T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Cu10Sn + ZrO_2 + CNT HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE MİKROYAPI - MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

EMRE İNCE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

EKİM - 2023
KASTAMONU

TAAHHÜTNAME

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

Emre İNCE

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cu10Sn + ZrO_2 + CNT HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE MİKROYAPI - MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

EMRE İNCE

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

Saf malzemelerle karşılaştırıldığında mükemmel mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle, son zamanlarda nanokompozit malzemeler araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Bronz malzemeler iyi elektriksel ve termal iletkenliklere sahiptir. Bununla birlikte, düşük mukavemet, sertlik ve aşınma direnci nedeniyle endüstriyel uygulamalarda zaman zaman problemler yaşanmaktadır. Bu sorunu çözmek için bilim adamları, yüksek mukavemet ve sertlik ve aşınma direncine sahip bronz esaslı kompozit üretmeyi başarmıştır. Bu çalışmada, bronz matrisli hibrit nanokompozitler toz metalurjisi metodu ile üretilmiştir. Çalışmada matris malzemesi olarak ön alaşımlı Cu10Sn tozları ile takviye malzemeleri olarak karbon nanotüp (CNT) ve Zirkonya (ZrO_2) kullanılmıştır. Üretilen hibrit nanokompozitlerin mikroyapısal – mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda sertlik ve aşınma davranışı özelinde takviye oranlarına göre Zirkonya takviyesinin olumlu etkileri olduğu tespit edilirken, CNT takviyesinin olumsuz etkileri olduğu görülmüş, hibrit kompozitlerde ise her iki takviye özelliklerinin ortalaması mekanik özellikler gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Bronz, CNT, ZrO_2, Hibrit nanokompozit, Toz metalurjisi

Eylül 2023, 95 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

FABRICATION OF Cu10Sn + ZrO_2 + CNT HYBRID NANOCOMPOSITES BY POWDER METALLURGY AND INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES

EMRE İNCE

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. HAKAN ADA

Due to their excellent mechanical and electrical properties compared to pure materials, nanocomposite materials have recently attracted the attention of researchers. Bronze materials have good electrical and thermal conductivities. However, due to their low strength, hardness and wear resistance, industrial applications sometimes have problems. To solve this problem, scientists have succeeded in producing bronze-based composites with high strength, hardness and wear resistance. In this study, bronze matrix hybrid nanocomposites were produced by the powder metallurgy method. Pre-alloyed Cu10Sn powders were used as matrix material and carbon nanotubes (CNT) and Zirconia (ZrO_2) were used as reinforcement materials. The microstructural and mechanical properties of the hybrid nanocomposites were investigated. As a result of the study, it was found that Zirconia reinforcement had positive effects on hardness and wear behaviour according to reinforcement ratios, while CNT reinforcement had negative effects, and hybrid composites exhibited properties that were the average of both reinforcement properties.

KEYWORDS: Bronze, CNT, ZrO_2, Hybrid Nanocomposite, Powder Metallurgy

September 2023, 95 Page

TEŞEKKÜR

Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Programı'nda 2019 güz yarıyılından bugüne kadar sürdürmüş olduğum yüksek lisans eğitimimde, şahsıma göstermiş olduğu her türlü ilgi ve destek nedeniyle saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Tez çalışmalarım süresince kendisine sürekli danıştığım ve yönlendirmelerinden istifade ettiğim değerli hocam Sayın Doç. Dr. Arif UZUN'a ve tezime yaptığı katkılar nedeniyle jüri üyesi Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Her zaman desteğini hissettiğim arkadaşım Serkan ÖZSOY'a da teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlıklarına teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, bugünlere ulaşmamda maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta rahmetli babam ve annem olmak üzere kardeşlerime de çalışmalarım süresince göstermiş oldukları sabır ve anlayıştan dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

EMRE İNCE

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ... **ii**
TAAHHÜTNAME ... **iii**
ÖZET ... **iv**
ABSTRACT ... **v**
TEŞEKKÜR ... **vi**
İÇİNDEKİLER ... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ... **xiii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ... **xiv**
1. GİRİŞ ... **1**
2. TOZ METALURJİSİ ... **6**
3. BAKIR VE BRONZ ALAŞIMLARI ... **9**
3.1 Bakır ve Alaşımları ... 9
3.2 Bronz Alaşımları ... 9
4. KOMPOZİT MALZEMELER ... **11**
4.1 Kompozit Malzeme Türleri ... 13
4.1.1 Büyük Difüzyon Kompozitleri ... 13
4.1.2 Yüksek Performanslı Kompozitler ... 13
5. BRONZ MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER ... **14**
5.1 Bronz Matrisli Kompozit Malzemeler ... 14
5.2 Bronz Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretiminde Kullanılan Takviye Malzemeler ... 14
5.2.1 Silisyum Karbür (SiC) ... 14
5.2.2 Bor Karbür (B_4C) ... 14
5.2.3 Alümina (Al_2O_3) ... 15
5.2.4 Grafen (GNP) ... 15
5.2.5 Zirkonyum Oksit (ZrO_2) ... 16
5.2.6 Karbon Nano Tüp (CNT) ... 16
6. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI ... **18**
7. YÖNTEM ... **24**
7.1 Mikroyapısal Karakterizasyon ... 27
7.2 Mekanik Karakterizasyon ... 28
8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA ... **30**
8.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları ... 30
8.2 Mikroyapı İncelemeleri ... 31
8.2.1 OM İncelemeleri ... 31
8.2.1.1 OM görüntülerinin genel değerlendirmesi ... 42
8.2.2 SEM İncelemeleri ... 43
8.2.2.1 SEM incelemelerinin genel değerlendirmesi ... 52
8.3 EDS İncelemeleri ... 53
8.4 XRD Analizleri ... 70
8.5 Sertlik Testi Sonuçları ... 72
8.5.1 Makrosertlik Sonuçları ... 72
8.5.2 Mikrosertlik Sonuçları ... 74

8.6 Aşınma Testi Sonuçları 76
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 88
KAYNAKLAR 90
ÖZGEÇMİŞ 95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Toz metalurjisinin basit adımları 8
Şekil 3.1 Bakır-Kalay faz sıcaklık grafiği 10
Şekil 7.1 Gezegen hareketli bilyeli öğütücü 25
Şekil 7.2 a) Kalıplar b) Specac GS15011 hidrolik pellet presi 26
Şekil 7.3 Üretimi gerçekleştirilen kompozit numunelerin görüntüsü 26
Şekil 7.4 Bakalite alınan numuneler 27
Şekil 7.5 Leica marka DM4000 optik mikroskop 27
Şekil 7.6 Jeol marka JSM 6060 LV taramalı elektron mikroskobu 28
Şekil 7.7 Bruker marka D8 Advance XRD cihazı 28
Şekil 7.8 Deneylerde kullanılan sertlik ve aşınma cihazları 29
Şekil 8.1 Hibrit nanokompozit malzemelerin bağıl yoğunluk grafiği 30
Şekil 8.2 Hibrit nanokompozit malzemelerin gözeneklilik grafiği 31
Şekil 8.3 1 numaralı deney numunesinin (%100 Cu10Sn) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 32
Şekil 8.4 2 numaralı deney numunesinin (%97,5 Cu10Sn + %2,5 ZrO2) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 33
Şekil 8.5 3 numaralı deney numunesinin (%95 Cu10Sn + %5 ZrO2) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 33
Şekil 8.6 4 numaralı deney numunesinin (%90 Cu10Sn + %10 ZrO_2) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 34
Şekil 8.7 5 numaralı deney numunesinin (%99,5 Cu10Sn + %0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 35
Şekil 8.8 6 numaralı deney numunesinin (%99 Cu10Sn +%1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 35
Şekil 8.9 7 numaralı deney numunesinin (%98 Cu10Sn +%2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 36
Şekil 8.10 8 numaralı deney numunesinin (%97 Cu10Sn + %2,5 ZrO_2 +%0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 37
Şekil 8.11 9 numaralı deney numunesinin (%96,5 Cu10Sn + %2,5 ZrO_2 +%1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 37
Şekil 8.12 10 numaralı deney numunesinin (%95,5 Cu10Sn + %2,5 ZrO_2 +%2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme 38

Şekil 8.13 11 numaralı deney numunesinin (%94,5 Cu10Sn +%5 ZrO_2 +%0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme..... 39
Şekil 8.14 12 numaralı deney numunesinin (%94 Cu10Sn + %5 ZrO_2 + %1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme..... 39
Şekil 8.15 13 numaralı deney numunesinin (%93 Cu10Sn + %5 ZrO_2 +%2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme..... 40
Şekil 8.16 14 numaralı deney numunesinin (%89,5 Cu10Sn + %10 ZrO_2 +%0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme..... 41
Şekil 8.17 15 numaralı deney numunesinin (%89 Cu10Sn + %10 ZrO_2 + %1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme..... 41
Şekil 8.18 16 numaralı deney numunesinin (%88 Cu10Sn + %10 ZrO_2 + %2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme..... 42
Şekil 8.19 1 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 43
Şekil 8.20 2 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 44
Şekil 8.21 3 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 44
Şekil 8.22 4 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 45
Şekil 8.23 5 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 46
Şekil 8.24 6 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 46
Şekil 8.25 7 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 47
Şekil 8.26 8 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 48
Şekil 8.27 9 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 48
Şekil 8.28 10 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 49
Şekil 8.29 11 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 49
Şekil 8.30 12 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 50
Şekil 8.31 13 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 50
Şekil 8.32 14 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 51
Şekil 8.33 15 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 51

Şekil 8.34 16 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri 52
Şekil 8.35 1 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 54
Şekil 8.36 2 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 55
Şekil 8.37 3 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 56
Şekil 8.38 4 numaralı demey numunesinin EDS grafik ve sonuçları 57
Şekil 8.39 5 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 58
Şekil 8.40 6 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 59
Şekil 8.41 7 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 60
Şekil 8.42 8 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 61
Şekil 8.43 9 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 62
Şekil 8.44 10 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 63
Şekil 8.45 11 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 64
Şekil 8.46 12 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 65
Şekil 8.47 13 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 66
Şekil 8.48 14 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 67
Şekil 8.49 15 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 68
Şekil 8.50 16 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları..... 69
Şekil 8.51 Mono kompozit numunelerin XRD analizleri 70
Şekil 8.52 Hibrit kompozit numunelerin XRD analizleri 71
Şekil 8.53 Kompozit malzemelerin makrosertlik ölçümü 72
Şekil 8.54 Makrosertlik grafiği 73
Şekil 8.55 Kompozit malzemelerin mikrosertlik ölçümü 74
Şekil 8.56 Mikrosertlik grafiği..... 75
Şekil 8.57 Aşınma testi sonrası ağırlık kaybı grafiği 77
Şekil 8.58 1 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 78
Şekil 8.59 2 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 79
Şekil 8.60 3 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 79
Şekil 8.61 4 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 80
Şekil 8.62 5 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 81
Şekil 8.63 6 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 81
Şekil 8.64 7 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 82
Şekil 8.65 8 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 83
Şekil 8.66 9 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 83
Şekil 8.67 10 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 84
Şekil 8.68 11 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 84
Şekil 8.69 12 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 85

Şekil 8.70 13 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 85
Şekil 8.71 14 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 86
Şekil 8.72 15 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 86
Şekil 8.73 16 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme 87

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 7.1 Çalışmada kullanılan tozların ağırlıkça yüzdeleri 25
Tablo 8.1 Aşınma sonrası ağırlık kaybı tablosu..... 76

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	**:** Santigrat Derece
Al_2O_3	**:** Alüminyum Oksit
CNT	**:** Karbannanotüp
Cu	**:** Bakır Elementi
HF	**:** Hidroflorik Asit
HNO_3	**:** Nitrik asit
N	**:** Newton
Sn	**:** Kalay Elementi
T_m	**:** Ergime Derecesi
Zr	**:** Zirkonyum
ZrO_2	**:** Zirkonyum Oksit
µm	**:** Mikrometre

Kısaltmalar

cm	**:** Santimetre
dk	**:** Dakika
EDS	**:** Enerji Dağılımlı Spektroskopi
ITAB	**:** Isının Tesiri Altında Kalan Bölge
MA	**:** Mekanik Alaşımlama
mm	**:** Milimetre
MMK	**:** Metal Matrisli Kompozitler
S/N	**:** Sinyal/Gürültü
SEM	**:** Taramalı Elektron Mikroskop
TM	**:** Toz Metalurjisi
XRD	**:** X-ışını Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Nanokompozit malzemeler, son zamanlarda saf malzemeler ile karıştırıldığında mükemmel elektriksel, mekanik, tribolojik, korozyon ve termal, özellikleri nedeniyle (Abu-Oqail vd., 2019) araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Abd-Elwahed ve Meselhy, 2020).

Metal matrisli kompozitler, geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında; uygun takviyelerle mekanik özellikleri iyileştirmek için bir alternatif sunar. Metal matrisli kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, bronz matrisli kompozitlerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri bilgimiz dâhilinde henüz detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bu kompozitlerin yaygın ticari kullanımı, mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir (Fathy ve El-Kady, 2013).

Metallerin birçok uygulamasında termal iletkenlik, elektrik iletkenliği ve ısı transferi önemli bir parametredir. Saf bakırın (Cu) elektriksel ve termal iletkenliği de mükemmel boyuttadır. Bu özelliğinin yanı sıra düşük mukavemetinden dolayı da modern endüstride kullanılmaktadır. Bakırın mukavemet sorununun çözülmesi için bilim insanları, ısı değişim malzemesi, yüksek hızlı yörüngeler ve havai iletkenler dâhil olmak üzere, yeni uygulamalarda kullanılabilen Cu bazlı kompozitler üretmeyi başarmışlardır. Hibrit kompozitler, tek takviyeli kompozitlere kıyasla gelişmiş özelliklere sahiptir. Ayrıca, özellikle yüksek mukavemet ve yüksek iletkenlik gerektiren belirli amaçlar için tasarım gereksinimlerini karşılaması için tasarımcıya daha fazla serbestlik derecesi sağlamaktadır. Bunun nedeni, mevcut seramiklerin termal genleşme, aşınma ve mekanik özelliklerinde büyük farklılıklar ve iyi darbe direnci sağlamasıdır (Abd-Elwahed ve Meselhy, 2020). Bu tür malzemelerin özellikleri, parçacık boyutu ve matris içindeki nanoparçacıkların dağılımı, takviye ve matris fazlarının özellikleri ve üretim süreci gibi birçok parametreye bağlıdır (Abu-Oqail vd., 2019).

Bakır, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği (Sorkhe vd., 2014), üstün korozyon direnci, üretim kolaylığı (Ružić vd., 2013) nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Tu vd.,

2002). Ancak saf bakırın çekme - akma dayanımı gibi mekanik özellikleri çok iyi değildir. İnce seramik parçacıkların oksit veya karbürler şeklinde bakıra dâhil edilmesi, yüksek mukavemet ve sertlik sağlar, ancak elektriksel iletkenlikte nispeten küçük bir kayba neden olabilir. Dağıtılmış takviye parçacıkların matris güçlendirme ve mukavemet tutmadaki etkinliği, öncelikle boyut, dağılım, boşluk, termodinamik kararlılık, çözünürlük ve yayılma gibi parçacık özelliklerine bağlıdır: Oksit fazları arasında, bakır matrise alümina eklenmesi çok yaygındır. Bunun nedeni, hem yüksek sıcaklıklarda kararlı, hem de ucuz olmasıdır (Fathy, vd., 2012).

Günümüzde Cu bazlı kompozitlerin geliştirilmesindeki ana hedef, iyi mekanik mukavemet, yüksek elektriksel iletkenlik ve mükemmel termal kararlılığın optimal bir kombinasyonunu sağlamaktır. Üstün özelliklerinden dolayı, bu kompozitler nokta kaynak elektrotları, elektrik konnektörleri, kurşun çerçeveler, kızaklar ve diğer cihazlar gibi yüksek sıcaklık malzemeleri için en iyi aday haline gelmektedir. Bu malzemeler genellikle farklı güçlendirme mekanizmaları açısından iki kategoriye ayrılmaktadır. Birincisi çökelme ile güçlendirilmiş Cu bazlı kompozitler, ikincisi ise dağılma ile güçlendirilmiş Cu bazlı kompozitlerdir. Etkili güçlendirme için, ikinci faz parçacıklarının (dispersoid) termodinamik olarak kararlı olması, 5-50 nm'lik tipik boyutları ile ince olması ile hareketli dislokasyonların parçacıklarla doğrudan etkileşimi sağlanabilir. Böylece takviye malzeme matris taneleri içinde ve tane sınırlarında homojen olarak dağılarak güçlendirme sağlamış olur. Mükemmel performansa sahip metal matrisli kompozitler elde etmek için, ince takviye parçacıklarının üniform dağılımı ve boyutunu korumak önemli bir gerekliliktir (Wagih ve Fathy, 2017).

Arayüz uyumluluğunu iyileştirmek ve ciddi reaksiyonlardan kaçınmak ve yüksek performanslı kompozitler imal etmek için çeşitli yeni işleme teknikleri kullanılmaktadır. Son zamanlarda, seramik parçacık takviyeli metal matris kompozitleri imal etmek için yerinde bir teknik geliştirilmiştir. Bu tekniğin temel prensibi, ince ve termodinamik olarak kararlı seramik fazların, elementler arasında veya bir metal matris içindeki element ve bileşikler arasındaki ekzotermik reaksiyon tarafından yerinde oluşturulmasıdır. Yerinde işlemin avantajı, yerinde üretilen takviye yüzeylerinin gaz absorpsiyonu, oksidasyon ve diğer zararlı yüzey reaksiyonları gibi

kontaminasyonlardan uzak kalma eğiliminde olmasıdır. Bu nedenle, gelişmiş bir takviye-matris arayüz bağı elde edilebilir. Bu kompozitler, gelişmiş mekanik mukavemet, sertlik ve ayrıca gelişmiş aşınma direnci sergiler (Tu vd., 2002).

Ancak saf halde nispeten düşük akma dayanımı ve yorulma direnci gösterir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi veya bu iki mekanizmanın kombinasyonu, çökelme sertleştirmesi (dispersiyon sertleştirme) ile sağlanır (Ružić vd., 2013). Çökelme sertleştirmeli alaşımlar, oda sıcaklığında iyi elektriksel ve termal özellikleri korurken, daha yüksek mukavemet değerleri sunar. Bu alaşım grubu için ısıl işlemler, gerekli mekanik ve elektriksel özellikleri geliştirecek şekilde tasarlanmalıdır. Ortaya çıkan sertlik ve mukavemet hem çözeltiyle söndürmenin etkinliğine, hem de çözeltiyle söndürmenin ve eskitme işleminin kontrolüne bağlıdır. Bu alaşımların daha üstün mekanik özellikleri, hızlı katılaşma işlemi uygulanarak elde edilir. Dispersiyon ile güçlendirmenin birtakım avantajları vardır. İkinci fazlar genellikle inert olduğundan, elektriksel iletkenliği yalnızca malzemenin enine kesitini azalttıkları ölçüde azaltırlar. Böylece, %80-95 IACS mertebesinde elektriksel iletkenlikler elde edilebilmektedir (Bozic vd., 1998).

Mükemmel bir kompozit elde etmek için, dispersiyonla güçlendirilmiş malzemelerin yapısı için temel gereklilik, bronz matriste homojen bir dağılım ve küçük boyutlu oksit parçacıklarıdır. Standart eritme ve döküm teknikleri, iyi bir dağılım homojenliği sağlayamaz. Metal oksit kompozit tozun üretimi için geleneksel yöntem, dâhili oksidasyon yöntemidir. İç oksidasyonun ana kusurlarından biri, metal oksit kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerini olumsuz etkileyen oksit parçacıklarının homojen olmayan dağılımıdır (Rajkovic vd., 2010).

Dispersiyonla güçlendirilmiş malzemeler, çökelmeyle sertleşebilen alaşımlara göre yapısal kararlılık bakımından üstündür çünkü ikinci fazların, çökelerek sertleşebilen alaşımların bir özelliği olan yüksek sıcaklıklarda çözünme eğilimi yoktur. Bu alaşımlar, toz metalurjisi yöntemleri ve kontrollü sıcak ve soğuk deformasyon prosesinin kombinasyonu ile üretilir. Toz karışımlarının yoğun öğütülmesinin yanı sıra takviye parçacıklarının yerinde oluşumu için hızlı katılaşma işlemlerinin kullanıldığı toz metalurjisi tekniği, bakır esaslı dispersiyonla sertleştirilmiş malzemelerde

nanometrik yapı elde etmede etkilidir. Dispersoidler, bakır alaşımlı matris malzemede daha yüksek sıcaklıklarda kabalaşmadan kararlı kalmaları koşuluyla eklenirse, iki farklı güçlendirme mekanizmasını birleştirmek mümkündür. Bu çoklu (dağılım ve çökelme) sertleşmedir. Alaşımların çoklu güçlendirilmesi fikri yeni değildir. Örneğin, nikel bazlı süper alaşımlarda, mekanik özellikleri iyileştirmek için matrisin üçlü sertleşmesi kullanılır: katı çözelti sertleşmesi, çökelme sertleşmesi ve dispersiyon sertleşmesi. Bu fikir daha sonra bakır alaşımlarında da uygulanmıştır. Oda sıcaklığında çoklu sertleştirilmiş bakır alaşımları, yalnızca çökelme veya dağılımın mevcut olduğu geleneksel alaşımlara kıyasla gelişmiş mekanik özellikler gösterir. Özel koşullar altında bu iyileştirilmiş özellikler daha yüksek sıcaklıklara kadar korunabilir (Ružić vd., 2013). Dispersiyon güçlendirme yoluyla bakır alaşımının yüksek mekanik özelliklerini elde etmenin umut verici bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Karbürler, oksitler, borürler ve nitrürler, bakır matriste homojen olarak dağılmış ikinci takviye fazları olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Wang vd., 2014).

Sert parçacıklarla güçlendirilmiş kompozitler üretmenin en yaygın yöntemleri döküm ve toz metalurjisidir. Toz metalurjisi yolu genellikle yüksek enerjili ön bilyalı öğütme, sıkıştırma, sinterleme veya ekstrüzyon içerir. Yüksek enerjili ön bilyalı öğütme işlemi, nano ölçekli takviyeyi metal matrise dahil etme kabiliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye ve metalik matrisin doğrudan karıştırılması, genellikle ex-situ teknolojisi olarak adlandırılır. Aksine, yerinde teknoloji, başlangıç malzemeleri arasındaki kimyasal reaksiyonla metalik matriste takviye sentezini içerir (Deshpande vd., 2006). Dispersiyonla güçlendirilmiş bronz alaşımlarının imalat işlemi sırasında, güçlendirilmiş parçacıkların topaklaşması genellikle mekanik özelliklerin bozulmasına yol açar. Geometrilerin, yoğunlukların ve güçlendirilmiş parçacıklerdaki farklılıkların parçacık aglomerasyonunu etkileyebileceğini öne süren bazı raporlar vardır (Wang vd., 2014). Yüksek enerjili ön bilyalı öğütme, güçlendirilmiş parçacık dağılımını iyileştirmek için uygun bir yöntem olarak kabul edilse de, sinterleme işlemi sırasında gazlı elementler tarafından toz kontaminasyonunun yoğunlaştırma üzerindeki etkisi ve soğuk işlenmiş yapılar nedeniyle tozların sıkıştırılabilirliğinin azalması gibi bazı dezavantajların da ortaya çıkması beklenmektedir (Razavi Hesabi vd., 2007; Wang vd., 2014; Zhao vd., 2005).

Bu çalışma, toz metalurjisi ile Cu10Sn/ZrO_2/CNT hibrit nanokompozitleri geliştirmek ve mikroyapısal – mekanik özelliklerini araştırmaya odaklanmaktadır. Literatürde bronz matrisli kompozitlerle ilgili sınırlı sayıda çalışma yapıldığı gözlemlenirken, hibrit ve nano takviyelerle gerçekleştirilmiş çalışmaların ise çok az ve yetersiz olduğu görülmüştür. Bu çalışma özelinde kullanılan Cu10Sn/ZrO_2/CNT kombinasyonuna ait herhangi bir çalışmanın yapılmış olmaması da çalışmanın özgünlüğünü ve önemini ortaya koymaktadır. Özel bir malzeme üretip, bu malzemenin mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonunu ortaya koyarak çalışma benzer çalışmalardan farklılıklar kazanmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

Metal tozlarından yeni şekiller üretilmesi yeni gelişen bir durum değildir. Eski uygarlıkların bu yöntemi tarih öncesi dönemlerde uyguladıkları görülmüştür. Mısırlılarda bazı aletlerde (Firavunu Tutankhamon'un mezarında altın tozu ile süslenmiş hançerlerde (Tsukerman, 2013)), Dehli'de demir sütunlarda (Ashoko Sütunu (Angelo vd., 2022)) ve İnkalar döneminde yapılan değerli metal eşyalarda rastlanılmıştır. 1920'lerde modern toz metalurjisi, tungsten karbürlerin üretimi ve yataklar için gözenekli bronz burçların seri üretimi ile ortaya çıkmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında, çeşitli kompozit malzemeler olmak üzere çeşitli demirli ya da demirsiz malzemelerin imalatında daha fazla gelişmeler yaşanmıştır. Savaş sonrası yıllardan 1960'ların başlarına kadar istikrarlı bir büyüme dönemi görülmüştür (Upadhyaya, 1997). Son otuz yılda ise demir esaslı toz metalurjisindeki büyüme olağanüstü bir şekilde gelişme göstermiştir. Çünkü bu teknoloji işleme, döküm, damgalama, dövme ve diğer benzer metal işleme teknolojilerine alternatif olarak daha düşük maliyet ile kendini göstermektedir. Toz metalurjisindeki toz yapma, bağlayıcılar, alaşım geliştirme, yağlayıcılar, büyüme ve parça üretim yöntemleri teknolojik gelişmelerle teşvik edilmektedir (Narasimhan, 2001). Toz metalurjisi ile elde edilen sert alaşım ürünlerden elde edilen modern kesici malzemeler, metal kesme işlemlerinde ve madencilikte gerçek bir devrime neden olmuştur. Modern toz metalurjisi yöntemlerinin ilk endüstriyel uygulaması, Rus bilim insanı metalurjist Petr Grigorevich Sobolevskii tarafından yapılmıştır. (Tsukerman, 2013).

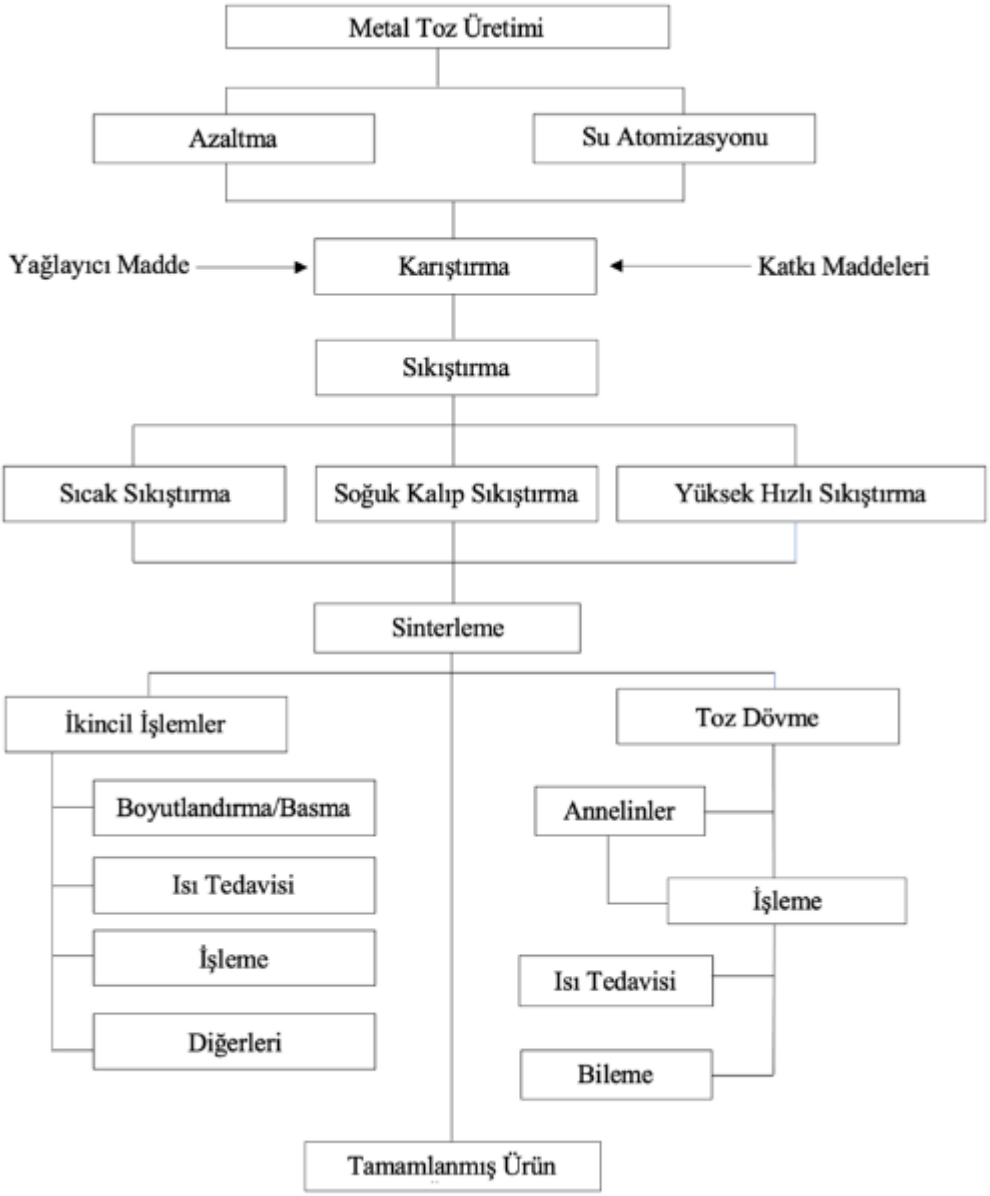
Toz metalurjisi, metalik olmayan bileşikler, eklenmiş ya da eklenmemiş, tek, karışık veya alaşımlı tozlardan metal tozları üretme ve yarı mamul ve mamul nesneler yapma sanatı ve bilimi olarak tanımlanmaktadır (Angelo vd., 2022). Toz metalurjisi, modern teknolojinin son derece önemli ve genç bir dalıdır. Metal tozları ve bu tozlardan yapılan çeşitli eşyaların üretimi ile ilgili çalışılmaktadır. Toz metalurjisi bazen metal-seramik olarak da adlandırılmaktadır. Bunun nedeni, tozlardan yapılan eşyaların üretiminde kullanılan işlemlerin seramik üretiminde kullanılan işlemlere benzer olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu durum metal-seramik malzemelerin mutlaka seramik ve metal kombinasyonu ile ortaya çıktığı anlamına gelmemektedir.

Esas olarak toz metalurjisi, özel olarak seçilen ve hazırlanan tozlardan elde edilen bir karışımın 10-100 kg/mm^2 basınç altındaki kalıplarda sıkıştırılmasıdır. Elde edilen pres ürünü eşyanın kullanımı için yetersiz olsa da bir sonraki teknolojik işlemlerin uygulanabilmesi için yeterli mukavemete sahiptir. Malzemelerin nihai mekanik mukavemeti, ancak karışıma giren metallerin erime noktasının altındaki bir sıcaklığa maruz bırakılarak elde edilmektedir. Toz metalurjisinin gelişmesi, belirli uygulamalarda diğer uygulamalara göre büyük avantajlara sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Artık toz metalurjisi, ısıya dayanıklı malzemeler ve kesici takımların temeli haline gelmiş, refrakter metal üretimine de pratik bir çözüm getirmiştir. Toz metalurjisi, sıvılaşma nedeni ile eritilemeyen çeşitli alaşımların, ön bellekte çözünmeyen metallerden yapılmasını da sağlar (Tsukerman, 2013).

Toz metalurjisi, eritme ve döküm işlemlerinden daha eski bir malzeme işleme teknolojisidir. Bu teknoloji eritme ve işleme için enerjinin olmadığı durumlarda cevherin katı halde indirgenmesini ve gerekli şekil ve boyutlara dönüşmesini sağlamıştır. Bundan dolayı günümüzde de çok yüksek sıcaklıklar ve arzu edilen atmosfer basıncını oluşturma becerilerimize rağmen hala revaçta olmaya devam etmektedir. Toz metalurjisinde işleme ve şekillendirme için daha az enerji gerekmektedir. Ayrıca performans gereksinimlerini karşılamak için aynı parçanın farklı bölümlerine istenilen özelliklerin getirilmesi de bu teknoloji ile mümkün kılınmaktadır. Çeşitli sinterleme işlemlerinden sonra basınçlı sinterleme ile gözenekliliği kontrol etmek ve gözenekliliği istenilen boyutta tutmak mümkün hale gelmiştir (Angelo vd., 2022).

Toz üretimi iki kategoride gerçekleşmektedir. Birincisi ekstraktif metalurji işlemlerinin ürünü olarak, ikincisi ise sünger, külçe, değirmen ürünleri veya hurdadan oluşmaktadır (Fang vd., 2018). Toz metalurjisi dört aşamadan meydana gelir: toz yapma, ön kalıplara sıkıştırma, gerekli yoğunluklara sinterleme ve sinterleme sonrası işlemlerden oluşmaktadır. Bu işlemlerin her biri ürün başarısını belirlemek için hayati önem arz etmektedir. Her bir aşama arkasında yatan bilimsel aşamanın anlaşılmasını sağlamaktadır. Toz metalurjisi, element veya tozların, yağlayıcılarla ve katkı maddeleri ile karıştırılarak karışımın uygun kalıplarda sıkıştırılması ile elde edilen ham parçaların kontrollü atmosfer fırınında parçacıkların metalurjik olarak bağlanacak

şekilde ısıtılmasını içermektedir. Ortaya çıkan malzemeler çeşitli alanlarda kullanılabilecek yeterli mukavemete ve yoğunluğa sahip katı malzeme gövdelerinden oluşmaktadır. Son derece gözenekli ürünler, hassas yüksek performanslı bileşenler ve kompozit malzemeler toz metalurjisi ile üretilmektedir. Toz metalurjisi aynı zamanda kompozisyon esnekliği en aza indirilmiş, ayrışma ve değişen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip kademeli mikro yapılar üretebilme becerisini de ortaya koymaktadır (Angelo vd., 2022).



Şekil 2.1 Toz metalurjisinin basit adımları (Šalak vd., 2005)

3. BAKIR VE BRONZ ALAŞIMLARI

3.1 Bakır ve Alaşımları

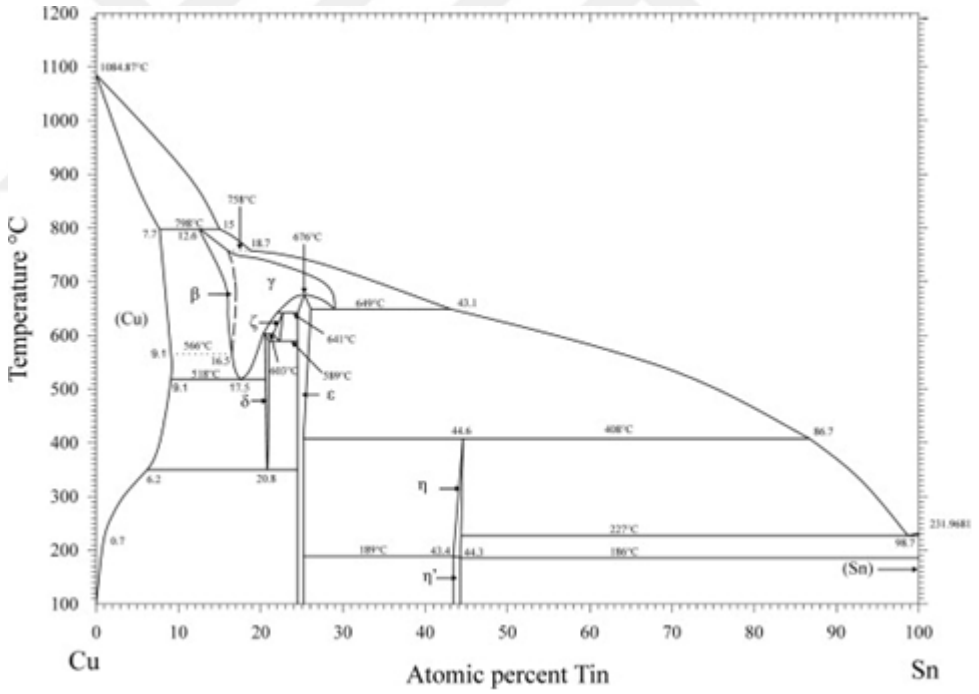
Bakır ve bakır bazlı alaşımlar, teknolojik toplumumuzda yaygın malzemelerdir ve birçok türde nihai ürüne dönüştürülür. Bakır ürünler, yüksek işlenebilirlik ve elektrik iletkenliği nedeniyle tel ve kablolarda, konnektörlerde, prizlerde ve kurşun çerçevelerde kullanılmaktadır. Pirinç (Cu–Zn alaşımları) ve bronz (Cu–Sn–Al–Si alaşımları) gibi bakır alaşımları, mekanik özellikler ve korozyon direnci açısından yüksek performansa sahiptir. Sonuç olarak, bakır tüketimi dünya çapında artmış ve bu da büyük bir bakır stoğuna neden olmuştur. Kimyasal bileşim açısından bakır ve bakır alaşımları tamamen farklı bakır içeriklerine sahiptirler. Bakır yarı ürünleri esas olarak oksijensiz bakır, sert ziftli bakır ve fosforla deoksidize edilmiş bakırdan oluşmaktadır. Bu ürünlerin %99,90'dan fazla bakır içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. Öte yandan, bakır alaşımları esas olarak pirinç ve otomat pirincinden oluşmaktadır. Bakır içerikleri genellikle sırasıyla %59,0–71,5 ve %57,0–63,0 aralığındadır. Bakır alaşımlarının ikincil izabe tesisleri bakır hurda tüketebilse de, yüksek saflıkta bakırın ikincil izabe tesisleri bakır alaşımı hurdalarını tüketemez. Bu nedenle, ikincil izabe tesislerinde geri dönüşümü teşvik etmek için bakır döngüsü ile bakır alaşımı döngüsü arasında bir ayrım gereklidir (Daigo vd., 2009).

