

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

**SİC TAKVİYELİ İLETKEN BAKIR
KOMPOZİTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Met. Ve Malz. Yük. Müh. Güzde Fatma ÇELEBİ EFE

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

**Tez Danışmanları : Prof. Dr. Cuma BİNDAL
Prof. Dr. Sakin ZEYİN**

Haziran 2010

Bu tez 106M118 no'lu "Seramik Partikül Takviyeli Yüksek İletken Bakır Kompozitlerin Geliştirilmesi" isimli TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu) projesi tarafından desteklenmiştir.

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİC TAKVİYELİ İLETKEN BAKIR
KOMPOZİTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Met. Ve Malz. Yük. Müh. Güzde Fatma ÇELEBİ EFE

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

Bu tez 03 / 07 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Cuma BİNDAL
Jüri Başkanı



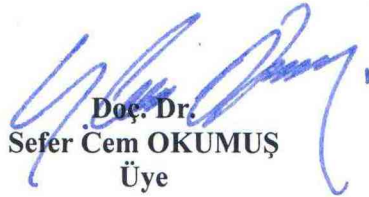
Prof. Dr.
Şerafettin EROĞLU
Üye



Prof. Dr.
Murat TÛTÛNCÛ
Üye



Doç. Dr.
Metin USTA
Üye



Doç. Dr.
Sefer Cem OKUMUŞ
Üye

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilir ve nispeten yüksek elektrik iletkenliğine sahip bir bakır iletken üretilmesi için Cu-seramik kompozitleri konu edilmiştir. Bu tür kompozitler yüksek mekanik özelliklere sahip olmazlar, ancak özelliklerini yükselen sıcaklıklarda koruyabilirler. Sementasyon yöntemiyle üretilen bakır tozu ve mukayese amacıyla ticari bakır tozu, farklı bileşim ve boyutlardaki SiC partikülleri ile takviye edilerek farklı sıcaklıklarda sinterlenerek bakır kompozitleri üretilmiştir. Tüm numuneler mikroyapısal ve mekanik olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Çalışmalarımın gerçekleşmesi süresinde çok büyük desteğini gördüğüm öğreticiliği ile yapıcı, yol gösterici yardımlarından dolayı danışman hocalarım Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Cuma BINDAL ve Sayın Prof. Dr. Sakin ZEYTİN'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Görüşlerini benimle paylaşan, yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Mediha İPEK'e, deneylerin gerçekleştirilmesi ve yetiştirilmesinde çok büyük emeği olan laboratuvar teknisyenimiz Ersan DEMİR'e, deneysel çalışmalarımın ve tezin yazılmasında yardımcı olan oda arkadaşım Arş. Gör. Tuba YENER'e, toz üretimindeki katkısından dolayı Arş. Gör. İbrahim ALTINSOY'a, makine mühendisliği bölümü teknisyeni Metin GÜNAY'a, çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü çalışanlarına, SEM, XRD incelemelerini gerçekleştiren uzman Fuat KAYIŞ'a, iletkenlik ölçümleri ve kontak test düzeneğinin hazırlanmasındaki yardımları ve anlayışlarından dolayı FEDERAL ELEKTRİK A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma 106M118 no' lu "Seramik Partikül Takviyeli Yüksek İletken Bakır Kompozitlerin Geliştirilmesi" isimli TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu) projesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Bu vesile ile TÜBİTAK kurumuna ve her türlü pozitif desteği veren Sakarya Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür ederim.

Ayrıca öğrenimim boyunca ve çalışmalarım sırasında maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve her türlü fedakarlıktan kaçınmayan babam Zeki ÇELEBİ, annem, anneannem ve kardeşime, her zaman yanımda olan, her konuda yardımlarını esirgemeyen, tezimin hazırlanmasında çok büyük emek sahibi sevgili eşim Sedat EFE ve canım oğlum Ayberk'e şükranlarımı sunuyorum.

Met.ve Malz. Yük.Müh. Gözde F. ÇELEBİ EFE

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Kompozit Malzeme ve Özellikleri.....	5
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	7
2.3.1. Metal Matriksli Kompozitler (MMK).....	11
BÖLÜM 3.	
BAKIR VE SiC.....	16
3.1. Bakır.....	16
3.1.1. Bakır Mineralleri.....	17
3.1.2. Bakır Cevherleri.....	19
3.1.3. Ticari Saf Bakır Çeşitleri.....	20
3.1.4. Bakırın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	21
3.1.5. Bakırın Elektriksel İletkenliği.....	24

3.1.6. Bakırın Kullanım Alanları.....	24
3.1.7. Alaşım Elementlerinin Bakıra Etkileri.....	25
3.1.8. Bakır Alaşımları.....	27
3.1.8.1. Pirinçler.....	30
3.1.8.2. Bronzlar.....	32
3.1.8.3. Nikel Gümüőü.....	34
3.1.9. İletken ortamlarda kullanılacak bakırın mukavemetinin arttırılması.....	37
3.2. Silisyum Karbür.....	41
BÖLÜM 4.	
BAKIRIN ÜRETİMİ.....	47
4.1. Giriş.....	47
4.2. Sementasyon Yöntemi ile Bakır Tozu Üretimi.....	49
BÖLÜM 5.	
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER.....	53
5.1. Giriş.....	53
5.2. Elektriksel İletkenlik.....	54
5.2.1. Ohm kanunu.....	57
5.2.2. Metal ve Alaşımlarda İletkenlik.....	61
5.2.2.1. Sıcaklık etkisi.....	62
5.2.2.2. Kristal yapıdaki kusurların etkisi.....	62
5.2.2.3. Şekillendirme ve mukavemetlendirme yöntemlerinin etkisi.....	63
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMA.....	65
6.1. Giriş.....	65
6.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	66
6.3. Çalışmada Kullanılan Cihazlar.....	66
6.4. Deneysel Çalışmada İzlenen Yol.....	67
6.5. Toz Karışımlarının Hazırlanması.....	68

6.5.1. Ticari bakır tozundanretim.....	68
6.5.2. Sementasyon yöntemiyle çöktürülen bakır tozundan üretim.....	69
6.5.2.1. Bakır tozu üretimi.....	69
6.5.3. Tozların karakterizasyonu.....	71
6.6. Sinterleme.....	71
6.6.1. Sinterlenen numunelerin karakterizasyonu.....	72
6.6.1.1. Yoğunluk.....	72
6.6.1.2. Optik-SEM incelemesi.....	73
6.6.1.3. Sertlik.....	73
6.6.1.4. XRD incelemesi.....	73
6.6.1.5. Elektrik iletkenliği.....	74
6.6.1.6. Kontak testi.....	74
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER.....	76
7.1. Toz karakterizasyonu.....	76
7.2. Sinterlenmiş numunelerin karakterizasyonu.....	82
7.2.1. Yoğunluk.....	83
7.2.2. Optik-SEM incelemesi.....	90
7.2.3. XRD.....	131
7.2.4. Sertlik.....	137
7.2.5. Elektrik iletkenliği.....	143
7.2.6. Kontak Testi.....	151
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	162
KAYNAKLAR.....	168
ÖZGEÇMİŞ.....	177

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

R.Y.	: Relatif yoğunluk
d_T	: Teorik yoğunluk
HV	: Vickers sertlik değeri
IACS	: International annealed copper standart
SEM	: Scanning electron microscope
EDS	: Energy dispersive spectroscopy
XRD	: X ray difraction
E_g	: Energy gap
V	: Potansiyel, Volt
I	: Elektrik akımı, Amper
R	: Direnç
ρ	: Malzemenin elektrik özdirenci
L	: İletkenin uzunluğu
A	: İletkenin kesit alanı
σ	: İletkenlik
J	: Akım yoğunluğu
ξ	: Elektrik alan
Q	: Toplam yük
n	: cm^3 'teki yük taşıyıcıların sayısı
q	: 1 elektronun yükü
v	: Hareket halindeki yük taşıyıcılarının ortalama hareket hızı
μ	: mobilite

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Kompozit malzemelerin takviye elemanının şekline göre görünümü.....	10
Şekil 2.2.	Çeşitli motor malzemelerinin çalışma sıcaklığı ve mukavemet/ağırlık oranına göre performans haritaları.....	11
Şekil 3.1.	Elementlerin bakırın elektrik iletkenliğine etkisi.....	21
Şekil 3.2.	Bakır atomunun elektron dizilimi.....	22
Şekil 3.3.	Alaşım elementlerinin bakıra etkileri.....	26
Şekil 3.4..	Bakır alaşımlarının elektrik iletkenliği ve çekme mukavemeti ilişkisi.....	29
Şekil 4.1.	Şematik bakır üretim kademeleri.....	49
Şekil 5.1.	Atom sayısına bağlı olarak band yapısı.....	55
Şekil 5.2.	Atomlararası mesafenin bir fonksiyonu olarak sodyum atomunun band yapısı.....	55
Şekil 5.3.	Band yapılarının a) metallerde, b) yarıiletkenlerde, c) yalıtkanlarda şematik gösterimi (OK'de).....	56
Şekil 5.4.	Elektriksel direnci ölçmek için kullanılan aparatın şematik gösterimi.....	58
Şekil 5.5.	a) Metalik bağlı malzemelerde, b) kovalent bağlı malzemelerde, c)iyonik bağlı malzemelerde yük taşıyıcıları.....	61
Şekil 5.6.	a) Mükemmel bir kristalde, b) kristalin yüksek sıcaklığa ısıtıldığı zaman elektrotunun hareketi.....	62
Şekil 5.7.	Metalin kusur ve sıcaklıktan kaynaklanan elektriksel öz direncindeki değişim.....	63
Şekil 5.8.	Bakırın elektriksel iletkenliğine a) katı çözelti mukavemetlendirmesi ve soğuk işlemin, b) bazı element ilavelerinin etkisi.....	64

Şekil 6.1.	Ticari bakır tozundan Cu-SiC kompozit üretim.....	69
Şekil 6.2.	Sementasyon yöntemi ile bakır tozu üretimi.....	70
Şekil 6.3.	Semente bakır tozundan Cu-SiC kompozit üretimi.....	71
Şekil 6.4.	Tozların preslemesinde kullanılan a) kalıbın, b) kalıp kesitinin, c) preslenmiş numunenin şematik resmi.....	72
Şekil 6.5.	Açma kapama deney düzeneği.....	75
Şekil 6.6.	Numunelerin monte edildiği kontaktör ve kontakların görüntüsü..	75
Şekil 6.7.	Hareketli kontakların görüntüsü.....	75
Şekil 7.1.	Ticari bakır tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.....	76
Şekil 7.2.	Semente bakır tozunun a) 1.000 büyütmedeki SEM mikrografi, b) 30.000 büyütmedeki SEM mikrografi, c) 10.000 büyütmedeki SEM mikrografi ve EDS analizi.....	77
Şekil 7.3.	1µm tane boyutundaki SiC tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.....	78
Şekil 7.4.	5 µm tane boyutundaki SiC tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.....	78
Şekil 7.5.	30 µm tane boyutundaki SiC tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.....	79
Şekil 7.6.	Semente bakır tozunun SEM-EDS alan taraması ve spekturumu...	80
Şekil 7.7.	Ticari Cu tozlarının XRD patemi.....	81
Şekil 7.8.	Semente Cu tozlarının XRD paterni.....	81
Şekil 7.9.	SiC'ün XRD paterni.....	82
Şekil 7.10.	700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluğunun kontür diyagramında değişimi.....	86
Şekil 7.11.	700°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluğunun kontür diyagramında değişimi.....	87
Şekil 7.12.	700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluk değişiminin a) stun grafiği, b) çizgi grafiği.....	88
Şekil 7.13.	700°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut	

	ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluk değişiminin a) stun grafiği, b) çizgi grafiği.....	89
Şekil 7.14.	900 °C’de sinterlenmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları.....	91
Şekil 7.15.	950 °C’de ve 1000 °C’de sinterlenmiş ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları.....	92
Şekil 7.16.	700 °C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları.....	93
Şekil 7.17.	700 °C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları.....	94
Şekil 7.18.	700 °C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları.....	95
Şekil 7.19.	a) 900 °C’de sinterlenmiş Ct numunesinin, b) 900°C’de sinterlenmiş Cs numunesinin, c) 950°C’de sinterlenmiş Ct numunesinin, d) 1000 °C’de sinterlenmiş Ct numunesinin, e) 700 °C’de sinterlenmiş Ct numunesinin, f) 700°C’de sinterlenmiş Cs numunesinin SEM mikrografları ve EDS analizleri.....	97
Şekil 7.20.	900 °C’de sinterlenmiş Cs numunesinin map analizi.....	98
Şekil 7.21.	900 °C’de sinterlenmiş Cs numunesinin EDS analizi.....	99
Şekil 7.22.	700 °C’de sinterlenmiş Cs numunesinin EDS analizi.....	99
Şekil 7.23.	900 °C’de sinterlenmiş a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	101
Şekil 7.24.	950 °C’de sinterlenmiş a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitlerinin SEM ve EDS analizleri.....	102
Şekil 7.25.	1000 °C’de sinterlenmiş a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	103
Şekil 7.26.	900 °C’de sinterlenmiş a) C1Ss, b) C2Ss, c) C3Ss ve d) C5Ss kompozitlerinin SEM görüntüleri (dağlanmış) ve EDS analizleri..	104
Şekil 7.27.	900 °C’de sinterlenmiş C5St numunesinin map analizi.....	105
Şekil 7.28.	900 °C’de sinterlenmiş a) C2St numunesinin, b) C3St numunesinin EDS analizi.....	106
Şekil 7.29.	950 °C’de sinterlenmiş a) C2St numunesinin,b) C3St	

	numunesinin EDS analizi.....	
Şekil 7.30.	a) 1000°C’de sinterlenmiş C5St ve b) 900°C’de sinterlenmiş C1Ss numunesinin EDS analizi.....	107
Şekil 7.31.	950°C’de sinterlenmiş a) C3St kompozitinin, b) C5Stkompozitinin EDS analizi.....	108
Şekil 7.32.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	109
Şekil 7.33.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a)C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	110
Şekil 7.34.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	111
Şekil 7.35.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a)C1Ss, b) C2Ss, c) C3Ss ve d) C5Ss kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	112
Şekil 7.36.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1Ss, b) C2Ss, c) C3Ss ve d) C5Ss kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	113
Şekil 7.37.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1Ss, b) C2Ss, c)C3Ss ve d) C5Ss kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	114
Şekil 7.38.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1St, b) C2St numunesinin EDS analizi.....	116
Şekil 7.39.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C3St, b) C5St numunesinin EDS analizi.....	116
Şekil 7.40.	700°C’de sinterlenmiş 1µm’luk SiC ile takviye edilmiş C2St numunesinin EDS analizi.....	117
Şekil 7.41.	700°C’de sinterlenmiş 1µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin map analizi.....	118
Şekil 7.42.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1St,	

	b) C2St numunesinin EDS analizi.....	119
Şekil 7.43.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C3St, b) C5St numunesinin EDS analizi.....	119
Şekil 7.44.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin map analizi.....	120
Şekil 7.45.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1St, b) C2St numunesinin EDS analizi.....	121
Şekil 7.46.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C2St numunesinde Cu-SiC arayüzeyinin EDS analizi.....	121
Şekil 7.47.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin EDS analizi.....	122
Şekil 7.48.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin map analizi.....	123
Şekil 7.49.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1Ss numunesinin, b) C2Ss numunesinin EDS analizi.....	124
Şekil 7.50.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C3Ss, b) C5Ss numunesinin EDS analizi.....	125
Şekil 7.51.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C5Ss numunesinin EDS analizi.....	125
Şekil 7.52.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3Ss numunesinin map analizi.....	126
Şekil 7.53.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C2Ss, b) C5Ss numunesinin EDS analizi.....	127
Şekil 7.54.	700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3Ss numunesinin map analizi.....	128
Şekil 7.55.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1Ss, b) C2Ss numunesinin EDS analizi.....	129
Şekil 7.56.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3Ss numunesinin map analizi.....	130
Şekil 7.57.	700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C5Ss numunesinin EDS analizi.....	131
Şekil 7.58.	900 °C’ de sinterlenen Cu (ticari)-SiC kompozitlerinin XRD	

	paternleri.....	132
Şekil 7.59.	900 °C’ de sinterlenen Cu (semente)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri.....	132
Şekil 7.60.	950 °C’ de sinterlenen kompozitlerin XRD paternleri.....	133
Şekil 7.61.	1000 °C’ de sinterlenen kompozitlerin XRD paternleri.....	133
Şekil 7.62.	700 °C’de sinterlenen a) 1 µm, b) 5 µm ve c) 30 µm tane boyutunda SiC içeren Cu (ticari)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri.....	134
Şekil 7.63.	700 °C’de sinterlenen a) 1 µm, b) 5 µm ve c) 30 µm tane boyutunda SiC içeren Cu (semente)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri.....	135
Şekil 7.64.	a) 1 µm, b) 5 µm ve c) 30 µm partikül boyutuna sahip Cu-SiC kompozitindeki sertlik izi görüntüsü.....	137
Şekil 7.65.	700°C’de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertliğinin kontür diyagramında değişimi.....	140
Şekil 7.66.	700°C’de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertliğinin kontür diyagramında değişimi.....	141
Şekil 7.67.	Ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertlik değişiminin a) stün grafiği, b) çizgi grafiği.....	142
Şekil 7.68.	Semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertlik değişiminin a) stün grafiği, b) çizgi grafiği.....	143
Şekil 7.69.	700°C’de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin kontür diyagramında değişimi.....	147
Şekil 7.70.	700°C’de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin kontür diyagramında değişimi.....	148
Şekil 7.71.	700°C’de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin a) stün grafiği, b) çizgi grafiği.....	149

Şekil 7.72.	700°C’de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin a) stun grafiği, b) çizgi grafiği.....	150
Şekil 7.73.	700°C’de sinterlenmiş 1 µm partikül boyutuna sahip SiC ile takviye edilmiş kompozitlerin relatif yoğunluk, elektrik iletkenlik ve sertlik değerleri arasındaki ilişki.....	151
Şekil 7.74.	Cs ve C3Ss numunelerinin 3000, 6000 ve 9000 açma kapama sonarında 22X büyütmedeki SEM mikrografları.....	154
Şekil 7.75.	Cs ve C3Ss numunelerinin 3000, 6000,) 9000 açma kapama sonarında 100X büyütmedeki SEM mikrografları ve genel EDS analizleri.....	155
Şekil 7.76.	Cs ve C3Ss numunelerinin 3000, 6000, 9000 açma kapama sonarında 500X büyütmedeki SEM mikrografları.....	156
Şekil 7.77.	Artan çevrim sayısıyla kontaklardaki ağırlık kaybı değişimi.....	157
Şekil 7.78.	Cs numunesinin 3000 açma kapama sonrasında a) 100X, b) 500X büyütmedeki EDS analizi.....	158
Şekil 7.79.	Cs numunesinin 6000 açma kapama sonrasında a) 100X, b) 500X büyütmedeki EDS analizi.....	158
Şekil 7.80.	9000 açma kapama sonrasında Cs numunesinin EDS analizi.....	159
Şekil 7.81.	C3Ss numunesinin 3000 açma kapama sonrasında a) 100X, b) 500X büyütmedeki EDS analizi.....	160
Şekil 7.82.	C3Ss numunesinin 6000 açma kapama sonrasında a) 500X, b) 1000X büyütmedeki EDS analizi.....	161
Şekil 7.83.	C3Ss numunesinin 9000 açma kapama sonrasında EDS analizi....	161

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Bazı önemli bakır mineralleri ve içerikleri.....	18
Tablo 3.2.	Bazı önemli bakır minerallerinin minerolojik özellikleri.....	19
Tablo 3.3.	Bakırın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	23
Tablo 3.4.	İletkenlik uygulamalarında kullanılan bazı bakır alaşımlarının özellikleri.....	39
Tablo 3.5.	Bakırı takviye etmek için kullanılabilen seramik tozların bazı özellikleri.....	41
Tablo 3.6.	Farklı SiC çeşitleri ve kristal yapıları.....	42
Tablo 3.7.	SiC ve Cu'nun tipik fiziksel özellikleri.....	45
Tablo 5.1.	Bazı malzemelerin 300 K'de elektriksel iletkenlikleri.....	57
Tablo 7.1.	Sementasyon yolu ile üretilen bakır tozunun yaş analiz sonuçları..	79
Tablo 7.2.	Ticari ve sementasyonla çöktürülen bakır tozlarından sinterlenen numunelerin kodlandırılması.....	83
Tablo 7.3.	Farklı sıcaklıklarda sinterlenen Cu-SiC kompozitlerinin Archimedes Prensibine göre hesaplanan relatif yoğunluk değerleri.....	84
Tablo 7.4.	700°C'de sinterlenen farklı SiC tane boyutlu Cu-SiC kompozitlerinin Archimedes Prensibine göre hesaplanan relatif yoğunluk değerleri.....	85
Tablo 7.5.	Farklı sıcaklıklarda sinterlenen Cu-SiC kompozitlerinin elde edilen Vickers Sertlik değerleri.....	138
Tablo 7.6.	700°C'de sinterlenmiş Cu-SiC kompozitlerinin mikrosertlik değerleri.....	139
Tablo 7.7.	Farklı sıcaklıklarda sinterlenen Cu-SiC kompozitlerinin elektrikiletkenlikleri (%IACS).....	144

Tablo 7.8.	700°C’de sinterlenen farklı tane boyutlarında SiC içeren Cu-SiC kompozitlerinin elektriksel iletkenlik değerleri.....	146
Tablo 7.9.	Artan çevrim sayısıyla kontaklardaki ağırlık kaybı.....	153

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sementasyon, elektriksel iletkenlik, relatif yoğunluk, sertlik, Cu, SiC, kontak.

Bu çalışmada, sementasyon yöntemiyle üretilen bakır tozunun farklı partikül boyut ve bileşimdeki seramik karakterli SiC tozu ile takviye edilerek yüksek iletken Cu-SiC kompozit üretimi hedeflenmiştir. Öncelikli olarak 10 µm tane boyutlu ticari Cu tozu ağırlıkça, 0, 1, 2, 3 ve 5 oranlarında 1 µm partikül boyutlu SiC partikülleri ile takviye edilerek mekanik olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan toz karışımları 280 MPa basınçta tek yönde uygulanan basınçla preslenmiş ve 900, 950 ve 1000°C'de 2 saat süre ile grafit tozuna gömülü halde açık atmosferli fırında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası numuneler yoğunluğun artırılması için 850 MPa yük uygulanarak sıcak olarak dövülmüştür. Optik ve SEM incelemeleri sonucu SiC partiküllerinin bakır tanelerinin etraflarında yer aldığı ve hakim bileşenlerin Cu, SiC olduğu X-ışınları analiz tekniği ile (XRD) tespit edilmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte bakır matriste tane kabalaşması görülmüş ve genel olarak kompozitlerin relatif yoğunluk, sertlik ve iletkenliklerinde çok küçük azalmalar tespit edilmiştir. Yapılan karakterizasyon incelemeleri sonucunda 900°C optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin elektrik iletkenlik değerlerinin düşük olması nedeni ile daha düşük sinterleme sıcaklıkları denenmiş ve 700°C sinterleme sıcaklığında en iyi elektriksel iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Bu sıcaklıkta SiC partikül boyutları da değiştirilerek (1, 5, 30 µm) semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin relatif yoğunlukları, 1 µm' luk SiC için 97,3 ile 91,8; 5 µm'luk SiC için, 97,5 ile 95,2; 30 µm'luk SiC için, 97,7 ile 96,2; mikrosertlikleri her üç SiC boyutu için sırasıyla, 143- 167; 156- 182; 215- 277 HV; elektriksel iletkenlikleri ise yine her üç SiC boyutu için, sırasıyla 85,9- 55,7; 87,9- 65,2; 91,3- 77,2 % IACS arasında değişmiştir. 700°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin relatif yoğunlukları ise, 1 µm'luk SiC için 96,2 ile 90,9; 5 µm'luk SiC için, 96,6 ile 93,7; 30 µm'luk SiC için, 97 ile 95; mikrosertlikleri her üç SiC boyutu için sırasıyla, 130- 155; 153- 179; 188- 229 HV; elektriksel iletkenlikleri ise yine her üç SiC boyutu için, sırasıyla 79- 54,9; 81- 60,3; 83- 69 % IACS arasında değişmiştir. 3000, 6000, 9000, 12000 ve 21000 çevrim sayısında gerçekleştirilen açma kapama testleri Cu-%3SiC'ün düşük elektrik iletkenliğine bağlı olarak saf semente bakırdan daha fazla malzeme kaybı olduğu tespit edilmiştir.

DEVELOPMENT OF CONDUCTIVE COPPER COMPOSITES REINFORCED WITH SiC

SUMMARY

Key Words: Cementation, electrical conductivity, relative density, hardness, Cu, SiC, switch.

In this study, the production of Cu-SiC composite with high electrical conductivity by reinforcing cemented copper with ceramics based SiC having different particle sizes at different ratios was aimed. Primarily, commercial copper powders having 10 μm particle size were mixed with SiC with particle size of 1 μm at ratios of 0, 1, 2, 3 and 5 % by weight. Then, the prepared powder mixtures first were pressed with an axial pressure of 280 MPa and sintered at 900, 950 and 1000°C in an open atmospheric furnace for 2 h embedded in graphite. Following sintering the test samples were pressed with a load of 850 MPa in order to increase the relative density of test samples. Optical and SEM studies revealed that SiC particles are located at grain boundaries of copper grain and Cu and SiC being dominant phases were verified by x-ray diffraction (XRD) analysis technique. In addition, high sintering temperature results in grain coarsening in copper particles and minor declines was observed in relative density, hardness and electrical conductivity of Cu-SiC composites. The optimum sintering temperature determined is 900°C. Because of low electrical conductivity of cemented Cu-SiC composites at 900°C, the low sintering temperatures were attempted and the best electrical conductivity results were obtained for composites sintered at 700°C and the effect of SiC particles having different particle sizes (1, 5 and 30 μm) on Cu-SiC composites were investigated at concerning temperature.

The relative densities of commercial Cu-SiC composites sintered at 700°C are ranged from 97,3 to 91,8 for SiC with 1 μm particle size, 97,5 to 95,2 for SiC with 5 μm particle size, and 97,7 to 96,2 SiC with 30 μm particle size, microhardness of composites ranged from 143 to 167 HV for SiC having 1 μm particle size, 156 to 182 for SiC having 5 μm particle size, 215 to 277 HV for SiC having 30 μm particle size and the electrical conductivity of composites changed between 85,9 and 55,7 for SiC with 1 μm particle size, 87,9 and 65,2 for SiC with 5 μm particle size, and 91,3 and 77,2 % IACS for SiC with 30 μm particle size, respectively. The relative densities of cemented Cu-SiC composites sintered at 700°C are ranged from 96,2 to 90,9 for SiC with 1 μm particle size, 96,6 to 93,7 for SiC with 5 μm particle size, and 97,0 to 95,0 for SiC with 30 μm particle size, microhardness of composites ranged from 130 to 155 HV for SiC having 1 μm particle size, 153 to 179 for SiC having 5 μm particle size, 188 to 229 VHN for SiC having 30 μm particle size and the electrical conductivity of composites changed between 79 and 54,9 SiC with 1 μm particle size, 81,0 and 60,3 SiC with 5 μm particle size, and 83,0 and 69,0 % IACS for SiC with 30 μm particle size, respectively. The load break switch test performed for cycles of 3000, 6000, 9000, 12000 and 21000 revealed that depending on low electrical conductivity of Cu-3wt%SiC the materials loss of composite is greater than that of pure cemented copper.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bakır, insanlar tarafından kullanılan ilk metal, çağlar boyunca kullanım açısından da demirden sonra gelen ikinci metaldir. Tarih öncesi dönemde bulunmuştur ve yaklaşık M.Ö.4000'den daha önceki dönemlerde kullanılmaya başlandığı düşünülmektedir.

Bakır ve alaşımlarının günümüze kadar en önemli mühendislik malzemeleri olarak kalmasının sebepleri; yüksek korozyon dayanımları, mükemmel elektrik ve ısı iletkenlikleri, cazip görünüşleri, yüksek süneklikleri ve şekillendirme kolaylıklarıdır. Gümüşten sonra en iyi elektrik iletkenliğine ve gümüş ile altın arasında çok yüksek ısı iletkenliğine sahiptir [1]. Ancak, yüksek maliyeti nedeniyle, gümüş ve altın iletkenlik uygulamalarında az kullanılır. Kütsel uygulamalar açısından, en fazla kullanılan iletken malzemeler alüminyum ve bakırdır. Bakırın tercih edilmesinin temel sebepleri daha yüksek iletkenliği yanında alüminyuma nazaran yüksek mukavemetli olmasıdır [2, 3].

Ancak, bakırın önemli bir dezavantajı 390 MPa mertebesindeki mukavemetidir. Zira saf bakır, soğuk şekil verilerek sertleştirilse dahi, 100°C'ye yakın sıcaklıklarda yeniden kristalleşmekte ve dolayısı ile mukavemetini çabucak kaybetmektedir. Hem elektriksel olarak yeterince iletken, hem de saf bakıra nazaran oldukça yüksek mukavemet ve sertlik, saf bakırın alaşımlandırılması ile elde edilmektedir. Fakat elektrik iletkenliğinin çok düşmesi istenmediği için, saf bakıra ilave edilecek alaşım elementleri ancak %2 mertebesinde, birçok uygulamada ise daha az miktarda olmaktadır. Bu tür bakır "az alaşımlı bakır", "yüksek bakır alaşımı" veya "sert bakır alaşımı" olarak adlandırılır. Bu maksatla bakıra katılan alaşım elementlerinin başlıcaları Be, Cr, Zr, Si, P, Ni'dir. Az alaşımlı bakırın en önemli karakteristiği, bu alaşımların hepsinin yaşlanma ile sertleşebilir olmalarıdır. Alaşımın mukavemet veya sertliğinde bir dereceye kadar katı çözelti sertleşmesi ile artış sağlanmakla beraber, esas sertlik artışı yaşlanma ile elde edilmektedir. Hatta bazı uygulamalarda,

yaşlanma işlemi soğuk şekillendirme ile kombine edilerek 1300 MPa'a ulaşan mukavemet değerleri sağlanabilmektedir. İletkenlik uygulamalarında kullanılan az alaşımlı bakırın en önemli dezavantajı, yüksek sıcaklıkta çökelti partiküllerinin kabalaşmasından dolayı özelliklerindeki hızlı kayıptır. Bu problemi çözmek amacıyla, seramik partiküllerinin yüksek sıcaklıklarda kararlı olmalarından dolayı oksit, borür, karbür gibi seramiklerle takviye edilmiş bakır matrisli metal matris kompozitler geliştirilmiştir [4-7].

Bakır- alümina kompozitleri, alumina partikülleri ile takviye edilmiş olarak iletkenlik gerektiren alanlarda, özellikle iletken ve temas malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Bu alanlarda kullanılacak bakırın yüksek elektrik iletkenliği yanında oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda makul mekanik özelliklere sahip olması gerekir. Bu bakımdan, alumina partikülleri ile yapılan takviye işlemi bir yandan dispersiyon sertleşmesi ile mukavemet ve sertliği artırırken, öte yandan elektrik iletkenliğinde önemli azalmalara yol açmamalıdır. Elektrik iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalar açısından seramik partikül oranı önemlidir. Bu nedenle, bakırı takviye etmek için kullanılan alumina seramik partikül oranı yaklaşık %1 mertebesindedir [8].

Bakır alumina kompozitine alternatif olarak, diğer bazı seramik partikülleri ile bakırın takviye edilmesi çalışmaları mevcuttur. Bu takviye partikülleri arasında TiC, TiB₂, SiC sayılabilir. Bunlardan yüksek elastik modülü, yüksek ısı iletkenliğinden dolayı SiC özellikle cazip olabilir. SiC ile takviye edilmiş Cu kompozitlerinin çok yüksek mukavemet yanında tatminkar elektrik iletkenliği de gösterdiği rapor edilmiştir. Ancak konu ile ilgili detaylı bilgi yoktur [9, 10]. Günümüzde alumina partikülleri ile takviye edilmiş bakır kompozitleri, gerek kontakt elemanları gerekse iletken malzemeler olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, SiC partikülleri ile takviye edilmiş Cu kompozitlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bakır tozu CuSO₄ tuzlarından hareketle kimyasal çöktürme yoluyla üretilmiş ve mukayese amacıyla ticari olarak temin edilmiştir. Üretilen ve ticari olarak temin edilen bakır tozları farklı bileşim ve boyutlardaki SiC partikülleri ile karıştırılarak farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş ve sonuçlar mekanik, mikroskobik ve elektriksel olarak karakterize edilmiştir.

BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Giriş

Çeşitli uygulamalarda kullanılacak ürünlerin dizaynı ve üretiminde mühendisler için 50.000'den fazla uygun malzeme çeşidi bulunmaktadır. Bu malzemeler yüzyıllardır kullanılan bakır, dökme demir, bronz gibi temel malzemelerden yeni geliştirilmiş ileri teknoloji ürünü malzemelere kadar değişiklik göstermekte olup [11]; genel olarak metaller, polimerler ve seramikler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bunların birbirlerine göre zayıf ve üstün yanları vardır. Bir malzeme, uygulama alanları dikkate alındığında aranan özelliklerden en önemlileri; akma dayanımı, elastik modülü, kırılma tokluğu, yoğunluk ve yüksek sıcaklıklara dayanma direncidir [12].

Metaller yapısal uygulamalarda geçmişten beri yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Yüksek mukavemet, ısı kararlılık, ısı ve elektriksel iletkenlik özelliklerine sahiptirler. Polimerlerden yüksek olan yüksek sıcaklık dayanımlarına bağlı olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Polimerlerin yoğunluğunun düşük ve karmaşık şekilli parçaların üretiminin kolay olması, birbirleri ile ve diğer malzemelerle birleştirilebilir olması yanında talaş kaldırma işlemlerinin kolay olması özelliklerinin arasındadır. Fakat düşük ısı kararlılıkları ve mekanik özellikleri de kullanım alanlarını kısıtlamaktadır.

Seramikler, kuvvetli iyonik bağa sahip olmaları sebebiyle yüksek ısı kararlılık ve mukavemet sergilerler. Seramiklerin metallerle kıyaslandığında en ayırıcı özelliği neredeyse hiç süneklik sergilemeyişleridir. Bunlar, genellikle ısı ve kimyasal etkilere karşı dirençlidirler. Ancak, yüksek ergime sıcaklıkları ve sertlikleri üretim sonrası işlenmelerini zorlaştırır ve yalıtıkdırlar. Kırılgan oluşları seramiklerin kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [11, 12].

Yukarıda bahsedilen bu üç ana grubun yanında teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanım ihtiyacını doğurmuştur. Sürekli olarak gelişen bu teknolojik faaliyetler, beraberinde sanayinin temel maddesi olan malzeme de ilerlemeyi gerekli kılmıştır. Bu sebeple, malzeme bilimciler; üstün özelliklere sahip yeni malzemeleri araştırmaya yönelmişler ve diğer malzemelerden farklı olarak, daha üstün niteliklere sahip “Kompozit Malzemeler” adı altında yeni malzemeler üretmişlerdir. Bunlar malzeme türleri arasında dördüncü grubu teşkil etmektedirler [12, 13].

Kompozit malzemelerin tarihçesi çok eskiye dayanmaktadır. Örneğin ağaç, kemik ve diş gibi doğal kompozit malzemeler insanlığın var oluşu ile birlikte kullanılmıştır. İnsanlar belki de çamura saman karıştırıp kerpiç tuğlalar üretmeye başladıklarında ilk kompozit malzemeyi yapmışlardır. Kompozit terimi, geniş manada doğal veya sentetik iki ya da daha fazla bileşenin bir araya getirilmesi ile oluşturulan malzeme olarak tanımlanır. Gerçektende doğayı dikkatle incelediğimizde var oluştan gelen birçok oluşumun kompozit yapıda olduğunu söyleyebiliriz. Doğanın var oluş temelini oluşturan kompozit ve özellikle gradyan yapı gerçeği, en sonunda insanoğlunun da dikkatini çekmiş ve gelişen teknolojiyle ortaya çıkan farklı ihtiyaçları karşılamak için bu konular üzerinde çalışmalar başlamıştır [14].

Kompozit malzemelerin yaygın uygulamaları II. Dünya savaşı esnasında mevcut konvansiyonel malzemelerin tek başlarına teknoloji karşısında belirli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamıştır. O zamandan beri de bu malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmektedir [12] ve uzun zamandır teknolojik problemlerin çözümünde kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler; otomotiv parçaları, spor araçları, inşaat sektörü, müzik aletleri, sağlık, ulaşım, uzay ve uçak sanayi parçaları, denizcilik malzemeleri, çeşitli cihazlar ve yağ endüstrileri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [11, 15, 16]. Kompozit malzemeler uzay, havacılık ve otomotiv sektörlerinde, mukavemet/ağırlık, mukavemet/yoğunluk oranları gibi malzeme özelliklerinin önemli olduğu ağırlığa duyarlı alanlarda kullanılan malzemelerin karıştırılarak

özelliklerinin geliştirilmesini önemli kılmış ve bu alanlarda da önemli gelişmelere yol açmıştır [12]. Kompozit malzemelerin kullanımındaki artış, ürün performansının farkına varılması ve dünya piyasalarında hafif malzemelerin artan yarışı ile ortaya çıkmıştır [11].

Son yıllardaki gelişmelere bakarak bu malzemelerin kullanımlarının hızla yaygınlaştığını ve giderek artacağını söylemek mümkün gözükmemektedir. Bu gelişmeleri tetikleyen güç malzemelerde yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranı elde etmek olmuştur. Bu nedenle de spesifik uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır [12]. Dolayısıyla bugünkü ve gelecekteki birçok uygulama alanında kompozit malzemelerin kullanımının katlanarak artacağı görülmektedir [11].

2.2. Kompozit Malzeme ve Özellikleri

Kompozit malzeme terimindeki kompozit kelimesi; iki veya daha fazla malzemenin, üçüncü bir malzemeyi oluşturmak için makroskobik ölçüde bir araya gelmesini ifade etmektedir. Malzemenin makroskobik incelenmesinde dikkat edilecek nokta, bileşenlerin çıplak gözle görülebilmesidir [17, 18]. Yani, içyapıları çıplak gözle incelendiğinde yapıyı oluşturan bileşenler kolayca seçilip ayırt edilebilmelidir. Sözlük anlamında kullanılan kompozit terimi çeşitli parçalardan veya elementlerden oluşan malzemeleri tanımlamaktadır. Bu tanıma göre de pek çok malzemenin kompozit grubu içerisine girmesi mümkündür [19].

Temel olarak kompozit malzemeler, şekil ve/veya kimyasal bileşimleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen ve aralarında bileşik oluşturmayan iki veya daha fazla sayıda makrobileşenin kombinasyonundan oluşan malzemeler olarak tanımlanabilir [17, 19, 20]. Ancak kompozit malzeme tanımının daha açık ve anlaşılır olmasını sağlamak için; bir malzemenin kompozit sayılması için gerekli özelliklerin belirtilmesi gerekir. Bu özellikler:

- İnsan tarafından üretilmelidir,

- Farklı bileşenlerle beraber kimyasal olarak birbirinden farklı en azından iki malzemenin kombinasyonundan oluşmalıdır,
- Malzemeyi oluşturan ayrı malzemeler üç boyutlu olarak birleştirilmelidir,
- Kendisini meydana getiren bileşenlerin tek başlarına sahip olmayacakları özellikler göstermelidir [14].

Kompozit malzemeler matriks ile takviye elemanı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Genel olarak kompozit malzemelerde matriks sünek, hafif ve düşük dayanımlı, takviye elemanı ise rijit, yüksek dayanım ve sertliğe sahip olmaktadır [17]. Bir kompozit malzemedeki takviye elemanının ve matriks malzemesinin önemli görevleri aşağıda belirtilmiştir.

Kompozit malzemedeki takviye elemanlarının temel fonksiyonları şunlardır:

- Yük taşımak. Yapısal kompozitlerde yükün %70- 90'ını fiberler taşır.
- Kompozit malzemeye tokluk, mukavemet, ısıl kararlılık ve diğer yapısal özellikleri sağlamak.
- Kullanılan takviye elemanının şekline göre elektrik iletkenliği veya izolasyon sağlamak.

Kompozit yapısındaki matriks malzemesinin birçok görevi vardır. Matriks malzemesinin önemli fonksiyonları aşağıda belirtilmiştir:

- Matriks malzemesi takviye elemanlarını bir arada tutar ve dışarıdan malzemeye uygulanan yükleri takviye elemanlarına transfer eder.
- Matriks, takviye elemanlarının birbirlerinden ayrı durmalarını sağlar. Takviye elemanlarının serbest olarak hareket edebilmeleri malzemedeki çatlak ilerlemesini yavaşlatabilir veya durdurabilir.
- Matriks iyi bir yüzey kalitesi sağlar ve nihai ürüne yakın parçaların üretimine katkıda bulunur.

- Matriks takviye elemanını kimyasal etkilere ve mekanik hasarlara (aşınma) karşı korur.
- Seçilen matriks malzemesine göre de süneklik, darbe direnci vb. gibi performans özellikleri değişiklik gösterir.
- Hasar tipi, takviye elemanı ile uyumuna bağlı olduğu gibi kompozit malzemede kullanılan matriks malzemesinin tipinden fazlasıyla etkilenir [11].

Takviye fazlarının çoğu iyi ısı ve elektriksel iletkenliğe, matriksten daha düşük bir ısı genleşme katsayısı ve/veya iyi aşınma direncine sahiptir. Sonuçta kompozit malzeme, diğer malzeme bileşenleri ile tek başına daha üstün bir yapısal özellikler dengesine sahiptir [17].

