolgu maddeleriyle karşılaştırıldığında grafen, mükemmel kapsamlı performansı sayesinde elektriksel ve termal iletkenliklerinde çok az bozulma ile kompozitlerin mekanik performanslarını iyileştirebilir (Li vd. 2020).

Bugüne kadar, mekanik bilyeli öğütme / karıştırma, elektriksel adsorpsiyon, kimyasal / elektrokimyasal işlemler ve yerinde kimyasal buhar biriktirme (CVD) süreçleri grafeni bir bakır matris içinde dağıtmak için kullanılmış yöntemlerdir.

Dutkiewicz vd. (2015) grafen ile güçlendirilmiş bakır matrisli kompozitleri bilyeli öğütülmüş toz karışımlarının vakum altında tek eksenli sıcak preslenmesi ile hazırlanmışlardır. İki farklı boyutta yassı grafen kullanarak hazırladıkları kompozitte grafen oranı ağırlıkça %1 ve %2'dir. Araştırmacıların bulgularına göre kaba grafen içeriğine kıyasla ince grafen ilavesi kompozit de yaklaşık %50 daha fazla sertlik ve yaklaşık %30 daha düşük elektrik direnci sağlamıştır.

Li vd. (2015a) bilyalı öğütme yoluyla grafen kaplı bakır tozlarının üretimi ve ardından spark plazma sinterleme (SPS) süreçlerini içeren yöntemlerle yüksek kaliteli grafene dayanan elektriksel iletkenliği arttırılmış bir bakır / grafen kompoziti raporlamışlardır.

Cao vd. (2017) bakır parçacıklarını bir pul formuna dönüştürdükten sonra grafen-bakır kompozitleri yerinde (in-situ) ürettiler. Elde ettikleri kompozit de çekme ve akma mukavemetlerinde önemli bir artış gözlemlerken beraberinde kompozitin yüksek süneklik ve yüksek elektrik iletkenliği sergilediklerini belirlemişlerdir. Saf bakıra kıyasla %1,6 oranında grafen içeren kompozitin akma mukavemetinde %70'lik bir artış gözlemlenirken toplam uzamada önemli bir değişim meydana gelmemiştir. Araştırmacılar başka bir çalışmada kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile geliştirilen tek katlı grafenleri bakır folyo üzerine Cu-Grafen-Cu şeklinde istifleyerek kompozit malzeme üretmiştir. Üretilen kompozit malzemede hacimsel olarak %0,008 gibi çok düşük bir grafen içeriğiyle elektriksel iletkenlik %117 IACS değerine ulaşmıştır. Bu değer, bakır-grafen kompozitleri için literatürde bulunan yüksek elektriksel iletkenlik değerinden biridir (Cao vd. 2019).

Chen vd. (2016) farklı grafen içeriğine sahip bakır matrisli kompozitleri moleküler düzeyde karıştırma işlemi ve spark plazma sinterleme işlemi ile hazırlanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre grafenlerin matris içindeki dağılımı hacimsel fraksiyonlarından etkilenmiştir. Mikroyapı için grafen nano plakalar (GNP'ler) düşük grafen konsantrasyonlu (hacimce %0,8'den fazla olmayan) kompozitlerde rasgele dağılmışken, grafen konsantrasyonu hacimce %2'nin üzerinde olduğunda yoğunlaştırma kuvvetine dik yönde yönelmelerin olduğu belirlenmiştir. Kompozitlerde grafen içeriğinin artmasıyla birlikte güçlendirme etkisi önce artmış sonrasında azalmıştır. Bununla birlikte grafen içeriği arttığında hem termal hem de elektriksel iletkenliğin bir miktar azaldığı vurgulanmıştır.

Chu ve Jia, (2014) bilyalı öğütme ve sıcak presleme gibi iki ardışık işlemi kullanarak grafen nano plakaları bakır matrise başarıyla ilave ettiler. Bu çalışmada takviye oranına bağlı olarak bakır matrisin mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmiştir. Hacimce %8'lik grafen nano plakalar ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerin akma dayanımı saf bakır ile karşılaştırıldığında 300 MPa artmış ve Young modülü %37 artışla 114 GPa'ya ulaşmıştır. Bu artış dikkate değerdir. Araştırmacılar bunun bakır matriste grafen nano plakaların bilyalı öğütme yöntemi kullanılarak homojen bir şekilde dağılımından kaynaklandığına dikkat çekmiştir. Ancak GNP'lerdeki artış ile kompozitteki homojenlik topaklanmadan ötürü azalmıştır. Bu topaklanma kompozitte büyük gözenekliliklerin oluşmasına yol açmış ve böylece belirli bir değerden sonra mekanik özelliklerde azalma meydana gelmiştir.

Li vd. (2015b) sıcak presleme yöntemi ile ürettikleri grafen nano levha (GNS) ve grafit takviyeli bakır matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini karşılaştırdı. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar Tablo 4.2'de özetlenmiştir. Tablodan görüldüğü gibi en iyi mikro sertlik değerleri GNS takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. GNS miktarındaki artış ile kompozitin sertliğinde artmıştır. Ancak bu artış %7 GNS oranından sonra azalmıştır. Kompozitlerin eğilme mukavemeti değerleri ise artan takviye oranı ile azalmıştır. Buna rağmen aynı takviye oranları için GNS takviyeli kompozitlerin eğilme mukavemeti grafit takviyeli kompozitlerinkinden daha yüksektir.

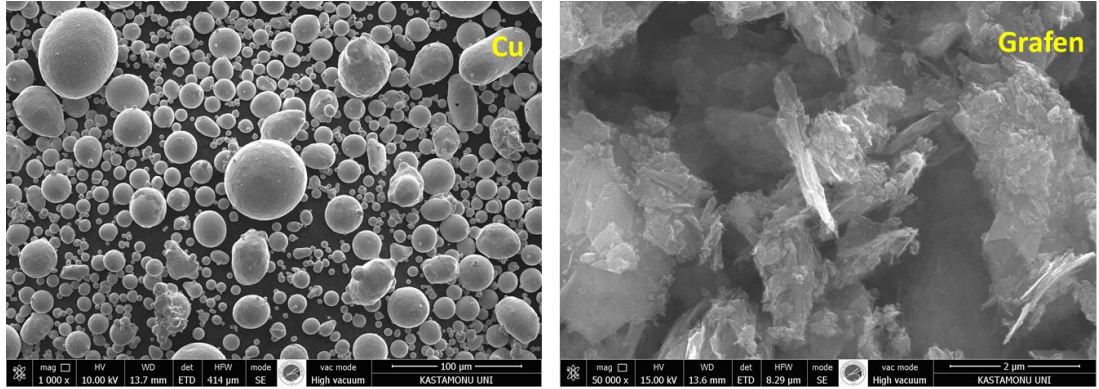
Tablo 4.2 Cu-Gr ve Cu- GNS kompozitlerin mekanik özellikleri

Takviye elemanı oranı (%hacimsel)	Cu-Gr kompozitler			Cu-GNS kompozitler		
	Bağlı yoğunluk (%)	Mikrosertlik (HV)	Eğme dayanımı (MPa)	Bağlı yoğunluk (%)	Mikrosertlik (HV)	Eğme dayanımı (MPa)
<b>2,5</b>	98,9	66,5	362,03	99,1	67,8	441,27
<b>5</b>	98,5	69,2	294,39	98,9	71,7	301,16
<b>7,5</b>	98,4	74,2	185,68	98,7	97,4	284,01
<b>10</b>	98,2	68,9	149,01	97,5	56,8	211,85

## 5. YÖNTEM

### 5.1 Malzemeler

Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak Nanokar firmasından Cu tozu (%99,7 saflıkta – ortalama 44  $\mu\text{m}$  boyutunda) ve takviye elemanı olarak Nanografi firmasından grafen nano levhalar (GNS'ler) (%99,9 saflıkta – 3 nm boyutunda) temin edilmiştir. Kullanılan tozlara ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü

### 5.2 Grafen Katkılı Bakır Kompozitlerin Üretimi

#### 5.2.1 Tozların Karıştırılması

Karıştırma işlemleri öncelikli olarak başlangıç tozları ile başlanmıştır. Bu işlem için ağırlık olarak %0, %0,5, %1 ve %1,5 grafen parçacıkları ayrı ayrı bakır tozları ile karıştırılmıştır. Karıştırma öncesi grafen tozları homojen bir dağılım sağlamak amacıyla 40 ml alkol içeren bir kap içerisinde konulmuştur. Daha sonra bu karışım içerisi damıtılmış su ile doldurulmuş ultrasonik banyo içerisine yerleştirilmiş ve oda sıcaklığında 30 dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 5.2). Akabinde alkol ve grafenden oluşan solüsyona Cu tozları ilave edilerek paslanmaz bir çelik kap içerisinde (250 ml) bilyalı karıştırıcı (Retsch PM100) (Şekil 5.3) ile 400 rpm karıştırma hızında 120 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ağırlıkça bilye/toz oranı 10:1 olması için 10 mm çapında paslanmaz çelik bilyeler karışım toz içerisine ilave edilmiştir. Karıştırma

işlemi sonrasında karışım etüv fırın içerisine yerleştirilerek 80°C sıcaklıkta 180 dakika bekletilerek kurutulmuştur.



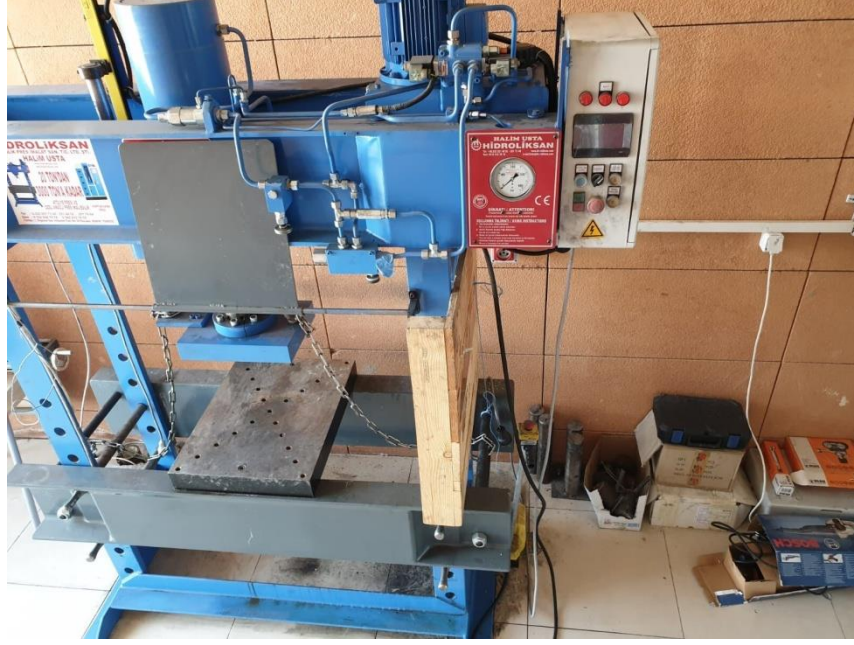
Şekil 5.2 Karıştırma işleminde kullanılan ultrasonik banyo



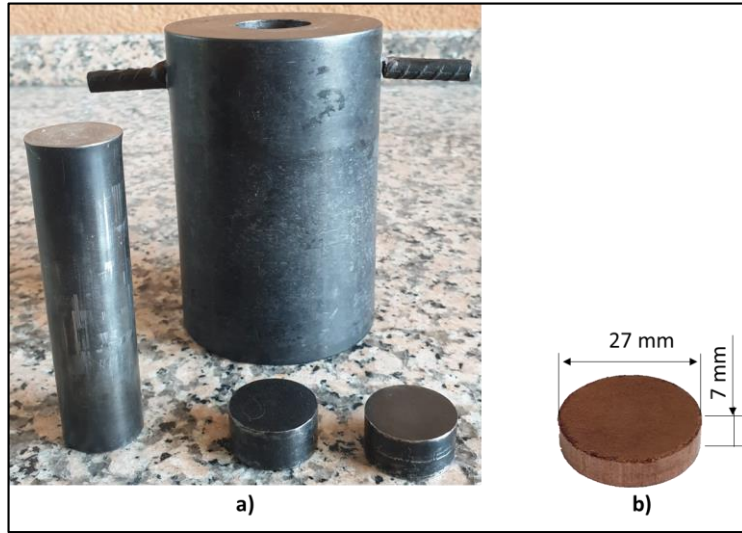
Şekil 5.3 Karıştırma işleminde kullanılan bilyeli karıştırıcı

### 5.2.2 Tozların Sıkıştırılması ve Sinterlenmesi

Karışım tozlar 120 ton basma kapasitesine sahip hidrolik pres yardımıyla (Şekil 5.4) 500, 600 ve 700 MPa basınç altında çelik bir kalıp içerisinde (Şekil 5.5a) tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası 27 mm çapında silindirik numuneler üretilmiştir (Şekil 5.5b). Üretilen numuneler tüp fırın (Şekil 5.6) içerisinde argon atmosferinde 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.4 Sıkıştırma işleminde kullanılan hidrolik pres



Şekil 5.5 Sıkıştırma işleminde kullanılan kalıp (a) ve üretilen numuneler (b)



