

**T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ BAKIR MATRİSLİ  
KOMPOZİTLERİN YENİ BİR KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE  
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CANER BULUT**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TEZ DANIŞMANI  
Yrd. Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN**

**BİNGÖL-2017**

**T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ BAKIR MATRİSLİ  
KOMPOZİTLERİN YENİ BİR KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE  
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CANER BULUT**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TEZ DANIŞMANI  
Yrd. Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN**

**BİNGÖL-2017**



T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ BAKIR MATRİSLİ  
KOMPOZİTLERİN YENİ BİR KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE  
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Caner BULUT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 31/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.  
Ali Kaya GÜR  
Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr.  
Zülküf BALALAN  
Üye

Yrd. Doç. Dr.  
Özgün ÖZGÜN  
Üye

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. İbrahim Y. ERDOĞAN  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN'e teşekkür ederim.

Mekanik testlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen değerli dostum Yrd. Doç. Dr. Tahir AKGÜL'e ve yazım aşamasındaki desteklerinden dolayı değerli meslektaşım Öğr. Gör. Mustafa ÖCAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime; tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşim ve çocuklarıma özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma, BAP-376-315-2015 proje numarası ile Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Çalışmalar sırasında gösterdikleri ilgi ve harcadıkları emeklerinden dolayı BÜBAP birimi çalışanlarına ve Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

**Caner BULUT**  
**Bingöl 2017**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	4
2.1. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	4
2.1.1. Avantajları.....	4
2.1.2. Dezavantajları.....	5
2.2. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları.....	5
2.3. Toz Metalurjisi Yönteminde Kullanılan Tozların Özellikleri ve Üretimi....	7
2.3.1. Tozların Özellikleri.....	7
2.3.2. Tozların Üretimi.....	9
2.4. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Parça Üretim Aşamaları.....	14
2.4.1. Tozların Hazırlanması.....	14
2.4.2. Presleme.....	15
2.4.3. Sinterleme.....	17
2.4.4. Sinterleme Atmosferi.....	21
2.5. Son İşlemler.....	22
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	23
3.1. Neden Kompozit Malzeme.....	24

3.2. Kullanım Alanları.....	26
3.3. Kompozitlerin Yapısı.....	28
3.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	30
3.4.1. Takviye Elemanına Göre Kompozitler.....	31
3.4.1.1. Fiber-Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	31
3.4.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	33
3.4.2. Yapısal Kompozitler.....	34
3.4.2.1. Tabakalı Kompozitler.....	34
3.4.2.2. Karma Yapılı Kompozitler.....	34
3.4.3. Matris Malzemesine Göre Kompozitler.....	35
3.4.3.1. Polimer Matrisli Kompozitler.....	35
3.4.3.2. Seramik Matrisli Kompozitler.....	36
3.4.3.3. Metal Matrisli Kompozitler.....	36
3.5. Karbon Nanotüpler (CNT).....	40
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	44
4.1. Malzeme.....	44
4.2. Yöntem.....	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

T/M	: Toz metalurjisi
CNT	: Karbon nanotüp
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
Fe	: Demir
MMK	: Metal matrisli kompozit
XRD	: X-ışınları difraksiyon analizi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirmeli elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
YMK	: Yüzey merkezli kübik
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
nm	: Nanometre
HB	: Brinell sertliği
HV	: Vickers sertliği

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	T/M ile üretilmiş çeşitli ürünler .....	6
Şekil 2.2.	Toz metalurjisinin kullanım alanları .....	6
Şekil 2.3.	Toz metalurjisinde bazı partikül şekilleri ve tanımları .....	8
Şekil 2.4.	Hall akış aparatı .....	8
Şekil 2.5.	Mekanik öğütme .....	10
Şekil 2.6.	Atomizasyon yöntemi; a) su atomizasyonu, b) gaz atomizasyonu.....	11
Şekil 2.7.	Santrifüj atomizasyon yöntemleri; a) döner disk, b) döner kupa, c) döner çark, d) döner elektrot.....	11
Şekil 2.8.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiş değişik tozların yüzey genel görüntüleri; a) alüminyum, b) bakır (sıvı atomizasyonu), c) magnezyum, d) titanyum, e) demir, f) bakır (gaz atomizasyonu).....	12
Şekil 2.9.	Elektrolitik hücreden metal tozlarının oluşumu.....	12
Şekil 2.10.	Karıştırıcı geometrileri; a) silindirik, b) döner küp, c) çift taraflı konik, d) V tipi .....	15
Şekil 2.11.	Presleme işleminin basamakları; 1) işlem başlangıcı, 2) toz doldurma, 3) presleme başlangıcı, 4) preslemenin bitişi, 5) preslenmiş parçanın çıkarılması .....	16
Şekil 2.12.	Presleme basıncının artışı ve taneciklerin kalıp içindeki durumu .....	16
Şekil 2.13.	Sinterleme sıcaklığının kompakt özelliklerine etkisi.....	18
Şekil 2.14.	Serbest tozların sinterleme aşamaları.....	18
Şekil 2.15.	Sinterlemenin ilk aşamasında tanecikler arası boyun oluşumu.....	19
Şekil 2.16.	Katı faz sinterleme aşamalarının şematik olarak gösterilmesi .....	19
Şekil 2.17.	Sıvı faz sinterlemesinde mikro yapısal değişimler.....	20
Şekil 3.1.	Kompozit yapıların çeşitli kullanım alanları .....	28

Şekil 3.2.	Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar; a) doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) kaplanmış takviye kullanımı, c) karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu.....	30
Şekil 3.3.	Kompozit yapıların ana bileşenlerinin şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.4.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	30
Şekil 3.5.	Çeşitli şekillerde takviye edilmiş kompozit malzeme yapıları; a) partikül takviyeli, b) kısa fiber takviyeli, c) uzun fiber takviyeli, d) lamine yapılı kompozit malzeme.....	31
Şekil 3.6.	Elyaf ve reçine kullanarak kompozit malzemenin üretilmesi.....	32
Şekil 3.7.	Fiber takviyeli kompozitler için temel yapı blokları.....	32
Şekil 3.8.	Yapısal kompozit malzemelerin yapıları ve bileşenleri.....	34
Şekil 3.9.	Takviye malzemesinin geometrisine göre MMK'ler.....	37
Şekil 3.10.	Farklı takviye geometrisine sahip MMK'lerin mikroskop görüntüleri...	37
Şekil 3.11.	Karbon nanotüp yapıları; a) tek duvarlı, b) çok duvarlı.....	41
Şekil 3.12.	CNT' in grafit tabaka ve atom dizilişleri.....	42
Şekil 4.1.	Çalışmada kullanılan; a) Cu tozunun SEM görüntüsü, b) Cr tozunu SEM görüntüsü, c) CNT'lerin TEM görüntüsü.....	44
Şekil 4.2.	a) Karıştırma işleminde kullanılan ultrasonik banyo cihazı, b) özel olarak tasarlanmış pervaneli karıştırıcı.....	46
Şekil 4.3.	Sıcak presleme işleminin yapıldığı cihaz.....	46
Şekil 4.4.	Çekme testlerinde kullanılan numuneler.....	47
Şekil 4.5.	a) Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihaz, b) çekme testlerinde kullanılan cihaz.....	48
Şekil 5.1.	Cu/CNT toz karışımından alınan SEM görüntüleri; a) düşük büyütme, b) yüksek büyütme.....	50
Şekil 5.2.	Sıcak preslenmiş numunelerden alınmış XRD analizi.....	51
Şekil 5.3.	Üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %3 CNT, b) %6 CNT, c) %3 CNT + Cr, d) %6 CNT + Cr.....	52
Şekil 5.4.	%3 CNT+Cr numunesinden alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler.....	53
Şekil 5.5.	Üretilen kompozitlerde ulaşılan bağıl yoğunluk değerleri; a) sıcak presleme işleminden sonra, b) ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra...	55

Şekil 5.6.	Üretilen kompozitlerden ölçülen sertlik değerleri; a) sıcak presleme işleminden sonra, b) ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra.....	57
Şekil 5.7.	Çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim uzama eğrileri; a) sıcak presleme işleminden sonra, b) ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra...	59
Şekil 5.8.	%3 CNT+Cr numunesinin farklı büyütmelemlerle alınmış kırılma yüzeyi SEM görüntüleri; a) 250X,b) 1000X, c) 5000X, d) 10000X.....	60



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Tozların önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler.....	9
Tablo 2.2.	Bazı toz malzemeler ve üretim yöntemleri.....	13
Tablo 3.1.	Bazı MMK malzemelerin mekanik özellikleri.....	38
Tablo 3.2.	Bazı metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları.....	39
Tablo 3.3.	Karbon nanotüplerin mekanik özelliklerinin diğer malzemeler ile karşılaştırılması.....	42
Tablo 3.4.	Karbon izomerlerine ait temel fiziksel özellikler.....	43
Tablo 4.1.	Üretilen kompozit numunelerin hacimsel % cinsinden bileşenleri.....	45

# KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN YENİ BİR KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

## ÖZET

Bu çalışmada, saf bakır tozu içerisine hacimsel olarak farklı oranlarda karbon nanotüp (CNT) ilavesi yapılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. CNT takviyeli kompozitlerin üretiminde karşılaşılan en büyük problem CNT'lerin matris içerisinde homojen dağıtılamaması olup, bu problemin aşılabilmesi için yeni bir karıştırma tekniği uygulanmıştır. Bazı numunelere CNT'lere ek olarak özelliklere etkilerini belirlemek amacıyla Cr elementi ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlara sıcak presleme işlemi uygulanarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla sıcak presleme işleminden sonra yüksek basınçlı ikinci bir yoğunlaştırma işlemi uygulanmıştır. Yoğunluk ölçümleri, mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler ile hem sıcak preslenmiş numunelerin hem de yüksek basınçla ikinci yoğunlaştırma işlemi uygulanmış numunelerin özellikleri karakterize edilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon X-ışınları analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde sertlik ölçümleri ve çekme testlerinden yararlanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri, uygulanan karıştırma işlemi ile CNT'lerin Cu matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabildiğini göstermiştir. Yoğunluk ölçümlerinden CNT oranındaki artışın, elde edilebilen bağıl yoğunluk değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Sıcak presleme işleminden sonra uygulanan yüksek basınçlı yoğunlaştırma işleminin bağıl yoğunluğu ve buna bağlı olarak tüm mekanik özellikleri artırdığı tespit edilmiştir. Cr ilavesinin, üretilen kompozitlerin sertlik ve mukavemetini artırdığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Cu/CNT kompozit, yeni bir karıştırma tekniği, Cr ilavesi, sıcak presleme, ikinci yoğunlaştırma işlemi.

# **PRODUCTION OF CARBON NANOTUBE REINFORCED COPPER MATRIX COMPOSITES WITH A NOVEL MIXING TECHNIQUE AND CHARACTERIZATION**

## **ABSTRACT**

In this study, composite materials were produced by adding carbon nanotubes (CNTs) to pure copper powder at volumetrically different rates. The biggest problem faced in the production of CNT-reinforced composites is that CNTs do not distribute homogeneously in the matrix, and a novel mixing technique was applied to overcome this problem. Cr element was added to some specimens in addition to CNTs to determine its effects on the properties. Hot pressing was applied to the prepared mixtures, and the composite production was performed. A second high-pressure densification process was applied following the hot pressing process for developing the properties of the composites produced. The properties of both the hot-pressed specimens and the specimens to which a second high-pressure densification process was applied were characterized with the density measurements, microstructure examinations, and mechanical tests. The microstructural characterization was performed with the X-ray diffraction (XRD) analysis, scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectrometry (EDS). The hardness measurement and tensile tests were used for the determination of mechanical properties. The microstructure examinations showed that CNTs could be distributed homogeneously in the Cu matrix with the mixing process applied. It was determined from the density measurements that the increase in the CNT rate decreased the relative density value obtained. It was found out that the high-pressure densification process applied following the hot-pressing process increased the relative density and thus, all mechanical properties. It was observed that the Cr addition increased the hardness and strength of the composites produced.

**Keywords:** Cu/CNT composite, a novel mixing technique, Cr addition, hot pressing, second high-pressure densification process.

## 1. GİRİŞ

Sahip olduğu üstün elektrik ve ısıl iletkenliği sayesinde bakır, metalik malzemeler içerisinde özel bir konuma sahiptir (Akramifard et al. 2014). Bakır, üstün elektrik ve ısıl iletkenliğin yanında aynı zamanda yüksek şekillendirilebilirlik ve tokluk (Barmouz et al. 2011a) ile iyi korozyon ve oksidasyon direnci (Barmouz et al. 2011b) gibi çekici özellikler de sergilemektedir. Sahip olduğu bu özelliklere rağmen düşük mukavemet ve yetersiz aşınma direnci bakır ve alaşımlarının kullanımını sınırlayan en büyük eksiklikleridir (Ziyuan and Deqing 2000). Bakırın mekanik özelliklerini geliştirmek için izlenen yolların başında alaşımlama yaparak çökelme sertleşmesi ısıl işlemleri uygulamak (Sobhani M et.al 2013) veya oksitler, borürler, karbürler ve nitrürler gibi takviye elemanları ile bakır matrisli kompozitler oluşturmak gelmektedir (Gu et al. 2007; Bozic et al. 2009). Yüksek elektrik ve ısıl iletkenlikleri ile elektronik, petrokimya ve havacılık endüstrileri gibi uygulama alanları için oldukça çekici olan Cu matrisli kompozitlerin geliştirilmesi üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Ziemnicka-Sylwester 2014).

CNT'ler ilk olarak 1991 yılında keşfedilmişlerdir (Iijima 1991). Bugün CNT'lerin yüksek mukavemete, yüksek elastik modüle ve hafifliğe sahip oldukları çok iyi bilinmektedir (Komarov and Mironov 2004).

Daha ucuz ve kusursuz CNT'lerin geliştirilmesi üzerine çok sayıda araştırma bulunmakla birlikte, sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlikleri sayesinde CNT'lerin bulk malzemeler içerisinde ilave edilmesiyle yeni malzemelerin elde edilmesi üzerine de çalışmalar yapılmaktadır (Esawi and El Borady 2008). Sahip oldukları üstün özelliklerinden dolayı CNT takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin gelecekte yapısal malzemelerin rolünü üstlenmesi beklenmektedir (Zhan et al. 2003; Sun et al. 2007). Fakat CNT takviyeli metal matrisli kompozitlerin bulk olarak üretilmesinde halen kesin başarıya ulaşamamıştır. CNT'lerin ilave edilmesi ile malzeme üretiminde karşılaşılan bir takım ciddi problem bulunmaktadır. Bu problemlerin başında birbirlerine yapışma eğilimlerinden dolayı CNT'lerin matris içerisinde homojen olarak

dağıtılmalarının zor olması gelmektedir (Esawi and El Borady 2008). Henüz tam olarak çözülememiş olan bu problemin çözümü üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Esawi and El Borady 2008). İletken ve yüksek mukavemetli polimerlerin elde edilmesi amacıyla CNT'lerin polimer matris içerisine ilave edilmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen mekanik özelliklerde önemli bir artıştan söz edilememiştir. Bu çalışmalarda karşılaşılan zorluklar CNT'lerin topaklanması olması ve belirli bir düzene göre matris içerisine eklenememeleri olmuştur. Az sayıda araştırmacı tarafından metal ve seramik matrisler üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Nanotüp preformlara metal emdirilmesi üzerine yapılan başarısız denemelerden sonra alternatif teknikler aranmaya başlanmıştır (Esawi and Morsi 2008). CNT'lerin metaller içerisine homojen bir şekilde ilave edilebilmesinde karşılaşılan zorluklarda metal partiküllerinin zeta potansiyellerinin kontrolünün zorluğu ve CNT'ler ile metaller arasındaki yüksek yoğunluk farklarının rolü büyüktür. Bu nedenle CNT takviyeli metal matrisli kompozitlerin mekanik alaşımlama yaklaşımı ile bulk olarak üretilebilmesi için çalışmalar başlamıştır (Kuzumaki et al. 1998; George et al. 2005). Başarılı sonuçların elde edildiği birkaç çalışmada kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile kaplanmış düşük miktardaki çok duvarlı CNT'lerin hem Al hem de Mg matrisler ile T/M teknikleri kullanılarak bir araya getirilebileceği bildirilmiştir (Zhong et al. 2003; Morelli et al. 2004). Söz konusu çalışmalardan birinde homojen bir karışım elde edilebilmesi gayesiyle bir turbula karıştırıcıda düşük enerjili bilyalı öğütme işlemi gerçekleştirildikten sonra sıcak presleme, sinterleme ve sıcak izostatik presleme işlemleri yapılmıştır. Sonuçta elde edilen malzemelerin sünek davranış sergilediği, fakat elastisite modüllerinde sağlanan artışın çok az olduğu görülmüştür (Zhong et al. 2003; Morelli et al. 2004). Bu tür malzemelerin üretiminde gelecek vadeden T/M teknikleri üzerine yapılacak kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğu bildirilmektedir (Esawi and Morsi 2008).

CNT takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde karşılaşılan bir diğer önemli problem matris CNT ara yüzeyindeki yetersiz bağlanmadır (Esawi and El Borady 2008; Meguid and Sun 2004). Matris-CNT ara yüzeyinde yeterli bağlanmanın sağlanamaması nedeniyle üretilen kompozitler bu bölgelerden hasara uğramaktadırlar (Esawi and El Borady 2008). Özellikle Cu/CNT kompozitlerde ıslatmanın olmaması nedeniyle saf bakır ile CNT'ler arasında çok zayıf bir ara yüzey bağı kurulduğu bilinmektedir (Daoush et al. 2009; Chu et al. 2010). Bu problemin üstesinden gelinmesi amacıyla en çok izlenen yol

CNT'lerin Ni, Cu ve Mo gibi uygun bir metal ile kaplanarak ara yüzey enerjisini azaltmak olmuştur (Ke Chu et al. 2013). Ancak maalesef kaplama tabakasının kompozitlerin üretimi esnasında uygulanan yoğunlaştırma işlemleri esnasında hasara uğraması ve buna bağlı olarak kompozitin özelliklerinin olumsuz etkilenmesi bu yöntemin belirgin bir dezavantajıdır (Meguid and Sun 2004). Ayrıca karmaşık işlem basamakları ile gerçekleştirilen kaplama işlemleri üretim maliyetinin artmasına da yol açmaktadır (Ke Chu et al. 2013). Cu-Karbon kompozitlerde bazı reaksiyonlar ile ara yüzeydeki ıslatma ve bağlanmayı artırmak için matrisin kuvvetli karbür yapıcı elementlerle alaşımlanması izlenebilecek bir diğer yol olarak rapor edilmektedir (Datta et al 1999; Schubert et al. 2008). Bu amaçla Cu/CNT kompozitlerde Cr elementini alaşım elementi olarak kullanan çalışmalar yapılmıştır (Chu et al. 2013).

Bu çalışmada, saf bakır tozu içerisine hacimsel olarak farklı oranlarda CNT ilavesi yapılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Ara yüzey bağına, dolayısıyla yoğunluk ve mekanik özelliklere etkisini belirlemek amacıyla bazı numunelere Cr elementi ilave edilmiştir. CNT takviye elemanının Cu matris içerisinde homojen dağılımını sağlayabilmek amacıyla yeni bir karıştırma tekniği kullanılmıştır. CNT ve Cr ilavesi yapılmış Cu tozu sıcak presleme işlemi ile kompozit malzeme haline getirilmiştir. Sıcak presleme işleminden sonra üretilen numunelere yüksek basınçlı ikinci bir yoğunlaştırma işlemi uygulanmıştır. Üretilen kompozit malzemeler mikroyapı incelemeleri ve mekanik testlerle karakterize edilerek elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak üretim prosesinin başarısı değerlendirilmiştir.

## **2. TOZ METALURJİSİ**

Toz metalurjisi, metal ve seramik tozlarının ergitilmeden basınç ve sıcaklık etkisiyle istenilen şekle sahip dayanıklı parçalar haline getirilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir (Hiçyılmaz 1999). Toz metalurjisi, tozların üretimini, üretilen tozların sıkıştırılarak şekillendirilmesini, şekil kazandırılan ham parçaların sinterlenmesini ve ihtiyaç duyulması halinde çapak alma, yağ emdirme gibi ilave işlem basamaklarını içerir (Saritaş ve Doğan 1994).

Toz metalurjisi, diğer üretim yöntemleriyle üretilmesi oldukça zor olan alaşım sistemlerinden çeşitli parçaların kolaylıkla ürün haline getirilmesini mümkün kılmaktadır (German 1996). Bu yöntem sayesinde zor ve karmaşık şekilli parçalar daha ekonomik bir şekilde ürün haline dönüştürülebilmektedir (Yavuz ve Gürler 2002).

### **2.1. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları**

#### **2.1.1. Avantajları**

- Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçalarda yüksek boyutsal hassasiyet elde edilebilmektedir,
- Küçük boyutlu ve karmaşık şekilli parçaların seri üretimine son derece uygundur,
- Belirli seviyede gözenek ve geçirgenlik elde edilebilir,
- İmal edilen ürünlerin büyük bölümünde talaşlı işleme gereksinim duyulmaz,
- Malzeme kaybı son derece azdır (Saritaş ve Doğan 1994).
- Birbiri içerisinde çözünemeyen farklı karakterdeki alaşım tozları bir araya getirilerek imalat gerçekleştirilebilir (Demir 1992).
- Ergime sıcaklığına ulaşılması çok yüksek maliyetler gerektiren platin, tungsten ve molibden gibi metaller T/M tekniği ile ergitilmeden ürün haline dönüştürülebilir (Baksan ve Gürler 2003).
- İşgücü ihtiyacı azdır

- Üretim basamakları basittir,
- Yüksek saflığa sahip ürünler imal edilebilir (Çiğdem 2006).
- Metal olmayan malzemeler, metalik malzemeler içerisinde homojen bir şekilde dağılılabılır (Boz 2003).
- Üretilen ürünlerde yüksek yüzey kalitesi elde edilir.
- Üretilen parçalar üstün mikroyapısal özelliklere sahiptir. (Kaysser and Rzenitzek 1990).

### **2.1.2. Dezavantajları**

- Yapılarında bulunan gözeneklerden dolayı T/M ürünleri, döküm ve dövme ürünlere göre zaman zaman daha düşük mekanik özellikler sergilerler. Bu mekanik özellikleri iyileştirmek için ikincil işlemlere gereksinim duyulabilir.
- Büyük kütleli parçaların üretimi zordur.
- Üretim için gerekli olan kalıp ve cihazların maliyeti yüksektir.
- Karmaşık şekilli ürünlerin imalatı bazen mümkün olmayabilir.
- Üretimde kullanılan yüksek saflıktaki tozlar oldukça pahalıdır (Çiğdem 2006).
- Presleme esnasında homojen basınç dağılımı olmadığından dolayı parça kesiti boyunca özelliklerde ve yoğunlukta değişiklikler görülebilmektedir (Demir 1992).
- Makine ve teçhizat yönünden maliyet yüksektir,

### **2.2. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları**

Toz metalurjisinin uygulama sahası günümüz endüstrisinde oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Otomotiv endüstrisi, uzay endüstrisi, havacılık, nükleer endüstri, tıp ve dişçilik, elektrik-elektronik sanayi, savunma sanayi T/M'nin uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir. Kendinden yağlamalı yataklar, dişli çarklar, mıknatıslar, makine parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, elektrik kontakları, zırh delici mermiler, ofis makine parçaları, kesici takımlar, uçak fren balataları, ortopedik gereçler, şarj edilebilir piller, diş dolguları ve jet motoru parçaları yukarıda bahsi geçen uygulama alanlarında T/M ile imal edilen parçalara örnek olarak verilebilir. T/M yöntemi ile çok geniş bir malzeme yelpazesinden ürün elde etmek mümkündür. Farklı gruplarda yer alan bu malzemelere örnek olarak takım çelikleri, bakır ve alaşımları, alüminyum alaşımları, süper alaşımlar, paslanmaz çelikler, reaktif ve refrakter metaller, titanyum alaşımları ve seramikler toz metalurjisi

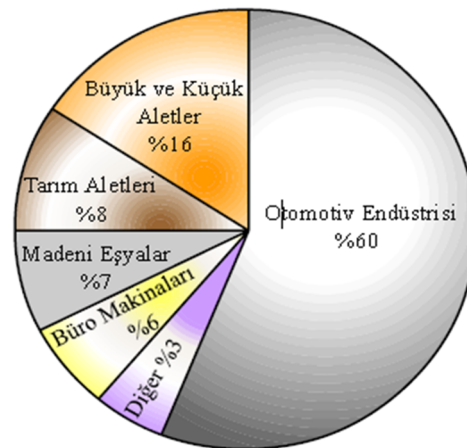


üretim yöntemi ile imal edilen ürünlere örnek olarak verilebilir (Karaaslan 2002). Şekil 2.1’de T/M metodu ile üretilen bazı parçalar ve Şekil 2.2’de T/M’nin kullanım alanları oranlarıyla verilmiştir.



Şekil 2.1. T/M ile üretilmiş çeşitli ürünler (URL-1)

Ayrıca otomotiv endüstrisinin büyük bir kısmında, klimalar, elektronik sistemler, tungsten lamba filamentleri, paslanmaz çelikler, bakır, alüminyum ve titanyum alaşımları, patlayıcılar, kaynak elektrotları, sert lehim bileşikleri, ileri teknoloji ürünü kompozitleri ve talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlar gibi malzemelerin üretiminde etkin bir şekilde rol oynamaktadır (Turan 1993; Fujiki 2001; Yavuz ve Gürler 2002).