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin doğaları ve yapılarının açıklanmasıyla bu malzemeler üzerinde işlevini koruyan sınıflandırmalar yapılmaktadır. Kompozitler genel olarak iki farklı çeşitte sınıflandırılırlar. Sınıflandırmanın ilk kısmı genellikle matriks bileşenine uygun olarak yapılır. Matriks bileşenine göre başlıca kompozit çeşitleri organik matriksli kompozitler (OMK), metal matriksli kompozitler (MMK) ve seramik matriksli kompozitler (SMK) dir. Organik matriksli kompozit terimi iki kompozit türünü kapsamaktadır: Polimer matriksli kompozitler (PMK) ve karbon matriksli kompozitler (çoğunlukla karbon-karbon kompozitleri olarak ifade edilirler). Araştırma ve geliştirme topluluklarında bazen intermetalik matriksli kompozitler (IMK), MMK'lerden farklı bir sınıflandırma olarak ifade edilirler. Fakat IMK'lerin önemli ticari uygulamaları henüz bulunmamaktadır ve pratikte MMK'lerden tamamen farklı özellik göstermezler [17].

— Polimer Matriksli Kompozitler:

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha fazla kompleksirler. Matriks olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla işlenebilen malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastik modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Polimerler yapıları

gereği çelik ve diğer konvansiyonel malzemelerden farklıdırlar ve onların avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir [12, 15, 17].

Karbon, cam veya aramid gibi fiber takviyelerini içeren polimer matrisli kompozitler mühendislik malzemelerinin yerine oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar [21]. Polimer ve polimer kompozitlerin başlıca hedefleri en az çelik kadar sağlam, olabildiğince hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimidir.

Günümüzde ileri mühendislik malzemelerinin kullanımında hiç şüphesiz otomotiv sektörü en büyük payı almaktadır. Otolarda çeşitli plastik malzemelerin kullanımı % 10 civarında ise de tamponlar gibi bazı özel uygulamalarda plastik kompozitler rakipsizdir. Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerine tercihen kullanılan polimer kompozitler sadece hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikleri ile ön planda değildir. İnsan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında optik elyaf ve basınç ile elektrik üretebilen piezoelektrik özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır.

Polimer kompozitleri iki ana kategoride incelemek mümkündür. Bunlar parçacık dolgulu ve sürekli elyaf kompozitleridir. Özellikle sürekli elyaf içeren kompozitler yüksek performans istenen alanlarda giderek daha çok kullanılmaktadır. 1950'lerden beri polimer kompozitler çok önemli bir boşluğu doldurmuştur.

Bugün yaygın olarak uçak, roket, füze gövdeleri, yüksek kalitede spor malzemeleri, yapay kemik gibi maliyetin yüksekliğinin pek önemli olmadığı alanlarda kullanıldığı gibi lastik, otomotiv sanayii, beyaz eşya, basınç dayanımlı boru, ve deniz araç gövdeleri gibi geniş bir spektrumda işlev görmektedirler. Önümüzdeki yıllarda uzay ve havacılık başta olmak üzere, robotik ve tıp alanında ve gelişen diğer teknolojilerde polimer kompozitlere daha da çok ağırlık verilecektir. Bu amaçla hem daha güçlü ve sağlam elyaflar, hemde daha yüksek ısı dayanımlı, çatlak oluşturmeyen, darbe dayanımı yüksek ve sert polimer matrisler üzerinde çalışmalar dünyada ve ülkemizde devam etmektedir [12, 15, 17, 22].

– **Seramik Matrisli Kompozitler:**

Seramikler yüksek sıcaklıklarda üretilen metalik olmayan ve inorganik malzeme türlerini içeren çok sert ve kırılğan malzemelerdir [21]. Bunun yanında yüksek sıcaklıklarda bile yüksek elastik özellik gösterir. Kimyasal olarak inerttirler ve düşük yoğunluğa sahiptirler.

Seramik malzemeler ısı şok direncinin düşük olduğu malzemelerdir. Dolayısıyla kullanımları sırasında ani hasar sergilediklerinden faciaya yol açacak özelliktedirler. Seramik malzemelerin seramik fiberlerle takviye edilmesi durumunda ani kırılmalara karşı dayanım artarken tokluklarının da artırılması amaçlanmaktadır. Bu uygulamayla monolitik seramiklere oranla tokluk 20 kata kadar artırılabilir. Seramik matrisli kompozitlerde proses parametreleri ile oynayarak mikro çatlaklar oluşturulur. Bu mikroçatlaklar, çatlak yolunun uzamasını ve gerilme konsantrasyonlarının yoğunlaşmasını engelleyerek gerilmeleri absorbe ederler [12, 17, 22].

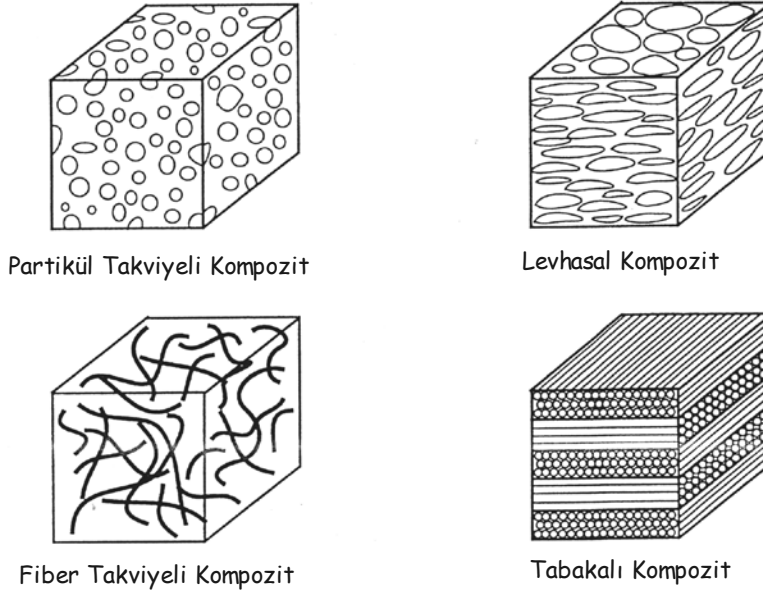
– **Metal Matrisli Kompozitler:**

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir [23]. Metal matrisli kompozitler genelde iki bileşenden meydana gelmektedirler. Bunlardan biri metal matris (genelde bir metal alaşımıdır), diğeri ise takviye malzemesidir (genel olarak bir metaller arası bileşik, oksit, karbür veya nitrür). Kompozitin üretilmesinde matris ve takviye malzemesi beraber karıştırılırlar. Bir kompoziti elde etmek için başlangıçta farklı komponentler seçilir. [12, 17, 22].

Kompozit malzemeleri sınıflandırmanın ikinci kısmı takviye fazı çeşidine bağlı olarak yapılır:

– **Fiber takviyeli kompozitler,**

- Levhasal kompozitler,
- Partikül takviyeli kompozitler,
- Tabakalı kompozitler (Şekil 2.1) [17].



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin takviye elemanının şekline göre görünümü [17]

Bu dört tip takviye elemanlı kompozit yine plastik, metal veya seramik matriks içinde olabilir. İkinci faz veya takviye elmanı her zaman beklenen özellik sağlanması için matriksten daha serttir. Burada fiber takviyeli kompozitler,

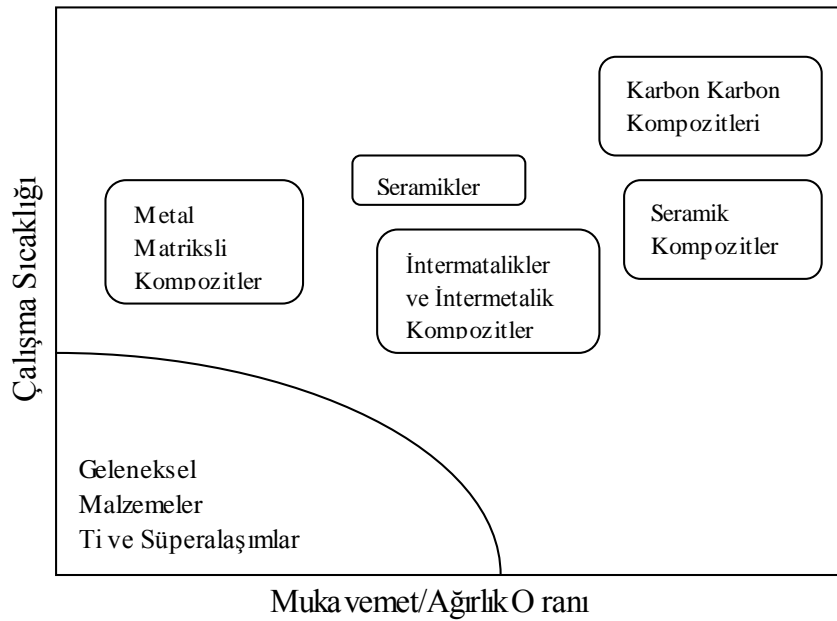
- Sürekli fiber takviyeli kompozitler,
- Süreksiz fiber takviyeli kompozitler,
- Rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozitler olarak sınıflandırılabilir.

Partikül takviyeli kompozitler iki alt grupta incelenilebilir: (a) büyük partiküllerle dayanımı artırılmış kompozitler, (b) dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitler [12, 17, 24].

Kompozit malzemeler mühendisliğin her branşında tasarımcıların ufuklarını

genişletmektedir. Kompozit malzemeler aslında binlerce yıldan beri mevcuttur. Doğal kompozit oluşumlarının yanı sıra çok uzun zamandan beri birçok mühendislik malzemeleri kompozit olarak pek çok alanda kullanılmaktadır. Kauçuk içindeki karbon siyahı, portland çimentosu veya kumla karışmış asfalt ve reçinedeki cam fiberler en genel örnekleridir [22- 27].

Kompozit performansının geliştirilmesi için en önemli anahtar parametreler, mukavemet/ağırlık veya spesifik mukavemettir. Şekil 2.2 kullanım sıcaklıklarına ve spesifik mukavemetlerine göre çeşitli yüksek sıcaklık malzemelerinin performans haritalarını göstermektedir. Bu şekilde MMK malzemeler, geleneksel malzemelerden daha iyi bir yer tutarken spesifik mukavemetlerinin seramik ve diğer yüksek sıcaklık malzemelerinden daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.2. Çeşitli motor malzemelerinin çalışma sıcaklığı ve mukavemet/ağırlık oranına göre performans haritaları [27]

2.3.1. Metal Matriksli Kompozitler (MMK)

MMK malzemeler hakkındaki bilgiler çok eski yıllara dayanmasına rağmen, bu malzemelerin kullanımları son yıllarda, özellikle son 30 yılda oldukça

yaygınlaşmıştır [26]. Çeyrek yüzyıldan daha uzun zamandan beri endüstriyel ve mühendislik uygulamalarına önemli katkılar sağlayan metal matriksli kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı olan en az iki bileşenden meydana gelmektedirler [28, 29].

MMK malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve alaşımlarına göre üstünlükleri mevcuttur. MMK'ler:

- Yüksek elastik modülüne sahiptirler,
- Yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler,
- Yüksek mukavemet (çekme, basma, aşınma, sürünme ve kayma)gösterirler,
- Yoğunlukları düşüktür,
- Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modülü özelliklerini birleştirirler,
- Tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahiptirler,
- Sıcaklık değişikliklerine veya ısıl şoka karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzey akışlarına karşı düşük hassasiyete sahiptirler,
- Yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik özellikleri mevcuttur.

Metal matriksli kompozitler üstün mekanik, elektrik ve ısıl performanslarından dolayı uzay/uçak, otomobil ve elektronik endüstrilerinde 1960'lardan beri kullanılmaktadır. Bu kompozitler düşük elektriksel direnç, iyi ısıl iletkenlik ve yüksek mekanik mukavemetlerinden dolayı son yıllarda elektriksel kontak ve elektronik paketleme endüstrilerinde de önem kazanmıştır [15, 27, 30- 32] ve yapısal malzeme olarak da mühendislik uygulamalarında hızla ilk sıralarda yer almaktadırlar. Son zamanlarda yüksek oranda seramik içeren metal-seramik kompozitleri elektronik paketleme gibi ısıl yönetim uygulamalarında ilgi odağı olmuştur. Bu kompozitlerin yaygın kullanımı, bunların ısıl genişleme ve bazı özelliklerini çok iyi anlamayı gerektirmektedir. Örneğin, mikro-elektronikteki paketleme malzemeleri ısıyı dağıtmak için yüksek ısıl iletkenliğe ve parçalar

arasındaki ısı genleşme uyumsuzluğunu azaltmak için düşük ısı genleşme katsayısına (CTE) sahip olmalıdırlar. İyi ısı iletkenlikle birlikte düşük ve uyumlu CTE'ye sahip kompozit, uygun metalik ve seramik fazları harmanlama ile elde edilebilir. Seramiklerin yüksek elastik modül ve metallerin yüksek süneklik özelliklerini birleştiren bu malzemeler, havacılık ve savunma sanayinin yanında otomotiv endüstrisinde de kullanılmaya başlanmıştır [33, 34].

Metal matriksli kompozitler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- Dispersiyonla Sertleştirilmiş Kompozit: Bu kompozit, seçilen matriks içerisinde çok ince partiküllerin düzenli bir şekilde dağıldığı yapı olarak karakterize edilir. Partikül boyutu 0,01 μm 'den 0,1 μm 'ye kadar değişebilir ve partiküllerin hacim oranı %1-15 arasında olur.
- Partikül Takviyeli Kompozit: Bu kompozitlerde ilave edilen takviye elemanının boyutu 1 μm 'den büyüktür ve hacim oranı % 5-40 aralığındadır.
- Fiber Takviyeli Kompozit: Fiber kompozit malzemelerinde takviye elemanının (fiberin) uzunluğu 0,1 μm ve 250 μm aralığında olabilmektedir. Sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK'lerde takviye malzemesinin hacim oranı %70'lere kadar arttırılabilmektedir. Fiber takviyeli malzemelerin ayırt edilebilen mikroyapısal özelliği; diğer iki takviye fazı partiküllerinde olmayan uzun bir boyutunun olmasıdır.

Metal matriksli kompozitler, partikül, tabaka, whisker, kısa fiber ve sürekli düzene girmiş fiber türündeki seramik fazlarla takviye edilmiş bir metalik alaşım matriksi içeren malzemelerin farklı bir sınıfıdır [17]. Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matriks malzemesi elyaflar arasına emdirilmeli, elyafları ıslatabilmeli, kimyasal veya belli şartlarda yapışma için bağ oluşturmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşabilmelidir. Bağdan ayrı olarak da üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler sırasında matriks ve elyaf arasında diğer kimyasal etkileşimler olmamalı ve matriks sürekli olarak kararlı kalmalıdır. Üretim sırasında matriksin kimyası nedeniyle elyaflar da herhangi bir fiziksel hasara maruz kalmamalıdır. Kompozitin sıcaklığa, kimyasal etkileşime ve neme karşı direnci öncelikle matriks tarafından belirlenir, takviye elemanı da sıcaklığa karşı kararlı

olmalıdır [12, 17, 27].

MMK' lerde çok yaygın olarak kullanılan matriks malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlardır. Bu hafif metal alaşımları dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlarda tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması diğer karakteristik özelliklerinden biridir. Genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn matriks malzemesi olarak kullanılır. En yaygın kullanılan metal matriksli kompozitler, ya silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3), karbon yada grafit takviyeli alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımlarına dayanmaktadır. [12, 17, 25, 26].

Mühendislikte kullanılan takviye elemanlarının pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden dayanım ve rijitlikleri katı haldeki konumlarından yaklaşık 30-50 kat daha dayanıklı ve 3 kat daha rijit olduklarından kütle halinde gösterdikleri özelliklerinden daha üstün performans gösterirler. Elyaflardan aranan temel özellikler;

- Yüksek elastik modül ve dayanım,
- Düşük yoğunluk,
- Kimyasal uyumluluk,
- Üretim kolaylığı,
- Isıl direnç gibi kriterlere göre seçilmektedir.

MMK' ler hakkındaki ilk çalışmalar sürekli fiberlerle takviye edilen malzemeler üzerine olmuş ve bu malzemelerin uygulamaları havacılık alanında kendini göstermiştir. Sürekli fiberlerle takviye edilen MMK malzemeler aslında kompozit malzemelerin spesifik olarak belli bir sınıfını teşkil etmektedirler. Fiber takviyeli metaller, metal ve alaşımların çoğunun aksine anizotropiktir. Anizotropluk derecesi her şeyden önce fiber oryantasyonuna bağlıdır. Metal matriks yükü transfer eder ve fiberlere iletirken, fiberlerin ana rolü ise yükü taşımaktır. Matriksin yükü transfer edebilmesi ve fiberlerin yükü taşımadaki başarısı fiber/matriks arayüzündeki ıslatmaya bağlıdır. Ticari uygulamalarda dispersiyonla sertleştirilmiş ve partikül

takviyeli MMK malzemeler kullanılırken, sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK'lerin uygulaması, havacılıktaki bazı uygulamalarla ve askeri uçakların bazı parçaları ile sınırlandırılmıştır. Bunların dışında istisna olarak sürekli paslanmaz çelik fiberlerle takviye edilen MMK malzemeler otomobil biyel kollarında kullanılmaktadırlar [12, 17, 25, 35, 36].

Son yıllarda süreksiz fiberlerle takviye edilmiş MMK'ler takviye malzemelerinin kolay üretilibilmeleri ve kolay temin edilebilmelerinden dolayı tercih edilmektedir. Süreksiz fiberli kompozitlerin diğer bir avantajı, dönme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi standart metalurjik proseslerle şekillendirilebilir olmalarıdır. Bu nedenle süreksiz olarak takviye edilmiş MMK'ler bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu uygulamalara tenis raketleri, SiC/Al kompozitinden yapılan golf sopalarının kafaları, SiC/Al kompozitinden yapılan piston biyel kolu gibi otomobil motor parçaları örnek olarak verilebilir [17, 36].

Metal matriks kompozit üretimi birçok parametreye bağlıdır. Bunlardan bazıları; sertliğin korunumu ve geliştirilmesi, takviyenin oluşturacağı hasarların en aza indirilmesi, matriks malzemesi ve takviyesi arasındaki ıslatma ve bağlanmayı arttırmasıdır. Metal matriksli kompozitlerin üretilmesinde çok değişik üretim metodu geliştirilmiş olmasına rağmen bu üretim yöntemlerini; (i) toz metalurjisi, (ii) difüzyon, (iii) ekstrüzyon ve çekme ve (iv) döküm yöntemleri olarak dört ana gruba ayırmak mümkündür. Döküm yöntemleri dışındaki üretim şekilleri pahalı ve kullanışsızdır. Ticari bakımdan, döküm şekli daha uygun görülmektedir. Metal matriksli kompozitler yeni ve ucuz üretim tekniklerinin bulunması ile doğru orantılı olarak uygulamaya aktarılabilirler. Bu sebepten son yıllarda en ucuz ve en kolay üretim metodlarından olan döküm ile kompozit üretiminin imkanları araştırılmaktadır [35, 37].

BÖLÜM 3. BAKIR ve SiC

3.1. Bakır

Bakır insanların en az 7000 yıldır çeşitli amaçlarla kullandığı ve günümüzde de sanayinin temel girdileri arasında yer alan [38, 39], kırmızımtırak renkte, soğuk iken dahi dövülüp biçim verilebilen önemli metallere biridir. Aktif metal olmadığı için tabiatta serbest olarak da (nabit bakır) bulunur [40]. Yer kabuğunda ortalama %0,01 mertebesinde bulunan bakır, en çok bulunan elementler sıralamasında yirmibeşinci sırada yer almaktadır [41]. Bakır, tabiatta metal olarak birçok yerde dağınık olarak mevcuttur. Birçok kaya ve toprakta olduğu gibi, okyanus çamurunda, nehir kumlarında, deniz bitkilerinin küllerinde, deniz mercanlarının birçoğunda, insan karaciğerinde ve salyangoz gibi yumuşakçalarda bulunur [42]. İnsan vücudundaki bakır 150 mg kadardır. Bilhassa kan, dalak, pankreas, böbrek, beyin ve karaciğer gibi organlarda plasmada bulunur [40].

Eski çağlarda demirin bulunuşundan önce bakır, kalayla karıştırılarak veya alaşımlandırılarak bronz elde edilirdi. Sonrada bronzdan çeşitli aletler ve silahlar yapıldı. Bugün bakır ve bileşikleri, bir çok alanda kullanılmaktadır. Bakırın çekici rengi onu her zaman dekoratif metal olarak çekici kılmıştır. İnsanlar bakır günlük yaşamlarında süs eşyası, silah ve el sanatları, madeni para ve ziynet eşya yapımında kullanmış, uygarlık ilerledikçe bakıra olan ihtiyaç daha da artmıştır. Bakır mükemmel bir elektrik ve ısı iletkeni olması sebebiyle elektrik tesisatlarında esnek kabloların yapımında da kullanılmaktadır [39, 43].

Günümüzde tüketimi 15 milyon tonun üzerine çıkan bakır en çok kullanılan üçüncü metal durumundadır. Bakıra olan devamlı talep artışı endüstrileşmedeki gelişmelerle orantılıdır. Bakırın endüstrileşme ve makineleşmedeki yeri artık tartışmasız kabul edilmiş olup, geçen 10 yılda Tayland'ın ihtiyacı dört kat ve Güney Kore'nin üç kat artmış, Çin'deki

talep patlama noktasına gelmiş durumdadır. Gelecekte de Güney Amerika ve Doğu Avrupa ülkelerinin bakıra olan taleplerinde önemli artışlar olacağı tahmin edilmektedir. Gelişmiş ülkelerde kişi başına yıllık bakır tüketimi 10 kg'dır. Bu rakam az gelişmiş ülkelerde 1- 2 kg arasında değişmektedir.

Günümüzde refah içinde yaşayan toplumların elektrik enerjisi tüketimlerinin yüksek olduğu bilinen bir gerçektir ve bakır kullanımının %75'i iletkenlik özelliğinden faydalanmaktadır. Elektrik enerjisi tüm ekonomik faaliyetlerin en önemli müşterek girdisidir, ana hammaddesidir. Burada bakır metalinin önemi ortaya çıkmaktadır. Sonuçta, ekonomik gelişmelere bağlı olarak hayat standardının sürekli yükseldiği günümüz dünyasında bakıra olan talebin devamlı olarak artacağı, bazı kullanım alanlarında ikame malzemesi bulunsa bile bakırın güncelliğini daima muhafaza edeceği gerçeği anlaşılmış bulunmaktadır [43].

3.1.1. Bakır Mineralleri

Bakır içeren 160'tan çok mineral bilinmektedir ve bunlardan 30- 40 kadarı doğada daha yaygın bulunmaktadır. Dünya bakır yataklarının yarısı kalkopirit filizi biçimindedir [1, 41].

Magma tabakasından yukarıya, yerkabuğuna doğru sıvı sızması sonucu ağır metal sülfürleri ayrışır, en çok rastlanan kalkopirit minerali de, CuFeS_2 (%34,6 Cu), primer olarak bu şekilde oluşmuştur. Kızgın doğal buharların ya da sülfürlü mineraller üzerine sızan doğal sülfat çözeltilerinin kimyasal etkisi ile oksitlenme ve redüklenme sonucu sekonder olarak oksitli bakır mineralleri ve metalik bakır (nabit bakır) oluşur. Bu nedenle birçok maden yatağında üstteki oksitli bakır mineralleri alınarak derine inildikçe sülfürlü cevherlere ulaşılır. Bakır endüstriyel öneme sahip pek çok mineralin önemli bir bileşenidir. Dünya bakır üretiminde kullanılan minerallerin yaklaşık %50'sini kalkozit (Cu_2S), %25'ini kalkopirit (CuFeS_2), %3'ünü enargit (Cu_3AsS_4), %1'ini diğer sülfür mineralleri, %6- 7'sini nabit (doğal) bakır ve %15'ini de oksit mineralleri oluşturur. 200 civarında mineralin bakır ihtiva ettiği, bunlardan 30- 40 kadarının doğada daha yaygın bulunduğu bilinmektedir. Bazı önemli bakır mineralleri ve içerikleri ile minerolojik özellikleri sırasıyla Tablo 3.1 ve 3.2'de görülmektedir [3, 41, 44, 45].

Tablo 3.1. Bazı önemli bakır mineralleri ve bakır içerikleri [41, 44]

Mineral	Formülü	%
		Cu
Nabit Bakır	Cu	99,9
Sülfürler		
Kalkosit	Cu_2S	79,9
Kovellit	CuS	66,5
Kalkopirit	CuFeS_2	34,6
Bornit	Cu_5FeS_4	63,3
Oksitler		
Kuprit	Cu_2O	88,8
Tenorit	CuO	79,9
Malahit	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	57,5
Azurit	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	55,3
Krisokol	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,2
Kalkantit	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,5
Brokantit	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2$	56,2
Atakamit	$\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2$	59,5
Kronkit	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2$	42,8
Diğerleri		
Enargit	Cu_3AsS_4	48,4
Famatinit	Cu_3SbS_4	43,3
Tetrahedrit	Cu_3SbS_3	46,7
Tenantit	CuAs_3	52,7

Tablo 3.2. Bazı önemli bakır minerallerinin minerolojik özellikleri [45]

Mineral	Formülü	Kristal Yapı	Renk	Sertlik (Mohs)
Sülfürlü Mineraller				
Bornit	Cu_5FeS_4	Kübik	Bakır kırmızısı kahverengi	3
Kalkopirit	$CuFeS_2$	Tetragonal	Açık sarı	3,5-4
Enarjit	$Cu(As_2Sb)S_4$	Ortorombik	Gri siyah-demir siyahı	3
Tetraedrit	$Cu_{12}Sb_4S_{13}$	Kübik	Gri-siyah	3-4,5
Tennantit	$Cu_{12}As_4S_{13}$	Kübik	Siyah-kurşun grisi	3-4,5
Kalkosit	Cu_2S	Ortorombik	Siyahmsı-kurşun grisi	2,5-3
Kovallit	CuS	Hekzagonal	Mavi-siyah	1,5-2
Kompleks Mineraller				
Famantinit	$Cu_3(Sb, As)S_4$	-	Bakır kırmızısı-gri	3,5
Bournanit	$PbCuSbS_3$	Ortorombik	Çelik grisi	2,5-3
Oksitli Mineraller				
Kuprit	Cu_2O	Kübik	Kırmızı	3,5-4
Tenorit	CuO	Monoklinik	Griden siyaha	3,5
Malahit	$CuCO_3.Cu(OH)_2$	Monoklinik	Açık yeşil	3,5-4
Azurit	$2CuCO_3.Cu(OH)_2$	Monoklinik	Mavi	3,5-4
Antlerit	$Cu_3SO_4(OH)_2$	Ortorombik	Yeşil	3,5-4
Brokontit	$Cu_4SO_4(OH)_6$	Monoklinik	Yeşil	3,5-4
Atakamit	Cu_2ClOH_3	Ortorombik	Yeşil	3-3,5
Krisokol	$CuSiO_3.2H_2O$	Ortorombik	Yeşil-mavi	2-4
Metalik				
Tabii Bakır	Cu	Kübik	Kırmızısı	2,5-3

3.1.2. Bakır Cevherleri

Bakır cevherleri dünyanın her tarafına dağılmış ve bol miktarda bulunmaktadır. Bakır mineralleri, her çeşit maden yatağında rastlanan yatak mineralleri içinde bulunur. Bakır maden yataklarının dünya üzerindeki dağılımı her tarafta eşit olmadığı için, dünya üretimi de böylece belirli bölgelerden yapılmaktadır. Bu güne kadar büyük ölçüde bakır üretimi yapan belli başlı dört maden yatağı sayılabilir:

1. A.B.D.'ndeki kayalık dağları ve Great Basin.
2. Peru ve Şili'deki Andlerin batı yamacı.
3. Demokratik Kongosundaki (Belçika kongosu) merkezi yayla ve Kuzey Rodezya.
4. Merkezi Kanada'nın pre-kambriyen zamanına ait kabuk sahası ve onun kuzey Michigan'a kadar uzanan kısmı.

Bütün bu maden yatakları, bilinen bakır rezervlerinin %90'dan fazlasını teşkil ederler. Metalik bakır üretiminde uygulanan metalurjik metodlara ve minerolojik yapılarına göre

bakır cevherleri aşağıdaki şekilde bir sınıflandırmaya tabi tutulabilir [44, 46]. Günümüzde bilinen bakır cevherlerinin yaklaşık %85'i sülfürlü, %15'i oksidli minerallerdir [47].

1. Sülfür cevherler

- a) Yüksek bakır tenörlü olup, doğrudan doğruya ergitilebilen cevherler.
- b) Orta veya düşük tenörlü olup, zenginleştirmeyi gerektiren cevherler.
- c) Piritik cevherler.

2. Oksit cevherler

- a) Yüksek veya orta tenörlü olup, sülfür cevherlerle birlikte piro-metalurji veya hidro-metalurji metodlarıyla değerlendirilen bakır cevherleri,
- b) Düşük tenörlü cevherler olup, ancak hidro-metalurji metodlarıyla değerlendirilebilirler.

3. Natif bakır, maden yatakları

Halen bakır üretimi yapılan cevherler (1b) ve (2b) de belirtilmiş olan düşük tenörlü sülfür ve oksit cevherlerdir [44].

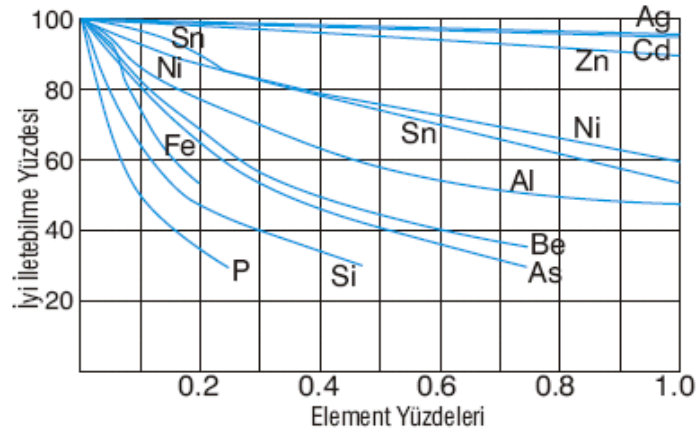
3.1.3. Ticari Saf Bakır Çeşitleri

Ticari bakırları içerdiği oksijen miktarına göre üç sınıfa ayırmak mümkündür.

- Bünyesinde % 0,04- 0,05 oksijen ihtiva eden bakır.
- Deokside edilmiş bakır. Bu tür bakır oksijen ihtiva etmez, fakat bir miktar deoksidan ilaveleri içerir.
- Oksijensiz elektrolitik bakır. Bu tip bakır oksijen ve deoksidan kalıntıları içermez.

Yukarıda belirtilen ticari bakırların tümü %99'dan fazla bakır (Cu) içerir. Bakırı oksijenden arıtmak için deoksidan katkı elementleri kullanılır. En önemli deoksidan elementleri şu şekilde sıralanır: Çinko (Zn), fosfor (P), silisyum (Si), kalsiyum (Ca), berilyum (Be), alüminyum (Al), magnezyum (Mg).

Bu oksijen giderici elementlerin bakır bünyesinde fazla olması elektrik iletkenliğini bir hayli düşürmektedir. Oksijensiz bakır elektrolitik rafine bakırın daha fazla arıtılarak oksijen ihtiva etmeyen ortamlarda dökümü neticesinde elde edilir. Değişik türdeki ticari bakıra katılan ve bakırın safiyetini bozan elementlerin elektrik iletkenliğine olan etkileri Şekil 3.1’de verilmiştir [1].



Şekil 3.1. Elementlerin bakırın elektrik iletkenliğine etkisi [1]

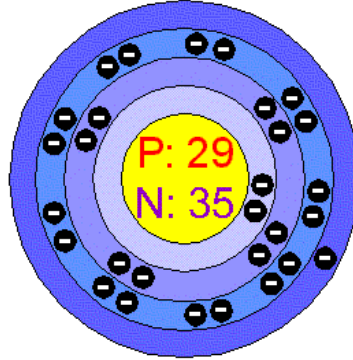
3.1.4. Bakırın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Etrafımızda gördüğümüz her şey atomlardan, her atom da proton, nötron ve elektronlardan oluşmaktadır. Proton ve nötronlar atomun merkezinde çekirdekte bir arada bulunurlar. Elektronlar çekirdeğin etrafında, elektron kabukları olarak isimlendirilen tabakalarda dönerler.

Her bir bakır atomu 29 negatif yüklü elektrona sahiptir. Her zaman elektron ve proton sayıları birbirlerine eşittirler dolayısıyla, bakır çekirdeğinde 29 pozitif yüklü protona sahiptir. Bir atomun proton sayısı da aynı zamanda atom numarasına karşılık gelir ve bakırın atom numarası 29’dur.

Bakırın kimyası, farklı yapılar oluşturmak için diğer atomlarla ve moleküllerle nasıl kombine olacağı elektron hareketleriyle ilgilidir. Elektronlar merkezden itibaren elektron kabuklarını doldururlar. Bir kabuk dolduğunda elektronlar dıştaki diğer kabuğa geçerler. Birçok elementte dıştaki kabuk tam dolmamıştır. Sadece dolu kabuk kararlıdır, bu yüzden elementler tam dolu bir dış kabuk elde etmek için elektronlarını paylaşır veya takas ederler.

Bir bakır atomu elektronlarının bir veya ikisini vermeye çalışır ve vererek pozitif yüklenir ve buna iyon denir. Şekil 3.2’de bakır atomunun elektron dizilimi görülmektedir [39].



Şekil 3.2. Bakır atomunun elektron dizilimi [47]

Kimyasal simgesi “Cu” ile gösterilen bakır, kırmızımsı renkli, ince tel ve levha haline getirilebilen, ısı ve elektrik iletkenliği yüksek ve kullanım sahası çok geniş olan bir metaldir [49]. Bakır atomları sıkı paket yapıda dizilirler ve yüzey merkezli kübik yapıya sahiptirler. Metaller gevrek değildir, atomu oluşturan tabakalar birbirleri üzerinde kayabilirler. Bu sebeple metallerin çoğu dövülerek şekillendirilebilir, tel ve levha haline getirilebilir. Metaller en dıştaki elektronlarını bırakırlar ve bir elektron denizi oluştururlar. Serbest elektronlar ısı ve elektriği iletirler. Bakır çok iyi ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir [39].

Saf bakır 400 W/m.K mertebesinde ısı iletkenliği, 390 MPa mertebesinde akma mukavemeti ve 490 MPa mertebesinde çekme mukavemeti olan bir malzemedir.

Bakırın tarih boyu önemli kılan özellikleri şunlardır [2]:

- Yüksek elektriksel iletkenlik,
- Yüksek ısı iletkenlik,
- Korozyon direnci,
- Dekoratif rengi,
- Orta derecedeki mukavemet ve
- Kolay şekillendirilebilirlik.

Bakırın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te görülmektedir.

Tablo 3.3. Bakırın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri [3, 10, 49]

Simgesi	Cu
Sınıfı	Geçiş elementleri
Grup, periyot, blok	11, 4, d
Görünüş	Metalik kahverengi
Kristal Yapısı	Kübik (YMK)
Atom Ağırlığı	63,546 g/mol
Yoğunluğu	8.9 gr/cm ³
Mohs sertliği	3,0
Vickers sertliği	369MPa
Brinell sertliği	874MPa
Ergime Noktası	1083.0 °C (1356.15 K, 1981.4 F)
Kaynama Noktası	2567.0 °C (2840.15 K, 4652.6 F)
Ergime ısısı	43 k.cal (1 kg'ının ergimesi için gerekli ısı)- 13,26kJ/mol
Buharlaşma ısısı	300,4 kJ/mol
Isı kapasitesi	24,440 (25°C)J/(mol.K)
Elektrik iletme özelliği	%99.95
Elektrik direnci	16,78 nΩ.m(20°C'de)
Isıl iletkenlik	401 W/(m.K)
Isıl genleşme	16,5 mm/(m.K) (25°C'de)
Atom Numarası	29
Atom Ağırlığı	63.546 g/mol

Bakırın yüksek elektriksel iletkenliği, onu enerji ve telekomünikasyon kabloları, mıknatıslı teller, iletkenler ve çok sayıdaki elektriksel uygulamalarda tercih edilen bir metal haline getirmiştir. Bakır 100°C'nin üzerindeki işlem sıcaklıklarında, bu uygulamalar için yeterli bir mukavemet, süneklik ve sertliğe sahiptir. Fakat diğer uygulamaların çoğu için bakır, daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmalı ve yüksek işlem sıcaklıklarında elektriksel özelliklerle birlikte mukavemetini korumalıdır [49].

3.1.5. Bakırın Elektriksel İletkenliği

Elektriksel iletkenlik, bir malzemedeki elektrik yükünün ne kadar rahat hareket edebildiğinin bir ölçütüdür. Birimi Simens per meter biriminden türetilen SI'dır, fakat iletkenlik değerleri genellikle %IACS ile gösterilir. Bakırın elektrik iletkenliği yüzde IACS (International annealed copper standart) birimi ile ifade edilir. Tavlanmış saf bakırın iletkenliği (5.8108×10^7 S/m) 20°C 'de % 100 IACS olarak tanımlanır. Bu standart 8.9g/cm^3 yoğunluğunda, 1 metre uzunluğunda, 1 gram ağırlığında, 0.15328 ohms direncindeki tavlanmış bir bakır tel için geçerlidir. Bütün diğer iletkenlik değerleri, bakırın bu tavlanmış iletkenlik değerine bağlıdır. İletkenlik değerleri Simens/metre' den %IACS'ye 1.7241×10^{-6} ile çarpılarak çevrilebilir. IACS değeri ne kadar yüksekse malzeme o kadar iletken [50-53].

3.1.6. Bakırın Kullanım Alanları

Bakır elektrik iletkenliği ile korozyon direncinin yüksekliği ve kolay işlenebilirliğinden dolayı değişik endüstrilerde kullanılmaktadır. Saf bakırın başlıca kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Tel
- Motor bobini
- Jeneratörler
- Transformatörler
- Elektrikli trenlerin hava hatları
- Endüstrilere ve evlere elektrik enerjisi nakleden iletim hatlarında
- Radyatörler ve yağ soğutucuları
- Yüksek fırın tüyeri, yastık radyatör ve monkilerin yapımında
- Ark ocaklarının elektrod tutucu ve kollarının yapımında [1].

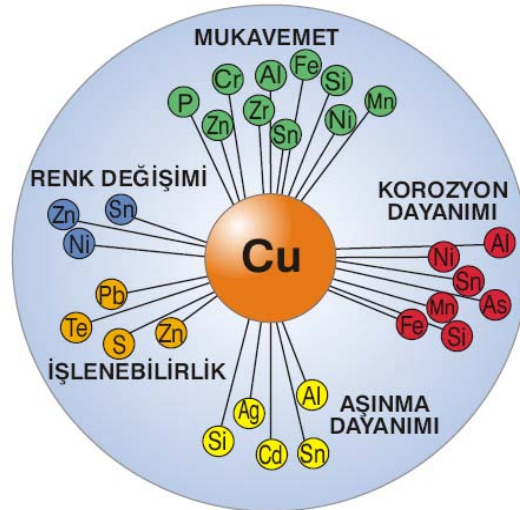
Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri bakırı, elektrik santralleri ve iletken malzemelerin vazgeçilmez girdisi haline getirmektedir. Soğuk hava makine ve

teçhizatlarında, paslanmaz özelliğinden dolayı nakliye vasıtalarında ve dış kaplamalarda bakırın büyük kullanım alanları bulunmaktadır. Bunlara ek olarak bakırın kaynak işlerinde, bronz üretiminde önemli yeri vardır. En geniş kullanım alanları sırasıyla; elektrik üretim ve iletimi ile ilgili tesislerde, inşaatta, ulaşım makine ve teçhizatındadır [49].

Elektriğin üretilmesinde (jeneratör, trafo gibi) , nakledilmesinde (enerji nakil hatları) ve kullanılmasında (elektrik motorları, elektrikli makineler v.b.) en iyi ekonomik iletken olan rafine bakır metalinin vazgeçilemez stratejik bir metal olduğu bilinmektedir. Evlerimizdeki aydınlatma gereçleri, radyo ve TV- cihazları, çamaşır ve bulaşık makineleri, buzdolabı ve mutfak robotları gibi çağdaş yaşamın gerektirdiği tüm donanımlar bakır sayesinde insanlığın hizmetindedir. Uzun ömürlü çatı kaplaması olarak bakır levha ve mobilya malzemesi olarak pirinç kullanımına da rastlanmaktadır. Torna, freze, matkap, kaynak makineleri ve trafoları gibi elektrikli makineler de bakırın kullanıldığı önemli üretim araçlarıdır. Bu tür makinelerde bakır, elektriğin tüketimi ve dahili iletimi amacına hizmet eder. Ayrıca bakır, otomobil, gemi, tren gibi ulaşım araçlarında radyatör, boru gibi parçalarda, kimya sektöründe, mühimmat sanayinde, turistik eşya yapımında, soğutucu donanımlarda çokça kullanılmaktadır. Bunlarda bakırın elektriğin üretiminde, iletiminde ve tüketiminde hizmet ettiği gözlemlenebilir. Özetle bakırın takriben %80'inin elektrik/(elektronik) sektöründe, kalan %20'sinin ise pirinç, bronz v.b. alışımlı halinde genelde makine sektöründe; boru ve içi boş profil halinde ısı eşanjörlerinde ve mobilya sanayinde, levha halinde inşaat ve makine sektöründe kullanıldığı söylenebilir [3, 41, 54].

3.1.7. Alışım Elementlerinin Bakıra Etkileri

Saf bakıra ilave edilebilen elementler şunlardır: Alüminyum, arsenik, berilyum, kadmiyum, krom, kobalt, demir, kurşun, manganez, nikel, oksijen, fosfor, silisyum, gümüş, kükürt, tellür, kalay, çinko ve zirkonyum. Bu alışım elementlerinin saf bakıra olan etkileri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Alaşım elementlerinin bakıra etkileri [1]

Saf bakıra ilave edilen alaşım elementleri sağlayacakları avantajlara göre aşağıdaki gruplara ayrılabilir.

