



**FARKLI TAKVİYELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BAKIR
ESASLI KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZLERİ**

Gamze İSPİRLİOĞLU KARA

Danışman: Doç. Dr. Sinan SEZEK

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır.)

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

**FARKLI TAKVİYELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BAKIR ESASLI
KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE
ANALİZLERİ**

(Production and Analyses of Copper Based Composites Reinforced with Different
Reinforcements by Powder Metallurgy Method)

DOKTORA TEZİ

Gamze İSPİRLİOĞLU KARA

Danışman: Doç. Dr. Sinan SEZEK
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL

Erzurum
Aralık, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Gamze İSPİRLİÖĞLU KARA tarafından hazırlanan “FARKLI TAKVİYELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BAKIR ESASLI KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZLERİ” başlıklı çalışması 22/12/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekanik Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Yaşar TOTİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Sinan SEZEK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Hamit AKBULUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Fatih YILDIZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Yusuf ER <i>Fırat Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL <i>Fırat Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
....../....../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP Koordinasyon projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2022-10286

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Doç. Dr. Sinan SEZEK ve Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL danışmanlığında sunulan “FARKLI TAKVİYELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BAKIR ESASLI KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZLERİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Yöntem	12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuç ve Öneriler	1	20
Tezin Geneli	8	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Gamze İSPİRLİOĞLU KARA	Doç. Dr. Sinan SEZEK, Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL
22.12.2023	22.12.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması süresince benden yardımını, anlayışını, desteğini, hoşgörüsünü, zamanını esirgemeyen ve bana daima yol gösteren değerli ortak tez danışmanım Sayın hocam Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL’a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Sinan SEZEK’e çok teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım boyunca bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen, deneyimlerini paylaştan ekip arkadaşlarım Cevher Kürşat MACİT, Merve HORLU ve Melike AVER’e,

Yaptığım çalışmada bana daima yol gösteren ve benden bilgilerini esirgemeyen değerli hocalarım Öğr. Gör. Muhammet Kaan YEŞİLYURT ve Doç.Dr. Yusuf ER’e,

Bilimsel çalışma ortamına sağladıkları katkılarından dolayı değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Şükran Merve TÜZEMEN, Arş. Gör. Burak ATİK, Arş. Gör. Ercan DOĞAN, Arş. Gör. Burak HÜLAGÜ, Arş. Gör. Selçuk AVCİ ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf Burak BOZKURT’a,

Yapılan bu çalışmayı FDK-2022-10286 nolu proje kapsamında destekleyen Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)’ne,

Eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, bu günlere gelmemi sağlayan canım annem Sevdâ İSPİRLİOĞLU, babam Ahmet İSPİRLİOĞLU, kardeşlerim Zeynep İSPİRLİOĞLU ve Sinan İSPİRLİOĞLU’na,

Maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, sevgi ve güveniyle her zaman yanımda olan, bu zorlu süreçte sonsuz sabrı ve desteği için çok kıymetli eşim Ubeydullah KARA’ya ve varlıklarıyla en büyük manevi desteği sağlayan oğullarım Onur KARA ve Ozan KARA’ya sonsuz teşekkür ederim.

Gamze İSPİRLİOĞLU KARA

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI TAKVİYELERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BAKIR ESASLI KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ANALİZLERİ

Gamze İSPİRLİOĞLU KARA

Danışman: Doç. Dr. Sinan SEZEK

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL

Amaç: Hibrit kompozitler, Cu ana matris tozlarına ağırlıkça farklı oranlarda B, B₄C, Gr ve CNT takviyeleri ile toz metalürjisi üretim yöntemi ile üretilmiştir. Alternatif hibrit kompozitlerin üretilmesi ile mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerinin iyileştirilerek endüstriyel uygulama alanlarının genişletilmesi hedeflenmektedir.

Yöntem: Bu çalışma toz metalürjisi üretim yöntemi ile tartım, karışım, presleme ve sinterleme olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Sertlik sonuçları artan sinterleme sıcaklığı ve azalan takviye partikül boyutu ile artmış ve aşınma testlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek sertlik sonucu 850 °C'de 142 HV ile sinterlenen Cu-Cr-4B hibrit kompozitte elde edilmiştir. Cu-Cr-4B numunesinde saf Cu numunesine göre %76,25 oranında daha yüksek bir değere ulaşılmıştır. Hibrit kompozitlerin aşınma direncinin de artan sinterleme sıcaklığı ile arttığı gözlemlenmiştir. Korozyon testlerinde, grafit takviyesi ile korozyon direnci saf bakıra kıyasla artmıştır. Kompozitin korozyon direnci B/B₄C takviye oranı arttıkça (%3'e kadar) artmış ve optimum değer Cu-Cr-3B'de elde edilmiştir. Bununla birlikte, kompozitin korozyon direnci CNT takviyesi ile saf Cu'ya göre düşmüştür.

Sonuç: Cr, B, B₄C, Gr takviyelerinin mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerini olumlu yönde etkilediği, CNT içeriğinin ise mekanik ve tribolojik özellikleri iyileştirdiği ve korozyon direncini azalttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Toz metalürjisi, Hibrit Kompozit, Bakır, Bor, Grafit, Karbon nanotüp.

Aralık 2023, 131 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL THESIS

PRODUCTION AND ANALYSES OF COPPER BASED COMPOSITES REINFORCED WITH DIFFERENT REINFORCEMENTS BY POWDER METALLURGY METHOD

Gamze İSPİRLİOĞLU KARA

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sinan SEZEK

Co-supervisor: Prof. Dr. Bünyamin AKSAKAL

Purpose: Hybrid composites were produced with B, B₄C, Gr, and CNT reinforcements by powder metallurgy production method at different ratios by weight to Cu main matrix powders. By producing alternative hybrid composites, it is aimed to expand their industrial application areas by improving their mechanical, tribological, and corrosion properties.

Method: This study was carried out by the powder metallurgy production method in four stages; weighing, mixture, pressing, and sintering.

Findings: Hardness results increased with increasing sintering temperature and decreasing reinforcement particle size and similar results were obtained in wear tests. The highest hardness result was obtained in Cu-Cr-4B hybrid composite sintered at 850 °C with 142 HV. A higher value of 76,25% was reached in the Cu-Gr-CNT sample than in the pure Cu sample. It was also observed that the wear resistance of hybrid composites increased with increasing sintering temperature. Corrosion resistance increased with graphite reinforcement compared to pure copper through the corrosion tests. The corrosion resistance of the composite increased as the B/B₄C reinforcement ratio increased (up to 3%) and the optimum value was obtained in Cu-Cr-3B. However, the corrosion resistance of the composite decreased with CNT reinforcement to pure Cu.

Results: It was shown that Cr, B, B₄C, and Gr reinforcements positively affected mechanical, tribological, and corrosion properties, while CNT content improved mechanical and tribological properties and reduced corrosion resistance.

Keywords: Powder metallurgy, Hybrid Composite, Copper, Boron, Graphite, Carbon nanotube.

December 2023, 131 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
Literatür Özeti	2
Tezin Literatürdeki Yeri ve Önemi	9
KURAMSAL TEMELLER.....	10
Kompozit Malzeme	10
Metal Matrisli Kompozit Malzemeler.....	13
Katı hal prosesleri	13
Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	14
Toz Metalürjisi	15
Soğuk presleme	17
Sinterleme	28
MATERYAL VE METOD	31
Takviye Tozların Saflık ve Adlandırılması.....	31
Tozların Hazırlanması.....	32
Kompozit Numunelerin Hazırlanması	33
Sertlik	37
Basma Testleri.....	37
Aşınma Testleri	38
Korozyon Testleri.....	39
Haddelme.....	40
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	44
XRD ve Morfolojik Analizler	44

Krom (Cr), Bor(B) ve Bor karbür(B ₄ C) partikül takviyeli kompozitin XRD ve morfolojik analizleri.....	44
Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) partikül takviyeli hibrit kompozitin XRD ve morfolojik analizleri.....	51
Sertlik Testleri.....	55
Krom (Cr), Bor (B) ve Bor karbür (B ₄ C) partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertliği.....	55
Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik analizleri.....	57
Aşınma Testleri	58
Krom (Cr), Bor (B) ve Bor karbür (B ₄ C) partikül takviyeli Hibrit kompozitlerin aşınma davranışı.....	58
Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) partikül takviyeli üretilen Hibrit kompozitlerin aşınma davranışı.....	65
Cu Esaslı Üretilen partikül takviyeli Hibrit kompozitlerin Korozyon Davranışları	71
B partikül takviyeli hibrit kompozitlerin korozyon davranışları.....	71
Partikül B ₄ C takviyeli hibrit kompozitlerin korozyon davranışları	75
Gr ve CNT partikül takviyeli kompozitlerin korozyon davranışları.....	84
Basma Testi Sonuçları.....	89
B partikül takviyeli Cu esaslı kompozitlerin basma testi sonuçları	89
Gr ve CNT partikül takviyeli kompozitlerin basma testi sonuçları	91
Elektiriksel İletkenlik	92
Haddeleme.....	94
SONUÇ VE ÖNERİLER	97
KAYNAKÇA	101
ÖZGEÇMİŞ.....	117

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Matris, Takviye Elemanı ve Kompozit Yapı Tipleri.....	10
Tablo 2. Saf Cu Elementinin Mekanik, Kimyasal, Fiziksel ve Elektriksel Özellikleri	18
Tablo 3. Bor Karbürün Genel Özellikleri	20
Tablo 4. Grafit Kullanım Alanları	22
Tablo 5. Grafit ve CNT'nin Özelliklerinin Karşılaştırılması	28
Tablo 6. Çalışmada Kullanılan Tozların Safılık, Partikül Boyutları ve Fiziksel Özellikleri	31
Tablo 7. Kompozit Numune Grupları ve Ağırlıkça % Katkı Miktarları.....	32
Tablo 8. Triboloji Testi İçin Belirlenen Deney Parametreleri	38
Tablo 9. Hibrit Kompozitlerin Ortalama Sürtünme Katsayısı Değerleri.....	61
Tablo 10. Gr ve CNT Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Ortalama Sürtünme Katsayısı Değerleri.....	68
Tablo 11. En iyi mekanik özellik gösteren numunelerin elektrik iletkenliği değerleri	92
Tablo 12. Tüm Kompozitlerin Genel Sonuçları	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Matris malzemelerine göre kompozitler	11
Şekil 2. a) Elyafı, b) Parçacıklı, c) Tabakalı ve d) Karma kompozitlerin şekli	12
Şekil 3. Katı hal metal matris kompozit malzeme akış şeması	14
Şekil 4. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.....	15
Şekil 5. Toz metalürjisi aşamaları	16
Şekil 6. Grafitin kimyasal yapısı	21
Şekil 7. Grafenin yapısı (Zhen & Zhu, 2018)	23
Şekil 8. Karbon nanotüp atomik bağ yapısı	27
Şekil 9. Atmosfer kontrollü sinterleme fırınları	28
Şekil 10. Mikroskobik boyutta sinterleme mekanizması	29
Şekil 11. T/M metodu ile Hibrit kompozit üretim işlemleri akış şeması	31
Şekil 12. Hibrit kompozit hazırlama süreci şematik gösterimi	33
Şekil 13. Soğuk pres.....	33
Şekil 14. Soğuk presleme işlemi için tasarlanıp imal edilen kalıplar.....	34
Şekil 15. Soğuk presleme ile üretilen kompozit numuneler.....	34
Şekil 16. Sinterleme işlemlerinde sıcaklık-zaman değişimi a) 750 °C b) 850 °C	35
Şekil 17. Soğuk presle kompaktlanan Cu esaslı hibrit kompozitlerin sinterleme öncesi (a) ve sonrası (b) numuneler.....	35
Şekil 18. Soğuk presle kompaktlanan ve bakalite alınan farklı kompozisyondaki kompozit numuneler.....	36
Şekil 19. SEM analiz cihazı	36
Şekil 20. X ışını kırınım (XRD) cihazı.....	37
Şekil 21. Sertlik cihazı	37
Şekil 22. Çekme testi cihazı	38
Şekil 23. Aşınma cihazı.....	39
Şekil 24. Korozyon test düzeneği (Atik, 2020).....	40
Şekil 25. Deneylerde kullanılan haddeleme cihazı.	41
Şekil 26. Haddeleme işleminin şematik gösterimi.	42
Şekil 27. Üretilen Bor(B) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri	45
Şekil 28. Üretilen Bor karbür (B ₄ C) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri.....	46
Şekil 29. Üretilen Bor(B) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri	47
Şekil 30. Üretilen Bor karbür (B ₄ C) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri.....	49
Şekil 31. Üretilen a) Grafit (Gr) ve b) Karbon nanotüp (CNT) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri	51

Şekil 32. Üretilen Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri	52
Şekil 33. B ve B ₄ C partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik değişimleri a) 44 µm b) 1 µm	56
Şekil 34. Üretilen Gr ve CNT partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik değerleri.....	57
Şekil 35. Farklı içerikteki partikül takviyeli hibrit kompozitlerin aşınma sonrasındaki ağırlık kayıpları; a) 750°C sinterleme sıcaklığı için 44µm, b) 750°C sinterleme sıcaklığı için 1µm, c) 850°C sinterleme sıcaklığı için 44µm, d) 850°C sinterleme sıcaklığı için 1µm	59
Şekil 36. Cu-Cr-B hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri.....	60
Şekil 37. Cu-Cr-B ₄ C hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri.....	61
Şekil 38. 750 °C ‘de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri a) Cu, b) Cu-Cr, c) Cu-Cr-4B (750 °C 44 µm), d) Cu-Cr-4B ₄ C (750 °C 44 µm), e) Cu-Cr-4B (750 °C 1 µm), f) Cu-Cr-4B ₄ C (750 °C 1 µm)	62
Şekil 39. 850 °C ‘de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri a) Cu-Cr-4B (850 °C 44 µm), b) Cu-Cr-4B ₄ C (850 °C 44 µm), c) Cu-Cr-4B (850 °C 1 µm), d) Cu-Cr-4B ₄ C(850 °C 1 µm)	64
Şekil 40. Farklı içerikteki hibrit kompozitlerin aşınma sonrasındaki ağırlık kayıpları; a) 750°C sinterleme sıcaklığı için b) 850°C sinterleme sıcaklığı için.....	65
Şekil 41. Gr-CNT takviyeli hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri (750°C)	66
Şekil 42. Gr-CNT takviyeli hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri (850°C)	67
Şekil 43. 850 °C ‘de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri a) Cu-Cr-Gr, b) Cu-2Gr, c) Cu-CNT, d) Cu-2CNT, e) Cu-Gr-CNT ve f) Cu-Gr-2CNT	69
Şekil 44. Saf Cu potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).	71
Şekil 45. 750 °C, 1 µm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).	72
Şekil 46. 750 °C, 44 µm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).	73
Şekil 47. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).	73
Şekil 48. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).	74

Şekil 49. 750 °C, 1 µm farklı oranlarda B ₄ C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).....	75
Şekil 50. 750 °C, 44 µm farklı oranlarda B ₄ C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).....	75
Şekil 51. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda B ₄ C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).....	76
Şekil 52. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda B ₄ C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).....	76
Şekil 53. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları	77
Şekil 54. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B ₄ C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları	79
Şekil 54. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B ₄ C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları (devam).....	80
Şekil 55. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda partikül B ₄ C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları.....	80
Şekil 56. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları.....	82
Şekil 57. 850 °C farklı oranlarda Gr takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).	84
Şekil 58. 850 °C farklı oranlarda Gr ve CNT takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).....	85
Şekil 59. 850 °C, farklı oranlarda Gr ve CNT takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları.....	86
Şekil 60. % 1B partikül takviyeli hibrit kompozitlerin basma testi sonuçları.....	90
Şekil 61. % 4B partikül takviyeli hibrit kompozitlerin basma testi sonuçları.....	90
Şekil 62. Gr ve CNT partikül takviyeli hibrit kompozitlerin basma testi sonuçları.....	91
Şekil 63. Üretilen kompozitlerin Saf Cu 'ya göre elektrik iletkenliğinde % azalma değerleri	93
Şekil 64. B partikül takviyeli kompozitin sertlik değerlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması	94
Şekil 65. Gr partikül takviyeli kompozitin sertlik değerlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması	95
Şekil 66. CNT partikül takviyeli kompozitin sertlik değerlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması	95

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al₂O₃	Alüminyum oksit
ASTM	Uluslararası Amerikan Test Ve Materyalleri Topluluğu (American Society For Testing And Materials)
B	Bor
B₄C	Bor Karbür
C	Karbon
CMK	Seramik matrisli kompozit
CNT	Karbon nanotüp
Cr	Krom
Cu	Bakır
E_{kor}	Korozyon potansiyeli
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
G	Jelatin
GNP	Grafen
GNS	Grafen nano tabakaları
Gr	Grafit
I_{kor}	Korozyon akım yoğunluğu
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
µm	Mikrometre
PA	Poliamid
PE	Polietilen
PMK	Polimer matrisli kompozit
PTFA	Politetrafloroetilen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SWCNT	Tek duvarlı karbon nanotüp
SiC	Silüsyum karbür
T/M	Toz Metalürjisi
XRD	X-ışını Kırınımı

GİRİŞ

Geçmişte mühendislik malzemeleri genellikle homojen özelliklere sahip olmasına rağmen, aşınma, korozyon direnci ve diğer mekanik özellikler açısından optimum performans sağlamak amacıyla sürekli olarak daha fonksiyonel kompozit malzemeler geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Bu tür malzemelerin özelliklerini geliştirmek için saf metaller ve alaşımlar gibi geleneksel malzemelerin sınırlamaları nedeniyle daha fazla fonksiyonellik kazanmaları gerekmektedir (Kaya, 2016).

Saf metaller ve alaşımlar dahil olmak üzere geleneksel homojen malzemelerin uygulanmalarındaki kısıtlamalar nedeniyle, seramikler, polimerler ve geleneksel kompozitler, endüstriyel uygulama alanlarının gereksinimlerini karşılamak için yeni malzemeler geliştirilmelidir. Çünkü havacılık, otomobil, biyomedikal ve savunma alanları gibi birçok endüstriyel uygulama alanlarında, belirli bir ihtiyaca yönelik olarak tüm malzeme kompozisyon ve yapılarında kademeli bir değişiklik gerektiren belirli özelliklere ihtiyaç duyulmakta olup bunları da ancak kompozit malzemeler ile karşılamak mümkündür (Clyne & Hull, 2019).

Kompozit malzeme; İki veya daha fazla farklı malzemenin makro düzeyde bir araya getirilerek en iyi özelliklerinin tek bir malzemedeki toplanmasıyla oluşturulan yeni bir malzemedir. Başka bir deyişle, birbirlerinin zayıf yönlerini geliştirerek daha iyi özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilen farklı türdeki malzeme veya fazlardan oluşan malzemeler olarak da adlandırılabilirler (Vinson & Sierakowski, 2006). Kompozit malzeme bir matris malzemesi ve bu matris içinde dağılmış takviye malzemelerinden oluşur. Matris malzemesi genellikle polimer, metal veya seramik gibi bir yapıştırıcı veya bağlayıcı görevi gören bir malzemedir. Takviye malzemeleri ise matrisin mekanik özelliklerini artırmak için kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler; metal, seramik ve organik malzemeler olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar.

Genel olarak bu üç sınıfta kategorize edilen malzemelerin birbirlerine göre bazı üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin her geçen gün geliştirilen malzeme özellikleri sayesinde yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, boyutsal stabilite ve korozyon dayanımı gibi avantajlı bir malzeme olması sebebiyle tasarımcılar, mühendisler ve yöneticiler tarafından tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir (Ngo, 2020). Bu avantajlar, kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde araç ağırlığını azaltmak, havacılık

endüstrisinde yakıt tasarrufu sağlamak, yapı sektöründe dayanıklılığı artırmak gibi birçok alanda kullanılmasını sağlar (Zimmerli et al., 2010).

Tarih boyunca farklı malzemeler birleştirilerek daha dayanıklı ve işlevsel malzemeler elde etmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Modern kompozit malzemelerin gelişimi 20. yüzyılın başlarına dayanır (Roeseler et al., 2007). 1907'de kimyager Leo Baekeland, ilk sentetik plastik olan bakalit'i keşfetmiştir. Bakalit, fenol formaldehit reçinesiyle takviye edilmiş bir polimerdir. Dayanıklı ve yalıtkan bir malzeme olarak kullanılmıştır. Bu, kompozit malzemelerin gelişiminde önemli bir adımdır. 1930'lar ve 1940'larda, cam elyafının kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. İlk cam elyaf takviyeli kompozitler, uçak parçaları ve savaş gemileri gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Bu dönemde kompozit malzemelerin mukavemeti ve hafifliği nedeniyle askeri endüstrilerde büyük önem kazanmıştır. 1960'larda ise kompozit malzemelerin kullanımı genişlemiştir. Uzay endüstrisi, kompozit malzemelerin hafiflik ve dayanıklılık avantajlarından yararlanmaya başlamıştır. Uzay araçları ve uydu yapılarında kompozit malzemelerin kullanımı artmıştır. 1970'lerden itibaren otomotiv endüstrisi, yakıt tasarrufu sağlamak ve araç ağırlığını azaltmak amacıyla kompozit malzemeleri benimsemeye başlamıştır. Özellikle karbon elyaf takviyeli polimerler, performans otomobillerinde ve yarış araçlarında kullanılmaya başlanmıştır (Nagavally, 2017).

Son yıllarda, kompozit malzemelerin gelişimi ve kullanımı hızla ilerlemiş olup yeni matris malzemeleri, takviye malzemeleri ve üretim teknikleri ile kompozit malzemelerin mukavemeti ve işlenebilirliği artırılmış ve bu da daha geniş bir uygulama alanı yaratmıştır. Örneğin rüzgâr türbinleri, spor ekipmanları, inşaat malzemeleri, deniz araçları ve daha birçok alanda kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Literatür Özeti

Günümüzde, kompozit malzemelerin sürekli olarak araştırılıp geliştirildiği ve daha da yenilikçi uygulamaların ortaya çıktığı bir dönemdeyiz. Yeni teknolojiler ve malzeme bileşimleri, kompozit malzemelerin özelliklerini daha da iyileştirmekte ve farklı sektörlerde kullanımını artırmaktadır. Bu bağlamda literatürdeki çalışmalara bakıldığında farklı takviye elemanları kullanılarak yeni kompozit malzemeler üretilmiştir. Abenojar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyum/bor metal matrisli kompozitler (MMK) üretmişlerdir. Bor ağırlıkça oranı değiştirilerek (%10-50) izostatik presleme yöntemiyle üretilmiştir. Yaptıkları çalışma ile, sıcaklığın Bor ve alüminyumun reaktivitesi ve yeni fazların oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile yeni fazların oluşumu incelenmiş ve sinterleme sıcaklığı belirlenmiş, sıcaklığın Bor içeriğine bağlı olduğu bulunmuştur. Malzemeler yoğunluk ve mekanik özellikler (eğilme dayanımı ve sertlik testleri)

ile karakterize edilmiş ve beklendiği gibi Bor içeriği ile özelliklerde değişiklikler bulunmuştur (Abenojar et al., 2006). Chen ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise AA1100 matrisli, %25 ve %30 B₄C ile güçlendirilmiş iki kompozitin ortam ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri incelenmiştir. İki kompozitin 300 °C' deki termal kararlılığı yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Mikroyapısal özellikler ve farklı koşullarda çekme dayanımı incelenmiştir (X.-G. Chen et al., 2012). Başka bir çalışmada ise sıcak izostatik presleme ile Bor (B) takviyeli titanyum (Ti) matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Yüksek TiB hacim fraksiyonlarına sahip malzemelerde, ince partikül boyutlu Borür ve yüksek mukavemetli matrisin gevrekleşmeye neden olduğu belirtilmiştir. Ticari saflıkta, titanyum gibi daha düşük mukavemetli bir matris kullanımının ve daha kısa öğütme sürelerinin bu tür bir kompozit için daha iyi bir mukavemet, sertlik ve süneklik dengesi sağlayacağını göstermektedir (Godfrey et al., 2000).

Grafenin (GNP) bakır matrisli kompozitlere takviye olarak kullanılması üzerine yapılan son araştırmalar mevcuttur (F. Chen et al., 2016; Gao et al., 2016; W. Qu et al., 2022; Zhang & Zhan, 2016c). Bu çalışmalarda, bakır/grafen kompozitleri hazırlamak için kullanılabilecek çok sayıda işleme yönteminin yanı sıra üretilebilecek farklı mikro yapılar verilmiştir. Bakır/grafen kompozitlerin fonksiyonel özellikleri, elektriksel ve termal özellikleri, tribolojik ve korozyon davranışları incelenmiştir. Her durumda, grafen tipi ve içeriği ile işleme koşullarının etkisi de açıklanmaktadır. Son olarak, bakır/grafen kompozitlerin gelecekteki olası uygulamaları tartışılmaktadır (Hidalgo-Manrique et al., 2019).

Toz metalürjisi (T/M) yöntemiyle üretilen ve değişen miktarlarda (%0.9, %1.8, %2.7 ve %3.6 hacim) grafen partikülleri ile takviye edilen bakır-grafen metal matrisli kompozitlerin mikroyapısal, mekanik ve elektriksel özellikleri üzerinde sinterleme parametrelerinin ve grafen ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Sinterleme 900 °C'de %95N₂-%5H₂ (şekillendirici gaz) atmosferinde, geleneksel için 5°/dakika ve mikrodalga için 20°C/dakika ısıtma hızıyla ve her iki durumda da 60 dakika bekletme süresiyle gerçekleştirilmiştir. Tüm kompozitlerin mikrodalga alanıyla iyi bir şekilde birleştiği ve geleneksel işlemlerle karşılaştırıldığında işlem döngüsü süresinde %63'lük bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Mikro-yapısal analiz grafenin bakır matris içinde homojen dağılımını ortaya koymuştur. Bakır-grafen kompozitler, yüksek sertlik ve grafenin mükemmel yağlayıcı doğası nedeniyle mükemmel aşınma direnci sergilemiştir. Gözenekliliğin elektriksel iletkenlik değerleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir (Ayyappadas et al., 2017). Yapılan bu çalışmada, grafen içeriği ağırlıkça %1 ile %5 arasında değişen Cu/grafen nano tabaka kompozitleri sıcak presleme yöntemiyle 800 °C'de üretilmiştir. Kompozitlerin yüzey morfolojisi ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bağlı

yoğunluğun, grafen içeriğinin ağırlıkça %1'den ağırlıkça %5'e artmasıyla arttığı ve ağırlıkça %5'te en yüksek seviyeye (%96,68) ulaştığı bulunmuştur. Grafen içeriğinin artmasıyla, termal iletkenlik özelliği ve elektrik iletkenlik önce azalır ve daha sonra minimum termal iletkenlik ve elektrik iletkenliği ile ağırlıkça %3~ ağırlıkça %4'de artar (Wei et al., 2014). Yapılan bu çalışmada iyi tasarlanmış bir darbe profili ile basit, ölçeklenebilir ve ekonomik bir darbe ters elektrodepozisyon yöntemi ile çok sert Cu-Grafen kompozit folyoların sentezini incelemiştir. Darbe parametrelerinin ve akım yoğunluğunun optimizasyonu, saf Cu ile karşılaştırılabilir bir elektrik iletkenliği sergilerken ~2,5 GPa'lık yüksek bir sertlik ve ~137 GPa'lık artan bir elastik modül sergileyen, iyi dağılmış grafenli kompozit folyolar elde edilmiştir (Pavithra et al., 2014). Bu çalışmada, bakırın tane sınırını grafen ile 2 boyutlu eğrilige sabitlemek için bir strateji önerilmiş ve bu nedenle bakır-grafen kompoziti üretilmiştir. Cu-0,5 ağırlıkça % grafen (GNP) kompozitinin sertliğinin, oda sıcaklığı ile 450 °C arasında Cu-0,5 ağırlıkça % grafit (Gr) kompozitinin sertliği ile neredeyse aynı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, Cu-GNP kompozitinin sertliği 450 °C'nin üzerinde önemli ölçüde artar ve 600 °C'de Cu-Gr kompozitinin yaklaşık iki katıdır, bu da grafenin yüksek sıcaklıklarda tane sınırı boyunca atom difüzyonu üzerindeki engelleme etkisini gösterdiğinin bir işaretidir (X. Wang et al., 2016).

Diğer bir çalışmada ise, bakırın ısı iletkenliğini artırmak amacıyla tek katmanlı ve çok katmanlı grafen uygulamalarının incelendiği bir araştırmayı sunmaktadır. Yapılan sayısal simülasyonlar ve analizler, çeşitli kompozit yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir, bu yapılar bakır matrisli kompozitleri temsil etmektedir. Çalışmada, grafen uygulamalarının potansiyelleri ve sınırlamaları ortaya konmuş, yapısal parametrelerin, özellikle çok katmanlı bölgelerin hacim oranı, boyutları, yönelimleri ve uzamsal dağılımlarının, metal matrisli kompozitlerin termal iletkenliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tek katmanlı grafenin bakır matrisli kompozitlerin termal iletkenliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabileceğini öngörmektedir (Wejrzanowski et al., 2016). Khopragade ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada Grafen takviyeli Cu kompozitler, iki aşamalı ısı işlem tekniği kullanılarak hazırlanmış ve bu malzemelerin elektriksel ve mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sinterlenmiş malzemelerin mikroyapıları, FESEM (alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop) ile incelenmiş ve Grafenin Cu matrisi içinde homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Aşınma testi sonuçları, bakır matris içindeki Grafen içeriğinin artmasıyla aşınma derinliğinde bir azalmaya işaret etmektedir. Bu bulgular, Grafen takviyeli Cu bazlı kompozitlerin aşınma direncini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Khopragade et al., 2017). Bu gümüş/indirgenmiş grafen oksit (Ag-rGO), bakır matrisli kompozitler için takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Ag-RGO'nun

entegrasyonu, bilyalı öğütme ve farklı basınçlarda sıcak pres sinterleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ag-RGO/Cu kompozitlerinin, mükemmel mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahip olduğu belirlenmiş ve Ag-RGO hibritinin, Cu matris kompozitlerini imal etmek için etkili bir takviye malzemesi olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, Ag-RGO'nun, bakır matrisli kompozitlerin performansını artırmak için başarılı bir şekilde kullanılabileceğini vurgulamaktadır (Luo et al., 2017).

Jiang ve arkadaşları ise grafen nano tabakalarının metal matrisler üzerinde önemli bir güçlendirme etkisine sahip olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, bakır matris içinde güçlendirici bir bileşen olarak Ni ile kaplanmış grafen hazırlamak için yeni bir elektriksiz kaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Grafen levhalar üzerinde Ni nanopartiküllerinin etkili bir şekilde dağılması, grafen ve bakır arasındaki arayüzey uyumluluğunu artırmıştır. Akımsız kaplamalı grafen-bakır kompozit, saf bakıra kıyasla daha yüksek bir mukavemete sahiptir. Ayrıca, üstün süneklik, uzama ve elektrik iletkenliğini koruyarak çeşitli avantajlar sunmaktadır (Jiang et al., 2017). Zhang ve arkadaşları çalışmalarında grafen nanoplatelet (GNP)-bakır kompozitleri üretmek için modifiye edilmiş bir yarı toz yöntemini benimsemişlerdir. GNP'lerin ıslanabilirliğini artırmak amacıyla, yarı toz karıştırma işleminden önce GNP'lerin yüzeyine akımsız Cu ve Ni kaplaması yapılmıştır. Bu kaplama işlemi sonucunda GNP'lerin ana yapısı korunmuştur. Mikroyapı çalışmaları, %0,5 vol'luk bakır kaplamalı ve nikel kaplamalı GNP'lerin (Cu-GNP'ler ve Ni-GNP'ler) her ikisinin de düzgün bir şekilde dağıldığını ve Cu matrisi ile iyi bir şekilde bağlandığını göstermiştir. Bu çalışmada, tane inceltme, termal uyumsuzluk ve yük transferi de dahil olmak üzere güçlendirme mekanizmaları detaylı bir şekilde tartışılmıştır (Zhang & Zhan, 2016b). Yapılan başka bir çalışmada ise rastgele dağılmış grafen içeren grafen/metal kompozitlerin izotropik mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelendi. Ancak, hizalanmış grafen/metal kompozitlerin hem düzlem içi hem de düzlemler arası yönlerdeki anizotropik mekanik özellikleri henüz rapor edilmemiştir. Bu bağlamda, grafen nanoplateletleri (GNP'ler) Cu matris içinde vakum filtreleme yöntemi kullanılarak hizalanmaya ve ardından kıvılcım plazma sinterleme yoluyla işlenmeye çalışıldı. Elde edilen sonuçlar, kompozitlerde oldukça iyi bir GNP hizalamasının sağlandığını ve bunun düzlem içi gerilme mukavemeti ile uzamanın düzlemler arası olanlardan önemli ölçüde daha iyi performans göstermesiyle belirgin anizotropik mekanik özelliklere yol açtığını gösterdi (Chu, Wang, Wang, & Huang, 2018).

Grafen, taban düzlemi boyunca ultra yüksek bir termal iletkenliğe (TC) sahiptir. Bununla birlikte, grafen/metal kompozitlerin TC'si, öncelikle metal matris içinde yeterli

grafen hizalanmasının olmaması nedeniyle hala beklentinin çok altındadır. Yapılan çalışmada, yüksek oranda hizalanmış grafen nanoplateletlere (GNP'ler) sahip grafen nanoplatelet (GNP)/Cu kompozitlerinin hazırlanması için etkili bir yol olan vakum filtrasyon yöntemi ve ardından kıvılcım plazma sinterleme stratejisi rapor edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, yüksek oranda hizalanmış bir grafen ağı oluşturma, grafen/metal kompozitlerde dikkate değer düzlem içi TC artışına neden olabileceğini göstermiş ve elde edilen kompozitlerin özellikle elektronik ambalajlarda verimli yönlü ısı transferi gerektiren uygulamalarda potansiyel bir kullanım alanına sahip olduğunu vurgulamıştır (Chu, Wang, Wang, Li, et al., 2018). Diğer bir çalışmada ise bakır/grafen nanoplatelet (GNP) nanokompozitleri, ıslak karıştırma yöntemi ve ardından toz metalürjisi tekniği kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra, iki farklı son işlem tekniği olan bastırarak tavlama ve sıcak izostatik preslemenin (HIP) nanokompozitlerin yoğunluğu, arayüzey bağı, sertliği ve termal ile elektriksel iletkenliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Yoğunluk değerlendirmeleri, numunelerin bağıl yoğunluğunun işlem sonrası adımlardan sonra arttığını, böylece HIP işleminden sonra neredeyse tam yoğunlaşma elde edildiğini göstermiştir. Elektriksel iletkenlik ölçümleri ise grafen içeriğinin artmasıyla birlikte elektriksel iletkenliğin azaldığını göstermiştir (Saboori et al., 2018).

Yue ve arkadaşları çalışmalarında grafen nano tabakaları (GNSs) takviyeli saf bakır matrisli kompozitleri bilyalı öğütme ve sıcak pres sinterleme yöntemleriyle hazırlamışlardır. GNSs-Cu tozlarının morfolojileri ve yapıları, farklı sürelerde bilyalı öğütme sonrasında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, GNSs içeriğinin kompozitlerin mikroyapıları, mekanik özellikleri ve kırılma mekanizmaları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Yapılan çalışma, kompozitlerin kırılma mekanizmasının süneklikten gevrekliğe doğru bir değişim gösterdiğini ortaya koymuştur (Yue et al., 2017). Ponraj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bakır (Cu)/Grafen Nano Levha (GNS) kompozitlerini toz metalürjisi tekniği kullanarak hazırlamışlardır. Bu yöntemle GNS'nin, Cu ile homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Basınç geriliminde %0,2 GNS ile mükemmel bir artış elde edilmiştir ki bu, saf Cu ile karşılaştırıldığında %10'dan fazladır. Cu/GNS kompozitin SEM çalışmaları, GNS'nin kompozit üzerinde iyi bir bağlanma ve homojen dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır (Ponraj, Azhagurajan, et al., 2017).

Qu ve arkadaşları bu çalışmada bu çalışmada grafen nano tabakalar (GNS)/bakır kompozitini kıvılcım plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle hazırlamışlardır. Sinterlenmiş kompozitin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Termal iletkenlik ve elektriksel özdirenç özellikleri lazer flaş aparatı ve fiziksel özellik ölçüm sistemi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen GNS/bakır kompoziti katmanlı bir

yapı göstermektedir. SPS ile hazırlanan GNS/bakır kompoziti termal iletkenlik ve elektriksel özdirenç anizotropisine sahiptir (D. Qu et al., 2014).

Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı miktarlarda grafen nano tabakaları (GNSs) içeren sıcak preslenmiş bakır bazlı kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini, aynı yöntemle üretilen bakır-grafit (Gr) kompozitlerinkilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, Cu-GNSs kompozitlerinin, GNSs ve Gr'nin aynı hacim oranına sahip Cu-Gr kompozitlerine kıyasla daha yüksek mikrosertliğe, bağlı yoğunluğa ve eğilme mukavemetine sahip olduğunu gösterir. Ayrıca, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları GNSs ilavesiyle önemli ölçüde azalırken, sürtünme ve aşınmayı azaltma üzerindeki sınırlı etki grafit üzerinde bulunmuştur (J. Li et al., 2015).

Ponraj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada grafen nanotabakanın (GNS) etkili bir şekilde dağılımı için çeşitli morfolojide Bakır (Cu) tozlarıyla çalışmışlardır. Cu tozlarının morfolojisini değiştirmek için yüksek enerjili öğütme kullanılmıştır; bu çalışmada küresel ve dentrik şekilli Cu tozu kullanılmıştır. Her iki toz da yüksek enerjili öğütme ile sırasıyla 8 saat ve 16 saat boyunca öğütülmüştür. Cu tozlarının morfolojisi, öğütme sonrasında pul şeklinde değişmiştir. GNS (ağırlıkça %2), matris olarak kullanılan çeşitli morfolojideki Cu tozu ile eşit oranda takviye olarak eklenmiştir. Matris olarak kullanılan Cu'un boyut ve şeklinin Cu/GNS kompozit özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Cu matris kompozitin sertliği, saf Cu'ya kıyasla %20'ye kadar iyileşmiştir. Böylece Cu morfolojisi, GNS takviyesi ile mekanik özellikleri geliştirme yeteneğine sahiptir (Ponraj, Vettivel, et al., 2017).

Kambaj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yumuşak çelik üzerine elektrodpoze edilmiş Cu-grafen kompozit kaplamaların morfolojisi, dokusu ve korozyon davranışını tartışmışlardır. Bu çalışma, grafenin uygun bir metal matrisine dahil edildiği bir metal-grafen kompozit kaplamanın, çelik gibi korozyona eğilimli malzemeler için anti-korozif kaplamalar üretmede grafenin anti-korozif potansiyelini kullanmanın etkili bir yol olduğunu göstermektedir. Kompozit kaplamaların gelişmiş korozyon direnci, dahil edilen grafen miktarı ile artan korozyon potansiyeli ile gösterilmiştir (Kamboj et al., 2017).

Maharana ve arkadaşları, tribomekanik ve elektriksel özelliklere sahip elektrodpoze grafen oksit (GO) takviyeli bakır kompozit kaplamanın detaylandırılması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Grafen oksit, farklı konsantrasyonlarda (0.1, 0.5 ve 1 g/L) bakır matrisine dahil edilmiştir. Mekanik ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi, homojen dağılımın neden olduğu dağılım sertleşmesi ile gözlemlenmiştir. Cu-TRGO kompozit kaplama, GO ve RGO takviyeli kompozit kaplamalara kıyasla mükemmel elektrik iletkenliği göstermektedir, çünkü

termal indirgeme işlemi oksijen içeren grupların uzaklaştırılmasına neden olmuştur. (Maharana et al., 2017).

Aslan ve arkadaşları sert doku biyomedikal uygulamaları için gözenekli-Ti6Al4V (P-Ti6Al4V) alaşımlarını üretmek için sıcak presleme ve ara parça yöntemlerini kullanmışlardır. Elde edilen gözenekli yapılar SEM, XRD ve EDS ile karakterize edilmiştir. Sıkıştırma testleri yapılarak mukavemet ve elastik modül değerlendirilmiştir. Elde edilen yoğunluk ve mekanik özellik değerleri, özellikle elastik modül, insan kemiğine yakın değerlere sahiptir ve biyomedikal uygulamalar için kabul edilebilir aralıklarda bulunmaktadır. Ayrıca, üretilen P-Ti6Al4V'nin analizinden, homojen ve birbirine bağlı açık gözeneklerin oluşumuna katkıda bulunan mekanik anizotropiden makro gözeneklerin sorumlu olduğu anlaşılmıştır (Aslan et al., 2021).

Ozay ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, yaptıkları çalışmada AA-2024 alaşımının yüzeyini sıcak pres sinterleme yöntemi kullanarak güçlendirilmiş bir kompozit kaplama ile kaplamışlardır. Al ve B4C tozları mekanik alaşımlama tekniği ile sentezlenmiş ve farklı oranlarda AA-2024 substratına kaplanmıştır. Substrat (AA-2024 Al alaşımı) ile kaplama tabakası (Al/B4C MMK'ler) arasında oluşan ara geçiş bölgesinin mikro yapısı, Al/B4C metal matris kompozitler (MMK'ler) kaplamanın mikro yapısı, mikrosertlik ve yapıştırıcı Al/B4C MMK'lerin kaplama tabakasının aşınma direnci incelenmiştir. Buna göre, B4C takviye tane oranı arttıkça kaplama tabakasının sertliğinin ve aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir (Ozay et al., 2021).

Sobhani ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, güç metalürjisi sıcak izostatik presleme (PM-HIP) ile karmaşık geometrilere sahip net şekillibileşenler üretebilen bir üretim tekniğini incelemişlerdir. Ancak, süreç ve sonuç sağlamlığı, kullanılan kapsülün (kalıp veya kutu olarak da bilinir) geometrik tasarımına son derece duyarlıdır. Bu bağlamda, çalışmada HIP sürecinin güçlü bir sonlu eleman analizi (FEA) modeli geliştirilmiştir. FEA tabanlı optimizasyon algoritması, HIP analizleri ile doğrulanmış ve yapılan analiz ile model arasında mükemmel bir uyum olduğu görülmüştür (Sobhani et al., 2023).

Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sıcak pres sinterleme yöntemiyle yeni bir Cu/AlMgB14 kompoziti hazırlanmıştır. AlMgB14 içeriği ve sinterleme sıcaklığına göre deiyonize su ve sıvı parafin ortamlarında tribolojik tepkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, saf bakırın aşınma direnci, her iki ortama da AlMgB14 eklenerek önemli ölçüde arttırılmıştır. Ayrıca, daha düşük sinterleme sıcaklığında sinterlenen Cu/AlMgB14 kompozitleri, gözeneklilik nedeniyle AlMgB14 içeriğinden bağımsız olarak daha iyi yağlama gösterirken, daha yüksek sıcaklıkta sinterlenenler, artan AlMgB14 içeriği ile birlikte giderek

iyileşen sertlik nedeniyle kademeli olarak artan aşınma direnci sergilemiştir (J. Chen et al., 2019).

Dogan ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, farklı öğütme sürelerinin (1, 2, 4 ve 8 saat) çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) takviyeli Al7075 kompozit tozlarının yapısal, morfolojik ve kristalografik özellikleri incelenmiştir. Partikül boyutu analizörü, Raman spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilen karakterizasyon sonuçlarına göre, MWCNT'ler öğütme süresi arttıkça kademeli olarak dağılmış ve matris içine gömülmüştür (Dogan et al., 2022).

Mahesh ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüplerle güçlendirilmiş bakır nanokompozitlerin (MWCNTs/Cu) imalat sürecinin aşınma ve sertlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için iki parametrelili Weibull dağılımı istatistiksel yöntemini kullanmışlardır. İstatistiksel analiz, MWCNT'lerin Cu'nun aşınma hızı üzerindeki katkısının, daha düşük kayma hızında daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sertlik ve aşınma testlerinin hem teorik hem de deneysel sonuçlarının iyi bir korelasyon gösterdiği istatistiksel analizden de anlaşılmıştır (Mahesh et al., 2022).

Tezin Literatürdeki Yeri ve Önemi

Yukarıda verilen literatür çalışmaları sonucunda Cu'nun farklı malzemelerle birleştirildiği ancak bu çalışmadaki gibi hibrit ve fonksiyonel bir karışımın yapılmadığı görülmüştür. Bu sebepler göz önüne alındığında literatüre yeni bir malzeme kazandırılması amacıyla bu tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada Cu matrisine takviye edilen Cr, B, B₄C, CNT ve Gr ayrı ayrı spesifik özelliklerinin Cu tozu üzerindeki mekanik ve tribolojik etkileri incelenmiştir. Ayrıca plastik deformasyonu da incelenmiştir. Bu tozların soğuk preslenmesi ve sinterlenmesi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanma işlemi tamamlanan kompozit numunelerin mikroyapısal özellikleri, sertlik, aşınma ve korozyon analizleri incelenerek üretilen yeni kompozit malzemenin elde edilen bütün sonuçlar literatüre kazandırılmıştır. Üretilen bu alternatif hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerinin iyileştirilerek endüstriyel uygulama alanlarının genişletilmesi hedeflenmiştir. Üretmiş olduğumuz bu kompozit malzemeler ile birlikte ilerleyen dönemlerde de daha farklı kompozitlerin üretiminin savunma ve otomotiv sanayisinde çok daha yaygın bir şekilde kullanım alanları bulacağını düşünmekteyiz.

KURAMSAL TEMELLER

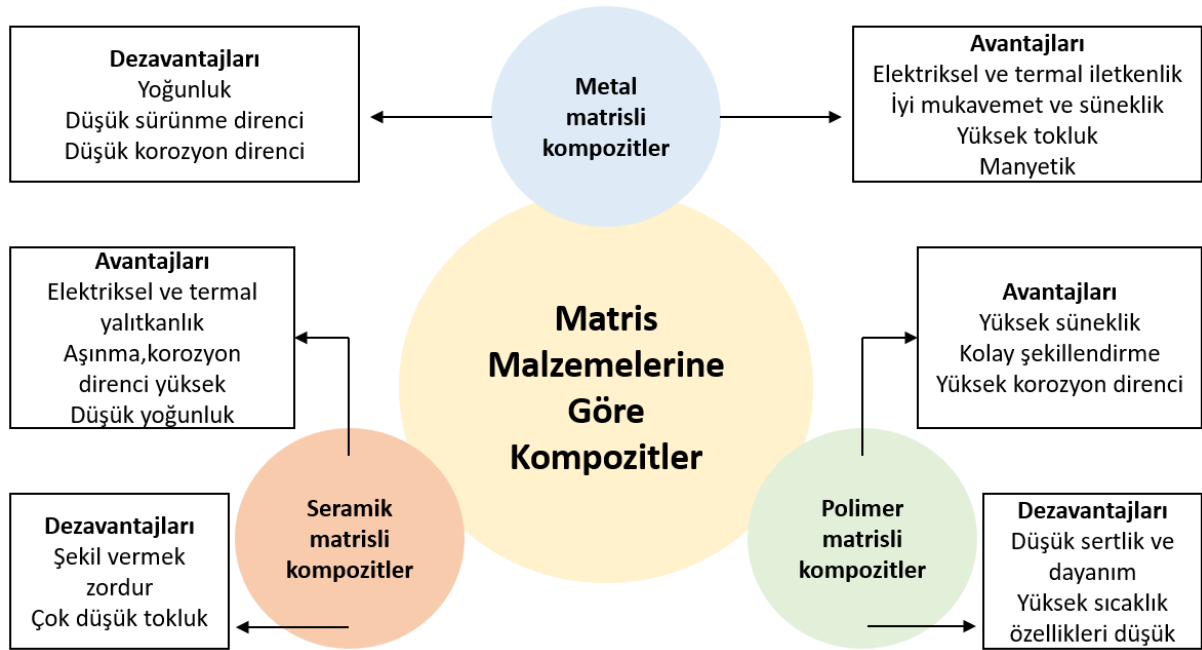
Kompozit Malzeme

İki veya daha fazla malzemenin özelliklerini birleştirerek veya yeni bir özellik elde etmek amacıyla makro düzeyde heterojen bir karışım ile oluşturulan malzemeye kompozit malzeme adı verilir. İstenen özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kompozit yapılar oluşturulur; aşınma direnci, korozyon direnci, yorulma direnci, kırılma direnci, yüksek sıcaklık özellikleri, termal ve elektriksel iletkenlik, sertlik ve maliyet olabilir. Bu özelliklerin hepsi herhangi bir kompozit malzemede bulunamaz. Bu nedenle bileşen malzemesi, özelliklerin iyileştirilmesi istenen alana göre yapılır (Ulçay et al., n.d.). Kompozitlerin genel özelliklerine bakacak olursak: Polimer bileşiklerinin yoğunluğu genellikle $1,5-2 \text{ gr/cm}^3$ civarındadır. Metal bileşiklerinin yoğunluğu $2,5-4,5 \text{ g/cm}^3$ olmasına rağmen numuneler arasında farklılıklar görülebilmektedir. Bunlar arasında seramik bileşikleri de bulunmaktadır. Ancak polimer kompozitler diğerlerine göre daha hafiftir. Yüksek mekanik özellikleri nedeniyle basma, çekme, darbe ve yorulma mukavemetleri çok yüksektir. Yüksek ısı direncine ve nispeten düşük genleşme katsayılarına sahiptirler; bu da sert, sağlam bir yapıya ve yüksek boyutsal stabiliteye işaret eder. Kompozit malzemelerin kimyasal direnci yüksektir. Asitlere, bazlara, dış koşullara ve solventlere karşı dayanıklıdır. Elektriksel özelliklerin seçici olarak ayarlanabildiği belirtilmiştir (Hsissou et al., 2021). Genel olarak, kompozit malzemeler metal esaslı, polimer esaslı ve seramik esaslı olmak üzere anayapının fiziksel ve kimyasal yapısına göre üç ana gruba ayrılır (Tablo 1) (Campbell, 2010).

Tablo 1. Matris, Takviye Elemanı ve Kompozit Yapı Tipleri

Matris Malzemeleri	Takviye Elemanları	Kompozit Yapının Şekli
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Lifler	Film-Folye
Polimerler	Yonga	Filament Sarılmış Yapılar
	Whiskers	Honey-Combs
	Pudra	Tabakalar

Matris malzemelerine göre kompozitler Şekil 1’de gösterilmiştir (Mortensen & Llorca, 2010).



Şekil 1. Matris malzemelerine göre kompozitler

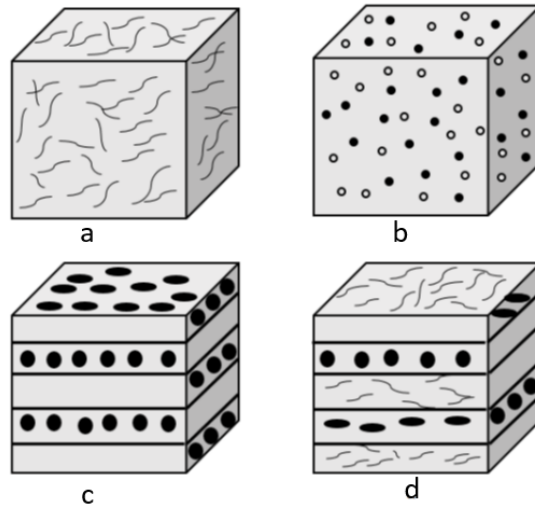
Metal matrisli kompozitler (MMK), yüksek çekme ve basma gerilmesi, yüksek elastik modülü ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme özelliklerine sahiptir. Bu malzemeler, metallerin tokluğunu ve sünekliğini seramiklerin yüksek elastikiyeti ve mukavemeti ile birleştirerek önemli mühendislik malzemelerine dönüşmüşlerdir. MMK üretiminde genellikle hafif metaller matris malzemesi olarak kullanılsa da, tercih edilen matris malzemeleri arasında çoğunlukla alüminyum ve alaşımları bulunmaktadır. Bu alaşımların tercih edilmesinin nedeni yoğunluğun düşük olması, erime noktasının düşük olması ve birçok seramik takviye elemanını kolaylıkla ıslatabilmesidir (Mortensen & Llorca, 2010).

