

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



TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN CoCrMo
MATRİSLİ NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN MİKROYAPI, MEKANİK VE
BİYOUYUMLULUK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

HASANEEN MAJED HOUSSAIN HOUSSAIN

DOKTORA TEZİ

PROF. DR. SERKAN ISLAK

HAZİRAN - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

HASANEEN MAJED HOUSSAIN HOUSSAIN tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN CoCrMo MATRİSLİ NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPI, MEKANİK VE BİYOUYUMLULUK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **26.06.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Serkan ISLAK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ Fırat Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Erkan KOÇ Karabük Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Temel Kan BAKIR Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Özkan ESKİ Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ

.....

TAAHHÜTNAME

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

Hasaneen Majed Houssain HOUSSAIN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN CoCrMo MATRİSLİ NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPI, MEKANİK VE BİYUYUMLULUK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

HASANEEN MAJED HOUSSAIN HOUSSAIN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. SERKAN ISLAK

CoCrMo alaşımları, olağanüstü biyoyumluluk özelliklerine rağmen zayıf mekanik özelliklerinden dolayı gün geçtikçe bilim insanlarını CoCrMo alaşımları üzerine farklı çalışmalar yapmaya itmektedir. Bu çalışma, CoCrMo alaşımının farklı karbon nanopartiküller (karbon nanotüp (CNT), grafen (Gr) ve karbon nanofiber (CNF)) ile takviye edilmesinin mikro yapı, fiziksel, mekanik, tribolojik ve biyoyumluluk özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Her bir karbon nanopartikül içeriği %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 ağırlık oranında olmuştur. Toz metalurji teknikleri kullanılarak dört grup kompozit alaşım üretilmiştir. Optik mikroskop, tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak mikro yapı analizi yapılmıştır. Ek olarak, yoğunluk, mekanik, triboloji ve biyoyumluluk testleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı sonuçları, karbon nanopartiküllerin matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını, tane sınırlarının görüldüğünü, karbür fazlarının tespit edilerek tane sınırları çevresine dağıldığını ve dendritik yapının da mikro yapıda görüldüğünü ortaya koymaktadır. Kompozitlerin bağıl yoğunluğu, karbon nanopartikül içeriği arttıkça azalmakta ve %85,77 ile %79,8 arasında değişmektedir. Tersine, Vickers sertlik testleri, nanopartikül ilavesi ile sertlikte önemli bir artış olduğunu göstermiştir ve optimum sertlik artışı %1 Gr ilavesi ile elde edilmiştir. Tribolojik testler, karbon nanopartikül içeriği arttıkça aşınma direncinde bir iyileşme olduğunu ve sürtünme katsayısının 0,48'den 0,63'e değiştiğini doğrulamıştır. Yine, %1 Gr içeren alaşım en uygun tribolojik özellikleri sergilemiştir. Biyoyumluluk değerlendirmesi, referans alaşıma (CoCrMo) kıyasla tüm karbon nanopartikül takviyeli alaşımlar için iyileştirilmiş biyoyumluluk göstermiştir. Bulgular, karbon nanopartiküllerin takviye olarak dahil edilmesinin CoCrMo alaşımlarının geliştirilmesi için umut verici olduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELE: CoCrMo alaşımı, nanokompozit, karbon nanopartikülleri, toz metalurjisi, biyoyumluluk, mekanik özellikler

Haziran 2024, 101 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND BIOCOMPATIBILITY PROPERTIES OF CoCrMo MATRIX CARBON NANOPARTICLE REINFORCED COMPOSITES PRODUCED BY POWDER METALLURGY

HASANEEN MAJED HOUSSAIN HOUSSAIN

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
SUPERVISOR: PROF. DR. SERKAN ISLAK**

Despite the exceptional biocompatibility properties of CoCrMo alloys, their poor mechanical properties drive scientists to conduct various studies on CoCrMo alloys. Scientists are investigating the alterations that take place when carbon nanoparticles such as carbon nanotube (CNT), graphene (Gr), and carbon nanofiber (CNF) are introduced to the CoCrMo alloy in order to enhance its strength. They are looking at its microstructure, physical, mechanical, tribological, and biocompatibility properties. Each carbon nanoparticle contained 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1% by weight. Four groups of composite alloys were produced using powder-metallurgy techniques. We analyzed the microstructure using optical, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD). Additionally, density, mechanical, tribological, and biocompatibility tests were conducted. The microstructure results showed that the carbon nanoparticles were evenly spread throughout the matrix. Grain boundaries were also seen, and carbide phases were found and spread around the grain boundaries. Dendritic structures were also seen in the microstructure. The relative density of the composites decreased as the carbon nanoparticle content increased, ranging from 85.77% to 79.8%. In contrast, Vickers hardness tests revealed a significant increase in hardness with the addition of nanoparticles, with adding 1% Gr achieving the maximum increase in hardness. Tribological tests showed that the wear resistance improved as the amount of carbon nanoparticles increased. The coefficient of friction ranged from 0.48 to 0.63. Again, the alloy containing 1% Gr demonstrated the most favorable tribological properties. Biocompatibility assessment showed improved biocompatibility for all carbon nanoparticle-reinforced alloys compared to the reference alloy (CoCrMo). The findings indicate that including carbon nanoparticles as a reinforcement is promising for developing CoCrMo alloys.

KEYWORDS: CoCrMo alloy, nanocomposite, carbon nanoparticles, powder metallurgy, biocompatibility, mechanical properties

June 2024, 101 Page

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince, her türlü desteği ve imkânı sağlayarak kıymetli vaktini ayıran değerli danışman hocam Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Serkan ISLAK’a en derin saygı ve şükranlarımı sunarım. Kendisininengin bilgisi, yol göstericiliği ve anlayışı, bu çalışmanın her aşamasında bana büyük bir ilham kaynağı olmuştur. Akademik ve kişisel gelişimime yaptığı katkılardan dolayı kendisine minnettarım. Tez İzleme Komitesi Üyeleri Sayın Doç. Dr. Temel Kan BAKIR ve Dr. Öğr. Üyesi Özkan ESKİ’ye verdikleri katkılardan dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Biyoyuumluluk çalışmaları sırasında katkı ve değerlendirmeleriyle bana destek olan Biyomedikal Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Nuray EMİN’e ayrıca teşekkür ederim. Kendisinin değerli görüşleri ve önerileri, bu çalışmanın bilimsel değerini artırmış ve doğru yolda ilerlememi sağlamıştır. Çalışma sürecimde gösterdiği ilgi ve destek için kendisine minnettarlığımı ifade etmek isterim. Laboratuvarı da biyoyuumluluk deneylerinin yapılmasında büyük bir özveriyle bana yardımcı olan doktora öğrencisi Havva YAZAR’a da teşekkürlerimi sunarım. Deneylerin başarıyla tamamlanmasında gösterdiği sabır, titizlik ve bilgi birikimi, bu çalışmanın en önemli yapı taşlarından biri olmuştur. Kendisinin yardımları ve katkıları olmadan bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı. Tez hazırlama sürecinde büyük bir özveriyle bana destek olan değerli annem, eşim ve çocuklarıma da en içten teşekkürlerimi sunarım. Annemin sevgisi, sabrı ve teşviki, bu zorlu süreçte bana güç ve motivasyon kaynağı olmuştur. Eşim ve çocuklarıma anlaşı ve destekleri ise bu yolculuğu daha katlanılabilir kılmış ve bana her daim moral olmuştur. Onların yanımda olması, bu süreci başarılı bir şekilde tamamlamamda büyük rol oynamıştır. Bu vesileyle, tez çalışmamın hazırlanmasında emeği geçen ve bana destek olan herkese teşekkür eder, saygı ve minnetlerimi sunarım.

HASANEN MAJED HOUSSAIN HOUSSAIN

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMA.....	6
2.1 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri İlgili Yapılan Çalışmalar	6
2.2 Karbon Nanopartiküller Kompozit Malzemeler İlgili Yapılan Çalışmalar	9
2.3 Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi	12
3. KURUMSAL TEMELLER.....	13
3.1 Kompozit Malzemeler	13
3.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	14
3.1.1.1 Kompozit malzemelerin matris tipine göre sınıflandırılması.....	15
3.1.1.2 Dağılmış fazın şekline göre sınıflandırma	17
3.1.1.3 Takviye elyafının tipine göre sınıflandırma.....	17
3.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	18
3.1.2.1 Kobalt esaslı matris	19
3.1.3 Nanokompozit.....	22
3.1.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	24
3.1.5 Toz Metalurjisi.....	25
3.1.5.1 Tozların üretimi ve hazırlanma yöntemleri.....	27
3.1.5.2 Bilyalı öğütme ve toz karıştırma	28
3.1.5.3 Toz sıkıştırma.....	30
3.1.5.4 Sinterleme işlemi.....	31
3.2 Nanoteknoloji.....	34
3.2.1 Nanomalzemeler	36
3.2.1.1 Nanomalzemelerin sınıflandırılması	36
3.2.1.2 Karbon nanotüpler (CNT)	37
3.2.1.3 Grafen (Gr).....	40
3.2.1.4 Karbon nanofiber (CNF)	42
4. MATERYAL VE METOD.....	44
4.1 Kompozit Malzemelerin Hazırlanması	44
4.1.1 Toz Karıştırma	45
4.1.2 Ultrasonik Karıştırma	47
4.1.3 Soğuk Presleme.....	48
4.1.4 Sinterleme İşlemi	49
4.2 Mikroyapı İncelemesi	51

4.3	Yoğunluk Ölçümü.....	53
4.4	Sertlik Testi.....	54
4.5	Aşınma Testi	55
4.6	Biyoyumluluk Testi	55
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	60
5.1	Kullanılan Tozların Karakterizasyonu	60
5.2	Üretilen Numunelerin Karakterizasyonu	62
5.2.1	Mikroyapı ve SEM-EDS Analizi	62
5.2.2	XRD Analizi	69
5.2.3	Yoğunluk Ölçümü.....	71
5.2.4	Sertlik Sonuçları	73
5.2.5	Aşınma Sonuçları.....	75
5.2.6	Biyoyumluluk Analiz Sonuçları	81
5.2.6.1	Biyobozunurluk analizi ve sızabilir madde analizi	81
5.2.6.2	Sitotoksikite ve biyoyumluluk.....	84
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
	KAYNAKLAR	90
	ÖZGEÇMİŞ.....	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Kompozit malzeme örnekleri: (a) fiberglas kompozit ve (b) kaba kum içeren beton.....	13
Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması: (a) matris malzemelerine göre ve (b) takviye malzemelerine göre.....	15
Şekil 3.3 Toz Metalurjisi yöntemiyle üretilen Cu-nanokarbon kompoziti	24
Şekil 3.4 Kompozit imalat yöntemleri	25
Şekil 3.5 Toz metalurjisi yöntemi ile parçalar üretimi.....	27
Şekil 3.6 Tozun bir bilyadan bilyaya çarpma etkisi	30
Şekil 3.7 Artan yükleme kuvveti ile sıkıştırma işlemi	31
Şekil 3.8 Sinterleme sırasında gelen aşamalar: (a) iki kürenin modeli, (b-e) sinterleme aşamaları boyunca gözenek yapısındaki değişiklikler	33
Şekil 3.9 Sinterleme sonrası bronz parçacıklar arasında oluşan boyunların SEM görüntüsü.	34
Şekil 3.10 Nanometre ölçeğinin diğer ölçeklerle karşılaştırması.....	35
Şekil 3.11 Nanomalzeme sınıflandırmaları: (a) 0D kümeler ve küreler, (b) 1D teller, çubuklar ve nanolifler, (c) 2D plakalar, ağlar ve filmler ve (d) 3D nanomalzemeler.....	37
Şekil 3.12 Silindirik formda karbon nanotüp oluşumu	38
Şekil 3.13 Karbon nanotüp modelleri: (a) kiralitesine göre SWCNT'ler (zikzak, koltuk ve kiral), (b) çift duvarlı nanotüpler (DWNT'ler) ve (c) çok duvarlı nanotüpler (MWCNT'ler)	39
Şekil 3.14 0D buckyballs, 1D nanotüpler ve 2D grafen, şeklinde grafen yapısı	41
Şekil 3.15 CNF tipleri: (a) levha tipi, (b) tüp tipi ve (c) balık kılçığı tipi.....	43
Şekil 4.1 Hassas terazi.....	45
Şekil 4.2 Mekanik alaşımlama cihazı	47
Şekil 4.3 Ultrasonik mikser cihazı	48
Şekil 4.4 Tek eksenli hidrolik pres.....	49
Şekil 4.5 Tüp fırın	50
Şekil 4.6 Numune üretim sürecinin şeması.....	50
Şekil 4.7 Üretilen numuneler	51
Şekil 4.8 Mikroyapı analizlerinde kullanılan cihazlar: (a) optik mikroskop cihazı, (b) SEM cihazı ve (c) XRD analiz cihazı.....	52
Şekil 4.9 Arşimet yoğunluk ölçüm kiti	53
Şekil 4.10 Mikrosertlik testi cihazı	54
Şekil 4.11 Aşınma testi cihazı.....	55
Şekil 4.12 PBS çözelti.....	56
Şekil 4.13 24-well'li petri kaplarında PBS içinde numuneler	57
Şekil 4.14 MEMMERT inkübatör	57
Şekil 4.15 ICP-OES analiz cihazı	58
Şekil 5.1 Matris tozların SEM görüntüleri: (a) kobalt, (b) krom ve (c) molibden	60
Şekil 5.2 Matris tozların EDS analizi: (a) kobalt, (b) krom ve (c) molibden.....	61
Şekil 5.3 Takviye tozların SEM görüntüleri: (a) CNT, (b) Gr ve (c) CNF.....	61
Şekil 5.4 Takviye tozların EDS analizi: (a) CNT, (b) Gr ve (c) CNF.....	62

Şekil 5.5 Numunelerin optik fotoğrafı: (a) CRM, (b) CRM025T, (c) CRM05T, (d) CRM075T, (e) CRM1T, (f) CRM025G, (g) CRM05G, (h) CRM075G, (i) CRM1G, (j) CRM025F, (k) CRM05F, (l) CRM075F ve (m) CRM1F	63
Şekil 5.6 Numunelerin SEM görüntüleri: (a) CRM, (b) CRM1T ve (c) CRM1G (d) CRM1F	65
Şekil 5.7 Dendritik yapının SEM görüntüleri	66
Şekil 5.8 MAP-EDS analizi: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F	67
Şekil 5.9 Numunelerin EDS grafikleri: (a) CRM, (b) CRM1T, (C) CRM1G ve (d) CRM1F	68
Şekil 5.10 Numunelerin XRD grafiği	69
Şekil 5.11 Co-Cr-Mo 1300 °C'de üçlü faz diyagramı	70
Şekil 5.12 Co-Cr-6Mo-C 1493 K'de faz diyagramı	71
Şekil 5.13 CNP içeriğinin bağıl yoğunluğa etkisi.....	73
Şekil 5.14 CNP içeriğinin sertliğe etkisi	74
Şekil 5.15 Numunelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı	76
Şekil 5.16 Sürtünme katsayısı-kayma mesafe grafiği.....	78
Şekil 5.17 Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F	79
Şekil 5.18 Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM-EDS fotoğrafı: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F.....	80
Şekil 5.19 Numunelerin biyobozunurluğu fizyolojik kütle değişiklikleri grafiği.....	82
Şekil 5.20 Ortamda bulunan Ca^{2+} iyonları ile PO_4^{3-} iyonlarının konsantrasyonları	82
Şekil 5.21 ICP-OES ile fizyolojik tampon çözelti içerisinde kompozit numunelerin bozunuma davranışlarının takibinde ortamdaki (P ve Na) iyon konsantrasyonları	83
Şekil 5.22 ICP-OES ile fizyolojik tampon çözelti içerisinde kompozit numunelerin bozunuma davranışlarının takibinde ortamdaki sızabilen (Co, Cr, Mo) iyon konsantrasyonlarının değişimi.	83
Şekil 5.23 CoCrMo ve CoCrMo-1% CNP numuneleri MTT reaktifi ile gerçekleştirilen sitotoksosite analiz sonuçları.....	85

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Biyomedikal alanda genel olarak kullanılan bazı Co-Cr alaşımlarının kimyasal bileşimi (%)	21
Tablo 3.2 Genel Co-Cr alaşımlarının mekanik özellikleri	22
Tablo 3.3 CNT tiplerine göre çeşitli özellikler	40
Tablo 3.4 Belirli koşullara göre grafenin çeşitli özellikleri	42
Tablo 3.5 Belirli faktörlere göre CNF'in seçilen özellikleri.....	43
Tablo 4.1 Co, Cr ve Mo tozlarının özellikleri.....	45
Tablo 4.2 CNT, Gr ve CNF'nin özellikleri.....	45
Tablo 4.3 Üretilen numunelerin bileşim oranları.....	46
Tablo 4.4 İşlem parametreleri	47
Tablo 5.1 Üretilen numunelerin yoğunlukları.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	: Selsiyus derecesi
d	: Numune yoğunluğu
A	: Havada numune ağırlığı
B	: Sudaki numunenin ağırlığı
ds	: Ölçümün yapıldığı sıcaklıktaki suyun yoğunluğu
ρ_b	: Bağlı yoğunluk
ρ	: Deneysel olarak ölçülmüş yoğunluk
ρ_k	: Toz karışım oranları esas alınarak hesaplanan teorik yoğunluğu
G_0	: Test ilk numune kütlesi
G_i	: 24 saatlik sureler sonunda kütlesi
H_k	: Kompozit sertliği
H_m	: Matrisin sertliği
H_t	: Takviyenin sertliği
f_m	: Matrisin hacimsel oranları
f_t	: Takviyenin hacimsel oranları
V	: Aşınma uygulanan yük
W	: Aşınma uygulanan yük
L	: Aşınma mesafedir
ds	: Ölçümün yapıldığı sıcaklıktaki suyun yoğunluğu

Kısaltmalar

TM	: Toz Metalurji
MMK	: Metal Matrisli Kompozitlerin
MA	: Mekanik Alaşıma
SMK	: Seramik Matrisli Kompozitler
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitler
MMNK	: Metal Matrisli Nanokompozitler
CNT	: Karbon nanotüpler
Gr	: Grafen
CNF	: Karbon Nanofiber
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
XRD	: X-ışınları difraksiyon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HA	: Hidroksiapatit
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
GNP	: Grafen Nanoplakası
CNP	: Karbon Nanopartikül
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Plastikler
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Plastikler
OMK	: Organik Matrisli Kompozitler
SWCNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler
EDS	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi

PBS	: Fosfat Tampon Salin
ICP-OES	: Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi
MSC	: İliği Mezenkimal Kök Hücreleri
SLA	: Seçici Lazer Katkı Maddesi
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme



1. GİRİŞ

Son zamanlardaki endüstriyel sektördeki ilerlemeler ve dönüşümsel gelişmeler ve bunların pratik uygulanması göz önünde bulundurulduğunda, bu alandaki günlük gereksinimlerin sürekli artması nedeniyle yenilikçi metodolojiler ve teknolojilerin oluşturulması için büyük bir talep artışı yaşanmaktadır. Son yıllarda, kapsamlı araştırma çalışmaları, yeni malzemelerin geliştirilmiş tekniklerle sentezine odaklanmıştır (Ni vd., 2008). Farklı çeşitli üretim yöntemleri arasında, toz metalurji tekniği (TM), optimize edilmiş özelliklere sahip yeni malzemeler üretmek için baskın bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Balaji ve Kumaran, 2014).

Toz metalurji (TM), yüksek kalitede metal matris kompozitlerin (MMK'ler) üretimini sağlayan bir katı hal üretim tekniğidir. Bu teknik, takviye malzemelerinin matris malzemesi içinde homojen bir şekilde dağılmasını mümkün kılmaktadır. TM, diğer işleme teknikleriyle karşılaştırıldığında, olağanüstü potansiyeli ve esnekliği ile kompozit üretimi için en umut verici ve çok yönlü yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Razavi vd., 2017). Toz metalurji (TM) tekniği, diğer yöntemlere kıyasla, metal tozlarından üretilen metal matris kompozitlerde (MMK'ler) daha homojen bir mikro yapı elde etme konusunda belirgin bir avantaja sahiptir. Ayrıca, TM süreci, önemli artık ve termal gerilmeleri azaltma kabiliyetine sahiptir (Saxena vd., 2023). Toz metalurji tekniğinin temel aşaması, genellikle bilyalı öğütme yöntemi veya mekaniksel karıştırma olarak da bilinen işlemlerle nihai bir karışım tozu elde etmek için malzeme tozlarının karıştırılmasını içermektedir. Bilyalı öğütme, uzun süredir malzemelerin öğütülmesi için kullanılsa da, son dönemde bu yöntem, çeşitli ilgi çekici işlemleri kolaylaştırma potansiyeli nedeniyle tekrar ilgi odağı haline gelmiştir. Örneğin, mekanik alaşıma (MA) süreci, farklı malzeme tozlarının karıştırılmasını içerir ve bu işlem tamamen yeni alaşımlar ve bileşiklerin üretimiyle sonuçlanır. Bu yenilikçi malzemeler, genellikle oda sıcaklığında veya geleneksel işleme yöntemleriyle elde etmek mümkün değildir. Modern ve yenilikçi üretim yöntemlerinin kullanımı, malzeme üretimi alanında yeni imkanlar yaratmaktadır. Bilyalı öğütme, diğer yöntemlerle oluşturulması zor olan teknolojik açıdan önemli malzemelerin sentezi için hızlı ve kolay bir yaklaşım sunulmaktadır. Toz haline getirilen malzemeler

daha sonra sıkıştırılmıştır ve ardından istenilen özelliklere sahip katı ürünler elde etmek için sinterleme işlemlerine tabi tutulmaktadır (Oleszak, 1999). Bu uygulanabilir üretim yönteminin ortaya çıkışı sayesinde, kompozit malzemeler gibi ayarlanabilir özelliklere sahip malzemelerin üretimi mümkün hale gelmektedir.

Kompozit malzemeler, her biri farklı özelliklere sahip çeşitli bileşenlerin oranlarından oluşan bir mühendislik malzemesidir. Bu bileşenlerin sinerjik etkileşimi sayesinde, kompozit malzeme, ayrı ayrı haldeki bileşenlerinin sergilediklerinden daha üstün bir özellik yelpazesi kazanılmaktadır (Basak vd., 2019). Kompozit malzemelerde, matris fazı sürekli faz olmaktadır, takviye fazı ise genellikle kesikli bir formdur ve en boy oranına bağlı olarak farklı konfigürasyonlara sahip olabilmektedir. Malzeme mühendisleri, bileşen malzemeleri hassas bir şekilde seçerek, kompozit malzemeleri belirli özelliklere uyacak şekilde uyarlayabilmektedirler (Shanmugavel vd., 2022). Kompozit malzemeler, temel olarak kullanılan matris ve takviye malzemesi türlerine göre sınıflandırılmaktadır. Morfolojik açıdan ise, kompozitler, takviyelerin şekil ve yapısına göre elyaf, partikül, tabakalı veya levhasal kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Ek olarak, kompozitler, kullanılan matris malzemesi türüne göre metal matrisli kompozitler (MMK'ler), seramik matrisli kompozitler (SMK'ler) ve polimer matrisli kompozitler (PMK'ler) olarak sınıflandırılabilir (Lakshmikanthan vd., 2022; Dawoud ve Saleh, 2019; Thostenson vd., 2001). MMK'lar, iki temel bileşenden oluşan metal matrisli kompozitlerdir. İlk bileşen, sürekli faz olarak hizmet eden metal veya alaşım matrisidir. İkinci bileşen ise kesikli faz olarak işlev gören ve çeşitli morfolojilere sahip olan takviye malzemesidir. Metal matrisli kompozitlerde (MMK'ler) yaygın olarak kullanılan metaller ve alaşımlar alüminyum, nikel, bakır, çelik, titanyum, kobalt ve magnezyum gibi malzemeleri kapsar. Bu malzemeler, elektrik kablolarından biyomedikal bileşenlere, uzay ve havacılık ekipmanlarına ve otomotiv parçalarına kadar çeşitli uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır. Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler) ile karşılaştırıldığında, MMK'ler yüksek özgül mukavemet, üstün aşınma direnci, plastik deformasyon yeteneği, gelişmiş birleştirme özellikleri ve çeşitli yöntemlerle mukavemeti artırma kabiliyeti gibi önemli avantajlar sunulmaktadır (Lakshmikanthan vd., 2022).

Son zamanlarda, özellikle biyomedikal uygulama alanında, kobalt bazlı kompozit alaşımlara, titanyum bazlı kompozitlerle birlikte, önemli bir bilimsel ilgi gösterilmektedir. Bu alan, yapay kalça ve diz eklemleri gibi ortopedik implantların geliştirilmesinde büyük öneme sahiptir. Ayrıca, kobalt bazlı alaşımlar, etkileyici korozyon ve aşınma direnci özellikleriyle ünlüdür ve dişçilik alanında çeşitli uygulamalara sahiptir. Bunun yanı sıra, ilgi çekici mekanik ve termal özellikleri, çeşitli endüstriyel uygulamalar için değerli kılmıştır (Hassim vd., 2019; Yamanaka vd., 2014). Son yıllarda, mikro ölçekli takviyeler yerine nanoparçacıklarla güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerin (MMK'ler) performansının incelenmesine dikkat çekici bir vurgu yapılmaktadır. Bu odak değişikliği, nanoparçacıkları takviye malzemesi olarak kullandığında MMK'lerin mekanik özelliklerinde gözlemlenen dikkate değer iyileştirmeler tarafından yönlendirilmektedir. Günümüzde bu alaşımlar, metal matrisli nanokompozitler (MMNK'ler) olarak adlandırılmaktadır (Basak vd., 2019).

Metal matris nano kompozitler (MMNC'ler), hafif bir metal matrisine, alüminyum, magnezyum, titanyum veya kobalt alaşımları gibi ve yüksek dayanımlı takviye edici nanoparçacıkların eklenmesiyle oluşturulmuş bir tür ileri malzeme ve yapı kategorisini temsil edilmiştir. Bu sinerjik kombinasyon hem hafif hem de yüksek dayanımlı özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimiyle sonuçlanmaktadır (Massoud, 2021; Nassar ve Nassar, 2017). Karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen (Gr) ve karbon nanofiberler (CNF'ler) gibi nanoparçacıklar, kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılabilir. Bu nanoparçacıklar, düşük yoğunluk, yüksek çekme ve basma gerilimi ve etkileyici sertlik gibi farklı özelliklere sahiptir. Bu belirgin özellikler, alaşımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilmektedir. Ek olarak, karbon nanoparçacıklarının sahip olduğu olumlu termal ve elektriksel özellikler, korozyona ve aşınmaya karşı yüksek dirençleri, çok sayıda araştırmacıyı denizcilik uygulamaları gibi korozif ortamlarda ve önemli aşınmanın söz konusu olduğu koşullarda kullanılan alaşımların özelliklerini iyileştirmek için bu malzemeleri kullanmaya yöneltmiştir. Ayrıca, MMNK'ler termal ve elektriksel uygulamalarda ve yonga üretimi gibi elektronik uygulamalarda önemli bir performans sergilemektedir. Son zamanlarda, ilginç özellikleri nedeniyle birçok araştırma çalışması, biyomedikal uygulamalarda kullanılabilecek MMNK'ler alaşımlarının geliştirilmesine odaklanmış

ve bu alanda muhteşem bir performans sergilemiştir (Huang vd., 2023; Nassar ve Nassar, 2017; Ouyang vd., 2019).

Karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen tabakalarının yuvarlanarak oluşturduğu silindirik yapılardır. Farklı yuvarlanma şekilleri, zikzak, kiral ve koltuk tipi CNT'ler gibi çeşitli karbon nanotüp formlarına yol açmıştır. Karbon nanotüplerin (CNT'ler) elektriksel özellikleri, karbon altıgenleri ile tüp ekseninde oluşan kiral açıya göre belirlenmektedir. Bu açı, yalıtkan davranışından yarı iletken davranışına kadar uzanabilmektedir. Karbon nanotüpler (CNT'ler) son derece düşük yoğunluğa ve çelikten 100 kat daha fazla çekme mukavemetine sahiptir. Bu nedenle, genellikle metal kompozitler ve seramikler gibi kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için mükemmel takviye malzemeleri olarak kabul edilmektedir (Radhamani vd., 2018). Karbon nanotüplerin (CNT'ler) yanı sıra, grafen (Gr) de, altıgen bal peteği örgüte sahiptir, sp^2 karbon atomlarından oluşan iki boyutlu tabakalı yapısı nedeniyle kompozitlerde mükemmel bir takviye malzemesi olarak kabul edilmiştir. CNT'ler gibi grafen de olağanüstü mekaniksel, termal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Ayrıca nanopartikül yapısı sayesinde grafen, geniş özgül yüzey alanına sahip olup bu da benzersiz özelliklerine katkıda bulunmuştur. Bu nitelikler, grafeni, kompozitlerin mekaniksel ve fonksiyonel özelliklerini artırmak için oldukça cazip bir malzeme haline getirmektedir (Schedin vd., 2007; Zhan vd., 2023). CNT'ler ve Gr ile birlikte, karbon nanofiberler (CNF'ler) de nanofilamentlerden oluşan tek boyutlu bir yapı sergileyen başka bir grafit türevi malzemedir. CNF'ler, CNT'lerden farklı olarak, hafif asimetrik bir şekle sahip şekilde istiflenmiş grafen tabakalarına sahiptir. Yakın dönemdeki araştırma çalışmaları, CNF'lerin metal matrisli kompozitlerin mekaniksel, fiziksel ve tribolojik özelliklerini iyileştirme potansiyelini keşfetmeye odaklanmıştır. CNF'lerin benzersiz özellikleri, bu nanofiberleri takviye olarak içeren alaşım sistemlerinin performansını artırmada umut verici sonuçlar ortaya koymuştur (Ahmadi ve Goodarzi, 2023; Torres vd., 2020).

Bu tez çalışmasının amacı, özellikle çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler), grafen (Gr) ve karbon nanofiberlerin (CNF'ler) bir Co-28Cr-6Mo matris kompozitine eklenmesinin etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmaktır. İmalat süreci, toz metalurjisi tekniği kullanılarak metal matrisli nanokompozit (MMNK) üretimini

içermiştir. Bu çalışma, tozların bilyalı öğütme yöntemiyle karıştırılması, ardından soğuk presleme ve sonrasında sinterleme işlemini içermiştir. Dört grup kobalt bazlı MMNK alaşımı üretilmiştir ve her biri ilgili karbon nanoparçacık takviyelerinin (MWCNT'ler, Gr, CNF'ler) değişen oranlarda ağırlıkça sırasıyla (%0,25, %0,5, %0,27 ve %1) bulunduğu alaşımları içermiştir. Araştırma, tüm nihai alaşımlar için fiziksel ve mekanik özelliklerin analizini, biyouyumluluk değerlendirmesini, mikroyapı analizini içermektedir. Elde edilen sonuçlar, bu araştırma çalışmasındaki elde edilen sonuçlara dayanarak en uygun karbon nanoparçacık takviye tipini belirleyecektir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMA

Bu bölümde, toz metalürjisi tekniği ile üretilen karbon nanopartiküller ile güçlendirilmiş metal bazlı matris alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu ile ilgili önceki araştırma çalışmaları sunulacaktır.

2.1 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri İlgili Yapılan Çalışmalar

Dos Santos vd. (2014), toz metalurji (TM) tekniğini kullanarak CoCrMo alaşımları üretmiştir. Tozlar, inert bir ortamda, bir SPEX değirmeni kullanılarak yüksek enerjili bilyalı öğütme ile elde edilmiştir. Öğütme işlemi, 200 devir/dakika dönme hızı ve 6:1 top-toz oranı ile 15 ila 120 dakika arasında sürmüştür. Elde edilen alaşımlar ve karışık tozlar, fazları ve topoğrafyaları X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Öğütme süresi uzadıkça, sonuçlar partikül boyutunda bir azalma ve küresel şekillerin oluşumunu göstermiştir.

Bahrami vd. (2015), hidroksiapatit (HA) nanotozu ile takviye edilmiş Co-bazlı alaşım kompozitleri üretmiştir. Co-Cr-Mo matris, bilyalı öğütme tekniği kullanılarak değişen miktarlarda HA tozu ile karıştırıldıktan sonra soğuk presleme ve sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Alaşımların mekaniksel ve biyolojik özellikleri değerlendirilmiştir, mikrosertlikte bir artış ve elastisite modülünde ise belirgin bir azalma olduğu ortaya konmuştur. Co-Cr-Mo alaşımlarının biyoaktif tipe dönüştürülmesi, ağırlıkça % değişen miktarlarda HA eklenmesiyle başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Dehaghani vd. (2015), toz metalurji teknikleri ve space holder yöntemini kullanarak Co-Cr-Mo tozlarından matris ve 58S biyoglass takviyesi ile nano kompozit alaşımlar üretmiştir. Gözenekli nano kompozit soğuk olarak sıkıştırıldıktan sonra iki aşamalı ısıtma işlemiyle 4 saat boyunca ısıtılmıştır. Alaşımların topografyası, mikro yapısı, mekaniksel özellikleri ve biyoyumluluğu incelenmiştir. Araştırma sonuçları, bu süngerimsi nano kompozitin, gözenekli yapısı, uygun biyoaktivitesi, biyoyumluluğu ve mekaniksel özellikleri nedeniyle kemik dokusu mühendisliği için elverişli bir biyomalzeme olduğunu ortaya koymuştur.

Abdullah vd. (2016), toz metalurji (TM) teknolojisini kullanarak biyoglass 45S5 içeren gözenekli yapıli bir CoCrMo-bazlı kompozit alaşım üretmiştir. Tasarlanan kompozit tozlar soğuk olarak sıkıştırılmış ve 100 °C'de 2 saat boyunca sinterlenmiştir. Araştırmacılar, nihai alaşımların partikül dağılımı ve analitik fazlarını değerlendirmiş, ayrıca üretilen alaşımların biyoaktivite davranışını incelemiştir. Sonuçlar, ağırlıkça %6 oranında biyoglass 45S5 eklenerek başarılı bir şekilde biyoaktif bir malzemeye dönüştürülebileceğini göstermiştir.

Nová vd. (2017), kobalt esaslı alaşımların mekaniksel özellikleri ve biyouyumluluğu üzerinde alaşım elementlerinin etkisini incelemiştir. Diğer özellikleri korurken aşınma direncini artıran uygun alaşım elementlerini araştırmayı amaçlamışlardır. Standart CoCrMo ve %5 oranında Nb, Si ve Ti gibi alaşım elementleri içeren CoCrMo alaşımlarını üretmek için mekaniksel öğütme yöntemini takiben kıvılcımlı plazma sinterleme tekniği kullanılmıştır. Alaşım elementlerinin mikro yapı, tribolojik ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, niobium ilavesinin aşınma direncini önemli ölçüde artırması nedeniyle CoCrMoNb alaşımı oldukça uygun görünmektedir.

Jang vd. (2018), metal bir bloğu frezeleyerek, soğuk izostatik presleme tabi tutarak ve 750 °C'de ön sinterleme yaparak CoCrMo alaşımları üretmiştir. Ön sinterlenmiş numuneler, disk veya halter şeklinde örnekler elde etmek için 5 eksenli bir öğütme makinesi kullanılarak kuru olarak frezelemiştir. Numuneler daha sonra nihai alaşımları elde etmek için 1250, 1350 ve 1450 °C'de 1 saat süreyle fırında sinterlenmiştir. Son numunelerin mikro yapısı, fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar genel olarak, 1350 °C grubunun 1250 °C ve 1450 °C gruplarına göre daha iyi mekanik özellikler sergilediğini ortaya koymuştur.

Vittayakorn vd. (2018) çalışmalarında, Co-Cr alaşımları üretmek için geleneksel toz metalurji tekniğini kullanmıştır. Bu alaşımlar daha sonra soğuk izostatik presleme ile birlikte tek eksenli preslemeye tabi tutulmuş ve ardından argon atmosferinde sinterlenmiştir. Karşılaştırılmal bir analiz gerçekteştirmek amacıyla, belirli alaşımlar ek olarak post-sinterleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Üretilen tüm alaşımların biyouyumluluğu, kimyasal bileşimi, mikroyapısı ve yüzey morfolojilerini

değerlendirmek için bir analiz yürütülmüştür. Sonuçlar, post-sinterleme numunelerinin gözenekliliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün gerilim giderme ve termal tane büyümesi nedeniyle azaldığını göstermektedir. Biyouyumluluk testi analizi, daldırma günleri uzadıkça PBS çözeltisindeki Co miktarının arttığını, Cr içeriğinin ise azaldığını ortaya koymaktadır. Son olarak, ısıtılma son işlem görmüş numuneler tüm durumlarda daha yüksek ayrışma seviyeleri sergilemektedir.