Mukavemet Artırıcı Alaşım Elementleri

- | | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| – Krom (Cr) | – Silisyum (Si) | – Kalay (Sn) |
| – Alüminyum (Al) | – Manganez (Mn) | – Nikel (Ni) |
| – Fosfor (P) | – Çinko (Zn) | – Berilyum (Be) |
| – Demir (Fe) | – Zirkonyum (Zr) | – Kobalt (Co) |

Korozyon Dayanımını Artırıcı Alaşım Elementleri

Bakır asil metaldir, ama altın veya diğer değerli metallere tersine bazı ortamlarda korozyona dayanmayabilir. Bazı bakır alaşımlarının hidrojen gevrekliği veya gerilme korozyonuna dayanımı zayıftır.

- | | |
|------------------|-----------------|
| – Nikel (Ni) | – Arsenik (As) |
| – Alüminyum (Al) | – Demir (Fe) |
| – Kalay (Sn) | – Silisyum (Si) |

- Manganez (Mn)

Aşınma Dayanımını Artırıcı Alaşım Elementleri

- Alüminyum (Al)
- Gümüş (Ag)
- Silisyum (Si)
- Kadmiyum (Cd)
- Kalay (Sn)
- Berilyum (Be)
- Kobalt (Co)

İşlenebilirliği Artırıcı Alaşım Elementleri

- Tellür (Te)
- Kurşun (Pb)
- Kükürt (S)
- Çinko (Zn)

Renk Değiştirici Alaşım Elementleri

Bazı bakır alaşımları dekoratif amaçlı da kullanılabilir. Özel bir renk ve yüzey alaşımlandırma yapılarak, mekanik özelliklerle birlikte uyumlu olarak ortaya çıkartılabilir [1].

- Çinko (Zn)
- Kalay (Sn)
- Nikel (Ni)

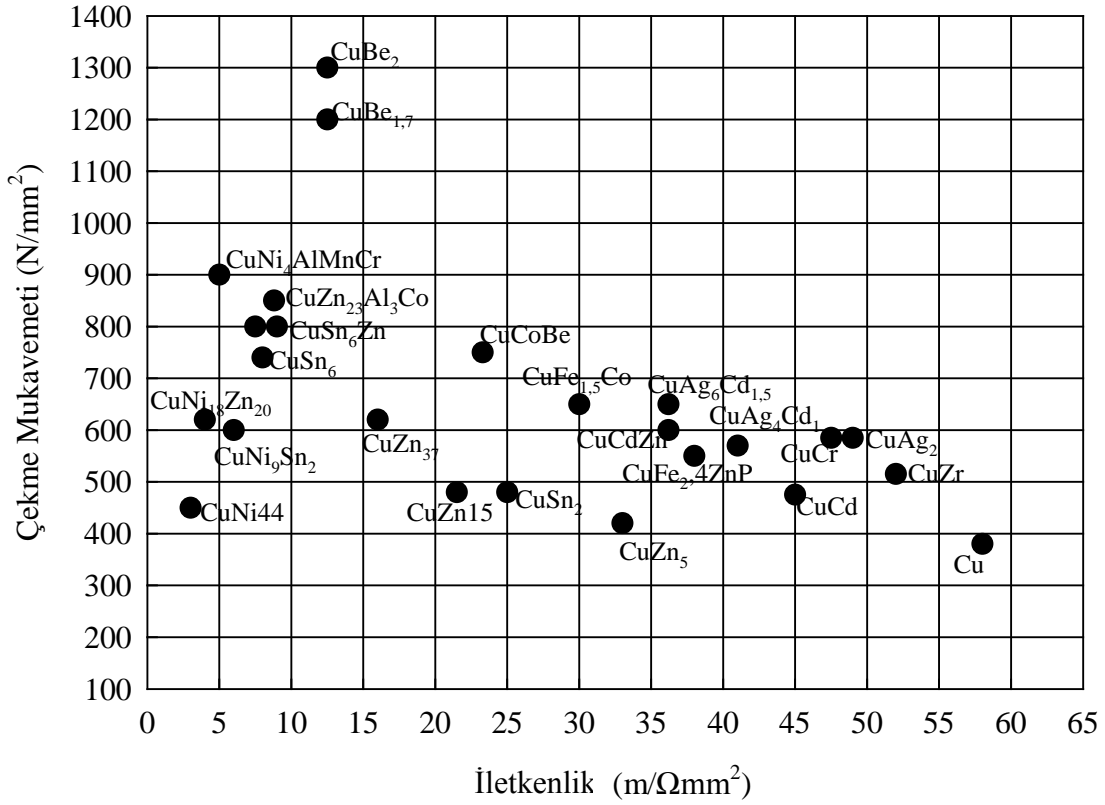
3.1.8. Bakır Alaşımları

Bakır ve bakır alaşımları mühendislik malzemelerinin içerisinde en yaygın ve en geniş kullanım alanı bulan gruplarından birini teşkil etmektedir. Amerika'da yaklaşık 500 bakır alaşımı mevcuttur ve daha fazlası uluslararası standartlara göre sınıflandırılmıştır. Bu kadar geniş bir ayırım göz korkutucu olabilir fakat bakır metalleri istenen fiziksel ve mekaniksel özelliklerine göre seçilirse istenen özellikteki alaşımlar kolaylıkla bulunabilir, bu sayede doğru alaşımın seçimi basitleştirilebilir.

Bakır ve alaşımlarının bu kadar yaygın kullanılmasının ana nedeni, diğer malzemelerde bulunan yararlı özelliklerden daha üstün özellikte bir kombinasyon sergilemesidir [55]. Mükemmel elektriksel ve ısı iletkenlikleri, korozyona karşı dirençleri, hem mukavemet hem de yorulmaya karşı dirençli malzeme üretiminin kolay olması bu özellikleri arasında sayılabilir.

Bakır ve alaşımları gerçekten iyi elektrik ve ısı ileticilerdir. Aslında bakır, diğer metallere göre daha çok bu özellikleri için kullanılmaktadır. Alaşımlama mütemediyen elektrik iletkenliğini azaltır ve ısı iletkenliğe etkisi daha azdır. Bu sebeple uygulamalarda yüksek elektrik ve ısı iletkenlik istendiğinde, toplam alaşım miktarı yüzde birkaç mertebelerinde olan bakır alaşımları tercih edilir. Alaşımlama ile birlikte meydana gelen azalma, alaşım elementlerinin iletkenliğe veya diğer malzeme özelliklerine olan etkisine bağlı olmayıp, direkt olarak yabancı atomların bakır latisine olan etkisine bağlıdır [56].

Bakır alaşımlarının elektriksel iletkenliği ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 3.4'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan mukavemet ile birlikte iletkenlik azalmakta ve alaşımdan alaşıma farklılık göstermektedir [1].



Şekil. 3.4. Bakır alaşımlarının elektrik iletkenliği ve Bakır ve alaşımlarını kodlamanın en yaygın yolu onları altı gruba ayırmaktır:

- bakırlar,
- seyreltilmiş bakır alaşımları (az alaşımlı bakırlar),
- pirinçler,
- bronzlar,
- bakır nikeller ve
- nikel gümüşlerdir (Cu-Ni-Zn).

İlk grup olan bakırlar, aslında genellikle yumuşak, sünek ve %0.7'den daha düşük toplam empürite içeren ticari saf bakırlardır. Seyreltilmiş bakır alaşımları, bakırın bir veya daha fazla temel özelliklerini modifiye eden alaşım elementlerini düşük miktarda içermektedir [56].

Bakır başlıca çinko, kalay, alüminyum, nikel, fosfor ve berilyumla alaşım oluşturur. Endüstride kullanılan bakır alaşımları pirinçler ve bronzlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Bakırın çinko ile oluşturduğu alaşımlara pirinçler ve bakırın çinkodan başka diğer elemanlarla oluşturduğu alaşımların tümüne bronzlar denir. Bronzlar içerdiği esas alaşım elemanının türüne göre kalay bronzu, nikel bronzu, fosfor bronzu, berilyum bronzu gibi adlar alır [57].

3.1.8.1. Pirinçler

Bakırın (Cu) çinko (Zn) ile değişik oranlarda birleşerek yapmış olduğu alaşımlara pirinç adı verilir. Pirinç malzemelere, rengi sarı olduğu için ülkemizde "sarı" da denir. Mukavemet ve korozyon dayanım özellikleri çok yüksek olan pirinçlerin, içyapı ve mekanik özellikleri çinko miktarıyla orantılıdır [1, 3]. Bakır ve çinko yalnızca hadde değil aynı zamanda döküm alaşımlarında da bakırın en önemli alaşım türüdür. Demir dışı tüm bakır alaşımlarının en önemlisidir ve mühendislikte çok fazla kullanılmaktadır. Endüstriyel pirinçler bakır ve çinko ilavelerinin dışında diğer alaşım elementlerini de içerirler.

Pirinçlerin en önemli özellikleri, atmosferik korozyona dirençli olması, sıcak ve soğuk şekillendirilmesi, derin çekilmeye, sıcak dövülmeye ve preslenmeye uygunluğu ve kolay lehimlenme özelliğine sahip olmalarıdır. Pirinçlerin birçok avantajları vardır. Bu avantajların en önemli olanları aşağıda sıralanmıştır.

- Üstün işleme özelliği,
- İyi ısı ve elektrik iletkenliği,
- Özelliklerinde azalma olmadan tekrar kullanılma özelliği,
- Kolay kaynak olma,
- Kolay dövülebilirliği,
- Kıvılcım çıkarmaz,
- Değişik şekil ve ebatlarda temin kolaylığı,
- Çekici renk özelliği,
- Aşınma dayanımı,

- 200°C altında özelliklerinde azalma olmaması,
- Güneş ışını ile renk değiştirmemesi,
- Uygun maliyetli malzeme,
- İyi mukavemet özellikleri,
- İyi korozyon dayanımı.

Endüstride kullanılan malzemelerde bakır miktarının en az %54 olması zorunludur. Daha düşük bakır miktarlarında malzeme çok sert ve kırılğan olur. Pirinçler iki ana gruba ayrılır:

- %61'den fazla bakır içeren alfa alaşımları
- %54- 61 bakır içeren alfa + beta alaşımları

Bakır çinko alaşımlarının özelliklerini alfa ve beta fazları belirler. Örneğin alfa alaşımları soğuk şekillendirilmeye ve beta alaşımları sıcak işlemeye (dövmeye, ekstrüzyona) müsaittir [1, 3, 58].

Yüksek Mukavemetli Pirinçler (Cuprass Serisi Özel Pirinçler):

Pirincin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla, bakıra çinkonun dışında nikel, mangan, demir, kalay ya da silisyum elementleri katılabilir. Özel pirinç adı verilen bu alaşımlarda ilave elementlerin toplam miktarı %5'i geçmez. Bu elementler uzama özelliklerine fazla etki etmeksizin çekme mukavemetini artırır. Birden çok element içeren bu alaşımlara yüksek mukavemetli pirinçler denir [1].

Pirinçlerin kullanım alanları:

- %5- 20 çinko içeren pirinçler renk özelliğinden ötürü süslü metal işlerinde, ucuz mücevherat ve mimari maksatlarda tercihen kullanılır.
- %20- 30 çinko içeren pirinçler fazla uzama kabiliyeti istenen tel, çubuk, mermi kovani ve kondansatör boru yapımında kullanılır.

— %40- 43 çinko içeren pirinçler alfa-beta pirinçleri olarak bilinir ve daha az uzama kabiliyetine sahiptir, fakat çok kolay işlenebilirler. Bu tür pirinçler ekstrüzyona, haddelemeye, sıcak dövme ve preslemeye müsaittirler [1].

3.1.8.2. Bronzlar

Bronzlar esas olarak kalay içeren bakır esaslı alaşımlardır. Bakırın çinko içermeyen diğer alaşımlarına genel olarak bronz denilmekte ve çeşitleri ana alaşım elementleriyle belirtilmektedir. Geleneksel bronzlar bakır-kalay alaşımlarıdır ve kalay bronzu ya da çoğu zaman fosforla deokside edildiklerinden, fosfor bronzu olarak adlandırılırlar [1, 59].

Kalay bronzları

Kalay miktarları belirli sınırlar içerisinde olan bakır- kalay alaşımları endüstriyel açıdan en önemli bronzları oluşturmaktadır.

Kalay bronzlarının en belirgin özellikleri atmosferik ve su korozyonuna karşı iyi dirençli ve aşınmaya karşı fazla dirençli olmasıdır. Aynı zamanda mükemmel yağlama kabiliyetleri vardır. Endüstride en çok kullanılan bakır alaşımlarından biridir. Ülkemizde kalay bronzu imal edilmekte ancak, düşük kalay içeren cinsleri üretimdeki kolaylığı nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Bu tür bronzlar ise çok çabuk aşınarak veya sarma adı verilen sertliğinin düşük olmasından kaynaklanan yapışma yaparak verimlilikte azalmaya sebep olmaktadır. %6 kalay ihtiva eden bronzlar soğuk ve sıcak işlenmeye müsaittirler. Kalay miktarının artması malzeme mukavemetini artırır, diğer taraftan uzama kabiliyeti bir hayli azalır. %10, 12 kalay içeren bronzlar mekanik özellikler açısından en ideal olanlarıdır. Bu tip bronzlar döküm parçalarında tercih edilirler. Döküm bronzları kalay, kurşun, fosfor ve nikel ihtiva eder [1, 3, 58- 60].

Alüminyum bronzları

Alüminyum bronzları %14'e kadar alüminyum içeren bakır esaslı alaşım ailesidir. Oldukça sert, yüksek çekme dayanımına ve tokluğa sahiptirler. Bu alaşımlar kendi kendine oluşan alüminyum oksit filminden dolayı aşınmaya ve yorulmaya direnç gösterirler ve mükemmel

korozyon direncine sahiptirler [61]. Diğer alaşımların sunamadığı mekanik ve kimyasal özellikleri alüminyum bronzları sunar. Bu özellikler alüminyum bronzlarına birçok üstünlükler sağlar. Sertlikleri 40- 42 HRC'ye kadar çıkan cinsleri vardır. Bu malzemelerin aşınma dayanımı da yüksek olduğundan kalıpcılıkta ve makine imalatında çeliğin ciddi alternatifidirler. Çelikten daha iyi ısı iletkenliğinin olması sayesinde de plastik kalıplarında çeliğe alternatif teşkil eder. Örneğin plastik kova kalıplarında çekirdek tamamıyla bronzdan yapılabilir. Sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle, paslanmaz sacların derin sıvama kalıplarında kullanılan malzemedir [1, 3, 62].

Nikel bronzları

Bakır- nikel alaşımları yaklaşık 70 yıl önce geliştirilmiş olup günümüzde teknolojik önemini koruyan önemli malzemelerden birisidir. Bakır- nikel alaşımlarının iyi korozyon direncine sahip olmaları, bu alaşımların denizde çalışan sistemlerde uzun zamandan beri tercih edilen bir malzeme olarak kullanılmalarını sağlamıştır [63].

Nikel, demir dışı döküm alaşımlarına gün geçtikçe daha fazla ilave edilmektedir. Genelde çekme dayanımını ve önemli ölçüde akma sınırını artırır ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasını önler. Ayrıca malzemenin tane büyüklüğünü azaltır, korozyon dayanımını yükseltir ve bazı alaşımlarda, ısı işlem sayesinde alaşıma üstün fiziksel özellikler kazandırır. Nikel bronzları kabaca dört alaşım grubu olarak sınıflandırılır:

- %5' den az nikelli alaşım grubu
- %5 ile % 10 nikelli alaşım grubu
- %10 ile % 20 nikelli alaşım grubu
- Ana alaşımı nikel olan özel alaşımlar (yüksek nikelli bronz, örneğin Monel metal).

Düşük miktarlarda nikel kullanımı kurşun segregasyonunu azaltır. Doğrudan kullanılacak yataklar %2'den fazla nikel içermemelidir. Bu miktarın üzerindeki değerlerin malzemenin yataklık özelliklerini kötüleştirme eğilimi olduğuna inanılmaktadır. Birinci alaşım grubunun dökümünde pek zorluk yaşanmamakta ve mevcut döküm pratiği geçerli

olmaktadır. %88 Cu, %5 Sn, %5 Ni ve %2 Zn alaşımı uluslararası bir alaşım olup, üstün özelliklerinden dolayı tercihen kullanılmaktadır. Isıl işlemin uygulanması ile bu 2 alaşımın çekme mukavemeti 24 kg/mm^2 ve kopma uzaması %15'e çıkarılması mümkündür. %4- %5 nikelli alaşım nikel bronzu karakteristikleri göstermeye başlar. Nikel yüzdesi artınca ,alaşımların ergitme ve döküm sıcaklıkları yükselir ve gaz absorbe etmesi fazlasıyla artar. Nikel miktarı %10'u aşınca diğer bir zorluk ortaya çıkar. Karbon absorpsiyonu sonucu karbon mevcut ortamdaki oksitlerle birleşerek karbondioksit oluşturur. Bu hidrojene benzer problem yaratır. Şöyle ki; gaz, sıvı eriyiğe geçer ve katılaşma esnasında dışarı atılarak gaz boşluklarına sebebiyet verir [1, 3, 58, 59].

3.1.8.3. Nikel Gümüşü

Nikel gümüşü Cu – Ni – Zn alaşımıdır. Bakır ana elementtir. Ni arttıkça ergime sıcaklığı yükselir. Korozyon direncini arttırır. Bakırın rengini yok ederek gümüş rengini verir. Mukavemetine olumlu etki yapar. Ancak elektrik iletkenliği düşer. Çinko mukavemeti arttırır. Maliyeti azaltır. Çinko % 37 'i geçince süneklik azalır. Nikel gümüşleri döküm ve işlem alaşımı olarak ikiye ayrılır:

Döküm alaşımı: Sert ve iki fazlıdır. % 37'den fazla çinko içerir.

İşlem alaşımı: Yumuşak ve deformasyon kabiliyetleri iyidir. Tek fazlı yapıdır [58, 64].

Sert bakır alaşımları

20. yüzyıl başlarında, az miktarda Cu, Mg, Si ve Fe içeren alüminyum esaslı alaşımların sertliğinde, ergime sıcaklığının biraz altındaki bir sıcaklıktan su verildiklerinde ve oda sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklıkta bir süre tutulduklarında önemli bir artış olduğu bulunmuştur. Bunun çökeltme sertleşmesi veya benzer adıyla yaşlandırmanın, bir metalik malzemenin sertliğinin, iç yapısına ince bir şekilde dağılmış, parçacıklar (alaşım elementleri) ekleyerek artırılması olduğu artık çok iyi bilinmektedir. Sert bakır alaşımları da bu sertleştirme mekanizması kullanılarak geliştirilen ve çok geniş kullanım alanı bulan alaşımlardır [1].

Berilyum bronzları

1960'lı yıllarda berilyumlu bakırdan yapılmış bir kaç parça, kayma ve sürtünme şartları altında metalin metale değmesi ile çalıştırılmıştı. O yıllardan günümüze değin berilyumlu bakır alaşımları denizaltı telefonlarından, uçakların iniş takımlarının dişlilerine, plastik parçalar basan enjeksiyon kalıplarına kadar geniş kullanım alanı buldu. 1970'li yıllardan sonra berilyumlu bakırların uygun bir şekilde yağlanmasıyla, tüm bakır esaslı alaşımlardan ve birçok çelik cinsinden daha fazla aşınma dayanımının olduğu anlaşıldı [1].

Tüm bakır esaslı alaşımlar arasında en sert ve mekanik mukavemeti en yüksek olanı berilyumlu bakırlardır. Bu alaşımlar %0.35- 2.85 berilyum içerir. Bakır- Berilyum alaşımları dövülmüş ve dökülmüş olmak üzere iki gruba ayrılır. Çözeltiye alma tavlamaları 570- 810°C'de yapılır. Alaşım 800°C'de suda soğutulduktan sonra yaklaşık 370°C'de yaşlandırma yapılır. Yaşlandırma ve sonrasında soğuk şekillendirme ile malzeme sertliği dört katı artar [1, 62].

Bakır-berilyum alaşımlarının genel kullanım alanları:

- Projeksiyon ve yakma alın kaynağı, paslanmaz çeliklerin punta kaynağı için elektrotlar
- Pistonlar, nozullar
- Plastik kalıplarda hızlı soğuması gereken yerlerde geçme olarak veya kalıbın tümü
- Kontak, zemberek, yaprak, bağlama, spiral yayları
- Çeşitli diyaframlar
- Takı kilitleri ve vidaları
- Direnç kaynağı elektrotları
- Komütatör segmanları
- Güç transistör altlıkları
- Motor ateşleme orifisler
- Direnç kaynağı elektrotları [1, 3, 62].

Son zamanlarda bazı kalıpcıların berilyumlu bakırdan çekindiği bilinmektedir. Oysa aşağıdaki çeşitli kaynaklardan alınan bilgiler bu çekincenin gereksiz olduğunu ortaya koymaktadır.

Sert bakır alaşımlarının kullanım alanları

Bakır, insanoğlu tarafından ilk kullanılan metaldir. Alaşımlarıyla eski çağlara adını veren bakır, elektrik iletkenliği, ısıl iletkenliği ve mekanik özelliklerin önemli olduğu yerlerde geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu özellikleri optimum şekilde içinde barındıran sert bakır alaşımlarına, teknolojinin gereği olarak gün geçtikçe artan oranlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı çeşitli endüstri dallarında kullanılmaktadırlar.

- **Otomotiv Sanayiinde:** Yıllık üretim rakamlarının 1 milyon adede doğru gittiği ülkemizde, sektörde faaliyet gösteren fabrikaların özellikle punta kaynak elektrotlarında, kollarında ve disklerinde tüketim miktarları yüksektir. Bu sektördeki diğer kullanım alanları arasında elektrot tutucuları, TIG kaynağı uçları vs. sayılabilir.
- **Beyaz Eşya Sanayiinde:** Yine otomotiv sektörü gibi gelişen bir sektör olan beyaz eşya imalatında da yoğun sert bakır alaşımları tüketimi vardır. Örneğin çamaşır makinesi ve buzdolabındaki sacların punta kaynağı ile birleştirilmesi, set üstü ocakların imalatı, fırın imalatı vs. tümünde sert bakır alaşımlarından yapılan elektrotlara ihtiyaç vardır.
- **İnşaat Sektörü:** Bu sektöre hitap eden mallar üreten fabrikalarda sert bakır alaşımlarına olan talep giderek artmaktadır. Örneğin, panel radyatör imalatı, su saatleri imalatı, batarya ve musluk imalatı, çelik hasır imalatı vs.
- **Kalıpcılık Sektöründe:** Artık ihracata açılan bu sektörde, artan kalıp şirketlerinin sayısı ihracatı zorlamaktadır. Hali hazırlarda yüz milyon dolarlarla ifade edilen ihracat rakamlarının yakın gelecekte milyar doları bulması beklenmektedir. Dalma erozyon elektrotları (EDM yöntemiyle) yapımında, plastik enjeksiyon kalıplarında hızlı soğuması gereken kalıplarda tamamen veya geçme olarak, şişirme kalıplarında, derin sıvama, paslanmaz çelik sac ve kalaylı sacların sıvanmasında, kullanılır. Bu malzemelerin

kalıplarda kullanılması üretim miktarlarını muazzam ölçüde arttırmaktadır.

— **Demir Çelik Sektöründe:** Ülkemiz ekonomisinin lokomotif sektörlerinden biri olarak nitelendirilen demir çelik sektörü ham çelik üretimi 25- 26 milyon tona yükselmiştir. Bu üretim artışı demir- çelik sektöründe kullanılan bakır ve alaşımlarına olan ihtiyacı da artırmıştır [1].

3.1.9. İletken ortamlarda kullanılacak bakırın mukavemetinin arttırılması

Bakır, tüm metaller arasında gümüşten ($6,21 \times 10^7 / \Omega.m$) sonra elektrik iletkenliği en yüksek metal ($5,88 \times 10^7 / \Omega.m$) olup elektrik iletkenliğinin ana talep olduğu uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gümüş, yüksek fiyatı ve tedarikindeki güçlükler nedeni ile bu tür uygulama alanlarında az kullanılmaktadır. Bakıra bir rakip yine elektrik iletkenliği yüksek olan alüminyumdur, ancak onun hem iletkenliği ($3,65 \times 10^7 / \Omega.m$) hem de mukavemeti bakırınki kadar yüksek değildir.

Bakırın diğer bütün metaller içerisinde gümüşten sonra elektriği en iyi ileten metal olması, elektrik iletkenliğinin ana talep olduğu uygulama alanlarında yaygın olarak kullanımını sağlamaktadır [2, 3].

Bakırın yüksek elektriksel iletkenliği ($5,88 \times 10^7 / \Omega.m$), yüksek ısı iletkenliği (400 W/m.K), korozyon direnci, dekoratif rengi, orta derecedeki mukavemet ve kolay şekillendirilebilirliği onu tarih boyunca önemli kılmıştır ve [2, 4] çeşitli mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan yapısal ve işlevsel metallerden biri yapmıştır [35, 65, 66].

İletkenler, elektrotlar, açma kapama kontakları gibi elektrik iletkenliğinin birinci derecede önemli olduğu uygulama alanlarında kullanılacak olan bakırlarda şu temel özellikler aranır:

- Yüksek elektrik iletkenliği
- Yüksek oda sıcaklığı mukavemeti

— Mukavemetini yüksek sıcaklıklarda koruyabilme özelliği (yüksek sıcaklık mukavemeti)

Saf bakır, ilk özellik açısından neredeyse rakipsiz bir malzemedir. Bu noktada oksijensiz yüksek iletken bakır çok uygundur. Ancak, saf bakırın sınırlı bir mukavemeti vardır [4, 7, 66, 67]. Bakırın düşük mukavemeti ve özellikle yüksek sıcaklıklarda yumuşaması yaygın kullanım alanını kısıtlamaktadır [65, 68]. Bakır elektrik iletkenliğinde önemli bir kayıp olmaksızın, sadece soğuk deformasyon ile sertleştirilebilir. Bu şekilde mukavemetlendirilse bile, saf bakır 100°C'ye yaklaşan sıcaklıklarda, hızlı bir şekilde yeniden kristalleşir, sertlik ve mukavemetini kaybeder.

Bakırın mukavemetini artırmanın bir diğer yolu alaşımlamadır. Alaşımlama sonucunda, bakır alaşımının mukavemeti ya katı eriyik sertleştirilmesi veya çökelti sertleştirilmesi ile artırılabilir. Ancak, elektrik iletkenliğindeki kaybın yüksek olmaması için alaşım elementi ilavesinin sınırlı tutulması gerekir. Çünkü alaşım elementi ilavesi ile, mukavemetin artmasına karşılık elektrik iletkenliği azalır. Bu bakımdan, iletken olarak kullanılacak bakır alaşımlarında az miktarda alaşım elementi bulunur (genellikle ağırlık %2 mertebesinde). Bu tür bakır alaşımları az alaşımlı bakır, yüksek bakır alaşımları veya ısıl işlem ile sertleşebildiği için yüksek iletken sert bakır alaşımları gibi isimlerle anılır. Bakır, bu amaçla alaşımlandırmak için kullanılan başlıca alaşım elementleri Be, Cr, Ni, Co, Ag, Si ve Zr'dur [4, 7, 66, 67].

Gerek bakır ve gerekse bu alaşım elementlerinin çoğu oksidasyona eğilimlidir. Buna bağlı olarak, alaşımın ergitilmesi ve dökümü sırasında özellikle itina göstermek gerekir. Ergitme ve döküm vakumda, koruyucu atmosfer altında veya buna benzer tedbirler alınarak yapılmalıdır. Çünkü oksidasyon alaşımın elektrik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

Az alaşımlı yüksek mukavemetli bakır alaşımlarında, elektrik iletkenliği %70 IACS seviyesine kadar düşebilmektedir. Ancak, buna karşılık saf bakırın 390 MPa mertebesinde olan akma mukavemeti bazı alaşımlarda 1000 MPa'nın üzerine çıkmaktadır. Elbette, alaşımlama ile % uzama değerlerinde bir miktar azalma olmakta, fakat alaşım yine de plastik olarak rahatlıkla şekillendirilebilmektedir.

Mukavemeti artırmak için bakıra katılan alaşım elementlerinden biri berilyumdur. Berilyumlu bakır gerçekten üstün özelliklere sahiptir. Ancak berilyum bir seri problemi de beraberinde taşır: Pahalıdır, bulunması zordur, üretimi zordur ve en önemlisi, sağlık problemlerine neden olmaktadır. Berilyumun oksidi (BeO) çok zehirlidir. Berilyumlu alaşımların ergitme ve dökümü bu açıdan da çok önemlidir [4, 7, 66].

Tüm bu nedenlerle, berilyumlu bakır yüksek performansına karşılık oldukça pahalıdır. Bakırın gümüş ile yaptığı alaşım çok iyi mukavemet özelliği ile yeterli elektriksel iletkenliğe de sahiptir. Tablo 3.4’de bazı alaşımların mukavemet ve iletkenlikleri verilmiştir.

Tablo 3.4. İletkenlik uygulamalarında kullanılan bazı bakır alaşımlarının özellikleri [10]

Malzeme	Akma Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti [MPa]	İletkenlik [% IACS]
Cu	393	493	100
Cu-Al ₂ O ₃	545 -625	639 – 665	88 – 90
Cu-Ag	1000 - 1076	1109 – 1276	70
Cu-Nb	1068	1268	75 – 81
Cu-Be	716 ± 17	777 ± 17	67 ± 2

Az alaşımlı bakırlarda mukavemet artışından farklı mekanizmalar sorumludur: Katı eriyik sertleştirilmesi, çökelti sertleştirilmesi (yaşlandırma) ve soğuk deformasyon. Gerçekte, az alaşımlı bakırın sertliğine katı eriyik sertleştirilmesinin etkisi çok önemli değildir. Bu alaşımlarda esas mukavemet artışı çökelti sertleştirilmesi ile elde edilir. Önce alaşım, uygun bir sıcaklıkta tutularak ikinci fazların çözeltiye alınması sağlanır, takiben su verilir ve solvüs sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yaşlandırılır. Bazı alaşımlarda, su vermeyi takiben soğuk deformasyon uygulanır, yaşlandırma son olarak uygulanır. Bu şekilde işlem görmüş alaşımlarda sertlik değerleri 300 kg/mm²’nin üzerine çıkmaktadır. Az alaşımlı bakırlar, alaşımın türüne göre 750- 950°C aralığında çözeltiye alınırken 350-500°C aralığındaki sıcaklıklarda yaşlandırılır [69]. Bilindiği gibi, yaşlandırılmış alaşımlar yaşlandırma sıcaklığının üzerinde kullanılmamalıdır, aksi halde hızla yumuşarlar. Yaşlandırma sıcaklığında veya buna yakın düşük sıcaklıklarda kullanılmaları halinde de kısa bir süre içerisinde aşırı yaşlanmak suretiyle yumuşamaları kaçınılmazdır. Dolayısıyla, az alaşımlı bakırların mukavemet performansları yükselen sıcaklıklarda değişmektedir [70].

Bakırın yüksek sıcaklıklarda azalan özelliklerini kazanmanın bir yoluda, bakır matris içerisinde seramik partiküllerinin dispersiyonu ile kompozit oluşturmaktır. Bu amaçla bakır matrise ilave edilen seramiklere örnek olarak Al_2O_3 , SiC, TiC, WC, B_4C ve TiB_2 sayılabilir [65]. Alumina en çok kullanılan mühendislik seramik malzemesidir. Yüksek elastik modüle (390 GPa), yüksek sertliğe (16 GPa) ve 25 W/m.K mertebesinde bir ısı iletkenliğe sahip olup özelliklerini yüksek sıcaklıklarda dahi koruyabilmektedir (alumina malzemeler 1700- 1800°C'ye kadar dayanabilirler). Eğer bakır içerisinde çok ince alumina partiküllerinin dağılımı sağlanabilirse, dispersiyon sertleşmesi etkisi ile sertlikte artış olur [71, 72, 73]. Bilindiği gibi dispersiyon sertleştirme etkisi, dispersoidlerin sıklığı (inceliği) ile ters orantılıdır. Yani alumina partikülleri ne kadar ince ve ne kadar çok olursa bakır matrisin mukavemeti o derece artar [71]. Ancak, partiküllerin miktarı arttıkça elektrik iletkenliği o derece azalır. Bu nedenle, kompozitin mukavemeti ve iletkenliği arasında bir denge gözetilmelidir. Bu noktadan hareketle, bakır matris içerisinde disperse edilecek alumina miktarı yaklaşık % 1 mertebesinde tutulmalıdır. Bu gün ağırlık % 1,1'e kadar alumina partikülleri içeren bakır iletkenler ticari olarak bulunmaktadır [74, 75]. Bu malzemelerin iletkenlikleri, az alaşımlı bakırların elektrik iletkenliklerinden bile yüksektir (yaklaşık %85-90 IACS), buna karşılık orta derecede bir mukavemetleri vardır (yaklaşık 600 MPa). Alumina partiküllerinin sıcaklık artışı ile büyümesi söz konusu olmayacağı için, mukavemet yükselen sıcaklıklarda sadece matrisin yumuşamasından dolayı biraz düşmektedir [48]. Fakat Andic ve arkadaşları [76] alumina miktarının Cu- Al_2O_3 kompozitlerinin sinterlenebilirliğine etkisini araştırmışlar ve porozite hacminin, artan sinterleme sıcaklığı ile azaldığını ve artan alumina ile arttığını tespit etmişlerdir. Al_2O_3 'da tane büyümesi, kompozitin elektriksel ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir.

Cu- Al_2O_3 kompozitleri farklı tekniklerle hazırlanabilmektedir. Bunlar arasında; döküm, geleneksel toz metalurjisi, Cu- Al alaşımının iç oksidasyonla Cu- Al_2O_3 'e dönüştürülmesi ve kimyasal çöktürme ile CuO- Al_2O_3 karışımının hazırlanması ve müteakiben hidrojen atmosferinde redüksiyon ile Cu- Al_2O_3 eldesi sayılabilir [48].

Bakırı takviye etmek için, alumina dışında TiC, TiB_2 [77] gibi seramik partiküllerin etkileri de araştırılmıştır. Ne yazık ki, bu çalışmaların sonuçları umut verici olmamıştır. Tablo 3.5'de bakırı takviye etmek için kullanılacak bazı seramik tozların nitelikleri

verilmiştir. Bunlardan, SiC yüksek elastik modülü ve aluminadan çok daha yüksek ısı iletkenliği ile dikkat çekmektedir. Gerçekte, SiC de bakırı takviye etmek için kullanılmış ve iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür (1300 MPa'lık mukavemet ve %70 IACS iletkenlik). Ancak, Florida State University National High Magnetic Field Laboratory'de gerçekleştirilen bu araştırma ile ilgili olarak, çok kısa bir iki satır haricinde, takviye SiC oranı, partikül boyutu, karıştırma şekli gibi konularda hiçbir bilgi verilmemiştir [10].

Tablo 3.5. Bakırı takviye etmek için kullanılabilen seramik tozların bazı özellikleri [10]

Malzeme	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	MgO	TiC	TiB ₂	SiC	Cu
Molekül ağırlığı, g/mol	102	123,2	40,3	59,9	69,5	40,08	
Elastik modül, GPa	390	200	300	491	550	410	
Sertlik, GPa	16	12	9	26	20-27	28	
Yoğunluk, g/cm ³	3,98	5,7-6,0	3,58	4,9	4,25	3,2	
Ergime sıcaklığı, °C	2050	2710	2800	3170	2980	~2700*	
Isıl iletkenlik (W/m.K)	28	2,2-2,7	48	9	25	120	400
Elektrik iletkenliği, %IACS							100

*2300'de dekompoze olur

3.2. Silisyum Karbür

Silisyum karbür Si ve C'nun tek kimyasal bileşimidir. Orijinal olarak kumun ve karbonun yüksek sıcaklıkta elektro- kimyasal reaksiyonu ile üretilmektedir. Silisyum karbür çok iyi bir abrasiv malzeme olup yüzyılı aşkın sürelendir zımpara diskleri ve diğer aşındırıcı ürünler olarak üretilmiştir. Günümüzde bu malzeme, çok iyi mekanik özelliklerde teknik olarak yüksek kalitede seramik bir malzeme olarak geliştirilmiştir [78].

Doğada direkt rastlanılmayan silisyum karbür (SiC) kuvvetli kovalent bağ yapısında yapay bir malzeme olup, E.G. Acheson tarafından 1891'de tesadüfen Acheson adı verilen proses ile eşitlik 3.1'de verilen reaksiyon sonunda sentezlenmiştir .



Silisyum karbür kristal latiste kuvvetli bağa sahip karbon tetrahedraları ve silisyum atomlarından oluşmaktadır [78, 79]. SiC'ün en belirgin özelliği çok kristalli oluşudur.

Bileşimin 200'den çok çeşidi bulunmaktadır. 3C, 4H, 6H ve 15R yapıları en yaygın çeşitleridir [80]. SiC'e 6H yeşil, 15R sarı, 4H yeşil- sarı rengini verir [81].

Sentetik bir malzeme olan silisyum karbür, 1400- 1800°C'larda "β" formunda kübik, 2000°C'ların üzerinde ise, "α" formunda Hegzagonal ve rombohedral olmak üzere iki değişik şekilde bulunur (Tablo 3.6) [78, 79].

Tablo 3.6. Farklı SiC çeşitleri ve kristal yapıları [82]

Farklı SiC Çeşitleri	Kristal Yapıları
α - SiC (Yüksek Sıcaklık Formu)	6H, 15R, 4H
β - SiC (Düşük Sıcaklık Formu)	3C

SiC'ün özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- SiC temel yapısı tetrahedraldır.
- SiC'ün farklı formları, SiC tetrahedralarının birbirlerinin üzerine yığılmaları ile oluşan tabakalar ve tekrarlayan SiC birimlerinin oluşturduğu bu tabakaların sayısı ile temsil edilir.
- Acheson fırınında sentezlenen SiC kristallerinde, 4H, 6H, 15R veya 3C formları yaygın olarak görülür.
- Bunların dağılımı hammaddenin kalitesine ve üretim koşullarına göre değişir; H, R, C sırasıyla hegzagonal, rombohedral ve kübik yapıları rakamlar ise tabaka sayılarını göstermektedir.
- β- SiC'e ait olan 3C dışında diğer formların tamamı α- SiC'e aittir.
- En sık karşılaşılan 3C, 4H, 15R ve 6H tipleri X-ışınları difraksiyon teknikleri ile tespit edilebilir [82].

Seramik malzeme grupları içinde SiC'ün;

- Mükemmel sertlik ve yüksek aşınma direnci,
- Düşük sürtünme katsayısı,

- Mükemmel korozyon direnci,
- Yüksek ısı şok mukavemeti,
- Düşük ısı genleşme
- Çeliğe göre daha yüksek ısı iletim ve iletkenlik katsayısı

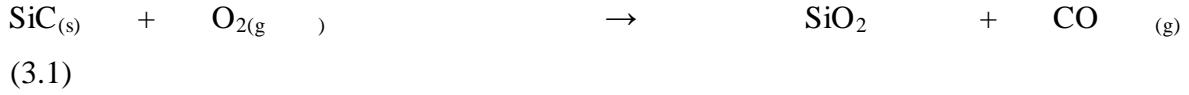
gibi üstün özellikleri nedeniyle aşındırıcı, refrakter, seramikler ve daha bir çok yüksek performans uygulamalarında, gaz tribünlerinde ve aşınmaya maruz otomobil parçalarında kullanımı büyük önem kazanmıştır [79, 83- 86]. Bu malzeme ayrıca elektrik iletken yapılabilmekte ve direnç ısıtıcılarda, alev tutuşturucularda ve elektronik bileşenlerde uygulamalara sahiptir [79, 86].

SiC, dolu valans bandı ile boş iletim bandı arasında olduğundan, yüksek alan şiddetine dayanım, yüksek termal iletkenlik ve iyi mikrodalga absorblama gibi göze çarpan özelliklere sahiptir [88]. Kimyasal safiyeti, yüksek sıcaklıklarda kimyasal ataklara karşı direnç [89] ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini muhafaza etmesi bu malzemeyi yarıiletken fırınlarda tepsi destekleri (wafer tray supports) ve kısa kürek (paddles) olarak çok popüler yapmıştır. Sahip olduğu elektrik iletkenliği bu malzemenin elektrik fırınlarında ısıtıcı elemanlar, termistorlerde (temperature variable resistor) ve varistörlerde (voltage variable resistor) bileşenlerde kullanımına yol açmıştır [78, 87].

Oldukça sert ve kuvvetli bir malzeme olan silisyum karbür 800°C'ye kadar herhangi bir asit veya alkali veya erimiş tuz tarafından etkilenmemekte ve 1200°C'de koruyucu bir silisyum dioksit (SiO₂) filmi oluşturmakta ve bu malzemenin 1600°C'ye kadar kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Isıl genleşme ve yüksek mukavemet ile yüksek ısı iletkenlik bu malzemeye olağandışı kalitede ısı şok direnci kazandırmaktadır. Az miktarda empürite veya tane sınırlarında empürite olmayan SiC mukavemetini, 1600°C'ye yaklaşan sıcaklıklara kadar muhafaza etmektedir [78]. Silisyum karbür yaklaşık 2300°C civarında dekompoze olmaya başlar, orijinal niteliklerini kaybeder [79].

Kang ve arkadaşları SiC'ün 1100°C'de Si ve C'a ayrışıp oksitlenmeye başladığını belirtmişlerdir [90]. SiC'ün oksitlenmesi iki kademe gerçekleşmektedir. Bunlar; SiC'ün yüzeyinde SiO₂ tabakasının oluşumu ile gerçekleşen pasif oksidasyon (Denklemler 3.1) ve

daha yüksek sıcaklıklarda SiO ve CO'nun buharlaşmasıyla gerçekleşen aktif oksidasyondur (Denklem 3.2).



İki rejim arasındaki geçiş SiC'ün yapısına, kompozisyona, gaz akışına, basınç ve sıcaklığa bağlıdır [91, 92].

Son yıllarda yüksek seramik ihtiva eden metal-seramik kompozitler elektronik kutularında ısı bariyer olarak kullanılmaktadır. Ancak burada kompozitin ısı genleşme katsayısı ve bazı özellikleri çok iyi kritik edilmelidir. Örneğin, mikroelektroniklerde kullanılan ambalaj malzemesinin ısıyı dağıtmak ve cihazlar arasındaki ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğunu azaltmak için yüksek ısı iletkenliğe ve düşük ısı genleşme katsayısına sahip olması gerekir. Yukarıdaki bilgiler ışığında SiC'ün bu nitelikte bir özellik sergilediği söylenebilir.