Şekil 2.2. Toz metalurjisinin kullanım alanları (Bocchini and Lingskog 1991)

## 2.3. Toz Metalurjisi Yönteminde Kullanılan Tozların Özellikleri ve Üretimi

### 2.3.1. Tozların Özellikleri

Toz metalurjisinde kullanılan metal ve seramik tozlarının birçok özelliği üretim yöntemlerine göre belirlenmektedir. Üretilen parçalarda kullanılan tozların, parçanın kullanım yerlerine bağlı olarak değişik metotlarla üretilmesi gerekmektedir.

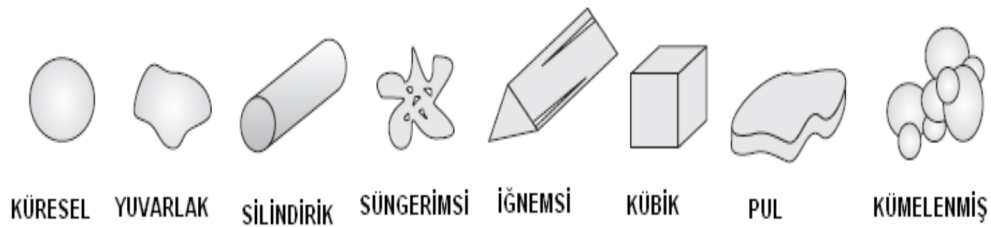
Metal tozlarının özellikleri kimyasal ve fiziksel olarak iki ana başlık altında incelenir. Parçaya ait özellikleri doğru şekilde tespit edebilmek için, tozun kimyasal ve fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bunun tespiti için parçayı oluşturacak toz kütlenin tüm kesitinden numune alınır. Bu işlemler için özel numune alıcılar geliştirilmiştir. Numune alıcılar açılır kapanır pencerelere sahip bir tüp şeklindedir. Tüp toz parçanın içine daldırıldıktan sonra pencereler açılır ve numune içine toz dolar. Bu tozlar yeterince karıştırılır. Bölücülerle ayrıştırılır ve tozun özellikleri tespit edilir (Kurt 1992).

Kimyasal özelliklerden metal tozunun bileşimi ve saflığı anlaşılmaktadır. Tozun kimyasal özelliği belli analiz yöntemleriyle tespit edilebilir. Örneğin, toz numunedeki oksijen miktarını öğrenebilmek için, belli oranda kurutulmuş toz takriben bir saat süreyle hidrojen altında 550-1150 °C sıcaklığa indirgenir ve ağırlığı tartılır (Kurt 1992).

Fiziksel özellik; parçacık boyutu, parçacık şekli, yapısı, özgül yüzey, görünür yoğunluk, akış hızı gibi özellikler belirler. Presleme ve sinterleme işlemleri bu özelliklerle yakından ilgilidir (Kurt 1992). Tozun tane boyutu; şayet küresel değil ise, tek partikül boyutunu saptamak oldukça zor bir iştir. Çoğunlukla tek partikül boyutunu belirlemek geometrik yapısının gölgesinden yararlanılarak varsayıma dayanan çap özelliğinden faydalanılır. İz düşüm boyu, maksimum kort boyu, izdüşüm genişliği, izdüşüm alanı, yüzey alanı, hacim tespiti gibi işlemler bulunur (Kousaka 1997).

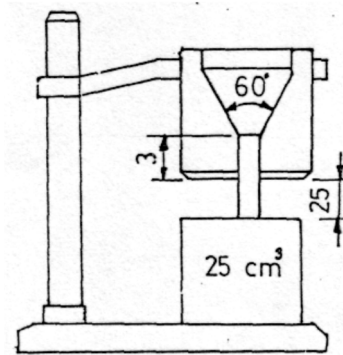
Metal ve alaşımlarının imalinde hangi tür değişkenlerin kontrol edildiğini tozun boyutu, şekli ve yüzey biçimleri belirler. Toz metalurjisinde toz boyutu kullanım aşamasında önemli bir özelliktir (Lawley 1992). Üretim aşamasına göre toz parçacıklarının şekilleri Şekil 2.3'te görülmektedir. Toz parçacıkların şekli; ham mukavemet, görünür yoğunluk, tozların akış hızı, sıkıştırılabilirlik, sinterlenebilirlik gibi özellikleri etkileyen önemli bir faktördür. Toz taneleri homojen bir şekilde değildirler. Tozların kolay ve hızlıca akması

imalat esnasında büyük önem arz etmektedir. Seri üretimde tozların kaplardan kalıplara kolaylıkla akarak kalıbı doldurması zaman kazancı açısından önemli bir etkidir (Kurt 1992). Toz partikülleri içerisinde küresel yapıya sahip olan tozların akıcılığı daha yüksektir. Pul şeklindeki tozların akış özelliği iyi değildir. Karmaşık şekilli tozların ise akıcılığı çok zayıftır. Şekil 2.4’de verilen Hall akış aparatı ile tozların akıcılığı belirlenir. Yüksek gözenekli tozlar ve köşeli tozların yoğunluğu düşüktür. Küresel şekilli tozların yoğunluğu yüksektir. Küresel şekilli tozlar daha kolay sıkıştırılırken, karmaşık şekilli tozlar daha zor sıkıştırılır. Sıkıştırması zor olan tozlara yağlayıcılar katılarak sıkıştırmaları kolaylaştırılır (Kurt 1992).



Şekil 2.3. Toz metalurjisinde bazı partikül şekilleri ve tanımları (German 1984)

Teorik ve görünür yoğunluk; parçanın şekli, boyutu, yüzey alanı ve parçaların düzeni gibi olgularla yakından ilişkilidir. Görünür yoğunluk sıkıştırılmamış olan tozun kütlelerinin hacmine oranıdır (Kurt 1992).



Şekil 2.4. Hall akış aparatı

Tozların yanıcılık ve zehirleyici özellikleri insan sağlığı açısından son derece önemlidir. Yanıcılık bakımından 50 mikron altındaki parçacıklar risklidir. Radyoaktiflik gösteren 1 mikron altındaki parçacıklar tehlike arz ederler. Gerekli emniyet tedbirleri alınarak temizleme sistemleri, havalandırma sistemleri geliştirilmiş olmalıdır. İhtiyaç halinde

emniyet maskeleri kullanılmalıdır (Kurt 1992). Tablo 2.1’de toz partiküllerinin önemli özellikleri ve etki ettiği davranışları görülmektedir.

Tablo 2.1. Tozların önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler (URL-2)

Önemli Özellikleri	Etkisi
Tozun boyutu (parçacık boyutu)	Görünür yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli (parçacık şekli)	Ham dayanım
Kimyasal kompozisyon	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikroyapı	Şekillendirilebilirlik, tokluk

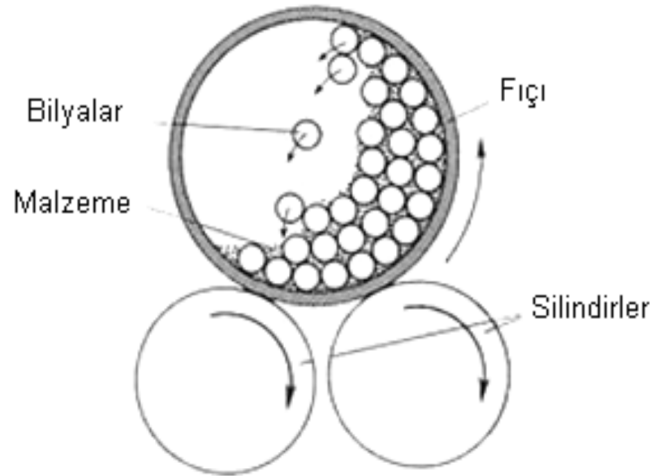
### 2.3.2. Tozların Üretimi

Toz metalurjisinde kullanılacak tozlar değişik metotlar uygulanarak hazırlanırlar. Metal tozlarının imalinde kullanılan bu metotlar, tozların birçok özelliğini belirleyeceğinden toz hazırlama metotları büyük önem arz etmektedir. Malzemelerin sahip oldukları özellikler birbirlerinden farklı olduklarından, toz haline getirilmeleri için de farklı üretim yöntemleri uygulanmaktadır (Akorall 2003). Bir imalat yönteminin diğerine göre tercih edilir olması, yöntemin ekonomikliğine, uygulanabilirliğine, son ürün haline getirilen tozların özelliklerine ve kullanım yeri ihtiyaçlarının ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır (German 2007). Tozun özelliği, sinterleme davranışına, presleme davranışına ve nihai mamulün özelliklerine de tesir etmektedir (German 2007). Genel olarak toz imalatı dört aşamadan oluşmaktadır. Bunlar, mekanik yöntem, atomizasyon, elektrolitik ve kimyasal yöntemlerdir (German 2007; Lawley 1992).

Mekanik yöntemle toz üretimi, genel olarak ergime sıcaklığı yüksek olan bazı malzeme tozları imalatı için ekonomik bir yöntemdir. Bu yöntemde katı haldeki malzemelere öğütme işlemi uygulanır. Kimyasal bağları zayıf, kayma oranı az olan karışık kristalli yapılara sahip, sert ve gevrek metal alaşımlar ve seramik malzemelerin çarpışması sonucu bu malzemelerin toz haline getirilmesi işlemidir. Bu yöntemde toz haline getirilecek metal tozları başta alüminyum, bakır, pirinç olmak üzere kalay, kurşun, manganez, kobalt, silisyum, çinko, demir, demir esaslı ve bakır esaslı malzemelerdir (Ekşi 1996; Boz

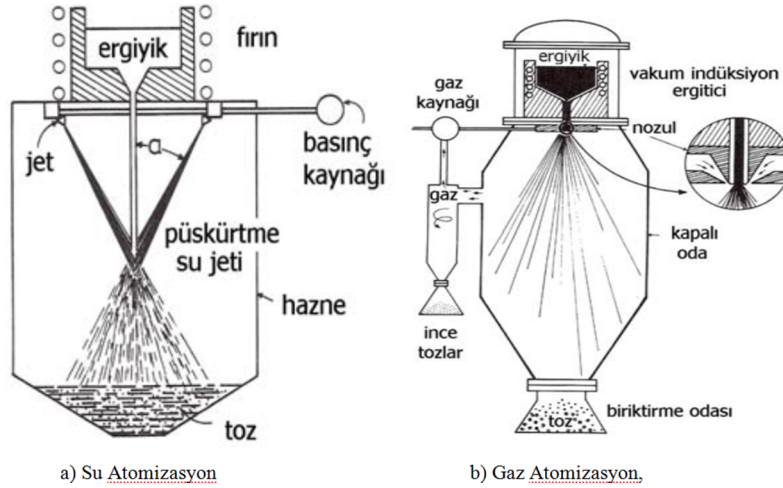
1999). Bunların yanı sıra oksit esaslı tozların üretiminde de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu yöntemde, metal tozlarının öğütülme işlemi düşük hızlarda yapıldığından işlem süresi oldukça uzundur. Fakat ekonomik olmasından dolayı tercih edilen bir yöntemdir (Aydın ve Yetkin 2006). Toz öğütme işleminde, içerisinde sert, aşınmaya dayanıklı ve büyük çaplı bilyalar barındıran silindirik değirmenler kullanılmaktadır (Höganäs 1996). Bilyaların hacmi buldukları kap hacminin yaklaşık  $\frac{1}{2}$ 'si ve öğütülecek malzeme miktarı da kap hacminin yaklaşık  $\frac{1}{4}$ 'i kadar olmalıdır (German 2007). Şekil 2.5'de öğütme işleminin şematik şekli verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi malzeme bilyeli silindirik kap içerisine konur. Kaba konulan malzemeler titreştirilerek döndürülür. Çarpışma, darbe, sıkıştırma, burulma etkilerine maruz kalan malzemeler küçük parçalar haline gelir. Bu hareketlerin devam etmesiyle malzemeler toz haline dönüşür. Bu yöntemde genellikle sünek malzemeler tercih edilmemektedir. Bunun sebebi ise malzemenin kırılmayarak bilyalar üzerine sıvanmasıdır (German 2007).



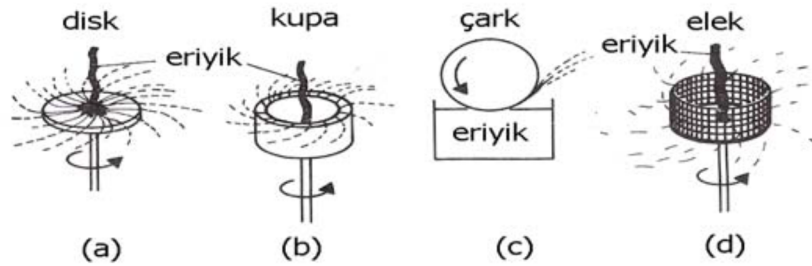
Şekil 2.5. Mekanik öğütme (German 2007)

Atomizasyon yöntemi dört farklı yolla gerçekleşir. Bunlar; gaz atomizasyonu, su atomizasyonu, santrifüj atomizasyonu, döner elektrot atomizasyonudur (Öveçoğlu 1993). Atomizasyon yöntemiyle toz üretiminde Şekil 2.6'da gösterildiği gibi bir pota içerisinde ergimiş hale getirilen sıvı metal, bulunduğu potanın dibindeki bir delikten akıtılarak yüksek basınçlı gaz veya sıvı jetine maruz bırakılarak çok ince parçacıklara ayrılır. Bu parçacıkların ani olarak soğumasıyla sıvı metal parçacıkları katılaşıp toz haline gelir. Ergitilebilen tüm metaller için bu yöntem kullanılabilir (Kurt 1992).



Şekil 2.6. Atomizasyon yöntemleri (German 1984)

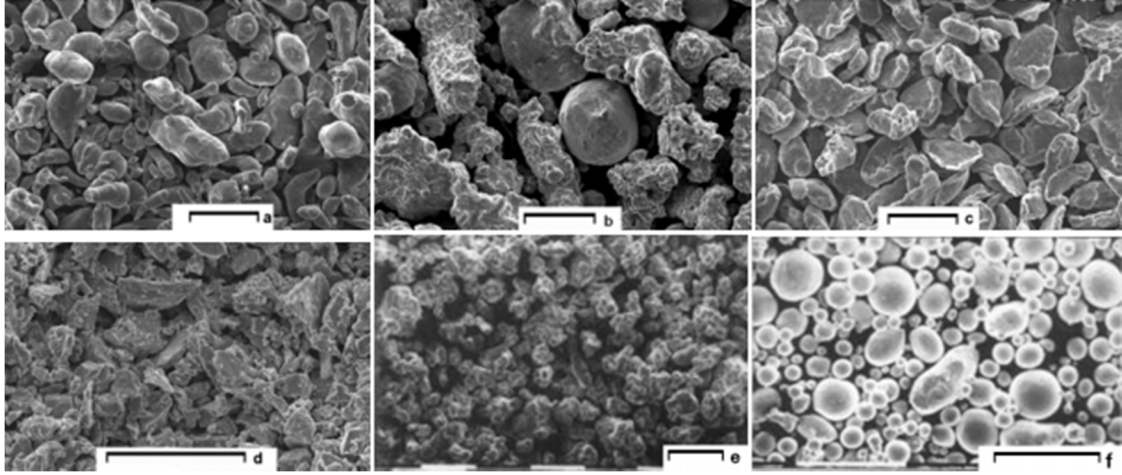
Şekil 2.7’de görüldüğü gibi santrifüj atomizasyon yönteminde yüksek hızda dönen tabla veya disk üzerine ergimiş haldeki sıvı metal akıtılır ve savrulmuş sıvı damlacıkları ani soğumayla toz partikülleri haline gelir.



Şekil 2.7. Santrifüj atomizasyon yöntemleri; a) döner disk, b) döner kupa, c) döner çark, d) döner elektrot (German 1984)

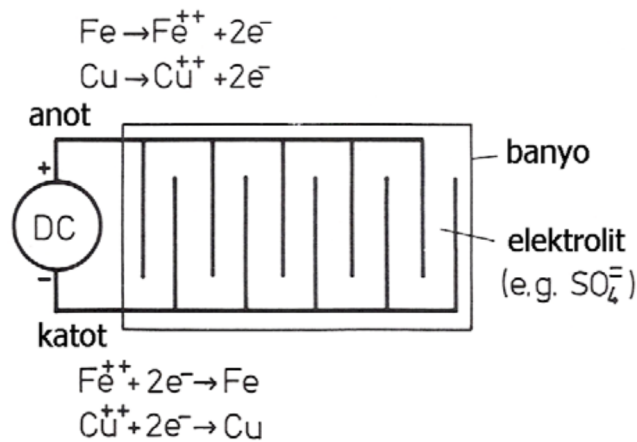
Atomizasyon yönteminde, toz haline gelen parçacıkların boyutları 1  $\mu\text{m}$  ile 1 mm arasında değişmektedir. Bu yöntemde elde edilen metal parçacıkların mikroyapısı ani soğutulmadan dolayı diğer yöntemlerle elde edilen metal parçacıkların mikroyapısına göre daha üstün özelliklere sahiptir (Callwell 1990). Bu yöntem ile tozun sahip olduğu şekil, boyut ve tane boyutu dağılımı kontrol edilebilir. Özellikle üretim kolaylığından dolayı çok tercih edilen bir yöntemdir (Boz 1999). Toz haline gelen parçacıkların şekli katılma hızına bağlıdır. Küresel şekilli parçacıklar yavaş soğuma hızıyla, karmaşık şekilli parçacıklar ise hızlı soğuma ile elde edilirler. Bu yöntem alaşımli çelikler, bakır, demir, takım çelikleri, alüminyum, kalay, kurşun, çinko, kadmiyum gibi metallerden toz

üretiminde yaygın olarak kullanılır (Höganas 1996). Şekil 2.8’de çeşitli atomizasyon teknikleri ile üretilmiş tozların SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 2.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiş değişik tozların genel görüntüleri; a) alüminyum, b) bakır (sıvı atomizasyonu), c) magnezyum, d) titanyum, e) demir, f) bakır (gaz atomizasyonu). Ölçü çizgileri 100 µm`u göstermektedir (URL-2)

Elektrolitik yöntem ile yüksek iletkenliğe sahip metallere yüksek saflığa sahip tozlar üretilir. Elektrolitik bir hücrenin katot çubuğunda metal tozlarının çöktürülmesi işlemidir (Şekil 2.9). Bu yöntemle bakır, gümüş, demir, çinko tozlarını yüksek saflıkta üretmek mümkündür (Kurt 1992). Üretilen toz parçacıkları, genellikle süngerimsi şekle sahip olup, gözenekli ve dentritik yapıdadır (Hiçyılmaz 1999). Üretim maliyetlerin yüksek olması sebebiyle kullanımı sınırlıdır (German 2007).



Şekil 2.9. Elektrolitik hücreden metal tozlarının oluşumu (German 2007).

Kimyasal yöntem ile hemen hemen tüm metallerin tozları üretilmektedir. Kimyasal veya fizikokimyasal yöntemlerle metal tozlarının üretimi, toz özelliklerinde önemli farklılıklara izin verir (Yılmaz 2006). Bu yöntemde toz üretimi, demir, bakır, tungsten, molibden, nikel, kobalt gibi metal oksitlerin, CO ve hidrojen gibi indirgeyici gazlarla kimyasal tepkime sonucu indirgemesiyle gerçekleşir (Meriç vd. 2005). Genel olarak kimyasal yöntemin avantajları; metal oksitlerin kolaylıkla bulunabilir olması, gözenekli tozlar üretilmesi, metal ve oksitlerin boyut kontrolünün yapılabilmesidir (Lenel 1993). Metal oksitlerin toz saflığını etkilemesi ve alaşım tozlarının üretilmesi kimyasal yöntemin dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır (Kayış 2005). Tablo 2.2’de T/M uygulamasında kullanılan tozların hangi üretim yöntemiyle oluşturulduğu verilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı toz malzemeler ve üretim yöntemleri (URL-2)

Üretilen Miktar	%70	%15	%15			
			Atomizasyon	Kimyasal indirgeme	Öğütme	Elektrolitik çökeltme
Alüminyum ve Al-alaşımları	X					
Berilyum			X	X		
Kobalt						
Bakır	X	X		X		X
Bakır alaşımları						
Cu-Al	X					
Cu-Pb	X					
Cu-Sn (Bronz)*	X					
Cu-Zn (Pirinç)	X					
Cu-Ni-Zn	X					
Demir	X	X	X	X	X	
Demir alaşımları						
Düşük alaşımlı çelik	X					
Paslanmaz çelik	X					
Takım çeliği	X					
Molibdenim		X				
Nikel		X			X	X
Nikel alaşımları	X		X			
Gümüş	X			X		X
Tantalyum		X		X		
Kalay	X					
Titanyum	X	X			X	
Tungsten		X				
Zirkonyum	X				X	

\*Bronz T/M tozları saf Cu ve Sn tozlarının karışımı ile elde edilir.



## 2.4. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Parça Üretim Aşamaları

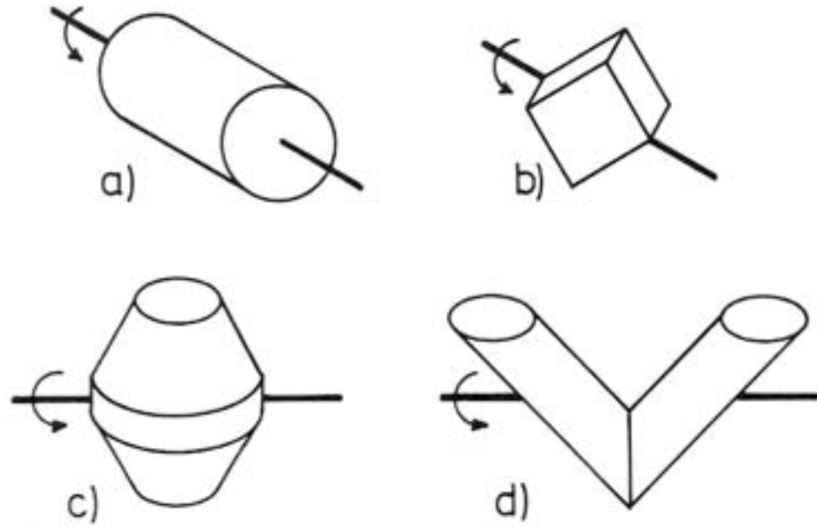
### 2.4.1. Tozların Hazırlanması

Bu aşama, malzeme preslenmeden önce ön işlemler diye tabir edilen, elekten geçirme, tavlama, yağlayıcı ilavesi, harmanlama ve karıştırma gibi bazı uygulamaları içermektedir. Toz boyut dağılımı birçok metal tozunun imalat aşamasında kontrol edilmesi gereken en önemli özelliktir. Çünkü sinterleme oranı, akıcılık, şekillendirilebilme, boyutsal değişim ve mekanik mukavemet gibi birçok özellik toz boyut dağılımına bağlıdır. Toz metalurjisinde toz boyut dağılımını belirlemek için kullanılan en yaygın metot elek metodudur. Bu metot toz parçacıklarının boyutlarına göre sınıflandırılmasını sağlar (Başaran 2007).

Toz metalurjisi üretim yönteminde, malzemenin üretim basamakları sırasında genellikle kullanılan tozlar kirlenmektedir. Oksijen, azot, fosfor, kükürt ve karbon gibi elementler tozların kirlenmesine sebep olur. Bu durum, tozların sıkıştırılabilirliğini ve ham mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorunu gidermek için metal tozlarına tavlama işlemi uygulanır. Böylelikle parçacıkların üzerindeki ince oksit tabakası ve nemin giderilmesi sağlanır. Bu sayede tozların sıkıştırılabilme kabiliyeti arttırılmış olur (German 2007).

T/M teknolojisinde sağlıklı parçalar üretilebilmesi için tozların homojen bir şekilde karıştırılması büyük önem arz eder. Karıştırma işleminin amacı farklı element tozlarının homojen bir şekilde bir araya getirilmesini sağlamaktır (German 2007). Harmanlama işlemi ise karıştırılmış veya alaşım olarak üretilmiş tozlarda bekleme veya nakliye esnasında meydana gelen boyutsal ayrışmayı ortadan kaldırarak tekrar homojen tane boyut dağılımına sahip tozlar elde edilmesini sağlamak amacıyla yapılır (German 2007). Karıştırma işlemleri genellikle 20-40 dakika aralığındadır (Lenel 1980). Karışımında en iyi sonuç toz hacmi, karıştırıcı hacminin % 50-60'ı kadar olduğunda elde edilir. 5-30 dakika zaman aralığında yapılan karıştırma işlemleri ile başarı sağlanabileceği bildirilmiştir (Upadhyaya 2002). Karıştırma işleminin uzun ve yüksek hızda yapılması, toz tanelerinin kırılarak küreselleşmesine ve mekanik kilitlemelere yol açarak sinterleme sonrası daha büyük gözenekli bir yapı oluşturabilir. Bununla birlikte hızlı karıştırma homojenliği ortadan kaldırır ve plastik deformasyon meydana getirir. Bu da tozun sıkıştırılabilme

özelliğini azaltır, şekillendirme esnasında gerekenden fazla soğuk işleme ihtiyaç doğurur (Klar 1984; German 2007). Şekil 2.10'da tozların karıştırılmasında kullanılan çeşitli düzenekler verilmiştir.