Polimer matrisli kompozitlerin (PMK) üretim yöntemleri, diğer kompozit malzemelerin üretiminden daha ucuz ve basit olduğu için geniş bir uygulama alanına sahiptir. PMK'lerde matris malzemesi olarak genellikle epoksi ve polyester gibi malzemeler, ayrıca termoplastik polyester, polietilen (PE), politetrafloroetilen (PTFE) ve poliamid (PA) gibi termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise genellikle cam, karbon, aramid, polietilen, alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor gibi malzemeler kullanılmaktadır (Shalin, 2012). Seramik matrisli kompozitler (CMK), yüksek sıcaklıklara dayanabilmeleri ve hafif olmaları nedeniyle oldukça kullanışlıdır. Yüksek sıcaklıklarda çalışması gereken parçalarda sıklıkla seramik bazlı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Seramik malzemeler genellikle sert ve kırılgan özelliklere sahiptir, bu nedenle düşük dayanım ve sünekliğe eğilimlidirler. Bu dezavantajları aşmak için genellikle liflerle takviye edilirler.

Aynı zamanda, seramik malzemeler çok yüksek elastikiyet katsayısına, düşük yoğunluğa ve çok yüksek çalışma sıcaklığına sahiptirler. Seramik bileşikleri çok yüksek sıcaklıklara dayanabilir, sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir (Bansal & Lamon, 2014).

Kompozitler genellikle ana yapı içerisinde dağılmış farklı takviye fazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir sistemdir.

Kompozit bir yapıda, matris ve takviye fazlarının birbirine karışmaması önemlidir. Ancak çok düşük çözünürlük durumu, matris ile takviye fazı arasında güçlü bir bağın oluşmasını olumlu yönde etkileyebilir. Matris malzemesinin temel işlevi, takviye malzemelerini bir arada tutarak kompozit malzemenin biçimsel bütünlüğünü korumaktır. Takviye malzemesi ise matris malzemesinin istenen özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılır (Telichenko et al., 2018). Kompozit malzemeler takviye elemanlarının şekil ve yerleştirilmesine göre Şekil 2’ de gösterilmiştir (El Moumen et al., 2015).



Şekil 2. a) Elyafli, b) Parçacıklı, c) Tabakalı ve d) Karma kompozitlerin şekli

Fiber takviyeli kompozitler, ince fiberlerin bir matris yapısında birleştirilmesiyle oluşturulan tek katmanlı kompozitlerdir. Liflerin matris içindeki düzeni, kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen önemli bir faktördür (Bunsell et al., 2021). Parçacıklı kompozitler ise matris malzemesinde başka bir malzemenin parçacıklarının bulunması sonucu elde edilir ve izotropik davranış gösterirler. Yapının gücü, parçacıkların sertliğine bağlıdır. Bu tür kompozitlerin en yaygın örneği, plastik bir matris içine gömülü metal parçacıklarını içeren kompozitlerdir (German, 2016). Tabakalı kompozit yapılar, farklı elyaf yönelimlerine sahip katmanların birleştirilmesiyle oluşturulan ve çok yüksek mukavemet değerlerine sahip olan malzemelerdir. Aynı zamanda, neme ve ısıya dayanıklı yapılarıyla dikkat çekerler. Bu tür kompozitler, hafif ve yüksek mukavemetli olmaları nedeniyle metallere kıyasla tercih edilen malzemeler arasında yer alır (Kažys et al., 2006) Tabakalı kompozit yapılar, farklı elyaf

yönelimlerine sahip katmanların birleştirilmesiyle oluşturuldukları için özellikle çok yönlüdür. Yüksek mukavemet, neme ve ısıya karşı direnç gibi özellikler, bu kompozit malzemelerin birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, hafif olmaları, özellikle metal kullanımının yerine geçmeleri için ek bir avantaj sağlar (Safri et al., 2018).

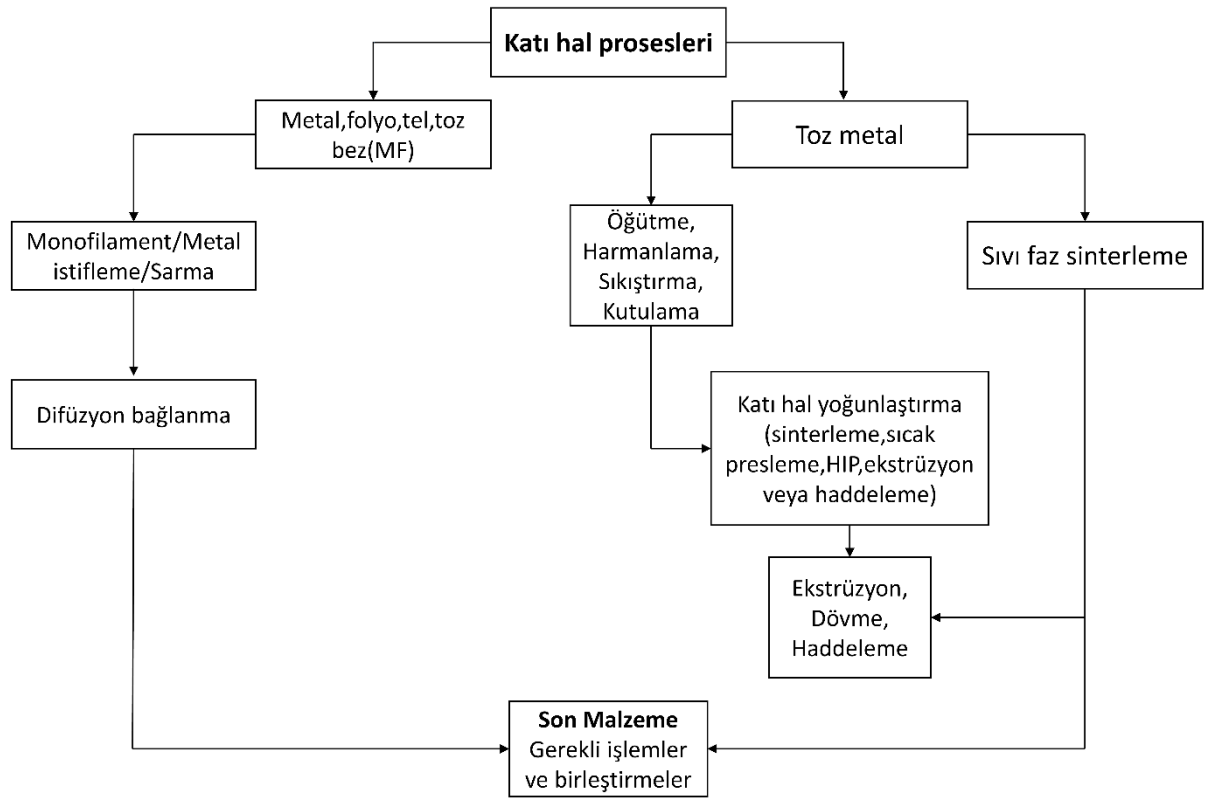
Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

MMK süreçleri en az iki aşamada gerçekleşir; birincil işlemler olarak adlandırılan konsolidasyon veya sentez (matrise takviye eklenmesi), ardından ikincil işlemler olan şekillendirme işlemleri gelir.

Ana işlemler, bir kompozit oluşturmak için matris ve takviye malzemesinin bir araya getirilmesidir (örneğin, seramik parçacıklarla toz haline getirilmiş metal veya fiber ön kalıplı erimiş metal). Bu aşamada malzemeye nihai bir şekil veya mikro yapı verilemez. Birincil işlemten sonra bileşime uygulanan çeşitli işlemler ikincil işlemler olarak tanımlanır; malzemenin oluşma ve mikro yapının oluşma aşamaları; döküm, dövme, ekstrüzyon, ısıtma işlemi gibi. Kompozit bileşenler (faz, şekil) ikincil işlemlerle değiştirilebilir. Parçacık takviyeli MMK (P), kısa elyaf takviyeli MMK (SF), sürekli elyaf takviyeli MMK (CF) ve monofilament MMK üretiminde farklı sıvı, katı ve gaz fazında prosesler (kaplama) kullanılmaktadır. (MF); Proseslerde ön arıtma sırasını genellikle sentetik imalat, tasarım ve nihai ürün takip eder. Metal matrisli kompozitlere yönelik üretim işlemleri üç gruba ayrılabilir: katı hal işlemleri, sıvı faz işlemleri ve gaz fazı işlemleri (veya biriktirme işlemleri).

Katı hal prosesleri

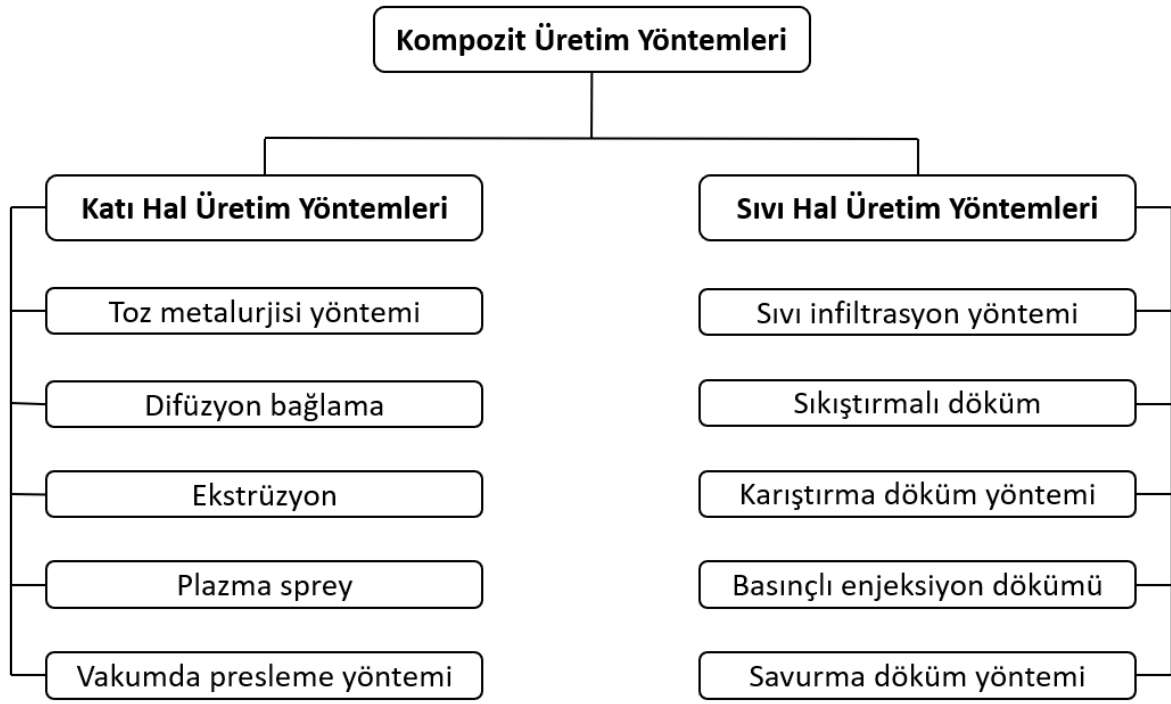
Katı faz prosesleri, toz malzemelerin (matris ve takviye) karıştırılıp çeşitli aşamalardan geçirilmesiyle istenilen kompakt katıların (P), kısa elyafların (SF), sürekli elyafların (CF) ve monofilament (MF) takviyeli MMK'lerin elde edilmesi için kullanılan işlemlerdir. Katı hal prosesleri kullanılarak metal matrisli kompozitlerin üretiminde, metal matris ve dağılmış faz (takviye) birlikte difüzyonla bağlanır. İşlem uygun sıcaklık ve basınçta katı halde gerçekleştirilir. Proses sıcaklığının çok yüksek tutulması (sıvı MMK'lerin üretimiyle karşılaştırıldığında), matris ve takviye fazlar arasındaki arayüzde istenmeyen reaksiyonları azaltır veya önler. Metal matrisli kompozitler ayrıca haddelme, dövme, presleme, çekme veya ekstrüzyon gibi sinterleme işlemlerinden sonra da deforme olabilir. Deformasyon süreci soğuk (yeniden kristalleşme sıcaklığının altında) veya sıcak (yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde) olabilir. Genel bir katı hal proses akış şeması Şekil 3'te gösterilmektedir (Deniz, 2005).



Şekil 3. Katı hal metal matris kompozit malzeme akış şeması

Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin, geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özellikler sergilemesi, son yıllarda bu malzemelerin üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Buna rağmen, bu malzemelerin üretim maliyetleri hala yüksek değerlerdedir. Metal matrisli bir kompozit malzemenin üretim tekniği; üretilen parçanın şekline, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matrise, takviye elemanı şekli ve türüne göre belirlenir. Her üretim yönteminin kendine özgü avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Ancak tüm kompozit üretim yöntemleri, geleneksel malzeme üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında matris ve takviye fazı arasındaki etkileşimler nedeniyle karmaşıklığıyla dikkat çekmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri Şekil 4’de gösterilmiştir (Gofrey et al., 2000).



Şekil 4. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Bir imalat yöntemi seçerken, üretilen ürünün veya yarı mamulün önceden belirlenmiş fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilir ve yöntemin belirlenmesinde aşağıdaki parametreler dikkate alınır:

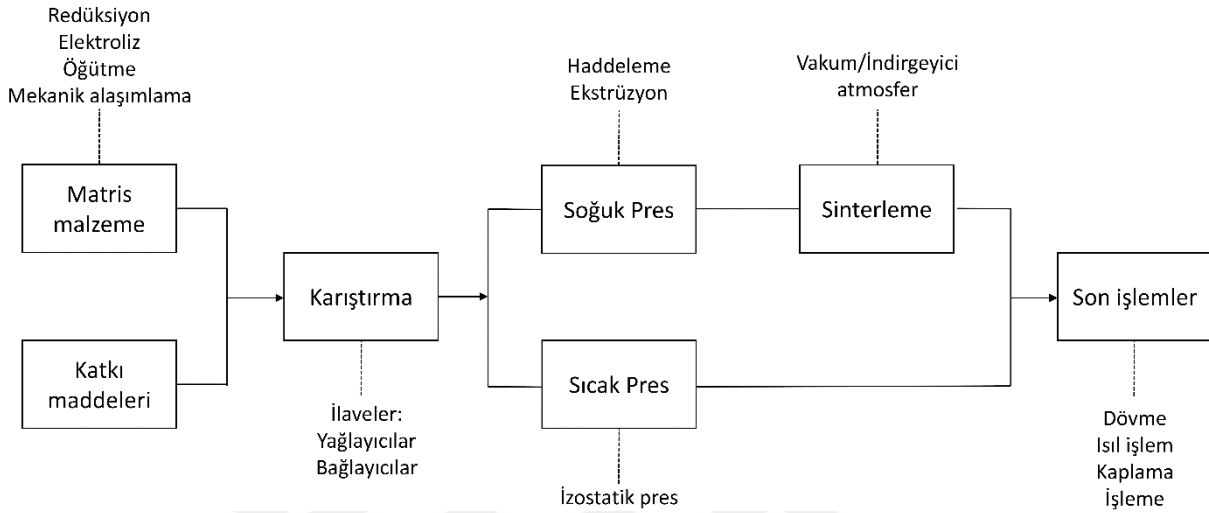
- Çalışma sıcaklığı aralığı
- Takviye malzemesi şekli
- Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumluluğu
- Matris ve takviye malzemelerinin ek işlem gereksinimi
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında oluşabilecek reaksiyonlar
- Elde edilecek üründen istenen boyut tamlığı
- Takviyenin matris malzemesi içerisinde homojen dağılımı
- Matris-takviye ara yüzey bağının tam olarak sağlanabilmesi (Kaczmar et al., 2000).

Toz Metalürjisi

Toz metalürjisi (T/M), metal ve seramik tozlarını yüksek basınç ve sıcaklık kullanarak katı ve dayanıklı parçalara dönüştürme yöntemidir. Bu yöntem, çok küçük partiküllerin birbirine bağlanarak katı veya gözenekli bir malzemeye dönüştürülmesi işlemidir. Tamamlanan İşlemler; Esas olarak toz malzemelerin preslenmesi ve ardından yüksek sıcaklıkta sinterleme yoluyla küçük boyutlu parçalar üretilir. İnce parçacıklar halindeki saf metaller, metal alaşımları, karbon, seramik ve plastik malzemeler karıştırılarak basınç altında kalıplanır. Bu parçalar daha sonra ana bileşenin erime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta

sinterlenir, partiküllerin temas yüzeyleri arasında güçlü bir bağ oluşturulur ve böylece istenen özellikler elde edilir.

Toz metalürjisi yönteminde metal matris ve takviye tozları karıştırılır. Karıştırılan partiküller sıcak veya soğuk pres yardımıyla preslenir. Daha sonra sinterleme işlemi yapılır. Toz metalürjisi aşamaları Şekil 5’de gösterilmiştir (Tomac et al., 1992).



Şekil 5. Toz metalürjisi aşamaları

Toz metalürjisi (T/M) tekniği, hassas boyut kontrolü veya yüksek mekanik özelliklerin önem taşıdığı parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Toz metalürjisi (P/M) teknolojisi, hassas boyut kontrolünün veya yüksek mekanik özelliklerin önemli olduğu parçaları üretmek için kullanılır. Döküm özelliklerinin zayıf olduğu veya döküm sıcaklıklarının çok yüksek olduğu, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesinin mümkün olmadığı parçaların üretiminde kullanılabilir. Bu nedenle T/M yöntemi döküm yöntemine göre daha ucuzdur (Novák, 2020).

Günümüzde, havacılık ve otomotiv gibi yüksek teknoloji alanlarında kullanılmak üzere daha hafif ve üstün özelliklere sahip yeni malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. Mukavemet/ağırlık ve mukavemet/yoğunluk oranları gibi malzeme özellikleri, özellikle havacılık ve otomotiv gibi basınca duyarlı alanlarda kullanılan malzemelerin performansını belirler. Bu nedenle, malzeme mukavemet sınırlarını aşmak ve daha etkili malzemeler elde etmek için çeşitli malzemeler takviye edilerek özelliklerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır (Kažys et al., 2006). Mükemmel özelliklerine rağmen kompozit malzemelerin kullanımı, üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle istenilen endüstriyel seviyeye ulaşamamıştır. Ancak son birkaç yıldaki gelişmelere bakıldığında bu malzemelerin kullanımının hızla yaygınlaştığı ve bu miktarın giderek arttığı ifade edilebilir (Safri et al., 2018).

Soğuk presleme

Geleneksel toz metalürjisinin bir diğer adımı ise preslemedir. Presleme genellikle soğuk, sıcak ve bunların izostatik özellikli olanlarını kapsamaktadır. Mekanik veya soğuk presleme, yaygın olarak kullanılan prosestir. Bu proses, daha çok tozların oda şartlarında bir kalıp yardımıyla preslenmesi ve atmosfer kontrollü fırında sinterlenmesi (yüksek vakum veya yüksek saflıkta inert Ar gazı altında) olarak açıklanabilir. Tez çalışmamızda matris malzemesi olarak bakır (Cu) kullanılmıştır. Bakır bazlı kompozitler yüksek elektrik iletkenliği, çok iyi korozyon direnci ve kolay işlenebilme özellikleri nedeniyle birçok endüstride ümit verici bir kompozit malzeme haline gelmiştir (Shalin, 2012).

Bakır matrisli kompozitler; Bakır bazlı alaşımlar, daha düşük ağırlığa sahip olan Al ve Mg alaşımlarına göre yorulmaya, aşınmaya ve yıpranmaya karşı daha dayanıklıdır. Çoğu bakır alaşımı yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe, iyi kimyasal stabiliteye, yüksek aşınma ve korozyon direncine sahiptir (Ayyappadas et al., 2017). Bu yüzden son yıllarda bakır (Cu) grafen kompozitleri hakkında araştırmalar yapılmıştır. Bakır-grafen-matris kompozitleri yapılarak çok iyi ısı/elektriksel iletkenliğe ve dayanıklılığa sahip, mekanik özellikleri geliştirilmiş bir malzeme oluşturulur. Otomotiv endüstrisinde, kimya endüstrisinde, silah endüstrisinde, soğutma sistemlerinde radyatör ve borular gibi birçok parçada yaygın olarak kullanılmaktadır (Bansal & Lamon, 2014).

Bakır ve alaşımları, mükemmel termal ve elektriksel iletkenlikleri ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle mühendislik uygulamalarında yapısal malzemeler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Hwang et al., 2013; Jagannadham, 2013; Xie et al., 2014). Özellikle yüksek sıcaklıklarda kullanımlarını büyük ölçüde sınırlayan nispeten zayıf mekanik özellikler sergilerler. Makine, elektronik, ulaşım ve diğer endüstrilerdeki hızlı gelişmeler, hem mükemmel iletken özelliklere hem de iyi mekanik özelliklere sahip Cu ve Cu alaşımlarını talep yüksek olduğundan, mekanik performanslarının artırılması giderek daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır (Bharat & Bose, 2021; de Bondt, 2000). Saf Cu elementinin mekanik, kimyasal, fiziksel ve elektriksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir (Dogan et al., 2022).

Tablo 2. Saf Cu Elementinin Mekanik, Kimyasal, Fiziksel ve Elektriksel Özellikleri

Özellikler			
Element simgesi	Cu	Ergime noktası	1084,62 °C
Element Sınıfı	Metal	Çekme Mukavemeti	231.38 MPa
Atom Numarası	29	Elastisite Modülü	124 GPa
Atom ağırlığı	63.54 g/mol	Akma Mukavemeti	21 MPa
Elektron düzeni	4s ¹ 3d ¹⁰	Sertlik	874 HB, 55.4 HV
Atom yarıçapı	1.96 °A	Poisson Oranı	0,35
Kristal yapısı	YMK	Isı iletkenliği	401 W/mK
Yoğunluğu	8,96 g/cm ³	Elektrik yalıtkanlığı	16,78 n.Ω.m

Üstün mukavemet elde etmenin en etkili yolu, Cu matris kompozitleri imal etmek için Cu ve alaşımlarına ikincil fazların eklenmesidir (M. Li et al., 2015; C. Zhao & Wang, 2014). Mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için doğru takviye elemanlarını seçmek gereklidir (Koltsova et al., 2012). Bakır matrisli kompozitlerde korozyona karşı direnç sağlamak için kullanılan takviye malzemeleri (Alaneme & Odoni, 2016):Seramikler (Alümina (Al₂O₃), Silisyum karbür (SiC), Bor karbür (B₄C), Titanyum dioksit (TiO₂)), Karbon Elyafı, Grafit, Nikel. Bu takviye malzemeleri, bakır matrisli kompozitlerde korozyona karşı direnci artırmak için kullanılan yaygın seçeneklerdir (Chawla & Chawla, 1998).

Endüstri ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte, metal matrisli kompozit malzemeler (MMK'ler), güçlendirilmiş yüksek performanslı mekanik özellikleri ve azaltılmış ağırlıkları nedeniyle enerji, savunma, havacılık, biyoteknoloji, optik ve otomobil gibi birçok alanda uygulanmaktadır (Chao et al., 2013; J. Liu et al., 2014; Su et al., 2014; Yener et al., 2015). Metal matrisli kompozitlerin gelişmiş özellikleri, matris ve takviyenin özelliklerinin yanı sıra takviye-matris arayüzü ile de yakından ilişkilidir. B₄C, SiC ve Al₂O₃, sünek matrisli kompozitler gibi bakır için mükemmel takviye malzemeleridir (Meydanoglu et al., 2013). Metalik malzemeler arasında bakır, yüksek şekillendirilebilirlik, oksidasyon ve korozyona karşı iyi direnç gösterir ve elektriksel ve termal iletkenliği nedeniyle tüm metaller arasında özel bir konuma sahiptir. Bu nedenle, Cu'nun en genel uygulaması, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğin gerekli olduğu yerlerdir. Düşük mukavemet ve zayıf aşınma direnci, Cu ve alaşımlarının başlıca sınırlamalarıdır (Akramifard et al., 2014). Saf bakır, kablolar ve teller, elektrik kontakları ve elektrik akımını geçirmesi gereken çok çeşitli diğer parçalar için yaygın olarak kullanılır. 1913'te oluşturulan elektriksel iletkenlik ölçeği, %100 olarak adlandırılan bir bakır standardına dayanıyordu ve herhangi bir malzemenin elektriksel iletkenliği, 20 °C'de (68 °F) tavllanmış bakır standardının (0.017241 μΩ m) hacim direncinin ilgili malzeme için

ölçülen değere oranının 100 katına eşit olan IACS (Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardı) olarak ifade edilmektedir (Akbarpour et al., 2014; Efe et al., 2012). Burada IACS, tavlanmış saf bakırın %100 IACS olduğu Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardını temsil etmektedir.

Takviye elemanının kompozit malzemelerde çok önemli bir işlevi vardır. Takviye elemanı malzemenin yükünün yaklaşık %90'ını taşır (Karaçor & Özcanlı, 2023) matris malzemesine sertlik kazandırır, malzemenin mukavemetini artırır ve elektrik iletkenliği veya izolasyonu, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek elastikiyet ve yüksek sertlik gibi özellikler sağlar. Tabi ki, takviye elemanının bileşen malzemesinin yükünün çoğunu taşıyabilmesi için, takviye elemanı ile matris arasındaki ara yüzeyin bağlanma mukavemetinin çok iyi olması gerekmektedir.

Çalışmamızda Cu nun mekanik, fiziksel, aşınma, korozyon ve elektrik iletkenliği üzerindeki etkilerini araştırmak için Bor, Bor karbür, Krom, Grafit, ve CNT gibi farklı takviye elemanları kullanılmıştır.

İlk olarak kullanılan takviye elemanı Bor (B)' dur. Sertlik özelliklerine önemli bir etkisi olduğundan metallerin yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mukavemet, yüksek elastikiyet, yüksek yüzey koruması, yüksek aşınma ve korozyon direnci ve yüksek yapışma gibi özelliklerinin geliştirilmesinde büyük avantajlar sağlar (Hsu et al., 2004; Uzunsoy, 2010). Bor, korozyona karşı dirençli bir elementtir ve bakır matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanıldığında korozyona karşı direnci artırabilir. Bor takviyeli bakır matrisli kompozitler yüksek sertlik, mukavemet ve termal stabilite gibi özellikler sergileyebilir. Ayrıca borun antimikrobiyal özellikleri onu dahili kullanım için faydalı hale getirebilir (J. Li et al., 2018).

Literatür araştırmalarından Bor'un Cu esaslı toz metalürjisi uygulamalarında kullanımının sınırlı olduğu görülmüş ve bu tezin bir kısmını oluşturmuştur.

Diğer takviye elemanı olarak seçilen ve kullanılan Bor Karbür (B_4C), elmas ve kübik yapıli Bor nitrürden sonra bilinen en sert (9,5+Mohs skalasında) üçüncü malzemedir (Domnich et al., 2011). Nötron emilimi, sürünme direnci ve darbe direnci gerektiren uygulamalarda çeşitli avantajlara sahip olan kovalent bağlı seramik bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda en hafif seramiktir. Bu nedenle kompozitin toplam ağırlığını arttırmadan mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. B_4C 'nin yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, nötron absorpsiyon stabilitesi, iyi kimyasal direnç, aşırı sertlik, mekanik özellik ve iyi nükleer özellikleri nedeniyle, kurşun geçirmez zırhlar, sıvı metal soğutmalı hızlı soğutan reaktörlerde nötron soğurucu gibi bir dizi aşırı bilimsel uygulama için yaygın olarak kullanılan bir yapısal malzeme olarak kullanılmaktadır. B_4C son zamanlarda toz metalurjisinde metal matrisli

kompozitler için iyi bir takviye elemanı olarak kullanıldığı bilinmektedir (Prajapati & Chaira, 2019; Yazdani & Salahinejad, 2011). Bor karbürün genel özellikleri Tablo 3’de verilmiştir (Somiya, 2013).

Tablo 3. Bor Karbürün Genel Özellikleri

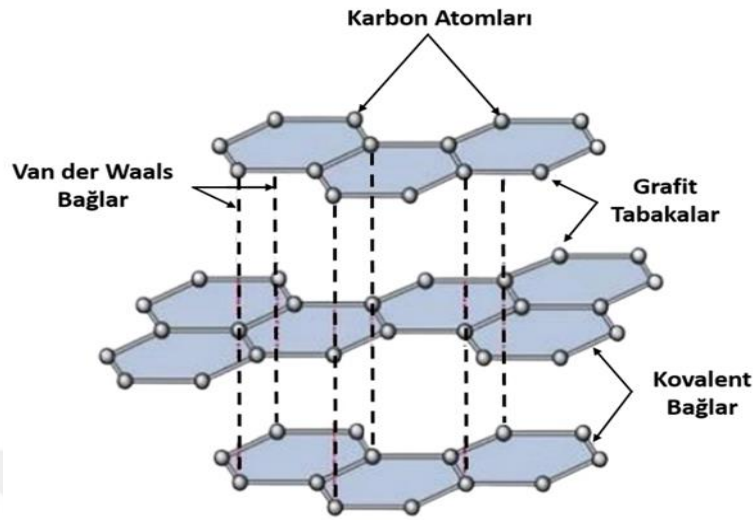
Özellikler			
Bileşim	B ₄ C	Kristal yapısı	Rhombohedral
Moleküler ağırlık	55,26	Erime noktası	2450 °C
Yoğunluk	2,52 (g/cm ³)	Basma mukavemeti	2750 (MPa)
Sertlik	27,4-34,3 (GPa)	Elektriksel iletkenlik	140 (Ω-1m-1)
Young modülü	290-450 (GPa)	Kafes parametreleri	a ⁰ =0,55991, c ⁰ =1,20740 (nm)
Poisson katsayısı	0,18	Elastisite modülü	448 GPa

Bor karbür, düşük yoğunluğu, yüksek erime noktası, yüksek elastik modülü ve kimyasal inertliğinin yanı sıra yüksek sertliği (2900-3100 kg/mm²), yüksek nötron soğurma kesiti ve mükemmel termo-elektriksel özellikleri nedeniyle kompozit malzeme yapımında potansiyel bir takviye olarak hizmet etmektedir. B₄C yüksek modül oranı ve 1100 °C’ nin üzerindeki sıcaklıklarda bile korunan sertliği, onu yüksek sıcaklık uygulamalarında iyi bir güçlendirme ortamı haline getirir. Bunlar, B₄C’nin oda ve yüksek sıcaklıktaki benzersiz özellikleridir ve onu hızlı üreyiciler, nükleer reaksiyonda nötron moderatörleri, derin uzay uçuş uygulamalarında güç üretimi, mikroelektronik, tıbbi, hafif hizmet tipi kurşun geçirmez zırhlar, patlatma nozulları, aşındırıcı su jeti kesme ekipmanı, yüksek sıcaklık termoelektrik cihazları, yüksek sıcaklık yapısal parçaları, kesici aletler, roket iticileri, aşınmaya dayanıklı parçalar ve termo-mekanik uygulamalar gibi çeşitli yüksek teknoloji uygulamaları için önemli bir malzeme haline getirir (Deepa et al., 2011b).

Diğer bir takviye elemanı krom (Cr)’dir. Nispeten ucuz olması, kolayca geri dönüştürülebilir olması, sertleşebilirliği artırması, üstün tribolojik özellikleri ve farklı takviye kategorileri ile takviye edilmiş kompozitlere kıyasla üstün refrakterliği nedeniyle Cr takviyeli kompozitler tercih edilmektedir (Sreenivasa & Mallur, 2021).

Diğer bir takviye elemanı olan Grafit, karbonun bir allotropudur ve aynı maddenin farklı kristal biçimlerine "allotrop" denir. Karbon, periyodik tablonun 4A grubunda yer alan bir ametaldir. Grafit hegzagonal kristal yapısına sahiptir ve yoğunluğu 2.1-2.3 g/cm³’dür. Yüzeyi yumuşak ve yağlıdır. Şekil 6’da görülebileceği gibi, karbon atomları iki boyutlu bir düzlemde birbirine bağlanarak üst üste dizilmiş düz tabakalar oluşturur (Cuhadaroğlu & Erdal, 2018). Bu karbon plakalar birbiri üzerinde kolayca kayarak grafiti iyi bir yağlayıcı

yapar. Grafitte karbon atomlarının oluşturduğu düzlemde bağlar kuvvetlidir. Seviyeler arasındaki bağlantılar zayıftır. Bunun sonucunda kaygan ve pullanma davranışı gözlemlenir (karbon esaslı malzemeler).



Şekil 6. Grafitin kimyasal yapısı

Grafit (Gr), iki boyutlu nano plaka olarak da isimlendirilir. Mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı karbon tabanlı dolgu malzemesi olarak da tanımlanabilmektedir. Diğer karbon türevlerine göre hem daha az maliyetli hem de düşük özgül ağırlığa sahiptir. Farklı fiziksel, kimyasal yöntemlerle iyileştirilerek nanokompozit malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanılan Grafit, üst düzey yapısal özelliklere sahip polimer nanokompozit malzemelerin oluşmasına imkan vermektedir (Uysal, 2012; Yalçın, n.d.).

Grafit; Doğal Grafit ve Sentetik Grafit olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.

1) Doğal Grafit:

- Amorf grafit,
- Pulsu grafit,
- Kristal grafit-damar tipi grafit formlarında bulunur.

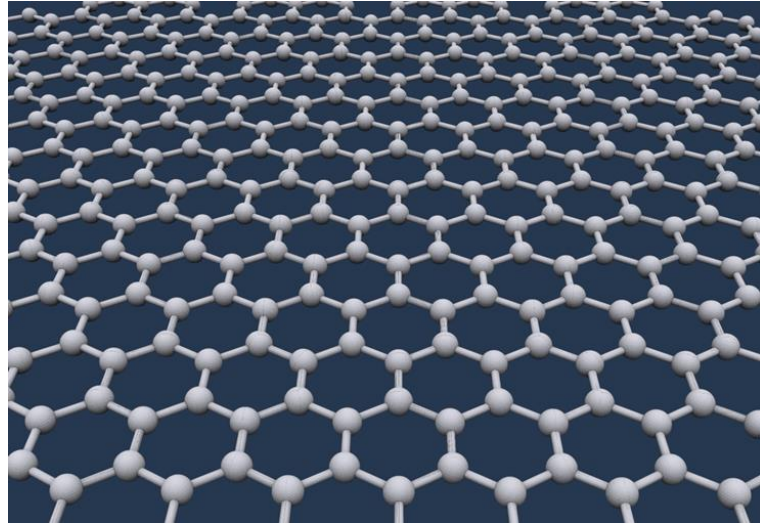
2) Sentetik Grafit: Bir sanayi ürünü olup, petrol, kok ve antrasitin elektrik ocaklarında 4000 °C'ye ısıtılmasıyla elde edilir (Kwiecińska & Petersen, 2004).

Üstün özelliklerinden dolayı grafitin çok geniş kullanım alanı vardır. Tablo 4'de grafit kullanım alanları verilmiştir (Cuhadaroglu & Erdal, 2018).

Tablo 4. Grafit Kullanım Alanları

Kullanım amacı	Kullanıldığı alanlar
İletkenlik	Elektrodlar Pil Tozları Motor ve Jeneratör Fırçaları Fren Astarları Isı Değiştiricileri
Yağlayıcılık	Yağlayıcılar Lastikler Motor ve Jeneratör Fırçaları Kurşun Kalemler Yataklar Tohum ve Gübre Kaplama Fren Astarları Piston Halkaları (Segmanlar) Barut Cilas Motor Gömlekleri
Refrakterlik	Refrakter Tuğlalar Döküm Boyaları Potalar Yatay Mufl Fırınları (Retort) Soba Boyaları Elektrodlar
Karbon verici	Karbon Yükseltici İzabe İşlemleri Nükleer Moderatörler (Nötron Yavaşlatıcılar)
Kimyasal asallık	Contalar Yapıştırıcılar Boyalar Refraktörler Pil Karbonları Döküm Boyaları Pas Temizleyiciler (Kazanlar) Soba Boyaları

Grafitin düzlemsel yapısına grafen denir. Şekil 7’de yer alan grafenin düzlemsel yapısına ait görüntüde de görüldüğü üzere grafen, grafit yapısının tek katmanıdır (Tufan & Batar, 2015).



Şekil 7. Grafenin yapısı (Zhen & Zhu, 2018)

Grafen (GNP), mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle polimerlerin yanı sıra metal matrisli kompozitlerin mukavemetini artırmada takviye malzemesi olarak önemli bir rol oynar (Zhang & Zhan, 2016c). Grafen nano katmanlı metal-grafen kompozitlerde dislokasyon hareketini engelleyerek ultra yüksek mukavemet sağlar (Alaneme & Odoni, 2016; Bharat & Bose, 2021; Chawla & Chawla, 1998; de Bondt, 2000; Fogagnolo et al., 2003; Ghodrati & Ghomashchi, 2019; J. Liu et al., 2014). Ayrıca, kompozit yaklaşım esasen metallerin ve alaşımların Young modülünü arttırmanın önemli yollarından biridir (Akramifard et al., 2014; Efe et al., 2012; Meydanoglu et al., 2013). Cu matrislerinde geleneksel olarak kullanılan oksitler veya karbür partikül gibi takviyeler, elektrik ve termal iletkenliği düşürürken mekanik ve tribolojik özellikleri önemli ölçüde artırır (Balandin et al., 2008; Lee et al., 2008; Novoselov et al., 2004; Shi et al., 2007). Bununla birlikte, Cu/Gr kompozitleri üzerine yapılan nispeten az sayıdaki çalışmanın gösterdiği gibi, dolgu maddesi olarak Gr kullanılarak Cu'nun mekanik özellikleri iyileştirilebilirken, iyi termal ve elektriksel özellikler korunabilir ve böylece iyi yapısal-fonksiyonel entegrasyona sahip CMK'ler elde edilebilir (Balandin et al., 2008; Lee et al., 2008; Shi et al., 2007).

İki boyutlu, altıgen bir kafes içinde düzenlenmiş, kovalent olarak bağlanmış sp^2 hibrit karbon atomlarından oluşan tek bir katman olan grafen , olağanüstü elektriksel ($1,5 \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$, (Shi et al., 2007)), termal ($5 \times 10^3 \text{ W/mK}$, (Balandin et al., 2008)) ve mekanik (1 TPa Young modülü ve 130 GPa gerilme mukavemeti (Lee et al., 2008)) özellikleri nedeniyle nano dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. İlk olarak 2004 yılında Geim ve Novoselov tarafından bir yapışkan bant yöntemi kullanılarak grafit kristallerinin mekanik olarak pul pul dökülmesiyle izole edilmiştir (Novoselov et al., 2004) ve bu çalışmaları 2010 Nobel Fizik Ödülü ile onurlandırıldı. Bununla birlikte, mekanik pul pul dökülme hâlâ en yüksek kalitede kristallerden bazılarını üretirken, bu işlemin düşük üretkenliği, onu büyük ölçekli teknolojik

uygulamalar için uygun hale getirmez. Bu bağlamda, grafenin metal karbürler veya metal yüzeyler üzerinde kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Lewis et al., 2013) ve GO ıslak kimyasal sentezi ve ardından indirgeme (Young et al., 2012) dahil olmak üzere büyük miktarlarda grafen sentezi için birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Grafen, tek atom kalınlığında karbon tabakalarından oluşan bir malzemedir. Yüksek mekanik dayanıklılık, elektriksel iletkenlik ve termal iletkenlik gibi özelliklere sahiptir. Grafen takviyeli bakır matrisli kompozitler, mekanik özelliklerini ve performansını artırabilir. Ayrıca, grafenin korozyona karşı dirençli özellikleri de vücut içi korozyona karşı dayanıklılığa katkıda bulunabilir (W. Qu et al., 2022).

Literatürde Cu/Gr kompozitleri için farklı mikro yapılar bildirilmiştir. En yaygın mikro yapılar, grafen partiküllerinin Cu matrisine gömüldüğü parçacıklardır ve Cu ve grafenin alternatif katmanlar halinde düzenlendiği katmanlı kompozitlerdir. Bununla birlikte sedefi taklit eden kompozitler gibi daha sofistike konfigürasyonlar da rapor edilmiştir (F. Chen et al., 2016; Gao et al., 2016; Hidalgo-Manrique et al., 2019; Zhang & Zhan, 2016c).

Son zamanlarda çalışılmaya başlanan Cu/Gr kompozitlerinin yapısını ve özelliklerini optimize etmek amacıyla çeşitli işleme teknikleri geliştirilmiştir. Tekniğe bakılmaksızın, ana zorluklar her zaman matris içinde homojen bir grafen dağılımının elde edilmesi, güçlü bir arayüzey bağının oluşturulması ve grafenin yapısal stabilitesinin korunmasıdır. Toz metalürjisi (Chu & Jia, 2014; Cui et al., 2014; Dutkiewicz et al., 2015; Gao et al., 2016; Jiang et al., 2016; W. J. Kim et al., 2014; M. Li et al., 2014; W. Li et al., 2015; Tang et al., 2014; Varol & Canakci, 2015; Xiao et al., 2017) ve elektrokimyasal biriktirme (F. Chen et al., 2016; Huang et al., 2016; Hwang et al., 2013; Jagannadham, 2011, 2012a, 2012b, 2013; M. Li et al., 2015; L. Wang et al., 2015; Xie et al., 2014; Xiong et al., 2016; Zhang & Zhan, 2016a; C. Zhao & Wang, 2014) bu tür kompozitler için açık ara en kapsamlı şekilde uygulanan işleme yöntemleridir. Bununla birlikte, kullanılan diğer işleme teknikleri arasında CVD (Babul et al., 2016; Cao et al., 2017; Y. Chen, Zhang, Liu, He, Han, et al., 2016; Y. Chen, Zhang, Liu, He, Shi, et al., 2016; Goli et al., 2014; Koltsova et al., 2012; Nasibulin et al., 2013; Wejrzanowski et al., 2016), soğuk püskürtme (Yin et al., 2017), katman katman montaj (Jagannadham, 2011; Y. Kim et al., 2013), metal sızma (Dong, Chen, Deng, et al., 2017; Dong, Chen, Zheng, et al., 2017), preform emdirme (Xiong et al., 2015) ve birikimli rulo yapıştırma (X. Liu et al., 2015) yöntemleri vardır.

Grafen tek atom kalınlığında olduğu için olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek mukavemeti ve esnekliği, kompozit malzemenin aşınma dayanımını artırabilir. Grafen, yüzeyine uygulanan sürtünme kuvvetlerini dağıtabilir ve yüzey aşınmasını azaltabilir. Olağanüstü mekanik ve diğer fiziksel özelliklere sahip olan karbon nanotüpler (CNT'ler) ve

grafen, kompozit malzemelerde mükemmel nano dolgu maddeleri olarak kabul edilir ve çok çeşitli uygulamalar için muazzam bir potansiyel sunar (Tjong, 2013). Grafen karbon nanotüplerden daha geniş bir yüzey alanına sahiptir, bu da özelliklerinin kompozite daha iyi aktarılmasına neden olabilir. Bu nedenle, grafen, yapısal ve fonksiyonel uygulamalar için metal matris kompozitlerde karbon nanotüplere uygun bir alternatiftir (Tjong, 2013).

Grafen takviyeli kompozitler üzerine yapılan araştırmalar, esas olarak polimer matrisli kompozitlere odaklanmış (Papageorgiou et al., 2015, 2017; V. Singh et al., 2011; Young et al., 2012) ve bugüne kadar metal matrisli kompozitler üzerine nispeten az sayıda, ancak giderek artan sayıda çalışmalar vardır (Hu et al., 2016; H. G. P. Kumar & Xavior, 2014; Ovid'Ko, 2014). Bunun iki nedeni var (Sadowski et al., 2015); ilk olarak, metaller iyi mekanik, elektriksel ve termal özelliklerle karakterize edilir, bu nedenle özelliklerdeki potansiyel gelişme, polimer matrisli kompozitlere göre daha az olabilir. İkincisi, grafen takviyeli MMK'lerin işlenmesindeki teknolojik zorluklar, polimer matrisli kompozitlere göre daha belirgindir. Özellikle grafenin atomlar arasındaki güçlü van der Waals kuvvetleri işleme sırasında yüzey enerjisini azaltmak için topaklanmalar oluşturma eğiliminde olduğundan, metal bir matrise düzgün bir şekilde dağılması zordur (Tjong, 2013).

Ayrıca, Grafenin metallere zayıf afinitesi nedeniyle etkili bir arayüzey bağı elde etmesi zordur. Özellikle, bakır (Cu) grafeni ıslatmaz ve Cu ile grafen arasında hiçbir reaksiyon meydana gelmediği için kovalent bağ mümkün değildir. Sadece zayıf mekanik yapışma ve van der Waals etkileşimleri meydana gelir (Chu & Jia, 2014). Bu nedenle, grafenin genellikle buruşuk yapısı, grafen ve Cu arasında daha iyi bir yük transferine yol açarak mekanik kilitlenmeyi geliştirmede önemli bir rol oynayabilir (Bashirvand & Montazeri, 2016). Son bir zorluk da, Gr genellikle MMK'leri üretmek için kullanılan sert üretim koşulları (yani yüksek sıcaklık ve yüksek basınç) sırasında kolayca zarar görerek içsel özelliklerini zayıflatabilmesidir (Tjong, 2013). Bu nedenle, iyi grafen MMK'lerin üretilmesindeki temel zorluk, genellikle toz metalürjisi yollarına dayanan imalatlarıdır

Yapılan araştırmalarda bakır matrisli malzemelere katkılanan diğer bir takviye elemanı ise karbon nanotüptür (CNT). Diğer bir karbon malzemesi olan karbon nanotüpler (CNT'ler), yüksek mukavemetleri, hafiflik özellikleri ve ayrıca yüksek en-boy oranı, yüksek spesifik yüzey alanı ve mükemmel mekanik özellikleri gibi olumlu geometrik özellikleri nedeniyle ideal takviyeler olarak kabul edilir (C. Li & Chou, 2003; Treacy et al., 1996; Yao et al., 2001). Olağanüstü mekanik ve diğer fiziksel özelliklere sahip olan karbon nanotüpler (CNT'ler), kompozit malzemelerde mükemmel nano dolgu maddeleri olarak kabul edilir ve çok çeşitli uygulamalar için muazzam bir potansiyel sunar (Tjong, 2013).

CNT'ler, benzersiz atomik yapıları ve büyüleyici özellikleri nedeniyle araştırmalarda büyük ilgi görmüştür. Şimdiye kadar elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar, CNT'lerin dünyada şimdiye kadar keşfedilen en eşsiz ve çok yönlü malzemeler olduğunu göstermektedir. CNT'ler 0,5-2 TPa'lık son derece yüksek bir Young modülüne (Lu, 1997; Treacy et al., 1996; Wong et al., 1997; Yakobson et al., 1996; Yu, Files, et al., 2000; Yu, Lourie, et al., 2000), 20-150 GPa'lık yüksek çekme dayanımına (Belytschko et al., 2002; Wagner et al., 1998; Walters et al., 1999) ve yüksek esnekliğe (Iijima et al., 1996) sahiptir. Olağanüstü mekanik özelliklerinin yanı sıra, CNT'ler son derece yüksek en-boy oranına, mükemmel kimyasal stabiliteye ve ayrıca üstün termal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Tüm bu özellikler, CNT'leri çeşitli uygulamalara yönelik nanokompozitlerin geliştirilmesinde olağanüstü takviye malzemeleri haline getirmiştir.

Monolitik malzemelerle karşılaştırıldığında mekanik özelliklerde önemli gelişmeler sağlayan karbon nanotüp takviyeli polimer matris kompozitleri üzerinde önemli araştırmalar yapılmıştır. Ancak metal-CNT nanokompozitlerinin hazırlanması, yapısal, fiziksel ve mekanik özellikleri konusunda sınırlı araştırmalar yapılmıştır.

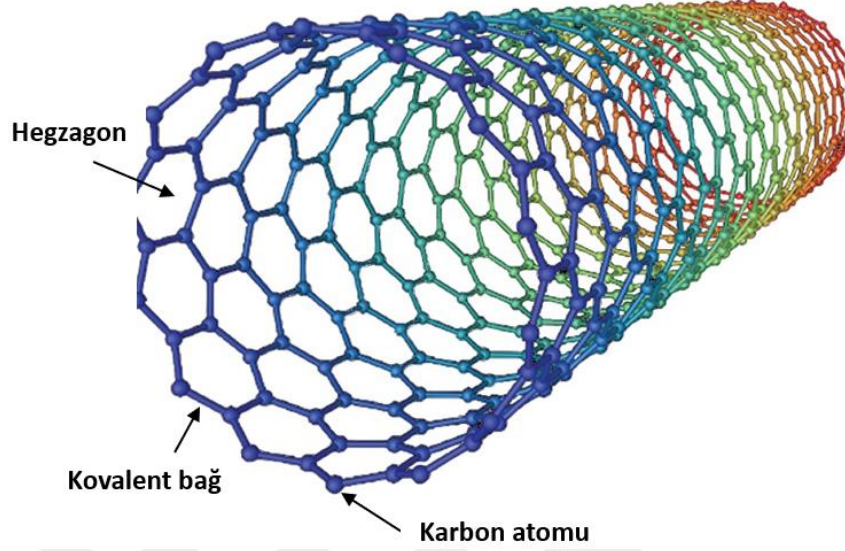
Metal matrisin takviyesi olarak CNT kullanılmasının başlıca dezavantajları:

- Zayıf ıslatma davranışı veya matris malzemelerine zayıf ara yüzey bağlanması,
- Van-der-Waals kuvveti ile kendi aralarında topaklanma oluşması,
- Matrislerde CNT'lerin homojen olmayan dağılımı,
- Yüksek işlem sıcaklığında bozulmuş termal stabilitedir.

Karbon nanotüplerin hem mekanik hem de fonksiyonel özelliklerin yüksek derecede güçlendirilmesini sağlayabildiğini gösteren analizlerle, karbon nanotüpler metal matris kompozitlerde (MMK'ler) kullanılan baskın karbon nano dolgu maddeleridir (Bakshi et al., 2010). Karbon nanotüplerle karşılaştırıldığında, grafenin matrislere dağılmasının daha kolay olduğu ve potansiyel olarak daha uygun maliyetli olduğu düşünülmektedir (Kotov, 2006).

Karbon nanotüpler Şekil 8 'de görüldüğü gibi moleküler yapısı belirli yönlerde yuvarlanan bir dizi grafen levha veya fulleren tipi yapı olarak kabul edilen bir malzeme sınıfıdır (Geim & Novoselov, 2007). Bu malzeme sınıfının sahip olduğu eşsiz elektriksel, mekanik, optik, kimyasal ve termal özellikler CNT'lerin yarı boyutlu yapıları, atomik olarak tek tabakalı yüzeyi ve kavisli π -bağı konfigürasyonu ile ilgilidir. Örneğin; yarı iletken, metalik veya yarı metalik olabilen tek katmanlı karbon nanotüpler yüksek mobilitesinden (oda sıcaklığında yaklaşık $10000 \text{ cm}^2 \text{Vs}^{-1}$) dolayı transistör aygıtlarında aktif kanallar olarak kullanılabilir. Ayrıca düşük dirençleri, yüksek akım taşıma kapasiteleri (10^9 A.cm^2) ve

yüksek termal iletkenlikleri ($3500 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) sayesinde elektriksel ara bağlantı elemanları olarak kullanımları söz konusudur. Ek olarak, 1-2 TPa aralığında elastik modüle sahip, çekme mukavemeti çelikten yaklaşık 50 MPa daha yüksek ve $1600 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 'lik yüzey alanı ile çeşitli sensör uygulamalarında kullanımı açısından avantaj sağlayabilmektedir.



Şekil 8. Karbon nanotüp atomik bağ yapısı

CNT'ler nano ölçekli devrelerden alan emisyon göstergelerine, hidrojen depolama aygıtlarına, ilaç dağıtım ajanlarına, ışık yayan cihazlara, termal ısı alıcılarına, elektrik ara bağlantı elemanlarına, kimyasal/biyolojik sensörlere ve biyomalzemelere kadar birçok alanda kullanım potansiyeli mevcuttur (Q. Wang & Moriyama, 2011).