Li vd. (2019), yüksek krom ve tungsten içeren kobalt bazlı alaşımları vanadyum ilavesiyle üretmek için mekaniksel alaşıma ve sıcak presleme sinterleme tekniklerini kullanmıştır. Kobalt bazlı alaşımların mekanik özellikleri ve mikroyapısı analiz etmek için bir çalışma yürütülmüştür. Sonuçlar, üretilen alaşımın olağanüstü sertlik ve mükemmel kırılma tokluğuna sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, mikro yapının oluşumu ve kobalt bazlı alaşımın güçlendirilme mekanizmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Chang vd. (2020), CoCrMo alaşımlarını üretmek için vakum sıcak presleme sinterleme tekniğini kullanarak en uygun parametreleri belirleme çalışması yapmıştır. Araştırmada, en uygun CoCrMo alaşımları parametrelerini belirlemek için çeşitli sinterleme sıcaklıkları (1100°C, 1150°C, 1200°C ve 1250°C) ve yükler (20 MPa, 35 MPa ve 50 MPa) kullanılmıştır. Araştırmacılar, mikro yapısal özellik ve karakteristiklerdeki farklılıkları incelemiştir. Bulgular, CoCrMo alaşımının özelliklerinin sinterleme parametrelerinden etkilendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, nispeten daha düşük bir sinterleme sıcaklığında vakum sıcak presleme sinterleme yöntemi kullanıldığında mekanik özelliklerin arttığı gözlenmiştir.

Sahasrabudhe vd. (2021), lazerle-tasarlanmış ağ şekillendirme katmanlı imalat teknolojisini kullanarak hidroksiapatit (HA) formunda kalsiyum fosfat içeren bir CoCrMo kompozitinin üretimi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Araştırmacılar, değişen miktarlarda HA içeren üç farklı alaşım üretmiştir. Üretilen alaşımların aşınma davranışları üzerinde kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, CoCrMo alaşımına HA ilavesinin aşınma oranlarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Cao vd. (2022), elektrokaplama kullanılarak nikel kaplı alümina (Ni@Al₂O₃) partikülleri ile takviye edilmiş bir CoCrMo alaşımı üretmiştir. Araştırmada bilyalı öğütme ve seçici lazer ergitme (SLM) tekniği kullanılmıştır. CoCrMo alaşımının mekanik özellikleri, mikroyapısı ve aşınma davranışı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Ni@Al₂O₃'ün CoCrMo alaşımına takviye olarak eklenmesinin, elde edilen alaşımların mekanik özelliklerini ve aşınma karakteristiklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Leban vd. (2023), aynı kimyasal bileşime sahip CoCr alaşımlarını farklı teknikler kullanarak (seçici lazer ergitme (SLM) ve döküm blokların öğütmesi) üreterek ve ısıtma işlemi uygulayarak (sadece SLM bileşenine) karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Alaşımların korozyon direnci, mikroyapısı ve biyoyumluluğu değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Seçici Lazer Eritme (SLM) yöntemi kullanılarak üretilen CoCr alaşımının, öğütlenerek elde edilen alaşımlara kıyasla daha fazla miktarda iyon salındığını göstermektedir. Ayrıca, bu koşullar altında ısıtma işlemi tabi tutulmayan ve ısıtma işlemi tabi tutulan SLM numuneleri arasındaki farklılık anlamlı değildir. Seçici lazer ergitmenin (SLM) ısıtma işleminin CoCr alaşımlarının korozyon özelliklerini etkilemediği görülmüştür. Çalışmalarında, bu alaşımın geliştirilmesinde korozyon ve biyoyumluluğu araştırmak için disiplinlerarası bir yaklaşım kullanmanın önemini vurgulamaktadırlar.

2.2 Karbon Nanopartiküller Kompozit Malzemeler İlgili Yapılan Çalışmalar

Jeyasimman vd. (2014), Al 6061 alaşımının nanokristalin matrisine farklı oranlarda çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) eklenmesinin etkilerini araştırmıştır. 30 saat süreyle mekanik öğütme uygulanmış ve ardından karıştırılan tozlar, inert atmosferde farklı sıcaklıklarda sinterleme işleminden önce soğuk tek eksenli sıkıştırmaya tabi tutulmuştur. Son nanokristalin matris alaşımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri ile mikroyapısı incelenmiştir. Sonuçlar, üretilen kompozitlerin takviye edilmemiş Al 6061'den üç kat daha yüksek sertlik sergilediğini ortaya koymuştur.

Peng ve Chang (2015), homojen Al/MWCNT kompozitleri üretmek için ultrasonikasyon, borulu karıştırma ve bilyalı öğütme işlemlerinin avantajlarını

birleştiren yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Elde edilen ve karıştırılan tozlar ile üretilen kompozit, topografi açısından incelenmiştir. Araştırmacılara göre, Al partikülleri uygun boyutlarını ve pürüzsüz yüzeylerini korurken, MWCNT'ler Al tozları içerisinde eşit şekilde dağılmıştır. Ek olarak, sinterlenmiş Al/MWCNT döküm alaşımları, silindirik şeklini koruyan MWCNT varlığını göstermektedir. Bu durum, kompozit alaşımların genel özelliklerini iyileştirmek için kritik öneme sahiptir.

Wang vd. (2016), elektrosız kaplama ve kıvılcımlı plazma sinterleme işlemlerini kullanarak çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) takviyeli nanokristalin bakır matris kompozitleri üretmiştir. Bu kompozitler, kayda değer ölçüde yüksek mukavemet ve tatmin edici esneklik sergilemiştir. Mekaniksel özellikler ve plastiklik incelemeleri, MWCNT içeren alaşımlarda sade alaşımlara kıyasla belirgin bir iyileşme olduğunu ortaya koymuştur.

Ayyappadas vd. (2017), Cu/Gr MMK'lerin mekanik ve elektriksel özellikleri ile mikro yapısal özelliklerini etkileyen sinterleme yönteminin ve grafen ilavesinin rolünü incelemiştir. MMK'ler farklı oranlarda grafen ile takviye edilmiştir. Sonrasında, nihai alaşımlar toz metalurji tekniği kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafenin bakır matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Buna ek olarak, Cu/Gr kompozitleri, grafenin yüksek sertliği ve üstün yağlama özelliklerine bağlı olarak kayda değer aşınma direnci sergilemiştir. Ayrıca, araştırma verileri, gözenekliliğin alaşımların elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Deshpande vd. (2018), toz metalurji yaklaşımını kullanarak bakır esaslı bir nano-kompozit üretmiştir. Bu yöntem, metal tozları ve karbon nano takviyelerinin karıştırılmasını, ardından presleme ve sinterleme işlemlerini içermiştir. Çalışmada, matris olarak bakır, takviye malzemesi olarak ise karbon nanotüpler kullanılmıştır. Mekanik ve mikro yapısal özelliklerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, takviyeli bakır alaşımlarının aşınma direnci ve mekanik özelliklerinde, takviyesiz alaşımlara kıyasla önemli bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Çalışma ayrıca, karbon nanotüplerin (CNT'ler) bakır matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır.

Zhao vd. (2019), Cu esaslı nano-kompozitler üretmek için yerinde oluşum tekniğini kullanmıştır. Bu yöntem, CNT'lerin Cu matris içinde daha iyi dispersiyonu ve takviye parçacıkları ile matris arasındaki bağlantıyı güçlendirmiştir. Süreç, elektrostatik adsorpsiyon yoluyla mikron boyutlu CNT/Cu₂O kompozit tozlarının ilk olarak oluşturulmasını, ardından Cu-Ti alaşım tozu ile düşük enerjili öğütmeyi içerilmiştir. Elde edilen tozlar, sonraki adımda yerinde geçiş fazı oluşturmak için sıcak presleme kullanılarak konsolide edilmiştir. Sonuçlar, kompozitin takviye mekanizmalarının açıkça avantajlı olduğunu göstermektedir. Araştırmacılar, gözlenen mekanik özelliklerin iyileşmesini, homojen dağılmış karbon nanotüpler (CNT'ler) ve yerinde montaj yoluyla titanyum karbür (TiC) nanopartiküllerinin oluşumunun sinerjistik etkisine bağlamıştır.

Carneiro vd. (2020), karbon nanotüp (CNT) takviyeli nikel matrisli bir metal matris nano kompozitinin (MMNC) karakterizasyonuna incelenmiştir. Araştırmacılar, toz metalurjisi yöntemini ve bilyeli öğütmeyi kullanarak Ni-CNT nano kompozitleri üretmiştir. CNT'ler, ultrasonikasyon karıştırma kullanılarak önce açılmış, ardından değişken karıştırma dönme hızında bir bilyalı öğütme kullanılarak Ni tozu ile karıştırılmıştır. Karıştırılan toz soğuk preslendikten sonra vakumda sinterlenmiştir. Üretilen nano kompozitin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde yoğun bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bulgular, ultrasonikasyon ve bilyalı öğütme tekniklerinin birleştirilerek başarıyla Ni-CNT nano kompozitleri üretmeye imkan verdiğini ve bilyeli öğütme süresinin nihai nano kompozit mikro yapısı ve CNT dağılımı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sharma vd. (2021), AA2024-T351 alaşımlarında takviye edici olarak çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanım olasılığını araştırmıştır. Araştırmacılar, toz metalurjisi yaklaşımını kullanarak nihai alaşımları üretmek için ileri bir deneysel teknik kullanmıştır. Ayrıca, bilyeli öğütme yaklaşımı, CNT'lerin homojen dağılımını başarıyla sağlamıştır. Araştırmada, üretilen numunelerin mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, MWCNT'lerin mekanik özellikleri önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, mikro yapı analizi, çok düzgün bir dağılım, boşlukların gelişimi ve önemli arayüzey bağlanmasını göstermektedir.

Naseer vd. (2022), bakır matrisi ile difüzyon ve etkileşimi üzerindeki etkilerini incelemek için grafen nanoplakası (GNP) üzerine metal oksitlerin bağlanması için bir greftleme protokolü geliştirmişlerdir. GNP'ler fonksiyonel eştirilmelerini iyileştirmek için uyarılmış ve ardından eş-çöktürme protokolü kullanılarak bakır oksit nanopartikülleri ile greft gelmiştir. GNPs-Cu₂O/Cu kalıplı numuneler üretmek için toz karıştırma ve toz enjeksiyonlu kalıplama teknikleri kullanılmıştır. Fiziksel ve mikro yapısal incelemeler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, bu yöntem kullanılarak GNP'lerin homojen dağılımının elde edilebileceğini göstermektedir.

Zhan vd. (2023), ultrasonik destekli doğru akım elektrokaplama yöntemini kullanarak yüksek ısı ve mekanik özelliklere sahip grafen oksit ve grafen oksit/bakır folyoları ile takviye edilmiş bakır matris kompoziti hazırlamıştır. Üretilen numunelerin mekanik ve ısı özellikleri ile mikro yapısı incelenmiştir. Sonuçlar, belirli yöntem süreç özeliği altında, matris içinde ince taneli yapının oluşumunu ve takviye parçacıklarının homojen dağılımını elde etmenin ve iyileştirmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca hem mekanik hem de ısı özelliklerde önemli bir iyileşme gözlenmiştir.

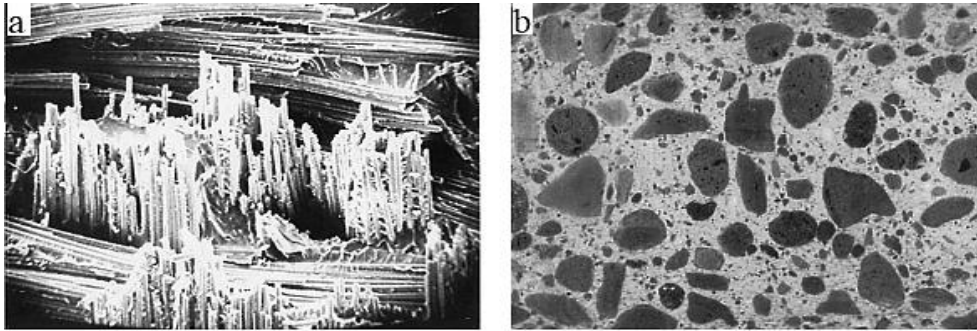
2.3 Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Önceki çalışmalara değerlendirildiğinde, metal matris kompozit çeşitleri arasında CoCrMo matris kompozitlerinin çeşitli sanayi sektörlerinde ve biyomedikal uygulamalardaki önemli kullanımları nedeniyle büyük ilgi gördüğü tespit edilmiştir. Daha önceki araştırmalar, farklı takviye elemanları ve işleme tekniklerinin kullanılmasının, bu alaşımların özelliklerini etkili bir şekilde artırarak mekanik özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağladığını göstermiştir. Özellikle, karbon nanopartikül (CNP) takviyesi, CNP'lerin benzersiz özellikleri nedeniyle tercih edilen bir seçim olarak ortaya çıkmıştır ve olağanüstü alaşım özellikleriyle sonuçlanırdır. Önceki araştırmaların kapsamında amaçlanan çalışma ile farklı CNP takviye tiplerinin ve oranlarının CoCrMo alaşımlarının mekanik ve biyomedikal özellikleri üzerindeki etkisini inceleyerek ve optimal CNP takviye tipi ve oranını belirlemeyi amaçlamıştır.

3. KURUMSAL TEMELLER

3.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, literatürde kompozit malzemeler veya basitçe kompozitler olarak da adlandırılan, birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir malzeme türüdür. İki veya daha fazla farklı bileşenden oluşan bu malzemeler, belirgin şekilde farklı fiziksel ve/veya kimyasal özelliklere sahiptir. Bu elementlerin birleşimi, tek tek bileşenlerde bulunmayan benzersiz özelliklere sahip yeni bir malzeme ortaya yaratmıştır. Kompozit malzemelerin, geleneksel malzeme karışımlarından ve katı çözümlerden ayırt edici bir özellik olarak, nihai malzeme yapısında bireysel bileşenlerinin kendine özgü ve ayırt edici özelliklerini koruduğunu vurgulamak önemlidir (Dawoud ve Saleh, 2019c). Kompozit malzemeler, birleştirildiğinde farklı malzemelerin sergileyebileceği sinerjiye örnek teşkil ederek, üstün sertlik, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik veya iletkenlik bileşimleri elde etme konusunda dikkate değer bir potansiyel sunmaktadır. Doğal örnekler olarak deniz kabukları, ahşap, kemik ve dişler kompozit malzemelerin başlıca temsilcileridir. Şekil 3.1, belirli kompozitlerin mikro yapılarını göstermektedir. Çelik takviyeli beton, makro ölçekte bir kompozit malzemenin en iyi örneklerinden biridir. Mikro ölçekte ise, karbon veya cam elyaf takviyeli plastikler (CFRP veya GFRP) gibi malzemeler, belirli mukavemetlerde önemli iyileştirmeler sağlayan kompozitlere örnek teşkil etmektedir. Sonuç olarak, bu mikro ölçekli kompozitlerin uzay havacılığı (uçaklar), elektronik (bileşenler), otomotiv ve spor ekipmanları gibi çeşitli sektörlerde kullanımı giderek artmaktadır (Donald vd., 2010).



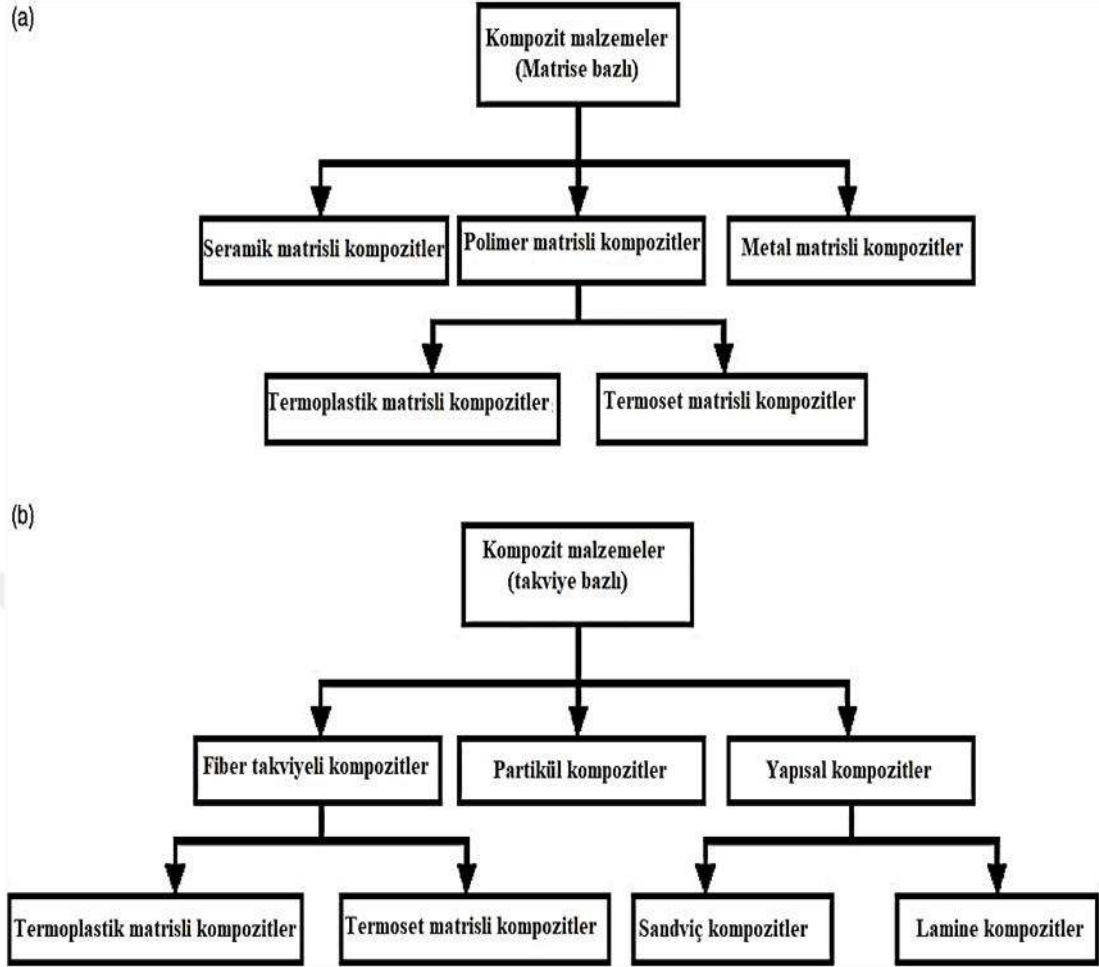
Şekil 3.1 Kompozit malzeme örnekleri: (a) fibreglas kompozit ve (b) kaba kum içeren beton (Donald R. vd., 2010)

Kompozit malzemeler, bileşen malzemeler olarak adlandırılan farklı temel malzemelerden meydana gelmiştir. Bu oluşturucular iki ana kategoride sınıflandırılır: Matris ve takviye. Her iki kategori de bir kompozit malzeme oluşturmak için gereklidir. Matris fazı, takviyeleri saran, kuşatan ve destekleyen bir ortam görevi görerek, kompozit yapısı içindeki göreceli konumlarını korur. Diğer taraftan, takviyeler ise kendilerine özgü fiziksel ve mekanik özellikleriyle matrisin genel performansını artırılmaktadır (Argyropoulos, 2001).

Matris ve takviye fazları arasındaki olağanüstü iş birliği ve geniş bir bağlayıcı ve takviye yelpazesinden seçim yapma imkânı ile birlikte, tasarımcıların hassas bir şekilde kalibre edilmiş özelliklere sahip özel kompozitler oluşturmaya olanak tanınmaktadır. Bu esneklik, belirli ihtiyaçları karşılayabilen ve çok sayıda uygulamada kullanılabilen en iyi özellik birleşimlerine sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesine izin verilmektedir (İbrahim vd., 2015).

3.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması temel olarak iki seviyeyi içermiştir (Şekil 3.2). İlk seviye, matris (bağlayıcı) bileşeninin kompozisyonuna göre belirlenmiştir. Bu bağlamda, üç ana kompozit kategorisi vardır: organik matrisli kompozitler (OMK'ler), metal matrisli kompozitler (MMK'ler) ve seramik matrisli kompozitler (SMK'ler). OMK'ler sınıflandırması içinde, yaygın olarak kabul görmüş iki kompozit sınıfı bulunur: polimer matrisli kompozitler (PMK'ler) ve genellikle karbon-karbon kompozitleri olarak adlandırılan karbon matrisli kompozitler. Sınıflandırmanın ikinci seviyesi, kompozitlerde bulunan takviye fazları ile ilgilidir. Bu sınıflandırma, fiber takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve partikül takviyeli kompozitler arasında ayrım yapmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler konusuna daha yakından bakacak olursak, kullanılan elyaf tipine göre, kesikli veya sürekli fiber takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılabilir (Dawoud ve Saleh, 2019c; Yang vd., 2012). Bu iki seviyeli sınıflandırma sistemi, kompozit malzemelerin matris bileşenleri ve kullanılan takviye tipine göre kategorize edilmesini sağlayarak, mevcut olan çeşitli kompozit malzemelerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına olanak tanımaktadır (Yang vd., 2012).



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması: (a) matris malzemelerine göre ve (b) takviye malzemelerine göre (Yang vd., 2012)

3.1.1.1 Kompozit malzemelerin matris tipine göre sınıflandırılması

Ayrıca, aşağıdaki gibi diğer kompozit malzemelerin sınıflandırmaları da mevcuttur:

- Metal matrisli kompozitler (MMK'ler)

MMK'ler, metalleri matris veya bağlayıcı malzeme olarak kullanan ve diğer bileşenlerin eklenmesiyle takviye edilen kompozit malzemelerdir. Metaller, maliyet etkinliğine rağmen, bazı uygulamalarda yaygın kullanımlarını sınırlayabilen nispeten yüksek özgül kütleye (yoğunluğa) sahiptir. Metal elyaf-matris uyumluluğundan faydalanılarak, MMK'lerin genel performansını artırmak amacıyla kompozitler üretilmektedir (Argyropoulos, 2001).

Metal matris kompozitlerde yaygın olarak kullanılan bazı elyaf türleri şunlardır:

- Karbon çelik elyaf (300°C'ye kadar sıcaklıklarda kullanılır).
- Tungsten elyaf (daha yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılır).
- Molibden elyaf (daha yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılır).

Bu farklı elyaflarını metal matrise entegre edilmesiyle, metal matrisli kompozitler, geniş bir endüstriyel uygulamalar için hassas sıcaklık ve performans kriterlerini karşılayacak şekilde özelleştirilebilmektedir (İbrahim vd., 2015).

- Seramik matrisli kompozitler (SMK'ler)

Bu malzemeler, bir matrisi içine gömülü seramik parçacıklarına, elyaflara vb. sahip kompozitler veya seramik matrisle gömülü diğer malzemeler veya hem seramik takviyelerine hem de matrise sahip kompozitlerdir. Bu kompozitler, giderek artan şekilde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Örneğin, seramik fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler, geleneksel seramiklere kıyasla mukavemet ve kırılma tokluğunda önemli iyileştirmeler sunulmaktadır (Donald vd., 2010).

Matrise seramiklerin eklenmesiyle, kompozit malzeme mekanik özelliklerini artırarak kırılmalara karşı daha yüksek direnç ve genel olarak daha fazla mukavemet sağlamaktadır. Bu özellikler, yüksek mukavemet ve kırılma direncinin gerekli olduğu havacılık, otomotiv ve yapısal bileşenler gibi geniş bir mühendislik uygulaması yelpazesi için seramik matrisli kompozitleri değerli kılmaktadır (Donald vd., 2010).

- Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler).

Polimerler, avantajlı özellikleri nedeniyle kompozitler için en çok tercih edilen matris malzemeleridir. Üstün işlenebilirlik, düşük yoğunluk ve olumlu mekanik özelliklere sahiptirler. Sonuç olarak, yüksek sıcaklıklara dayanıklı polimer reçineler havacılık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerlerin kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılması, verimli ve ekonomik işleme tekniklerinin uygulanmasına olanak tanıyarak karmaşık şekil ve yapıların üretimini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin düşük yoğunluğu, hafif kompozitlerin

geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu özellik, ağırlık azaltmanın yakıt verimliliğini ve genel performansı artırmak için kritik olduğu havacılık uygulamalarında özellikle faydalıdır. Dahası, yüksek sıcaklıklara dayanıklı polimer reçineler, olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir. Bu sayede, özellikle yüksek sıcaklıklarda olmak üzere, havacılık ortamlarında karşılaşılan zorlu koşullara dayanmak için son derece uygundur (Wang vd., 2011).

3.1.1.2 Dağılmış fazın şekline göre sınıflandırma

Takviye fazının şekline bağlı olarak kompozit malzemeler kategorisi sınıflandırılabilir ve bu sınıflandırma aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir.

- Sürekli fiber takviyeli kompozitler.
- Elyaf dokuma (tekstil), örme takviyeli kompozitler.
- Tabaka takviyeli kompozitler.
- Çok kısa elyaf (kılçıklar) takviyeli kompozitler.
- Parçacık takviyeli kompozitler.
- Nano parçacık takviyeli kompozitler.

Nanopartikülle takviyeli kompozitler, son dönemde bilim insanlarının ilgi odağı haline gelmiştir. Bu tip kompozitlerin üretim yöntemleri ve karakterizasyonu birçok araştırmacı tarafından yoğun bir şekilde çalışılmakta ve araştırılmaktadır (Donald vd., 2010; Dawoud ve Saleh, 2019c; Thostenson vd., 2001).

3.1.1.3 Takviye elyafının tipine göre sınıflandırma

Kompozit malzemeler, kullanılan takviye elyaflarının türüne göre sınıflandırılabilir. Bu seçenekler arasında, karbon ve grafit elyaf kompozitleri, kendine özgü ve olağanüstü özellikleriyle öne çıkmıştır. Bu elyaflar, cam elyaflar gibi diğer takviye elyaf türlerinden ayırt edici olağanüstü özelliklere sahiptir (Dawoud ve Saleh, 2019c). Karbon ve grafit fiberler, cam elyaflardan yaklaşık on kat daha yüksek rijitlik göstererek olağanüstü bir sertliğe sahiptir, ancak yoğunluğu cam elyafların yarısı kadardır. Yüksek rijitlik ve düşük ağırlık kombinasyonu, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarının gerekli olduğu uygulamalar için onları ideal hale getirilmektedir.

Karbon ve grafit elyaflar, mekanik özelliklerinin yanı sıra, oksidasyondan korunduğunda mükemmel termal performans sunulmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda stabil ve kimyasal olarak inert kalırlar, bu sayede önemli bir bozulma olmadan 1000°C'ye kadar sıcaklıklara dayanabilmektedirler. Ayrıca, bu elyaflar olağanüstü elektriksel iletkenlik göstererek elektriksel özelliklerin önemli olduğu uygulamalar için uygundur (Ayyappadas vd., 2017; Zhao vd., 2019).

Öte yandan, hibrit kompozitler adı verilen özel kompozit türleri, çeşitli alanlarda giderek daha fazla ilgi çekmekte ve uygulama alanı bulmaktadır. Araştırmacılar şu anda, birçok malzemenin bir arada sunabileceği avantajlardan yararlanmak ve bu sayede kendine özgü ve özelleştirilmiş kompozit malzemeler oluşturmak için bu kompozitlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadırlar. Hibrit kompozitler, farklı matris malzemeleri ile birlikte birden fazla takviye elyafı veya partikülünün bilinçli bir şekilde birleştirilmesini ifade etmiştir. Elde edilen kompozit, her bir bileşenden elde edilen özelliklerin sinerjik bir kombinasyonunu sergilemektedir, bu sayede tek bir malzemenin üretilen geleneksel kompozitlere kıyasla gelişmiş performans özellikleri sunulmaktadır. Hibrit kompozitlerin kullanım amacı, her bir bileşen malzemenin artırılmış mukavemet, rijitlik, tokluk, termal kararlılık veya elektriksel iletkenlik gibi avantajlarından faydalanarak en iyi şekilde yararlanmak, potansiyel dezavantajları en aza indirmektir. Bu yaklaşım, tasarımcıların ve mühendislerin, belirli uygulama ön koşullarını ve zorluklarını karşılamak üzere hassas bir şekilde özelleştirilmiş kompozit malzemeler üretmelerini sağlamaktadır. Hibrit kompozitler, havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat ve spor ekipmanları gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu sektörler, olağanüstü performans ve verimlilik elde etmek için özel olarak uyarlanmış ve geliştirilmiş malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Hibrit kompozit alanındaki araştırma ve geliştirme çalışmaları devam ettikçe, kompozit malzemelerde daha fazla iyileştirme ve yenilik beklenmektedir. (Berthelot, 1999).

3.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler (MMK'ler) yetmiş yılı aşkın süredir sürekli gelişim göstermektedir. İlk olarak, havacılık uygulamaları için geliştirilen sürekli filamanlı metal matrisli kompozitler (MMK'ler) üzerine yoğunlaşmıştır. Sonrasında, MMK'ler

diğer çeşitli sektörlerde de kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, havacılık ve askeri uygulamalar dışındaki endüstrilere MMK entegrasyonu, esas olarak MMK malzemelerinin maliyetindeki düşüşe bağlı olarak kademeli olarak gelişmiştir. Maliyetlerdeki düşüş, esas olarak, MMK üretiminde kullanılabilecek yeni ve daha uygun maliyetli liflerin geliştirilmesine ve bunlara erişilebilirliğe atfedilmiştir. Teknoloji ve üretim tekniklerindeki gelişmelerle birlikte, MMK üretim maliyetleri düşmüştür. Bu durum, MMK'leri havacılık ve askeri sektörlerin dışındaki daha geniş bir uygulama yelpazesi için ekonomik açıdan daha uygulanabilir hale getirmiştir. Sonuç olarak, MMK'ler, üstün mukavemet-ağırlık oranı ve olağanüstü termal özellikleri gibi kendine özgü özellikleri sayesinde, genel performans ve verimliliği artırdıklarından dolayı çeşitli sektörlerde benimsenmiştir (Taya ve Arsenault, 1989).

MMK'ler, genellikle iki ana bileşenden oluşmaktadır: ilki, çoğunlukla bir alaşım biçiminde bulunan metal matriks; ikinci bileşen ise tipik olarak bir takviye malzemesidir. Takviye, aralarında intermetalik kompleksler, oksitler, karbürler veya nitritler bulunan birçok malzeme kullanılarak sağlanabilmektedir. Metal matriks kompozitler ile iki veya daha fazla faz içeren diğer alaşımlar arasındaki temel fark, işleme yöntemlerine dayanmaktadır. Kompozit üretimi, başlangıçta ayrı bileşenler olarak var olan metal matriks ve takviye malzemesinin karışımını içermiştir. Kompozitler, iki veya daha fazla faz içeren alaşımlardan ayrılır, çünkü alaşımlardaki ikinci faz genellikle partikül, ötektik veya ötektoid tepkimeler gibi işlemler sonucunda oluşmaktadır (Taya ve Arsenault, 1989).

3.1.2.1 Kobalt esaslı matris

Kobalt esaslı matrisler, metal matrisli kompozitler (MMK'ler) arasında ilgi çekici bir kategoridir ve kobalt alaşımları, döküm alaşımları ve sıcak dövme alaşımları olmak üzere temelde iki gruba ayrılmaktadır. Bununla birlikte, kobalt bazlı alaşımları içeren kompozitler genellikle döküm veya toz metalurjisi teknikleri kullanılarak üretilmiştir (Tanzi vd., 2019).

Döküm işlemi basit ve ekonomik bir yaklaşım sunmaktadır, ancak makro segregasyon, porozite, katılaşma büzülmesi ve ikinci faz kapanımları gibi kusurları önlemek için

döküm sıcaklığı, soğutma hızı ve ısıtma işlem koşulları gibi faktörlerin hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Kompozit içindeki karbürlerin boyut ve dağılımı bu parametrelere büyük ölçüde bağlıdır (Zaman vd., 2017).

Diğer bir yöntem olarak, önceden alaşımlandırılmış tozların kullanıldığı toz metalurjisi işlemi ile de kobalt bazlı alaşımlar imal edilebilmektedir. Bu yöntem, nihai kompozitin kompozisyonu ve mikro yapısı üzerinde daha fazla kontrol imkanı sunmaktadır (Sun vd., 2014; Zaman vd., 2017).

Kobalt bazlı alaşımların olağanüstü özellikleri, onları birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Bu alaşımlar, nükleer güç santralleri için vana koltuklarında, havacılık yakıt nozullarında, motor kanatlarında, ortopedik ve dental implantlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda olağanüstü mukavemet, korozyon direnci, üstün aşınma direnci ve biyouyumlu olma özellikleriyle çeşitli endüstrilerdeki zorlu ve kritik koşullar için oldukça uygundur (Sun vd., 2014).

Çeşitli kobalt alaşımları arasında kobalt-krom (CoCr) alaşımları en yaygın olanıdır. Kobalt-krom alaşımları, özellikle krom içeriği %25 ağırlıkçıyı aştığında güvenilirlikleri nedeniyle oldukça değerlidir. Yüksek krom seviyeleri, alaşımda daha iyi mekanik ve biyolojik özellikler ile birlikte korozyon direncinin artmasına katkıda bulunmaktadır. (Tanzi vd., 2019). CoCr alaşımları, havacılık motorları, nükleer enerji, gaz türbinleri ve biyomedikal sektörleri gibi çeşitli teknik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşımlar özellikle dental ve ortopedik implantlarda göze çarpmaktadır (Vittayakorn vd., 2018).

Ancak, CoCr alaşımlarının üretim süreçlerinde bazı zorluklar belgelendirilmiştir. Bu faktörler, her bir bileşenin birleşmesinden kaynaklanan istenmeyen ara fazların oluşumunu, değişken mikro yapının varlığını ve tam yoğunluğa ulaşmada karşılaşılan güçlüğü kapsamaktadır (Poolphol vd., 2017). Bu sorunları çözmek amacıyla araştırmacılar farklı yaklaşımları incelemiştir. Etkili bir strateji, takviye malzemesi seçimi veya uygun üretim tekniklerinin kullanımı gibi iyileştirici materyallerinin kullanılmasını içermektedir. Buna ek olarak, ısıtma işlem, CoCr alaşımlarının mikro

yapısını ve özelliklerini daha da geliştirmek için kullanılabilmektedir (Cao vd., 2022; Poolphol vd., 2017; Sun vd., 2014; Tanzi vd., 2019; Zaman vd., 2017).

Son zamanlarda, kobalt-krom (CoCr) alaşımları biyomedikal uygulamalarda geniş çapta kullanım bulmuştur. Özellikle, bu alanda yaygın olarak kullanılan dört kobalt-krom alaşımları aşağıdakilerdir:

- ASTM F75: Kompozisyon- Co-28Cr-6Mo (Döküm Alaşımı).
- ASTM F799: Kompozisyon- Co-28Cr-6Mo (Termodinamik İşlenmiş Alaşım).
- ASTM F90: Kompozisyon- Co-20Cr-15W-10Ni (Dövme Alaşımı).
- ASTM F562: Kompozisyon- Co-35Ni-20Cr-10Mo (Dövme Alaşımı).

Bu alaşımların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1'de verilmektedir (Tanzi vd., 2019).

Tablo 3.1 Biyomedikal alanda genel olarak kullanılan bazı Co-Cr alaşımlarının kimyasal bileşimi (%)

Elementler (%)	ASTM F75	ASTM F799	ASTM F90	ASTM F562
Co	58,9-69,5	58-59	45,5-56,2	29,0-38,8
Cr	27,0-30,0	26,0-30,0	19,0-21,0	19,0-21,0
Mo	5,0-7,0	5,0-7,0	–	9,0-10,5
W	0,2	–	14,0-16,0	–
Ni	2,5	1,0	9,0-11,0	33,0-37,0
Mn	1,0	1,0	2,00	0,15
Si	1,0	1,0	0,40	0,15
Fe	0,75	1,5	3,00	1,0
C	0,35	0,35	0,15	0,025
N	0,25	0,25	–	–
P	0,02	–	0,04	0,015
Ti	0,10	–	–	1,0
S	0,01	–	0,03	0,010

ASTM F75 ve ASTM F799 alaşımlarının benzer bileşimlere sahip olmalarına rağmen, farklı işleme yöntemleri farklı mekanik özelliklerle sonuçlanmaktadır. Ek olarak, ASTM F90 ve ASTM F562'deki kobalt içeriği, ASTM F75 ve ASTM F799'dakine göre daha düşüktür. Tersine, ASTM F562 daha fazla nikel içerirken, ASTM F90 daha fazla tungsten içermektedir (Tanzi vd., 2019).

CoCr alaşımlarının çeşitli kimyasal kompozisyonları ve işleme yöntemleri, geniş bir mekanik özellik yelpazesine yol açmıştır ve bu da onları son derece çok yönlü ve dental ve ortopedik implantlar dahil olmak üzere çeşitli biyomedikal uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Bu durum, olağanüstü mekanik mukavemetleri, korozyon dirençleri ve canlı dokularla uyumluluklarından kaynaklanmaktadır (Poolphol vd., 2017; Singh vd., 2016).

Mekanik özellikler, spesifik Co-Cr alaşımlarının Tablo 3.2'de gösterilmektedir (Singh vd., 2016; Tanzi vd., 2019).