SiC, bakır matrisi geliştirmek için takviye olarak kullanılabilir [83]. Cu- SiC kompozitleri yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ile birlikte mekanik mukavemet, kalıplanabilirlik ve düşük üretim maliyetlerini bir arada sağladığı için hem yapı malzemesi hem de fonksiyonel malzeme olarak kullanılmaktadır [84, 93].

SiC- Cu kompozitleri, bakırın iyi sünekliği ve tokluğu ile SiC partikülleri takviyelerinin yüksek mukavemeti ve elastik modüllerinin her ikisini birleştirir [83]. Bu kompozitler direnç kaynak elektrotları, klavuz çerçeveleri, elektrik klemensleri, röleler, iletkenler, kondaktörler, elektrik anahtarları, akım devresi kesicileri, elektronik paketleme uygulamalarında elektrik temas malzemeleri olarak kullanılabilirler [73, 83, 94].

Cu- SiC kompozitleri bakırın üstün süneklik ve tokluk özellikleri yanı sıra SiC'ün yüksek mukavemet ve yüksek modülünü kombine etmektedir (Tablo 3.7).

Tablo 3.7. SiC ve Cu'nun tipik fiziksel özellikleri [84, 93]

Özellik	Birim	Malzeme	
		SiC	Cu
Yoğunluk	g/cm ³	3.20-3.26	8.96
Young Modülü	GPa	400-500	110
Ergime Sıcaklığı	°C	2600	1083
Çekme Mukavemeti	GPa	>3.2	0.20-0.24
Isıl Genleşme Katsayısı	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5.40	16.5
Poisson Oranı		0.17	0.33
Kayma Modülü	GPa	175	48.3
Isıl İletkenlik	W m ⁻¹ K ⁻¹	120	392

Cu ile SiC arasındaki ısıl genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik uyumsuzluğu ve ıslatabilirlik Cu- SiC kompozitlerinin hazırlanmasında büyük problem oluşturmaktadır. SiC'ün ısıl genleşme katsayısı ve ısıl iletkenliği sırasıyla $3.7 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ve 150- 230 W/m.K, oysa Cu'nun ısıl genleşme katsayısı ve ısıl iletkenliği sırasıyla $17 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ve 400 W/m.K'dir. Yukarıda görüldüğü gibi SiC, Cu- SiC kompozitinin hem ısıl genleşme katsayısını hemde ısıl iletkenliğini düşürecektir [85]. Kang ve arkadaşları [90] Cu-SiC kompozitinin SiC'den daha yüksek termal şok direncine sahip olduğundan elektronik paketleme malzemelerinin ısı uzaklaştırma uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir.

SiC ve bakır arasındaki birlikte dağılma, ıslatma ve bağlanma SiC- Cu kompozitlerinin hazırlanmasında pratik öneme sahiptir. Yine de bakır ve SiC arasındaki kötü ıslanabilirlik SiC'ün flokülasyonuna ve bakır matristen segregasyonuna ve kompozitlerin yoğunlaşma ve fiziksel özelliklerinde azalmaya yol açabilir. Seramik takviyesini bakırla ön kaplama ıslatabilirliği arttırabilir [78, 95, 96]. Zhang ve arkadaşları [97] SiC'ü bakır ile ön kaplama ile hazırlanan kaplanmış Cu-SiC kompozitlerinin kaplanmamışlara göre daha düşük poroziteli olup; daha yüksek termal ve elektriksel özellikler sergilediğini rapor etmişlerdir.

Metal-seramik kompozitleri üretimi için;

- ergitme ve döküm,

- birlikte çöktürme (kimyasal metod),
- İç oksidasyon ve
- toz metalurjisi yöntemleri uygulanabilir [34, 98].

Ergitme ve döküm yöntemi, bakır ve takviye fazları arasındaki zayıf dispersiyondan ve dispersoidlerin aglomerasyonundan dolayı uygun değildir. Ayrıca yoğunluk farkından dolayı takviye fazları eriyikte segregasyon olabilir. Birlikte çöktürme ve iç oksidasyon, büyük kütlelerin üretimi için uygulanamaz. İnce partiküllerin homojen bir şekilde dispersiyonu ile matris ve takviye fazı arasındaki bağlanmayı geliştirdiği ve büyük kütleli parçaların üretimini sağladığı için toz metalurjisi yöntemi en uygun olanıdır [98, 99]. Cu-SiC kompozitlerini üretmek için en yaygın yöntem sinterleme ve sıcak presleme kullanılarak yapılan toz metalurjisi metodudur [90].

BÖLÜM 4. BAKIRIN ÜRETİMİ

4.1. Giriş

Bakır çeşitli pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrometalurjik metodların kullanılmasıyla cevherlerinden saf olarak üretilmektedir [44].

Bakır cevherlerinden veya konsantrelerinden bakır üretimi, tüm demir dışı metaller metalurjisinde olduğu gibi, ekonomik olarak bir tek kademede değil, birbirini takip eden birkaç kademede gerçekleştirilir. Bu kademeleri

1. Bakırın, içerisinde toplandığı sıvı bir faz üretimi (pirometalurjide mat, hidrometalurjide çözelti); konsantrasyon işlemi,
2. Bakırın metalik hale dönüştürülmesi (pirometalurjide redüksiyon veya reaksiyon ergitmesi, hidrometalurjide çökeltme veya sementasyon, elektrometalurjide elektolitik redüksiyon); redüksiyon işlemi,
3. Ham bakırın (blister, kara bakır, sement bakır v.b.) saflaştırılması (pirometalurjide ateşte rafinasyon, elektrometalurjide elektolitik) rafinasyon işlemi olarak belirlemek mümkündür [100].

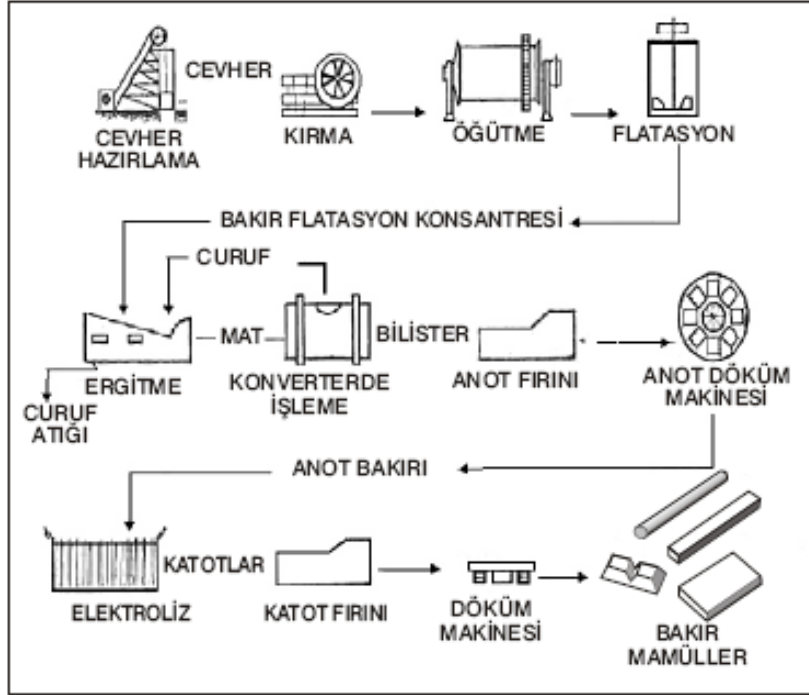
Pirometalurji metodları; sülfür, oksit ve natif bakır cevherlerine, hidrometalurji metodları; düşük tenörlü oksit bakır cevherlerine uygulanır. Elektrometalurji metodları (elektroliz) da; yukarıdaki metodların son kademesi olarak her ikisine de uygulanır. Böylece pirometalurji metodlarıyla elde edilen saf olamayan bakır, elektrolitik tasfiyeye tabi tutularak saf katot bakıra çevrilir. Benzer şekilde hidrometalurji metodlarıyla sulu solüsyonlara alınan bakır, elektrokazanım metodu ile katotta saf olarak toplanabilmektedir. Bu arada bakır ve hurda bakır da elektroliz edilmeden önce,

içindeki yabancı maddelerden önemli kısmını ayırmak için ateşte rafineye tabi tutulur. Elektroliz sonucu elde edilen katot bakır, daha sonraki şekil almalarda istenen fiziksel özellikleri (süneklik, mukavemet, sertlik vs.) elde edebilmesi için tekrar ateşle rafineye tabi tutulur. Ancak bünyesine oksijen almaksızın oksijensiz yüksek iletkenlik özelliğine sahip bakır yapılacak ise, o taktirde katotlar ateşle rafineyeye tabi tutulmaksızın, koruyucu gaz ortamında eritmek suretiyle istenen ingot veya profillerde dökülebilir

Bakır üretimindeki tüm bu kademeler şu şekilde özetlenebilir:

- Bakır cevherinin ocaktan çıkarılması ve hazırlanması
- Öğütme
- Flotasyon (zenginleştirme)
- Ergitme ile mat ve curufa ayrıştırılması
- Konvertör de hava üfleme ile mattan bilister bakır üretimi
- Anot fırınında anot bakıra dönüştürme
- Elektrolizle katot bakır yapımı
- Katot bakırın ergitilerek külçe haline getirilmesi ve satışa sunulması (Şekil 4.1)

[44, 101-103].



Şekil 4.1. Şematik bakır üretim kademeleri [1]

4.2. Sementasyon Yöntemi ile Bakır Tozu Üretimi

Bakır yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip, sünek ve kolay şekil verilebilen bir metaldir. Tel şeklindeki saf bakır elektrik iletkenlerinde, ince saf bakır tozu özellikle toz metalurjisi olmak üzere birçok metalurji endüstrisinde büyük bir uygulama alanı bulmaktadır. Eğer boyut nano seviyesine indirilebilirse, bakırın katalizör olarak ve diğer alanlarda şaşırtıcı özelliklere sahip olması beklenilmektedir [104].

Bakır mineralleri doğada genellikle oksit ya da sülfat formunda bulunmaktadır. Bakır, oksitli cevherlerin liç edilmesi ile sulu çözeltiye direk olarak transfer edilebilir, fakat sülfatlı bakır cevherlerinin liçi daha zor olmaktadır. Nihai liç çözeltisinin kompozisyonu ve saflığı liç için kullanılan reaktanların çeşidine ve mineral yapısına bağlıdır. Kuvvetli asitlerle elde edilen liç çözeltileri daha fazla empürite ihtiva etmektedir. Düşük empürite ihtiva eden liç çözeltileri ise zayıf asit, baz ve tuzlarla elde edilebilmektedir. Bu reaktanlar bakır çözünmesinde yüksek oranda seçicidir [105].

Günümüzde yüksek tenörlü bakır cevherleri azalmakta ve kalan cevherlerde düşük miktarda bakır içermektedir. Bunun sonucu olarak, pirometalurjik bakır üretim metodları hidrometalurjik üretim prosesleriyle yer değiştirmektedir [106].

Bakır birçok endüstrilerin atık sularında yüksek konsantrasyonda bulunur ve atık suların eldesi düşük maliyetinden dolayı teşvik edicidir. En çok kullanılan geri dönüşüm metodları; kimyasal çöktürme, iyon değişimi, karbon adsorbsiyonu, ters osmoz, elektroliz olup, hepsinin dezavantajları vardır. Kimyasal çöktürmenin hazırlanış ve uygulama süreci çok uzundur ve çamurumsu kolay müdahale edilemeyen bir çözeltisi vardır. İyon değişimi ve karbon adsorbsiyonu çok pahalıdır ve uygun performans için yenilenmeyi gerektirmektedir. Ters osmoz ve elektrolizde pahalı malzemelere ihtiyaç vardır ve işlem maliyeti de yüksektir [107, 108]. Dolayısıyla metalurjik proseslerde metalik bakır üretmek için en uygun ve basit yol hidrometalurjik yöntemlerden biri olan, ufak demir parçaları kullanılarak bakırın sementasyonudur [109].

Sementasyon veya metal yer değiştirme reaksiyonu, çözeltideki soy olan metal iyonun elektromotif serisinde daha yüksekte olan bir metal tarafından çözeltiden çöktürülmesi esasına dayanan elektrokimyasal bir prosestir [106]. Kısaca sementasyon, çözeltideki metal iyonunun kendisinden daha aktif olan bir metal ile çöktürülmesidir [105, 110]. Sementasyon prosesi genel olarak aşağıdaki reaksiyon ile ifade edilebilir:



Burada N soy metali, M redükleyici metali göstermektedir [106]. Sementasyon işlemi aslında daha zayıf olan metalin çözüldüğü anodik reaksiyon ve daha soy olan metalin biriktiği katodik reaksiyondan oluşan bir korozyon reaksiyonudur [110].

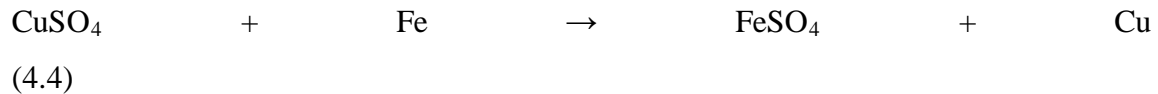
Sementasyon hidrometalurjik proseste önemli bir reaksiyondur. Sementasyon ayrıca ticari olarak siyanit liç çözeltisinden altını geri kazanmak, elektrokaplama ve “electrowinning” çözeltilerinden empüriteleri uzaklaştırmak ve yaygın çeşitlilikteki liç çözeltilerinden bakır geri kazanımı için kullanılmaktadır [106].

Bakırın sementasyonu, Cu^{2+} 'nin çözümlenmiş halden sementasyon elemanı (demir, alüminyum veya çinko) üzerine çöktürülmesi ile gerçekleşen heterojen bir elektrokimyasal süreçtir. Sementasyon Cu^{2+} 'nin indirgenmesi için elektronların sementasyon ajanından büyüyen bakır birikintisi üzerine transfer edildiği kısa devre olmuş elektrokimyasal hücreler içerisinde meydana gelmektedir. Bakır iyonları bakır birikintisi yüzeyinde indirgenmektedir. Demir, alüminyum ve çinko gibi elektron sağlayıcılar ise yüzeyleri üzerindeki anodik bölgelerde okside olmaktadır. Kompakt bakır birikintileri oluşumu sementasyon etkenlerinin ayrışmasını engellemekte, böylelikle bakır sementasyon hızı azalmaktadır [111].

Bakırın demir ile sementasyonunda iki element arasındaki farklı standart indirgenme potansiyellerine göre (Denklem 4.2, 4.3);



mevcut miktarda demir çözünürken, bakır iyonu metalik demir yüzeyinde kolayca indirgenmektedir. Standart şartlarda reaksiyon, yaklaşık 0.78 V standart emf. değeriyle gerçekleşmektedir (Denklem 4.4) [109].



Bakırın demir ile genel sementasyon reaksiyonu Denklem 4.5'e göre gerçekleşmektedir [110].



Dönmez ve arkadaşları [106] bakırın sementasyon kinetiğini incelemişler ve bakırın sementasyonunun, sıcaklık, Cu^{++} konsantrasyonu, karıştırma hızı ve çözelti PH'ı gibi birçok faktörlere bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Buna göre;

- sementasyon hızı artan sıcaklık ve karıştırma hızı ile artmaktadır,
- yüksek PH değerleri sementasyon hızı üzerinde negatif etkiye sahiptir,
- semente bakır oranı başlangıçta hızlı olup zamanla yavaşlamaktadır [106].

Sementasyon prosesinin; metallerin saf olarak elde edilmesi, proses şartlarının kontrolünün kolay olması, düşük enerji tüketimi ve genellikle düşük proses maliyeti gibi avantajları kullanımını yaygınlaştırmaktadır [104].

BÖLÜM 5. ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER

5.1. Giriş

Birçok uygulamada malzemelerin elektriksel davranışları, mekanik davranışlarından daha önemlidir. Elektrik ve elektronik uygulamaları için malzeme seçimi ve kullanımında, elektrik iletkenliği gibi özelliklerin nasıl üretilip kontrol edildiğini anlamamız gerekir. Aynı zamanda elektriksel davranışın malzemenin yapısı, üretimi ve bulunduğu çevreden etkilendiğini göz önünde bulundurmalıyız [112, 113].

Malzemelerin elektriksel özellikleri, elektron yapıları ve elektron hareketleri ile ilgilidir. Elektronların elektriksel alan, manyetik alan, elektromanyetik radyasyon ve sıcaklık etkisinde davranışları elektriksel özellikleri oluşturur [57].

Elektrik sözcüğünün kaynağı kehribar anlamına gelen Yunanca elektron sözcüğüdür. Antik Yunan'da kehribarın sürtünmesi ile diğer nesnelere çaktığı gözlemlenmiş ve bu güce elektrik adını vermişlerdir.

Elektriğin gerçeğe en yakın tanımlamasını yapan Benjamin Franklin'dir. Franklin'e göre tabiattaki bütün maddelerin bünyesinde elektriksel bir akış vardır. Belirli iki madde arasındaki sürtünme, bu akıştan bir kısmının, miktar bakımından fazlalık meydana getirecek şekilde öteki maddeye geçmesine sebep olur. Akış negatif yüklü elektronlardan oluşmaktadır [114].

Elektrik konusunda en önemli gelişmeler, 1800 yılında Alessandro Volta tarafından ilk pilin (bataryanın) keşfiyle başlamıştır [115].

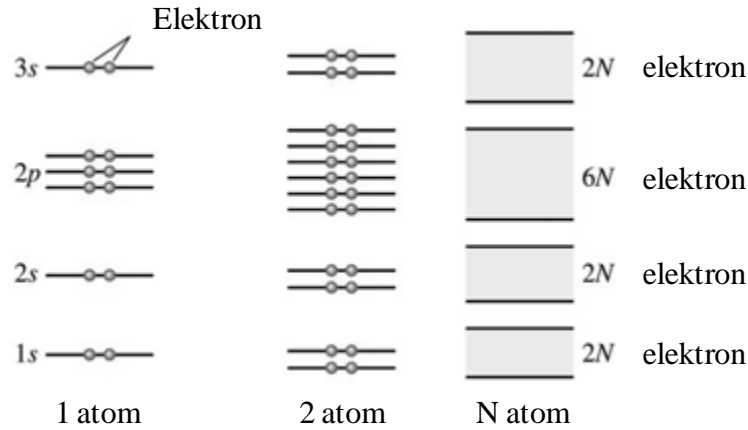
5.2. Elektriksel İletkenlik

Elektriksel alanın oluşturduğu Coulomb kuvvetleri etkisinde elektronların veya yayınan iyonların malzeme içerisinde uzak mesafeli hareketleri elektriksel iletkenliği sağlar. Bu özelliği sağlayan malzemelere “iletken malzemeler” denir [57]. Bir malzemenin iletkenliğini belirleyen en önemli faktör, atomlarının son yörüngesindeki elektron sayısıdır. Bu son yörüngeye “Valans Yörünge”, üzerinde bulunan elektronlara da “Valans Elektron” denir [116].

Her bir atomda elektronlar tarafından oluşturulmuş yörünge ve alt yörüngeler şeklinde düzenlenmiş farklı enerji seviyeleri mevcuttur. Yörüngeler 1, 2, 3 gibi tam sayılar, alt yörüngeler ise s, p, d, f harfleri ile gösterilirler. $s \rightarrow 1$, $p \rightarrow 3$, $d \rightarrow 5$ ve $f \rightarrow 7$ enerji seviyesi içermektedir.

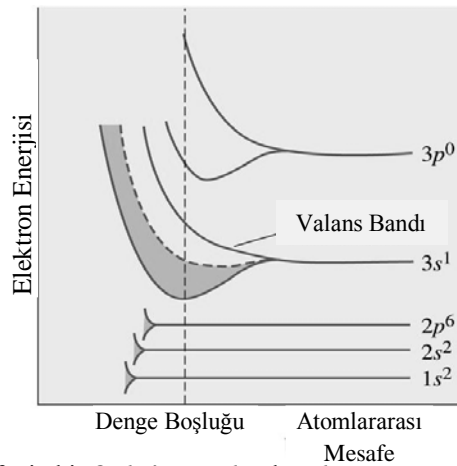
Pauli dışlama prensibine göre her bir enerji seviyesinde zıt yönde hareket eden 2 elektrondan fazla elektron bulunamaz. Çok sayıda atom içeren metallerde atomlar birbirine temas edecek kadar yakındır. Değerlik elektronları sadece kendi atomlarına ait olmakla kalmaz birbirlerini etkiler ve sürekli elektron bulutu oluştururlar. Bir enerji düzeyine 2 elektrondan fazlası bulunamaz ilkesi gereği başlangıçtaki keskin enerji düzeyi enerji bantları haline genişler. Değerlik elektronları tarafından çevrilmiş içteki elektronlar bantlar oluşturamaz.

Örneğin Na metalinin atom numarası 11’dir ve elektronik konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ ’dir. Atom sayısının artışı ile enerji seviyeleri bantlar haline genişler (Şekil 5.1) [112, 117, 118].



Şekil 5.1. Atom sayısına bağlı olarak band yapısı [110]

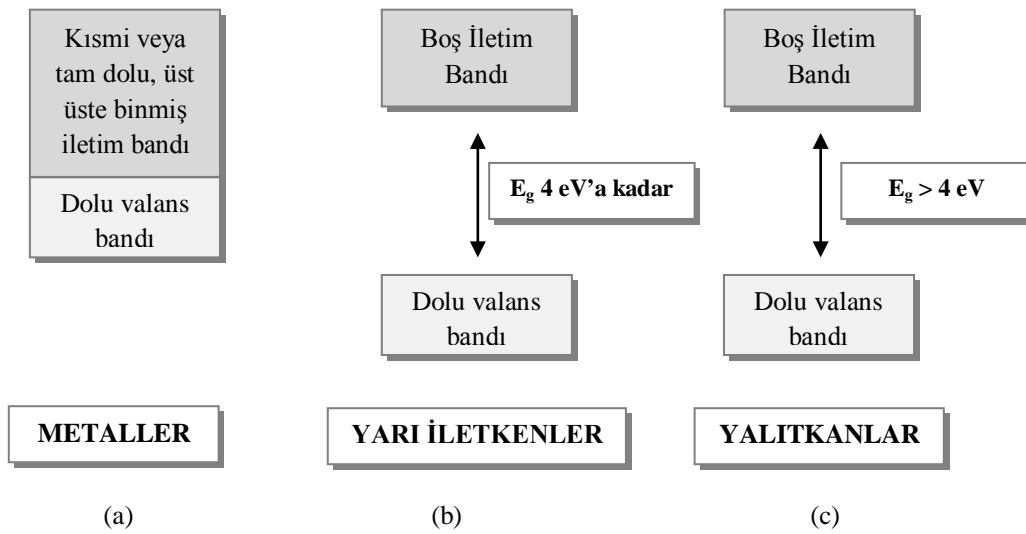
Çok atomlu sodyum metalinde her bir valans elektronu Pauli dışlama prensibine göre diğerlerinden biraz farklı bir enerji düzeyine sahip olmalıdır. Buna göre N sodyum atomu var ise 3s enerji bandında N adet birbirinden biraz farklı $3s^1$ enerji düzeyi olacaktır. Şekil 5.2 sodyum için atomlar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak band yapısını göstermektedir. Elektronlar tarafından yalnızca yarısı işgal edilmiş olan 3s bandı sodyumdaki iletkenlikten sorumludur [112, 113, 117].



Şekil 5.2. Atomlararası mesafenin bir fonksiyonu olarak sodyum atomunun band yapısı [112]

Elektronlar elektronik iletken bir malzemede yük taşıyıcılardır ve onların takip ettiği yol iletim bandı olarak adlandırılır. Atomlarda elektronlar spesifik enerji seviyelerine sahiptir ve çekirdek çevresinde ayrı zonlarda yer almaktadırlar. Bu zonlar ya da enerji bantları atoma ait sınırlı sayıda elektron içerirler. Verilen bir band içinde izin verilen elektron pozisyonlarının tamamı dolu ise elektronlar band içerisinde serbest hareket edemez ve elektronik iletim gerçekleşemez. Ancak band kısmen dolu ise elektronlar bant içerisinde serbestçe hareket edebilir ve elektronik iletim gerçekleşir.

Band boş ise bu durumda taşıyıcı olmayacaktır ve iletim de gerçekleşmeyecektir. Metallerde atomik bağlanma kısmen dolu enerji bandları oluşturur ve bu da elektronik iletimi sağlar. Yalıtkan ve yarıiletkenlerde enerji bandları ya tamamen dolu yada tamamen boştur. En dış dolu band (valans bandı) ile bitişik boş band (iletim bandı) arasında bir enerji aralığı vardır. Bu band aralığı valans ve iletim bandları arasında elektron akışını engeller ve elektronik iletim oluşmaz (Şekil 5.3) [119].



Şekil 5.3 Band yapılarının a) metallerde, b) yarıiletkenlerde, c) yalıtkanlarda şematik gösterimi (0K'de) [117]

Kısmen dolu enerji bandındaki elektronlar hareket edebilecekleri boş enerji seviyelerine sahiptirler. Ancak dolu enerji bantlarındaki elektronlar boş enerji bantlarına geçmek için bir aralığı (energy gap, E_g) aşmak zorundadırlar.

- İletkenlerde valans enerji bantları kısmen dolu
- Yarı iletkenlerde valans enerji bantları tam dolu, $E_g < 4 \text{ eV}$
- Yalıtkanlarda valans enerji bantları tam dolu, $E_g > 4 \text{ eV}$ [57].

Buna göre malzemeler elektriksel iletkenliklerine göre üç sınıfa ayrılırlar:

- İletken
- yarı iletken

— yalıtkan malzemeler.

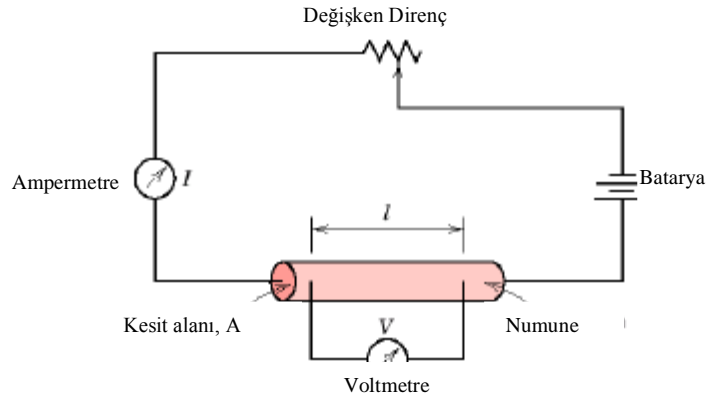
İletkenlikleri; $10^4 (\Omega.m)^{-1}$ 'den büyük $10^7 (\Omega.m)^{-1}$ civarında ise iletken, 10^{-10} ve $10^{-20} (\Omega.m)^{-1}$ aralığında çok düşük elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler elektriksel yalıtkan, 10^{-6} ve $10^4 (\Omega.m)^{-1}$ arasında orta seviyede elektrik iletkenliğine sahip malzemeler yarı iletken olarak isimlendirilir [112, 119]. Tablo 5.1'de bazı malzemelerin elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Bazı malzemelerin 300 K'de elektriksel iletkenlikleri [112]

Malzeme	İletkenlik (ohm.m^{-1})
Metaller	
Alkali metaller	
Na	$2,13 \times 10^7$
K	$1,64 \times 10^7$
3B Grubu metaller	
Al	$3,77 \times 10^7$
Ga	$0,66 \times 10^7$
Geçiş metaller	
Cu	$5,98 \times 10^7$
Ag	$6,80 \times 10^7$
Au	$4,26 \times 10^7$
Yarı iletkenler	
Si	5×10^{-4}
Ge	2
GaAs	$2,5 \times 10^{-7}$
Seramikler	
Al_2O_3	10^{-12}
BN	10^{-11}
Polimerler	
Polietilen	10^{-13}
Epoxy	10^{-10} ile 10^{-15}

5.2.1. Ohm kanunu

İletkenlik kısaca malzemelerin elektrik akımını iletme yeteneğidir. Bir malzemenin iyi bir iletken olup olmadığını malzemenin her iki ucuna bir potansiyel farkı tatbik edilerek anlaşılabilir (Şekil 5.4). Pilin pozitif ve negatif uçları arasındaki fark (-) kutuptan (+) kutuba serbest elektronların akışına neden olacak voltaj üretir. Elektronların akışı akım (I) olarak tarif edilir. Bakır bir tel içinde akımı ileten elektronlar birbirleri ile ve bakır atomları ile etkileşime girer. Bu etkileşimde elektron akışını etkiler ve elektriksel direnç olarak (R) adlandırılır [119]. Geçen akım şiddeti I, malzemenin direnci R ve tatbik edilen voltaj (V) arasındaki ilişki, ohm kanununa şu şekilde ifade edilir: [117]



Şekil 5.4. Elektriksel direnci ölçmek için kullanılan aparatın şematik gösterimi [117]

$$V = I \times R \quad (5.1)$$

Burada,

V = Potansiyel (gerilim farkı), Volt (V) yada J/C

I = Elektrik akımı, Amper (A)

R = Elektrik akıma direnç, Ohm (Ω) tir.

Akım ve direnç birbirleri ile ters orantılıdır. Eğer bir malzemenin direnci düşük ise malzeme içerisinde elektronlar kolay bir şekilde akar yani iletimi sağlar, akım yüksektir (bakır tel durumunda olduğu gibi). Direnç yüksek ise elektronlar malzeme içerisinde zorlukla hareket edebilecektir ve bu durumda akım düşük olacaktır. Örnek: Ampül içerisindeki flamanın durumu. Flaman çok ince kesitli tungsten alaşımından yapılır ve bakırdan daha yüksek elektriksel dirence sahiptir. Elektronlar ince tungsten flamana ulaştığı zaman daha fazla efor göstermesi gerekir. Bu ısı oluşumuna neden olur ve ısı ışık yayar [117].

Direnç (R), malzemenin elektrik özdirenci ile geometrisine bağlıdır [113] ve bir çok malzeme için akımdan bağımsızdır. Özdirenç malzemenin geometrisinden bağımsız olup, dirence bağlıdır. Özdirenç ile iletkenlik birbirlerinin tersidir (Denklem 5.2). [112]

$$R = \rho \times \frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A} \quad (5.2)$$

ρ = Malzemenin elektrik özdirenci, ($\Omega \cdot \text{cm}$)

L = İletkenin uzunluğu, (cm)

A = İletkenin kesit alanı, (cm^2)

σ = iletkenlik (ρ 'nun tersi), ($1/(\Omega \cdot \text{cm})$)

Ohm kanununun ikinci şekli her iki denklemin (5.1 ve 5.2) kombinasyonu ile elde edilir.

$$V = I \times R = \frac{IL}{\sigma A} \Rightarrow \frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{L} \quad (5.3)$$

$I/A = J$, akım yoğunluğu, (A/cm^2) ve

$V/L = \xi$, elektrik alan, (V/cm) ise

Denklem 5.3 aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$J = \sigma \times \xi \quad (5.4)$$

Kesiti A olan bir çubukta t süresince, q yüküne sahip, n elektronun, v hızıyla taşıdığı toplam Q yükü, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Q = n \times q \times t \times v \times A \quad (5.5)$$

$$Q/t = I \Rightarrow$$

$$I = n q v A$$

$$I/A = J \Rightarrow$$

$$J = n \times q \times v \quad (5.6)$$

Q = Toplam yük, C

n = cm^3 'teki yük taşıyıcıların sayısı,

q = 1 elektronun yükü, ($1,610^{-19}\text{C}$)

v = Hareket halindeki yük taşıyıcılarının ortalama hareket hızı, (cm/sn)

Denklem 5.4 ve 5.6'yı birbirine eşitlersek;

$$\sigma \times \xi = n \times q \times v \quad \text{veya} \quad \sigma = n \times q \times \frac{v}{\xi} \quad (5.7)$$

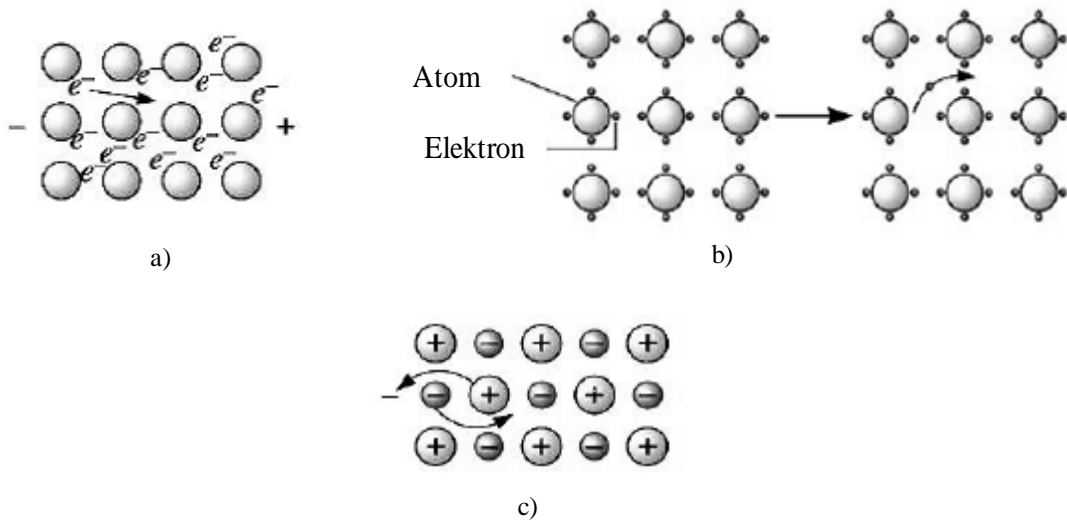
Burada $v/\xi = \mu$, mobilite, elektron yada taşıyıcı hareket kabiliyeti, ($\text{cm}^2/\text{V.sn}$)'dir. Sonuç olarak iletkenlik Denklem 5.8'deki gibi ifade edilir.

$$\sigma = n \times q \times \mu \quad (5.8)$$

q yükü bir sabittir ve Denklem 5.8'e göre bir malzemenin elektrik iletkenliğini, malzemedeki yük taşıyıcıların sayısını ve mobilitiyi kontrol ederek veya yük taşıyıcıların hareketini kolaylaştırarak kontrol edebiliriz [112, 113, 117-119].

İletkenlerde ve yarı iletkenlerde elektronlar yük taşıyıcı iken birçok iyonik bileşikte iyonlar yükü taşır. Elektronlar gibi yük taşıyıcılar atom yada kusurlar tarafından saptırılabilir ve iletken boyunca düzensiz bir yol takip edebilirler [112]

Metalik bağlı malzemelerde valans elektronları kolaylıkla hareket edebilir. Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda elektronun hareket edebilmesi için kovalent bağlar kırılmalıdır. İyonik bağlı malzemelerde de yükün taşınması için iyonların difüzyonu gereklidir (Şekil 5.5) [112].



Şekil 5.5.a) Metalik bağli malzemelerde, b) kovalent bağli malzemelerde, c) iyonik bağli malzemelerde yük taşıyıcıları [112]

Metallerde; serbest elektronlar negatif kutuptan pozitif kutba doğru hareket eden (-) yük taşıyıcılar, yarı iletkenlerde; elektriksel alan etkisi ile kopan elektron pozitif kutba hareket eden (-) ve elektron eksilmesinden oluşan elektron boşlukları ise negatif kutba hareket eden (+) yük taşıyıcılarıdır. İyonik bileşiklerde; + yüklü iyon negatif kutba hareket eden (+) yük taşıyıcı, - yüklü iyon pozitif kutba hareket eden (-) yük taşıyıcıdır. Buna göre dört tür yük taşıyıcı vardır: [112, 117]

- Elektron
- Elektron boşluğu
- + yüklü iyon ve
- - yüklü iyon

5.2.2. Metal ve Alaşımelerde İletkenlik

Saf kusursuz bir metalin iletkenliği atomların elektronik yapısı tarafından belirlenir. İletkenlik yük taşıyıcıların mobilitesini (μ) etkilemek sureti ile önemli ölçüde değiştirilebilmektedir. Mobilite ortalama sürüklenme hızı ile orantılıdır. Sürüklenme hızı latisdeki kusurlarla elektronların çarpışması sonucu düşer. Ortalama serbest yolu çarpışmalar arasındaki ortalama mesafe belirler. Daha uzun ortalama serbest yol yüksek mobilite ve yüksek iletkenlik sağlar [112].

5.2.2.1. Sıcaklık etkisi

Bir metalin sıcaklığı arttığı zaman termal enerji atomların titreşimine sebep olur. Bunun sonucu olarak atom denge konumunda bulunmayabilir ve elektronlarla etkileşime girerek saçılmalarına sebep olabilir. Bu durumda; ortalama serbest yol azalır, elektronların mobilitesi düşer ve direnç artar (Şekil 5.6).

Saf bir metalin direncindeki değişim sıcaklığın fonksiyonu olarak aşağıdaki formül ile verilebilir (Denklem 5.9):

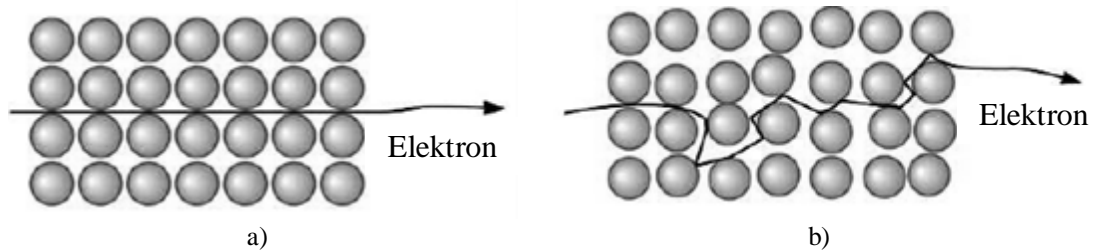
$$\rho = \rho_{RT} \times (1 + \alpha_R \times \Delta T) \quad (5.9)$$

ρ = Herhangi bir T sıcaklığındaki özdirenç,

ρ_{RT} = Oda sıcaklığındaki özdirenç,

α_R = Sıcaklık özdirenç katsayısı,

$\Delta T = T - T_{RT}$, işlem sıcaklığı ile oda sıcaklığı arasındaki fark'ı ifade etmektedir [112].



Şekil 5.6a) Mükemmel bir kristalde, b) kristalin yüksek sıcaklığa ısıtıldığı zaman elektronun hareketi [112]

5.2.2.2. Kristal yapıdaki kusurların etkisi

Kristal yapıdaki kusurlar elektronları saçar ve böylelikle mobilite ve iletkenlik azalır.

Örneğin katı çözelti atomlarının özdirençte meydana getirdiği artış Denklem 5.10'daki gibi ifade edilir.

$$\rho_d = \rho_b \times (1 - X) + \rho_X \times X \quad (5.10)$$

ρ_d = Kusurdan dolayı özdirençteki artış,

X = Empürite yada katı çözeltili atomlarının atomik oranı,

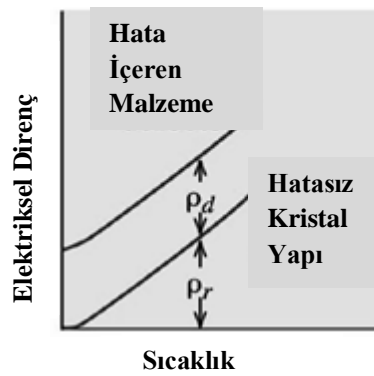
b = Kusur özdirenç katsayısıdır.

Benzer tarzda boşluklar, dislokasyonlar ve tane sınırları metalin özdirençinde artış sağlar. Böylece toplam özdirenç (Denlem 5.11):

$$\rho = \rho_T + \rho_d \quad (5.11)$$

ρ_d , katı çözeltili atomları, boşluklar, tane sınırları gibi kusurlardan gelen özdirenci, ρ_T ise sıcaklıktan kaynaklanan özdirenci göstermektedir.

Şekil 5.7 metalin kusur ve sıcaklıktan kaynaklanan elektriksel özdirençindeki değişimi göstermektedir. Buna göre kusurların etkisi sıcaklıktan bağımsızdır [112, 117, 118].



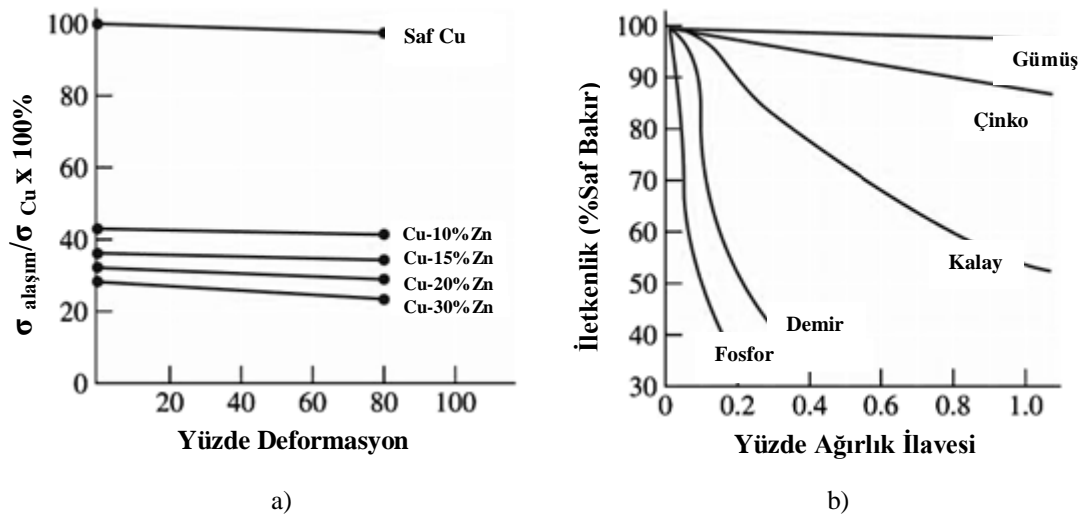
Şekil 5.7. Metalin kusur ve sıcaklıktan kaynaklanan elektriksel özdirençindeki değişim [112]

5.2.2.3. Şekillendirme ve mukavemetlendirme yöntemlerinin etkisi

Mukavemetlendirme mekanizmaları ve metal üretim teknikleri elektriksel özellikleri farklı şekilde etkiler.