Şekil 5.6 Sinterleme işleminde kullanılan fırın

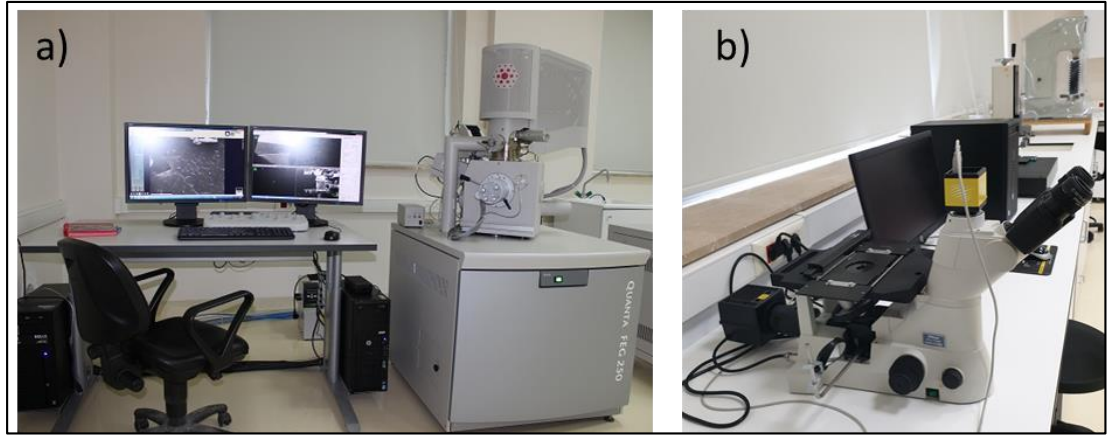
### 5.3 Karakterizasyon İşlemleri

#### 5.3.1 Makro ve Mikro Yapısal Analizler

Üretilen kompozit numunelerin mikro ve makro yapısal analizleri için geleneksel metalografik prosedür uygulanmıştır. Bu prosedüre göre numuneler Şekil 5.7’de verilen zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla 120, 280, 320, 600, 800, 1200, 1500 ve 2000 mesh SiC zımparalar ile numune yüzeyleri zımparalanmış ve elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Böylece numuneler makro ve mikro yapısal analizler için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan enerji dağılımlı spektrometri (EDS) içeren FEI marka Quanta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 5.8a) ve Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Nikon marka MA100 model optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 5.8b).



Şekil 5.7 Zımparalama ve parlatma cihazı



Şekil 5.8 Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskop (a) ve optik mikroskop (b)

### 5.3.2 Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin yoğunlukları ( $\rho_s$ ) boyutsal büyüklükten dolayı Eşitlik. 5.1'de verilen formül kullanılarak numunelerin havadaki ağırlıklarının ( $m_h$ ), hacmine ( $v$ ) oranı ile hesaplanmıştır.

$$\rho_s = \frac{m_h}{v} \quad (5.1)$$

Kompozit numunelerin teorik yoğunlukları ( $\rho_t$ ) karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Buna göre numuneyi oluşturan her bir bileşenin ağırlıkça yüzde oranları ile

yoğunlukları çarpılmış ve elde edilen değerler toplanarak teorik yoğunluk hesaplanmıştır (Eşitlik 5.2).

$$\rho_t = [(\%W_1) \times \rho_1] + [(\%W_2) \times \rho_{12}] + \dots + [(\%W_n) \times \rho_s] \quad (5.2)$$

Bağıl yoğunluk ( $\rho^*$ ) değerleri ise gerçek yoğunluğun teorik yoğunluğa oranlanması ile elde edilmektedir (Eşitlik 4.3).

$$\rho^* = \rho_s / \rho_t \quad (5.3)$$

### 5.3.3 Mikrosertlik Ölçümü

Sertlik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Shimadzu (HMV-G) marka mikro sertlik cihazında yapılmıştır (Şekil 5.9). Üretilen kompozit numunelerin sertlik ölçümleri 0,025, 0,05, 0,1, 0,3 ve 0,5 N yükler uygulanarak yapılmıştır. Yükte bekleme süresi 10 s'dir. Mikro sertlik değerleri her numune için en az beş ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.9 Sertlik ölçüm cihazı

### 5.3.4 Elektrik İletkenlik Ölçümü

Elektrik iletkenlik ölçümleri Olympus Nortec 500 D tipi dijital girdap akımı metal iletkenlik ölçer ile ölçülmüştür (Şekil 5.10). Ölçümler Türk Standartlar Enstitüsü Tahribatsız Muayene Laboratuvarlarında yapılmıştır. Her numune için, ortalama bir değer elde etmek için en az beş kez ölçüm yapılmıştır.

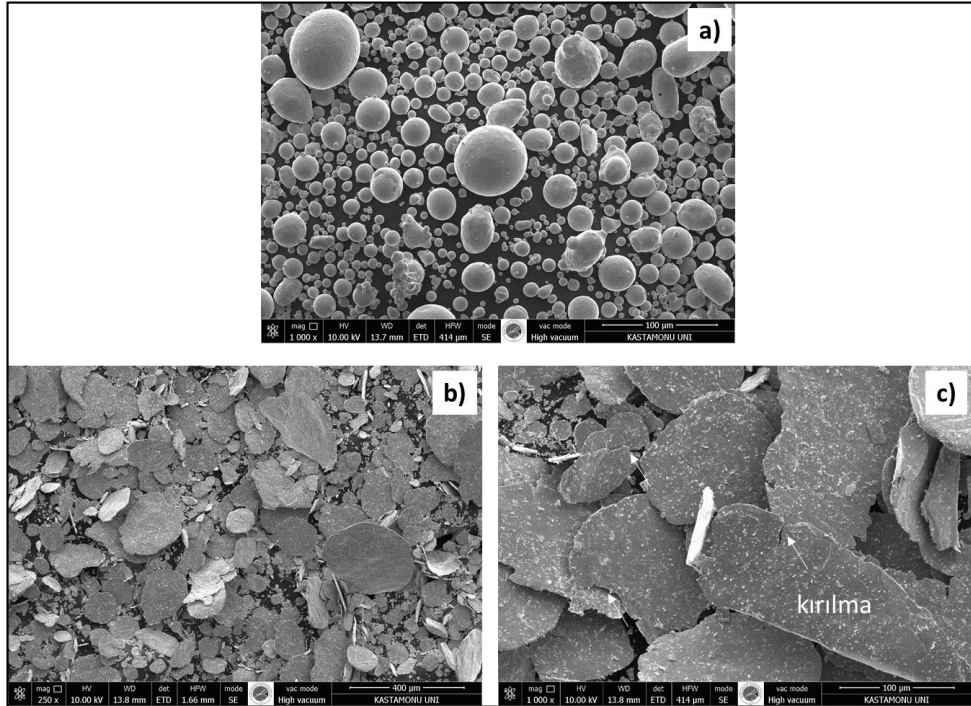


Şekil 5.10 Elektriksel iletkenlik ölçümü

## 6. BULGULAR

### 6.1 Toz Morfolojisi

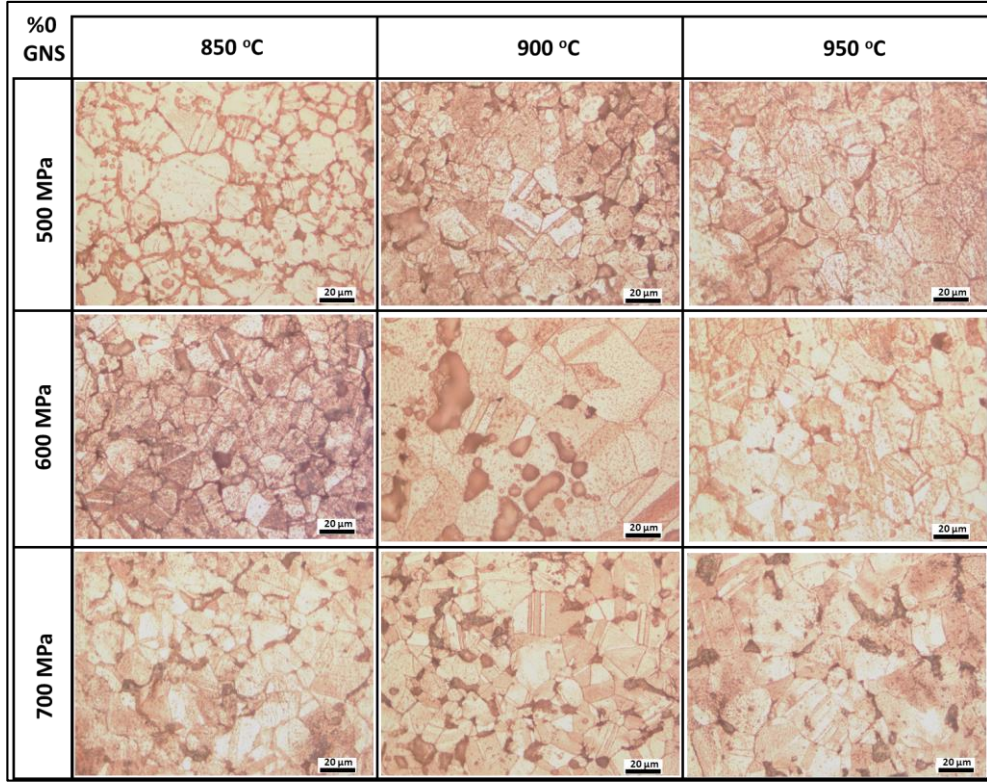
Bilyalı öğütme işlemi için kullanılan Cu ham tozlarının morfolojisi sırasıyla Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Cu tozu başlangıçta küresel şekilli ortalama 44 µm çapa sahip iken (Şekil 6.1a), karışım işleminin etkisi ile bu morfoloji önemli ölçüde değişmiştir. 2 saatlik öğütülmüş tozun SEM görüntüsüne bakıldığında, mekanik öğütmenin bir sonucu olarak Cu tozlarının pulsu bir yapıya dönüştüğü görülmektedir (Şekil 6.1b). Ayrıca iri taneli yapılarda zaman zaman kırılma eğilimleri gözlenmiştir (Şekil 6.1c). Genel olarak, mekanik öğütme sırasında toz parçacıkları soğuk kaynak, kırılma ve yeniden kaynak işlemlerinden geçmektedir. Ayrıca soğuk kaynak ve kırılma işlemleri mekanik öğütmenin herhangi bir aşamasında baskın olabilir. Bu durum çoğunlukla toz öncüllerinin deformasyon özelliklerine ve kinetiklerine bağlıdır (Salvo vd. 2019). Daha önce pulsu morfolojiye sahip Cu tozları kullanılarak üretilen kompozitlerin gelişmiş fonksiyonel özellikler sergiledikleri Varol ve Çanakçı (2015) tarafından belirtilmiştir.



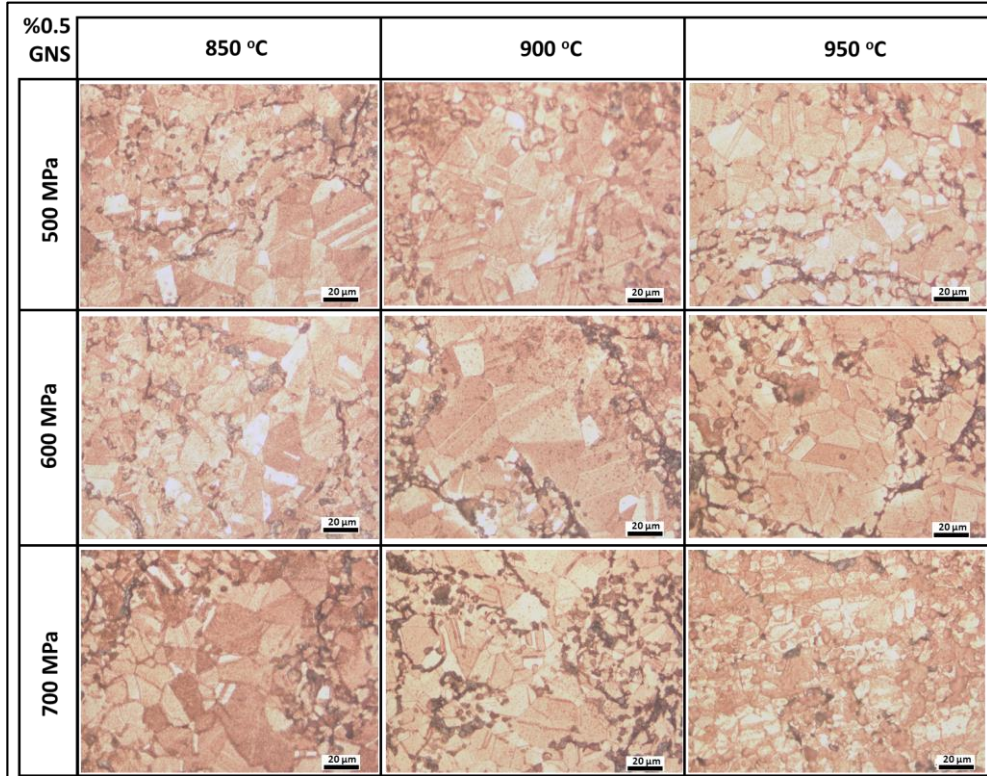
Şekil 6.1 Karışım öncesi (a) ve karışım sonrası Cu tozların morfolojisi (b ve c)