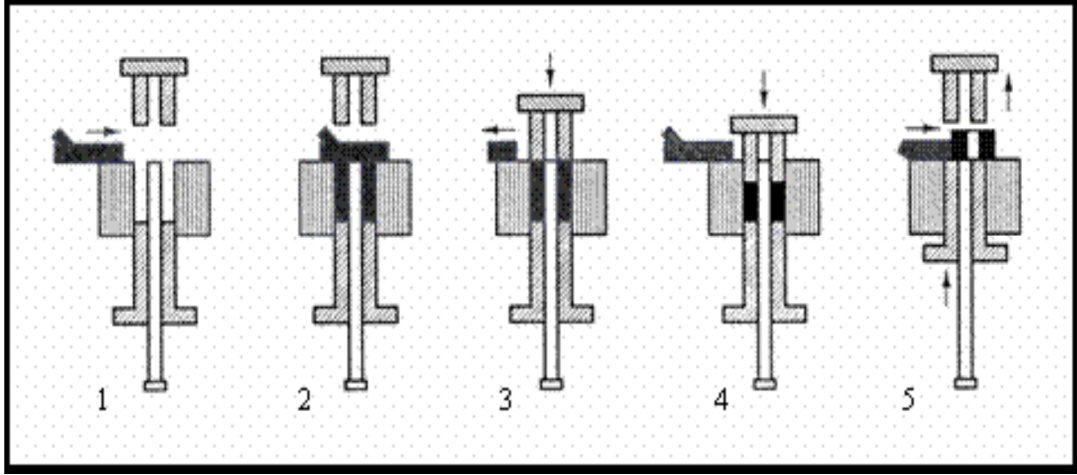
Şekil 2.10. Toz karıştırma işlemlerinde kullanılan çeşitli karıştırıcılar; a) Silindirik, b) döner küp, c) çift taraflı konik, d) V tipi (German, 1984)

Toz karışımı hazırlama aşamasında içerisine genellikle % 0,5-1,5 oranında yağlayıcı ilave edilir. Yağlayıcı olarak stearik asit, metalik stearatlar, çinko stearatlar ve parafin en çok tercih edilenlerdir. Yağlayıcıların temel amacı, kalıp duvarları ve takım yüzeyleriyle toz tanecikleri arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek, tozların sıkıştırılma esnasında kolay kaymalarını sağlamaktır (Hale 2003). Bu sayede bir taraftan kalıp ömrü uzatılırken diğer taraftan preslenen parça içerisinde meydana gelen yoğunluk gradyanları da minimize edilmiş olur (German 2007).

#### 2.4.2. Presleme

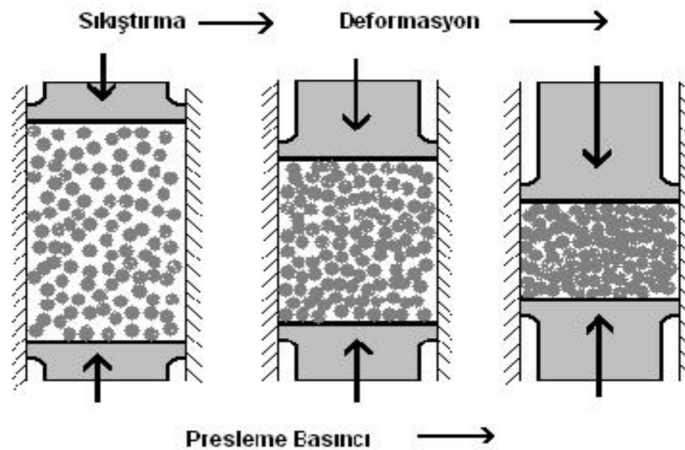
T/M'de önemli işlem basamaklarından biri de sıkıştırma'dır. Metal tozlar ve yağlayıcılar üretilecek parçanın şekli ve ölçüsüne göre özel olarak hazırlanmış kalıp içerisinde basınç etkisiyle presle sıkıştırılarak şekillendirilir. Tozların sıkıştırılmasındaki ana fikir ham yoğunluk ve dayanımın kazanılmasıdır. Sıkıştırma işlemi için genellikle hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılır (Klar 1984). Şekil 2.11'de presleme işleminin basamakları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi öncelikle metal tozu ve yağlayıcı karışımı, rijit kalıp boşluğuna doldurulur. Daha sonra karışım iki veya daha fazla

hareketli alt ve üst zimbalar vasıtasıyla istenen oranda gözeneklik sağlayacak şekilde preslenir. Son olarak parça kalıptan sıyrıcı yardımıyla çıkartılır (Akorol 2003)



Şekil 2.11. Presleme işleminin basamakları; 1) işlem başlangıcı, 2) toz doldurma, 3) presleme başlangıcı, 4) preslemenin bitişi, 5) preslenmiş parçanın çıkarılması (Söyler 2007 )

Presleme işleminde toz karışımının plastiklik özelliklerine göre 1-10 ton/cm<sup>2</sup> aralığında basınç uygulanmaktadır. Ancak bazı durumlarda uygulanan basıncın 30 ton/cm<sup>2</sup> ye kadar ulaştığı belirtilmektedir (Ersümer 1970). Şekil 2.12’de serbest haldeki tozda presleme işlemi esnasında meydana gelen fiziksel değişimler şematik olarak verilmiştir. Basınç tatbik edilirken başlangıçta tanecikler arasında gevşek düzenden daha sıkı bir paketleme düzenine geçme eğilimi vardır. Tatbik edilen basınç arttıkça tanecikler arası temas artar ve taneler daha da sıklaşır. Sıkıştırımda kullanılan kalıp ve maça pimleri tungsten karbürden, alt ve üst zimbalar yüksek kaliteli takım çeliğinden yapılmalıdır (Kurt 1992).



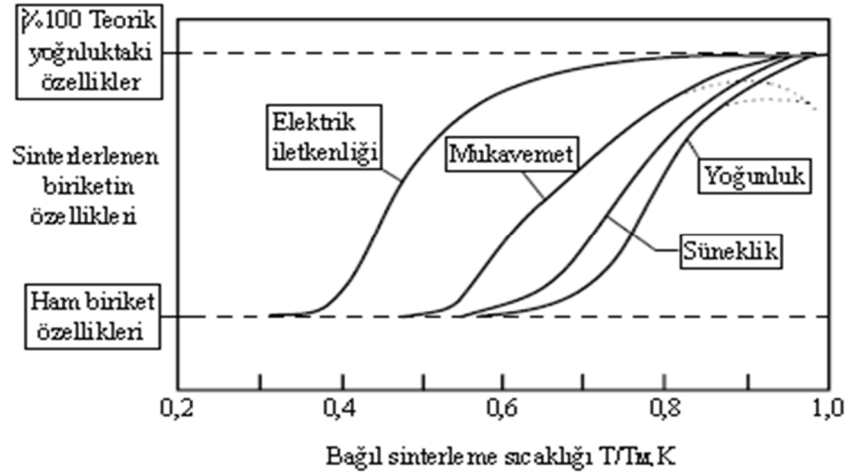
Şekil 2.12. Presleme basıncının artışı ve taneciklerin kalıp içindeki durumu (Söyler 2007)

T/M ile üretilen parçaların kalitesine etki eden önemli etkenlerden biri de sıkıştırma işlemlerinde kullanılan tekniklerdir. Bu teknikler, eksenel, izostatik ve hacim deformasyonu olarak üç değişik metotla gerçekleştirilir. Eksenel sıkıştırma, tek ve çift etkili olabildiği gibi soğuk, sıcak ve ılık sıkıştırma şeklinde de olabilirler. İzostatik sıkıştırma soğuk ve sıcak sıkıştırma şeklinde uygulanır. Hacimsel deformasyon ise, toz dövme, toz ekstrüzyon ve toz haddeleme olarak uygulanmaktadır (ASM Metals Handbook 1998). Değişik sıkıştırma teknikleri içerisinde en yaygın olarak kullanılanı tek eksenli sıkıştırma'dır. Bunun nedeni seri ve hızlı parça üretimini mümkün kılmasıdır (Kurt 2004).

### 2.4.3. Sinterleme

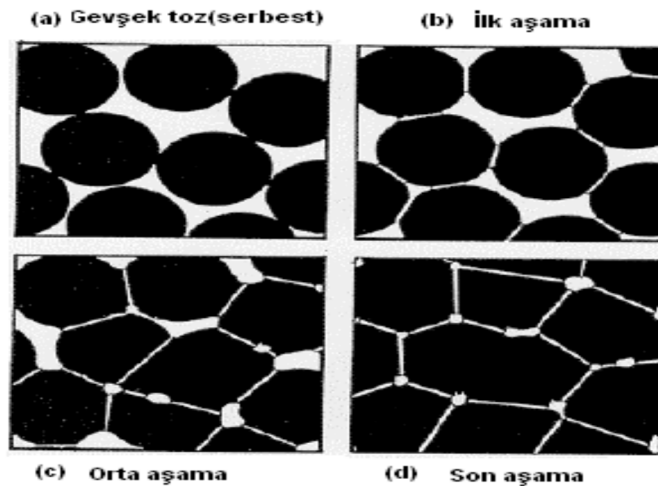
Presleme aşamasından sonra sıkıştırılan malzemeye yoğunluk kazandırmak için sinterleme aşamasına geçilir. T/M teknolojisinin en fazla enerji gereksinimi gerektiren ve en önemli işlem basamağıdır. Sinterleme işlemi şekil kazandırılmış gözenekli yapıdaki tozların yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak ifade edilmektedir (Archbold 1999). Diğer bir ifadeyle preslenerek şekillendirilmiş toz parçalarına mukavemet kazandırmak amacıyla kontrollü bir atmosferde ve yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlemidir. Sinterleme işlemi ile kalıp içerisinde sıkıştırılarak şekillendirilen ürünlerdeki toz parçacıkları arasındaki mekanik bağlar metalik bağlara dönüştürülür (Mandelbrot 1998).

Genellikle sinterleme sıcaklığı tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5'i alınarak yapılır. Çok bileşenli sistemlerde ise ergime sıcaklığı yüksek olan metalin ergime sıcaklığının altında, ergime sıcaklığı düşük olan metalin ergime sıcaklığının üzerinde yapılır. Fe esaslı malzemeler için sinterleme sıcaklığı 1000-1300 °C, sert alaşımlar için 1400-1600 °C arasında, refrakter metaller (molibden, tantal, wolfram) için ise 2000-2900 °C arasında seçilir. Kullanılan malzeme türüne göre sinterleme sıcaklığı değişir. Sinterleme süresi ile sıcaklık artışı ters orantılıdır. Sıcaklık arttıkça sinterleme süresi kısalır. Süre uzun tutulduğunda sıcaklığın düşürülmesi gerekir (Kurt 1992). Sinterleme sıcaklığı 1150 °C'yi aştığında maliyet artmaktadır. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla ürünün mukavemet, yoğunluk, elektrik iletkenliği, süneklik gibi özellikleri de artmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Sinterleme sıcaklığının kompakt özelliklerine etkisi (Upadhyaya 2000)

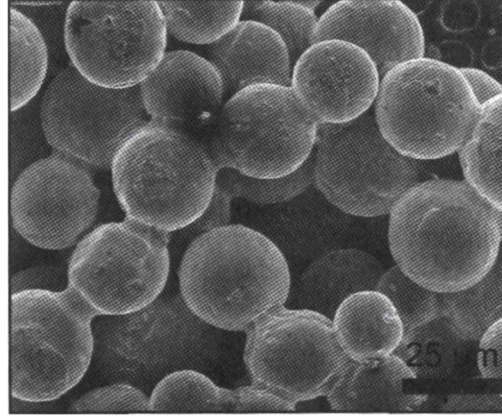
Katı hal sinterleme, genellikle tek bileşenli sistemlerde tamamen katı halde gerçekleşen sinterleme türüdür. Bu sinterleme işleminde yoğunlaşma tamamen katı halde meydana gelen atomsal hareketlerle sağlanır. Sinterleme işlemi preslenmiş parçada hacimsel küçülmeye yol açar. Hacimsel küçülme parça türüne göre değişiklik göstermektedir. Özellikle çok küçük ince tozlar kullanıldığında bu durum daha belirgin olur (German 2007). Katı hal sinterleme aşamaları Şekil 2.14’de gösterilmiştir. Sıcaklık artışıyla birlikte atomsal yayılım hızla artar. Bu durum atomlara ve sınır hareketine etki eder (Yılmaz 1999).



Şekil 2.14. Serbest tozların sinterleme aşamaları (German 2007)

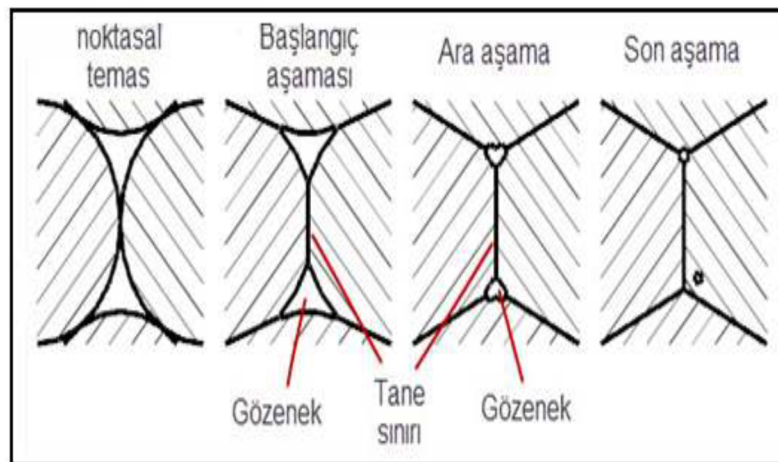
Şekil 2.14’de görüldüğü gibi ilk aşamada toz parçacıkları arasında nokta teması meydana gelir. Temas halindeki noktalar Şekil 2.15’te verilen SEM görüntüsündeki boyunlara

dönüşür. Tane sınırı, iki tane arasındaki temas düzlemlerinin oluşumuyla başlayacaktır. Bu safhada temas halindeki tane merkezlerinde az da olsa yaklaşımlar gözlemlenir. (German 2007).



Şekil 2.15. Sinterlemenin ilk aşamasında tanecikler arası boyun oluşumu (German 2007)

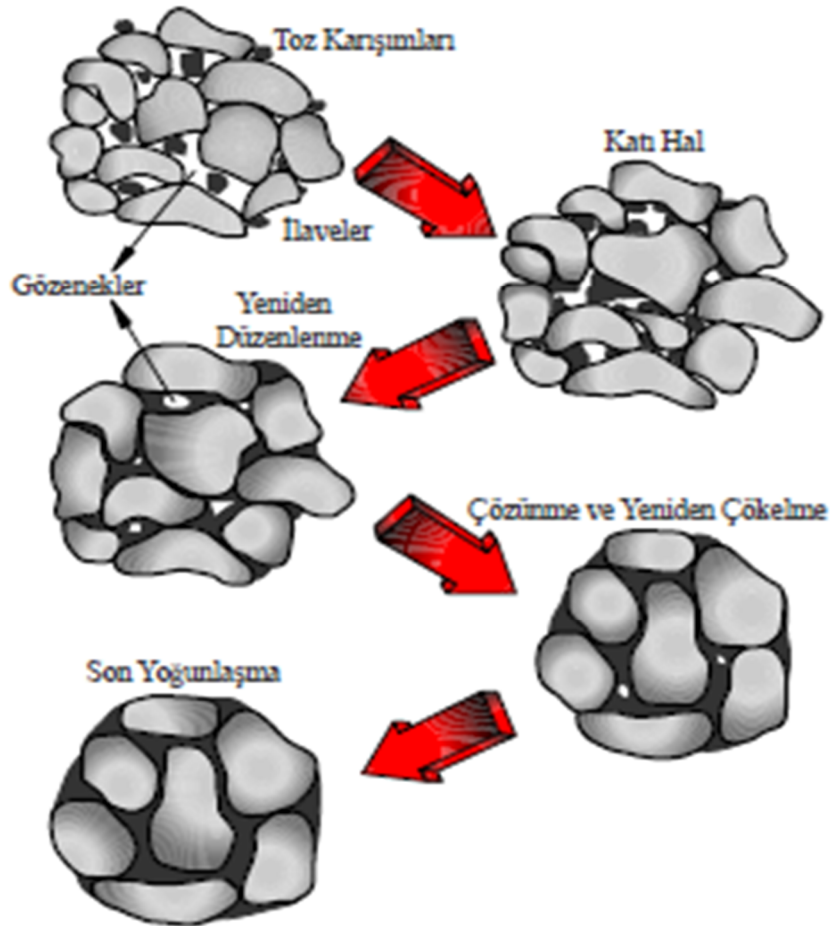
Yoğunluk artışı ve tane büyümesi görülen orta devre sinterleme aşaması, sinterlenen parçaların özelliklerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bu devrede gözeneklerin boyutu küçülmekte fakat açık gözenekler son aşamaya kadar kalmaktadır. Bu devrede sinterleme oranı tane sınırı ve gözenek geometrisi tarafından kontrol edilmektedir. Sıcaklık artışı ile tane sınırı hareket oranı artmakta, gözenekler daha yavaş hareket ettiğinden gözeneklerden tane sınırı ayrılması meydana gelmektedir. Gözenekler toplam tane sınırını azaltmaktadır. Sinterlemenin farklı aşamalarında gözeneklerde meydana gelen değişim Şekil 2.16'de verilmiştir.



Şekil 2.16. Katı faz sinterleme aşamalarının şematik olarak gösterilmesi (German 2007)

Sinterlemenin son aşaması, büzülmenin meydana geldiği, gözenek oranının hızla düştüğü ve atom hareketlerin oldukça yavaş olduğu bir safhadır. Gözenek giderme oranı; hacim difüzyonu, tane boyutu, gerilme etkileri, gözenek yoğunluğu ve gözenek yarıçapı gibi faktörlerle ilişkilidir (German 2007).

Sıvı faz sinterleme; çok bileşenli alaşım sistemlerinde alaşım elementlerinden birinin ergime sıcaklığının hemen üzerine çıkılmasıyla gerçekleşir. Ortamdaki sıvı fazın etkisiyle meydana gelen malzeme taşınımından dolayı mikroyapıda hızlı bir değişim görülür. Parçada meydana gelen ani büzülmelere sıvı faz oluşumu neden olmaktadır. Oluşan sıvı faz, katı parçacıklar arasındaki sürtünmeyi azaltarak yeniden bir düzenleme oluşturur. İşlem esnasında sıvı fazın miktarı düşük tutulmakta ve oranı %20'yi geçmemektedir (German 2007). Şekil 2.17'de sıvı faz sinterleme esnasında meydana gelen yoğunlaşma safhaları gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Sıvı faz sinterlemesinde mikroyapısal değişimler (German 1996)

Kimyasal yapıları farklı olan tozlar kullanılarak sıvı faz elde edilmektedir. Sıvı faz iki farklı tozun etkileşimiyle oluşmaktadır (James 1985). Taneler arası bağlanma başlangıç ısıtmasıyla başlamaktadır. İlk sıvı oluşumu ile hızlı bir yoğunluk artışı meydana gelir. Bu esnada katı parçacıkların hareketleri, ortamdaki sıvı etkisiyle kolaylaşarak yeniden düzenlenmeyi gerçekleştirir. Sonrasında çözünme-yeniden çökme meydana gelir. Sıvı yardımıyla katı atomların taşınımı gerçekleşir. Küçük partiküller sıvı içerisinde yayılır, çözünür ve büyük partiküllerin üzerine çöklerler. Tane boyutu, katı tane çözünürlüğüyle ters orantılıdır. Bu sebeple, ilk olarak sıvı faz içinde küçük taneler çözünür. Bu aşamanın sonlarında tane büyümesi gerçekleşir. Tane sayısı azalır (German 2007).

#### **2.4.4. Sinterleme Atmosferi**

Sinterleme atmosferi çok dikkatli seçilmelidir. Sinterleme işleminde endotermik gaz, ekzotermik gaz, parçalanmış amonyak gazı, hidrojen ve vakum gibi atmosferler kullanılabilir. Doğal gazın yanmasıyla elde edilen endotermik gaz aynı zamanda en fazla tercih edilen sinterleme atmosferidir. Azot, su buharı, hidrojen, karbondioksit, metan ve karbon monoksit gazlarının karışımı fırın atmosferini oluşturur. Yanmanın özelliklerini kontrol etmek için fırın atmosferine hava ilavesi yapılır. Böylece hava-gaz oranı yanmış gazların özelliklerini belirler (Başaran 2007).

Sinterleme sırasında fırının içerisindeki atmosfer, malzeme yapısını ve sinterleme işlemini direkt etkiler. Bu sebeple oksijen ve hava bakımından zengin atmosferler tercih edilmez. Atmosferin amacı, hava ile teması keserek olası olumsuzluklardan metal parçaları korumaktır. Havanın numunelere sızmasını önlemek için fırın içerisindeki basınç ve akış hızı önem arz eder. Ayrıca sinterlenen numuneleri korumak fırının değişik bölgelerindeki sıcaklık ve soğukluğun da dengeli şekilde yapılması gerekir (Koç 2006).

Sinterleme sırasında kullanılan atmosferin amaçları;

- Havanın fırına sızmasını engellemek,
- Parçalarda bağlayıcıları uzaklaştırmak
- Ürün üzerindeki oluşabilecek oksitlenmeyi azaltmak
- Çelik malzemelerdeki karbon oranını kontrol altına almak,
- Özel uygulamalarda karbonun çıkarılmasını sağlamak,



- Isıyı etkili ve düzenli bir şekilde iletme,
- Bazı özel uygulamalarda oksidasyonu kontrol altında tutmak şeklinde sıralanabilir (Nayar 1984).

## 2.5. Son İşlemler

Birçok uygulama için T/M yönteminin presleme ve sinterleme aşamalarından geçirilen parçalar performans ihtiyaçlarına yeterli gelmektedir. Fakat ihtiyaç doğrultusunda bazen presleme ve sıkıştırma işlemlerinin dışında, mekanik özellikleri geliştirmek, yüzey kalitesini arttırmak veya boyutsal tamlığı sağlamak amacıyla yüzey bitirme, yoğunluk kazandırma ve tekrar boyutlandırma gibi bir veya daha fazla ikincil işlem gerekebilmektedir. Sinterlemeden sonra gerçekleştirilen bu işlemlere “sinterleme sonrası” veya “ikincil işlemler” denir. Fonksiyonel olarak birçok durumda zorunlu olan ikincil işlem parça özelliğine değer katar. Buna karşın parçanın maliyetini de artırır (Salak 2005). İkincil işlemlerde genel olarak tekrar sıkıştırma, yüzey kaplama, birleştirme, yüzey parlatma, yağ emdirme, yüzey sertleştirme, yeniden boyutlandırma gibi işlemler uygulanabilmektedir (Söyler 2007).

### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozitler, kimyasal bağ yapmaksızın birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin nihai bir malzeme yapısında makro düzeyde birleştirilmesi ile elde edilen malzemeler olarak tanımlanabilir. Kompozitler çok fazlı malzemeler olarak da adlandırılabilirler (Şahin 2006). Kompozit malzemeler bir insan icadı olmayıp var olan malzemelerin kombinasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır (Harris 1999). Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenler birbiri içerisinde çözünmezler. Ancak metalik sistemde düşük oranda bir miktar çözünme görülebilir. Malzemeyi oluşturan bileşenler kendi özelliklerini yapı içerisinde korurlar. Bileşenler arasındaki ara yüzey kolaylıkla gözlemlenebilir (Çalık 2004). Kompozit bir malzemenin özellikleri, onu oluşturan malzemelerin özelliklerine, şekil ve dağılımına bağlıdır. Kompozit malzemelerin özelliklerini matris, fiber, arayüzey, mikroyapı gibi dört temel unsur belirler (Taşgetiren 1999).

Kompozit malzemelerin üstün yönlerini sıralayacak olursak;

- ❖ Yüksek mukavemetlidirler,
- ❖ Kolay şekillendirilebilirler,
- ❖ Üretimleri kolaydır,
- ❖ Özel katkı maddeler ile ısı ve ateşe dayanımları artırılabilir,
- ❖ Genellikle düşük ağırlığa sahiptirler,
- ❖ Amaca uygun olarak ürün elde edilebilir,
- ❖ Yüksek mekanik özelliğe sahiptirler,
- ❖ Titreşim sönümlenme özelliğine sahiptirler,
- ❖ Kalıcı renklendirme ve estetik görünüme sahiptirler (Tanır 1997; Alnak 2007).

Bunun yanında zayıf yönlerini sıralarsak;

- ❖ Nemli ortamlardan etkilenirler,

- ❖ Malzeme performansının daha yüksek sonuçlar vermesi için kullanılan matris ve takviyeler pahalıdır,
- ❖ Çoğunlukla kırılındırlar ya da kırılma uzaması azdır,
- ❖ Yüksek maliyetli özel tasarlanmış kompozitler dışında, genelde yaygın kompozitlerin ısı direnci düşüktür,
- ❖ Tutuşma halinde çevreye zehirleyici gaz çıkarırlar buda insan sağlığına olumsuz etki etmektedir,
- ❖ Kesme, delme vb. gibi işlemlerin malzeme mukavemetine etkilerinin hesaplanması yapılamaz.
- ❖ Benzer kompozitler aynı yüklere maruz kaldığında farklı özellikler gösterebilir, bu da standartlaşmamış kalitelere işaretir,
- ❖ Diğer malzemeler gibi geri dönüşüm imkânları yoktur (Tanır 1997; Alnak 2007).

### 3.1. Neden Kompozit Malzeme

Mühendislik malzemelerinin sahip olması gerektiği belirli özellikler ve bu özelliklerin farklı uygulama alanlarında ihtiyacı karşılaması gerekmektedir. Bunlar; çekme, eğme, sürtünme, akma, basma, sertlik, yorulma mukavemeti, aşınma direnci gibi mekaniksel özelliklerdir. Yalıtkanlık, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenliği, manyetik özellikler, yoğunluk gibi fiziksel özelliklerdir. Korozyon direnci, kararlılık gibi kimyasal özellikleridir. Bu özelliklerin yanı sıra malzeme seçimi ve dizaynında önem arz eden değişik tekniklerle ölçülebilen birim maliyet, kolay bulunabilirlik, işlenebilme, şekillendirilebilme, ihtiyaç duyulan tonaj gibi faktörlerde genellikle işletmeciler ve mühendislerin göz önünde bulundurdıkları diğer olgulardır (Çalık 2004 ). Mühendislik malzemeleri olarak sayılan metaller, plastikler ve seramiklerin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılmak amacıyla kompozit malzemeler üretilmiştir.