3.2 Bronz Alaşımları

İlk olarak bakır dökümü ile eşya yapımı kanıtları Güney Anadolu'da, Karaman'da Can Hasan Höyüğü'nde bulunmuştur. M.Ö. 4500 yıllarında ise Ege ve Balkanlarda yapılan çalışmalarda bakırın işlendiğine dair kanıtlar bulunmuştur. Saf bakır oldukça yumuşak ve dayanımı az olarak bilinen bir metaldir. Bu özelliğinden dolayı, sertlik ve dayanıklılık gerektiren aletlerin yapımına (özellikle de savaş aletleri ve silah yapımına) uygun değildir. Bundan dolayı başka bir alternatif olarak görülen bronzun dayanımı daha yüksektir. Bronz, yaklaşık olarak %12 kalay ve bakır karışımının seramik fırınlarda ergitilmesinden meydana gelmektedir. Bu bronz alaşımı kompleks cevherlerden doğrudan elde edilebilmiştir. Anadolu'da bronz (tunç) çağının başlangıcı M.Ö. 3700-3300 yılları arasında denk gelmektedir. Tarihte bulunan ilk alaşım özelliği

taşıyan örnekler bronz alaşımlarıdır. Anadolu'da keşfedilmiş ilk bronz alaşımı %1 demir (Fe), %11 kalay (Sn) ve %87 bakırdan (Cu) oluşmaktadır. Bu alaşımdan sonra M.Ö 300'lerde Romalılar tarafından bakır-çinko karışımından pirinç üretilmiştir. Bundan dolayı bronzun, tarihsel ve teknolojik olarak medeniyetlerin gelişmesinde önemli bir yeri vardır. Anadolu'da yaşamış medeniyetlerin neredeyse tamamı bronz üretimi ve döküm teknolojisini kullanmışlar, bu konuda büyük ilerlemeler kaydetmişlerdir. M.Ö. 4000-2000 dönemlerinde ilk olarak Sümerliler bakır metalurjisinin gelişmesine katkı sağlamışlardır. Bu dönemlerde mat, bakır oksitli cevherler ergitme ve kavurma işlemleri ile bakıra dönüştürülmüştür (Ehsani ve Yazıcı, 2016).

Şekil 3.1'de bronz alaşımını ihtiva eden Bakır ve Kalay'ın sıcaklık ve içeriğe bağlı olarak değişen ikili faz diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.1 Bakır-Kalay faz sıcaklık grafiği

4. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler doğal ve suni olarak kullanılmaktadır (Campbell, 2010). Aslında, "kompozit" kavramı insanlar tarafından geliştirilmiş bir şey değildir. Ahşap, bunun bir örneği olarak karşımıza çıkmaktadır. Ahşap, bir polimer malzeme olan ligninin reçineli bir matrisinden (iyi mukavemet ve sertliğe sahip selüloz lifleri) oluşan doğal bir kompozit malzemedir (Harris, 1999). Başka bir deyişle ahşap, lignin matrisi ile birbirine bağlanmış selülozdan oluşan bir bileşiktir. Kompozit malzemeler insanlık tarafından uzun bir süredir kullanılmaktadır. Yüksek mukavemetli insan yapımı liflerin ortaya çıkışı ve polimer kimyasındaki büyük ilerleme ile 20. yy'da birçok durumda rakip malzeme ile karıştırılabilir avantajlı kompozit malzemelerin yapımına imkân sağlamıştır (Campbell, 2010). Ancak, kompozit malzeme bilimi ve teknolojisi, mühendislere yeni bir malzeme sınıfı ve bunların avantajlı bir biçimde kullanılmasını sağlayacak gerekli imkânları sağlamak için son yarım yüzyılda ancak kendini gösterebilmiş ve gelişebilmiştir (Harris, 1999).

Kompozit malzeme, tek başına kullanılabilen bileşenlerden daha iyi özellikler sergileyen (Campbell, 2010), iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesi, son ürünün, onu oluşturan malzemelerin her birinin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip olması şeklinde tanımlanabilir. Kompozit malzemeler artık yaygın olarak bir matris içine gömülmüş takviye düzenlemeleri (dolgu maddeleri) olarak da adlandırılmaktadır (Hsissou vd., 2021). Metalik alaşımların aksine, her malzeme ayrı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri korumaktadır. İki bileşen bir takviye ve bir matristir (Campbell, 2010).

Matris, yükün kohezyonunu ve yönünü sağlar. Ayrıca kompozitin maruz kaldığı gerilmelerin yüke iletilmesi de mümkündür. Bu şekilde elde edilen malzemeler çok heterojendir ve genellikle anizotropiktir. Matrisin ve yükün doğası, yükün şekli ve oranı, ara yüzeyin kalitesi ve kullanılan üretim süreci, kompozit malzemenin özelliklerini etkileyebilecek parametrelerdir. Matris ve takviye metalik, seramik veya polimer olabilir. Bu da çok sayıda kombinasyonun tasavvur edilmesini mümkün kılmaktadır. Kompozit malzeme, sürekli fazlarda dağıtılan bir veya daha fazla süreksiz

fazın genel durumundan oluşur. Farklı yapılarda birkaç süreksiz faz olması durumunda, kompozitin hibrit olduğu da söylenebilir. Sürekli faza matris denir ve süreksiz faza takviye veya takviye malzemesi denir. Kompozit malzemelerde tamamlayıcı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip bileşenler birleştirilir. Bir polimer matrisinde çok yüksek modüllerin iyi gerilme mukavemetine sahip takviyelerinin eklenmesi, mekanik ve termal kalitelerin iyileştirilmesini mümkün kılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin metallere kıyasla avantajı, daha düşük yoğunluk, dolayısıyla daha düşük yakıt tüketimi (havacılık ve otomobil için), rekabetçi sporlarda daha yüksek hız veya daha uzun süre dâhil olmak üzere karmaşık şekilli parçaların üretimine izin veren üretim sürecidir. Kompozit malzemeler, matris tipine göre organik, mineral ve metalik olmak üzere üç kategoride sınıflandırılır. Organik kompozitler arasında karton (reçineler ve selüloz lifleri), lamine lastikler (kauçuk, çelik, organik reçineler, cam lifleri, karbon ve bor) ve güçlendirilmiş plastikler (reçineler ve kısa lifler) bulunmaktadır. Mineral kompozitler arasında beton (çimento, kum ve katkı maddeleri), karbon-karbon kompozitler (karbon ve karbon fiberler) ve seramik kompozitler (seramik ve seramik fiberler) bulunur. Ayrıca sonuncusu metalik kompozitlerdir (alüminyum/bor fiberler ve alüminyum/karbon fiberler). Bu kompozit malzemeler, paketleme, otomotiv, hafif yapılar, inşaat mühendisliği, havacılık, spor, biyotıp, termomekanik bileşenler ve havacılık gibi çeşitli uygulama alanlarını etkilemektedir (Hsissou vd., 2021).

Takviye aşaması, mukavemet ve sertlik sağlamaktadır. Çoğu durumlarda takviye, matristen daha sert, güçlü ve rijit olabilmektedir. Takviye genellikle bir elyaf ya da bir parçacıktan oluşur. Parçacıklı kompozitler, sürekli fiber kompozitlerden çok daha zayıf ve az daha sert olma eğilimi göstermektedirler. Ancak genellikle daha ucuzdurlar. İşleme zorlukları ve kırılganlıkları nedeniyle parçacık takviyeli kompozitler genellikle daha az takviye içermektedir. Takviyenin türünü ve miktarını ise nihai özellikler belirlemektedir. Bir kompozit malzeme oluşturmak için yaklaşık %70 oranında takviye pratik sınırı kullanılmaktadır. Daha yüksek yüzdelerde, lifleri etkili bir şekilde desteklemek için çok az matris bulunur (Campbell, 2010).

Kompozit malzemeler, bileşimsel ve yapısal özelliklerde gradyanlara sahip olabilir. Bu tür malzemelerde, bu özelliklere duyarlı özellikler de gradyanlar sergilemektedir.

Bu gradyanlar, yerel özelliklerde meydana gelir ve kompozitin genel özelliklerini etkileyebilir. Gradyan kompozitler bu nedenle mühendislik uygulamaları için ilgi çekici olmaktadır (Bever ve Duwez, 1972). Kompozit malzemelerin ana avantajları, dökme malzemelerle karıştırıldığında, bitmiş parçada bir ağırlık azalmasına izin veren düşük yoğunlukla birleşen yük mukavemet ve sertlikleridir (Campbell, 2010).

4.1 Kompozit Malzeme Türleri

Kompozit malzemenin tanımına erişmek için, bileşenlerin doğası ve özellikleri, takviyenin geometrisi ve dağılımı ve matris-takviye ara yüzünün doğası gibi üç doğayı belirtmek gerekecektir. Kompozit malzeme bu nedenle nispeten çok sayıda bileşenden oluşan bir sistemdir. Bu nedenle, bu temel öğeler arasından olası gerçekleştirmelerin sayısı pratik olarak sonsuzdur. Matrisin doğası, takviye türleri, formülasyona giren katkı maddeleri ve bu elementlerin nispi miktarlarının yanı sıra uygulama süreci de bitmiş ürünün özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Büyük difüzyon kompozitleri ve yüksek performanslı kompozitler gibi iki ana malzeme sınıfı vardır (Hsissou vd., 2021).

4.1.1 Büyük Difüzyon Kompozitleri

Büyük difüzyon kompozitleri en yaygın olanıdır ve genellikle cam elyafından ve doymamış veya fenolik polyester reçineden yapılır. Üretimin %95'inden fazlasını oluştururlar ve en önemli talep sahipleri ulaşım sektörü (otomobil, demiryolu) ve elektrik konstrüksiyonudur (Hsissou vd., 2021).

4.1.2 Yüksek Performanslı Kompozitler

Bileşenler esas olarak uzun cam elyaflarla güçlendirilmiş epoksi reçinelerdir, ancak özellikle karbon veya aramittir. Başvuru sahipleri, yüksek mekanik ve termal özellikleri ile ilgilenmektedir. Ancak, çok düşük üretim serilerinde havacılık ve uzay endüstrisi de ilgilenen sektörlerdendir (Hsissou vd., 2021).

5. BRONZ MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

5.1 Bronz Matrisli Kompozit Malzemeler

Yeni ve çok yönlü malzemeler elde etmek için metallerin öne çıkan yönlerini birleştirmeyle ilgili araştırmalar, metal matrisli kompozit malzeme alanında ivme kazanmıştır. Metal matrisli kompozit üretimi için, alüminyum, çelik alaşımı, magnezyum, pirinç, bronz ve dökme demirler gibi çeşitli metaller matris veya takviye malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Matris ve takviye malzemesi olarak seçilen bronz, iyi yüzey bütünlüğü, yüksek mukavemet ve iyi tribolojik özellikler gibi olağanüstü özellikleri sayesinde diğer malzemelere göre daha fazla ilgi görmüştür. Bundan dolayı, iki veya daha fazla metalin iyi yönlerini birleştirmek teorik olarak mümkünken, pratikte bu metallerin tüm yönlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir (Güneş vd., 2021).

5.2 Bronz Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretiminde Kullanılan Takviye Malzemeler

5.2.1 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür en çok kullanılan yapısal seramiklerden bir tanesidir. 1970'li yıllardan beri yeni uygulamalar bulmuştur. Sahip olduğu birçok özellik ve en önemlisi karmaşık mühendislik şekillerinde, silisyum karbür, tungsten karbür yerine çekici bir aşınma direnci uygulayıcı malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır (Büyükuncu vd., 2000). Silisyum karbür, kısaca SiC olarak ifade edilir. Doğada direkt rastlanmamasına rağmen, ana bileşenleri olan silisyum ve karbon, oldukça bol miktarda rastlanmaktadır (Yıldırım vd., 2002). Mineral ismi moissanit olan SiC sentetik olarak üretilmektedir (Emrullahoğlu vd., 2005).

5.2.2 Bor Karbür (B_4C)

Bor karbür (B_4C) yoğunluğu oldukça düşük hafif, güçlü bir kovalent karaktere sahip elmas ve kübik bor nitrürden (BN) sonra bilinen en sert seramik malzemedir

(Domnich, 2011). Mekanik özellikleri sayesinde farklı koruma, yapısal ve alet uygulamaları için kullanım alanı bulmuştur (Suri, 2010). Mekanik olarak üstün özelliklerinin yanında, kırılgan bir malzeme olma dezavantajına sahiptir. Kırılma tokluğu ve kovalent yapısı göz önüne alındığında sinterlenmesi zor bir malzemedir. Basınç destekli sinterleme teknikleri ve katkı maddelerinin kullanımı yüksek yoğunluklu numuneler elde etmede başarılı olmuştur. Bor karbür seramikleri için basınçsız sinterleme yöntemleri oldukça yüksek sıcaklıklar gerektirmektedir. Metalik silisyum katkılandırılması ile infiltrasyon (sızma) yöntemi kullanılarak düşük sıcaklıklarda sinterlenmiş bor karbür seramikleri elde edilebilir (Hayun, 2006).

5.2.3 Alümina (Al_2O_3)

Alümina, kristalografik olarak oksijen iyonlarının alüminyum iyonları tarafından sıkı hegzogonal olarak sarılması ile ifade edilebilir. Dış görünüş olarak beyaz bir tozdur (Kara, 1998). Ergime sıcaklığı 2050ºC, kaynama noktası ise 2080ºC olan alümina, yüksek sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı en dayanıklı refrakter malzemelerden biridir (Kara, 1998; Özdemir, 2004). Alümina'nın molekül ağırlığı 101,96 g/mol, reaktif indeksi 1.765, oluşum serbest enerjisi ise -1582,4 kj/mol'dür (İpek, 2005). Alümina, suda ve şayet iyi kalsine edilmişse hem mineral asitlerinde, hem de bazlarda çözünmezler. Alümina, HF'ye karşı da dayanıklıdır. Sodyum karbonat, kostik soda ve sodyum peroksit, saf alümina potalarda az tahribatla eritilebilir. 1700-1800ºC gibi yüksek sıcaklıklarda flor gazı dışında bütün gazlara karşı direnç gösterir. Alümina oksitleyici ve redükleyici atmosferde 1900ºC'ye kadar kullanılabilir (Özdemir, 2004).

5.2.4 Grafen (GNP)

Grafen, altı üyeli karbon halkalarından oluşan iki boyutlu bir sistemdir. Altıgen grafen kafes, grafen tabakasının mümkün olan en düşük kalınlığa sahip (sadece bir atom kalınlığında) olması farkıyla bir bal peteğine benzer. Grafenin olağandışı özellikleri, benzersiz yapısıyla yakından ilişkilidir. Grafen neredeyse tamamen şeffaftır, çelikten yüz kat daha güçlüdür ve çok esnektir. Aynı zamanda mükemmel termal ve elektrik iletkenliği gösterir, bu da onu elektronikteki uygulamalar için iyi bir malzeme yapar.

Örneğin ince, esnek ve güçlü ekranlar veya hızlı işlem devrelerinin üretiminde kullanılır ve çeşitli sensörler için malzeme olarak kullanımı da uygundur. Grafenin kullanım alanları çok geniştir. Enerji, tıp, elektronik, gıda, koruyucu donanımlar, balistik gibi birçok uygulama alanı mevcuttur. Fakat pek çok kişi tarafından geleceğin en umut verici malzemesi olarak kabul edilen grafen, hala pahalı ve üretilmesi zor bir madde olmaya devam etmektedir. Grafen, 2004 yılında sıradan bir selobant tekniği kullanılarak grafitten karbon katmanlarının soyulmasıyla elde edilmiştir. Araştırmacılar, soyulan bu karbon katmanlarında bir atom kalınlığında grafen diye adlandırılan tabakalar bulmuşlardır. Fakat grafenin endüstriyel uygulamaları için bu malzemeyi büyük ölçekte üretmek gerekir ve bunun için de özel bir ekipman kullanmadan ucuz ve daha iyi kontrollü yöntemler bulunmalıdır (Kaminska vd., 2012).

5.2.5 Zirkonyum Oksit (ZrO_2)

ZrO_2 monoklinik, tetragonal ve kübik kristal formlarında bulunur. Kübik ve tetragonal kristal formları seramik malzeme üretiminde daha yoğun kullanılır. Yüksek sıcaklık kristal formu kübiktir, soğuma sırasında önce tetragonal daha sonra monoklinik kristal forma dönüşür. Kristal yapı değişimi sırasında hacimde %3 kadar bir değişim olur. Yüksek sıcaklık kristal formlarını kararlı hale getirmek için MgO, CaO veya Y_2O_3 gibi kararlaştırıcılar kullanılır.

ZrO_2 yüksek refrakterliği, korozyon direnci ve nükleer tanecik geçirgenliğinin düşüklüğü nedeniyle nükleer enerji uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulur. Erimiş metaller tarafından ıslatılamadığı için alaşım ve yüksek sıcaklıklarda eriyen diğer metallerin üretilmesinde kullanılır. Titanat ve ferrit üretiminde ayrıca havacılıkta rüzgar tünellerinin iç yüzey astarlarında kullanılır.

5.2.6 Karbon Nano Tüp (CNT)

1985 yılında, Richard Smalley'in bulduğu, karbon atomlarının 60'lı gruplar halinde birbirlerine bağlanmasıyla oluşan "buckyball"lar (küresel molekül) kütlesine birkaç kobalt veya nikel atomu eklendiğinde şekil değiştirerek, kimyasal olarak kararlı ve duvar kalınlığı bir nanometre boyutundaki "nanotüp" şekline dönüşür.

Çok hafif olması, yüksek elastik modüle sahip olması ve bilinen en dayanıklı fiber olması ihtimalleri, CNT'lerin en önemli özelliklerindendir. Deneysel bazı çalışmalar sonucu çok cidarlı CNT'lerin 1-1,8 TPa arasında elastiklik modülüne ve TEM-esaslı çekme ve eğme testleriyle de 0,8-150 GPa arasında değişen çekme dayanımına sahip olduğu anlaşılmaktadır (Gogotsi, 2006). Çok cidarlı CNT'lerin çekme dayanımlarının tek cidarlılardan daha düşük olduğu bilinmektedir. Bunun temel sebebi, her bir karbon nanotüp katmanının sürtünmesize yakın kinetik özelliklere sahip olmasından dolayı birbiri üzerinden kayarak sıyrılma (pull-out) olarak bilinen özelliğin görülmesidir. Yu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada tek cidarlı CNT'lerin dış yüzeylerinde taşıdığı yükler vasıtasıyla oluşturulan gerilme-gerinim eğrilerinden 13-52 GPa arasında kırılma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir (Yu vd., 2000). Aynı yöntemle çok cidarlı CNT'ler için gerçekleştirilen çalışmada ise 11-63 GPa arasında çekme dayanımı ile 0,27 – 0,95 TPa mertebesinde elastiklik modülü tayin edilmiştir. Özellikle, yoğunluk da dikkate alındığında çelikten çok daha yüksek spesifik dayanıma sahip olan CNT'ler bilinen en mukavemetli malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir.

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Tez konusu ile ilgili ya da benzer olduğu düşünülen bazı çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

Chadwick ve Hashemi, Benzotriazolün (BTA) bakır ve bakır alaşımları üzerine yaptıkları çalışmada (Chadwick ve Hashemi, 1978) adsorpsiyonu ile oluşan yüzey filmleri, X-ışını foto-elektron spektroskopisi ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda hem bakır hem de bakır-nikel alaşımlarında benzotriazolün bir Cu(I)BTA yüzey kompleksi oluşturduğunu bulmuşlardır. Bakır-nikel alaşımları için, Cu(I)BTA filminin oluşturulması için geçen sürenin, alaşım bileşimine bağlı olduğunu da belirtmişlerdir. Ayrıca, Cu(I)BTA filmlerinin, sıvı fazdan çıkarıldığında hızla bir Cu (II) türüne oksitlendiği de belirlenmiştir. %70 Cu, %30 Zn alaşımı üzerinde BTA ile oluşturulan yüzey filmlerinin hem bakır hem de çinko içerdiğini, bakırın yine Cu(I) durumunda olduğu da vurgulanmıştır.

Minneci ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada (Minneci vd, 2021), Cu–8Cr–4Nb (%at) veya GRCop-84 ve Cu–4Cr üzerinde çalışarak, genellikle GRCop veya Glenn Research bakır alaşımları olarak adlandırılan, Cu bakımından zengin Cu–Cr–Nb alaşımlarının gelişimini ve mevcut durumunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, yüksek ısı akışı performansını optimize etmek için temel niteliklerin anlaşılmasına yardımcı olan, son teknoloji ürünü yüksek ısı akışlı Cu alaşımları ve Cu metalurjisi karşılaştırıldığında çeşitli mikroyapısal eğilimler olduğu bulunmuştur. Zr ilavelerinin L-PBF'de (lazer-toz yatağı füzyonu) nasıl etkileşime gireceği konusunda bilinmezliklerin olduğu ve gelecekte testlerin ve karakterizasyonun gerekli olduğu belirtilmiştir. Zr ilavelerinin, ekstrüde edilmiş malzemeye kıyasla geliştirilmiş sürünme performansı ve uzama gösterdiği ve HIPed L-PBF GRCop-84 için benzer iyileştirmeler gösterdiği, ama Zr'nin L-PBF GRCop'a önemli ölçüde fayda sağlayıp sağlayamayacağı konusunda da net bir sonuca ulaşılamadığı belirtilmiştir.

Zhi, vd.'nin yaptığı çalışmada, (Zhi, vd., 2020), elektrokimyasal CO_2 indirgeme reaksiyonunun (CRR) karmaşık reaksiyon ağı nedeniyle, istenen ürünler için oldukça seçici elektrokatalizörler geliştirmenin büyük zorluk oluşturduğu ve çeşitli

adsorpsiyon konfigürasyonlarını ve enerjilerini değerlendirerek CRR seçicilik eğilimlerini araştırmak için birden fazla aktif bölgeye sahip bir dizi Cu bazlı tek atom alaşımı (M@Cu) modellemesi geliştirildiği belirtilmiştir. M@Cu model katalizörlerdeki ikincil metallerin hidrojen (H) ve oksijen (O) afinitesinin, CRR seçiciliğinin belirlenmesinde etkili tanımlayıcılar olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, çok çeşitli Cu bazlı bimetalik malzemeler için CRR ürün seçiciliği hakkında daha fazla mekanik bilgi ve içsel katalizör özelliklerine dayanan seçicilik eğilimi, oldukça seçici CRR elektrokatalizörleri için rasyonel bir tasarım stratejisi sağladığını belirtmişlerdir.

Ramachandra vd. (2015), toz metalurjisi ile üretilen ZrO_2 nano parçacık takviyeli Al nanokompozitlerin sertlik ve aşınma dayanımlarını test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, kompozitlerin sertliğinin n-ZrO_2 içerisindeki artışla arttığını, nano kompozitlerin aşınma oranlarının, takviyesiz alüminyum ile karşılaştığında daha düşük olduğunu, bu durumunda, n-ZrO_2 içeriğindeki artışla aşınma direncinde bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Nano kompozitlerin mikro yapısının, n-ZrO_2 parçacıklarının neredeyse tekdüze dağılımını ve hafif topaklanmayı ortaya çıkardığını da vurgulamışlardır.

Gül vd. (2015), mevcut aktif sinterleme yöntemi ile üretilen bronz/SiCp kompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, SiC'nin Ni-P kaplamasının, bronz kompozitlerin aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Belirli bir hacim fraksiyonu için, Ni-P kaplı SiC takviyeli bronz kompozitlerin, bronz alaşımlı ve kaplanmamış SiC takviyeli kompozitlerle karşılaştırıldığında aşınma oranında daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır. Nano SiC'nin eklenmesinin, mikro sertlik ve kayma aşınması açısından bronz matrisin performansını artırdığını ve aşınmış yüzeylerin SEM morfolojisinin, hasarın boyutunun en az Ni kaplı SiC takviyeli kompozitler için önemli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Mazaheri vd. (2020), sürtünme karıştırma işlemiyle geliştirilen AZ31/ZrO_2 yüzey nanokompozitlerinin tribolojik davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, mikroyapı araştırmaları, FSP'nin önemli tane incelmesine yol açtığını, mikrosertlik ölçümlerinde, ilave ZrO_2 nanoparçacıkları olmadan FSP'nin sertlikte çok az

iyileşmeye neden olduğunu, aşınma direncinin, ZrO_2 nanoparçacıklarının varlığından ve artan geçiş sayısından etkilendiğini ve aşınmış yüzey, aşınma izi enine kesiti, karşı uç ve aşınma kalıntısının SEM gözlemleri, aşınma mekanizmasının AZ31 ana metali için şiddetli aşınma ve yapışmadan 4 geçişli FSPed AZ31/ZrO_2 nanokompoziti için hafif aşınmaya karşı değişiklik gösterdiğini bulmuşlardır.

Abd-Elwahed ve Meselhy, (2020), toz metalurjisi kullanarak ZrO_2 ve GNP'ler ile güçlendirilmiş Cu bazlı hibrit nanokompozitlerin başarı ile üretilmesini sağlamışlardır. Üretilen hibrit nanokompozitlerin basınç dayanımı, termal iletkenliği ve termal genleşme katsayısı araştırılmış ve üretim sırasında numunelerdeki mikro yapı değişiklikleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonucunda, hibrit olmayan nanokompozit ve saf Cu ile karşılaştırıldığında %0,5 GNP içeren hibrit nanokompozitin kristalit boyutunda önemli bir azalma olduğunu, %0,5 GNP'lerin eklenmesinin, basınç dayanımını 384,6 MPa'dan, 504,6 MPa'ya yükselttiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, GNP ağırlık yüzdesinin %0,5'in üzerinde artmasının, sinterleme sırasında Cu taneciklerinin büyümesine yardımcı olan GNP'lerin topaklaşması nedeniyle basınç dayanımını olumsuz etkilediğini ve termal iletkenliğin biraz arttığını vurgulamışlardır. Bununla birlikte, GNP'lerin tane sınırlarında oluşan aglomerasyon nedeniyle, Cu taneleri arasındaki elektron hareketi ve Cu ile GNP'lerin termal genleşmesi arasındaki büyük uyumsuzluğu sağlayan yapıların ağırlık yüzdesinin %0,5'in üzerinde artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Cu tane sınırlarında ZrO_2 ve GNP'lerin bulunması nedeniyle, %0,5 GNP'lerin eklenmesi, hibrit kompozitin termal özelliklerini büyük ölçüde azalttığını ve bunun da Cu taneleri üzerinde sıkıştırma termal gerilmelerinin uygulanmasına neden olduğunu, ancak, ağırlık yüzdesinin %0,5'in üzerinde artması ve tane sınırlarının belirli kısımlarında yığılması nedeniyle termal özellikleri geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Abu-Oqail vd. yaptıkları çalışmada (Abu-Oqail, 2019), Cu-ZrO_2 nanokompozitlerinin güçlendirilmesinde yüksek enerjili bilyeli öğütmenin etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, ağırlıkça %5 ve %10 ZrO_2 parçacıkları ile güçlendirilmiş bakır matrisli nanokompozitleri, farklı öğütme sürelerinde mekanik öğütme tekniği kullanarak üretmişlerdir. ZrO_2 nanoparçacıklarının Cu matriste oldukça üniform ve homojen dağılıma ulaşana kadar 5; 10; 15 ve 20 saat olmak üzere dört farklı öğütme

süresi dikkate alarak çalışma yapmışlardır. Üretilen tozların yapısal ve morfolojik değişimlerini incelemek için XRD, SEM ve TEM tekniklerini kullanmışlardır. Numunelerin içindeki gözeneklilik miktarını tahmin etmek için sinterlenmiş nanokompozitlerin SEM mikrograflarına görüntü işleme uygulamışlardır. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerindeki değişiklikleri karakterize etmek için mikrosertlik testi kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara ve tartışmalara dayanarak, şu sonuçları elde etmişlerdir. 20 saatlik öğütme sonrasında ZrO_2 nanoparçacıklarının Cu matrisinde oldukça üniform ve homojen dağılımı elde edilmiştir. Öğütme süresinin artmasının, kristalit boyutunu aşırı derecede azaltığı ve kafes dislokasyonundan kaynaklanan kafes distorsiyonu nedeniyle kafes gerilmesinin arttığı bulunmuştur. Ayrıca artan ZrO_2 içeriğinin, kristalit boyutunda ve kafes geriliminde daha fazla azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Artan öğütme süresinin, Cu ve Cu-ZrO_2 nanokompozit tozlarının morfolojisinin yanı sıra parçacık boyutunu da önemli ölçüde değiştirdiğini görmüşlerdir. Ayrıca, Cu matrisindeki dağılmış nano-ZrO_2 parçacıklarının, hazırlanan nanokompozitlerin yapısında ve özelliklerinde ciddi bir gelişmeyi teşvik ettiğini bulmuşlardır. 20 saatlik öğütmeden sonra neredeyse gözeneksiz kompozitlere ulaşana kadar öğütme süresinin artırılmasıyla gözeneklilik yüzdesinin büyük ölçüde azaldığını ve ZrO_2 içeriğinin artmasıyla atomlar arasında daha fazla gözenekle sonuçlanan Cu atomlarının difüzyon hareketliliğinin azalması nedeniyle gözeneklilik yüzdesinin arttığını belirtmişlerdir. Sinterlenmiş Cu-ZrO_2 nanokompozit numunelerinin mikrosertliğinin artan öğütme süresi ve ZrO_2 içeriği ile arttığını, saf Cu için 75 HV'ye kıyasla 20 saat öğütülmüş %5 ZrO_2 için 201 HV'ye ve %10 ZrO_2 nanokompozitler için 282 HV'ye ulaştığını gözlemlemişlerdir. Cu-ZrO_2 nanokompozitlerdeki ana güçlendirme mekanizmalarının, öğütme işlemi ve takviye ilavesinden kaynaklanan tane inceltme ve dislokasyon bozulması olduğunu ve Cu-ZrO_2 nanokompozitlerin güçlendirilmesinde takviye ilavesinin rolünün, öğütme işleminin rolünden daha etkili olduğunu vurgulamışlardır (Abu-Oqail vd., 2019).

Çelik vd. yapmış oldukları çalışmada (Çelik vd., 2009), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin kimyasal bileşimini ve mikro yapısını kontrol etmek için, bu çalışmada NiCrAl/MgO–ZrO_2 sermet tozlarını başarıyla geliştirmiştir. NiCrAl/MgO–ZrO_2 tozları, kimyasal sentez kullanılarak NiCrAl, ZrO_2 ve Mg hidroksit karbonat öncülerinden oluşan bir çözeltiden sentezlenmesi üzerine çalışılmıştır. Numunelere

1381°C'de N_2 – %5 H_2 atmosferi altında 30 dakika sinterleme işlemi uygulanmıştır. Kimyasal işleme ve eleme işlemine bağlı olarak, özellikle plazma püskürtme parametrelerine göre seçilen ağ aralıklarına bağlı olarak 35–90 μm ve 125–150 μm olmak üzere iki çeşit toz üretilmiştir. EDS ve X-Ray haritalama analizleri, sermet tozunda homojen dağılımın gözlendiğini de ortaya çıkarmıştır. Seramik fazlar olarak ZrO_2, MgO ve $MgZr_7O_{14}$ ve Ni, Cr ve Ni_5Al sermet tozundan XRD sonucu olarak 3 metalik faz elde etmişlerdir.

Chaopeng vd. yaptıkları çalışmada, (Chaopeng vd, 2018), nano boyutlu ZrO_2'nin Mo alaşımının yeniden kristalleşmesine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, Mo-ZrO_2 alaşımlı levhanın, hidrotermal sentez ve toz metalurjisi kombinasyonu ile hazırlanan yeni bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. ZrO2'nin, alaşımların yeniden kristalleşmesini etkili bir şekilde geciktirebileceğini ve alaşımların yeniden kristalleşme mukavemeti ile yeniden kristalleşme plastisitesini etkili bir şekilde geliştirebileceğini belirtmişlerdir.

Clinktan vd. yaptıkları çalışmada; (Clinktan vd., 2019), CuSi4Zn14 silikon bronz nanokompozitlerdeki bor karbür nano parçacıklarının matris tozu yüzey morfolojisi ve mekanik alaşımlama yoluyla yapısal evrim üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, yaklaşık 40 μm büyüklüğündeki öğütülmemiş toz parçacık boyutunun mekanik alaşımlamadan sonra ağırlıkça %0; 3; 6; 9 ve 12 oranında güçlendirilmiş nanokompozit tozlar için sırasıyla 3,4; 4,8; 13,3 ve 40 kat azalmaya başladığını göstermiştir. Toz boyutundaki ciddi azalma, mekanik alaşımlama ve nano ZrO_2 parçacıkları tarafından üretilen daha fazla mekanik çarpışmaya bağlanmıştır. Yaklaşık 13 nm'lik küçük kristalit boyutu ve 12,7021 × 10 16 m^{-2}'lik yüksek dislokasyon yoğunluğu [CuSi4 Zn14] - %12 B_4C numunesi içindir ve B4C katkısıyla daha fazla tane incelmesine atfedilmiştir. Diğer öğütme ortamına ek olarak C parçacıkları, Cu kafes ve ZrO_2 seramik parçacığı arasında güçlü bir arayüz gözlemlemiştir. Bu durumun da mevcut araştırma çalışması ile nanokompozit tozların oluşumunu kanıtladığını belirtmişlerdir.

Elmahdy vd. (2017), yerinde işleme yöntemiyle sentezlenen Cu-ZrO_2 nanokompozitlerinin mikroyapısı ve özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar, nano

boyutlu ZrO_2 parçacıklarının (yaklaşık 30-50 nm çapında) başarıyla oluşturulduğunu ve bakır matris içinde dağıldığını göstermiştir. Cu-ZrO_2 nanokompozitin yoğunluk, elektriksel iletkenlik, mekanik dayanım ölçümleri (basma dayanımı ve Vickers mikrosertliği) ve aşınma özellikleri incelenmiştir. ZrO_2 ağırlık yüzdesindeki artış ile numunelerde ağırlıkça %10'a kadar nanoparçacıkların, nanokompozitlerin yoğunluğunda (%7,2) ve elektriksel iletkenliğinde (%53,8) azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir.

7. YÖNTEM

Deneysel çalışmalar aşamasında hibrit nanokompozit malzemelerin üretimi ve XRD incelemeleri Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarlarında, numunelerin incelemelere hazırlanması, mikrosertlik - makrosertlik incelemeleri, aşınma testleri, Optik Mikroskop (OM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve kırık yüzey incelemeleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Cu10Sn / ZrO_2 / CNT hibrit nanokompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak <44 μm parçacık boyutunda ve %85 saflıkta bronz tozları kullanılmıştır. Takviye elamanı olarak ise 20-40 nm ortalama parçacık boyutu ve %93 saflıkta CNT ile 20 – 80 nm ortalama parçacık boyutu ve %99 saflıkta ZrO_2 tozları kullanılmıştır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan tozlar Nanokar firmasından temin edilmiştir. Cu10Sn matris içerisine farklı ağırlıkça yüzde oranlarında CNT (%0,5; %1,0 ve %2,0) ve ZrO_2 (%2,5; %5,0 ve %10,0) takviye malzemeler ilave edilmiştir. Ayrıca Cu10Sn parçacıklarının karıştırma sırasında topaklaşma ve yapışmasını önlemek için toz malzeme karışımlarına eser miktarda (%0,25) stearik asit ilave edilmiştir.

Hibrit nanokompozit malzeme üretiminin ilk aşamasında toz oranları belirlenmiştir. Oranların belirlenmesinde literatüre en uygun ağırlık oranları esas alınmıştır (Abd-Elwaheda ve Meselhyb, 2020). Yüksek saflıktaki tozlar, karıştırma işlemi öncesinde RADWAG marka hassas terazi ile 10^{-4} hassasiyetinde tartılarak karıştırmaya hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım tozlar Retsch marka PM100 model cihazda (Şekil 7.1) 350 rpm hız ve 60 dakika sürede, 5/1 bilya/toz oranında, 10 mm çapında paslanmaz çelik bilyeler içeren bir kap içinde karıştırılmıştır. Çalışmada matris malzeme ve takviye malzemeler için belirlenen ağırlıkça yüzde oranları Tablo 7.1'de gösterilmiştir.