## 6.2 Mikroyapısal Analiz

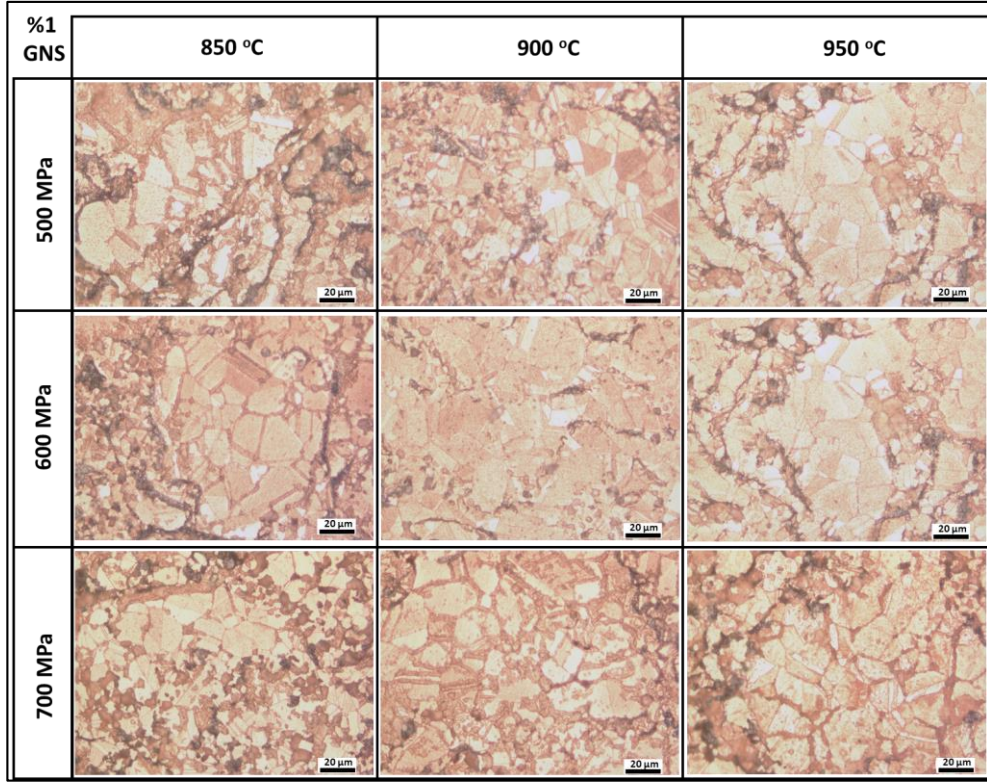
Farklı basınçlarda preslenmiş ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş GNS takviyeli Cu matrisli kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilmiştir. Görüntülere bakıldığında grafen içermeyen numunelerde yapı içerisinde önemli ölçüde gözeneğe rastlanmazken grafen katkılı numunelerde yapısal kusurlar dikkat çekicidir. GNS oranındaki artış parçacık sınırlarındaki ve Cu matris tozlarındaki GNS partiküllerinin sayısını önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum özellikle tane sınırlarında aglomerasyona ve gözeneğe yol açmıştır (Şekil 6.6). Presleme işlemi esnasında partikül sınırlarında bulunan GNS'ler numune mikroyapısında önemli ölçüde değişikliğe neden olmuştur. Daha fazla analiz için, EDS çizgi tarama analizleri Cu-1,5 GNS numunelerinin tane sınırları üzerinde gerçekleştirilmiş ve detaylar Şekil 6.7'de sunulmuştur. EDS analizleri Cu-1,5 GNS kompozitlerinin tane sınırlarında grafenin varlığını açıkça doğrulamıştır. Gözlenen GNS toplanması tam yoğunlaşmayı önleyerek sanal gözenekler olarak işlev görmüştür. Salvo vd. (2019) tarafından da benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Aglomerasyon sonucu oluşan gözenekler üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine olumsuz etkileri mevcuttur (Varol ve Çanakçı, 2015).



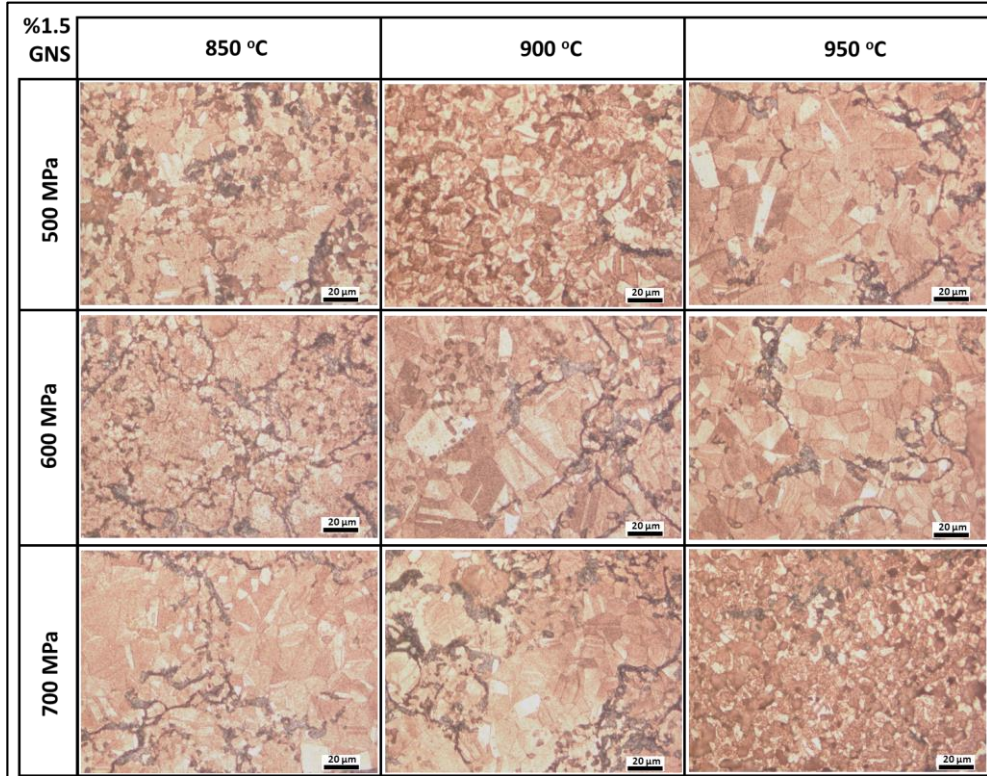
Şekil 6.2 GNS içermeyen (%0) numunelerin optik mikroskop görüntüsü



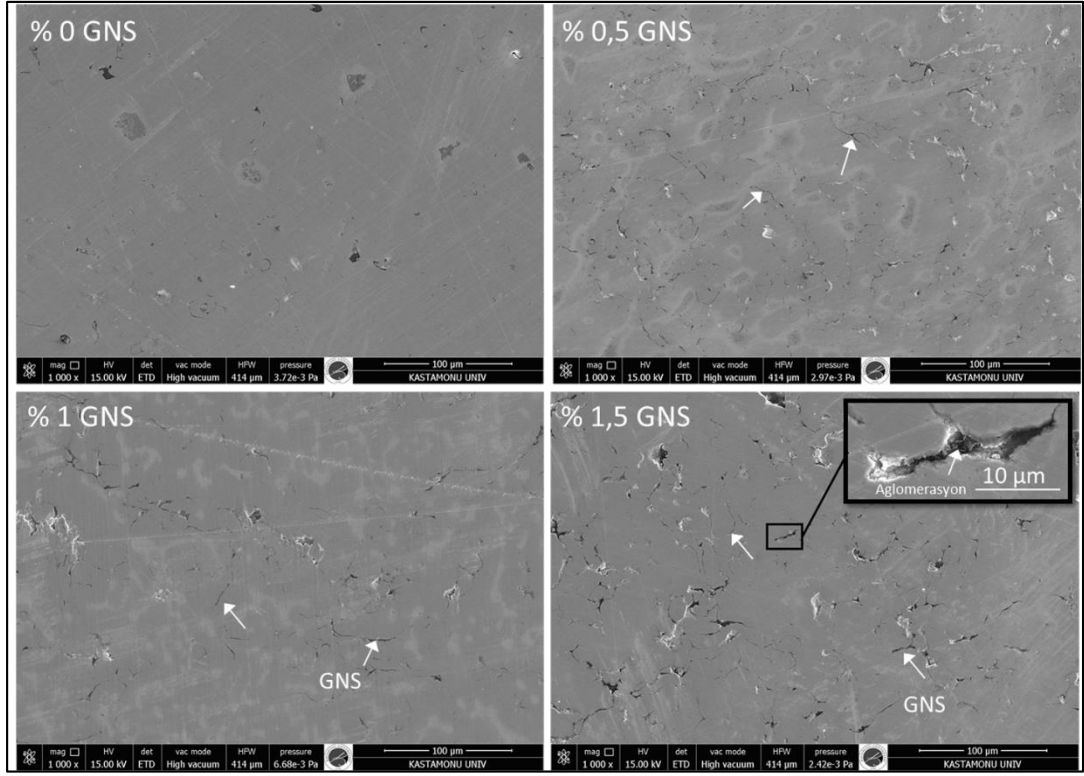
Şekil 6.3 %0,5 GNS içeren numunelerin optik mikroskop görüntüsü



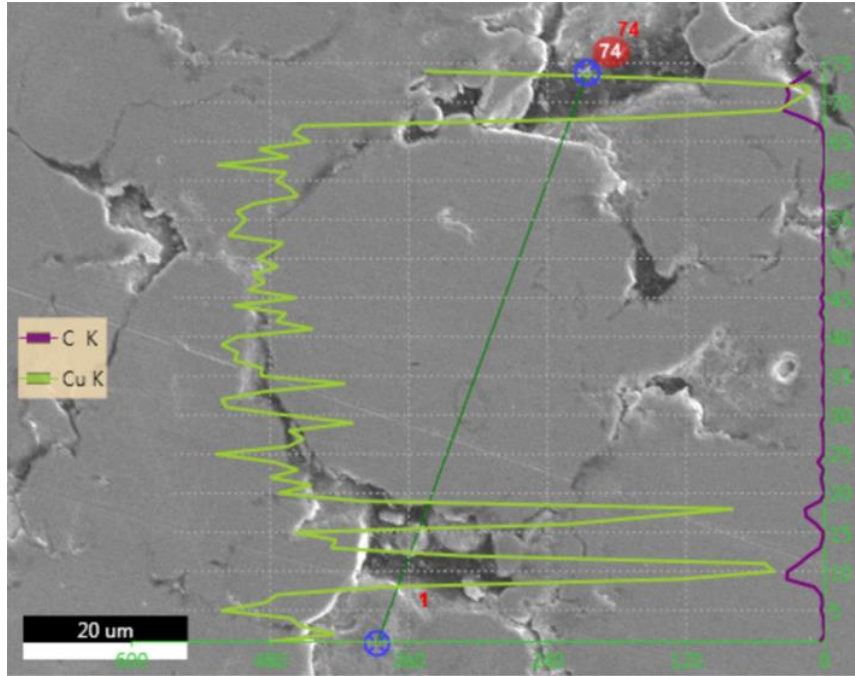
Şekil 6.4 %1 GNS içeren numunelerin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 6.5 %1,5 GNS içeren numunelerin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 6.6 600 MPa ve 900 °C'de yoğunlaştırılmış Cu-GNS kompozitlerin SEM görüntüsü



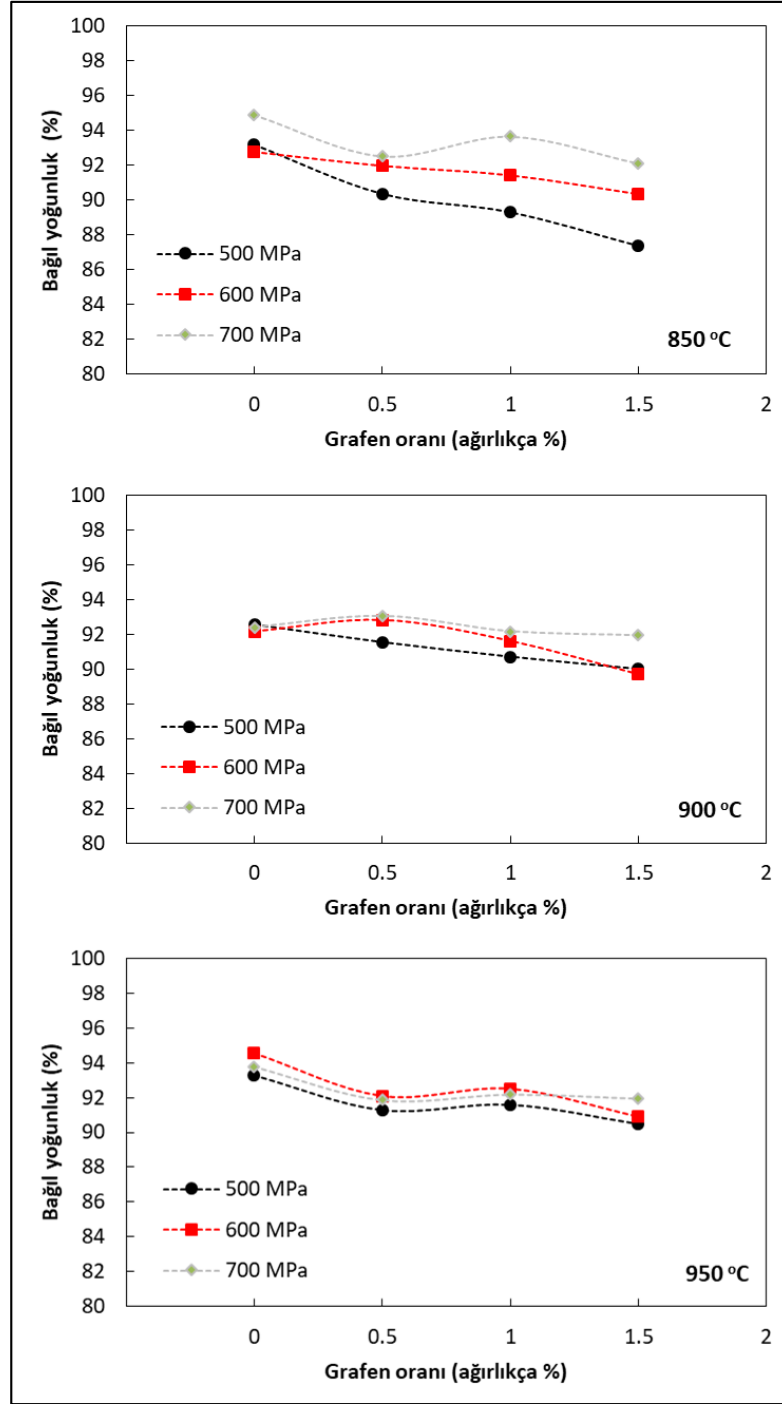
Şekil 6.7 600 MPa ve 900 °C'de yoğunlaştırılmış Cu-1,5 GNS kompozitlerin EDS çizgi tarama analizi