CNT'ler, yüksek yüzey alanı, mekanik özellikler ve nanoteknoloji gibi farklı yönlerde gösterilmektedir. CNT'nin çapı bir ila birkaç nanometre arasında değişen boru şeklindeki yapıları, nano olmayan homologlarıyla karşılaştırıldığında benzersiz özellikler sunar. Grafit ile CNT'nin özellikleri Tablo 5'de gösterilmiştir.

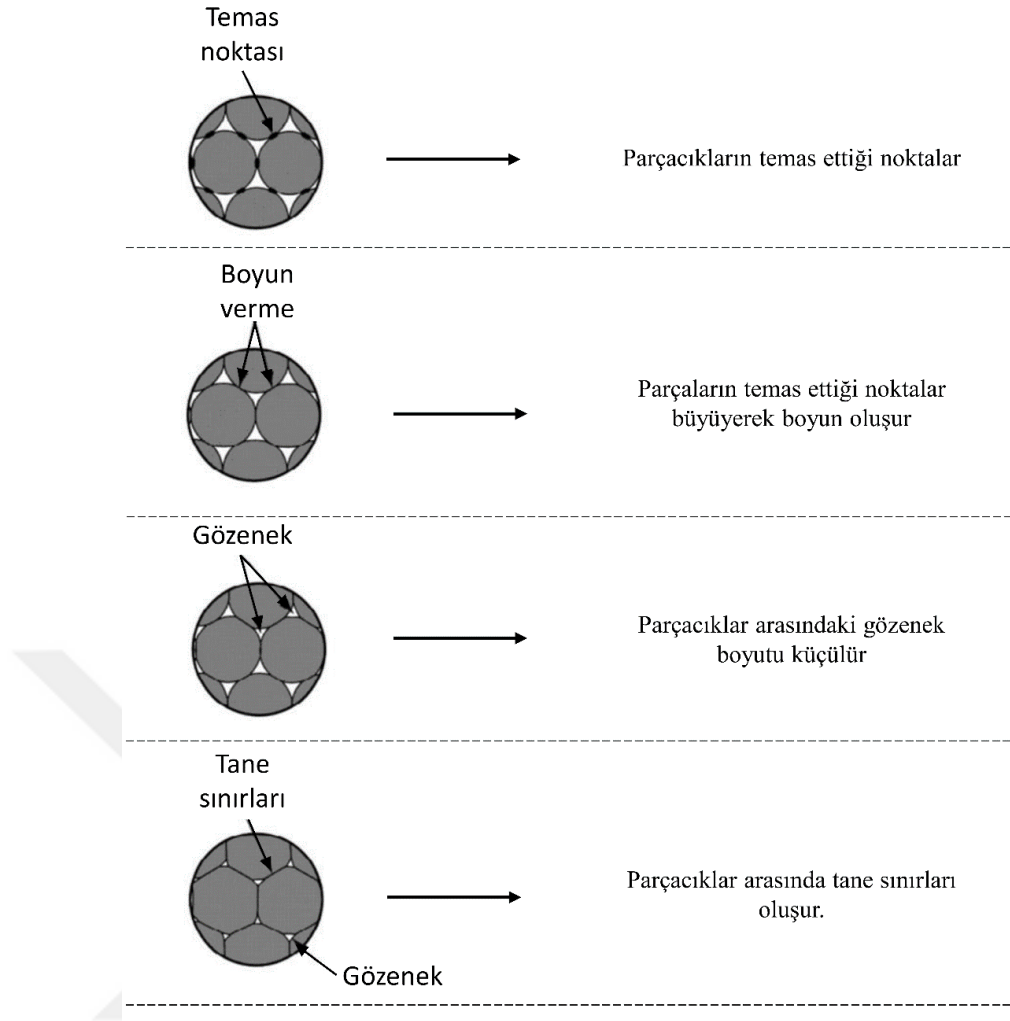
Tablo 5. Grafit ve CNT'nin Özelliklerinin Karşılaştırılması

Özellikler	CNT	Grafit	Referanslar
Yoğunluk	SWCNT için 0,8 g/cm ³ MWCNT için 1,8 g/cm ³ teorik)	2,26 gr/cm ³	(Knopp & Scharr, 2020)
Young modülü	SWCNT için ~1 TPa MWCNT için ~0,3–1 TPa	1TPa	(De Volder et al., 2013)
Çekme mukavemeti	SWCNT için 50–500 GPa MWCNT için 10–60 GPa		(Ali et al., 2023)
Direnç	5–50 µΩ cm	50 µΩ cm	(Ramana & Ramprasad, 2017)
Termal iletkenlik	3000 Wm-1.K-1	3000Wm-1.K-1	(Soni et al., 2020)

Sinterleme

Sinterleme işleminde sıkıştırılmış veya kalıplanmış ham yoğunlukta toz karışımı ergime sıcaklığının altına ısıtılarak tozlar arasındaki bağ sağlanır. Sinterleme işlemi, matris malzemenin erime sıcaklığının 1/3'ü kadar düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Presleme işleminde tozlar arasındaki mekanik bağ, sinterleme işlemindeki kimyasal bağ ile desteklenerek mekanik olarak daha mukavemetli bir malzeme elde edilir. Sinterleme işlemleri kontrol atmosferli (Argon, Azot veya vakum altında) sinterleme fırınlarında yapılabilmektedir (Şekil 9). Sinterleme işleminin mikroskobik boyutlarda gösterimi Şekil 10 'da verilmiştir (Upadhyaya, 1997).

**Şekil 9.** Atmosfer kontrollü sinterleme fırınları



Şekil 10. Mikroskobik boyutta sinterleme mekanizması

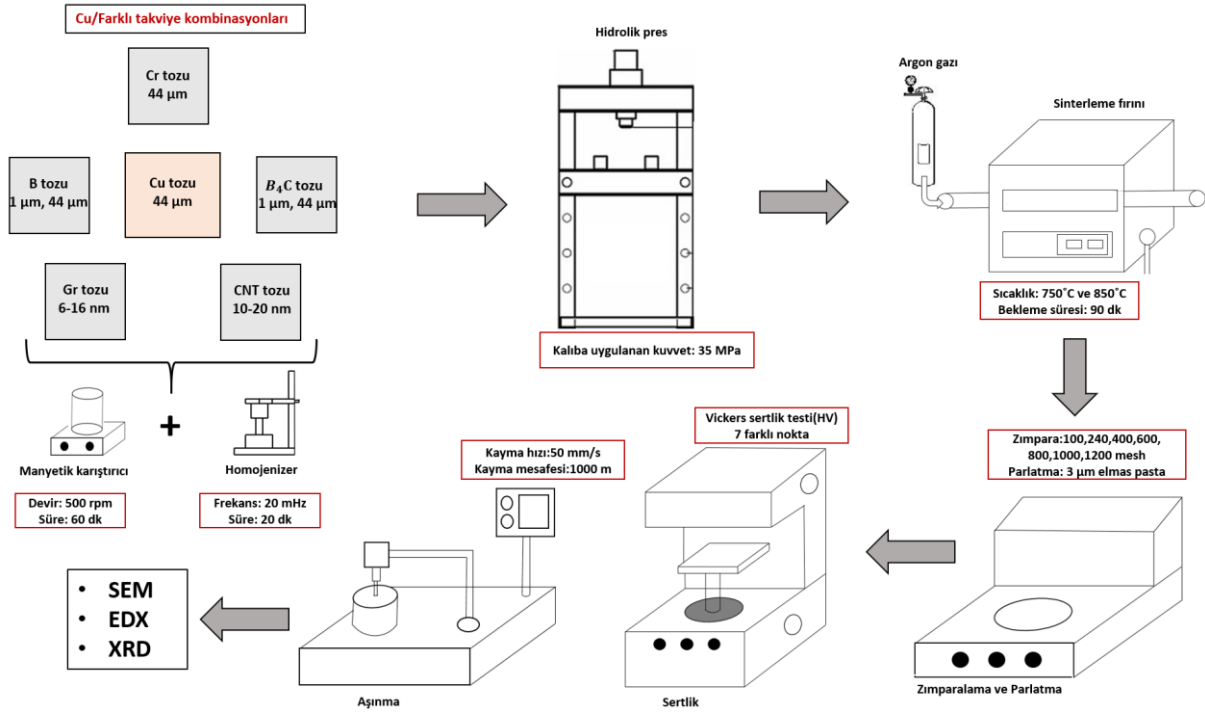
Sinterleme sırasında malzemenin gözeneklerinde difüzyon meydana gelir. Ara yüzeyde boşlukların oluşmasına, fiziksel ve kimyasal bağlanmaya neden olur ve bu da malzemenin mukavemetine katkıda bulunur. Difüzyon, partiküllerin genleşme hızına, sinterleme sıcaklığına ve sinterleme süresine bağlıdır (Gunes et al., 2015). Genellikle sinterleme, erime noktası sıcaklığının 0,8-0,9 katı sıcaklıkta gerçekleştirilir. Toz metalürjisi (PM) ürünlerinin özellikleri, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, takviye maddesinin türü ve oranı, matrisin boyutu ve takviye malzemeleri vb. gibi proses parametrelerine bağlıdır (N. Kumar, Bharti, & Saxena, 2020). Sıkıştırma basıncı toz metalürjisi prosesinin en önemli parametrelerinden biridir. PM yöntemiyle üretilen bir ürünün yoğunluğu ve gözenekliliği, sıkıştırma basıncıyla düzenlenir. Sıkıştırma basıncı ne kadar yüksek olursa, yoğunluk o kadar büyük ve gözeneklilik o kadar düşük olur. Bir malzemenin mekanik, elektriksel ve diğer özellikleri aynı zamanda yoğunluk ve gözenekliliğe de bağlıdır; bu da bunların sıkıştırma basıncına dolaylı olarak bağlı olduğunu gösterir (N. Kumar, Bharti, Dixit, et al., 2020).

Sinterleme sıcaklığı da toz metalürjisi prosesinde çok önemli bir parametredir çünkü toz metalürjisi kompaktının mukavemeti, malzemedeki difüzyon bağının ve tanecik büyümesinin derecesine bağlıdır. Difüzyon bağlanmasının ve tane büyümesinin boyutu sinterleme sıcaklığına bağlıdır. Difüzyonun zamana ve sıcaklığa bağlı bir olay olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha fazla olduğu belirtilmektedir. Partiküller arasındaki bağı iyileştirir ve dolayısıyla malzemenin mukavemetini artırır. Bu nedenle sinterleme sıcaklığının dikkatli seçilmesi gerekmektedir (Miracle, 2005). Sinterleme sıcaklığına benzer şekilde sinterleme süresinin de mekanik ve elektriksel özellikler üzerinde etkisi vardır. Sinterleme süresinin artmasıyla birlikte, malzemede oksit oluşur ayrıca termal genleşme ile ilişkili olabilecek elektriksel iletkenlik azalır.



MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında farklı takviye kombinasyonları ile 4 grup kompozit malzemeler üretilmiştir. Deneysel çalışmada yapılan işlemlerin akış şeması Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. T/M metodu ile Hibrit kompozit üretim işlemleri akış şeması

Takviye Tozların Safılık ve Adlandırılması

Tüm 4 grupta sentezlenen hibrit kompozit sentezlemelerde kullanılan tozların partikül boyutları ve saflık dereceleri Tablo 6’da, üretilen hibrit kompozitlerde katkı tozların ağırlıkça oranı ve kompozitlerin adlandırılması Tablo 7 ’de gösterilmiştir.

Tablo 6. Çalışmada Kullanılan Tozların Safılık, Partikül Boyutları ve Fiziksel Özellikleri

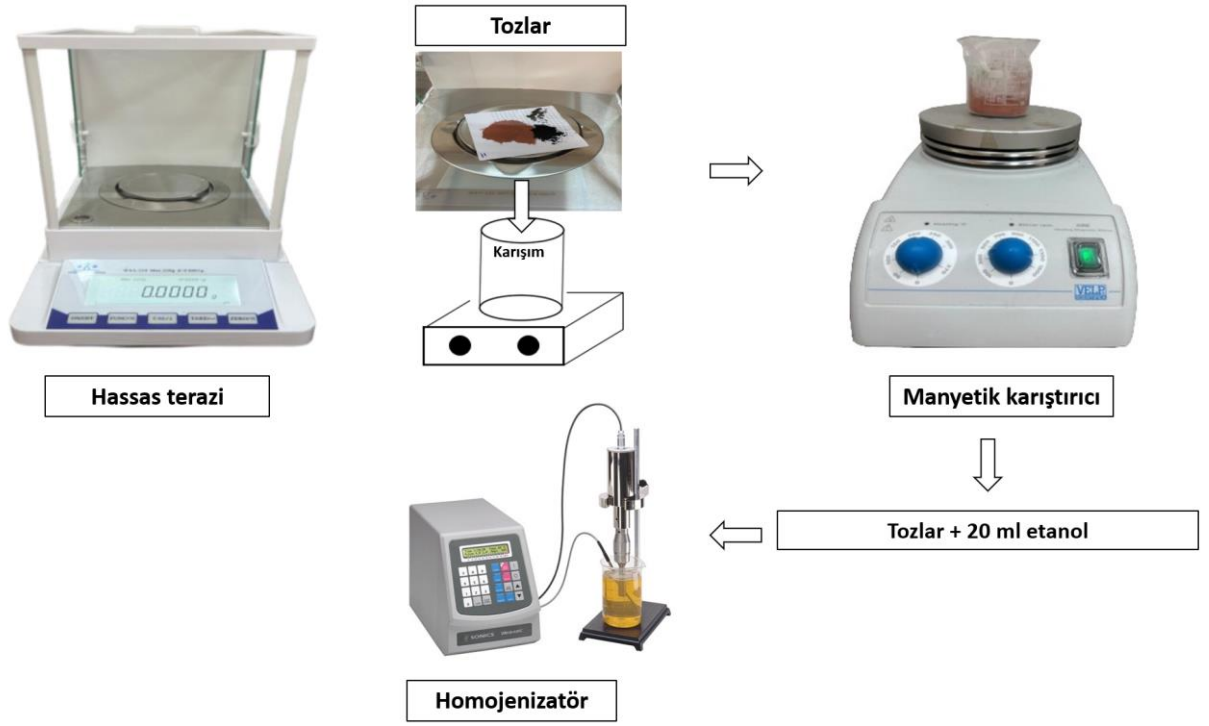
Malzeme	Cu	Cr	B	B_4C	Gr	CNT
Saflık (%)	99.9%	%99.9	%99.9	%99.9	%99.9	%99
Partikül boyutu	44 μm	44 μm	44 μm 1 μm	44 μm 1 μm	6-16 nm	10-20 nm

Tablo 7. Kompozit Numune Grupları ve Ağırlıkça % Katkı Miktarları

Grup	Numune	Cu	Gr	B	B ₄ C	Cr	CNT
1.Grup	Cu	%100	-	-	-	-	-
	Cu-Cr	%99	-	-	-	%1	-
	Cu-Cr-1B	%98	-	%1	-	%1	-
	Cu-Cr-2B	%97	-	%2	-	%1	-
	Cu-Cr-3B	%96	-	%3	-	%1	-
	Cu-Cr-4B	%95	-	%4	-	%1	-
2.Grup	Cu-Cr-1B ₄ C	%98	-	-	%1	%1	-
	Cu-Cr-2B ₄ C	%97	-	-	%2	%1	-
	Cu-Cr-3B ₄ C	%96	-	-	%3	%1	-
	Cu-Cr-4B ₄ C	%95	-	-	%4	%1	-
3.Grup	Cu-Gr	%99	%1	-	-	-	-
	Cu-2Gr	%98	%2	-	-	-	-
4.Grup	Cu-CNT	%99	-	-	-	-	%1
	Cu-2CNT	%98	-	-	-	-	%2
	Cu-Gr-CNT	%98	%1	-	-	-	-
	Cu-Gr-2CNT	%97	%2	-	-	-	-

Tozların Hazırlanması

Ana matris malzeme Cu olacak şekilde Tablo 7'deki değerler dikkate alınarak karışımlar hazırlanmıştır. Ağırlıkça molarite hesabı yapılarak tozlar 3 gram (gr) olacak şekilde Precisa marka hassas terazide (1.0×10^{-4}) tartılmıştır. Hazırlama işleminde matris malzeme ile takviye elemanları yapılan ön deneylerle homojenliğin olduğu optimum değer belirlenerek (500 rpm hız, 60 dakika süre) manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışımlara 30 ml etil alkol eklenerek hazırlanan tozların daha homojen olması için ultrasonik homejenizatörde (VCX 750, Sonics) 20 dakika 20 mHz frekansta tekrar karıştırılmıştır. Elde edilen çözelti daha sonra 24 saat boyunca bir etüvde kurutulmuştur. Hibrit kompozit tozlarının hazırlanma süreci Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Hibrit kompozit hazırlama süreci şematik gösterimi

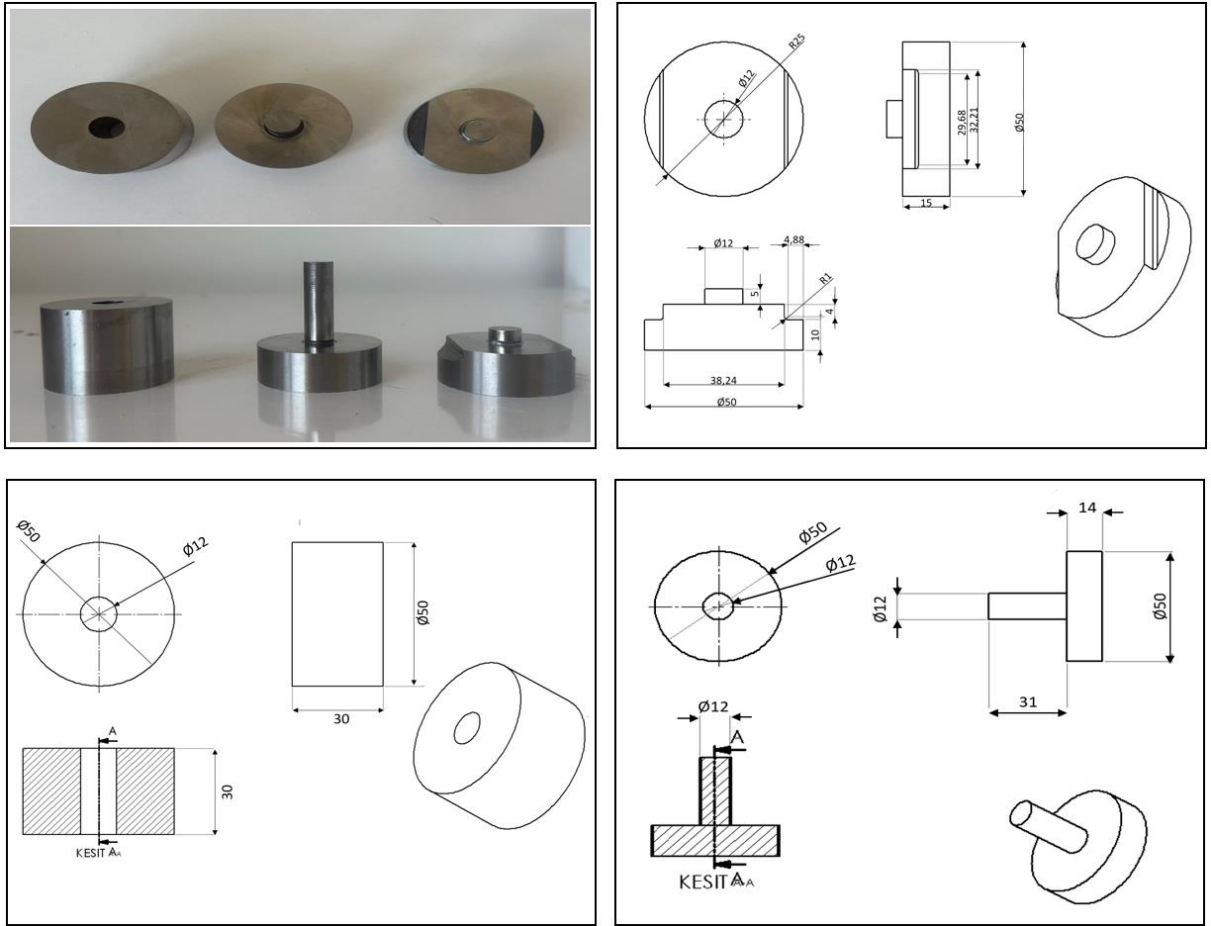
Kompozit Numunelerin Hazırlanması

Karıştırma işlemleri tamamlanan kompozitlerin soğuk presleme tekniğiyle preslenmeleri Şekil 13’ de verilen pnömomatik presde (Fırat Üniv-SHYO) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. Soğuk pres

Soğuk presleme işlemi için hazırlanan kalıp ve zımbalar 304 paslanmaz çeliğinden üretilmiş ve ilgili kalıp foto ve teknik resim çizimleri (Şekil 14) de gösterilmiştir.



Şekil 14. Soğuk presleme işlemi için tasarlanıp imal edilen kalıplar

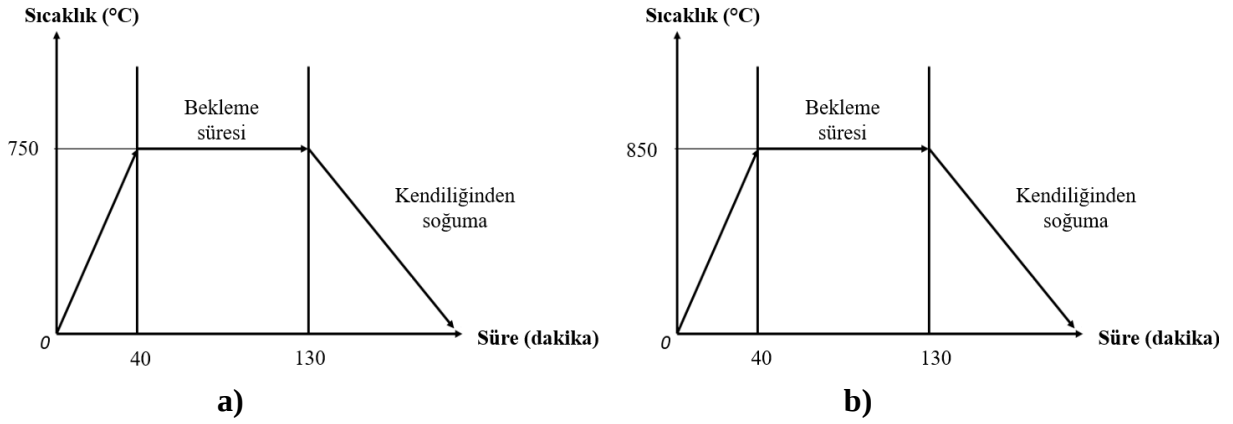
Homojenizasyon için manyetik karıştırma işlemleri tamamlanan kompozitlerin soğuk presleme tekniğiyle preslenmeleri gerçekleştirilmiştir. Presleme esnasında tozların kalıptan daha rahat bir şekilde çıkartılabilmesi için kalıbın iç yüzeyleri $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$ (Çinko Stearat) ile yağlandı ve yapılan denemeler sonucunda, bulunan optimum presleme basıncı olan 35 MPa basınçta kompozit numuneler hazırlanmıştır (Şekil 15).



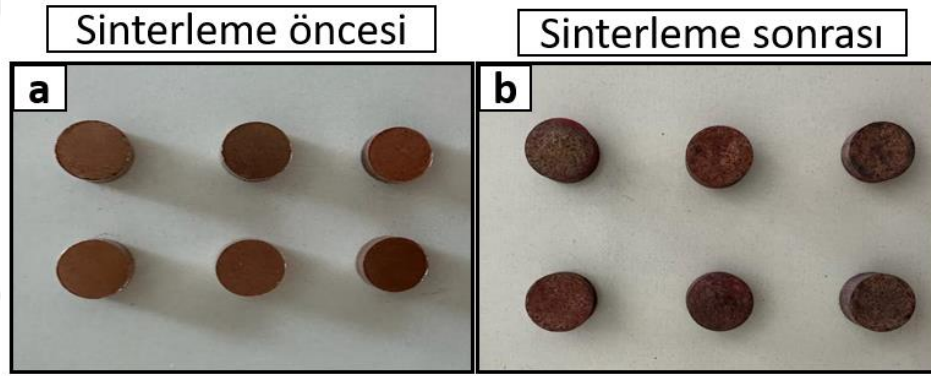
Şekil 15. Soğuk presleme ile üretilen kompozit numuneler

Kompaktlanan numuneler argon gazı (%99.9 saflıkta) atmosferinde 90 dakika sinterleme işlemi sonrasında kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem iki farklı

sinterleme sıcaklığında (750°C ve 850°C) tekrarlanmıştır. Sinterlenen numunelerin bekleme grafikleri Şekil 16’da sinterleme öncesi ve sonrası numuneler Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 16. Sinterleme işlemlerinde sıcaklık-zaman değişimi **a)** 750°C **b)** 850°C



Şekil 17. Soğuk presle kompaktlanan Cu esaslı hibrit kompozitlerin sinterleme öncesi **(a)** ve sonrası **(b)** numuneler

Hibrit Kompozitlerin Yapısal Karakterizasyonu

Sinterleme sonrası numunelerin mikroyapıları ve sertlik analizleri yapılmadan önce soğuk bakalite alınmıştır. Fiber Elyaf Polyester Reçine ve sertleştirici ile bakalit karışımı hazırlanmıştır. Numuneler kalıpların içerisine koyularak üzerine hazırlanan karışım dökülüp 24 saat donması beklenmiştir. Bakalite alınan numunelerin mikroyapılarının incelenmesi için zımparalama ve parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla 100, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı SiC zımpara kağıtları üzerinde ve daha sonra $3\text{ }\mu\text{m}$ 'luk elmas pasta kullanılarak çuha ile parlatma işlemleri yapılmıştır. Çuha ile parlatma işlemlerinden sonra da numuneler etil alkolle yıkanmıştır. Soğuk presle kompaktlanan ve bakalite alınan farklı kompozisyondaki kompozit numuneler Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Soğuk presle kompaktlanan ve bakalite alınan farklı kompozisyondaki kompozit numuneler

Numunelerin mikroyapılarında Cu matris yapı içerisinde homojen dağılım sergileyen takviye elemanı analizi ve aşınma yüzeylerinin incelenmesi için Zeiss EVO MA10 markalı SEM cihazı (Atatürk Üniv-DAYTAM) kullanılarak SEM ve EDX analizleri yapılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. SEM analiz cihazı

Tüm grupların faz analizleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde yer alan Malvern PANalytical EMPYEAN X- ışını kırınım ölçer (XRD) ile Cu – $K\alpha$ ışınımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. X ışını kırınım (XRD) cihazı

Sertlik

Mekanik özellikler Onalkon marka mikrosertlik test cihazı (Fırat Üniversitesi –Sivil havacılık yüksekokulu (SHYO)-Araştırma Laboratuvarı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de belirtilen numunelerin farklı katkı oranında, sinterleme sıcaklığında ve takviye tanecik miktarının değişiminin sertlik üzerindeki etkisini göstermek için 30 kg yük altında 15 saniye bekleme süresinde Vickers sertlik ölçüm yöntemine göre 7 farklı noktadan ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır (Şekil 21). Numunelerin yüzey sertliği [ASTM E92-17](#) standardına göre ölçülmüştür.



Şekil 21. Sertlik cihazı

Basma Testleri

Basma testleri, oda sıcaklığında Universal Test Cihazı (Besmak, SHYO-Fırat Univ.) kullanılarak ASTM D3410/D3410M-03 test standardına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 22). Tüm analizler için makinenin çapraz kafa hızı 0,5 mm/dk olarak sabitlenmiştir. Basma

deneyi numunelerinde önemli olan bir özellik, numunenin çapı (d_0) ile yüksekliği (h_0) arasındaki orandır. Bu oranın h_0/d_0 çok büyük olması, numunenin deney sırasında eğilmesine ve gerilmenin numune üzerinde homojen olarak dağılmamasına neden olur dolayısıyla yanlış sonuçlar elde edilir. Basma numunesinde yüksekliğin çapa oranının çok kısa olması da istenmez, alt limit olarak da $h_0/d_0 = 1.5$ oranı önerilir. Metalik malzemeler için basma numunelerinde genellikle $h_0/d_0 = 2$ oranı kullanılır. Basma testi numuneleri, 15 mm yüksekliğinde ve 10 mm çapında silindirik olarak hazırlanmıştır (Balamurugan et al., 2012; Rahimian et al., 2010). Her bir kompozit türü için en az dört numune test edildi ve ortalama tepe yükü, standart sapma ile birlikte hesaplandı.



Şekil 22. Çekme testi cihazı

Aşınma Testleri

Aşınma testleri ASTM G113-05 standardına göre kuru atmosfer ortamında Elkimak marka ileri geri hareket test cihazı (F.Ü-SHYO) kullanılarak gerçekleştirildi. Pim olarak 5 mm çapında çelik kullanıldı. Deney için belirlenen parametrelere göre cihaz ayarlanarak aşınma deneyi yapılmıştır (Tablo 7). Deney sonuçları cihazdan alınarak sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Aşınma düzeneği şematik olarak Şekil 23’de gösterilmiştir. Triboloji testi için belirlenen deney parametreleri Tablo 8’ de gösterilmiştir.

Tablo 8. Triboloji Testi İçin Belirlenen Deney Parametreleri

Parametre	Miktar
Uygulanan Yük	10 N
Aşınma hızı	50 mm/sn
Aşınma mesafesi	1000 m
Toplam süre	3600 sn
Sıcaklık	22±2 °C



Şekil 23. Aşınma cihazı

Literatür çalışmaları incelendiğinde, kuru şartlar altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde takviye miktarı, uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi gibi önemli test parametreleri kullanılmıştır (Abouelmagd, 2004; Jha et al., 2011; Şahin, 2010). Bu çalışmada aşınma testleri, pin-on-disk aşınma test cihazıyla gerçekleştirildi. Numunelerin ağırlık kayıpları 10^{-4} hassasiyet değerine sahip Weightlab Instruments terazide ölçüldü ve ölçülen değerler kayıt altına alınarak mesafeye göre her numune için ağırlık kaybı grafikleri oluşturuldu. Aşınma deneylerindeki diğer işlem olan sürtünme katsayılarının belirlenmesi için her bir numune 1000 metre kayma mesafesi boyunca aşındırıldı ve aşınma test cihazında kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri kayıt altına alındı. Kayıt altına alınan sürtünme katsayı değerleri bilgisayara aktararak sürtünme katsayısı grafikleri çıkarıldı. Her deneysel çalışmadan önce ve sonra, pin-on aşındırıcı pim ve disk alkolle temizlendi ve kurutuldu.

Korozyon Testleri

Tablo 5’de detayları verilen beş gruptan 1,2,3 ve 4. gruplarda ki tüm numunelerin elektrokimyasal korozyon davranışının tespiti için açık devre potansiyeli (OCP) ve potansiyodinamik polarizasyon taraması (POTDYN) testleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler için Gamry G750 Potensiyostat/Galvanostat sistemi kullanılmıştır (Şekil 24).

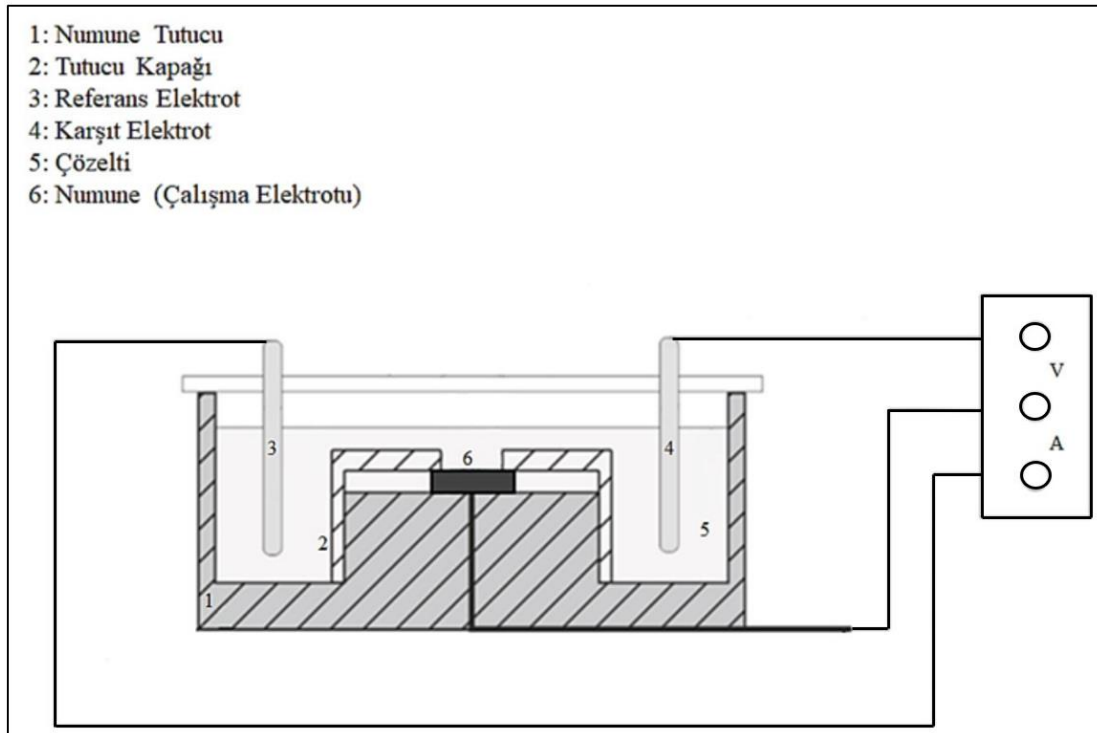
Açık devre potansiyeli (OCP), aynı zamanda serbest korozyon potansiyeli de denir. Aralarında akım akışı bulunmayan bir elektrolitte iki iletken arasındaki elektriksel potansiyel farkıdır (Kawai et al., 1995). OCP analizi sistemin ne zaman stabil bir hale geldiğini, aktif ve pasif davranış gibi farklı durumlar arasındaki geçişlerin ne zaman olacağını belirlemek için önemlidir. Açık devre potansiyeli (OCP) değerlerinin daha pozitif olması malzemenin

korozyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Malzemenin korozyon direncinin belirlenmesinde sadece açık devre potansiyelinin kullanılması yeterli değildir, ayrıca Tafel eğrileri de incelenmelidir (Ghosh et al., 2006).

Polarizasyon ölçümleri %3,5'luk NaCl ortamında gerçekleştirildi. Korozyon testleri [ASTM G3-14](#) standardına göre yapıldı. Çözelti ile temas halinde olan yüzey alanı 1,17 cm²'dir. OCP ölçümleri 4000 saniye boyunca gerçekleştirildi. Potansiyodinamik Polarizasyon ölçümleri -2 mV ile +2 mV arasında 0,5 mVs⁻¹ tarama hızında yapıldı. Polarizasyon ölçümleri, korozyon hücresi içerisinde üç elektrot tekniği kullanılarak yapılmıştır. Referans elektrot (RE) Ag/AgCl, karşıt elektrot (KE) grafit çubuk ve çalışma elektrotu (ÇE) deney numunesi kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda korozyon oranı mm / yıl cinsinden ASTM G-102 standardında geçtiği şekilde Faraday kanunundan faydalanan aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Astm, 2004);

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \times \frac{I_{kor} \times EW}{d} \quad (1)$$

Formülde CR korozyon oranını (mm/yıl), I_{kor} korozyon akım yoğunluğunu ($\mu A/cm^2$), EW eşdeğer ağırlık (gr) ve d ise yoğunluğu (gr/cm^3) vermektedir.



Şekil 24. Korozyon test düzeneği (Atik, 2020)

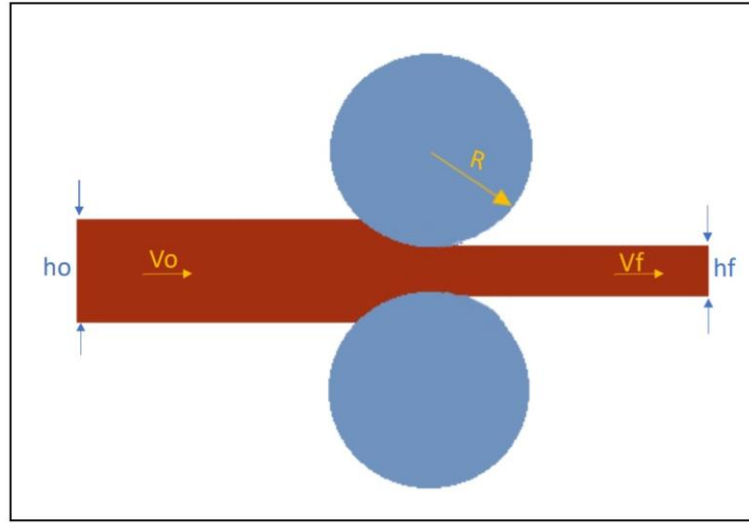
Haddeleme

Plastik kalıplama yöntemleri genellikle kütle şekillendirme ve levha kalıplama diye iki ayrı bölüme ayrılır. Birinci grupta malzeme her üç yönde de değişmektedir. Bu yöntemleri

tanımlayan bir diğer kriter ise numunenin "alan/hacim" oranıdır. Kütle oluşturma yöntemlerinde bu oran düşüktür. Sac şekillendirme olarak adlandırılan diğer grupta ise şekillendirme genellikle kalınlığı 5 mm'den az olan ince saclar olarak tanımlanan saclara verilmektedir. Şekil değişimi yüzeyde iki yönde gelişir ve kalınlık değişimi genellikle göz ardı edilir. Bu tez çalışmasında kütleli şekillendirme yöntemlerinden biri olan haddeleme yöntemi kullanılmıştır (Demirkol, 2010)(Şekil 25). Haddeleme işlemi, taneleri küçülterek anizotropi yaratmayı ve mukavemeti artırmayı hedefler. Aynı zamanda, merdane döküm yöntemiyle malzemenin yoğunluğunu ve ince yapısını değiştirerek malzeme özelliklerini iyileştirmek mümkündür. Haddeleme işleminin önemli bir diğer yönü, belirli bir zamanda sınırlı bir hacimde basınç ve deformasyon uygulanmasını içerir. Bu mekanik avantajlar sayesinde, büyük külçeler ve yüksek deformasyon direncine sahip alaşımlı malzemeler üretilir (H. Yang et al., 2014).



Şekil 25. Deneylerde kullanılan haddeleme cihazı.



Şekil 26. Haddeleme işleminin şematik gösterimi.

- Giriş kalınlığı: h_0 , Çıkış kalınlığı: h_f
- Giriş hızı: V_0 , Çıkış hızı: V_f
- R : Merdane çapı (m)
- L : temas yayı uzunluğu
- Haddeleme Miktarı: $\Delta t = h_0 - h_f$
- V_r : Merdanelerin teğetsel hızı (m/sn)
- F : Ezme kuvveti, W_0 : genişlik, K :sabit

Bakır matrisli kompozit numuneler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında haddeleme makinesinde %15 ve %25 oranlarında tek yönlü soğuk haddeleme ile deforme edilmiştir. Şekil 26' da şematik resmi gösterilen haddeleme yöntemi kullanıldığında, haddeleme işleminin nasıl uygulandığı gösterilmiştir.

Soğuk haddeleme kuvveti hesaplanırken ortalama gerilme değeri göz önüne alınır. Soğuk haddelemede haddelenen parçadaki enine gerilme boyuna gerilmeye oranla çok daha düşüktür. Bu kabullerden hareketle yuvarlanma sırasında silindirlere etki edensıkıştırma kuvvetinin nasıl hesaplandığını formüller yardımıyla hesaplayabiliriz.

Haddeleme işlem sıcaklığına göre ikiye ayrılır: Çok büyük deformasyonların elde edilebildiği "sıcak haddeleme" ve sınırlı sınırlamalarla düz haddeleme yoluyla sac haddelemenin üretildiği "soğuk haddeleme". Yassı haddeleme sırasında gerçek birim şekil değişimi(ϵ) Formül (1) kullanılarak hesaplanabilir;

$$\epsilon = \ln \frac{t_0}{t_f} \quad (1)$$

Giriş kalınlığı: t_0 ve çıkış kalınlığı: t_f olarak tanımlanır, soğuk haddeleme ortalama bir akma değeri gerektirir ve yukarıdaki gerçek gerilme değişimini hesapladıktan sonra ortalama akma dayanım (σ_{ort}) değerini Formül (2) kullanılarak hesaplanabilir:

$$\sigma_{ort} = \frac{K \cdot \epsilon^n}{1+n} \quad (2)$$

Soğuk haddeleme süreci, malzemenin girişten çıkışa kadar temas yayı boyunca farklı kısımlarında farklı deformasyonları gerektirdiği için ortalamanın üzerinde gerilme değerlerini içerir. Bu nedenle, soğuk haddeleme sırasında gerçekleşen düzlemsel birim şekil değişimi (neredeyse hiç yayılma olmadığı düşünülerek) dikkate alındığında, haddeleme sırasında etkiyen ezme kuvveti Formül (3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$F = (1.15) \cdot \sigma_{ort} \cdot W_0 \cdot L \quad (3)$$

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bakır (Cu) tozuna ağırlığı %1’de sabit kalacak şekilde Krom (Cr) tozu, ağırlıkça belirli oranlarda (%1,%2,%3 ve %4) Bor (B) ve (%1,%2,%3 ve %4) Bor karbür (B₄C) tozları takviye edilerek ve farklı partikül boyutlarında (1 µm ve 44 µm) eklenerek hibrit kompozitler hazırlanmıştır. Ayrıca Cu tozuna ağırlıkça belirli oranlarda (%1 ve %2) Grafit (Gr) ve (%1 ve %2) Karbon nanotüp (CNT) tozları takviye edilerek hibrit kompozitler elde edilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde Cu tozlarına bu çalışmadaki gibi hibrit karışımlar yapılmadığı görülmüştür. Hazırlanan numuneler iki farklı sıcaklıkta (750 °C ve 850 °C) sinterlenmiştir. Numunelerin mikroyapısı (SEM, EDX ve XRD), sertliği ve 10N yük altında kuru şartlarda aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonrasında hibrit kompozitlerin aşınma sonrası görüntüleri SEM görüntüleriyle gözden geçirilerek takviye elemanlarının, takviye tanecik boyutunun ve sinterlemenin mikroyapı ve triboloji üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm numunelerin elektrokimyasal korozyon davranışının tespiti için açık devre potansiyeli (OCP) ve potansiyodinamik polarizasyon taraması (POTDYN) testleri gerçekleştirilmiştir. Polarizasyon ölçümleri %3,5’luk NaCl ortamında gerçekleştirildi. Kompozit numunelerin mekanik özellikleri basma testleri ile belirlenmiştir. Basma testi sırasında numune sabit hızda basma yüküne maruz bırakılmıştır. En iyi mekanik özellik gösteren numunelerin elektrik iletkenliği oda sıcaklığında dört prob yöntemiyle ölçülmüştür.

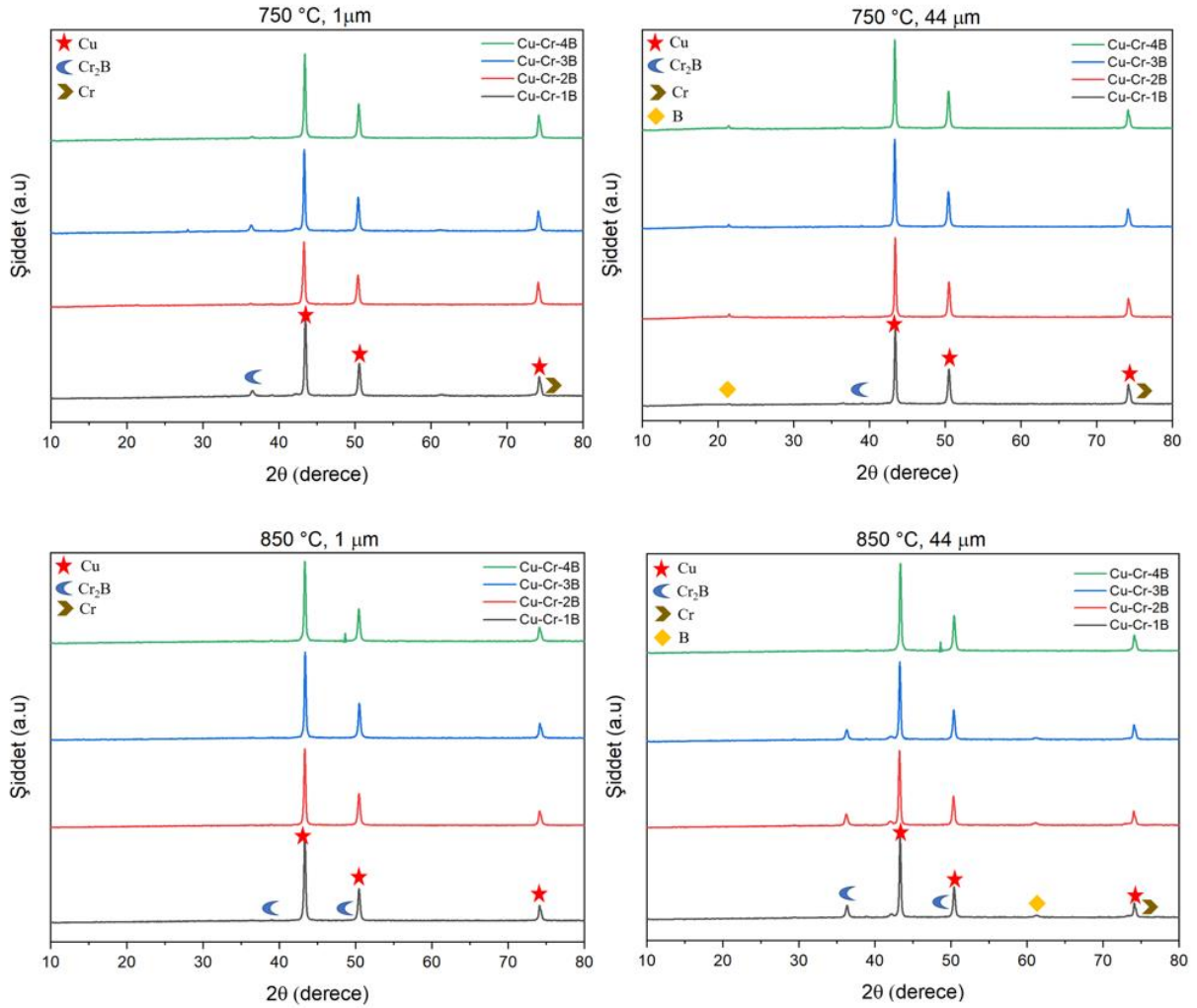
XRD ve Morfolojik Analizler

Üretimleri, yüzey işlemleri (zımparalanma ve parlatılması) tamamlanan farklı sinterleme ve tanecik boyutlarındaki Cr, B, B₄C, Gr ve CNT takviyeli Cu matrisli tribolojik analizler için hazırlanan hibrit kompozitlerin mikroyapıları XRD, SEM ve EDX analizleri ile Cu matris yapı içerisinde dağılım sergileyen takviye elemanı tayini yapılmıştır. XRD analizlerinde matris malzeme ve takviye elemanlarının karakteristik piklerini korudukları görülmüştür.

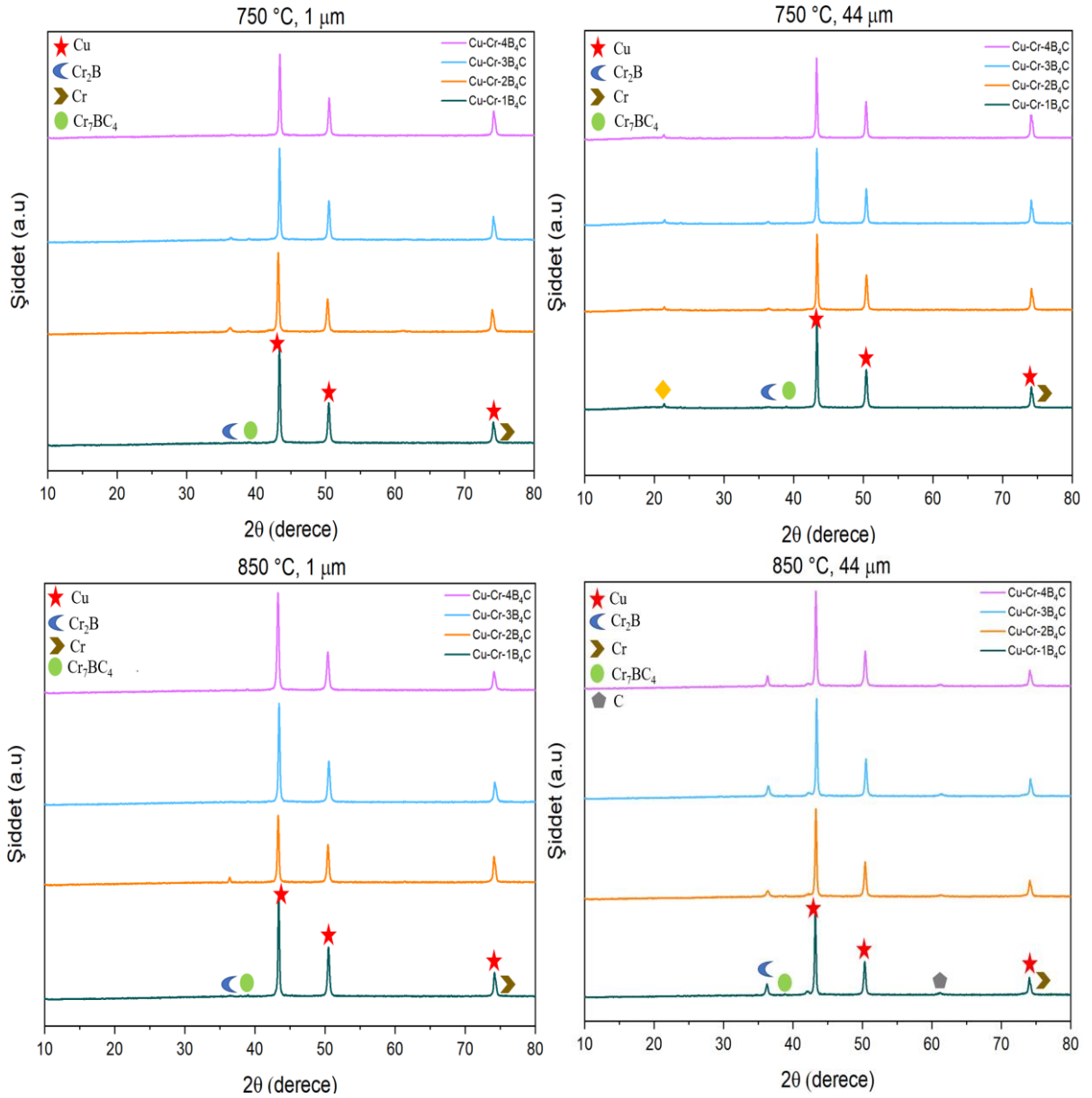
Krom (Cr), Bor(B) ve Bor karbür(B₄C) partikül takviyeli kompozitin XRD ve morfolojik analizleri

XRD analizlerinde krom bor karbür (Cr₇BC₄), bor krom (Cr₂B), bor bakır (CuB₂₄) ve heptakrom trikarbür (Cr₇C₃) bileşiklerinin kendi aralarında bağ yaptıkları ve düşük yoğunlukta oluştukları görülmüştür. Tane boyutunun küçülmesiyle Bor(B) ve Karbon (C) genişlemektedir. Ayrıca yoğunluk zayıflığı gözlenmiştir ki bu durum tane boyutunun

incelmesine ve atomik seviyedeki gerilmenin artmasına bağlanabilir. Buna ek olarak, birkaç B piki ve C piklerinin kaybolduğu tespit edilmiştir. Bunun bir nedeni, takviye taneciklerinin bilyalı karışma işlemi sırasında kolaylıkla çatlaması ve deformasyon ve/veya kırılma süreçlerine maruz kalmasıdır (İsfahani et al., 2019). Diğer bir neden ise takviye elemanlarının ayrışmasının meydana gelebilmesidir. (Koch, 1998). Bor (B) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri Şekil 27’ de ve Bor karbür (B_4C) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri Şekil 28’ de gösterilmiştir.