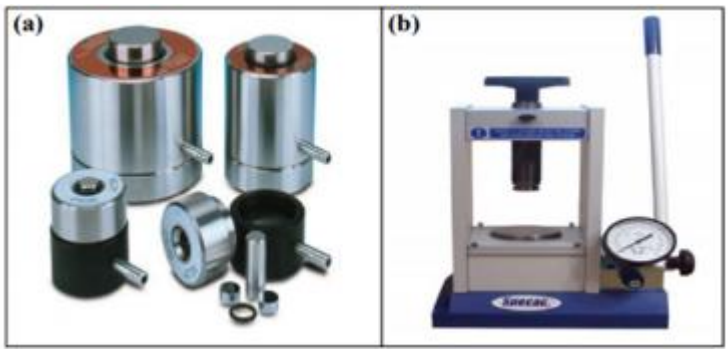
Şekil 7.1 Gezegen hareketli bilyeli öğütücü

Tablo 7.1 Çalışmada kullanılan tozların ağırlıkça yüzdeleri

Deneyler	**Karışım Oranları (%)**		
	Cu10Sn	**ZrO2**	**CNT**
Deney 1	100	0	0
Deney 2	97,5	2,5	0
Deney 3	95	5	0
Deney 4	90	10	0
Deney 5	99,5	0	0,5
Deney 6	99	0	1,0
Deney 7	98	0	2,0
Deney 8	97	2,5	0,5
Deney 9	96,5	2,5	1,0
Deney 10	95,5	2,5	2,0
Deney 11	94,5	5,0	0,5
Deney 12	94	5,0	1,0
Deney 13	93	5,0	2,0
Deney 14	89,5	10	0,5
Deney 15	89	10	1,0
Deney 16	88	10	2,0

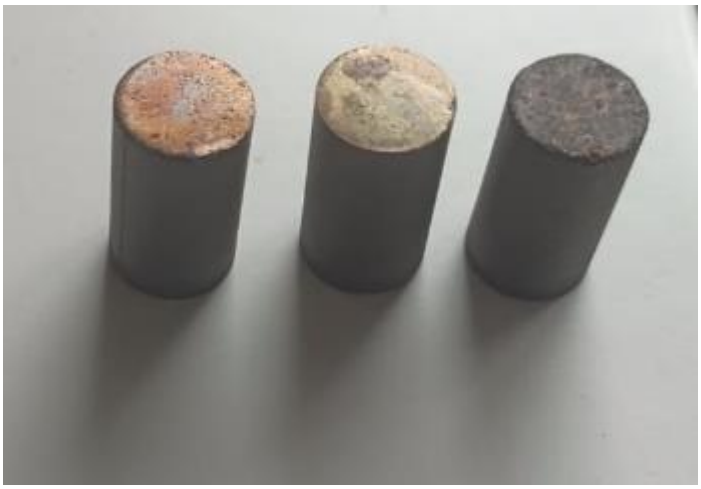
Hazırlanan karışım tozların soğuk preslenmesi çelik kalıplar ile Specac marka GS15011 model hidrolik pellet preste gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.2). Oda sıcaklığında gerçekleşen presleme işleminde kalıp olarak, 10 mm çapında silindirik çelik kalıplar

kullanılmıştır. Presleme basıncı olarak 600 MPa basınç uygulanmış ve 10 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde numuneler elde edilmiştir.



Şekil 7.2 a) Kalıplar b) Specac GS15011 hidrolik pellet presi

Cu-Sn faz diyagramında (Fürtauer vd., 2013) %10 kalay değerinde 798°C ve üzerinde sıvı katı ara yüzeyine geçiş olduğu belirlendiğinden sinterleme sıcaklığı 750°C olarak belirlenmiştir. Sıkıştırılan toz malzemeler, arayüzey bağlanmasının arttırılması için Argon atmosferi altında 750°C sıcaklık ve 90 dakika sürede bir tüp fırın içerisinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi sonrası bir deney grubundaki numunelerin görüntüsü Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3 Üretimi gerçekleştirilen kompozit numunelerin görüntüsü

Üretimi tamamlanan hibrit nanokompozit malzemeler öncelikle yoğunluk ölçümlerine tabi tutulmuştur. Yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibi kullanılarak sıvı taşırma metoduyla gerçekleştirilmiştir. Arşimet prensibine göre numunelerin deneysel yoğunlukları tespit edilerek, bağıl yoğunluklar hesaplanmıştır.

7.1 Mikroyapısal Karakterizasyon

Üretilen hibrit nanokompozit malzemeler mikroyapısal incelemeler için standart metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Bakalite alınan numuneler (Şekil 7.4) sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 gritlik su zımparasına tutularak yüzeyleri incelemeye hazır hale getirilmiştir. Numuneler daha sonra 3 ve 1 mikronluk elmas süspansiyonlar ve keçeler yardımıyla yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler son aşamada ise 5gr $FeCl_3$, 50 ml HCl, 100 ml saf H_2O'dan oluşan dağlama ayracı ile dağlanmıştır. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenmiş ve mikroyapısal incelemelere hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri kapsamında; OM incelemeleri Leica marka DM4000 model (Şekil 7.5), SEM ve EDS incelemeleri Jeol marka JSM 6060 LV model (Şekil 7.6), XRD incelemeleri ise Bruker marka D8 Advance (Şekil 7.7) cihazlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4 Bakalite alınan numuneler



Şekil 7.5 Leica marka DM4000 optik mikroskop



Şekil 7.6 Jeol marka JSM 6060 LV taramalı elektron mikroskobu

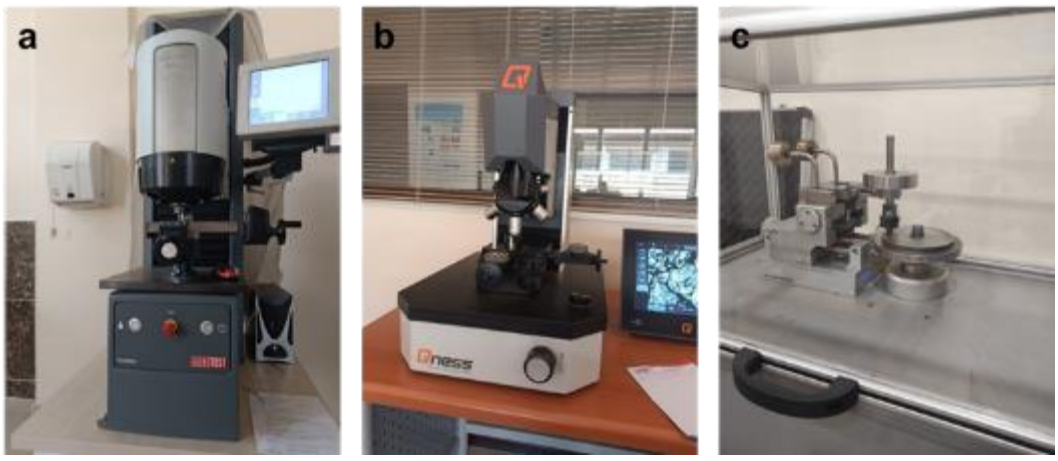


Şekil 7.7 Bruker marka D8 Advance XRD cihazı

7.2 Mekanik Karakterizasyon

Yüzeyleri metalografik uygulamalar için hazırlanan numunelerin makrosertlik ölçümleri; Emcotest Duravision 2000 marka cihaz (Şekil 7.8.a) yardımıyla, 2,5 mm

çapında batıcı uç ve 15.625 kg yük uygulanarak Brinell yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik değerleri ise; Q-Ness Q30M marka otomatik sertlik ölçme makinesinde (Şekil 7.8.b), Vickers metoduyla 0,5 kg yük kullanılarak ölçülmüştür. Makrosertlik ve mikrosertlik değerleri, numunenin belirli bölgelerinden 5 adet ölçüm ve ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Kuru kayma aşınma testleri ise ASTM G99-17 standardına göre hazırlanmış numunelere Pin-on-disc yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde Tribometer T10/20 cihazı (Şekil 7.8.c) ve aşındırıcı plaka olarak 120 mm çapında 10 mm kalınlığında EN ISO 6506-1'e göre 400 HBW sertliğinde Hardox 400 kalite malzeme kullanılmıştır. Aşınma testleri 1200 m mesafede, 1,25 m/s kayma hızında ve 10 N yük altında yapılmıştır. Kuru kayma aşınma testleri, hibrit nanokompozit tabakası diske sürtünerek bir pim-disk makinesinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerden önce disk yüzey taşlama tezgâhında taşlatılmıştır. Pim temizlenmiş ve deneyden önce elektronik bir terazide dikkatlice tartılmıştır. Aşınma testinden önce ve sonra numunelerin ağırlıkları not edilmiş ve ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Aşınmış yüzeyin detaylı mikroyapısal karakterizasyonunu anlamak için aşınmış yüzey incelemeleri SEM yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.8 Deneylerde kullanılan sertlik ve aşınma cihazları

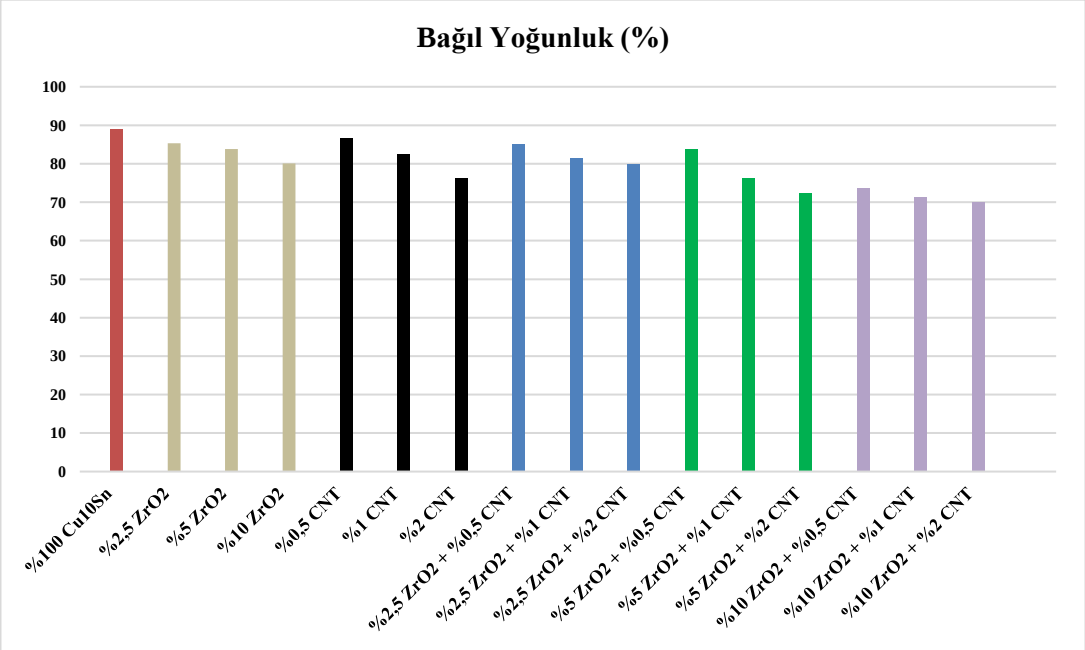
8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

TM metoduyla üretilen Cu10Sn matrisli ve CNT/ZrO_2 takviyeli mono ve hibrit kompozitler, yoğunluk ölçümü, mikroyapı incelemeleri (OM, SEM, EDS, XRD), mikrosertlik ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

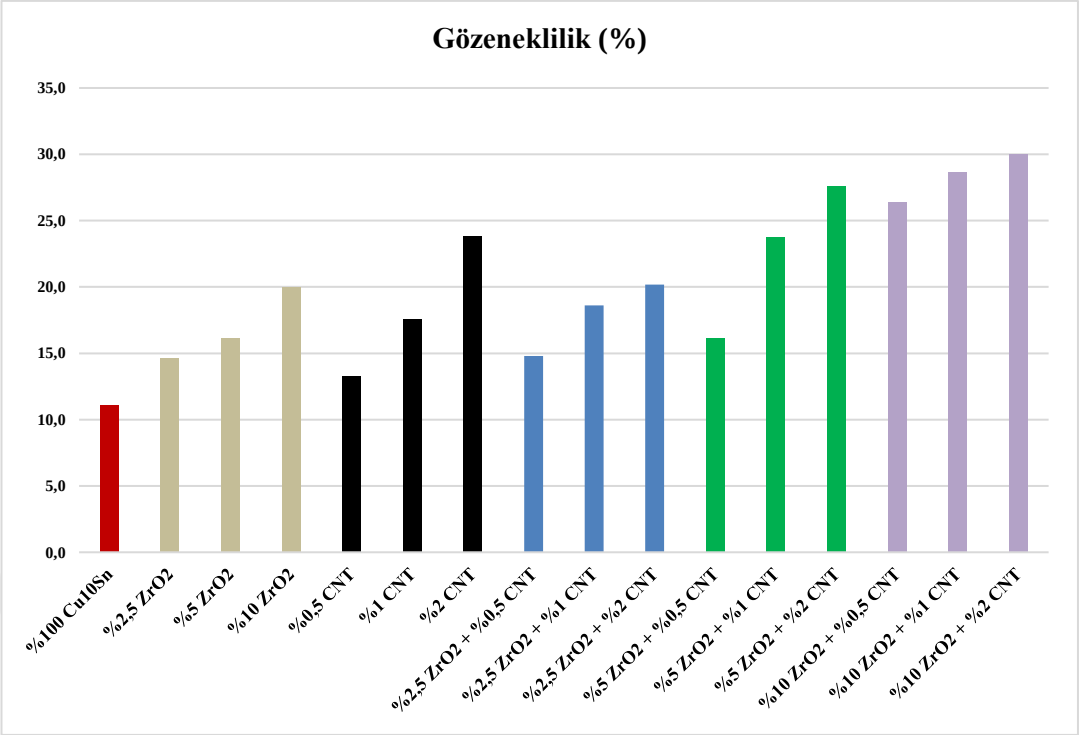
8.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

TM metoduyla üretilen kompozit malzemelere öncelikle bağıl yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin bağıl yoğunluk grafiği ve bağıl yoğunluğa bağlı olarak gözeneklilik grafiği ise sırasıyla Şekil 8.1 ve Şekil 8.2'de verilmiştir. Bağıl yoğunluk hesabı ise aşağıdaki eşitliğe uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

$$Bağıl\ yoğunluk\ (\%) = \frac{Deneysel\ yoğunluk\ \left(\frac{gr}{cm^3}\right)}{Teorik\ yoğunluk\ \left(\frac{gr}{cm^3}\right)} x100 \quad (8.1)$$



Şekil 8.1 Hibrit nanokompozit malzemelerin bağıl yoğunluk grafiği



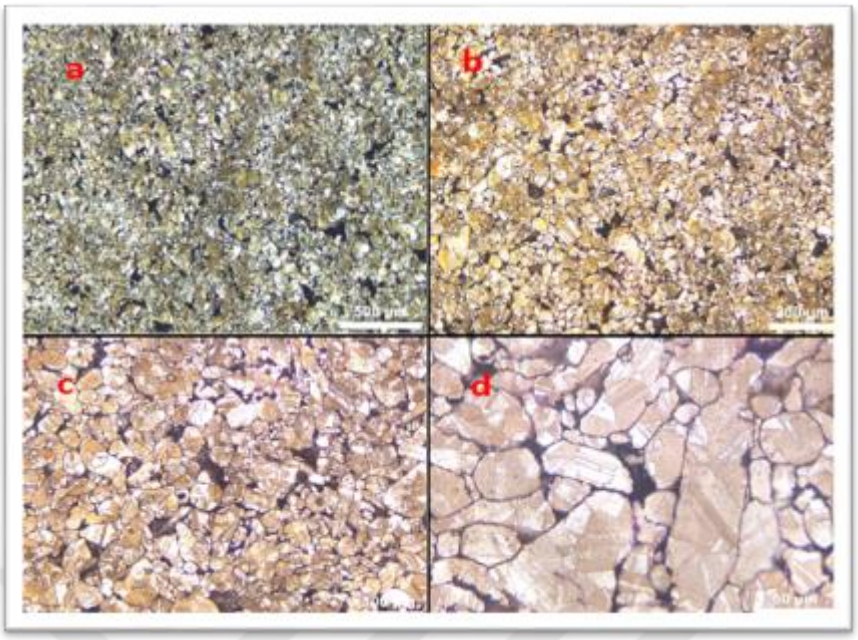
Şekil 8.2 Hibrit nanokompozit malzemelerin gözeneklilik grafiği

Şekil 8.1 ve Şekil 8.2'deki grafikler incelendiğinde matris malzemesi Cu10Sn'nin bağıl yoğunluğunun ve gözenekliliğinin sırasıyla %88,9 ve %11,1 olduğu görülmüştür. Genel olarak, takviye malzemelerinin yoğunluğunun matris malzemesinden daha düşük olması nedeniyle, kompozit malzemelerin yoğunluğu azalırken, gözeneklilikte de artışlar gözlemlenmiştir.

8.2 Mikroyapı İncelemeleri

8.2.1 OM İncelemeleri

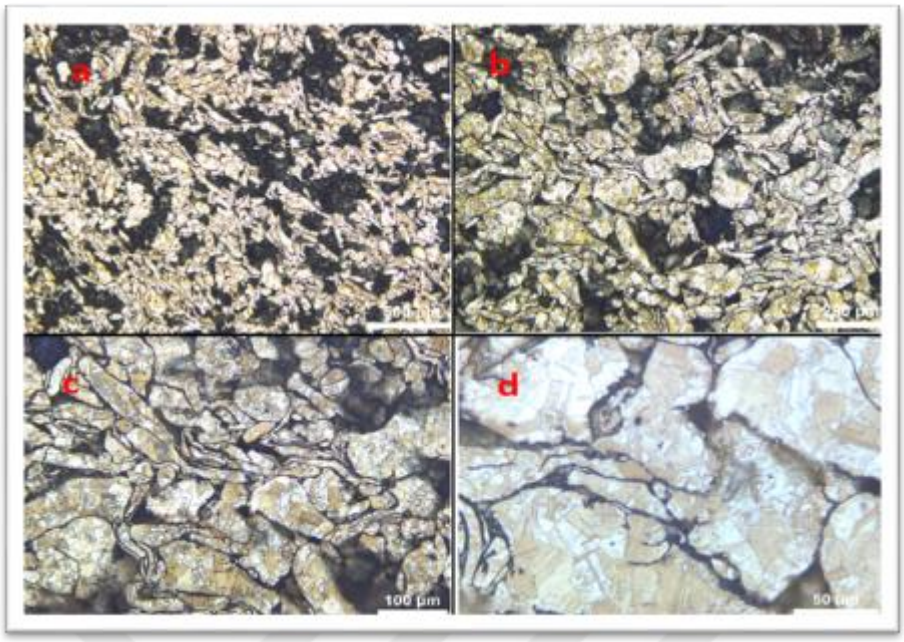
Kompozit malzemelerden metalografik numune hazırlama yöntemlerine uygun olarak alınan numuneler daha sonra mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Sonuçların birbirini desteklemesi açısından üretilen tüm malzemeler için hem OM hem de SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Matris malzeme olan Cu10Sn alaşımının OM görüntüsü Şekil 8.3'te, kompozit malzemelerin OM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 8.4 – 8.19 arasında verilmiştir.



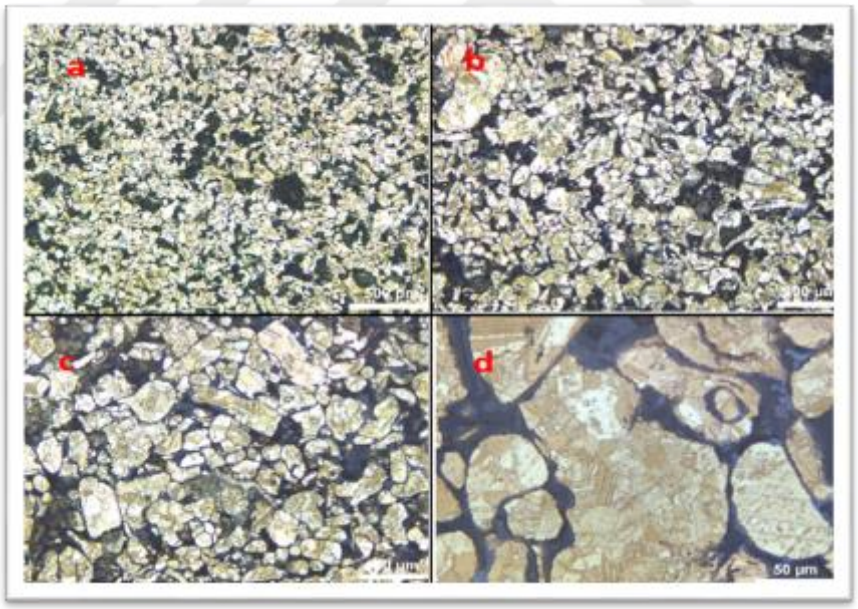
Şekil 8.3 1 numaralı deney numunesinin (%100 Cu10Sn) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme

Şekil 8.3'te verilen matris malzemesi Cu10Sn alaşımının OM görüntüleri incelendiğinde; Cu10Sn taneleri net olarak görülmekte olup, Cu10Sn tanelerinin arasında oluşan gözenekler ve sinterleme sonrası boşluklar da görüntüden anlaşılmaktadır.

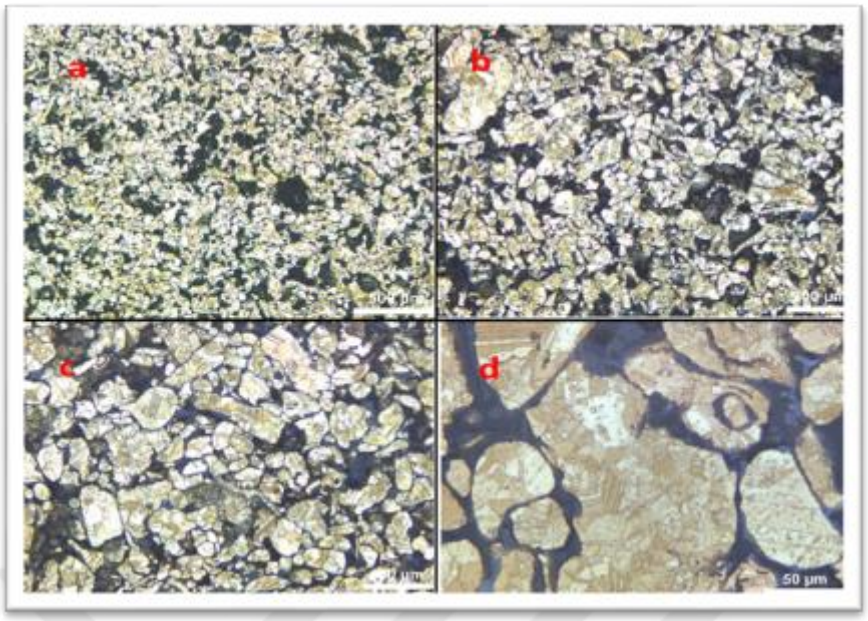
Mono takviye olarak sadece ZrO_2'nin kullanıldığı deneyler olan Deney 2, Deney 3 ve Deney 4'ten elde edilen OM görüntüleri sırasıyla Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da verilmiştir.



Şekil 8.4 2 numaralı deney numunesinin (%97,5 Cu10Sn + %2,5 ZrO2) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



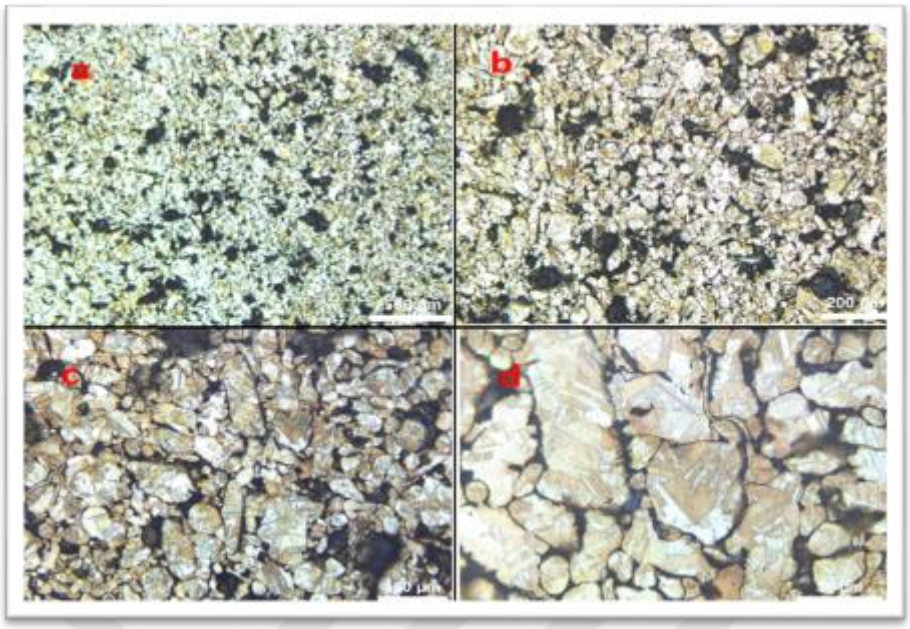
Şekil 8.5 3 numaralı deney numunesinin (%95 Cu10Sn + %5 ZrO2) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



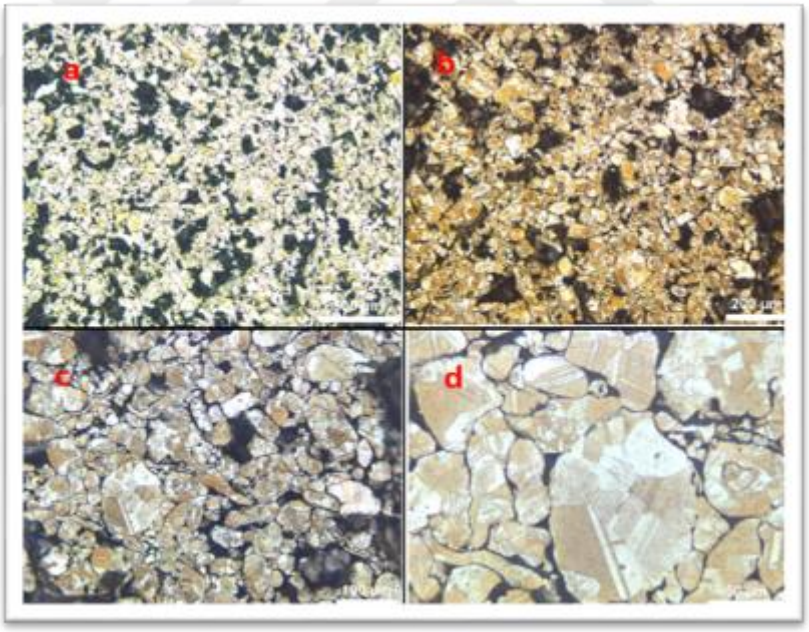
Şekil 8.6 4 numaralı deney numunesinin (%90 Cu10Sn + %10 ZrO_2) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme

Şekil 8.4 – Şekil 8.6 arasında verilen ZrO_2 takviyeli kompozit malzemelerin OM görüntülerinde özellikle büyük büyütmelerde tane sınırlarının arasında tespit edilen griliklerin aglomere ZrO_2 takviyeleri olduğu düşünülmektedir. TM metoduyla üretilen kompozit malzemelerde takviye partiküllerinin özellikle matris malzeme tane sınırlarına yerleştiği bilinmektedir. Yine OM görüntülerinde ZrO_2 takviye oranının artmasıyla birlikte bağıl yoğunluğun düşmesine bağlı olarak, gözenekliliğin arttığı, bu durumun da OM görüntülerinden gözenekler ve boşluklar şeklinde anlaşılabildiği görülmüştür.

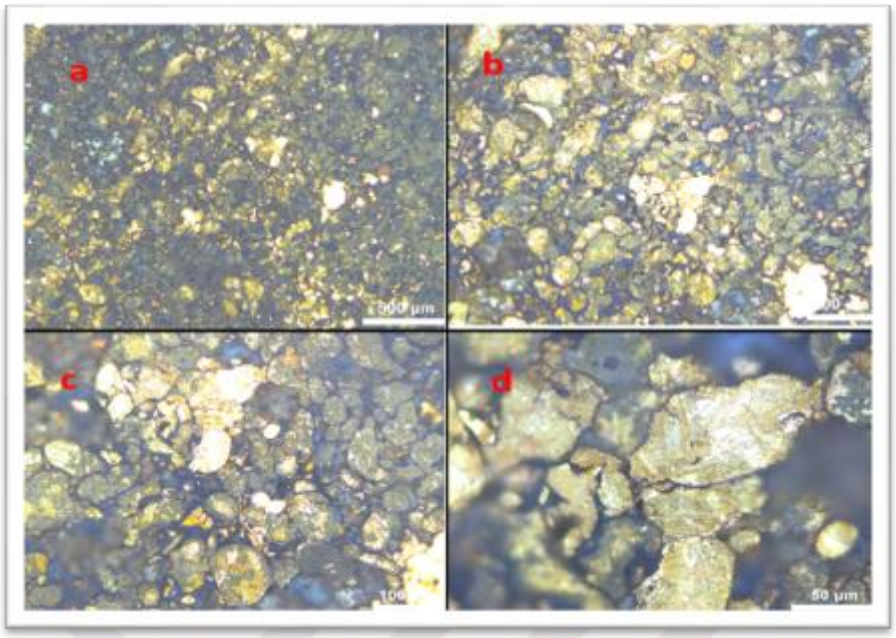
Mono takviye olarak sadece CNT'nin kullanıldığı deneyler olan Deney 5, Deney 6 ve Deney 7'den elde edilen OM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 8.7, Şekil 8.8 ve Şekil 8.9'da verilmiştir.



Şekil 8.7 5 numaralı deney numunesinin (%99,5 Cu10Sn + %0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



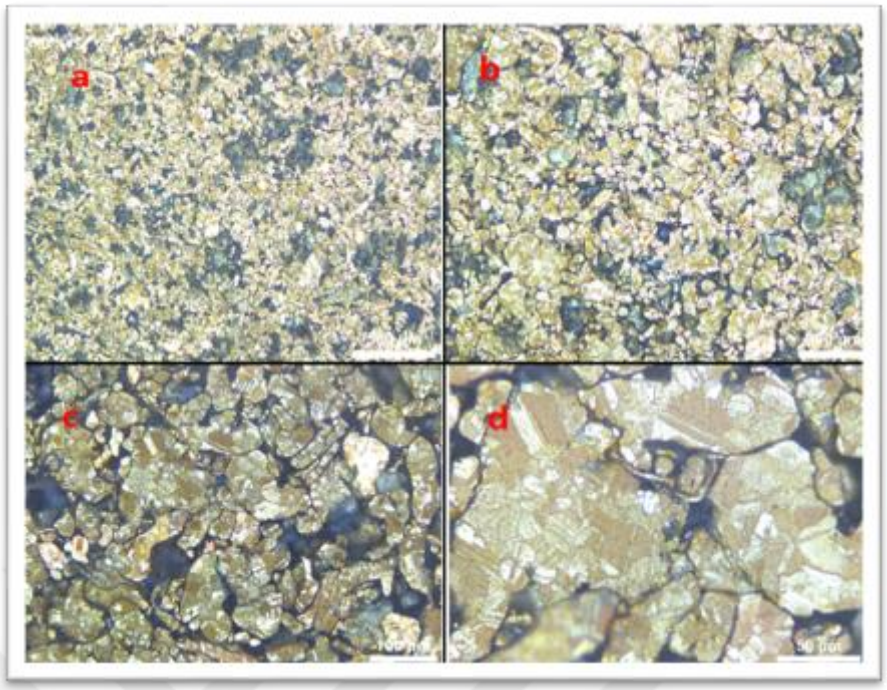
Şekil 8.8 6 numaralı deney numunesinin (%99 Cu10Sn +%1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



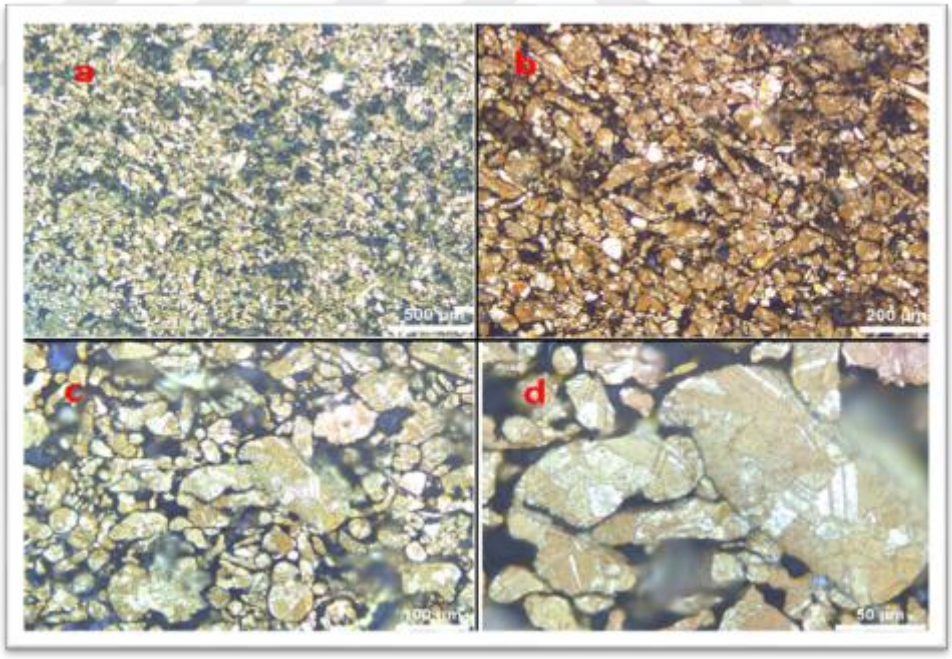
Şekil 8.9 7 numaralı deney numunesinin (%98 Cu10Sn +%2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme

Şekil 8.7 – Şekil 8.9 arasında verilen CNT takviyeli kompozit malzemelerin OM görüntülerinde siyah renkle görülen bölgelerin gözeneklerin oluşturduğu boşluklarla birlikte CNT takviyeleri olduğu düşünülmektedir. OM görüntülerinde CNT takviye oranının artmasıyla birlikte bağıl yoğunluğun düşmesine bağlı olarak, gözenekliliğin arttığı görülmüş, bu durum da yine OM görüntülerine yansımıştır.

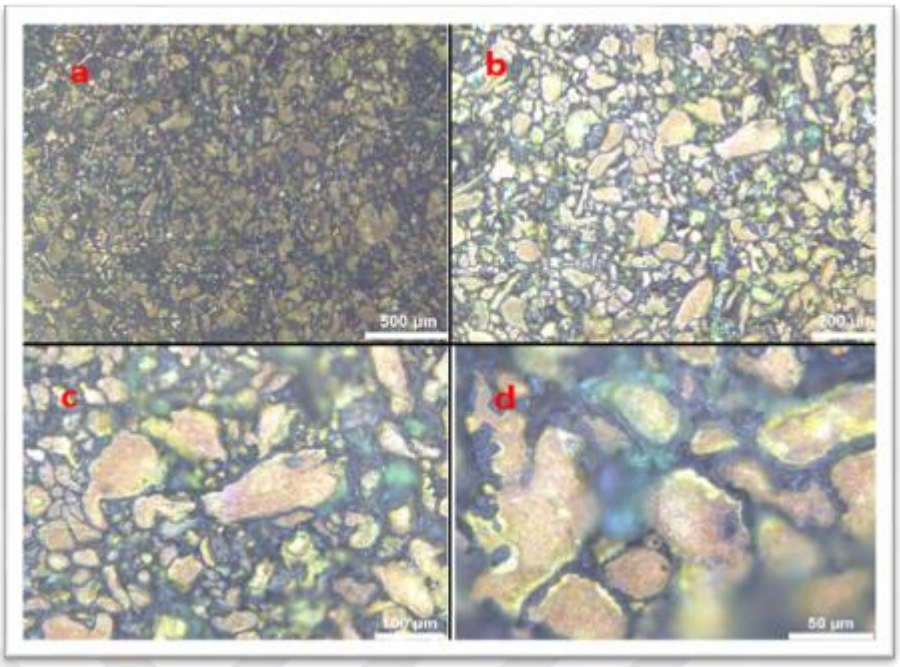
Hibrit takviye olarak %2,5 ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneyler olan Deney 8, Deney 9 ve Deney 10'dan elde edilen OM görüntüleri sırasıyla Şekil 8.10, Şekil 8.11 ve Şekil 8.12'de verilmiştir.