### 6.3 Yoğunluk Değişimi

Arşimet yöntemiyle ölçülen Cu-GNS kompozitlerinin bağıl yoğunluğu Şekil 6.8’da verilmiştir. Grafen içeriğindeki artışa bağlı olarak numunelerin bağıl yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmüştür. Buna karşın sıkıştırma basıncındaki artış bağıl yoğunluk değerlerinin artışına yol açmıştır. Özellikle düşük sinterleme sıcaklığında (850 °C) sıkıştırma basıncının etkisi daha fazladır. Bu sıcaklıkta en yüksek bağıl yoğunluk %94,9 ile 700 MPa sıkıştırma basıncında preslenen GNS içermeyen numunede elde edilmiştir. En düşük bağıl yoğunluk değeri ise 500 MPa sıkıştırma basıncında preslenen %1,5 GNS içeren numunede %87,4 olarak hesaplanmıştır. Bu sıcaklıkta presleme basıncındaki azalma ve GNS içeriğindeki artış bağıl yoğunluk değişiminde %7,5 fark oluşturmuştur.

Sinterleme sıcaklığındaki artış ile birlikte numunelerin bağıl yoğunluk değişimi üzerine sıkıştırma basıncının etkisi nispeten daha azdır. 950 °C sıcaklıkta sinterlenmiş numuneler için en yüksek bağıl yoğunluk %94,6 ile 600 MPa sıkıştırma basıncında preslenen GNS içermeyen numunede elde edilmiştir. Aynı sıcaklıkta sinterlenen ve 700 MPa ile 500 MPa sıkıştırma basınçlarında preslenen numunenin bağıl yoğunluk değerleri ise sırasıyla %93,7 ve %93,3 olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta GNS içermeyen numuneler için sıkıştırma basıncının bağıl yoğunluk değişimi üzerine maksimum %1,3 fark oluşturduğu görülmektedir. 950 °C sıcaklıkta sinterlenmiş numuneler için en düşük bağıl yoğunluk %90,5 ile 500 MPa sıkıştırma basıncında preslenen %1,5 GNS içeren numunede elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta presleme basıncındaki değişim ve GNS içeriğindeki artış bağıl yoğunluk değişiminde ~ %4 fark oluşturmuştur.

GNS içeriğindeki artış bağıl yoğunluk değerlerini düşürmüştür. Bu durum Cu-1,5 GNS kompozitlerdeki gözeneklerin mevcudiyeti ile desteklenebilir (Şekil 6.6). Wei vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise grafen içeriği %1’den %5’e çıkartıldığında bağıl yoğunluk değerlerinin en yüksek seviyeye (%96,68) ulaştığı raporlanmıştır.

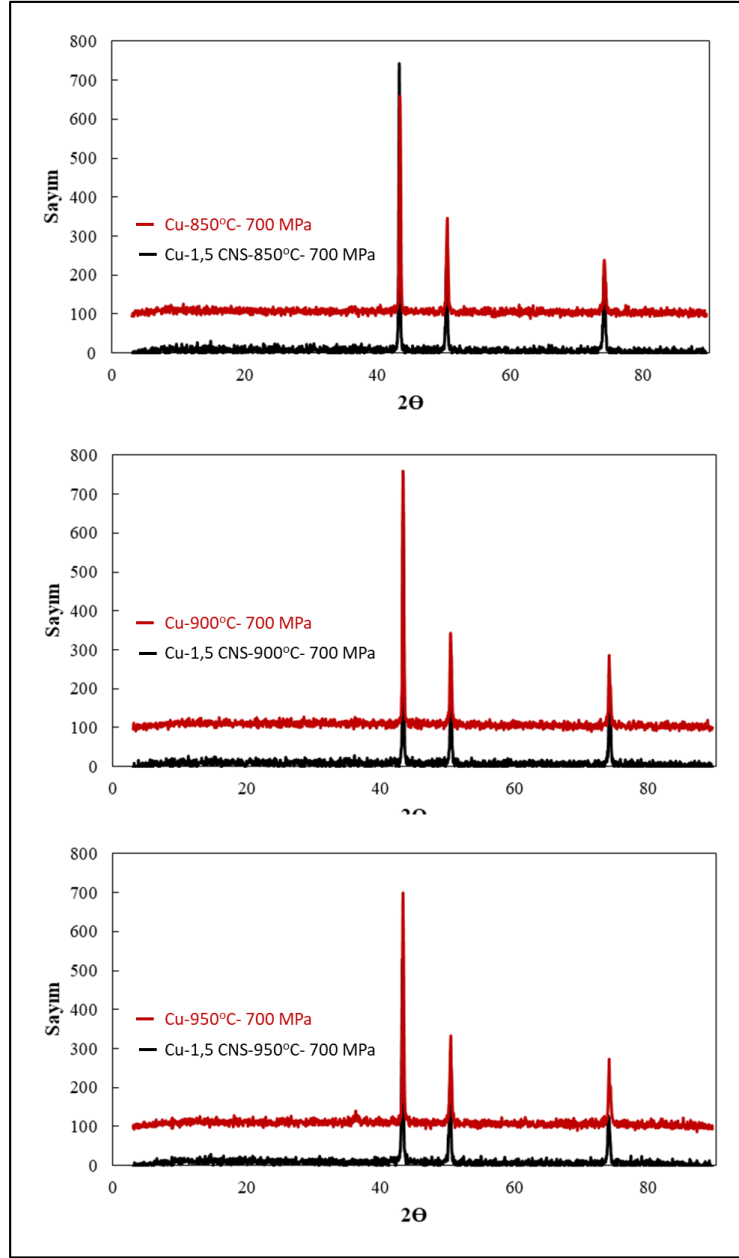


Şekil 6.8 Cu-GNS kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimi

#### 6.4 XRD Analizi

700 MPa basınçta sıkıştırılmış ve farklı sıcaklıklarda (850, 900 ve 950 °C) sinterlenmiş saf Cu ve Cu-1,5 GNS kompozitlerinin XRD modelleri sırasıyla Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Saf Cu ve Cu-1,5 GNS kompozitlerinin XRD modelleri 43,2, 50,3 ve 74,1'deki kırınım piklerini gösterir ve Cu'nun sırasıyla (111), (200) ve (220)

yansımalarına karşılık gelmektedir (Theivasanthi ve Alagar, 2010). Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak desenler arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Cu-1,5 GNS numunelerinde grafene bağlı kırınım piklerinin yokluğu dikkat çekicidir. Bu durum (a) XRD saptama sınırlarında tespit edilemeyen Cu matrisinde düşük miktarda grafenin dağılımına, (b) Cu ile ilgili yüksek yoğun kırınım pikleri ile grafene bağlı piklerin maskeleyişine veya (c) öğütme sırasında grafen tabakalarının istiflenmesi ve Cu matrisinde iyi dağılmış tek tabakalı GNS ile sonuçlanabilecek bozulmaların meydana gelmesinden kaynaklanabilir (Wei vd. 2014; Salvo vd. 2019). Wejrzanowski vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada bulk yapıdaki grafen-bakır kompozitlerde benzer bir XRD patern davranışı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.9 700 MPa basınçta sıkıştırılmış ve farklı sıcaklıklarda (850, 900 ve 950 °C) sinterlenmiş saf Cu ve Cu-1,5 GNS kompozitlerinin XRD modelleri

## 6.5 Sertlik Değişimi

Bir yükün uygulanmasından kaynaklanan deformasyon ve kırık malzemelerin sertliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilir. Mikro sertlik malzemelerin sertliğini ölçmek ve mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir. Özellikle Vickers sertliği mekanik özellikleri tanımlamada en yaygın kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Vickers sertlik değerleri farklı yüklere sahip pramit biçiminde batıcı ucun numune üzerinde bırakmış olduğu izin boyutlarının ölçümüne bağlıdır. Bu çalışmada

altı farklı yük ( $F = 0,245, 0,490, 0,980, 1,960, 2,940$  ve  $4,900$  N), oda sıcaklığında saf Cu ve Cu- xGNS ( $x: 0,5, 1$  ve  $1,5$ ) kompozitlerinin mekanik özelliklerini araştırmak için kullanıldı. Yük/iz alanı ile Vickers sertlik arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 6.1).

$$H_v = 1854,4 \left( \frac{F}{d^2} \right) (GPa) \quad (6.1)$$

Burada  $F$ , N cinsinden uygulanan yükü ve  $d$ ,  $\mu m$  cinsinden yükün malzeme üzerinde oluşturduğu izin köşegensel ortalama uzunluğunu ifade etmektedir. Ayrıca bütün numuneler için yüke bağlı elastik modülü ( $E$ ) değerleri ve akma dayanımı ( $Y$ ) Eşitlik (6.2) ve (6.3)'te verilen formüllerden hesaplanmıştır.