Şekil 27. Üretilen Bor(B) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri

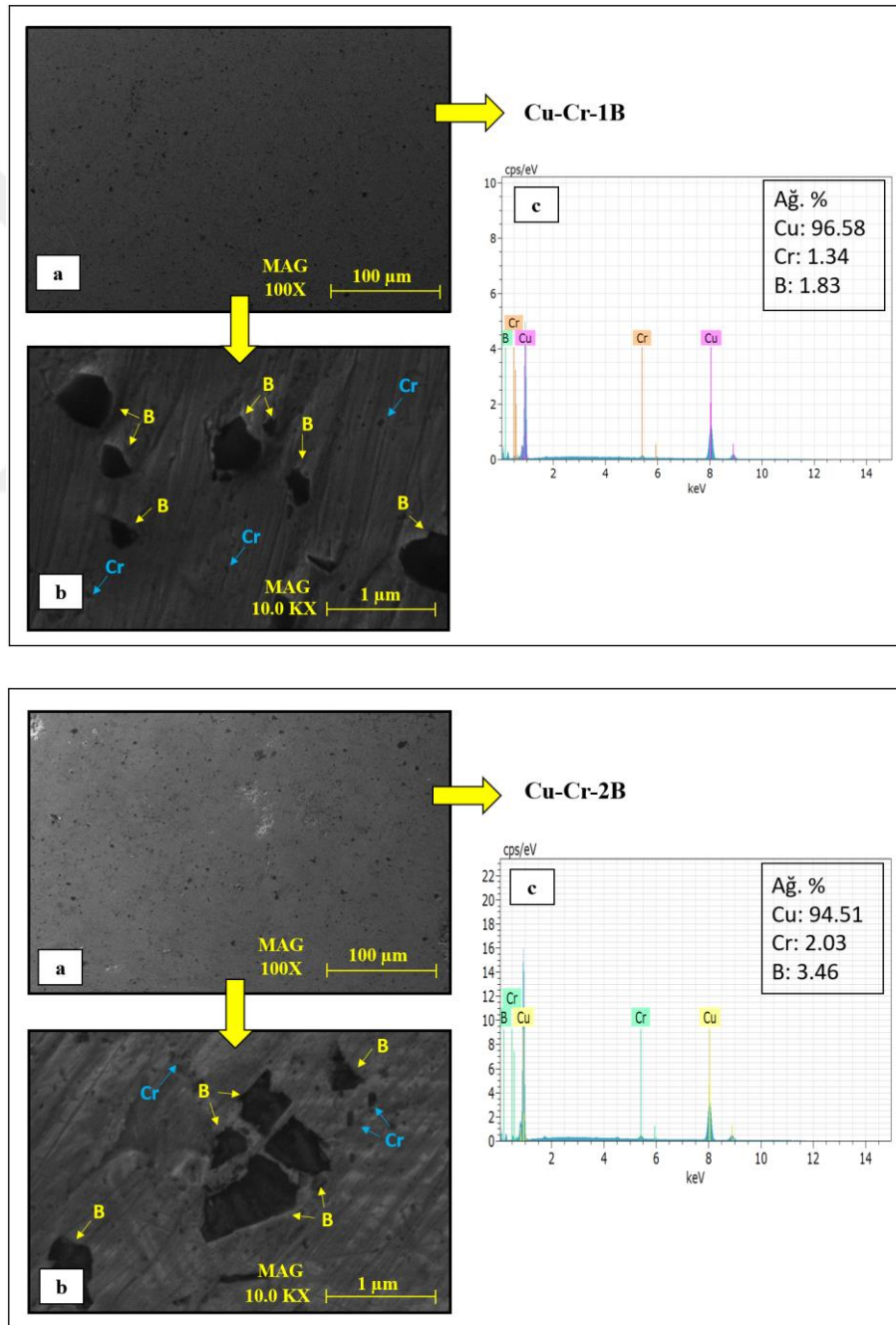


Şekil 28. Üretilen Bor karbür (B_4C) katkılı hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri

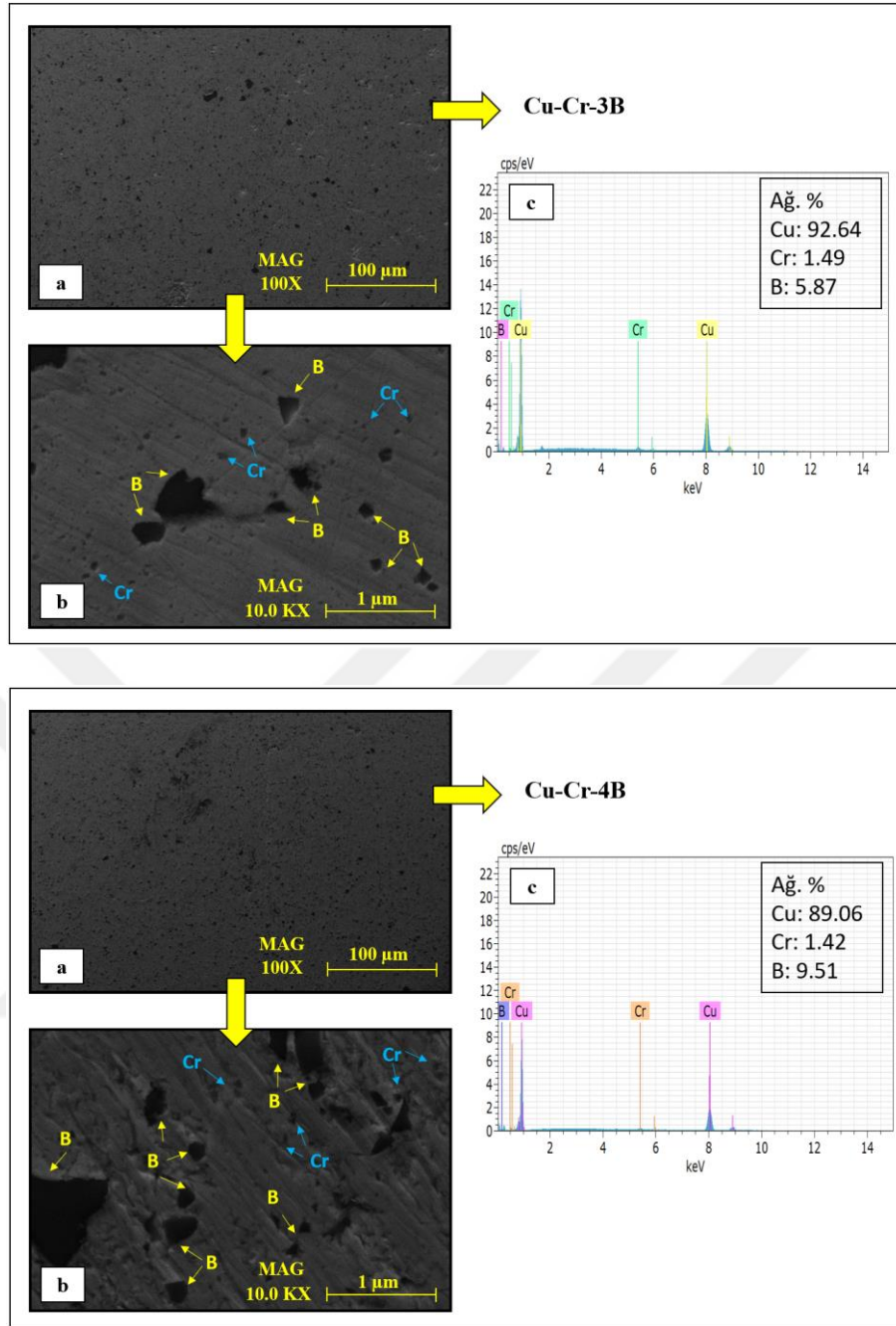
Tablo 6’da notasyonları verilen Cu esaslı ve farklı takviye ve oranlarından sentezlenen hibrit kompozitlerin 750 °C ve 850 °C sinterlenme sıcaklığında elde edilen SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları Şekil 29 ve Şekil 30’da gösterilmiştir. Ölçümlerdeki hata payı %10’dur. Takviye elemanlarının tanecik boyutu üzerindeki etkisi SEM görüntülerinde belirgin bir şekilde oluştuğu ve EDX harita görüntülerinde ise matris yapı üzerinde Cr, B ve B_4C takviyelerinin homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir. 44 µm partikül boyutuna sahip Cu numunelerinde, partiküller arasındaki basınç dağılımı, daha düşük özgül yüzeyden kaynaklanan etkiye göre daha düşüktür. Bu nedenle, takviyenin partikül boyutunun 44 µm ‘den 1 µm ‘ye düşürülmesiyle bağlı yoğunluk artmıştır. SEM görüntülerinde 1 µm’lik takviye elemanlarının yapı içerisinde daha homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Çünkü Cu matrisin partikül boyutu 44µm olduğu için, Cu partikülleri arasındaki boş alanlara 1 µm’lik B ve B_4C partikülleri daha rahat yerleştiği düşünülmektedir (Higashi & Kanno, 2020; Sankhla et al., 2022). Takviye elemanlarının partikül boyutunun küçültülmesi, B ve

B₄C partiküllerin sayısını önemli ölçüde artıracak ve böylece bunların topaklaşmasını önemli ölçüde azaltacaktır. Takviye tane boyutu arttıkça tanecikler arasındaki mesafe de artacaktır (Dieter & Bacon, 1976). Cr, B ve B₄C patikülleri, sinterleme sırasında tane sınırı hareketine engel teşkil ettiğinden, partiküller arasındaki mesafenin artırılması (iri taneli takviye nedeniyle), tane sınırı hareketine karşı engellerin sayısını azaltır. Bunun sonucunda taneler serbestçe hareket eder ve tane boyutu arttığı belirtilmiştir (Rahimian et al., 2010).

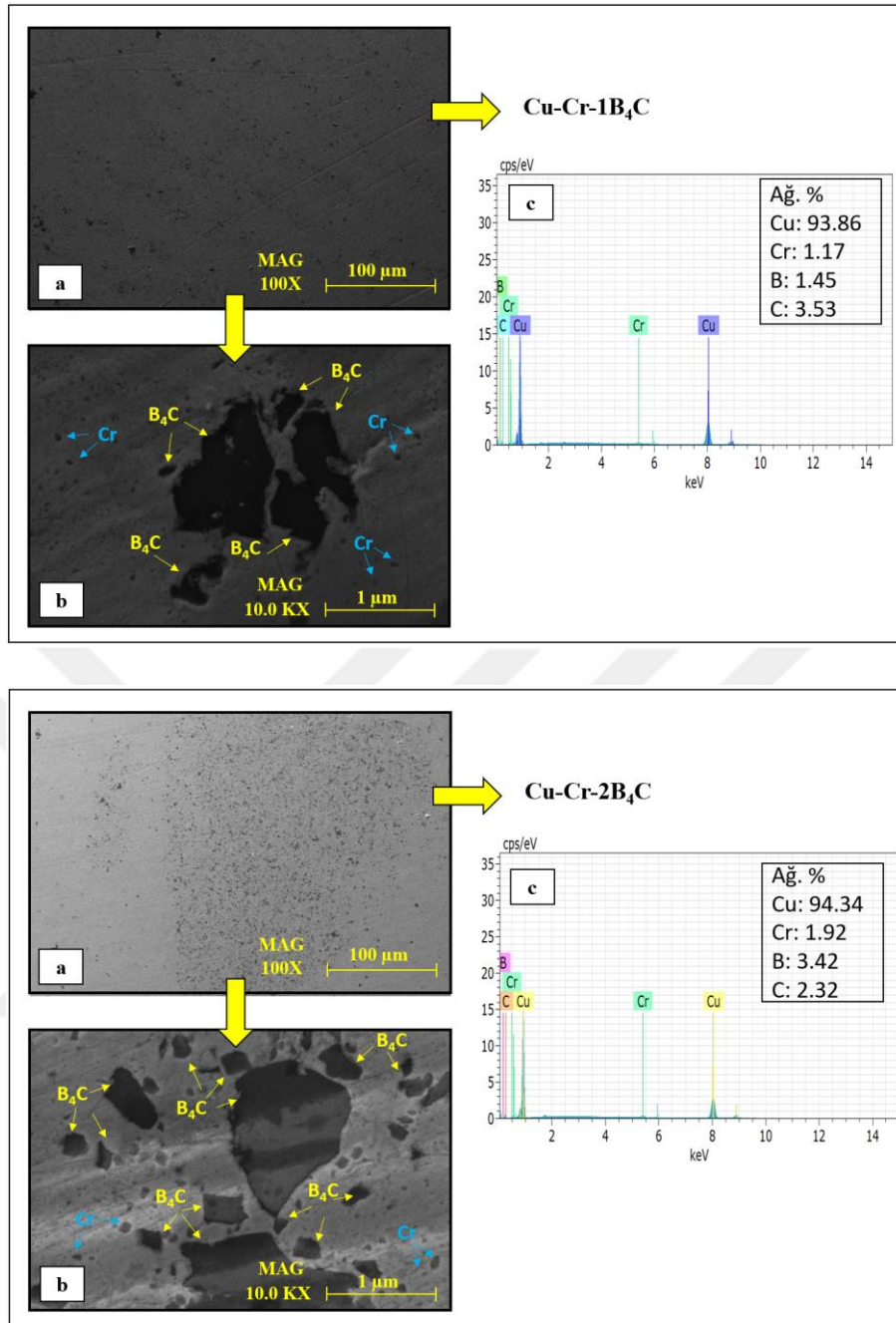
Sinterleme sıcaklığının artmasıyla gözenekler büzülür ve geometrileri dairesel bir şekil oluşturma eğilimi göstermiş başka bir deyişle taneciklerdeki gözeneklilik daha küçük, daha izole ve küresel hale gelmiştir (Javanbakht et al., 2016).



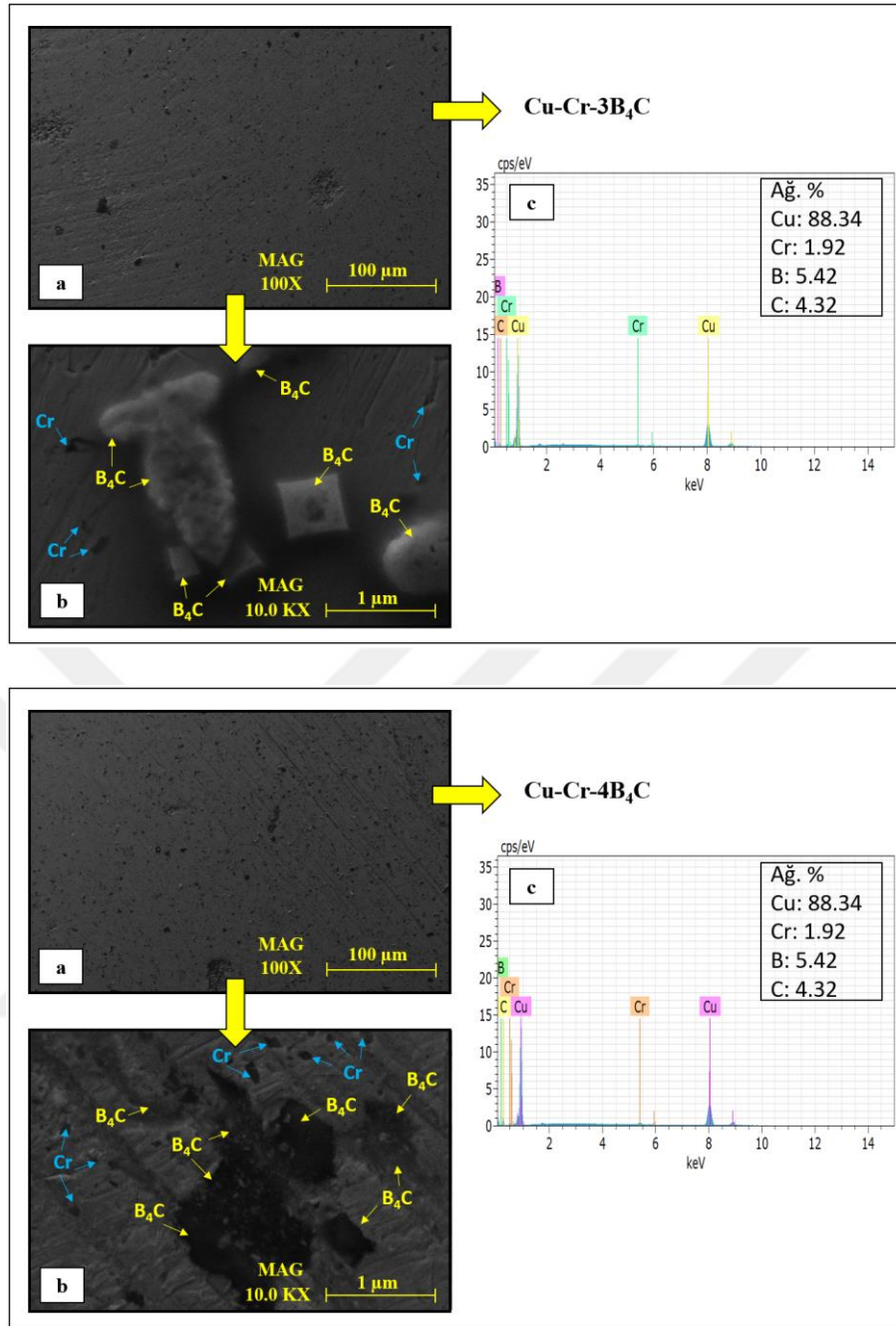
Şekil 29. Üretilen Bor(B) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 29. Üretilen Bor(B) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri (devam)



Şekil 30. Üretilen Bor karbür (B₄C) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri

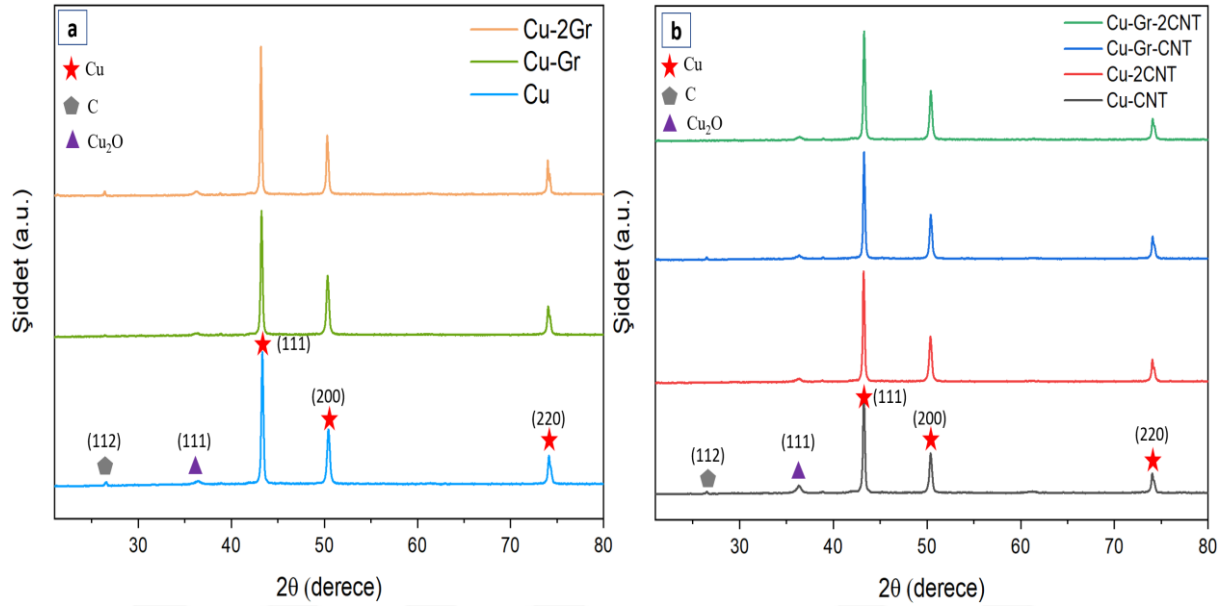


Şekil 30. Üretilen Bor karbür (B₄C) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri (devam)

Takviye malzemelerinin matris içinde uygun şekilde dağıtılmasıyla matristeki çatlakların büyümesi azalır. Bu nedenle sertlik, yoğunluk, gözeneklilik, mekanik çekme mukavemeti ve geçirgenlik iyileştirilir (El-Kady & Fathy, 2014; Kango et al., 2013; Liu Shanshan; Xiao, B.L.; Xue, P.; Wang, Wenrong; Ma, Zongyi, 2012).

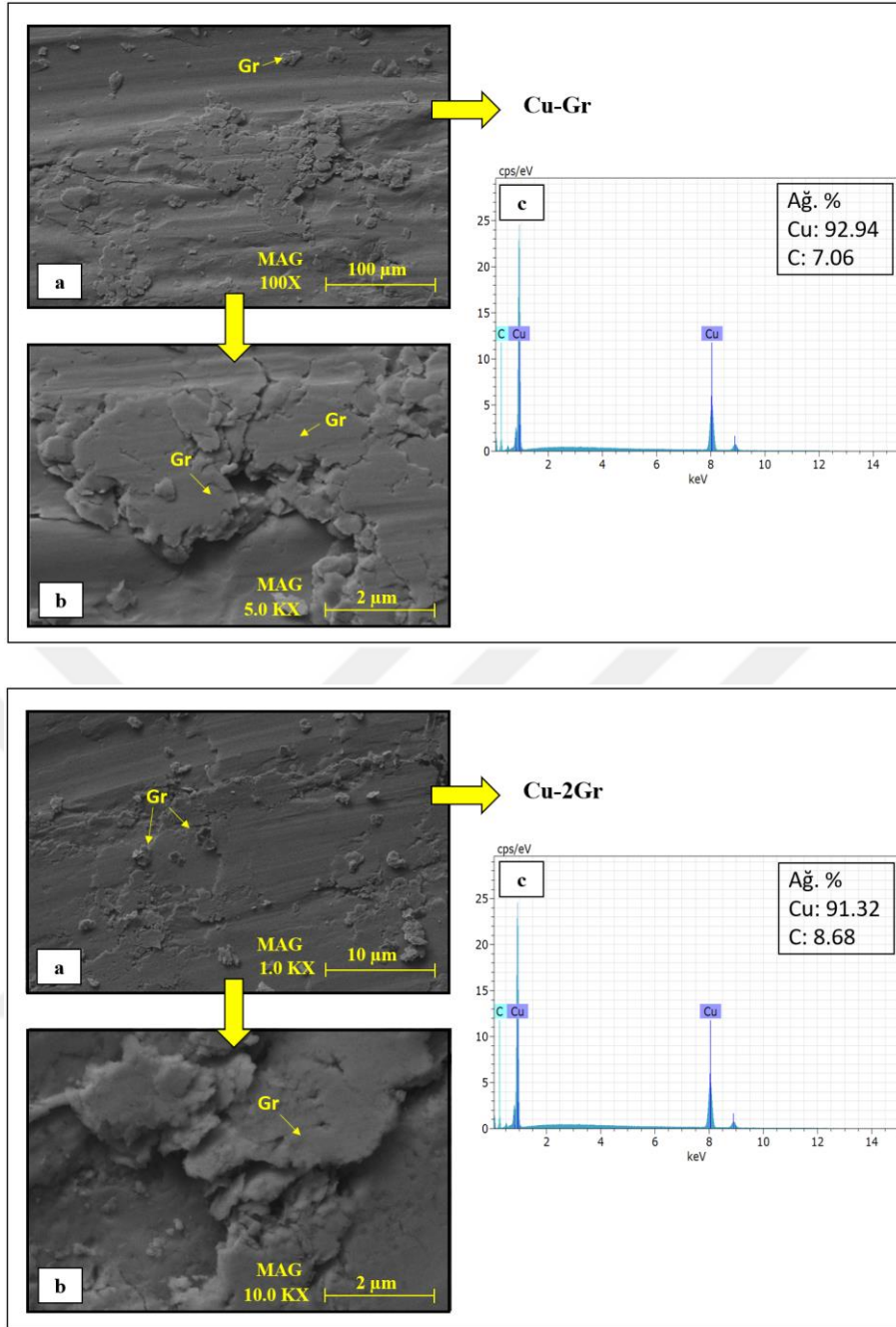
Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) partikül takviyeli hibrit kompozitin XRD ve morfolojik analizleri

Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) katkıli hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri Şekil 31’ de gösterilmiştir. XRD analizi sonucunda Cu matris yapısı içerisinde C ve Cu_2O bileşik ve elementlerinin oluşumunu göstermiştir. XRD analizlerinde matris malzeme ve takviye elemanlarının karakteristik piklerini korudukları görülmüştür. Bakırın üç önemli piki görülmekte olup bu pikler $\{1\ 1\ 1\}$, $\{2\ 0\ 0\}$, $\{2\ 2\ 0\}$ kristal düzlemlerinde oluşmaktadır.

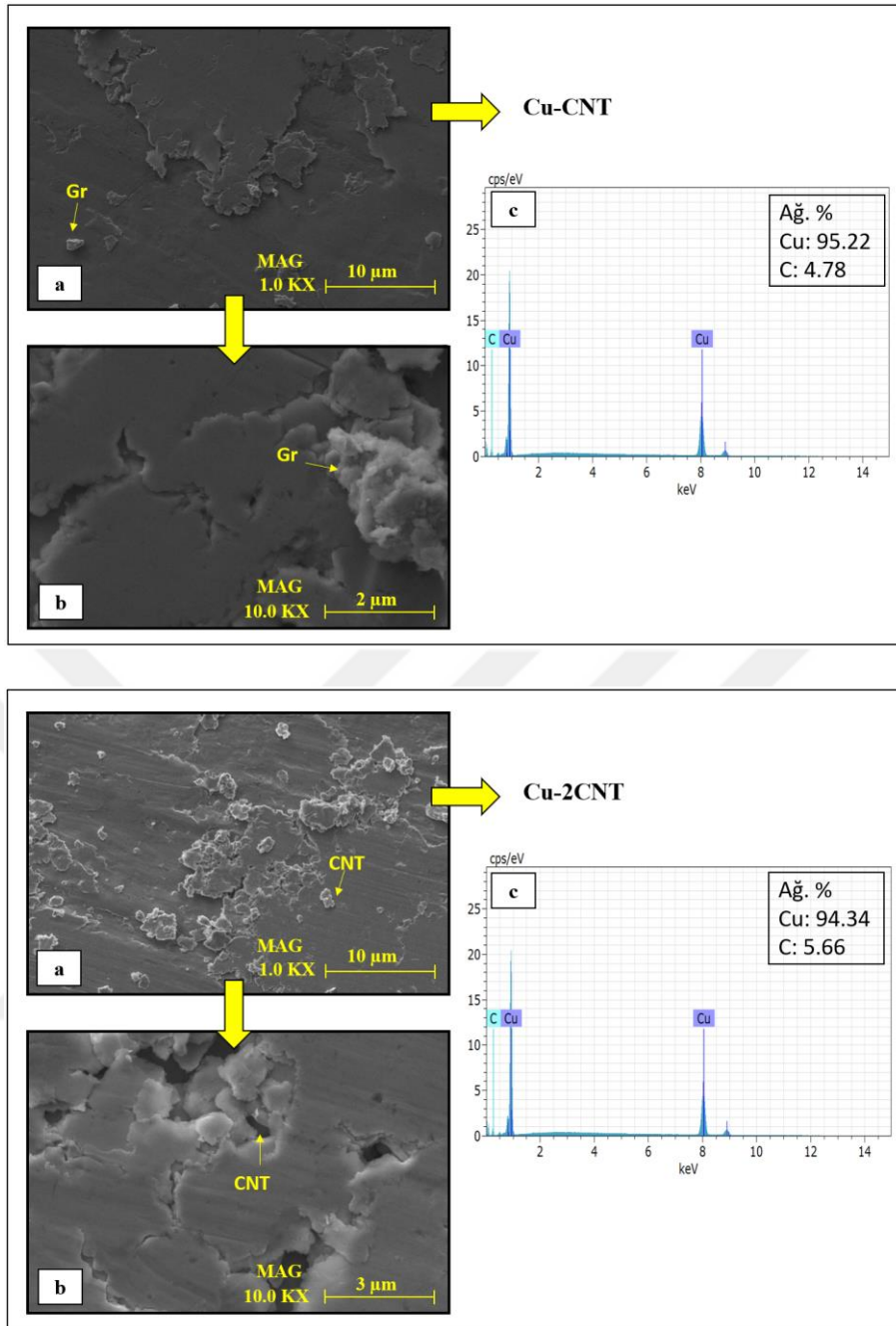


Şekil 31. Üretilen **a)** Grafit (Gr) ve **b)** Karbon nanotüp (CNT) katkıli hibrit kompozitlerin XRD kırınım desenleri

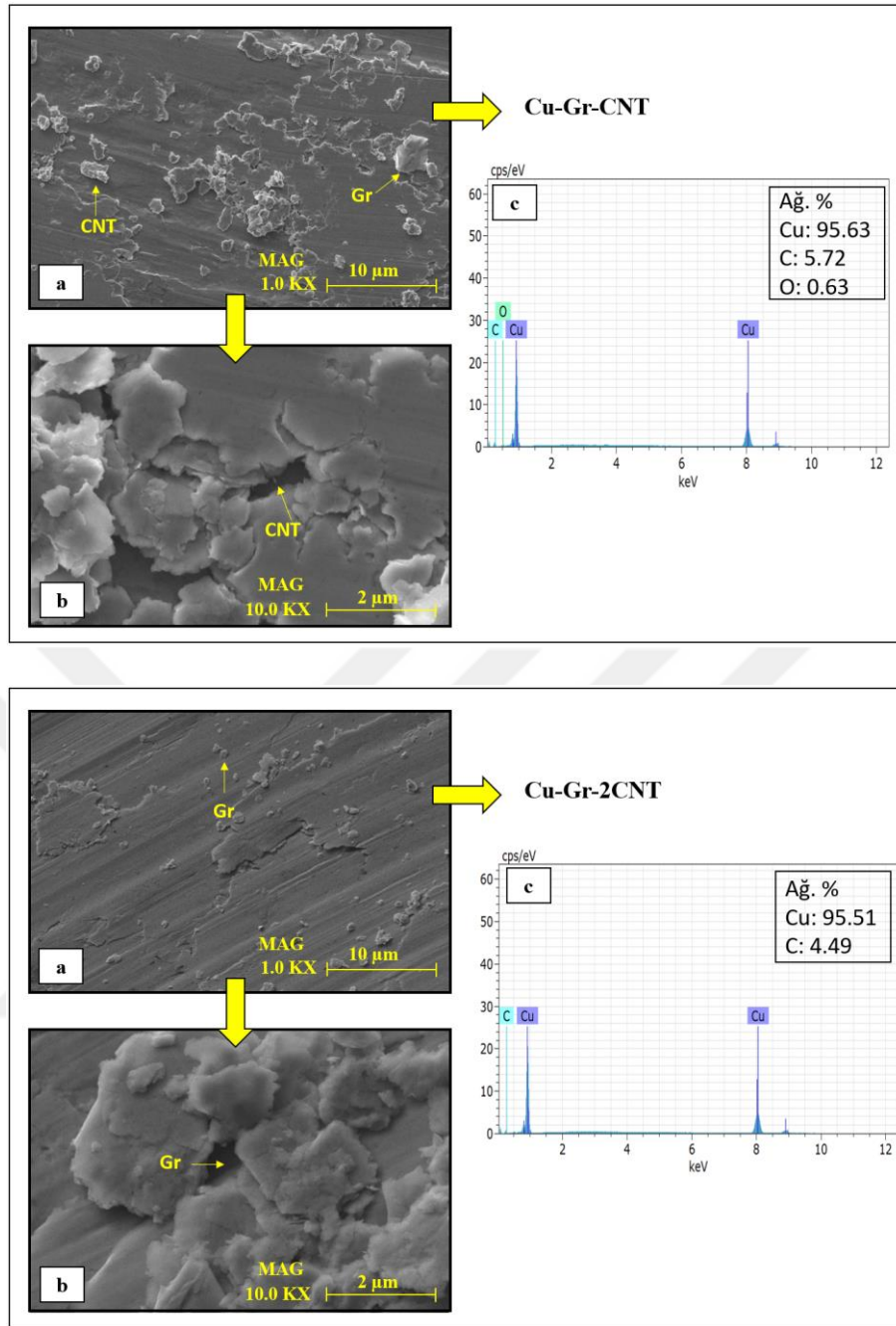
Kompozitlerin 850 °C sinterlenme sıcaklığında elde edilen SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları Şekil 32’de gösterilmiştir. Bakır matrisindeki grafitin homojen dağıldığı söylenebilir.



Şekil 32. Üretilen Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri



Şekil 32. Üretilen Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri (devam)



Şekil 32. Üretilen Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) katkılı hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri (devam)

Tipik Cu-CNT kompozit numune mikro yapısı Şekil 32 'de gösterilmektedir. Tüm kompozit numunelerde, CNT'lerin çoğu tane sınırlarında ve yakınında kümelenmiş olarak bulunurken, bazı CNT'ler tanelerin içinde de görülebilmektedir. Numunelerde gözeneklik ve tane sınırlarında Gr ve CNT'lerin yerleşik olduğu gözlenmiştir. Bu, CNT'lerin Cu içinde birlikte çözünme sorununa atfedilebilir (Maqbool et al., 2013), ki bu da CNT'leri katılaştırırken bakırın tane sınırlarında ayrılmaya zorlar (Bakshi et al., 2010). Şekil 32 incelendiğinde grafit partiküllerinin bakır matris içinde düzgün bir şekilde dağıldığını, ancak grafitin topaklaşmasından dolayı matris fazında takviye fazının zayıf bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Daha yüksek büyütmeye alınan SEM görüntüsünde (Şekil 32-b), grafit

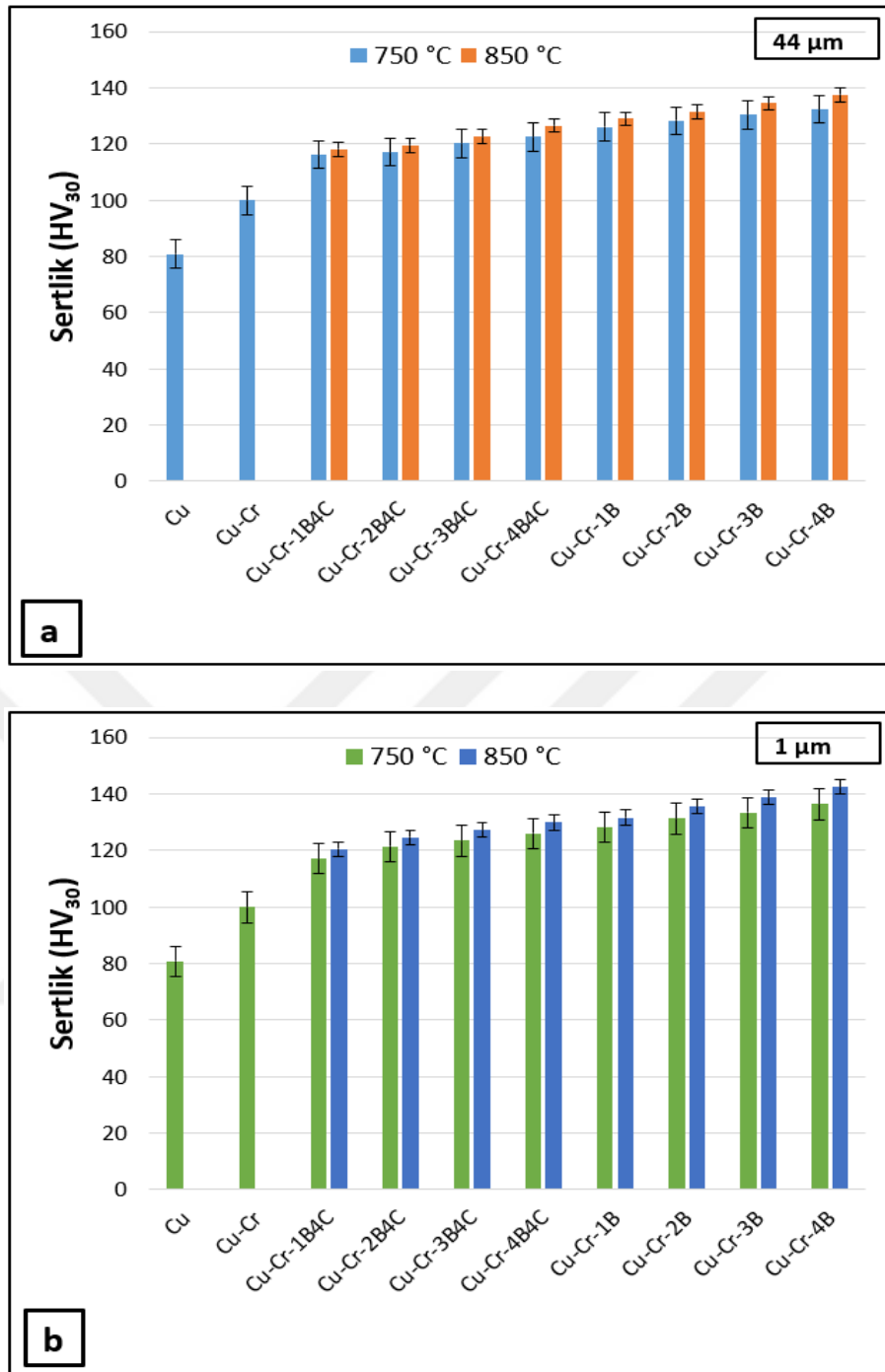
partiküllerinin bakır matrisle hatalı şekilde bağlandığını ortaya çıkarmıştır. Grafit partiküllerinin kümelenmesi de gözlemlenmiştir. Bakır ve grafit arasındaki uygunsuz bağ oluşumu ve grafitin topaklaşması, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir (Ngai et al., 2013). Saf bakır ve bakır-grafit kompozitlerin elementel bileşimine yönelik enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) analizi Şekil 32-c' de verilmiştir. EDS sonucu, bakır matristeki grafit takviyesi arttıkça karbon içeriğinin arttığını ve bu durumun bakır matrisli kompozitlerdeki takviye fazının oldukça iyi dağılımını yansıttığını göstermektedir.

Sertlik Testleri

Sertlik testleri sırasında 7 farklı noktadan ölçümler alındı ve bu değerlerin ortalamaları alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri Vickers sertliğinde bulunmuş olup saf Cu değerinin sertlik değerinin literatür değerleri ile benzer olduğu görülmüştür (Uddin et al., 2010).

Krom (Cr), Bor (B) ve Bor karbür (B₄C) partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertliği

Kromun varlığı malzemenin mekanik özelliklerini geliştirerek daha yüksek sertliğe, yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahip Cu-Cr alaşımlarının oluşmasını sağlar. Ötektik sıcaklıkta bile bakırdaki krom son derece düşük katı çözünürlüğe sahiptir (Q. Zhao et al., 2014). B₄C' nin malzeme maliyetinin yüksek olması ve zayıf ıslatma özellikleri nedeniyle Cu-Cr ile güçlendirilmiş B₄C kompoziti üzerinde çok az araştırma yapılmıştır. B₄C partiküllerinin ağırlık yüzdesini artmasıyla sertlik artmıştır. Bu durum Cu matrisinde son derece sert B₄C partiküllerinin varlığından kaynaklanmıştır (Sharifi et al., 2011). Cu-Cr-B₄C kompozitlerinin sertliği, Cu-Cr matrisindeki B₄C takviye oranının artmasıyla arttığı literatür çalışmalarıyla da desteklenmektedir (S. C. E. Singh & Selvakumar, 2017). Sertlik testlerinde Cr ve B takviyesinin de kompozit numunelerin sertlik değerlerini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 33). Özellikle B miktarındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Partikül boyutunun küçülmesiyle kompozitin sertliğinin arttığı görülmüştür. B takviyesinin metal matrisli malzemeler üzerinde sertlik değerini arttırdığı literatür çalışmalarıyla da desteklenmektedir (Alihosseini et al., 2017; Alizadeh & Taheri-Nassaj, 2011; N. Kumar, Bharti, Dixit, et al., 2020). Hibrit kompozitlerin sertlik değerleri incelendiğinde, ağırlıkça %4 katkılı B numunesinde en yüksek sertlik (142,43 HV) sonucu elde edilmiştir.



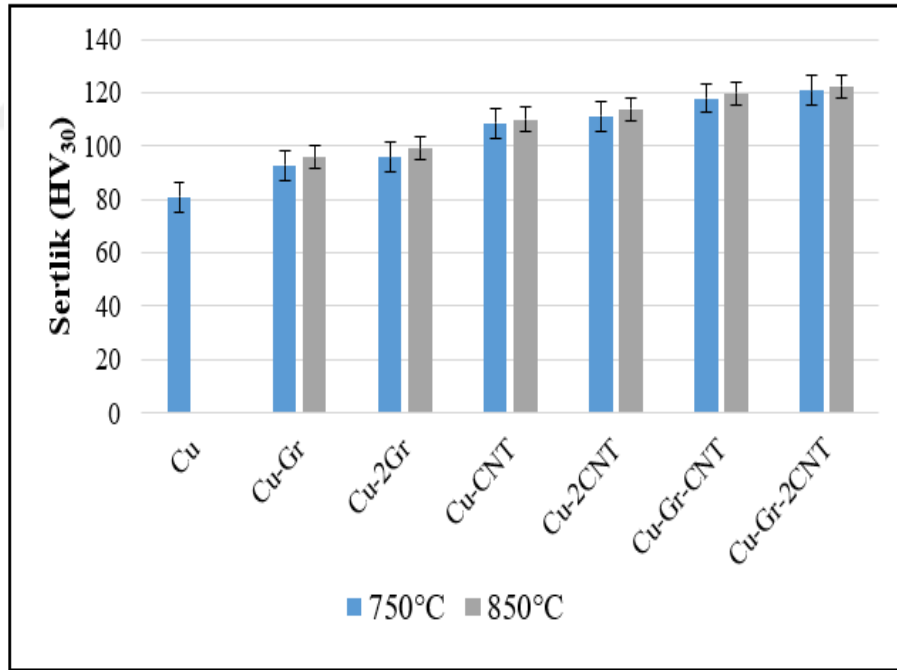
Şekil 33. B ve B₄C partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik değişimleri **a)** 44 μm **b)** 1 μm

Sinterleme sıcaklığının artmasıyla hibrit kompozitlerin sertlik sonuçlarının arttığı, hem B₄C katkısında hemde B katkısında görülmüştür. Literatür çalışmaları incelendiğinde B₄C partiküllerinin takviye elemanı olarak kullanıldığı bir diğer çalışmada Al matrisli malzemelerin toz metalurjisi ile üretimi ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. 3 farklı sinterleme sıcaklığında (500, 550, 600 C°) hazırlanan kompozitlerde de sinterleme sıcaklığının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür (Alihosseini et al., 2017). Cu matrisli kompozitlerin sertliklerinin artmasındaki diğer bir durum ise takviye elemanı olarak

B₄C bulunması nedeniyle Orowan mekanizmasına bağlı olarak sertlik de artmaktadır (Alizadeh & Taheri-Nassaj, 2011). Diğer bir parametre olan takviye elemanlarının (B₄C ve B) tanecik boyutlarının matris malzeme üzerindeki sertliklere etkisinde tanecik boyutunun azalmasının sertlik değerlerini artırdığı sonucuna varılmıştır. Bu duruma tanecik boyutunun küçülmesinin dislokasyonu da arttığı ve böylelikle Cu matrisli hibrit kompozitlerin sertlik değerlerini artırdığı düşünülmektedir (Przestacki, 2014; Ye et al., 2019). Saf B katkısının B₄C katkısına göre daha yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği ve sırasıyla 142 HV ve 129 HV gibi değerlere ulaşıldığı görülmüştür. Sinterleme sıcaklığı, takviye tanecik boyutu parametreleri incelendiğinde en yüksek sertlik sonucu 850 °C ‘de sinterlenen 1 µm’ lik B’nin Cu-Cr-4B hibrit kompozitinde elde edilmiştir. Cu-Cr-4B numunesinde saf Cu numunesine göre %76.25’ lik daha yüksek bir değere ulaşılmıştır.

Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik analizleri

Kompozit numunelerin, takviye oranlarına göre ölçümünden elde edilen sertlik değerleri Şekil 34’de gösterilmektedir.



Şekil 34. Üretilen Gr ve CNT partikül takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik değerleri

Şekil 34’deki grafik incelendiğinde Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) takviyeli kompozit numunelerin takviye miktarı arttıkça sertlik değerleri artmıştır. Van der Waals kuvvetleri tarafından yönlendirilen Gr ve CNT üretim süreci sırasında topaklanmaya eğilimlidir. Ayrıca grafitin bakıra afinitesinin zayıf olması nedeniyle etkili arayüz bağı elde edilememektedir (Rubel et al., 2019). Bu nedenle, yüksek performanslı bakır matrisli kompozitleri üretmek için iki ana

gereksinimin karşılanması gerekir: 1) Takviyelerin (Gr ve CNT) matris içinde düzgün dağılımı, 2) Bakır ve Gr/CNT arasında yeterli arayüz kuvveti oluşması (Ramezani et al., 2022). Takviye miktarındaki artış ile kompozit yapıdaki takviye dağılımının homojenliği giderek bozulmuş, takviye topaklanmaları meydana gelmiştir (F. Chen et al., 2016). Bu durum yapıda gözeneklik oluşmasına neden olmuştur. Takviye miktarı arttıkça geniş topaklanma alanları oluşmuş ve zaten yumuşak fazda olan nanomalzemeler kompozit yapının yumuşamasına neden olmuştur. Tüm takviye oranlarında karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerinin grafit takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kompozit yapıda grafit nanomalzemelerin düzlemsel ağ yapısının, karbon nanotüplerin içi boş silindirik yapısına göre daha geniş bir alana dağılmasıyla açıklanabilir. Bu nedenle grafit takviyeli kompozitler tüm takviye oranlarında daha yumuşak kalmıştır. Grafit ve Karbon nanotüp takviyesinin metal matrisli malzemeler üzerinde sertlik değerini belirli bir noktaya kadar artırdığı ardından azalma eğiliminde olduğu literatür çalışmalarıyla da desteklenmektedir (Guiderdoni et al., 2013; Muharrem, 2019; Uddin et al., 2010).

Kompozit yapı içerisine katılan CNT ve Gr takviye malzemelerinde topaklanmaların yaşandığı tespit edilmiştir. Hem Gr hemde CNT takviyeli kompozit numunelerde takviye miktarlarının artışına bağlı olarak sertlik değerleri artmıştır. Gr takviyeli kompozitlerde CNT takviyeli kompozitlere göre bütün takviye oranlarında daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu duruma kompozit yapı içerisindeki, Gr nano malzemelerin düzlemsel ağ yapısının, CNT'nin içi boş silindirik yapısına göre daha geniş yüzey alanına dağılmış olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Saf bakırın mekanik dayanımı Gr ve CNT takviyesiyle belirgin bir şekilde artmıştır.

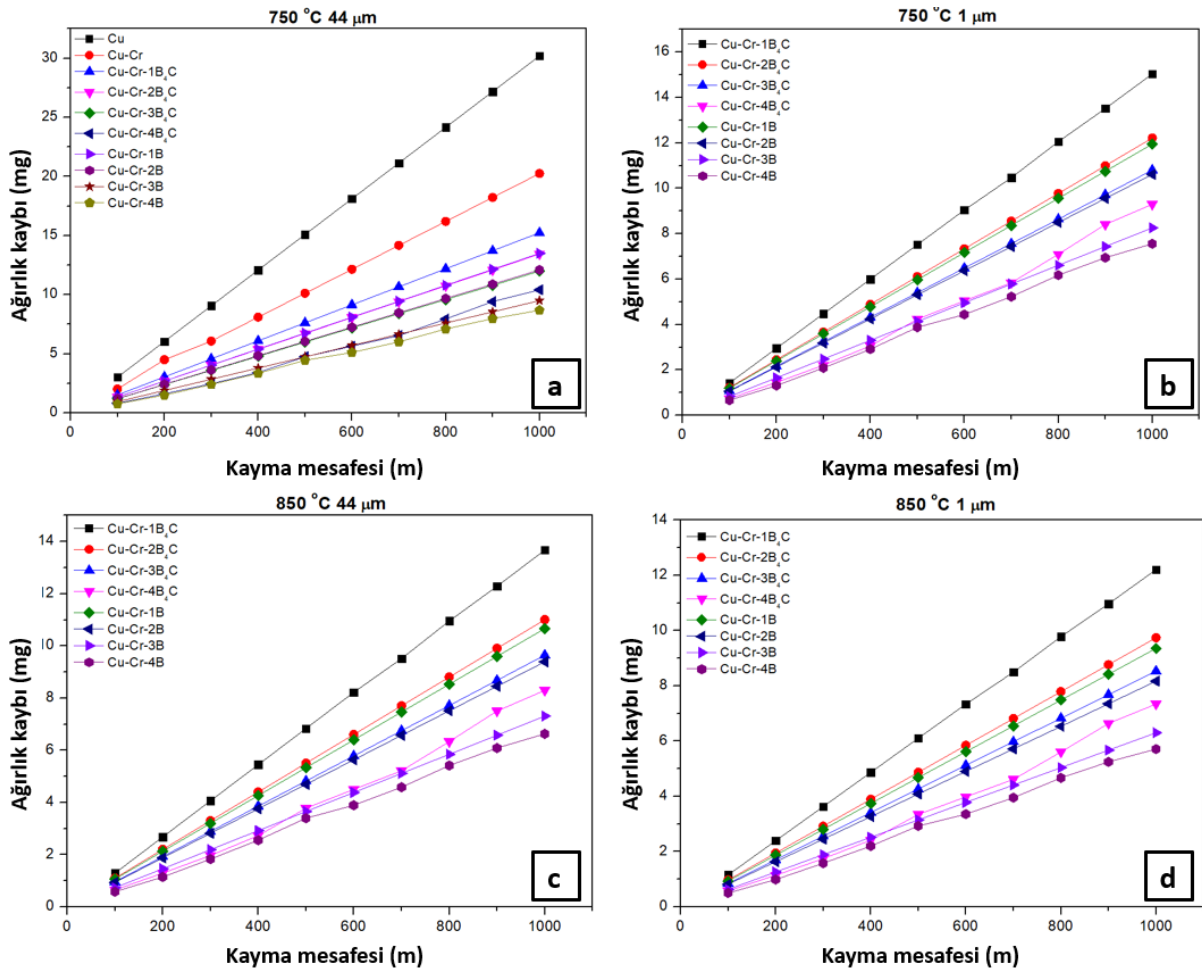
Sinterleme sıcaklığının artmasıyla kompozitlerin sertlik sonuçlarının arttığı hem Gr katkısında hem de CNT katkısında görülmüştür. Sinterleme sıcaklığı ve takviye oranları parametreleri incelendiğinde en yüksek sertlik sonucu 850 °C'de sinterlenen Cu-Gr-2CNT hibrit kompozitin de elde edilmiştir. Cu-Gr-CNT numunesinde saf Cu numunesine göre %51,4' lük daha yüksek bir değere ulaşılmıştır.