Kompozit malzemelerin diğer malzeme gruplarına alternatif hale gelmesinin nedenleri,

- ❖ Mukavemetlerinin benzer ağırlıktaki malzemelere göre daha fazla olması,
- ❖ Korozyondan fazla etkilenmemesi,
- ❖ Darbeyi soğurma enerjilerinin metal, seramik ve plastiklere göre daha fazla olması,
- ❖ Tasarımlarının daha esnek olması,

- ❖ Diğer malzeme gruplarına oranla kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının daha fazla olması,
- ❖ Malzemenin sertliğinin yoğunluğuna oranının daha fazla olması,
- ❖ Diğer malzemelerde kullanılan perçin, cıvata vs. gibi birleştirme elemanlarından kaynaklanan yapısal zayıflıklar kompozitlerde söz konusu değildir ( Çalık 2004).

Herhangi bir malzemenin bir diğer malzemeye veya malzeme grubuna tercih edilmesi için önemli derecede avantajının bulunması gerekir. Kompozit malzemede kullanım yeri ve amacına göre bu konu ile ilgili pek çok cevabı karşılamaktadır. Bunları sıralayacak olursak (Çalık 2004).

Üretim kolaylığı; imalat ve tasarım kolaylığı sayesinde nihai ürüne, ikincil bir işleme gerek kalmadan elde etmek mümkündür. Kalıplama maliyeti düşüktür.

Esnek tasarım; kompozit malzemeler kullanım alanı ve amacına, ihtiyaç doğrultusundaki beklentilere ve tasarımcının isteğine göre imal edilir. Örneğin, malzeme büyük, küçük, esnek, sert, basit, karmaşık şekilli vb. gibi.

Düşük maliyet; diğer imalat yöntemleriyle üretilen malzeme gruplarına kıyasla kompozitler, daha düşük oranda bir maliyete sahiptir.

Ürünlerin termoset olması; kompozit ürünlerin reçine sistemlerinde termoset plastikler termoplastiklere oranla daha fazla tercih edilir. Bunun nedeni olarak, termoplastiklerde ısı reçine sistemini yumuşatmak ya da eritmek amacı ile kullanılır. Malzeme soğuduktan sonra şeklini almış olur. Fakat şekil kalıcı değildir. Malzemenin şekli ısıdan dolayı şekil değişikliğine uğrar ve bozulabilir. İşlem prosesi baştan tekrarlanabilir. Termosetli kompozit malzeme ısıdan dolayı şekil bozukluğuna uğramaz. Şekil sabittir ve işlem tekrarlanmaz. Bundan dolayı malzeme kullanılması esnasında ani ısı değişimlerinden kaynaklanan deformasyon riski ortadan kalkar. Malzeme yorulması gibi problemlerle karşılaşılmaz.

Mukavemet; genellikle plastikler, metallere göre daha düşük mukavemet değerine sahiptirler. Buna karşın takviye elemanlarının dikkatli bir şekilde seçilerek ürünün içerisine yerleştirilmesiyle istenen mukavemet değeri elde edilebilir. Böylece mekanik mukavemete sahip ve aynı zamanda hafif malzemeler elde edilir.

Mükemmel su dayanımı; kompozitler, suyun herhangi bir biçiminden etkilenmediği gibi dayanımları oldukça yüksektir.

Korozyona karşı dayanım; kompozitlerin kimyasal maddelere karşı korozyon direnci yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı metallerin bu alanda karşılaşacakları sorunların etkisiyle metallerin yerini almışlardır.

Sınırsız kalıplama boyutları; günümüze kadar üretimi değişik kalıplama yöntemleriyle elde edilen kompozit malzemelerin milimetre ve metre gibi değişik ölçü aralıklarında üretilmesi mümkün olmuştur.

Parça birleştirilmesi; birden fazla parçadan oluşan ürünler tek kalıplama ile üretilebilmektedir. Bu durum, işçiliği, işlem miktarını, stoklama maliyetini düşürür.

İsteğe bağlı olarak ısı geçirgenlik; uygun malzemeler kullanılarak ışık geçirgen özellikte kompozit malzeme kalıplanabilmektedir.

Kendinden renklendirilme olanağı; bu malzemeler doğal renklerde olabildiği gibi kendi de renklendirilmiş olarak üretilebilmektedir. Bu özellik ile boyama ihtiyacına gereksinim duyulmaz.

Elektrik iletkenliği ve termik yalıtım özelliği; bu özelliğe sahip olan malzemeler özellikle enerji nakil sistemlerinde kullanılır. Ayrıca bu özelliklerin ihtiyaç duyulduğu alanlarda kullanılmaktadır.

Titreşim sönümlendirme; kompozit malzemelerde süneklik nedeni ile doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Bu özelliği ile çatlak ilerlemesi minimize edilmiş olur (Tanır 1997; Alnak 2007).

### **3.2. Kullanım Alanları**

Mühendislikte yaygın olarak kullanılan malzemelerin yetersiz olduğu durumlarda kullanılan kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça yaygındır. Hemen hemen bütün endüstri dalında kompozit malzeme kullanımına rastlamak mümkündür. Şekil 3.1'de kompozit yapıların bazı kullanım alanlarının görselleri verilmiştir.

Kompozitlerin kullanım alanlarından; uçakların iç mekân parçaları, kanat, gövde, basınçlı tanklar, roket gövdeleri, helikopterlerin kabin duvarları, uçakların yolcu koltukları, fırlatma tüpleri gibi uygulamalarında kullanılır. Hafiflik, yorulma dayanımı ve korozyon dayanımlarından dolayı uzay/havacılık sektörünün %50'sini oluştururlar.

Özellikle hafiflik, yorulma dayanımı gibi özelliklerinden ötürü otomobillerin, tampon parçalarında, havalandırma kanallarında, radyatör panellerinin pervanelerinde, karoserlerde, jantlarda, gösterge panelleri, ön ve arka far yuvalarında, rüzgârlıklarda, torpidolarda, süspansiyon sistemlerinde, çeşitli motor aksamları gibi uygulamalarda kullanılır.

Köprü ve merdiven desteklerinde, bina dış cephe giydirmelerinde ses perdeleri, panolar, döşeme elemanları, çatılar, temiz su ve petrol boru hatlarında, prefabrik yapılarda, mutfak malzemesi, küvet-duş teknesi, mobilyalar gibi malzeme üretiminin ekonomiklik, hafiflik, iyi ısı yalıtımı, tasarım kolaylığı, çevresel etkenlere karşı dayanım avantajlarından dolayı inşaat sektöründe kullanılırlar.

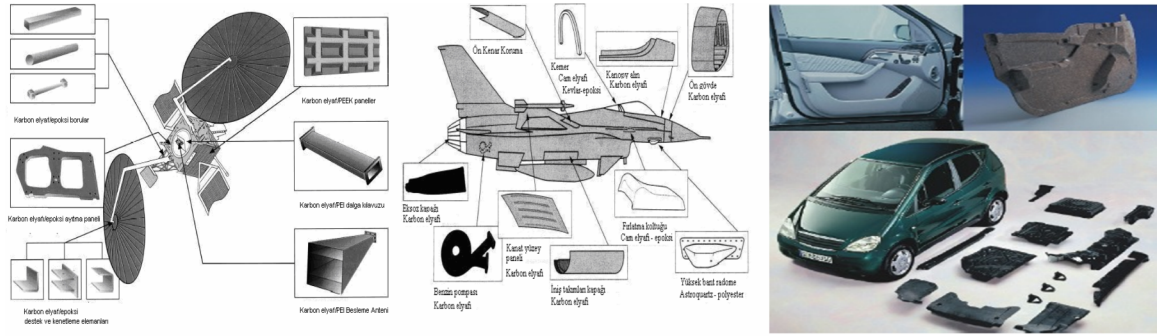
Aydınlatma direkleri, kablo kanalları, dağıtım panoları, elektronik malzemeler, cihaz gövdeleri, kılavuz kabloları, rüzgâr türbinlerinin kanatları gibi uygulamalarda kimyasal dayanım, korozyon dayanımı, sağlamlık, hafiflik özellikleri ile elektrik ve enerji sektöründe kullanılmaktadır.

Miğfer ve kurşungeçirmez yelekler, mühimmat parçaları, taşıma sandıkları, araç zırhlandırılması, kimyasal yakıt tankları, atık ve taşıma boruları, pompa ve valf parçaları, asit banyoları gibi savunma sanayii ve kimyasal sanayisinde kompozitler hafiflik ve dayanım özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yorulma dayanımı ve hafiflik gibi özellikleriyle hızlı tren ve metrolarda, düşük atalet, yüksek hız, çabuk ivmelenme, yanmazlık sağlayan katkıları ile demiryolu taşımacılığında kullanılmaktadır.

Yat ve teknelerde, arıtma tankları, basınçlı tanklar, gemi gövdeleri imalatında kullanımları düşük ısıl genleşme katsayıları, yüksek kimyasal dayanımları, farklı şekillere sahip gövdelerin kolaylıkla üretilmesi ve hafifliklerinden dolayı yaygın olarak denizcilik sektöründe kullanılırlar.

Bisikletler, kasklar, tenis raketleri, golf ve hokey sopaları, kanolar, kayak takımları, yelken direkleri, kürekleri gibi uygulamalarda kompozitler hafiflik, yorulma dayanımlarından dolayı kullanımları spor aletleri yapımında ön plana çıkmaktadırlar (Gay et al. 2003; Özek 2005; İnkaya 2011).



Şekil 3.1. Kompozit yapıların çeşitli kullanım alanları (Mazumdar 2002; URL-3)

### 3.3. Kompozitlerin Yapısı

Kompozit malzemelerin diğer malzeme gruplarına göre mekanik özelliklerinin üstün olması ile beraber aşağıda belirtilen faktörlere bağlıdır;

- ❖ Matris türü,
- ❖ Takviye elemanının türü ve özelliği,
- ❖ Elyaf doğrultusu,
- ❖ Üretim yöntemi,
- ❖ Elyaf geometrisi,
- ❖ Takviye elemanının hacim oranı,
- ❖ Matris takviye arkasındaki bağın özellikleri.

Kompozit malzemeler genellikle matris adı verilen ana yapı ve takviye elemanı denilen destekleyici elemandan meydana gelir. Malzemeyi güçlendirmek amacıyla içerisine yerleştirilmiş takviye elemanları karıştırıldığında, belli bir kategoride tutacak ve mukavemet artışında görev üstlenecek üniform yapıya matris adı verilir. Doğru matris yapısının seçilmesi takviye elemanından istenen başarıyı sağlayacaktır (Özek 2005).

Genel olarak kompozit malzemelerde matris hafif, düşük dayanımlı ve sünek yapıdadır. Takviye elemanı ise daha sert, yüksek dayanımlı ve rijit yapıdadır (ASM Handbook 2001).

Kompozit malzeme içerisinde takviye elemanının başlıca görevleri;

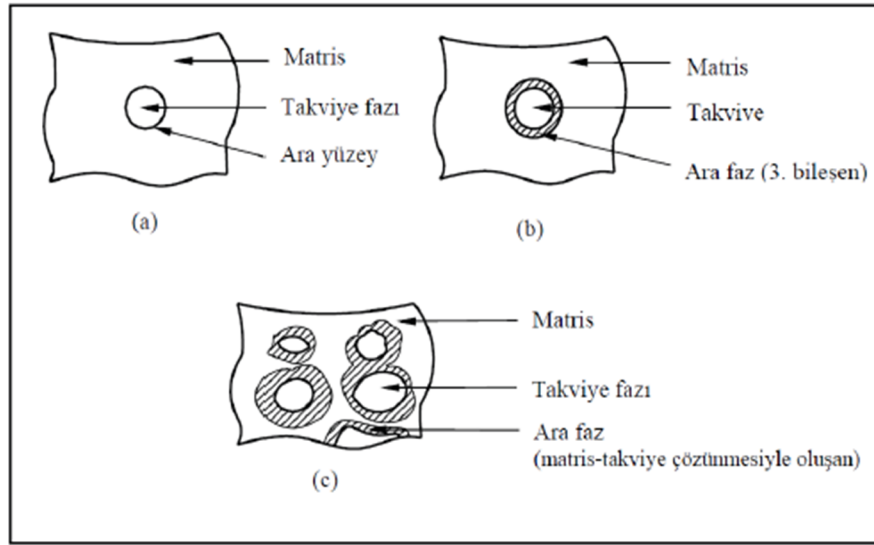
- ❖ Malzeme içerisinde, yükün büyük bir kısmını taşımak. Bu oran %70-90 ağırlığında fiberler tarafından taşınır,
- ❖ Kompozit malzemeyi üstün kılacak önemli unsurlardan olan mukavemet, ısı kararlılık, tokluk ve gerekli yapısal özellikleri sağlamak,
- ❖ Takviye elemanının kullanım türüne göre izolasyon ve elektriksel iletkenliğini sağlamaktır.

Kompozit malzeme yapısındaki matris malzemesinin görevleri;

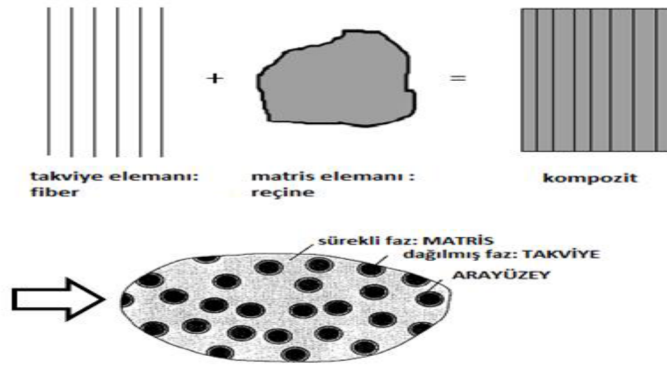
- ❖ Takviye elemanlarını birbirine bağlayarak, yapısal bütünlüğü oluşturur ve yapıya rijitlik kazandırır,
- ❖ Dışardan malzemeye uygulanan kuvveti takviye elemanlarına iletir ve fiberler arasında dağılmasını sağlar,
- ❖ Takviye elemanlarının bağımsız davranmalarına yardımcı olur ve çatlakların ilerlemesini yavaşlatır veya durdurabilir,
- ❖ Korozyon, oksidasyon gibi ortam etkilerinden ve darbeler gibi dış etkenlerden takviye elemanlarını korur,
- ❖ Malzeme yapısına bir form verir,
- ❖ Matris, ürün imalatının nihai kısmında iyi bir yüzey kalitesi sağlar,
- ❖ Matris seçiminde malzemenin nem ve su alma özelliği göz önünde bulundurulmalıdır (Mazumdar 2002).

Şekil. 3.2 kompozit malzemedeki matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar yapısı, Şekil 3.3'te kompozit yapıların ana bileşenlerinin şematik gösterimi verilmiştir.





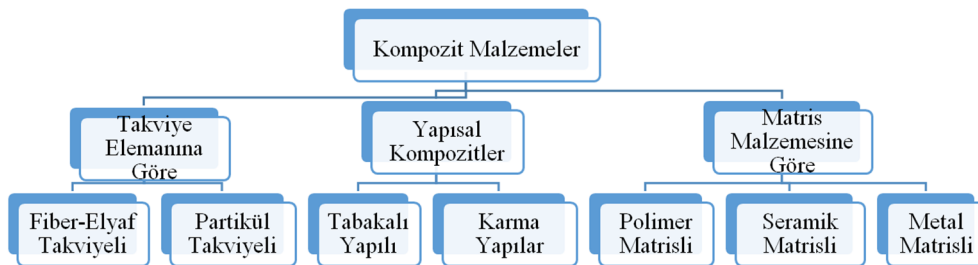
Şekil 3.2. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar; a) doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) kaplanmış takviye kullanımı, c) karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu (Çanakçı 2006)



Şekil 3.3. Kompozit yapıların ana bileşenlerinin şematik gösterimi (Jones et al.1999)

### 3.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

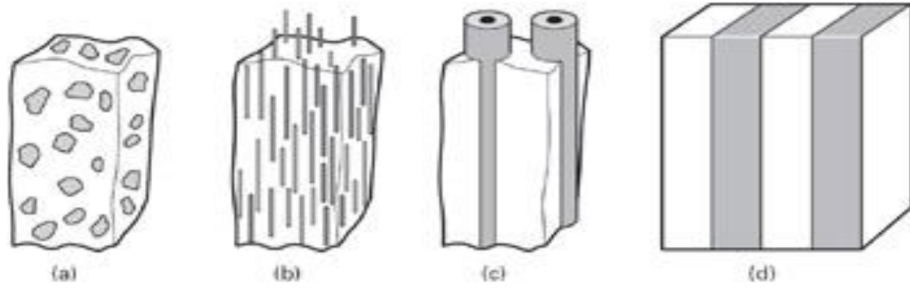
Kompozit malzemeleri takviye elemanına, yapısına ve matris malzemesine göre üç ana gruba ayırmak mümkündür. Şekil 3.4'te kompozit malzemeler sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

### 3.4.1. Takviye Elemanına Göre Kompozitler

Kompozit malzeme yapılarının çeşitli şekillerde takviye edilmiş hali Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Çeşitli şekillerde takviye edilmiş kompozit malzeme yapıları; a) partikül takviyeli, b) kısa fiber takviyeli, c) uzun fiber takviyeli, d) lamine yapılı kompozit malzeme

Kompozit malzemelerin özellikleri kompoziti oluşturan, fazların dağılımına, bileşenlerin özelliklerine ve şekline bağlı olarak farklılık gösterebilir. En önemli etkenlerden biride matris içerisindeki takviye elemanın hacim miktarıdır. Takviye elemanı kompozit içerisindeki dağılımı fiziksel ve mekanik özellikleri etkilemektedir. Uygun olmayan bir dağılım, malzeme içerisinde kırılmaya elverişli zayıf bölgelerin oluşumunu ve homojensizliği artırır (Dave 1999).

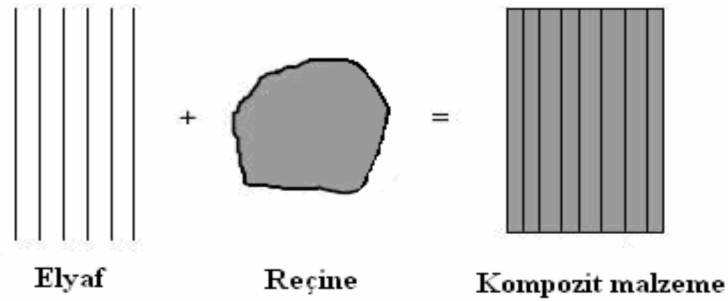
Kompozit malzemedeki takviye elemanı seçimine etki eden faktörler şu şekilde sıralanabilir;

- ❖ Elektrik ve ısı iletkenlik,
- ❖ Yorulma mukavemeti,
- ❖ Düşük ağırlık,
- ❖ Malzemenin gevrek ya da esnek olması,
- ❖ Mukavemet ve modül (çekme-basma),
- ❖ Maliyet (Altan vd.1997).

#### 3.4.1.1. Fiber-Elyaf Takviyeli Kompozitler

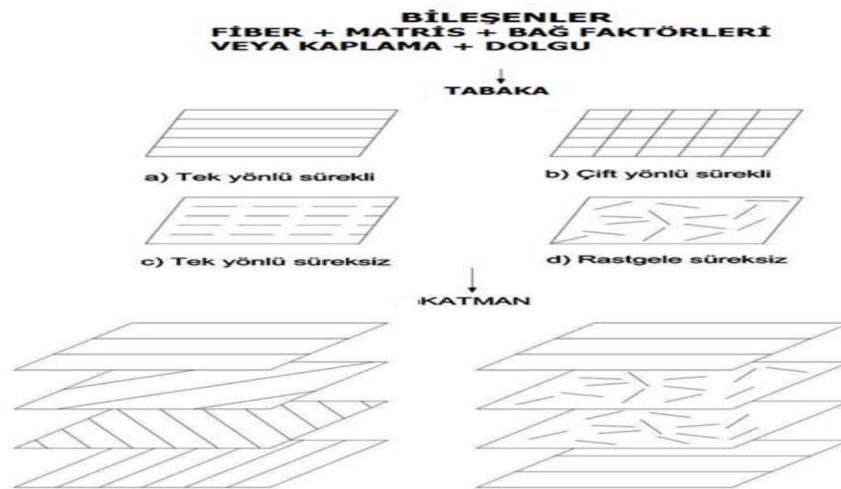
Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkiler. Sürekli, süreksiz diye incelenirler.

Kompozit malzemenin mukavemeti elyaf eksenine doğru yönünde büyük değerlerdedir, elyafa dik yönünde daha küçük mukavemete sahiptir (Karcı 2009). Şekil 3.6'da kompozit malzemelerin elyaf ve reçine içeriğinin şematik şekli verilmiştir.



Şekil 3.6. Elyaf ve reçine kullanarak kompozit malzemenin üretilmesi (Mazumdar, 2002)

Kompozit malzemede fiber takviyesi yüksek gerilme ve modüle sahip fiberlerden oluşmaktadır. Fiber malzemeler kompozit malzeme yapısına gelen yükü taşırlar. Elyafın mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Elyafın uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen kuvvet miktarı artar. Kompozit yapının mukavemeti elyaf yapısının hatasız olmasına bağlıdır. Elyaf çeşitleri olarak cam fiber, karbon elyaf, kevlar49 fiber, seramik fiber, boron fiber ve alüminyum oksit fiberler mevcuttur. Fiber takviyeli kompozitlerin hafif oluşu uzay/havacılık ve otomotiv sektöründe yaygın kullanılmasına yol açmıştır. Şekil 3.7'de fiber takviyeli kompozitler için temel yapı blokları gösterilmiştir (Mallick 1993).



Şekil 3.7. Fiber takviyeli kompozitler için temel yapı blokları (Mallick 1993)

### 3.4.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Partikül takviyeli kompozitlerde çeşitli boyut ve şekillerdeki partiküller bir matris malzeme içinde gelişigüzel biçimde dağılım göstermesiyle elde edilir. Bu partiküllerin rastgele dağılımıyla parçacık takviyeli kompozit malzeme özellikleri homojen kabul edilir ve izotop yapıdadır.

Partiküller matrise kıyasla sert olmaları sebebiyle, matrisin plastik deformasyonunda bazı kısıtlamalara neden olur. Partiküller yükü paylaşmaktadırlar. Yapının mukavemeti partiküllerin sertliğine bağlıdır. En yaygın olarak kullanılan polimer matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Isıl ve elektrik iletkenliğini bu metal parçacıklar sağlar. Seramik matris içeren yapıların sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Genellikle sertleştirilmiş alaşım olarak karşımıza çıkar. Bununla birlikte uçak motor parçalarının üretiminde de tercih edilirler (Chang 1983).

Bu tip kompozitler için yaklaşık olarak partikül boyutu 1 mikrondan büyük olmakla beraber, parçacık olarak alüminyum oksit ve silisyum oksitten oluşan seramiklerde kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin takviye eleman miktarı %25'ten fazladır. Uygulanan kuvvet matris ve takviye elemanı ile beraber taşınır (Cabioğlu 2012).

Parçacık takviyeli kompozitler,

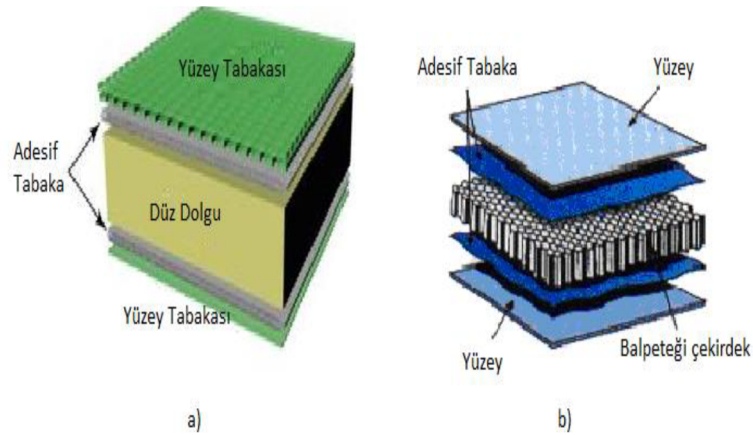
- ❖ Metal dışı matris içinde metal dışı parçacık (beton, kauçuk benzeri parçacık takviyeli kırılğan polimer matris),
- ❖ Metal dışı matris içinde metalik matris (alüminyum parçacık destekli poliüretan kauçuk),
- ❖ Metalik parçacık destekli metalik matris (işleme kabiliyetini geliştirmek için kurşun parçacık takviyeli çelik),
- ❖ Metal dışı parçacık destekli metalik matris (silisyum karbür parçacıklı alüminyum) bileşenlerinde kullanılırlar (Matthews and Rawlings 1994; Dave and Loos 1999).

### 3.4.2. Yapısal Kompozitler

#### 3.4.2.1. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit yapı en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip kompozit türlerinden biridir. Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan meydana gelir ve çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. İhtiyaç doğrultusunda çok farklı bileşimlerden tabakalanmış kompozitler üretilebilmektedir. Örneğin, metaller üzerine uygulanan metalik, organik ve seramik kaplamalar, cam plastik cam tabakalardan oluşan seramikler, kâğıt üzerine plastik kaplamalı kompozitler verilebilir (Cabioğlu 2012).