- Yüksek iletkenliğe sahip olması istenen bir metalin katı çözelti mukavemetlendirmesi ile mukavemetinin artırılması kötü bir yoldur. Çünkü ortalama serbest yol arayer veya yeralan atomların rasgele dağılımından dolayı çok kısadır.
- Yaşlandırma ile sertleştirme ve dispersiyon ile sertleştirme iletkenliği katı çözelti mukavemetlendirmesinden daha az etkiler, nokta kusurları arasındaki yol ile karşılaştırıldığında daha uzun ortalama serbest yola sahiptirler.
- Deformasyon sertleştirme ve tane boyutu kontrolü iletkenliği daha da az etkiler. Çünkü, dislokasyonlar ve tane sınırları katı çözelti atomlarından oldukça ayrıdır, metalde elektronların uzun bir ortalama yola sahip olabilecekleri geniş hacimler vardır. Sonuç olarak soğuk işlem malzemenin özelliklerinde seri kayıplara neden olmadan iletken bir metalin mukavemetini artırmak için en etkili yoldur. Ayrıca soğuk işlemin iletkenliğe etkileri, düşük sıcaklıkta uygulanan kendine gelme ısıl işlemi ile elimine edilebilir.

Şekil 5.8’de bakırın elektriksel iletkenliğine katı çözelti mukavemetlendirmesi ve soğuk işlem ile bazı element ilavelerinin etkisi görülmektedir [112, 117].



Şekil 5.8. Bakırın elektriksel iletkenliğine a) katı çözelti mukavemetlendirmesi ve soğuk işlemin, b) bazı element ilavelerinin etkisi [110]

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Giriş

Mühendislik malzemeleri özelliklerine bağlı olarak uygulama alanları açısından farklılık gösterirler. Yüksek sıcaklık ve yalıtım uygulamaları için seramik malzemeler tercih edilirken, şekillendirilme kolaylıklarından ve yalıtkanlık özelliklerinden dolayı polimer malzemeler, ısı ve elektrik iletkenlik uygulamaları için metalik malzemeler kullanılmaktadır. Birçok uygulama için malzemelerin elektrik özellikleri mekanik özelliklerinden çok daha kritik olmaktadır. Elektriği uzun mesafelere iletmek için iletken olarak kullanılan metalin elektrik iletkenliği yüksek olmalıdır, bu ise iletim esnasında ısınma kayıplarını azaltıcı rol oynar. Elektrik ve elektronik uygulamalar için malzeme seçimi çok önemlidir. Bütün bu özellikler öncelikle malzemenin içyapısı ile ilişkilidir. Bütün malzemelerin uygun şartlar sağlandığında elektriği ileteceği bilinen bir gerçektir. Çünkü bütün malzemeler maddenin en küçük birimi olan atomdan oluşmaktadır. Atomdaki parçacıklar, elektron, proton vb malzemeyi doğal olarak iletken yapmaktadır. Malzemelerin atom ve band yapılarına ve yasak band enerji büyüklüklerine bağlı olarak malzemeler iletken, yarıiletken ve yalıtkan olarak üç gruba ayrılmaktadırlar. Elektrik iletkenliği en yüksek olan metaller gümüş ($6.8 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$) ve bakırdır ($5.98 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$). Gümüş en iyi iletkenidir, ancak pahalıdır. Bir diğer iletken malzeme alüminyumdur. Bu metal gerek bakır gerekse gümüşe göre daha ekonomiktir. Fakat alüminyumun oksijene olan afinitesinden dolayı yüzeyinde hemen oksit tabakası oluşmakta bu da iletkenliği düşürmektedir. Ayrıca düşük mukavemeti ve yüksek ısıl genleşme katsayısı ($25 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) bu malzemedeki nispeten yüksek sıcaklıklarda sürünmeye ve erken kopmalara neden olması alüminyumun iletken malzeme olarak kullanımını sınırlamaktadır. Metallerin elektrik iletkenliğini etkileyen sıcaklık, proses ve ilave edilen alaşım elementleri gibi birçok faktör mevcuttur. Malzeme biliminden hareketle tek bir malzemedeki istenilen özellikler

elde edilemiyorsa, alternatif olarak iki malzemenin kombinasyonu yani kompozit malzeme üretmek istenilen bazı özellikleri elde etmek mümkündür. Bu çalışmada sementasyon yöntemi ile bakır tozu üretimi ve hem semente hemde ticari Cu tozuna SiC partikül takviye edilerek üretilen Cu ve farklı bileşimlerde Cu-SiC kompozitlerinin elektriksel ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

6.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Matriks malzemesi olarak: Ticari Cu tozu (10 µm, %99.9 safiyette, Merck)
Semente Cu tozu (0.1- 0.5 µm, %99.55 safiyette)
Takviye malzemesi olarak: SiC tozları (1- 5 ve 30 µm, %99.5 saflıkta, Alfa-Aesar ve Struers)
Semente Cu tozu üretiminde: Susuz CuSO₄ tozu (%99 safiyette, Merck)
H₂SO₄ (Sülfürik asit) (%99 saflıkta, Alfa-Aesar)
Saf Fe tozu (%99.5 safiyette, 10 µm, Merck)
Destile su

Sinterleme sırasında oksitlenmeyi önleyici eleman olarak da grafit tozu kullanılmıştır.

6.3. Çalışmada Kullanılan Cihazlar

Deneysel çalışmalarda şu cihazlar kullanılmıştır:

- Semente bakır tozlarının üretimi için ısıtıcılı manyetik karıştırıcı ve cam beher,
- Semente bakır tozlarının kurutulmasında MMM Med Center marka vakumlu etüv,
- Kompozit toz karışımlarının kompaktlanmasında Dartec marka çekme cihazı, 15 mm çapında kalıp ve iki adet zımba,
- Sinterleme çalışmaları için Protherm marka max. 1200°C'lik fırın,
- Yoğunluk ölçümleri için GecAway marka hassas terazi ve Archimed yoğunluk ölçüm ekipmanı

- f) Optik mikroyapıların elde edilmesinde Leica marka optik mikroskop,
- g) XRD analizlerinde Rigaku marka x-ışınları difraktometresi
- h) SEM- EDS analizlerinde EDS destekli Jeol JSM 6060- LV model SEM mikroskobu
- i) Sertlik ölçümlerinde Brinell sertlik ölçüm cihazı ve Leica WMHT- Mod model optik mikroskop destekli Vickers indentasyon cihazı
- j) Elektriksel iletkenlik ölçümlerinde GE model iletkenlik cihazı
- k) Kontak ömür test cihazı

6.4. Deneysel Çalışmada İzlenen Yol

Çalışmada izlenen yol, genel bir çerçevede, aşağıdaki gibidir.

A. Toz karışımı hazırlama

- Ticari tozlardan ve
 - Sementasyonla çöktürülen tozlardan mekanik karıştırma ile
- ağırlıkça; %100 Cu,
 %99 Cu + %1 SiC,
 %98 Cu + %2 SiC,
 %97 Cu + %3 SiC ve
 %95 Cu + %5 SiC bileşimli karışımlar hazırlanmıştır.

B. Sinterleme

Belirtilen bileşimlerde hazırlanan toz karışımları 280 MPa basınç altında sıkıştırılarak kompaktlar hazırlanmıştır. Saf bakır ve 1 mikron SiC partikül takviye edilerek ticari tozlardan hazırlanan kompaktlar 700, 900, 950 ve 1000°C’de, sementasyonla çöktürülen tozlardan hazırlanan kompaktlar 700 ve 900°C’de 2 saat süreyle grafitte gömülerek sinterlenmiştir. SiC tane boyutunun etkisini görmek amacıyla ortalama partikül boyutu 5µm ve 30µm olan SiC takviyeli kompozitler hazırlanmış ve 700°C’de sinterlenmiştir.

C. Karakterizasyon

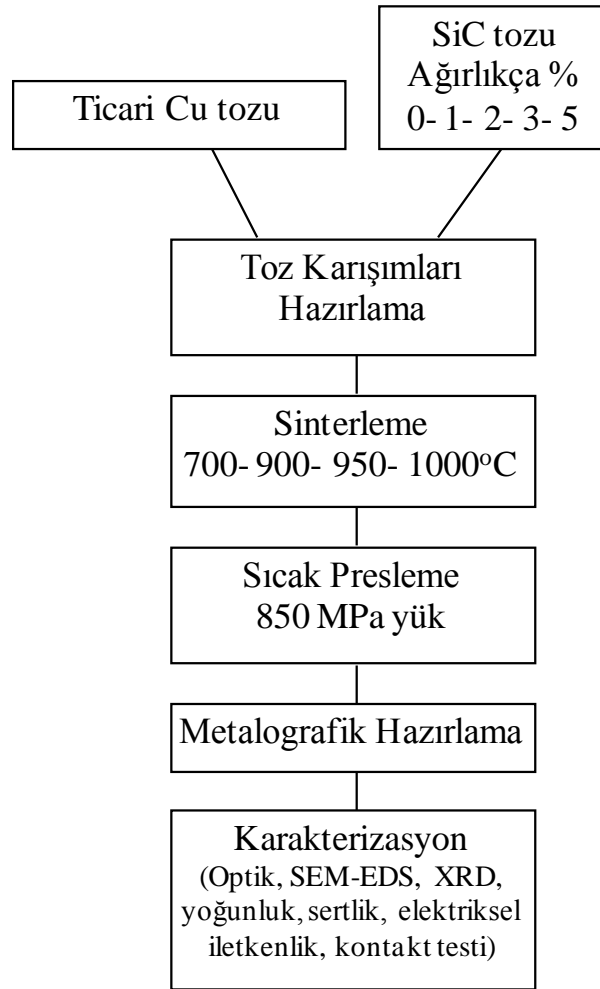
Sinterlenmiş ürünler üzerinde aşağıdaki karakterizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

- Yoğunluk
- Mikroyapı
 - Optik mikroskop
 - Taramalı elektron mikroskobu (SEM- EDS)
- Sertlik
- XRD
- Elektrik iletkenliği
- Kontak ömrü

6.5. Toz Karışımlarının Hazırlanması

6.5.1. Ticari bakır tozundan üretim

Ticari olarak temin edilen bakır tozu ile farklı bileşimlerdeki silisyum karbür tozları mekanik olarak karıştırılarak farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş ve özellikleri incelenmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Ticari bakır tozundan Cu-SiC kompozit üretimi

6.5.2. Sementasyon yöntemiyle çöktürülen bakır tozundan üretim

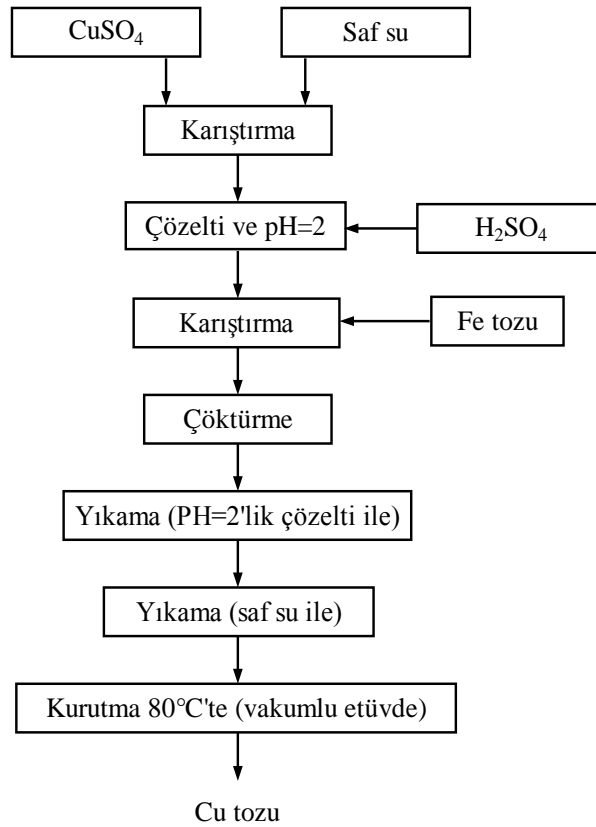
Sementasyon yöntemi ile çöktürülerek bakır tozu elde edilmesinde başlangıç malzemesi olarak bakırsülfat (susuz CuSO_4) tuzu kullanılmıştır.

6.5.2.1 Bakır tozu üretimi

Bakır tozu, metalik demir tozu kullanılarak bakırın sülfatlı çözeltisinden sementasyon yöntemi ile çöktürülerek üretilmiştir. Bakır sülfat tuzu, 0,1M'lık çözelti oluşturacak şekilde saf su içerisinde karıştırılarak çözündürülmüştür. Bu esnada çözeltiye H_2SO_4 ilave edilerek $\text{PH}= 2$ 'ye ayarlanmış ve stokiometrik orana göre hesaplanan demir tozu ilavesiyle 20 dakika sürekli karıştırılmış ve Denklem 6.1'deki reaksiyona göre bakır tozu çöktürülerek üretilmiştir.

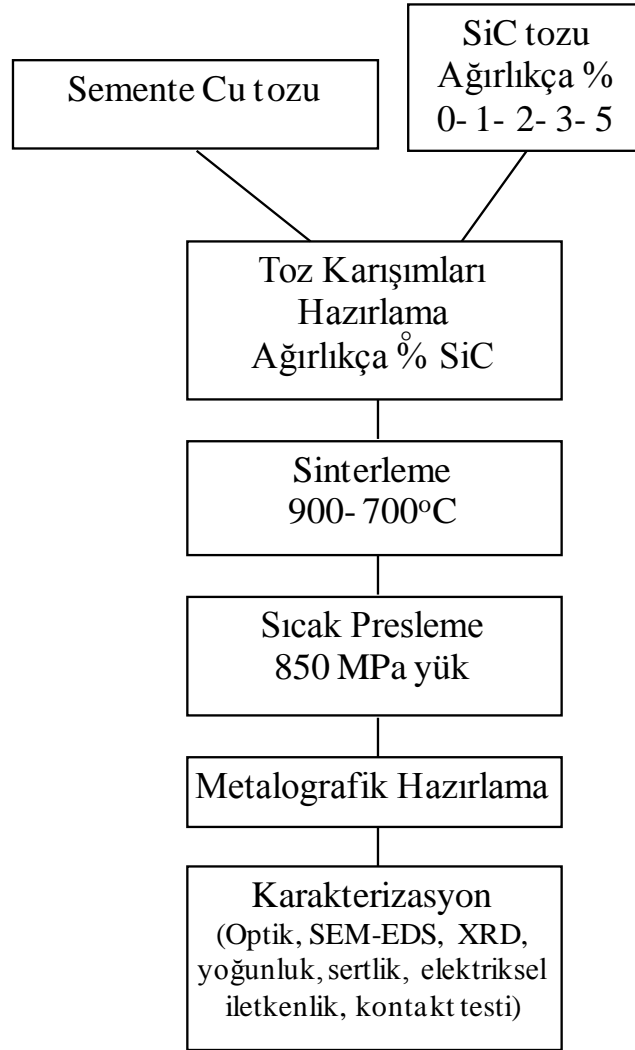


Çöktürme işlemini takiben çökelti iki kez PH=2'lik çözelti ile, iki kez de saf su ile yıkanmış ve fiziksel suyun giderilmesi için 80°C'lik vakumlu etüvde kurutulmuştur. Sementasyonla çöktürme yöntemiyle bakır tozu üretim akım şeması Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Sementasyon yöntemi ile bakır tozu üretimi

Sementasyon yöntemiyle çöktürülen bakır tozundan Cu-SiC kompozit üretiminin akım şeması Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Semente bakır tozundan Cu-SiC kompozit üretimi

6.5.3. Tozların karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların tane morfolojileri ve boyutları SEM ile incelenmiş ve enerji dağılımlı x-ışınları spektrometresi (EDS) ile analizleri yapılmıştır. Tozların bileşenleri Rigaku marka x-ışınları (XRD) cihazı ile $10 \leq 2\theta \leq 90$ açılarında Cu $K\alpha$ ($\lambda=1,5418^\circ\text{A}$) radyasyonu kullanılarak belirlenmiştir.

6.6. Sinterleme

Bakır tozu ve bakır-silisyum karbür toz karışımlarından 5'er gr olarak hazırlanan kütleler 15 mm çapında silindirik boşluğa sahip çelik kalıp içerisine yerleştirilmiş (Şekil 6.4), 0,1 mm/sn hızla 280 MPa basınçta, tek yönde basılarak disk şeklinde

$$d_b = \frac{m_k}{m_k - m_s / d_{su}} \quad (6.2)$$

d_b = bulk yoğunluk (sinterlenmiş numunenin yoğunluğu), gr/cm³

m_k = numunenin kuru ağırlığı, gr

m_s = numunenin saf su içindeki ağırlığı, gr

d_{su} = suyun yoğunluğu, gr/cm³

$$\%R.Y. = (d_b / d_T) \times 100 \quad (6.3)$$

R.Y. = relatif yoğunluk

d_T = teorik yoğunluk

6.6.1.2. Optik- SEM incelemesi

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin mikroyapıları optik mikroskop ve SEM ile incelenmiş ve EDS analizleri alınmıştır. Tane yapısını tespit etmek için %40 HNO₃+H₂O ile dağlanmıştır.

6.6.1.3. Sertlik

Numunelerin sertlikleri Leica WMHT- Mod model optik mikroskop destekli Vickers indentasyon cihazında, 50gr ve 100gr yük altında, en az beş farklı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

6.6.1.4. XRD incelemesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan bakır ve silisyum karbür tozlarının bileşimlerini teyit etmek, sementasyon yolu ile üretilen semente Cu tozlarında kurutma sonrasında ortaya çıkabilecek ve sinterleme sonrası oluşabilecek herhangi bir oksit varlığını belirlemek amacıyla XRD incelemesi gerçekleştirilmiştir.

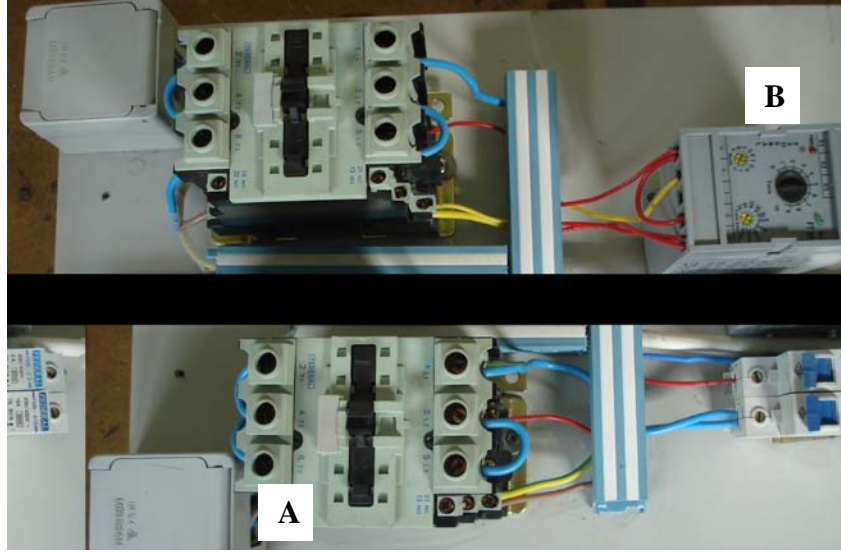
6.6.1.5 Elektrik iletkenliği

Sinterlenmiş numunelerin elektrik iletkenlikleri GE model iletkenlik cihazı ile S/m cinsinden en az dört farklı ölümün ortalaması alınarak belirlenmiş ve 1.7241 ile çarpılarak %IACS'ye çevrilmiştir.

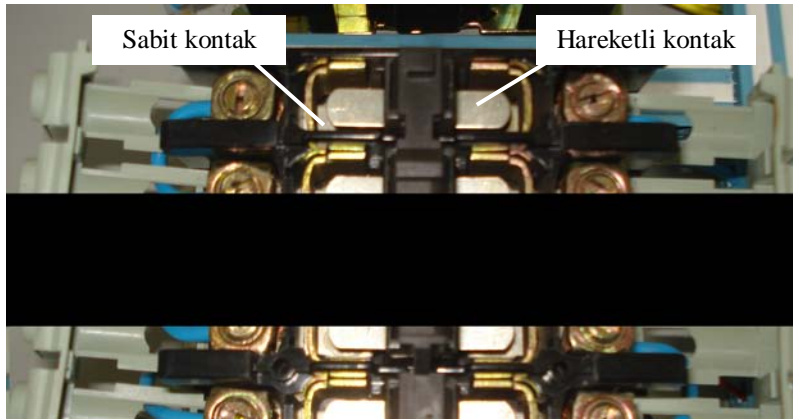
6.6.1.6 Kontak testi

Elektrik iletkenlik kaybına yol açmadan sertliği yüksek olan ağırlıkça %3 SiC içeren semente Cu-SiC ve mukayese amacıyla katkısız semente bakır numunesi kontak testine tabi tutulmuştur. Numuneler Federal elektrik Ltd. şti.'den hazır olarak temin edilen kontaktörlerin sabit ve hareketli kontaklarına monte edilmiştir. Kontak gücü olarak 1600 W kullanılmıştır. Kontakt mr deneyinde her numuneye sırasıyla 3000, 6000, 9000, 12000, 21000 açma-kapama işlemi uygulanmış ve yüzeyleri SEM-EDS ile incelenmiş, ağırlık kayıpları llmştir.

Kontak mr deneyi için tasarlanan deney düzeneği şekil 6.5' de verilmiştir. şekilde A nitesi deney düzeneğinin kontaktörü olup, üretilen numuneler bu kontaktörün kontaklarına monte edilmiştir. B nitesi kontaktörü periyodik olarak 10 saniye aralıklarla açıp kapatan osilatör devresidir. Deney düzeneğinin çalışma prensibi şudur: B nitesinde bir 555 kare dalga osilatörü bulunmaktadır ve bu nite A nitesi olan kontaktre 220 V gerilim uygulayarak devreyi 10 saniye açıp 10 saniye süreyle kapatmaktadır. Kontaktörün pabularına ise bir yük bağlanarak B nitesi devreyi açığında kontakların üzerinden akım geçmektedir. şekil 6.6'da üretilen numunelerin bağlandığı kontaktörün ve şekil 6.7'de numunelerin üzerine monte edildiği hareketli kontakların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.5. Açma kapama deney düzeneği



Şekil 6.6 Numunelerin monte edildiği kontaktör ve kontakların görüntüsü

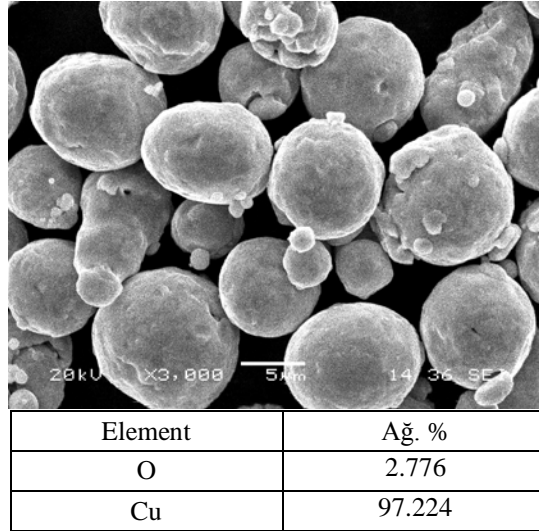


Şekil 6.7 Hareketli kontakların görüntüsü

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER

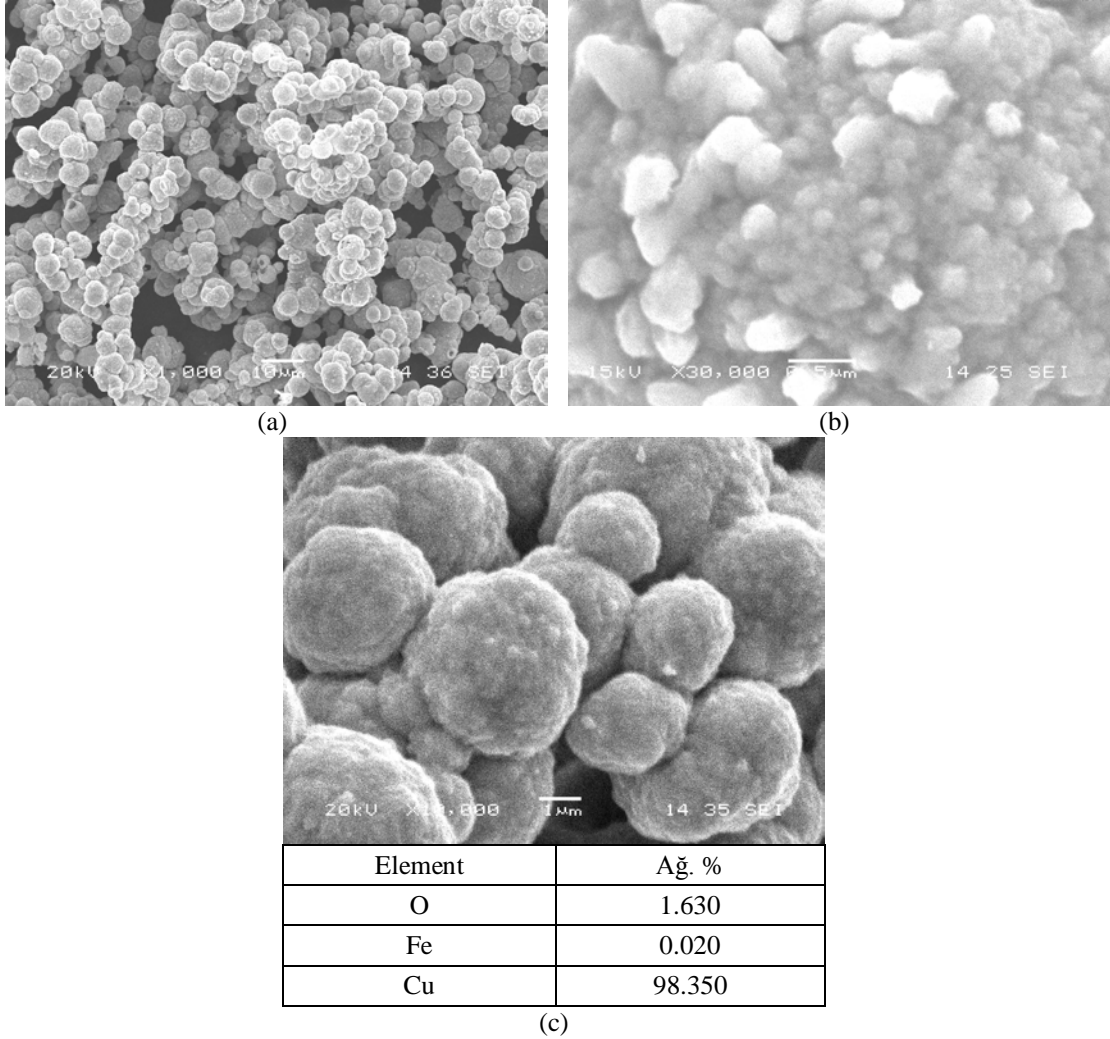
7.1. Toz karakterizasyonu

Ticari olarak temin edilen ve sementasyon yöntemiyle üretilen bakır ve takviye bileşeni SiC tozlarının SEM mikrografları ve bu mikrograflar üzerinden alınan EDS analizleri Şekil 7.1- 7.5'te görülmektedir.



Şekil 7.1. Ticari bakır tozunun SEM mikrografı ve EDS analizi.

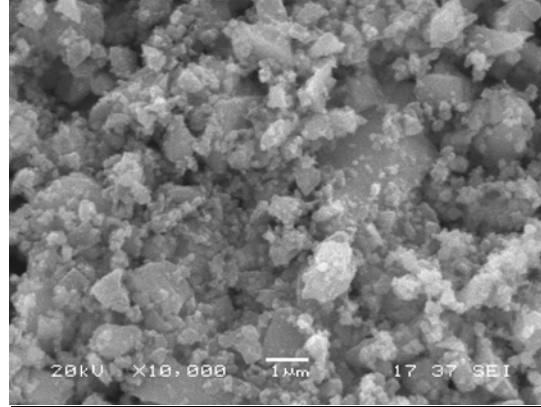
Şekil 7.1'den görüldüğü üzere ticari bakır tozu küresel şekillidir ve 10µm boyutuna sahiptir. EDS analizinde Cu dışında çok az miktarda O₂ tespit edilmiş olup, bu muhtemelen tozun zamanla hava ile olan reaksiyonundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.2. Semente bakır tozunun a) 1.000 büyütmedeki SEM mikrografi, b) 30.000 büyütmedeki SEM mikrografi, c) 10.000 büyütmedeki SEM mikrografi ve EDS analizi.

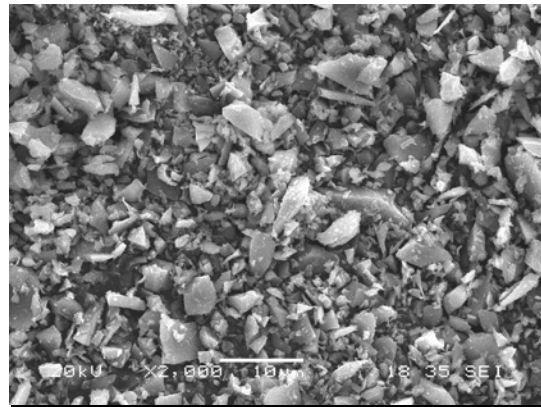
Semente Cu tozunun partikül morfolojisi küresele yakın olup, tanelerde belirgin bir topaklanma bulunmaktadır (Şekil 7.2c). Bu aglomere Cu tanelerinin boyutları 2- 6 μ m arasında değişirken (Şekil 7.2a), partiküllerin gerçek boyutları mikron altı seviyelerde olup, boyutu 100 nm'ye yakın tanecikler de vardır (Şekil 7.2b). Küçük parçacıklar topaklanmaya meyillidir. Topaklanmanın nedeni toz üretimi esnasındaki karıştırma ve kurutma sonrasındaki mekanik karıştırma esnasında parçacıkların soğuk kaynaklanmasıdır [120]. EDS analizinde tespit edilen Fe ve O₂, muhtemelen bakır tozunun sementasyon prosesi ile çöktürülerek üretiminden kaynaklanmaktadır (Şekil 7.2c).

Şekil 7.3- 7.5'ten takviye bileşeni olan SiC tozlarının köşeli morfolojiye sahip olduğu ve bünyelerinde az miktarda oksit bulunduğu görülmektedir. SiC tanelerinin boyutu arttıkça oksijen miktarı, azalan yüzey alanından dolayı azalmaktadır.



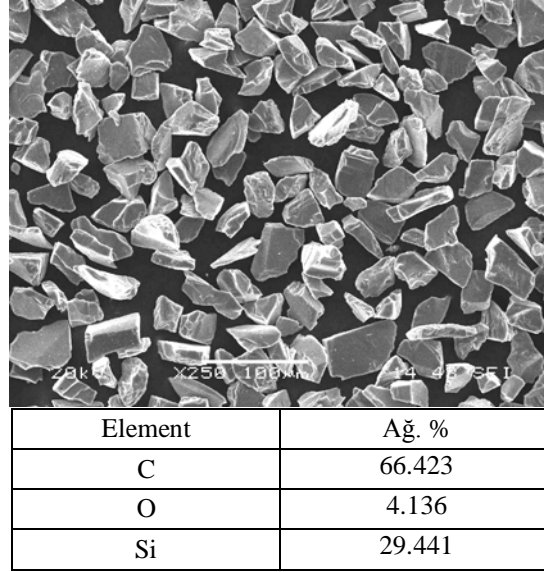
Element	Ağ. %
C	64.151
O	5.899
Si	29.950

Şekil 7.3. 1µm tane boyutundaki SiC tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.



Element	Ağ. %
C	57.537
O	4.995
Si	37.468

Şekil 7.4. 5 µm tane boyutundaki SiC tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.



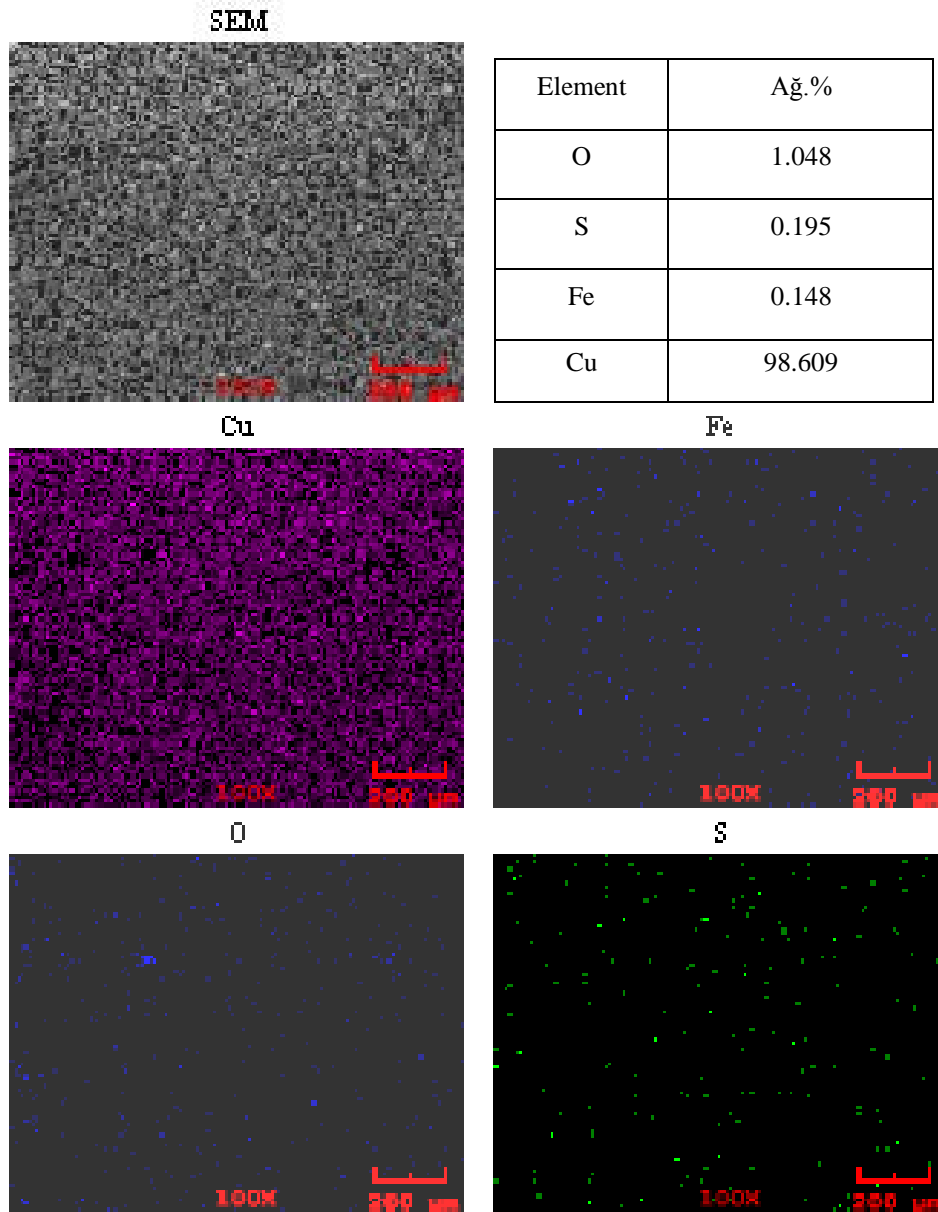
Şekil 7.5. 30 µm tane boyutundaki SiC tozunun SEM mikrografi ve EDS analizi.

Sementasyon yöntemiyle çöktürülerek üretilen bakır tozunun saflığını belirlemek için Sakarya Üniversitesi bünyesinde mevcut laboratuvarlarda yaş analiz yaptırılmış ve sonuçlar Tablo 7.1’de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi üretilen bakır tozlarının safiyeti analiz sonucunda %99’un üzerindedir ve eser miktarda demir ihtiva etmektedir.

Tablo 7.1. Sementasyon yolu ile üretilen bakır tozunun yaş analiz sonuçları.

Alaşım Elementi	Ağ. %
Cu	99,871
Fe	0,129

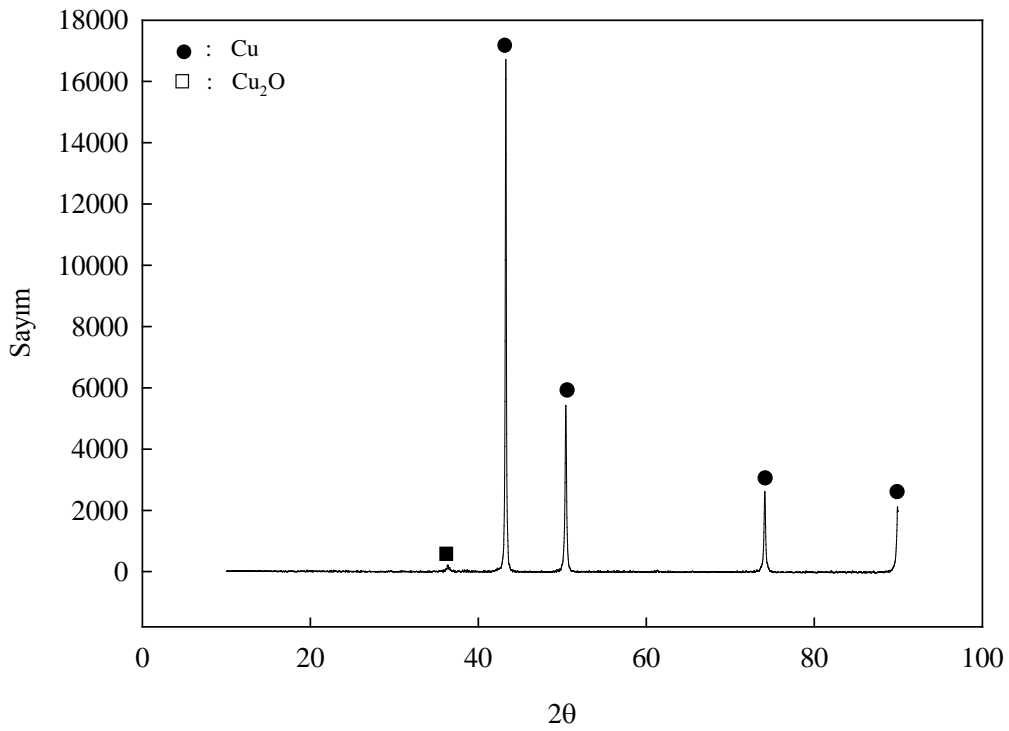
Şekil 7.6’da semente Cu tozlarının SEM- EDS alan taraması (SEM-map) ve bu alana ait EDS spektrumu verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi semente Cu tozunda ağırlıklı olarak Cu, eser miktarlarda O₂, Fe ve S bulunmaktadır.



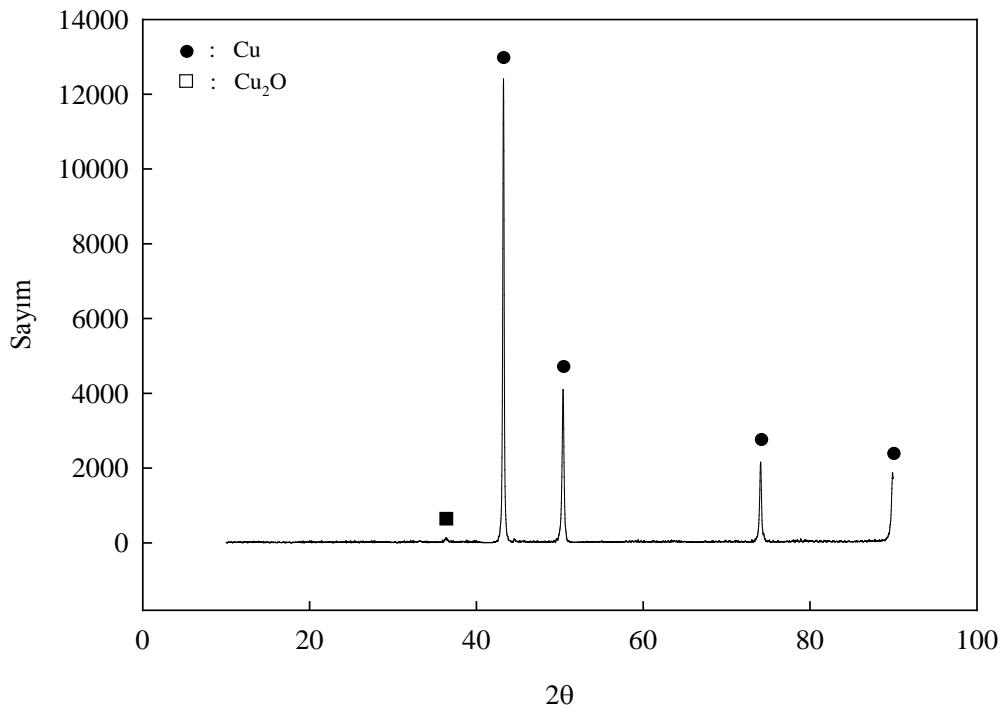
Şekil 7.6. Semente bakır tozunun SEM-EDS alan taraması ve spektrumu.

Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların bileşenlerini belirlemek ve sementasyon yolu ile üretilen semente Cu tozlarında kurutma sonrasında ortaya çıkabilecek herhangi bir bakır-oksit varlığını incelemek üzere tozların XRD analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.7- 7.11).

Ticari olarak kullanılan bakır tozunun x-ışınları difraksiyon paterni sementasyon yöntemi ile çöktürülmüş bakırınki ile tamamen aynıdır. Bakır tozlarının X-ışınları analizlerinde çok az miktarda Cu_2O tespit edilmiştir.