Aşınma Testleri

Krom (Cr), Bor (B) ve Bor karbür (B₄C) partikül takviyeli Hibrit kompozitlerin aşınma davranışı

Hibrit kompozitlerin tek yük altındaki aşınma ağırlık kaybı grafikleri Şekil 35'de gösterilmiştir. Takviye elemanları (Cr, B ve B₄C) aşınma deneyleri sonucundaki ağırlık kayıpları miktarında azalmalar meydana gelmiştir. Numunelerdeki aşınma yüzeylerindeki meydana gelen direncin, sertliğin iyileştirilmesine, matris ve seramik partiküller arasındaki olağanüstü ara yüzey bağlarına, sert B₄C ve B takviye partiküllerinin gömülmesine, yapıdaki

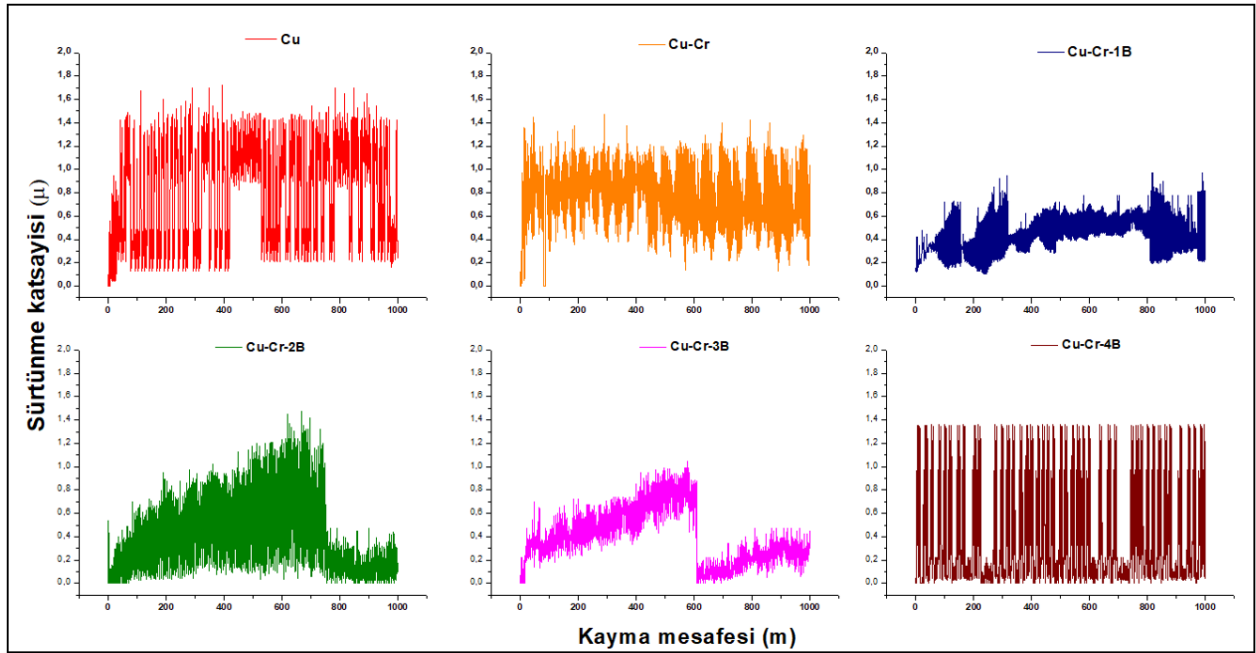
tane incelmeye bağlanabilir. Hibrit kompozitlerin aşınma oranındaki azalma, B_4C ve B' nin ağırlık %'si arttıkça daha kalın ve daha yoğun hale gelen bir tribotabakanın etkili bir şekilde oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Ye et al., 2019). Aynı zamanda, kompozitlerin aşınma direncindeki artış, katı yağlayıcı özelliği ile B takviyesinin varlığına bağlanmıştır. Saf B kompozitlerinin B_4C kompozitlerine göre daha üstün sonuçlar vermesinde sinterleme sıcaklığı olarak seçilen 750 ve 850°C' de B_4C ile Cu matris malzemenin kendi aralarında yeni bileşikler oluşturması ve B/C oranının miktarının sebep olduğu düşünülmektedir (Deepa et al., 2011a).



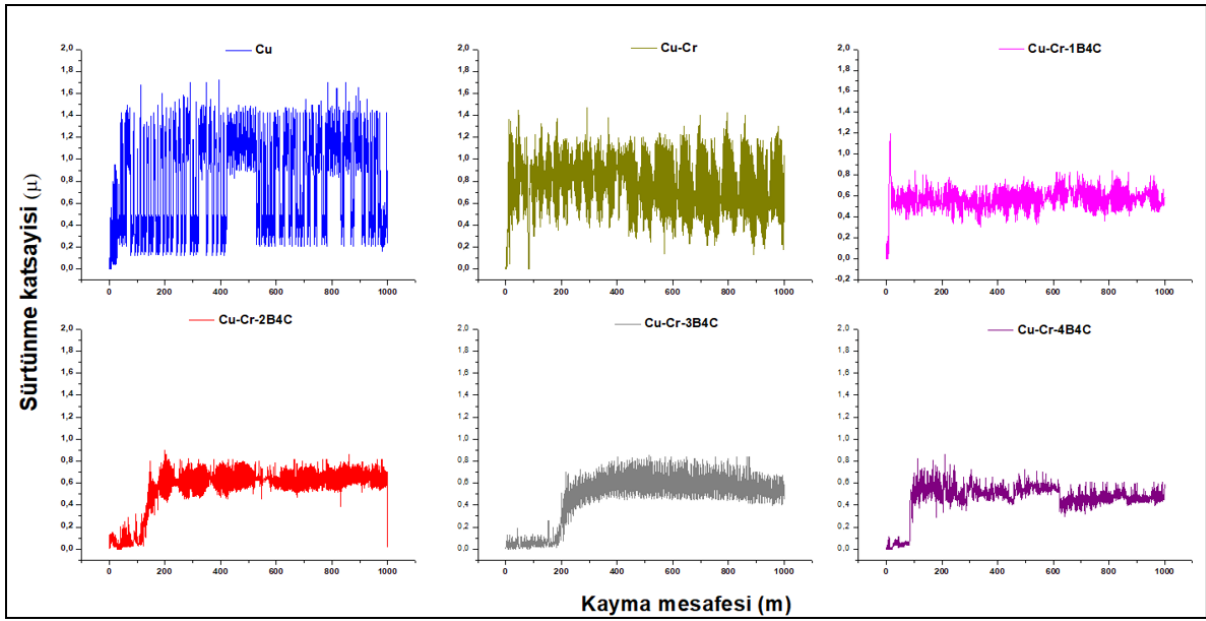
Şekil 35. Farklı içerikteki partikül takviyeli hibrit kompozitlerin aşınma sonrasındaki ağırlık kayıpları; **a)** 750°C sinterleme sıcaklığı için 44µm, **b)** 750°C sinterleme sıcaklığı için 1µm, **c)** 850°C sinterleme sıcaklığı için 44µm, **d)** 850°C sinterleme sıcaklığı için 1µm

Sürtünme katsayısı sonuçlarında Cr, B ve B_4C katkılarının sürtünme katsayısı değerini düşürdüğü ve sürtünmeye karşı direncin arttığı gözlemlenmiştir. B ve B_4C katkısının Cu matrisine sıkı bir şekilde bağlanmasıyla köprü görevi gördüğü ve mekanik bağlanma yerine kimyasal bağların oluşmasına yol açtığı ve sonuç olarak ara yüzey tabakaya aşınma esnasında zarar vermek için daha fazla enerji tüketmesi gerekmiştir. B ve B_4C , kırılğan Cu matrisini ve kompozitlerini belirli bir dereceye kadar kırılmaya karşı koruyabilen oldukça yüksek bir

dayanıma sahip bir takviye malzemedir. Üretilen hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 36-37’de ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri Tablo 9’da gösterilmiştir. Sertlik sonuçlarına benzer sonuçlar sürtünme katsayısı değerlerinde de elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ve takviye elemanlarının tanecik boyutunun azalmasıyla hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı ve aşınmaya karşı gösterilen direnci artırdığı görülmüştür. Saf Cu numunesine göre sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde aynı tanecik boyutunda 750 °C’de hazırlanan hibrit kompozitlerde Cu-Cr-4B numunesinde %50.06, Cu-Cr-4B₄C numunesinde ise %41.5’lik bir düşüş gözlenmiştir. 750 °C’de 1 µm ‘lik takviye elemanları için alınan sonuçlarda ise saf Cu numunesine göre Cu-Cr-4B numunesinde %52.32, Cu-Cr-4B₄C numunesinde ise %44.27’lik bir düşüş elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının tribolojik özelliklere etkisi incelendiğinde, aynı tanecik boyutunda 750 °C’ de alınan sonuçlarla karşılaştırma yapıldığında 850 °C’ deki 44 µm’de Cu-Cr-4B numunesi 750 °C’ deki Cu-Cr-4B numunesine göre %10.07, Cu-Cr-4B₄C numunelerinde ise sadece %10.10 ‘luk bir düşüş gözlenmiştir. 850 °C’ deki 1 µm tanecik boyutunda Cu-Cr-4B numunesinde %6.44’lük, Cu-Cr-4B₄C’de ise %6.69’luk bir düşüş gözlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerlerinde alınan sonuçlarda Cr, B ve B₄C takviyesi saf Cu numunesinde çok yüksek bir aşınma direnci sağlamıştır. Sinterleme sıcaklığı arttıkça ve takviye tanecik boyutunun küçülmesiyle numunelerin tribolojik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır (N. Kumar, Bharti, Dixit, et al., 2020; J. Li et al., 2018; Samal et al., 2013).



Şekil 36. Cu-Cr-B hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri



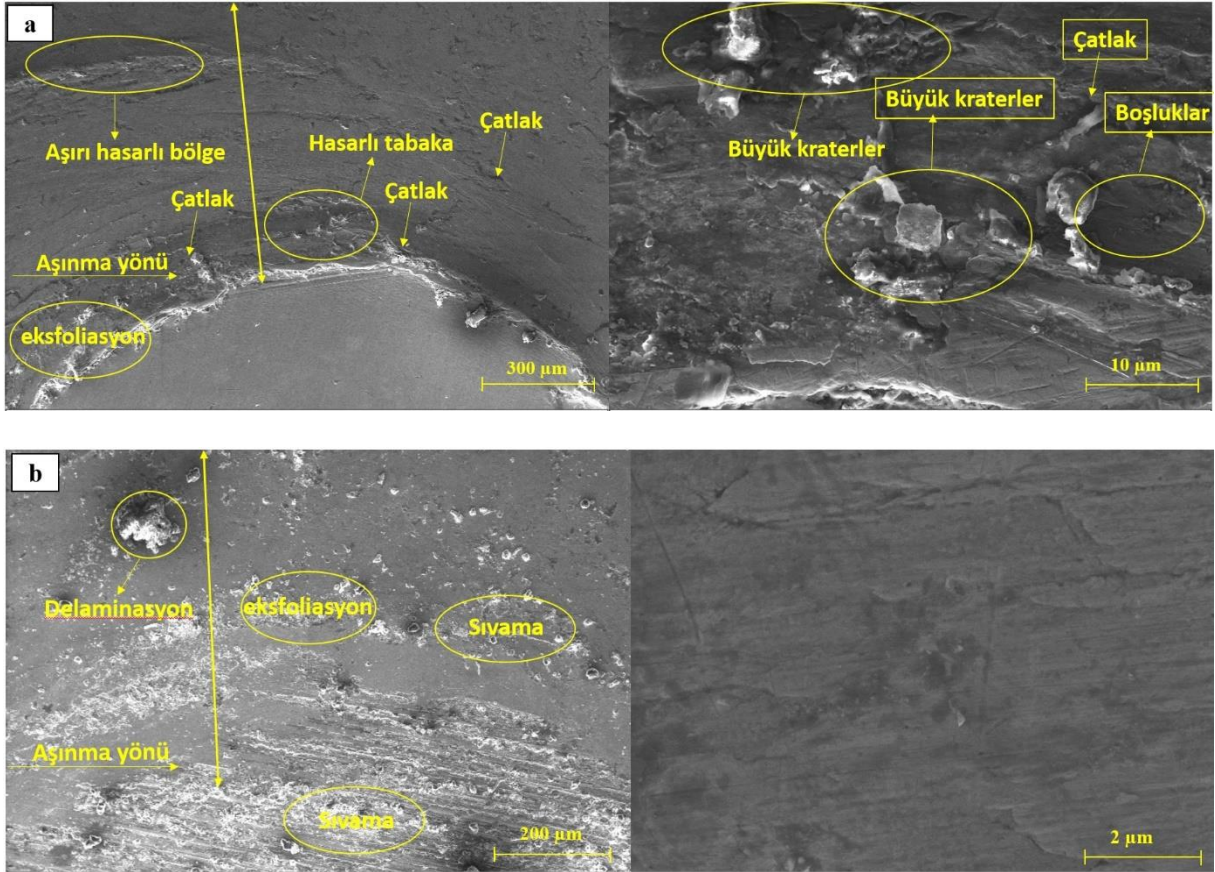
Şekil 37. Cu-Cr-B₄C hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri

Tablo 9. Hibrit Kompozitlerin Ortalama Sürtünme Katsayısı Değerleri

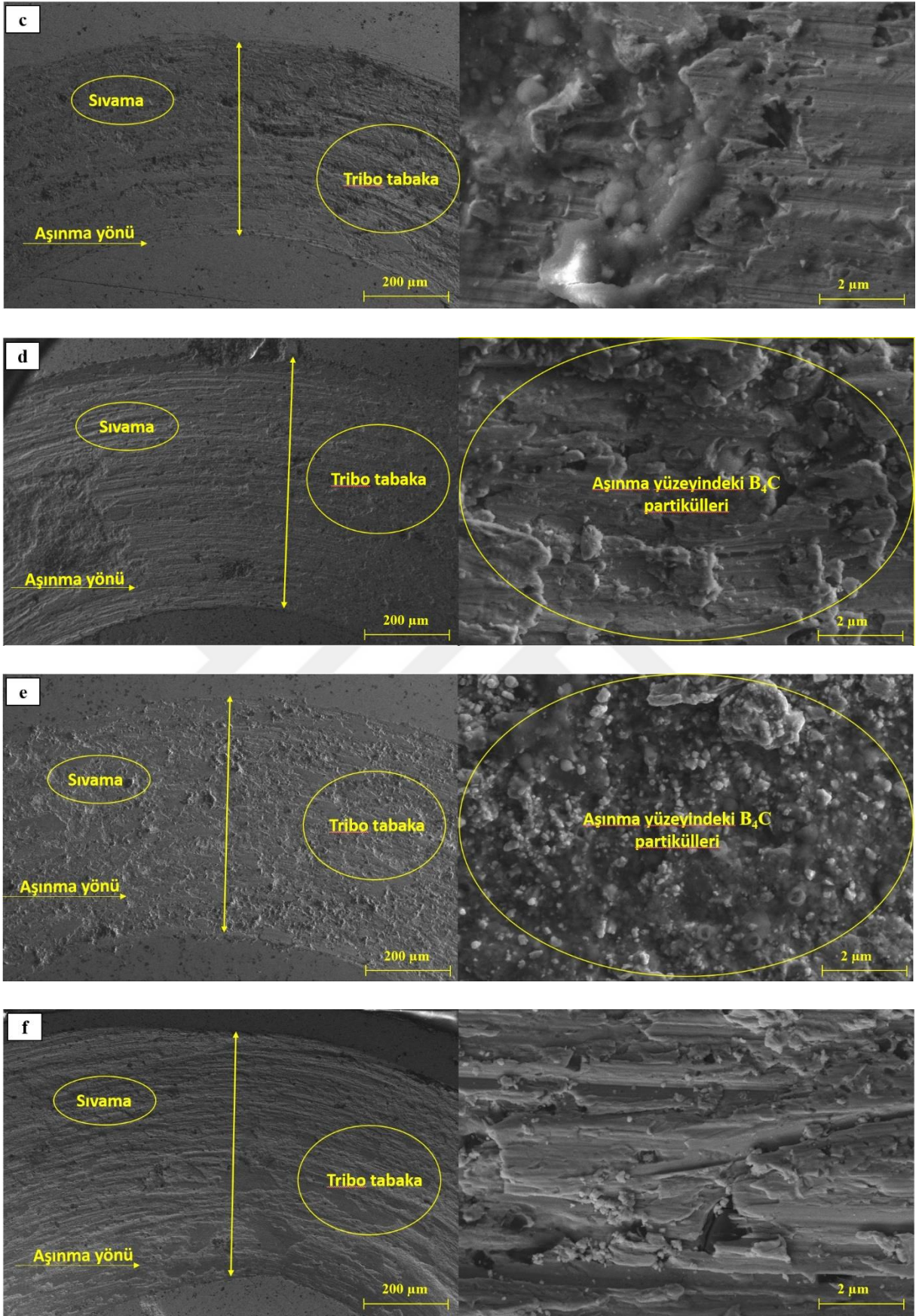
Numune	44μm		1 μm	
	750°C	850°C	750°C	850°C
Cu	0,795245758			
Cu-Cr	0,774708084			
Cu-Cr-1B	0,421806733	0,401721	0,378982	0,354189
Cu-Cr-2B	0,419	0,399048	0,37646	0,351832
Cu-Cr-3B	0,406953865	0,387575	0,365637	0,341717
Cu-Cr-4B	0,397989022	0,379037	0,357582	0,334189
Cu-Cr-1B₄C	0,572581979	0,545316	0,514449	0,480794
Cu-Cr-2B₄C	0,556092297	0,529612	0,499634	0,466947
Cu-Cr-3B₄C	0,476912948	0,454203	0,428493	0,400461
Cu-Cr-4B₄C	0,465519173	0,443352	0,418256	0,390894

Aşınma sonrası hibrit kompozitlerdeki aşınma izlerini incelemek için alınan SEM görüntüleri Şekil 38 ve 39' da gösterilmiştir. SEM görüntülerinden de görüleceği üzere, saf Cu numunesinin yüzeyinde aşınma sonrası derin çatlaklar, izler ve derin boşluklar oluşmuştur. Çalışmada kullanılan takviye elemanlarının eklenmesiyle oluşan hibrit kompozitlerin saf Cu numunesine göre çok daha yüksek aşınma dirençleri elde edilmiştir. B ve B₄C katkısının artması ile aşınma yüzeylerinde daha yoğun B ve B₄C partiküllerinin olduğu ve aşınmaya karşı direnci arttırdığı gözlemlenmiştir. Saf Cu ve Cu-Cr numunelerinde görülen çatlakların B ve B₄C takviyeli aşınma yüzeylerinde görülmediği, numunelerin daha az deforme olduğu ve

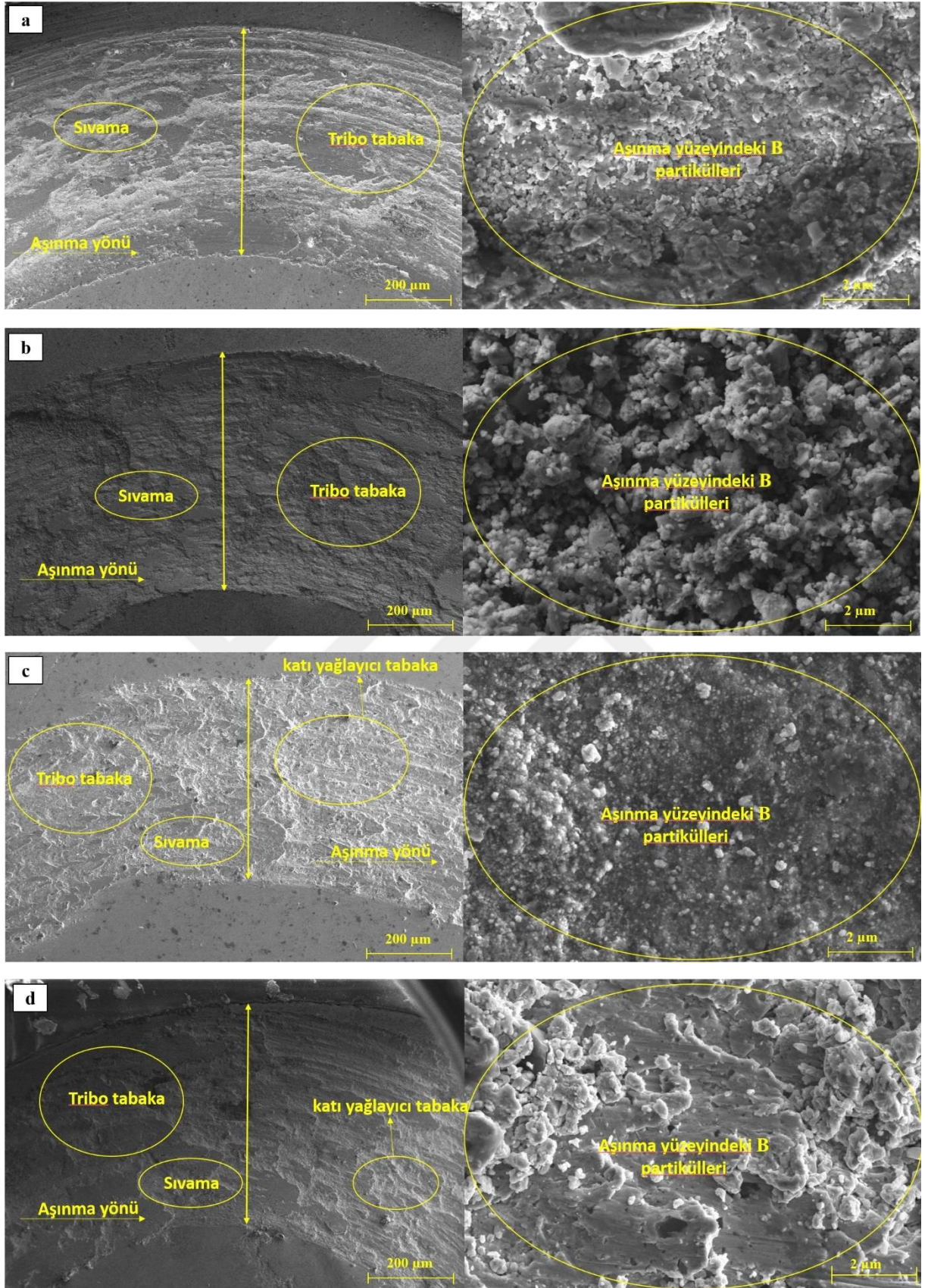
aşınma derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. B_4C takviyesinin aşındırıcı uç ile Cu matris arasındaki aşınmayı artırıcı bir direnç sergilediği düşünülmektedir (N. Kumar, Bharti, Dixit, et al., 2020; Pham et al., 2011). Sürtünme katsayısı değerlerindeki azalmanın temel nedeninin ise, kayma aşınması sırasında B miktarının artmasıyla kompozitlerin aşındırıcı bilye ile hibrit kompozit yüzeyde ince bir yağlayıcı film oluşturması olduğu düşünülmektedir (Yazdani & Salahinejad, 2011). Ayrıca B, aşınma meydana gelen yüzeylerde grafit benzeri bir yapı oluşturabilir (J. Li et al., 2018; Sreenivasa & Mallur, 2021). Takviye elemanlarının tanecik boyutunun düşürülmesiyle B ve B_4C tanecikleri Cu matris yapı içerisinde daha yoğun ve daha homojen bir şekilde dağıldığı ve bu dağılımı SEM görüntüleri de desteklemiştir. Bu homojen dağılım ve tanecik boyutunun küçülmesi bu çalışmada sentezlenen hibrit kompozitlerin tribolojik özelliklerini oldukça iyi seviyeye getirmiştir.



Şekil 38. 750 °C ‘de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri **a)** Cu, **b)** Cu-Cr, **c)** Cu-Cr-4B (750 °C 44 µm), **d)** Cu-Cr-4B₄C (750 °C 44 µm), **e)** Cu-Cr-4B (750 °C 1 µm), **f)** Cu-Cr-4B₄C (750 °C 1 µm)



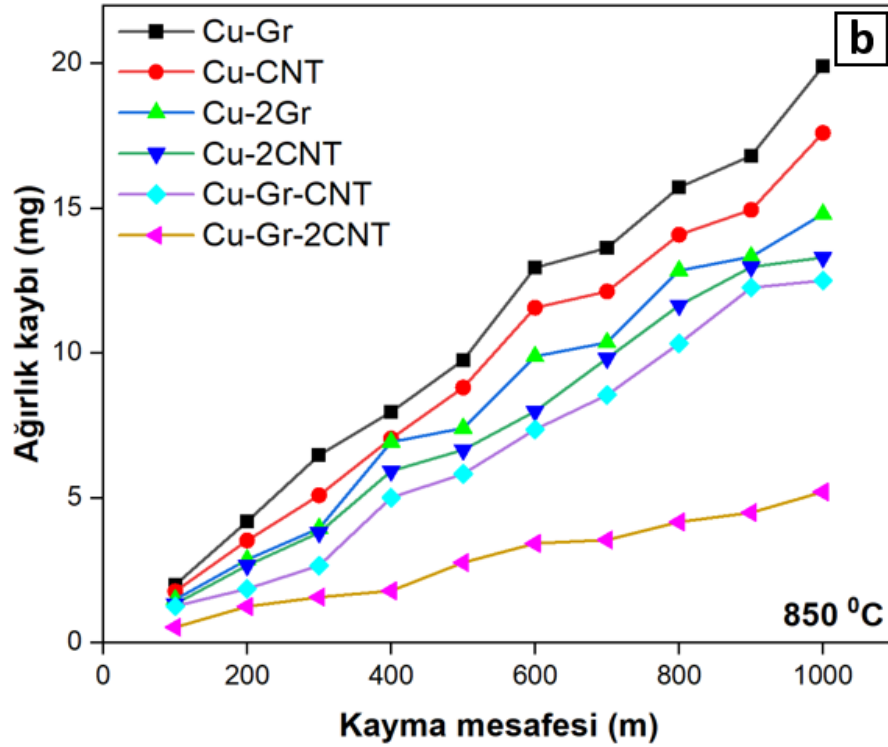
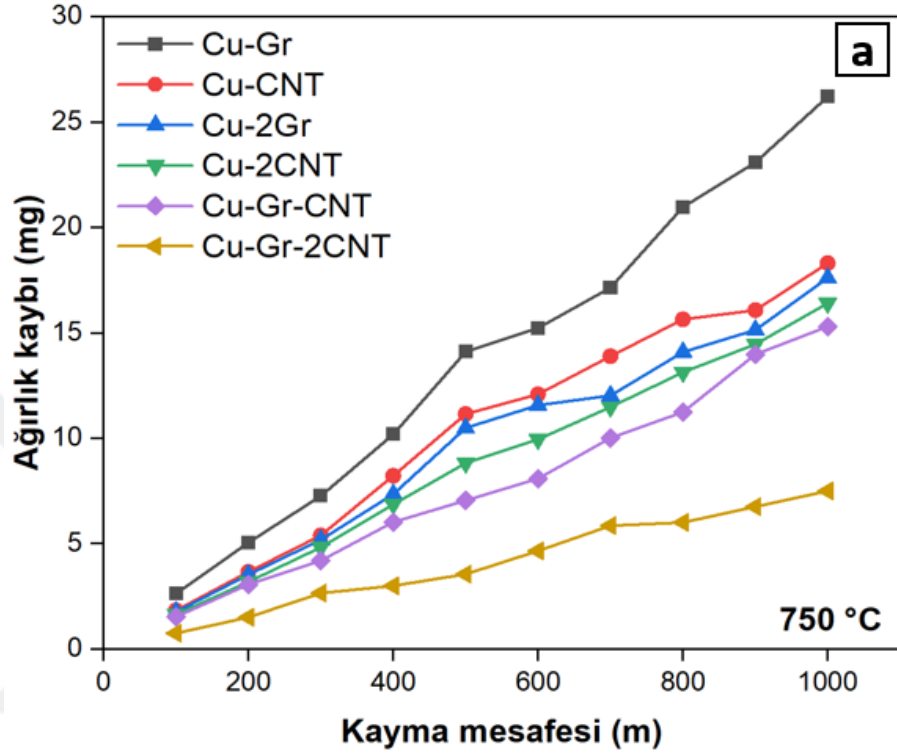
Şekil 38. 750 °C ‘de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri **a)** Cu, **b)** Cu-Cr, **c)** Cu-Cr-4B (750 °C 44 µm), **d)** Cu-Cr-4B₄C (750 °C 44 µm), **e)** Cu-Cr-4B (750 °C 1 µm), **f)** Cu-Cr-4B₄C (750 °C 1 µm) (devam)



Şekil 39. 850 °C 'de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri **a)** Cu-Cr-4B (850 °C 44 μm), **b)** Cu-Cr-4B₄C (850 °C 44 μm), **c)** Cu-Cr-4B (850 °C 1 μm), **d)** Cu-Cr-4B₄C(850 °C 1 μm)

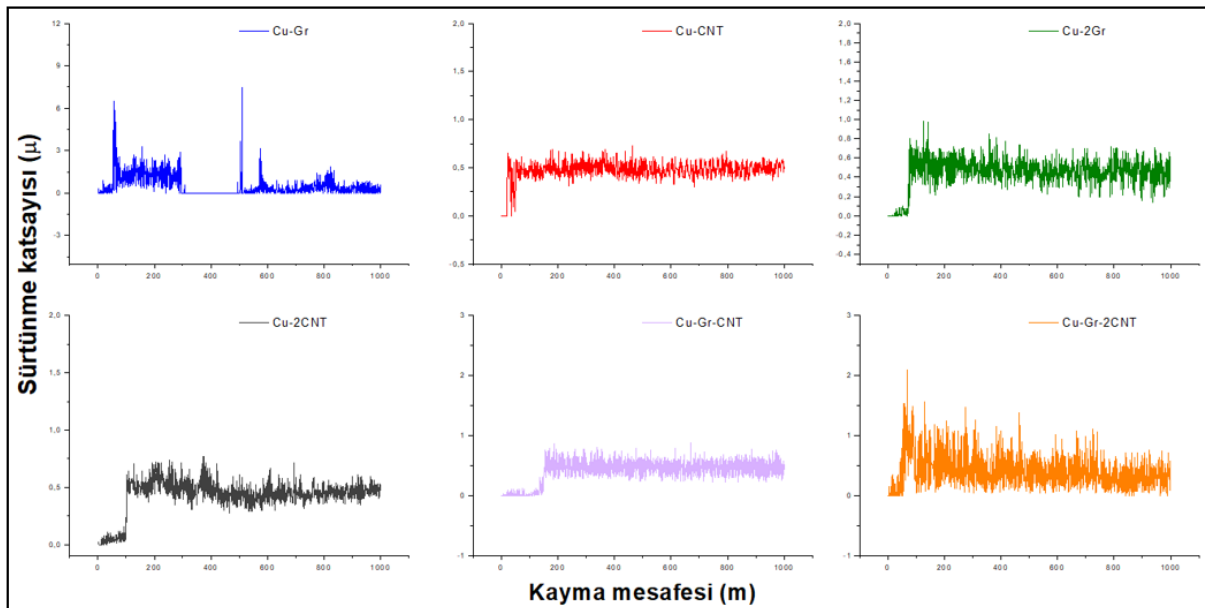
Grafit (Gr) ve Karbon nanotüp (CNT) partikül takviyeli üretilen Hibrit kompozitlerin aşınma davranışı

Hibrit kompozit numunelerin, pin-on-disk yöntemi ile yapılan tek yük altındaki aşınma deneylerinden takviye cinsi ve takviye oranlarına göre elde edilen aşınma kaybı değerlerine göre çizilen grafikler Şekil 40'da gösterilmektedir.

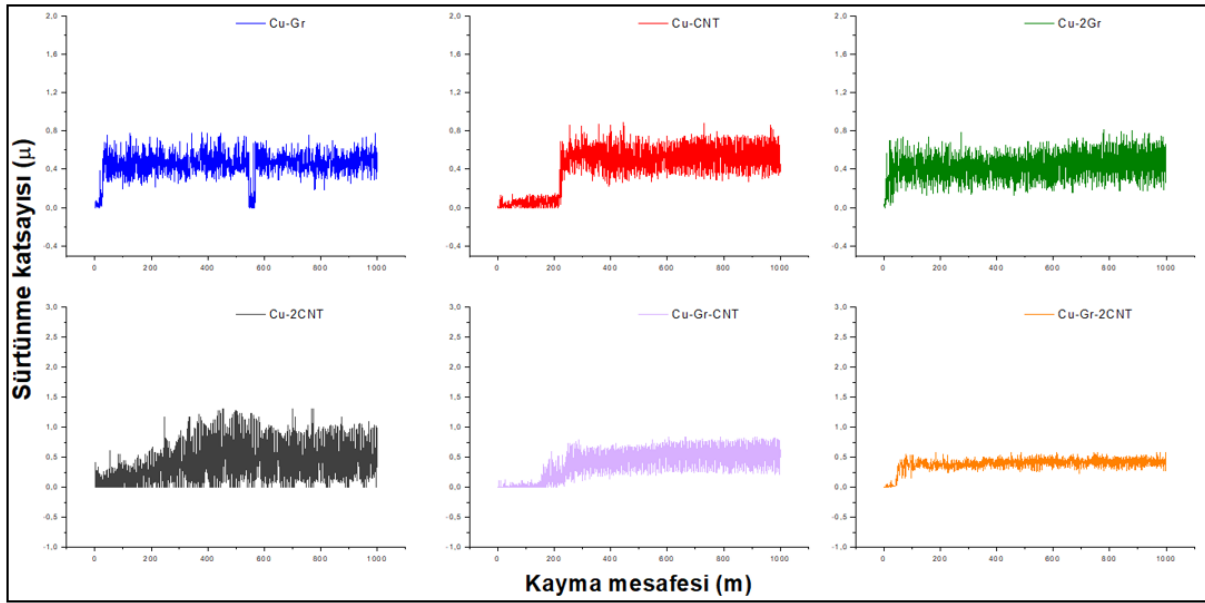


Şekil 40. Farklı içerikteki hibrit kompozitlerin aşınma sonrasındaki ağırlık kayıpları; a) 750°C sinterleme sıcaklığı için b) 850°C sinterleme sıcaklığı için

Şekil 40 a-b'deki grafiklere bakıldığında Gr ve CNT takviye oranlarının %1'den %2'ye artmasıyla aşınma kayıplarının da azaldığı görülmektedir. %1,0 takviyeli Gr ve CNT kompozit numunelerdeki aşınma kaybı, %2 takviyeye göre daha fazla meydana gelmiştir. Böyle bir durumun kompozit numune hazırlanmasından kaynaklandığı söylenebilir. Takviye elemanlarının kompozit yapı içerisinde eşit şekilde dağılmamıştır. Dolayısıyla aşınma analizinde %2 CNT takviyeli kompozitin aşınmış yüzeyinde, yapı genelinde gözlenen düzensiz dağılımın aksine daha homojen ve stabil bir kompozit yapı ortaya çıkabilmektedir. Sonuç olarak bu kazanç oranı ile kompozit numunede daha az aşınma değeri ölçülmüştür. Gr takviyeli kompozitlerin aşınma kayıpları biraz daha yüksek olmasına rağmen CNT takviyeli kompozitlere yakın bulunmuştur. En düşük ağırlık kaybı Cu-Cr-2CNT hibrit kompozitinde meydana gelmiştir. Sinterleme sıcaklıkları kıyaslandığında, 750 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin ağırlık kaybının daha fazla olduğu görülmüştür. Cu-grafit kompozitlerin aşınma özellikleri saf bakırla karşılaştırıldığında artmıştır. Kompozit numunelerde, sürtünme kuvvetinin azalması sonucu grafitin varlığı nedeniyle aşınma yüzeyinde oluşan kendinden yağlamalı katı film nedeniyle metal-metal yüzey teması bozulur. Grafitin katı yağlama özelliğinden dolayı bakırdaki grafitin ağırlık yüzdesi arttıkça sürtünme katsayısı artar. Aşınma testi sırasında temas yüzeyine grafit takviyeler temas eder ve grafit partiküllerinin katı yağlama özelliğinin iyi olması nedeniyle sürtünme katsayısı azaltılmıştır. Bakır matrisinde takviye olarak grafitin varlığı, metal-metal temas noktalarını azaltır, bu da daha sonra sürtünme katsayısını azaltır (Kato et al., 2003; Sarmadi et al., 2013).



Şekil 41. Gr-CNT takviyeli hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri (750°C)



Şekil 42. Gr-CNT takviyeli hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı grafikleri (850°C)

Kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak kompozit numuneler için sürtünme katsayısının değişimi Şekil 41-42 'de gösterilmektedir. Tüm numunelerde sürtünme katsayısı değerleri 1000 m kayma mesafesine kadar genellikle artmış, daha sonra azalarak nispeten sabit değerlere ulaşmıştır. Sürtünme katsayısı değişimindeki bu eğilim, yüzeyde mekanik olarak karışan katmanın oluşmasından kaynaklanıyor olabilir. Bu katman, bazı oksit bileşikler içerdiğinden katı yağlayıcı bir tabaka olarak ele alınabilir (X. Y. Li & Tandon, 2000; Mandal et al., 2009). Dolayısıyla kayma aşınması sırasında kompozit numunelerin yüzeyinde böyle bir tabakanın oluşması sürtünme katsayısı değerlerini düşürmektedir. Cu-Gr numunesinin en düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahiptir. Takviye miktarlarının artmasıyla hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısının azaldığı ve sürtünmeye gösterilen direnç artmıştır. Sertlik sonuçlarına benzer sonuçlar sürtünme katsayısı değerlerinde de elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı ve aşınmaya karşı gösterilen direnci artırdığı görülmüştür. Saf Cu numunesine göre sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde aynı tanecik boyutunda 750°C'de hazırlanan hibrit kompozitlerde Cu-Gr numunesinde %10,62, Cu-CNT numunesinde ise %9,2, Cu-2Gr numunesinde %5,27, Cu-2CNT numunesinde ise %4,55, Cu-Gr-CNT numunesinde %3,92 ve Cu-Gr-2CNT numunesinde % 3,88 'lik bir düşüş gözlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça numunelerin tribolojik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır. Gr ve CNT takviyeli hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Gr ve CNT Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Ortalama Sürtünme Katsayısı Değerleri

Numune	Sinterleme sıcaklığı	
	750°C	850°C
Cu	0,795245758	
Cu-Gr	0.510583	0.456369
Cu-CNT	0.476851	0.432963
Cu-2Gr	0.452267	0.431690
Cu-2CNT	0.429243	0.412599
Cu-Gr-CNT	0.419877	0.403415
Cu-Gr-2CNT	0.412129	0.390392

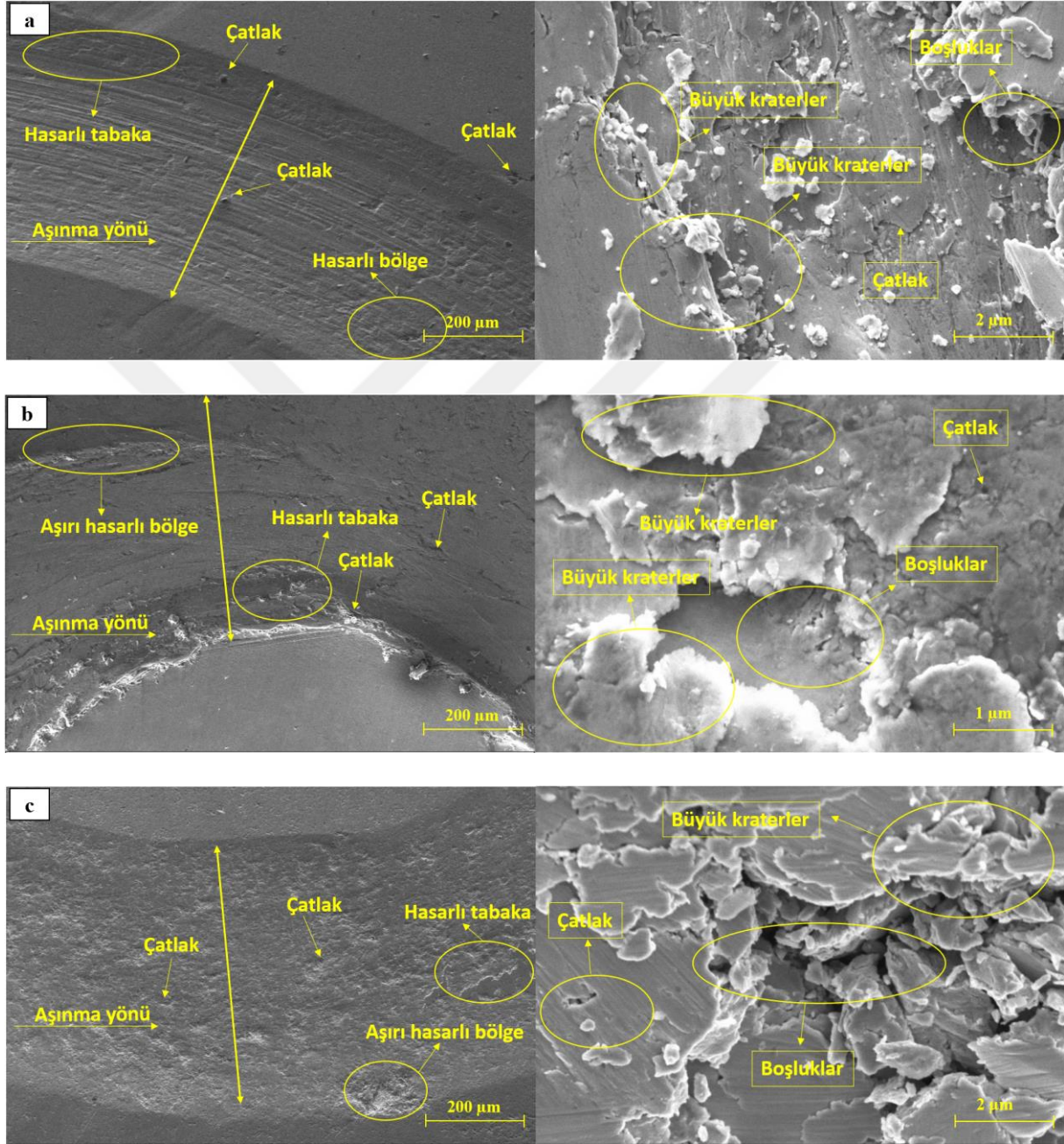
CNT'ler, aşınma analizi sırasında metal yüzeye yavaşça salınacaktır ve yüzeydeki CNT'ler aralayıcı görevi görerek eşleşen iki metal yüzey arasındaki kaba teması önleyerek aşınma oranını önemli ölçüde yavaşlatacağı ön görülmektedir. CNT'ler eşleşen iki metal yüzey arasında daha kolay kayarak sürtünme katsayısının azalmasına neden olacaktır.

Grafit, mükemmel performansı nedeniyle yeni bir katı yağlayıcı olarak kabul edilmektedir (Berman et al., 2014; Gutierrez-Gonzalez et al., 2015; J. Lin et al., 2011; Zhai et al., 2014). Şekil 41 kompozitlerdeki CNT'lerin hacim oranının artmasıyla sürtünme katsayısının hafifçe azaldığını da göstermektedir. Bu, CNT'lerin yüzey fraksiyonundaki bir artışın, metalik matris ile elmas pim arasındaki doğrudan teması azalttığını ve CNT'lerin kendi kendini yağlamasından kaynaklanan sürtünmeyi değiştirdiğini dolayısıyla kompozitlerin sürtünme katsayısının azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Grafit gibi yumuşak takviye malzemeleri içeren bakır matrisli kompozit, sürtünme katsayısının azaltılmasına yardımcı olmuştur (Yılmaz, 2001). Bu çalışmada aşınma oranı grafit takviyesinden etkilenmiştir. Deneysel sonuçlar, grafit takviyesinin metal matrisli kompozitin aşınma özellikleri üzerinde faydalı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bakır matristeki grafit takviyesi, aşınma deformasyonunun boyutunu azaltmada etkilidir. Kumar ve Mondal, hacimce %5,10,15 Grafit takviyesi içeren Grafit takviyeli bakır matris kompozitlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir (J. Kumar & Mondal, 2018).

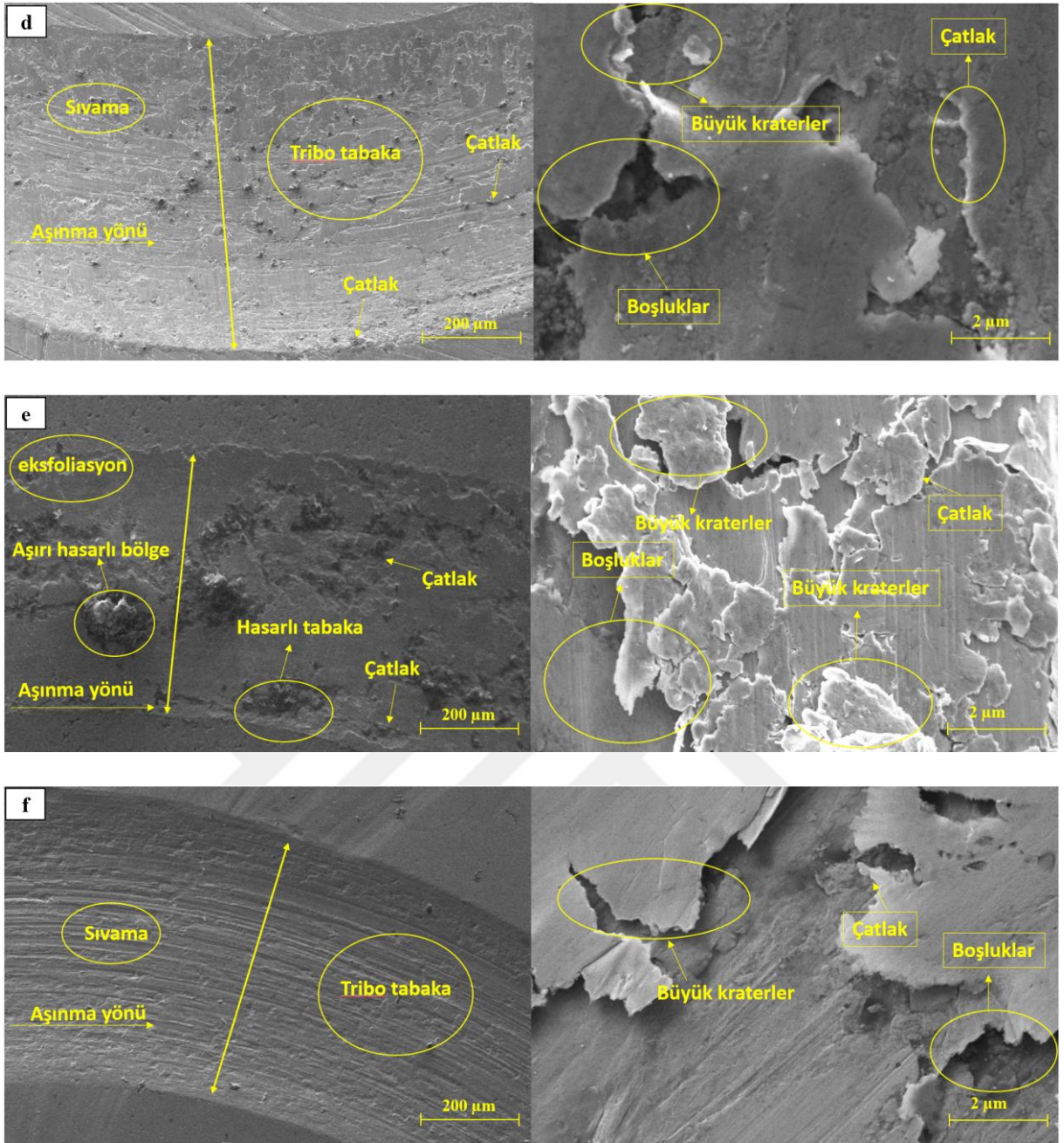
CNT'lerin tribolojik parametreler üzerindeki olumlu etkileri, mükemmel mekanik özelliklerine ve içi boş nanotüplerin benzersiz topolojik yapısına bağlanmaktadır. CNT'ler deney sırasında matristen metal yüzeylere salınabilir ve pürüzlerin temas etmesini önleyen aralayıcılar olarak görev yapabilir.

Numunelerin aşınmış yüzeyi, düşük yükte (10 N) hafif aşınma ortaya çıkarmıştır; aşınma oranı, uygulanan yükün artmasıyla önemli ölçüde artmıştır. Aşınma yüzeyinde oluşan

katı kendinden yağlamalı film nedeniyle metal-metal yüzey temasını azaltan grafit varlığına bağlı olarak bakır matristeki grafit konsantrasyonunun artmasıyla kompozit malzemelerin aşınma hızı ve sürtünme özelliği azalmaktadır (J. Kumar & Mondal, 2018). Aşınma sonrası hibrit kompozitlerdeki aşınma izlerini incelemek için alınan SEM görüntüleri Şekil 43' de gösterilmiştir.



Şekil 43. 850 °C 'de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri **a)** Cu-Cr-Gr, **b)** Cu-2Gr, **c)** Cu-CNT, **d)** Cu-2CNT, **e)** Cu-Gr-CNT ve **f)** Cu-Gr-2CNT



Şekil 43. 850 °C ‘de sinterlenen hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri **a)** Cu-Cr-Gr, **b)** Cu-2Gr, **c)** Cu-CNT, **d)** Cu-2CNT, **e)** Cu-Gr-CNT ve **f)** Cu-Gr-2CNT (devam)

Hibrit kompozitlerin aşınma sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde saf Cu numunesinde derin aşınma izleri, çatlaklar ve boşluklar oluşmuştur. Gr ve CNT takviyeleriyle bu çatlakların takviye miktarlarının artmasıyla gözle görülür bir şekilde azalmıştır. Bu duruma Gr ve CNT içeriğinin neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 32 incelendiğinde Gr ve CNT’nin homojen bir şekilde matris yapı üzerinde oluştukları ve bu takviye elemanlarının aşınmaya karşı gösterilen direnci artırdığı görülmüştür. SEM görüntülerinde Cu-Gr-2CNT hibrit kompozitinde net bir şekilde aşınma izlerinin azaldığı ve tribotabakanın aşınma yüzeyi boyunca etkili olduğu çatlakların ve ağır aşınma izleri çok net bir şekilde azalmıştır.

Toplam ağırlık kayıpları ve sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde CNT takviyesinin Gr takviyesine göre daha iyi bir aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Bu duruma Gr' in daha sert bir yapısı olduğundan ve CNT'nin iyi bir yağlayıcı film tabakası sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aşınma öncesi yapılan mikroyapı karakterizasyonlarında alınan SEM görüntülerinde CNT takviyesinin bakır matrisli yapı Gr' ye göre daha iyi bir bağlanma davranışı gösterdiği ve bakır tozlarıyla daha iyi bir şekilde birleştiği, bu durumun da aşınmayı etkilemiştir.

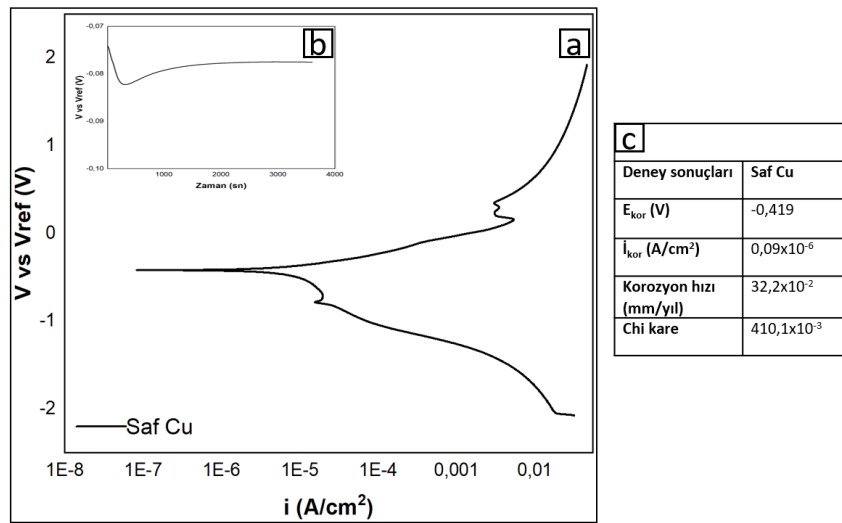
Cu Esaslı Üretilen partikül takviyeli Hibrit kompozitlerin Korozyon Davranışları

B partikül takviyeli hibrit kompozitlerin korozyon davranışları

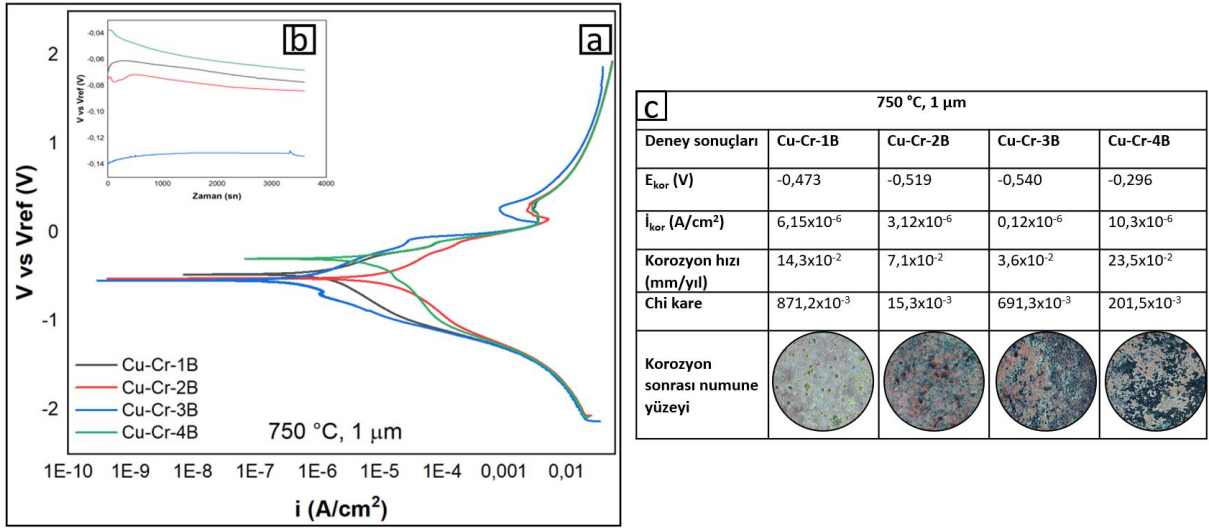
Öncelikle, Tafel eğri uydurma yönteminin kullanılması amacıyla tüm deney şartları için açık devre potansiyellerinin ± 2 V tarama aralığında tarama yapılmıştır. Kompozit malzeme %3,5'luk NaCl çözeltisi içerisinde 4000 sn boyunca açık devre potansiyeli (OCP) şartlarında tutulmuş, potansiyodinamik polarizasyon taramaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 44-48'de verilmiştir.