Şekil 8.10 8 numaralı deney numunesinin (%97 Cu10Sn + %2,5 ZrO_2 +%0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



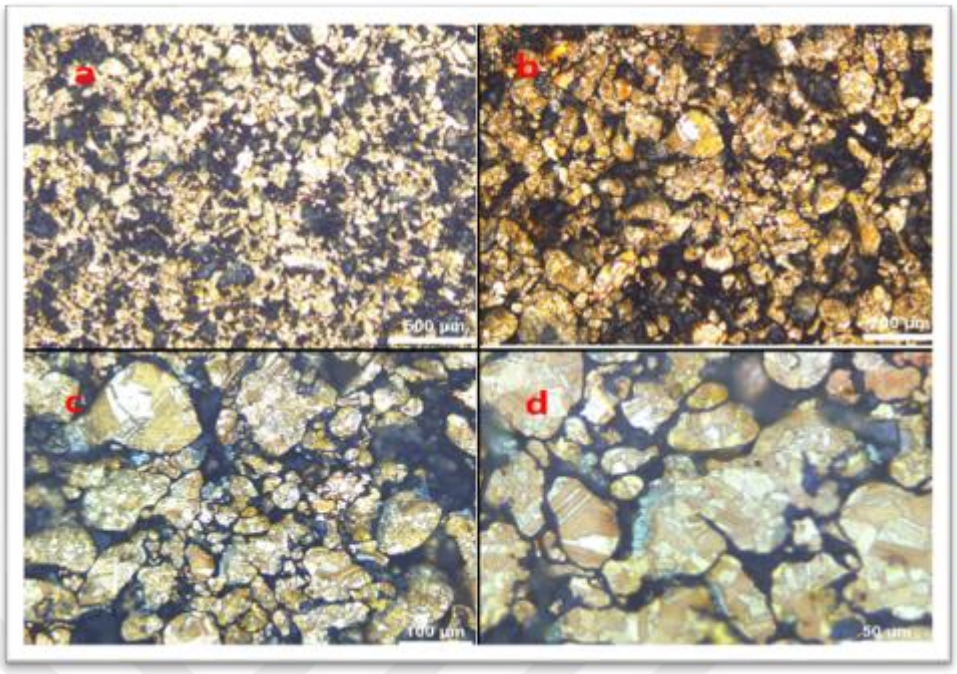
Şekil 8.11 9 numaralı deney numunesinin (%96,5 Cu10Sn + %2,5 ZrO_2 +%1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



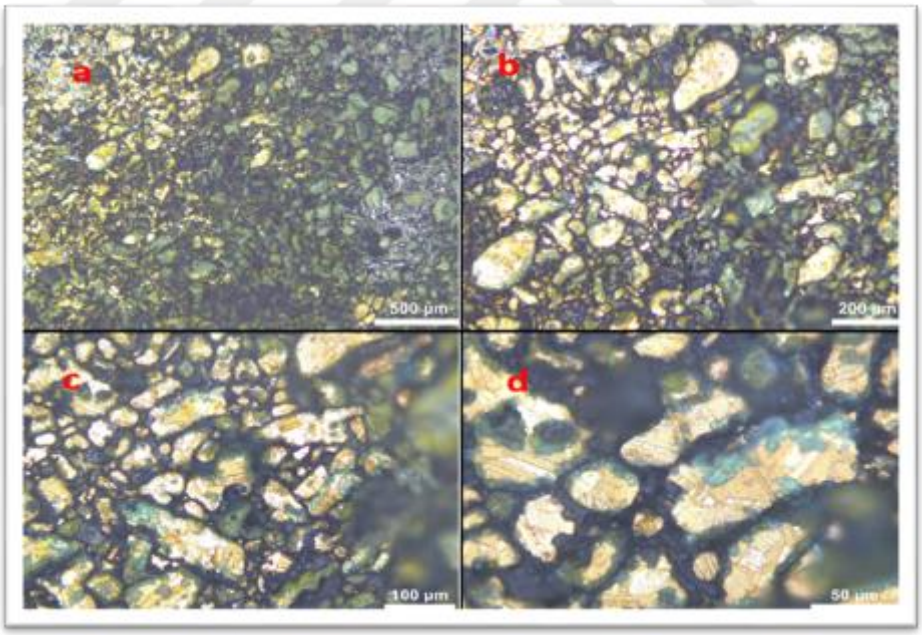
Şekil 8.12 10 numaralı deney numunesinin (%95,5 Cu10Sn + %2,5 ZrO_2 +%2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme

Şekil 8.10 – Şekil 8.12 arasında verilen hibrit takviye olarak %2,5 ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneylerde malzemelerin OM görüntülerinde bölge bölge gözeneklerin oluşturduğu boşluklarla birlikte ZrO_2 ve CNT takviyelerinin kümelendiği düşünülmektedir. Takviye oranlarının artmasıyla birlikte bağıl yoğunluğun düşmesine bağlı olarak, gözenekliliğin artması neticesinde, OM görüntülerinde de bu durum gözlemlenmiştir.

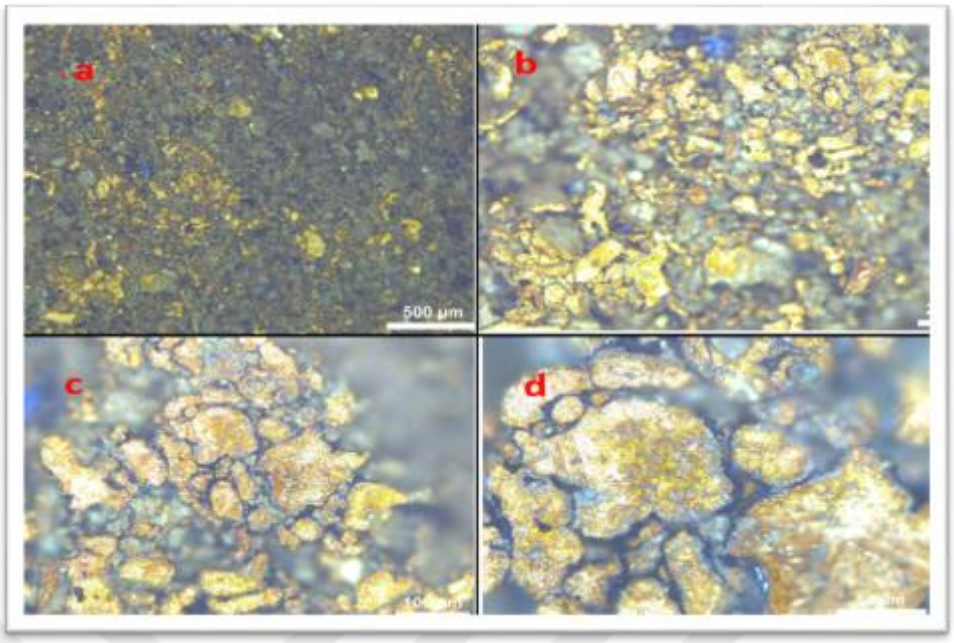
Hibrit takviye olarak %5 ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneyler olan Deney 11, Deney 12 ve Deney 13'ten elde edilen OM görüntüleri sırasıyla Şekil 8.13, Şekil 8.14 ve Şekil 8.15'te verilmiştir.



Şekil 8.13 11 numaralı deney numunesinin (%94,5 Cu10Sn +%5 ZrO_2 +%0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



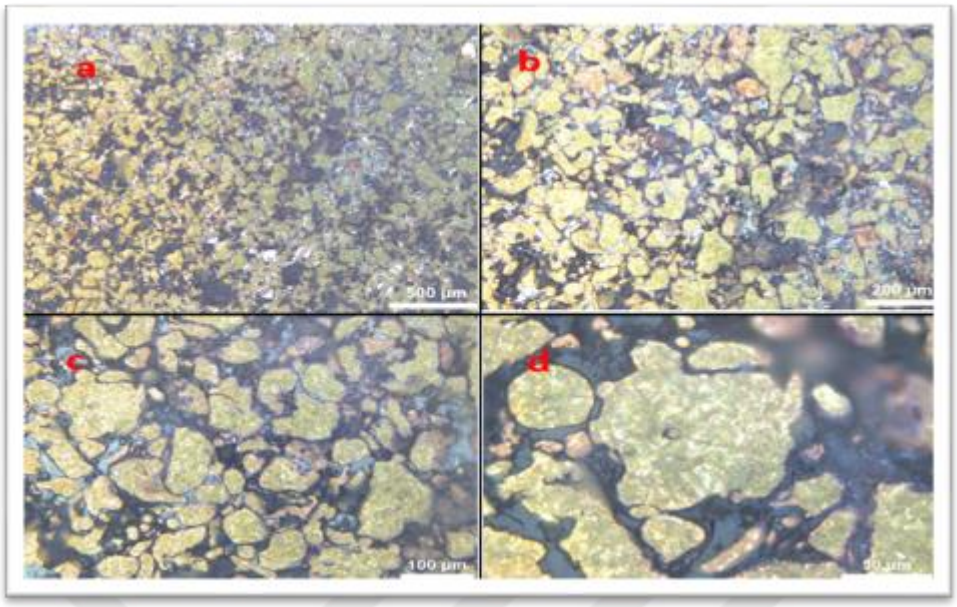
Şekil 8.14 12 numaralı deney numunesinin (%94 Cu10Sn + %5 ZrO_2 + %1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



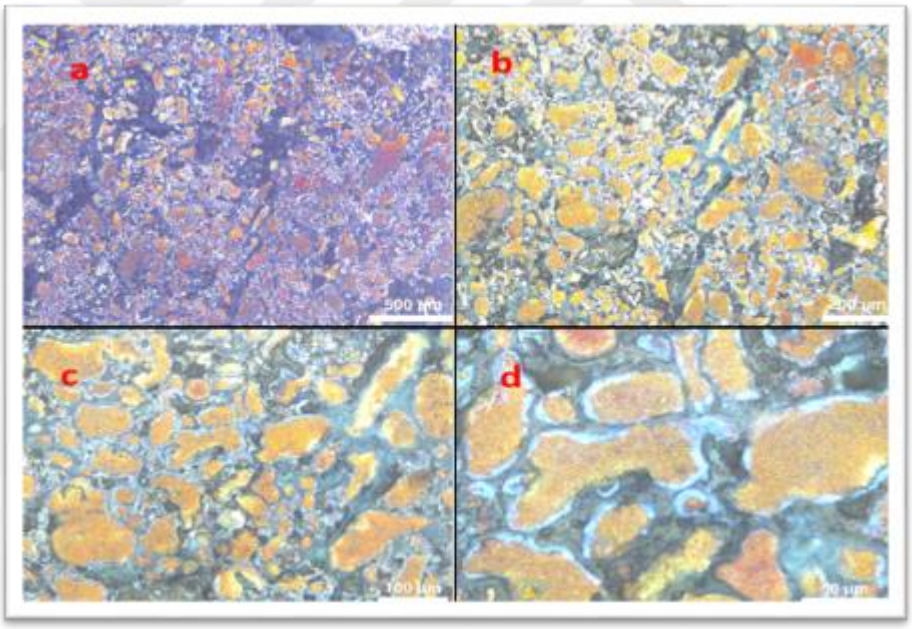
Şekil 8.15 13 numaralı deney numunesinin (%93 Cu10Sn + %5 ZrO_2 +%2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme

Şekil 8.13 – Şekil 8.15 arasında verilen hibrit takviye olarak %5 ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneylerde malzemelerin OM görüntülerinde gözeneklerin oluşturduğu boşluklar, ZrO_2 ve CNT takviyelerinin kümelenmiş hali görülmektedir. OM görüntülerinde takviye oranlarının artmasıyla birlikte bağıl yoğunluğun düşmesine bağlı olarak, gözenekliliğin arttığı görülmüş, bu durum OM görüntülerine yansımıştır.

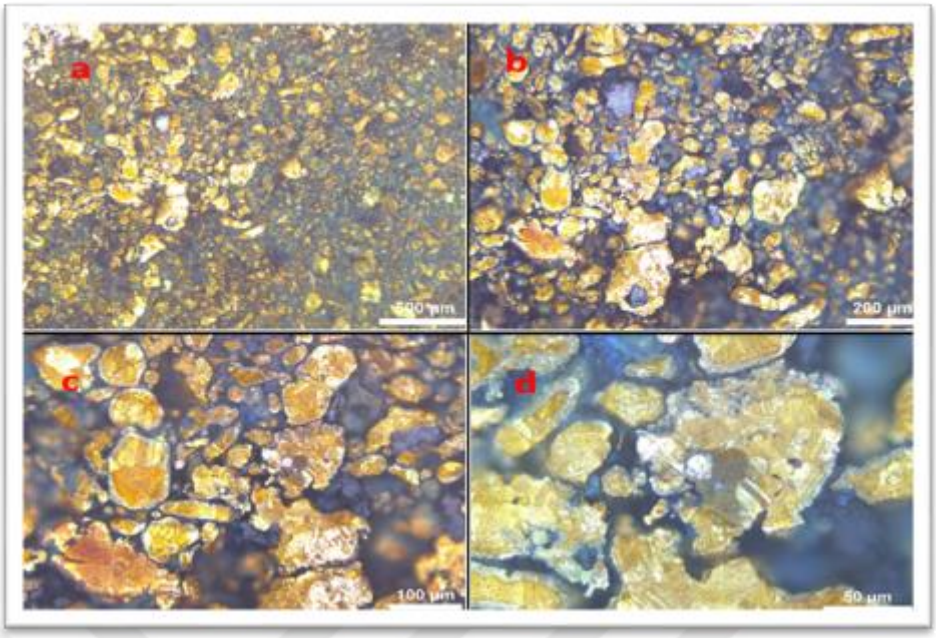
Hibrit takviye olarak %10 ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneyler olan Deney 14, Deney 15 ve Deney 16'dan elde edilen OM görüntüleri sırasıyla Şekil 8.16, Şekil 8.17 ve Şekil 8.18'de verilmiştir.



Şekil 8.16 14 numaralı deney numunesinin (%89,5 Cu10Sn + %10 ZrO_2 +%0,5 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



Şekil 8.17 15 numaralı deney numunesinin (%89 Cu10Sn + %10 ZrO_2 + %1 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme



Şekil 8.18 16 numaralı deney numunesinin (%88 Cu10Sn + %10 ZrO_2 + %2 CNT) OM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 100x büyütme, c) 200x büyütme, d) 500x büyütme

Şekil 8.16 – Şekil 8.18 arasında verilen hibrit takviye olarak %10 ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneylerde malzemelerin OM görüntülerinde gözeneklerin oluşturduğu boşlukların, artan ZrO_2 ve CNT takviyeleri sebebiyle arttığı düşünülmektedir.

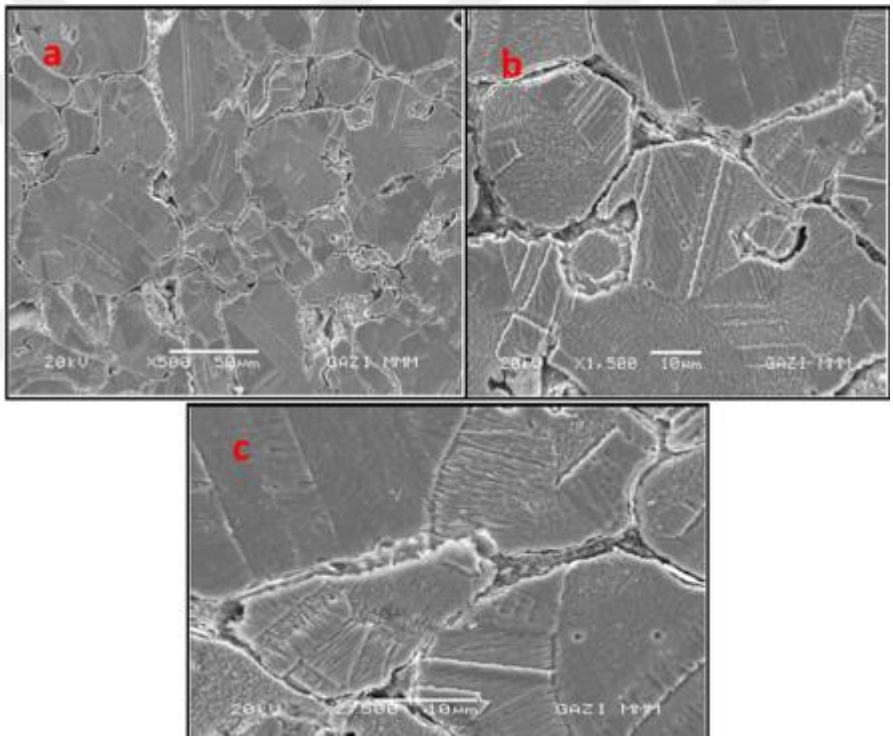
8.2.1.1 OM görüntülerinin genel değerlendirmesi

OM görüntüleri genel olarak incelendiğinde; matris malzemesi, takviye malzemesi ve gözeneklerden oluşan yapıların görüntülerde yer aldığı tespit edilmiştir. Genel olarak gri renkteki bölgelerin takviye malzemesi ZrO_2, siyah renkteki bölgelerin ise CNT'nin özellikle tane sınırlarında birikmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Yapılan genel incelemelerde; CNT ve ZrO_2 miktarı arttıkça matris üzerinde mikro boyutta yapısal bozulmalar ve boşluk oluşumlarının arttığı gözlemlenmiştir. Parçacık boyutunun nano ölçekte olması nedeniyle tane sınırlarında görülen parçacık malzemelerinin bir araya gelerek aglomerasyon ve topaklaşma oluşturduğu düşünülmektedir. ZrO_2 ve CNT oranında artış görüldükçe numunenin aglomere olan ve topaklanan bölümlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

8.2.2 SEM İncelemeleri

Ağırlıkça %10 Sn ve %90 Cu içerikteki Cu10Sn matrisi ile ZrO_2 ve CNT takviye içeren kompozit malzemelerin farklı büyütmelerde SEM fotoğrafları alınmıştır. OM görüntülerini desteklemek amacıyla %100 bronz alaşımı ile birlikte kompozit malzemelerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 8.19 - Şekil 8.34 arasında verilmiştir.

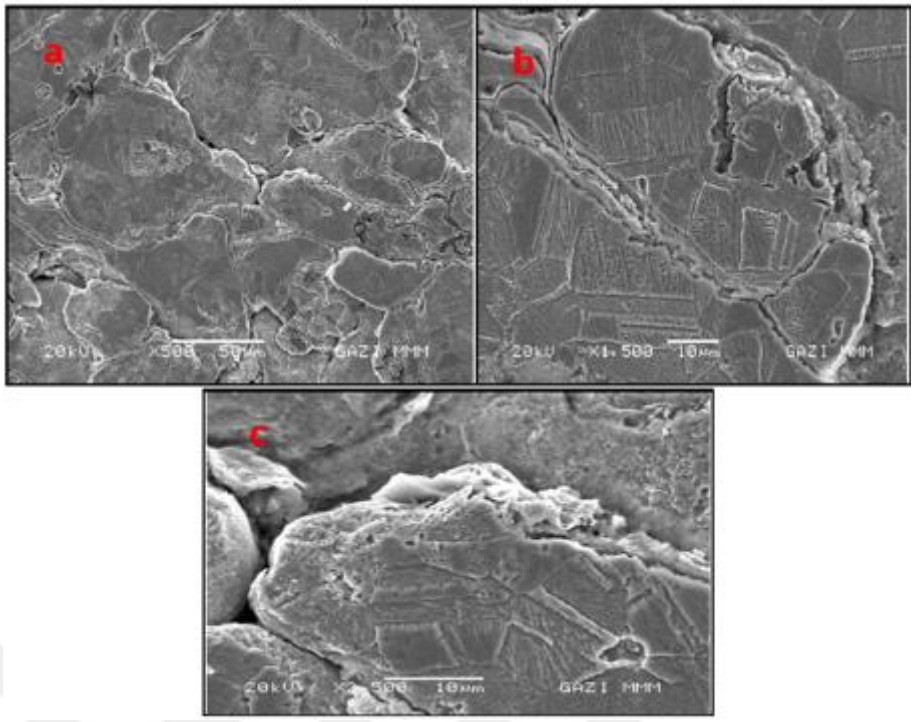
Şekil 8.19'da Deney 1 numunesinin (%100 Cu10Sn) farklı büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde a, 500x, b, 1500x, c ise 2500x büyütmeyi göstermektedir.



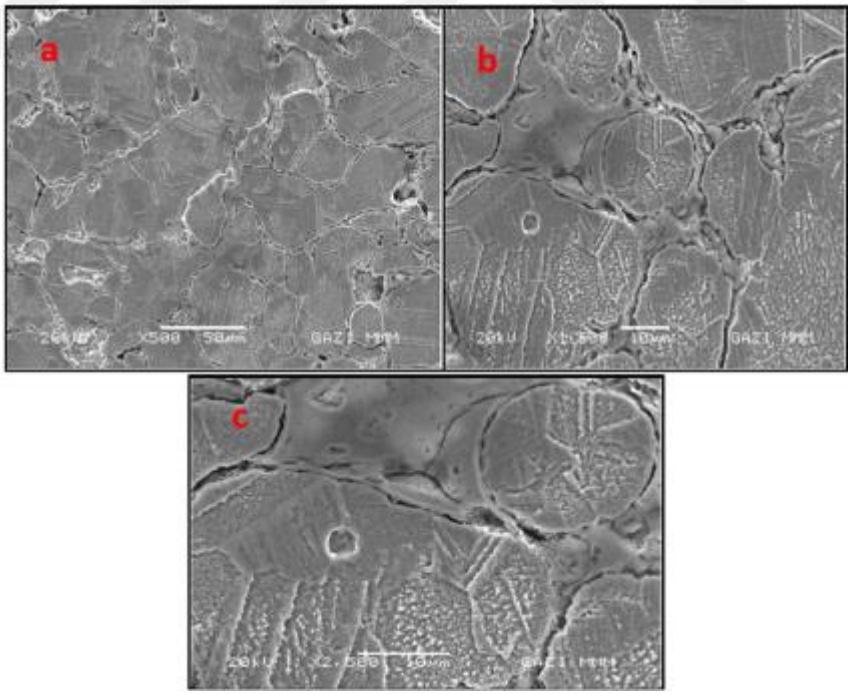
Şekil 8.19 1 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 8.19 incelendiğinde; takviyesiz olması nedeniyle Deney 1 numunesinde oluşan tanelerin Cu10Sn taneleri olduğu, tane sınırları arasında ise yer yer gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir.

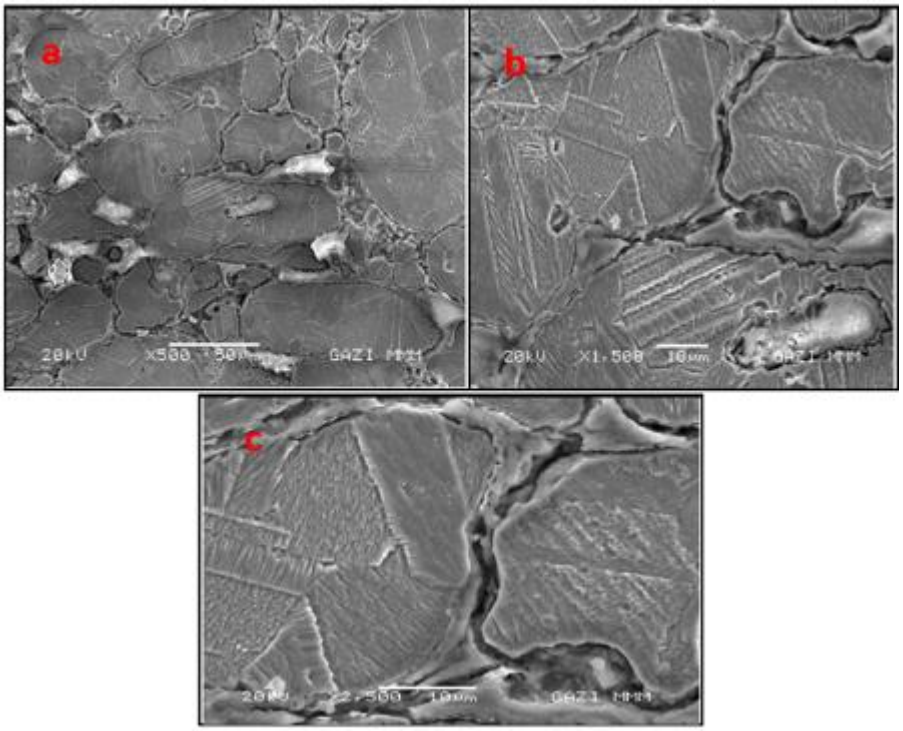
Mono takviye olarak sadece ZrO_2'nin kullanıldığı Deney 2, Deney 3 ve Deney 4'ten elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 8.20, Şekil 8.21 ve Şekil 8.22'de verilmiştir.



Şekil 8.20 2 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



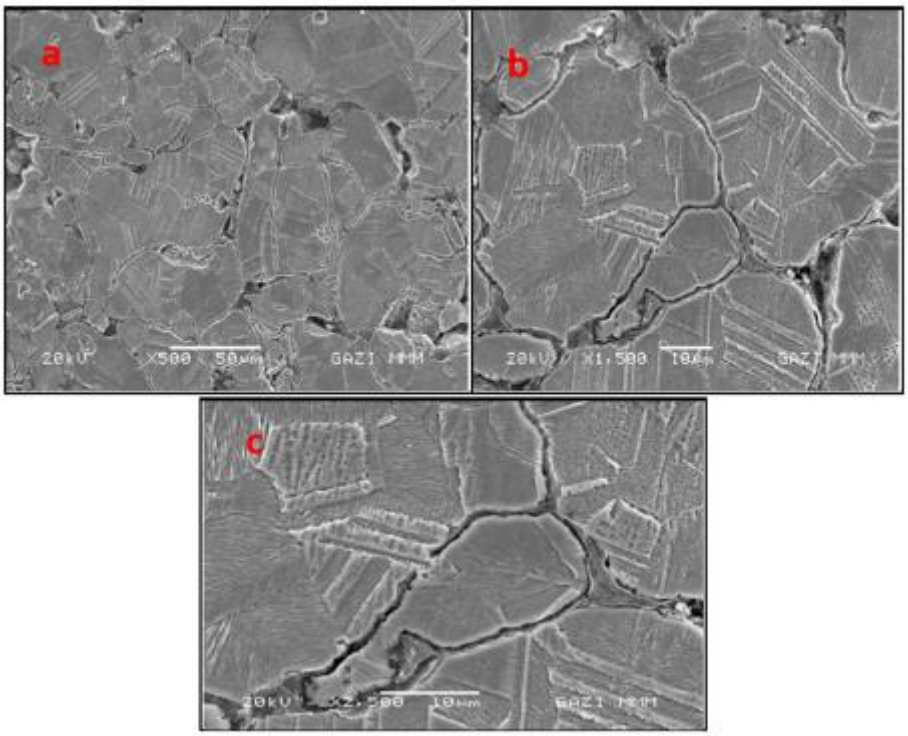
Şekil 8.21 3 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



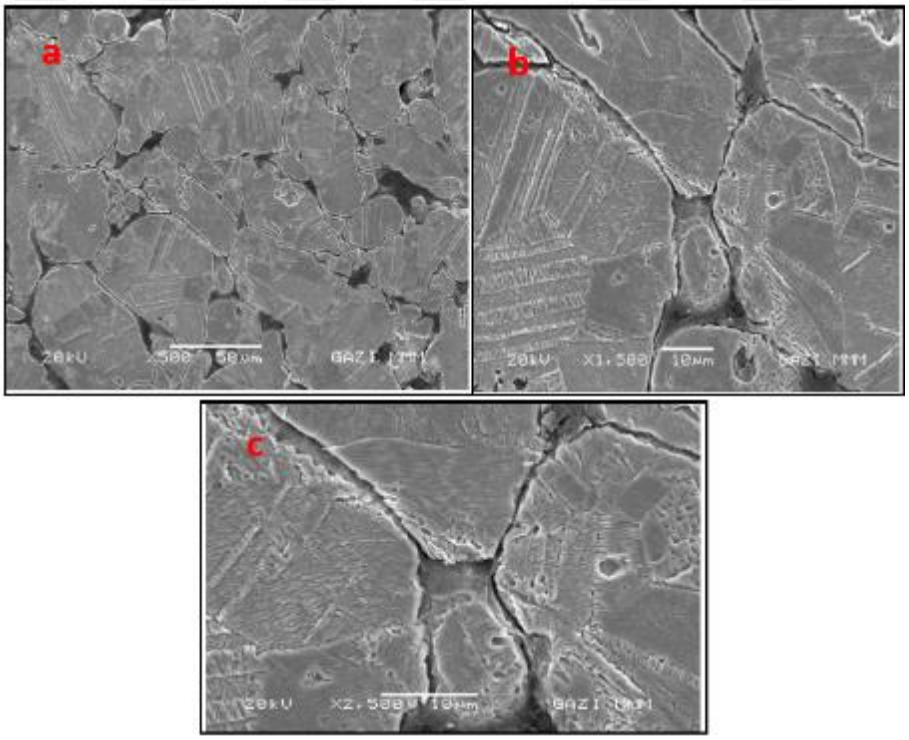
Şekil 8.22 4 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 8.20 – Şekil 8.22 arasında verilen ZrO_2 takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntülerinde tane sınırlarının arasında tespit edilen griliklerin OM görüntülerindekilere benzer şekilde ZrO_2 takviyesi olduğu düşünülmektedir. TM metoduyla üretilen kompozit malzemelerde takviye partiküllerinin özellikle matris malzeme tane sınırlarına yerleştiği OM incelemelerinde de bahsedilmiş ve yine SEM görüntülerinde belirlenmiştir. SEM görüntülerinde ZrO_2 takviye oranının artmasıyla birlikte gözenekliliğin artması durumu SEM görüntülerinden de anlaşılmaktadır.

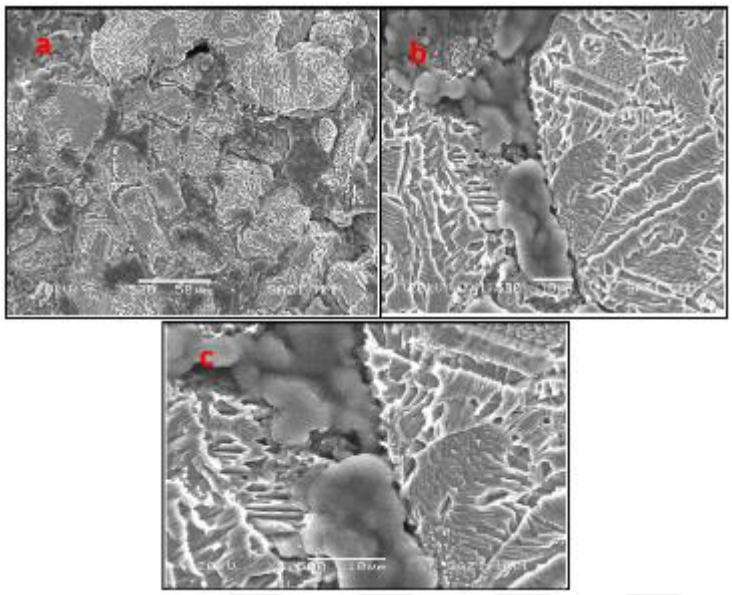
Mono takviye olarak sadece CNT'nin kullanıldığı Deney 5, Deney 6 ve Deney 7'den elde edilen SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 8.23, Şekil 8.24 ve Şekil 8.25'te verilmiştir.



Şekil 8.23 5 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



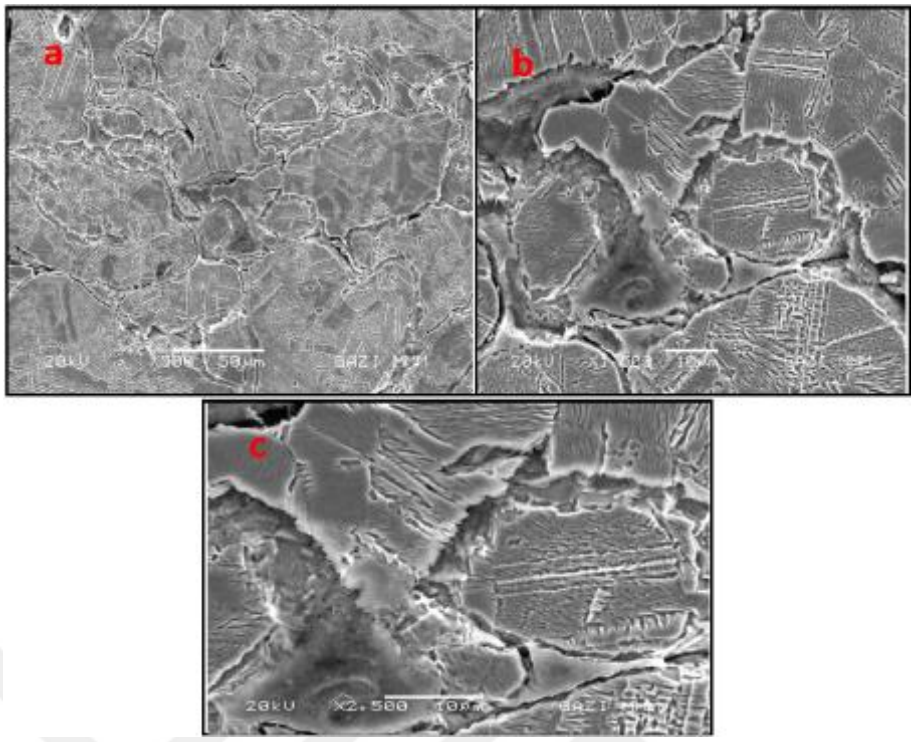
Şekil 8.24 6 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



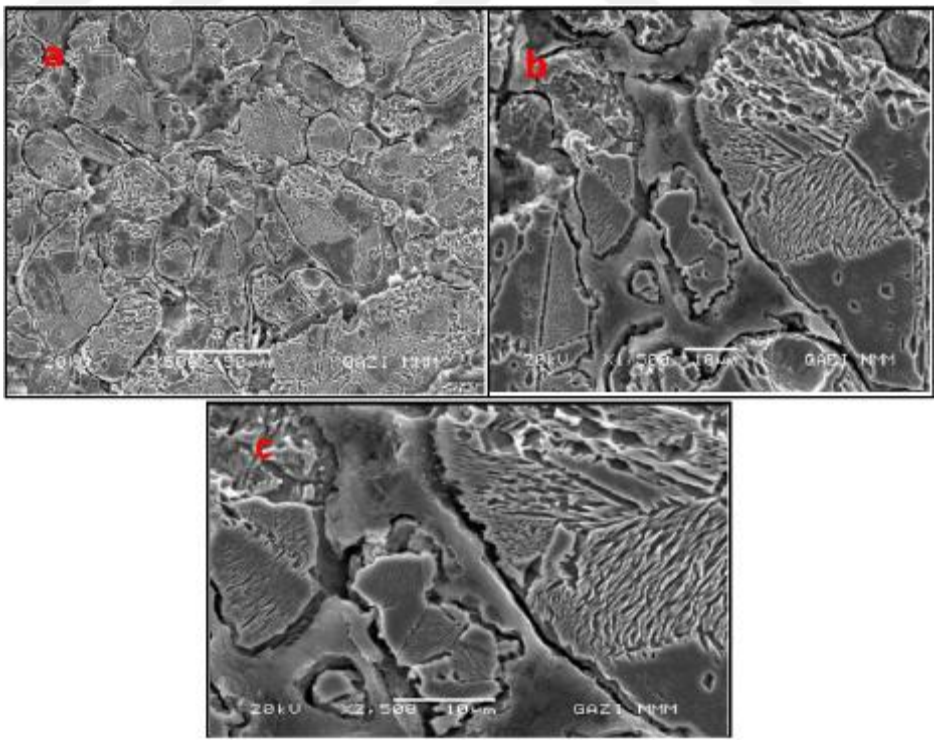
Şekil 8.25 7 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 8.23 – Şekil 8.25 arasında verilen CNT takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntülerinde tane sınırlarının arasında tespit edilen siyahlıkların CNT takviyesi olduğu düşünülmektedir. OM incelemelerinde de bahsedildiği üzere TM metoduyla üretilen kompozit malzemelerde takviye partiküllerinin özellikle matris malzeme tane sınırlarındaki boşluklar arasına yerleştiği ve SEM görüntülerinde CNT takviye oranının artmasıyla birlikte gözenekliliğin arttığı anlaşılmıştır.

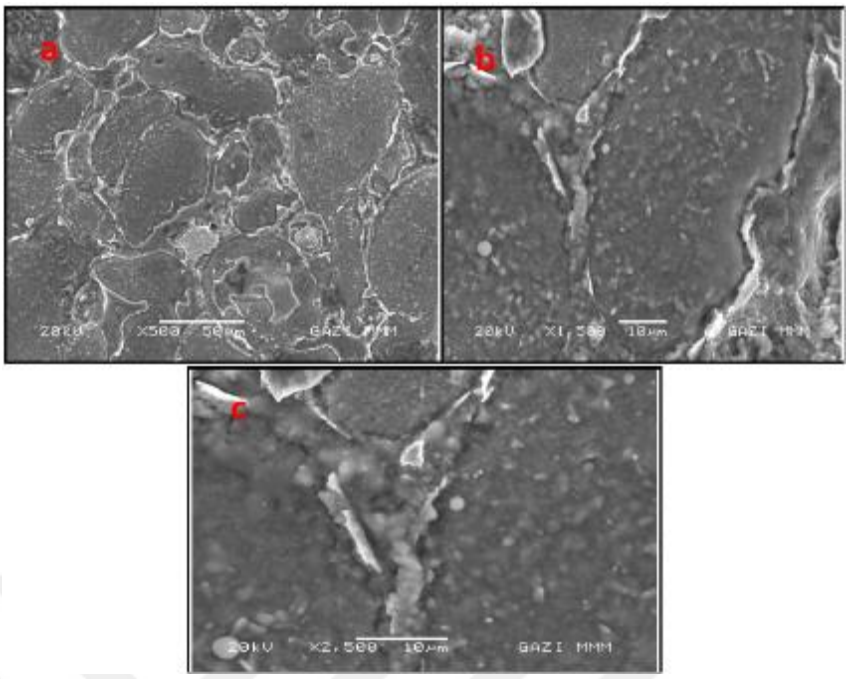
Hibrit takviye olarak değişik oranlarda (%2,5-5-10) ZrO_2 ile değişken oranlarda CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneyler olan Deney 8, Deney 9, Deney 10, Deney 11, Deney 12, Deney 13, Deney 13, Deney 14, Deney 15 ve Deney 16'dan elde edilen SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 8.26, Şekil 8.27, Şekil 8.28, Şekil 8.29, Şekil 8.30, Şekil 8.31, Şekil 8.32, Şekil 8.33 ve Şekil 8.34'te verilmiştir.