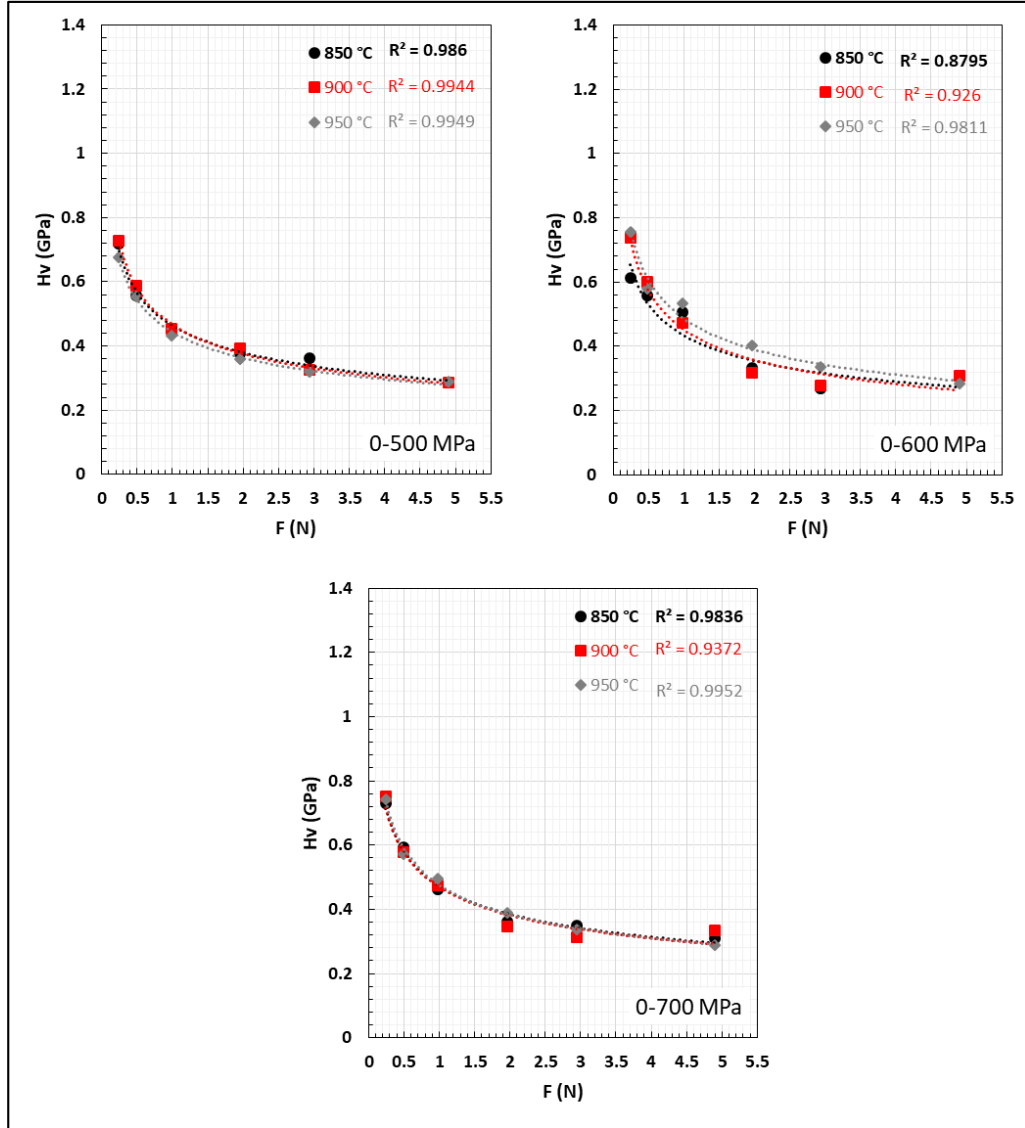
$$E = 81,9635H_v \quad (6.2)$$

$$Y \approx H_v/3 \quad (6.3)$$

Mikro sertlik karakterizasyonunda iz boyutu etkisi (İBE) veya ters iz boyutu etkisi (TİBE) şeklinde malzeme davranışı olabilir (Akkurt ve Yıldırım, 2016; Zalaoglu vd., 2017). TİBE davranışı uygulanan test yükündeki artışa bağlı olarak sertlikteki artışı gösterirken, İBE davranışı ise uygulanan yükteki artışa bağlı olarak sertlikteki azalmayı ifade etmektedir. Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 uygulanan yüklere bağlı olarak mikro sertlik değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Ayrıca, sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreleri karşılaştırmak için elde edilen sonuçlar Tablo 6.1, Tablo 6.2, Tablo 6.3 ve Tablo 6.4'te verilmiştir. Numunelerin mikro sertlik değerleri üzerindeki değişimler dikkate alındığında üretim parametrelerindeki değişkenlerin (presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve bakır matris içerisine ilave edilen grafen) önemi anlaşılır hale gelmektedir. Bütün numunelerde iz boyut etkisi (İBE) gözlemlenmiştir. Malzemelerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için mikro sertliğin yanı sıra elastik modülü ve akma dayanımı da oldukça önemli parametrelerdir. Elastik modülü kuvvet altındaki malzemenin elastik davranışını belirtmektedir. Sert bir malzemenin şeklini değiştirebilmek için çok daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda malzemenin elastik modülü yüksektir.  $H_v$  ve  $E$  artışı malzemeleri şekillendirmek için daha fazla kuvvetin uygulanması gerektiğini

göstermektedir. Salvo vd. (2019) tarafından yapılan çalışmanın aksine bu çalışmada uygulanan yüke göre sertliğin kademeli olarak azaldığı ve uygulanan yükün 4,900 N için minimuma ulaştığı açıktır.

Şekil 6.10'da farklı basınçlarda preslenmiş ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş saf Cu numunelerin yüke bağlı sertlik değişimleri gösterilmektedir. Grafikte açıkça gösterildiği gibi farklı yükler altında yükleme eğrilerinin belirli bir yük (2,940 N) değerinden itibaren yaklaşık bir plato (düzlük) biçimini aldığı görülmektedir. Bu plato değerleri için elde edilen ve Tablo 6.1'de verilen  $E$  değerleri karşılaştırıldığında önemli farklılıkların olmadığı görülmektedir. Buna göre saf Cu numuneler için deneysel çalışmalarda kullanılan presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının elastik modülü üzerine etkisi yok denecek kadar azdır. Benzer durum akma dayanımları içinde söylenebilir.

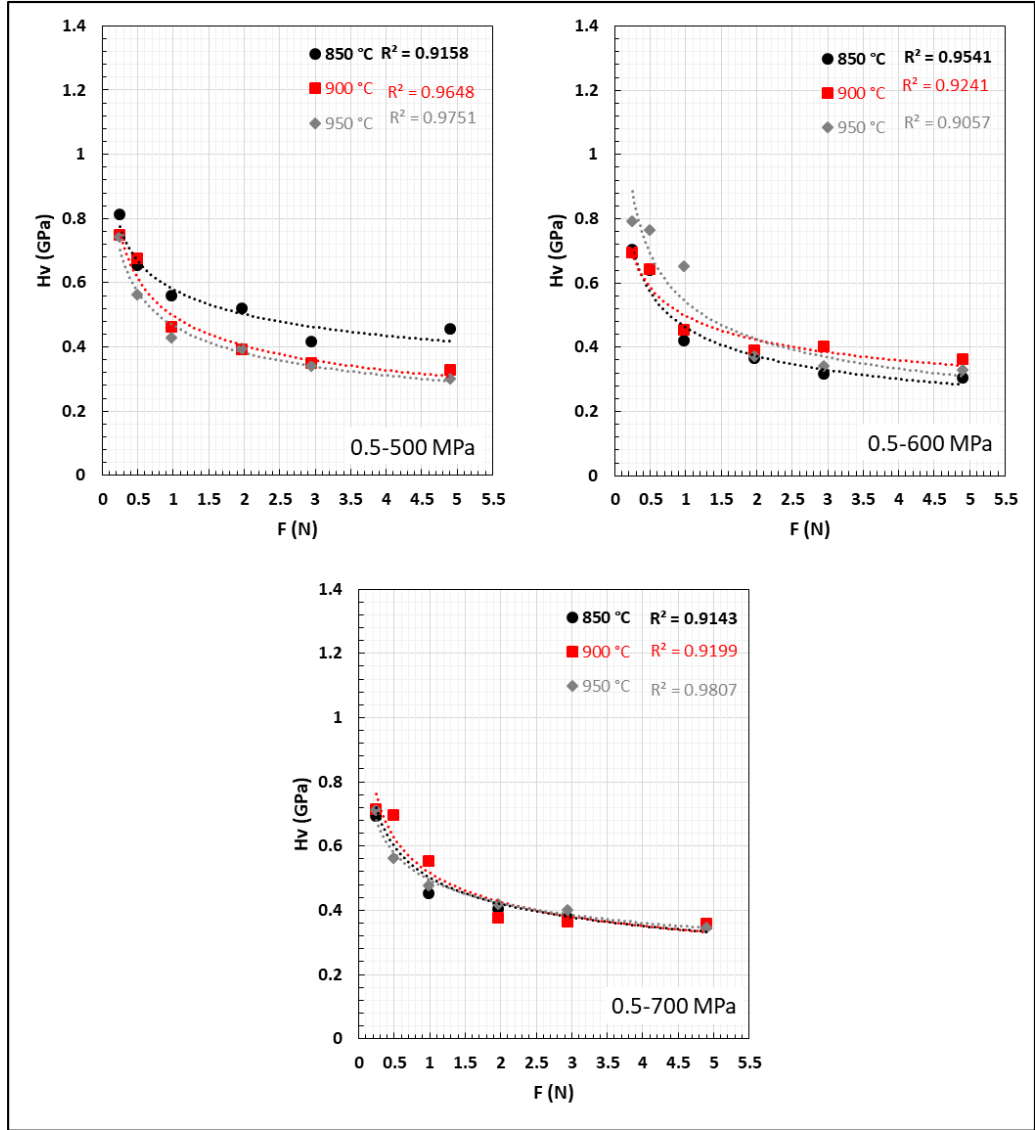


Şekil 6.10 Saf Cu numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri

Tablo 6.1 Saf Cu numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler

	500 Mpa					600 Mpa					700 Mpa				
	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)
850 °C	0,245	25,140	0,719	58,920	0,240	0,245	27,230	0,613	50,222	0,204	0,245	24,950	0,730	59,820	0,243
	0,490	40,385	0,557	45,665	0,186	0,490	40,333	0,559	45,784	0,186	0,490	39,193	0,592	48,486	0,197
	0,980	63,734	0,447	36,670	0,149	0,980	60,000	0,505	41,376	0,168	0,980	62,730	0,462	37,853	0,154
	1,960	98,098	0,378	30,957	0,126	1,960	104,492	0,333	27,284	0,111	1,960	100,458	0,360	29,520	0,120
	2,940	122,908	0,361	29,581	0,120	2,940	142,793	0,267	21,916	0,089	2,940	125,193	0,348	28,511	0,116
	4,900	178,213	0,286	23,450	0,095	4,900	172,377	0,306	25,065	0,102	4,900	171,113	0,310	25,436	0,103
900 °C	0,245	25,000	0,727	59,581	0,242	0,245	24,820	0,738	60,449	0,246	0,245	24,603	0,751	61,518	0,250
	0,490	39,333	0,587	48,139	0,196	0,490	38,930	0,600	49,142	0,200	0,490	39,690	0,577	47,278	0,192
	0,980	63,352	0,453	37,113	0,151	0,980	61,967	0,473	38,791	0,158	0,980	61,955	0,473	38,806	0,158
	1,960	96,085	0,394	32,268	0,131	1,960	107,006	0,317	26,017	0,106	1,960	102,390	0,347	28,416	0,116
	2,940	129,376	0,326	26,697	0,109	2,940	140,184	0,277	22,739	0,092	2,940	131,970	0,313	25,658	0,104
	4,900	178,590	0,285	23,351	0,095	4,900	171,430	0,309	25,342	0,103	4,900	164,765	0,335	27,434	0,112
950 °C	0,245	25,937	0,675	55,356	0,225	0,245	24,540	0,754	61,836	0,251	0,245	24,715	0,744	60,963	0,248
	0,490	40,447	0,555	45,525	0,185	0,490	39,562	0,581	47,584	0,194	0,490	39,873	0,572	46,844	0,191
	0,980	64,838	0,432	35,432	0,144	0,980	58 350	0,534	43,749	0,178	0,980	60,507	0,496	40,686	0,165
	1,960	100,553	0,359	29,464	0,120	1,960	94 845	0,404	33,117	0,135	1,960	96,777	0,388	31,808	0,129
	2,940	130,516	0,320	26,233	0,107	2,940	127 396	0,336	27,533	0,112	2,940	126,998	0,338	27,706	0,113
	4,900	177,573	0,288	23,619	0,096	4,900	178 970	0,284	23,252	0,095	4,900	177,323	0,289	23,686	0,096

Şekil 6.11’de Cu-0.5 GNS kompozit numunelerin yüke bağlı sertlik değişimleri gösterilmektedir. Saf Cu numunelerde olduğu gibi Cu-0,5 GNS kompozit numunelerde de yükleme eğrilerinin belirli bir yük (2,940 N) değerinden itibaren yaklaşık bir plato biçimini aldığı görülmektedir. Bu plato değerleri için elde edilen ve Tablo 6.2’de verilen  $E$  değerlerine bakıldığında, saf Cu numunelere kıyasla Cu-0,5GNS kompozit numunelerde elde edilen değerlerin nispeten yüksek olduğu görülmektedir. Ancak presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının Cu-0,5 GNS kompozit numunelerin elastik modülü üzerine etkisi karmaşık bir korelasyon içerisindedir. Örneğin 850°C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde sıkıştırma basıncındaki artış ile birlikte elde edilen sonuçlar artan-azalan şeklinde meydana gelmiştir. 950°C sıcaklıkta ise sıkıştırma basıncındaki artış ile elastik modülü değerlerinde artan yönde bir eğilim gözlenmiştir. Bununla birlikte 500 MPa sıkıştırma basıncında preslenen numuneler için sinterleme sıcaklığındaki artış ile elastik modülü değerleri azalmıştır. 700 MPa sıkıştırma basıncında preslenen numuneler için ise elastik modülü değerlerinde önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