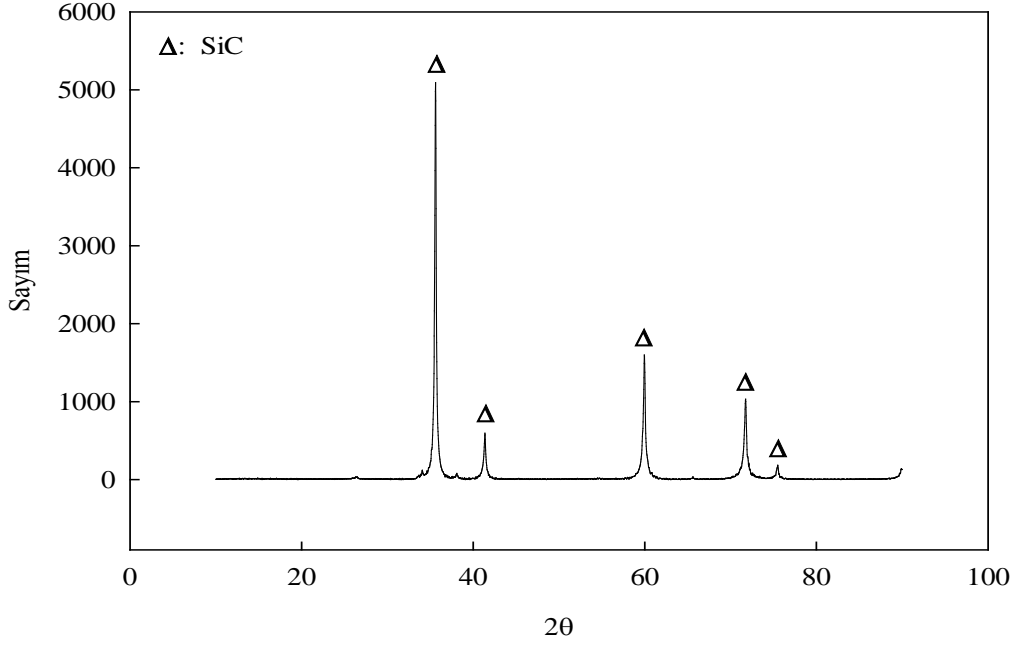
Şekil 7.7 Ticari Cu tozlarının XRD paterni.



Şekil 7.8 Semente Cu tozlarının XRD paterni.

Şekil 7.9'da takviye bileşeni olarak kullanılan SiC tozunun XRD analizi görülmektedir. SiC tozlarının X-ışınları analizlerinde SiC dışında başka bir bileşen

tespit edilmemiştir.



Şekil 7.9 SiC'ün XRD paterni.

7.2. Sinterlenmiş numunelerin karakterizasyonu

Bundan sonra ticari ve sementasyonla çöktürülen bakır tozlarından sinterlenen numuneler Tablo 7.2'de kodlandırıldığı halde kullanılacaktır.

Tablo 7.2. Ticari ve sementasyonla çöktürülen bakır tozlarından sinterlenen numunelerin kodlandırılması.

Numune	Ticari Cu-SiC kompoziti	Semente Cu-SiC kompoziti
Cu	Ct	Cs
Cu+ağ.%1SiC	C1St	C1Ss
Cu+ağ.%2SiC	C2St	C2Ss
Cu+ağ.%3SiC	C3St	C3Ss
Cu+ağ.%5SiC	C5St	C5Ss

C: Cu, S: SiC, t: Ticari bakır tozu, s: Semente bakır tozu.

7.2.1. Yoğunluk

Kang ve arkadaşları [90] Cu-SiC kompozitini üretmek için en uygun yöntemin sinterleme ve sıcak presleme kullanılarak yapılan Toz Metalurjisi metodu olduğunu belirtmişlerdir. Guobin ve arkadaşları [121] Cu-Al₂O₃ kompozitlerini, yoğunluk ve elektrik iletkenliğini arttırmak için %50 oranında plastik deformasyona tabi tutmuşlar, yoğunluk ve elektrik iletkenliği ile birlikte akma ve çekme mukavemetlerinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Benzer olarak tüm sinterleme sıcaklıklarından sonra relatif yoğunluğu arttırmak amacıyla numunelere 850 MPa yük uygulanarak sıcak preslenmiştir.

Deneysel çalışmalarda ilk olarak ticari bakır tozu ve 1 µm tane boyutundaki SiC tozu kullanılarak hazırlanan kompaktlar üç farklı sıcaklıkta (900, 950, 1000°C) sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının özellikler üzerine etkisi incelenmiş ve optimum sinterleme sıcaklığı belirlenmiştir.

Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş kompozitlerin Archimedes prensibi ile belirlenen relatif yoğunluklarının sinterleme sıcaklığına ve SiC içeriğine bağlı olarak değişimi Tablo 7.3'de verilmektedir. Ticari tozlardan sinterlenen numunelerde en yüksek relatif yoğunluklar 900°C'de sinterleme sonrası elde edilmiştir ve bu nedenle sementte Cu ve Cu-SiC kompozitleri yalnızca 900°C'de sinterlenmiştir. 900°C'de sinterlenmiş ticari bakır tozunun relatif yoğunluğu %98,2, sementte bakır tozunun %98 olarak tespit edilmiştir ve SiC ilavesiyle relatif yoğunluklar ticari Cu-SiC kompoziti için %92'ye, sementte Cu-SiC kompoziti için de %91,2'ye azalmıştır.

Ticari ve sementte bakır tozları kullanılarak sinterlenen numunelerin relatif yoğunluk değerleri birbirlerine yakın olup; ticari Cu tozlarından hazırlananların yoğunlukları bir miktar yüksektir. Bu muhtemelen sementte bakır tozlarının morfolojisi ve aglomerasyonundan kaynaklanmaktadır. Ticari tozlar daha küresel şekillidir ve sementte tozlarda belirgin bir aglomerasyon mevcuttur. Yüzey alanı ne kadar büyük veya toz şeklinin düzensizliği ne kadar fazla ise paketleme yoğunluğu da o kadar düşük olur. Ayrıca tozların aglomerasyonu esnasında toz tanelerinin aralarında kalan boşluklar tozların paketleme yoğunluğunu düşürmektedir [120].

Tablo 7.3. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen Cu-SiC kompozitlerinin Archimedes prensibine göre hesaplanan relatif yoğunluk değerleri.

Numune	Sıcaklık(°C)		
	900	950	1000
	% Relatif Yoğunluk		
Ct	98,2 ± 1,2	97,8 ± 1,8	97,0 ± 1,4
C1St	97,5 ± 0,8	94,3 ± 0,9	96,1 ± 1,2
C2St	96,8 ± 1,3	93,6 ± 0,7	95,7 ± 1,3
C3St	95,3 ± 1,4	91,3 ± 1,0	93,6 ± 1,0
C5St	92,0 ± 1,5	89,0 ± 1,2	91,5 ± 2,1
Cs	98,0 ± 1,1	-	-
C1Ss	97,1 ± 1,0	-	-
C2Ss	95,7 ± 0,4	-	-
C3Ss	92,8 ± 1,8	-	-
C5Ss	91,2 ± 0,6	-	-

Karakterizasyon çalışmalarında 900°C’de sinterlenmiş semente Cu-SiC kompozitlerinin elektrik iletkenlik değerlerinin beklenen değerlerin altında olduğu tespit edilmiş ve nedenle farklı sinterleme sıcaklıkları (850-800-750-700°C) denenmiş ve 700°C sinterleme sıcaklığında beklenen elektrik iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Bu sebeple semente bakır tozu ile yapılacak çalışmalarda sinterleme sıcaklığının 700°C olmasına karar verilmiştir. Belirlenen sıcaklıkta, semente ve ticari bakır tozları ile farklı bileşim ve boyutlardaki SiC tozları karıştırılarak sinterlenmiş ve sonuçlar mukayese edilmiştir.

700°C’de sinterlenmiş numunelerin Archimedes prensibi ile ölçülen relatif yoğunluklarının SiC içeriğine ve boyutuna bağlı olarak değişimi Tablo 7.4’deki verilerden hareketle Şekil 7.10 ve 7.11’de kontür diyagramı ve yorum kolaylığı için Şekil 7.12 ve 7.13’de sütun ve çizgi grafiği olarak verilmiştir. Kontür diyagramları her üç veriyi aynı diyagramda kıyaslama imkanı verir [122]. Aynı zamanda deneyi gerçekleştirilmeyen şartlar içinde çıkması muhtemel sonuçlarla ilgili fikir yürütülmesini sağlar.

Tablo 7.4. 700°C’de sinterlenen farklı SiC tane boyutlu Cu-SiC kompozitlerinin Archimedes prensibine göre hesaplanan relatif yoğunluk değerleri.

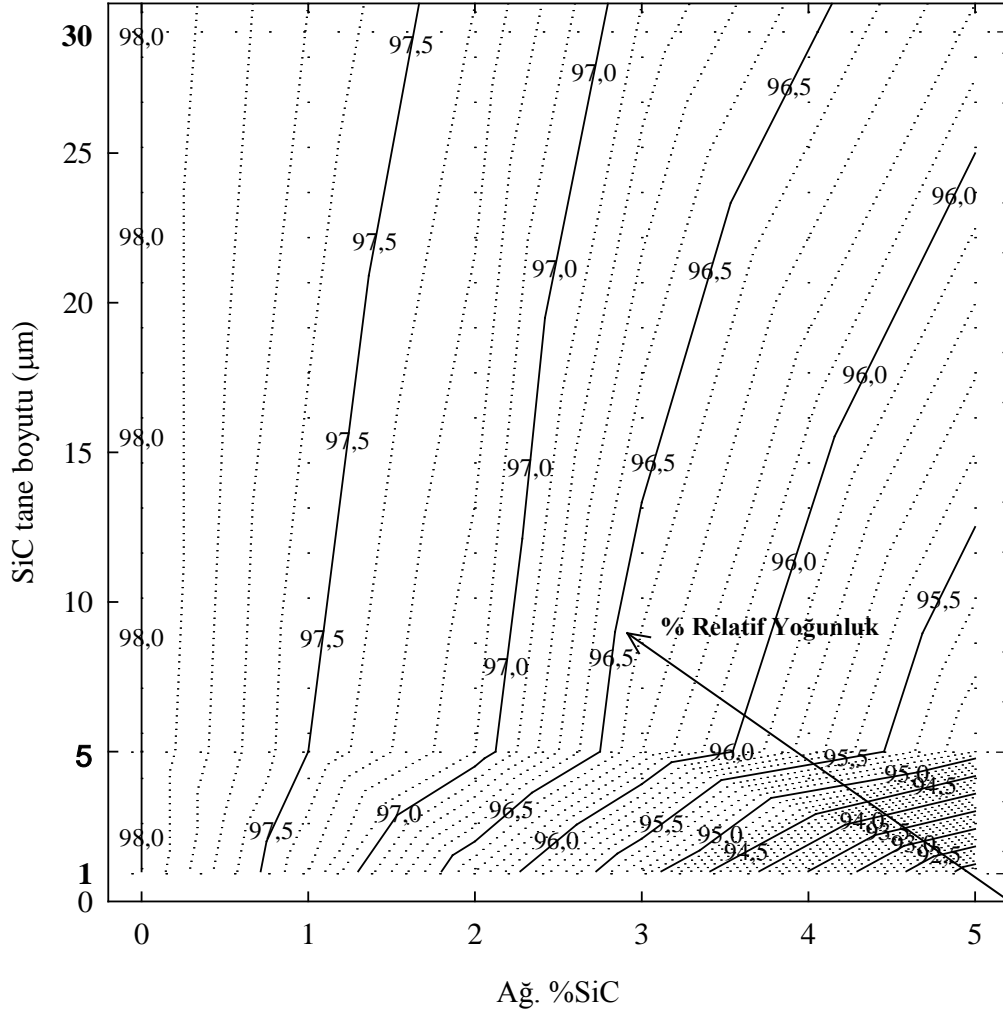
Numune	SiC tane boyutu (μm)		
	1	5	30
	% Relatif Yoğunluk		
Ct	98,0 \pm 0,6	98,0 \pm 0,6	98,0 \pm 0,6
C1St	97,3 \pm 0,7	97,5 \pm 0,7	97,7 \pm 1,1
C2St	96,3 \pm 1,2	97,1 \pm 0,4	97,4 \pm 1,2
C3St	95,2 \pm 0,5	96,3 \pm 0,4	96,9 \pm 1,0
C5St	91,8 \pm 0,5	95,2 \pm 0,4	96,2 \pm 0,8
Cs	97,5 \pm 0,8	97,5 \pm 0,8	97,5 \pm 0,8
C1Ss	96,2 \pm 1,3	96,6 \pm 0,7	97,0 \pm 1,3
C2Ss	95,5 \pm 1,7	96,0 \pm 0,3	96,5 \pm 0,4
C3Ss	92,3 \pm 1,1	94,9 \pm 0,3	95,4 \pm 0,3
C5Ss	90,9 \pm 1,2	93,7 \pm 0,5	95,0 \pm 1,1

Hem ticari hem de semente bakır tozuna SiC takviyesi ile relatif yoğunluklar azalmaktadır. SiC partikül takviyeli numunelerde yoğunluk, SiC partikül boyutu artışı ile artmaktadır. 1 μm partikül boyutlu SiC ile takviye edilen C1St’nin relatif yoğunluğu %97,3, C1Ss’in %96,2 iken; 5 μm ’luk SiC takviyesinde bu değerler sırasıyla %97,5 ve %96,6; 30 μm ’luk SiC takviyesinde ise %97,7 ve %97’ye yükselmiştir.

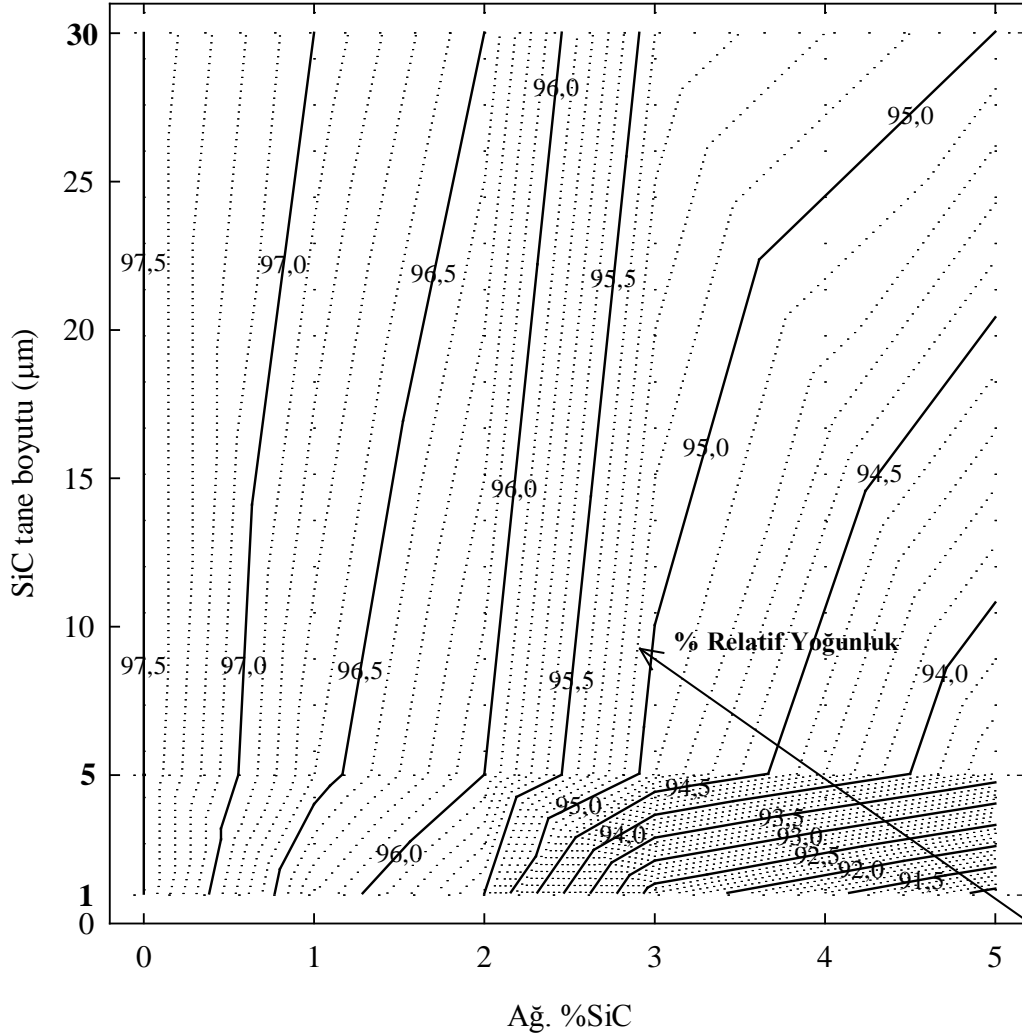
Kompozit numunelerde düşük SiC hacim oranlarında Cu-SiC arayüzeyi daha azdır ve bakır atomları için daha az difüzyon bariyeri söz konusudur. Bakır atomlarının kolaylıkla difüze olması ve SiC partikülleri arasındaki boşlukları doldurabilmesi kompozitte yoğunluk artışına neden olur [123]. SiC partikül boyutu arttıkça yüzey alanı ve Cu-SiC arayüzeyleri azalmakta, buna bağlı olarak ta daha yoğun bir yapı ortaya çıkmaktadır.

Şekil 7.10-7.11’deki diyagramlardan SiC miktarı ve partikül boyutundaki artış ile relatif yoğunlukların değişimi görülmekte ve üç veri aynı diyagramda

kıyaslanabilmektedir. Ayrıca, deneyi gerçekleştirmediğimiz ağ.%4 SiC ve 1-5 ile 5-30 μm arasındaki SiC tane boyutları için çıkması muhtemel sonuçlar diyagramlar yardımı ile belirlenebilir.

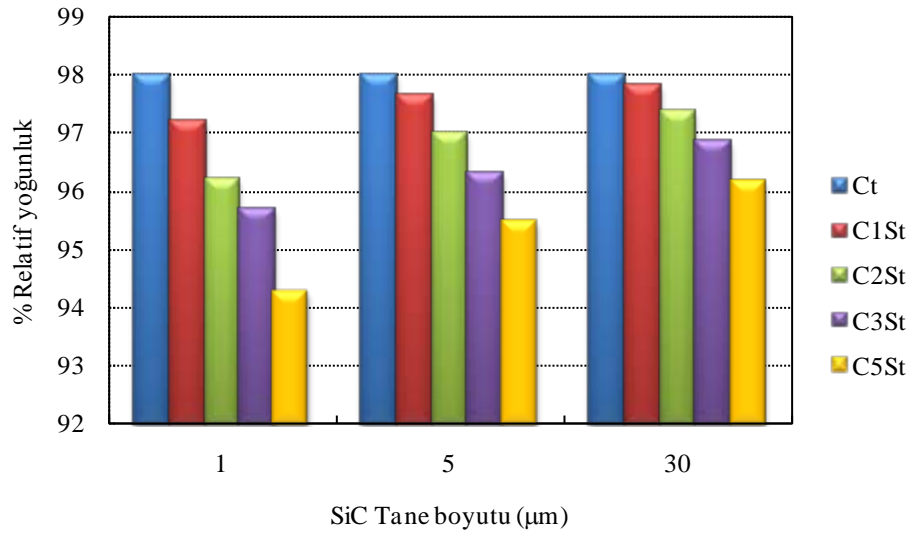


Şekil 7.10. 700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluğunun kontür diyagramında değişimi.

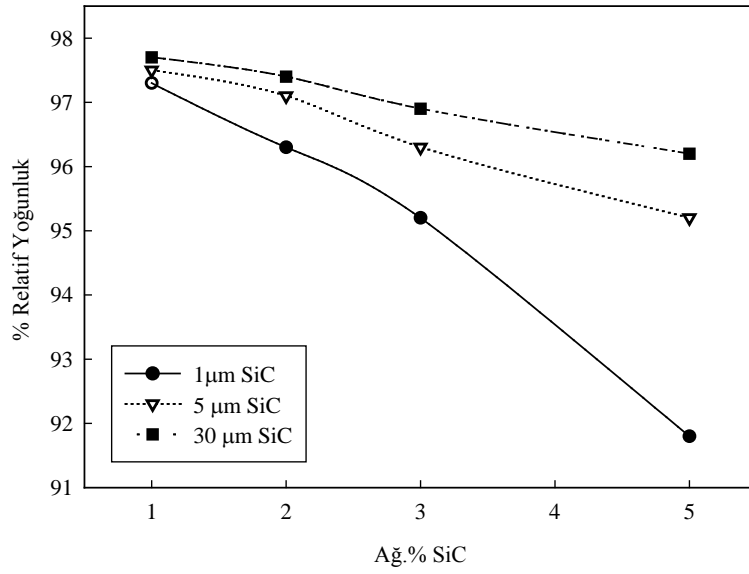


Şekil 7.11. 700°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluğunun kontür diyagramında değişimi.

Şekil 7.12a ve 7.13a'da 700°C'de sinterlenmiş numunelerin relatif yoğunluklarının, her üç SiC partikül boyutu için, SiC miktarındaki artış ile azaldığı, artan partikül boyutu ile birlikte de arttığı görülmektedir. Şekil 7.12b ve 7.13b'de ağırlıkça % SiC miktarına bağlı olarak, her üç SiC Partikül boyutu için, % relatif yoğunluğun değişimi verilmiştir. Şekillerden 1μm partikül boyutunda SiC takviyesinde, relatif yoğunluğun çok geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir.

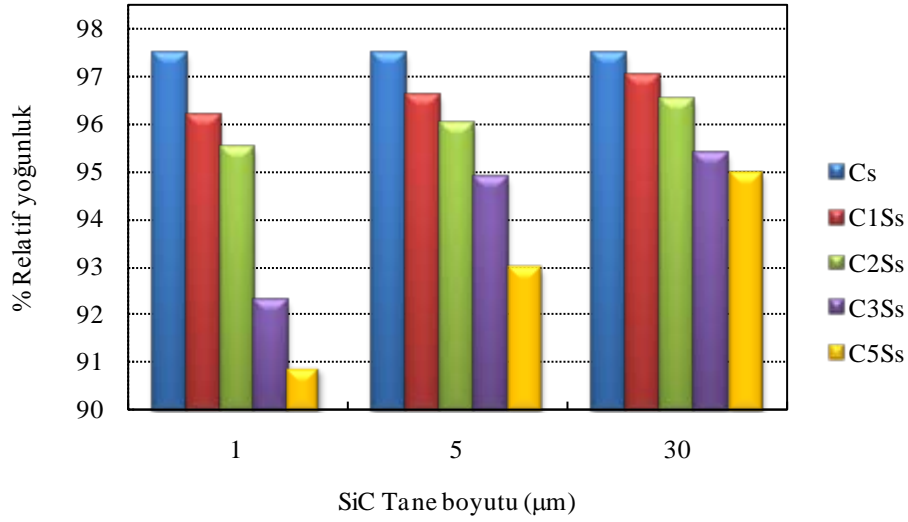


a)

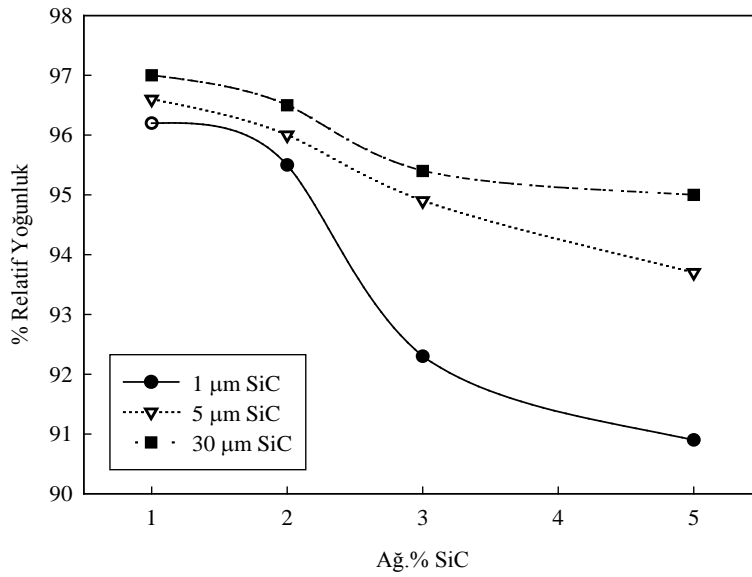


b)

Şekil 7.12. 700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluk değişiminin a) sütun grafiği, b) çizgi grafiği



a)



b)

Şekil 7.13. 700°C’de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak %Relatif Yoğunluk değişiminin a) sütun grafiği, b) çizgi grafiği

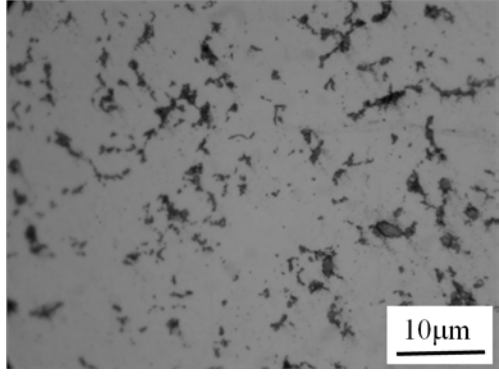
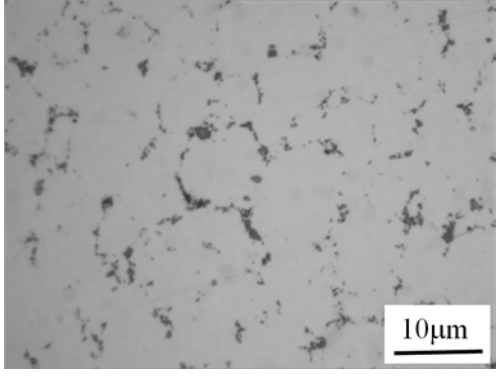
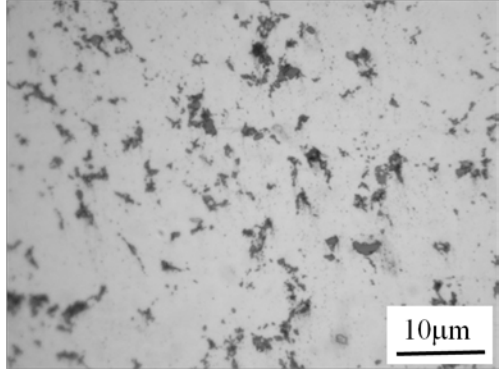
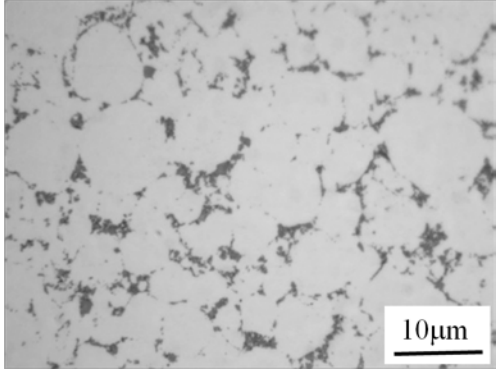
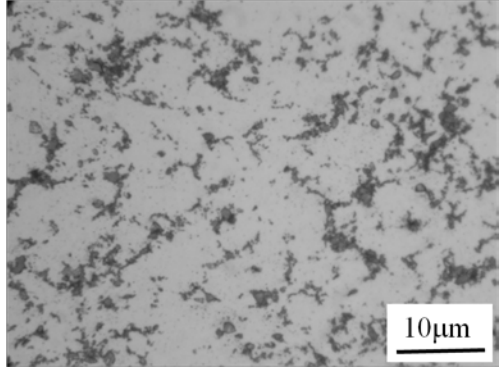
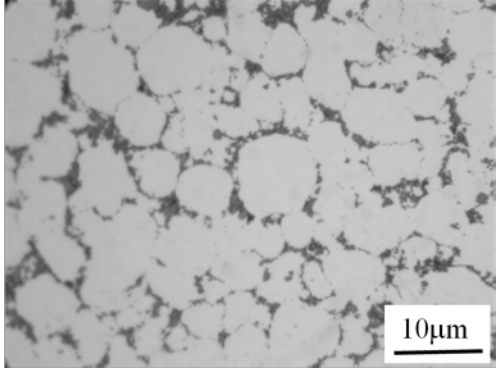
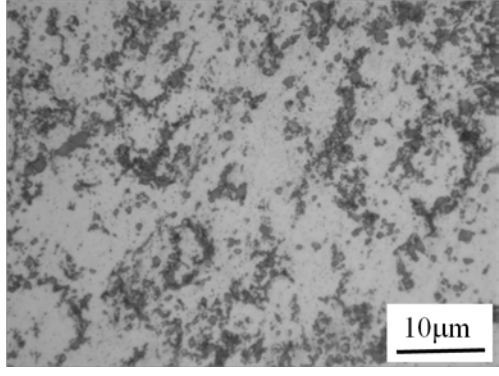
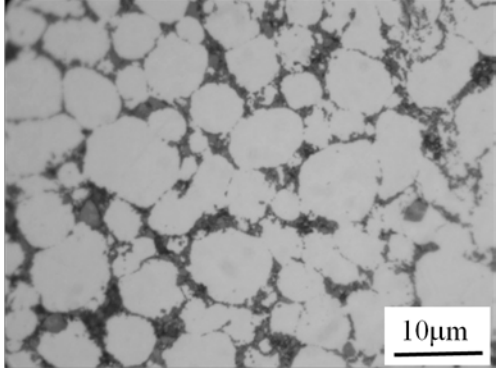
700°C’de sinterlenen, üç farklı boyuta sahip SiC ile takviye edilen semente Cu-SiC kompozitlerin relatif yoğunlukları birbirine yakındır ve hazır tozların sahip olduğu yoğunluklara benzerdir. Kompozitlerin relatif yoğunlukları SiC partikül boyutunun artışıyla artış sergilemiştir ve en iyi yoğunluk değerleri 30 μm’luk SiC partikül takviyeleri ile elde edilmiştir. SiC’ün artan partikül boyutu ile birlikte, daha fazla bakır-bakır taneleri birbirleri ile temas etmekte ve sinterleme sonrasında daha yoğun bir yapı ortaya çıkmaktadır.

7.2.2. Optik- SEM incelemesi

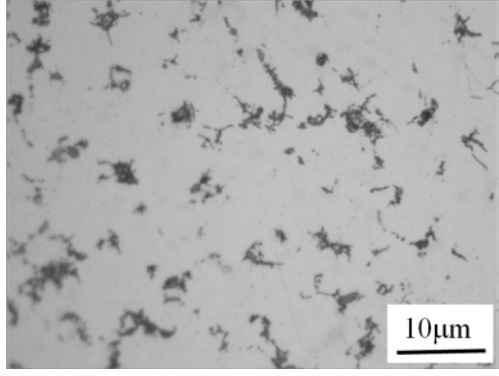
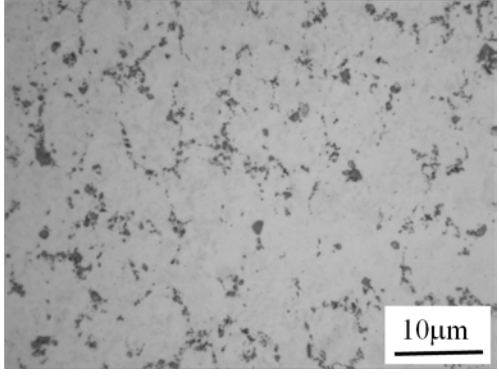
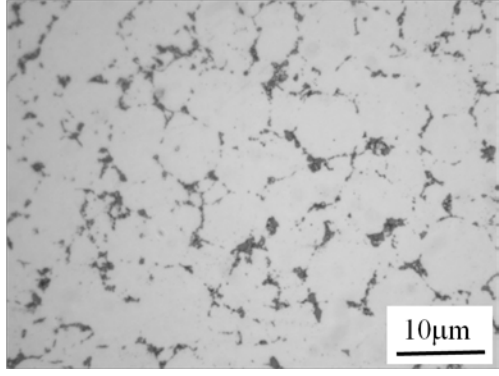
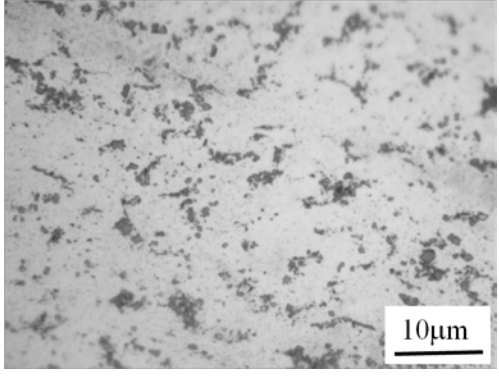
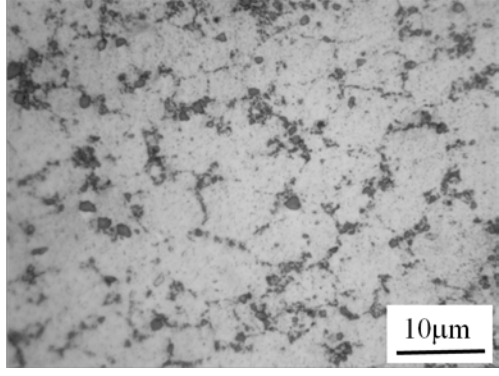
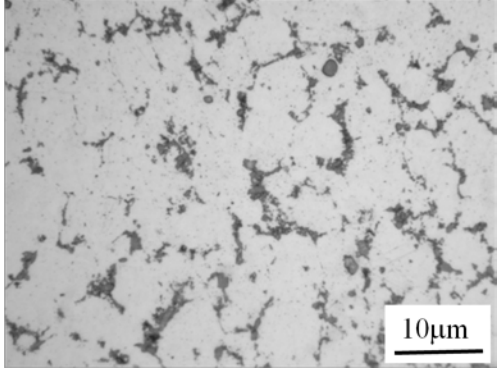
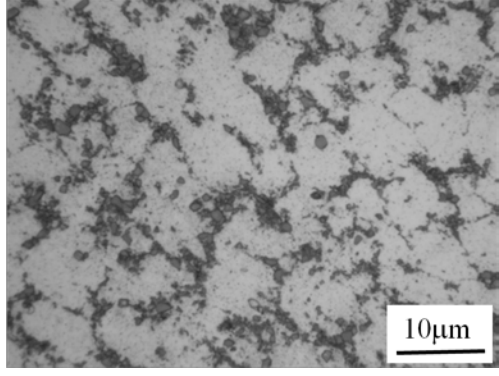
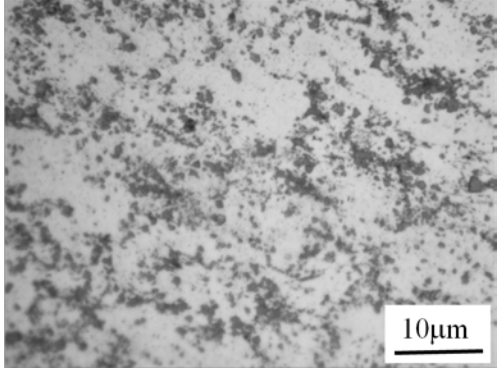
Partikül boyutu $1\mu\text{m}$ olan SiC ile takviye edilmiş, 900°C 'de sinterlenen, ticari ve semente Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları Şekil 7.14'de, 950°C ve 1000°C 'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları Şekil 7.15'te verilmiştir.

Mikrograflarda bakır matris açık renk ve SiC partikülleri koyu gri olarak görülmektedir. SiC partikülleri bakır matrisinde nispeten homojen bir dağılıma sahiptir ve genel olarak bakır tanelerinin etrafını sarmaktadır. Lee ve arkadaşları [125] eğer disperse partiküller homojen dağılmazsa, bundan kompozitin mekanik ve elektriksel özelliklerinin negatif yönde etkileneceğini belirtmişlerdir. En homojen ve düzenli dağılım 900°C 'de sinterlenen numunelerde gözükmektedir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça SiC dağılımının karmaşıklaştığı ve tane içlerine doğru ilerlediği görülmektedir. SiC miktarı arttıkça da, SiC tozları bakırın tüm tane sınırlarına doğru yayılmakta, çok belirgin bir ağ oluşturmaktadır ve yüksek SiC yüzdelerinde tane içlerine girmiştir. 950°C ve 1000°C 'de yüksek SiC içerikli numunelerde tane sınırlarındaki SiC ağının dağıldığı ve bakır taneleri içerisinde yer aldığı görülmektedir (Şekil 7.15). Semente bakır tozları kullanılarak 900°C 'de sinterlenen kompozitlerin mikroyapılarına bakıldığında ticari tozlarda olduğu gibi belirgin ve küresel bir tane yapısı gözlenmemiştir (Şekil 7.14). Bu, muhtemelen tozlardaki topaklanmadan kaynaklanmaktadır. Ticari Cu-SiC kompozitlerinin daha küresel ve eş eksenli tane yapısına sahip olduğu optik mikrograflardan da açıkça görülmektedir.

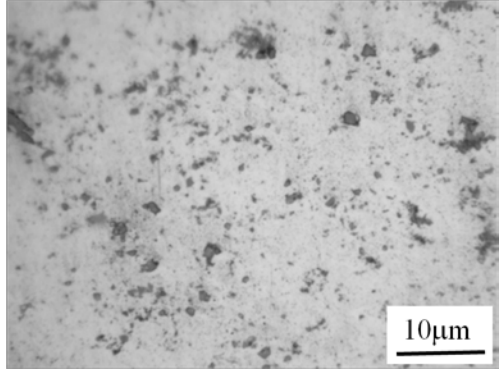
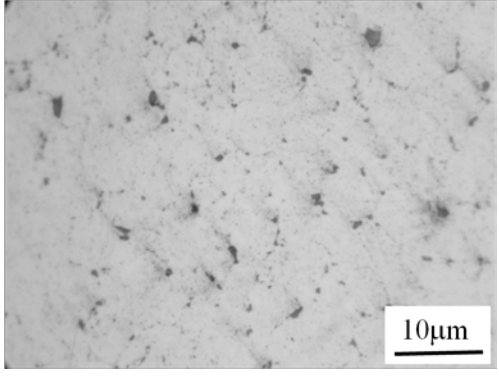
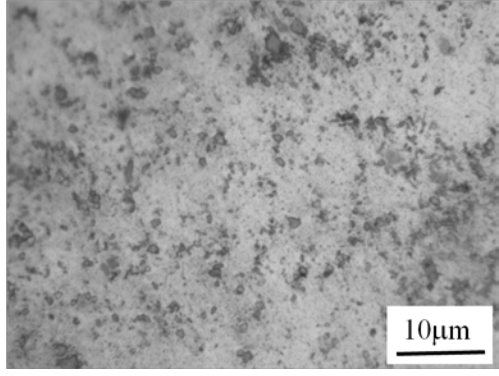
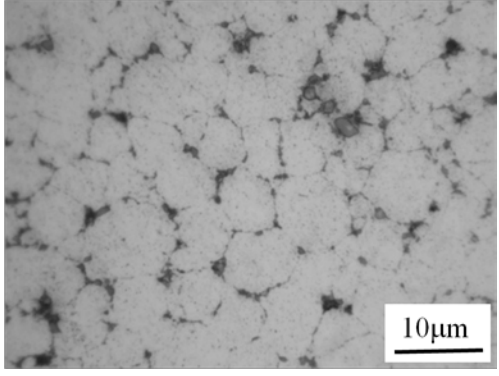
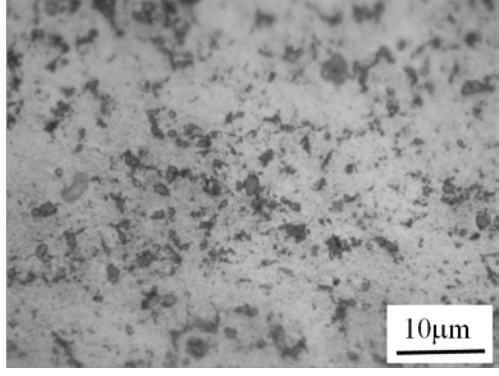
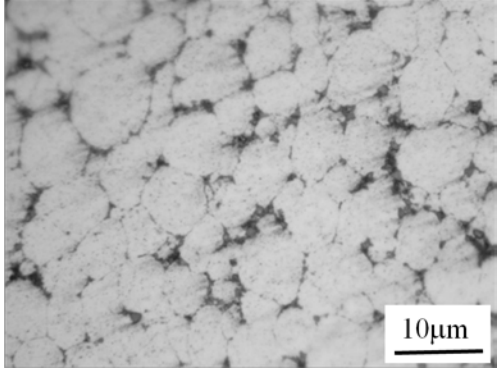
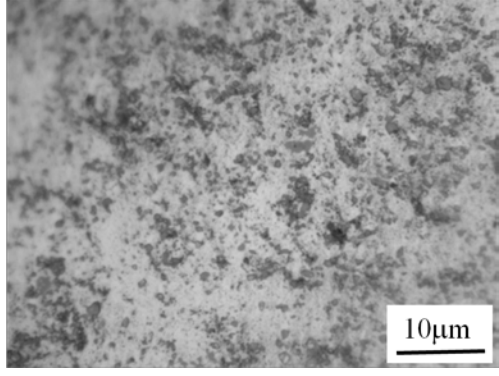
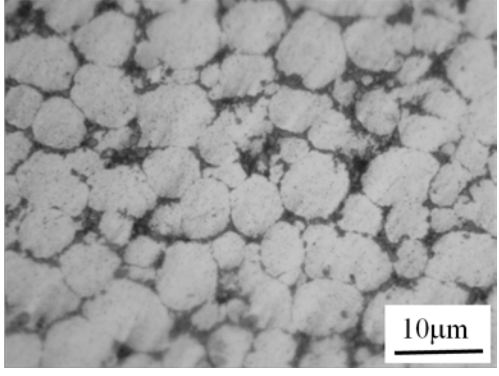
Shu ve arkadaşları [124] yaptıkları çalışmada Cu-SiC reaksiyonunun olumsuz etkisinden kaçınmak için sinterleme sıcaklığının 750°C 'nin altında olmasının ve SiC'e bakır ile ön kaplanma yapılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Zaten gerçekleştirdiğimiz deneysel çalışmalar neticesinde semente Cu-SiC kompozitleri için 700°C en uygun sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta SiC'ün tane boyutları da değiştirilerek özellikler üzerine etkisi incelenmiş ve sonuçlar ticari tozlarla mukayese edilmiştir. Sırasıyla $1\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ ve $30\mu\text{m}$ partikül boyutuna sahip SiC ile takviye edilmiş, 700°C 'de sinterlenen ticari ve semente Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları Şekil 7.16-7.17'de verilmiştir.