Metallere göre düşük ağırlık ve aynı zamanda mukavemetli olmalarından dolayı tercih edilirler. Tabakalı kompozitler ucuz olmaları, yüksek dayanım, düşük ağırlık, yüksek aşınma dayanımı, estetik görünüm ve mükemmel ısı genleşme gibi özelliklere sahip olabilmektedir. Uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılabilirler. Tabakalı (sandwich) yapı kompozit malzemelerden düz dolgu ve bal peteği (honeycomb) dolgulu yapılar Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Yapısal kompozit malzemelerin yapıları ve bileşenleri (URL- 4; URL-5)

#### 3.4.2.2. Karma Yapılı Kompozitler

Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunması durumudur. Bu tip kompozitlere hidrit kompozitlerde denir. Bu kompozit malzeme türü yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır, ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak basma

mukavemeti iyi olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit malzeme oluşturmada, meydana gelen karma kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük, basma mukavemetinde kevlar elyaflı kompozitten daha yüksek olmaktadır (Cabioğlu 2012).

### 3.4.3. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Matris malzeme özellikleri kompozit malzemenin dayanımını etkiler. Özellikle yüksek sıcaklıklarda matris malzemenin dayanımının düşmesi kompozit malzemenin dayanımının düşmesine sebep olur. Bu özellikle polimer esaslı kompozitlerde daha sık görülmektedir. Matrisin çoğu sıvı haldedir, bu yüzden matris için viskozite çok önemlidir. Kür zamanı, ergime noktası, sıcaklık ve fiziksel özelliklerde matris için önemli olan diğer faktörlerdendir. Matris malzemeler temelde üç ana grupta toplanırlar; (Jones 1999; Strong 2008)

- ❖ Polimer matrisli kompozitler,
- ❖ Seramik matrisli kompozitler,
- ❖ Metal matrisli kompozitler.

#### 3.4.3.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Matris olarak kullanılan polimer, metal ve seramiklere göre çok daha kompleks, ucuz ve kolaylıkla işlenebilen malzeme türleridir. Polimerler endüstride tartışmasız en çok kullanılan matris türüdür. Öte yandan düşük elastik modülü ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptir. Pekiştirici olarak cam, karbon, kevlar, boron lifleri kullanılır. Polimer kompozitlerde en çok kullanılan bağlayıcı malzemeler, epoksi, polyester, vinilester, silikon, termoplastik reçinelerdir (Aran 1990).

Polimer kompozitlerin üretilmesinde genel olarak kullanılan metotlar; elle sıvama, telle sarma, kese kalıplama işlemi, sıvı akış tekniği, ekstrüzyon ve ısıl oluşum metotlarıdır. Polimer kompozitlerin kullanım alanları genellikle uçak, roket, füze gövdeleri, kaliteli spor malzemeleri, yapay kemik, lastik, otomotiv sanayii, beyaz eşya, basınç dayanımlı borular, deniz araç gövdeleri yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca dünya ve ülkemizdeki çalışmalarla çatlak oluşturmeyen, darbe dayanımı yüksek, yüksek ısı dayanımlı, daha sağlam ve güçlü elyaflar ve sert dayanımlı matrisler üzerine çalışmalar yapılarak

havacılık, robotik ve tıp alanlarında da kullanımını geliştirilmek istenmektedir (Demirkesen 1995; Şahin 2000).

### 3.4.3.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin bileşiminden oluşan seramik kompozitler, genellikle yüksek termal performans özelliklerine ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılan çok sert ve kırılğan malzemelerdir. Ayrıca yüksek sıcaklarda bile yüksek elastik özellik gösterirler. Düşük yoğunluğa sahip, yalıtkan ve kimyasal inerttirler (Chawla 2003; Becenen 2008).

Matris malzemesi olarak silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cam-seramik, seramik-seramik esaslı fiberlerle takviye edilir. Bu kompozit türleri genelde uzay araçları, askeri amaçlı araçlar, otomotiv motor sanayii gibi uygulamalarda kullanılır.

### 3.4.3.3. Metal Matrisli Kompozitler

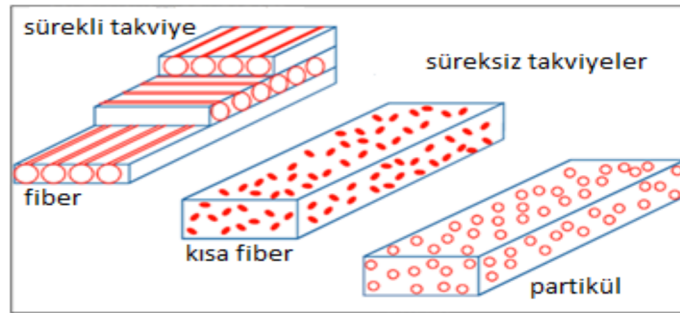
Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler istenen ve gerekli özellikleri temin etmek üzere en az biri metal olan iki ya da daha fazla farklı malzemenin birleşimiyle elde edilen yeni üründür (Şahin 2010). MMK genelde iki bileşenden oluşmaktadır. Genelde biri metal alaşımı olan matris ve diğeri takviye malzemesidir. Genel olarak bir metaller arası bileşik oksit, bir karbür veya nitrürdür (Akbulut vd.1995).

MMK, yüksek akma ve çekme dayanımları, yüksek elastite modülü gibi mekanik özelliklere sahiptir. Elektrik ve ısı iletimi gibi fiziksel özelliklerin yanı sıra iyi bir sürtünme davranışı ve aşınma direncine sahiptir. Günümüz koşullarında imal edilen MMK malzemeler üç gruba ayrılmaktadır. Partikül takviyeli, whisker süreksiz (kısa) takviyeli fiberler, sürekli takviyeli fiberler vb. kullanılmaktadır. Takviye elemanının ismiyle kompozit malzeme isimlendirilir. Şekil 3.9 ve 3.10'da takviye malzemesinin geometrisine göre MMK'ler verilmiştir. (Zhou et al. 1997; Altınsoy 2009).

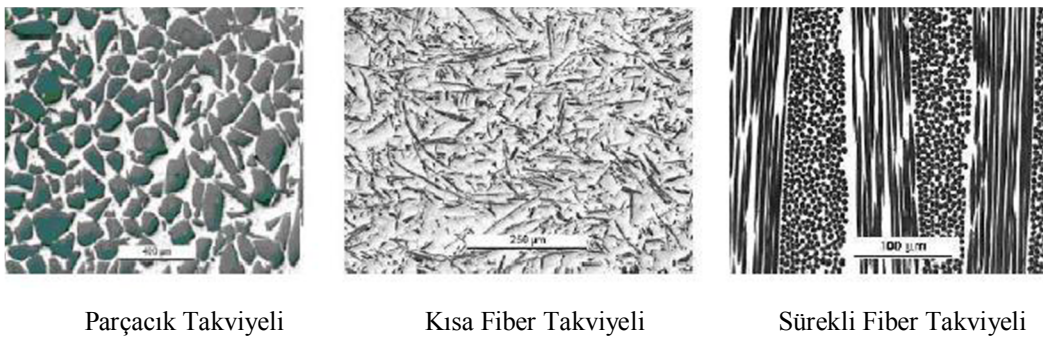
**Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler:** Bu kompozitlerde ilave edilen takviye elemanının boyutu 1 mikrondan büyüktür. Hacim oranı %5-40 aralığındadır. Elastite modülü ve belli oranda mukavemet artışı görülmektedir. Maliyetleri düşüktür. Rijitlikte olumlu gelişme söz konusudur. Genellikle izotropik özellik gösterirler (Samal et al.2013).

**Whisker ve Kısa Fiberli (Sürekli) Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler:** Seçilen matris içerisine düzenli olarak dağılan çok ince partiküller şeklindeki yapı olarak oluşur. Partikül boyutu yaklaşık olarak 0,01 mikrondan 0,1 mikrona kadar değişebilir. Hacimsel oran %1-%1,5 arasında olur. Büyük yük iletim yeteneğine sahiptir. Yüksek dayanımlıdır. Mukavemetleri yüksektir ancak partikül esaslılara nazaran pahalıdır (Haris 1999; ASM Handbook 2001; Eker 2008).

**Sürekli Fiber Katkılı Metal Matrisli Kompozitler:** Bu kompozitlerde takviye elemanının boyutu 0,1 mikron ve 250 mikron aralığında olabilir. %70'e kadar hacimsel oran artırılabilir. Fiber takviyeli malzemelerin diğer iki takviyeli elemanlardan ayıran özellik, takviye fazı partiküllerinin uzun bir boyutunun oluşudur. Fiber takviye elemanı tüm özelliklerinde yüksek performans sağlar. Elastite modülü ve mukavemeti yüksek olmasına karşın, kompozit özellikleri anizotropiktir. Kullanılan fiber takviyeleri ve kompozit üretim maliyeti yüksektir. Havacılık ve uzay endüstrisi ile enerji sektöründe kullanılmalarıyla tercih edilmektedir (Haris 1999; ASM Handbook 2001; Eker 2008).



Şekil 3.9. Takviye malzemesinin geometrisine göre MMK'ler (URL-6)



Şekil 3.10. Farklı takviye geometrisine sahip MMK'lerin mikroskop görüntüleri (Varol 2012)



Günümüz şartlarında üretilen ve belli uygulama alanında kullanılacak olan en uygun kompoziti elde edebilmek için MMK bileşenlerini iyi bilmemiz gerekir. Takviye elemanının boyutu, cinsi, şekli, dağılımı, kimyasal özellikleri, yüzey özellikleri, homojenliği ve dağılım miktarı gibi yapısal özellikleri de bilinmesi gerekmektedir. Matris alaşımı ve takviye fazının kimyasal uyumluluğu da önem arz etmektedir. Tablo 3.1’de bazı MMK malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir (Diler ve İpek 2013).

Tablo 3.1. Bazı MMK malzemelerin mekanik özellikleri (Eker 2008)

<b>Metal Matrisli Kompozit Malzeme</b>	<b>Çekme Dayanımı (Mpa)</b>	<b>Elastik Modülü (Gpa)</b>	<b>Kopmadaki Uzamanın Miktarı (%)</b>
<u>Sürekli fiberli</u> (fiber yönünde özellikleri)			
Al 2024-T6 (%45 Bor)	1458	230	0,810
Al 6061-T6 (%51 Bor)	1417	231	0,735
Al 6061-T6 (%47 Bor)	1462	204	0,89
<u>Süreksiz Fiberli</u>			
Al 2124-T6 (%20SiC)	650	127	2,4
Al 6061-T6 (%20 SiC)	480	115	5
<u>Partikül takviyeli</u>			
Al 2124-F (%20SiC)	552	103	7,0
Al 6061 F (%20SiC)	496	103	5,5
<u>Güçlendirilmemiş</u>			
Al 2124-F	455	71	9
Al 6061-F	310	68,9	12

Metal matrisli kompozit malzemelerin yerlerine göre kullanıldıkları ve metal alaşımlarına göre avantajları;

- ❖ Yüksek elastite modülüne sahiptirler,
- ❖ Yüksek mukavemet gösterirler,
- ❖ Daha yüksek sıcaklıklarda çalışırlar,
- ❖ Yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri mevcuttur,
- ❖ Boyutsal kararlılıkları daha iyidir,
- ❖ Yüksek yorulma ve aşınma direncine sahiptirler,
- ❖ Tekrar üretilebilir mikro yapı ve özelliklere sahiptirler,
- ❖ Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve modül özelliklerini birleştirirler.

Metal matrisli kompozit malzemelerin dezavantajları ise;

- ❖ Sıcaklık değişimlerinde ve ısıl şoka karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- ❖ Üreticilerin ve firmaların MMK yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle tam kapasite olarak cevap verememesi,
- ❖ Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat,
- ❖ Sünekliğinin metallere göre kısmen azalması,
- ❖ Sürekli fiber takviyeli kompozit üretiminin karmaşık ve zor üretim işlemlerinin olması (döküm yöntemi hariç) (Eker 2008).

MMK kullanıldıkları fiber ve matris malzeme türüne göre genellikle enerji, havacılık/uzay endüstrisi, nükleer santraller gibi alanlarda kullanılırlar. Tablo 3.2'de kullanım alanları belirtilmiştir.

Tablo 3.2. Bazı metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları (Aktaş 2007)

Kompozit Türü	Uyulama Alanları	Bazı Ayırt Edici Özellikleri
Alüminyum - Grafit	Yataklar	Daha ucuz, daha hafif, kendi kendine yağlama, Cu, Pb, Su, Zn tasarrufu
Alüminyum-Grafit Alüminyum-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Alüminyum-SiC/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Otomobil pistonları, silindir gömlekleri, biyel kolları	Aşınma direnci, soğuk çalıştırma, daha hafif, yakıt tarassurufu, gelişmiş etkinlik
Bakır-Grafit	Kaymalı elektriksel kontaklar	Mükemmel iletkenlik, yapışmama özelliği
Alüminyum-SiC	Turboşarj pervaneleri	Yüksek sıcaklık kullanımı
Alüminyum-Cam Veya Karbon Mikrobalonları	Turboşarj pervaneleri	Ultra hafif malzemeler
Magnezyum-Karbon Fiber	Uzay yapıları için boru şeklindeki kompozitler	Sıfır ısı genleşme, yüksek sıcaklık mukavemeti, iyi özgül mukavemet ve modül
Alüminyum-Zirkon Alüminyum-SiC Alüminyum-Silika	Kesici takımlar, makine örtüleri, pervaneler	Sert, abrasiv aşınma dirençli malzemeler
Alüminyum-Kömür Alüminyum-Kil	Düşük maliyetli ve düşük enerjili malzemeler	Sert, abrasiv aşınma dirençli malzemeler

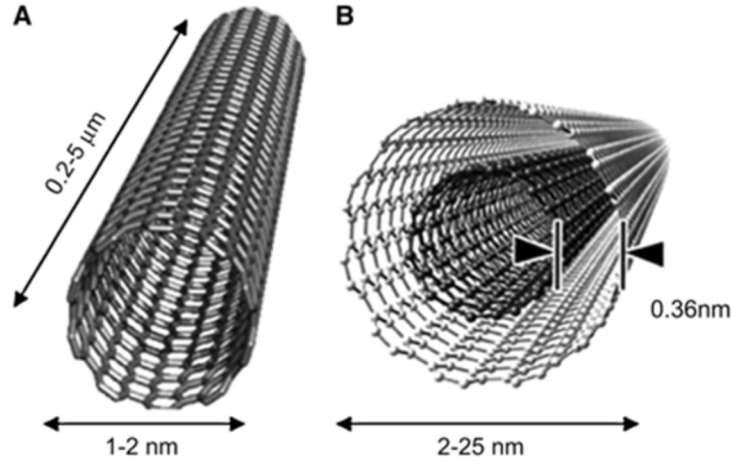
### 3.5. Karbon Nanotüpler (CNT)

Karbon nanotüpler, Lijima tarafından ark buharlaştırma yöntemiyle 1991 yılında keşfedilmiştir. Bu yıldan itibaren karbon nanotüpler hakkında birçok bilimsel araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar karbon nanotüplerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini ortaya çıkarmaktadır. Farklı amaç ve sahalarda yapılan araştırmalarla, karbon nanotüpler hakkında bilinmeyen özellikleri ortaya çıkarmak için çalışmalar sürmektedir (lijima 1991). Karbon nanotüpler, karbon atomlarının nanometre boyutunda bir çapa sahip, altıgen yapı oluşturacak biçimde bal eteği görünümlü silindirik tüp şeklindeki malzemedir. Kısaca CNT olarak bilinir. Özellikle kimyasal ve fiziksel özelliklerinin avantajı ile nano teknoloji optik, elektronik ve birçok alanda kullanılmaktadır (Bethude et al.1993; Saito et al. 1995; Salvetat 1999; Thostensan 2001).

Karbon nanotüpler yapıları itibariyle yüksek mukavemet değerine sahiptirler. Bunun yanında yüksek kopma gerilmesi (30 Gpa) ve elastite modülüne (1,0-1,4 TPa) sahiptirler. Özgül ağırlığı  $1,31 \text{ gr/cm}^3$ 'tür.  $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar kararlıdır (Çöl 2013). Karbon nanotüpler yapı olarak farklı boy, kalınlık, spiral, çok katmanlı tipe sahiptirler. Karbon nanotülerin morfolojik değişkenleri dikkate alınmalıdır. Farklı yapılar olarak adlandırılan kıvrımlı, yığılmış, dallı, balıksırtı, düz yapılar, tek, çift ve çoklu olan tabakalar, bozulmuş ve iyi hizalanmış tabaka kristallerdir. Topolojik ve boşluk kusurları fonksiyonel grup, kaplama ve oksidize olan yüzey kimyası şeklinde sıralanabilir (Küçükyıldırım 2012).

Karbon nanotüpler tek duvarlı karbon nanotüpler ve çok duvarlı karbon nanotüpler olarak iki kısımda incelenirler. Şekil 3.11'de Karbon nanotüp yapıları verilmiştir (Bethude et al.1993; Saito et al. 1995; Salvetat 1999; Thostensan 2001). Tek duvarlı karbon nanotüpler 1-100 mikron aralığında değişir. Tek grafen katmanına sahiptir. (Reich et al.2004). 1-5 nm çapa sahip tek bir grafit plakasının kıvrılmış silindirik yapı olarak da düşünebilir. Bu durum çok katmanlı nano tüplerin yapı taşlarını meydana getirir. (Koç 2003). Çok duvarlı karbon nanotüpler vander waals bağıyla birbirine bağlıdır. Ortak eksenli iki veya daha fazla grafit katmanların bir araya gelmesiyle oluşan iç içe silindirik yapıdır. (Reich et al,2004). İç çapı 1,5-15 nm ve dış çapı 2,5-30 nm'dir. Grafit katmanları aynı olmasına karşın elektrik özellikleri geometri yapılarına göre değişir. Metal ve yarı iletken olabilirler. Nanotüplerin, nano kompozit içerisinde en çok tercih edileni çok duvarlı karbon nanotüplerdir. (Çöl 2013). Teorik olarak ortalama çapı 1-2 nm civarındaki

tek duvarlı karbon nanotüplerin elastik katsayıları çok duvarlı karbon nanotüplere kıyasla daha yüksektir. Bu tip yapıdaki karbon nanotüplerin şekil değişikliğini veya bükülebilirlik özelliğinde olmasını sağlar (Sümer 2011).

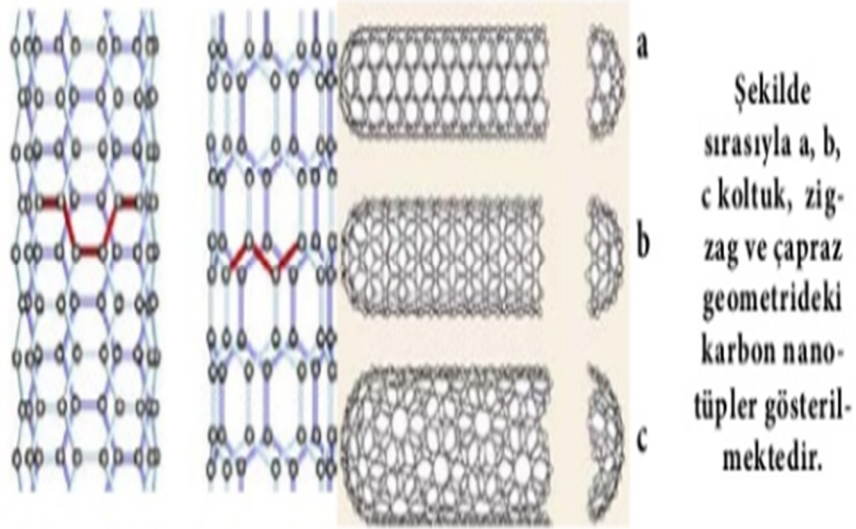


Şekil 3.11. Karbon nanotüp yapıları; a) tek duvarlı, b) çok duvarlı (Sümer 2011)

Her bir nano kompozit çalışmasında karbon nanotüplerin değişik tipleri arasında farklılık gösterdiğinden stratejik olarak seçimi önem arz etmektedir. (Shen 2007). Aşağıda bu farklılıklar maddeler halinde belirtilmiştir.

- Mekanik dayanım (Bretan 2004; Godara 2009,2010)
- Isıl ve elektrik iletkenliği (Spitalskaya 2010; Balakrishnan 2010; Kenato 2011)
- Kimyasal kararlılık, yoğunluk, matris malzemesiyle birleşme eğilimi, kimyasal ve fiziksel özellik (Mora 2009; Hayashi 2011).

Nano kompozitlerin performansı için, karbon nanotüplerin boyları önemli bir etkidir. Uzun bir tüple iyi bir mekanik özellik elde edilebilir. Fakat karmaşıklık ve dağılım sorunundan ötürü matriste boşluk oluşmasına sebeptir. Bu nedenle homojen bir dağılım elde etmek için kısaltılmış nanotüplerin tercih edilmesi daha uygundur (Çöl 2013). Karbon nanotüpler, grafit tabaka ve atom dizilişlerine göre üç farklı formda olabilir. Bunlar; koltuk (armchair), zigzag, kiral (chiral) formlarıdır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. CNT' in grafit tabaka ve atom dizilişleri (<https://www.slideshare.net>)

Teorik olarak karbon nanotüpler çelikten 10 kat daha fazla sertlik ve elastite modülüne sahiptir. Young modülü 1,2 TPa, sertliği 50-200 GPa olarak hesaplanmıştır (Qian at al.2002). Karbon nanotüplerin karbon atomları arasında meydana gelen  $sp^2$  kimyasal bağlarıdır. Bu bağ yapısı  $sp^3$  olan bağ yapısından daha güçlüdür. Elektrik iletkenliği çok yüksek olduğundan birçok çalışmada bu özelliğinden yararlanır. Teorik olarak elektrik akımı yoğunluğu  $4 \times 10^9$  A/cm<sup>2</sup> 'dir. Bu oran bakır bir kablodan yaklaşık 1000 kat daha fazla elektrik taşıma kapasitesine sahiptir. (Hong and Myung 2007). Tablo 3.3'te karbon nanotüplerin mekanik özelliklerinin diğer malzemeler ile karşılaştırılması ve Tablo 3.4'te karbon izomerlerine ait temel fiziksel özellikler verilmiştir.