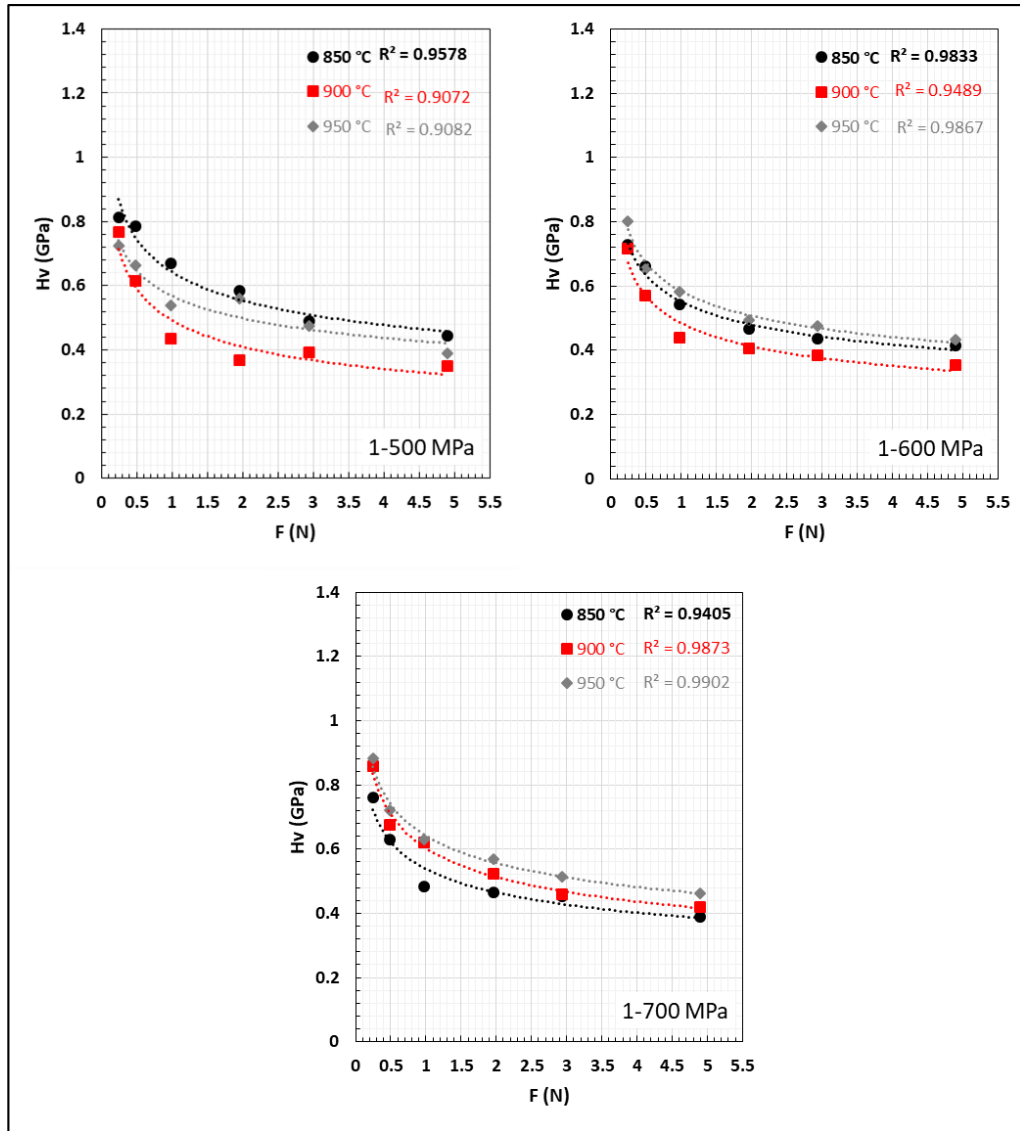


Şekil 6.11 Cu-0,5 GNS kompozit numunelerde yüke bağlı dertlik değışimleri

Tablo 6.2 Cu-0,5 GNS numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler

	500 Mpa					600 Mpa					700 Mpa				
	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)
850 °C	0,245	23,645	0,813	66,606	0,271	0,245	25,427	0,703	57,598	0,234	0,245	25,587	0,694	56,880	0,231
	0,490	37,270	0,654	53,617	0,218	0,490	37,680	0,640	52,456	0,213	0,490	36,097	0,697	57,159	0,232
	0,980	56,914	0,561	45,985	0,187	0,980	65,740	0,421	34,466	0,140	0,980	63,450	0,451	36,999	0,150
	1,960	83,638	0,520	42,587	0,173	1,960	99,830	0,365	29,892	0,122	1,960	94,747	0,405	33,186	0,135
	2,940	114,390	0,417	34,150	0,139	2,940	130,824	0,319	26,109	0,106	2,940	120,168	0,378	30,945	0,126
	4,900	140,980	0,457	37,472	0,152	4,900	172,760	0,304	24,954	0,101	4,900	160,700	0,352	28,840	0,117
900 °C	0,245	24,603	0,751	61,518	0,250	0,245	25,570	0,695	56,955	0,232	0,245	25,207	0,715	58,608	0,238
	0,490	36,633	0,677	55,497	0,226	0,490	37,600	0,643	52,680	0,214	0,490	36,110	0,697	57,117	0,232
	0,980	62,693	0,462	37,898	0,154	0,980	63,222	0,455	37,266	0,152	0,980	57,243	0,555	45,457	0,185
	1,960	96,140	0,393	32,231	0,131	1,960	96,652	0,389	31,890	0,130	1,960	98,040	0,378	30,994	0,126
	2,940	125,000	0,349	28,599	0,116	2,940	116,567	0,401	32,887	0,134	2,940	122,400	0,364	29,827	0,121
	4,900	166,290	0,329	26,933	0,110	4,900	158,550	0,361	29,627	0,120	4,900	159,187	0,359	29,390	0,120
950 °C	0,245	24,704	0,744	61,018	0,248	0,245	23,937	0,793	64,992	0,264	0,245	25,270	0,711	58,315	0,237
	0,490	40,192	0,562	46,104	0,187	0,490	34,490	0,764	62,609	0,255	0,490	40,213	0,562	46,057	0,187
	0,980	65,177	0,428	35,064	0,143	0,980	52,840	0,651	53,349	0,217	0,980	61,772	0,476	39,036	0,159
	1,960	95,966	0,395	32,348	0,132	1,960	98,810	0,372	30,513	0,124	1,960	92,973	0,420	34,464	0,140
	2,940	126,235	0,342	28,042	0,114	2,940	126,104	0,343	28,100	0,114	2,940	116,440	0,402	32,958	0,134
	4,900	173,643	0,301	24,700	0,100	4,900	166,160	0,329	26,975	0,110	4,900	162,103	0,346	28,342	0,115

Cu-1 GNS kompozit numunelerin yüke bağlı sertlik değişimlerine bakıldığında (Şekil 6.12) elde edilen sertlik varyasyonları saf Cu ve Cu-0,5 GNS kompozit numunelerinki ile benzer eğilimde oldukları görülmektedir. Buna rağmen Cu-1 GNS kompozit numunelerin yüke bağlı elastik modülü ve akma dayanımı değerleri saf Cu ve Cu-0,5 GNS kompozit numunelerde elde edilen elastik modülü ve akma dayanımı değerlerine kıyasla nispeten daha yüksektir (Tablo 6.3). Bu durum ilave edilen grafen parçacıklarının etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Zhang (2015) yapmış olduğu çalışmada grafen takviyeli bakır matrisli kompozitlerde düşük miktarlarda ilave edilen GNS'lerin mikro sertlikte artışa yol açtığı güçlendirici etkisine atfedilerek belirtilmiştir.

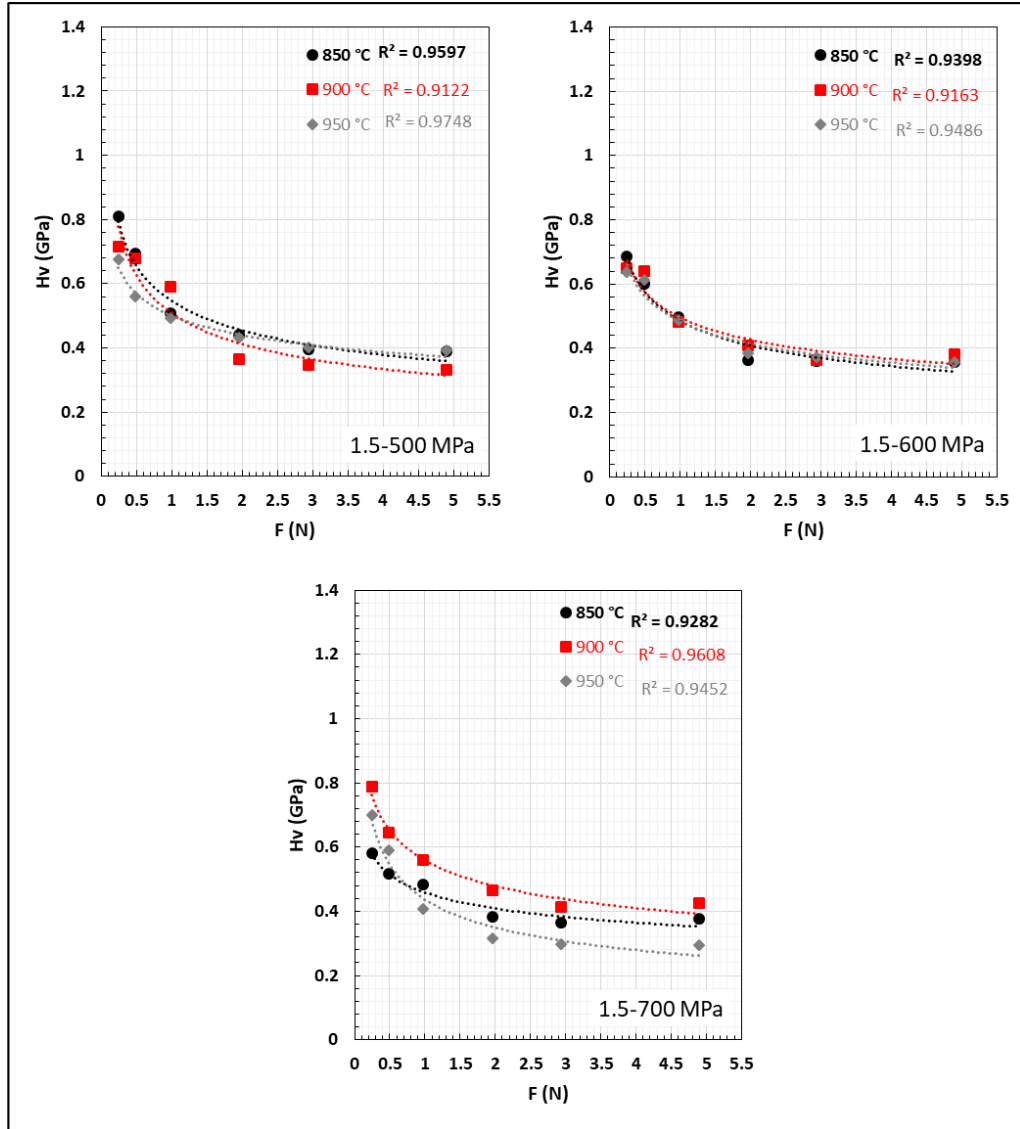


Şekil 6.12 Cu-1 GNS kompozit numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri

Tablo 6.3 Cu-1 GNS numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler

	500 Mpa					600 Mpa					700 Mpa				
	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)
850 °C	0,245	23,620	0,814	66,747	0,271	0,245	24,972	0,729	59,715	0,243	0,245	24,453	0,760	62,279	0,253
	0,490	34,030	0,785	64,313	0,262	0,490	37,106	0,660	54,092	0,220	0,490	38,022	0,629	51,517	0,210
	0,980	52,076	0,670	54,926	0,223	0,980	57,808	0,544	44,574	0,181	0,980	61,298	0,484	39,642	0,161
	1,960	78,768	0,586	48,015	0,195	1,960	88,280	0,466	38,226	0,155	1,960	88,510	0,464	38,027	0,155
	2,940	105,530	0,490	40,125	0,163	2,940	111,720	0,437	35,802	0,146	2,940	109,652	0,453	37,165	0,151
	4,900	142,947	0,445	36,448	0,148	4,900	147,773	0,416	34,106	0,139	4,900	152,967	0,388	31,829	0,129
900 °C	0,245	24,317	0,768	62,977	0,256	0,245	25,190	0,716	58,686	0,239	0,245	23,013	0,858	70,312	0,286
	0,490	38,477	0,614	50,307	0,205	0,490	39,955	0,569	46,653	0,190	0,490	36,643	0,677	55,469	0,226
	0,980	64,648	0,435	35,640	0,145	0,980	64,350	0,439	35,971	0,146	0,980	54,097	0,621	50,899	0,207
	1,960	99,316	0,368	30,202	0,123	1,960	94,748	0,405	33,185	0,135	1,960	83,410	0,522	42,820	0,174
	2,940	117,837	0,393	32,182	0,131	2,940	119,104	0,384	31,501	0,128	2,940	108,904	0,460	37,678	0,153
	4,900	160,833	0,351	28,792	0,117	4,900	160,447	0,353	28,931	0,118	4,900	147,133	0,420	34,403	0,140
950 °C	0,245	25,047	0,724	59,359	0,241	0,245	23,810	0,801	65,686	0,267	0,245	22,686	0,883	72,356	0,294
	0,490	36,974	0,665	54,479	0,222	0,490	37,303	0,653	53,521	0,218	0,490	35,508	0,721	59,070	0,240
	0,980	58,093	0,538	44,136	0,179	0,980	55,850	0,583	47,753	0,194	0,980	53,683	0,631	51,686	0,210
	1,960	80,596	0,560	45,862	0,187	1,960	85,690	0,495	40,571	0,165	1,960	79,856	0,570	46,716	0,190
	2,940	107,053	0,476	38,992	0,159	2,940	107,078	0,475	38,974	0,158	2,940	102,888	0,515	42,213	0,172
	4,900	152,460	0,391	32,041	0,130	4,900	145,107	0,432	35,371	0,144	4,900	140,157	0,463	37,913	0,154

Cu-1,5 GNS kompozit numunelerde uygulanan yüke bağlı olarak sertlik değerleri diğer numunelerde olduğu gibi azalmıştır. Cu-1,5 GNS kompozit numunelerin yüke bağlı elastik modülü ve akma dayanımı değerleri Cu-1 GNS kompozit numunelere kıyasla nispeten daha düşüktür (Tablo 6.4). Bununla birlikte elastik modülü üzerine presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının etkisi lineer değildir.