Ağ. % SiC	Sıcaklık, 900°C	
	Semente Toz	Ticari Toz
1		
2		
3		
5		

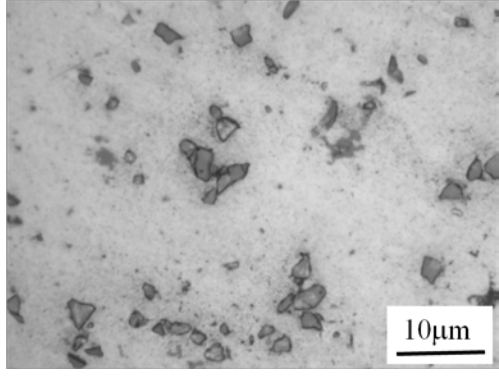
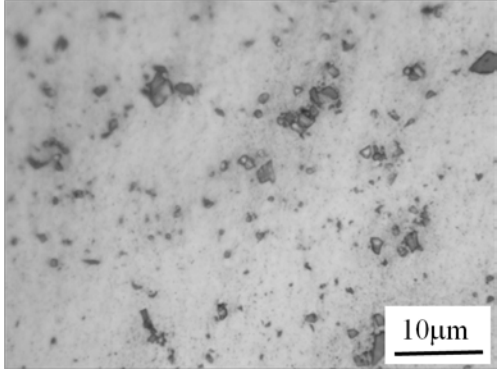
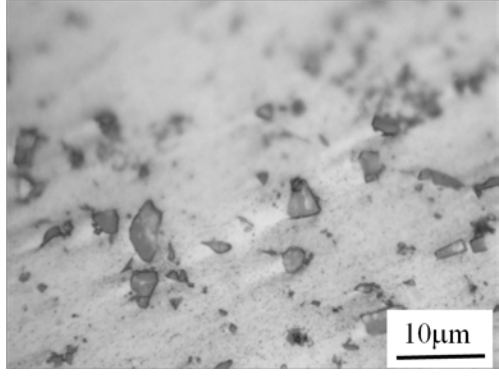
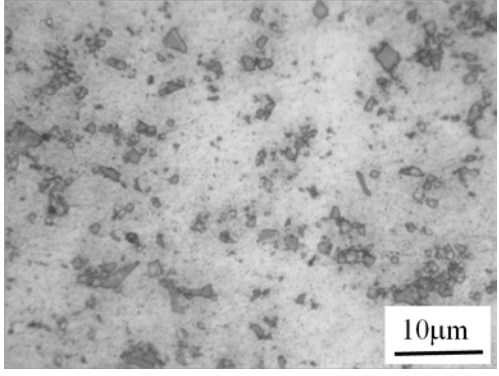
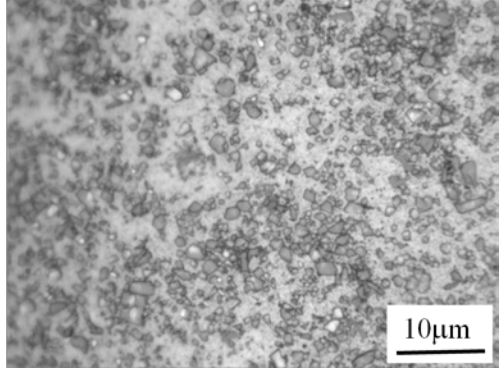
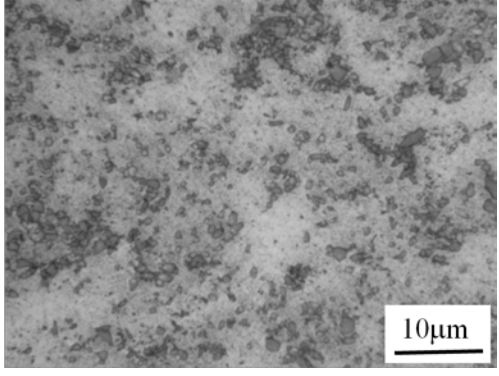
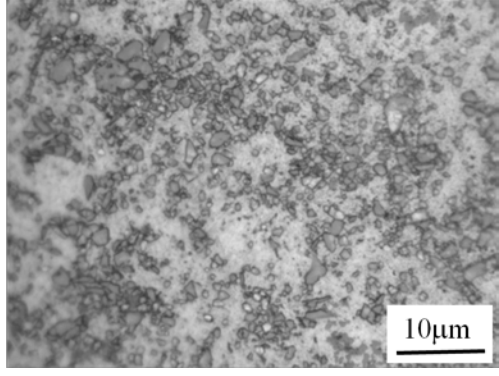
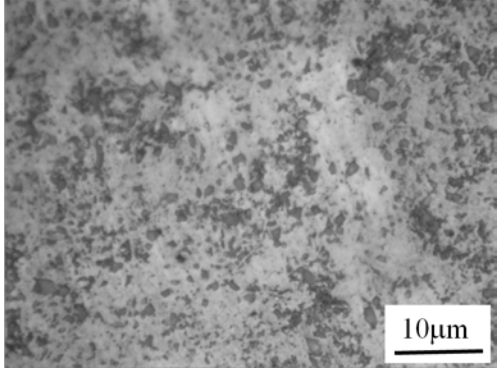
Şekil 7.14. 900°C'de sinterlenmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikroagrafları

Ağ. % SiC	Sıcaklık (°C)	
	950	1000
1		
2		
3		
5		

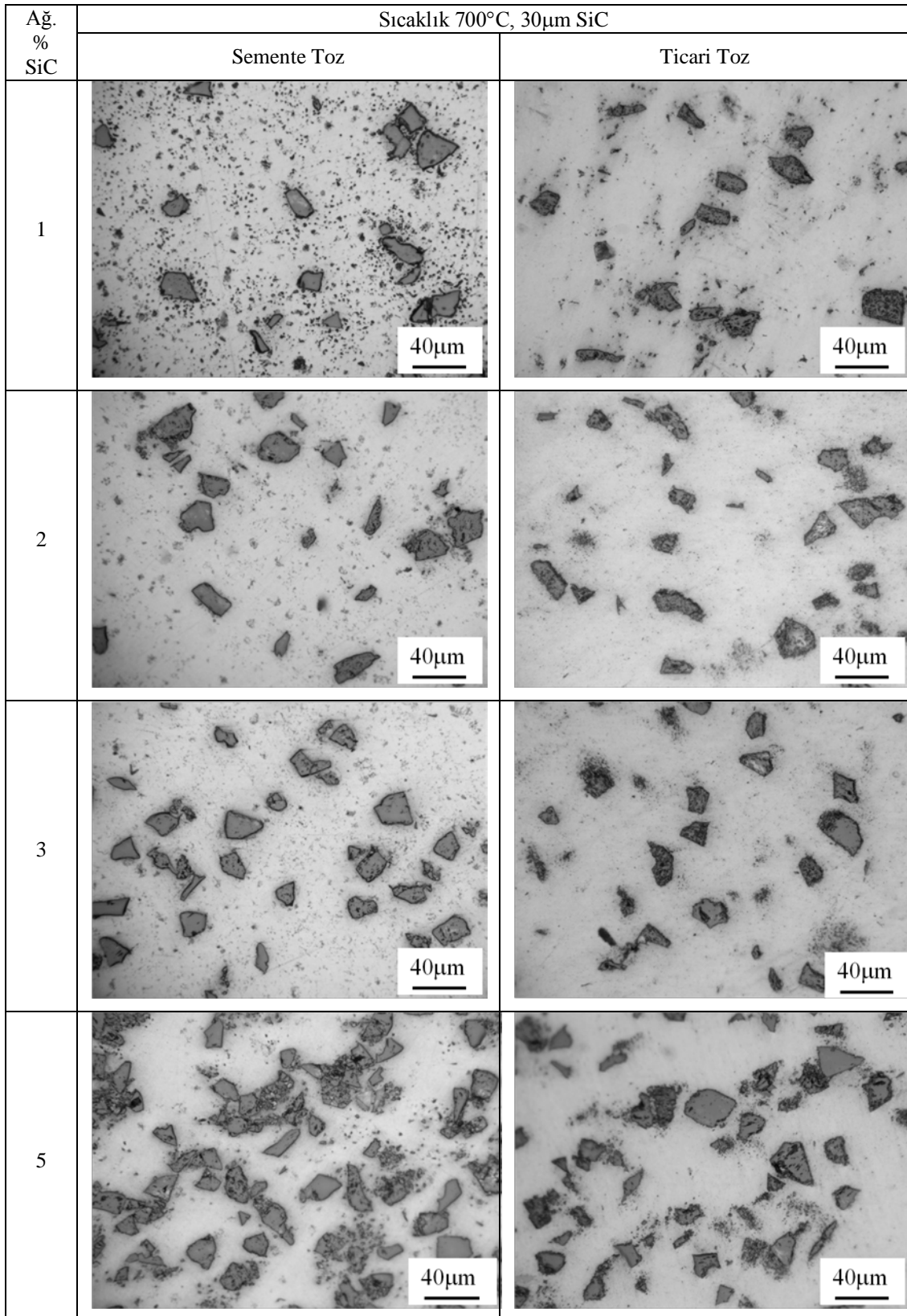
Şekil 7.15. 950°C ve 1000°C’de sinterlenmiş ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları

Ağ. % SiC	Sıcaklık 700°C, 1µm SiC	
	Semente Toz	Ticari Toz
1		
2		
3		
5		

Şekil 7.16. 700°C'de sinterlenmiş 1µm'luk SiC ile takviye edilmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları

Ağ. % SiC	Sıcaklık 700°C, 5µm SiC	
	Semente Toz	Ticari Toz
1		
2		
3		
5		

Şekil 7.17. 700°C'de sinterlenmiş 5µm'luk SiC ile takviye edilmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları

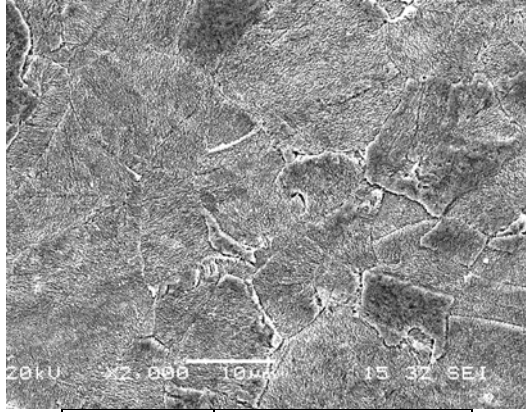


Şekil 7.18. 700°C'de sinterlenmiş 30µm'lık SiC ile takviye edilmiş semente ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin optik mikrografları

Şekil 7.19'da parlatılmış ve %40 HNO₃+H₂O çözeltisi ile dağlanmış numunelerin SEM mikrografları ve bu mikrograflardan alınan EDS alan analizleri verilmektedir.

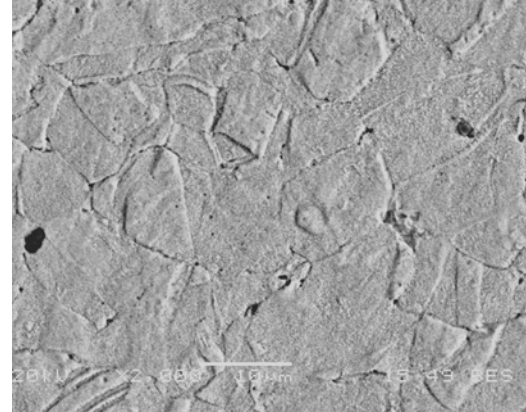
Mikrograflardan sıcaklık artışı ile bakır tane boyutundaki artış açık şekilde görülmektedir. Aynı sinterleme sıcaklığında ticari ve semente bakır tozlarından sinterlenen numunelerin tane boyutları hemen hemen aynıdır (Şekil 7.19a,b ve e,f).

Ticari tozlardan sinterlenen bakır numunelerin EDS analizleri Cu elementinin dışında başka bir safsızlığın bulunmadığını göstermektedir. Semente tozlardan hazırlanan Cu numunelerinde ise Cu'nun yanında Fe ve O₂ elementi de tespit edilmiştir. Bu safsızlıklar toz karakterizasyon bölümünde belirtildiği gibi, sementasyon prosesinden kaynaklanmaktadır.



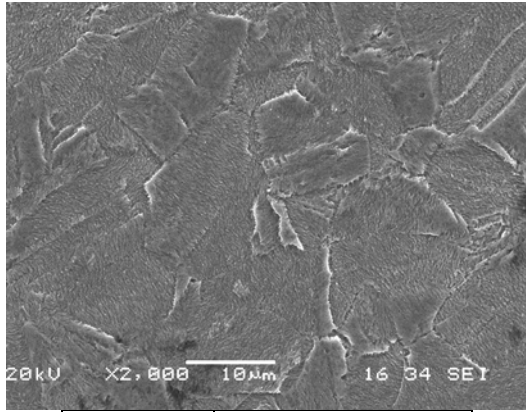
Sıcaklık (°C)	Ağ. %		
	O	Fe	Cu
900	-	-	100

a) Ct



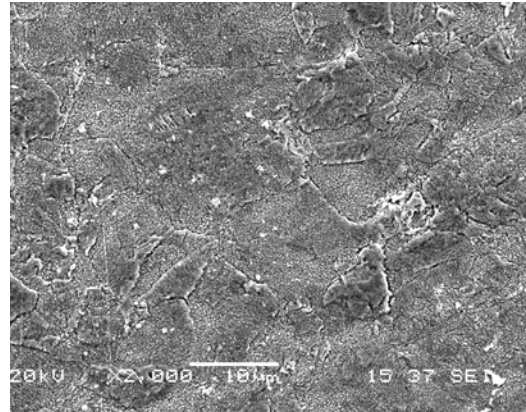
Sıcaklık (°C)	Ağ. %		
	O	Fe	Cu
900	2.096	0.833	97.071

b)Cs



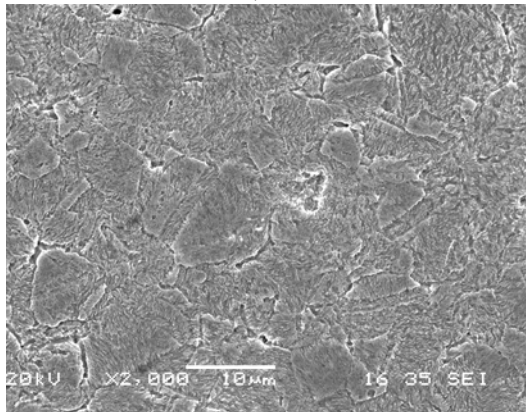
Sıcaklık (°C)	Ağ. %		
	O	Fe	Cu
950	-	-	100

c) Ct



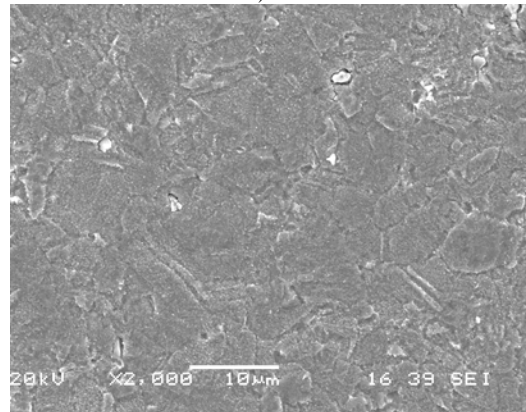
Sıcaklık (°C)	Ağ. %		
	O	Fe	Cu
1000	-	-	100

d) Ct



Sıcaklık (°C)	Ağ. %		
	O	Fe	Cu
700	-	-	100

e) Ct

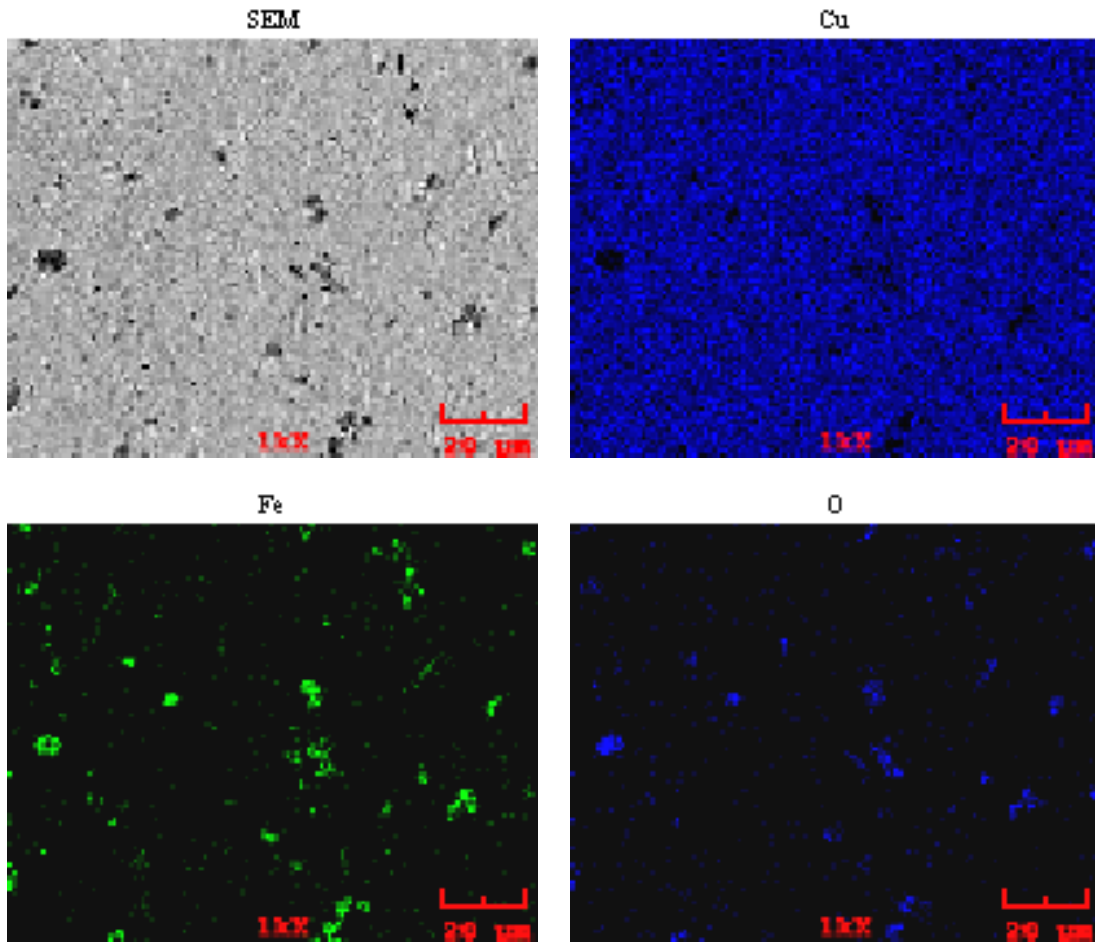


Sıcaklık (°C)	Ağ. %		
	O	Fe	Cu
700	1,045	0,648	98,307

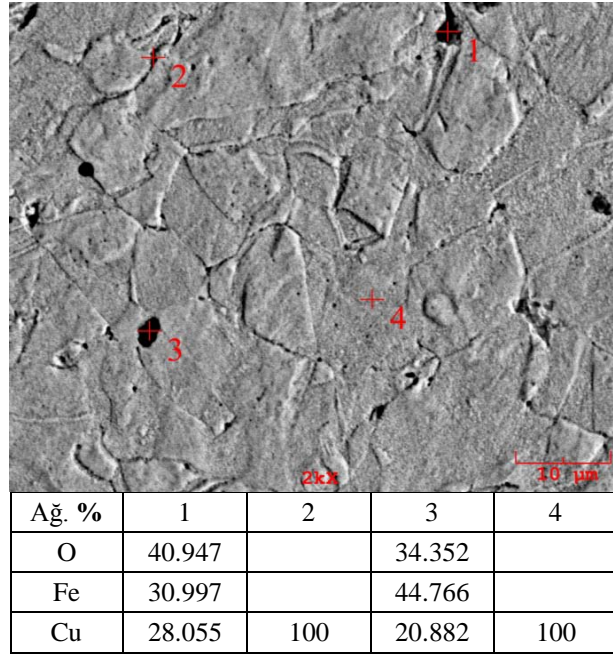
f) Cs

Şekil. 7.19 a) 900°C'de sinterlenmiş Ct numunesinin, b) 900°C'de sinterlenmiş Cs numunesinin, c) 950°C'de sinterlenmiş Ct numunesinin, d) 1000°C'de sinterlenmiş Ct numunesinin, e) 700°C'de sinterlenmiş Ct numunesinin, f) 700°C'de sinterlenmiş Cs numunesinin SEM mikrografları ve EDS analizleri.

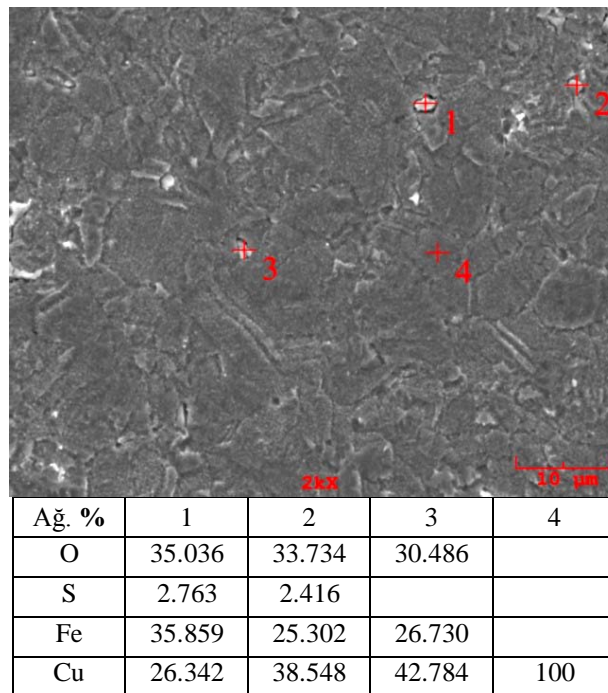
900°C’de sinterlenen semente bakır numunesinin SEM-EDS alan (map) analizinde, SEM mikrografında gri gözüken bölgelerde demir ve oksijen bulunduğu gözlenmiş (Şekil 7.20) ve Şekil 7.21’deki noktasal EDS analizi de bunu teyit etmiştir. Siyah renkte görülen 1 ve 3 noktalarından alınan EDS analizinde demir ve oksijenin bulunduğu, matristeki 4 noktasından ve tane sınırındaki 2 noktasından alınan analizde de oksijenin bulunmadığı tespit edilmiştir. Semente bakır tozunun karakterizasyon incelemelerinde de gözlemlendiği gibi (Bkz. Şekil 7.6) Fe ve O₂, bakır tozunun üretiminden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.22’de 700°C’de sinterlenmiş semente bakır numunesinin EDS analizi verilmiştir. Şekil 7.20’deki EDS analizinde SEM-BES mikrografındaki Fe ve O₂’li bölgeler siyah renkte görülürken Şekil 7.21’deki SEM-SEI mikrografında açık gri renkte gözükmektedir. Matris içerisindeki açık gri renkte görülen bu noktalarda da Fe ve O₂ bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.20. 900°C’de sinterlenmiş Cs numunesinin map analizi



Şekil 7.21. 900°C'de sinterlenmiş Cs numunesinin EDS analizi

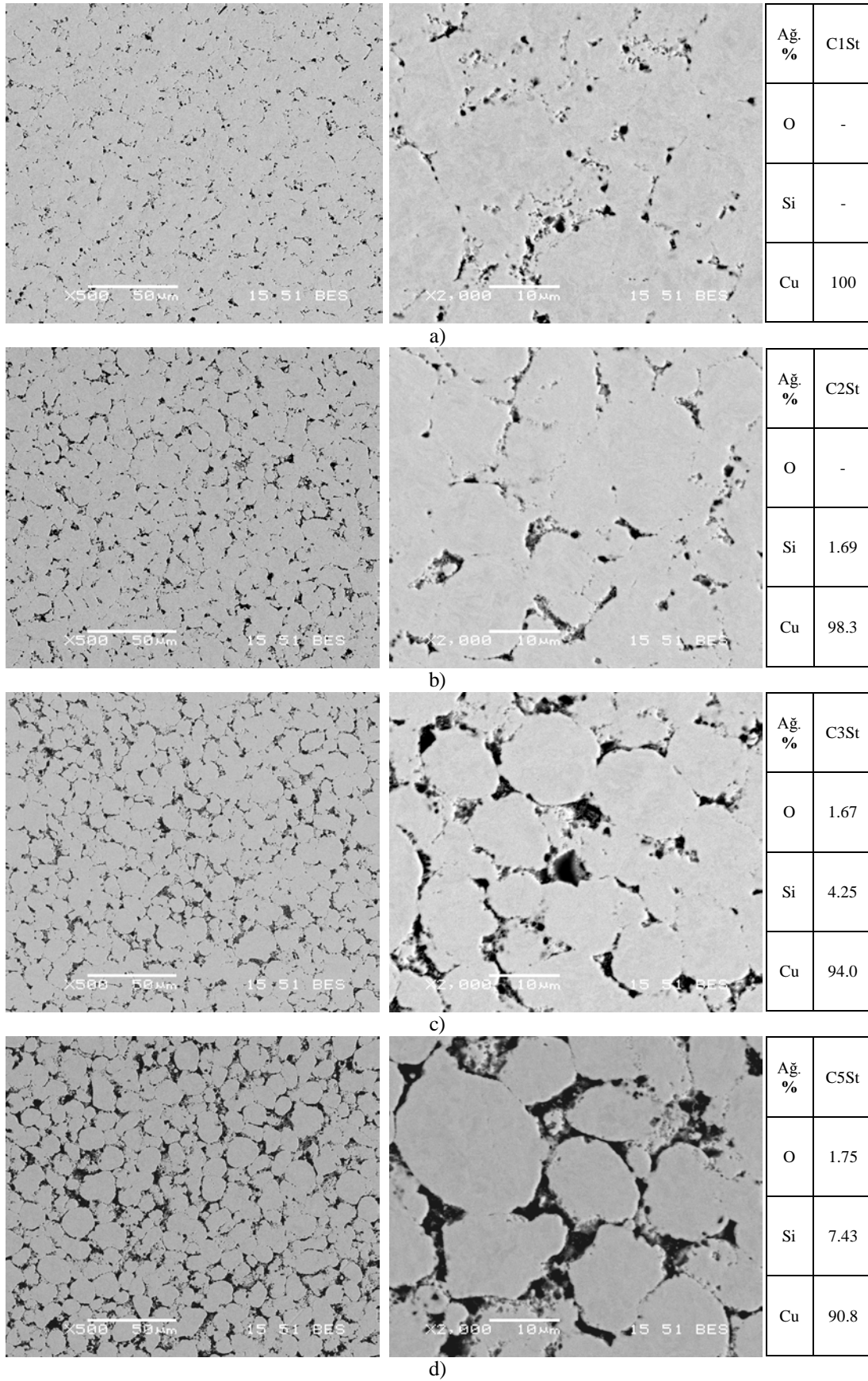


Şekil 7.22. 700°C'de sinterlenmiş Cs numunesinin EDS analizi.

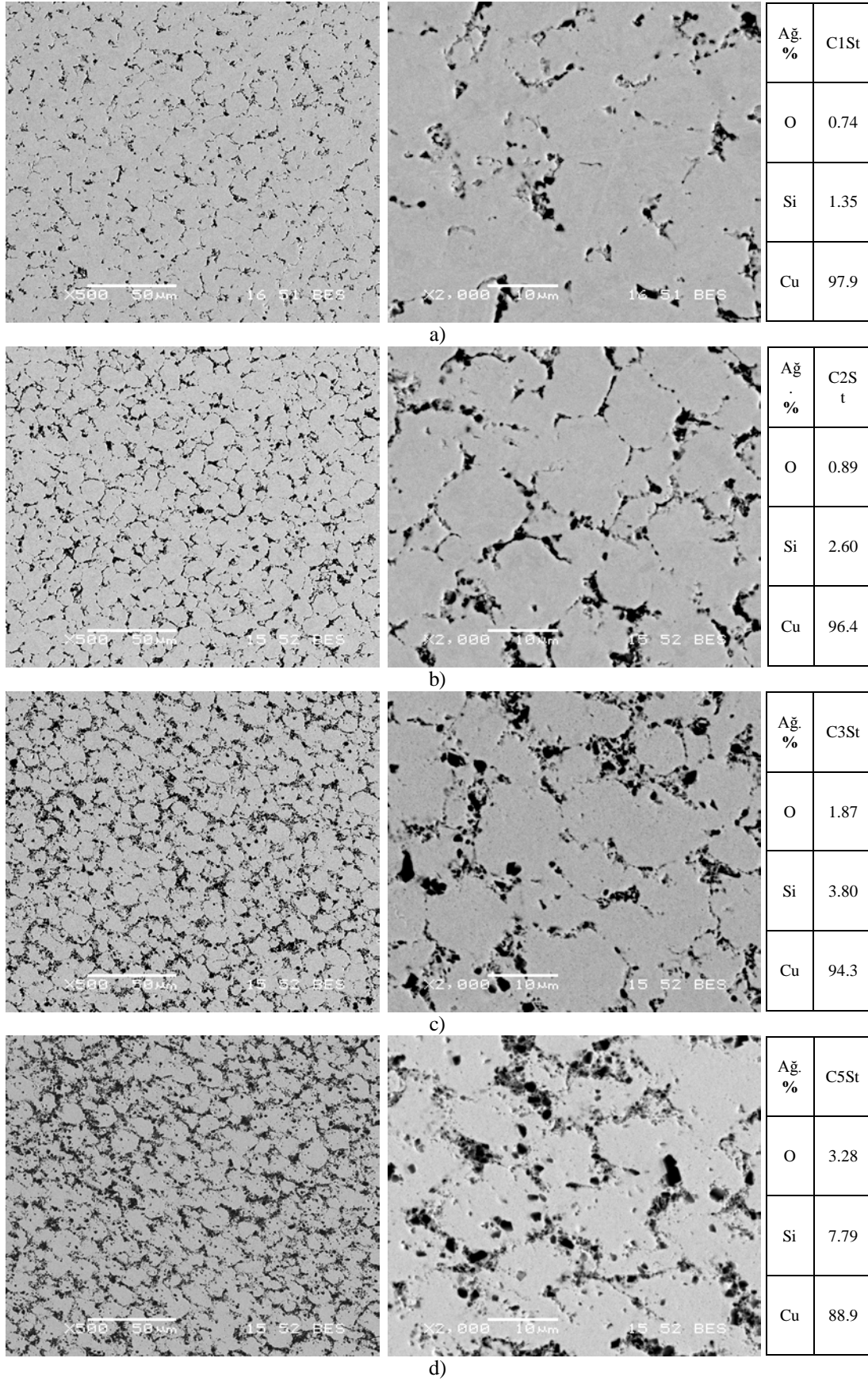
Kompozit numunelerin SEM incelemeleri optik mikroskop (OM) incelemelerini teyit eden sonuçlar vermiştir (Şekil 7.23-7.26). Düşük sıcaklıklarda sinterlenen düşük SiC içerikli numunelerde SiC'lerin tane sınırlarına nispeten izole partiküller şeklinde yerleştiği, konsantrasyon arttıkça tüm sınırı kaplayan filmler oluşturduğu açık bir şekilde görülmektedir. SiC partiküllerinin hakim olarak bakır tanelerinin birleşme

noktalarında yer aldığını teyit etmek amacıyla 900°C’de sinterlenmiş semente Cu-SiC kompozit malzemeleri %40 HNO₃ + %60 H₂O ile dağlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir (şekil 7.26).

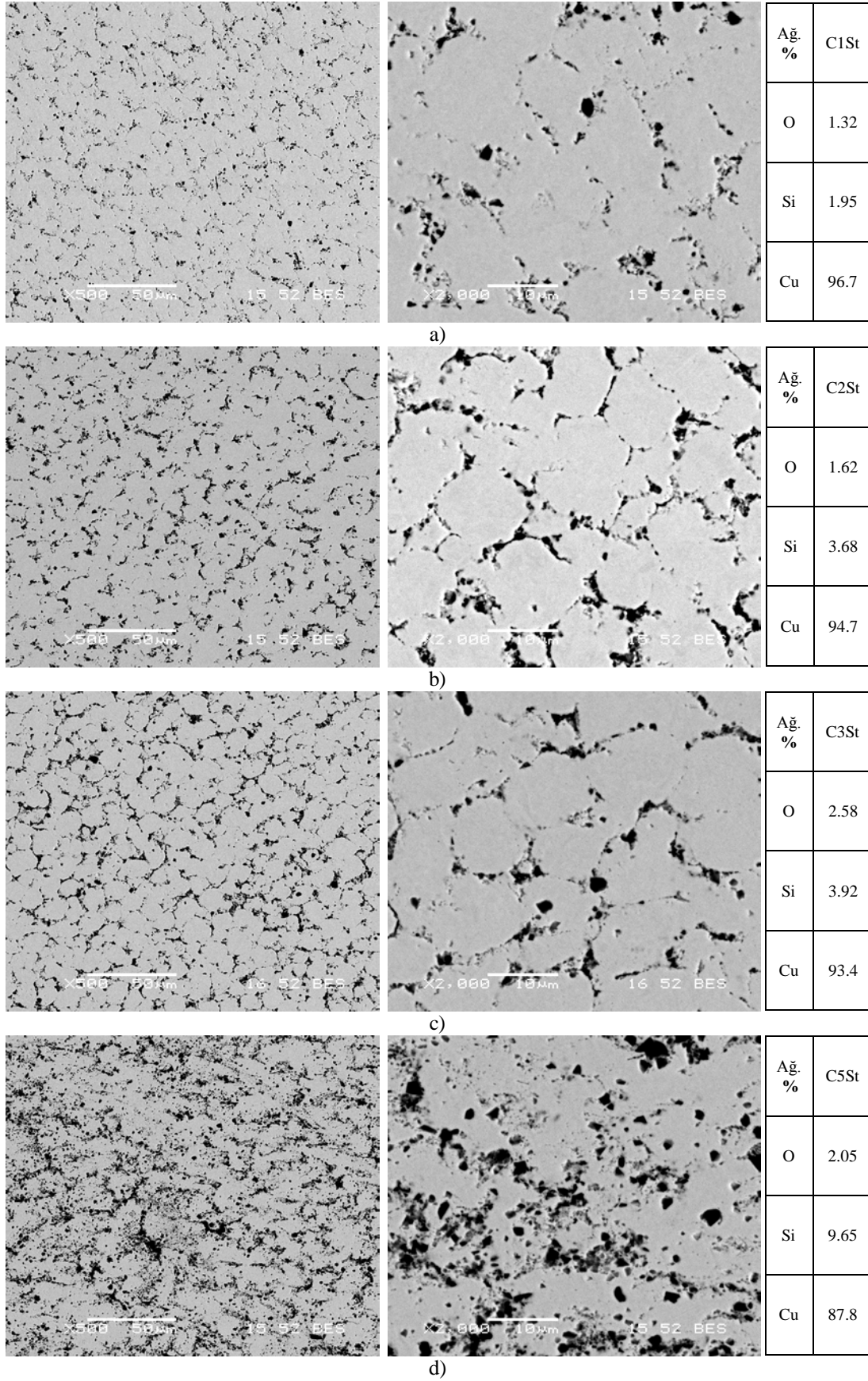
SEM mikrograflarının yanında verilen genel EDS analizlerinden görülebileceği gibi oksijen miktarı, sinterleme sıcaklığının yükselmesi ve ağ.% SiC miktarının artışıyla artış göstermiştir. Benzer şekilde ağ.% SiC miktarı arttıkça, Si miktarları da artmıştır. 900°C’de sinterlenmiş C5St numunesinde genel SiC ve O₂ dağılımını görmek amacıyla SEM-EDS alan (map) taraması yapılmıştır (şekil 7.27). Analizden optik ve SEM çalışmalarında gözlemlendiği gibi SiC’ün ve beraberinde oksijenin de tane sınırlarında dağıldığı görülmüştür. Bu durum oksijenin Si ile birlikte bulunduğunun ve artan Si miktarı ile O₂ miktarının da artışının nedenini göstermektedir.



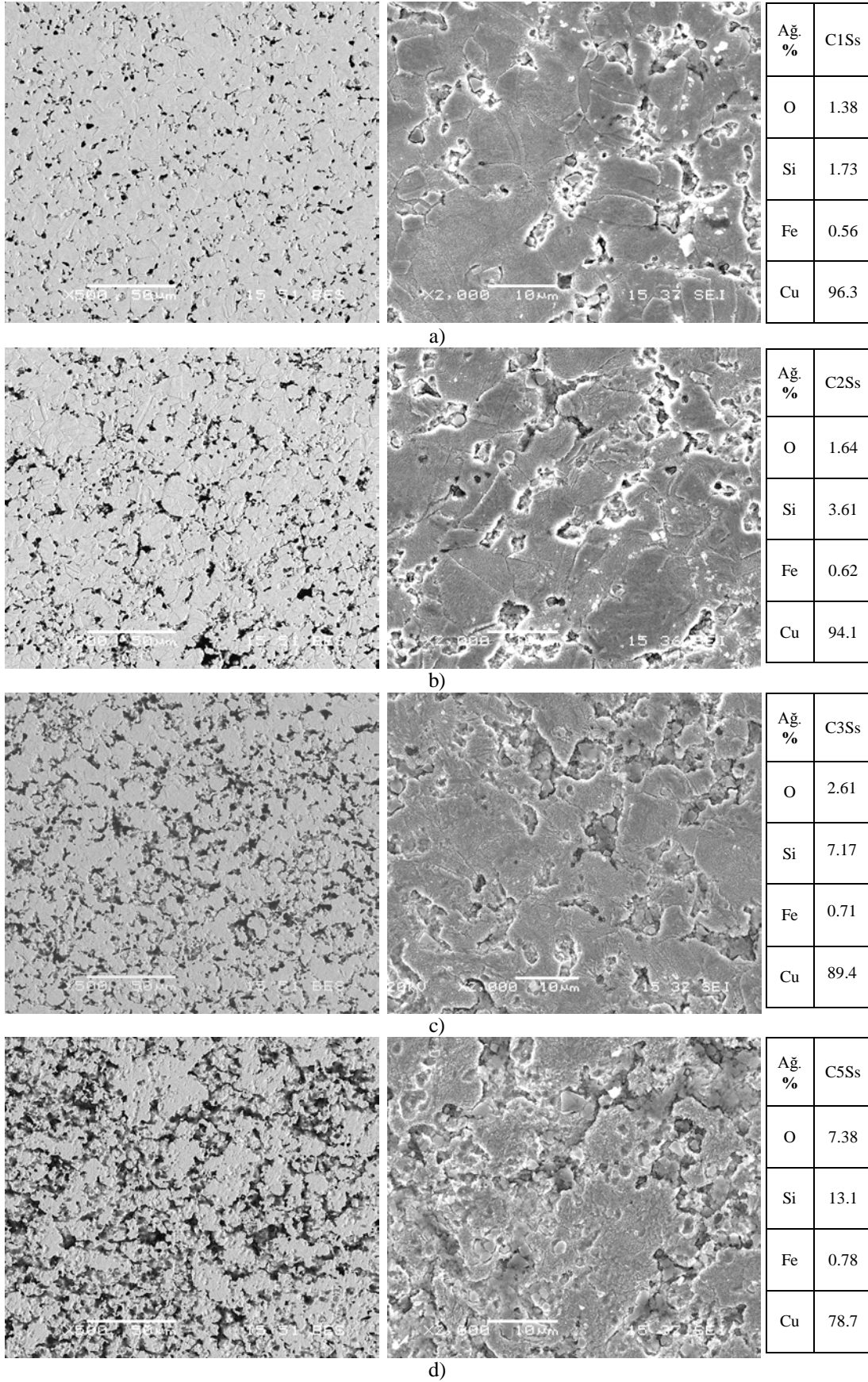
Şekil 7.23. 900°C’de sinterlenmiş a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri



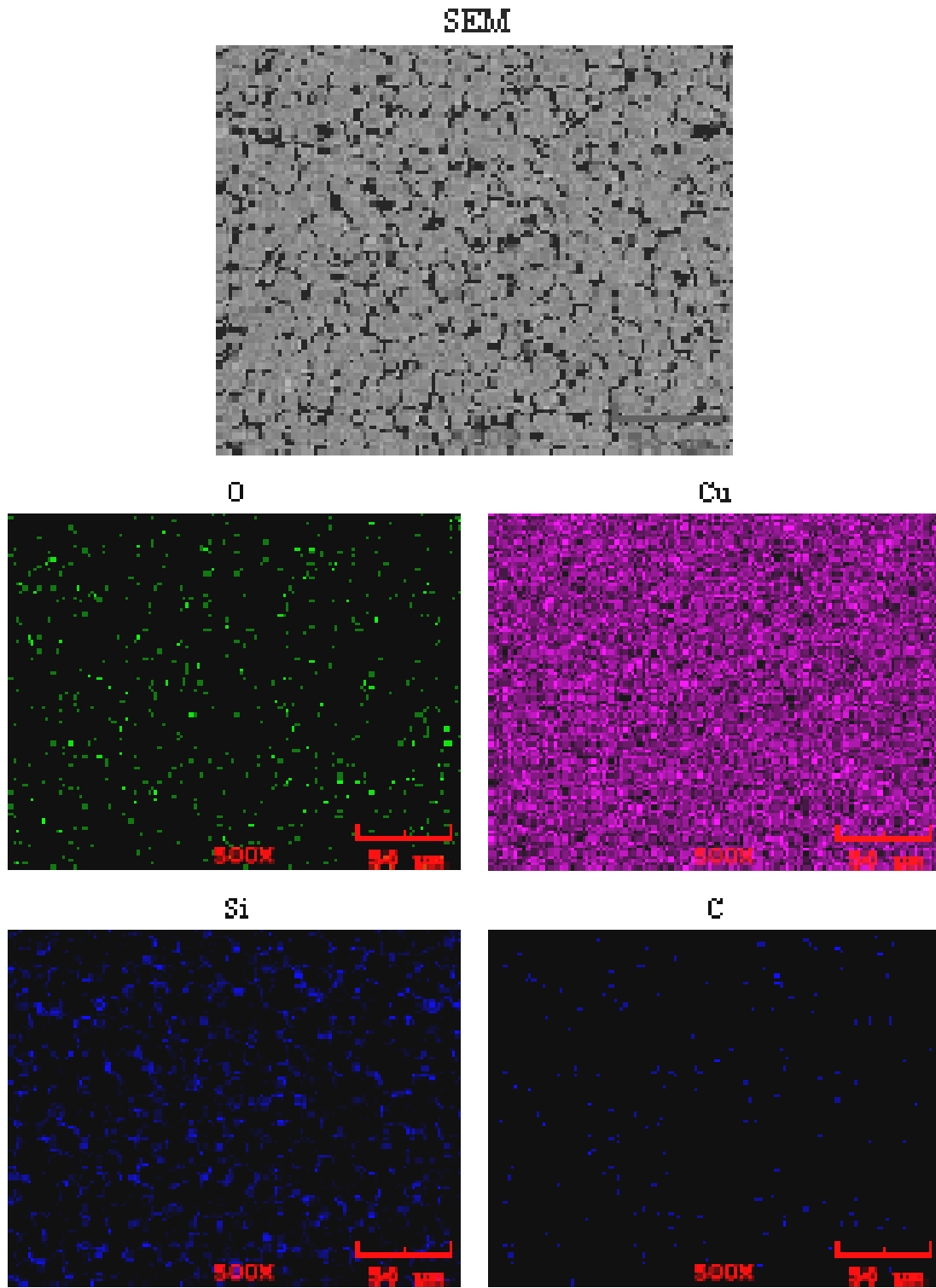
Şekil 7.24. 950°C’de sinterlenmiş a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri



Şekil 7.25. 1000°C’de sinterlenmiş a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri



Şekil 7.26. 900°C’de sinterlenmiş a) C1Ss, b) C2Ss, c) C3Ss ve d) C5Ss kompozitlerinin SEM görüntüleri (Dağlanmış) ve EDS analizleri

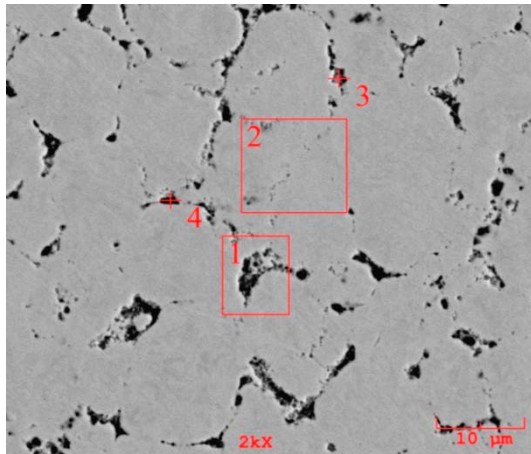


Şekil 7.27. 900°C'de sinterlenmiş C5St numunesinin map analizi

Sırasıyla, 900°C, 950°C ve 1000°C’de sinterlenmiş kompozit numunelerdeki mevcut bileşenlerin varlığını, morfolojisi ve dağılımını incelemek amacıyla gerçekleştirilen SEM-EDS analizleri Şekil 7.28-7.31’de verilmiştir.