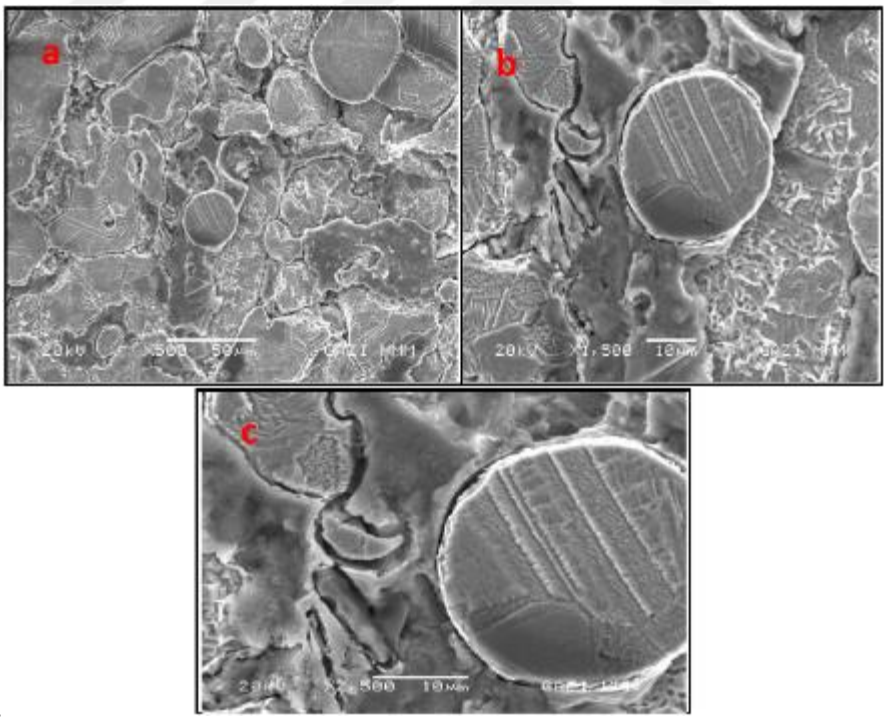
Şekil 8.26 8 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 8.27 9 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

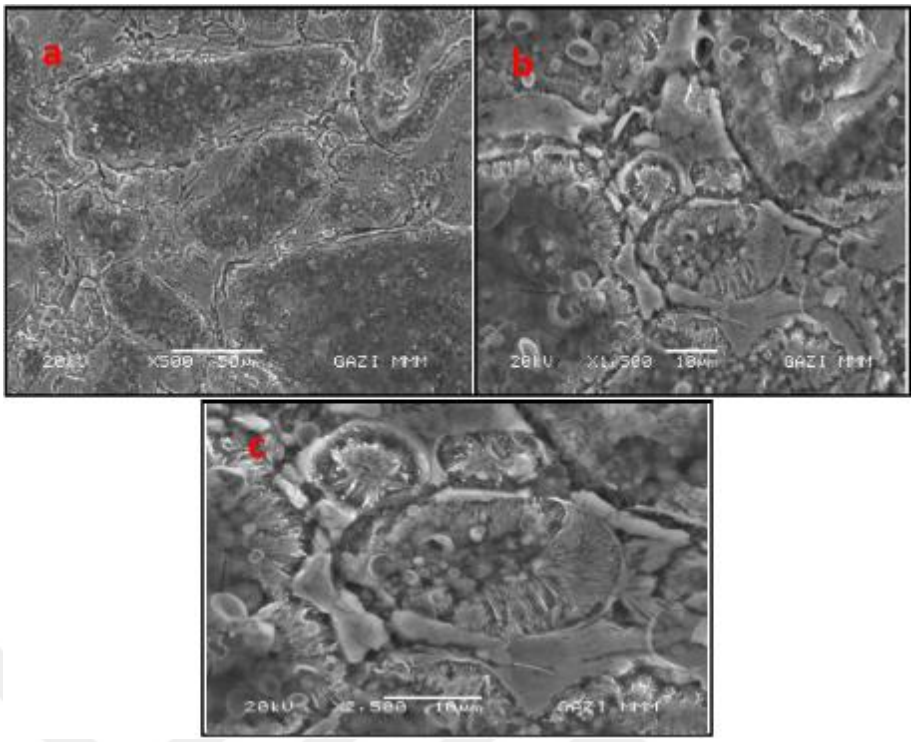


Şekil 8.28 10 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

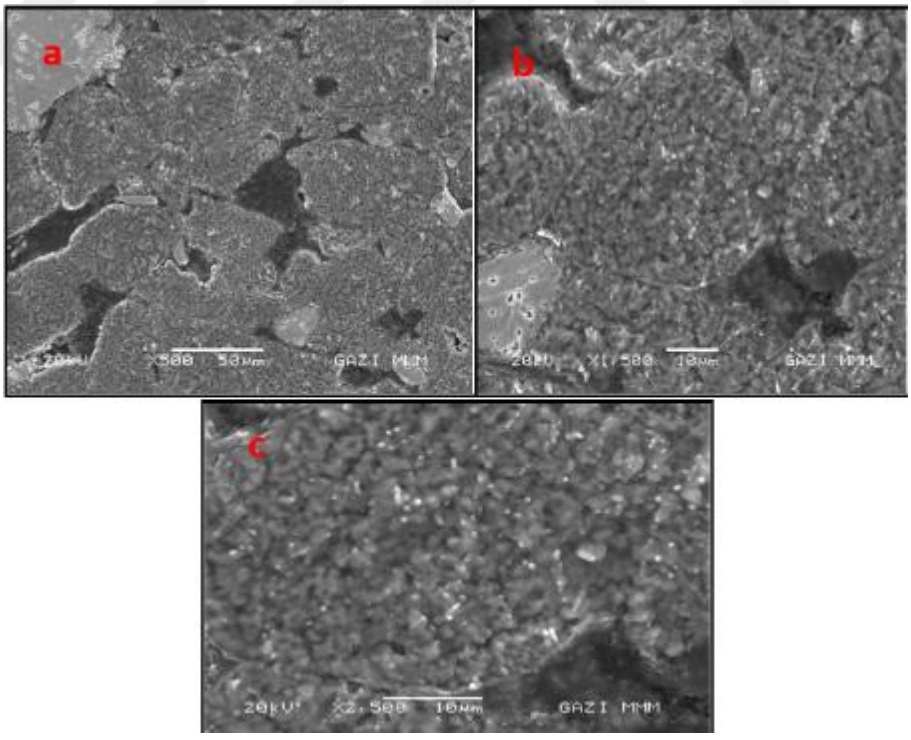


.

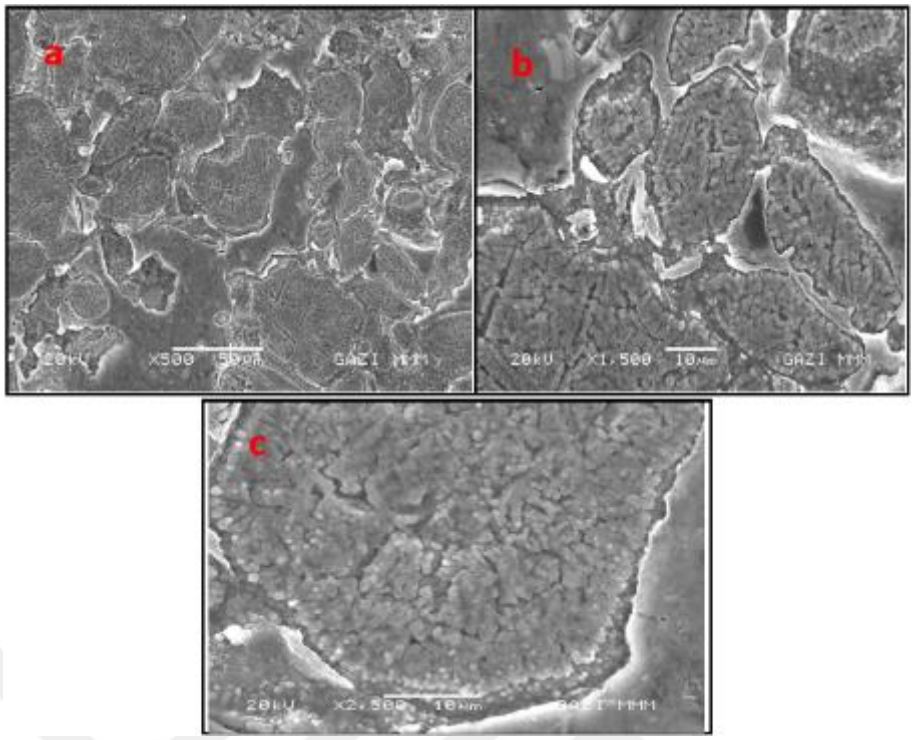
Şekil 8.29 11 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



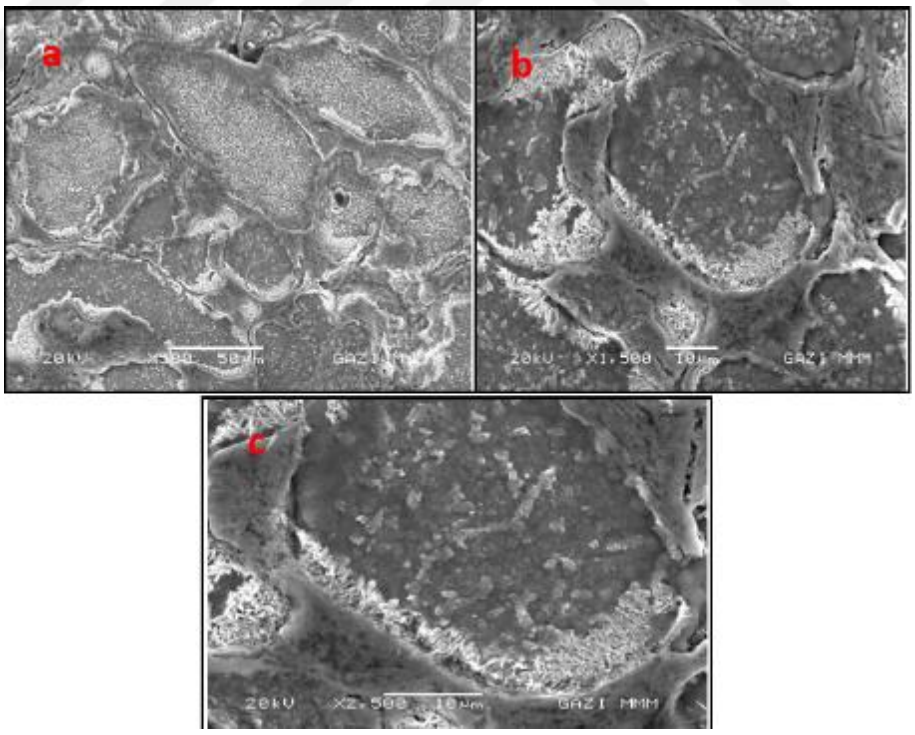
Şekil 8.30 12 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



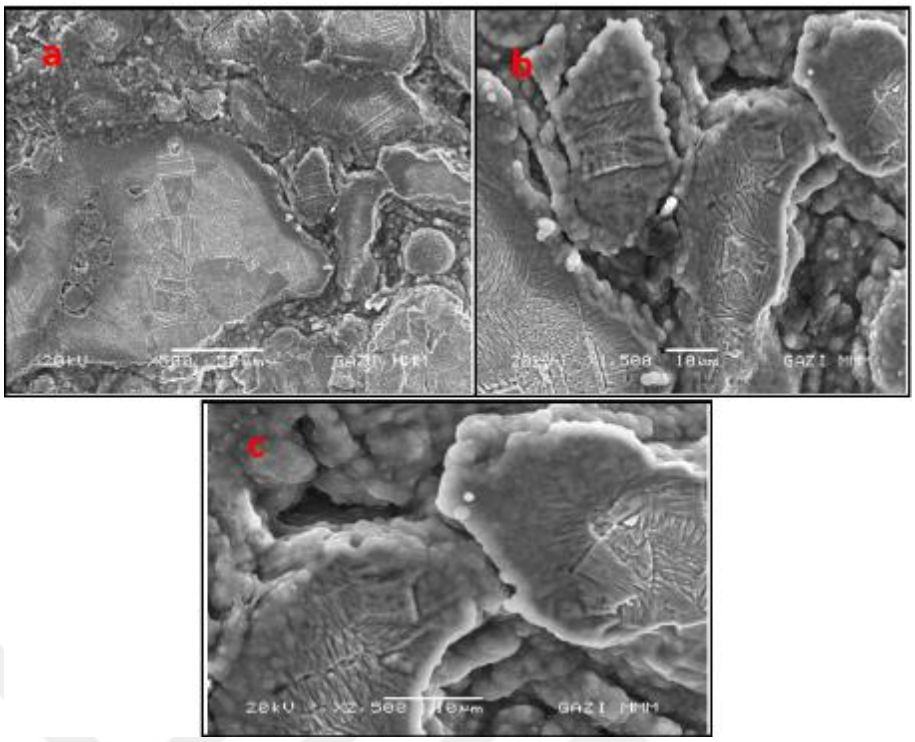
Şekil 8.31 13 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 8.32 14 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 8.33 15 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 8.34 16 numaralı deney numunesinin a) 500x, b) 1500x, c) 2500x, büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 8.26 – Şekil 8.34 arasında verilen hibrit takviye olarak değişken oranlardaki ZrO_2 (%2,5-5-10) ile CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı deneylerde malzemelerin OM görüntülerinde görülen bölgesel gözenek ve boşlukların arasına yerleşen ZrO_2 ve CNT kümelenmeleri SEM görüntülerinde de tespit edilmiştir. Takviye oranlarının artmasıyla birlikte tane sınırlarında oluşan boşlukların artışı SEM görüntülerine de yansımıştır.

8.2.2.1 SEM incelemelerinin genel değerlendirmesi

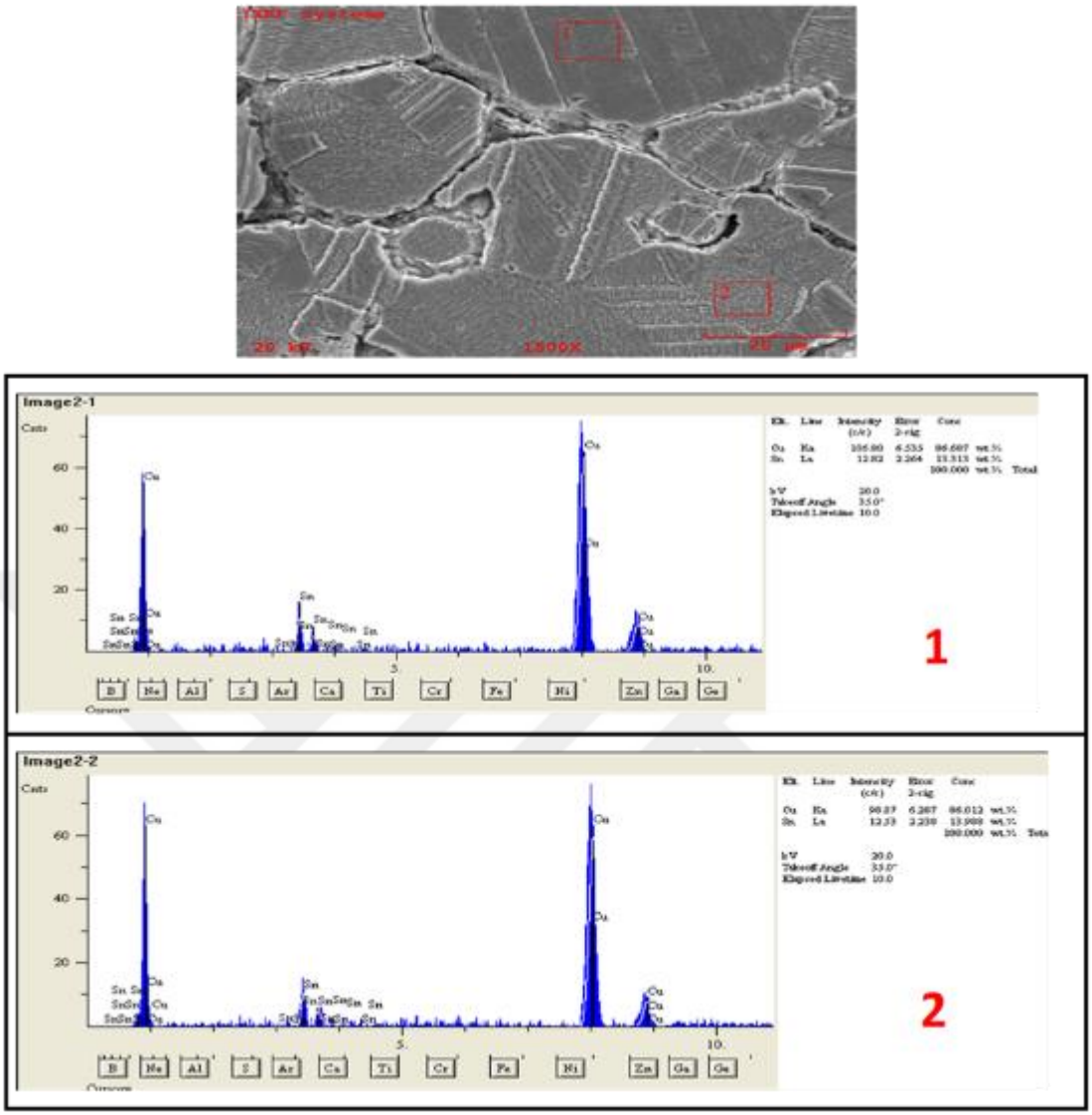
SEM incelemelerine göre; kompozit numunelerin mikroyapıları incelendiğinde, takviye elemanı oranları arttıkça matris malzemesinin tane yapısından farklı yapıların oluştuğu görülmüştür. Genel olarak bronz (Cu10Sn) matrisli ZrO_2 ve CNT takviyeli numunelerde, takviye oranı arttıkça parça üzerinde boşluklar ve yapısal değişimler saptanmıştır. Takviye oranlarına bağlı olarak mono kompozitler arasında bir kıyaslama yapıldığında ZrO_2 takviyeli mono kompozitte CNT takviyeli mono kompozite oranla gözenek, boşluk vb. yapısal bozulmaların daha az olduğu SEM görüntülerinde saptanmıştır. Genel olarak SEM fotoğrafları incelendiğinde takviyesiz matris malzemesinde tane sınırlarında boşluklar görülmektedir. Matris malzemesine

takviye olarak kullanılan ZrO_2 ve CNT malzemelerinde ise oran arttıkça bu boşlukların arttığı ve kompozit malzemelerde topaklanmaların olduğu tespit edilmiştir. Hibrit takviyeli nano kompozitlerde ise CNT oranı arttıkça gözenekliliğin daha olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Hibrit takviyeli nano kompozitlerde ise ZrO_2 oranı arttıkça tane sınırları arasındaki boşluk artmış olup CNT takviyesi ile beraber topaklanmaların olduğu belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı ileriki aşamalarda anlatılacak olan kompozit malzeme mekanik özelliklerinin olumsuz etkileneceği OM ve SEM görüntüleriyle ön görülebilmektedir.

8.3 EDS İncelemeleri

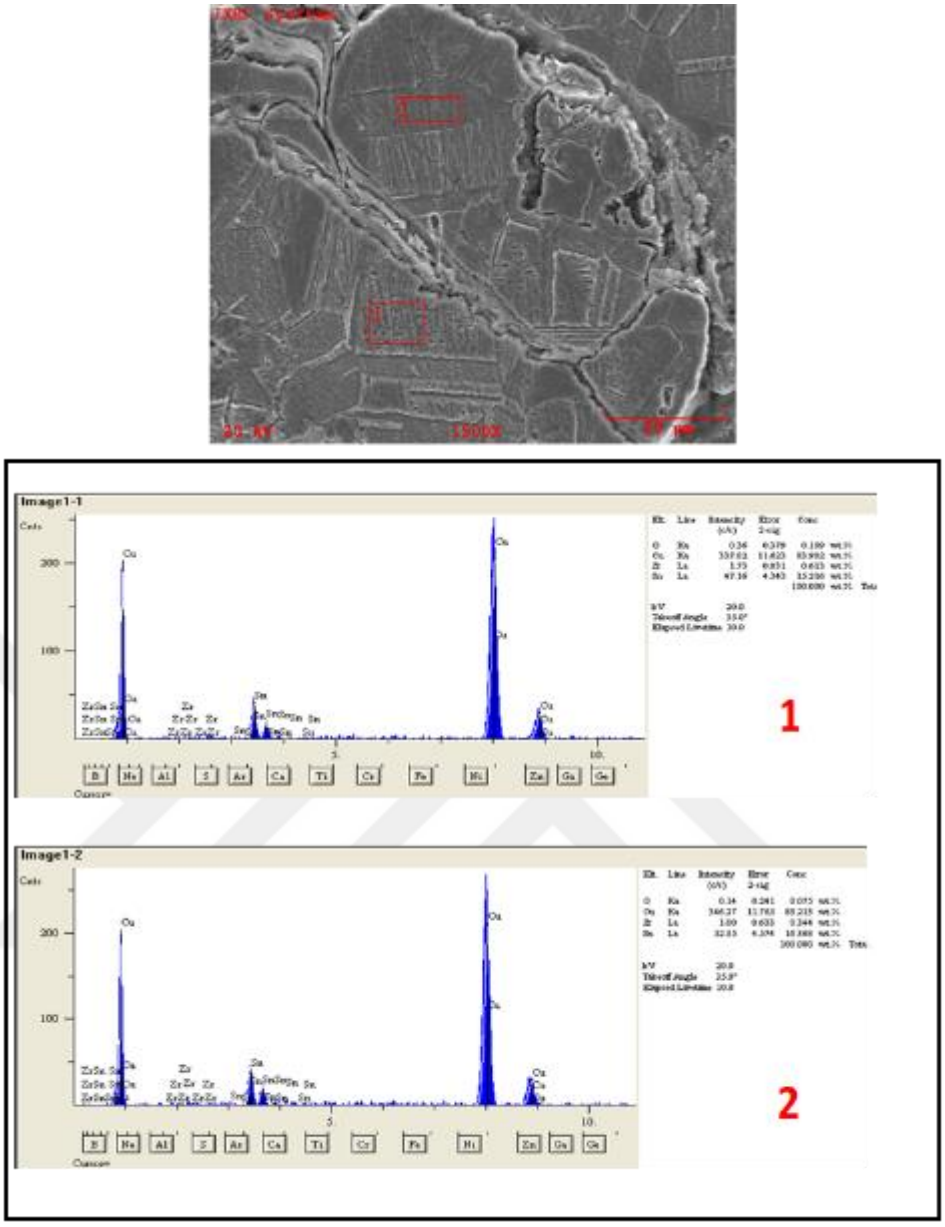
SEM görüntülerinden alınan bölgesel tarama yapılarak elde edilen EDS analiz sonuçları Şekil 8.35- Şekil 8.50 arasında verilmiştir. Tüm EDS incelemelerinde Cu, Sn, Zr, C ve O elementlerine bakılmıştır.

Şekil 8.35'te %100 Cu10Sn alaşımını ifade eden Deney 1 numunesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizleri görülmektedir. 2 farklı noktadan alınan EDS analizlerinde alaşımı oluşturan Cu ve Sn pikleri açıkça bellidir. Doğal bir sonuç olarak, alaşımda %90 içeriğe sahip Cu pikleri daha yüksek şiddette tespit edilirken, %10 içerikteki Sn pikleri ise daha düşük şiddette görülmüştür.

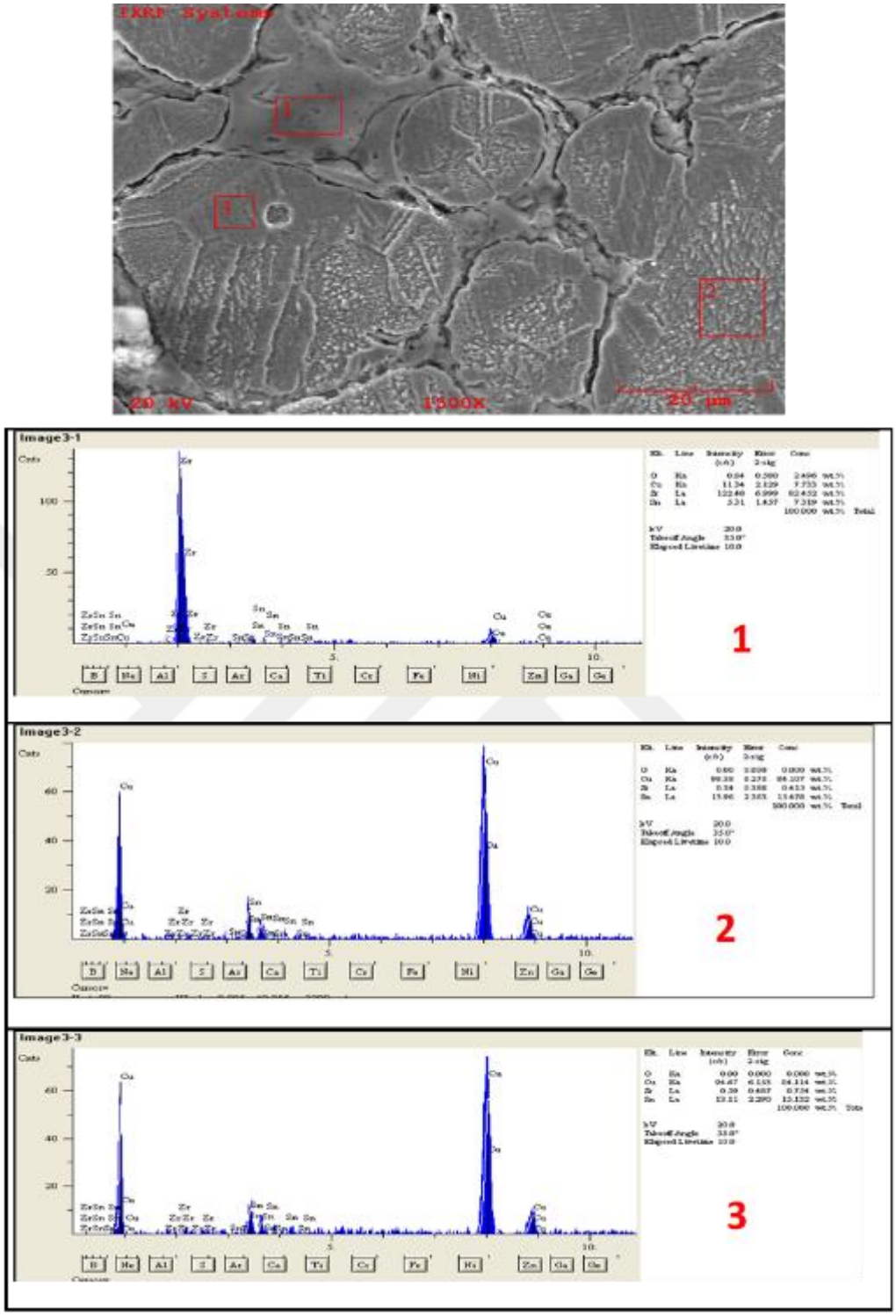


Şekil 8.35 1 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

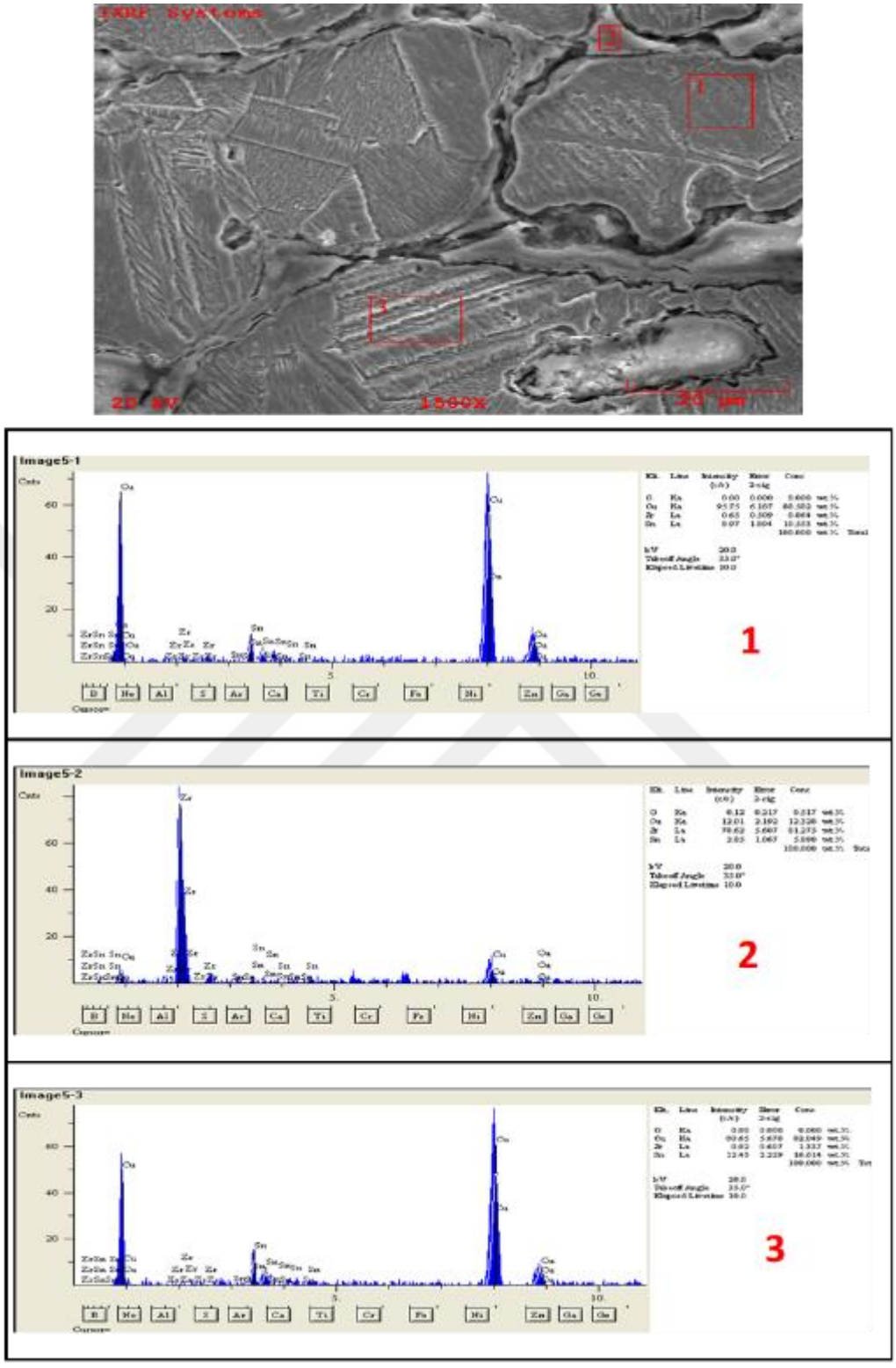
Şekil 8.36 – Şekil 8.38 arasında ZrO_2 takviyesinin farklı olarak kullanıldığı mono kompozit malzemelere ait numunelerin SEM görüntüleriyle birlikte EDS analizleri verilmiştir.



Şekil 8.36 2 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



Şekil 8.37 3 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

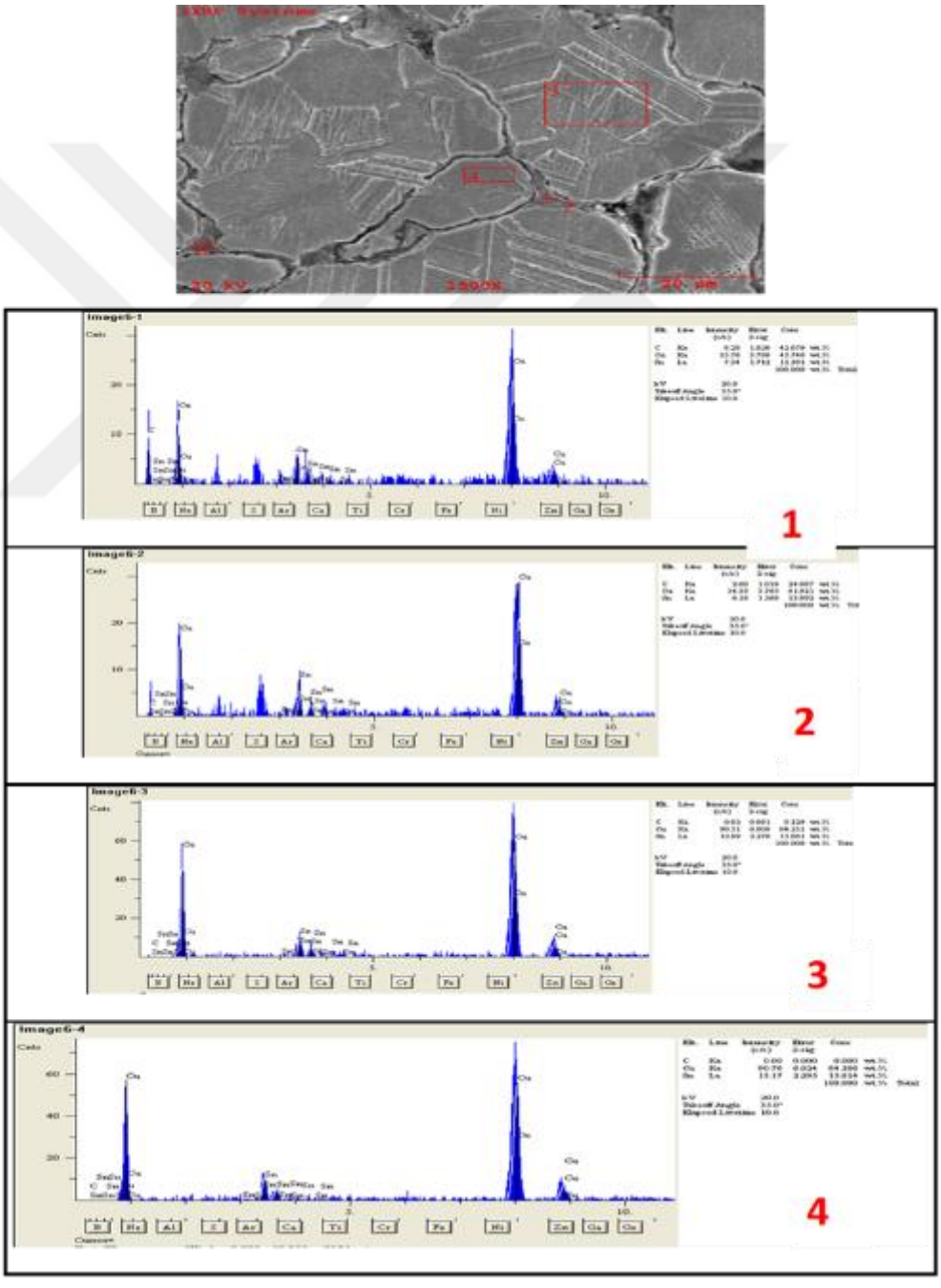


Şekil 8.38 4 numaralı demey numunesinin EDS grafik ve sonuçları

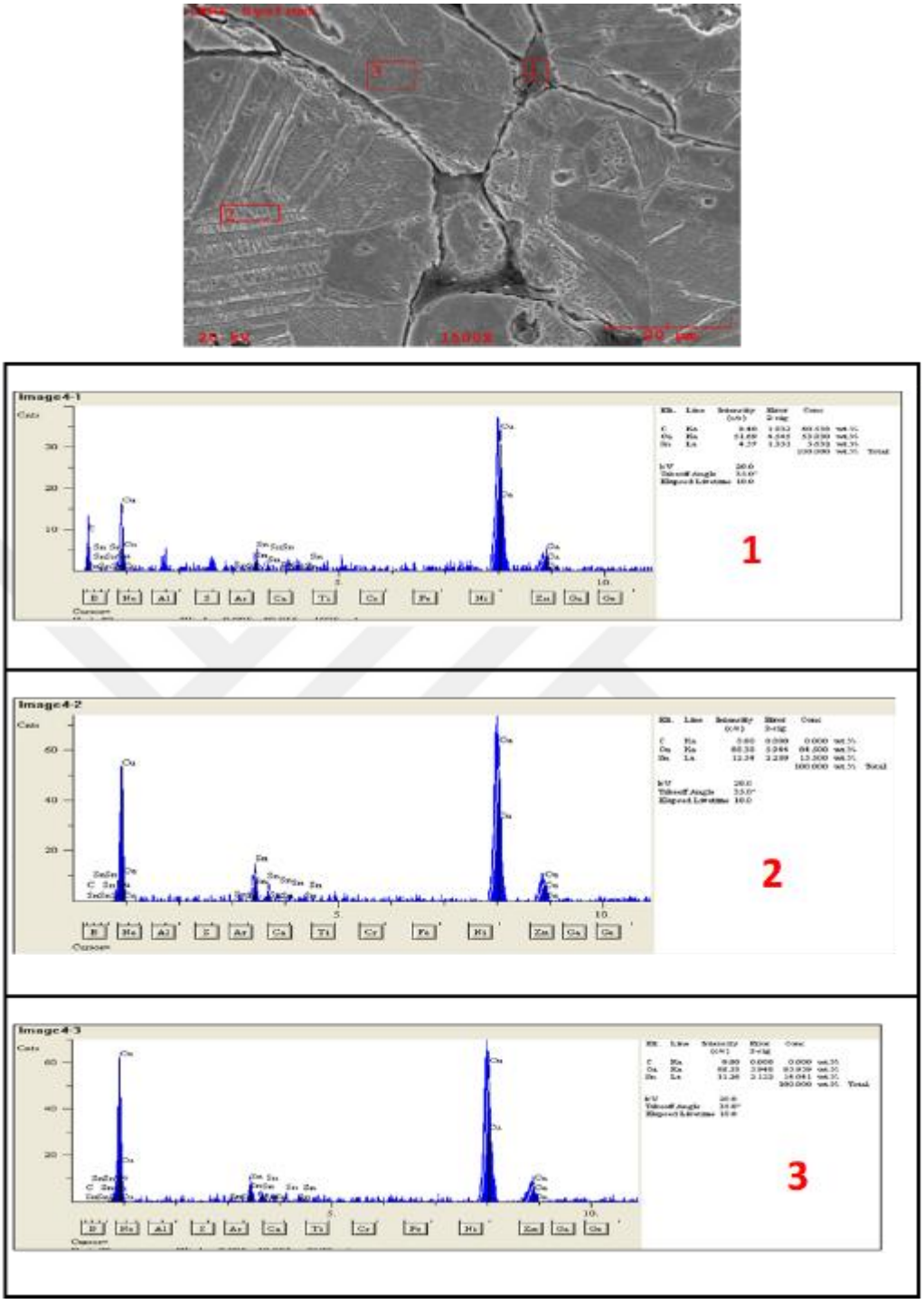
Cu10Sn/ZrO_2 mono kompozit malzemesi için ana matris malzemesi ile birlikte takviye olarak kullanılan elementler (Cu, Sn ve Zr) pikleri analizlerde tespit edilmiştir. Takviye partiküllerinin kümelendiği bölge olarak düşünülen 2 numaralı bölgede çok

küçük atom boyutu ve kütlesine rağmen eser miktarda O elementine de rastlanılmıştır. Zr elementi ile eser miktarda da olsa görülen O elementi takviye partikülün bu bölgedeki varlığını göstermektedir.