Tablo 3.2 Genel Co-Cr alaşımlarının mekanik özellikleri

Özellik	ASTM F75	ASTM F799	ASTM F90	ASTM F562
Elastik modülü (GPa)	253	210	210	332
Akma mukavemeti (MPa)	841	896-1200	448-1606	965-1500
Çekme Gerilme Direnci (MPa)	1277	1399-1586	951-1896	1206-1795
Sertlik (HV)	298	239	245	280

3.1.3 Nanokompozit

Son zamanlarda, nanobilim, nanoteknoloji ve nanokompozit alanları önemli ölçüde büyüme ve gelişme yaşamıştır. Nanokompozitler, nanometre ölçeğinde takviyeler içeren kompozit malzemeler olarak, benzersiz özellikleri ve çok yönlü uygulamaları nedeniyle önemli ilgi görmektedir (Mohan, 2016).

Nanokompozitlerin ortaya çıkması, otomotiv ve havacılık dâhil çeşitli endüstrilerde ilerlemelere yol açmıştır, bu malzemeler geliştirilmiş mekanik özellikler, artırılmış dayanıklılık ve azaltılmış ağırlık sunmaktadır. Ambalaj sektöründe kullanımları, daha iyi koruma ve malzeme muhafazası için hafif ancak güçlü malzemeler yaratma konusunda yeniliklere yol açmıştır. Elektronik endüstrisinde ise nanokompozitler, geliştirilmiş iletkenlik ve termal özelliklerle daha küçük ve daha verimli cihazların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Mohan vd., 2015).

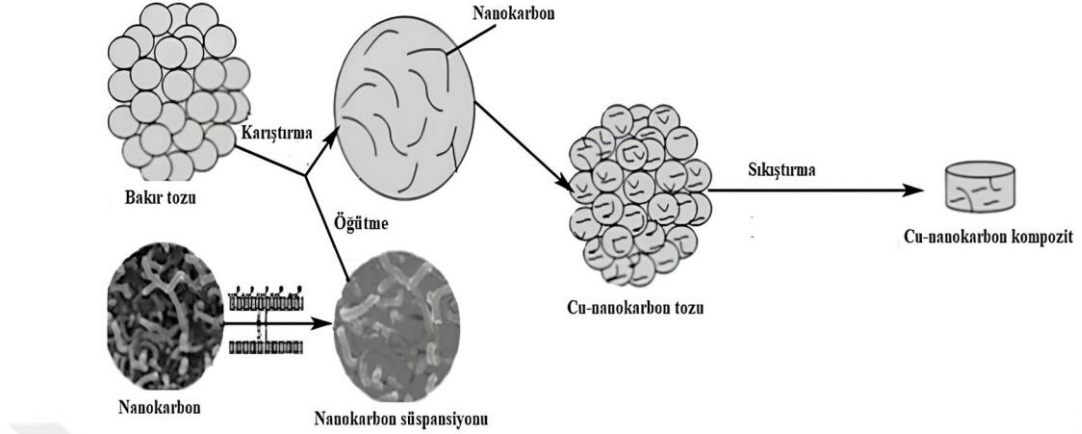
Biyoteknoloji alanında, nanokompozitler ilaç teslim sistemlerinde, doku mühendisliğinde ve biyogörüntüleme alanlarında uygulama bulmuş ve terapötik tedavilerde daha iyi hassasiyet ve kontrol sağlamıştır. Nanokompozitlere dayalı esnek sensörlerin geliştirilmesi, giyilebilir teknolojiyi devrimleştirmiş ve çeşitli sağlık ve çevresel uygulamalar için gerçek zamanlı izleme ve veri toplama imkânı sunmuştur (Mohan vd., 2015).

Nanokompozitlerin çok yönlülüğü, nanometre ölçeğindeki olağanüstü özellikleriyle birleşerek, birçok farklı sektörde varlıklarını artırmıştır ve araştırma ve geliştirme faaliyetleri yeni olanaklar ve uygulamalar açığa çıkarıldıkça önemleri daha da artmaya devam edecektir. Nanobilim, nanoteknoloji ve nanokompozitlerin gelişen alanı, dikkate değer potansiyelleri ile çeşitli endüstrilerin geleceğini şekillendirecek inovasyonları taahhüt etmektedir (Mohan vd., 2018a).

En yaygın nanokompozit çeşitleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Seramik matrisli nanokompozitler; seramik matrisin takviyesi olarak nanopartiküller kullanılarak veya metal matriste nanoseramik takviye kullanılarak üretilenmiştir (Kruis vd., 1998).
- Metal matrisli nano kompozitler; takviyeli metal matris kompozitleri olarak da bilinir, sürekli veya kesikli takviyeli malzemeler olarak sınıflandırılabilen malzemelerdir. Aşağıdaki Şekil 3.3, Cu matrisli nano kompozitin üretimini göstermektedir. Karbon nanotüp metal matris kompozitleri, karbon nanotüp malzemelerinin yüksek çekme dayanımı ve elektriksel iletkenliğinden faydalanan,

şu anda geliştirilmekte olan özellikle önemli bir nano kompozit türüdür (Janas ve Liszka, 2018).

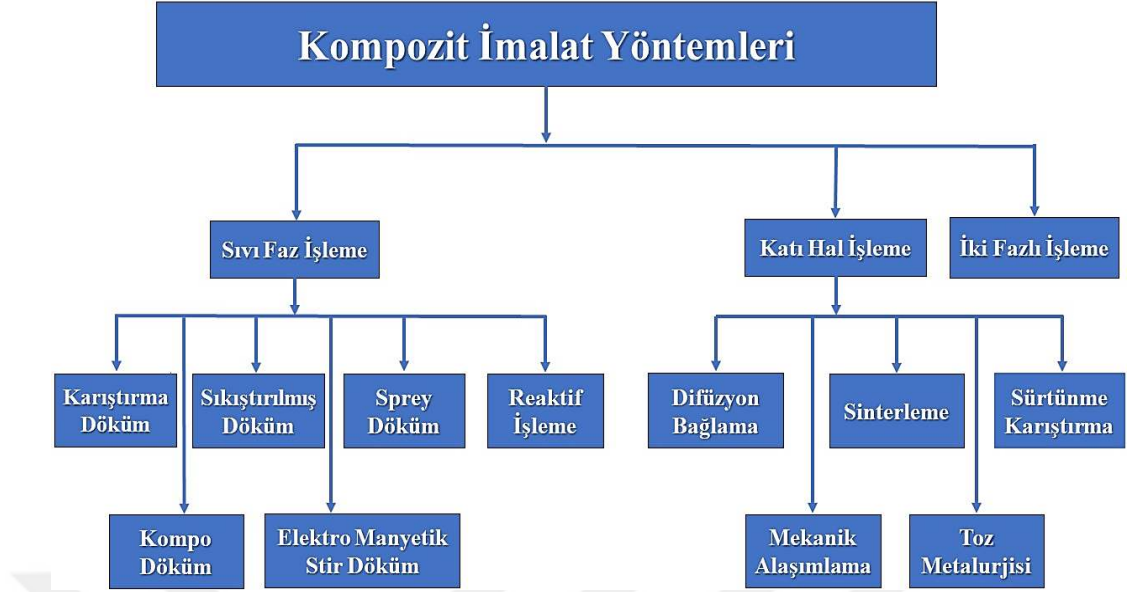


Şekil 3.3 Toz Metalurjisi yöntemiyle üretilen Cu-nanokarbon kompoziti (Khisamov vd., 2015)

- Polimer matrisli nano kompozitler; bu tip nano kompozitlerin basit tanımı, genel performansı artırılmış bir alaşım elde etmek için bir polimer matrisine nanopartiküller eklemektir. Polimer matrisli nanokompozitler, geleneksel polimer alaşımlardan farklı olarak, homojen olarak dağılmış nano boyuttaki takviye malzemeleri içermiştir. Bu nano boyuttaki takviye malzemeleri, polimerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirebilmektedir (Soltani vd., 2017).

3.1.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit bileşenler, enjeksiyon kalıplama gibi farklı endüstrilerden uyarlanmış yöntemlerin yanı sıra, özel tasarım veya üretim zorluklarını ele almak için özel olarak geliştirilmiş yöntemler dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak üretilmiştir. Belirli bir bileşen için bir sürecin seçimi, kullanılan malzemeler, parçanın tasarımı ve amaçlanan son kullanım veya uygulama gibi çeşitli unsurlara bağlıdır. Şekil 3.4, üretim koşullarına göre değişen teknikleri göstermektedir (Dwivedi vd., 2020).



Şekil 3.4 Kompozit imalat yöntemleri (Dwivedi vd., 2020)

3.1.5 Toz Metalurjisi

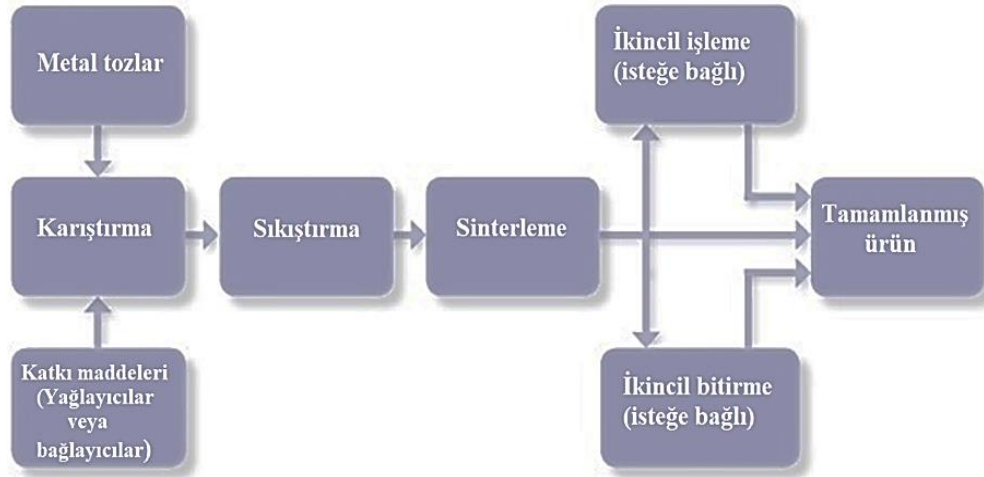
Toz metalurjisi, birincil bileşenlerini eritmeden toz halindeki metaller, metaloitler, metal alaşımları veya bileşiklerden nihai ürünler elde etme yöntemidir. Ek olarak, ferritler ve sinterlenmiş korindon gibi metal olmayan tozlara metalik özellikler kazandırma işlemini de kapsar. Bu işlem, işleme, şekillendirme ve belirli yarı iletken türlerinin üretimi için kullanılmaktadır. Tarih boyunca toz metalurjisi, metalurjinin en eski yöntemidir. Dünyanın birçok bölgesinden yapılan arkeolojik buluntular bunu doğrulamaktadır. Örneğin, İnkalar mücevher yapımında toz altın kullanmışken, eski Mısırlılar MÖ 3000 yılı kadar erken bir tarihte demir tozundan kullanılmışlardır. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında toz metalurjisi, tungsten (3422°C) ve molibden (2623°C) gibi yüksek erime noktalı metallerin üretimi için bir yöntem olarak popülerlik kazanmıştır. Bu durum, bu metallerin eritilmesi için gerekli ekipmanın o dönemde mevcut olmamasından kaynaklanıyordu. Ekim 1879'da Thomas Edison tarafından icat edilen ampul, özellikle filament üretiminde tungsten toz metalurjisinin gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. 20. yüzyılın başlarında, ilk sinterlenmiş metal-karbon bileşiklerinin ticari üretimi başlamıştır. Bu bileşikler, bakır veya gümüşe benzer şekilde elektrik iletkenliği sağlarken aynı zamanda grafit gibi mükemmel yağlama özelliklerine de sahiptir. Bu malzemeler, dinamo ve elektrik motorları gibi makine ve ekipman teknolojisinin gelişimi ile birlikte geliştirilmiştir. 1920 yılına kadar, ek kompozit malzemeler oluşturuldu ve “sert metaller” veya “sinterlenmiş

karbürler” olarak adlandırılmıştır. Bu malzemeler, esas olarak aşınmaya yüksek dirençli takım üretimi için kullanılmıştır (Randall, 1994).

Daha sonraki gelişmeler, özellikle konektörler ve elektrotlar için özel olarak tasarlanmış malzemelerin yanı sıra geniş bir yelpazede elektriksel ve manyetik malzemelerin üretimini içermiştir. Buna ek olarak, toz metalurjisi, belirli bileşenlerin üretimi için döküm, işleme ve makine gibi geleneksel yöntemlere göre uygulanabilir bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Razavi vd., 2017).

TM teknolojisi, otomotiv, mühendislik, havacılık, tıp ve petrol dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu durum hem enerji hem de malzeme kullanımında önemli tasarruf yol açılmaktadır. Dahası, TM teknolojisi kullanılarak üretilen ürünler, genellikle alternatif tekniklerle yapılanlara kıyasla geliştirilmiş özelliklere sahiptir. TM teknolojisi, geleneksel döküm metalurjisi kullanılarak üretiminde zorlayıcı veya imkânsız olan alaşımların kolaylaştırmıştır ve bu sayede kendine özgü özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesine yol açmaktadır. Bu durum, özellikle değişken ergime noktalarına, sıvı halde sınırlı çözünürlüğe veya değişen yoğunluklara sahip bileşenler için faydalıdır (Nagavally, 2016; Saxena vd., 2023).

Toz metalurjisinin etkili bir kullanım yöntemi, toz karışımının doğrudan sıcak preslenmesidir. Bu yöntem, alternatif yaklaşımlara kıyasla daha ekonomiktir. Teknik, birincil bileşenler olarak alüminyum, bakır, nikel ve titanyum gibi alaşımların kullanılmasını içerirken, B₄C, SiC, grafit, Ti parçacıkları ve kısa lifler ise takviye edici maddeler olarak işlev görür. Ek olarak, metal matris kompozitler, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, genellikle toz metalurjisi tekniği kullanılarak üretilmektedir. Bu işlem hem matris hem de takviye bileşenleri için tozların karıştırılmasını ve ardından bunların bir kalıba yerleştirilerek sıkıştırılmasını içermektedir. Sıkıştırılmış tozlar daha sonra, erime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta ısıtılabilir ve böylece katı hal difüzyonu teşvik edilmektedir. Difüzyon sürecini optimize etmek için sıcaklığın mümkün olduğunca yüksek olması tercih edilmektedir (Okay, 2020; Okay ve Islak, 2021).



Şekil 3.5 Toz metalurjisi yöntemi ile parçalar üretimi (URL-1, 2023)

3.1.5.1 Tozların üretimi ve hazırlanma yöntemleri

Parçacık boyutu, yapısı ve dağılımı ile birlikte tozların kimyasal bileşimi ve saflığı, toz metalurjisi tekniklerinde kritik rol oynamaktadır. İlk aşamada, genellikle malzemenin toz olarak üretimi, genellikle 1 mm'nin altında olması tercih edilen bir yöntemdir.

Metal toz üretimi için kullanılan üretim prosedürleri, tozların özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu yaklaşımlar, kullanılan özel üretim yöntemine bağlı olarak basit kürelerden karmaşık şekillere kadar değişebilen tozların geometrik özelliklerini kontrol etmektedir. Dahası, tozların yüzey oluşumu, kullanılan üretim yöntemine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Nazik (2013), belirli bir prosedürün uygunluğunun, malzemelerin içyapı özellikleri tarafından belirlendiğini belirtir. Çeşitli toz üretim teknikleri ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıdaki teknikler sıklıkla kullanılanlardır:

- Mekanik yöntemler.
- Kimyasal yöntemler.
- Fiziksel-mekanik yöntem.
- Kimyasal yöntem.
- Fiziksel-kimyasal yöntem.

Herhangi bir malzemeyi toza dönüştürmek için kullanılabilecek çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Seçilen yöntem, amaçlanan kullanıma ve son ürünün istenen özelliklerine ve yapısına dayanmalıdır.

Farklı malzemeler, toz haline getirme işlemleri için farklı teknolojiler gerektirebilmiştir. Toz oluşturma işlemi, daha büyük bir yüzey alanı oluşturmak için bir maddeye enerji uygulanmasını içermektedir. Önemli faktörler arasında işlem verimliliği, enerji kapasitesi, başlangıç malzeme kompozisyonu ve potansiyel safsızlıklar yer almaktadır. Örneğin, 1 metreküp metal hacmini 1 mikrometre boyutlarında taneciklere bölseymiş, yaklaşık olarak $2,1 \times 10^{18}$ adet küresel tanecik ve yaklaşık 6×10^6 metrekairelik bir yüzey alanı elde edermiştir. Bu işlem, sürecin verimliliği ile belirlenen önemli miktarda enerji gerektirmiştir. Üretim teknolojisinin seçimi, ekonomik faktörlere, tozun istenen özelliklerine ve kullanım amacına bağlıdır (Upadhyaya, 2002).

3.1.5.2 Bilyalı öğütme ve toz karıştırma

Mekanik öğütme prensibi, malzemeyi kırmak için mekanik hareket enerjisinin malzemeye aktarılmasını içermektedir. Bu enerji, kristallerde mekanik gerilmeye neden olarak, malzemenin fiziksel özelliklerine göre parçalanmasına yol açmaktadır.

Mekanik alaşımlı kavramını kullanan en temel cihaz bilyalı öğütmedir. Öğütme, tamburun dönme hareketiyle hareket eden katı öğütme parçacıklarının toz üzerine olan mekanik çarpışmalarıyla gerçekleşmektedir. Bilye, silindir veya çubuk gibi öğütme malzemeleri, alaşımsız ve paslanmaz çelik, seramik ve sert metal gibi birçok malzemedan üretilmiştir. Malzeme seçimi, sertlik, öğütme kabiliyetleri ve istenen toz saflık düzeyi gibi faktörlere bağlıdır. Öğütme, kuru veya ıslak olarak gerçekleştirilebilmektedir ve uygun bir yüzey aktif sıvının eklenmesi, parçalanma sürecini kolaylaştırmaktadır (Upadhyaya, 2002).

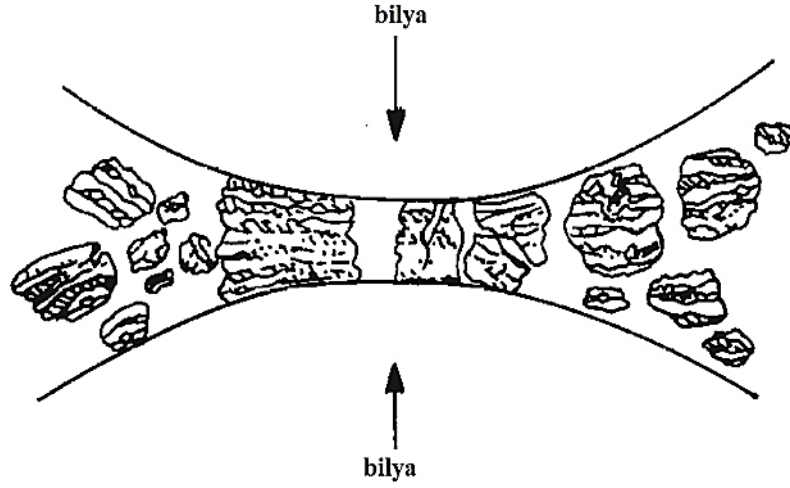
Toz metalurjisinde, "harmanlama" terimi özel olarak tek bir bileşeni içeren bir işlem için kullanılırken, "karıştırma" ise birden fazla toz türünün birleştirilmesini ifade edilmektedir. Örneğin, katı bir kayganlaştırıcı, bir metal tozu veya diğer metallerin tozları ile karıştırılabilmektedir. Bazen katkı maddesi, demirdeki grafit gibi hem

kayganlaştırıcı hem de alaşıma katkı maddesi olarak işlev görmektedir (Nagavally, 2016; Upadhyaya, 2002).

Hausne (1982), toz karıştırma prosedüründe aşağıdaki gibi çeşitli değişkenleri tanımlamıştır:

- Mikser tipi.
- Karıştırıcı hacmi.
- Mikser şekli.
- Mikserin iç yüzey alanı.
- Mikser malzemesinin yapısı ve yüzey kalitesi.
- Karıştırmadan önce karıştırıcı içindeki toz Hacmi.
- Karıştırdıktan sonra karıştırıcı içindeki toz Hacmi.
- Bileşenin tozları hacim oranı.
- Karıştırıcının toza hacim oranı.
- Bileşen tozları özellikler.
- Karıştırıcının sıkma hızı.
- Karıştırma süresi.
- Karışımın sıcaklığı.
- Karışım ortamı (sıvı veya gaz) ve nem.

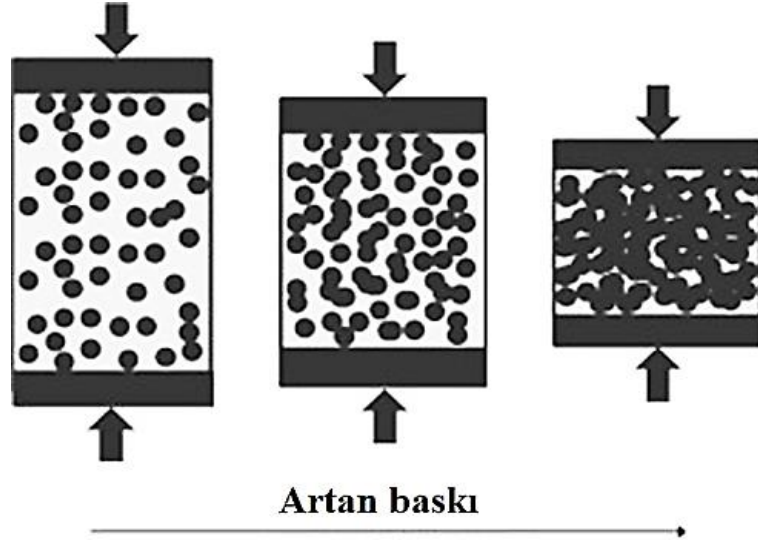
Mekanik alaşımlıma sürecinde, toz bilyalı öğütme içerisinde sürekli kırılma ve soğuk kaynak işlemine maruz kalmaktadır. Bu durum, tane boyutlarında bir azalmaya yol açmakta ve takviye elementinin matris içirsene eşit şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Tozlar birbirleriyle ve bilyeler ve pota yüzeyi ile çarpıştıklarında plastik deformasyona uğrar ve kaynaklanır veya kırılmaktadır (Şekil 3.6). Bu çarpışma ayrıca tozlara enerji verir ve bu enerjiyi diğer tozları kırmak ve kendileri de bir enerji kaynağı haline gelmek için kullanmaktadırlar. Sonuç olarak, tozlar bu plastik deformasyon nedeniyle sertleşmektedir (Upadhyaya, 2002).



Şekil 3.6 Tozun bir bilyadan bilyaya çarpma etkisi (Upadhyaya, 2002)

3.1.5.3 Toz sıkıştırma

Toz dökme işlemi sırasında, tanecikler yerçekimi kuvvetlerinin etkisi nedeniyle yeniden düzenlemeye uğrar ve bu da köprü ve boşlukların oluşmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte, bu kusurlar sallama ve titreşim uygulamak suretiyle aşılabilmektedir. Presleme işlemi sırasında şekillendirilmiş gövde, karmaşık mekanik yüklemeye maruz kalmaktadır. Tozu sıkıştırmak için uygulanan basınç, tanecikler ile kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi ve taneciklerin kendi aralarındaki sürtünmeyi aşmak için harcanan enerji nedeniyle eşit olarak dağılmaz. Kalıp duvarları tarafından indüklenen sürtünmenin strese ve yoğunluk gradyanlarına etkisi göz ardı edilirse, elde edilen kompakt yoğunluğu tamamen uygulanan sıkıştırma kuvvetine bağlı olacaktır. Bununla birlikte, kompakta basınç uygulandığında (Şekil 3.7), tanecikler düzenlenir, kümeler ve boşluklar giderilir ve plastik deformasyon yoluyla tanecikler arasındaki temas artmaktadır. Sonuç olarak, bu durum taneciklerin yüzeylerinin düzgünleşmesine, oksitlenme tabakasının parçalanmasına ve taneciklerin mekaniksel olarak birbirine kenetlenmesiyle topakların oluşmasına yol açmaktadır. Basıncı artırırsa, taneciklerin güçlenmesine, tanecikler arasındaki kohezyonun artmasına ve esnekliğini yitirmiş taneciklerin kırılmasına neden olmaktadır (Upadhyaya, 2002).



Şekil 3.7 Artan yükleme kuvveti ile sıkıştırma işlemi (Upadhyaya, 2002)

Toz sıkıştırma, çeşitli önemli işlevlere sahiptir. Bunlar, tozun istenilen şekle getirilmesi, sinterleme kaynaklı boyutsal değişiklikler hesaba katılarak hedeflenen boyutların elde edilmesi, istenilen seviye ve tipte porozitenin oluşturulması ve sonraki işlemler için yeterli mukavemet sağlanmasıdır (Hausne, 1982).

Sıkıştırma işlemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. İstenilen miktarda tozun kalıp boşluklarına doldurulması,
2. İstenilen yeşil yoğunluk ve parça kalınlığına ulaşmak için sıkıştırma,
3. Üst takımın kompaktan çekilmesi,
4. Nihai ürünün çıkarılması (Upadhyaya, 2002).

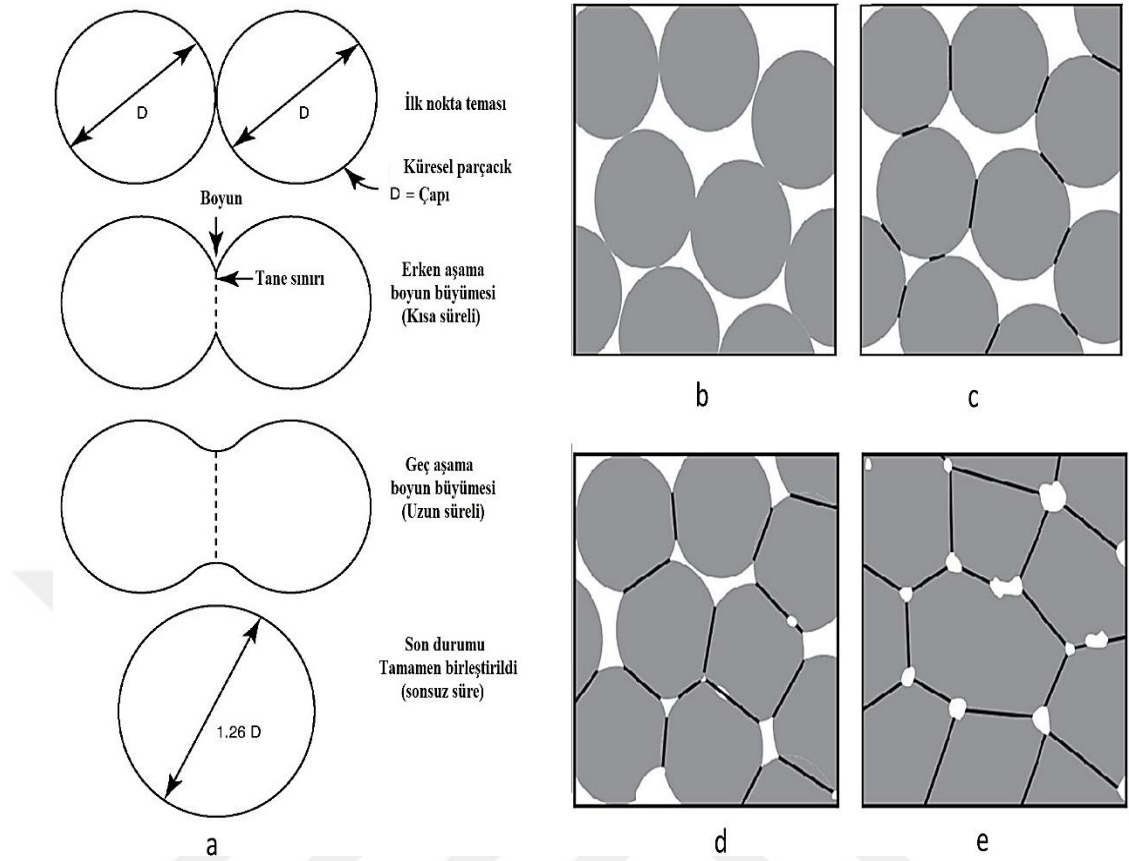
3.1.5.4 Sinterleme işlemi

Sinterleme, toz metalürjide sıkıştırılmış tozları katılaştırmak için kullanılan son yöntemdir. Bu işlem, tozların erime noktalarının %70 ila %90'ı arasındaki yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasını ve difüzyon gibi bir itici mekanizmanın kullanılarak tozların birbirine kaynaştırılmasını içermektedir. Bu işlem, tanecikler arasındaki boşlukları ortadan kaldırır, tane büyümesini teşvik eder ve aralarındaki kaynaşmayı arttırmaktadır (Tajuddin vd., 2014).

Sinterleme, basınç altında sıkıştırılmış veya bir kap içerisinde hapsedilmiş tanecik kümesinin, yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle kimyasal olarak birbirlerine bağlanarak bütünlük bir yapı oluşturmaları işlemidir. Sinterlemenin tanımlanması ve analizi, malzemenin içinde meydana gelebilecek çok sayıda eşzamanlı veya ardışık değişiklik nedeniyle karmaşık olabilir. Sinterlenmiş malzemenin yoğunlaşması veya büzülmesi, tüm sinterleme türlerinde yaygın olarak görülen bir durumdur. Bununla birlikte, sinterlemenin herhangi bir boyut değişikliği olmadan veya hatta genleşme ile gerçekleşmesi de mümkündür. Üretim açısından bakıldığında büyük boyutsal değişikliklerden kaçınmak tercih edilmektedir. Fazla yüzey serbest enerjisi, katı hal sinterlemesinin itici gücüdür. Katı hal sinterleme, farklı aşamalara, itici güçlere ve bunlarla ilişkili malzeme taşıma mekanizmalarına sahip karmaşık bir süreçtir. Bu aşamalar aşağıdaki sırayla gruplandırılabilir:

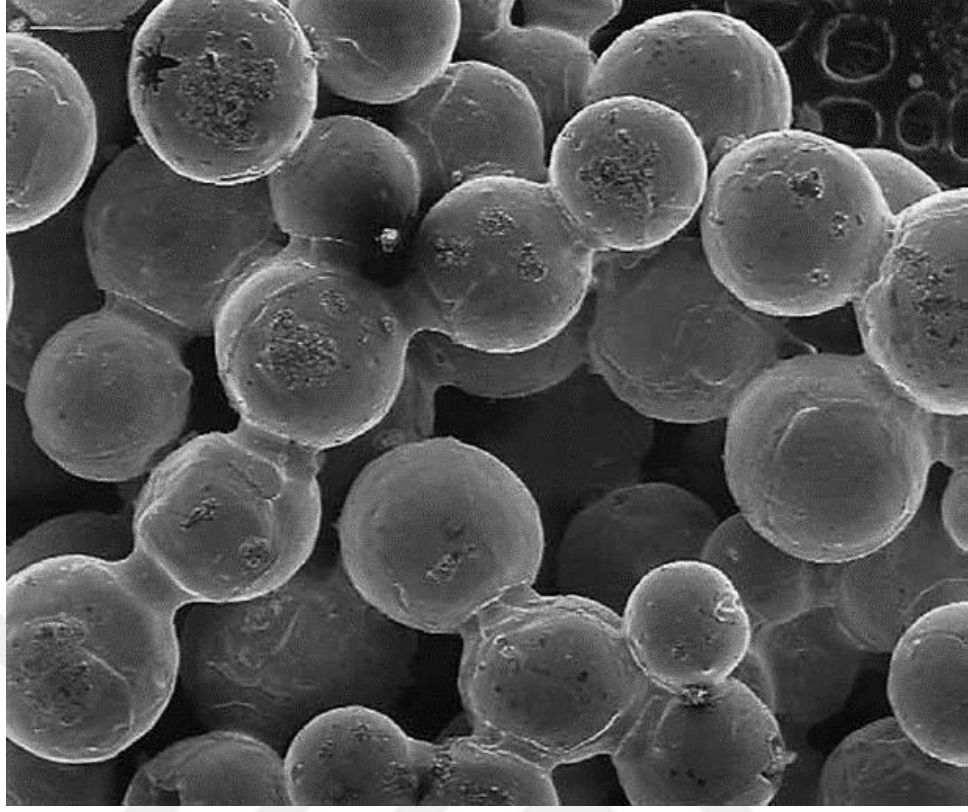
- Parçacıklar arasındaki başlangıçtaki bağlanma.
- Boyun bölgesinin büyümesi.
- Gözeneklerin kapanması.
- Gözeneklerin yuvarlanması.
- Gözeneklerin daralması veya Yoğunlaşması.
- Gözeneklerin kabalaştırma.

Bazı aşamalar zaman zaman diğerleriyle örtüşebilir veya aynı anda gerçekleşebilir. (Upadhyaya, 2002). Sinterleme işlemi tipik olarak üç ana aşamayı içermektedir (Şekil 3.8). İlk aşama, bitişik tanecikler arasında boyun bölgesinin gelişmesini içermektedir. Bu aşamadaki sinterleme davranışı genellikle eğrilik gradyanlarından etkilenir. İkinci aşamada gözenekler yuvarlanır ve tane gelişimi başlar. Bu aşamada, gözenekler birbirine bağlılığı sürdürür. Son aşamada, gözenekler çökerek kapalı kürelere dönüşür ve bu da tanelerin büyümesine olan engeli azaltır. Bu aşama genellikle bileşen %92 yoğunluğa sahip olduğunda başlar. Her üç aşamada da atomlar, yüzeysel difüzyon ve tane sınırı difüzyonu gibi farklı taşıma mekanizmaları aracılığıyla hareket eder ve bu da mikro yapıda değişikliklere yol açmaktadır (Fang, 2010).



Şekil 3.8 Sinterleme sırasında gelen aşamalar: (a) iki kürenin modeli, (b-e) sinterleme aşamaları boyunca gözenek yapısındaki değişiklikler (Fang, 2010)

Şekil 3.9'deki tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, partiküller arasındaki bağlanmanın daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu görsellerde, 800 °C'de sinterlenmiş olan küresel bronz taneciklerinde, temas halindeki tanecikler arasında yeni oluşan katı boyunlar görülmektedir. Temas eden küreler arasından büyüyen bu boyunlar, numuneye mukavemet ve rijitlik kazandırır. Sinterleme süresinin uzaması genellikle daha büyük boyun oluşumuna ve dolayısıyla daha fazla mukavemete yol açmaktadır (Randall, 2003).



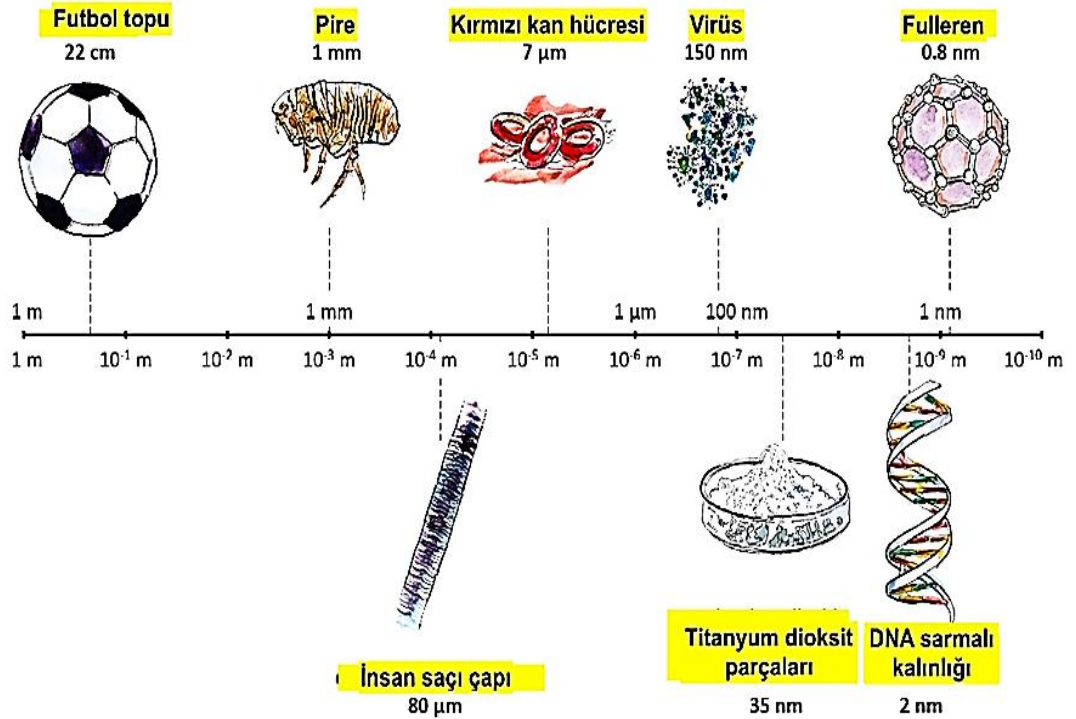
Şekil 3.9 Sinterleme sonrası bronz parçacıklar arasında oluşan boyunların SEM görüntüsü (Randall, 2003)

3.2 Nanoteknoloji

Önemli bilimsel devrimle birlikte, benzersiz mekaniksel, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemeler icat etmek için yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekli hale gelmiştir. Malzemenin özelliklerinin anlaşılması, yüksek çözünürlüklü mikroskopi aletlerinin geliştirilmesiyle mümkün hale gelen ultra ince mikro yapıların içerisindeki mekanizmaların incelenmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Bu gelişmeler, malzemelerin özellikleri ile yapıları arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Ultra ince boyutlardaki taneciklerin malzemelere kazandırdığı üstün özellikler, 20. yüzyılda Richard P. Feynman'ın 29 Aralık 1959'da Amerikan Fizik Derneği'nin yıllık konferansında "Altta Çok Yer Var" başlıklı bir sunum gerçekleştirmesiyle tanımlanmıştır. Bu sunum, 'nanoteknoloji' olarak bilinen yepyeni bir alanın doğuşunu müjdelemiştir. Feynman, bu sunumunda atomların ve moleküllerin boyutuna yakın ölçeklerde maddeyi nasıl manipüle edip kontrol edebileceğini ortaya koymuştur (Murty vd., 2013).