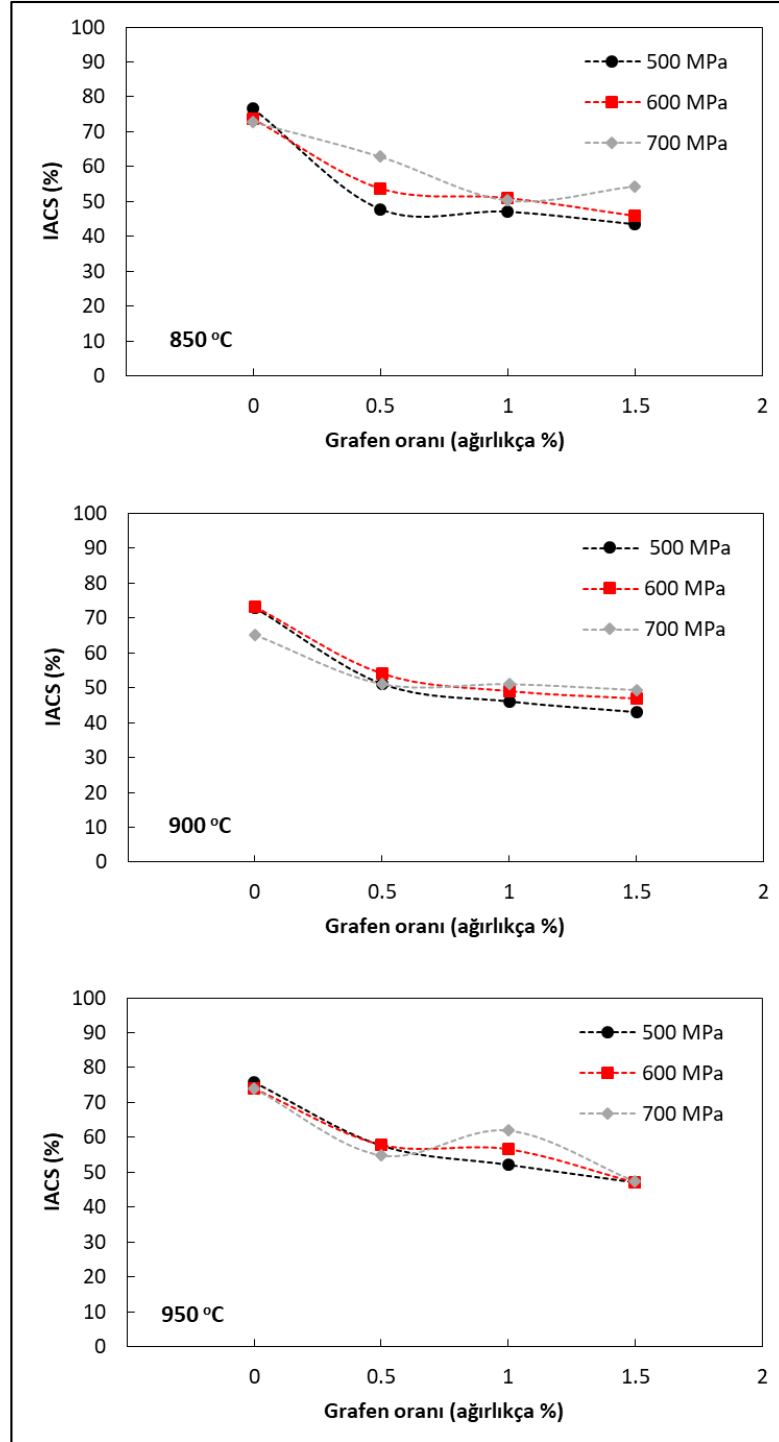
Şekil 6.13 Cu-1,5 GNS kompozit numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri

Tablo 6.4 Cu-1,5 GNS numunelerin sertlik ölçümü ile hesaplanan parametreler

	500 Mpa					600 Mpa					700 Mpa				
	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	F (N)	d (µm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)
850 °C	0,245	23,698	0,809	66,308	0,270	0,245	25,717	0,687	56,307	0,229	0,245	28,003	0,579	47,487	0,193
	0,490	36,193	0,694	56,854	0,231	0,490	38,893	0,601	49,235	0,200	0,490	41,937	0,517	42,348	0,172
	0,980	59,832	0,508	41,609	0,169	0,980	60,543	0,496	40,637	0,165	0,980	61,367	0,483	39,554	0,161
	1,960	90,868	0,440	36,079	0,147	1,960	99,890	0,364	29,856	0,121	1,960	97,287	0,384	31,476	0,128
	2,940	117,352	0,396	32,448	0,132	2,940	122,907	0,361	29,582	0,120	2,940	122,273	0,365	29,889	0,122
	4,900	152,710	0,390	31,936	0,130	4,900	159,310	0,358	29,345	0,119	4,900	155,380	0,376	30,848	0,125
900 °C	0,245	25,190	0,716	58,686	0,239	0,245	26,430	0,650	53,308	0,217	0,245	24,005	0,788	64,623	0,263
	0,490	36,600	0,678	55,598	0,226	0,490	37,665	0,641	52,498	0,214	0,490	37,525	0,645	52,891	0,215
	0,980	55,430	0,591	48,480	0,197	0,980	61,333	0,483	39,597	0,161	0,980	56,950	0,560	45,926	0,187
	1,960	99,926	0,364	29,835	0,121	1,960	94,247	0,409	33,539	0,136	1,960	88,407	0,465	38,116	0,155
	2,940	125,270	0,347	28,476	0,116	2,940	122,400	0,364	29,827	0,121	2,940	115,047	0,412	33,762	0,137
	4,900	165,470	0,332	27,201	0,111	4,900	154,090	0,383	31,367	0,128	4,900	146,250	0,425	34,820	0,142
950 °C	0,245	25,915	0,676	55,448	0,225	0,245	26,733	0,636	52,106	0,212	0,245	25,497	0,699	57,283	0,233
	0,490	40,290	0,560	45,880	0,187	0,490	38,543	0,612	50,133	0,204	0,490	39,200	0,591	48,467	0,197
	0,980	60,760	0,492	40,347	0,164	0,980	61,080	0,487	39,926	0,162	0,980	66,700	0,408	33,481	0,136
	1,960	91,788	0,431	35,360	0,144	1,960	97,287	0,384	31,476	0,128	1,960	107,180	0,316	25,933	0,105
	2,940	116,376	0,403	32,995	0,134	2,940	121,007	0,372	30,518	0,124	2,940	135,593	0,297	24,305	0,099
	4,900	152,400	0,391	32,066	0,130	4,900	159,440	0,357	29,297	0,119	4,900	175,420	0,295	24,203	0,098

## 6.6 Elektriksel iletkenlik

Şekil 6.14'de üretim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak Cu-GNS kompozit numunelerin elektrik iletkenliği gösterilmektedir. Elektrik iletkenlik değerleri %IACS olarak verilmiştir. IACS uluslararası tavllanmış bakır standardının kısaltmasıdır. Bu standarta göre tavllanmış saf bakırın iletkenliği 20 °C'de  $58 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$  olarak belirlenmiş ve bu değer %100 IACS olarak tanımlanmıştır. Sonuçlar Cu matrisine GNS'nin dahil edilmesinin GNS içermeyen referans numunesine kıyasla kompozitlerin elektrik iletkenliğini azalttığını göstermektedir. Grafenin elektrik iletkenliğinin bakırınkinden çok daha düşük olduğu ve bu nedenle elektrik iletkenliğini azalttığı dikkate alınmalıdır (Wei vd. 2014; Saboori vd. 2018; Hidalgo-Manrique vd. 2019; Moustafa ve Taha, 2020). Ek olarak metaller serbest elektronlar ve çekirdek arasındaki düşük etkileşim ile karakterize edilmektedirler. Cu serbest elektronların kolay hareketi nedeniyle iyi bir elektrik iletkenliğine sahiptir (Callister, 2007; Taha ve Zawrah, 2017). Diğer taraftan, grafen ilavesi serbest elektronlar ve çekirdek arasındaki bağların güçlendirilmesine katkıda bulunmakta ve bu tür nanokompozitlerin elektriksel iletkenliğinde gözle görülür bir azalmaya yol açmaktadır. Dahası, grafenin varlığı tane boyutunu azaltmanın yanı sıra dislokasyon yoğunluğunu arttırmaktan da sorumludur. Bu da tane sınırlarının artmasına ve bu nedenle iletkenlik yoluna karşı daha fazla bariyerin oluşumuna neden olabilmektedir (Sorkhe vd. 2014).



Şekil 6.14 Üretim parametrelerinin elektrik iletkenliği üzerine etkisi

En yüksek elektrik iletkenliği 76,59 IACS ile 500 MPa sıkıştırma basıncında preslenmiş ve 950 °C sıcaklıklarda sinterlenmiş GNS içermeyen referans numunesinde elde edilmiştir. Buna karşın en düşük elektrik iletkenliği ise 43,49 IACS ile 500 MPa sıkıştırma basıncında preslenmiş ve 850 °C sıcaklıklarda sinterlenmiş %1,5 GNS içeren kompozit numunelerde elde edilmiştir. Sıkıştırma basıncındaki artış ile birlikte

elektrik iletkenliğinde artış eğilimi görülmektedir. Fakat sinterleme sıcaklığının iletkenlik üzerine etkisi ise karmaşık bir korelasyon içerisindedir. Öte yandan Taha ve Moustafa (2020) tarafından yapılan çalışmada artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte iletkenliğin arttığı rapor edilmiştir. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen numuneler sinterleme işleminden sonra dahi yapıda mikro gözenekler içerebilmektedir. Bununla birlikte yapı içerisinde topaklanmış GNS'lerin iletkenliğe olumsuz yönde etki ettiği düşünülmektedir. Varol ve Çanakçı (2015) çok katmanlı grafen parçacıklarındaki oransal artışın topaklanmaya neden olduğunu ve bu bölgelerin elektron saçılmasına neden olarak iletkenliği zayıflattığını vurgulamıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki endüstriyel uygulamalar için Cu-GNS kompozitlerinin IAC değeri 50'nin üzerinde olması önerilmektedir (Grant vd. 1984).

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada grafen katkılı bakır matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bakır martis tozları içerisine ağırlıkça %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarda grafen parçacıkları ilave edilerek bilyeli karıştırıcıda (bilye/toz oranı 10:1) 400 rpm karıştırma hızında 120 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım tozlar 500, 600 ve 700 MPa basınç altında çelik bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler argon atmosferinde 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretim parametrelerinin numunelerin fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkilerini belirlemek amacıyla mikroyapı analizi, XRD analizi, sertlik ölçümü ve elektriksel iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Mekanik öğütmenin bir sonucu olarak küresel şekilli Cu tozları pulsu forma dönüşmüştür. Ayrıca aşırı deformasyon sonrası aşırı iş sertleşmesine maruz kalan matris parçacıklarında yer yer çatlaklar ve kırılmalar tespit edilmiştir.
- ✓ GNS içermeyen bakır numunelerde önemli ölçüde mikro gözeneğe rastlanmamıştır. Buna karşın GNS içeriğindeki artışın tane sınırlarında aglomerasyona ve gözeneğe yol açtığı tespit edilmiştir. Bu durum kompozitlerin mekanik özellikleri ve elektrik iletkenliğine olumsuz yönde etki etmiştir.
- ✓ Cu-GNS kompozitlerin bağıl yoğunluk değerleri üzerine GNS içeriğinin ve sıkıştırma basıncının sinterleme sıcaklığına kıyasla daha etkili olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ GNS içeriğindeki artış kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk değerlerini azaltırken, sıkıştırma basıncındaki artış bağıl yoğunluk değerlerini artırmıştır. En yüksek bağıl yoğunluk değeri 850 °C sıcaklıkta ve 700 MPa basınçta yoğunlaştırılan grafen katkısız numunede (%94,9) belirlenmiştir. En düşük

bağıl yoğunluk değeri ise aynı sıcaklıkta ve 500 MPa basınçta yoğunlaştırılan %1,5 GNS içeren numunede (%87,4) belirlenmiştir.

- ✓ GNS katkı oranındaki artış %1'e kadar sertlik, elastik modül ve akma dayanımına nispeten olumlu yönde etki ederken, bu değer %1,5'e ulaştığında belirtilen özelliklerin topaklanma ve gözeneklilikten dolayı zayıfladığı tespit edilmiştir.
- ✓ Cu-GNS kompozitlerin elektrik iletkenliği üzerine GNS içeriğinin ve sıkıştırma basıncının sinterleme sıcaklığına kıyasla daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Kompozitlerin elektrik iletkenliği artan GNS miktarı ile birlikte azalmıştır.
- ✓ En yüksek elektrik iletkenliği 76,59 IACS ( %0 GNS-500 MPa- 950 °C) ve en düşük elektrik iletkenliği 43,49 IACS (%1,5 GNS-500 MPa- 850 °C) olarak belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Abd-Elwahed, M. S., Wagih, A., & Najjar, I. M. R. (2020). Correlation between micro/nano-structure, mechanical and tribological properties of copper-zirconia nanocomposites. *Ceramics International*, 46(1), 56-65.
- Akkurt, B., & Yildirim, G. (2016). Change of mechanical performance and characterization with replacement of Ca by Gd nanoparticles in Bi-2212 system and suppression of durable tetragonal phase by Gd. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(12), 13034-13043.
- AL-Mosawi, B. T. S. (2017). The Synthesis and Properties of Advanced Aluminium and Copper Based Metal Matrix Composites.
- Asthana, R. (1998). Solidification Processing of Reinforced Metals: Properties of Cast Composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 151, pp. 351-398). Trans Tech Publications Ltd.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano letters*, 8(3), 902-907.
- Berber, S., Kwon, Y. K., & Tománek, D. (2000). Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes. *Physical review letters*, 84(20), 4613.
- Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., ... & Stormer, H. L. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid state communications*, 146(9-10), 351-355.
- Callister, W. D. (2007). *Materials science and engineering an introduction*. John Wiley.
- Cao, M., Xiong, D. B., Tan, Z., Ji, G., Amin-Ahmadi, B., Guo, Q., ... & Zhang, D. (2017). Aligning graphene in bulk copper: Nacre-inspired nanolaminated architecture coupled with in-situ processing for enhanced mechanical properties and high electrical conductivity. *Carbon*, 117, 65-74.
- Cao, M., Xiong, D. B., Yang, L., Li, S., Xie, Y., Guo, Q., ... & Zhang, X. (2019). Ultrahigh electrical conductivity of graphene embedded in metals. *Advanced Functional Materials*, 29(17), 1806792.
- Castro, R., & Van Benthem, K. (Eds.). (2012). *Sintering: mechanisms of convention nanodensification and field assisted processes* (Vol. 35). Springer Science & Business Media.