Anodik bölgede uygulanan gerilim için değerlendirilen Şekil 42' deki eğriye bakıldığında Cu-Cr-1B, Cu-Cr-2B ve Cu-Cr-3B numunelerinin benzer şekilde davrandığı grafik eğrilerden görülmektedir. Katot bölgesinde oluşan grafikler birbirine çok yakındır. Bunlara ek olarak grafiklerde herhangi bir aktifleşme veya pasifleşme bölgesi bulunmamaktadır. Korozyon numunelerinin yorumları Icorr değerlerine göre yapılmıştır.

Grafikte genel bir tafel ekstrapolasyonu oluşturularak korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve akım yoğunluğu (I_{kor}) değerleri belirlenmiştir. Belirlenen I_{kor} değerleri ve buna bağlı olarak Faraday kanunu (ASTM G-102) ile hesaplanan korozyon oranları Şekil 44-c' de verilmiştir.



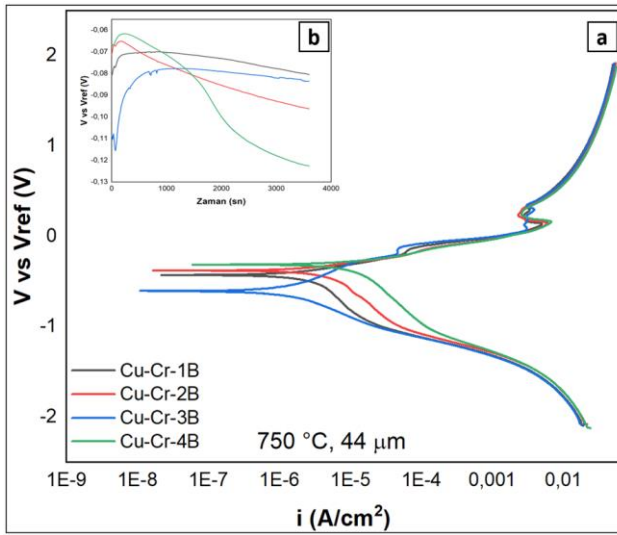
Şekil 44. Saf Cu potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).



Şekil 45. 750 °C, 1 μm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

Açık devre potansiyeli (OCP) eğrisi, polarizasyon taramasından önce OCP ölçümleri sırasında numunenin test çözeltisine ilk maruz kalma süresine bağlı olarak polarizasyon davranışının nasıl değiştiğini gösterir. Şekil 45-b 'ye bakıldığında, tüm kompozitlerin 4000 saniyelik açık devre potansiyeli (OCP) verileri gösterilmektedir. Minimum mutlak değer elde edildiğinden Cu-Cr-4B kompozit numunenin en soylu yani korozyon potansiyelinin en fazla olduğu söylenebilir. Polarizasyon testlerinden elde edilen eğriler Şekil 45-c' de gösterilmektedir. Sonuç tablosunda verilen korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı, Tafel ekstrapolasyonu kullanılarak polarizasyon eğrilerinden türetilmiştir.

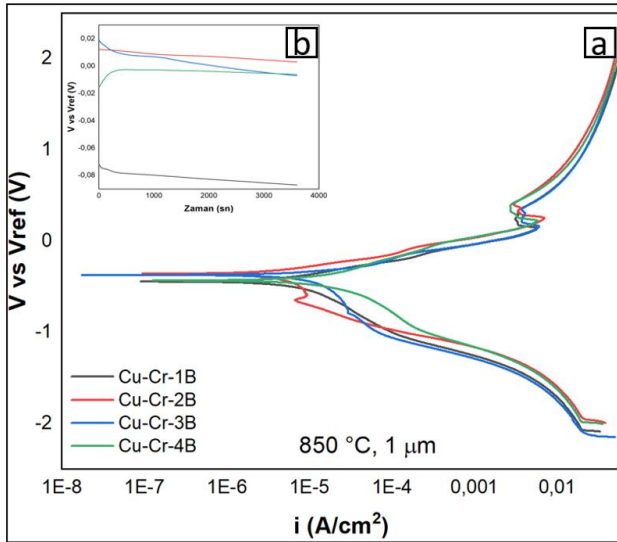
Dört ayrı numune grubunun korozyon davranışları incelendiğinde (Şekil 45-c); Cu-Cr-4B numunesi -0,296 V' luk korozyon potansiyel ile korozyona en önce uğrayan numune olmuştur. Korozyon kinetiğinin niceliği ile direkt orantılı olan akım yoğunluğu Cu-Cr-4B numunede maksimum değerdedir. Buna bağlı olarak $23,5 \times 10^{-2}$ mm/yıl değerindeki korozyon miktarı, korozyon sebebi ile malzemede meydana gelen toplam kayıp noktasında Cu-Cr-4B numunenin oldukça zayıf bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Zira bu değerler sırasıyla Cu-Cr-3B numune için $3,6 \times 10^{-2}$ mm/yıl, Cu-Cr-2B numunede $7,1 \times 10^{-2}$ mm/yıl iken Cu-Cr-1B numune için $14,3 \times 10^{-2}$ mm/yıl ile en yüksek seviyededir. Literatür çalışmaları incelendiğinde Cr elementinin malzemenin yüzeyinde pasif bir film oluşturabildiği ve bakırın korozyon direncini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir (Çelik et al., 2020, 2023). Bor takviye oranı arttıkça (%3'e kadar) korozyon akımı (I_{kor}) değeri azalmış, yani korozyon direnci artmıştır. Fakat takviye oranı %4 olduğunda malzemenin korozyon dayanımı çok fazla azalmıştır. Şekil 44' ile kıyaslandığında B ve Cr takviyesiyle bakırın korozyon direncinin arttığı görülmüştür.



750 °C, 44 μm				
Deney sonuçları	Cu-Cr-1B	Cu-Cr-2B	Cu-Cr-3B	Cu-Cr-4B
E_{kor} (V)	-0,429	-0,380	-0,605	-0,313
i_{kor} (A/cm²)	$9,4 \times 10^{-6}$	$3,58 \times 10^{-6}$	$0,348 \times 10^{-6}$	$20,6 \times 10^{-6}$
Korozyon hızı (mm/yıl)	$10,9 \times 10^{-2}$	$4,16 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-2}$	$12,3 \times 10^{-2}$
Chi kare	$636,8 \times 10^{-3}$	$679,4 \times 10^{-3}$	$257,1 \times 10^{-3}$	$169,8 \times 10^{-3}$
Korozyon sonrası numune yüzeyi				

Şekil 46. 750 °C, 44 μm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

Şekil 46’da Cr ve farklı takviye oranlarında B numunelerin %3,5’luk NaCl çözeltisi içerisindeki OCP eğrileri gösterilmektedir. Elde edilen OCP verilerinde, Cu-Cr-4B en asil olandır. Cu-Cr-4B numuneden sırasıyla Cu-Cr-1B, Cu-Cr-2B, Cu-Cr-3B numunelere bakıldığı zaman korozyon hızlarındaki azalmanın görüldüğü ve bu azalma sonucu olarak da korozyon direncinin arttığı sonucuna varılmaktadır. Şekil 45 ve Şekil 46 kıyaslandığında aynı sinterleme sıcaklığına sahip kompozit malzemelerin tanecik boyutu küçüldükçe korozyon direncinin arttığı görülmüştür (Meignanamoorthy et al., 2021).

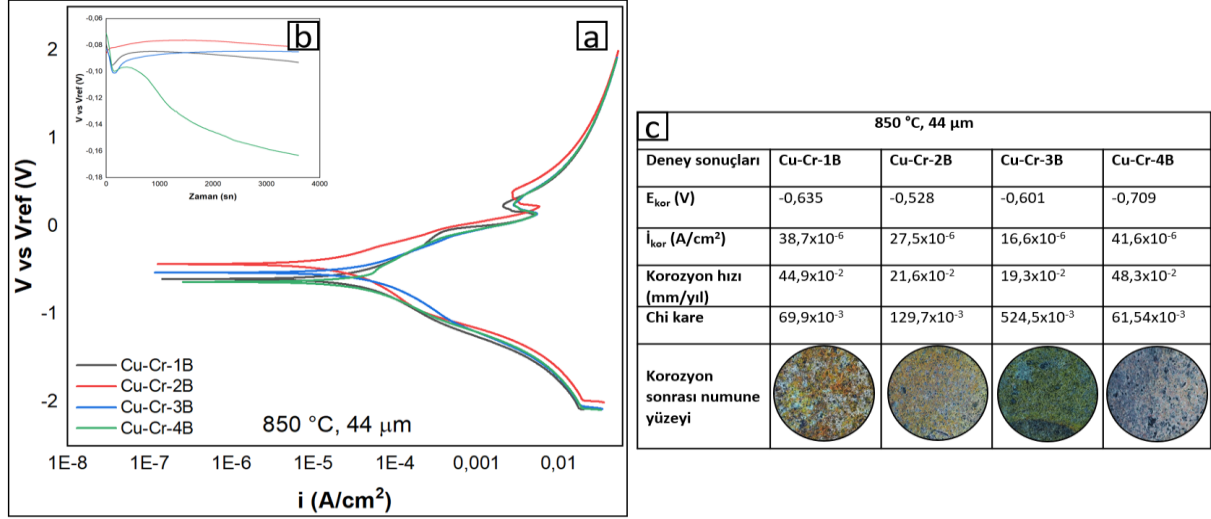


850 °C, 1 μm				
Deney sonuçları	Cu-Cr-1B	Cu-Cr-2B	Cu-Cr-3B	Cu-Cr-4B
E_{kor} (V)	-0,432	-0,359	-0,371	-0,442
i_{kor} (A/cm²)	$11,9 \times 10^{-6}$	$19,7 \times 10^{-6}$	$3,34 \times 10^{-6}$	$13,3 \times 10^{-6}$
Korozyon hızı (mm/yıl)	$13,8 \times 10^{-2}$	$23,7 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-2}$	$15,2 \times 10^{-2}$
Chi kare	$946,6 \times 10^{-3}$	$243,8 \times 10^{-3}$	$131,8 \times 10^{-3}$	$413,5 \times 10^{-3}$
Korozyon sonrası numune yüzeyi				

Şekil 47. 850 °C, 1 μm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

Farklı oranlarda B takviyeli kompozit numunelerine ait açık devre potansiyeli ölçümleri Şekil 47’ de verilmiştir. Başlangıçta Cu-Cr-3B numunenin açık devre 18,78 mV iken, 3600 saniye sonunda %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde açık devre potansiyeli -7,092 mV

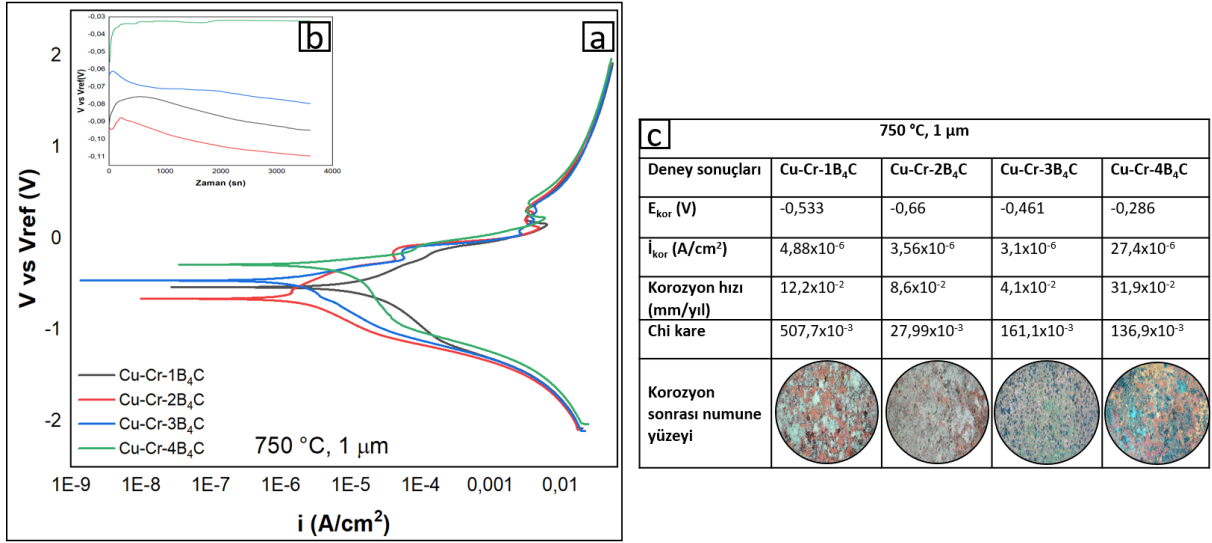
değerine ulaşmıştır. Cu-Cr-2B potansiyel değeri 12,2 mV iken, 3600 saniye sonunda açık devre potansiyeli 2,99 mV değerine ulaşmıştır. Cu-Cr-4B kompozit numunede ise açık devre potansiyel değerleri başlangıçta - 15,67 mV iken bu değer 1 saat sonunda -6,132 mV değerindedir. Açık devre potansiyeli ölçümleri genel olarak bakılacak olursa, hem Cu-Cr-2B hem de Cu-Cr-4B numuneleri kararlılığa hızlı bir şekilde ulaşmıştır. En soy numune Cu-Cr-2B kompozit numunede elde edilmiştir.



Şekil 48. 850 °C, 44 μm farklı oranlarda B takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

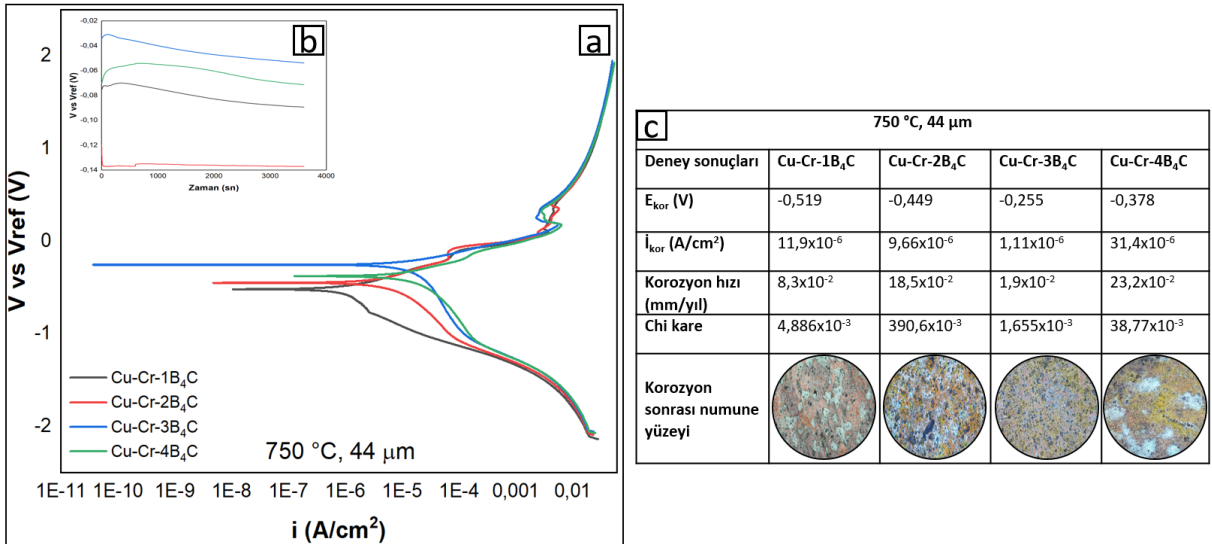
OCP eğrileri 3600 sn sonrasında kararlı bir seyir yakalamıştır (Şekil 48-b). İlk olarak %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen deneylere ilişkin sonuçlara bakıldığında diğer numunelere göre Cu-Cr-2B numunesinin oldukça soy karakterde davranış gösterdiği açıktır. Açık devre potansiyellerinin okunmasının ardından elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre (Şekil 48-a), Cu-Cr-4B en düşük E_{kor} değerine sahiptir (-0,709 V). Cu-Cr-2B' ye ait E_{kor} değeri (-0,528 V) Cu-Cr-1B'nin E_{kor} değerine oldukça yakındır (-0,635 V). Akım yoğunluklarına ilişkin değerlendirmelerin korozyon hızı ile paralel olduğu söylenebilir. 850 °C sinteleme sıcaklığında malzemenin tanecik boyutu küçüldükçe korozyon dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca aynı partikül büyüklüğüne sahip malzemenin sinterleme sıcaklığı arttıkça korozyon dayanımının azaldığı sonucuna varılmıştır (J. Wang et al., 2022).

Partikül B₄C takviyeli hibrit kompozitlerin korozyon davranışları



Şekil 49. 750 °C, 1 µm farklı oranlarda B₄C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

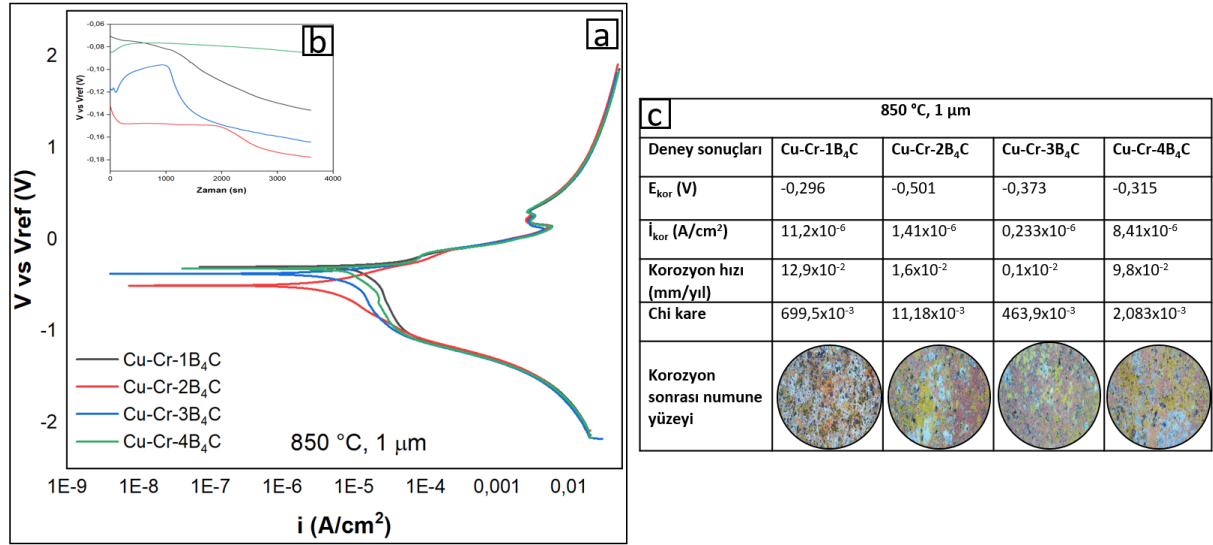
Şekil 49' daki potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre, Cu-Cr-2B₄C en düşük E_{kor} değerine sahiptir (-0,66 V). Cu-Cr-1B₄C' ye ait E_{kor} değeri (-0,533 V), Cu-Cr-3B₄C' ye ait E_{kor} değeri (-0,461 V) ve Cu-Cr-4B₄C'nin E_{kor} değeri ise -0,286 V' dir. Açık devre potansiyeli (OCP) verilerine bakıldığında Cu-Cr-4B numunesinin oldukça soy karakterde davranış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 44' ile kıyaslandığında B₄C ve Cr takviyesiyle bakırın korozyon direncinin arttığı görülmüştür.



Şekil 50. 750 °C, 44 µm farklı oranlarda B₄C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

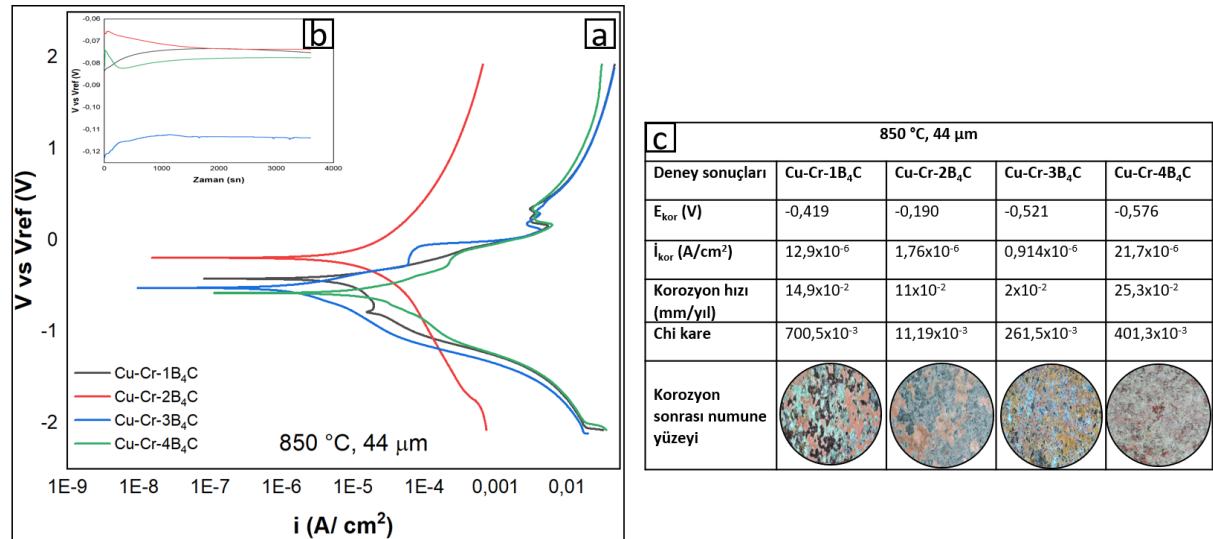
Şekil 50'de Cr ve farklı takviye oranlarında B₄C numunelerin %3,5'luk NaCl çözeltisi içerisindeki OCP eğrileri gösterilmektedir. Elde edilen OCP verilerinde, Cu-Cr-3B en asil olandır. Cu-Cr-3B korozyon hızı en düşük olan numunedir. Cu-Cr-3B numuneden sırasıyla

Cu-Cr-2B, Cu-Cr-1B, Cu-Cr-4B numunelere bakıldığı zaman korozyon hızlarındaki azalmanın görüldüğü ve bu azalma sonucu olarak da korozyon direncinin arttığı sonucuna varılmaktadır (Calli et al., 2017).



Şekil 51. 850 °C, 1 μm farklı oranlarda B₄C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

Şekil 51-b açık devre potansiyeli (OCP) verilerine bakıldığında Cu-Cr-4B numunesinin oldukça soy karakterde davranış gösterdiği görülmektedir. Korozyon direnci en yüksek olan numunenin Cu-Cr-3B₄C olduğu görülmüştür. Yapılan tüm korozyon testlerinde takviye oranı %4B₄C olan numunenin korozyon akımı en yüksek yani korozyon direnci en düşük malzeme olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

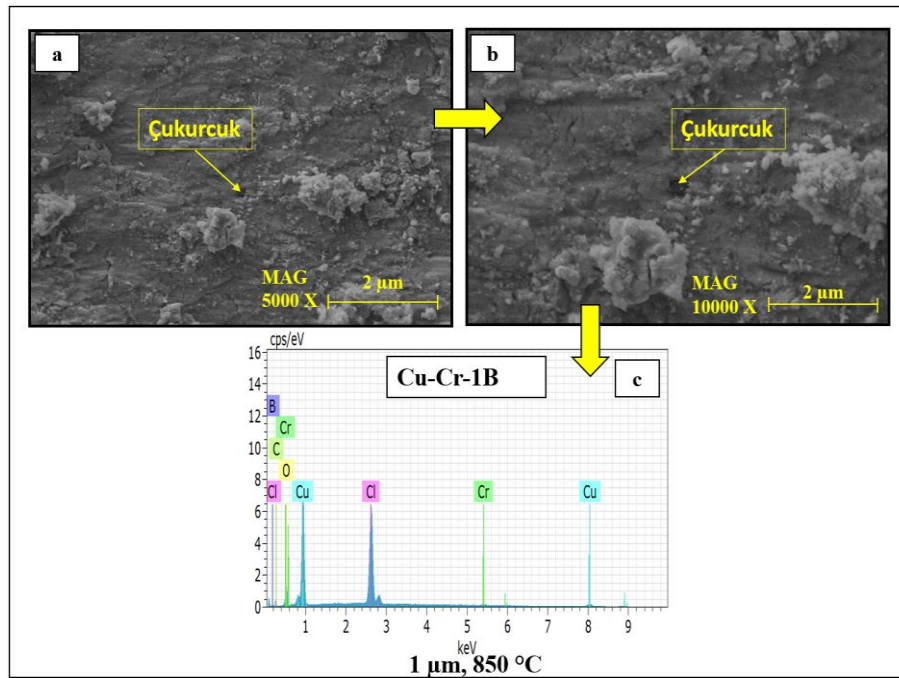


Şekil 52. 850 °C, 44 μm farklı oranlarda B₄C takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

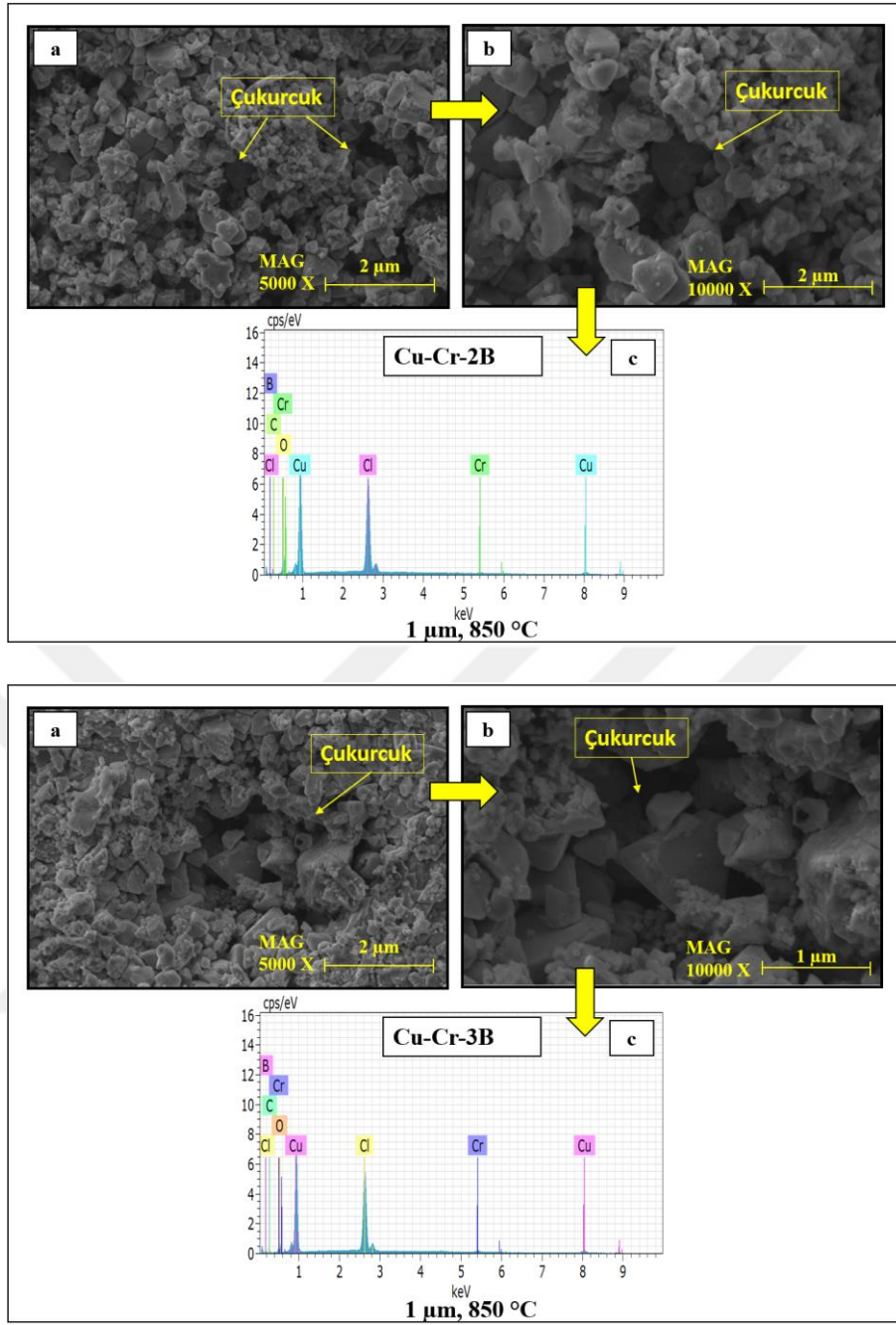
Şekil 52 incelendiğinde akım yoğunluğu arttıkça korozyon hızı da artmıştır. 850 °C sinteleme sıcaklığında malzemenin tanecik boyutu azaldıkça korozyon dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca aynı partikül büyüklüğüne sahip malzemenin sinterleme sıcaklığı arttıkça korozyon dayanımının azaldığı sonucuna varılmıştır (Karabulut et al., 2021).

Metal matrisli kompozitlerde bölgesel korozyon çoğunlukla matris ile takviye elemanı arasında oluşan tane sınırlarında, ara yüzeyde veya dislokasyonlar gibi kimyasal ve fiziksel heterojenliğin olduğu bölgelerde görülmektedir. Ancak birçok araştırmacı da takviye elemanının ve ortaya çıkan intermetalik fazların bu lokal korozyonlara karşı bir duvar görevi görerek korozyon direncini arttırdığını söylemişlerdir (Harun & Erhaima, 2021; Lekatou et al., 2015).

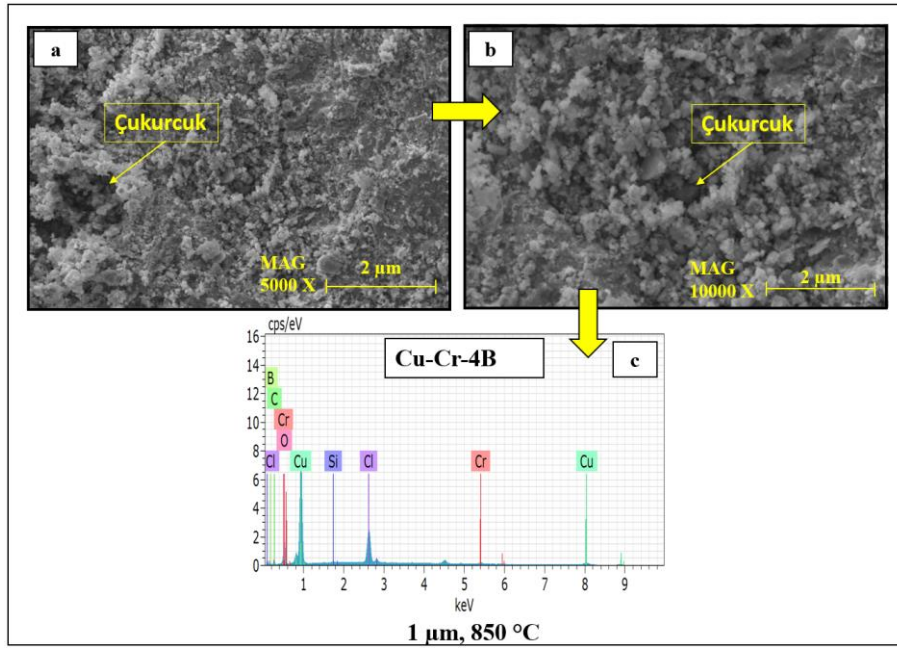
Deneyler sonrasında korozyona uğramış yüzeylerden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde hasar türlerinin benzerliği dikkat çekmektedir (Şekil 53, Şekil 54, Şekil 55 ve Şekil 56). Detay yakınlıştırmalarda yer yer oldukça derine inen çukurların varlığı söz konusudur. Bu bölgelerde yerleşen tuzlar hasarın tabana doğru ilerlemesine sebebiyet vermektedir (Orth & Wheat, 1997). Yüzeylerin hasarları incelendiğinde hasarların lokalize olduğu söylenebilir. Kritik boyuta ulaşmış çukurcukların benzer türde hasarlar (çukurcuk korozyonu) oluşturduğu gözlemlenmektedir. Korozyon bölgelerinden alınan EDS sonuçlarına göre; kütlece oksijen ve yer yer tuz derişimleri tespit edilmiştir. Sıvı teması olan tüm yüzeyde oksitlenmenin varlığı korozyon hasarının yayılabileceğini göstermiştir (Toptan et al., 2013).



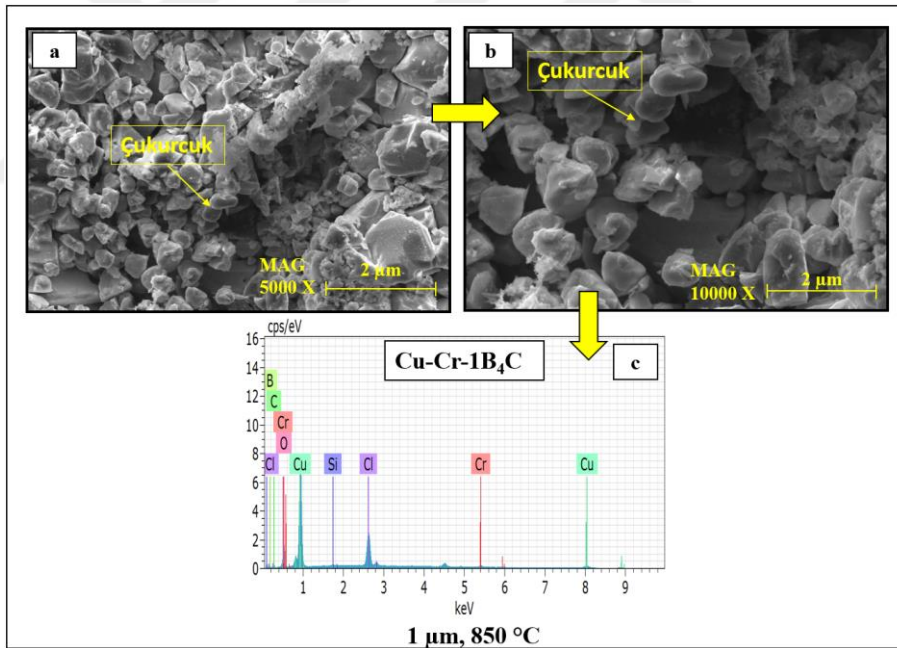
Şekil 53. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları



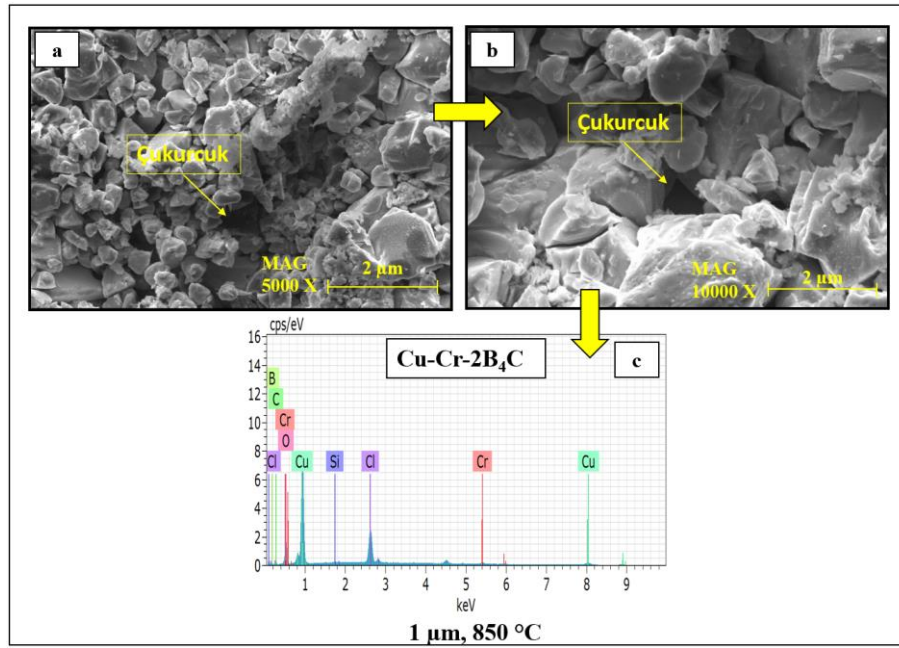
Şekil 53. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları (devam)



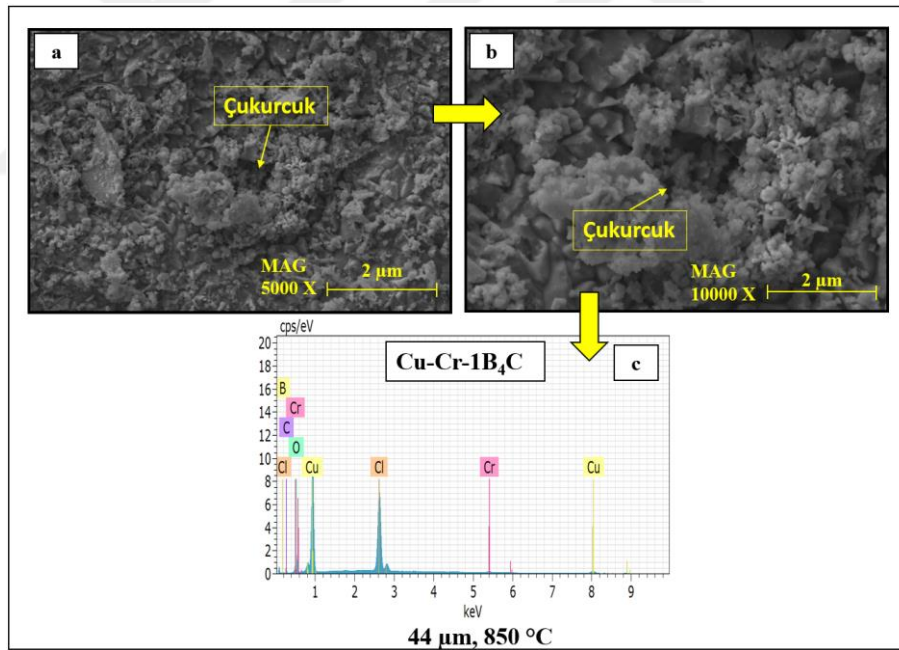
Şekil 53. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları (devam)



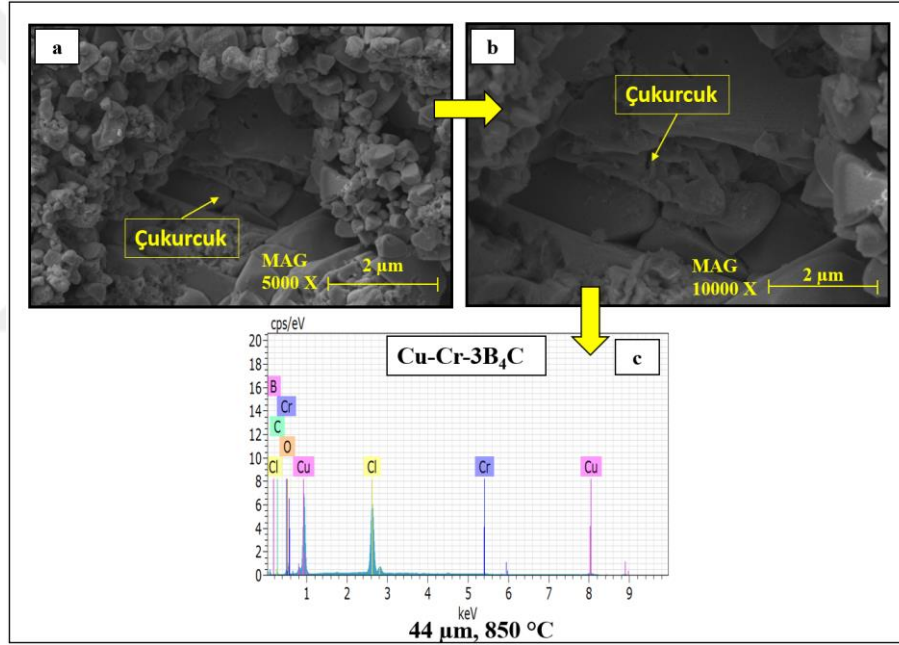
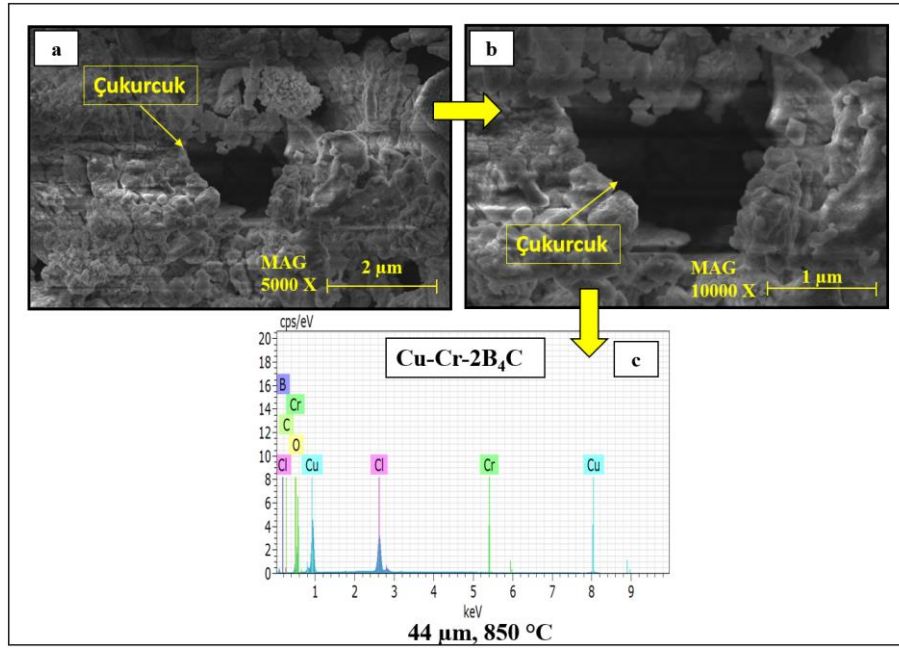
Şekil 54. 850 °C, 1 µm farklı oranlarda partikül B₄C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları



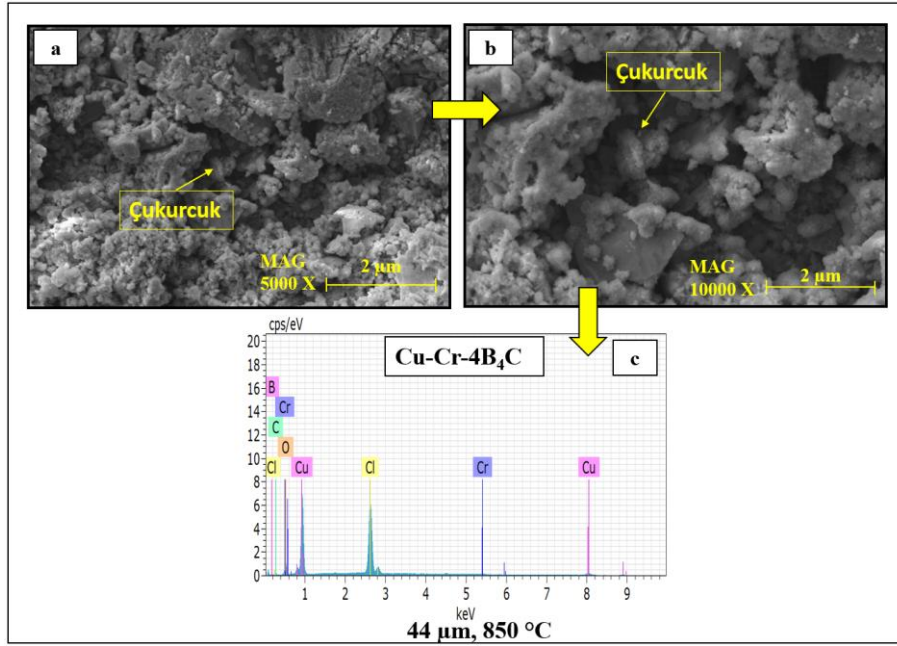
Şekil 54. 850 °C, 1 μm farklı oranlarda partikül B₄C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS ölçüm sonuçları (devam)



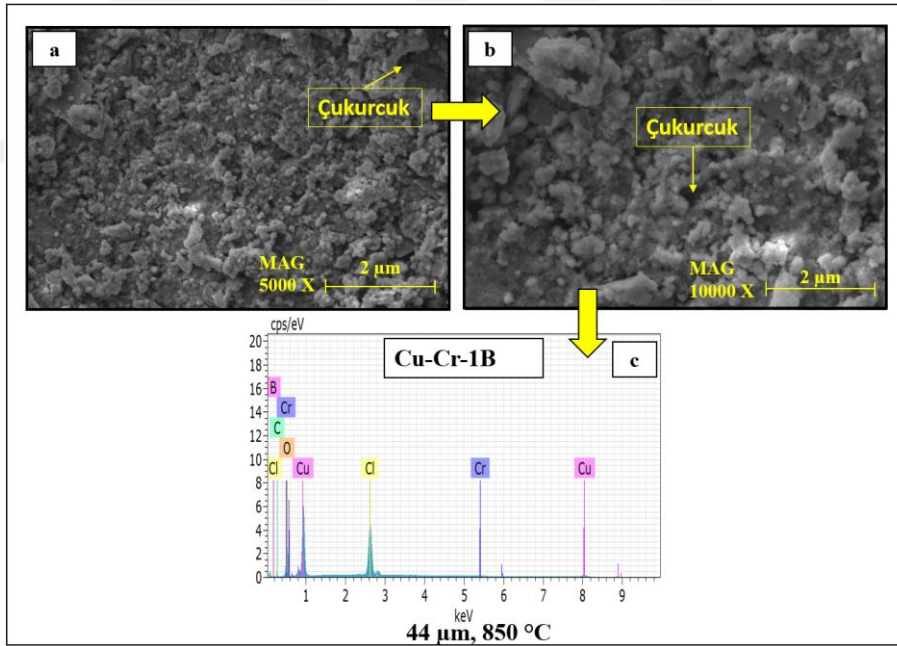
Şekil 55. 850 °C, 44 μm farklı oranlarda partikül B₄C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları



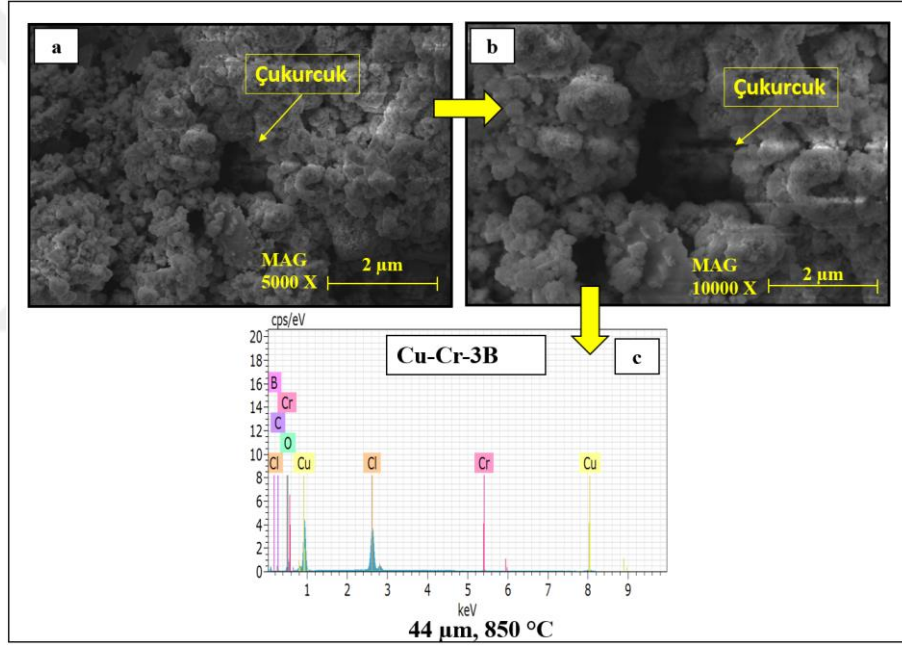
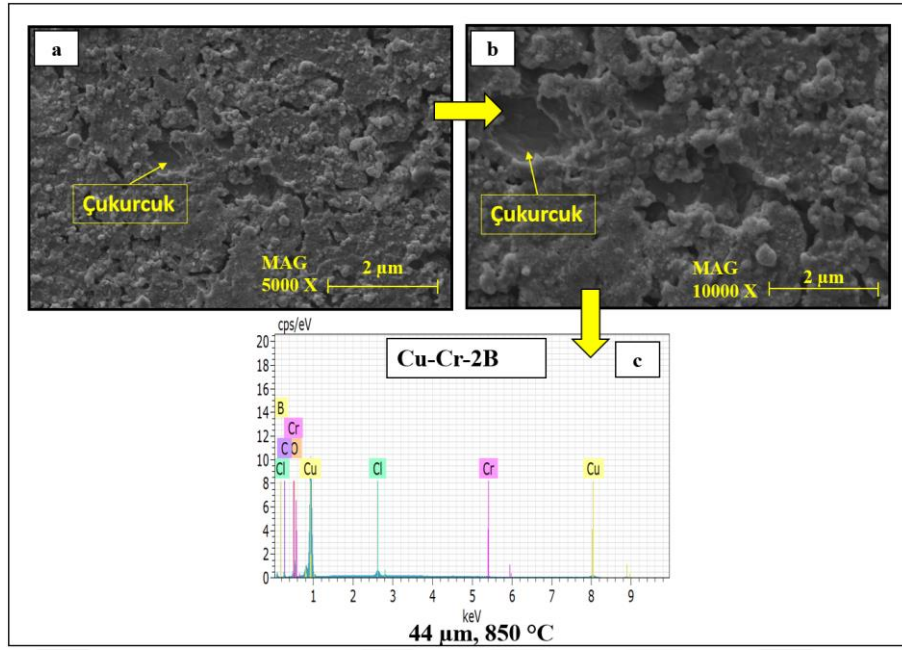
Şekil 55. 850 °C, 44 μm farklı oranlarda partikül B₄C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları (devam)



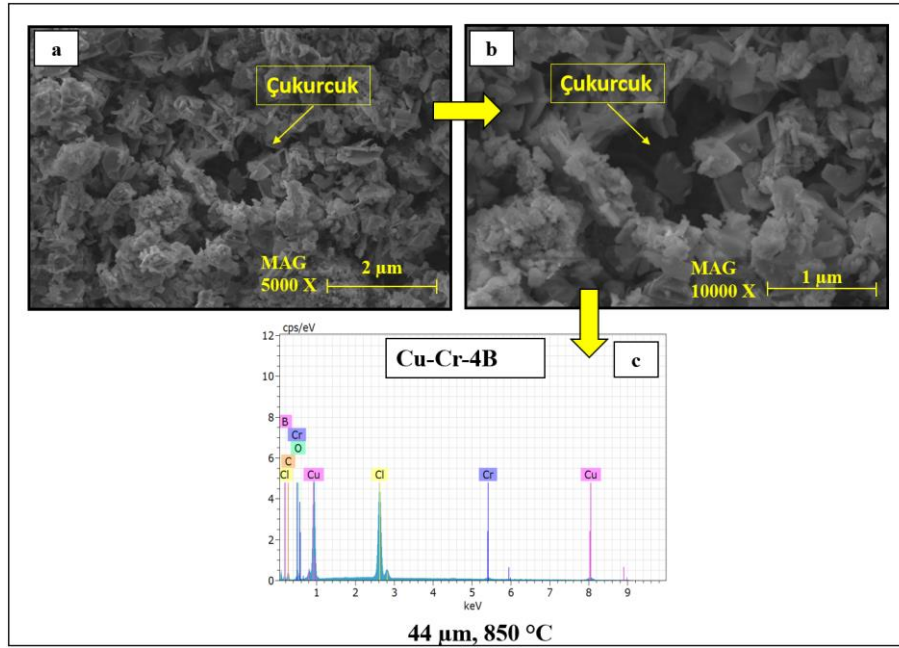
Şekil 55. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda partikül B₄C takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları (devam)



Şekil 56. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları



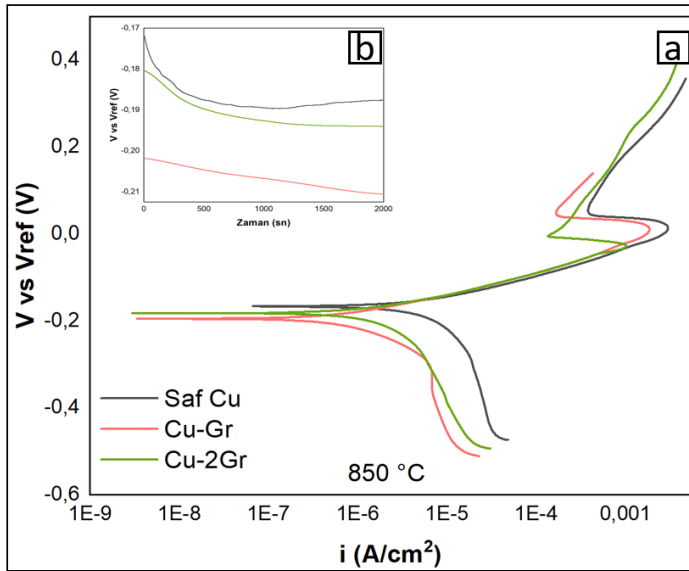
Şekil 56. 850 °C, 44 µm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları (devam)



Şekil 56. 850 °C, 44 μm farklı oranlarda partikül B takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları (devam)

Gr ve CNT partikül takviyeli kompozitlerin korozyon davranışları

Tüm deney şartları için açık devre potansiyellerinin $\pm 0,5$ V tarama aralığında tarama yapılmıştır. Elde edilen yüzeylerin %3,5'lik NaCl çözeltisi içerisinde 2000 sn boyunca açık devre potansiyeli (OCP) şartlarında tutulmuş, potansiyodinamik polarizasyon taramaları gerçekleştirilmiştir.