'Nano terimi, "cüce" veya "aşırı derecede küçük" anlamına gelen ve bir birimin milyarda birini (10^{-9}) ifade eden Yunanca önekten türetilmiştir (Şekil 3.10). Nano malzemeler, en az bir boyutu nano ölçek aralığında olan malzemelerdir (Murty vd., 2013).

Nanobilim, yakın zamanda modern bilim, teknoloji, mühendislik ve tıp alanlarında önemli bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Nanoteknolojinin uzun süre potansiyeli, çeşitli bilimsel ve mühendislik disiplinlerinde devrim niteliğinde değişiklikler getirmesi beklenmektedir. Nanobilim ve nanoteknolojideki araştırma faaliyetlerindeki artış, üç temel faktöre bağlanabilmektedir. İlk olarak, nanokristalin durumunun benzersiz fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik özelliklerini kullanma olasılığı gerçektir. İkincisi, nanoteknoloji, nanobilim ve nano araştırmaların disiplinler arası yapısı, toz teknolojisi, kolloid kimya, yüzey kimyası ve fizik, lazer teknolojisi, küme ve aerosoller, triboloji, kataliz, simülasyon ve modelleme gibi farklı alanların bir araya gelmesini kolaylaştırır. Üçüncü olarak, nanokristalin durumun anlayışımızdaki belirli boşluklar ve pratik uygulamasındaki zorluklar tanımlanmıştır (Pustovalov ve Babenko, 2004).



Şekil 3.10 Nanometre ölçeğinin diğer ölççeklerle karşılaştırması (URL-1, 2023)

3.2.1 Nanomalzemeler

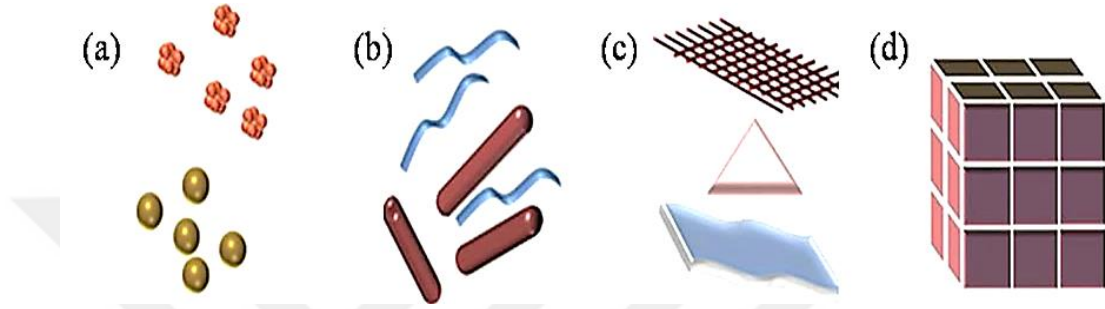
Nanomalzemeler, nanobilim ve nanoteknoloji alanlarında hayati bir rol oynamaktadır. Nano yapı bilimi ve teknolojisi, son yıllarda dünya genelinde dikkat çeken bir araştırma ve geliştirme alanını geniş ve disiplinler arası bir şekilde kapsamaktadır. Bu hızlı büyüme, malzeme ve ürün oluşturmayı devrimleştirme potansiyeline sahiptir ve geniş bir işlev yelpazesine erişim sağlamaktadır. Zaten önemli bir ticari etki gösteren bu etki, gelecekte daha da büyümesi beklenmektedir. Özellikle, nanomalzemeler son dönemdeki araştırmaların odağında yer almış olup, farklı disiplinlerden bilim insanları ve mühendisler, fizik, kimya, malzeme bilimi, makine ve elektrik mühendisliği gibi alanlarda bu alana ilgi göstermektedirler (Findik, 2021).

Nanomalzemelerin geliştirilmesi, yeni fiziksel özelliklerin ve örnek hazırlama ile cihaz üretiminde ileri teknolojilerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu ilerlemeler, kuantum etkilerini keşfetme ve nanomalzemelerin teorik dayanıklılığına ulaşma heyecan verici olasılıklarını açmıştır. Nanometre ölçeğinde, belirli malzeme özellikleri, erime noktaları ve örgü sabitleri gibi, aynı bileşime sahip büyük malzemelerden önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılık, yüzeydeki atomların veya iyonların artan etkisinden kaynaklanmaktadır; bu, nanometre ölçeğindeki kristallerin toplamının önemli bir kısmını oluşturur ve bu nedenle yüzey enerjisinin termal kararlılıkta önemli bir rol oynaması söz konusudur. Sonuç olarak, birçok malzeme özelliğinin tekrar değerlendirilmesi gerekmektedir, çünkü malzeme boyutunu nanometre ölçeğine indirgediğinizde yüzey ile hacim arasındaki oranın önemli ölçüde artması, malzeme performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olabilmektedir (Findik, 2021; Houssain, 2014).

3.2.1.1 Nanomalzemelerin sınıflandırılması

Nanomalzemeler, tek, iki veya üç boyutlu olmak üzere farklı boyutluluklara sahip olabilmektedir. Tekil yapılar, kaynaşık yapılar, topluluklar veya kümeler gibi çeşitli formlarda bulunabilen nanomalzemelerin küresel, boru şekilli ve düzensiz konfigürasyonlar dahil olmak üzere farklı şekilleri vardır. Nanotüpler, kuantum noktaları ve fullerenerler nanomalzemelerin yaygın örnekleridir. Nanomalzemeler

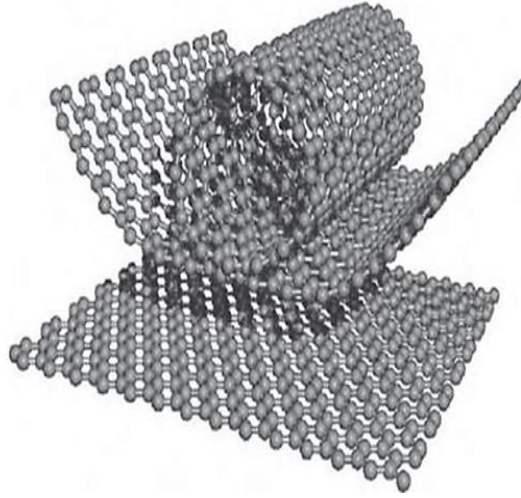
nanoteknolojide yaygın olarak kullanılmakta olup, geleneksel bileşiklere kıyasla benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler sergilemektedir. Gümüş nanoparçacıklar, karbon nanotüpler, fullerenler, fotokatalistler, karbon nanofibrilleri, grafen ve silika nanoparçacıkları bazı nanomalzeme örnekleridir. Siegel, nanoyapılı malzemeleri farklı boyutsal tiplere sınıflandırmakta olup, sıfır boyutlu, bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu nanoyapılar olmak üzere sınıflandırmaktadır (Şekil 3.11) (Findik, 2021).



Şekil 3.11 Nanomalzeme sınıflandırmaları: (a) 0D kümeler ve küreler, (b) 1D teller, çubuklar ve nanolifler, (c) 2D plakalar, ağlar ve filmler ve (d) 3D nanomalzemeler (Findik, 2021)

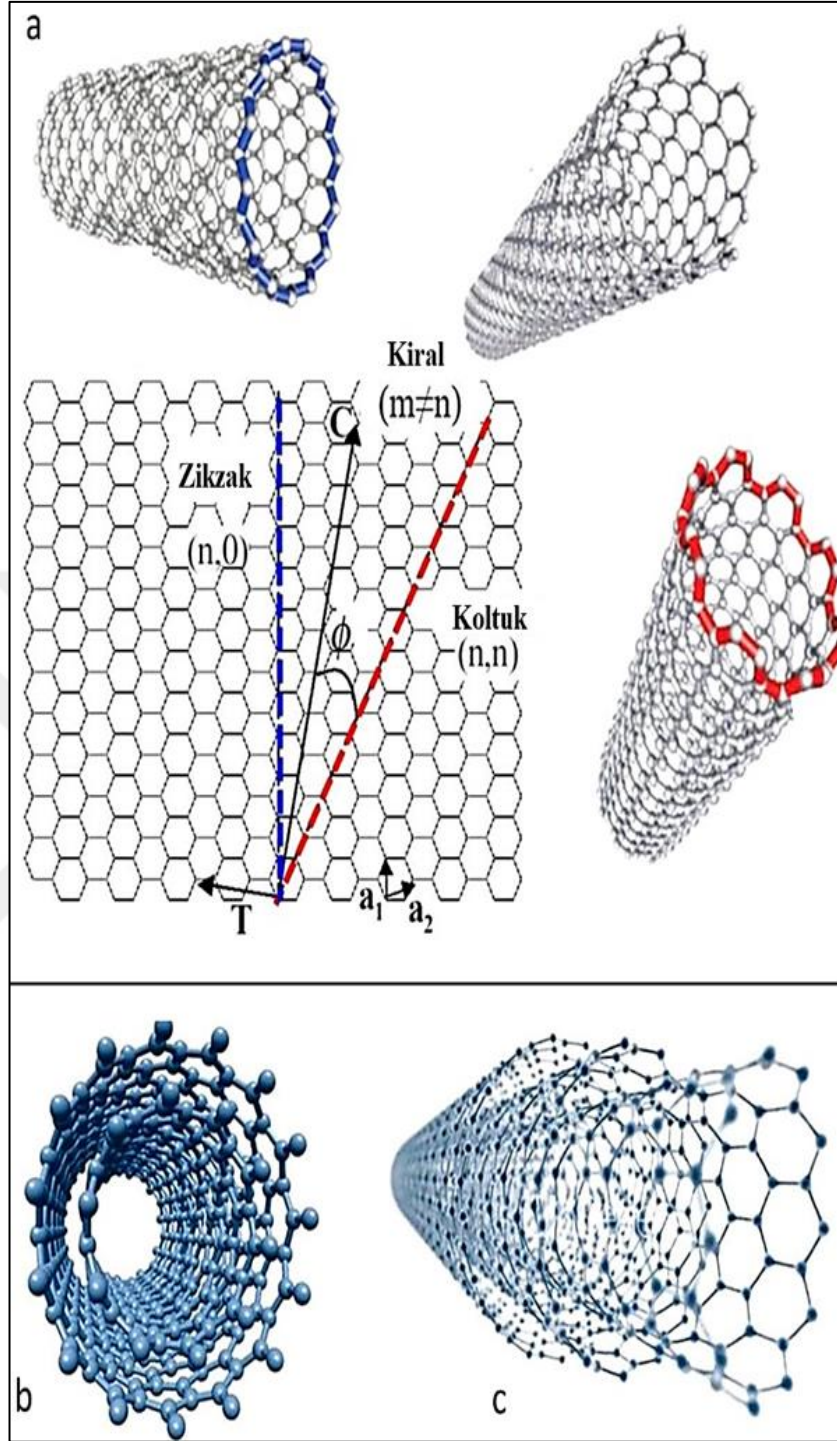
3.2.1.2 Karbon nanotüpler (CNT)

Karbon nanotüplerin ilk kesin keşfi, Iijima tarafından 1991 yılında ark deşarj tekniğinin kullanılmasıyla katmanlı karbonun (grafen) boru şeklinde kıvrılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüpler (CNT), tek atom kalınlığında grafit tabakalarının (grafen olarak adlandırılır) silindirik bir şekle (Şekil 3.12) sarılarak oluşturduğu karbon alotropidir. Çapları nanometre boyutlarında olup, diğer bir ifadeyle uzunluk-çap oranı 1000:1'i aşabilen nanoyapılardır. Bu özellik benzersizdir ve başka hiçbir maddede veya malzemede gözlemlenemezler. Karbon nanotüpler (CNT), geleneksel malzemelerin makroskobik ölçekteki özelliklerinden önemli ölçüde farklı olan olağanüstü mekaniksel, elektriksel, ısı ve optik özellikler dahil olmak üzere son derece ayırt edici özelliklere sahiptir. Karbon yapılar "nanotüp" olarak bilinen uzatılmış karbon "silindirleri" şeklinde oluşabilse de çapları 2,5 nm'den daha küçükken, uzunlukları makroskobik boyutlara kadar uzayabilmektedir (Findik, 2021).



Şekil 3.12 Silindirik formda karbon nanotüp oluşumu (Findik, 2021)

Çeşitli kaynaklar, karbon nanotüplerin üç tipte (tek duvarlı, çift duvarlı ve çok duvarlı) sınıflandırılabilirliğini belirtmektedir (Donald vd., 2010; Findik, 2021; Houssain, 2014), Bazı kaynaklar karbon nanotüpleri tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) olmak üzere iki ana forma ayrılmaktadır. Her nanotüpün kendine özgü tipi ne olursa olsun, tüm nanotüpler olağanüstü bir yapısal mükemmellik sergilemektedirler. Ancak, SWCNT tek bir grafit tabakasının silindirik bir şekle yuvarlanmasıyla oluşmaktadır. Aynı zamanda, MWCNT ise tıpkı bir ağaç gövdesinin halkaları gibi birbirinin içine konsantrik olarak konumlanmış çok sayıda nanotüpler içermektedir (Musaddique vd., 2011). CNT'ler ayrıca kiralitelerine göre koltuk, zikzak ve kiral karbon nanotüpler olarak sınıflandırılabilir. Kirallik, kiral vektör (n,m) ile tanımlanır. Bu vektörde n ve m , $R = na_1 + ma_2$ formülünde kullanılan tam sayılardır. Bu formülde a_1 ve a_2 , altıgensel bir 2D kafesinin baz vektörlerini temsil eder. n ve m değerleri, CNT'nin "kiralitesini" veya "büklümünü" belirtir. Bu kiralite ise, nanotüpün yoğunluğu, iletkenliği, kafes yapısı ve diğer özellikleri gibi özelliklerini etkilemektedirler. Ayrıca, n değerinden m değerini çıkararak elde edilen değer $(n-m)$, tek duvarlı bir karbon nanotüpün (SWCNT) yarı iletken veya metalik olup olmadığını bilmekteyiz. Eğer sonuç üçe bölünebilir ise, SWCNT metaliktir; aksi takdirde yarı iletkendir (Murty vd., 2013). Şekil 3.13, CNT türlerini göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki, CNT'lerin özellikleri, ne kadar çok sayıda sarmal grafit tabakasının olduğu ve CNT'nin hangi yönde oluştuğu tarafından büyük ölçüde etkilenmektedir. Tablo 3.3 ise farklı CNT türlerinin özelliklerini sunmaktadır.



Şekil 3.13 Karbon nanotüp modelleri: (a) kiralitesine göre SWCNT'ler (zikzak, koltuk ve kiral), (b) çift duvarlı nanotüpler (DWNT'ler) ve (c) çok duvarlı nanotüpler (MWCNT'ler) (Tîlmaciu ve Morris, 2015)

Tablo 3.3 CNT tiplerine göre çeşitli özellikler (Bandaru, 2007; Kumar vd., 2020)

Özellik	Değer
Çap (nm)	1,3-1,5
Yoğunluk (g/cm ³)	1,33-1,41
Kafes parametresi (nm)	16,53-16,55
Elastisite modülü (TPa)	1,0-1,7
Çekme mukavemeti (GPa)	~ 100
Elektriksel İletkenlik (K.Ohms) ⁻¹	13,0
Akım yoğunluğu (A/m ²)	1015
Ortalama serbest yol (nm)	~ 100
Termal İletkenlik (W/m.k)	2000-3000

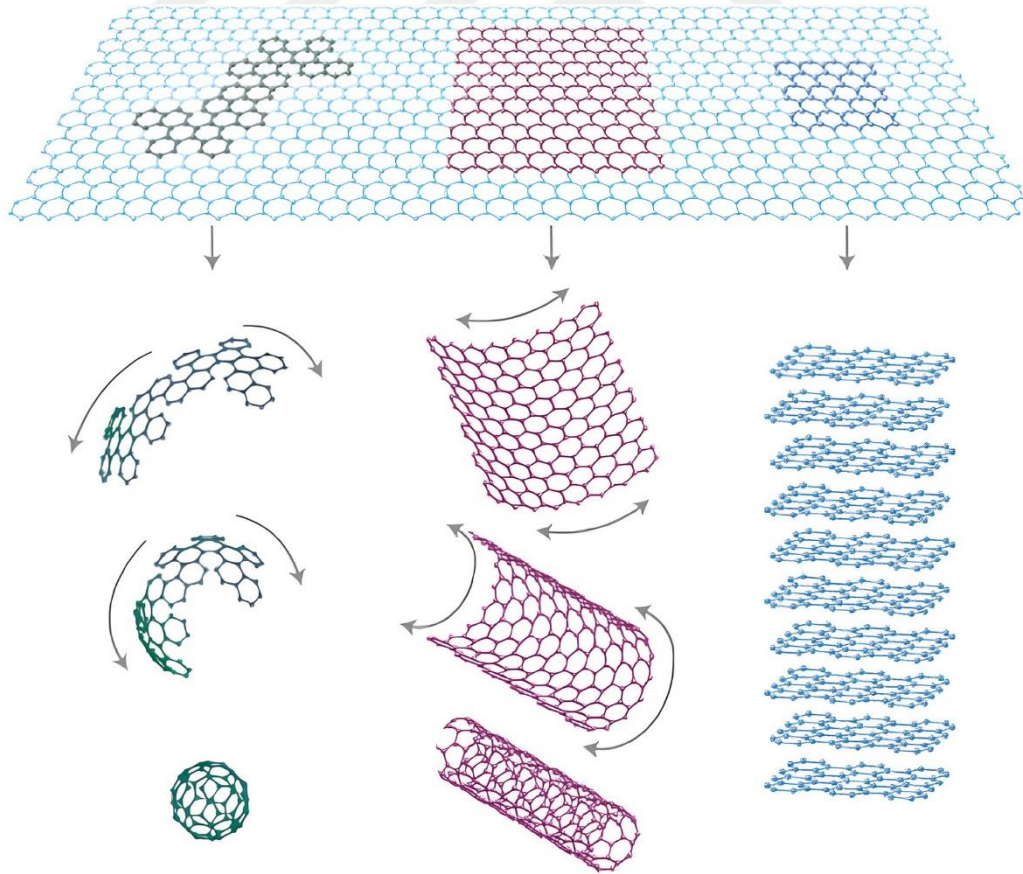
3.2.1.3 Grafen (Gr)

Grafen (Gr), karbonun başka bir alotropisidir; en ince malzemedir ve tek atom kalınlığında bir karbon tabakası veya hegzagonal kristal yapıya sahip karbon atomlarının filmidir ve sp² bağlarına sahiptir. Bu bilgilere göre, Gr, gerçek anlamda keşfedilen ilk 2 boyutlu kristalin malzemedir (Mohan vd., 2018b). Grafen, karbon bazlı bir malzeme olup 70 yıldan fazla bir süredir incelenmektedir ve farklı formlara dönüştürülebilir, örneğin 0D fullerinler, 1D nanotüpler veya 3D grafit (Şekil 3.14). Son zamanlarda, grafenin aynı zamanda (2+1) boyutlu kuantum elektrodinamiği için mükemmel bir model olduğu keşfedilmiştir. Serbest formda istikrarsız olduğuna inanılan ve "akademik" bir malzeme olarak kabul edilen grafen, 20 yıl önce beklenmedik bir şekilde bulundu ve Dirac fermionları adı verilen kütesiz şarj taşıyıcılarına sahip olduğu doğrulandı. Bu keşif, grafene olan ilginin artmasına yol açmıştır (Geim ve Novoselov, 2007).

Gr, yüksek yüzey alanına sahiptir; yani olağanüstü emilim ve yüzey reaksiyonları, harika elektron ve termal iletkenliği ve eşsiz mekanik dayanıklılık göstermektedir. Diğer malzemelerle karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanına sahip olması nedeniyle, grafen birçok dikkate değer özelliğe sahiptir ve umut vadeden uygulamalar sunmaktadır. Aynı zamanda değerlendirilmiş en dayanıklı malzemedir ve en rijit

malzeme ile en esnek kristal olma özelliğini taşımaktadır. Üstün termal ve elektriksel iletkenliğe sahip olması, düşük ağırlıkla birleşerek olağanüstü mekanik özellikler sunması, onu elektriksel ve termal, aynı zamanda biyomedikal ve elektronik uygulamalar için son derece ilgi çekici hale getirmektedir (Mohan vd., 2018b).

Son zamanlarda, Gr, ideal bir takviye malzemesi olarak kullanılabilecek ve hem polimer hem de seramik esaslı kompozit malzemeleri önemli ölçüde geliştirerek onları elektriksel ve termal uygulamalar için anlamlı hale getirebilecek ilgi çekici bir tercih olarak düşünülmektedir. Aynı zamanda Gr, metal esaslı kompozitler için de olağanüstü bir tercih olup hafiflikleri sayesinde bu malzemelere üstün mekanik performansı kazandırmaktadır (Schedin vd., 2007b). Grafenin özellikleri, üretim yöntemleri, saflığı, formu ve uzunluğu gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilse de Tablo 3.4 aşağıda belirli grafen tiplerinin bazı mekaniksel, termal ve elektriksel özelliklerini sunmaktadır.



Şekil 3.14 0D buckyballs, 1D nanotüpler ve 2D grafen, şeklinde grafen yapısı (Geim ve Novoselov, 2007)

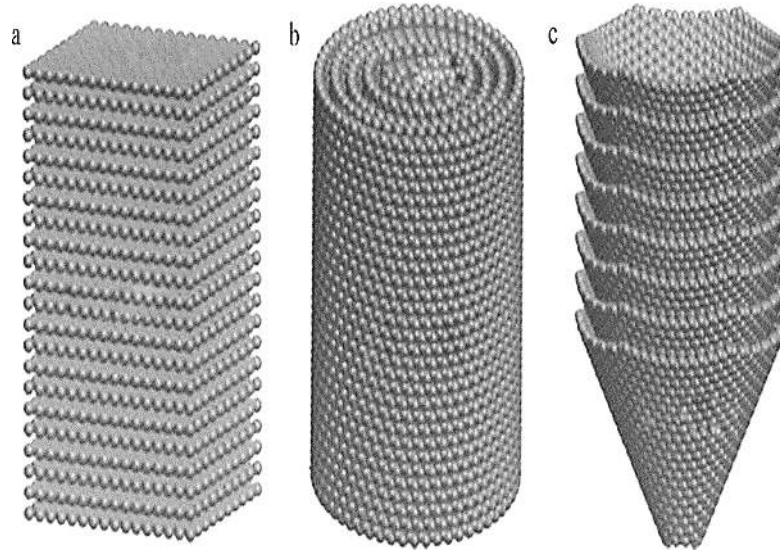
Tablo 3.4 Belirli koşullara göre grafenin çeşitli zellikleri (Schedin vd., 2007; Zhan vd., 2023)

zelik	Değer
Mukavemet (Gpa)	~130
Young modülü (TPa)	~1,0
Kesme Mukavemeti (GPa)	~ 60
Elektriksel İletkenlik (K.Ohms) ⁻¹	1000'e kadar
Akım yoğunluğu (A/m ²)	1,18 ×10 ⁸
Termal İletkenlik (W/m.k)	~5000

3.2.1.4 Karbon nanofiber (CNF)

Karbon nanofiberler (CNF), yaklaşık 50 ila 100 nm çap ve 1 ila 1000 m uzunluk aralığında değişen bir çapa ve karbon nanotüpler (CNT) ve grafen (Gr) ile benzer bir karbon alotropidir. Tek boyutlu nanomalzemeler olarak sınıflandırılan CNF'ler, elektrokimyasal kataliz, polimer takviyesi, hidrojen depolama ve seçici adsorpsiyon dahil olmak üzere çeşitli uygulamalara uygun olağanüstü özellikler sergilemektedir. Bununla birlikte, CNF'ler, grafitte bulunanlara benzeyen altıgensel karbon düzenlemelerine sahip daha karmaşık bir yapıya sahiptir (Yadav vd., 2020).

Karbon nanotüplerin (CNT) aksine, karbon nanofibrillerin (CNF) grafen katmanları merkezi eksen boyunca düzgün bir şekilde istiflenmiştir ve fiber eksenine göre grafen katmanlarının yönelimine göre üç tre ayrılabilmiştir: balık kılçığı, levha ve şerit. Balık kılçığı CNF'lerinde, aynı zamanda "fishbone" tipi olarak da bilinmiştir, grafen katmanları merkezi fiber eksenine göre çapraz olarak eğimlidir. Levha CNF'lerinde ise grafen katmanları merkezi fiber eksenine diktir. şerit CNF'lerde, boru tipi CNF'ler olarak da adlandırılan, grafen katmanları merkezi büyüme eksenine paraleldir. şekil 3.15, bu farklı CNF tiplerinin yapısal düzenlemesini göstermektedir (Al-Saleh ve Sundararaj, 2011).



Şekil 3.15 CNF tipleri: (a) levha tipi, (b) tüp tipi ve (c) balık kılçığı tipi (Cheng vd., 2012)

CNF'lerin özellikleri, karbon katmanlarının yöneliminden etkilenmektedir. sp^2 'ye dayalı olarak kesikli lineer filamentler halinde yapılandırılmışlardır ve tipik olarak 100:1'i aşan boyut oranlarına sahiptirler. Ek olarak, üretim yöntemi, CNF'lerin özelliklerini önemli ölçüde etkilerdir (Din vd., 2020). Tablo 3.5, çeşitli CNF'lerin seçilmiş bazı özelliklerinin bir özetini göstermektedir.

Tablo 3.5 Belirli faktörlere göre CNF'in seçilen özellikleri (Desmaris vd., 2015)

Özellik	Değer
Kütle yoğunluğu (g/cm^3)	1,4 - <2
Uzunluk	1 nm - 100 μm
Çekme Dayanımı (Gpa)	~ 30
Young modülü (TPa)	80 - 800
Elektrik öz direnci	0.1 ($\mu\Omega.m$) - 2 ($m\Omega.m$)
Elektriksel İletkenlik ($K.Ohms$) ⁻¹	5×10^{-5}
Termal genleşme katsayısı (CTE) (/K)	$\sim 10^{-6}$ - 10^{-7}
Termal İletkenlik (W/m.k)	20 - 3000

4. MATERYAL VE METOD

Bu bölüm, kullanılan malzemeleri, bunların ilgili oranlarını, kompozitlerin üretimi için kullanılan üretim yöntemlerini, dahil olan işlem parametrelerini ve kompozitlerin analizinde kullanılan test prosedürlerini ve cihazlarını kapsamlı bir şekilde açıklamaktadır.

4.1 Kompozit Malzemelerin Hazırlanması

Bu çalışma, CoCrMo esaslı bir alaşımı CNT, CNF ve Gr olmak üzere üç farklı tür karbon nanoparçacıkla takviyelendirmeyi içermiştir. Bu, toz metalurjisi tekniği kullanılarak yapılmıştır. Bu teknik, tozları bilye öğütme ile mekanik olarak karıştırma, ardından soğuk presleme ve bir fırında argon gazı ile sinterleme işlemlerini içerir. Sonuçta elde edilen kompozitler test edilmeye hazır hale gelmiştir.

Dört grup numune üretilmiştir. İlk grup, herhangi bir takviye malzemesi içermeyen F75 CoCr döküm alaşımına göre tahmin edilen dört adet standart CoCrMo alaşımını içerir. Diğer gruplar, CNT'ler, CNF'ler ve Gr'lerin değişen oranlarda takviyelendirilmiş CoCrMo-matrisli kompozitleri içerir. Her kompozit grubunda 12 numune bulunmaktadır, böylece toplamda 40 örnek üretilmiştir. Alaşımları üretmek için Co, Cr, Mo, Gr ve CNF tozları Nanografi Nano Teknoloji şirketinden temin edilmiştir. Bununla birlikte, CNT Nanotime şirketinden temin edilmiştir. Temin edilen tozlar kullanılmadan önce analiz edilmiştir. Tozların özellikleri Tablo 4.1 ve 4.2'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Co, Cr ve Mo tozlarının özellikleri (URL-3, 2024)

Özellik	Co	Cr	Mo
Saflık (%)	99,9	99,9	99,9
Tane boyutu (Mesh)	325	325	325
Yoğunluk (g/cm ³)	8,92	7,19	8,2
Erime noktası (°C)	1495	1875	2610
Kaynama noktası (°C)	2900	2475	5560
Genişleme katsayısı	12,5×10 ⁻⁶	6,2 ×10 ⁻⁶	5,1×10 ⁻⁶
Kristal yapı	HCP	BCC	BCC

Tablo 4.2 CNT, Gr ve CNF'nin özellikleri (URL-3, 2024; URL-4, 2024)

Özellik	CNT	Gr	CNF
Saflık	>95	>99,9	>96
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	~2,1	~2,26	~1,9
Dış çap (nm)	8-15	10	190-590
İç çap (nm)	3-5	-	-
Uzunluk	0,5-2µm	5 nm	5-55 µm
Spesifik yüzey alanı (m ² /g)	180	170	20

4.1.1 Toz Karıştırma

Karıştırma işlemini gerçekleştirmek için tozlar hacimsel olarak farklı oranlardaki hassas terazi kullanılarak tartılmıştır (Şekil 4.1). Tablo 4.3 numunelerin bileşim oranlarını göstermektedir.



Şekil 4.1 Hassas terazi

Tablo 4.3 Üretilen numunelerin bileşim oranları

Numune No	Numune İsmi	CoCrMo (%)	CNT (%)	Gr (%)	CNF (%)
1	CRM	100	-	-	-
2	CRM025T	99,75	0,25	-	-
3	CRM05T	99,50	0,5	-	-
4	CRM075T	99,25	0,75	-	-
5	CRM1T	99,00	1	-	-
6	CRM025G	99,75	-	0,25	-
7	CRM05G	99,50	-	0,5	-
8	CRM075G	99,25	-	0,75	-
9	CRM1G	99,00	-	1	-
10	CRM025F	99,75	-	-	0,25
11	CRM05F	99,50	-	-	0,5
12	CRM075F	99,25	-	-	0,75
13	CRM1F	99,00	-	-	1

Üretilen kompozit alaşımlardaki tozların homojen dağılımını sağlamak için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Retsch PM 100 model mekanik alaşımlama cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.2). Toz karışımları, iç çap 50 mm olan paslanmaz çelik kaplara doldurulmuştur. Optimum mekanik alaşımlama proses parametrelerini gözden geçirmek ve optimum proses parametrelerini belirlemek için farklı zamanlarda ön deneyler yapılmıştır. Tablo 4.4, optimum proses parametrelerini göstermektedir. Karıştırma sırasında 300 devir/dakika ve 120 dakika boyunca tozlarda soğuk kaynak oluşmuştur. Jesús vd. (2010), farklı karışma sürelerde CoCrMo matris kompozit alaşım mekanik alaşıma işlemi ile üretmiştir. Araştırmacılar, karıştırma ve öğütme sırasının elde edilen alaşımı etkilediğini bulmuşlardır. Düzgün karıştırma, öncü elementlerin atom boyutlarına ve yapısal afinitesine bağlı olan elementlerin katı hal difüzyonunu sağlar. Bir bağlayıcı olarak stearik asit kullanılmıştır. Karıştırılan toz plastik saklama kaplarda muhafaza edilmiştir.

Tablo 4.4 İşlem parametreleri

Top boyutu	10 mm
B:T	5:1
Karıştırma hızı	300 rpm
Karıştırma süresi	120 dakika
İşlem kontrol kimyasalı (Stearik asit)	1%



Şekil 4.2 Mekanik alaşımlama cihazı

4.1.2 Ultrasonik Karıştırma

Takviyeli alaşımların üretimi, Kastamonu Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan özel bir ultrasonik cihaz tipi (Alex Machine) kullanılarak (Şekil 4.3) ultrasonik karıştırma yönteminin uygulanmasını içermektedir. Bu işlemin amacı, karbon nanoparçacıkları optimum dispersiyonunu sağlamaktır. Ultrasonik karıştırma prosedürü, nanoparçacıkları kümelenmesini önlemek ve matris karışım tozları içerisinde homojen bir şekilde dağıtmak için bilyalı öğütmeden önce bir ön adım olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Ultrasonik mikser cihazı

Karbon nanoparçacıkları, alkol ile karbon nanoparçacıklarına oranla 100:1 ağırlık yüzdesiyle alkol etile eklenmiştir ve bir saat boyunca ultrasonik olarak karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen çamura CoCrMo tozları eklenmiştir ve ek daha bir saat ultrasonik olarak karıştırılmıştır.

4.1.3 Soğuk Presleme

Soğuk presleme işlemi, Kastamonu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan tek eksenli hidrolik pres (Specac GS15011) (Şekil 4.4) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Karıştırılmış tozlar 13 mm çapında bir kalıba yerleştirilmektedir ve yeşil alaşımları üretmek için 500 MPa yük altında sıkıştırılmaktadır.



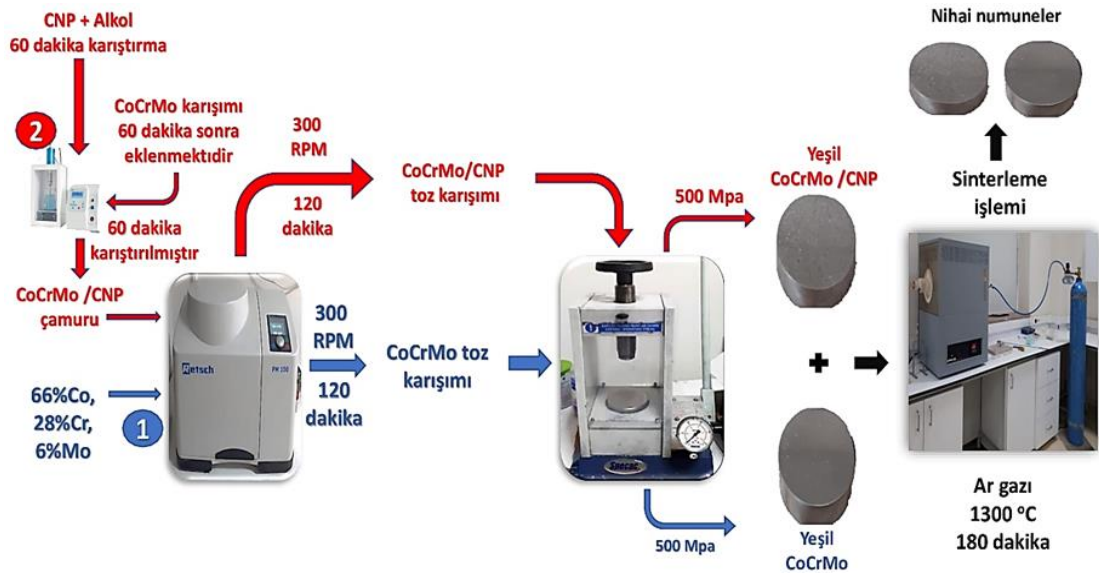
Şekil 4.4 Tek eksenli hidrolik pres

4.1.4 Sinterleme İşlemi

Maksimum yoğunluğa sahip nihai alaşımları elde etmek için, tüm yeşil haldeki preslenmiş numuneler, Protherm marka tüp fırın kullanılarak sinterleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4.5). Sinterleme işlemi, $10^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$ ısıtma hızında 1300°C sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Sinterleme işleminin süresi 180 dakika olarak seçilmiştir. Herhangi bir çevresel kirlenmeyi önlemek için tüm sinterleme işlemi saf argon ortamında gerçekleşmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.6'daki şemada numunelerin üretim süreci gösterilmektedir.