Tablo 3.3. Karbon nanotüplerin mekanik özelliklerinin diğer malzemeler ile karşılaştırılması (URL-7)

Malzeme	Young Modülü (Gpa)	Gerilme Kuvveti (Gpa)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
Tek duvar nanotüp	1054	150	
Çok duvar nanotüp	1200	150	2600
Çelik	208	0,40	7,8
Epoksi	3,5	0,005	1,25
Odun	16,5	0,008	0,6

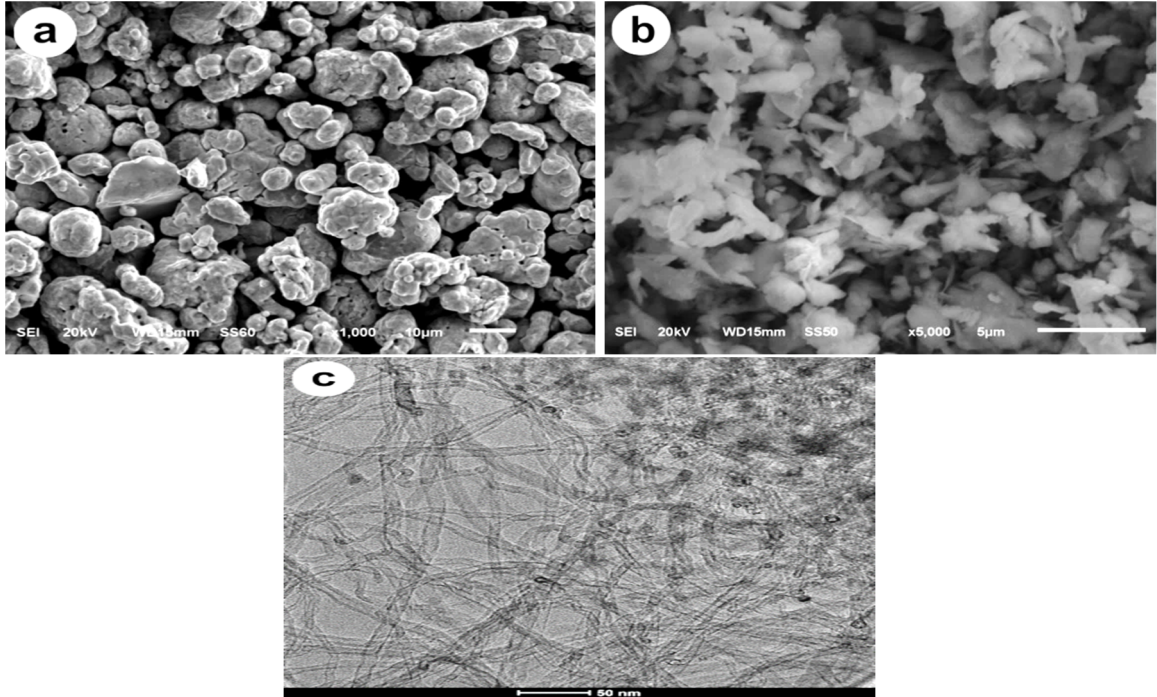
Tablo 3.4. Karbon izomerlerine ait temel fiziksel özellikler (Saito et al. 1995)

	<b>0 boyut</b>	<b>1 Boyut</b>	<b>2 Boyut</b>	<b>3 Boyut</b>
İzomer	Fulleren (C <sub>60</sub> )	Nanotüp	Grafit	elmas
Yoğunluk (G/Cm <sup>3</sup> )	1,72	1,2-2,0	2,26	3,515
Elektronik Özellik	Yarıiletken	Metal/Yarıiletken	Yarımetal	Yalıtkan
Bağ Yapısı	Sp <sup>2</sup>	Sp <sup>2</sup> (sp <sup>1</sup> )	Sp <sup>2</sup>	Sp <sup>3</sup>
Bağ Uzunluğu (Å <sup>0</sup> )	C = C (1,4)	C = C (1,44)	C = C (1,42)	C = C (1,54)

## 4. MALZEME VE YÖNTEM

### 4.1. Malzeme

Çalışmalarda Sigma-Aldrich firması tarafından üretilmiş saflığı %99 olan Cu tozu kullanılmıştır. Parçacık boyutu 14–25  $\mu\text{m}$  aralığında ve parçacık şekli küresele yakın olan Cu tozunun SEM görüntüsü Şekil 4.1.a'da verilmiştir. Özellikleri geliştirmek amacıyla ilave edilen Cr tozu Atlantic Equipment Engineers firmasından temin edilmiştir. SEM görüntüsü Şekil 4.1.b'de verilmiş olan bu toz %99,8 saflıkta olup, parçacık boyutu 1-5 $\mu\text{m}$  aralığındadır. Şekil 4.1.c'de kompozit üretiminde kullanılan çok duvarlı CNT'lerin Bayburt Üniversitesi'nde bulunan FEI marka TALOS F200S TEM 200 kV model geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ile alınan görüntüsü verilmiştir. Grafen Chemical Industries Co. firmasından temin edilmiş olan CNT'ler 9,5 nm çapında ve 1,5  $\mu\text{m}$  uzunluğundadır. Üreticinin verdiği bilgiye göre CNT'lerin saflığı %90'dır.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan; a) Cu tozunun SEM görüntüsü, b) Cr tozunun SEM görüntüsü, c) CNT'lerin TEM görüntüsü

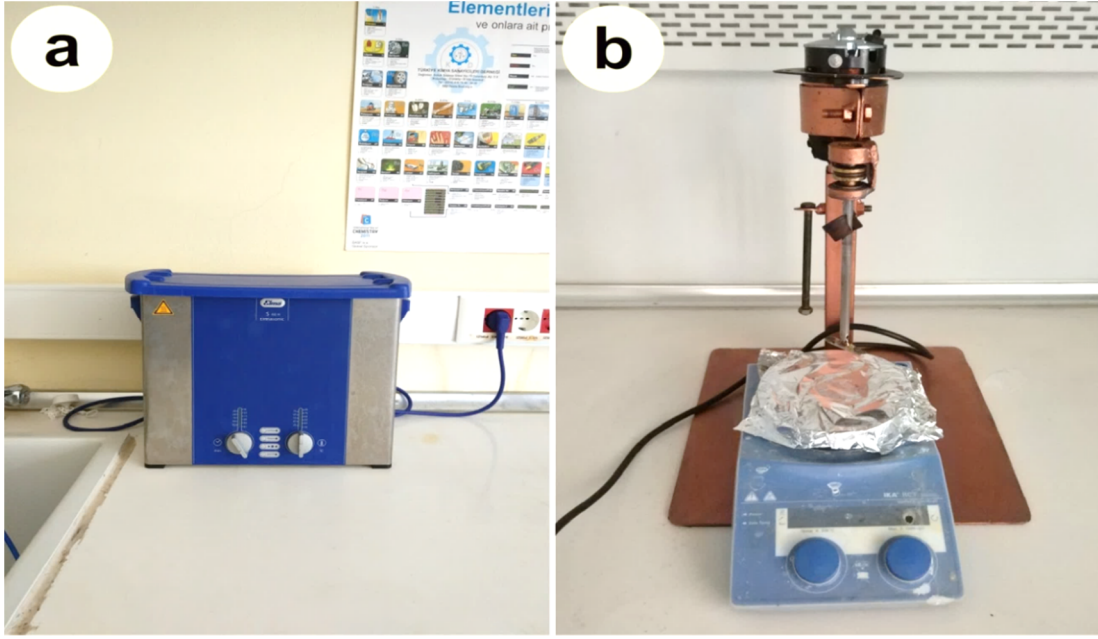
## 4.2. Yöntem

Tablo 4.1’de üretimi yapılacak kompozitler için hazırlanan toz karışımlarının hacimsel oranları verilmiştir. Cr ilave edilen numunelerde, Cr oranı ağırlıkça %0,5 olacak şekilde ayarlanmış olup, bu oran Tablo 4.1’deki hacim oranlarına karşılık gelmektedir. Tabloda verilen oranları sağlayacak şekilde 0,0001 hassasiyetli terazide tartılan tozlar 250 cc’lik erlen içerisine doldurulmuştur. Erlen içerisine tozlara ilave olarak toz hacminin %25’i kadar parafin mum ve 150 cc’ye kadar hegzan ( $C_6H_{14}$ ) ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama, vidalı kapak ile ağzı sıkıca kapatılan ve parafin mum bandı ile sarılan erlenin 60 °C’ye (parafin mumun erime sıcaklığının üzerinde) ısıtılmış Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı’nda bulunan Elma marka S 60 H model ultrasonik banyo cihazının (Şekil 4.2.a) süpürme modunda 1 saat titreşime maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucu tüm CNT’lerin hegzan-parafin çözeltisi içerisinde homojen dağılımı sağlanmış ve soğuma sonucu parafinin sağladığı vizkozite sayesinde bekleme ile herhangi bir ayrışmanın olmadığı görülmüştür. Karıştırma işleminin ikinci aşaması, 100 °C’ye (hegzanın kaynama noktasının, 68 °C, üzerine) ısıtılmış hot plate üzerine yerleştirilen erlen içerisinde özel olarak hazırlanmış pervaneli dikey karıştırıcı (Şekil 4.2.b) kullanılarak yapılmıştır. Karıştırıcı hem yükseklik ayarı yapılabilecek hem de pervanesi katlanarak erlenin dar ağzından içeri girebilecek şekilde tasarlanmıştır. Karıştırma esnasında karıştırıcının pervanesi erlenin tabanına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede Cu parçacıklarının, CNT’lerin dağıtılmış olduğu hegzan-parafin mum çözeltisi içerisinde sürekli hareket etmeleri sağlanmış ve tüm hegzan uçana kadar askıda kalarak dibe çökmeleri önlenmiştir. Hegzan tamamen uçtuktan sonra geriye içerisinde CNT’lerin homojen dağıldığı parafin mum tarafından kuşatılmış Cu parçacıklarından oluşan homojen bir karışım kalmıştır.

Tablo 4.1. Üretilen kompozit numunelerin hacimsel % cinsinden bileşenleri

Numune	Cu	CNT	Cr
%3 CNT	97	3	-
%6 CNT	94	6	-
%3 CNT+Cr	96,3939	3	0,6061
%6 CNT+Cr	93,40875	6	0,59125





Şekil 4.2. a) Karıştırma işleminde kullanılan ultrasonik banyo cihazı, b) özel olarak tasarlanmış pervaneli karıştırıcı

Elde edilen karışımlar grafit kalıp kullanılarak Zheng Zhou Golden Highway Co., LTD Sintering Machine marka cihaz (Şekil 4.3.) ile vakum ortamında 25 MPa basınç uygulanarak 880 °C’de sıcak presleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Cihazın sinterleme sıcaklığına ulaşma süresi 6 dakika olup numuneler bu sıcaklıkta 3 dakika bekletilmişlerdir. Soğuma esnasında 600 °C’ye kadar basınç sabit tutulmuş ve numunelerin soğuması yaklaşık 10 dakika sürmüştür.



Şekil 4.3. Sıcak presleme işleminin yapıldığı cihaz

Sıcak preslenmiş numunelerin bir kısmına ikinci bir yoğunlaştırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem 800 °C'ye ısıtılan numunelerin AISI 2080 soğuk iş takım çeliğinden (X210Cr12) yapılmış bir kalıp içerisinde 600 MPa basınca maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem esnasında ısıtılan numunelerin hızlı soğumasını önlemek için kalıba da bir ön ısıtma uygulanmıştır. İkinci yoğunlaştırma işleminden sonra numunelere 200 °C'de 1 saat süren bir gerilme giderme tavlaması uygulanmıştır. Üretilen numunelerin yoğunlukları Arşimet Prensibine göre ölçülmüştür. XRD analizi Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan Rigaku Ultima IV X-Ray Diffractometer cihazında Cu X-ışını tüpü ( $\lambda=1,5405$ ) kullanılarak 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızı ile yapılmıştır. SEM ve SEM/EDS incelemeleri Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan JEOL JSM 6510 taramalı elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS sistemi ile gerçekleştirilmiştir. SEM incelemeleri için numuneler metalografik hazırlık aşamalarından geçirildikten sonra %50 H<sub>2</sub>O + %50 HNO<sub>3</sub> çözeltisinde dağlanmışlardır. Sertlik ölçümleri Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde bulunan Wilson Hardness marka cihaz ile 25 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi ASTM: E8/E8M-11 standardına uygun olarak hazırlanmış numunelerin Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde bulunan Shimadzu marka AG-IC 50 kN model cihaz kullanılarak 1 mm/dk sabit hızla çekilmesi şeklinde yapılmıştır. Şekil 4.4'te çekme testlerinde kullanılan numunelerin fotoğrafı verilmiştir. Çekme testlerinde numunelerin çene içerisinde kaymasını önlemek için özel bir aparat kullanılmıştır. Şekil 4.5'te sertlik ölçümlerinde ve çekme testlerinde kullanılan cihazların resimleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Çekme testlerinde kullanılan numuneler



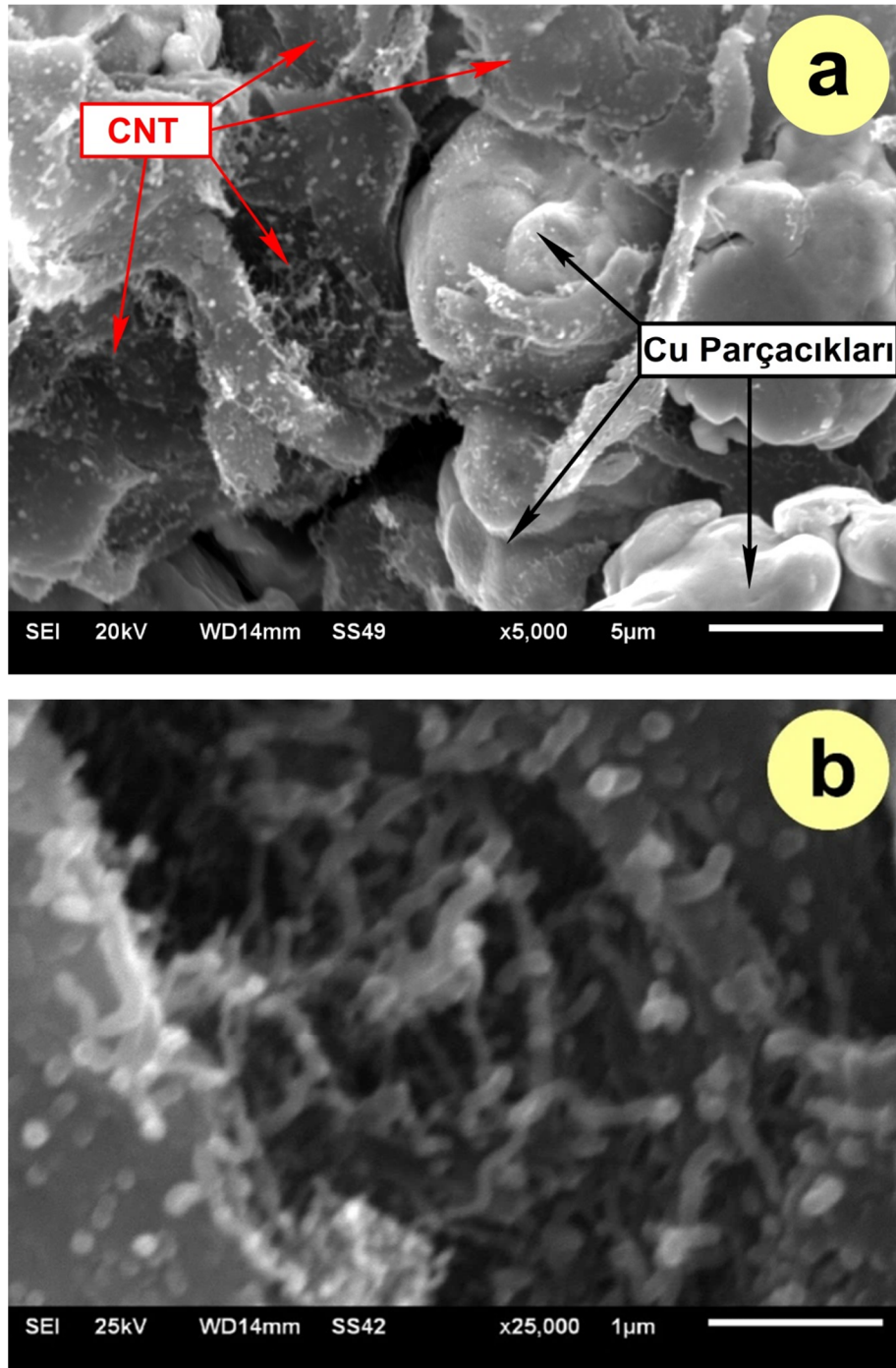
Şekil 4.5.a) Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihaz, b) çekme testlerinde kullanılan cihaz

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 5.1.a'da karıştırma işleminden sonra Cu/CNT tozundan alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüden CNT'lerin, hegzanın uçması sonucu tekrar katı hale geçen parafin mum içerisinde homojen bir dağılım sergiledikleri görülmektedir. İçerisinde CNT'lerin dağıldığı bu parafin mum Cu parçacıklarını kuşatmaktadır. CNT'lerin parafin içerisinde dağıtılmasının topaklanmayı önlediği gibi toz karışımının bekletilmesi veya kalıba doldurulup şekillendirilmesi esnasında meydana gelebilecek ayrışmaları da önleyeceği düşünülmektedir. Şekil 5.1.b'de daha yüksek büyütme ile alınan SEM görüntüsünde CNT'lerin parafin içerisindeki dağılımı daha net görülmektedir. Bu görüntüye göre CNT'ler herhangi bir yönlenmeye bağlı olmadan homojen bir dağılım sergilemektedirler.

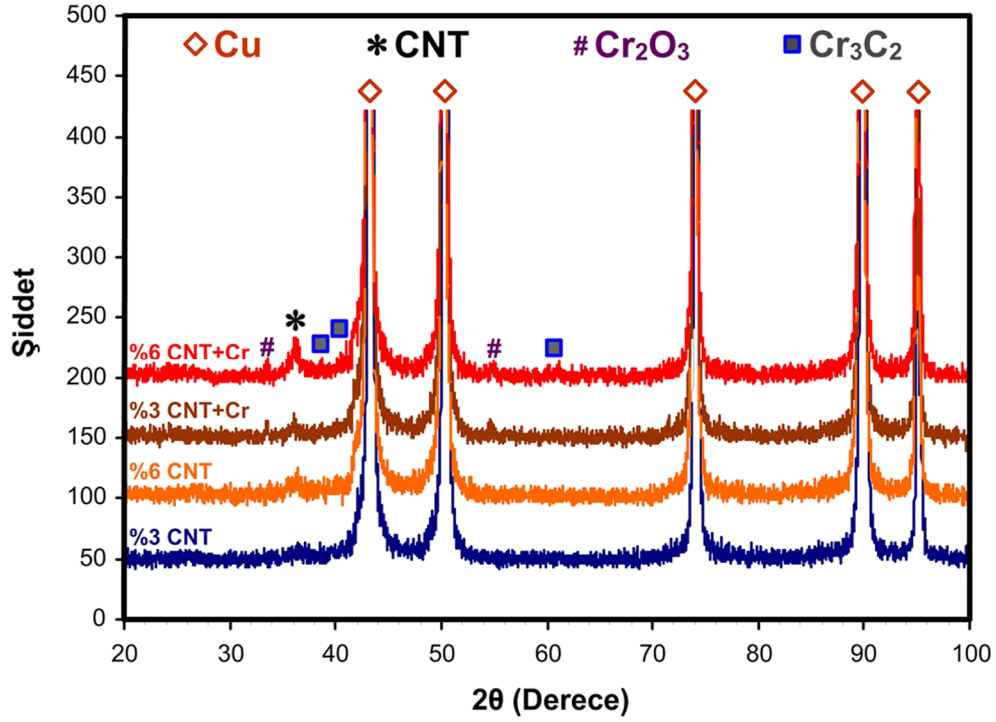
Şekil 5.2'de üretilen kompozit malzemelerin XRD analizinden elde edilen kırınım desenleri verilmiştir. Tüm numunelerin kırınım desenlerinde Cu ve CNT'lere ait pikler net olarak görülebilmektedir. Artan CNT oranıyla birlikte CNT'lere ait piklerin şiddetinde de artış olmaktadır. Cr ilave edilmiş numunelerin kırınım desenleri sinterleme işlemi esnasında  $Cr_2O_3$  bileşiğinin oluştuğunu göstermektedir. Sule ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada spark plazma sinterleme prosesi ile Cu/CNT kompozit malzemeler üretilmiştir (Sule et al. 2014). Söz konusu çalışmada başlangıç tozlarına yaptıkları XRD analizi ile Cu tozunun bakır oksit içerdiğini tespit etmişlerdir. Laboratuvar ortamında bekleme sonucu oluştuğunu tahmin ettikleri CuO'nin miktarını ağırlıkça %0,54 olarak tespit etmişlerdir. Argon atmosferinde yaptıkları indirgeme işlemi esnasında CuO'nin 530 °C'de bozunması olması sonucu  $O_2$  gazının serbest kaldığını belirtmişlerdir (Sule et al. 2014). Şimdiki çalışmada sıcak presleme işlemi vakum ortamında yapılmış olmasına rağmen XRD analizinde  $Cr_2O_3$  bileşiğine ait piklerin görülmesi, Sule ve arkadaşlarının belirttiği mekanizmayı akla getirmektedir. Yüksek sıcaklıkta CuO'nin bozunması ile serbest kalan  $O_2$ 'nin yanında Cr tozunun laboratuvar ortamından içerdiği oksijenin de  $Cr_2O_3$  oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir.





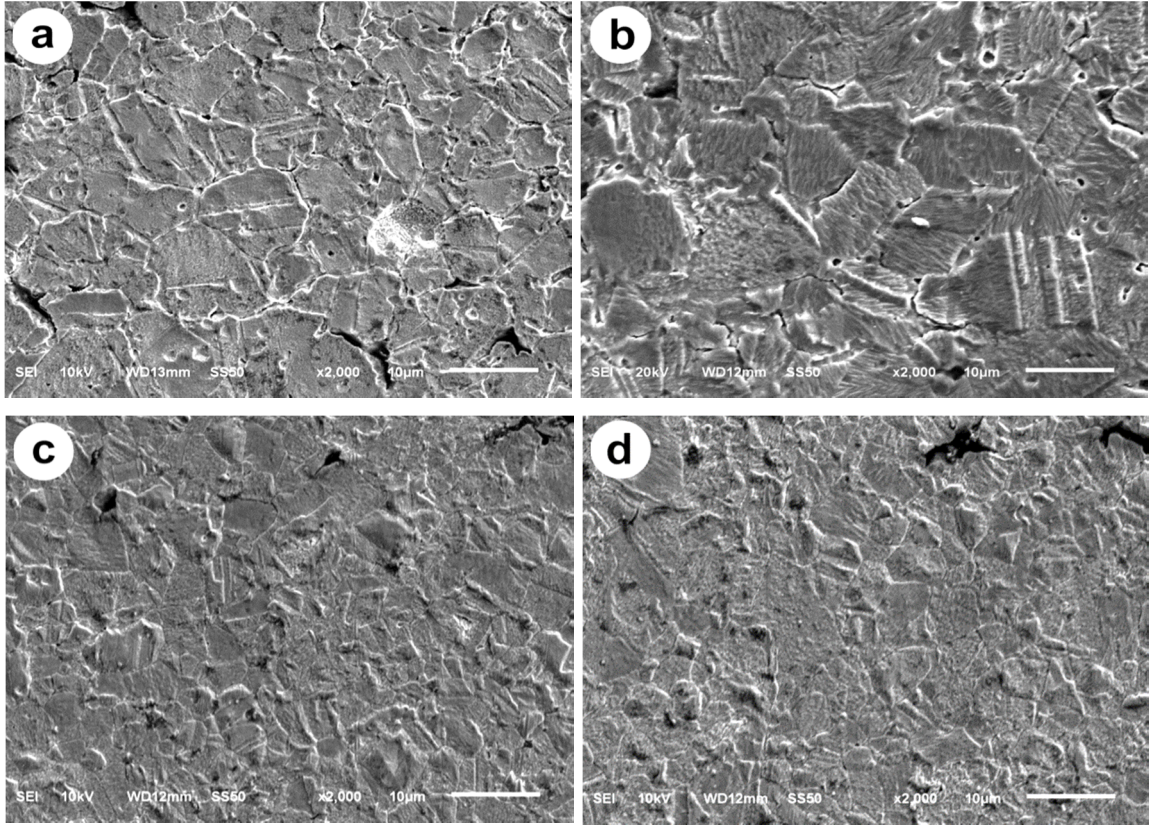
Şekil 5.1. Cu/CNT toz karışımından alınan SEM görüntüleri; a) düşük büyütme, b) yüksek büyütme

Cu/CNT kompozitlerde Cr alaşım elementi olarak kullanıldığında matris-takviye elemanı ara yüzeyinde  $Cr_3C_2$  karbürünün oluştuğunu rapor eden çalışmalar yapılmıştır (Chu et al. 2013; Kong et al. 2013). Cr içeren numunelerin kırınım desenleri, şimdiki çalışmada da ara yüzeyde  $Cr_3C_2$  bileşiğinin oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 5.2. Sıcak preslenmiş numunlerden alınmış XRD analizi

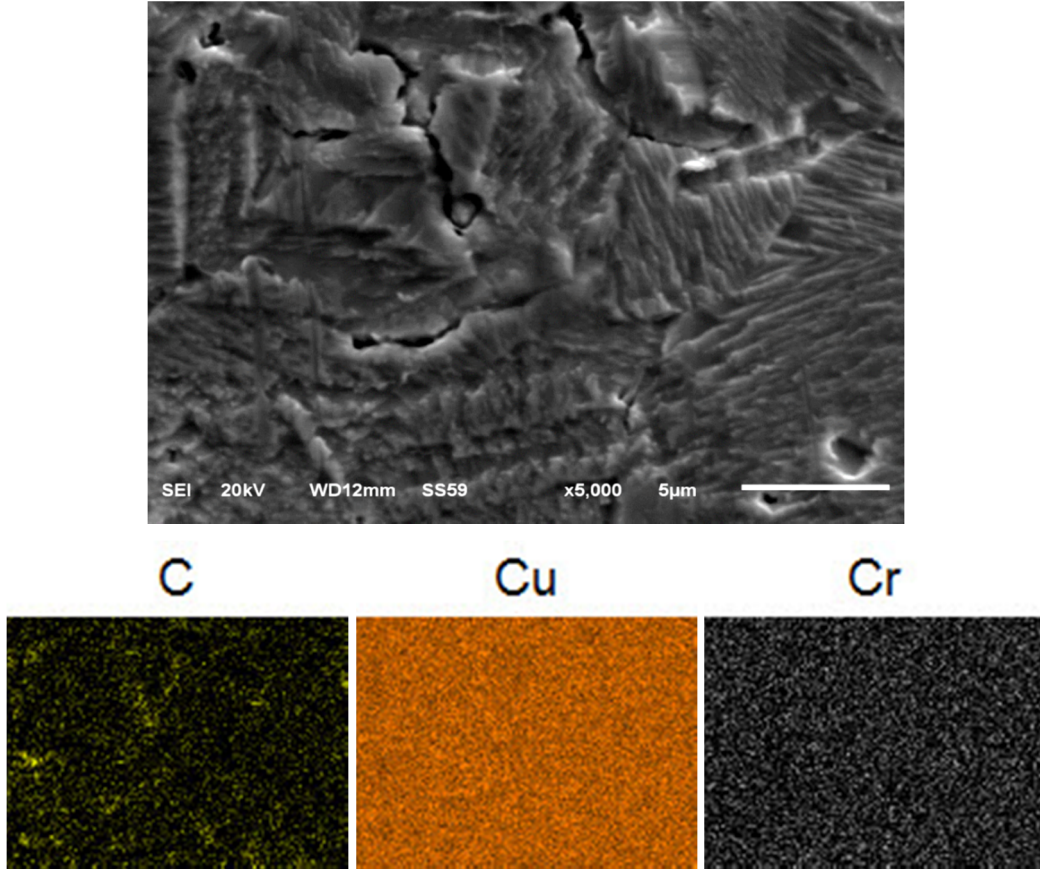
Şekil 5.3'te sıcak presleme işleminden sonra numunelerden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde tüm numunelerde ortalama tane boyutunun 10  $\mu\text{m}$ 'nin altında olduğu görülmektedir. Daoush ve arkadaşları CNT ilavesinin tane irileşmesini engellediğini bildirmişlerdir (Daoush et al. 2009). Bu açıklama ile uyumlu olarak şimdiki çalışmada yüksek oranda CNT ilavesi yapılan numunelerin tane boyutu diğerlerinden biraz daha incedir. Üretilen kompozit numunelerde oldukça ince bir tane yapısı elde edilmesinde sinterleme parametrelerinin de etkili olduğu düşünülmektedir. Sinterleme işlemi oldukça yüksek ısıtma ve soğutma hızları ile yapılmış ve sinterleme süresi çok kısa tutulmuştur. Hem sinterleme parametreleri hem de CNT ilavesi sayesinde oldukça ince taneli bir mikroyapı elde edilmiştir. Sıcak presleme işlemi esnasında YMK Cu matris içerisinde bol miktarda tavlama ikizi olduğu görülmektedir. Artan CNT oranı tane boyutunun incelmelerini sağlamanın yanında yoğunluk ölçümlerinden elde edilen sonuçları destekler tarzda gözenekliliğin de artmasına sağlamıştır. SEM görüntülerinden üretilen kompozitlerde özellikle taneler arası bölgelerde geometrik olarak düzenli bir şekle sahip olmayan gözeneklerin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %3 CNT, b) %6 CNT, c) %3 CNT + Cr, d) %6 CNT + Cr

Şekil 5.4'te hem CNT'lerin hem de diğer elementlerin mikroyapıdaki dağılımları hakkında fikir edinmek amacıyla %3 CNT+Cr numunesinden alınmış SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler verilmiştir. CNT'lerin dağılımı hakkında fikir edinmek için C elementinin dağılımı esas alınmıştır. C elementine ait görüntü, bu elementin genel olarak homojen bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu durum kullanılan karıştırma tekniğinin başarılı olduğunu göstermektedir. Genel olarak tüm mikroyapıya dağılmış bulunmakla birlikte gözeneklerde C elementinin miktarında hafif artış olduğu görülmektedir. Cr elementine ait görüntü incelendiğinde Cr'un da homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Cu-Cr faz diyagramı (Massalski 1990) incelendiğinde Cr'un bakır içerisinde hiç çözünmediği görülmektedir. Buna rağmen Cr'a ait haritalama analizi görüntüsünden Cr'un herhangi bir noktada kümeleşme göstermediği anlaşılmaktadır. Bu durum, Cr'un Cu-CNT ara yüzeylerinde  $Cr_3C_2$  bileşiğini oluşturmuş olduğunu göstermekte olup XRD analizinden elde edilen kırınım desenleri ile uyumludur.