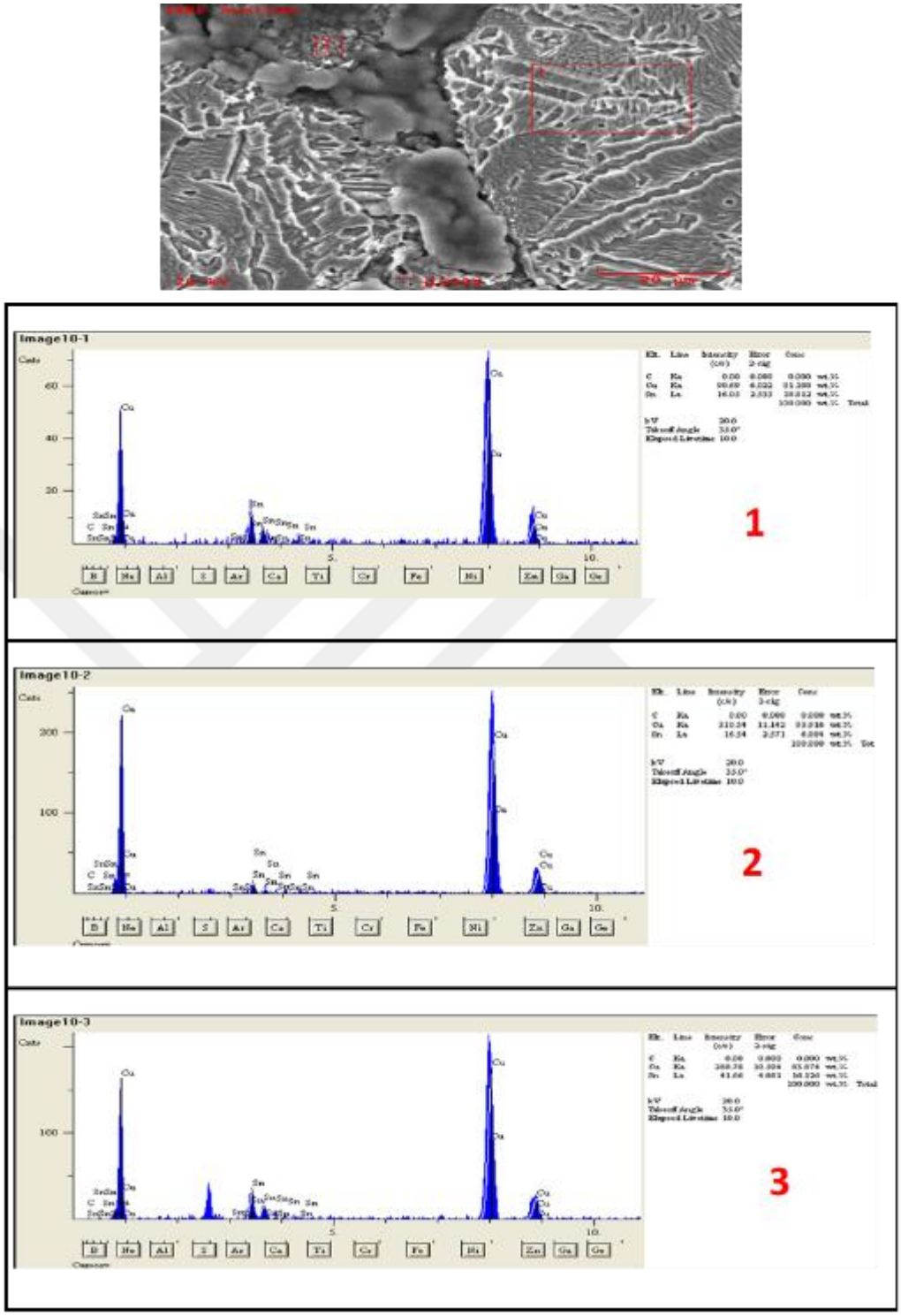
Şekil 8.39– Şekil 8.41 arasında ise CNT takviyesinin farklı olarak kullanıldığı Cu10Sn/CNT mono kompozit malzemelere ait numunelerin SEM görüntüleriyle birlikte EDS analizleri verilmiştir.



Şekil 8.39 5 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



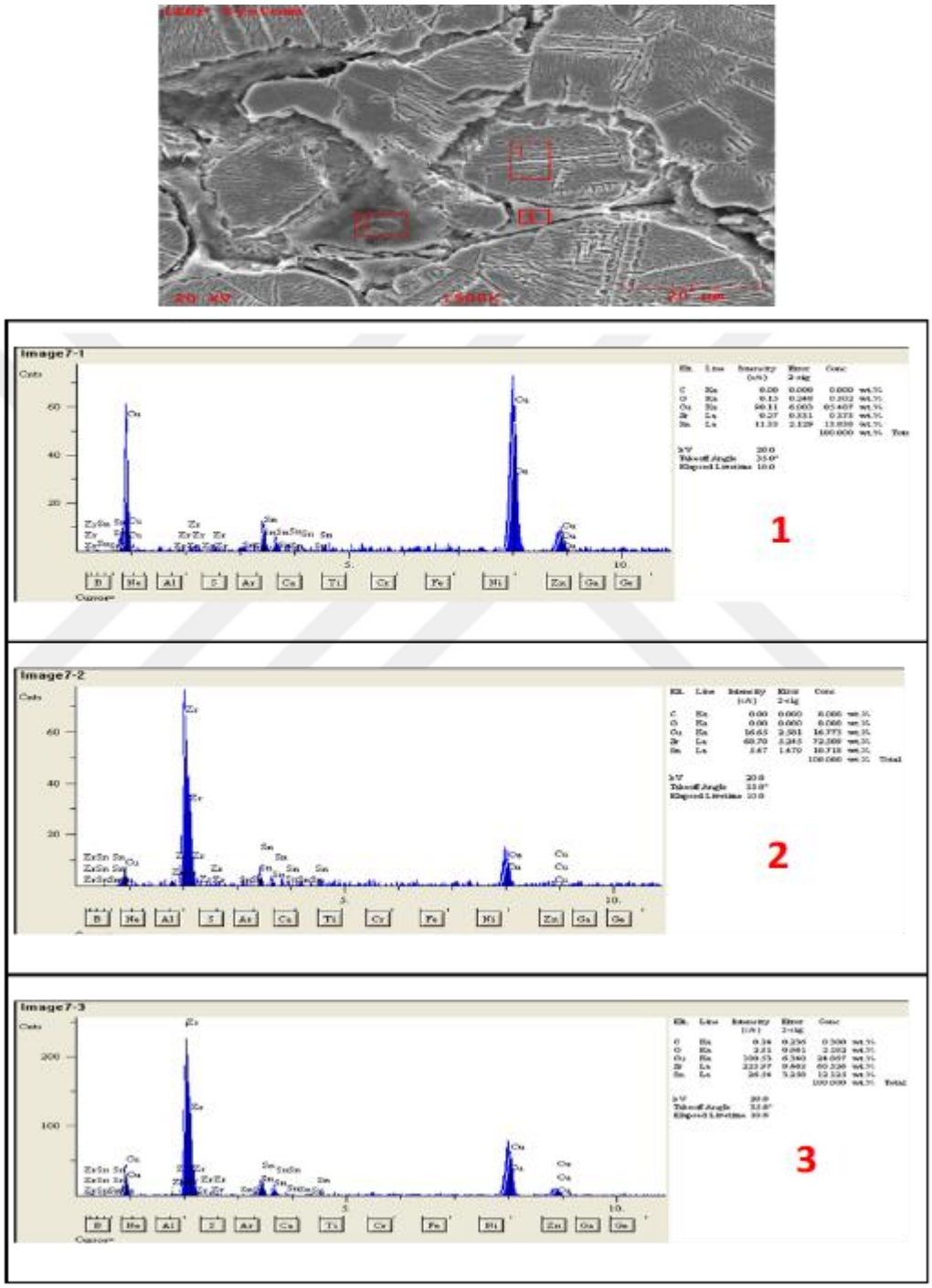
Şekil 8.40 6 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



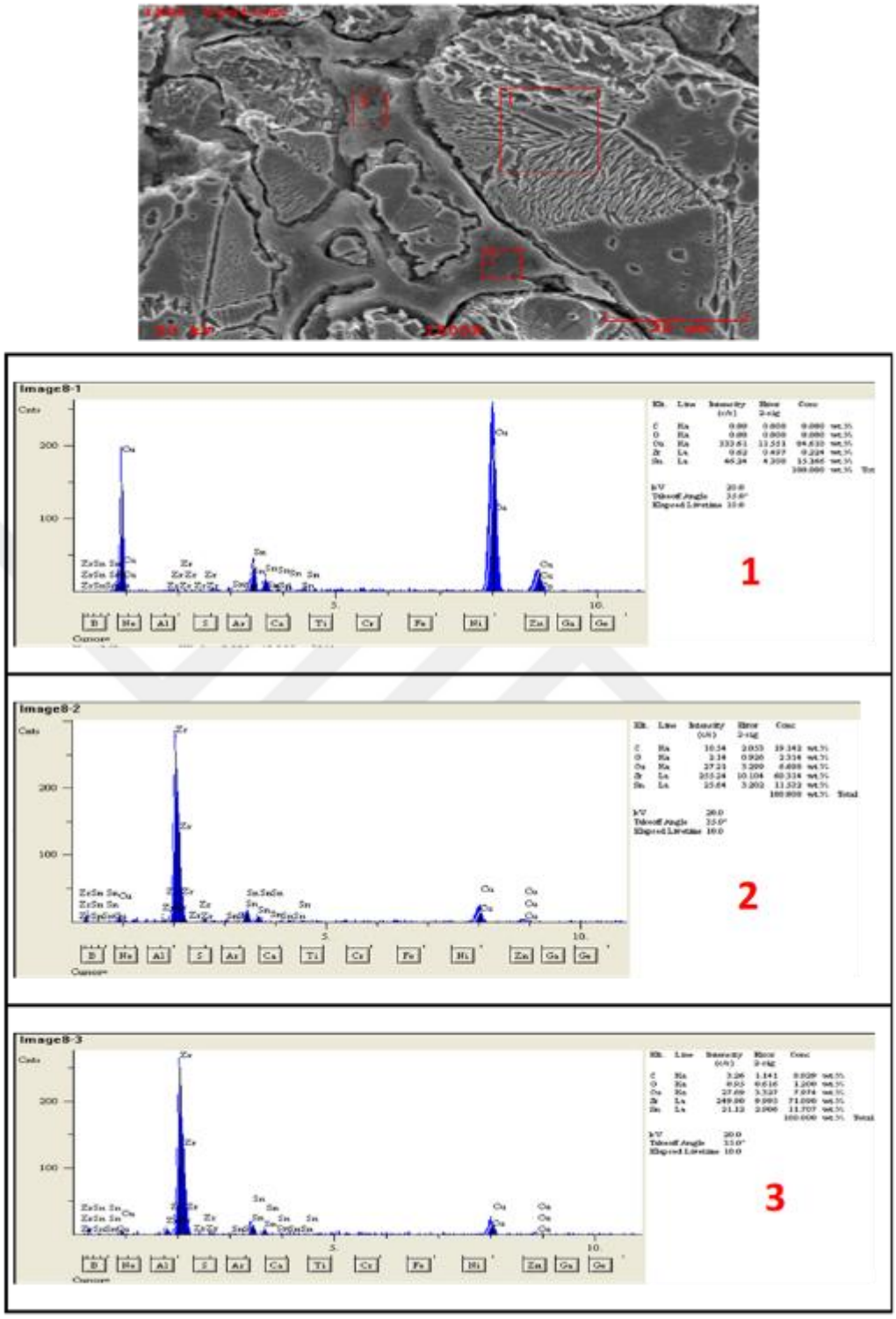
Şekil 8.41 7 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

Şekil 8.39 – Şekil 8.41 arasında ana matris malzemesi Cu10Sn ile takviye olarak kullanılan CNT takviyelerine ait elementler olan, Cu, Sn ve C pikleri analizlerde tespit edilmiştir.

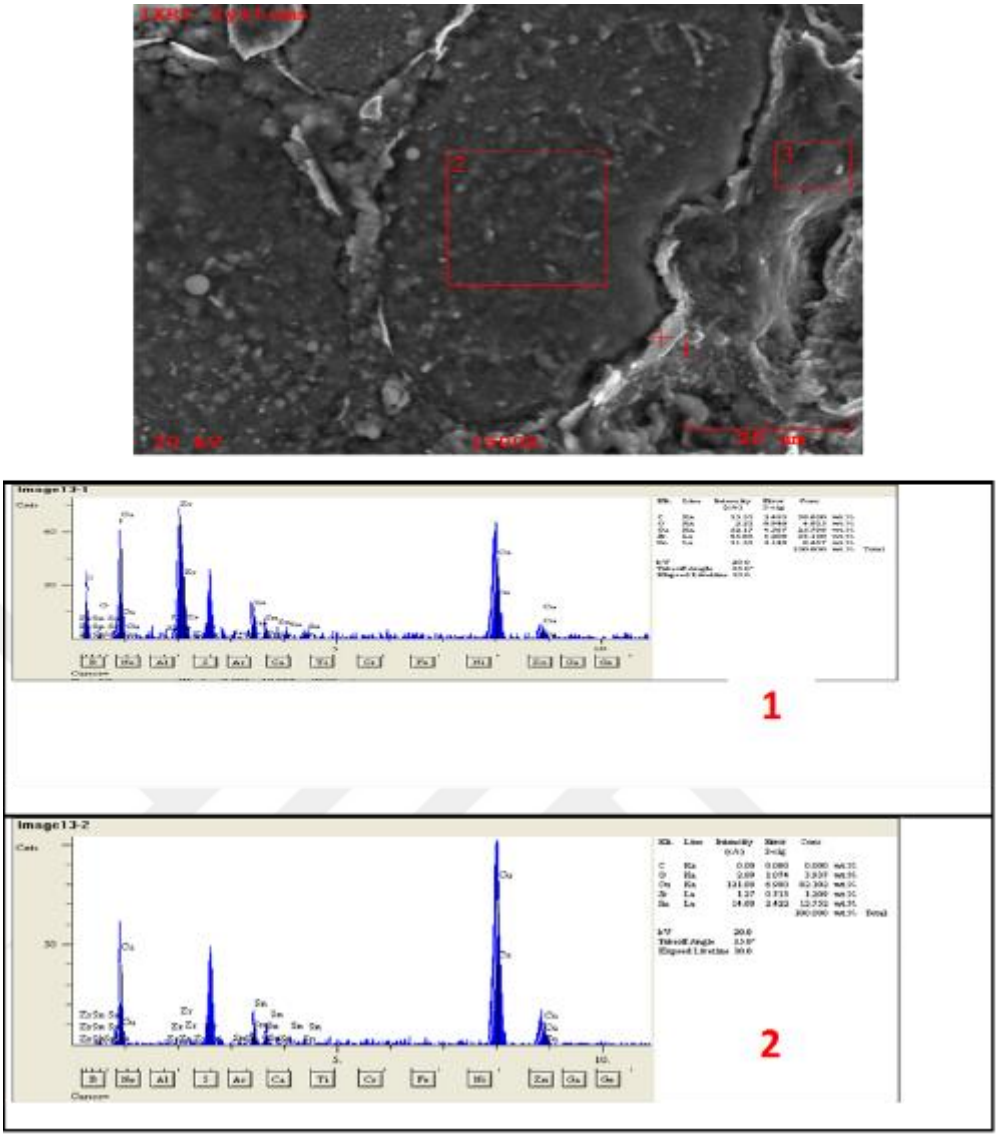
Şekil 8.42– Şekil 8.50 arasında değişken oranlarda (%2,5-5-10) ZrO_2 ile CNT'nin (%0,5-1-2) kullanıldığı hibrit kompozit malzemelere ait olan numunelerin SEM görüntüleriyle birlikte EDS analizleri verilmiştir.



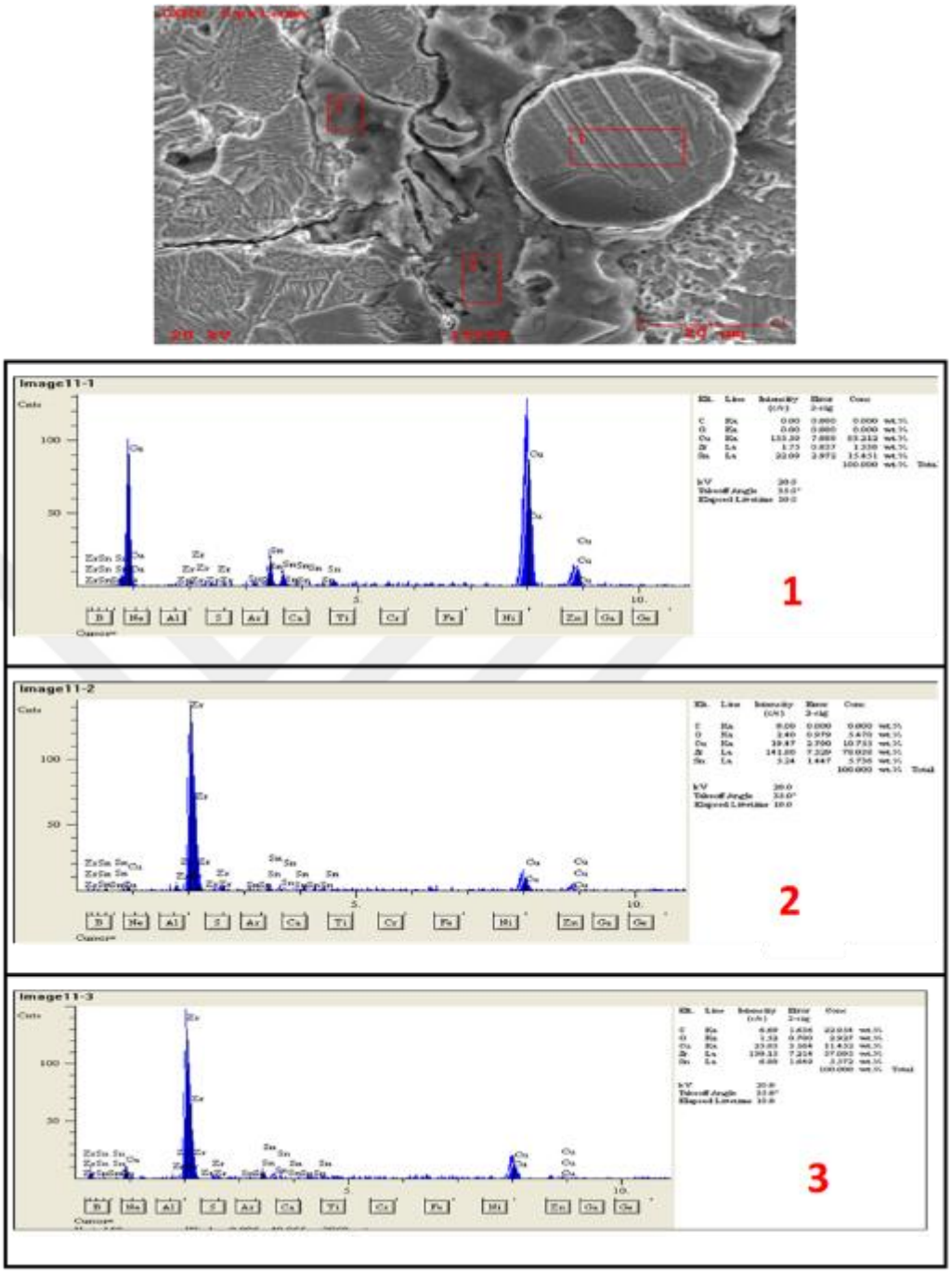
Şekil 8.42 8 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



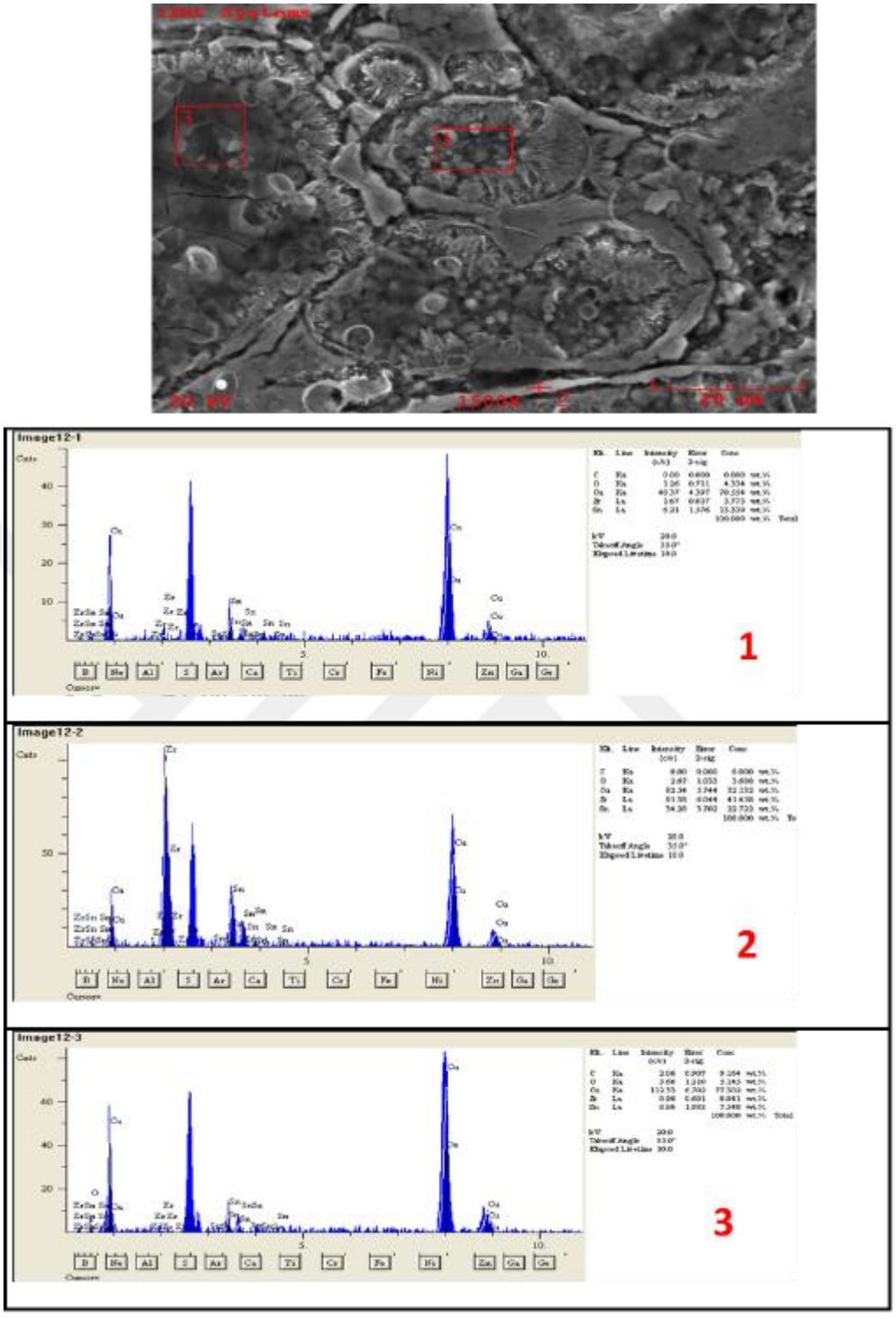
Şekil 8.43 9 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



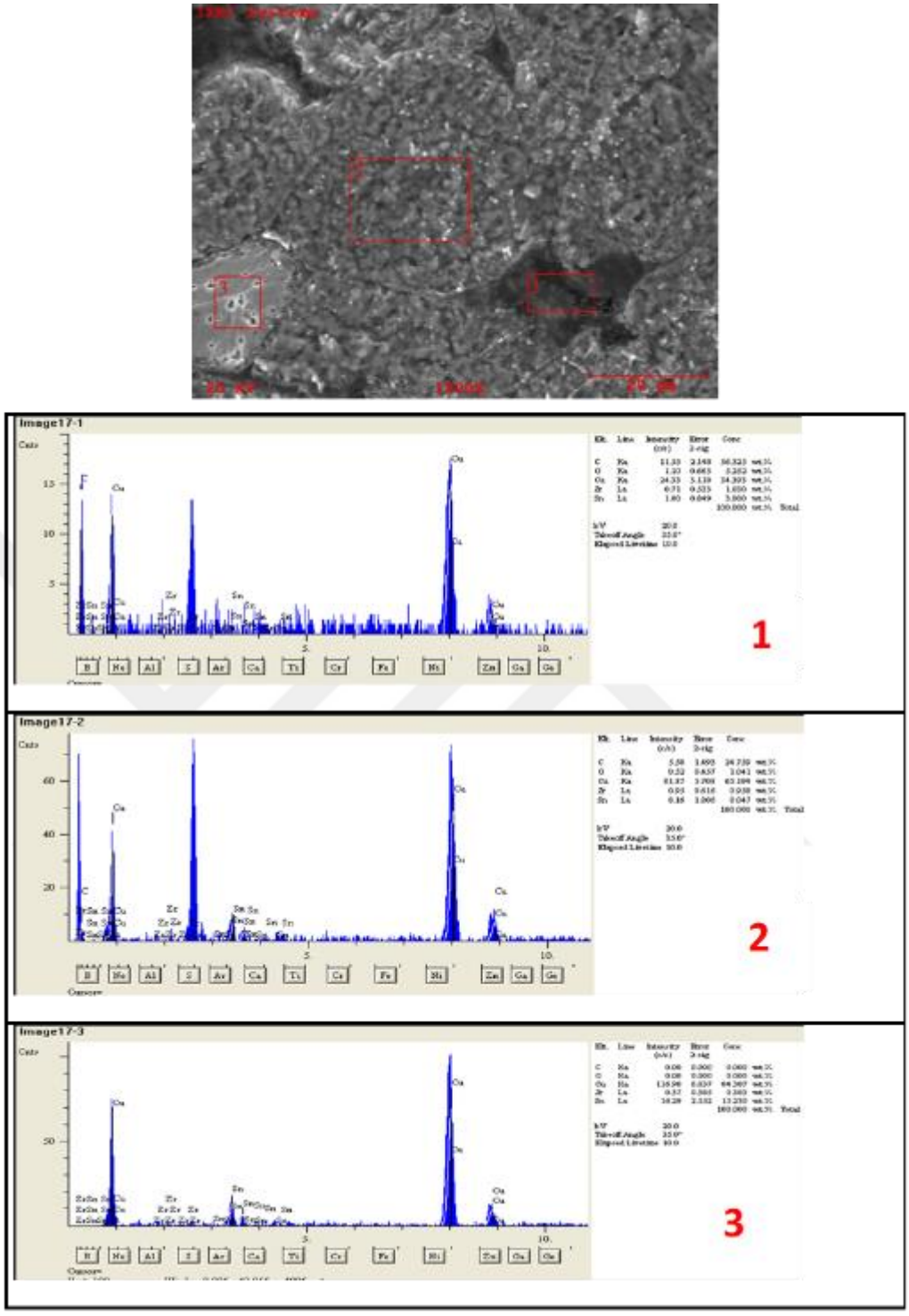
Şekil 8.44 10 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



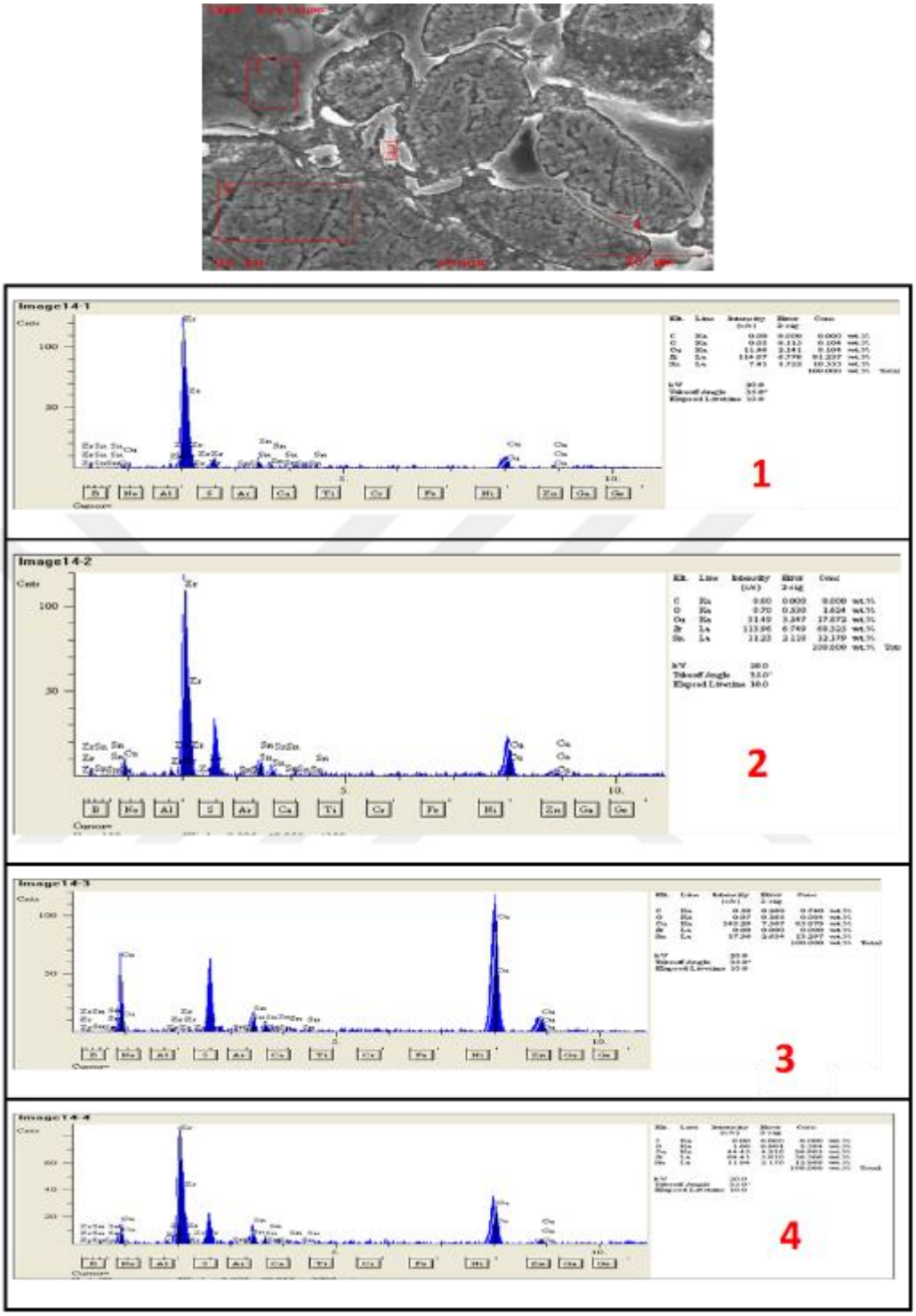
Şekil 8.45 11 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



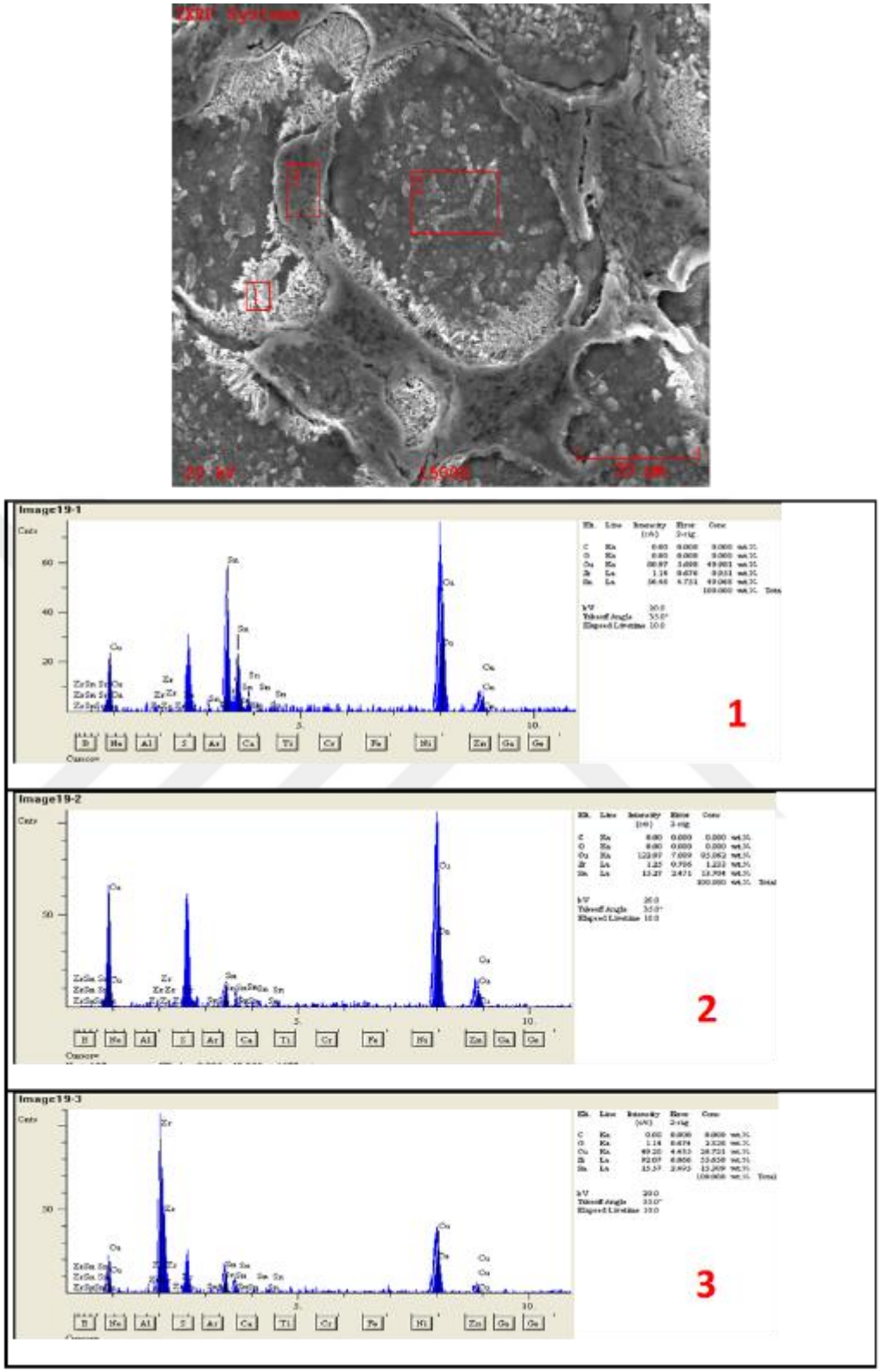
Şekil 8.46 12 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



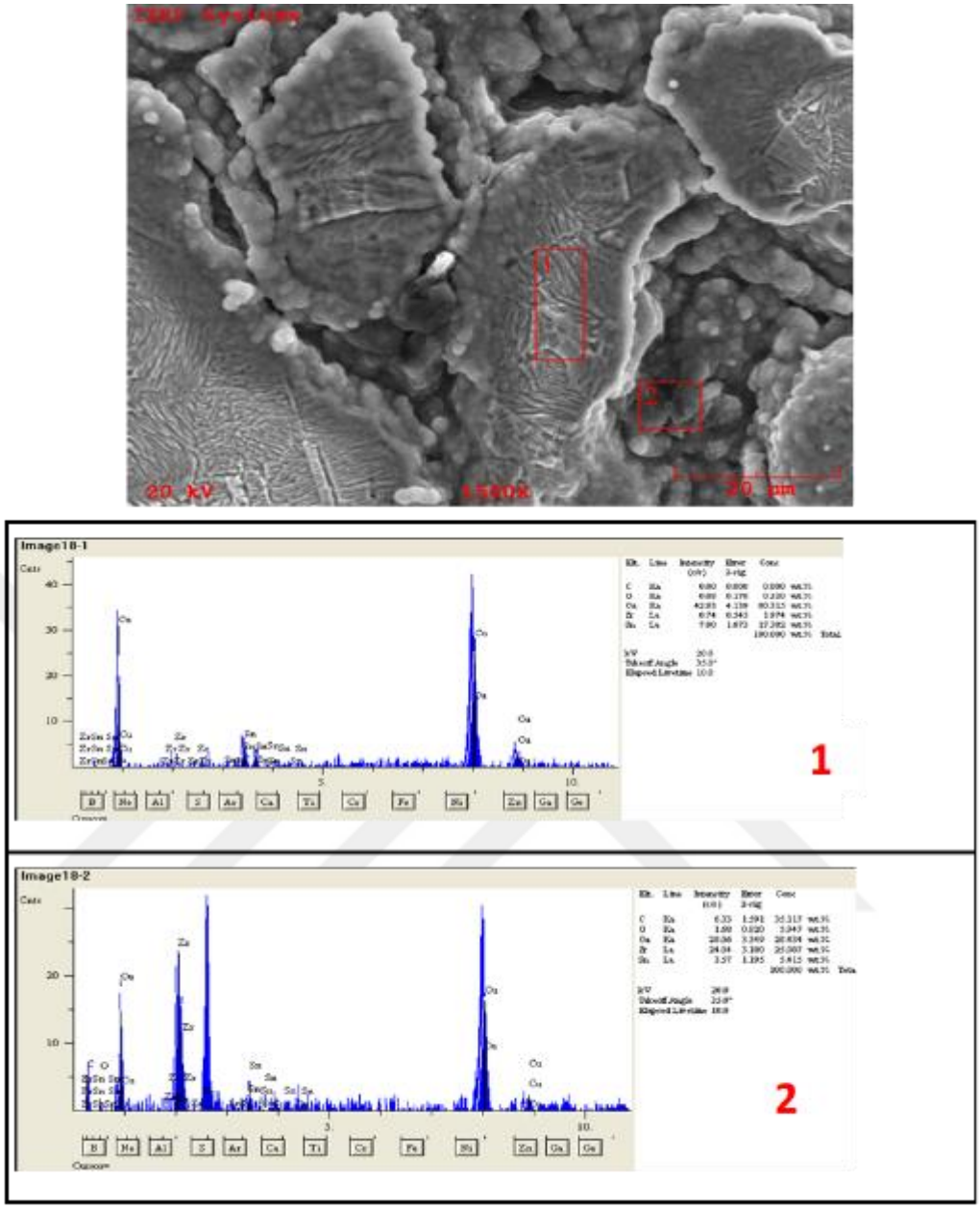
Şekil 8.47 13 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