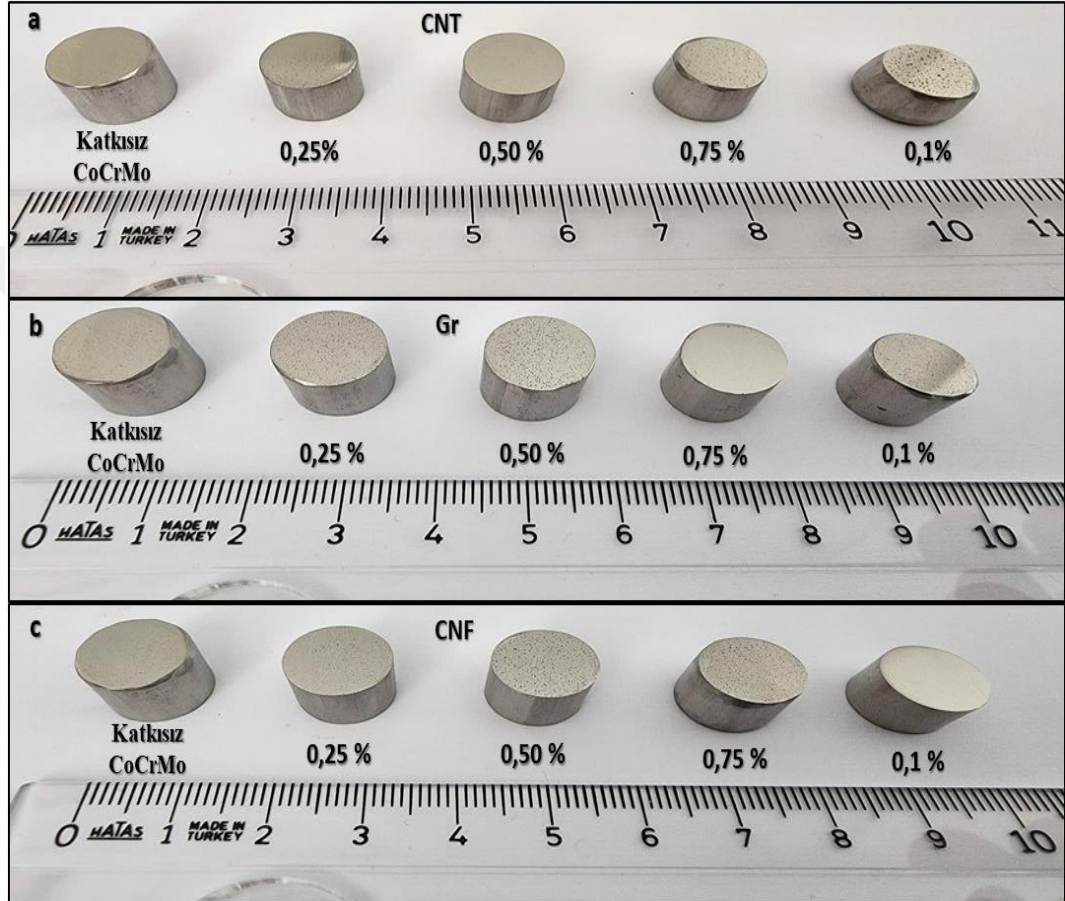


Şekil 4.5 Tüp fırın



Şekil 4.6 Numune üretim sürecinin şeması

Sinterleme işleminden sonra, numuneler zımparalama ve parlatma işlemi uygulanarak test ve analizler için hazır hale getirilmiştir. Bu işlem, zımparalama için farklı derecelerde SiC zımpara kâğıdı (150, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500 mesh) kullanılmasını ve ardından 1 mikron parlatma çuhası ve 1 mikron elmas solüsyonu ile parlatılmasını içermektedir. Test için hazır numuneler Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Üretilen numuneler

4.2 Mikroyapı İncelemesi

Numuneler zımparalama ve parlatma işlemleri ile hazırlandıktan sonra, mikro yapı incelemesi gerçekleştirilmesi için 15 ml nitrik asit + 15 ml asetik asit + 60 ml hidroklorik asit + 15 ml saf su bileşime sahip solüsyon kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin mikro yapı incelemesi ve oluşan fazların sınır ve tane sınırlarının oluşum mekanizmalarının belirlenmesi için Olympus GX41 optik mikroskobu (Şekil 4.8 (a))

kullanılarak numunelerin optik incelemesi gerçekleştirilmektedir. Daha ileri mikro yapı incelemesi için FEI QUANTA 250 FEG tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmaktadır (Şekil 4.8 (b)). SEM cihazı ile birlikte, mikro yapı içindeki kimyasal bileşimi analiz etmek için enerji dağıtıcı spektroskopi (EDS) analizleri yapılmaktadır. Ek olarak, numuneler içindeki fazların oluşumu Bruker D8 Advance cihazı kullanılarak X-ışını kırınımı ile tayin edilmektedir (Şekil 4.8 (c)).



Şekil 4.8 Mikroyapı analizlerinde kullanılan cihazlar: (a) optik mikroskop cihazı, (b) SEM cihazı ve (c) XRD analiz cihazı

4.3 Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin yoğunlukları Arşimet Prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, hassasiyeti 0,1 mg olan yüksek hassasiyetli bir terazi kullanılmıştır. Terazi, yoğunluk ölçümü için gerekli Arşimet yoğunluk ölçüm kiti kurulumu ile birlikte kullanılmıştır (Şekil 4.9). Yoğunluk ölçüm prosedürü, ASTM B 962 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Numunelerin ağırlıkları önce havada, daha sonra damıtılmış su ile dolu bir kaba daldırıldıktan sonra tekrar tartılmıştır. Tartılan numunelerin yoğunlukları, Eşitlik 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır (ASTM B 962, 2017).

$$d = \frac{A \times d_s}{A-B} \quad (4.1)$$

Eşitlikte verilen;

d= Numune yoğunluğu (g/cm³).

A= Havada numune ağırlığı (g).

B= Sudaki numunenin ağırlığı (g).

d_s= Ölçümün yapıldığı sıcaklıktaki suyun yoğunluğu (g/cm³).



Şekil 4.9 Arşimet yoğunluk ölçüm kiti

Numunelerin sinterleme oranları değerlendirilme etmek amacıyla, numunelerin bağıl yoğunlukları, Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_b = \frac{\rho}{\rho_k} \quad (4.2)$$

Eşitlikte verilen;

ρ_b = Bağıl yoğunluk (%).

ρ = Deneysel olarak ölçülmüş yoğunluk (g/cm³).

ρ_k = Toz karışım oranları esas alınarak hesaplanan teorik yoğunluğu (g/cm³).

4.4 Sertlik Testi

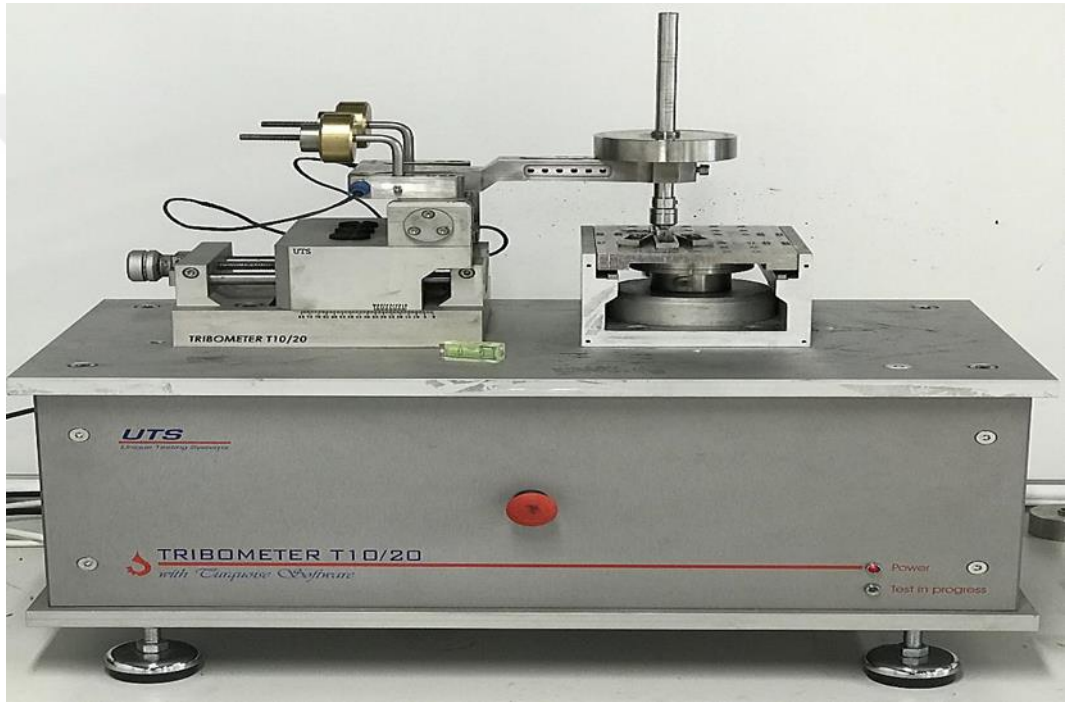
Numune sertlikleri, Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan SHIMADZU HMV G-21 marka ve model cihaz (Şekil 4.10) kullanılarak Vickers sertlik ölçüm yöntemi ile 2 kg yük ve 15 saniye yükleme süresinde ölçülmüştür. Her bir numunenin ölçümü beş tekrar halinde gerçekleştirilmiş olup, ölçüm sonuçlarının ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.10 Mikrosertlik testi cihazı

4.5 Aşınma Testi

Üretilen numunelerin tribolojik özellikleri değerlendirmek amacıyla, ASTM G133 standardının uyumluluğunu göre lineer bir aşınma testi (ileri-geri) gerçekleştirilmiştir. Testler, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'nde bulunan UTS Tribometer T10/20 test cihazı kullanılarak (Şekil 4.11) yapılmıştır. Aşınma test parametreleri; 100 m aşınma mesafesi, 20 N yük ve oda sıcaklığı atmosferi olarak belirlenmiştir. Test, 6 mm çaplı bir AISI 52100 çelik bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11 Aşınma testi cihazı

4.6 Biyouyumluluk Testi

Kompozitlerin biyobozunurluk ve sızdırılabilir madde testleri, insan vücudu koşullarını simüle etmek için kullanılan bir çözüm olan fosfat tampon salin PBS (Şekil 4.12) içerisinde 37°C sıcaklıkta 28 günlük bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu testin gerçekleştirilmesi için, numuneler önce saf su ile yıkanmıştır, daha sonra kurutulmuştur ve test öncesi ağırlıkları hesaplanmıştır. Numuneler, 24-well'li Petri kaplarına yerleştirilmiştir ve pH 7.4 PBS ile tamamen daldırılarak (Şekil 4.13) 37°C'ye ayarlı bir inkübatörde MEMMERT tipi (Şekil 4.14) inkübasyona başlanmıştır. Kontamine olmuş fosfat tampon salin (PBS) bir mikrotübe toplanmış ve indüktif

olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) incelemesine kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numuneler kurutulduktan sonra hassas bir terazi kullanılarak ağırlıkları ölçülmüş ve kütle değişimleri kaydedilmiştir. Daha sonra, numuneler tekrar taze bir PBS'ye daldırılmıştır ve tekrar 24 saat boyunca inkübe edilmeye bırakılmıştır. Numunelerin inkübasyonu boyunca kontamine olan PBS çözümleri sürekli olarak toplanmış ve numunelerin kütle değişimleri 28 gün boyunca kaydedilmiştir. Numunelerin kütle değişimleri grafik haline getirilerek, Eşitlik 4.3 göre gün sürelerine bağlı olarak değerlendirilmiştir.

$$\text{Biyobozunurluk (\%)} = \left(\frac{G_0 - G_i}{G_0} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

Eşitlikte verilen;

G_0 test ilk numune kütlesi, G_i 24 saatlik süreler sonunda kütlesi.



Şekil 4.12 PBS çözelti



Şekil 4.13 24-well'li petri kaplarında PBS içinde numuneler



Şekil 4.14 MEMMERT inkübatör

Ek olarak, toplanan PBS çözeltilerinin 1, 3, 14, ve 28 günlerdeki elementel kompozisyonlarını incelemek için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan SpectroBlue cihazı (Şekil 4.15) ICP-OES kullanılarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Test edilen elementler Co, Cr, Mo, Na, Ca, PO_4^{3-} , ve P'dir. Toplanan veriler, başlangıç zamanındaki çözeltide bulunan iyonlar incelenerek grafiksel olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4.15 ICP-OES analiz cihazı

Üretilen CoCrMo matris kompozitlerinin biyouyumluluk özellikleri ve sitotoksite analizi, TS EN ISO 10993-5 (Tıbbi Cihazların Biyolojik Değerlendirmesi, Bölüm 5: (In Vitro Sitotoksite Testleri) standardı esas alınarak MTT kiti kullanılarak indirekt Eliza yöntemi ile mitokondriyal dehidrogenaz aktivitesinin ölçülmesine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Analizde, Kastamonu Üniversitesi Doku Mühendisliği, Biyomalzeme ve Kök Hücre Laboratuvarı envanterinde bulunan Wistar Albino sıçanlarının kemik iliği mezenkimal kök hücreleri (MSC) kullanılmıştır (Kastamonu Üniversitesi Hayvan Deneyleri Lokal Etik Kurulu İzni (KÜ-HADYEK numaralı 10.12.2023-10/50). Sıvı nitrojen tankından alınan dondurulmuş hücreler, yüksek serum konsantrasyonuna sahip bir ortamda kültüre alınmaktadır. α -MEM ortamı, %10 FBS (fetal bovin serumu) ve %1 penisilin-streptomisinden oluşmaktadır. İnkübasyon koşulları 37°C sıcaklık, %90 nem oranı ve %5 CO₂ ile %95 hava içeren bir gaz

karışımını içermektedir. Yeterli çoğalmaya ulaştıktan sonra, hücrelerin substrattan ayrılması için tripsin-EDTA kullanılmaktadır. Enzim çözeltisi, hücrelerin santrifüj edildiği 50 ml'lik bir falcon tüpünde santrifügasyona tabi tutularak ve daha sonra serum ile iki kez yıkanarak uzaklaştırılmıştır. Fazlalık sıvı döküldükten sonra, hücre agregaları tekrar 1 ml solüsyon ile birleştirilerek, tripano mavisi boya ile muamele edilerek ve bir Thoma Laması kullanılarak sayılmaktadır. 96 well'lik petri tabaklar her bir kuyusuna, üç tekrar olacak şekilde toplam 5000 hücre ekilmektedir. Daha sonra, hücrelerin tutunmasını arttırmak için tabaklar bir gece CO₂ ortamına yerleştirilmektedir. Ertesi gün atık besiyeri uzaklaştırılmaktadır. Biyouyumuyabilirlik ve iyon salınımı deneyinden elde edilen PBS örnekleri, bir enjektör filtresi kullanılarak sterilize edilmiştir ve daha sonra her kuyuya %25 (v/h) konsantrasyonda enjekte edilmektedir. α -MEM tam besiyeri kullanılarak hacim 250 μ l'ye tamamlanmaktadır. Kontrol grubuna, besiyerin besin içeriğine PBS dilüsyonunun etkisini değerlendirmek için %25 (v/h) sterilize edilmiş saf PBS çözeltisi uygulanmaktadır.

Sitotoksite incelemesi için, numunenin akut dozunun direkt etkisini değerlendirmek üzere ilk günden, uzun dönem implant performansını değerlendirmek üzere ise yirmi sekizinci günden PBS çözeltileri toplanmaktadır. Hücreler, numunelerle etkileşime giren PBS çözeltileri ile birlikte 24 saat CO₂ inkübatörüne yerleştirilmektedir ve daha sonra atık ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Hücrelerin canlılığını değerlendirmek için her bir kuyuya serumsuz ortamın 225 μ l'si ve 25 μ l MTT reaktifi eklenmiştir. Daha sonra hücreler 4 saat boyunca CO₂ inkübatörüne yerleştirilmektedir. İnkübasyon süresinin sonunda formazan kristallerinin oluşumu mikroskop ile incelenmiştir. Ardından formazan kristalleri %10 hidroklorik asit çözeltisinde (2-propanol kullanılarak hazırlandı) çözündürülmüştür ve renk yoğunluğu Biotek Synergy HTX model mikropate okuyucu kullanılarak 570 nm dalga boyunda ölçülmektedir. Hücrelerin canlılığı, kontrol grubuna kıyasla Eşitlik 4.4 kullanılarak hesaplanan bir yüzde olarak belirlenmiştir ve sonuçlar grafiğe dökülmektedir. Hücre canlılığının değerlendirilmesi, kimyasallara ulaşmanın ve iyon salınımının birleşik etkileri incelenerek gerçekleştirilmektedir.

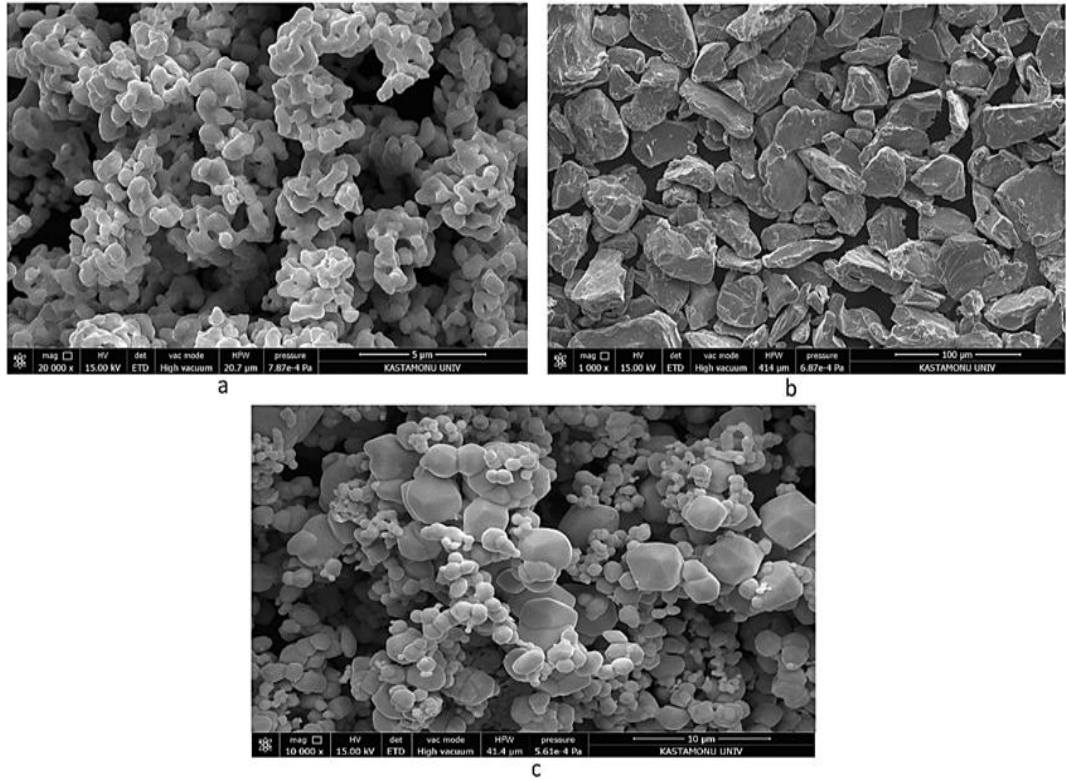
$$\text{Hücre canlılığı} = \frac{\text{absorbans numune}}{\text{absorbans kontrol}} \times 100 \quad (4.4)$$

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

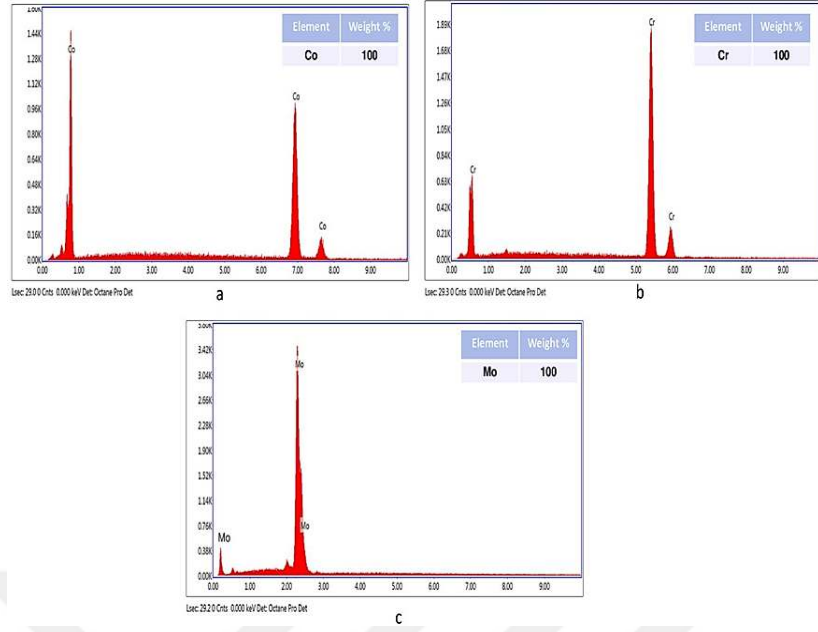
Bu bölüm, kullanılan malzemelerin karakterizasyonu sonuçlarını ve üretilen numunelerin değerlendirilmesini kapsamlı bir şekilde sunmakta ve analiz etmektedir. Çalışma, numunelerin fiziksel, mikroyapı, mekanik ve biyouyumluluk özelliklerinin incelenmesine odaklanmıştır.

5.1 Kullanılan Tozların Karakterizasyonu

Şekiller 5.1-5.4, toz metalurjisi tekniği ile CoCrMo matrisli kompozitinin üretiminde kullanılan tozların ve güçlendirme amacıyla kullanılan karbon nanopartiküllerinin SEM-EDS görüntülerini sergilemektedir. Görüntüler, kobalt ve krom tozlarının çoğunlukla küresel şekilde, molibden tozunun ise keskin kenarlı bir morfoloji sergilediğini ortaya koymaktadır. Karbon nanopartikülleri, Şekil 5.3'de gösterildiği gibi lifsi bir yapıya sahiptir. Şekiller 5.2 ve 5.4'te gösterilen tozlar üzerinde Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) incelemesi yapılmıştır.

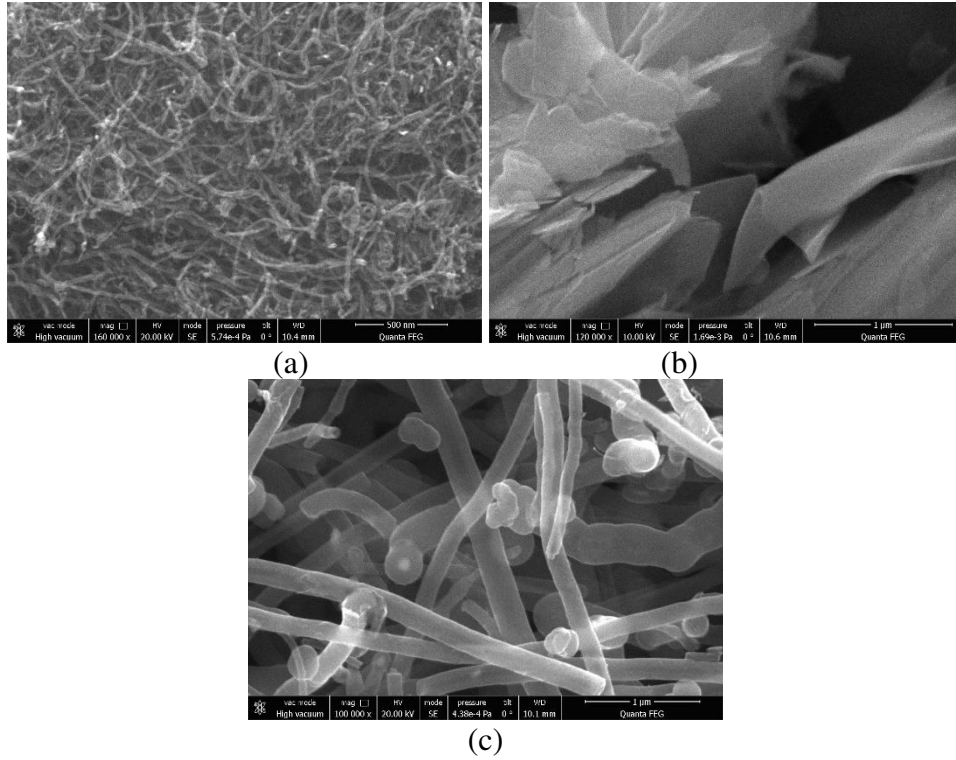


Şekil 5.1 Matris tozların SEM görüntüleri: (a) kobalt, (b) krom ve (c) molibden

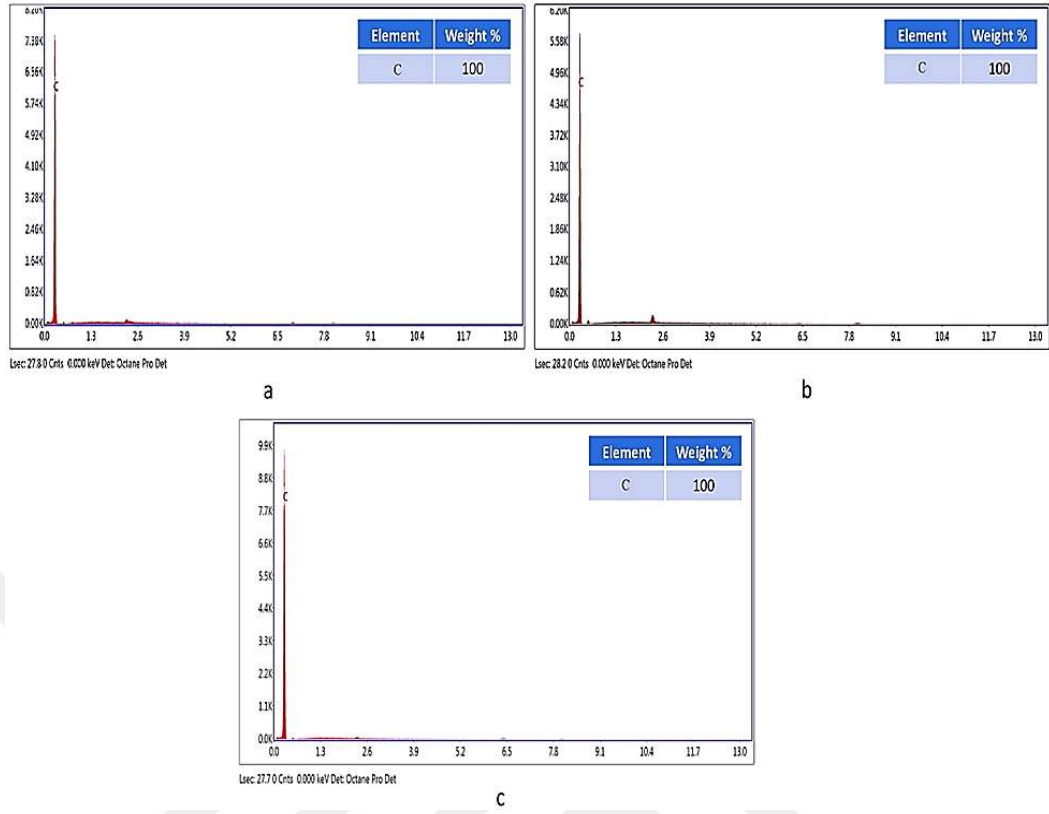


Şekil 5.2 Matris tozların EDS analizi: (a) kobalt, (b) krom ve (c) molibden

Şekil 5.3 ve 5.4, takviye fazını oluşturan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) resimlerini ve enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) grafiklerini göstermektedir. CNP'lerin SEM görüntüleri, onların lifli ve bıyık benzeri görünümünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3 Takviye tozların SEM görüntüleri: (a) CNT, (b) Gr ve (c) CNF



Şekil 5.4 Takviye tozların EDS analizi: (a) CNT, (b) Gr ve (c) CNF

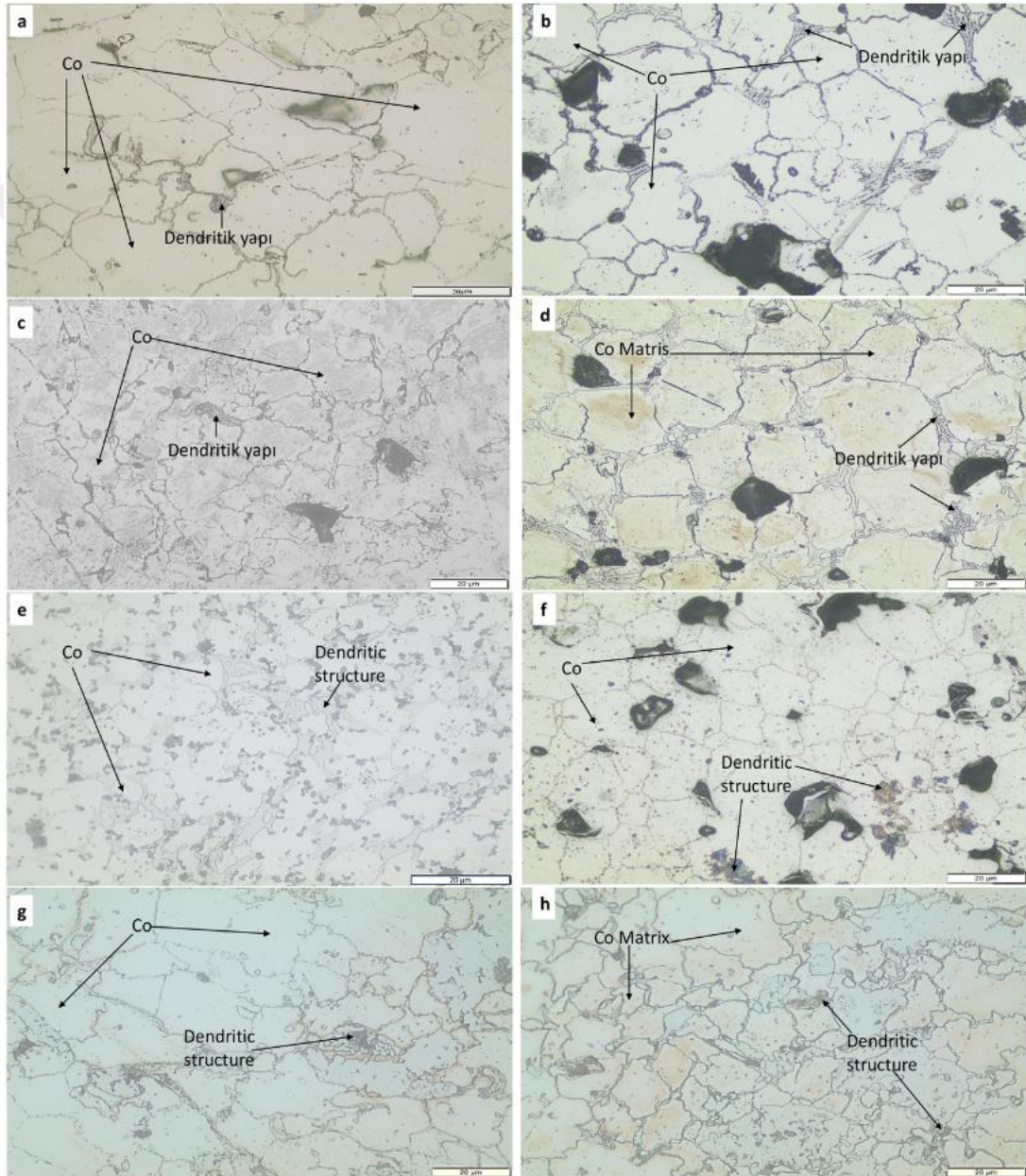
5.2 Üretilen Numunelerin Karakterizasyonu

CNP'nin CoCrMo matrisine dahil edilmesinin etkisini araştırmak için mikroyapı ve fazlar, yoğunluk, sertlik ve aşınma testleri kapsamlı bir şekilde yapılmıştır. Ayrıca, CoCrMo alaşımlarının biyomalzemeler alaşımları olarak kabul edilmesi nedeniyle, üretilen son numuneler üzerinde bir biyoyuymululuk testi de gerçekleştirilmiştir.

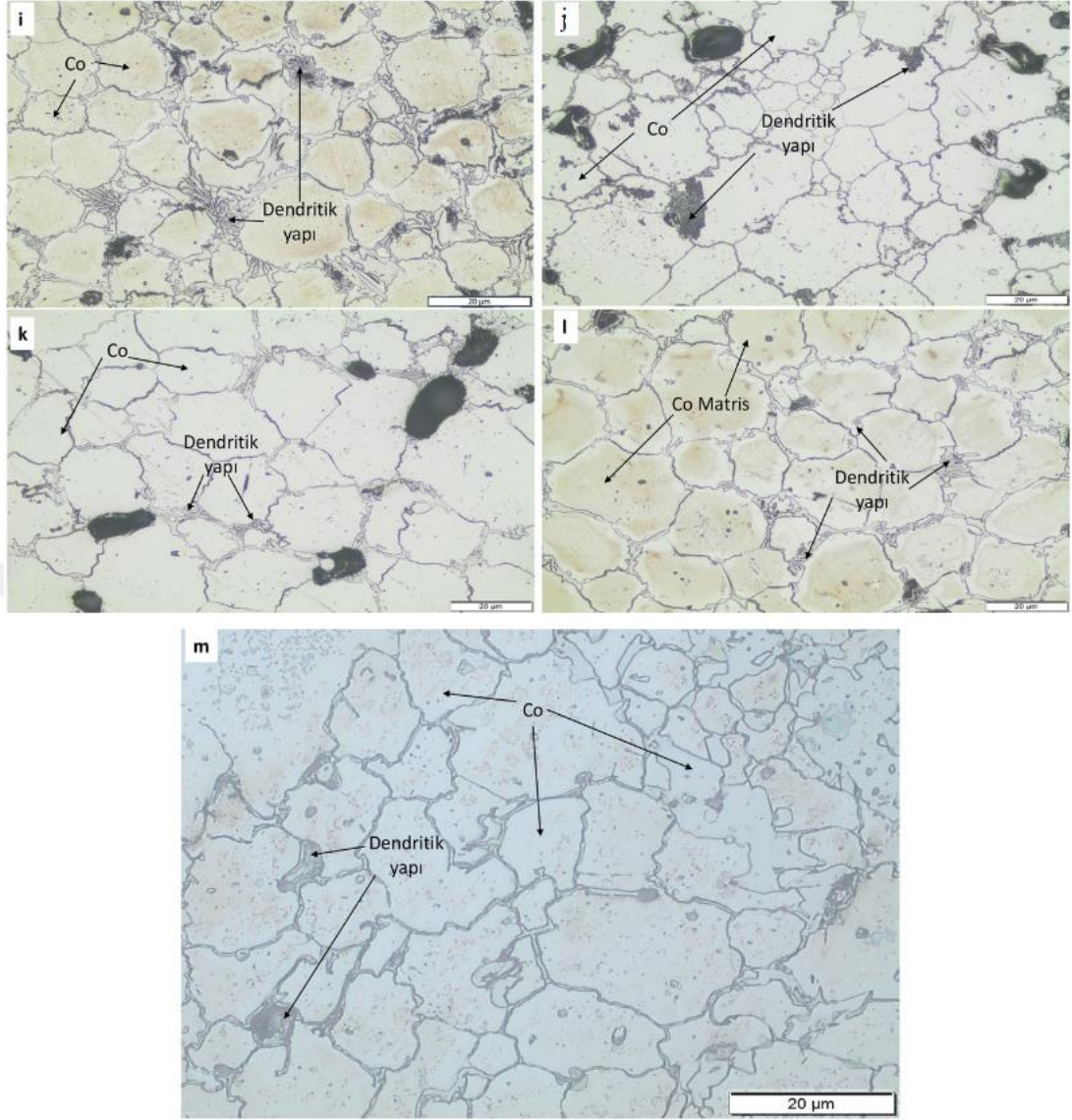
5.2.1 Mikroyapı ve SEM-EDS Analizi

Kobalt ASTM F-75 alaşımının mikro yapısı tipik olarak dendritik yapıya sahip kobalt esaslı yüzey merkezli kübik (FCC) bir matris ve dendritlerarası ve tane sınırlarında bulunan çökeltilelerle oluşmaktadır (Caudillo vd., 2001). Bu çalışmada üretilen referans ve CNP/CoCrMo alaşımlarının mikroyapı analizi, Şekil 5.5'te optik mikroskopi kullanılarak gösterilmiştir. Mikroyapı analizi, önceden yayımlanmış literatürle uyumlu olarak dendritik bir desen ve tane sınırı ile dendritik arası bileşenlerin varlığını göstermiştir (Rosenthal vd., 2010). Mikroyapı görüntüleri ayrıca herhangi bir boşluk veya çatlak bulunmadığını göstererek alaşımların sıkı bir şekilde paketlenildiğini

düşündürmektedir. Koyu ve açık gri tonlar ile gösterilen Co matrisi içerisinde kompozit elementlerinin tutarlı bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Ek olarak, optik görüntüler taneleri ve tane sınırlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, katkı olarak CNP içeren alaşımlarda (Şekil 5.5 b-m)'de gösterildiği gibi, karbür fazının tane sınırları boyunca dağıldığı ve krom (Cr) ile molibden (Mo) elementlerinin matris arayüzüne dahil edildiği gözlenmektedir.