Şekil 5.4. %3 CNT+Cr numunesinden alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler

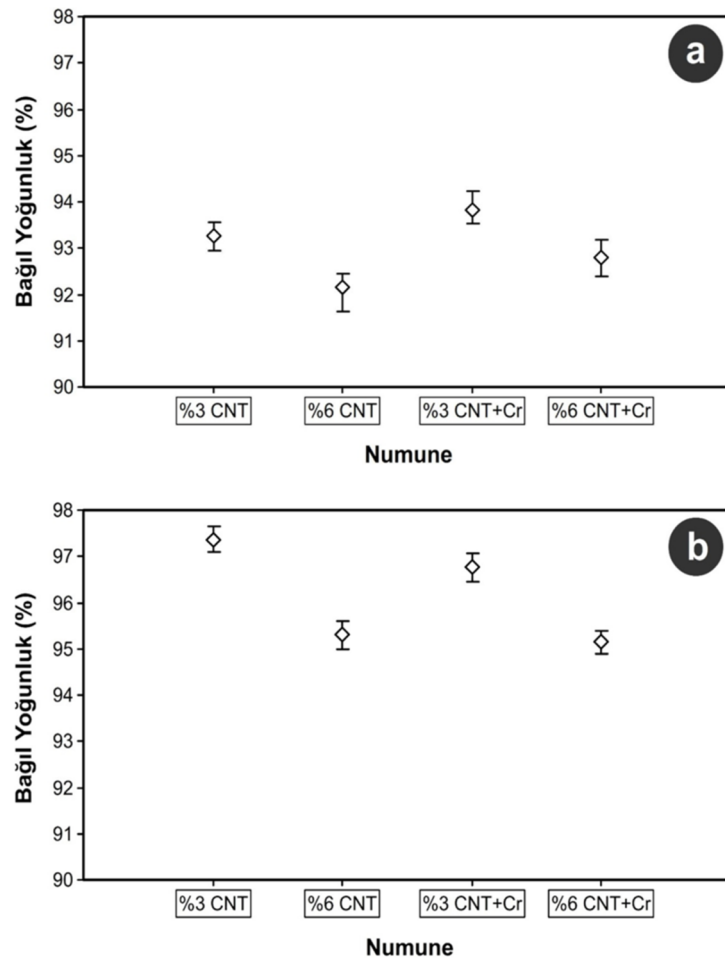
Şekil 5.5.a'da sıcak presleme işlemi sonucu kompozit numunelerde ulaşılan bağıl yoğunluk değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde artan CNT oranıyla birlikte bağıl yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. Daha önce yapılmış birçok araştırmada da metal matrisli kompozitlerde artan CNT oranıyla birlikte ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerinin düştüğü bildirilmektedir (Pham et al. 2011; Tu et al. 2001; Chu et al. 2010b; Uddin et al. 2010). Chu ve ark., artan CNT oranının yoğunlaşmayı olumsuz etkilemesinin topaklanma ve ara yüzey problemlerinden kaynaklandığını bildirmişlerdir (Chu et al. 2010b). Goudah ve ark., gaz atomizasyonu ile üretilmiş küresel şekilli Cu tozu içerisine hacimsel olarak %1 ve %2 CNT ilavesi yaparak geleneksel toz metalurjisi prosesi ile malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri bu malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini karakterize etmişlerdir. 900 °C'de 90 dakika süre ile gerçekleştirdikleri sinterleme işlemi sonucu teorik yoğunluğun %90'ına ulaştıklarını rapor etmişlerdir (Goudah 2010). Artan CNT oranının elde edilen bağıl yoğunluğu olumsuz etkilemesine rağmen şimdiki çalışmada daha yüksek oranda CNT takviyesi yapılmış kompozitlerde Goudah ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan (2010) daha yüksek



bağıl yoğunluk değerlerine çıkabilmesi geleneksel sinterleme ile sıcak presleme arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Uddin ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (2010) parçacık boyutu 45 µm olan Cu tozu içerisine ağırlıkça %0,5 (hacimsel olarak %2,19) CNT ilave edilerek 750 °C’de 40 MPa basınçla yapılan sıcak presleme işlemi sonucu %96,79 bağıl yoğunluğa ulaşıldığı bildirilmiştir. Aynı toza ağırlıkça %1 (hacimsel olarak yaklaşık %4,32) CNT ilave edildiğinde %93,69 ağırlıkça %2 (hacimce yaklaşık %8,36) CNT ilave edildiğinde ise %91,03 bağıl yoğunluk elde etmişlerdir (Uddin et al. 2010). Şimdiki çalışmada sıcak preslenen numunelerde Uddin ve arkadaşlarından (2010) biraz daha düşük yoğunluklara ulaşılmıştır. Bu durumun iki farklı nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Birincisi şimdiki çalışmada hacimsel olarak ilave edilen CNT oranlarının Uddin ve arkadaşlarından (2010) biraz daha yüksek olmasıdır (örneğin şimdiki çalışmada %3 iken Uddin ve arkadaşlarının çalışmasında %2,19’dur). İkinci neden uygulanan sinterleme parametreleri arasındaki farktır. Uddin ve arkadaşları (2010) daha düşük sıcaklık kullanmalarına rağmen daha yüksek basınç ve bekletme süresi uygulamışlardır. Şimdiki çalışmada yapılan yüksek basınçlı ikinci yoğunlaştırma işlemi ile Uddin ve arkadaşlarından daha yüksek bağıl yoğunluk değerlerine çıkılmıştır. Şekil 5.5.a incelendiğinde aynı oranda CNT içeren numunelerden Cr ilave edilenlerin daha yüksek bağıl yoğunluk değerlerine ulaştıkları görülmektedir. XRD analizleri Cr ilave edilen numunelerde  $Cr_3C_2$  bileşiğinin oluşmuş olduğunu göstermiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda Cu/CNT kompozitlerde Cu matrise yapılan Cr ilavesi ile oluşan  $Cr_3C_2$  bileşiğinin ara yüzey bağını geliştirdiği bildirilmiştir (Chu et al. 2013; Kong et al. 2013). Bu literatür bilgisi ışığında şimdiki çalışmada XRD analizinden elde edilen kırınım desenleri de göz önünde bulundurularak Cr içeren numunelerde daha yüksek bağıl yoğunluğa ulaşılmış olmasının, Cu-CNT ara yüzeylerinde oluşan  $Cr_3C_2$  bileşiği sayesinde olduğu söylenebilir.

Şekil 5.5.b’de sıcak preslenmiş numunelere uygulanan yüksek basınçlı ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra numunelerde ulaşılan bağıl yoğunluk değerleri verilmiştir. İkinci yoğunlaştırma işleminin tüm numunelerde önemli ölçüde bir yoğunluk artışı sağladığı görülmektedir. Sıcak presleme işlemi ile ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerinde olduğu gibi ikinci yoğunlaştırma işlemi ile ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerinin de artan CNT oranıyla birlikte azalma sergilediği görülmektedir. Cr elementinin varlığı sıcak presleme ile ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerini olumlu

etkilerken, ikinci yoğunlaştırma işlemi ile ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerini olumsuz etkilemiştir. Diğer bir ifadeyle Cr içermeyen numunelerde ikinci yoğunlaştırma işlemi ile ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerleri daha yüksek olmuştur. İkinci yoğunlaştırma işlemi sonucu Cr içeren numunelerde daha düşük bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılmasında Cr elementinin oluşturduğu karbür ve oksit bileşiklerinin etkili olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte aşağıda sonuçları paylaşılacak olan mekanik testler, Cr ilave edilen numunelerde daha yüksek sertlik ve mukavemet elde edildiğini göstermiştir ki ulaşılan bağıl yoğunluk değerlerinin düşük olmasında bu mekanik özelliklerin de etkili olduğu düşünülmektedir.

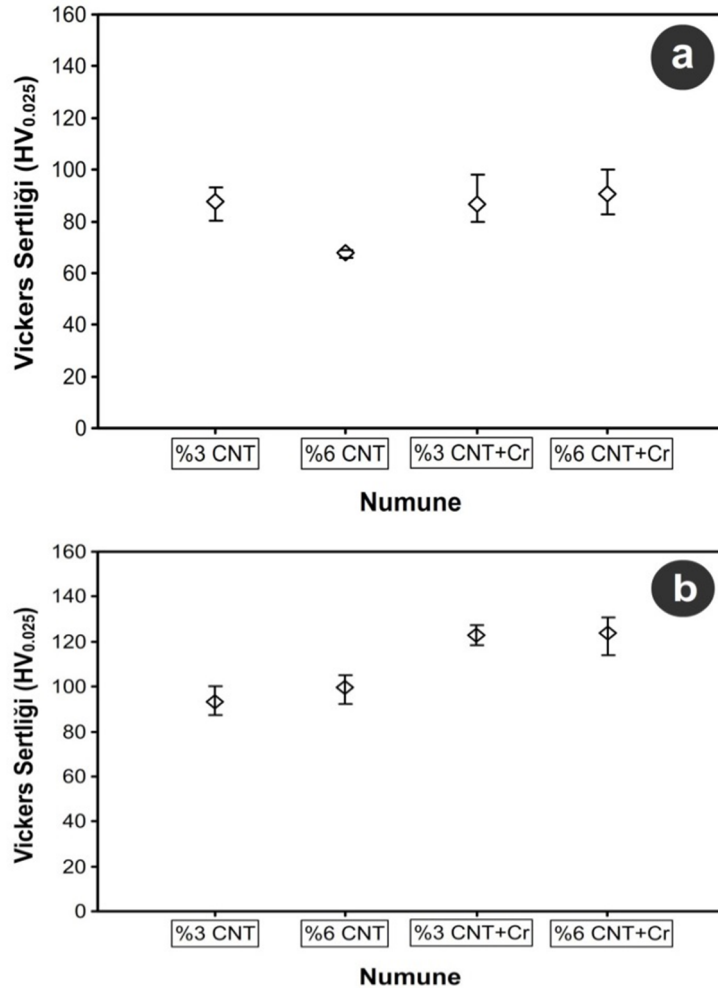


Şekil 5.5. Üretilen kompozitlerde ulaşılan bağıl yoğunluk değerleri; a) sıcak presleme işleminden sonra, b) ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra

Şekil 5.6.a'da sıcak presleme işleminden sonra kompozit numunelerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Cr içermeyen numunelerden ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde artan CNT oranıyla birlikte sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu durumun

numunelerin bağıl yoğunlukları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Artan CNT oranının ara yüzey problemleri veya topaklanma nedeniyle yoğunluk değerlerinin düşmesine neden olduğu bilinmektedir (Chu et al. 2010b). Sule ve arkadaşları (2014) CNT takviyeli bakır matrisli kompozitlerde artan bağıl yoğunlukla birlikte sertliğin de arttığını rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Özgün ve arkadaşları tarafından daha önce yapılmış çalışmalarda toz metalurjisi teknikleri ile üretilmiş malzemelerde bağıl yoğunluk azaldıkça sertliğin de azaldığı bildirilmektedir (Özgün vd. 2013; Gülsoy vd. 2016). Şimdiki çalışmada da artan CNT oranıyla sertlikteki düşüşün elde edilen bağıl yoğunluk değerlerindeki azalmaya bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu bulguya benzer olarak Uddin ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan çalışmada artan CNT oranıyla birlikte yoğunluğun ve sertliğin birlikte azaldığı rapor edilmiştir. Uddin ve arkadaşlarının (2010) çalışmasında ağırlıkça %0,5 CNT ilave edilmiş küçük parçacık boyutuna sahip tozdan üretilen kompozitte yaklaşık 82 HB sertlik elde edildiği bildirilmiştir (Uddin et al. 2010). Şimdiki çalışmada hacimsel olarak %3 (ağırlıkça %0,62) CNT içeren numuneden elde edilen sertlik değeri ortalama 87,7 HV<sub>(0.025)</sub> olup, Uddin ve arkadaşlarının çalışması ile uyumludur. Uddin ve arkadaşları CNT takviyesi yapmadan ürettikleri saf bakırın sertliğinin 56–60 HB arasında olduğunu bildirmişlerdir (Uddin et al. 2010). Şimdiki çalışmada tam yoğunluğa çıkılamamış olmasına rağmen CNT ilavesi yapılarak saf bakıra göre sertlikleri önemli ölçüde artmış kompozitler elde edilmiştir. Pham ve arkadaşları (2011) tarafından yapılan bir çalışmada ağırlıkça %0,5 CNT ilavesi yapılarak geleneksel sinterleme ile üretilen numunelerde ulaşılan sertlik değerleri 35–36 HB aralığında kalmıştır. Şimdiki çalışmada elde edilen sertlik değerlerinin daha yüksek olması elde edilen bağıl yoğunluk değerlerinin Pham ve arkadaşlarının (2011) yaptığı çalışmadan daha yüksek olmasına bağlanmaktadır. Şekil 5.6.'daki sertlik değerleri incelendiğinde aynı oranda CNT içeren kompozitlerden Cr ilave edilenlerin sertliklerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Chu ve arkadaşları (2013) bakır içerisine Cr ilave edildiğinde ilave edilmeyen numunelere göre daha yüksek sertlik değerleri elde etmişler ve bunu ara yüzeyde oluşan Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> bileşiğine bağlamışlardır. Şimdiki çalışmada da XRD analizi ile Cr ilave edilen numunelerde Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> bileşiğinin oluştuğu belirlenmiştir. Cr ilave edilmiş numunelerde sertlik değerlerinin daha yüksek olmasında Cu-CNT ara yüzeylerinde oluşan Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> bileşiğinin rol oynadığı düşünülmektedir. Bununla birlikte Cr ilave edilen numunelerde sertliğin daha yüksek olmasında daha yüksek olan bağıl yoğunluk değerlerinin de etkisi bulunmaktadır.

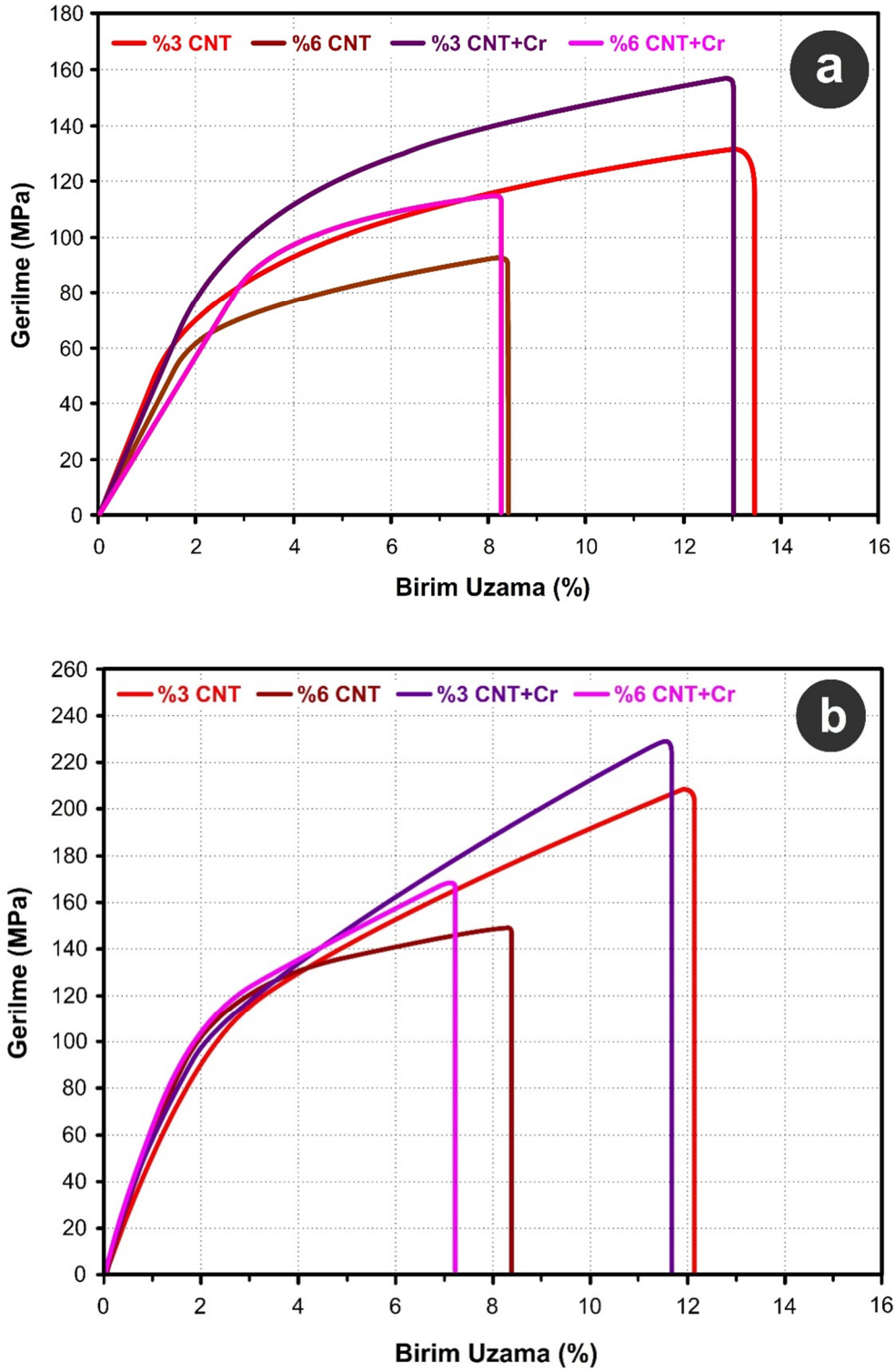
Şekil 5.6.b’de ikinci yoğunlaştırma işlemi uygulanan numunelerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Şekilden ikinci yoğunlaştırma işleminin sıcak preslenmiş kompozitlerin sertliklerini önemli ölçüde arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu artış ikinci yoğunlaştırma işleminin hem yoğunluğu hem de ara yüzey bağıni geliştirmesine bağlanmaktadır. Chu ve arkadaşları (2013) sıcak presleme ile ürettikleri hacimsel olarak %10 CNT içeren kompozitte 135 HV sertlik elde edildiğini bildirmişlerdir. Şimdiki çalışmada en yüksek sertlik değerine ikinci yoğunlaştırma işlemi sonucu hacimsel olarak %6 CNT içeren Cr ilave edilmiş numunede ulaşılmıştır. Bu numunede ulaşılan sertlik değeri ortalama 123,77 HV’dır. CNT oranının daha düşük olduğu göz önünde bulundurulduğunda elde edilen bu sertlik değerinin Chu ve arkadaşlarının (2013) çalışmalarında belirtilen sertlik değeriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Üretilen kompozitlerden ölçülen sertlik değerleri; a) sıcak presleme işleminden sonra, b) ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra

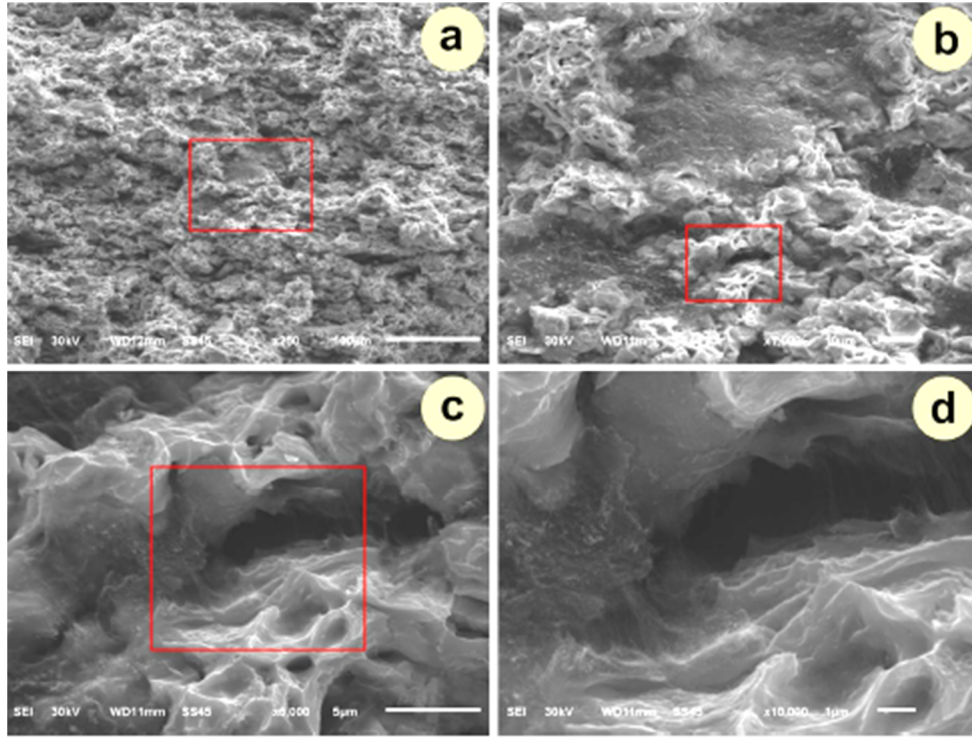
Şekil 5.7.a'da sıcak preslemiş numunelere uygulanan çekme testleri sonucu elde edilen ortalama gerilme-birim uzama eğrileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde artan CNT oranıyla birlikte hem elde edilen çekme dayanımının hem de % birim uzamanın azaldığı görülmektedir. Bu durum hem yoğunluk hem de sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlarla uyumludur. Artan CNT oranıyla birlikte bağıl yoğunluğun düşmesi ve buna bağlı olarak sertlik değerlerinin düşmesi gibi çekme deneyinden elde edilen mukavemet ve % uzama miktarları da düşmüştür. Elde edilen bu sonuçlar daha önce gerçekleştirilmiş bazı çalışmaların oldukça altındadır (Daoush et al.2009; Xue et al.2012; Chu et al.2013). Bu durumun başlıca nedeni sıcak presleme işlemi sonucu elde edilen bağıl yoğunluk değerlerinin çok düşük olmasıdır. Cr ilave edilen numunelerin mukavemet değerleri sadece CNT ilave edilmiş numunelerden biraz daha yüksek olmuştur. Ancak bu numuneler, daha düşük % uzama değerleri sergilemişlerdir. Şekil 5.7.b'de yüksek basınçlı ikinci yoğunlaştırma işlemi uygulanmış numunelerden çekme deneyi sonucu elde edilen ortalama gerilme % uzama eğrileri verilmiştir. İkinci yoğunlaştırma işlemi sayesinde bağıl yoğunluklarda sağlanan artışın elde edilen mukavemet değerlerine de yansıdığı görülmektedir. En yüksek çekme mukavemetine hacimsel olarak %3 CNT içeren numunelerde ulaşılmıştır. %3 CNT içeren numunelerden Cr ilave edilenin çekme mukavemeti daha yüksek olup ortalama 229,4 MPa'dır. Yaptıkları çalışmada Kim ve arkadaşları, hacimsel olarak %5 CNT ilave ederek spark plazma sinterleme tekniği ile ürettikleri ve ilave olarak soğuk haddelemeden geçirdikleri Cu matrisli kompozitte yaklaşık olarak 220 MPa çekme mukavemeti elde etmişlerdir (Kim et al. 2006). Şimdiki çalışmada daha düşük CNT ilavesi ile yaklaşık olarak aynı mukavemet değerine ulaşılmıştır. Şimdiki çalışmada ulaşılan bağıl yoğunluk değerleri Kim ve arkadaşlarının (2006) ulaştığı bağıl yoğunluk değerlerinin çok az altında olmasına rağmen daha düşük CNT oranı ile benzer mukavemet değerleri elde edilmesi kullanılan karıştırma tekniğinin başarılı olduğunu göstermektedir. Çünkü Kim ve arkadaşları (2006) tarafından da belirtildiği gibi CNT takviyeli kompozitlerin başarısı büyük oranda CNT'lerin homojen bir şekilde dağıtılabilmesine bağlıdır. Yapılan yüksek basınçlı ikinci yoğunlaştırma işlemine rağmen hacimsel olarak %6 CNT içeren numunelerde elde edilen mukavemet değerleri sıcak preslenmiş numunelere nazaran artmış olsalar da halen arzu edilen seviyelere ulaşamamıştır. Eğriler incelendiğinde %6 CNT içeren numunelerin çok daha düşük uzama değerlerinde koptuğu görülmektedir. Bu durum, bu numunelerde düşük

mukavemet değerleri elde edilmesinin ikinci yoğunlaştırma işlemine rağmen düşük olan bağıl yoğunluktan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim uzama eğrileri; a) sıcak presleme işleminden sonra, b) ikinci yoğunlaştırma işleminden sonra

Şekil 5.8’de %3 CNT+Cr numunesinin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsünde belirgin bir gözeneğe rastlanmamaktadır. Kırılma yüzeyinde çekme deneyinden elde edilen uzama değerleri ile uyumlu olarak sünek kırılmaya işaret eden bol miktarda çukurcuk oluşumu mevcuttur. Daha yüksek büyütme ile alınan SEM görüntülerinden CNT’lerin herhangi bir noktada topaklanmış olmadıkları ve homojen bir dağılım sergiledikleri görülmektedir.