- Chawla, K. K. (2012). Metal matrix composites. In *Composite Materials* (pp. 197-248). Springer, New York, NY.
- Chen, F., Ying, J., Wang, Y., Du, S., Liu, Z., & Huang, Q. (2016). Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites. *Carbon*, *96*, 836-842.
- Chen, S., Wu, Q., Mishra, C., Kang, J., Zhang, H., Cho, K., ... & Ruoff, R. S. (2012). Thermal conductivity of isotopically modified graphene. *Nature materials*, *11*(3), 203-207.
- Chu, K., & Jia, C. (2014). Enhanced strength in bulk graphene-copper composites. *physica status solidi (a)*, *211*(1), 184-190.
- Clyne, T. W. (2000). An introductory overview of MMC systems, types, and developments.
- Dutkiewicz, J., Ozga, P., Maziarz, W., Pstruś, J., Kania, B., Bobrowski, P., & Stolarska, J. (2015). Microstructure and properties of bulk copper matrix composites strengthened with various kinds of graphene nanoplatelets. *Materials Science and Engineering: A*, *628*, 124-134.
- El-Eskandarany, M. S. (2013). *Mechanical alloying: For fabrication of advanced engineering materials*. Univ. Press of Mississippi.
- Ezatpour, H. R., Sajjadi, S. A., Sabzevar, M. H., & Huang, Y. (2014). Investigation of microstructure and mechanical properties of Al6061-nanocomposite fabricated by stir casting. *Materials & Design*, *55*, 921-928.
- Frank, I. W., Tanenbaum, D. M., van der Zande, A. M., & McEuen, P. L. (2007). Mechanical properties of suspended graphene sheets. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, *25*(6), 2558-2561.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2010). The rise of graphene. In *Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature journals* (pp. 11-19).
- Gnjidic, Z., Grbovic, J., Mitkov, M., & Bozic, D. (2003). Influence of SiC particles on compressive strength of sintered aluminium alloy. *Powder metallurgy*, *46*(1), 21-24.
- Gómez-Navarro, C., Burghard, M., & Kern, K. (2008). Elastic properties of chemically derived single graphene sheets. *Nano letters*, *8*(7), 2045-2049.

- Grant, N. J., Lee, A., & Lou, M. (1984). High conductivity copper and aluminum alloys. *American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York*, 103.
- Güler, Ö., & Bağcı, N. (2020). A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6808-6833.
- Hidalgo-Manrique, P., Lei, X., Xu, R., Zhou, M., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2019). Copper/graphene composites: a review. *Journal of materials science*, 1-54.
- Huang, B., Hishinuma, Y., Noto, H., & Muroga, T. (2019). Mechanochemical processing of Cu-Y2O3 alloy by MA-HIP for heat sink materials application. *Fusion Engineering and Design*, 140, 33-40.
- Huda, M. D., Hashmi, M. S. J., & El-Baradie, M. A. (1995). MMCs: materials, manufacturing and mechanical properties. In *Key Engineering Materials* (Vol. 104, pp. 37-64). Trans Tech Publications Ltd.
- Kala, H., Mer, K. K. S., & Kumar, S. (2014). A review on mechanical and tribological behaviors of stir cast aluminum matrix composites. *Procedia Materials Science*, 6, 1951-1960.
- Koli, D. K., Agnihotri, G., & Purohit, R. (2013). Properties and characterization of Al-Al2O3 composites processed by casting and powder metallurgy routes. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, 2(4), 486-496.
- Koli, D. K., Agnihotri, G., & Purohit, R. (2014). A review on properties, behaviour and processing methods for Al-nano Al2O3 composites. *Procedia Materials Science*, 6, 567-589.
- Konakov, V. G., Kurapova, O. Y., Solovyeva, E. N., Lomakin, I. V., & Archakov, I. Y. (2018). Synthesis, structure and mechanical properties of bulk “copper-graphene” composites. *Reviews on Advanced Materials Science*, 57(2), 151-157.
- Kumar, H. P., & Xavior, M. A. (2014). Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review. *Procedia Engineering*, 97, 1033-1040.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385-388.

- Li, J. F., Zhang, L., Xiao, J. K., & Zhou, K. C. (2015b). Sliding wear behavior of copper-based composites reinforced with graphene nanosheets and graphite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(10), 3354-3362.
- Li, W., Li, D., Fu, Q., & Pan, C. (2015a). Conductive enhancement of copper/graphene composites based on high-quality graphene. *RSC advances*, 5(98), 80428-80433.
- Li, X., Yan, S., Chen, X., Hong, Q., & Wang, N. (2020). Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced copper matrix composites prepared by in-situ CVD, ball-milling, and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 155182.
- Liu, J. (2014). *Fabrication of composite materials with addition of graphene platelets* (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites science and technology*, 65(15-16), 2526-2540.
- Morozov, S. V., Novoselov, K. S., Katsnelson, M. I., Schedin, F., Elias, D. C., Jaszczak, J. A., & Geim, A. K. (2008). Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer. *Physical review letters*, 100(1), 016602.
- Moustafa, E. B., & Taha, M. A. (2020). Preparation of high strength graphene reinforced Cu-based nanocomposites via mechanical alloying method: microstructural, mechanical and electrical properties. *Applied Physics A*, 126(3), 1-16.
- Murty, B. S., & Ranganathan, S. J. M. R. (1998). Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling. *International materials reviews*, 43(3), 101-141.
- Nika, D. L., & Balandin, A. A. (2012). Two-dimensional phonon transport in graphene. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 24(23), 233203.
- Nishida, Y. (2013). *Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling*. Springer Science & Business Media.
- Poot, M., & van der Zant, H. S. (2008). Nanomechanical properties of few-layer graphene membranes. *Applied Physics Letters*, 92(6), 063111.
- Pop, E., Varshney, V., & Roy, A. K. (2013). Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *arXiv preprint arXiv:1301.6181*.
- Qin, Y. Q., Wu, Y. C., Huang, X. M., Wang, Y., Cui, J. W., Hong, Y., & Zheng, Y. C. (2015). Effect of Heat Treatment on Conductivity of Cu-1.0 Cr-0.12 Zr Alloy.

In *Advanced Materials Research* (Vol. 1061, pp. 7-12). Trans Tech Publications Ltd.

- Reddy, C. D., Rajendran, S., & Liew, K. M. (2006). Equilibrium configuration and continuum elastic properties of finite sized graphene. *Nanotechnology*, 17(3), 864.
- Rezvani, M. R., & Shokuhfar, A. (2012). Synthesis and characterization of nano structured Cu–Al–Mn shape memory alloy by mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 532, 282-286.
- Saboori, A., Pavese, M., Badini, C., & Fino, P. (2018). A novel approach to enhance the mechanical strength and electrical and thermal conductivity of Cu-GNP nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(1), 333-345.
- Salvo, C., Mangalaraja, R. V., Udayabashkar, R., Lopez, M., & Aguilar, C. (2019). Enhanced mechanical and electrical properties of novel graphene reinforced copper matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 777, 309-316.
- Seal, S., Kuiry, S. C., Georgieva, P., & Agarwal, A. (2004). Manufacturing nanocomposite parts: present status and future challenges. *MRS bulletin*, 29(1), 16-21.
- Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S. U., Akbari, M. K., Fakhrhoseini, S. M., Khayyam, H., Pakseresht, A. H., ... & Davim, J. P. (2017). Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 92, 70-96.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., & Seal, S. (2011). Graphene based materials: past, present and future. *Progress in materials science*, 56(8), 1178-1271.
- Sorkhe, Y. A., Aghajani, H., & Tabrizi, A. T. (2014). Mechanical alloying and sintering of nanostructured TiO<sub>2</sub> reinforced copper composite and its characterization. *Materials & Design*, 58, 168-174.
- Surappa, M. K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28(1-2), 319-334.
- Suryanarayana, C. (2011). Synthesis of nanocomposites by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, S229-S234.
- Suryanarayana, C., Ivanov, E., & Boldyrev, V. V. (2001). The science and technology of mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 304, 151-158.

- Tabandeh-Khorshid, M., Kumar, A., Omrani, E., Kim, C., & Rohatgi, P. (2020). Synthesis, characterization, and properties of graphene reinforced metal-matrix nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107664.
- Taha, M. A., & Zawrah, M. F. (2017). Effect of nano ZrO<sub>2</sub> on strengthening and electrical properties of Cu-matrix nanocomposites prepared by mechanical alloying. *Ceramics International*, 43(15), 12698-12704.
- Terry, B., & Jones, G. (1990). Metal matrix composites: current developments and future trends in industrial research and applications. *Elsevier Advanced Technology, Mayfield House, 256 Banbury Rd, Oxford OX 2 7 DH, UK, 1990. 154.*
- Theivasanthi, T., & Alagar, M. (2010). X-ray diffraction studies of copper nanopowder. *arXiv preprint arXiv:1003.6068.*
- Torralba, J. D., Da Costa, C. E., & Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 203-206.
- Van Lier, G., Van Alsenoy, C., Van Doren, V., & Geerlings, P. (2000). Ab initio study of the elastic properties of single-walled carbon nanotubes and graphene. *Chemical Physics Letters*, 326(1-2), 181-185.
- Varol, T., & Canakci, A. (2015). Microstructure, electrical conductivity and hardness of multilayer graphene/copper nanocomposites synthesized by flake powder metallurgy. *Metals and materials international*, 21(4), 704-712.
- Wang, X., Li, J., & Wang, Y. (2016). Improved high temperature strength of copper-graphene composite material. *Materials Letters*, 181, 309-312.
- Wei, B. W., Qu, D., Hu, C. F., Li, F. Z., Zhou, T. L., Xie, R. J., & Zhou, Z. M. (2014). Synthesis and physical properties of graphene nanosheets reinforced copper composites. In *Advanced Materials Research* (Vol. 833, pp. 310-314). Trans Tech Publications Ltd.
- Wejrzanowski, T., Grybczuk, M., Chmielewski, M., Pietrzak, K., Kurzydowski, K. J., & Strojny-Nedza, A. (2016). Thermal conductivity of metal-graphene composites. *Materials & design*, 99, 163-173.
- Xiang, S., Wang, X., Gupta, M., Wu, K., Hu, X., & Zheng, M. (2016). Graphene nanoplatelets induced heterogeneous bimodal structural magnesium matrix composites with enhanced mechanical properties. *Scientific reports*, 6, 38824.
- Zalaoglu, Y., Akkurt, B., Oz, M., & Yildirim, G. (2017). Transgranular region preference of crack propagation along Bi-2212 crystal structure due to Au

nanoparticle diffusion and modeling of new systems. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(17), 12839-12850.

Zhang L., Sliding Wear Behavior Of Copper-Based Composites Reinforced With Graphene Nanosheets And Graphite, *Trans. Nonferrous Met. Soc.* , 2015, (25), 3354–3362

Zhang, P., Jie, J., Gao, Y., Li, H., Cao, Z., Wang, T., & Li, T. (2015a). Preparation and properties of TiB<sub>2</sub> particles reinforced Cu–Cr matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*, 642, 398-405.

Zhang, Z., Sheng, Y., Xu, X., & Li, W. (2015b). Microstructural features and mechanical properties of in situ formed ZrB<sub>2</sub>/Cu composites. *Advanced Engineering Materials*, 17(9), 1338-1343.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmed Basheer Mohammed ALBARTOULI  
Doğum Yeri ve Yılı : Libya – Banigazi , 1978  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce ve Başlangıç Seviyede Türkçe  
E-posta :ahmed.bsher.1977@gmail.com



### **Eğitim Durumu**

Lise : Naji Alfonso Mekanik Meslekler Orta Enstitüsü, 1995  
Lisans : Al-Sabri Şehitleri Makine ve Elektrik yüksek okulu, 2000

### **Mesleki Deneyim**

İş Yeri : Al-Sabri Şehitleri Makine ve Elektrik yüksek okulu, 2002  
İş Yeri : Banigazi Ulusal Teknik ve Teknik Eğitim Kurumu, 2005-halen