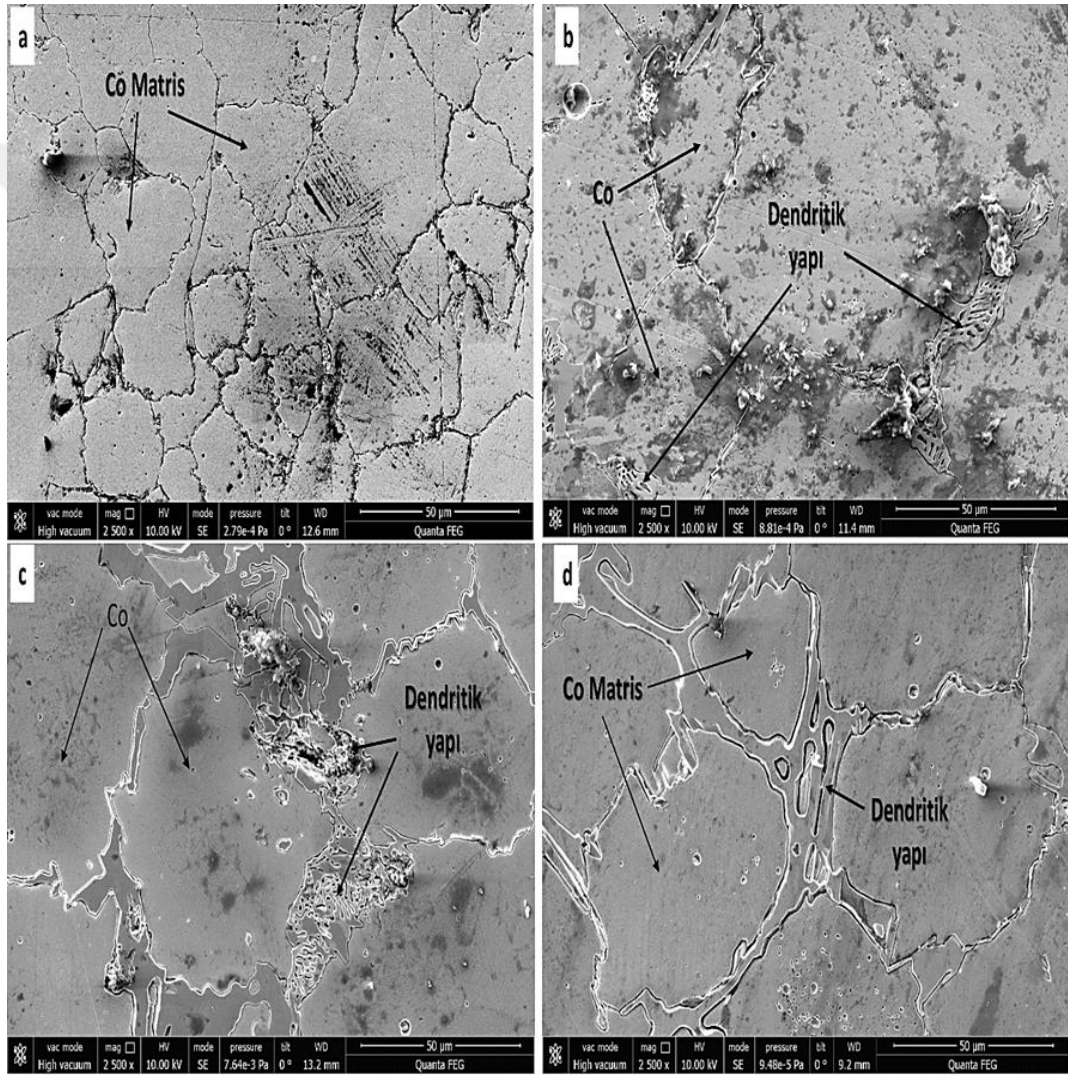
Şekil 5.5 Numunelerin optik fotoğrafı: (a) CRM, (b) CRM025T, (c) CRM05T, (d) CRM075T, (e) CRM1T, (f) CRM025G, (g) CRM05G, (h) CRM075G, (i) CRM1G, (j) CRM025F, (k) CRM05F, (l) CRM075F ve (m) CRM1F



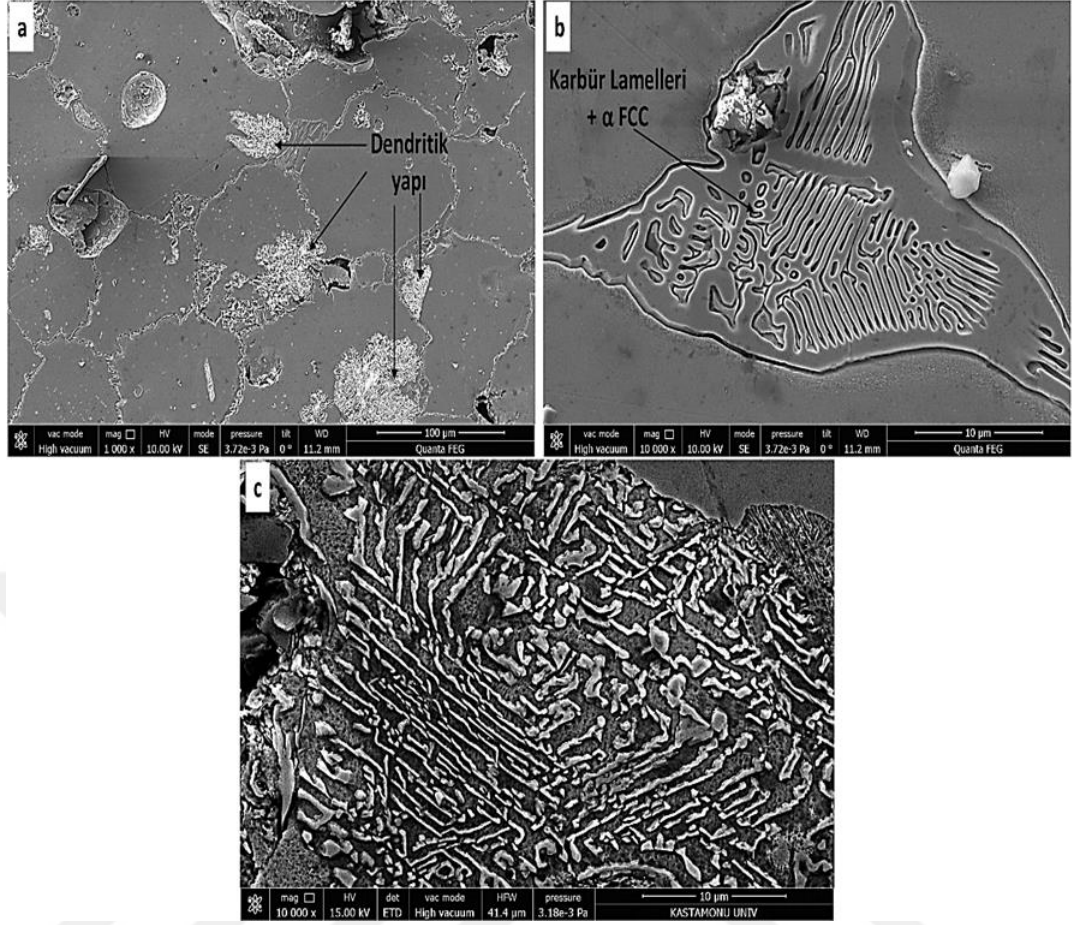
Şekil 5.5'in devamı

Mikro yapının daha kapsamlı bir analizi, enerji kırınımı spektrometresi (EDS) ile donatılmış bir tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri (Şekil 5.6), ayırt edici dendritik ve dendritik arası yapıları ile karakteristik bir CoCrMo yapısının varlığını doğrulamaktadır. Ek olarak, koyu gri alanlar, tane sınırları boyunca dağılmış karbürlerin ve matris içerisinde dağılmış diğer fazların varlığını göstermektedir. Şekil 5.7, açık ve koyu gri tonların zıtlık oluşturarak lameller yapıların dallanma şeklini detaylı bir şekilde göstermektedir. Ayrıca, CNP miktarı arttıkça dendritik yapıları daha belirgin ve kolayca gözlemlenebilir hale gelmektedir. Lameller karbür çökmesi, perlit tipi çökme olarak da adlandırılır, katılaşma sırasında veya sonradan uygulanan ısı işlemler esnasında yavaş soğutma

hızları sonucunda tane sınırlarında oluşabilmektedir (Emerson, 2015). Yaklaşık 1200°C (1473 K) sıcaklıkta gerçekleştirilen 1 ila 4 saat sürüyor arasındaki ısıt işlemler, karbürleri kısmen çözerek artan esneklik, akma dayanımı ve kopma dayanımı sağlayabilmiştir. Dendritik arasında oluşan çökeltiler yaklaşık 1223°C'de (1496 K) katılaşmaktadır, karbür çökeltileri ise doğrudan matris içerisinde çözünme yeteneğine sahiptir (Caudillo vd., 2001), Şekil 5.7'de gösterildiği gibi, dendritik yapısının oluşumunu gösterilmektedir.

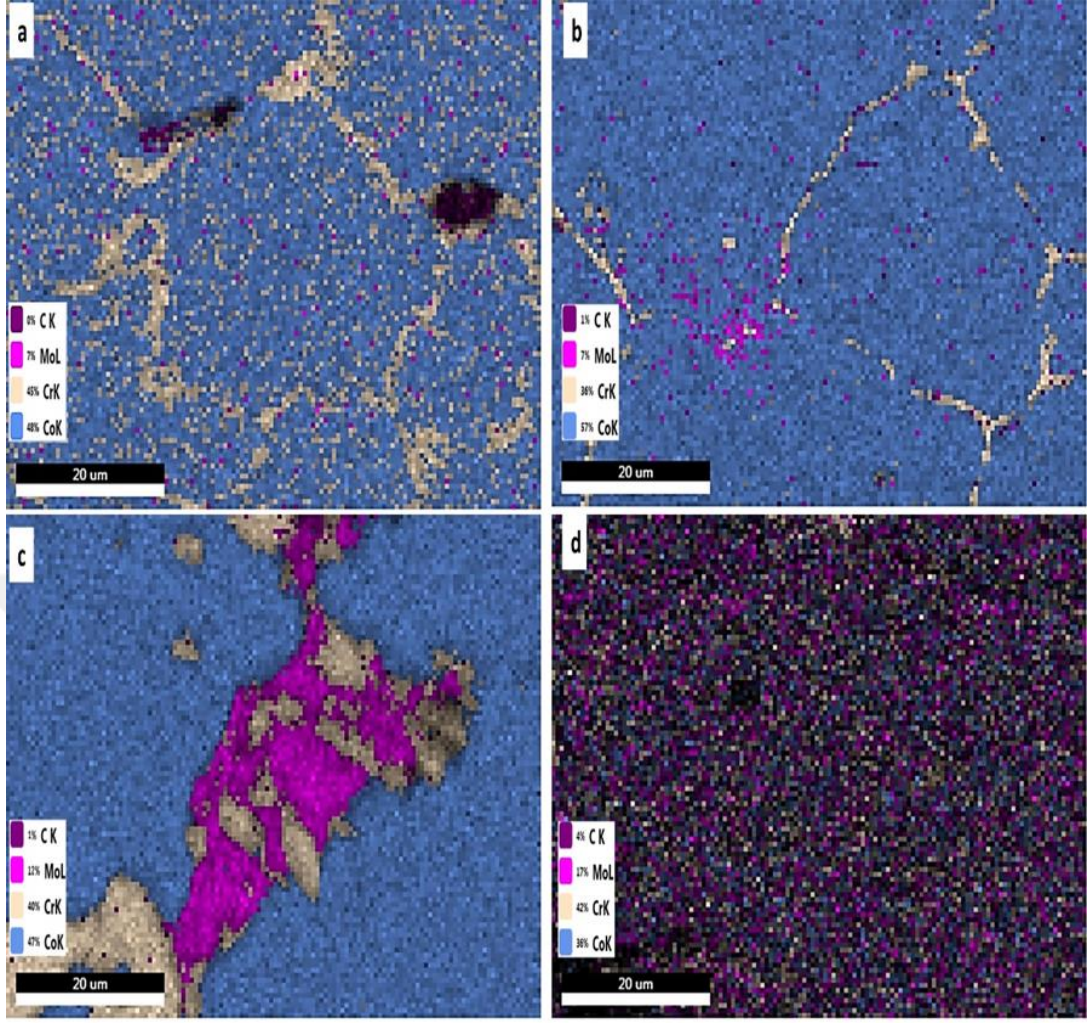


Şekil 5.6 Numunelerin SEM görüntüleri: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F



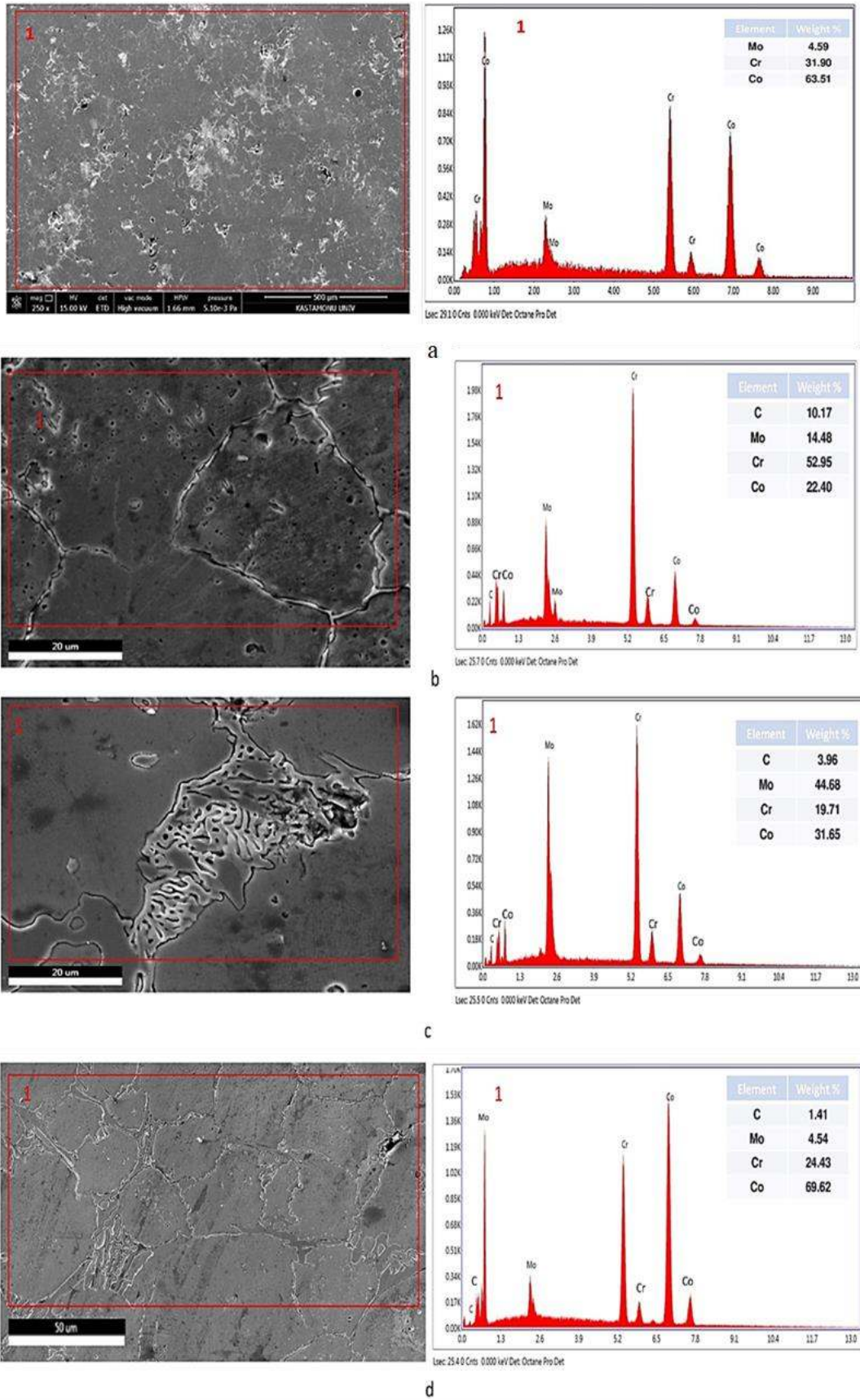
Şekil 5.7 Dendritik yapının SEM görüntüleri

Şekil 5.8, üretilen numunelerin MAP-EDS analizi sonucu elde edilen element dağılım haritalarını göstermektedir. Harita gösterimleri, elementlerin Co matrisinde homojen dağılımını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Haritalardaki dağılım paterni, optik ve SEM görüntüleri ile uyumlu bir görünüm sergilemektedir. Önemli olarak, literatürde de belirtildiği gibi, elementlerin matris içerisinde homojen dağılımının mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu ifade edilmektedir (Hausne, 1982). Taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikroskobik inceleme ve haritalama analizi kullanılarak, nihai numunelerin mikro yapısında çatlak bulunmadığı ortaya konmuştur. Bununla birlikte, tüm numunelerde belirli gözenek şekillerinin gözlemlendiğine dikkat edilmelidir.



Şekil 5.8 MAP-EDS analizi: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F

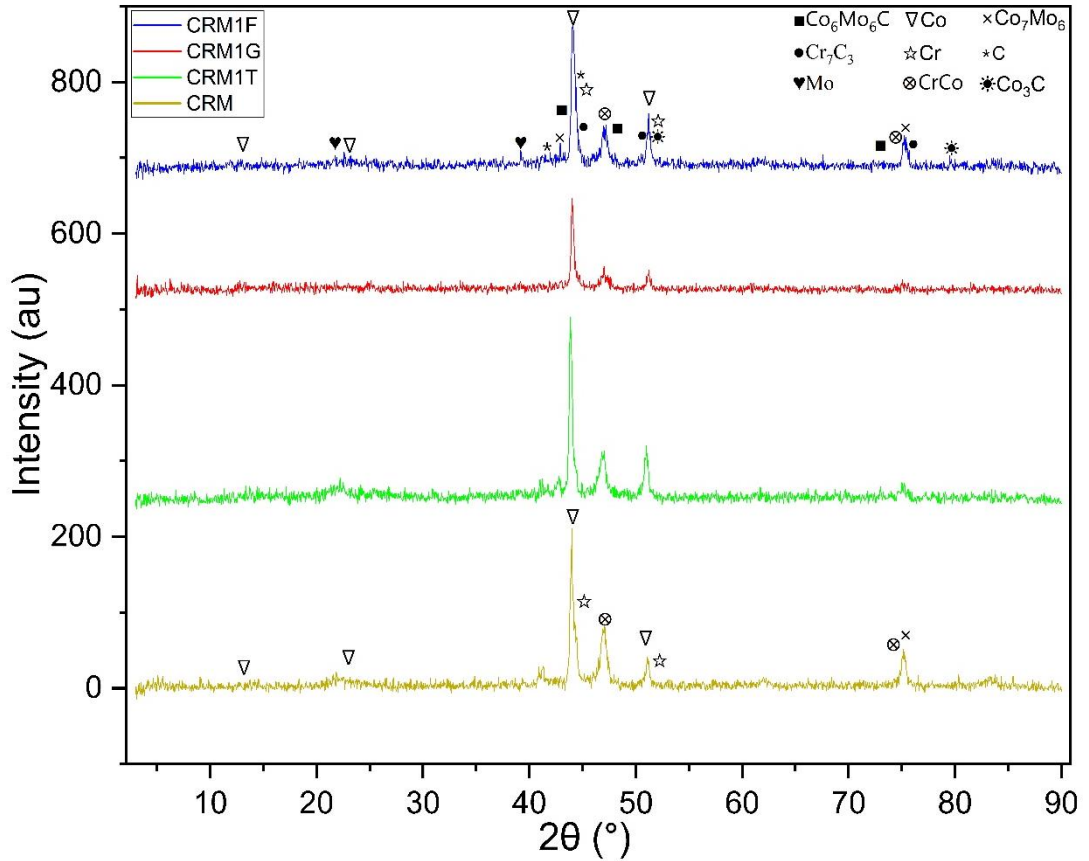
Şekil 5.9, referans CoCrMo ve CoCrMo-CNP numuneleri için EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.9a'da, referans numunesinin herhangi bir kirlilik veya oksit içermeyen Co, Cr ve Mo bileşenlerinden oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.9 b-d'de gösterilen CNP ile takviye edilmiş CoCrMo numunelerinin EDS analizi, Co, Cr ve Mo elementlerinin varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, küçük miktarlarda C elementine de rastlanmaktadır. EDS analizde C elementinin varlığı, karbon nanoparçacıkların mevcudiyetine işaret etmektedir. Ek olarak, mikro yapıda oksit veya diğer kontaminantlara dair herhangi bir kanıt bulunamamıştır. Bu bulgular, sinterleme işlemi boyunca oksidasyon gerçekleşmediğini göstermektedir.



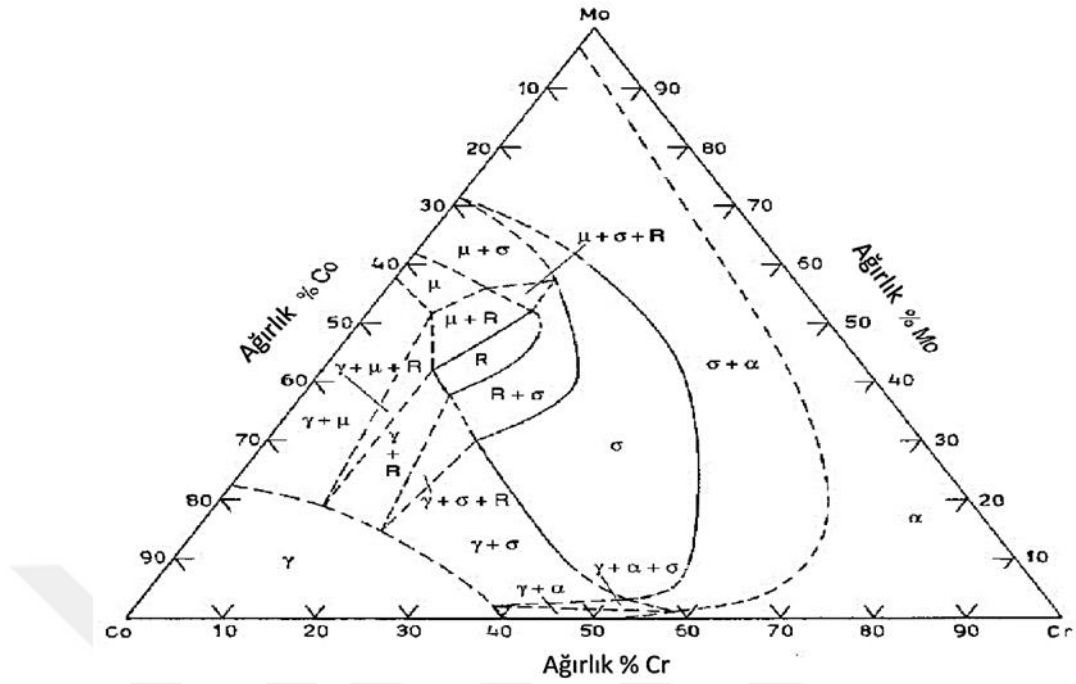
Şekil 5.9 Numunelerin EDS grafikleri: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F

5.2.2 XRD Analizi

Sinterleme işlemi sonrası oluşabilecek fazları ve bileşikleri tespit etmek amacıyla, XRD analizleri gerçekleştirilmektedir. Üretilen referans ve CNP takviyeli numunelere ait XRD grafikleri Şekil 5.10'da sunulmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki sinterleme işlemi sırasında katı hal difüzyonu meydana gelerek, Cr ve Mo atomlarının Co kristal kafesleri içerisinde difüzyona uğramaktadır (Zhao vd., 2019). Şekil 5.11'de gösterilen ternary Co-Cr-Mo faz diyagramına göre, 1300°C sıcaklıkta baskın faz γ -Co fazıdır. Alaşımların XRD grafikleri, Cr, Mo, CrCo ve Co_7Mo_6 fazlarının varlığını doğrulamaktadır. Bu bulgular, ASM Handbook Volume 3'de (Okamoto vd., 2016), ve Co-Mo faz diyagramı (Gupta, 2005) rapor edilen bilgiler ile uyumludur.



Şekil 5.10 Numunelerin XRD grafiği



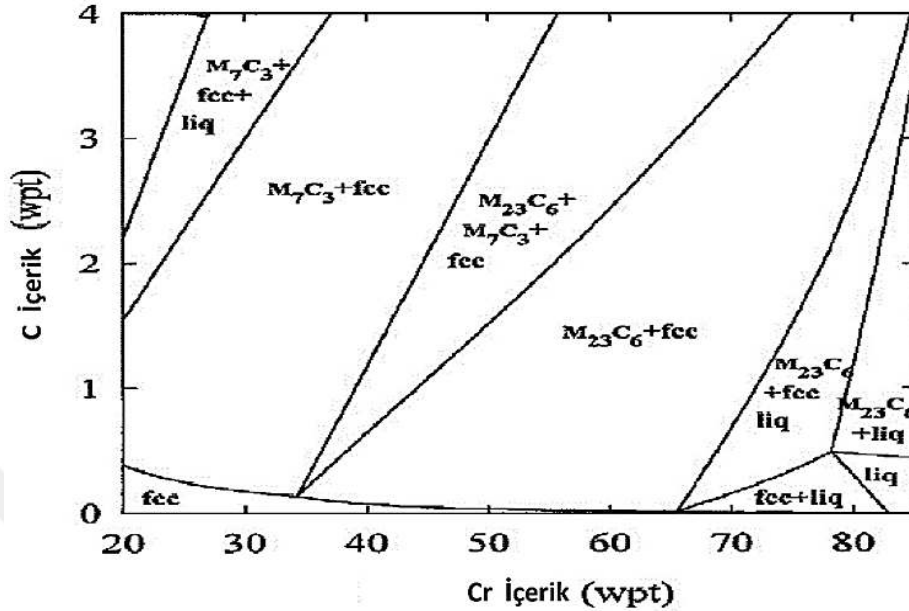
Şekil 5.11 Co-Cr-Mo 1300 °C'de üçlü faz diyagramı (Gupta, 2005)

Karbon nanoparçacıklarının (CNP) alaşıma dahil edilmesi, XRD grafiklerde gözlenen kırınım piklerinde bir değişime neden olmuştur. C elementinin büyük bir kısmı, diğer bileşen elementlerle reaksiyona girerek karbürlerin oluşmasına yol açmıştır. CNP içeren alaşımların XRD grafiği, karbon ile kompozitte bulunan diğer elementler (Co, Cr ve Mo) arasındaki reaksiyon sonucu oluşan $\text{Co}_6\text{Mo}_6\text{C}$ ara bileşiğinin ve Cr_7C_3 ve Co_3C karbürlerinin varlığını ortaya koymuştur. Eşitlik 5.1 ve 5.2 olası reaksiyonları göstermektedir (Cui vd., 2019).



Ayrıca XRD, matris içindeki reaksiyona girmemiş CNP'yi temsil eden C'nin varlığını göstermektedir. Newsam vd. (1988) alışmasında, C-Co-Mo faz diyagramında yer alan $\text{Co}_6\text{Mo}_6\text{C}$ fazının varlığını tespit etmiştir. (Kilner vd., 1982) ise, belirli alan kırınımı tekniği kullanılarak dendritik arası yapı M_7C_3 karbürlerinin varlığını saptamış ve bu yapıyı, yakın ötektik bir karışım olarak tanımlamıştır. Bu karışım, Şekil 5.12'de gösterilen Co-Cr-6%Mo-C sisteminin faz diyagramına göre sigma fazı, M_7C_3 ve FCC

Co oluşmaktadır. Faz diyagram, karbon içeriği %1'e ulaştığında M_7C_3 +FCC oluşumunu göstermektedir.



Şekil 5.12 Co-Cr-6Mo-C 1493 K'de faz diyagramı (Caudillo vd., 2001)

5.2.3 Yoğunluk Ölçümü

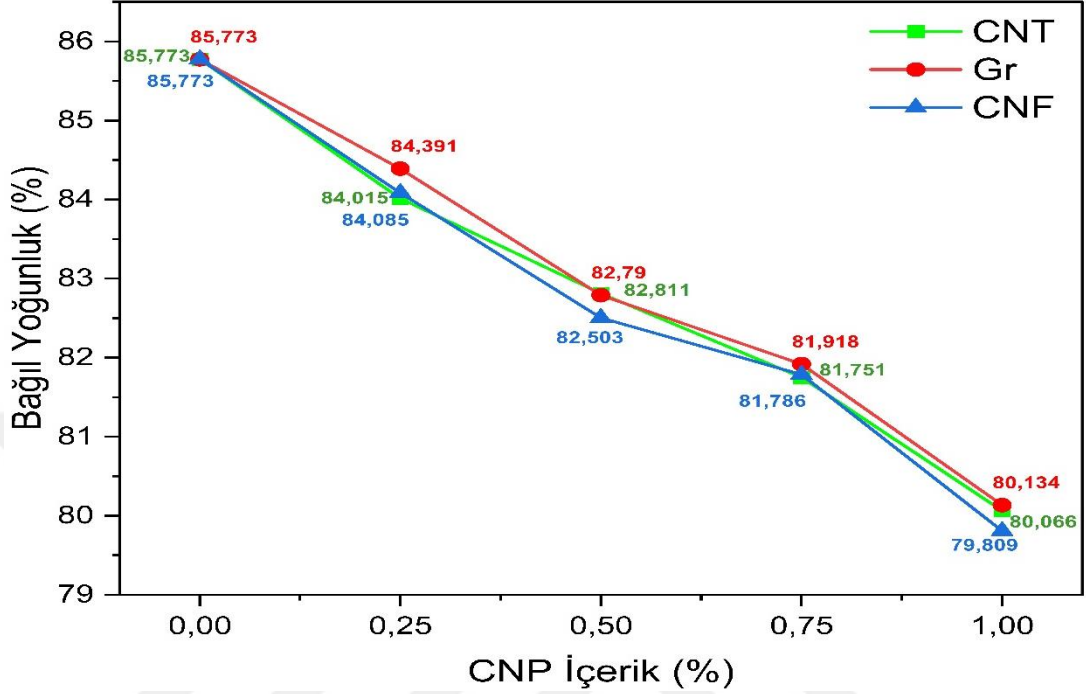
Arşimet prensibi kullanılarak üretilen numunelerin yoğunluğu tayin edilmiştir. Tablo 5.1, numunelerin teorik, deneysel ve bağıl yoğunluklarını göstermektedir. Tablodan görüldüğü üzere, deneysel yoğunluklar 7,294 ila 6,734 g/cm³ aralığında değişmektedir. Numunelerin teorik yoğunluğu ise 8,504 ile 8,437 g/cm³ arasında değişmektedir. Ek olarak, üretilen numunelerin bağıl yoğunluğu %85,7 ile %79,80 arasında değişmektedir. CNP ilavesiyle hem deneysel hem de bağıl yoğunluklarda gözle görülür bir azalmaya neden olmuştur ve bu azalma, CNP miktarı arttıkça devam etmiştir. Deneysel yoğunluklardaki azalma sebebi, matris bileşenleri olan Co (8,92 g/cm³), Cr (7,19 g/cm³) ve Mo (8,2 g/cm³) elementlerin daha yüksek yoğunluklarına kıyasla, takviye malzemesi olarak kullanılan CNT (2,1 g/cm³), Gr (2,26 g/cm³) ve CNF (1,9 g/cm³) nanomalzemelerin daha düşük yoğunluklarından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.1 Üretilen numunelerin yoğunlukları

Numune No.	Numune İsmi	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)
1	CRM	8,504	7,29415	85,77314
2	CRM025T	8,48799	7,13116	84,0147
3	CRM050T	8,47198	7,01569	82,81053
4	CRM075T	8,45597	6,91281	81,75065
5	CRM1T	8,43996	6,75753	80,06591
6	CRM025G	8,45722	7,13711	84,39074
7	CRM050G	8,47282	7,01463	82,78983
8	CRM075G	8,45722	6,92795	81,91753
9	CRM1G	8,44163	6,76466	80,13447
10	CRM025F	8,48749	7,13675	84,08548
11	CRM050F	8,47098	6,98881	82,50303
12	CRM075F	8,45447	6,91457	81,78593
13	CRM1F	8,43796	6,73429	79,80943

Şekil 5.13, CNP'nin (CNT, Gr ve CNF) numunelerin bağlı yoğunluğuna etkisini göstermektedir. Grafik, bağlı yoğunluk ile CNP içeriği arasında net bir ters orantı olduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, bağlı yoğunluktaki en yüksek etkinin olduğu, takviye malzemesi olarak CNF kullanıldığında gözlemlenmiştir, grafen (Gr) uygulandığında bağlı yoğunluktaki en düşük etkinin olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, her bir CNP türünün bağlı yoğunluk üzerindeki etkisi birbirinden biraz farklılık göstermektedir. Bir malzemenin bağlı yoğunluğunda azalmaya neden olabilecek çeşitli faktörler söz konusu olabilir. Bu faktörlerden biri, tozların presleme kabiliyetini azaltabilen takviye elemanı olarak CNP'nin dahil edilmesinin etkisinden kaynaklanıyor olabilmektedir. Cui vd. (2019), araştırmalarında karbon içeriği arttıkça CoCrMo alaşımlarının yoğunluğu ve bağlı yoğunluğunun azaldığını belirtmektedirler. Bu etkiyi, karbonun düşük yoğunluğuna bağlamaktadırlar. Olası bir diğer açıklama ise, sinterleme işlemi sırasında CNP takviye elementinin varlığının tozların yeniden düzenlenmesini engelleyebilmiştir. Bunun nedeni, CNP

partiküllerinin ergime noktalarının CoCrMo matrisinden önemli ölçüde farklı olmaktadır (Huang vd., 2023; Kumar ve Xavier, 2014).



Şekil 5.13 CNP içeriğinin bağıl yoğunluğa etkisi

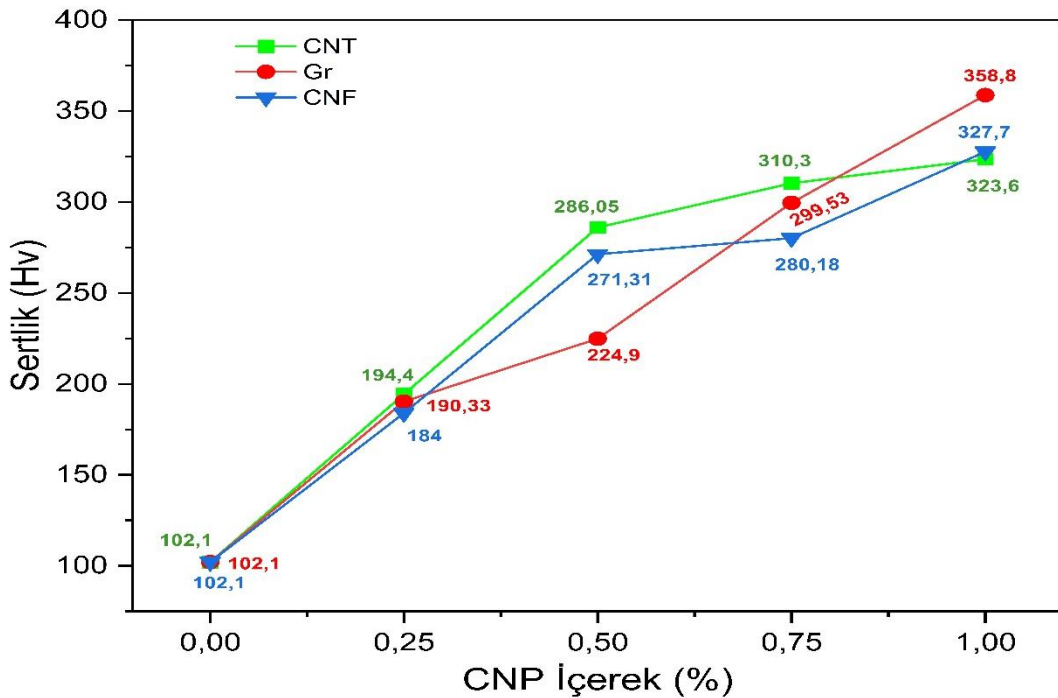
5.2.4 Sertlik Sonuçları

Numunelerin sertliği, Vickers mikrosertlik (Hv) ölçüm tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Her bir numune için beş ölçüm gerçekleştirilmiş ve ortalama değer kaydedilmiştir. Şekil 5.14, referans numunelerinin ve takviye olarak CNP (CNT, Gr, CNF) içeren numunelerin Vickers sertlik değerlerini göstermektedir. Vickers mikrosertlik ölçümleri, takviye malzemesi içermeyen CoCrMo numunelerin en düşük sertlik değerine sahip olduğunu ortaya koymuştur (102,2 Hv). Buna rağmen, CNP takviye elemanı olarak dahil edildiğinde sertlik değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Şekil 5.14'e göre ise her türlü CNP takviyesi farklı seviyelerde sertliği artırmıştır. %1 karbon nanotüp (CNT) içeren alaşım, sertliğinde yaklaşık %216'lık bir artış yaşamışken, %1 karbon nanofiber (CNF) içeren alaşımda ise sertlik yaklaşık %220 oranında artmıştır. %1 grafen (Gr) içeren alaşım ise referans alaşıma kıyasla yaklaşık %251'lik bir artışla en önemli sertlik artışını göstermiştir. CoCrMo matrisinin sertleşmesi, CNP partiküllerinin varlığına atfedilebilmektedir. Bu partiküller, matristeki diğer fazlardan daha yüksek sertlik gösterilmektedir, sertlik testi sırasında

lokalize deformasyonda önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Ayrıca, takviye edici partikül miktarı arttıkça, sertlik değeri de iyileşmektedir, (Kim, 2000) karışım kuralı Eşitlik 5.3'i kullanarak takviye sertliğinin matrisin toplam sertliği üzerindeki etkisini açıklamıştır.

$$H_k = H_m f_m + H_t f_t \quad (5.3)$$

Eşitlikte, H_k terimi, kompozit sertliğini temsil ederken H_m ve H_t sırasıyla matrisin ve takviyenin sertliğini ifade etmektedir. Benzer şekilde f_m ve f_t , sırasıyla matrisin ve takviyenin hacimsel oranlarını göstermektedir. Ayrıca, soğutma işlemi sırasında matris içinde takviye edici faz oluştuğunda karbür oluşumu da sertliğin artmasına katkıda bulunmaktadır (Chen vd., 2017). Karbür oluşumu dislokasyon dağılımını kısıtlayabilmektedir. Bu nedenle, numune daha yüksek bir sertlik değeri gösterilmektedir (Kumar ve Xavior, 2014). Soğutma sırasında CNP partikülleri, CNP parçacıkları ile matris arasındaki termal genleşme katsayıları arasındaki önemli fark nedeniyle, içindeki kütleyi yer değiştirme yoluyla matrisin mukavemetini arttırmaktadır. Li vd. (2024) ve Islak vd. (2021a) araştırma çalışmalarında, üretilen bronz kompozit alaşımların sertliğinin CNF ilavesi ile birlikte iyileştiğini bildirmişlerdir.