Şekil 5.8. %3 CNT+Cr numunesinin farklı büyütmelerle alınmış kırılma yüzeyi SEM görüntüleri; a) 250X, b) 1000X, c) 5000X, d) 10000X

Metal ve alaşımları gibi kompozitler de tanelerden oluşur. Metalik malzemelerin özellikleri tane boyutuna karşı oldukça hassastır. Tane boyutu küçüldükçe tane sayısı ve doğal olarak da tane sınırı alanı artar. Tane sınırları dislokasyon hareketlerini engelleyici etki yaptığından tane sınırı alanının artması, malzemenin sertlik ve mukavemetinin de artması anlamına gelir. Dislokasyon hareketleri ile metallerin mekanik davranışı arasındaki ilişki iyi bilindiğinden tane boyutunun inceltilmesine dayanan mukavemet artırma mekanizmaları bulunmaktadır. Dislokasyon hareketlerinin engellenmesi malzemenin daha sert ve yüksek mukavemetli olmasını sağlar (Savaşkan 2012). Tane boyutunu inceltici etkilerinden dolayı kompozit malzemedeki takviye elemanları da bu

görevi görürler. Ancak bu ifadelerin şimdiki çalışmada üretilen kompozitler için tamamen geçerli olması bir yandan da elde edilen yoğunluk değerlerine de bağlıdır.

Sünek kırılma yüksek oranda plastik deformasyon ile meydana gelir. Genellikle koni-çanak oluşumu ile gerçekleşir. Malzemelerdeki teorik kırılma mukavemeti ile gerçek kırılma mukavemeti arasındaki fark yapısal düzensizliklerden meydana gelir (Savaşkan 2012). Şimdiki çalışmada artan CNT oranıyla birlikte daha düşük bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılmış olması, artan takviye elemanı oranıyla yapısal düzensizlik olarak nitelendirilebilecek gözeneklerin miktarında artışa yol açmıştır. Sünek kırılmada sürekli uygulanan gerilme altında söz konusu boşluklar birleşerek malzeme merkezinde çatlaklar oluşturur. Oluşan çatlakların uygulanan gerilmeye dik doğrultuda ilerlemesi sonucu kırılma meydana gelir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, saf bakır tozu içerisinde hacimsel olarak farklı oranlarda CNT ilavesi yapılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. CNT takviyeli kompozitlerin üretiminde karşılaşılan en büyük problem CNT'lerin matris içerisinde homojen dağıtılamaması olup, bu problemin aşılabilmesi için yeni bir karıştırma tekniği uygulanmıştır. Bazı numunelere CNT'lere ek olarak özelliklere etkilerini belirlemek amacıyla Cr elementi ilave edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- SEM incelemeleri ve elementel analizler, uygulanan yeni karıştırma tekniği ile CNT'lerin Cu matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabildiğini göstermiştir. Bu karıştırma tekniğinin özellikle yoğunlukları arasındaki fark çok büyük olan malzeme tozlarının homojen bir şekilde karıştırılabilmesinde etkili olacağı düşünülmektedir.
- Yoğunluk ölçümleri artan CNT oranıyla birlikte ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerinin düştüğünü göstermiştir. Sıcak presleme işlemi sonucu ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerleri uygulanan yüksek basınçlı ikinci yoğunlaştırma işlemi ile önemli ölçüde arttırılmıştır. Cr ilavesi, sıcak presleme işlemi esnasında yoğunlaşmayı olumlu etkilerken, sıcak presleme işleminden sonra uygulanan ikinci yoğunlaştırma işlemi esnasında Cr'suz numunelere göre biraz daha düşük yoğunlaşma elde edilmesine yol açmıştır.
- Sertlik ölçümleri, genel olarak artan CNT oranıyla birlikte elde edilen sertlik değerlerinin de arttığını göstermiştir. Cr ilave edilen numunelerde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Cr ilavesinin sertlikte sağladığı bu artışın XRD analizi ile Cr tarafından oluşturulduğu tespit edilen karbür ve oksit bileşiklerine bağlı olduğu düşünülmektedir. Sıcak preslenmiş numunelere nazaran ikinci yoğunlaştırma işlemi uygulanan numunelerde bağıl yoğunluk değerlerinde olduğu gibi sertlik değerlerinde de önemli bir artış gözlenmiştir.

- Çekme testlerinde sıcak preslenmiş numuneler, düşük bağıl yoğunluklarına bağlı olarak düşük mukavemet değerleri sergilemiştir. Uygulanan ikinci yoğunlaştırma işlemi, mukavemet değerlerinin önemli ölçüde artmasını sağlamıştır. En yüksek mukavemet değerlerine hacimsel olarak %3 CNT içeren numunelerde ulaşılmıştır. %6 CNT ilave edilmiş numunelerde daha düşük mukavemet değerleri elde edilmesi, bu numunelerde ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerinin düşük olmasına bağlanmaktadır. Bağıl yoğunluk ve sertlik değerlerinde olduğu gibi Cr ilave edilen numunelerin mukavemet değerleri Cr ilave edilmeyen numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak Cr ilavesinin sünekliği çok az düşürdüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlar bütün olarak ele alındığında, CNT ilaveli kompozitlerin üretiminde CNT'lerin yapı içerisinde homojen dağıtılabilmesi kadar üretilen kompozitlerde ulaşılan bağıl yoğunluk değerlerinin de özellikler üzerinde büyük etkilerinin olduğu söylenebilir.
- Bu çalışmadakine benzer kompozitlerin başta sıcak presleme olmak üzere üretim parametrelerinin optimizasyonu üzerine yapılacak çalışmalar ile daha üstün özelliklere sahip olacak şekilde üretilebileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

Akbulut H, Durman M, (1995) SiC partikül takviyeli Al-Si metal matrisli kompozitlerin santrifüj dökümü. 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, s. 687–692

Akoral E (2003) toz metalurjisi yöntemi ile Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s. 10–45

Akramifard HR, Shamanian M, Sabbaghian M, Esmailzadeh M (2014) Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing. *Materials and Design* 54: 838–844

Aktaş H (2007) Alüminyum matrisli alümina parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemiyle üretimi ve kuru aşınma davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Alnak Y (2007) Fiber takviyeli kompozit malzemelerde interlaminar kayma gerilmelerinin nümerik analizi ve dört noktadan eme testi ile interlaminar kayma mukavemetinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas

Altan E, Kıyak M, Çakır O (1997) Metal matrisli kompozitlerin işlenebilirliği. 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, 8–10 Mayıs, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 341-348

Altınsoy İ (2009) Alümina takviyeli bakır kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Met. ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, s. 44

Aran A (1990) Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler. İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul

Archbold J (1999) Sintering temperature effects on the mechanical properties of porous-coated Ti-Al-4V ELI alloy, master degree of applied science. Graduate Department of Metallurgy and Material Science, University of Toronto, Canada

ASM Handbook (1998) Powder metal technologies and applications. Vol. 7, ASM International, USA, s. 1145-1146

ASM Handbook (2001) Composites. Vol. 21, ASM International, USA, s. 1–20

Aydın M, Yetgin H (2006) MMK üretiminde farklı tasarımlardaki karıştırıcıların etkisinin araştırılması. Teknoloji 9: 39–46

Baksan B, Gürler R (2003) Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması. Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.

Barmouz M, Asadi P, Givi MKB (2011a) Taherishargh M. Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP; Effect of SiC particles size and volume fraction. Mater. Sci. Eng. A 528:1740–1749

Barmouz M, Givi MKB, Seyfi J (2011b) On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior. Mater. Charact. 62: 108–117

Başaran A (2007) Toz metal parçalara ısıl ve mekanik yüzey işlemlerin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, s. 25–27

Bethune DS, Klang CH, Vries MS, Gorman G, Savoy R, Vazquez J, et al. (1993). Cobalt-catalyzed growth of carbon nanotubes with singleatomic-layer walls. Nature 263: 605–607

Bocchini GF, Lindskog PF (1991) Applications and developments of sintered ferrous materials powder metallurgy-an overview. The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy, (ed: I. Jenkins and J.V. Wood)

Boz M (1999) Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Boz M (2003) Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme-aşınma özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Bozic D, Cvijovic-Alagic I, Dimcic B, Stasic J, Rajkovic V (2009) In-situ processing of TiB<sub>2</sub> nanoparticle-reinforced copper matrix composites. Sci Sintering 41:143–50

Cabioğlu AM (2012) Farklı sıcaklık ortamlarında pim bağlantılı kompozit plakaların yatak dayanımlarının incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta

Caldwell SG (1990) Tungsten heavy alloy design Manual. Allegheny Technologies Compony, USA, s. 6–7

Chang HW (1983) Wear Characteristics of Composites: Effect of Fiber Orientation. *Wear* 85: 81–91

Chawla KK (2003) Ceramic matrix composites. Kluwer Academics Publishers.

Chu K, Jia C, Jiang L, Li W (2013) Improvement of interface and mechanical properties in carbon nanotube reinforced Cu–Cr matrix composites. *Materials and Design* 45 407–411

Chu K, Liu Z, Jia C, Chen H, Liang X, Gao W, et al. (2010) Thermal conductivity of SPS consolidated Cu/diamond composites with Cr-coated diamond particles. *J. Alloy. Compd.* 490: 453–458

Chu K, Wu Q, Jia C, Liang X, Nie J, Tian W, Gai G, Guo H (2010b) Fabrication and effective thermal conductivity of multi-walled carbon nanotubes reinforced Cu matrix composites for heat sink applications. *Composites Science and Technology* 70: 298–304

Çalık M (2004) Zırh tasarımında kullanılan farklı geometriye sahip kompozit kabukların balistik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar

Çiğdem M (2006) İmal Usulleri. Çağlayan Kitap Evi, İstanbul, s. 329–354

Çöl N (2013) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve CNT nano partiküllerin yağ katkısı olarak AISI 4140 çeliğinin aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalı, Eskişehir.

Daoush WM, Lim BK, Mo CB, Nam DH, Hong SH (2009) Electrical and mechanical properties of carbon nanotube reinforced copper nanocomposites fabricated by electroless deposition process. *Mater Sci Eng A* 513: 247–253

Datta SK, Tewari SN, Gatica JE, Shih W, Bentsen L (1999) Copper alloy-impregnated carbon–carbon hybrid composites for electronic packaging applications, *Metall. Mater. Trans. A* 30: 175–181

Dave RS, Loos AC (1999) Processing of Composites. Hanser Publishers, Germany

Demir A (1992) Toz metal bir çeliğin mekanik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Demirkesen E (1995) Kompozit malzemeler. İTÜ Kimya Fakültesi, 1. Baskı, İstanbul

Diler EA, İpek R (2013) Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al–SiCp composites using central composite design. *Composites: Part B* 50: 371-380

Eker A (2008) Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK\\_son](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son), (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2017)

Ekşi A (1996) Metal tozu üretim teknikleri. *Endüstriyel Teknoloji*, cilt.2, sayı 2, Gazi, Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara

Ersümer A (1970) T/M sert metal sinterleme. İstanbul Üniversitesi Matbaası, İstanbul, s. 24–50

Esawi AMK, El Borady MA (2008) Carbon nanotube-reinforced aluminium strips. *Composites Science and Technology* 68: 486–492

Esawi A, Morsi K (2008) Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum powder. *Composites: Part A* 38: 646–650

Feng Y (2005) Fabrication and properties of silver-matrix composites reinforced by carbon nanotubes. *Materials Characterization* 55: 211–218

Fujiki A (2001) Present state and future prospects of powder metallurgy parts for automotive applications. *Materials Chemistry and Physics* 67: 298-306

Gay D, Hoa VS, Tsai WS (2003) *Composite Materials Design and Applications*. Boca Raton, CRC Press

George R, Kashyap KT, Rahul R., Yamdagni S (2005) Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites. *Scripta Materialia* 53: 1159–1163

German RM (2007) Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri, Çeviri, Sarıtaş S, Türker M, Durlu N, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara

Goudah G, Ahmad F, Mamat O (2010) Microstructural studies of sintered carbon nanotubes reinforced copper matrix composite. *Journal of Engineering Science and Technology* 5(3): 272–283

Gu LY, Liang GY, Zheng ZB (2007) Investigation of in situ Cu–TiB<sub>2</sub> composite on the copper using later melting synthesis. *J Mater Eng Perform* 16(5): 54–58

Gülsoy HÖ, Özgün Ö, Bilketay S (2016) Powder injection molding of Stellite 6 powder: Sintering, microstructural and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A* 651: 914-924

Hale R (2003) Powder metallurgy process and applications. AE 510 research project, University of Kansas, Lawrence, USA

Harris B (1999) *Engineering Composite Materials*. The Institute of Materials, London

Hatman A, Karagöz Ş (1993) Su atomize CuZn42 alaşımı tozu üretimi ve su basıncının toz özelliklerine etkileri. 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ankara, s. 553-565

Hiçyılmaz, N. (1999) Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin aşınma özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Hong S, Myung S (2007) Nanotube Electronics: A flexible approach to mobility. *Nature Nanotechnology* 2(4): 207-208

Höganäs AB (1996) *Production of Iron and Steel Powders*. chapter 2, s: 3-21, Höganäs PM School

Iijima S (1991) Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354: 56-58

James BA (1985) Liquid Phase Sintering in Ferrous Powder Metallurgy *Powder Metallurgy* 28: 121-130

Jones RM (1999) *Mechanics of Composite Materials*. 2nd Edition, Taylor&Francis Inc., USA

Kang SJL (2005) *Sintering Densification, Grain Growth and Microstructure*. Keyword Group, England, s.1-4

Karaaslan R (2002) Titreşimli ve sabit gerilmede t/m esaslı radyal yatakların aşınma ve sürtünme özelliklerinin deneysel incelenmesi. Yüksek, Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

Karcı A (2009) Uçak yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksi malzemelerin yorulma davranışı. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Balıkesir

Kayış V (2005) Kısmi ve ön alaşımlı demir tozları içerisine katılan B ve FeB ilavelerin sinterleme davranışları ve mekanik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaysser WA, Rzesnitzek K (1990) Principles of atomization, Science of Sintering. Ed. Uskokovic DP, Plenum Press, s. 157-174

Kim KT, Cha SI, Hong SH, Hong SH (2006) Microstructures and tensile behavior of carbon nanotube reinforced Cu matrix nanocomposites. Materials Science and Engineering A 430: 27–33

Klar E, Fesko JW (1984) Production of metal powders. Metals Handbook, 9th ed. Vol. 7, Ohio

Koç V (2006) Toz metalurjisi tekniğiyle üretilen paslanmaz çelikte katkı elemanlarının aşınma direncine etkisi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ

Komarov FF, Mironov AM (2004) Carbon nanotubes: presents and future. Physics and Chemistry of Solid State 5: 411–29

Kong J, Zhang C, Cheng X (2013) Novel Cu–Cr alloy matrix CNT composites with enhanced thermal conductivity. Appl Phys A 112:631–636

Kousaka Y (1997) Particle Size, Japan Powder Technology Handbook Second Edition Chemical Engineering Department, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka

Kurt AO (1992) Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s. 1–57

Kurt AO (2004) Toz üretim yöntemleri ve sinterleme, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Bölümü ders notları, Sakarya

Kuzumaki, T, Miyazawa, K, Ichinose, H, Ito K (1998) Processing of carbon nanotube reinforced aluminum composite. Journal of Materials Research 9: 2445–2449

Lawley A (1977) An overview of powder atomization processes and Fundamentals. Int. J. Powder Metallurgy & Powder Technology 13(3): 169-188

Lawley A (1992) Atomization The Production of Metal Powders. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ

Lenel FV (1980) Powder Metallurgy Principles and Application. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ



Lenel FV (1993) Production of Iron Powder by Reduction of Iron Oxide. Metals Handbook, Volume 7, USA, s. 79-82

Mallick PK (1993) Fiber- Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design. Spring Design, New York

Mandelbrot BB (1998) Partical Image Analyses. Powder Metallurgy, Metal Handbook, ASM International Publ., USA, 7: 617-618

Massalski TB (1990) Binary Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park, Ohio

Mazumdar SK (2002) Composites manufacturing: materials, product and process engineering. CRC Press LLC

Meguid S, Sun Y (2004) On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces. Mater. Design 25: 289–296

Meriç C, Atik E, Türüdü T (2005) Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 4: 1–11

Morelli EC, Yang J, Couteau E, Hernadi K, Seo JW, Bonjour C (2004) Carbon-nanotube/magnesium composites. Phys. Stat. Sol. 201(8): 53–55

Nayar HS (1984) Production sintering atmospheres. Metals handbook ninth edition Vol.7. Powder Metallurgy, USA, s. 339–350

Okumuş C, Öveçoğlu ML (1993) Toz metalurjisinde atomizasyon yöntemi ve bu yöntemle üretilen Fe esaslı malzemeler. Metal Dünyası 1(8): 26–39

Özek T (2005) Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar

Özgün Ö, Gülsoy HÖ, Yılmaz R, Fındık F (2013) Injection molding of nickel based 625 superalloy: Sintering, heat treatment, microstructure and mechanical properties. J. Alloy. Comp. 546: 192–207

Özgün Ö, Gülsoy HÖ, Yılmaz R, Fındık F (2013) Microstructural and Mechanical Characterization of Injection Molded 718 Superalloy Powders. J. Alloys. Comp. 576: 140–153

Palavar O (2014) Toz metalürjisi ile üretilen Inconel süper alaşımlarda yaşlanma parametrelerinin aşınma davranışlarına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi, Karabük

Peigney A, Laurent C, Flahaut E, Rousset A (2000) Carbon nanotubes in novel ceramic matrix composites. *Ceramics International* 26: 677–683

Pham V, Bui HT, Tran BT, Nguyen VT, Le DQ, Than XT, Nguyen VC, Doan DP and Phan NM (2011) The effect of sintering temperature on the mechanical properties of a Cu/CNT nanocomposite prepared via a powder metallurgy method. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 2: 1-4

Qiang Xu, Xinghong Zhang, Jiecai Han, Xiaodong He, Kvanin VL (2003) Combustion synthesis and densification of titanium diboride-copper matrix composite, *Mater Lett* 57: 4439–44

Reich S, Thomsen C, Maultzsch J (2004) *Carbon Nanotubes: Basic Concepts and Physical Properties*. Wiley, s. 31-40

Saito R, Dresselhaus M, Dresselhaus G (1995) Physics of carbon nanotubes. *Physics of Carbon Nanotubes*. 33(7): 883-891

Salak A, Selecká M, Danninger H (2005) *Machinability of powder metallurgy steels*. Cambridge International Science Publishing, Cambridge, UK

Sarıtaş S, Doğan C (1994) Metal powder production by centrifugal atomization. *Int. J. Powder Metallurgy* 30: 419 – 427

Savaşkan T (2012) *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Trabzon

Schubert T, Ciupinski L, Zielinski W, Michalski A, Weißgärber T, Kieback B (2008) Interfacial characterization of Cu/diamond composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. *Scripta Mater.* 58: 263–266

Sobhani M, Arabi H, Mirhabibi A, Brydson RMD (2013) Microstructural evolution of copper–titanium alloy during in-situ formation of TiB<sub>2</sub> particles. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 23: 2994–3001

Söyler M (2007) Toz metalürjisi ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli

Sule R, Olubambi PA, Sigalas I, Asante JKO, Garrett JC (2014) Effect of SPS consolidation parameters on submicron Cu and Cu–CNT composites for thermal management. *Powder Technology* 258: 198–205

Sun Y, Sun J, Liu M, Chen Q (2007) Mechanical strength of carbon nanotube–nickel nanocomposites. *Nanotechnology* 18: 505-704

Sümer F (2011) QCM (Quartz Crystal Microbalance) tekniği ile farklı kaliksaren molekülleri ile modifiye olmuş karbon nanotüp (CNT) yapılarının karbon monoksit (Co) gaz sensörü olarak geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektronik Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi, İzmir

Şahin Y (2006) Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayıncılık, Ankara

Şahin Y (2010) Abrasive wear behaviour of SiC/2014 aluminium composite. *Tribology International* 43: 939-943

Taşgetiren S (1999) Kompozit Malzemelere Giriş Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, s. 2–3

Tu JP, Yanga YZ, Wang LY, Mab XC, Zhang XB (2001) Tribological properties of carbon-nanotube-reinforced copper composites. *Tribology Letters* 10(4): 225–228

Turan H (1993) Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara

Uddin S, Mahmud T, Wolf C, Glanz C, Kolaric I, Volkmer C, Höller H, Wienecke U, Roth S, Fecht H (2010) Effect of size and shape of metal particles to improve hardness and electrical properties of carbon nanotube reinforced copper and copper alloy composites. *Composites Science and Technology* 70: 2253–2257

Upadhyaya GS (2000) Sintered Metallic and Ceramic Materials-Sintered Low-Alloy Ferrous Materials. John Wiley & Sons LTD, West Sussex, England

Upadhyaya GS (2002) Powder Metallurgy Technology. Cambridge Ambridge international Science Publishing, Hindistan

URL-1 <https://turkish.alibaba.com/product-detail/powder-metal-gears-cylindrical-bevel-pinion-gears-115030840.html> (Erişim tarihi: 12.07.2017)

URL-2 [http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48939/27958/1\\_toz\\_üretim\\_yöntemleri\\_ve\\_sinterleme\\_ders\\_notlari.pdf](http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48939/27958/1_toz_üretim_yöntemleri_ve_sinterleme_ders_notlari.pdf) (Erişim tarihi: 12.07.2017)

URL-3 <http://www.turkchemonline.com/Haber/Dogal-Fiber-ve-Biyoplastik-Kullanarak-Cevreci-Cozu.html> (Erişim tarihi: 12.07.2017)

URL-4 Composites, <http://www.engineeredmaterialsinc.com/composites.htm> (Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2014)

URL-5 Polynova Composites, Sandwich Construction and Infusion <http://polynovacomposites.blogspot.com> (Erişim Tarihi: 12 Mayıs 2015)

URL-6 <https://yudiprasetyo53.wordpress.com/2012/05/18/komposit-aluminium-untuk-aplikasi-tegangan-tinggi/> (Erişim Tarihi: 12.05.2017)

URL-7 <http://slideplayer.biz.tr/slide/8844358/> (Erişim Tarihi: 12.06.2017)

Varol T (2012) AA2024 matrisli B4C parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

Wilyam PR (1985) Sintering with Nitrogen Based Atmospheres. Powder Metallurgy 28: 85–87

Xue ZW, Wang LD, Zhao PT, Xu SC, Qi JL, Fei WD (2012) Microstructures and tensile behavior of carbon nanotubes reinforced Cu matrix composites with molecular-level dispersion. Materials and Design 34: 298–301

Yavuz N, Güner R (2002) Demir esaslı toz metal parçaların elektrik direnç kaynağından optimum kaynak şartlarının belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 7(1): 221–228

Yılmaz N (2006) Demir esaslı toz metal malzemelerin talaşlı işlenebilirliği. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta

Yılmaz SB (1999) Toz metalurjisi ile üretilen bağlı grafitli demir parçalarda kullanılan farklı demir tozu cinslerinin parçalardaki mekanik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul

Zhan GD, Kunts JD, Wan J, Mukherjee AK (2003) Single-wall carbon nanotubes as attractive toughening agents in alumina-based nanocomposites. Nature Materials 2: 28–38

Zhong R, Cong H, Hou P (2003) Fabrication of nano-Al based composites reinforced by single-walled carbon nanotubes. *Carbon* 41: 848-851

Ziennicka-Sylwester M (2014) The Cu matrix cermets remarkably strengthened by TiB<sub>2</sub> “in situ” synthesized via self-propagating high temperature synthesis. *Materials and Design* 53: 758-765

Ziyuan Sh, Deqing W (2000) Surface dispersion hardening Cu matrix alloy. *Appl. Surf. Sci.* 167:107–112

## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Van'da doğdu. İlk ve ortaokulu Van' da okudu. Liseyi Van Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünü kazandı. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında, İzmir Narlıdere İstihkam Okulu ve Eğitim Merkezi Komutanlığında kısa dönem olarak askerliğini yaptı. 2004–2011 yılları arası otomotiv sektöründe çalıştı. 2011 yılı sonunda Iğdır Üniversitesi Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2014 yılında Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başlayan Caner BULUT halen aynı okulda yüksek lisans öğrenimini sürdürmektedir. Evli ve üç çocuk babasıdır.