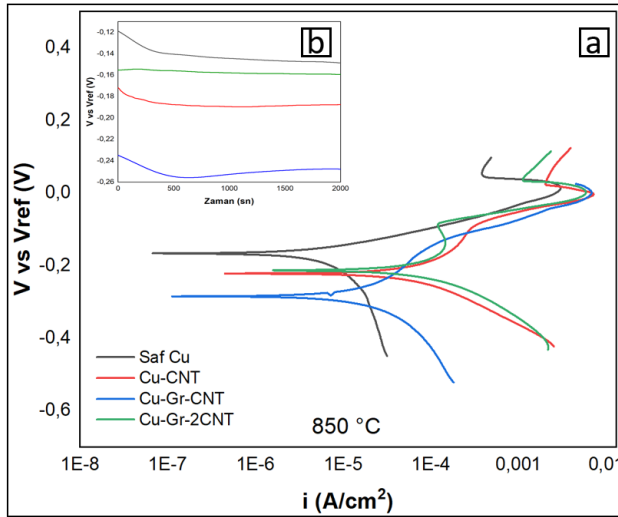
850 °C			
Deney sonuçları	Cu	Cu-Gr	Cu-2Gr
E_{kor} (V)	-0,166	-0,195	-0,182
i_{kor} (A/cm ²)	$66,9 \times 10^{-9}$	$3,37 \times 10^{-9}$	$2,97 \times 10^{-9}$
Korozyon hızı (mm/yıl)	$53,1 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$	$1,96 \times 10^{-2}$
Chi kare	$1,9 \times 10^{-3}$	$6,89 \times 10^{-3}$	$7,66 \times 10^{-3}$
Korozyon sonrası numune yüzeyi			

Şekil 57. 850 °C farklı oranlarda Gr takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

Açık devre potansiyelleri tüm numuneler için zamanın bir fonksiyonu olarak izlenmiş ve kararlı durum korozyon potansiyelleri E_{kor} olarak belirlenmiştir. Şekil 57-b 'ye

bakıldığında, kompozitlerin 2000 saniyelik açık devre potansiyeli (OCP) verileri gösterilmektedir. Minimum mutlak değer elde edildiğinden Saf Cu numunenin en soylu olduğu söylenebilir. Yani saf Cu korozyon potansiyelinin en fazla (pozitif) olduğu anlamına gelir. Polarizasyon testlerinden elde edilen eğriler Şekil 57-c' de gösterilmektedir. Sonuç tablosunda verilen korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı, Tafel ekstrapolasyonu kullanılarak polarizasyon eğrilerinden türetilmiştir.

Üç ayrı numune grubunun korozyon davranışları incelendiğinde (Şekil 57-c); Saf Cu numunesi -0,166 V' luk korozyon potansiyel ile korozyona en önce uğrayan numune olmuştur. Korozyon kinetiğinin niceliği ile direkt orantılı olan akım yoğunluğu Saf Cu numunede maksimum değerdedir. Buna bağlı olarak $53,1 \times 10^{-2}$ mm/yıl değerindeki korozyon miktarı, korozyon sebebi ile malzemede meydana gelen toplam kayıp noktasında Saf Cu numunenin oldukça zayıf bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Zira bu değerler sırasıyla Cu-Gr numune için $4,8 \times 10^{-2}$ mm/yıl iken Cu-2Gr numune için $1,96 \times 10^{-2}$ mm/yıl ile en yüksek seviyededir. Saf bakıra kıyasla grafit takviyesi ile korozyon dayanımının arttığı görülmüştür (Venkatesh & Rao, 2018). Grafit takviye oranı arttıkça korozyona karşı gösterilen direnç artmıştır (MEDELIENÉ et al., 2011). Grafit ve bakır karşılıklı olarak çözünmezler ve bir bileşik oluşturmak için birbirleriyle reaksiyona girmezler; grafit takviyesi ile bakır matris arasında sadece mekanik bir bağ vardır.

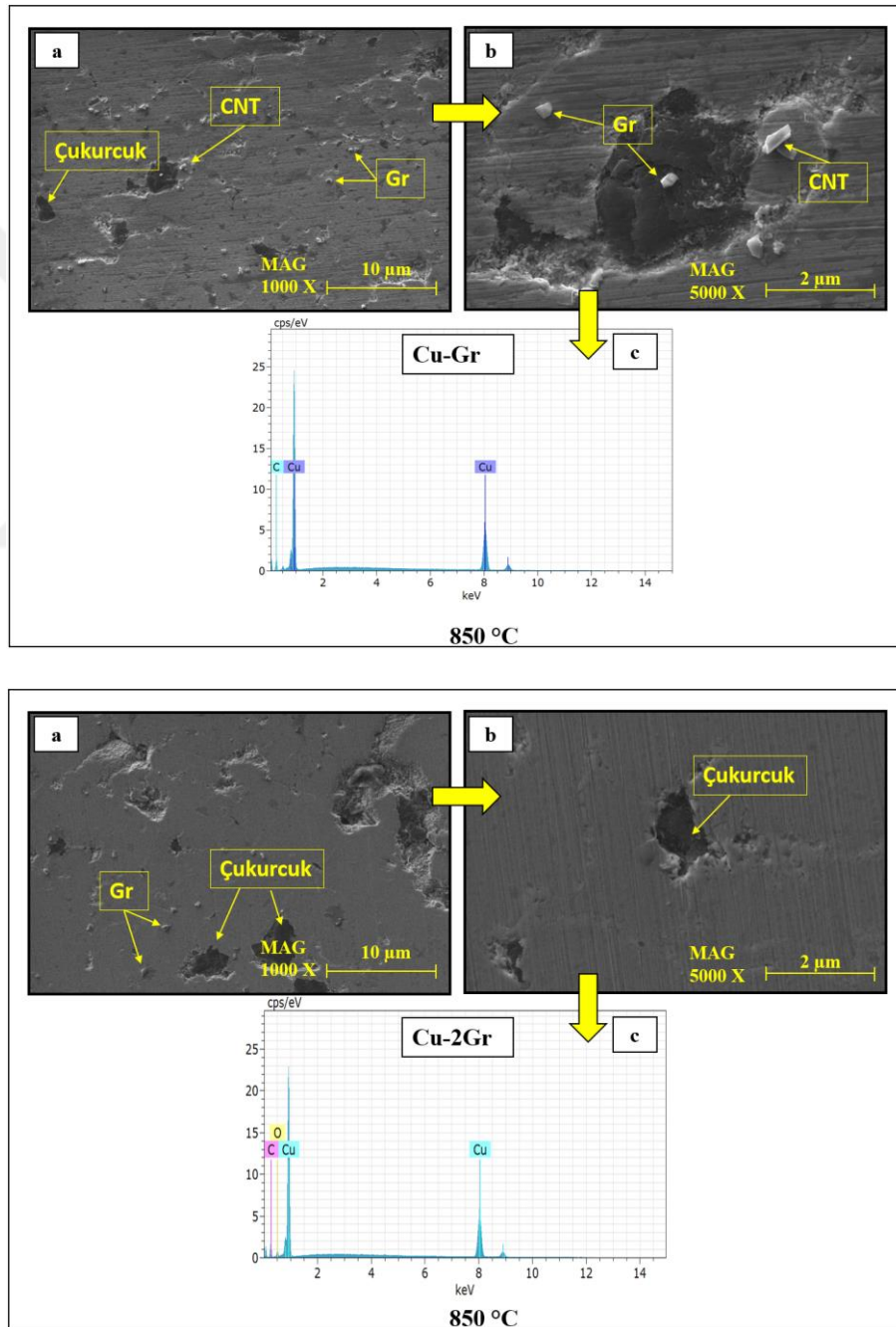


850 °C				
Deney sonuçları	Cu	Cu-CNT	Cu-Gr-CNT	Cu-2Gr-2CNT
E_{kor} (V)	-0,166	-0,223	-0,285	-0,213
I_{kor} (A/cm²)	$66,9 \times 10^{-9}$	$448,4 \times 10^{-9}$	$111,8 \times 10^{-9}$	$1583,1 \times 10^{-9}$
Korozyon hızı (mm/yıl)	$53,1 \times 10^{-2}$	$106,7 \times 10^{-2}$	$69,16 \times 10^{-2}$	$177,85 \times 10^{-2}$
Chi kare	$1,9 \times 10^{-3}$	$6,05 \times 10^{-3}$	$3,82 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-3}$
Korozyon sonrası numune yüzeyi				

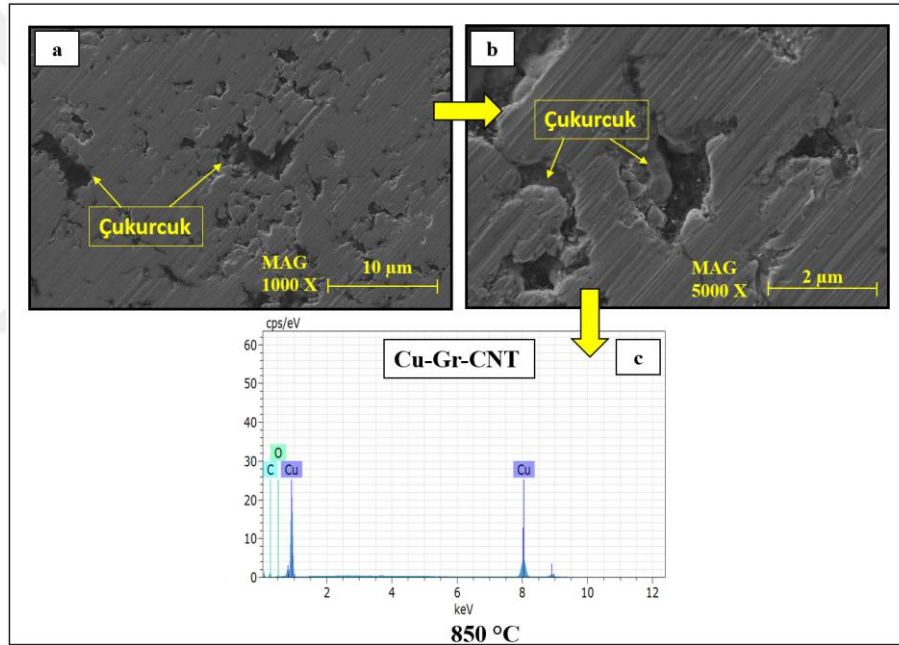
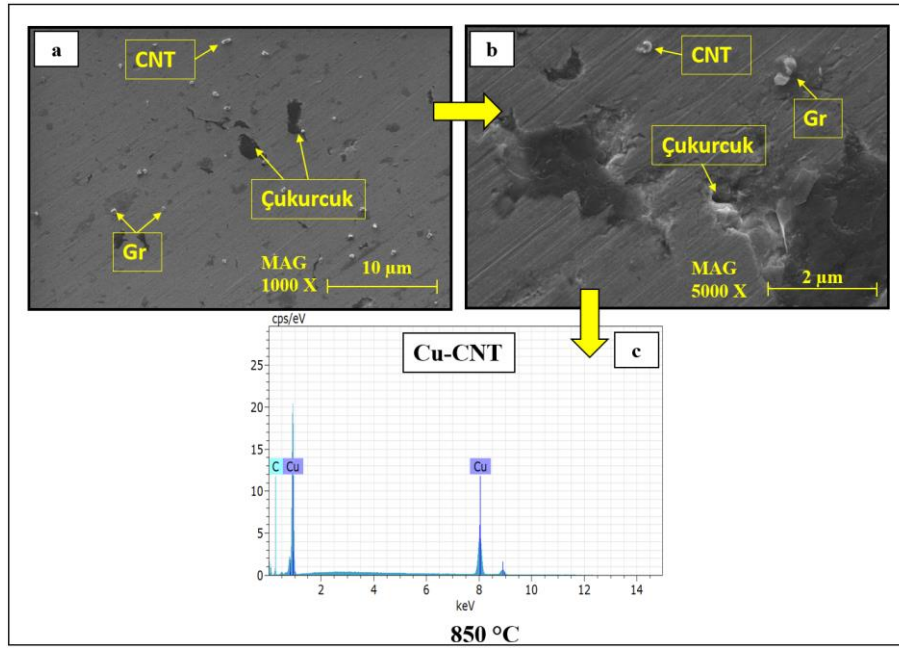
Şekil 58. 850 °C farklı oranlarda Gr ve CNT takviyeli potansiyodinamik polarizasyona ait test sonuçları, tarama (a), açık devre potansiyelleri (b), sonuç tablosu (c).

OCP eğrileri 1500 sn sonrasında kararlı bir seyir yakalamıştır (Şekil 5-b). İlk olarak %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen deneylere ilişkin sonuçlara bakıldığında diğer numunelere göre Saf Cu numunesinin oldukça soy karakterde davranış gösterdiği açıktır. Cu-Gr-CNT numunesine ait açık devre potansiyeli negatif bölgede en alt sırada kalmıştır (-285,1

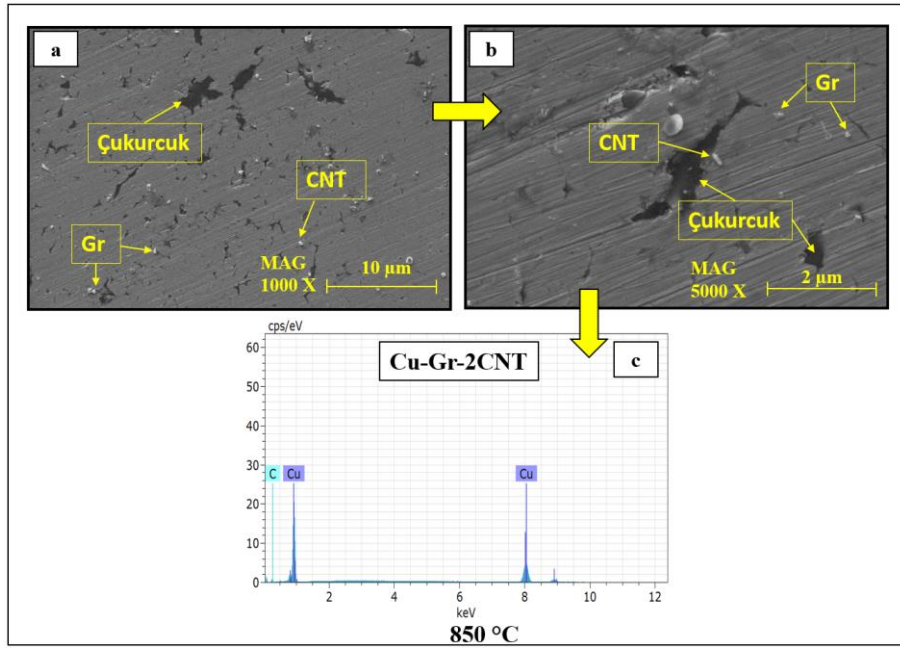
mV). Cu-CNT açık devre potansiyel değeri (-223,06 mV) iken, Cu-Gr-2CNT' nin ise kararlı hale geçtiği değer -213,28 mV olarak ölçülmüştür. Açık devre potansiyellerinin okunmasının ardından elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre (Şekil 54-a), Cu-Gr-CNT en düşük E_{kor} değerine sahiptir (-0,285 V). Cu-Gr-2CNT' ye ait E_{kor} değeri (-0,213 V) Cu-CNT'nin E_{kor} değerine oldukça yakındır (-0,223 V). Saf Cu'ya karbon nanotüp takviye edilmesiyle kompozit malzemenin korozyon direnci azalmıştır (Hannula et al., 2018). Karbon nanotüp'ün takviye oranı arttıkça akım yoğunluğu artmış yani korozyon direnci azalmıştır (Srinivasan et al., 2021).



Şekil 59. 850 °C, farklı oranlarda Gr ve CNT takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları



Şekil 59. 850 °C, farklı oranlarda Gr ve CNT takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektumları (devam)



Şekil 59. 850 °C, farklı oranlarda Gr ve CNT takviyeli Tafel analizlerine ait SEM görüntüleri ve EDS spektrumları (devam)

%3,5 NaCl çözeltisindeki deneyler sonucu alınan yüzey görüntüleri Şekil 59’ da gösterilmiştir. Tüm numune yüzeylerinde yoğun bir biçimde çukurcuk korozyonu şeklinde varlığını gösteren korozyon hasarı gözlenmiştir. Gr takviye oranı arttıkça yüzeyde daha fazla çukurcuk korozyon hasarı görülmüştür. CNT için de benzer yorumu yapmak mümkündür. Korozyon bölgelerinden alınan EDS ölçümlerinde kütlece oksijen elementi tespit edilmiştir. Ölçüm sonrasında numunelerde yüzey temizliği gerçekleştirilmiş olmasına rağmen çukurcuk bölgelerine yerleşen tuzlar nedeniyle, yüzeyde Na ve Cl elementlerine rastlanılmıştır.

Sonuçlar, bakır matrisi ile Gr bileşeni arasında önemli bir mikrogalvanik aktivite olmadığını ve bunun daha fazla korozyona karşı koruma sağladığını göstermektedir. Kompozitte CNT'nin elektrolite bakan alanı, CNT'lerin ağırlıkça %'sinin küçük olması nedeniyle bakırıncinden daha küçük olacaktır ve bu da galvanik korozyon riskini daha da azaltmıştır (Akbarpour, Mirabad, Azar, et al., 2020). Dolayısıyla CNT ve bakırın sınırında, yani tane sınırlarında hiçbir mikrogalvanik korozyon belirtisi gözlemlenmemiştir.

Korozyon mekanizması değişmese de CNT'nin korozyona uğramış mikro yapısı ile Gr numuneler arasındaki fark vardır. CNT 'de çukurların çoğu derindir. Bu derin çukurların yanında sığ çukurlar da vardır. Kompozit numuneler için aşınmış çukurlar düzgün bir şekilde dağılmış ve tipik olarak sığ olup aralarında bazı derin çukurlar bulunmaktadır. Tüm kompozit numunelerde gözlemlenen çukurlar CNT 'dekinden daha küçüktür; bu da kompozit numuneler için korozyon oranlarının azaldığını gösterir (Jamwal et al., 2020).

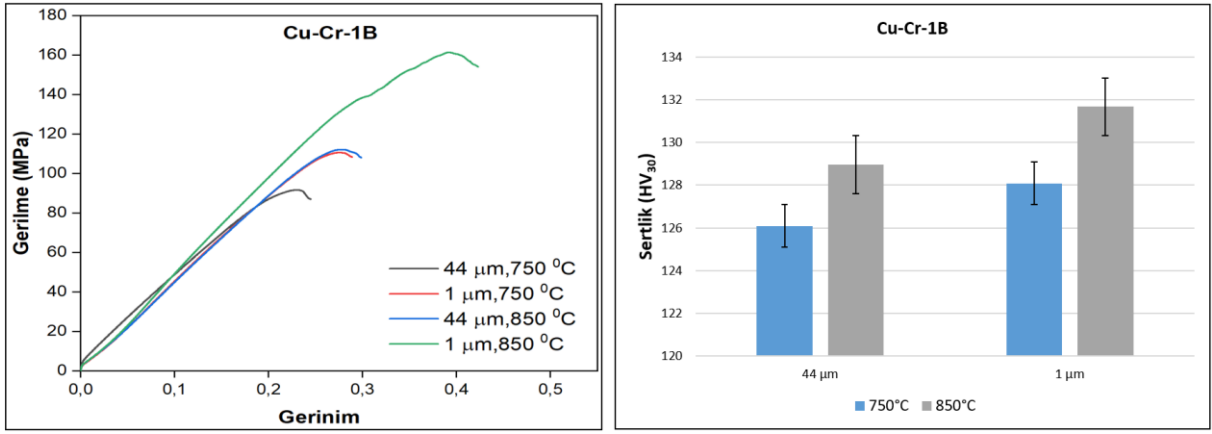
Bakır ve alaşımları mükemmel korozyon direncine sahiptir ve bu nedenle deniz suyu gibi koroziv ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak kompozit malzemelerin korozyonunu etkileyen faktörler iyi bilinmektedir. Mikro galvanik korozyonun, kompozitteki elektriksel temas halindeki farklı malzemelerin galvanik bağlanması nedeniyle bu tür malzemeler için bir sorun olduğu bilinmektedir. Karbon nanotüpler ve bakır, çözünmez oldukları ve yalnızca mekanik bir bağla bağlandıkları için birbirleriyle reaksiyona girerek bileşik oluşturmazlar. Galvanik metal serisinde karbon daha asil olduğundan bakırın anot, karbon malzemesinin ise katot görevi göreceği iyi bilinmektedir. Paslanmaz çelik ile güçlendirilmiş bakır MMK'nin korozyonu klorür ortamında araştırılmış ve bakırın anot görevi göreceği ve dolayısıyla paslanacağı bulunmuştur (Bakkar & Ataya, 2014).

Metal-CNT kompozitleri durumunda, elektrokimyasal olarak üretilen Ni-CNT kaplamalar için, saf Ni ile karşılaştırıldığında korozyon direncinin arttığını gösteren bazı sonuçlar rapor edilmiştir (X. H. Chen et al., 2005; Khabazian & Sanjabi, 2011; X. Li et al., 2015). Grafit (B. P. Singh et al., 2013) ve karbon nanotüp (Laoui, 2010) kaplamalı bakır yapılar için de gelişmiş korozyon özellikleri gösterilmiştir. Bakır-CNT mikro sütunların elektrokaplama yoluyla korozyon davranışı klorür ortamında araştırılmış ve korozyon direncinin saf bakırla karşılaştırıldığında takviye oranı arttıkça korozyon dayanımının azaldığı bulunmuştur (Pavithra et al., 2014). Buna karşılık, bakır-grafit MMK'ler klorür ortamında çelişkili korozyon davranışı göstermiştir: hem korozyon direncini arttırmış (grafit içeriğiyle birlikte artmaktadır) (H. Zhao et al., 2007) hem de azalmış korozyon direncini (grafit içeriğiyle azalmaktadır) (Orth & Wheat, 1997) göstermektedir. Bu nedenle, Cu-CNT kompozit numunelerin klorür ortamındaki korozyon davranışı muhtemelen kullanılan işleme tekniğine ve sonuçta ortaya çıkan mikro yapıya bağlıdır.

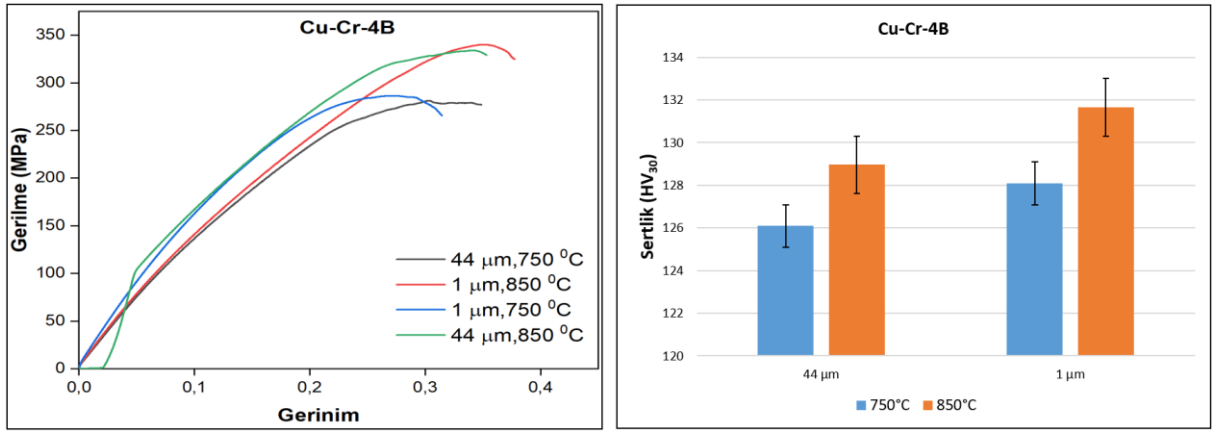
Basma Testi Sonuçları

B partikül takviyeli Cu esaslı kompozitlerin basma testi sonuçları

ASTM test standartlarına uygun olarak, mekanik kompozit test numunelerinin özellikleri basma testleri ile belirlenmiştir. Basma testi sırasında numune sabit hızda basma yüküne maruz bırakılmış, elastik modül, maksimum çekme mukavemeti, gerilme ve gerinim ölçülmüştür. Basma testi numuneleri ASTM E9 standartlarına göre hazırlanmıştır. Hibrit kompozit numuneler için gerilme-gerinim eğrileri Şekil 60-61'de sunulmuştur.



Şekil 60. % 1B partikül takviyeli hibrit kompozitlerin basma testi sonuçları



Şekil 61. % 4B partikül takviyeli hibrit kompozitlerin basma testi sonuçları

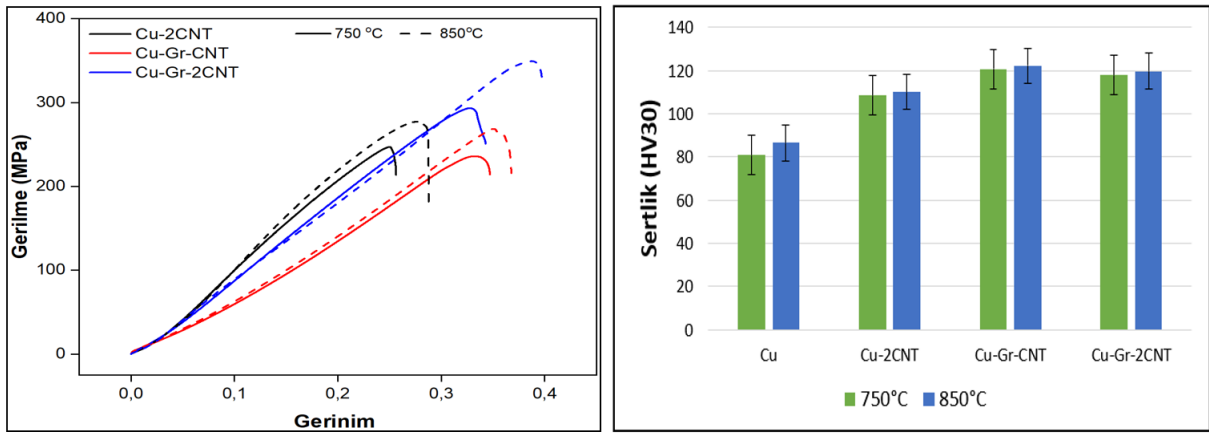
Bor partikül takviye oranı arttıkça kompozitin basma dayanımının arttığı görülmektedir. Dolayısıyla B partiküllerinin eklenmesiyle basma mukavemetinin artırılması, B partiküllerinin bakır matris içinde homojen dağılmasıyla açıklanabilir. Bu partiküller dispersiyon güçlendirme mekanizması sayesinde saf bakır matristeki dislokasyonların hareketini engeller. Ayrıca, B partiküllerinin miktarının artması aralarındaki mesafenin azalmasına neden olur ve bu da B partikülleri arasındaki dislokasyon hareketi için gerekli gerilmenin artmasına neden olur (Rahimian et al., 2010).

Takviye tane boyutu azaldıkça tanecikler arasındaki mesafe de azalacaktır. Takviye partikülleri arasındaki mesafenin azaltılması, takviyeler arasındaki dislokasyonların hareket ettirilmesi için gerekli gerilmeyi artırır, bu da kompozit mukavemetinin artmasına yol açar (Xu et al., 2019). Ayrıca tane sınırları, plastik deformasyon sırasında dislokasyonların hareketine karşı bir engel görevi görür. Bu nedenle, düşük tane boyutunda (1 μ), yüksek tane sınırları mevcut olup, bu da dislokasyon hareketlerine karşı engel teşkil etmektedir. Bu nedenle dislokasyonların hareketi için daha fazla gerilmeye ihtiyaç duyulacak ve kompozitin mukavemeti artacaktır. Son olarak, dislokasyon yoğunluğu tane boyutuyla ters orantılı, akma

gerilmesiyle ise doğru orantılıdır. Bu nedenle partiküllerin boyutu azaldıkça dislokasyon yoğunluğu artar ve bu da daha yüksek akma gerilmesine yol açar (Dieter & Bacon, 1976). Literatür çalışmaları incelendiğinde; Lin ve ark. (Y. C. Lin et al., 2004) basma sırasında metal matrisli kompozitlerin iki mekanizmayla deforme olduğunu açıklar; matris tane deformasyonu ve sınır kayma deformasyonu. Sınır kayma deformasyonu partiküllerin hacim oranının artmasıyla artar.

Gr ve CNT partikül takviyeli kompozitlerin basma testi sonuçları

Gr ve CNT takviyeli hibrit kompozit numuneler için gerilim-gerinim eğrileri Şekil 62’de gösterilmiştir.



Şekil 62. Gr ve CNT partikül takviyeli hibrit kompozitlerin basma testi sonuçları

Kompozit malzemelerin sertliği, Metal matrisli kompozit (MMK) 'deki grafit takviyesinin konsantrasyonuyla hafifçe değişmiştir. 850 °C sıcaklıkta sinterlenen bakır grafit kompozit, partiküller arasındaki daha iyi bağlanma nedeniyle 750 °C'de üretilen kompozitlerle karşılaştırıldığında tüm grafit takviyesi konsantrasyonlarında daha yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Kompozitin basma dayanımı CNT takviyesiyle artarken, en iyi dayanım gösteren Cu-Gr-2CNT hibrit kompozitidir (Shu et al., 2019).

Şekil 62’ de, bakır grafit kompozitlerdeki grafit konsantrasyonunun artmasıyla kompozitlerin sertliğinin giderek arttığını görülmektedir. Grafitin bakır matris içerisine takviyesinin, takviye fazının yumuşak yapısından dolayı kompozit numunelerin sertlik özelliğinde fazla bir iyileşme sağlamadığı görülmüştür (Samal et al., 2013). Düşük konsantrasyonlu grafit takviyesiyle kompozit numunenin geliştirilmiş sertlik özelliği, bakır matris ile takviye partikülleri arasındaki daha iyi arayüzey bağlantısından kaynaklanmaktadır (Chaubey et al., 2016).

CNT'ler grafitten daha hafiftir ve yaklaşık olarak benzer akma mukavemetine sahiptir, bu da onu yüksek mukavemet/ağırlık oranının gerekli olduğu uygulamalar için istenen aday

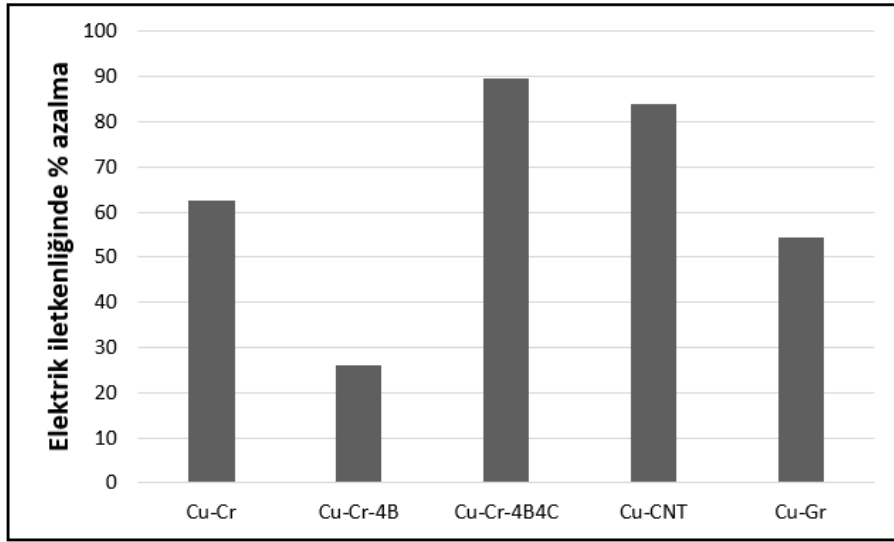
haline getirir. Termal stabilite söz konusu olduğunda, CNT'ler grafit ile karşılaştırıldığında üstün özellikler sağlar.

Elektiriksel İletkenlik

Yüksek iletkenliğe sahip bir metalin elektriksel iletkenliğinin iyileştirilmesi hala büyük bir bilim sorusudur. Saf Cu oda sıcaklığında dört prob yöntemiyle ölçüldüğünde elektiriksel iletkenliği $3,9 \pm 0,3 \times 10^5$ S/cm'dir. Bu, referans iletkenliğe (5,96 S/cm) kıyasla biraz daha düşüktür (Uddin et al., 2010). Toz metalürjisinin sinterleme gövdesinde teorik yoğunluğun %100 'üne ulaşmak zordur. Kompozitin içinde belli miktarda gözeneklilik olacaktır. Bu gözenekler aslında kompozitlerin iletkenliğini azaltan yalıtım bölgeleridir. Elektronik ve elektrik kablolarının yanı sıra güç hatlarında elektrik iletimi için daha hafif, daha güçlü ve daha iletken malzemeler elde etmek amacıyla elektrik iletken malzemelerinin geliştirilmesine yönelik artan bir talep vardır. Bakır ana matrisine farklı takviye elemanları ekleyerek en iyi mekanik özellik gösteren numunelerin elektrik iletkenliği değerleri ölçülmüştür (Tablo 11). Saf Cu 'ya göre elektrik iletkenliğinde % azalma ve iletkenlik değerleri ise Şekil 63'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bakır matrisine takviye elemanları katkısıyla elektrik iletkenliğinin azaldığı görülmüştür (Salvo et al., 2019; P. Yang et al., 2018). Ayrıca, Bor ve grafit ilavesi elektiriksel iletkenlik üzerinde çok az olumsuz etki göstermiştir ancak tribolojik performansı önemli ölçüde artırmıştır.

Tablo 11. En iyi mekanik özellik gösteren numunelerin elektrik iletkenliği değerleri

Üretilen Kompozit	Direnç ohm*cm	İletkenlik S/cm
Cu	2.55E-06	398750.1063
Cu-Cr	6.66E-06	150090.9251
Cu-Cr-4B	3.39E-06	294649.6526
Cu-Cr-4B ₄ C	2.36E-05	42462.2132
Cu-CNT	1.55E-05	64588.3079
Cu-Gr	5.48E-06	182402.1659



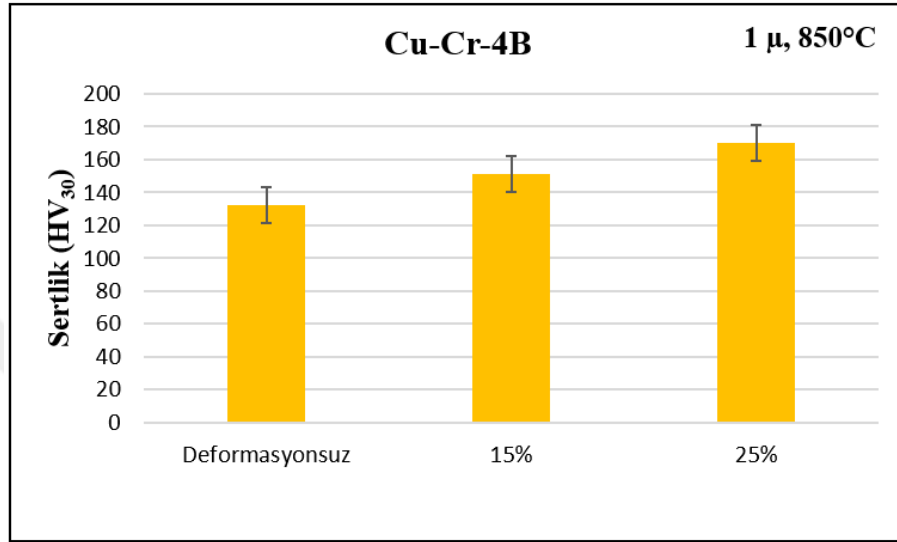
Şekil 63. Üretilen kompozitlerin Saf Cu 'ya göre elektrik iletkenliğinde % azalma değerleri

Cu matrisindeki grafit (Gr) takviyenin toz metalürjisi ile üretilen kompozitlerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, Grafit içeriği ile Saf bakıra kıyasla elektrik iletkenliği azaldığı (elektrik iletkenliğinde takviyesiz Cu numunesinin elektrik iletkenliğine göre yaklaşık %54 azalma) ve Cu matrisine ağırlıça %1 CNT eklenmesiyle elektrik iletkenliği yaklaşık %83, %1 Cr eklenmesiyle yaklaşık %62 oranında azalmıştır. Saf Cu'ya kıyasla elektrik iletkenliği değerinde en fazla azalma%89 ile Cu-Cr-4B₄C kompozitinde ölçülmüştür.

Cu matrisindeki grafit (Gr) takviyenin toz metalürjisi ile üretilen kompozitlerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Dixit & Srivastava, 2019). Grafit içeriğinin artmasıyla elektrik iletkenliği azalmış ve %5 Gr takviyeli kompozit için %67,8 IACS elektrik iletkenliği elde edilmiştir (elektrik iletkenliğinde takviyesiz Cu numunesinin elektrik iletkenliğine göre yaklaşık %22 azalma). Başka bir çalışmada ise Cu matrisindeki CNT takviyesinin, toz metalürjisi ile üretilen kompozitlerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Akbarpour, Mirabad, Alipour, et al., 2020). Cu matrisine hacimce %4 (veya ağırlıkça %0,83) CNT eklenmesiyle elektrik iletkenliği yaklaşık %8 oranında azaldığı görülmüştür.

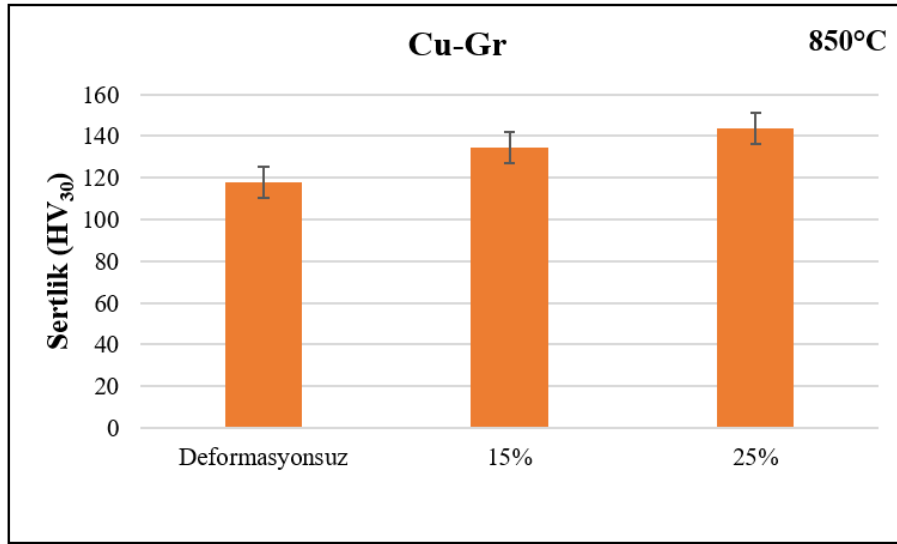
Haddeleme

En iyi mekanik özellik gösteren numuneler kütsel Şekil verme yöntemlerinden biri olan haddeleme ile plastik deformasyona uğratılmıştır. Soğuk haddeleme, metal matrisli kompozitler için en önemli Şekillendirme yöntemlerinden biridir. Bu kompozitlere %15 ve %25 oranında deformasyon uygulanmıştır. Şekil 63-65’de deformasyonsuz ve deforme olmuş durumdaki kompozitlerin sertliğı gösterilmiştir.



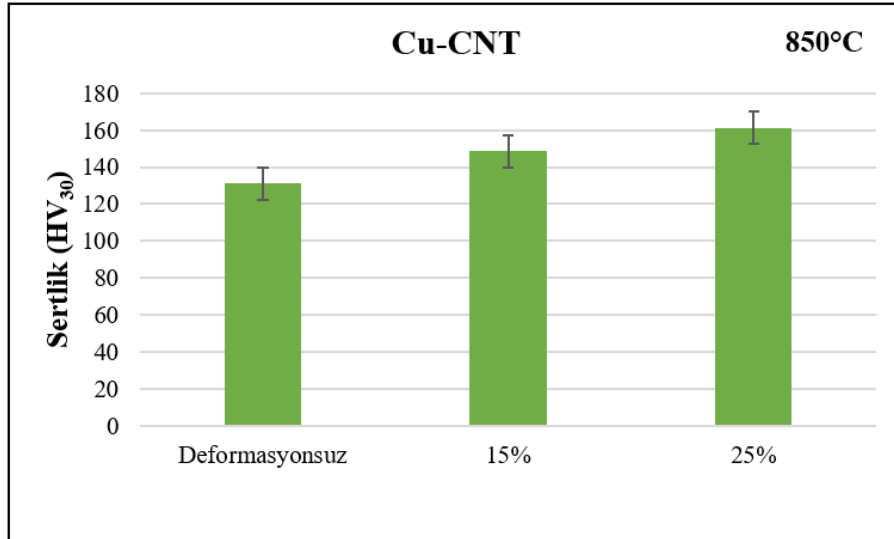
Şekil 64. B partikül takviyeli kompozitin sertlik değęrlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması

Şekil 64’deki grafik incelendiğinde deformasyon oranı arttıkça sertliğı artmıştır. Deformasyon oranı arttıkça en fazla sertlik artışı %25 deforme olmuş Cu-Cr-B hibrit kompozitinde olduğu tespit edilmiştir (169,9 HV). Deformasyon oranı arttıkça tane yapısı küçölür, haddeleme yönünde yönlenmeler meydana gelir. Şekil 63-64 incelendiğinde ise deformasyon oranı arttıkça mekanik özelliklerdeki iyileşmenin artış miktarı gözlenmiştir.



Şekil 65. Gr partikül takviyeli kompozitin sertlik değerlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması

Deformasyon oranı arttıkça Cu-Gr kompozitin sertliği artmıştır (Şekil 65). Soğuk haddeleme numunelerin sertliğini artıran dislokasyonların oluşmasına neden olmuştur. Grafit, kayma deformasyonu altında kolayca kırılabilir çünkü grafit katmanları arasındaki zayıf van der Waals kuvveti, katmanlar arası kaymanın üretilmesini kolaylaştırır (M. Yang et al., 2018). Literatür çalışmaları incelendiğinde takviye ile matris arasındaki arayüz kaymasının, yüksek sıcaklıktaki plastik deformasyon sürecinde kolaylıkla oluşabileceği bildirilmiştir (M. Wang et al., 2020).



Şekil 66. CNT partikül takviyeli kompozitin sertlik değerlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması

Şekil 66'da CNT partikül takviyeli kompozitin sertlik değerlerinin deformasyon oranlarına göre karşılaştırılması verilmiştir. Karbon nanotüplerin (CNT'ler) bakır matris içindeki zayıf dağılımı ve CNT'ler ile Cu matris arasındaki zayıf arayüzey bağı,

kompozitlerinin mühendislik uygulamalarını kritik şekilde engellemektedir (Deng et al., 2018). Burada, soğuk preslenmesi ve ardından sinterlenmesi gerçekleşen kompozit numuneler soğuk haddeleme yoluyla üretilen Cu/CNT kompozitlerinde CNT'ler ve Cu matrisi arasında iyi dağılmış ve sıkı bir arayüzey bağı oluşturmuştur (G. Liu et al., 2019). Mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi esas olarak kompoziti yoğun hale getiren ve CNT'ler ile Cu matrisi arasındaki arayüzey bağına artıran soğuk haddelemeden kaynaklanmaktadır (Van Duong et al., 2020).



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bakır matris malzemesine Cr, B, B₄C, Gr ve CNT partikülleri takviye edilerek hibrit kompozitler elde edilmiştir. Soğuk presleme tekniği ile preslenmesi ve argon atmosferinde sinterlenmeleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin mekanik, tribolojik, korozyon, elektrik iletkenliği özellikleri incelenmesi neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 12).

Tablo 12. Tüm Kompozitlerin Genel Sonuçları

Grup	Numune	Sertlik	Aşınma dayanımı	Korozyon dayanımı
1. Grup	Cu	X	X	X
	Cu-Cr	-	-	-
	Cu-Cr-1B	-	-	-
	Cu-Cr-2B	-	-	-
	Cu-Cr-3B	-	-	Maksimum
	Cu-Cr-4B	Maksimum	Maksimum	-
2. Grup	Cu-Cr-1B ₄ C	X	X	X
	Cu-Cr-2B ₄ C	-	-	-
	Cu-Cr-3B ₄ C	-	-	-
	Cu-Cr-4B ₄ C	-	-	Maksimum
	Cu-Cr-4B ₄ C	Maksimum	Maksimum	-
3. Grup	Cu-Gr	-	-	-
	Cu-2Gr	Maksimum	Maksimum	Maksimum
4. Grup	Cu-CNT	X	X	Maksimum
	Cu-2CNT	-	-	-
	Cu-Gr-CNT	-	-	-
	Cu-Gr-2CNT	Maksimum	Maksimum	X
	Cu-Gr-2CNT	Maksimum	Maksimum	X

- Cu matrisli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemiyle elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, takviyelerin Cu matrisi içinde eşit şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır.
- Sertlik testlerinde Cr ve B takviyesi kompozit numunelerin sertlik değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle B miktarındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Ağırlıkça %4 katkılı B numunesinde en yüksek sertlik (142 HV) sonucu elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla

hibrit kompozitlerin sertlik sonuçlarının arttığı hem B₄C katkısında hemde B katkısında görülmüştür. Takviye elemanlarının (B₄C ve B) tanecik boyutlarının matris malzeme üzerindeki sertliklere etkisinde partikül boyutunun azalmasının sertlik değerlerini artırdığı sonucuna varılmıştır. Saf B katkısının B₄C katkısına göre daha yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği ve sırasıyla 142 HV ve 129 HV gibi değerlere ulaşıldığı görülmüştür. En yüksek sertlik sonucu 850 °C 'de sinterlenen 1 µm' lik B'nin Cu-Cr-4B hibrit kompozitinde elde edilmiştir. Cu-Cr-4B numunesinde saf Cu numunesine göre %76.25' lik daha yüksek bir değere ulaşılmıştır. Grafit ve Karbon nanotüp takviyeli kompozit numunelerin takviye miktarı arttıkça sertlik değerleri artmıştır. Karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde Grafit takviyeli kompozitlere göre bütün takviye oranlarında sertlik değerlerinin daha fazla olduğu görülmektedir.

- Sinterleme sıcaklığının artmasıyla kompozitlerin sertlik sonuçlarının arttığı hem Gr katkısında hemde CNT katkısında görülmüştür. Sinterleme sıcaklığı ve takviye oranları parametreleri incelendiğinde en yüksek sertlik sonucu 850 °C 'de sinterlenen Cu-Gr-2CNT hibrit kompozitinde elde edilmiştir. Cu-Gr-2CNT numunesinde saf Cu numunesine göre %51,4' lük daha yüksek bir değere ulaşılmıştır.
- Sürtünme katsayısı değerlerinde alınan sonuçlarda Cr, B ve B₄C takviyesi saf Cu numunesinde çok yüksek bir aşınma direnci sağlamıştır. Sinterleme sıcaklığı arttıkça ve takviye partikül boyutunun küçülmesiyle numunelerin tribolojik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.
- Sinterleme sıcaklığının artmasıyla hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı ve aşınmaya karşı gösterilen direnci artırdığı görülmüştür. Saf Cu numunesine göre sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde aynı partikül boyutunda 750 °C' de hazırlanan hibrit kompozitlerde Cu-2CNT numunesinde %9.2, Cu-CNT numunesinde ise %3.88, Cu-Gr-2CNT numunesinde %3.92 ve Cu-Gr-CNT numunesinde % 5,27 'lik bir düşüş gözlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça numunelerin tribolojik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.
- B takviye oranı arttıkça (%3'e kadar) malzemenin korozyon direnci artmıştır. Cu-Cr-3B' de optimum değer elde edilmiştir. Takviye miktarının daha fazla artması korozyon davranışını olumsuz etkilediği görülmüştür. Aynı partikül boyutundaki numunelerin sinterleme sıcaklığının 750°C'den 850°C'ye artması korozyon dayanımını azaltmıştır. Aynı sinterleme sıcaklığına sahip malzemenin takviye

tanecik boyutu 44 μm dan 1 μm 'a küçüldükçe korozyon dayanımının arttığı görülmüştür.