Şekil 8.48 14 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



Şekil 8.49 15 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

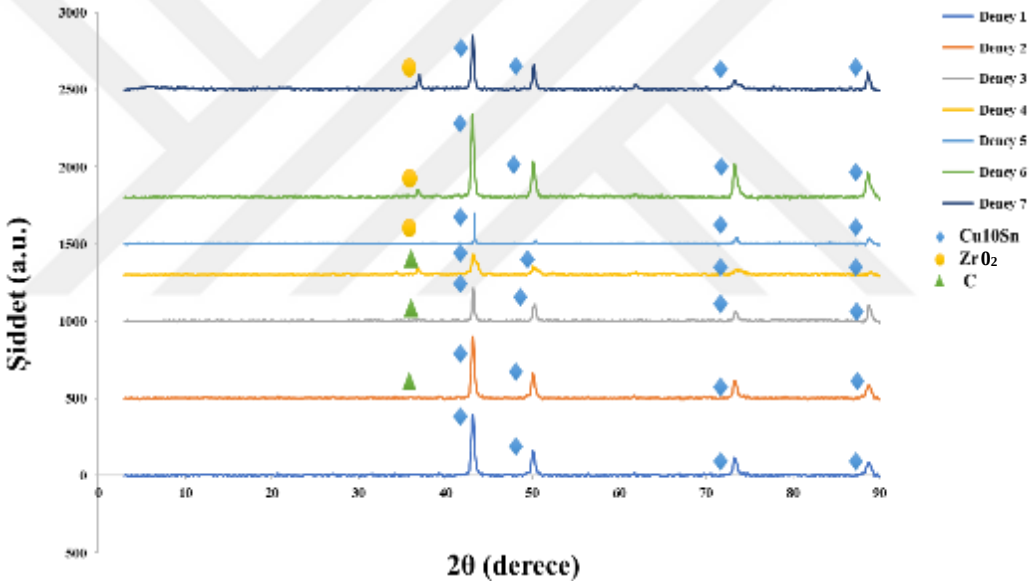


Şekil 8.50 16 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

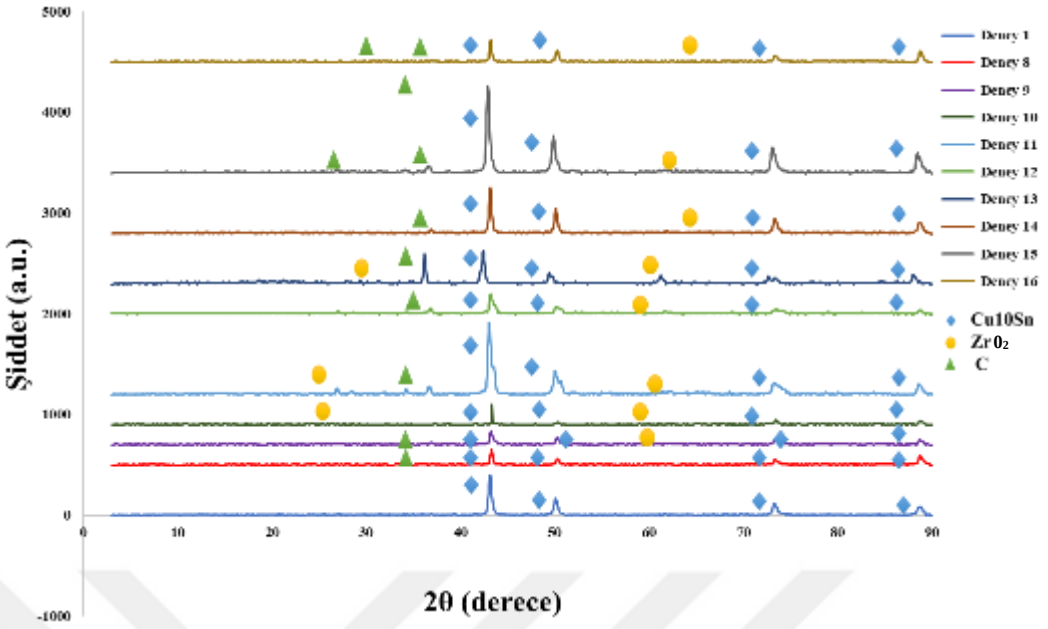
EDS analizleri incelendiğinde; Cu10Sn matrisinin içerisine ZrO_2 ve CNT takviye elemanlarının tane sınırlarında iç içe geçtiği, matris elementleri olan Cu ve Sn ile takviye malzemesi elementleri olan Zr, C ve O elementlerinin EDS piklerinde yer aldığı, takviye oranının artışına bağlı olarak Zr, C ve O piklerinde de artışların olduğu görülmüştür. Ayrıca sinterleme işlemiyle birleştirilen numunelerin EDS incelemelerinin, mikroyapı incelemeleri ile de uyumlu olduğu görülmüştür.

8.4 XRD Analizleri

Kompozit malzemelere uygulanılan mikroyapı incelemeleri sonrasında numunelere ayrıca 10 – 90º aralığında XRD analizleri yapılmıştır. Numunelerin XRD grafikleri Şekil 8.51 ve Şekil 8.52'de gösterilmiştir. Şekil 8.51'de Cu10Sn/ZrO_2 ile Cu10Sn/CNT mono kompozit malzemelerin, Şekil 8.52'de ise Cu10Sn/ZrO_2/CNT hibrit kompozit malzemelerin analizleri yer almaktadır. Grafikte ağırlıkça farklı oranlarda verilen ZrO_2, CNT ve ZrO_2/CNT içeren Cu10Sn metal matrisli kompozitlerde hangi fazların ne şiddette oluştuğunu belirlemek üzere XRD ölçümleri yapılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin XRD sonuçları incelendiğinde oluşan fazlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 8.51 Mono kompozit numunelerin XRD analizleri



Şekil 8.52 Hibrit kompozit numunelerin XRD analizleri

XRD analizleri sonucunda, Cu ve Sn'nin daha güçlü pik noktalarına sahip olduğu ZrO_2 ve CNT'nin ise daha zayıf pik noktalarına sahip olduğu görülmüştür. XRD analizlerinde, ZrO_2 ve CNT takviye içeriğinin artmasıyla birlikte, bu bileşiklerdeki elementlerin pik yoğunlukları artarken Cu ve Sn piklerinin yoğunluğu azalmıştır. Alınan numunelerde, ZrO_2 ve CNT miktarına bağlı olarak bakır oksit fazı ve CNT fazlarının bulunduğu, baskın fazın C'dan oluştuğu görülmüştür. Spektrumda Cu10Sn matrisleri, ZrO_2 ve CNT arasında bir arayüzey reaksiyonu olduğu da tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin Cu10Sn, CNT ve ZrO_2 bileşiklerinden oluştuğu yine grafiklerden anlaşılmaktadır. Yine, Cu10Sn, ZrO_2 ve CNT kompozitlerinde bulunan parçacıklar arasında etkileşim olmadığı XRD analiz sonuçlarından anlaşılmıştır.

Desenlerin özdeşlikleri, Şekil 8.51 ve Şekil 8.52'de verilen grafikteki pikler ve literatür ilişkilendirilerek belirlenmiştir. Elde edilen XRD analizlerinde, ZrO_2, CNT ve ZrO_2/CNT piklerini takviye oranlarının etkilediği belirlenmiştir. Bu durum, bronz matrisli mono ve hibrit kompozit malzemelerin bağlarında farklı intermetalik fazların oluşmadığını da ortaya koymaktadır. Grafikten elde edilen en yüksek CuSn pikleri sırasıyla 43°; 49,60°; 73,3° ve 88,75° 2θ açı konumlarında meydana gelirken, Zr elementinin tepe noktası 39° 2θ açı konumlarında ve C elementinin tepe noktası ise 61° 2θ açı konumlarında meydana gelir. XRD analizi, CuSn alaşımının daha yüksek piklere sahip olduğunu, Zr ve C'un isedaha zayıf piklere sahip olduğunu

göstermektedir. Takviye içeriğinin artmasıyla, Zr ve C pik yoğunluğu artarken, CuSn piklerinin yoğunluğu kısmen azalmıştır. Alınan örneklerde bakır oksit fazının olmadığı, baskın fazın CuSn'den oluştuğu görülmüştür. Benzer çalışmalarda elde edilen XRD pikleri, çalışmamızda elde edilen piklerle uyumludur (Guo vd. 2021; Liu vd., 2018; Wei vd. 2022).

8.5 Sertlik Testi Sonuçları

Cu10Sn matris ve ZrO_2 ile CNT takviyelerinden oluşan malzemelere makro ve mikrosertlik testleri gerçekleştirilmiş olup sonuçlar sırasıyla aşağıdaki gibi verilmiştir.

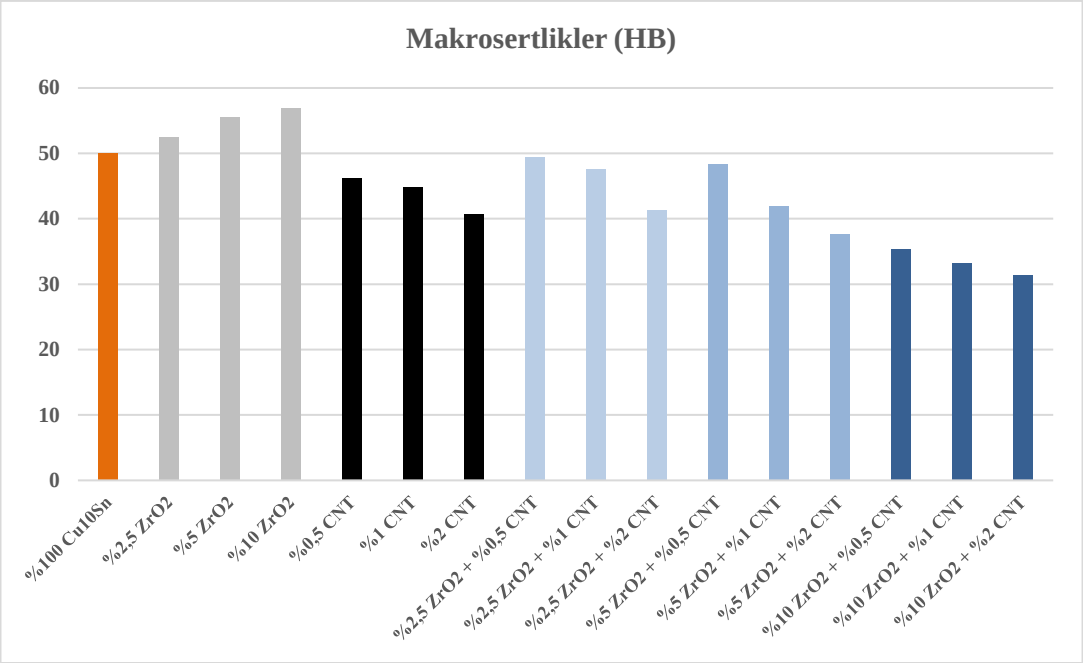
8.5.1 Makrosertlik Sonuçları

Kompozit numunelere gerçekleştirilen makrosertlik testlerinin cihaz ekran görüntüsü Şekil 8,53'te görüldüğü gibi olup sertlik ölçme metodu olarak Brinell yöntemi tercih edilmiştir. Ölçümlerde 2,5 mm batıcı uç ve 15,625 kg yük kullanılmıştır.



Şekil 8.53 Kompozit malzemelerin makrosertlik ölçümü

Sertlik testlerinden elde edilen sonuçlar ise yine takviye oranları baz alınarak gerçekleştirilen gruplandırmalar neticesinde Şekil 8.54'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 8.54 Makrosertlik grafiği

Şekil 8.54'te verilen makrosertlik grafiği incelendiğinde; kompozit malzemelerde ana malzeme makrosertliğinin üzerine sadece ZrO_2 takviyeli malzemelerde (Deney 2, Deney 3 ve Deney 4) çıkıldığı, diğer kompozit malzemelerde ise tüm deneylerde ana malzeme makrosertliğinin altında sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Buradaki sonuçların ana malzemeden daha düşük olmasının; takviye malzemesi olarak kullanılan CNT'nin söz konusu deneylerde kompozit malzemelerin makrosertliğine olumsuz etki etmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Artan CNT oranıyla birlikte bağıl yoğunluğun düşmesi ve buna bağlı olarak sertlik değerlerinin düşmesi beklenen bir durumdur. CNT takviyeli malzemelerle üretilen kompozit malzemelerle ilgili benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlar çalışmamızla uyumludur (Chu vd., 2013; Daoush vd., 2009; Xue vd., 2012). Deneylerde ana malzeme makrosertlik sonucu 50 HB olarak ölçülürken, en yüksek makrosertlik sonucu %10 ZrO_2 takviyeli kompozit malzemede (Deney 4) yaklaşık 57 HB olarak, en düşük makrosertlik sonucu ise %10 ZrO_2 ve %2 CNT takviyeli kompozit malzemede (Deney 16) yaklaşık 31 HB olarak ölçülmüştür. Deneylerde ZrO_2 oranı arttıkça sertliğin arttığı görülürken, CNT oranı arttıkça da sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir. ZrO_2 ve CNT'nin birlikte kullanıldığı hibrit kompozit malzeme deneylerinde ise ana malzeme ve ZrO_2 mono kompozit malzemelerde elde edilen makrosertlik değerlerinden daha düşük değerler elde

edilmiştir. Bu durum bronz matris üzerindeki CNT ve ZrO_2 etkileşiminin beklenildiği gibi olmadığını ortaya koymuştur.

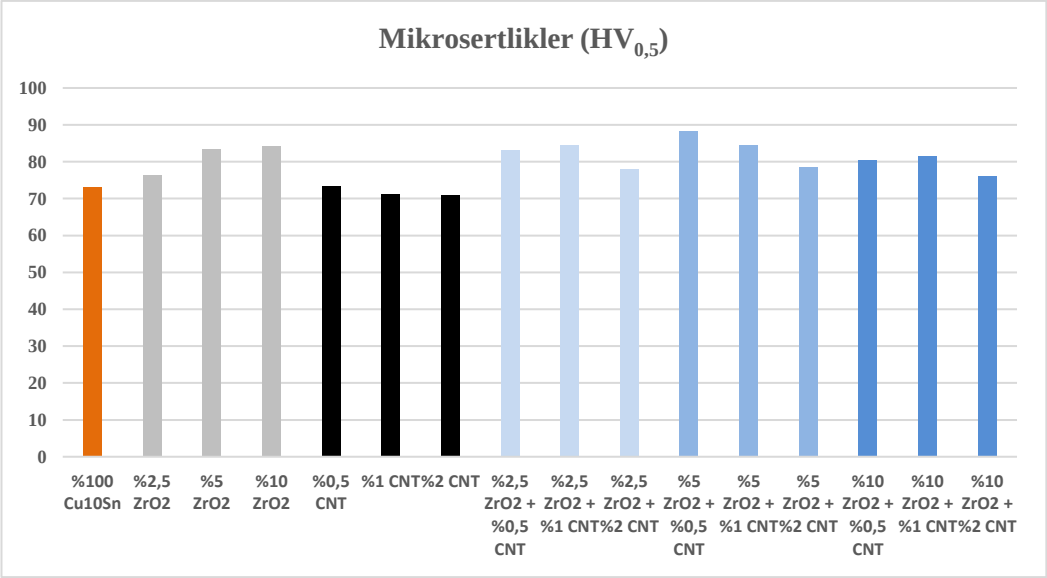
8.5.2 Mikrosertlik Sonuçları

Cu10Sn matrisli kompozit malzemelerin makrosertlik testlerinden elde edilen sonuçları desteklemek amacıyla numunelere ayrıca mikrosertlik testleri de gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelere gerçekleştirilen mikrosertlik testleri sertlik cihazından alınan ekran görüntüsünde görüldüğü gibi (Şekil 8.55) Vickers sertlik ölçme metoduyla 0,5 kg yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.55 Kompozit malzemelerin mikrosertlik ölçümü

Mikrosertlik testlerinden elde edilen sonuçlar yine takviye oranları baz alınarak gerçekleştirilen gruplandırmalar neticesinde Şekil 8.56'da verilmiştir.



Şekil 8.56 Mikrosertlik grafiği

Mikrosertlik testlerinde, makrosertlik sonuçlarına benzer sonuçlar tespit edilmiştir. Mikrosertlik sonuçlarında ZrO_2 takviyeli kompozit malzemelerle, hibrit kompozit malzemelerin mikrosertliğinin ana malzeme mikrosertliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür. CNT takviyeli kompozit malzemelerde ise ana malzeme mikrosertliğinden daha düşük sonuçlar ölçülmüştür. Genel olarak mikrosertlik sonuçları makrosertlik sonuçlarına benzemekle birlikte, farklı olarak hibrit yapılarda mikrosertlik artışına rastlanılmıştır. Buna sebep olarak özellikle tane sınırlarında oluşan ve OM ile SEM görüntülerinde de belirlenen topaklanmalar nedeniyle ana malzeme mikrosertlik değerlerinin üzerinde değerler elde edildiği düşünülmektedir. Ana malzeme mikrosertlik değeri 73 HV olarak ölçülürken, en yüksek mikrosertlik değeri Deney 11'de 83 HV, en düşük mikrosertlik değeri ise Deney 7'de 71 HV olarak ölçülmüştür. Deneylerde makrosertlik testlerinde olduğu gibi ZrO_2 oranı arttıkça mikrosertliğin arttığı görülürken, CNT oranı arttıkça mikrosertliğin düştüğü gözlemlenmiştir. ZrO_2 ve CNT'nin birlikte kullanıldığı hibrit kompozit malzeme deneylerinde ise ana malzemede elde edilen mikrosertlik değerlerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Mikrosertlik ölçümlerinde, makrosertlik ölçümlerinden farklı ölçümler elde edilmesi ve tutarlı sonuçların gözlemlenmemesinin numunelerdeki gözeneklilik ve topaklanmalar nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Özellikle mikrosertlik ölçümlerindeki artışların tane sınırlarına topaklanan takviye malzemeleri nedeniyle

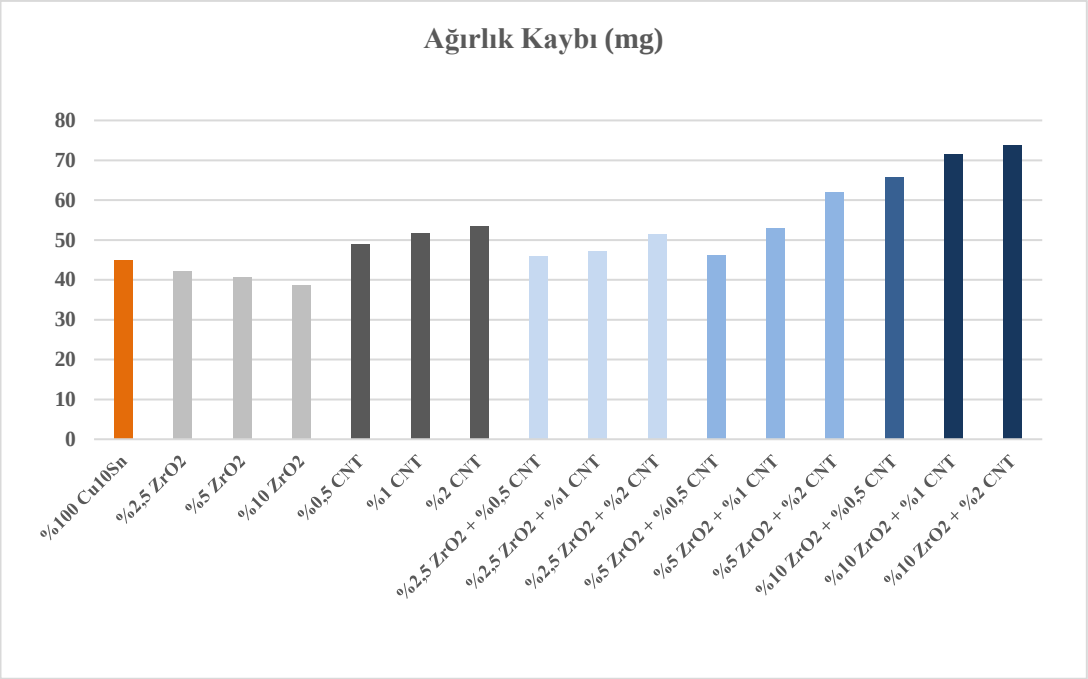
olduğu düşünülmektedir. Numunelerden alınan OM ve SEM görüntülerinde takviye malzemelerinin bilhassa tane sınırlarında toplandığı görülmektedir. Bu ve benzeri durumlar mikrosertlik ölçümlerini geçersiz kılabileceği düşüncesiyle bu çalışmada bilahare makrosertlik ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Böylece bir fazı içeren bölgeye batan cihaz ucunun algılayacağı farklı sertlik değerleri, numunenin daha genelini ifade eden bir bölgeden alınan makrosertlikle ifade edilerek daha genel bir sertlik sonucu ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

8.6 Aşınma Testi Sonuçları

ASTM G99-17 standardına göre Tribometer T10/20 cihazında Pin-on-disk yöntemi ile gerçekleştirilen kuru kayma aşınma testlerine ait sonuçlar Tablo 8.1'de verilmiştir. Aşınma testinden önce ve sonra numunelerin ağırlıkları not edilmiş ve ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Aşınma testlerinden elde edilen ağırlık kayıpları ise Şekil 7.60'da grafik olarak verilmiştir.

Tablo 8.1 Aşınma sonrası ağırlık kaybı tablosu

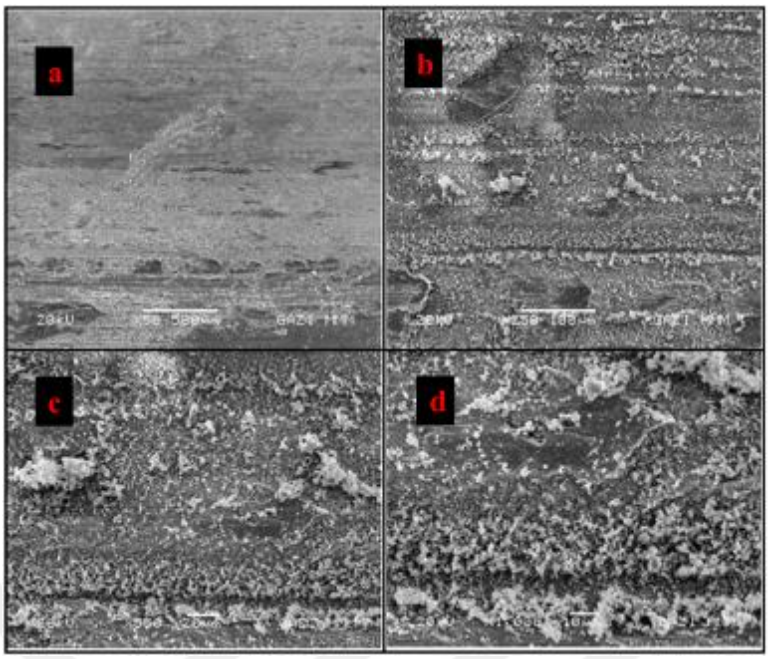
Deney No	İlk ağırlık (gr)	Son ağırlık (gr)	Ağırlık kaybı (gr)
1	10,1273	10,0824	0,0449
2	10,0115	9,9694	0,0421
3	10,2243	10,1837	0,0406
4	10,0475	10,0088	0,0387
5	10,2632	10,2143	0,0489
6	10,1962	10,1444	0,0518
7	10,2531	10,1997	0,0534
8	10,2198	10,174	0,0458
9	10,2432	10,196	0,0472
10	8,9675	8,9161	0,0514
11	6,1489	6,1027	0,0462
12	10,0728	10,0199	0,0529
13	5,3662	5,3041	0,0621
14	10,1232	10,0574	0,0658
15	8,9075	8,836	0,0715
16	10,1058	10,0321	0,0737



Şekil 8.57 Aşınma testi sonrası ağırlık kaybı grafiği

Tablo 8.1 ve Şekil 8.57'de verilen ağırlık kayıplarına göre; ZrO_2 takviyeli mono kompozit malzemelerin aşınma sonuçlarının ana malzeme ve diğer kompozit numunelere göre daha iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür. CNT katkılaması ile aşınma kayıpları artarken, hibrit yapılarda da CNT etkisiyle aşınma kayıplarının ana malzeme üstünde seyrettiği tespit edilmiştir. Deneylerde en düşük aşınma 0,0387 gr ağırlık kaybı ile Deney 4'te gözlenirken, en yüksek aşınma 0,0737 gr ağırlık kaybı ile Deney 16'da gözlemlenmiştir. En yüksek aşınma dayanımı ana malzemeye göre yüzde 16 daha iyi aşınma dayanımı sergileyen Deney 4'te, en düşük aşınma dayanımı ise ana malzemeye göre yüzde 39 daha düşük aşınma dayanımı sergileyen Deney 16'da ölçülmüştür. Aşınma testi sonuçlarının makrosertlik sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

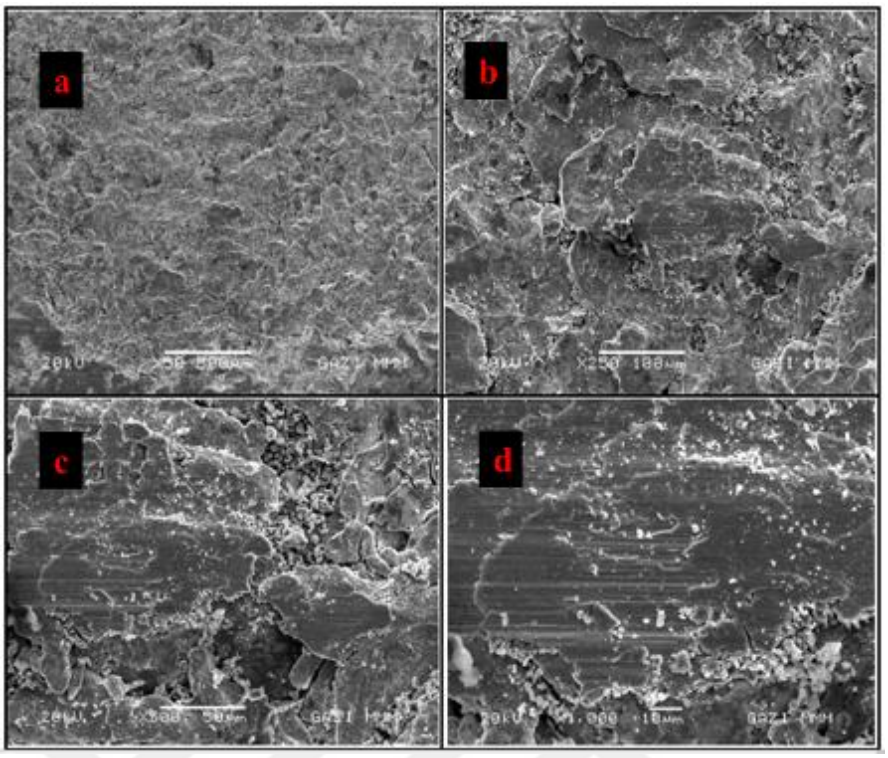
Sonraki aşamada ise aşınma testi gerçekleştirilen numunelerin aşınmış yüzeylerinin detaylı mikroyapısal karakterizasyonu anlamak için, numunelere SEM görüntüleri yardımıyla aşınmış yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.58'de ana malzemenin aşınma yüzeyi görüntüleri verilmiştir.



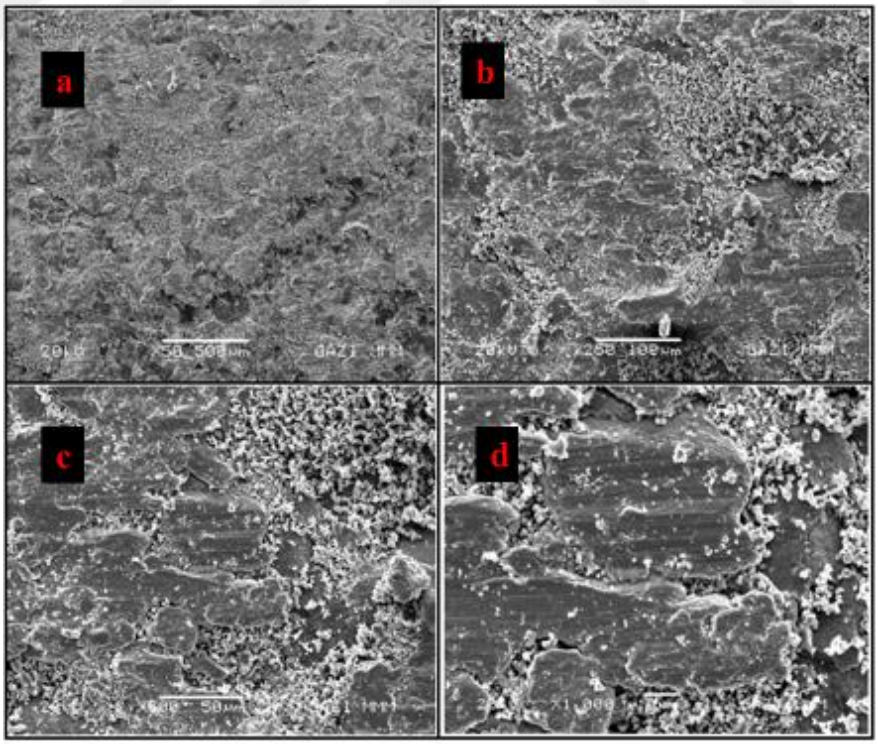
Şekil 8.58 1 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme

Şekil 8.58'de ana malzeme numunesindeki aşınma izleri görülmektedir. Aşınma izlerinden Cu10Sn matrisin aşınma davranış tespit edilebilmektedir. Kayma yönünde numunede meydana gelen aşınma izleri SEM fotoğrafları üzerinde gösterilmiştir.

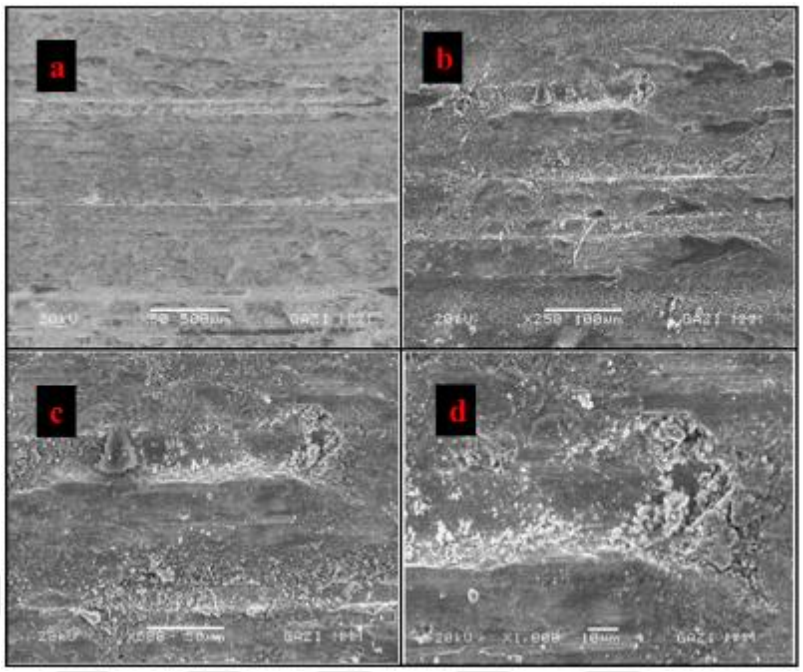
Şekil 8.59, Şekil 8.60 ve Şekil 8.61'te sırasıyla Deney 2, Deney 3 ve Deney 4'e ait aşınma testi sonrası yüzeyler SEM görüntüleriyle verilmiştir.



Şekil 8.59 2 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



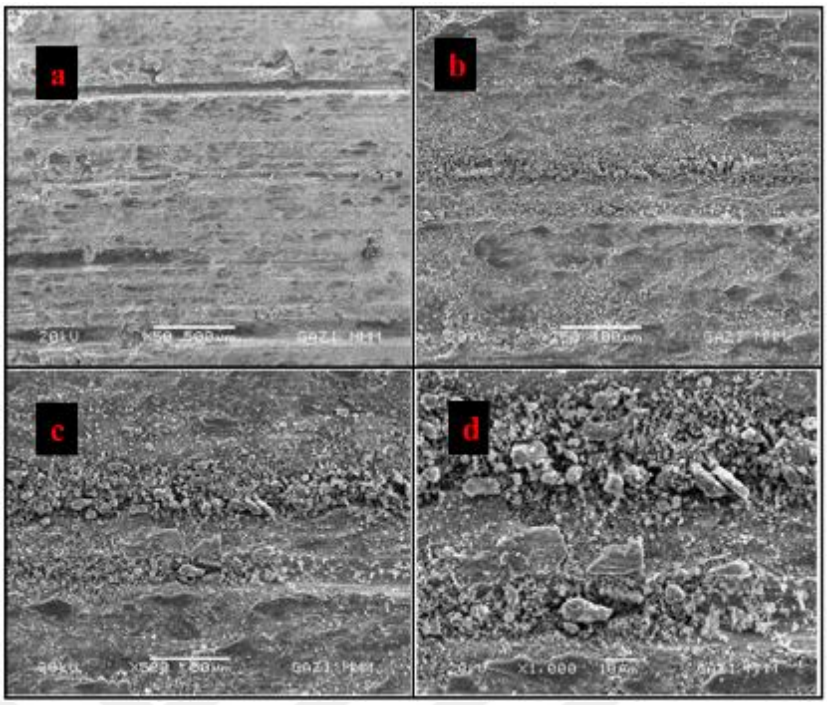
Şekil 8.60 3 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



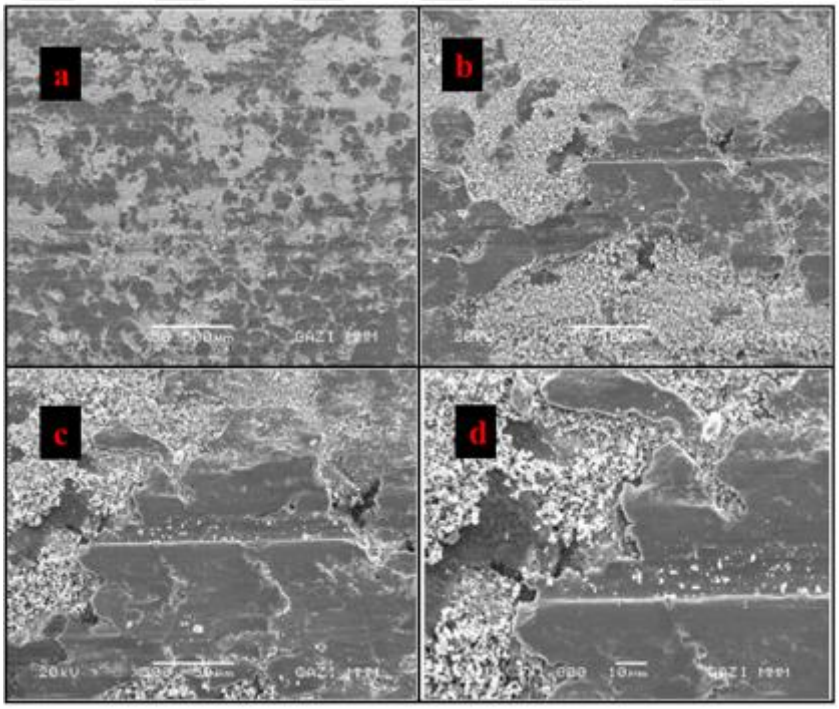
Şekil 8.61 4 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme

Yukarıdaki şekillerden anlaşılacağı üzere ZrO_2 takviyeli numunelerde ana malzemeden daha az aşınma olduğu izlerden de anlaşılmıştır. Aşınma testi sonuçlarında ana malzemeden daha az aşınan bu numunelerin aşınma dayanımının ana malzemeden daha yüksek olduğunu söylemek mümkündür (Ramachandra, vd., 2015).