Şekil 5.14 CNP içeriğinin sertliğe etkisi

5.2.5 Aşınma Sonuçları

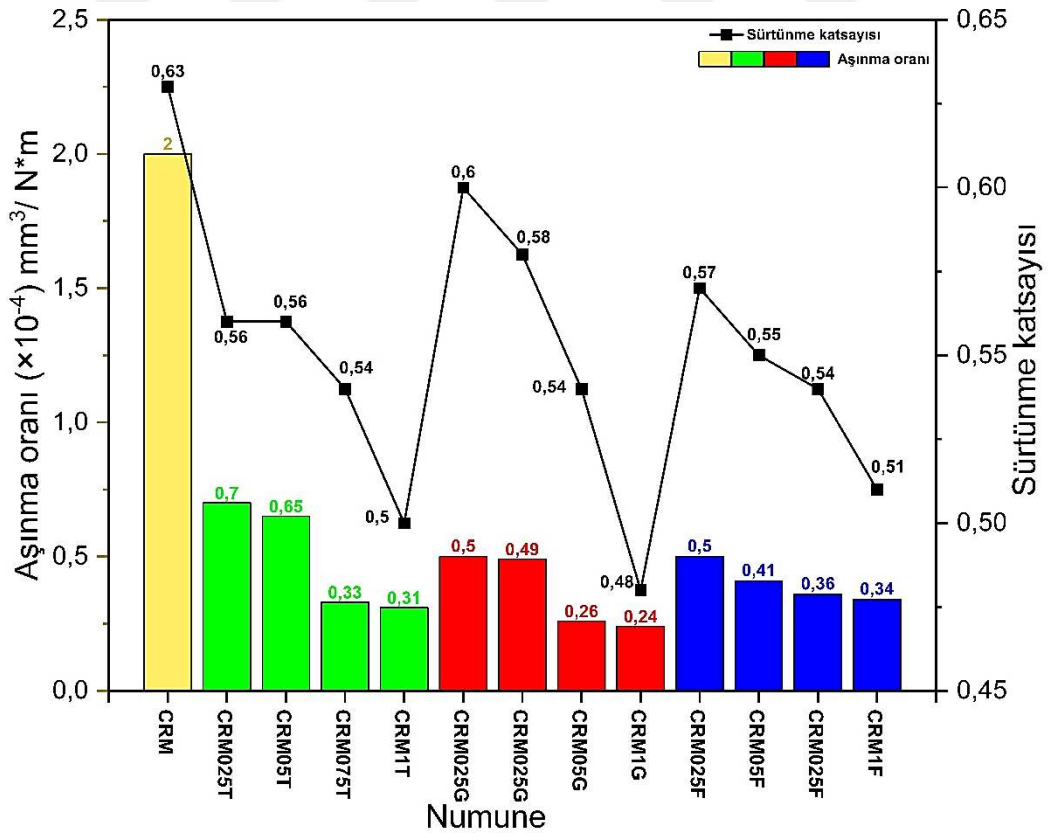
Bir malzemenin aşınma davranışının ilk göstergesi ve temel belirleyicisi, sertlik davranışdır (Şimşek, 2019). Elde edilen numunelerin sertlik değerlendirmeleri, CNP'nin aşınma oranına etkisini ortaya koyabilmiştir. Bununla birlikte, aşınma testleri gerçekleştirilirken, aşınma oranı, numunelerin maruz kaldığı kütle kaybı oranının nicel bir göstergesi olarak dikkate alınmalıdır. Numunelerin aşınma oranı, numunelerin aşınma direncinin güvenilir bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Aşınma oranı, aşağıda verilen Eşitlik 5.4 uygulanarak hesaplanabilir (Scharf vd., 2009).

$$\text{Aşınma oranı} = \frac{V}{W \times L} \quad (5.4)$$

Eşitlik, V hacimsel aşınma kaybı (mm^3), W uygulanan yük (N), ve L aşınma mesafedir (m). Şekil 5.15 referans ve CNP içeren numunelerin aşınma oranlarını ve sürtünme katsayılarını göstermektedir.

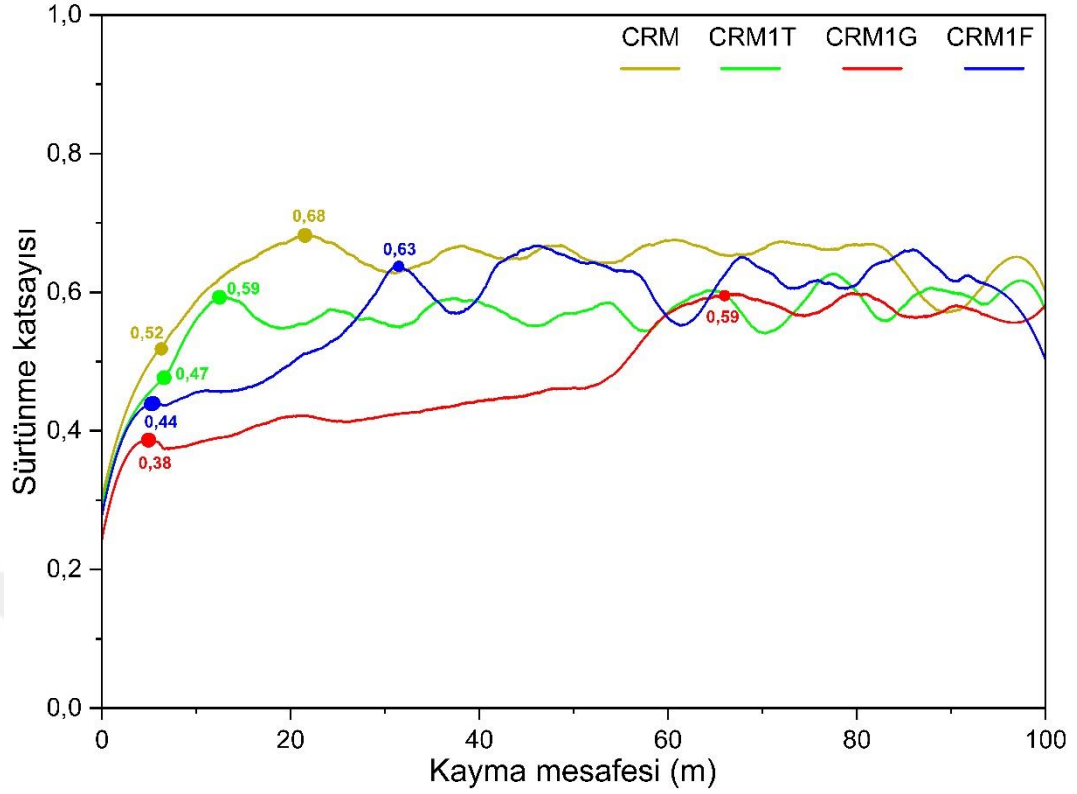
Şekil 5.15, referans alaşımlarının ve CNP içeren CoCrMo matris alaşımlarının aşınma oranını ve sürtünme katsayısını (COF) göstermektedir. Takviye parçacıkları içermeyen CoCrMo numunesinin aşınma oranının, $2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ölçülen CNP'li numunelerden daha yüksek olduğu açıktır. Ayrıca 0,63 gibi daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahiptir. Ancak, CNP ilavesi hem aşınma oranı hem de sürtünme katsayısında önemli bir azalmaya neden olmuştur. CNT içeren numuneler için aşınma oranı, %0,25 ağırlıkça CNT ilavesinde $0,7 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşmüştür. Benzer şekilde, sürtünme katsayısı da 0,56 düşmüştür. Ayrıca, CNT konsantrasyonu arttıkça aşınma oranı ve sürtünme katsayısındaki azalma devam etmiştir, %1 ağırlıkça CNT'de aşınma oranı için $0,3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve sürtünme katsayısı için 0,5 olmak üzere maksimum azalmaya ulaşmıştır. Bununla birlikte, Gr ve CNF içeren numunelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı davranışının, referans numuneye kıyasla benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. %0,25 ağırlıkça Gr ilavesinde aşınma oranı $0,5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye, sürtünme katsayısı ise 0,6'ya düşmüştür. Benzer şekilde, %0,25 ağırlıkça CNF ilavesinde de aşınma oranı $0,5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye ve sürtünme katsayısı 0,57'ye düşmüştür. Bununla birlikte, en belirgin azalma, Gr ve CNF'nin ağırlık yüzdesi %1 olduğunda meydana gelmiştir. Bu oranda, %1 ağırlıkça Gr içeren numuneler için aşınma oranı $0,24 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye ve sürtünme katsayısı 0,48'e düşmüştür. Benzer

şekilde, %1 ağırlıkça CNF içeren numuneler için de aşınma oranı $0,34 \times 10^{-4}$ mm³/Nm'ye ve sürtünme katsayısı 0,51'e düşmüştür. Bununla birlikte, bu davranış, oluşturulan alaşımların mikrosertlik ölçümlerindeki artış ile de uyumludur. Bu bulgular, diğer literatürdekiyle uyulmaktadır, Islak vd. (2021b), çalışması, CNF ilavesinin Mg matris kompozitinin sürtünme katsayısını ve aşınma oranı azalttığını ortaya koymuştur. Mallikarjuna vd. (2016), araştırmalarında, Cu-Sn matrisine CNT ilavesinin sürtünme katsayısını ve aşınma oranı düşürdüğünü bildirmişlerdir. Bu etki, farklı aşınma yükleri uygulandığında bile gözlemlenmektedir, Yüksek CNT içeriğine sahip alaşımlar hala daha düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri sergilemektedir. Sonekar ve Rathod, (2022), CoCrMo alaşımları için kaplama malzemesi olarak hidroksiapatit ile CNT'nin birlikte karıştırılmasının, saf hidroksiapatit kaplamasına kıyasla CoCrMo'nun tribolojik özelliklerini iyileştirdiğini bildirmişlerdir, CNT ilavesi, aşınma oranında bir azalmaya neden olmuştur. Das ve Harimkar, (2014), çalışmalarında Gr'in Mg alaşımlarında takviye olarak kullanılmasının, saf Mg alaşımına kıyasla aşınma direncinde önemli bir artış sağladığını belirtmişlerdir.



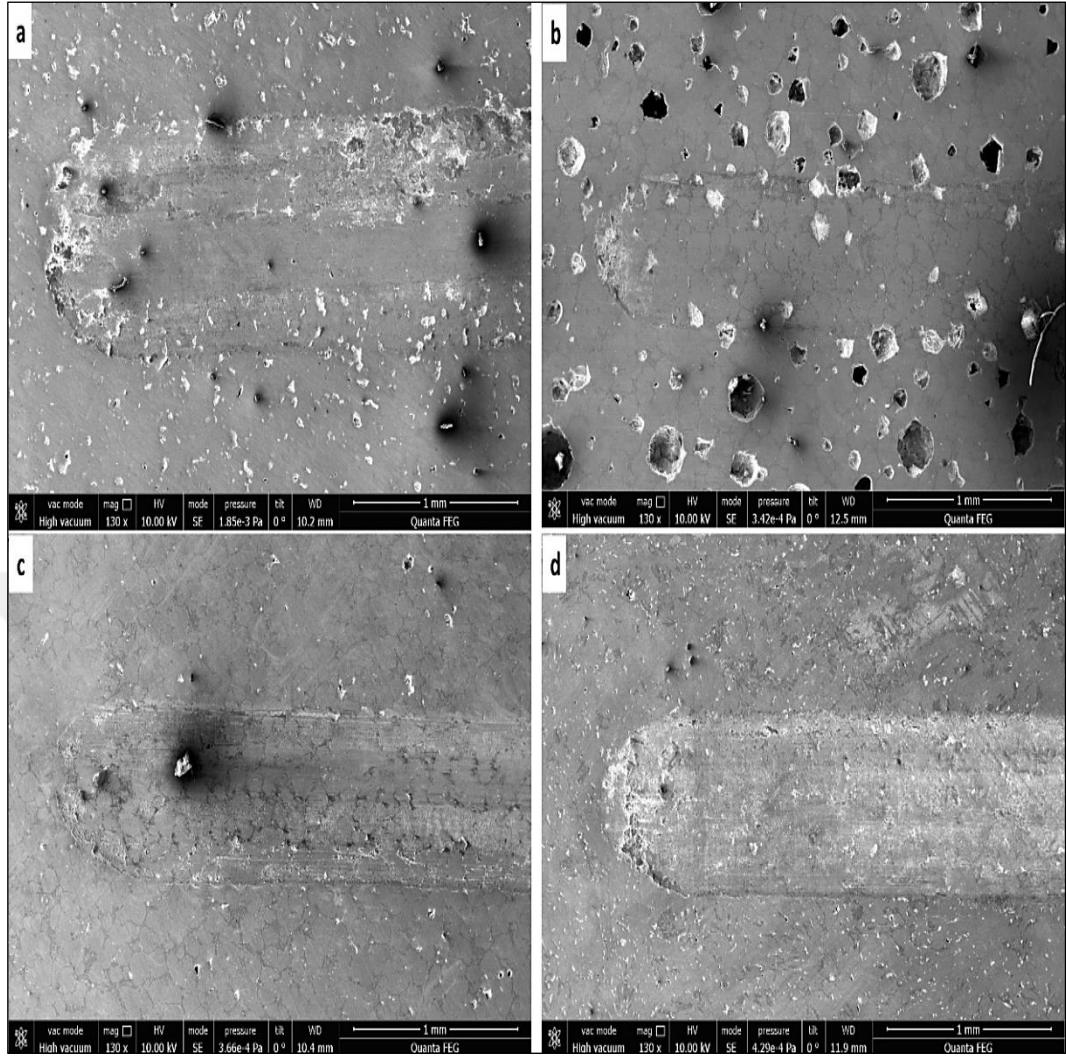
Şekil 5.15 Numunelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı

Şekil 5.16, referans alaşımlarının yanı sıra %1 ağırlıkça CNT, Gr ve CNF içeren alaşımlar için sürtünme katsayısı ile kayma mesafesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafik, %1 ağırlıkça CNP içeren numunelerin, referans numuneye kıyasla sürtünme katsayısında önemli bir azalma sergilediğini göstermektedir. Sürtünme katsayısındaki azalma, CNP'lerin çelik bilya ile test edilen alaşım arasında katı bir yağlayıcı olarak işlev görmesine bağlanabilir. Grafik, %1 ağırlık CNP içeren numunelerin, referans numune ile karşılaştırıldığında sürtünme katsayısında dikkate değer bir azalma sergilediğini göstermektedir (Islak vd., 2021b). Ancak, tüm numunelerin sürtünme katsayısının 5 metre aşınma mesafesinden sonra yükselmeye başladığı ve ardından bazı dalgalanmalarla birlikte nispeten kararlı hale geldiği görülmektedir. Buna karşın, %1 ağırlıkça CNT içeren numuneler için sürtünme katsayısı 0,27'den başlayarak 5 metre kayma mesafesinden sonra 0,47'ye yükselmektedir. Daha sonra 10 metre kayma mesafesinden sonra 0,59'a kadar yükselmekte ve ardından 100 metre kayma mesafesine ulaşıncaya kadar 0,54 ile 0,62 arasında dalgalanarak nispeten kararlı hale gelmektedir, bu mesafede, sürtünme katsayısı ise 0,57'dir. %1 Gr içeren alaşım, sürtünme katsayısı açısından başlangıçta 0,24 değerinden başlayıp 5 metre aşınma mesafesinden sonra 0,38'e yükselen ve ardından sabitlenen bir davranış sergilemektedir. 65 metre kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısı yavaş yavaş artarak 0,59 değerine ulaşmakta ve bu değer nispeten kararlı kalarak 100 metre kayma mesafesine ulaşana kadar 0,6 ile 0,55 arasında küçük dalgalanmalar göstermektedir. %1 ağırlıkça CNF içeren numunede ise sürtünme katsayısı, 5 m kayma mesafesinden sonra 0,27'den 0,44'e yükselmiştir. Daha sonra, 30 m kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısı 0,63'e kadar daha fazla artmış ve ardından 100 m kayma mesafesine ulaşana kadar nispeten kararlı hale gelerek 0,66 ile 0,5 arasında küçük dalgalanmalar göstermiştir. Buna ek olarak, CNP içermeyen CoCrMo numunesinin sürtünme katsayısı başlangıçta 0,3'tür. 5 m aşınma mesafesinden sonra sürtünme katsayısı 0,52'ye yükselmektedir. Ve 20 m kayma mesafesinden sonra daha da yükselerek 0,68 olmaktadır. Daha sonra 100 m kayma mesafesine ulaşıncaya kadar sürekli olarak dalgalanmakta ve 0,6 sürtünme katsayısını korumaktadır. Sürtünme katsayısı değerlerindeki bu ani artış, mikro kırılma ve delaminasyon olaylarına bağlanmaktadır (Al-Qutub vd., 2013). Ayrıca, %1 ağırlıkça CNP içeren alaşımların referans alaşımına kıyasla daha az dalgalanma göstermesi, CNP'nin kararlı yağlama etkisine bağlanmaktadır (Sharma vd., 2020).



Şekil 5.16 Sürtünme katsayısı-kayma mesafe grafiği

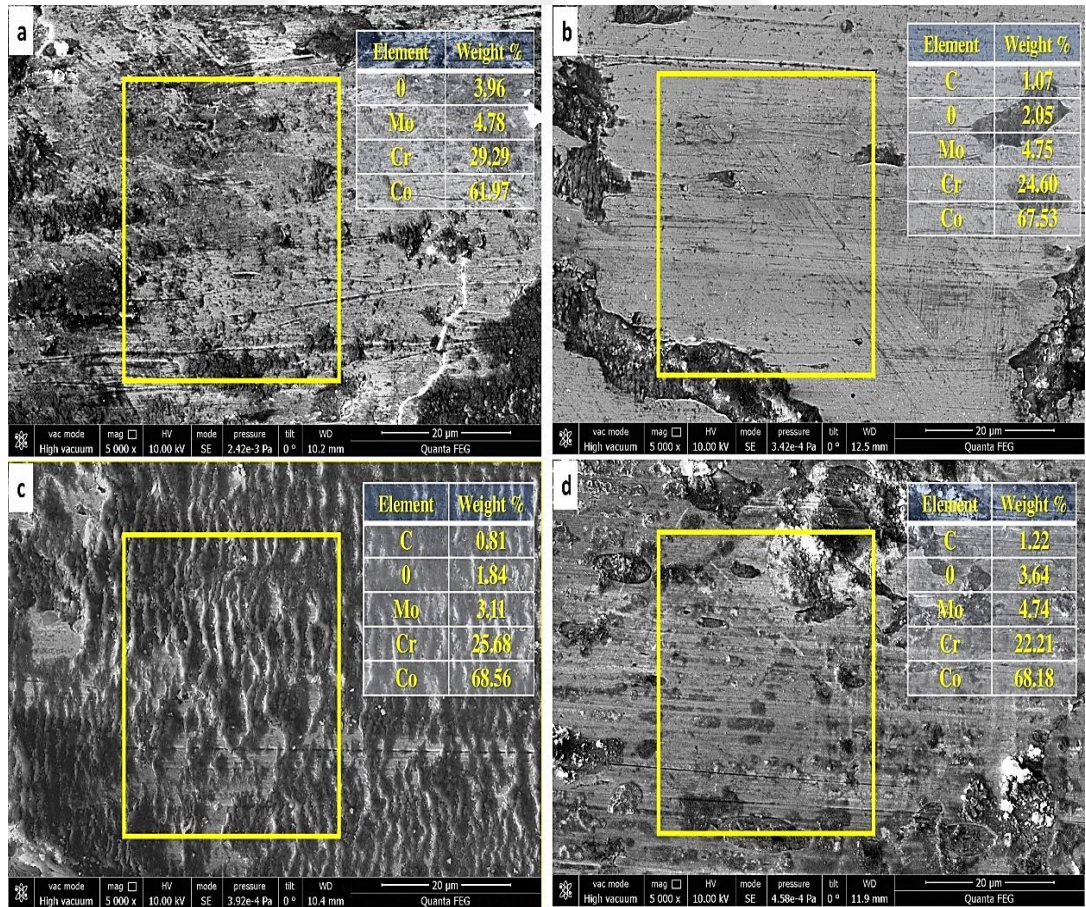
Aşınma testlerinin tamamlanmasının ardından numunelerin aşınma yüzeylerinin daha ayrıntılı incelenmesi yapılmıştır. Şekil 5.17, hem referans hem de CNP içeren numunelerin aşınma bölgesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.18 ayrıca aşınmış alandan elde edilen numunelerin EDS analizini göstermektedir. Bununla birlikte, incelenen numunelerin SEM görüntüleri, aşınma izlerinin ve plastik deformasyonun varlığını göstermektedir. Ek olarak, referans numunesindeki aşınma izinin boyutu (Şekil 5.17a), CNP içeren numunelere (Şekil 5.17b-c) kıyasla daha büyüktür. Bu durum, aşınma sürtünmesini ve etkisini en aza indirgeyen ve aşınma bilyası ile numune yüzeyi arasındaki yapışmayı artıran katı bir kayganlaştırıcı görevi gören karbonun yokluğuna atfedilebilmiştir. Daha basit ifadeyle, aşınma bilyası ile numune yüzeyi arasındaki temas alanını artırmaktadır. Ayrıca, referans alaşımının CNP içeren alaşımlara kıyasla daha düşük sertliğinin de önemli bir etkisi vardır, Islak vd. (2021b), takviye malzemesi olarak CNF içermeyen numunelerde derin aşınma izleri ve şiddetli plastik deformasyon gözlemlemiştir ve sebeple, aşınma testi sırasında katı bir kayganlaştırıcı görevi gören karbonun yokluğuna atfedilmişlerdir.



Şekil 5.17 Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F

Bununla birlikte, aşınmış yüzeyin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve numunelerin EDS analizi (Şekil 5.18), deformasyon bölgeleri ve aşınma artıklarından oluşan tipik aşınma izlerinin varlığını ortaya koymaktadır. Bu durum, aşındırıcı aşınmanın meydana geldiği gerçeğiyle uyumludur. EDS analizi, referans numunesinde (Şekil 5.18a) O, Co, Cr ve Mo elementlerinin varlığını, takviye olarak CNP içeren numunelerde ise bu elementlere ek olarak C elementinin varlığını ortaya koymaktadır (Şekil 5.18b-d). Aşınma topu numune yüzeyinde kayarken, yüzey sertleşmesi meydana gelmekte ve bu da temas halindeki yüzeyler arasında lokal yapışma ve ardından kopmaya neden olmaktadır. Bu durum, yüzey ve yüzey altı bölgelerinde deformasyon ve çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Zamanla, bu yüzey altı çatlakları birbirine bağlanarak genellikle pul veya levha şeklinde yüzey katmanının aşınmasıyla

sonuçlanmaktadır. Ek olarak, kuru kaymada, sürtünme kuvvetleri ısı üretmekte ve temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim nedeniyle numunenin ısınmasına neden olmaktadır (Sharma vd., 2020). Sonuç olarak, aşınma izleri atmosferik oksijen ile reaksiyona girerek bir oksit tabakası oluşumuna neden olmaktadır. Yüzey delaminasyon geçirdikçe, bu oksitler parçalanarak aşındırıcı özelliğe sahip keskin oksit parçacıklarına dönüşmekte ve aşınma izlerinde parlak bölgeler oluşturmaktadır. Bu parçacıklar delaminasyon sürecini hızlandırarak aşınma testi boyunca COF değerlerinde önemli bir artışa neden olmaktadır (Şekil 5.16). Bu aşınma mekanizması, yapışkan aşınma olarak sınıflandırılmaktadır. Bu durumda, yapışkan aşınma mekanizmasına bağlı delaminasyon meydana gelmiştir (Islak vd., 2021b; Sharma vd., 2020). Ancak, EDS analiziyle doğrulandığı üzere, matriks elementleri ve karbonun oksijene ek olarak varlığı, aşınma mekanizmasını yapışkan ve aşındırıcı aşınmanın bir kombinasyonuna dönüştürmektedir.

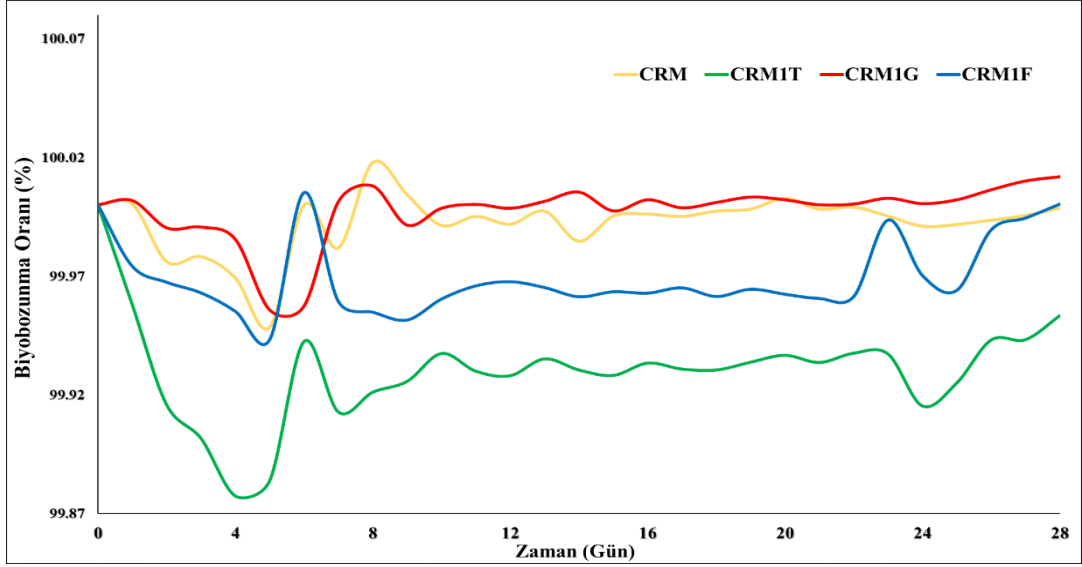


Şekil 5.18 Numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM-EDS fotoğrafı: (a) CRM, (b) CRM1T, (c) CRM1G ve (d) CRM1F

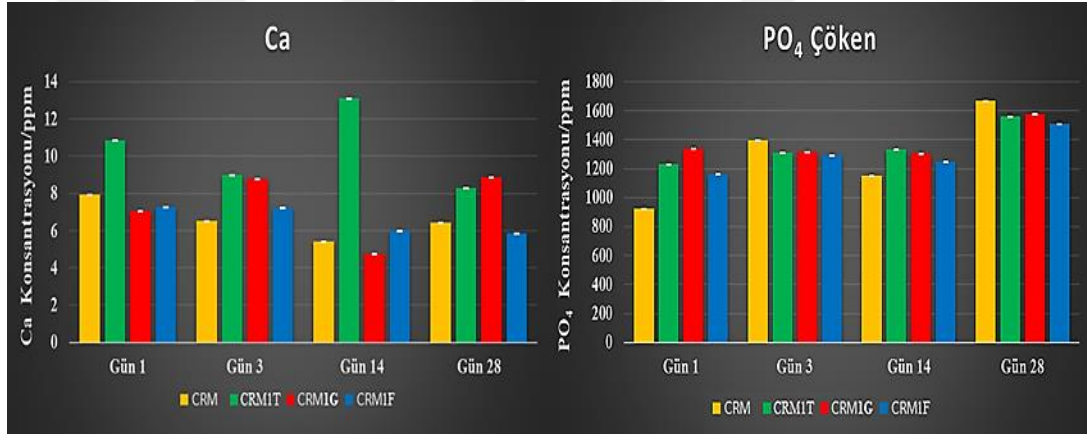
5.2.6 Biyouyumluluk Analiz Sonuçları

5.2.6.1 Biyobozunurluk analizi ve sızabilir madde analizi

CoCrMo alaşımlarının hem CNP içeren hem de içermeyenlerin fizyolojik tampon içindeki biyobozunurluk davranışı, numunelerin 37°C sıcaklıktaki fosfat tamponlu salin (PBS) içinde 28 gün boyunca inkübe edilmesiyle incelenmiştir. Şekil 5.19'de sunulan sonuçlar, biyomedikal uygulama alanında kullanım amaçlı alaşımların hiçbirinde belirgin bir kütle değişikliği gözlenmediğini ortaya koymaktadır. Dördüncü günde tüm alaşımlarda hafif bir kütle azalması gözlemlenmiş olsa da %1 CNT içeren alaşımda maksimum %0,098 kütle azalması ile, geri kalan 28 gün boyunca sabit kalmıştır. Referans numune, maksimum %0,017'lik bir kütle artışı sergilemiştir. Kütle artışı, deneysel prosedür boyunca numunelerin yüzeyinde beyaz çökeltilerin oluşumunun gözlenmesiyle doğrulanmıştır. Ölçümler sırasında azalan kütlenin tekrardan artış göstermesi ortamdaki Ca, PO₄ türlerinin konsantrasyon değişimi ile açıklanabilir (Şekil 5.20). Birbirlerine karşı reaktif olan Ca ve ortamda fosfat iyonları şeklinde bulunan fosfat birleşerek çökmektedir. Ca_x(PO₄)_y kristalleri doğal kemiğin de yapısında bulunmaktadır ve malzeme yüzeyinde bu bileşiklerin toplanabilmesi malzemelerin biyoaktif ve osseointegrasyon etki gösterebileceğine işaret etmektedir. Islak vd. (2024), 28 günlük biyobozunurluk değerlendirmesi sırasında Ti-Cu/B₄C alaşımları için benzer sonuçlara dikkat çekmişlerdir. Denemenin dördüncü gününden sonra tüm numunelerde kütle azalışı gözlemişlerdir, ardından test sonunda genel bir kütle artışı görülmüştür. Bu kütle artışını, numune yüzeylerinde ince bir kalsiyum fosfat yapısı tabakasının oluşmasına bağlamışlardır. Ek olarak, bu tabakanın kemiğin inorganik matrisine benzediğini ve osseointegrasyon destekleyen önemli bir keşif olabileceğini iddia etmişlerdir.

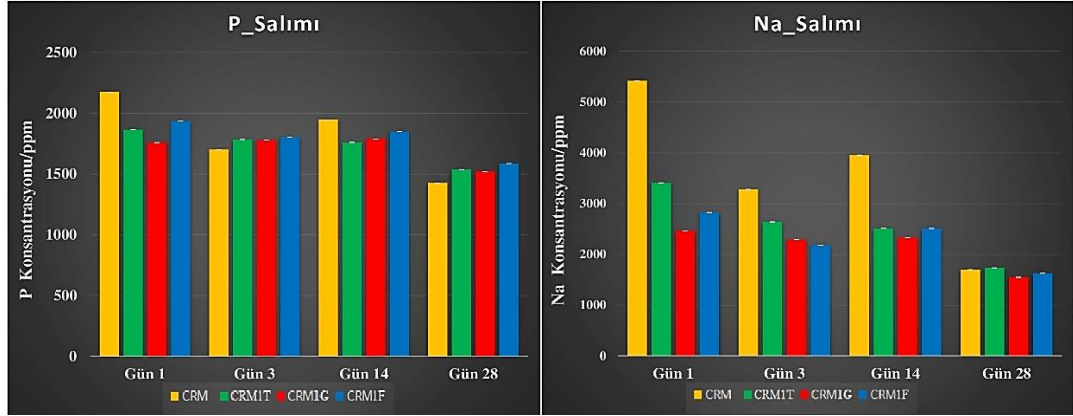


Şekil 5.19 Numunelerin biyobozunurluğu fizyolojik kütle değişiklikleri grafiği

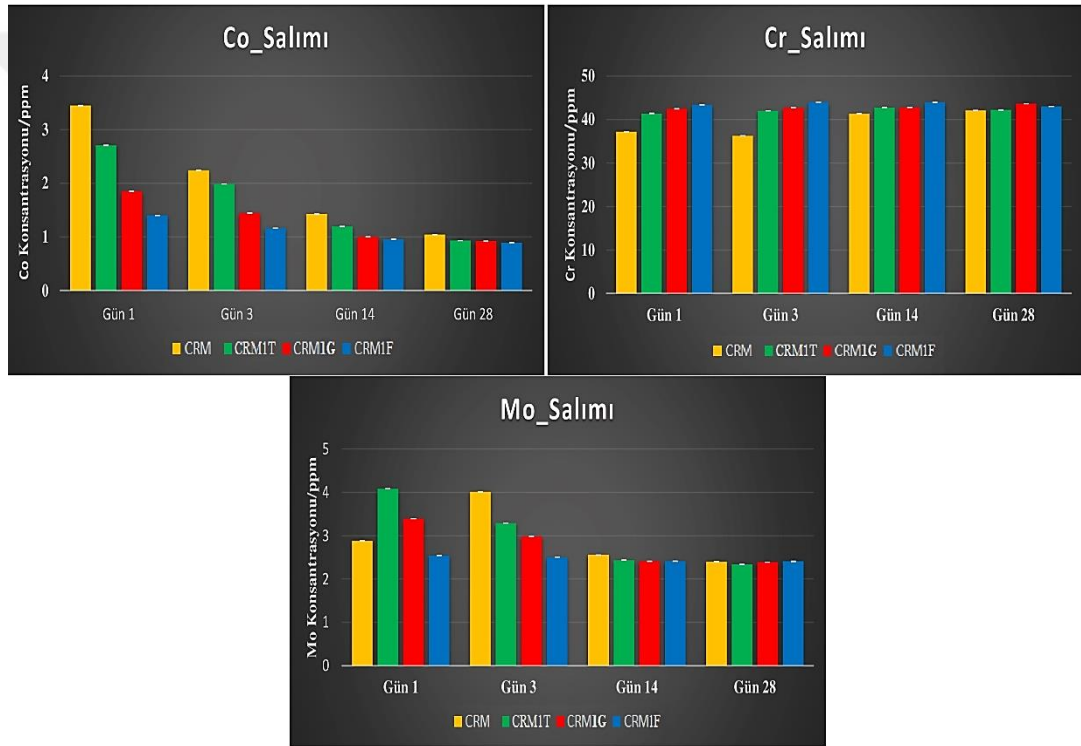


Şekil 5.20 Ortamda bulunan Ca^{2+} iyonları ile PO_4^{3-} iyonlarının konsantrasyonları

Gravimetrik analiz sırasında bozunuma ürünleri ile kompoziti oluşturan bileşenlerden sızabilecek iyonların tespiti için PBS değişimi sırasında toplanan kirli PBS temiz mikrosantrifüj tüplerinde saklanarak malzemedeki bileşenlerin akut doz salımı için 1 ve 3, uzamış salımı için 14 ve 28. Günler için ICP-OES (Spectroblue, ABD) ile konsantrasyonları belirlendi. Bu analizler ortamda bulunan sodyum (Na), fosfor (P) ve fosfat (PO_4^{3-}), ortamdaki safsızlıklardan sızması muhtemel kalsiyum (Ca) için yapıldı (Şekil 5.20 ve 5.21), ve ortama alaşımdan sızması muhtemel kobalt (Co), krom (Cr), ve molibden (Mo) (Şekil 5.22).