- B_4C takviye oranı arttıkça (%3'e kadar) malzemenin korozyon direnci artmıştır. $\text{Cu-Cr-3B}_4\text{C}$ ' de optimum değer elde edilmiştir. Takviye miktarının daha fazla artması korozyon davranışını olumsuz etkilediği görülmüştür. Aynı partikül boyutundaki numunelerin sinterleme sıcaklığının 750°C 'den 850°C 'ye artması korozyon dayanımını azaltmıştır. Aynı sinterleme sıcaklığına sahip malzemenin takviye partikül boyutu 44 μm dan 1 μm 'a küçüldükçe korozyon dayanımının arttığı görülmüştür.
- Gr takviye oranı arttıkça korozyona karşı gösterilen direnç artmıştır. Saf bakıra kıyasla Grafit takviyesi ile korozyon dayanımının arttığı görülmüştür.
- CNT takviye oranı arttıkça akım yoğunluğu artmış yani korozyon direnci azalmıştır. Saf Cu'ya CNT takviye edilmesiyle kompozit malzemenin korozyon direnci azalmıştır.
- Bor partikül takviye oranı arttıkça kompozitin basma dayanımının arttığı görülmektedir. Takviye partikül boyutu azaldıkça ve sinterleme sıcaklığı arttıkça kompozitin basma dayanımı artmıştır.
- CNT takviyesiyle kompozitin basma dayanımı artarken, en iyi dayanım gösteren Cu-Gr-2CNT hibrit kompozitidir.
- Bakır matrisine Cr, B, B_4C , Gr ve CNT takviye elemanları katkısıyla elektrik iletkenliğinin azaldığı fakat B ve Gr ilavesinin elektriksel iletkenlik üzerinde çok az olumsuz etki gösterdiği sonucuna varılmıştır.
- Hibrit kompozitlerde deformasyon oranı arttıkça sertlik değerinde artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Deformasyon oranı arttıkça en fazla sertlik artışı %25 deforme olmuş Cu-Cr-B hibrit kompozitinde olduğu tespit edilmiştir.
- Çalışmada incelenen mekanik, tribolojik ve korozyon testleri bir arada ele alındığında basma testleri ile sertlik testlerinin benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Aşınma ve korozyon testlerinde ise deformasyona uğrayan hibrit kompozitlerde bakır numunesine göre takviyelerin aşınmayı ve korozyonu olumlu yönde etkilediği görülmüştür.
- Hibrit kompozitlerin sertlik testi sonuçları ile basma testli sonuçları ilişkiler incelendiğinde takviye miktarlarının artması sonucunda saf bakır numunesine göre takviye edilen bütün takviye malzemelerin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.
- Sertlik ile basma test sonuçları birbirini destekler şekilde çıkmıştır. Takviye miktarının artmasıyla sertlik ve basma sonuçlarının da arttığı yapılan testler

sonucunda görülmüştür. Bu durumun asıl nedeni homojen bir şekilde matris yapı ile birleştirilen ve tanecik boyutlarının matris malzemedeki küçük seçilen takviye elemanlarının saf hallerinin bakırdan çok daha iyi mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olmasıdır.

- Aşınma sonrası SEM görüntüleri testlerinde ki homojen takviye dağılımı korozyon sonrası SEM görüntülerinde de görülmüştür. Takviye miktarının homojen dağılmadığı yerlerde aşınma ve korozyon hasarı artmıştır.
- Çalışmada kullanılan bütün takviye elemanları bir arada incelendiğinde mekanik, tribolojik ve korozyon sonucuna en iyi sonuçlar Cu-Cr-4B kompozitinde görülmüştür.
- Takviye elemanlarında Bor ve bor karbür kendi aralarında incelendiğinde bor karbürün sinterleme sıcaklığında XRD analizlerinde farklı fazların oluşmasıyla mekanik ve tribolojik özelliklerinin azaldığı görülmüştür.
- Grafit ve CNT nin kendi aralarındaki kıyaslamalarında ise grafitin ıslanabilirlik özelliği nedeniyle bakır ile bağlanmasının CNT ye göre daha düşük olduğu ve bu durumun mekanik tribolojik özellikleri etkilediği gösterilmiştir.
- Korozyon sonuçları bütün takviye elemanları birlikte değerlendirildiğinde bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir; takviye partikül boyutunun matris malzeme tanecik boyutundan küçük olması daha iyi bir homojen karışımı sağlamıştır ve bu durum da sinterleme ve presleme esnasında çok daha iyi bir matris-takviye bağlanmasını sağlamıştır. Daha yüksek sinterleme sıcaklığı ve düşük partikül boyutunun çalışmadaki aşınma ve mekanik sonuçları olumlu yönde etkilediği görülmüştür.
- Bor (B) ve B₄C takviyelerinde aşınma direnci ve mekanik özelliklerde B nin daha iyi özellikler gösterdiği görülmüşken, korozyon özelliklerinde B₄C nin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu duruma saf B' ye göre karbür takviyeli Bor'un oksitlenme direncinin daha yüksek olması neden olduğu düşünülmektedir.
- Bor ve bor karbürün korozyon özelliklerinde ise takviye miktarındaki artış ile korozyon direncinin arttığı görülmüştür. Ancak ağırlıkça yüzde 4 katkılı hibrit kompozitlerde XRD faz tanımlamalarına ve sinterleme sıcaklığı göz önüne alınarak korozyon direncinin azaldığı görülmüştür. Bu duruma diğer sebep olacak durum ise bakır matrisli yapının üzerinde oksit tabakanın heterojen olarak bir bölgede toplanmasıyla hibrit kompozitler üzerinde derin çukurlara neden olmuştur. Genel olarak bu durum ise oksit tabaka ile yoğun bor takviyesinin bakır matrisli hibrit yapıyı bozduğu düşünülebilir.

KAYNAKÇA

- Abenojar, J., Martinez, M. A., & Velasco, F. (2006). Effect of the boron content in the aluminium/boron composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 422(1–2), 67–72.
- Abouelmagd, G. (2004). Hot deformation and wear resistance of P/M aluminium metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 1395–1401.
- Akbarpour, M. R., Mirabad, H. M., Alipour, S., & Kim, H. S. (2020). Enhanced tensile properties and electrical conductivity of Cu-CNT nanocomposites processed via the combination of flake powder metallurgy and high pressure torsion methods. *Materials Science and Engineering: A*, 773, 138888.
- Akbarpour, M. R., Mirabad, H. M., Azar, M. K., Kakaei, K., & Kim, H. S. (2020). Synergistic role of carbon nanotube and SiCn reinforcements on mechanical properties and corrosion behavior of Cu-based nanocomposite developed by flake powder metallurgy and spark plasma sintering process. *Materials Science and Engineering: A*, 786, 139395.
- Akbarpour, M. R., Salahi, E., Hesari, F. A., Simchi, A., & Kim, H. S. (2014). Microstructure and compressibility of SiC nanoparticles reinforced Cu nanocomposite powders processed by high energy mechanical milling. *Ceramics International*, 40(1), 951–960.
- Akramifard, H. R., Shamanian, M., Sabbaghian, M., & Esmailzadeh, M. (2014). Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 838–844.
- Alaneme, K. K., & Odoni, B. U. (2016). Mechanical properties, wear and corrosion behavior of copper matrix composites reinforced with steel machining chips. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1593–1599.
- Ali, A., Koloor, S. S. R., Alshehri, A. H., & Arockiarajan, A. (2023). Carbon Nanotube Characteristics and Enhancement Effects on the Mechanical Features of Polymer-based Materials and Structures—A Review. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Alihosseini, H., Dehghani, K., & Kamali, J. (2017). Microstructure characterization, mechanical properties, compressibility and sintering behavior of Al-B4C nanocomposite powders. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2126–2134.
- Alizadeh, A., & Taheri-Nassaj, E. (2011). Wear behavior of nanostructured Al and Al–B 4 C nanocomposites produced by mechanical milling and hot extrusion. *Tribology Letters*, 44, 59–66.
- Aslan, N., Aksakal, B., & Findik, F. (2021). Fabrication of porous-Ti6Al4V alloy by using hot pressing technique and Mg space holder for hard-tissue biomedical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 32(7), 80.
- Astm, G. (2004). Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements. *G102-89*, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.

- Atik, B. (2020). *Cp-Ti Üzerine Kitin, TiO₂, SiC ve h-BN İnce Filmler Kaplanarak Biyomimetik Yüzeyler Elde Edilmesi*. Atatürk Üniversitesi.
- Ayyappadas, C. ao, Muthuchamy, A., Annamalai, A. R., & Agrawal, D. K. (2017). An investigation on the effect of sintering mode on various properties of copper-graphene metal matrix composite. *Advanced Powder Technology*, 28(7), 1760–1768.
- Babul, T., Baranowski, M., Sobczak, N., Homa, M., & Leśniewski, W. (2016). Thermophysical properties of Cu-matrix composites manufactured using Cu powder coated with graphene. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 3146–3151.
- Bakkar, A., & Ataya, S. (2014). Corrosion behaviour of stainless steel fibre-reinforced copper metal matrix composite with reference to electrochemical response of its constituents. *Corrosion Science*, 85, 343–351.
- Bakshi, S. R., Lahiri, D., & Agarwal, A. (2010). Carbon nanotube reinforced metal matrix composites-a review. *International Materials Reviews*, 55(1), 41–64.
- Balamurugan, G. M., Duraiselvam, M., & Anandakrishnan, V. (2012). Comparison of high temperature wear behaviour of plasma sprayed WC–Co coated and hard chromium plated AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 35, 640–646.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8(3), 902–907.
- Bansal, N. P., & Lamon, J. (2014). *Ceramic matrix composites: Materials, modeling and technology*. John Wiley & Sons.
- Bashirvand, S., & Montazeri, A. (2016). New aspects on the metal reinforcement by carbon nanofillers: a molecular dynamics study. *Materials & Design*, 91, 306–313.
- Belytschko, T., Xiao, S. P., Schatz, G. C., & Ruoff, R. S. (2002). Atomistic simulations of nanotube fracture. *Physical Review B*, 65(23), 235430.
- Berman, D., Erdemir, A., & Sumant, A. V. (2014). Graphene: a new emerging lubricant. *Materials Today*, 17(1), 31–42.
- Bharat, N., & Bose, P. S. C. (2021). An overview on the effect of reinforcement and wear behaviour of metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 707–713.
- Bunsell, A. R., Joannès, S., & Thionnet, A. (2021). *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press.
- Calli, C., Tazegul, O., & Kayali, E. S. (2017). Wear and corrosion characteristics of copper-based composite coatings. *Industrial Lubrication and Tribology*, 69(2), 300–305.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international.
- Cao, M., Xiong, D.-B., Tan, Z., Ji, G., Amin-Ahmadi, B., Guo, Q., Fan, G., Guo, C., Li, Z., & Zhang, D. (2017). Aligning graphene in bulk copper: Nacre-inspired nanolaminated architecture coupled with in-situ processing for enhanced mechanical properties and high electrical conductivity. *Carbon*, 117, 65–74.
- Çelik, A., Acar, M. T., Yetim, T., Kovacı, H., & Yetim, A. F. (2020). Improving structural, tribological and electrochemical properties of Ti6Al4V alloy with B-doped TiO₂ thin films. *Tribology International*, 146, 106210.
- Çelik, A., Atik, B., Uzun, Y., Bozkurt, Y. B., & Kovacı, H. (2023). Wear and corrosion properties of CP-titanium coated with Chitin–Ceramic nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 303, 127801.

- Chao, M., Cui, H., Lu, F., & Tang, X. (2013). Evolution behavior of TiB₂ particles during laser welding on aluminum metal matrix composites reinforced with particles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(6), 1543–1548.
- Chaubey, A. K., Scudino, S., Mukhopadhyay, N. K., & Eckert, J. (2016). Processing, microstructure and mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with mechanically alloyed particles. *Journal of Materials Research*, 31(9), 1229–1236.
- Chawla, K. K., & Chawla, K. K. (1998). *Metal matrix composites*. Springer.
- Chen, F., Ying, J., Wang, Y., Du, S., Liu, Z., & Huang, Q. (2016). Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites. *Carbon*, 96, 836–842.
- Chen, J., Cheng, J., Zhu, S. Y., Tan, H., Qiao, Z. H., & Yang, J. (2019). Tribological Behaviors of Cu/AlMgB₁₄ Composite Under Deionized Water and Liquid Paraffin. *Tribology Letters*, 67(1). <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1113-z>
- Chen, X.-G., St-Georges, L., & Roux, M. (2012). Mechanical behavior of high boron content Al-B₄C metal matrix composites at elevated temperatures. *Materials Science Forum*, 706, 631–637.
- Chen, X. H., Chen, C. S., Xiao, H. N., Cheng, F. Q., Zhang, G., & Yi, G. J. (2005). Corrosion behavior of carbon nanotubes–Ni composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 191(2–3), 351–356.
- Chen, Y., Zhang, X., Liu, E., He, C., Han, Y., Li, Q., Nash, P., & Zhao, N. (2016). Fabrication of three-dimensional graphene/Cu composite by in-situ CVD and its strengthening mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*, 688, 69–76.
- Chen, Y., Zhang, X., Liu, E., He, C., Shi, C., Li, J., Nash, P., & Zhao, N. (2016). Fabrication of in-situ grown graphene reinforced Cu matrix composites. *Scientific Reports*, 6(1), 19363.
- Chu, K., & Jia, C. (2014). Enhanced strength in bulk graphene–copper composites. *Physica Status Solidi (A)*, 211(1), 184–190.
- Chu, K., Wang, F., Wang, X., & Huang, D. (2018). Anisotropic mechanical properties of graphene/copper composites with aligned graphene. *Materials Science and Engineering: A*, 713, 269–277.
- Chu, K., Wang, X., Wang, F., Li, Y., Huang, D., Liu, H., Ma, W., Liu, F., & Zhang, H. (2018). Largely enhanced thermal conductivity of graphene/copper composites with highly aligned graphene network. *Carbon*, 127, 102–112.
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.
- Cuhadaroglu, A. D., & Erdal, K. (2018). Grafit: Bir genel değerlendirme. *Teknik Bilimler Dergisi*, 8(1), 14–33.
- Cui, Y., Wang, L., Li, B., Cao, G., & Fei, W. (2014). Effect of ball milling on the defect of few-layer graphene and properties of copper matrix composites. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27, 937–943.
- de Bondt, A. (2000). Effect of reinforcement properties. *Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements–Research in Practice*. Edited by AO Abd El Halim, D, 5, 13–22.

- De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H., & Hart, A. J. (2013). Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science*, 339(6119), 535–539.
- Deepa, J. P., Resmi, V. G., Rajan, T. P. D., Pavithran, C., & Pai, B. C. (2011a). Studies on the effect of processing parameters on electroless coating of copper on boron carbide particles. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 64, 47–51.
- Deepa, J. P., Resmi, V. G., Rajan, T. P. D., Pavithran, C., & Pai, B. C. (2011b). Studies on the influence of surface pre-treatments on electroless copper coating of boron carbide particles. *Applied Surface Science*, 257(17), 7466–7474.
- Demirkol, M. (2010). Plastik şekil verme teknolojisi ders notları. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul*.
- Deng, H., Yi, J., Xia, C., & Yi, Y. (2018). Improving the mechanical properties of carbon nanotube-reinforced pure copper matrix composites by spark plasma sintering and hot rolling. *Materials Letters*, 210, 177–181.
- Deniz, M. E. (2005). *Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıt işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı/Production technique of composite materials and the design and manufacturing of an device capable of producing*.
- Dieter, G. E., & Bacon, D. (1976). *Mechanical metallurgy* (Vol. 3). McGraw-hill New York.
- Dixit, M., & Srivastava, R. (2019). The effect of copper granules on interfacial bonding and properties of the copper-graphite composite prepared by flake powder metallurgy. *Advanced Powder Technology*, 30(12), 3067–3078.
- Dogan, K., Ozgun, M. I., Subutay, H., Salur, E., Eker, Y., Kuntoglu, M., Aslan, A., Gupta, M. K., & Acarer, M. (2022). Dispersion mechanism-induced variations in microstructural and mechanical behavior of CNT-reinforced aluminum nanocomposites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(1). <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00374-z>
- Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., & Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(11), 3605–3628.
- Dong, L., Chen, W., Deng, N., Song, J., & Wang, J. (2017). Investigation on arc erosion behaviors and mechanism of W70Cu30 electrical contact materials adding graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 923–930.
- Dong, L., Chen, W., Zheng, C., & Deng, N. (2017). Microstructure and properties characterization of tungsten–copper composite materials doped with graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 1637–1646.
- Dutkiewicz, J., Ozga, P., Maziarz, W., Pstruś, J., Kania, B., Bobrowski, P., & Stolarska, J. (2015). Microstructure and properties of bulk copper matrix composites strengthened with various kinds of graphene nanoplatelets. *Materials Science and Engineering: A*, 628, 124–134.
- Efe, G. C., Zeytin, S., & Bindal, C. (2012). The effect of SiC particle size on the properties of Cu–SiC composites. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 633–639.
- El-Kady, O., & Fathy, A. (2014). Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 348–353.
- El Moumen, A., Kanit, T., Imad, A., & El Minor, H. (2015). Effect of reinforcement shape on physical properties and representative volume element of particles-reinforced composites: statistical and numerical approaches. *Mechanics of Materials*, 83, 1–16.

- Fogagnolo, J. B., Ruiz-Navas, E. M., Simón, M. A., & Martinez, M. A. (2003). Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 792–795.
- Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L., & Wang, B. (2016). Mechanical properties and thermal conductivity of graphene reinforced copper matrix composites. *Powder Technology*, 301, 601–607.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191.
- German, R. M. (2016). *Particulate composites*. Springer.
- Ghodrati, H., & Ghomashchi, R. (2019). Effect of graphene dispersion and interfacial bonding on the mechanical properties of metal matrix composites: an overview. *FlatChem*, 16, 100113.
- Ghosh, S. K., Dey, G. K., Dusane, R. O., & Grover, A. K. (2006). Improved pitting corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline Ni–Cu alloys in 3.0 wt.% NaCl solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 426(1–2), 235–243.
- Godfrey, T. M. T., Wisbey, A., Goodwin, P. S., Bagnall, K., & Ward-Close, C. M. (2000). Microstructure and tensile properties of mechanically alloyed Ti–6Al–4V with boron additions. *Materials Science and Engineering: A*, 282(1–2), 240–250.
- Gofrey, T. M. T., Goodwin, P. S., & Ward-Close, C. M. (2000). Titanium particulate metal matrix composites—Reinforcement, production methods, and mechanical properties. *Advanced Engineering Materials*, 2(3), 85–91.
- Goli, P., Ning, H., Li, X., Lu, C. Y., Novoselov, K. S., & Balandin, A. A. (2014). Thermal properties of graphene–copper–graphene heterogeneous films. *Nano Letters*, 14(3), 1497–1503.
- Guideroni, C., Pavlenko, E., Turq, V., Weibel, A., Puech, P., Estournès, C., Peigney, A., Bacsá, W., & Laurent, C. (2013). The preparation of carbon nanotube (CNT)/copper composites and the effect of the number of CNT walls on their hardness, friction and wear properties. *Carbon*, 58, 185–197.
- Gunes, I., Uygunoglu, T., & Erdogan, M. (2015). Effect of sintering duration on some properties of pure magnesium. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 54, 156–165.
- Gutierrez-Gonzalez, C. F., Smirnov, A., Centeno, A., Fernández, A., Alonso, B., Rocha, V. G., Torrecillas, R., Zurutuza, A., & Bartolome, J. F. (2015). Wear behavior of graphene/alumina composite. *Ceramics International*, 41(6), 7434–7438.
- Hannula, P.-M., Masquelier, N., Lassila, S., Aromaa, J., Janas, D., Forsén, O., & Lundström, M. (2018). Corrosion behaviour of cast and deformed copper-carbon nanotube composite wires in chloride media. *Journal of Alloys and Compounds*, 746, 218–226.
- Harun, Ç. U. Ğ., & Erhaima, M. E. E. (2021). Effect of Mn and Zr addition on microstructure, wear and corrosion behavior of Ti-6Al-4V composite biomaterials produced by powder metallurgy. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(2), 41–48.
- Hidalgo-Manrique, P., Lei, X., Xu, R., Zhou, M., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2019). Copper/graphene composites: a review. *Journal of Materials Science*, 54, 12236–12289.
- Higashi, M., & Kanno, N. (2020). Effect of initial powder particle size on the hot workability of powder metallurgy Ni-based superalloys. *Materials & Design*, 194, 108926.

- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640.
- Hsu, C.-Y., Yeh, J.-W., Chen, S.-K., & Shun, T.-T. (2004). Wear resistance and high-temperature compression strength of Fcc CuCoNiCrAl 0.5 Fe alloy with boron addition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 1465–1469.
- Hu, Z., Tong, G., Lin, D., Chen, C., Guo, H., Xu, J., & Zhou, L. (2016). Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites—a review. *Materials Science and Technology*, 32(9), 930–953.
- Huang, G., Wang, H., Cheng, P., Wang, H., Sun, B., Sun, S., Zhang, C., Chen, M., & Ding, G. (2016). Preparation and characterization of the graphene-Cu composite film by electrodeposition process. *Microelectronic Engineering*, 157, 7–12.
- Hwang, J., Yoon, T., Jin, S. H., Lee, J., Kim, T., Hong, S. H., & Jeon, S. (2013). Enhanced mechanical properties of graphene/copper nanocomposites using a molecular-level mixing process. *Advanced Materials*, 25(46), 6724–6729.
- Iijima, S., Brabec, C., Maiti, A., & Bernholc, J. (1996). Structural flexibility of carbon nanotubes. *The Journal of Chemical Physics*, 104(5), 2089–2092.
- Isfahani, M. J. N., Payami, F., Asadabad, M. A., & Shokri, A. A. (2019). Investigation of the effect of boron carbide nanoparticles on the structural, electrical and mechanical properties of Al-B₄C nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 797, 1348–1358.
- Jagannadham, K. (2011). Orientation dependence of thermal conductivity in copper-graphene composites. *Journal of Applied Physics*, 110(7).
- Jagannadham, K. (2012a). Electrical conductivity of copper–graphene composite films synthesized by electrochemical deposition with exfoliated graphene platelets. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 30(3).
- Jagannadham, K. (2012b). Thermal conductivity of copper-graphene composite films synthesized by electrochemical deposition with exfoliated graphene platelets. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 43, 316–324.
- Jagannadham, K. (2013). Volume fraction of graphene platelets in copper-graphene composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44, 552–559.
- Jamwal, A., Mittal, P., Agrawal, R., Gupta, S., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., & Gupta, P. (2020). Towards sustainable copper matrix composites: manufacturing routes with structural, mechanical, electrical and corrosion behaviour. *Journal of Composite Materials*, 54(19), 2635–2649.
- Javanbakht, M., Salahinejad, E., & Hadianfard, M. J. (2016). The effect of sintering temperature on the structure and mechanical properties of medical-grade powder metallurgy stainless steels. *Powder Technology*, 289, 37–43.
- Jha, N., Badkul, A., Mondal, D. P., Das, S., & Singh, M. (2011). Sliding wear behaviour of aluminum syntactic foam: A comparison with Al–10 wt% SiC composites. *Tribology International*, 44(3), 220–231.
- Jiang, R., Zhou, X., Fang, Q., & Liu, Z. (2016). Copper–graphene bulk composites with homogeneous graphene dispersion and enhanced mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 654, 124–130.
- Jiang, R., Zhou, X., & Liu, Z. (2017). Electroless Ni-plated graphene for tensile strength enhancement of copper. *Materials Science and Engineering: A*, 679, 323–328.

- Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1–3), 58–67.
- Kamboj, A., Raghupathy, Y., Rekha, M. Y., & Srivastava, C. (2017). Morphology, texture and corrosion behavior of nanocrystalline copper–graphene composite coatings. *Jom*, 69(7), 1149–1154.
- Kango, S., Kalia, S., Celli, A., Njuguna, J., Habibi, Y., & Kumar, R. (2013). Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites—A review. *Progress in Polymer Science*, 38(8), 1232–1261.
- Karabulut, H., Karacif, K., Çıtak, R., & Çinici, H. (2021). Corrosion behavior of particle reinforced aluminum composites. *Materials Testing*, 63(12), 1157–1163.
- Karaçor, B., & Özcanlı, M. (2023). Examination of fiber reinforced composite materials. *Gazi University Journal of Science*, 36(1), 301–320.
- Kato, H., Takama, M., Iwai, Y., Washida, K., & Sasaki, Y. (2003). Wear and mechanical properties of sintered copper–tin composites containing graphite or molybdenum disulfide. *Wear*, 255(1–6), 573–578.
- Kawai, T., Nishihara, H., & Aramaki, K. (1995). Corrosion of iron in electrolytic anhydrous methanol solutions containing ferric chloride. *Corrosion Science*, 37(5), 823–831.
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38–45.
- Kažys, R., Demčenko, A., Žukauskas, E., & Mažeika, L. (2006). Air-coupled ultrasonic investigation of multi-layered composite materials. *Ultrasonics*, 44, e819–e822.
- Khabazian, S., & Sanjabi, S. (2011). The effect of multi-walled carbon nanotube pretreatments on the electrodeposition of Ni–MWCNTs coatings. *Applied Surface Science*, 257(13), 5850–5856.
- Khobragade, N., Kumar, B., Bera, S., & Roy, D. (2017). Studies on graphene reinforced Cu base composites prepared by two step thermal processing method. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8045–8051.
- Kim, W. J., Lee, T. J., & Han, S. H. (2014). Multi-layer graphene/copper composites: Preparation using high-ratio differential speed rolling, microstructure and mechanical properties. *Carbon*, 69, 55–65.
- Kim, Y., Lee, J., Yeom, M. S., Shin, J. W., Kim, H., Cui, Y., Kysar, J. W., Hone, J., Jung, Y., & Jeon, S. (2013). Strengthening effect of single-atomic-layer graphene in metal–graphene nanolayered composites. *Nature Communications*, 4(1), 2114.
- Knopp, A., & Scharr, G. (2020). Tensile Properties of Z-pin reinforced laminates with circumferentially notched Z-pins. *Journal of Composites Science*, 4(2), 78.
- Koch, C. C. (1998). Intermetallic matrix composites prepared by mechanical alloying—a review. *Materials Science and Engineering: A*, 244(1), 39–48.
- Koltsova, T. S., Nasibulina, L. I., Anoshkin, I. V, Mishin, V. V, Kauppinen, E. I., Tolochko, O. V, & Nasibulin, A. G. (2012). New hybrid copper composite materials based on carbon nanostructures. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 2(4), 240–246.
- Kotov, N. A. (2006). Carbon sheet solutions. *Nature*, 442(7100), 254–255.
- Kumar, H. G. P., & Xavior, M. A. (2014). Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review. *Procedia Engineering*, 97, 1033–1040.

- Kumar, J., & Mondal, S. (2018). Microstructure and properties of graphite-reinforced copper matrix composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 1–10.
- Kumar, N., Bharti, A., Dixit, M., & Nigam, A. (2020). Effect of powder metallurgy process and its parameters on the mechanical and electrical properties of copper-based materials: Literature review. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59, 401–410.
- Kumar, N., Bharti, A., & Saxena, K. K. (2020). CAS: 528: DC% 2BB3cXovFGhtr0% 3D: A re-analysis of effect of various process parameters on the mechanical properties of Mg based MMCs fabricated by powder metallurgy technique. vol. 26, issue 2. *Mater. Today: Proceedings*, 1953–1959.
- Kwiecińska, B., & Petersen, H. I. (2004). Graphite, semi-graphite, natural coke, and natural char classification—ICCP system. *International Journal of Coal Geology*, 57(2), 99–116.
- Laoui, T. (2010). Corrosion performance of copper coated with carbon nanotubes. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1), 57–63.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385–388.
- Lekatou, A., Karantzalis, A. E., Evangelou, A., Gousia, V., Kaptay, G., Gácsi, Z., Baumli, P., & Simon, A. (2015). Aluminium reinforced by WC and TiC nanoparticles (ex-situ) and aluminide particles (in-situ): Microstructure, wear and corrosion behaviour. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 1121–1135.
- Lewis, A. M., Derby, B., & Kinloch, I. A. (2013). Influence of gas phase equilibria on the chemical vapor deposition of graphene. *Acs Nano*, 7(4), 3104–3117.
- Li, C., & Chou, T.-W. (2003). A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes. *International Journal of Solids and Structures*, 40(10), 2487–2499.
- Li, J., Gan, L., Liu, Y., Mateti, S., Lei, W., Chen, Y., & Yang, J. (2018). Boron nitride nanosheets reinforced waterborne polyurethane coatings for improving corrosion resistance and antifriction properties. *European Polymer Journal*, 104, 57–63.
- Li, J., Zhang, L., Xiao, J., & Zhou, K. (2015). Sliding wear behavior of copper-based composites reinforced with graphene nanosheets and graphite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(10), 3354–3362.
- Li, M., Che, H., Liu, X., Liang, S., & Xie, H. (2014). Highly enhanced mechanical properties in Cu matrix composites reinforced with graphene decorated metallic nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 49, 3725–3731.
- Li, M., Xie, J., Li, Y., & Xu, H. (2015). Reduced graphene oxide dispersed in copper matrix composites: Facile preparation and enhanced mechanical properties. *Physica Status Solidi (A)*, 212(10), 2154–2161.
- Li, W., Li, D., Fu, Q., & Pan, C. (2015). Conductive enhancement of copper/graphene composites based on high-quality graphene. *RSC Advances*, 5(98), 80428–80433.
- Li, X., Gu, Y., Shi, T., Peng, D., Tang, M., Zhang, Q., & Huang, X. (2015). Preparation of the multi-walled carbon nanotubes/nickel composite coating with superior wear and corrosion resistance. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 4656–4663.
- Li, X. Y., & Tandon, K. N. (2000). Microstructural characterization of mechanically mixed layer and wear debris in sliding wear of an Al alloy and an Al based composite. *Wear*, 245(1–2), 148–161.

- Lin, J., Wang, L., & Chen, G. (2011). Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive. *Tribology Letters*, 41, 209–215.
- Lin, Y. C., Li, H. C., Liou, S. S., & Shie, M. T. (2004). Mechanism of plastic deformation of powder metallurgy metal matrix composites of Cu–Sn/SiC and 6061/SiC under compressive stress. *Materials Science and Engineering: A*, 373(1–2), 363–369.
- Liu Shanshan; Xiao, B.L.; Xue, P.; Wang, Wenrong; Ma, Zongyi, Z. X. (2012). Effect of ball-milling time on mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(12), 2161–2168. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.026>
- Liu, G., Tao, J., Li, F., Bao, R., Liu, Y., Li, C., & Yi, J. (2019). Optimizing the interface bonding in Cu matrix composites by using functionalized carbon nanotubes and cold rolling. *Journal of Materials Research*, 34(15), 2600–2608.
- Liu, J., Li, J., & Xu, C. (2014). Interaction of the cutting tools and the ceramic-reinforced metal matrix composites during micro-machining: a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(2), 55–70.
- Liu, X., Wei, D., Zhuang, L., Cai, C., & Zhao, Y. (2015). Fabrication of high-strength graphene nanosheets/Cu composites by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 642, 1–6.
- Lu, J. P. (1997). Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes. *Physical Review Letters*, 79(7), 1297.
- Luo, H., Sui, Y., Qi, J., Meng, Q., Wei, F., & He, Y. (2017). Copper matrix composites enhanced by silver/reduced graphene oxide hybrids. *Materials Letters*, 196, 354–357.
- Maharana, H. S., Rai, P. K., & Basu, A. (2017). Surface-mechanical and electrical properties of pulse electrodeposited Cu–graphene oxide composite coating for electrical contacts. *Journal of Materials Science*, 52, 1089–1105.
- Mahesh, Koti, V., Singh, K. K., & Singh, R. K. (2022). Experimental and statistical investigation on the wear and hardness behaviour of multiwalled carbon nanotubes reinforced copper nanocomposites. *WEAR*, 500. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204368>
- Mandal, A., Murty, B. S., & Chakraborty, M. (2009). Sliding wear behaviour of T6 treated A356–TiB2 in-situ composites. *Wear*, 266(7–8), 865–872.
- Maqbool, A., Hussain, M. A., Khalid, F. A., Bakhsh, N., Hussain, A., & Kim, M. H. (2013). Mechanical characterization of copper coated carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites. *Materials Characterization*, 86, 39–48.
- Medelienė, V., Stankevič, V., Grigučevičienė, A., Selskienė, A., & Bikulčius, G. (2011). The study of corrosion and wear resistance of copper composite coatings with inclusions of carbon nanomaterials in the copper metal matrix. *Materials Science*, 17(2), 132–139.
- Meignanamoorthy, M., Ravichandran, M., Mohanavel, V., Afzal, A., Sathish, T., Alamri, S., Khan, S. A., & Saleel, C. A. (2021). Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of boron carbide reinforced aluminum alloy (Al–Fe–Si–Zn–Cu) matrix composites produced via powder metallurgy route. *Materials*, 14(15), 4315.
- Meydanoglu, O., Jodoin, B., & Kayali, E. S. (2013). Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 235, 108–116.

- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 65(15–16), 2526–2540.
- Mortensen, A., & Llorca, J. (2010). Metal matrix composites. *Annual Review of Materials Research*, 40, 243–270.
- Muharrem, P. U. L. (2019). Karbon Nanotüp (CNT) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 370–382.
- Nagavally, R. R. (2017). Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Int. J. Mech. Prod. Eng*, 5(9), 82–87.
- Nasibulin, A. G., Koltsova, T., Nasibulina, L. I., Anoshkin, I. V, Semench, A., Tolochko, O. V, & Kauppinen, E. I. (2013). A novel approach to composite preparation by direct synthesis of carbon nanomaterial on matrix or filler particles. *Acta Materialia*, 61(6), 1862–1871.
- Ngai, T. L., Zheng, W., & Li, Y. (2013). Effect of sintering temperature on the preparation of Cu–Ti₃SiC₂ metal matrix composite. *Progress in Natural Science: Materials International*, 23(1), 70–76.
- Ngo, T.-D. (2020). Introduction to composite materials. *Composite and Nanocomposite Materials—From Knowledge to Industrial Applications*.
- Novák, P. (2020). Advanced powder metallurgy technologies. In *Materials* (Vol. 13, Issue 7, p. 1742). MDPI.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V, Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V, Grigorieva, I. V, & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669.
- Orth, J. E., & Wheat, H. G. (1997). Corrosion behavior of high energy-high rate consolidated graphite/copper metal matrix composites in chloride media. *Applied Composite Materials*, 4, 305–320.
- Ovid’Ko, I. A. (2014). Metal-graphene nanocomposites with enhanced mechanical properties: a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 38(2).
- Ozay, C., Ballikaya, H., Dagdelen, F., & Karlidag, O. E. (2021). Microstructural and wear properties of the Al-B₄C composite coating produced by hot-press sintering on AA-2024 alloy. *JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 35(7), 2895–2901. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0613-1>
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2015). Graphene/elastomer nanocomposites. *Carbon*, 95, 460–484.
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75–127.
- Pavithra, C. L. P., Sarada, B. V, Rajulapati, K. V, Rao, T. N., & Sundararajan, G. (2014). A new electrochemical approach for the synthesis of copper-graphene nanocomposite foils with high hardness. *Scientific Reports*, 4(1), 4049.
- Pham, V. T., Bui, H. T., Tran, B. T., Nguyen, V. T., Le, D. Q., Than, X. T., Nguyen, V. C., Doan, D. P., & Phan, N. M. (2011). The effect of sintering temperature on the mechanical properties of a Cu/CNT nanocomposite prepared via a powder metallurgy method. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2(1), 15006.

- Ponraj, N. V., Azhagurajan, A., Vettivel, S. C., Shajan, X. S., Nabhiraj, P. Y., & Sivapragash, M. (2017). Graphene nanosheet as reinforcement agent in copper matrix composite by using powder metallurgy method. *Surfaces and Interfaces*, 6, 190–196.
- Ponraj, N. V., Vettivel, S. C., Azhagurajan, A., Nabhiraj, P. Y., Theivasanthi, T., Selvakumar, P., & Lenin, A. H. (2017). Effect of milling on dispersion of graphene nanosheet reinforcement in different morphology copper powder matrix. *Surfaces and Interfaces*, 9, 260–265.
- Prajapati, P. K., & Chaira, D. (2019). Fabrication and characterization of Cu–B 4 C metal matrix composite by powder metallurgy: Effect of B 4 C on microstructure, mechanical properties and electrical conductivity. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 673–684.
- Przestacki, D. (2014). Conventional and laser assisted machining of composite A359/20SiCp. *Procedia Cirp*, 14, 229–233.
- Qu, D., Li, F. Z., Zhang, H. Bin, Wang, Q., Zhou, T. L., Hu, C. F., & Xie, R. J. (2014). Preparation of graphene nanosheets/copper composite by spark plasma sintering. *Advanced Materials Research*, 833, 276–279.
- Qu, W., Zhang, J., Zhang, S., Li, N., Liu, C., Yu, X., Song, Y., Han, S., Chen, L., & Xi, M. (2022). Copper matrix composites reinforced by three-dimensional netlike graphene towards enhanced mechanical property and wear resistance. *Composites Communications*, 32, 101187.
- Rahimian, M., Parvin, N., & Ehsani, N. (2010). Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(4–5), 1031–1038.
- Ramana, M. V., & Ramprasad, S. (2017). Experimental investigation on jute/carbon fibre reinforced epoxy based hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8654–8664.
- Ramezani, M., Dehghani, A., & Sherif, M. M. (2022). Carbon nanotube reinforced cementitious composites: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 315, 125100.
- Roeseler, W. G., Sarh, B., Kismarton, M. U., Quinlivan, J., Sutter, J., & Roberts, D. (2007). Composite structures: the first 100 years. *16th International Conference on Composite Materials*, 1–41.
- Rubel, R. I., Ali, M. H., Jafor, M. A., & Alam, M. M. (2019). Carbon nanotubes agglomeration in reinforced composites: A review. *AIMS Materials Science*, 6(5), 756–780.
- Saboori, A., Pavese, M., Badini, C., & Fino, P. (2018). A novel approach to enhance the mechanical strength and electrical and thermal conductivity of Cu-GNP nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49, 333–345.
- Sadowski, P., Kowalczyk-Gajewska, K., & Stupkiewicz, S. (2015). Classical estimates of the effective thermoelastic properties of copper–graphene composites. *Composites Part B: Engineering*, 80, 278–290.
- Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112–121.
- Şahin, Y. (2010). Abrasive wear behaviour of SiC/2014 aluminium composite. *Tribology International*, 43(5–6), 939–943.

- Salvo, C., Mangalaraja, R. V., Udayabashkar, R., Lopez, M., & Aguilar, C. (2019). Enhanced mechanical and electrical properties of novel graphene reinforced copper matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 777, 309–316.
- Samal, C. P., Parihar, J. S. y, & Chaira, D. (2013). The effect of milling and sintering techniques on mechanical properties of Cu–graphite metal matrix composite prepared by powder metallurgy route. *Journal of Alloys and Compounds*, 569, 95–101.
- Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S., & Khanna, N. (2022). Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 282–292.
- Sarmadi, H., Kokabi, A. H., & Reihani, S. M. S. (2013). Friction and wear performance of copper–graphite surface composites fabricated by friction stir processing (FSP). *Wear*, 304(1–2), 1–12.
- Shalin, R. E. (2012). *Polymer matrix composites* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- Sharifi, E. M., Karimzadeh, F., & Enayati, M. H. (2011). Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites. *Materials & Design*, 32(6), 3263–3271.
- Shi, X. L., Yang, H., Shao, G. Q., Duan, X. L., Yan, L., Xiong, Z., & Sun, P. (2007). Fabrication and properties of W–Cu alloy reinforced by multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 457(1–2), 18–23.
- Shu, R., Jiang, X., Shao, Z., Sun, D., Zhu, D., & Luo, Z. (2019). Fabrication and mechanical properties of MWCNTs and graphene synergetically reinforced Cu–graphite matrix composites. *Powder Technology*, 349, 59–69.
- Singh, B. P., Nayak, S., Nanda, K. K., Jena, B. K., Bhattacharjee, S., & Besra, L. (2013). The production of a corrosion resistant graphene reinforced composite coating on copper by electrophoretic deposition. *Carbon*, 61, 47–56.
- Singh, S. C. E., & Selvakumar, N. (2017). Effect of milled B₄C nanoparticles on tribological analysis, microstructure and mechanical properties of Cu–4Cr matrix produced by hot extrusion. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(2), 446–456.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., & Seal, S. (2011). Graphene based materials: past, present and future. *Progress in Materials Science*, 56(8), 1178–1271.
- Sobhani, S., Albert, M., Gandy, D., Tabei, A., & Fan, Z. Y. (2023). Design Optimization of Hot Isostatic Pressing Capsules. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp7010030>
- Somiya, S. (2013). *Handbook of advanced ceramics: materials, applications, processing, and properties*. Academic press.
- Soni, S. K., Thomas, B., & Kar, V. R. (2020). A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications. *Materials Today Communications*, 25, 101546.
- Sreenivasa, R., & Mallur, S. B. (2021). Sliding wear behavior of Cu+ Sn+ Cr composites by Taguchi technique. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 7, 1–8.
- Srinivasan, V., Kunjiappan, S., & Palanisamy, P. (2021). A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications. *International Nano Letters*, 1–25.

- Su, Y., Ouyang, Q., Zhang, W., Li, Z., Guo, Q., Fan, G., & Zhang, D. (2014). Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 597, 359–369.
- Tang, Y., Yang, X., Wang, R., & Li, M. (2014). Enhancement of the mechanical properties of graphene–copper composites with graphene–nickel hybrids. *Materials Science and Engineering: A*, 599, 247–254.
- Telichenko, V., Rimshin, V., & Kuzina, E. (2018). Methods for calculating the reinforcement of concrete slabs with carbon composite materials based on the finite element model. *MATEC Web of Conferences*, 251, 4061.
- Tjong, S. C. (2013). Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(10), 281–350.
- Tomac, N., Tannessen, K., & Rasch, F. O. (1992). Machinability of particulate aluminium matrix composites. *CIRP Annals*, 41(1), 55–58.
- Toptan, F., Alves, A. C., Kerti, I., Ariza, E., & Rocha, L. A. (2013). Corrosion and tribocorrosion behaviour of Al–Si–Cu–Mg alloy and its composites reinforced with B4C particles in 0.05 M NaCl solution. *Wear*, 306(1–2), 27–35.
- Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W., & Gibson, J. M. (1996). Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, 381(6584), 678–680.
- TUFAN, B., & BATAR, T. (2015). Oysu Grafit Cevheri Flotasyon Parametrelerinin İyileştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(3), 17–25.
- Uddin, S. M., Mahmud, T., Wolf, C., Glanz, C., Kolaric, I., Volkmer, C., Höller, H., Wienecke, U., Roth, S., & Fecht, H.-J. (2010). Effect of size and shape of metal particles to improve hardness and electrical properties of carbon nanotube reinforced copper and copper alloy composites. *Composites Science and Technology*, 70(16), 2253–2257.
- Ulcay, Y., Akyol, M., & Gemci, R. (n.d.). *Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi*.
- Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge Int Science Publishing.
- Uysal, S. (2012). Graphite In Turkey And Its Position In Europe. *Industrial Minerals International Congress&Exhibition*.
- Uzunsoy, D. (2010). Investigation of dry sliding wear properties of boron doped powder metallurgy 316L stainless steel. *Materials & Design*, 31(8), 3896–3900.
- Van Duong, L., Van Luan, N., Anh, N. N., Trung, T. B., Chung, L. D., Huan, N. Q., Minh, P. N., Phuong, D. D., & Van Trinh, P. (2020). Enhanced mechanical properties and wear resistance of cold-rolled carbon nanotubes reinforced copper matrix composites. *Materials Research Express*, 7(1), 15069.
- Varol, T., & Canakci, A. (2015). Microstructure, electrical conductivity and hardness of multilayer graphene/copper nanocomposites synthesized by flake powder metallurgy. *Metals and Materials International*, 21, 704–712.
- Venkatesh, R., & Rao, V. S. (2018). Thermal, corrosion and wear analysis of copper based metal matrix composites reinforced with alumina and graphite. *Defence Technology*, 14(4), 346–355.

- Vinson, J. R., & Sierakowski, R. L. (2006). *The behavior of structures composed of composite materials* (Vol. 105). Springer.
- Wagner, H. D., Lourie, O., Feldman, Y., & Tenne, R. (1998). Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix. *Applied Physics Letters*, 72(2), 188–190.
- Walters, Da., Ericson, L. M., Casavant, M. J., Liu, J., Colbert, D. T., Smith, K. A., & Smalley, R. E. (1999). Elastic strain of freely suspended single-wall carbon nanotube ropes. *Applied Physics Letters*, 74(25), 3803–3805.
- Wang, J., Wang, N., Liu, M., Ge, C., Hou, B., Liu, G., Sun, W., Hu, Y., & Ning, Y. (2022). Hexagonal boron nitride/poly (vinyl butyral) composite coatings for corrosion protection of copper. *Journal of Materials Science & Technology*, 96, 103–112.
- Wang, L., Cui, Y., Li, B., Yang, S., Li, R., Liu, Z., Vajtai, R., & Fei, W. (2015). High apparent strengthening efficiency for reduced graphene oxide in copper matrix composites produced by molecule-lever mixing and high-shear mixing. *Rsc Advances*, 5(63), 51193–51200.
- Wang, M., Sheng, J., Wang, L.-D., Yang, Z.-Y., Shi, Z.-D., Wang, X.-J., & Fei, W.-D. (2020). Hot rolling behavior of graphene/Cu composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 153204.
- Wang, Q., & Moriyama, H. (2011). Carbon nanotube-based thin films: synthesis and properties. In *Carbon Nanotubes-Synthesis, Characterization, Applications*. IntechOpen.
- Wang, X., Li, J., & Wang, Y. (2016). Improved high temperature strength of copper-graphene composite material. *Materials Letters*, 181, 309–312.
- Wei, B. W., Qu, D., Hu, C. F., Li, F. Z., Zhou, T. L., Xie, R. J., & Zhou, Z. M. (2014). Synthesis and physical properties of graphene nanosheets reinforced copper composites. *Advanced Materials Research*, 833, 310–314.
- Wejrzanowski, T., Grybczuk, M., Chmielewski, M., Pietrzak, K., Kurzydowski, K. J., & Strojny-Nedza, A. (2016). Thermal conductivity of metal-graphene composites. *Materials & Design*, 99, 163–173.
- Wong, E. W., Sheehan, P. E., & Lieber, C. M. (1997). Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *Science*, 277(5334), 1971–1975.
- Xiao, Q., Yi, X., Jiang, B., Qin, Z., Hu, J., Jiang, Y., Liu, H., Wang, B., & Yi, D. (2017). In-situ synthesis of graphene on surface of copper powder by rotary CVD and its application in fabrication of reinforced Cu-matrix composites. *Adv. Mater. Sci*, 2(2), 1–6.
- Xie, G., Forslund, M., & Pan, J. (2014). Direct electrochemical synthesis of reduced graphene oxide (rGO)/copper composite films and their electrical/electroactive properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(10), 7444–7455.
- Xiong, D.-B., Cao, M., Guo, Q., Tan, Z., Fan, G., Li, Z., & Zhang, D. (2015). Graphene-and-copper artificial nacre fabricated by a preform impregnation process: bioinspired strategy for strengthening-toughening of metal matrix composite. *Acs Nano*, 9(7), 6934–6943.
- Xiong, D.-B., Cao, M., Guo, Q., Tan, Z., Fan, G., Li, Z., & Zhang, D. (2016). High content reduced graphene oxide reinforced copper with a bioinspired nano-laminated structure and large recoverable deformation ability. *Scientific Reports*, 6(1), 33801.

- Xu, G., Yu, Y., Zhang, Y., Li, T., & Wang, T. (2019). Effect of B₄C particle size on the mechanical properties of B₄C reinforced aluminum matrix layered composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 53–61.
- Yakobson, B. I., Brabec, C. J., & Bernholc, J. (1996). Nanomechanics of carbon tubes: instabilities beyond linear response. *Physical Review Letters*, 76(14), 2511.
- Yalçın, C. (n.d.). *Yeni nesil enerji kay-naklarında grafitin önemi ve kullanımı*.
- Yang, H., Gao, P. F., Fan, X. G., Li, H. W., Sun, Z. C., Li, H., Guo, L. G., Zhan, M., & Liu, Y. L. (2014). Some advances in plastic forming technologies of titanium alloys. *Procedia Engineering*, 81, 44–53.
- Yang, M., Xu, Z., Li, P., Guo, F., Liu, Y., Xiao, Y., Gao, W., & Gao, C. (2018). Interlayer crosslinking to conquer the stress relaxation of graphene laminated materials. *Materials Horizons*, 5(6), 1112–1119.
- Yang, P., You, X., Yi, J., Fang, D., Bao, R., Shen, T., Liu, Y., Tao, J., & Li, C. (2018). Influence of dispersion state of carbon nanotubes on electrical conductivity of copper matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 752, 376–380.
- Yao, Z., Zhu, C.-C., Cheng, M., & Liu, J. (2001). Mechanical properties of carbon nanotube by molecular dynamics simulation. *Computational Materials Science*, 22(3–4), 180–184.
- Yazdani, A., & Salahinejad, E. (2011). Evolution of reinforcement distribution in Al–B₄C composites during accumulative roll bonding. *Materials & Design*, 32(6), 3137–3142.
- Ye, T., Xu, Y., & Ren, J. (2019). Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*, 753, 146–155.
- Yener, T., Altinsoy, I., Yener, S., Celebi Efe, G., Ozbek, I., & Bindal, C. (2015). An Evaluation of Cu-B₄C Composites Manufactured by Powder Metallurgy. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 1045–1047.
- Yin, S., Zhang, Z., Ekoi, E. J., Wang, J. J., Dowling, D. P., Nicolosi, V., & Lupoi, R. (2017). Novel cold spray for fabricating graphene-reinforced metal matrix composites. *Materials Letters*, 196, 172–175.
- Yılmaz, O. (2001). Abrasive wear of FeCr (M7C3–M23C6) reinforced iron based metal matrix composites. *Materials Science and Technology*, 17(10), 1285–1292.
- Young, R. J., Kinloch, I. A., Gong, L., & Novoselov, K. S. (2012). The mechanics of graphene nanocomposites: A review. *Composites Science and Technology*, 72(12), 1459–1476.
- 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*, 84(24), 5552.
- Yu, M.-F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., & Ruoff, R. S. (2000). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, 287(5453), 637–640.
- Yue, H., Yao, L., Gao, X., Zhang, S., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., & Wang, B. (2017). Effect of ball-milling and graphene contents on the mechanical properties and fracture mechanisms of graphene nanosheets reinforced copper matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 755–762.

- Zhai, W., Shi, X., Wang, M., Xu, Z., Yao, J., Song, S., & Wang, Y. (2014). Grain refinement: a mechanism for graphene nanoplatelets to reduce friction and wear of Ni3Al matrix self-lubricating composites. *Wear*, 310(1–2), 33–40.
- Zhang, D., & Zhan, Z. (2016a). Experimental investigation of interfaces in graphene materials/copper composites from a new perspective. *Rsc Advances*, 6(57), 52219–52226.
- Zhang, D., & Zhan, Z. (2016b). Preparation of graphene nanoplatelets-copper composites by a modified semi-powder method and their mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 658, 663–671.
- Zhang, D., & Zhan, Z. (2016c). Strengthening effect of graphene derivatives in copper matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 654, 226–233.
- Zhao, C., & Wang, J. (2014). Fabrication and tensile properties of graphene/copper composites prepared by electroless plating for structural applications. *Physica Status Solidi (A)*, 211(12), 2878–2885.
- Zhao, H., Liu, L., Wu, Y., & Hu, W. (2007). Investigation on wear and corrosion behavior of Cu-graphite composites prepared by electroforming. *Composites Science and Technology*, 67(6), 1210–1217.
- Zhao, Q., Shao, Z., Liu, C., Jiang, M., Li, X., Zevenhoven, R., & Saxén, H. (2014). Preparation of Cu–Cr alloy powder by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 607, 118–124.
- Zhen, Z., & Zhu, H. (2018). Structure and properties of graphene. In *Graphene* (pp. 1–12). Elsevier.
- Zimmerli, B., Strub, M., Jeger, F., Stadler, O., & Lussi, A. (2010). Composite materials: composition, properties and clinical applications. A literature review. *Schweizer Monatsschrift Fur Zahnmedizin= Revue Mensuelle Suisse d'odonto-Stomatologie= Rivista Mensile Svizzera Di Odontologia e Stomatologia*, 120(11), 972–986.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	: Gamze İSPİRLİOĞLU KARA
Doğum tarihi	:
Doğum Yeri	:
Uyruğu	:
Adres	:
Tel	:
E-mail	:
Eğitim	
Lise	: Erzurum Atatürk Lisesi
Lisans	: Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans	: Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı
Doktora	: Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	: İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	