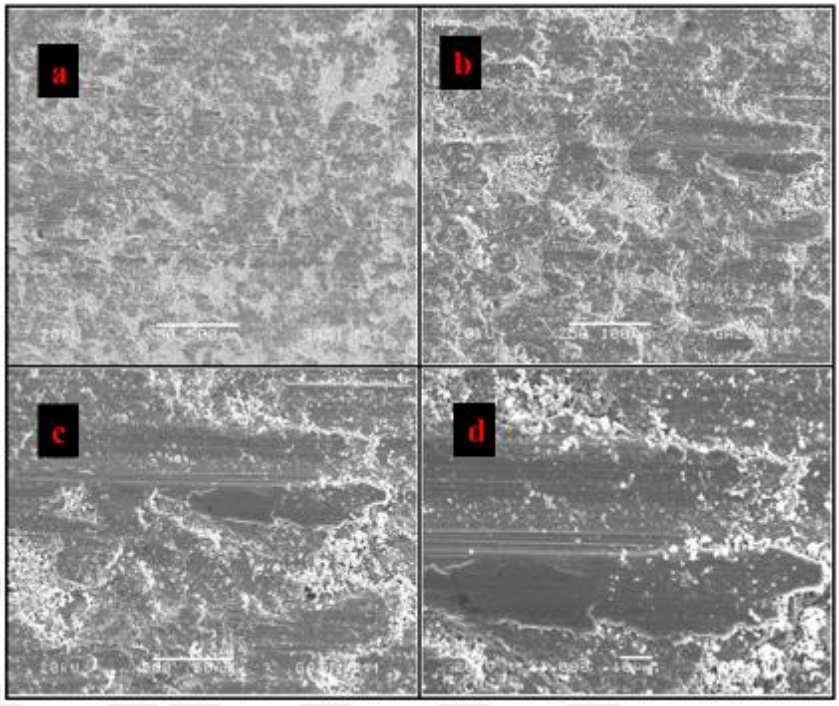
Şekil 8.62, Şekil 8.63 ve Şekil 8.64'te ise Cu10Sn/CNT kompozitlerden oluşan sırasıyla Deney 5, Deney 6 ve Deney 7'ye ait aşınmış yüzeyler SEM görüntüleriyle verilmiştir.



Şekil 8.62 5 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



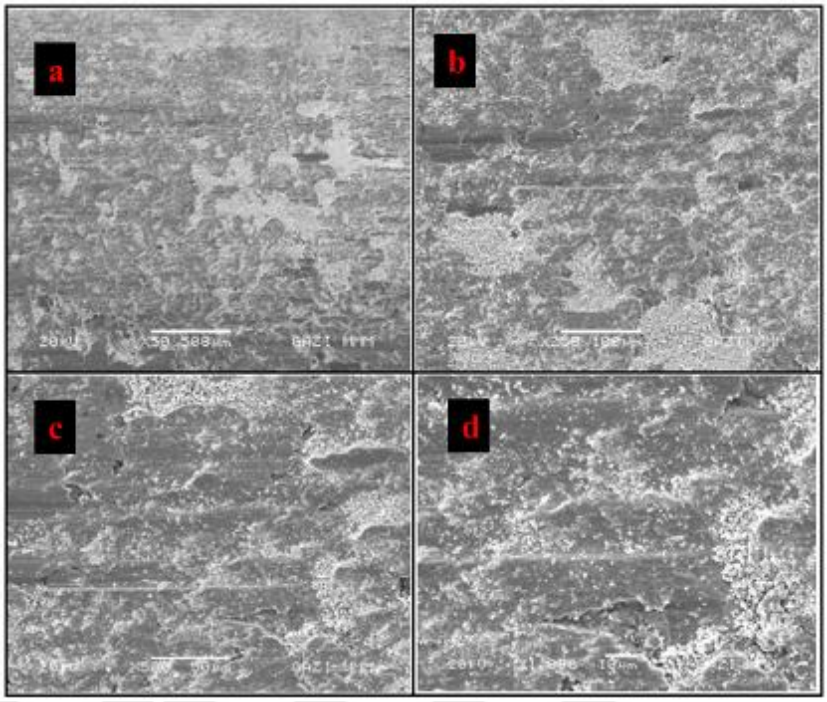
Şekil 8.63 6 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



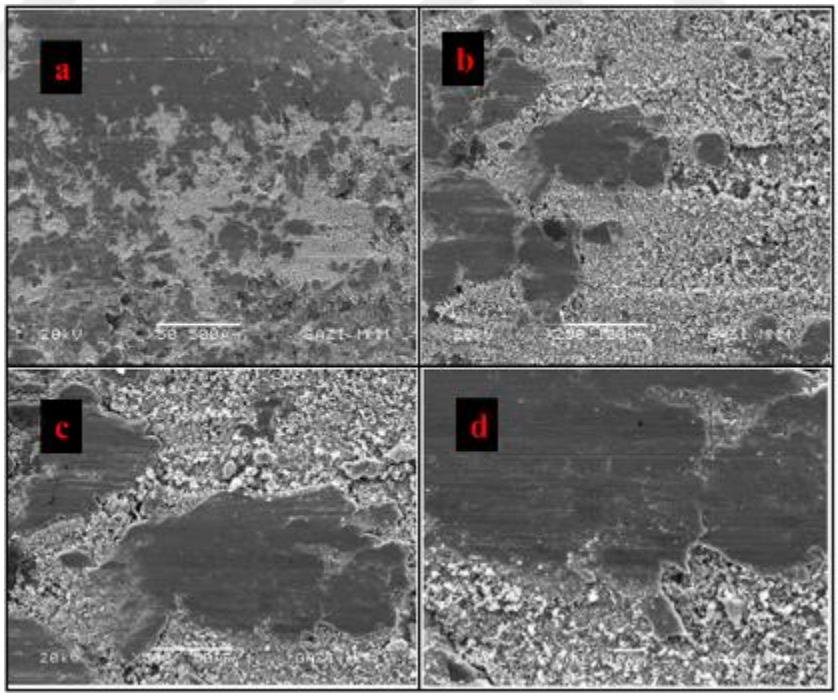
Şekil 8.64 7 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme

Yukarıdaki şekillerden anlaşılacağı üzere CNT takviyeli kompozit malzemelerde daha önce verilen aşınmış yüzeylerden daha yoğun aşınmaların olduğu yüzeylerin elde edildiği görülmüştür. Ağırlık kayıpları da bu durumu doğrulamaktadır. Aşınma testi sonuçlarında ana malzemeden daha fazla aşınan bu numunelerin aşınma dayanımının ana malzemeden daha düşük olduğunu söyleyebiliriz.

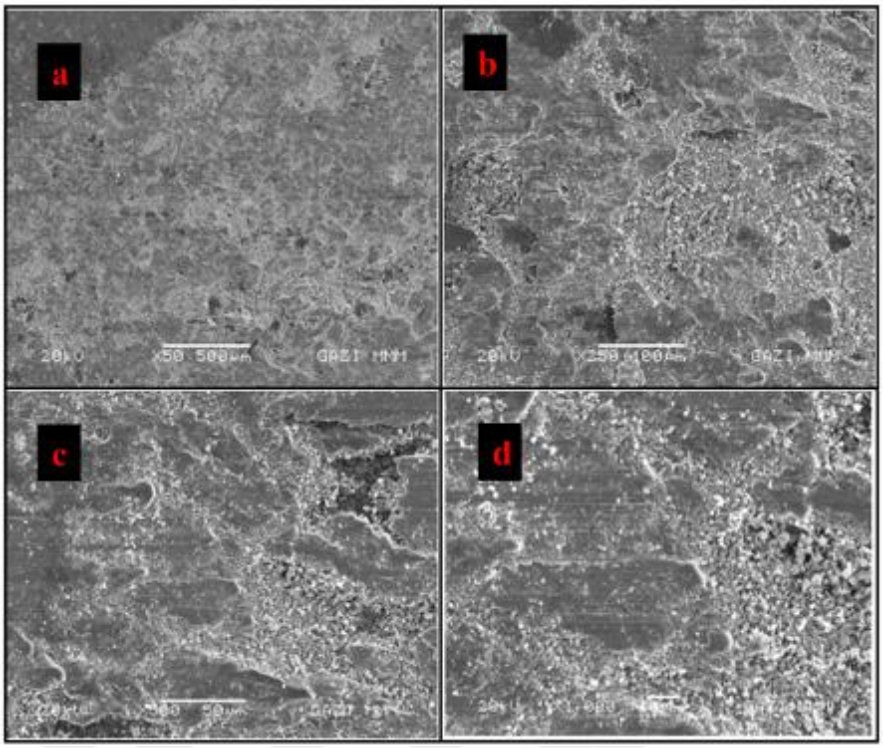
Hibrit kompozit malzemelere ait aşınmış yüzey görüntüleri ise sırasıyla Şekil 8.65 – Şekil 8.73 arasında verilmiştir.



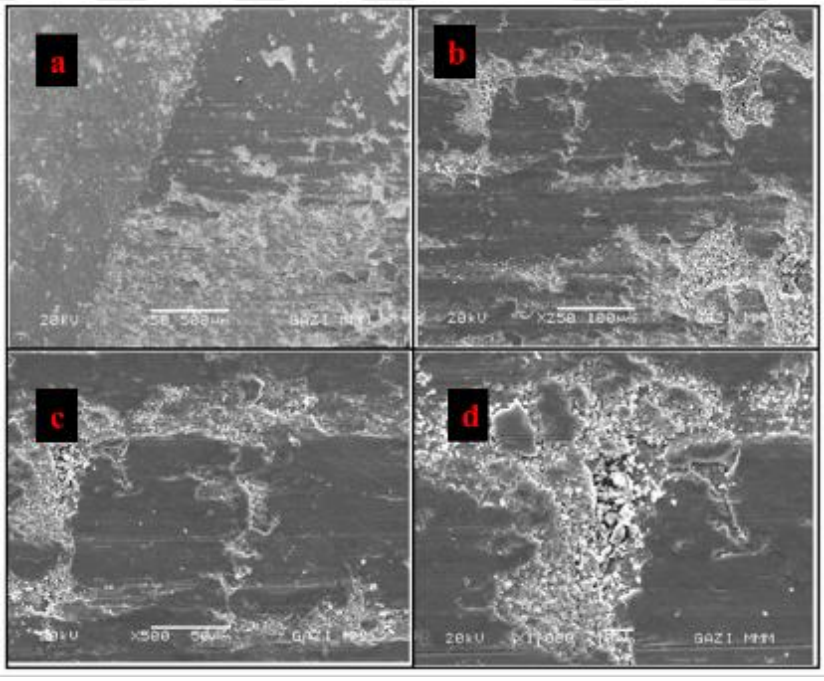
Şekil 8.65 8 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



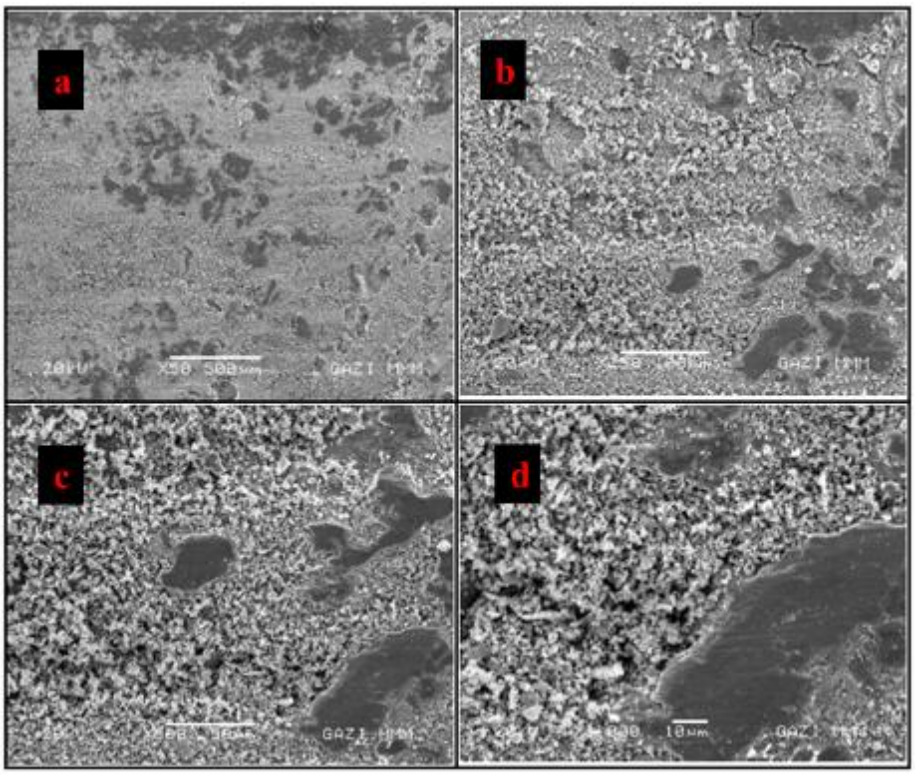
Şekil 8.66 9 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



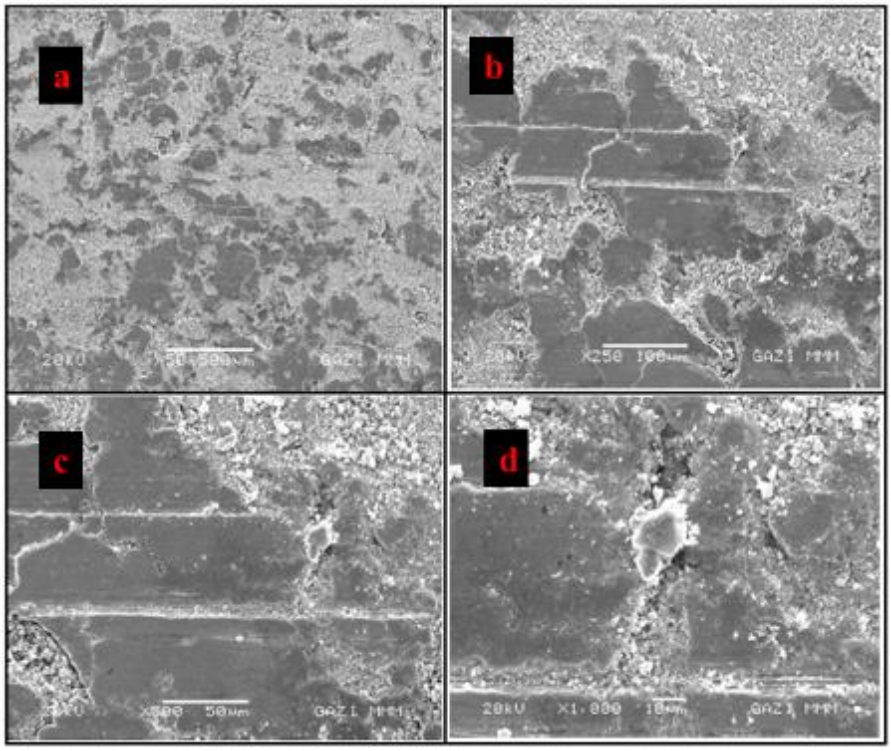
Şekil 8.67 10 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



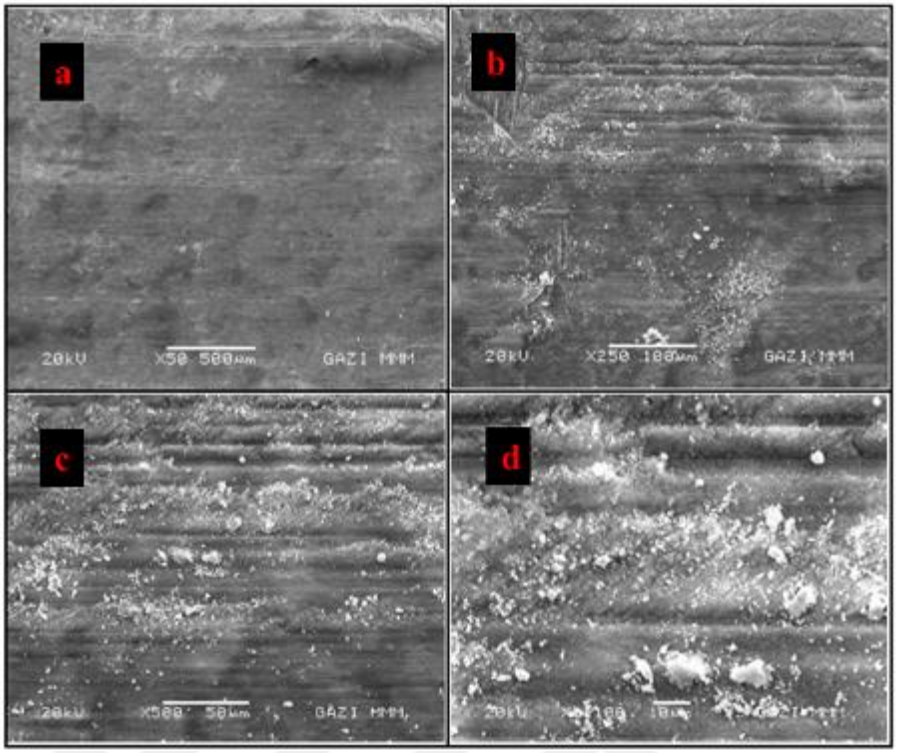
Şekil 8.68 11 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



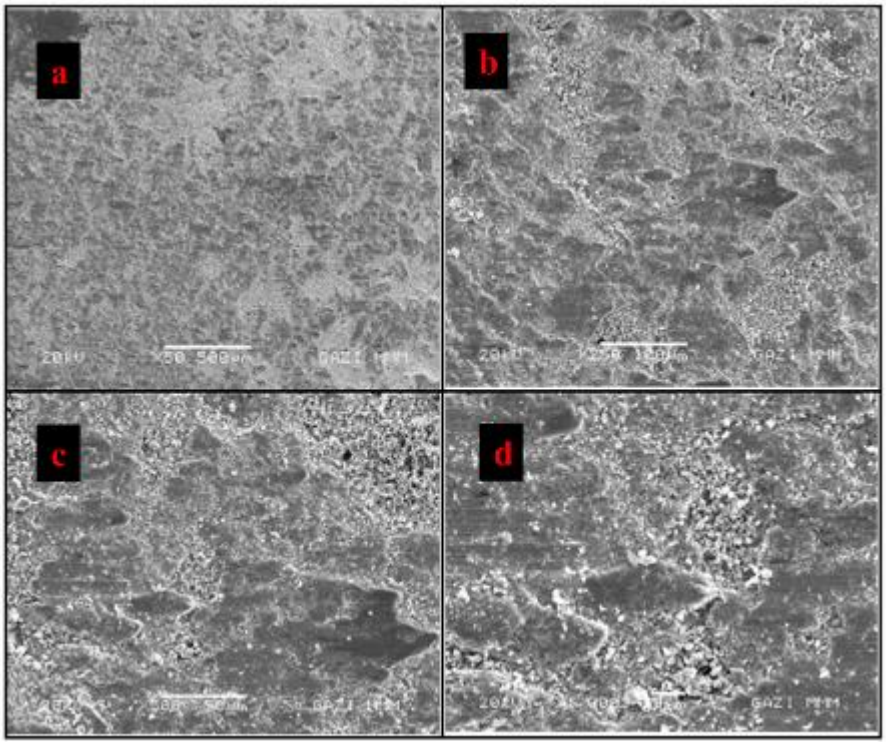
Şekil 8.69 12 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



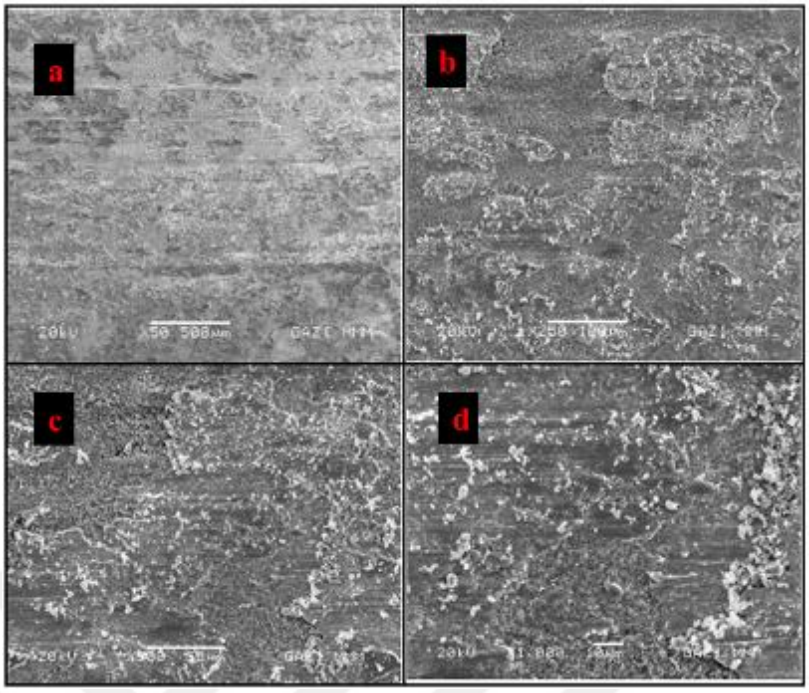
Şekil 8.70 13 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



Şekil 8.71 14 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



Şekil 8.72 15 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme



Şekil 8.73 16 numaralı deneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri a) 50x büyütme, b) 250x büyütme, c) 500x büyütme, d) 1000x büyütme

Şekil 8.65 – Şekil 8.74 arasında verilen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntülerinde ise ana malzemeden daha yoğun aşınma izleri olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hibrit takviyelerin birbiriyle uyumsuz özellik sergilemesi nedeniyle aşınma izlerinin daha derin ve yoğun oluştuğunu söylemek mümkündür.

Şekil 8.58 - Şekil 8.73'de görüldüğü üzere ana matris malzemesinin dayanımı düşmüştür. Şekil 8.57'de verilen grafikte ZrO_2 takviyeli mono kompozit malzemesinin en az ağırlık kaybı sergilemesi en yüksek aşınma direncini gösteren alaşım olduğunu göstermektedir. ZrO_2 ile CNT'nin aynı anda kullanıldığı hibrit kompozit malzemelerde ise ağırlık kaybının arttığı ve bu durumun matris malzemesinin aşınma direncini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Şekil 8.57'deki grafikte gözlemlenen ortalama numunelerde oluşan aşınma derinliği Şekil 8.58- Şekil 8.73 arasındaki SEM fotoğraflarında da görülebilmiştir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, toz metalurjisi ile üretilen Cu10Sn matrisli, Zirkonya ve CNT takviyeli hibrit kompozitlerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri araştırılmış olup, çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Gözenekliliğin en düşük olduğu sonuç %11,1 ile matris malzemesi, en yüksek olduğu sonuç ise %30 ile 16 numaralı deney numunesidir. Buna bağlı olarak bağıl yoğunluğun en yüksek olduğu numune matris malzemesi, en düşük olduğu numune ise 16 numaralı deney numunesidir.

- OM görüntüleri incelendiğinde CNT ve ZrO_2 miktarı arttıkça matris üzerinde mikro boyutta yapısal bozulma, topaklanma ve boşluk oluşumlarının arttığı gözlemlenmiştir.

- Takviye oranlarına bağlı olarak mono kompozitler arasında bir kıyaslama yapıldığında ZrO_2 takviyeli mono kompozitlerde, CNT takviyeli mono kompozitlere oranla gözenek, boşluk vb. yapısal bozulmaların daha az olduğu saptanmıştır.

- Cu10Sn matrisinin içerisine ZrO_2 ve CNT takviye elemanlarının tane sınırlarında iç içe geçtiği, matris elementleri olan Cu ve Sn ile takviye malzemesi elementleri olan Zr, C ve O elementlerinin EDS piklerinde yer aldığı, takviye oranının artışına bağlı olarak Zr, C ve O piklerinde de artışların olduğu görülmüştür.

- XRD grafiklerinde elde edilen en yüksek CuSn pikleri sırasıyla 43°; 49,60°; 73,3° ve 88,75° 2θ açı konumlarında meydana gelirken, ZrO_2 bileşiğinin tepe noktası 39° 2θ açı konumlarında ve C elementinin tepe noktası ise 61° 2θ açı konumlarında meydana gelmiştir.

- Deneylerde ana malzeme makrosertlik sonucu 50 HB olarak ölçülürken, en yüksek makrosertlik sonucu %10 ZrO_2 takviyeli kompozit malzemede (Deney 4) yaklaşık 57 HB olarak, en düşük makrosertlik sonucu ise %10 ZrO_2 ve %2 CNT takviyeli

kompozit malzemede (Deney 16) yaklaşık 31 HB olarak ölçülmüştür. Deneylerde ZrO_2 oranı arttıkça sertliğin arttığı görülürken, CNT oranı arttığında ise sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir.

- Ana malzeme mikrosertlik değeri 73 HV olarak ölçülürken, en yüksek mikrosertlik değeri Deney 11'de 83 HV, en düşük mikrosertlik değeri ise Deney 7'de 71 HV olarak ölçülmüştür. Deneylerde makrosertlik testlerinde olduğu gibi ZrO_2 oranı arttıkça mikrosertliğin arttığı görülürken, CNT oranı arttıkça mikrosertliğin düştüğü gözlemlenmiştir.

- Mono kompozit ZrO_2 takviyeli malzemesinin en az ağırlık kaybı sergilemesi en yüksek aşınma direncini gösteren alaşım olduğunu da göstermiştir.

- ZrO_2 ile CNT'nin aynı anda kullanıldığı hibrit kompozit malzemelerde ise ağırlık kaybının arttığı ve bu durumun matris malzemesinin aşınma direncini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

- Genel olarak ZrO_2'nin mekanik özellikleri arttırdığı, CNT'nin olumsuz özellik gösterdiğini gözlemlenmiştir. ZrO_2 - CNT ikilisinin bronz üzerinde etkileşim noktasında olumsuz özellikler sergilediği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Abd-Elwahed, M., & Meselhy, A. (2020). Experimental investigation on the mechanical, structural and thermal properties of Cu– ZrO_2 nanocomposites hybridized by graphene nanoplatelets. *Ceramics International*, 46(7), 9198-9206. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.172

Abu-Oqail, A., Wagih, A., Fathy, A., Elkady, O., & Kabeel, A. (2019). Effect of high energy ball milling on strengthening of Cu-ZrO2 nanocomposites. *Ceramics International*, 45(5), 5866-5875. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.053

Angelo, P. C., Subramanian, R., & Ravisankar, B. (2022). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=XWabEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Powder+Metallurgy&ots=4iGCHF9a1T&sig=xoXggzfsxsKoEjyW8uur_X2kyD4&redir_esc=y#v=onepage&q=Powder%20Metallurgy&f=false

Bever, M., & Duwez, P. (1972). Gradients in composite materials. *Materials Science and Engineering*, 10, 1-8. https://doi.org/10.1016/0025-5416(72)90059-6

Bozic, D., Ilic, N., & Jovanovic, M. T. (1998). Ageing of Cu-Cr powders produced by rotating electrode process (REP). *Journal of materials science letters*, 17(7), 587-589.

Büyükuncu, G. (2000). Bor Karbür / Silisyum Karbür Kompozitlerinin Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Campbell, F. C. (2010). Structural composite materials. ASM international. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=D3Wta8e07t0C&oi=fnd&pg=PR1&dq=Composite+materials&ots=T01hbDZbua&sig=9W661Q_OmpzmFZsyWEYlxd85pkQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Composite%20materials&f=false

Celik, E., Birlik, I., & Karakas, Y. (2009). Synthesis of NiCrAl/MgO– ZrO_2 cermet powders by chemical method for functionally graded coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 695-699. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.080

Chadwick, D., & Hashemi, T. (1978). Adsorbed corrosion inhibitors studied by electron spectroscopy: benzotriazole on copper and copper alloys. *Corrosion Science*, 18(1), 39-51.

Chaopeng, C., Xiangwei, Z., Shulong, L., & Qiang, L. (2018). Effect of nano-sized ZrO_2 on the recrystallization of Mo alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 752, 308-316. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.155

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

Clinktan, R., Senthil, V., Ramkumar, K., Sivasankaran, S., & Al-Mufadi, F. A. (2019). Effect of boron carbide nano particles in CuSi4Zn14 silicone bronze nanocomposites on matrix powder surface morphology and structural evolution via mechanical alloying. *Ceramics International*, 45(3), 3492-3501. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.007

Daigo, I., Hashimoto, S., Matsuno, Y., & Adachi, Y. (2009). Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 208-217. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.010

Daoush, W.M., Lim, B.K., Mo, C.B., Nam, D.H. & Hong, S.H. (2009). Electrical and mechanical properties of carbon nanotube reinforced copper nanocomposites fabricated by electroless deposition process. *Mater Sci Eng* A 513: 247–253

Deshpande, P., Li, J., & Lin, R. (2006). Infrared processed Cu composites reinforced with WC particles. *Materials Science and Engineering*: A, 429(1-2), 58-65. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.124

Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R.A. & Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: structure, properties and stability under stress. *J. Am. Ceram*. Soc. 94, 3605–3628.

Ehsani, A., & Yazıcı, E. Y. (2016). Anadolu'da Bakır Madenciliği ve Kullanımının Kısa Tarihçesi. *MT Bilimsel*, (9), 43-48.

Elmahdy, M., Abouelmagd, G., & Mazen, A. A. E. (2017). Microstructure and properties of Cu-ZrO 2 nanocomposites synthesized by in situ processing. *Materials Research*, 21.

Emrullahoğlu, S.B., Gül, S. & Emrullahoğlu, Ö.F. (2005). Kullanılmış SiC Kasetlerden Dökülebilir Refrakter Üretimi, *I. Endüstriyel Fırınlar ve Refrakter Sempozyumu*, Sakarya.

Fang, Z. Z., Paramore, J. D., Sun, P., Chandran, K. R., Zhang, Y., Xia, Y., ... & Free, M. (2018). Powder metallurgy of titanium–past, present, and future. *International Materials Reviews*, *63*(7), 407-459.

Fathy, A., & El-Kady, O. (2013). Thermal expansion and thermal conductivity characteristics of Cu–Al2O3 nanocomposites. *Materials & Design* (1980-2015), 46, 355-359. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.042

Fathy, A., Shehata, F., Abdelhameed, M., & Elmahdy, M. (2012). Compressive and wear resistance of nanometric alumina reinforced copper matrix composites. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 100-107. https://doi.org/10.1016/j.matdes. 2011.10.021

Gogotsi, Y. (2006). Nanotubes and Nanofibers. ISBN 0849393876, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton

Guo, L., Liu, W., Wang, C. (2021). Preparation and sintering properties of Cu10Sn3 IMCs nanopaste as die attach material for high temperature power electronics. Mater. Lett.

Gül, H., Uysal, M., Alp, A., & Akbulut, H. (2015). Preparation and characterization of bronze/SiCp composites produced via current activated sintering method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 38, 413-419. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.03.023

Güneş, A., Salur, E., Aslan, A., Kuntoğlu, M., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Düzcükoğlu, H., & Şahin, Ö. S. (2021). Towards Analysis and Optimization for Contact Zone Temperature Changes and Specific Wear Rate of Metal Matrix Composite Materials Produced from Recycled Waste. *Materials*, 14(18), 5145. https://doi.org/10.3390/ma14185145

Harris, B. (1999). Engineering composite materials. https://learn.skillman.eu/pluginfile.php/1902/mod_resource/content/0/Engineering%20Composites.pdf

Hayun, S., Frage, N. & Dariel, M.P. (2006). The morphology of ceramic phases in BxC–SiC–Si infiltrated composites. *J. Solid State Chem*. 179, 2875–2879.

Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, *262*, 113640. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640

İpek, M. (2005). İki Farklı Yolla Üretilmiş Alumina-Zirkonya Kompozitlerin Sinterlenme ve Kırılma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.

Kaminska, I., Das, M. R., Coffinier, Y., Niedziolka-Jonsson, J., Woisel, P., Opallo, M., ... & Boukherroub, R. (2012). Preparation of graphene/tetrathiafulvalene nanocomposite switchable surfaces. *Chemical Communications*, 48(9), 1221-1223.

Kaminska, I., Das, M. R., Coffinier, Y., Niedziolka-Jonsson, J., Sobczak, J., Woisel, P., ... & Szunerits, S. (2012). Reduction and functionalization of graphene oxide sheets using biomimetic dopamine derivatives in one step. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(2), 1016-1020.

Kara, M. (1998). Alüminyum Oksitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi*. Sakarya.

Liu, Z., Deng, X., Li, J., Sun, Y. (2018). Ran, S.: Effects of B4C particle size on the microstructures and mechanical properties of hot-pressed B4C–TiB2 composites. Ceram. Int.

Mazaheri, Y., Jalilvand, M. M., Heidarpour, A., & Jahani, A. R. (2020). Tribological behavior of AZ31/ ZrO_2 surface nanocomposites developed by friction stir

processing. *Tribology International*, 143, 106062. https://doi.org/ 10.1016/ j.triboint.2019.106062

Minneci, R. P., Lass, E. A., Bunn, J. R., Choo, H., & Rawn, C. J. (2021). Copper-based alloys for structural high-heat-flux applications: a review of development, properties, and performance of Cu-rich Cu–Cr–Nb alloys. *International Materials Reviews*, 66(6), 394-425.

Narasimhan, K. S. (2001). Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, *67*(1-3), 56-65.

Özdemir, M. (2004). Kaolen-Sepiyolit Katkılı Kordiyerit Üretimi. Mezuniyet Tezi, *A.K.Ü. Uşak Müh. Fak., Seramik Müh. Bölümü*. Afyon.

Rajkovic, V., Bozic, D., & Jovanovic, M. T. (2010). Effects of copper and Al2O3 particles on characteristics of Cu–Al2O3 composites. *Materials & Design*, 31(4), 1962-1970. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.037

Ramachandra, M., Abhishek, A., Siddeshwar, P., & Bharathi, V. (2015). Hardness and Wear Resistance of ZrO_2 Nano Particle Reinforced Al Nanocomposites Produced by Powder Metallurgy. *Procedia Materials Science*, 10, 212-219. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.043

Razavi Hesabi, Z., Hafizpour, H., & Simchi, A. (2007). An investigation on the compressibility of aluminum/nano-alumina composite powder prepared by blending and mechanical milling. *Materials Science and Engineering*: A, 454-455, 89-98. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.129

Ružić, J., Stašić, J., Rajković, V., & Božić, D. (2013). Strengthening effects in precipitation and dispersion hardened powder metallurgy copper alloys. *Materials & Design*, 49, 746-754. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.030

Šalak, A., Selecká, M., & Danninger, H. (2005). *Machinability of powder metallurgy steels*. Cambridge Int Science Publishing.

Sorkhe, Y., Aghajani, H., & Taghizadeh Tabrizi, A. (2014). Mechanical alloying and sintering of nanostructured TiO2 reinforced copper composite and its characterization. *Materials & Design*, 58, 168-174. https://doi.org/10.1016/ j.matdes.2014.01.040

Suri, A.K., Subramanian C., Sonber J.K. & Murthy T.S.R. (2010). Synthesis and consolidation of boron carbide: a review. Int. Mater. Rev. 55, 4–40.

Tsukerman, S. A. (2013). *Powder metallurgy*. Elsevier. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=DT8vBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Powder+Metallurgy&ots=lEiwxdZQiS&sig=ZTMAwGz_jAw0Z7bSC3pHtezvL4o&redir_esc=y#v=onepage&q=Powder%20Metallurgy&f=false

Tu, J., Wang, N., Yang, Y., Qi, W., Liu, F., Zhang, X., Lu, H., & Liu, M. (2002). Preparation and properties of TiB2 nanoparticle reinforced copper matrix

composites by in situ processing. *Materials Letters*, 52(6), 448-452. https://doi.org/10.1016/S0167-577X(01)00442-6

Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge Int Science Publishing.

Wagih, A., & Fathy, A. (2017). Experimental investigation and FE simulation of spherical indentation on nano-alumina reinforced copper-matrix composite produced by three different techniques. *Advanced Powder Technology*, 28(8), 1954-1965. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.05.005

Wang, F., Li, Y., Yamanaka, K., Wakon, K., Harata, K., & Chiba, A. (2014). Influence of two-step ball-milling condition on electrical and mechanical properties of TiC-dispersion-strengthened Cu alloys. *Materials & Design*, 64, 441-449. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.027

Wei, C., Liu, L., Cao, H., Zhong, X, Xu, X., Gu, Y., Cheng, D., Huang, Y., Li, Z., Guo W., Liu, Z. & Li, L. (2022). Cu10Sn to Ti6Al4V bonding mechanisms in laser-based powder bed fusion multiple material additive manufacturing with different build strategies. Addit. Manuf.

Xue, Z.W., Wang, L.D., Zhao, P.T., Xu, S.C., Qi, J.L. & Fei, W.D. (2012). Microstructures and tensile behavior of carbon nanotubes reinforced Cu matrix composites with molecularlevel dispersion. *Materials and Design* 34: 298–301

Yıldırım, İ. (2002). Al2O3 ve SiC'ün Mukavemet Özellikleri Üzerine Üretim Şartları ve Bileşimin Etkisi. Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Yu, M.F., Files, B.S., Arepalli, S. & Ruoff, R.S. (2000). Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties. *Physical Review Letters*, vol. 84, no.24, p.5552-5555

Zhao, N., Nash, P., & Yang, X. (2005). The effect of mechanical alloying on SiC distribution and the properties of 6061 aluminum composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(3), 586-592. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.037

Zhi, X., Jiao, Y., Zheng, Y., Vasileff, A., & Qiao, S. (2020). Selectivity roadmap for electrochemical CO2 reduction on copper-based alloy catalysts. *Nano Energy*, 71, 104601. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104601