Şekil 5.21 ICP-OES ile fizyolojik tampon çözelti içerisinde kompozit numunelerin bozunuma davranışlarının takibinde ortamdaki (P ve Na) iyon konsantrasyonları



Şekil 5.22 ICP-OES ile fizyolojik tampon çözelti içerisinde kompozit numunelerin bozunuma davranışlarının takibinde ortamdaki sızabilen (Co, Cr, Mo) iyon konsantrasyonlarının değişimi

Malzeme içerisinde bulunmayan ancak çözelti hazırlanırken kullanılan saf su içerisinde eser miktarda bulunan kalsiyum iyonlarının zaman noktalarında farklı konsantrasyon değerlerinde olduğu görüldü (Şekil 5.20). Ortamdaki fosforun tek kaynağı PBS çözeltisi olup, fosfat iyonu şeklinde ortamda bulunmaktadır. Ortamdaki başlangıç konsantrasyonu 3097 ppm olmasına karşın bu değer ilk günden itibaren azaldığı görülmektedir. 28 günlük kültür süresince numunelerin yüzeyinde eser miktarda beyaz çökeltilerin oluştuğu görülmekle birlikte, gravimetrik analizde de iyon

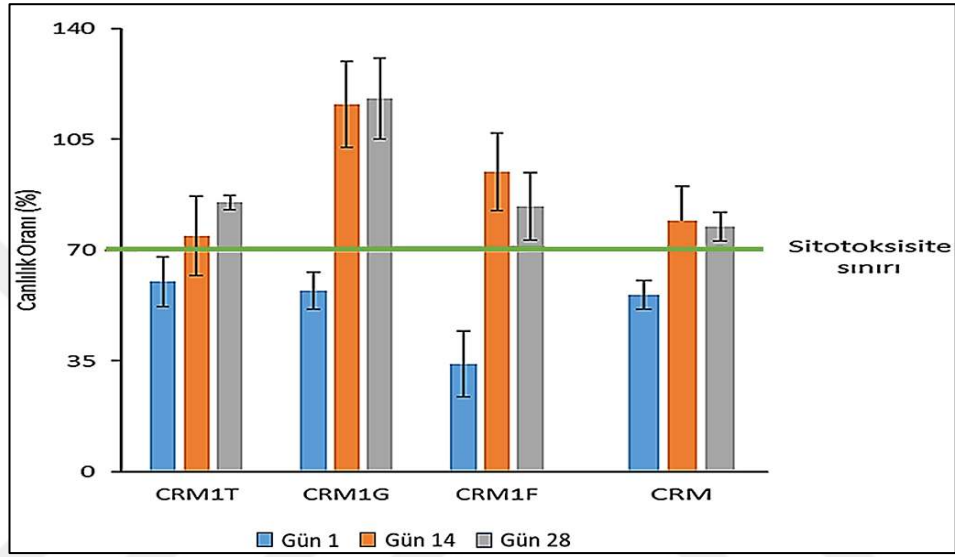
salımı olmasına karşın düşük miktarlarda kütle artışı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, ortamdaki çözeltide eser miktarda bulunan kalsiyum iyonlarının ortamdaki fosfat iyonları ile reaksiyona girerek sudaki çözünürlüğü düşük olan kalsiyum fosfat bileşiklerini oluşturduğu düşünülmektedir. Kalsiyum fosfat bileşikleri doğal kemiğin inorganik matriksinin temel bileşenidir (Islak vd., 2024). Bu bakımdan kompozit malzemelerin kalıcı implant uygulamaları için osseointegrasyon sağlayabilecek biyoaktiviteye sahip olduğu söylenebilir.

ICP-OES ile çözeltinin element içeriği analizi, kompozit yapıların PBS içerisinde ölçülebilir seviyede biyobozunurluk göstermemesine karşın, alaşımdaki krom, kobalt ve molibden iyonlarında kısmi bir sızma görülmektedir. Sızabilen ağır metal miktarı toplamda günlük olarak ~48 ppm (%0,0048) ile ~41 ppm (%0,0041) arasındadır. Buna karşın, kalsiyum fosfatların çökmesi sonucu özellikle kompozit yapılarda ~700 ppm (%0,07) oranında kütle artışı gerçekleşmiştir.

5.2.6.2 Sitotoksikite ve biyouyumluluk

Sitotoksik analizler, TS EN ISO 10993-5 (Tıbbi Cihazların Biyolojik Değerlendirmesi-Bölüm 5: Vücut Dışı Sitotoksikite Deneyleri) standardına uygun olarak mitokondriyal dehidrogenaz aktivitesini ölçmeye dayalı MTT kiti kullanılarak indirekt Eliza yöntemi ile gerçekleştirildi. Standartta tavsiye edildiği üzere analizlerde transforme olmamış sağlıklı hücreler kullanılmış olup, numunelerin kemik implantı olarak kullanılabileceği dikkate alınarak kemik iliği mezenkimal kök hücreleri (MSC) tercih edildi. Analizlenecek test materyali, kompozit numunelerin PBS çözeltisi içerisinde 24 saat bekletilmesi ile hazırlandı. PBS içerisindeki inkübasyona 28 gün boyunca devam edildi ve vasat ortamı 24 saatlik periyotlarla yenilendi. MTT analizi 1., 14. ve 28. Gün inkübasyonundan elde edilen çözeltiler için yapıldı. MTT analizi sonucunda oluşan formazan kristallerinin çözülmesi ve 570 nm de absorbans değerlerinin ölçülmesi sonucunda elde edilen veriler kullanılarak kontrole karşı canlılık oranları hesaplandı ve Şekil 5.23'deki grafikte değerlendirildi. Sonuçlara göre takviye edilmemiş CRM alaşımı, sadece akut doz olan birinci gün %55,86 canlılık oranı ile sitotoksik etki göstermişken, diğer günlerde %70'in üzerinde canlılık oranı ile sitotoksik etki göstermemiştir. Akut doz (birinci gün) için en düşük sitotoksikite

CRM1F kompoziti için %65,98 olarak hesaplandı. Test edilen kompozitler içerisinde CRM1G kompoziti, 14 ve 28. günlerde en yüksek canlılık değerlerine (sırasıyla %116,13 ve %117,89) ulaşmıştır. Bu durum, CRM içerisine CNP takviyesinin alarımın gözeneklerini doldurması nedeniyle sulu ortam ile etkileşime girecek yüzey alanını küçülttüğü ve bu nedenle iyon salımının azaldığı, dolayısıyla sitotoksik şokun azaldığı şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 5.23 CoCrMo ve CoCrMo-1% CNP numuneleri MTT reaktifi ile gerçekleştirilen sitotoksosite analiz sonuçları

ISO 10993-5 numaralı standart kapsamında bir materyalin sitotoksik olarak kabul edilebilmesi için hücre kültürü analizinde, hücre sağ kalım oranının %70'in altında olması gerekir. Bu oranın üzerindeki test numuneleri ise sitouyumlu kabul edilir ve doğrudan ya da dolaylı olarak canlı ile temaslı kullanımı için biyoyumumluluğu yeterli görülmektedir. Bu bakımdan, tüm numuneler birinci gün için sitotoksik etki göstermektedir. Ancak, üretilen kompozitlerin kalıcı implant olarak uzun süreli uygulamaları dikkate alındığında 28. Gün için yapılan analizde, tüm numunelerin yeterli biyoyumumluluğa sahip olduğu belirlendi, ek olarak 1%Gr içerek numune 14. ve 28.gunler itibaren referans numune kıyasla biyoyumumlunu yükselmiş göstermektedir. Alarım ve kompozit örneklerinin pH 7,4'te PBS ile ilk temaslarında akut olarak içerdikleri ağır metalleri (Co, Cr, Mo) ortama sızdırdıkları ICP-OES sonuçlarında görülmektedir. Bu nedenle kompozit ve alarım örneklerin sitotoksik etki gösterebildiği anlaşılmaktadır. Ancak vücutta temel eser elementler arasında olan bu elementlerin ortama salım konsantrasyonları günlük alınması önerilen değerlerin altındadır. Bu

sonuçlar literatürle uyumlamaktadır. Kassapidou vd. (2020) alışmasında, sonuçlarında zamanla CoCr bazlı alaşımdan önemli miktarda iyon salınımı olmadığını ve üretilen CoCr alaşımlarının standartlara göre hücre canlılığı sınırları içinde olduğu tespit edilmiştir. Bu karşın in vitro hücre kültürünün sınırlı çevresi ve tek soy hücre türü nedeniyle bu elementleri metabolize etmekte yetersiz kalmış olması kuvvetle muhtemeldir. Zamanla sızan madde konsantrasyonun azalması sonucu hücrelerinde metabolizma hızı olumsuz etkiyi tolere ettiği görölmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

CoCrMo matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve biyouyumluluk özelliklerinin araştırılmasını amaçlayan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Toz metalurji teknolojisi kullanılarak, CNT, Gr ve CNF ile takviye edilmiş CoCrMo matrisli kompozit malzemeler başarıyla üretilmiştir. Sinterleme işlemi inert atmosferde 1300°C'de 180 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen numunelerde herhangi bir çatlak veya süreksizlik gözlenmemiştir.
- Mikro yapı ve topografik inceleme, numunelerin mikro yapısının krom, molibden ve karbürlerin matris boyunca homojen bir şekilde dağıldığı bir kobalt matrisinden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Ek olarak, tane ve tane sınırları ve net bir şekilde gözlemlenmekte olup, karbürler tane sınırları çevresinde dağılmış durumdadır. Buna ek olarak, lameller dendritik yapının oluşumu tespit edilmiş olup.
- XRD sonuçları, referans CoCrMo alaşımının difraksiyon deseninin en yüksek tepe noktasının Co fazına ait olduğunu ve Cr fazına ait tepe noktasının da Co fazı yakınında görüldüğünü, ayrıca Mo, CoCr ve Co₇Mo₆ fazlarının tepelerinin de varlığını göstermektedir. CNP ilavesi ile, karbon diğer bileşenlerle reaksiyona girerek karbür fazları oluşturmaktadır. Bu bağlamda, CNP içeren alaşımların XRD desenlerinde Co₆Mo₆C, Cr₇C₃ ve Co₃C fazları diğer tepelerin azalmasına paralel bir şekilde göstermiştir. Ek olarak, Co tepelerinin yakınında düşük C elementi tepeleri de gözlenmiştir. Bu durum, matriste kalan reaksiyon girmemiş kalan karbonu göstermektedir.
- Yoğunluk değerlendirmesi, kompozitlerdeki CNP miktarı arttıkça deneysel ve bağıl yoğunlukların referans alaşımlara kıyasla azaldığını göstermektedir. Deneysel yoğunluklar 7,294 g/cm³ ile 6,734 g/cm³ arasında değişirken, bağıl yoğunluklar ise %85,773 ile %79,809 arasında değişiklik göstermiştir.

- Vickers mikrosertlik incelemesi, referans alaşımına kıyasla takviye olarak CNP eklendiğinde sertlik değerinin arttığını göstermektedir. Referans alaşım 102,1 Hv sertlik değeri kaydederken, optimum sertlik değeri %1 Gr ilavesi ile elde edilmiş olup 358,8 Hv olarak kaydedilmiştir.
- Tribolojik testler, alaşımlara CNP takviye olarak eklendiğinde aşınma oranı ve sşrtünme katsayısının azaldığını ortaya koymuştur. CoCrMo referans alaşımı 2×10^{-4} mm³/N*m aşınma oranına ve 0,63 sşrtünme katsayısına kaydedilmiştir. En düşük aşınma oranı ve sşrtünme katsayısı değerleri, %1 Gr içeren alaşımda gözlemlendi. Bu alaşımın aşınma oranı $0,24 \times 10^{-4}$ mm³/Nm ve sşrtünme katsayısı 0,43 olarak kaydedilmiştir. Karbon nanopartikşl içeren alaşımların tribolojik davranışındaki genel iyileşme, aşınma testi sırasında C elementinin katı yağlama etkisine bağlanabilmiştir. SEM görüntşleri ve aşınma izinin EDS analizi, aşınma mekanizmasının aşındırıcı ve yapışkan aşınmanın bir kombinasyonu olduğunu göstermektedir.
- CoCrMo alaşımı önemli biyoyumluluk özelliklerine sahip olsa da biyoyumluluk incelemesi, fizyolojik solüsyonda 28 günlük inkübasyondan sonra CNP ilavesinin olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve CoCrMo matris bazlı kompozitlerin biyoyumluluğunu daha da artırdığını göstermektedir. Biyobozunurluk testleri, tüm numunelerde neredeyse hiç kştle değişikliği olmadığını ve referans alaşımlarının yanı sıra, %1 Gr ve CNF içeren kompozitlerin 28 günlük test süresi boyunca kştle kararlılığı açısından en iyi sonucu gösterdiğini ortaya koymuştur. Numune yüzeylelerinde, kemiğin inorganik matrisine benzeyen bir kalsiyum fosfat yapısal tabakanın oluşumu gözlenmiştir. Bu tabaka, osseointegrasyonu destekleme açısından önemlidir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar kapsamında, gelecekteki araştırmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Daha kompakt kompozitler üretmek için spark plazma sinterleme, sıcak presleme, seçici lazer ergitme (SLM), seçici lazer katkı maddesi (SLA) ve seçici lazer sinterleme (SLS) teknikleri gibi çeşitli üretim yöntemleri kullanılabilir.

- Takviye için farklı karbon nanopartikül tipleri veya nanoseramik gibi diğer nanopartikül tipleri kullanılabilir.
- Üç noktalı eğme testi, çekme testi ve yüzey pürüzlülüğü gibi testleri mekanik özelliklerin daha fazla araştırılması, CNT ilavesinin CoCrMo alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde anlamak için önemlidir.
- CNP ilavesinin CoCrMo alaşımlarının korozyon davranışına etkisini incelemek için bir korozyon testi gerçekleştirilebilir.
- Karıştırma süresi, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığı gibi farklı üretim parametreleri araştırılabilir.
- Karışım içinde optimal bir CNP dağılımı elde etmek için CNP'nin CoCrMo karışımı ile ultrasonik karıştırma işlemi farklı karıştırma süreleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, R., Adzali, N. M. S., & Daud, Z. C. (2016). Bioactivity of a bio-composite fabricated from CoCrMo/bioactive glass by powder metallurgy method for biomedical application. *Procedia Chemistry*, 19, 566-570.
- Ahmadi, E., & Goodarzi, M. (2023). Evaluation of nanomechanical and nanoscratch response of Inconel 718 reinforced with graphene nanoplates produced by combined ARB-GTAW processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 432-444.
- Al-Qutub, A. M., Khalil, A., Saheb, N., & Hakeem, A. S. (2013). Wear and friction behavior of Al6061 alloy reinforced with carbon nanotubes. *Wear*, 297(1-2), 752-761.
- Al-Saleh, M. H., & Sundararaj, U. (2011). Review of the mechanical properties of carbon nanofiber/polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(12), 2126-2142.
- Argyropoulos, D. S. (2001). Wood and Cellulosic Chemistry Revised and Expanded. *Journal of the American Chemical Society*, 123(36), 8880–8881.
- ASTM B962-08. (2008). Standard test methods for density of compacted or sintered powder metallurgy (PM) products using Archimedes' principle.
- Ayyappadas, C., Muthuchamy, A., Raja Annamalai, A., & Agrawal, D. K. (2017). An investigation on the effect of sintering mode on various properties of copper-graphene metal matrix composite. *Advanced Powder Technology*, 28(7), 1760-1768.
- Bahrami, M., Fathi, M. H., & Ahmadian, M. (2015). The effect of nanobioceramic reinforcement on mechanical and biological properties of Co-base alloy/hydroxyapatite nanocomposite. *Materials Science and Engineering C*, 48, 572-578.
- Balaji, V. S., & Kumaran, S. (2014). Densification and microstructural studies of titanium-boron carbide (B4C) powder mixture during spark plasma sintering. *Powder Technology*, 264, 536-540.
- Bandaru, P. R. (2007). Electrical properties and applications of carbon nanotube structures. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 7(4-5), 1239-1267.
- Basak, A. K., Pramanik, A., & Prakash, C. (2019). Deformation and strengthening of SiC reinforced Al-MMCs during in-situ micro-pillar compression. *Materials Science and Engineering: A*, 763, 138141.
- Berthelot, J. M. (1999). *Composite Materials, Mechanical Behaviour and Structural Analysis*. New York :Springer.

- Cao, Y., Liu, W., Zhang, L., Sun, H., & Bai, P. (2022). Preparation and properties of CoCrMo-Ni@ Al₂O₃ composite by selective laser melting. *Materials Characterization*, 194, 112435.
- Carneiro, Í., Viana, F., Vieira, M. F., Valdemar Fernandes, J., & Simões, S. (2019). Characterization of Ni–CNTs nanocomposites produced by ball-milling. *Metals*, 10(1), 2.
- Caudillo, M. H. T. M., Herrera–Trejo, M., Castro, M. R., Ramírez, E., González, C. R., & Juárez, J. I. (2002). On carbide dissolution in an as-cast ASTM F-75 alloy. *Journal of Biomedical Materials Research*, 59(2), 378-385.
- Chang, S. H., Lin, L. Y., & Huang, K. T. (2020). In situ TEM observation of the microstructural characteristics and mechanical properties of vacuum hot-press sintered Co–30Cr–6Mo alloys. *Vacuum*, 176, 109333.
- Chen, Y., Li, Y., Koizumi, Y., Haider, H., & Chiba, A. (2017). Effects of carbon addition on wear mechanisms of CoCrMo metal-on-metal hip joint bearings. *Materials Science and Engineering C*, 76, 997-1004.
- Cheng, H. Y., Zhu, Y. A., Sui, Z. J., Zhou, X. G., & Chen, D. (2012). Modeling of fishbone-type carbon nanofibers with cone-helix structures. *Carbon*, 50(12), 4359-4372.
- Cihad Nazik. (2013). The production of aluminium matrix-b₄c particle reinforced composites by powder metallurgy method and investigation of their mechanical properties. Yüksek lisans Tezi. *Selçuk Üniversitesi*, Konya
- Cui, G., Li, S., Liu, H., & Gao, G. (2019). Effect of carbon on the microstructure and sliding wear performance of CoCrMo matrix composites from room temperature to 1000°C. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4778-4787.
- Das, A., & Harimkar, S. P. (2014). Effect of graphene nanoplate and silicon carbide nanoparticle reinforcement on mechanical and tribological properties of spark plasma sintered magnesium matrix composites. *Journal of Materials Science and Technology*, 30(11), 1059-1070.
- Dehaghani, M. T., Ahmadian, M., & Beni, B. H. (2015). Fabrication and characterization of porous Co-Cr-Mo/58S bioglass nano-composite by using NH₄HCO₃ as space-holder. *Materials and Design*, 88, 406-413.
- Deshpande, Harari, & Chougule. (2018, March). Fabrication and Characterization of Carbon Nano Tubes reinforced Copper Nano Composites by Powder Metallurgy Technique. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 07(01), 638–651.
- Desmaris, V., Saleem, M. A., & Shafiee, S. (2015). Examining carbon nanofibers: Properties, growth, and applications. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 9(2), 33-38.

- Din, I. U., Shaharun, M. S., Naeem, A., Alotaibi, M. A., Alharthi, A. I., Bakht, M. A., & Nasir, Q. (2020). Carbon nanofibers as potential materials for catalysts support, a mini-review on recent advances and future perspective. *Ceramics International*, 46(11), 18446-18452.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Material*. Boston: Cengage Learning,.
- Dos Santos, C., Habibe, A. F., Rodrigues, D., Minatti, J. C., Lins, J. F. C., & Dos Santos, L. A. (2014). Microstructural characterization of 66%co-28%cr-6%mo dental alloy powder obtained by high-energy ball milling. *Materials Science Forum*, 802, 51-55.
- Dwivedi, S. P., Maurya, M., Maurya, N. K., Srivastava, A. K., Sharma, S., & Saxena, A. (2020). Utilization of groundnut shell as reinforcement in development of aluminum based composite to reduce environment pollution: A review. *Novel Carbon Resource Sciences*. 7, (1), (15-25).
- Emerson, C. P. (2015). The microstructure and the electrochemical behavior of cobalt chromium molybdenum alloys from retrieved hip implants. Doktora Tezi, *Florida International Üniversitesi*. Florida.
- Faik okay. (2020). Investigation of mechanical and machinability properties of aluminum matrix boron carbide and carbon nanofiber reinforced hybrid composites. kastamonu university institute of science department of materials science and engineering. Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi*. Kastamonu
- Fang, Z. Z. (Ed.). (2010). *Sintering of advanced materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Findik, F. (2021). Nanomaterials and their applications. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(3), 62-75.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *nature materials*, 6, 183-191.
- Gupta, K. P. (2005). The Co-Cr-Mo (cobalt-chromium-molybdenum) system. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 26(1), 87-92.
- H. Okamoto; M.E. Schlesinger; E.M. Mueller. (2016).: *Alloy Phase Diagrams ASM Handbook Volume 3*. OH: ASM International.
- Hassim, M. H., Idris, M. H., Yajid, M. A. M., & Samion, S. (2019). Mechanical and wear behaviour of nanostructure TiO₂-Ag coating on cobalt chromium alloys by air plasma spray and high velocity oxy-fuel. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2290-2299.
- Henry Herman Hausne. (1982). *Handbook of Powder Metallurgy*. Gloucester: Chemical Publishing Company.

URL-1. <https://www.herkesebilimteknoloji.com/haberler/surdurulebilirlik/nano-atik-nedir-ve-neden-endiselenmeliyiz/attachment/nanometre-yazisi-o%CC%88lc%CC%A7ekler>, Erişim Tarihi; 08/05/2024

Houssain, H. M. (2014). Enhancement of Al 6061-T6 alloy surface properties using laser cladding with DWCNTs and MWCNTs. Yüksek lisans Tezi, *University of Baghdad*. Bağdat

Huang, L., Liu, B., Wang, Z., & Yuan, J. (2023). Effect of carbon nanotube content on the microstructure and mechanical properties of CNTs/TiAl alloys. *Ceramics International*, 49(5), 8196-8203.

Ibrahim, I. D., Jamiru, T., Sadiku, R. E., Kupolati, W. K., Agwuncha, S. C., & Ekundayo, G. (2015). The use of polypropylene in bamboo fibre composites and their mechanical properties - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(16), 1347-1356.

Islak, S., Houssain, H., Emin, N., Yazar, H., Danacı, H. C., & Koç, V. (2024). Microstructural, mechanical, and biocompatibility properties of Ti-Cu/B4C composites for biomedical applications. *Materials Chemistry and Physics*, 319, 129417

Islak, S., Özorak, C., Abouacha, N. M. E., Çalığülü, U., Koç, V., & Küçük, Ö. (2021). The effects of the CNF ratio on the microstructure, corrosion, and mechanical properties of CNF-reinforced diamond cutting tool. *Diamond and Related Materials*, 119, 108585.

Janas, D., & Liszka, B. (2018). Copper matrix nanocomposites based on carbon nanotubes or graphene. *Materials Chemistry Frontiers*, 2(1), 22-35.

Jang, S. H., Min, B. K., Hong, M. H., & Kwon, T. Y. (2018). Effect of different post-sintering temperatures on the microstructures and mechanical properties of a pre-sintered Co-Cr Alloy. *Metals*, 8(12), 1036.

Jeyasimman, D., Sivaprasad, K., Sivasankaran, S., & Narayanasamy, R. (2014). Fabrication and consolidation behavior of Al 6061 nanocomposite powders reinforced by multi-walled carbon nanotubes. *Powder Technology*, 258, 189-197.

Khisamov, R. K., Nazarov, K. S., Zubairov, L. R., Nazarov, A. A., Mulyukov, R. R., Safarov, I. M., ... & Huan, N. Q. (2015). Fabrication, microstructure, and microhardness of copper composites reinforced by carbon nanotubes. *Physics of the Solid State*, 57, 1206-1212.

Kilner, T., Pilliar, R. M., Weatherly, G. C., & Allibert, C. (1982). Phase identification and incipient melting in a cast Co-Cr surgical implant alloy. *Journal of Biomedical Materials Research*, 16(1), 63-79.

Kim, H. S. (2000). On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites. *Materials Science and Engineering: A*, 289(1-2), 30-33.

- Kruis, F. E., Fissan, H., & Peled, A. (1998). Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications a review. *Journal of aerosol science*, 29(5-6), 511-535.
- Kumar Jagadeesan, A., Thangavelu, K., & Dhananjeyan, V. (2020). Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties and Applications. *21st Century Surface Science - a Handbook* (P. 27). London: IntechOpen.
- Lakshmikanthan, A., Angadi, S., Malik, V., Saxena, K. K., Prakash, C., Dixit, S., & Mohammed, K. A. (2022). Mechanical and tribological properties of aluminum-based metal-matrix composites. *Materials*, 15(17), 6111.
- Leban, M. B., Kurnik, M., Kopač, I., Klug, M. J., Podgornik, B., & Kosec, T. (2023). Differences between 3-D printed and traditionally milled CoCr dental alloy from casted block in oral environment. *Electrochimica acta*, 445, 142066.
- Li, D., Jiang, X., Sun, H., Liu, T., Wu, Z., & Yang, L. (2024). Mechanical and damping properties of graphene-reinforced CuAlMn matrix laminated composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 983, 173961.
- Li, N., Yin, F., & Feng, L. (2019). Microstructure of a V-containing cobalt based alloy prepared by mechanical alloying and hot pressed sintering. *Metals*, 9(4), 464.
- M. Dawoud, M., & M. Saleh, H. (2018). Introductory Chapter: Background on Composite Materials. H. El-Din M. Saleh, M. Koller (Eds), *Characterizations of Some Composite Materials.*, (PP. 1–11). London: IntechOpen.
- M. Sonekar, M., & S. Rathod, W. (2022). Tribological Behavior of Atmospheric Plasma Sprayed HA-CNT Coatings of Biomaterials. G. Pintaude, T. Cousseau (Eds), *Tribology of Machine Elements - Fundamentals and Applications* (PP. 1–19). London: IntechOpen.
- Mallikarjuna, H. M., Kashyap, K. T., Koppad, P. G., Ramesh, C. S., & Keshavamurthy, R. (2016). Microstructure and dry sliding wear behavior of Cu-Sn alloy reinforced with multiwalled carbon nanotubes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1755-1764.
- Malaki, M. (2021). An Insight Into Metal Matrix Composites With Nano Size Reinforcement. Dermot Brabazon (Eds) *Encyclopedia of Materials: Composites* (pp. 42–51). Oxford: Elsevier.
- Mohan, V. (2016). Development of functional polymer-graphene nanocomposites, Doctora tezi, *Auckland Üniversitesi Research Space*, Auckland.
- Mohan, V. B., Brown, R., Jayaraman, K., & Bhattacharyya, D. (2015). Characterisation of reduced graphene oxide: Effects of reduction variables on electrical conductivity. *Materials Science and Engineering: B*, 193, 49-60.
- Mohan, V. B., Lau, K. T., Hui, D., & Bhattacharyya, D. (2018). Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. *Composites Part B: Engineering*, 142, 200-220.

- Murty, B. S., Shankar, P., Raj, B., Rath, B. B., & Murday, J. (2013). *Textbook of nanoscience and nanotechnology*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Musaddique, M., Rafique, A., & Iqbal, J. (2011). Production of Carbon Nanotubes by Different Routes-A Review. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 1, 29-34.
- Naseer, A., Ahmad, F., Ali, S., & Haider, W. (2022). Powder injection molded nano copper oxide grafted graphene reinforced copper matrix composites. *Powder Technology*, 397, 117101.
- Nassar, A. E., & Nassar, E. E. (2017). Properties of aluminum matrix Nano composites prepared by powder metallurgy processing. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29(3), 295-299.
- Newsam, J. M., Jacobson, A. J., McCandlish, L. E., & Polizzotti, R. S. (1988). The structures of the η -carbides $\text{Ni}_6\text{Mo}_6\text{C}$, $\text{Co}_6\text{Mo}_6\text{C}$, and $\text{Co}_6\text{Mo}_6\text{C}_2$. *Journal of Solid State Chemistry*, 75(2), 296-304.
- Ni, D. R., Geng, L., Zhang, J., & Zheng, Z. Z. (2008). Fabrication and tensile properties of in situ TiBw and TiCp hybrid-reinforced titanium matrix composites based on Ti-B4C-C. *Materials Science and Engineering A*, 478(1-2), 291-296.
- Nová, K., Novák, P., & Dvorský, D. (2017). Influence of alloying elements on the mechanical properties of a cobalt-based alloy produced with powder metallurgy. *Materiali in Tehnologije*, 51(3), 443-447.
- Okay, F., & Islak, S. (2021). Effects of Cutting Parameters in Drilling Process Applied to Boron Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composite Material. *Manufacturing Technologies and Applications*, 2(1), 2717-7475.
- Oleszak, D. (1999). Mechanical alloying-a novel method for synthesis and processing of materials. *Acta Physica Polonica A*, 96(1), 101-112.
- Ouyang, S. Hui, Liu, B., Liu, y., Zan, X., Liang, X. Peng, & Li, Z. (2019). Dynamic tensile behavior of PM Ti-47Al-2Nb-2Cr-0.2W intermetallics at elevated temperatures. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 29(6), 1252-1262.
- Peng, T., & Chang, I. (2015). Uniformly dispersion of carbon nanotube in aluminum powders by wet shake-mixing approach. *Powder Technology*, 284, 32-39.
- Poolphol, N., Sakkaew, T., Kachin, K., Jantaratana, P., & Vittayakorn, W. (2017). Physical, mechanical and magnetic properties of cobalt-chromium alloys prepared by conventional processing. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 6358-6364.
- Kassapidou, M., Hjalmarsson, L., Johansson, C. B., Johansson, P. H., Morisbak, E., Wennerberg, A., & Stenport, V. F. (2020). Cobalt-chromium alloys fabricated with four different techniques: Ion release, toxicity of released elements and surface roughness. *Dental Materials*, 36(11), e352-e363.

- Kumar, H. P., & Xavior, M. A. (2014). Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review. *Procedia Engineering*, 97, 1033-1040.
- Pustovalov, V. K., & Babenko, V. A. (2004). Optical properties of gold nanoparticles at laser radiation wavelengths for laser applications in nanotechnology and medicine. *Laser Physics Letters*, 1(10), 516-520.
- Radhamani, A. V., Lau, H. C., & Ramakrishna, S. (2018). CNT-reinforced metal and steel nanocomposites: A comprehensive assessment of progress and future directions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 170-187.
- Randall, M. G. (1994). *Powder metallurgy science*. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- German, R. M. (2003). Strength evolution in debinding and sintering. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Science, Technology & Applications of Sintering*, 15-17, Pennsylvania.
- Razavi, M., Farajipour, A. R., Zakeri, M., Rahimipour, M. R., & Firouzbakht, A. R. (2017). Production of Al₂O₃-SiC nano-composites by spark plasma sintering. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 56(4), 186-194.
- Nagavally, R. R. (2017). Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Int. J. Mech. Prod. Eng*, 5(9), 82-87.
- Rosenthal, R., Cardoso, B. R., Bott, I. S., Paranhos, R. P. R., & Carvalho, E. A. (2010). Phase characterization in as-cast F-75 Co-Cr-Mo-C alloy. *Journal of Materials Science*, 45(15), 4021-4028.
- Sahasrabudhe, H., Traxel, K. D., & Bandyopadhyay, A. (2021). Understanding wear behavior of 3D-Printed calcium phosphate-reinforced CoCrMo in biologically relevant media. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 120, 104564.
- Sánchez-De Jesús, F., Bolarín-Miró, A. M., Torres-Villaseñor, G., Cortés-Escobedo, C. A., & Betancourt-Cantera, J. A. (2010). Mechanical alloying of biocompatible Co-28Cr-6Mo alloy. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21(7), 2021-2026.
- Saxena, A., Saxena, K. K., Jain, V. K., Rajput, S. K., & Pathak, B. N. (2023). A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Scharf, T. W., Neira, A., Hwang, J. Y., Tiley, J., & Banerjee, R. (2009). Self-lubricating carbon nanotube reinforced nickel matrix composites. *Journal of Applied Physics*, 106(1), 013508.
- Schedin, F., Geim, A. K., Morozov, S. V., Hill, E. W., Blake, P., Katsnelson, M. I., & Novoselov, K. S. (2007). Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nature Materials*, 6(9), 652-655.

- Shanmugavel, R., Chinthakndi, N., Selvam, M., Madasamy, N., Shanmugakani, S. K., Nair, A., ... & Dixit, S. (2022). Al-Mg-MoS₂ reinforced metal matrix composites: Machinability characteristics. *Materials*, 15(13), 4548.
- Sharma, A., Fujii, H., & Paul, J. (2020). Influence of reinforcement incorporation approach on mechanical and tribological properties of AA6061- CNT nanocomposite fabricated via FSP. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 604-620.
- Sharma, S., Patyal, V., Sudhakara, P., Singh, J., Petru, M., & Ilyas, R. A. (2021). Mechanical, morphological, and fracture-deformation behavior of MWCNTs-reinforced (Al-Cu-Mg-T351) alloy cast nanocomposites fabricated by optimized mechanical milling and powder metallurgy techniques. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 65-85.
- Singh, R., Singh, S., & Hashmi, M. S. J. (2016). Implant Materials and Their Processing Technologies. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Oxford: Elsevier.
- Soltani, I., Smith, S. D., & Spontak, R. J. (2017). Effect of polyelectrolyte on the barrier efficacy of layer-by-layer nanoclay coatings. *Journal of Membrane Science*, 526, 172-180.
- Sun, S. H., Koizumi, Y., Kurosu, S., Li, Y. P., Matsumoto, H., & Chiba, A. (2014). Build direction dependence of microstructure and high-temperature tensile property of Co-Cr-Mo alloy fabricated by electron beam melting. *Acta Materialia*, 64, 154-168.
- Şimşek, İ. (2019). The effect of B₄C amount on wear behaviors of Al-Graphite/B₄C hybrid composites produced by mechanical alloying. *Journal of Boron*, 4(2), 100-106.
- Mohd Tajuddin, M. T., & Jamaludin, S. B. (2016). The effect of sintering temperature to the microstructure of PM F75 (Co-Cr-Mo) alloy. *Materials Science Forum* (pp. 242-245). Bangi: Trans Tech Publications Ltd.
- Tanzi, M. C., Farè, S., & Candiani, G. (2019). Biomaterials and Applications. *Foundations of Biomaterials Engineering* (pp. 199–287). California: Academic press.
- Taya, M., & Arsenault, R. J. (2016). *Metal matrix composites: thermomechanical behavior*. Oxford: Elsevier.
- Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T. W. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites science and technology*, 61(13), 1899-1912.
- Țîlmaciu, C. M., & Morris, M. C. (2015). Carbon nanotube biosensors. *Frontiers in chemistry*, 3, 59.

- Torres, D., Pérez-Rodríguez, S., Sebastián, D., Pinilla, J. L., Lázaro, M. J., & Suelves, I. (2020). Graphene oxide nanofibers: A nanocarbon material with tuneable electrochemical properties. *Applied Surface Science*, 509, 144774.
- Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge : Cambridge Int Science Publishing.
- URL-2. <https://www.pm-review.com/introduction-to-powder-metallurgy/the-powder-metallurgy-process/>, Erişim Tarihi; 05/16/2024
- URL-3. <https://nanografi.com/>, Erişim Tarihi; 05/16/2024
- URL-4. <http://timesnano.com/en/product.php?prt=3,29,50>, Erişim Tarihi; 05/16/2024
- Vittayakorn, W., Poolphol, P., Aimprakod, K., & Maluangnont, T. (2021). Processing Development and Properties of Cobalt-Chromium Alloys Fabricated by Traditional Method. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2629-2634.
- Wang, H., Zhang, Z. H., Hu, Z. Y., Wang, F. C., Li, S. L., Korznikov, E., ... & Kang, Z. (2016). Synergistic strengthening effect of nanocrystalline copper reinforced with carbon nanotubes. *Scientific reports*, 6(1), 26258.
- Wang, R. M., Zheng, S. R., & Zheng, Y. G. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Oxford: Elsevier.
- Yadav, D., Amini, F., & Ehrmann, A. (2020). Recent advances in carbon nanofibers and their applications—a review. *European Polymer Journal*, 138, 109963.
- Yamanaka, K., Mori, M., Kuramoto, K., & Chiba, A. (2014). Development of new Co-Cr-W-based biomedical alloys: Effects of microalloying and thermomechanical processing on microstructures and mechanical properties. *Materials and Design*, 55, 987-998.
- Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D. J., Kuiper, P., & de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, 53-68.
- Zaman, H. A., Sharif, S., Kim, D. W., Idris, M. H., Suhaimi, M. A., & Tumurkhuyag, Z. (2017). Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys - A Review. *Procedia Manufacturing*, 11, 563-570.
- Zhan, K., Wang, W., Li, F., Cao, J., Liu, J., Yang, Z., ... & Zhao, B. (2023). Microstructure and properties of graphene oxide reinforced copper-matrix composite foils fabricated by ultrasonic assisted electrodeposition. *Materials Science and Engineering: A*, 872, 144995.
- Zhao, C., Zhou, J., Mei, Q., & Ren, F. (2019). Microstructure and dry sliding wear behavior of ultrafine-grained Co-30 at% Cr alloy at room and elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 770, 276-284.

Zhao, W., Bao, R., Yi, J., Tao, J., Liu, Y., Fang, D., & Liu, C. (2019). Fabrication of CNT/Cu based composite with twice in-situ formation from powder preparation to sintering. *Materials Research Express*, 6(9), 095088.