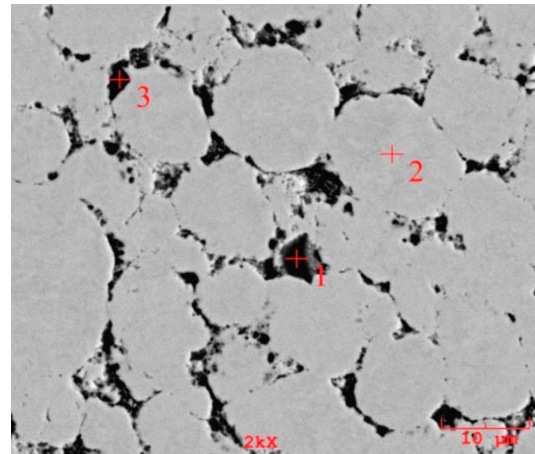
Analiz sonucuna göre siyah bölgeler SiC’ü, serbest gri alanlar Cu matrisi göstermektedir. Genellikle küçük boyutlu SiC partiküllerinden alınan analizlerde O₂ tespit edilmiş, büyük partiküllerde O₂’ne rastlanmamıştır (Şekil 7.28). O₂ muhtemelen SiC’ün serbest yüzeylerinden kaynaklanmaktadır. 950°C ve 1000°C’de sinterlenmiş kompozitlerin EDS analizlerinde de (Şekil 7.29 ve 7.30a) benzer şekilde SiC’lü bölgelerde az miktarda O₂ tespit edilmiştir.

Şekil 7.30.b’deki 900°C’de sinterlenmiş ve dağlanmış C1Ss numunesinden alınan EDS analizlerinden SiC’lerin tane sınırlarında bulunduğu gözlemlenmiştir. SiC’ün bulunmadığı tane sınırındaki 4 numaralı noktadan alınan analizde O₂ varlığına rastlanmamıştır. Bu durum yapıdaki O₂’in bakır matristen çok SiC’den kaynaklandığını göstermektedir.



Ağ. %	1	2	3	4
O	3.534		1.697	4.670
C			30.730	27.046
Si	4.710		14.772	17.888
Cu	91.756	100	52.801	50.396

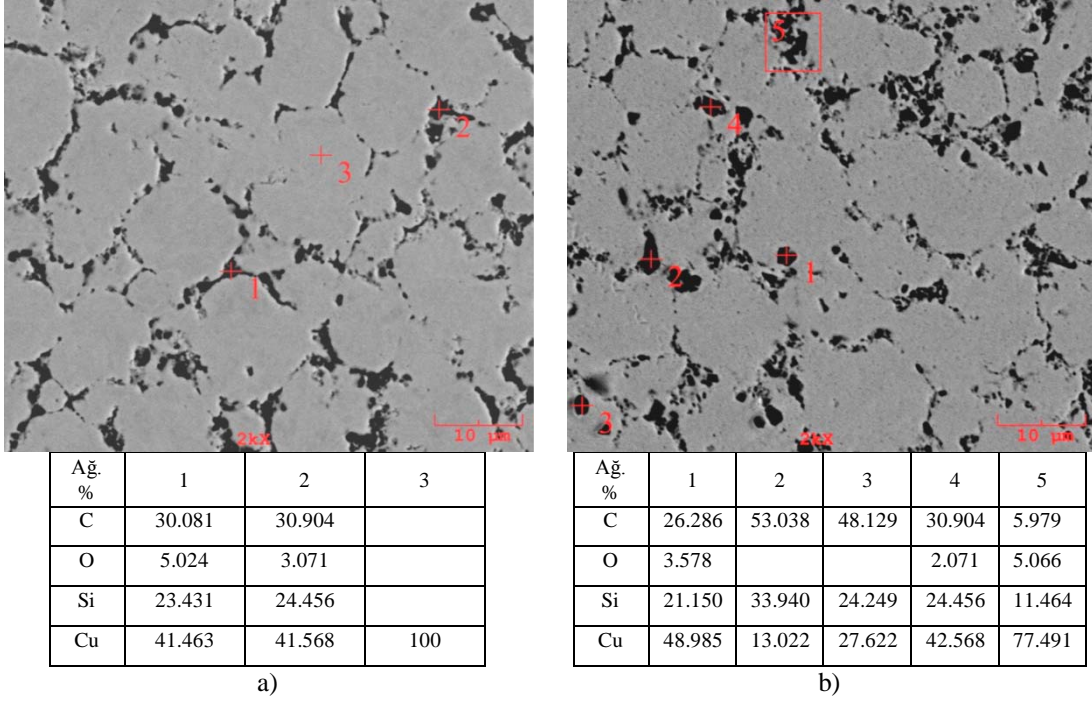
a)



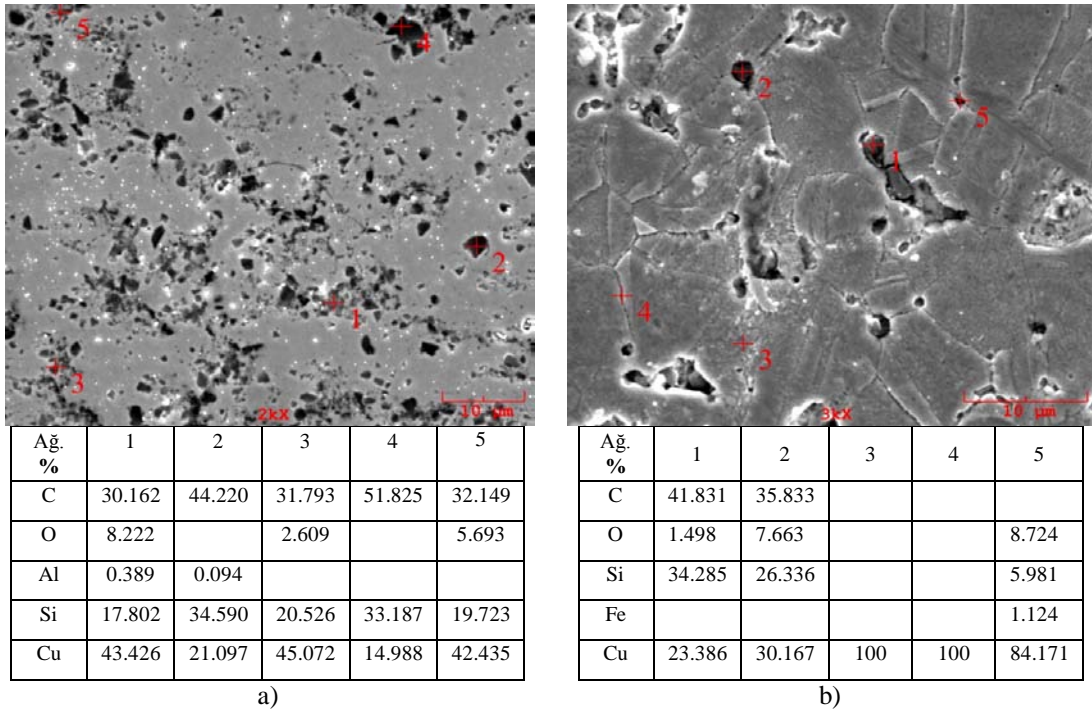
Ağ. %	1	2	3
O			1.116
Si	33.312		34.214
C	44.364		47.777
Cu	22.324	100	16.893

b)

Şekil 7.28. 900°C’de sinterlenmiş a) C2St numunesinin, b) C3St numunesinin EDS analizi



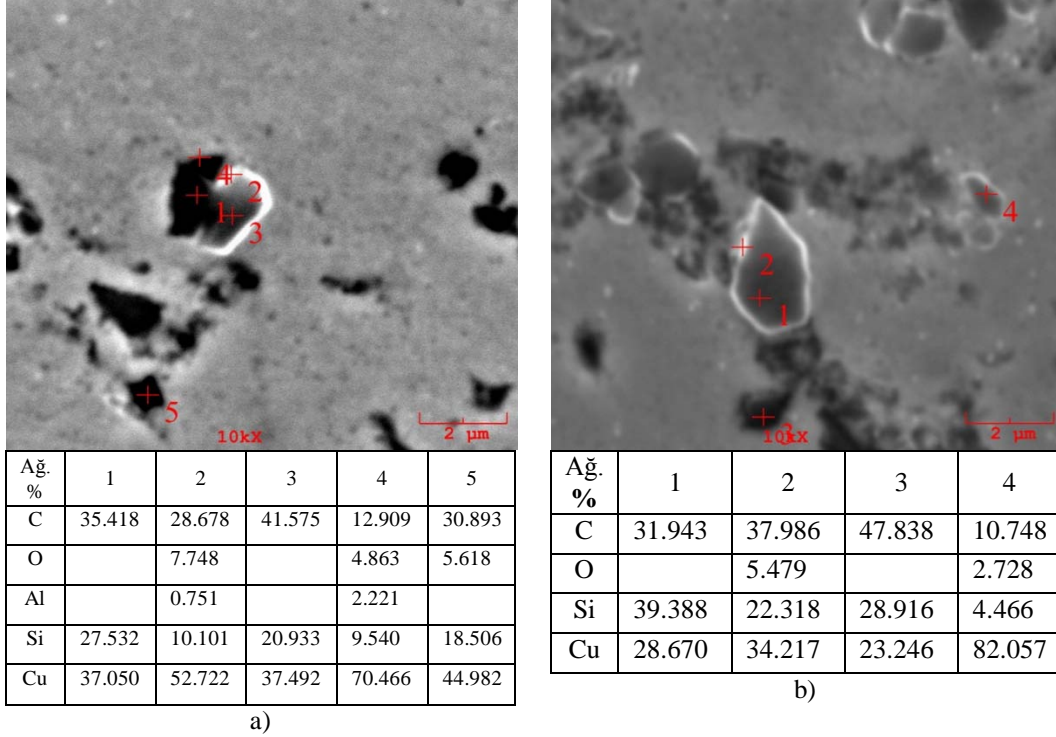
Şekil 7.29. 950°C’de sinterlenmiş a) C2St numunesinin, b) C3St numunesinin EDS analizi



Şekil 7.30. a) 1000°C’de sinterlenmiş C5St ve b) 900°C’de sinterlenmiş C1Ss numunesinin EDS analizi

950°C’de sinterlenmiş C3St ve C5St kompozitinde Cu-SiC arayüzeyi SEM’de yüksek büyütmelemlerde incelenmiş sonuçlar Şekil 7.31’de verilmiştir. Burada da benzer şekilde genellikle SiC partiküllerinin merkezinden alınan analizlerde oksijen

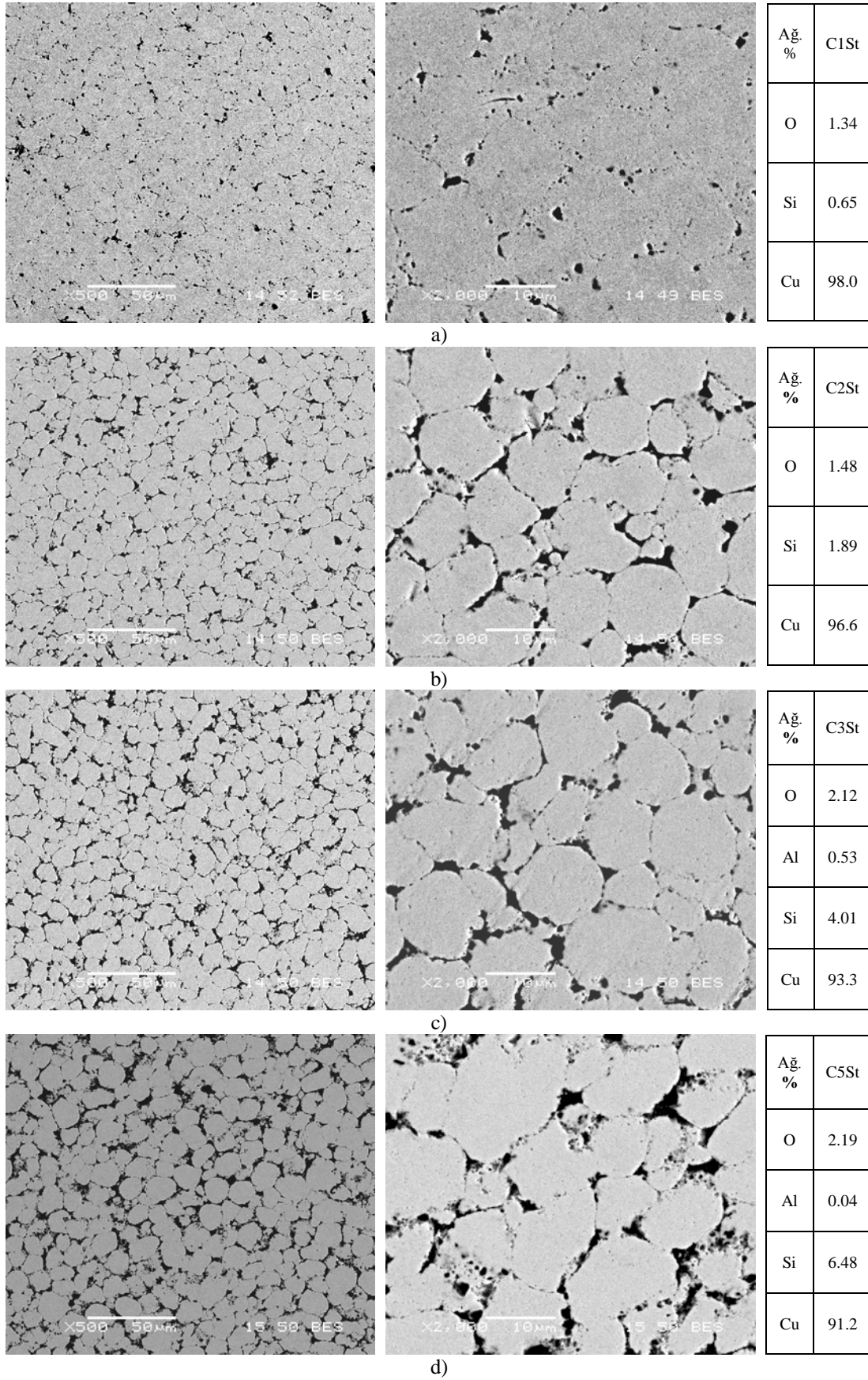
varlığı görülmezken, bakır ile temas bölgelerinden alınan analizlerde oksijen gözlenmiştir.



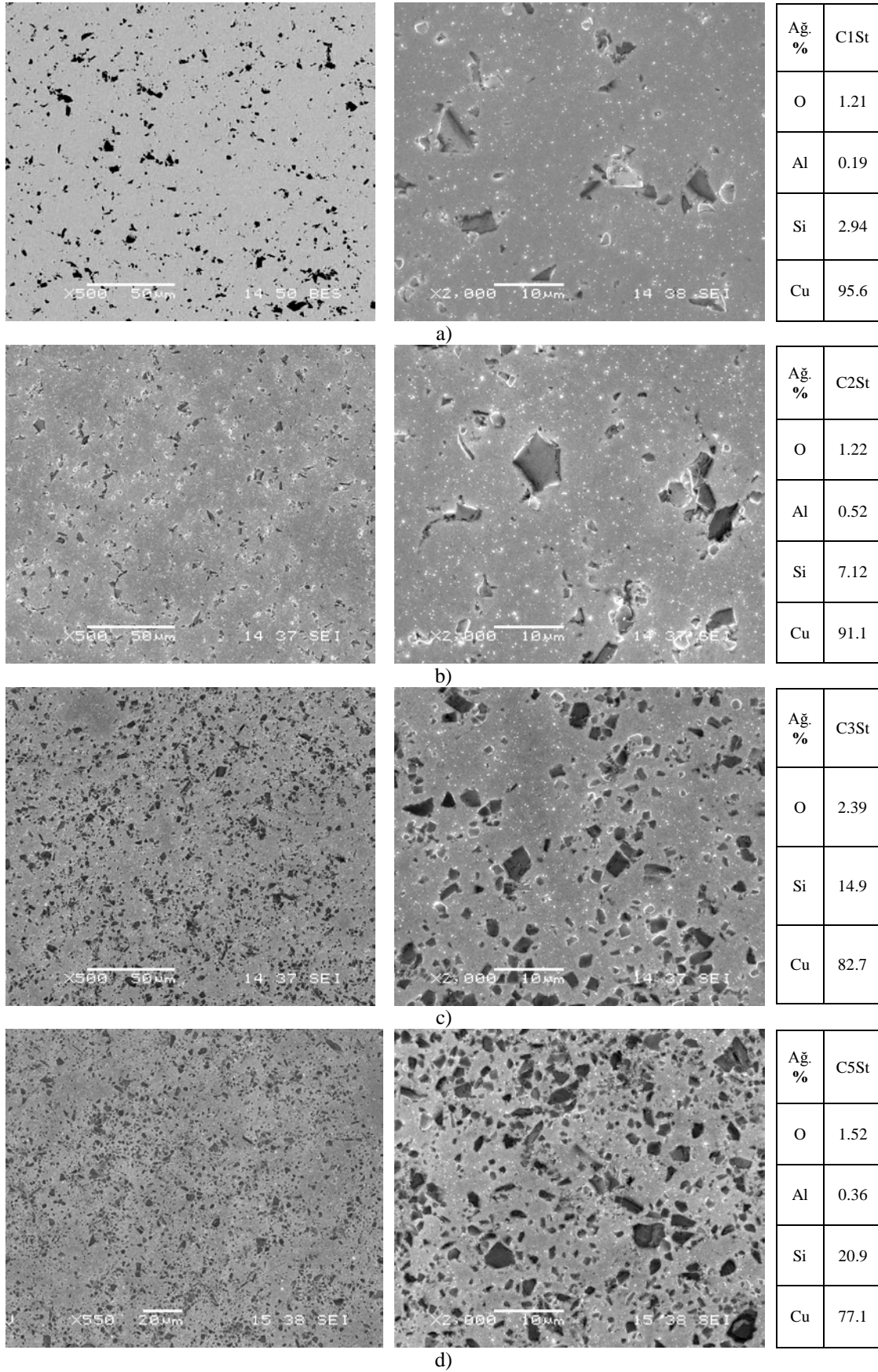
Şekil 7.31. 950°C’de sinterlenmiş a) C3St kompozitinin, b) C5St kompozitinin EDS analizi

Semente Cu-SiC kompozitleri için 700°C optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiş olup bu sıcaklıkta SiC’ün tane boyutları değiştirilerek özellikler üzerine etkisi incelenmiş ve sonuçlar ticari tozlarla mukayese edilmiştir. Farklı SiC tane boyutuna sahip kompozitlerin parlatılmış haldeki SEM mikrografları Şekil 7.32-7.37’de verilmiştir. Genel SEM-EDS analizlerinde görüldüğü gibi SiC partiküllerinin tane boyutu arttıkça Cu-SiC arayüzeyindeki oksijen miktarı azalmakta, Cu matriks takviye bileşeni olan SiC’e daha iyi tutunmaktadır ve bu bulgular relatif yoğunluk sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde (Bkz. Tablo 7.4).

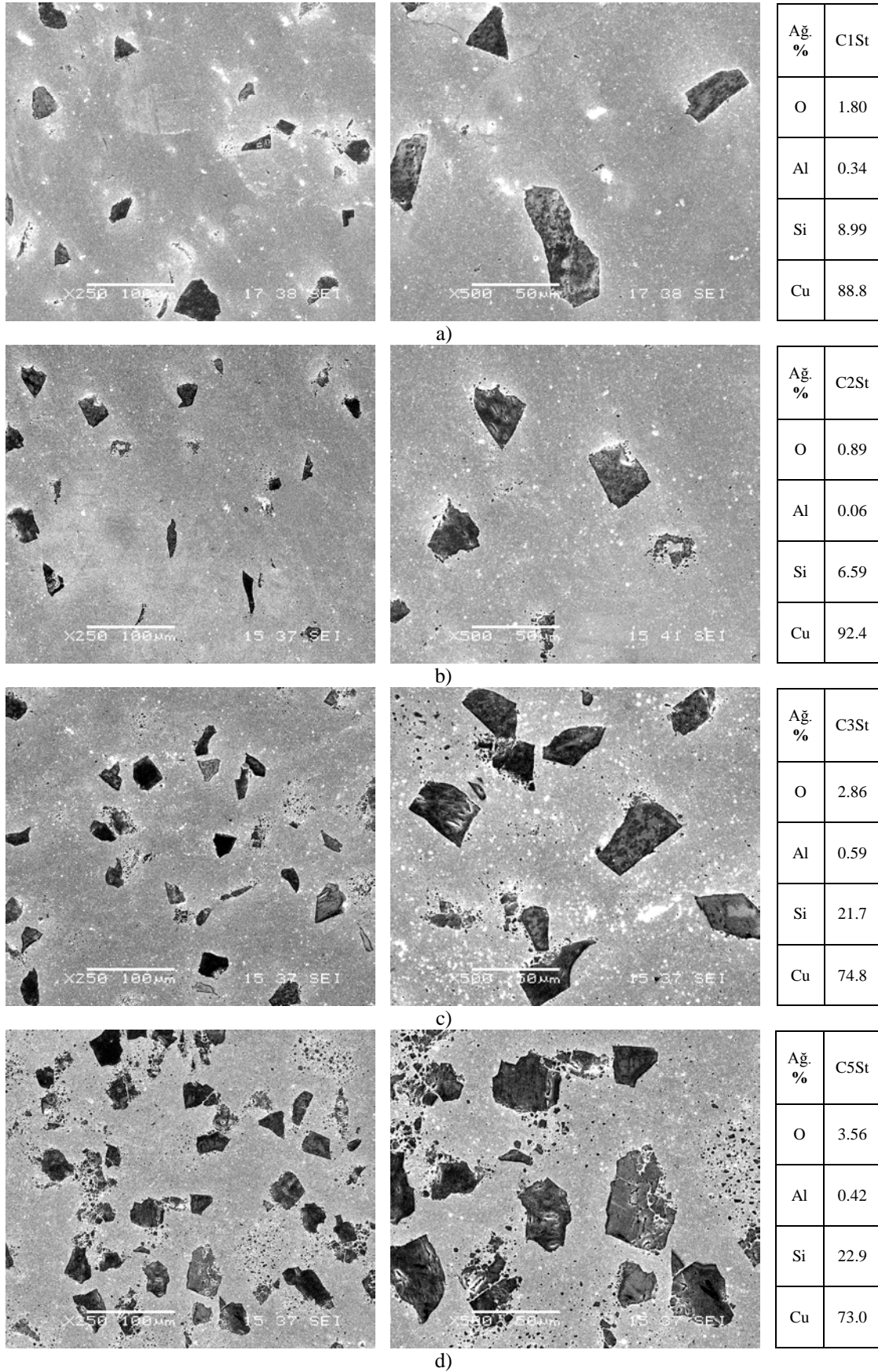
Ancak takviye bileşeni olan SiC partikül boyutunun küçülmesi aktif yüzey alanının fazla olmasının bir sonucu olarak SiC, işlem sıcaklıklarında dekompoze olmakta bu da Cu-SiC arayüzeyinde yüksek oksijen varlığına neden olmaktadır [90].



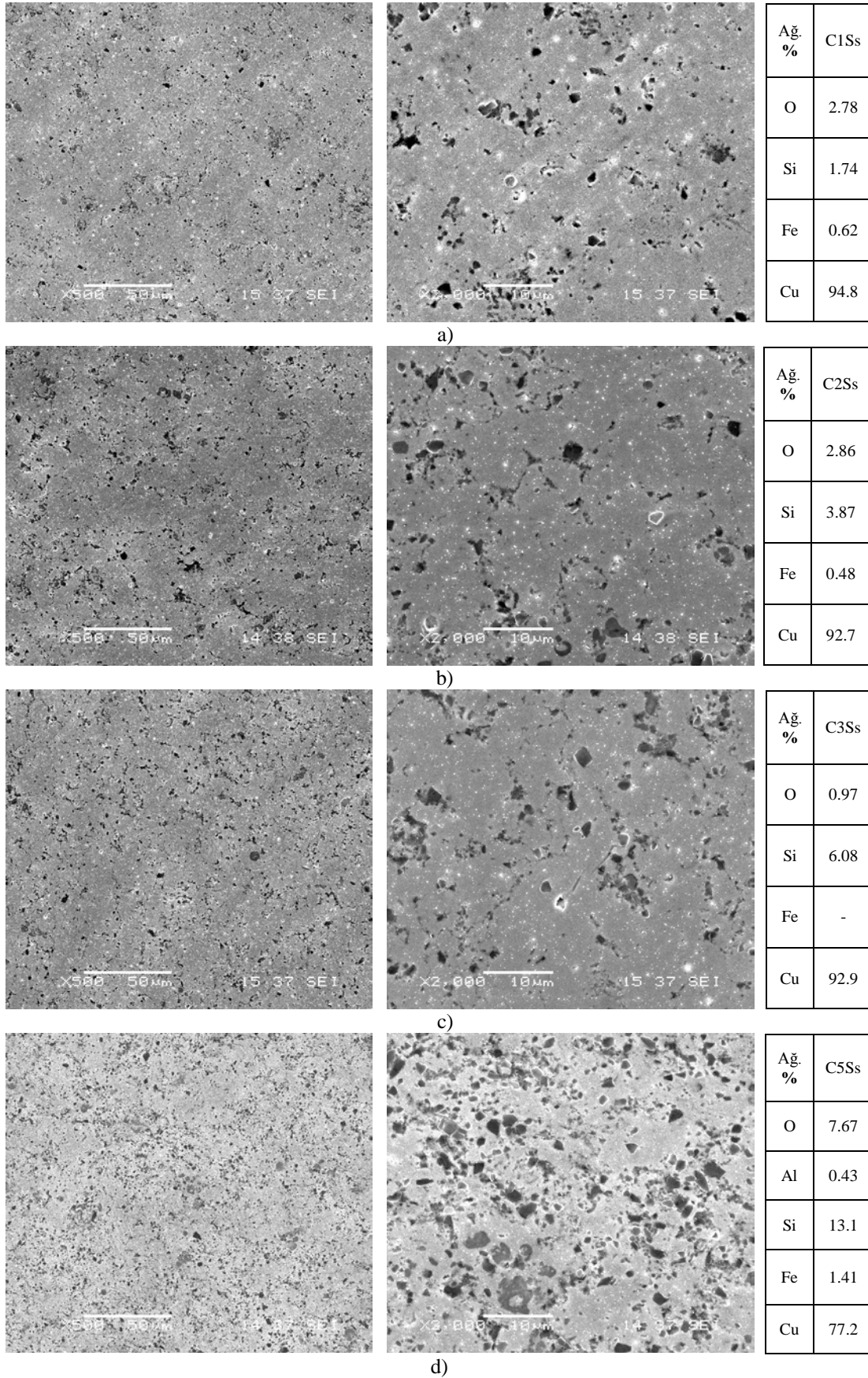
Şekil 7.32. 700°C’de sinterlenmiş 1µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi



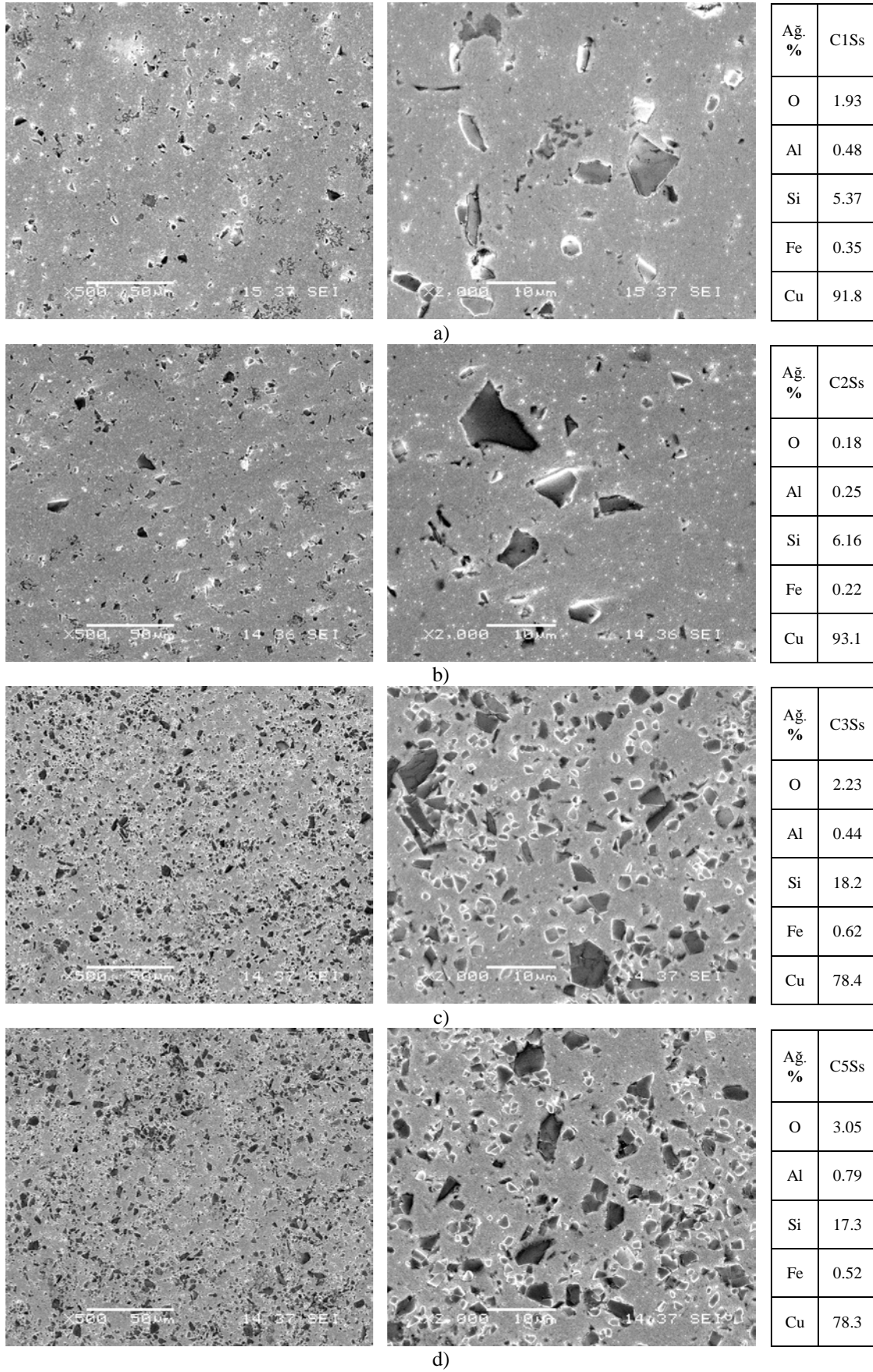
Şekil 7.33. 700°C’de sinterlenmiş 5µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi



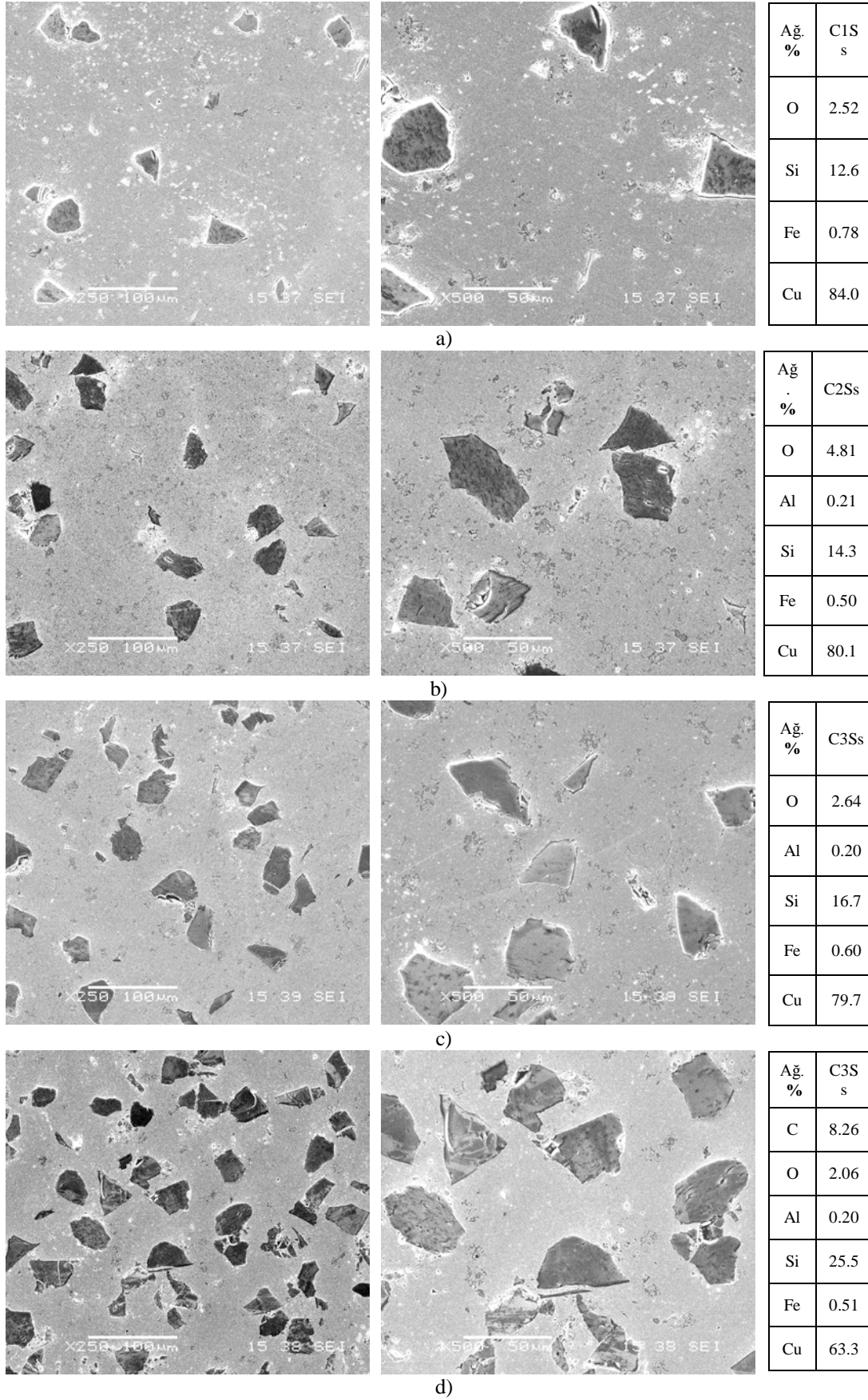
Şekil 7.34. 700°C’de sinterlenmiş 30µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1St, b) C2St, c) C3St ve d) C5St kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi



Şekil 7.35. 700°C’de sinterlenmiş 1µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1Ss, b) C2Ss, c) C3Ss ve d) C5Ss kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi



Şekil 7.36. 700°C'de sinterlenmiş 5µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1Ss, b) C2Ss, c) C3Ss ve d) C5Ss kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi



Şekil 7.37. 700°C’de sinterlenmiş 30µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen a) C1Ss, b) C2Ss, c)C3Ss ve d) C5Ss kompozitinin SEM görüntüleri ve EDS analizi

700°C’de sinterlenmiş numunelerin SEM incelemelerinde SiC taneciklerinin genel olarak matriks içerisinde uniform bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Kompozit mikroyapılarındaki koyu gri ve keskin köşeli fazlar SiC’ü açık gri alanlar Cu matriksi, serbest beyaz alanlar muhtemelen parlatmadan kaynaklanan alüminayı göstermekte, Cu matriks ile takviye bileşeni SiC arayüzeyindeki beyazlıklar herhangi bir fazı karakterize etmeyip, yükseklik farkından ileri gelmektedir. Yukarıda ifade edilen sonuçlar SEM-EDS analiz sonuçları ile desteklenmiştir.

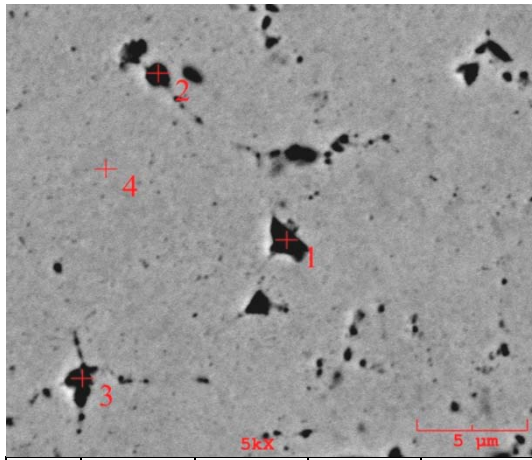
700°C’de sinterlenmiş 1µm’luk SiC ile takviye edilmiş ticari Cu-SiC kompozitlerine ait SEM-EDS analizleri Şekil 7.38-7.39’da verilmiştir. Şekil 7.40’da Cu-SiC arayüzeyi incelenmiştir. Analizlerdeki oksijen varlığı, Cu-SiC arayüzeylerinde ve beyaz gözükten alüminalı bölgelerde tespit edilmiştir.

Numunelerde SiC ve O₂ dağılımını dedekte etmek amacıyla tüm SiC boyutları için ticari ve semente kompozitlerin ağırlıkça %3 SiC içeren bileşimlerine SEM-EDS alan (map) analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.41’deki EDS alan (map) analizinde SiC’ün tane sınırlarında toplandığı, oksijenin de SiC’den ve alüminadan kaynaklandığı gözükmektedir.

Şekil 7.42 ve 7.43’deki 5 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen kompozitlerin EDS analizlerinde oksijenin varlığına rastlanmamıştır. Şekil 7.44’deki EDS alan (map) analizinde tespit edilen oksijen alüminadan kaynaklanmaktadır.

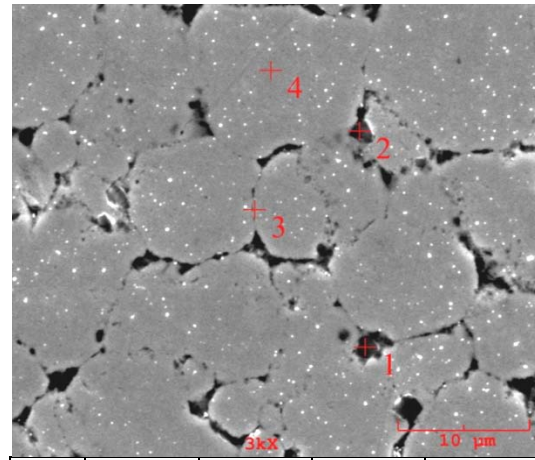
30 µm tane boyutlu SiC ile takviye edilen kompozitlerin EDS analizlerinde Cu-SiC arayüzeylerinde (Şekil 7.45a’da 2 numaralı nokta ve Şekil 7.45b’de 3 numaralı nokta) oksijen gözlenmemiştir. Bunu teyit etmek amacıyla Cu-SiC arayüzeyi Şekil 7.46’da yüksek büyütmede incelenmiş ve 2 numaralı noktada oksijene rastlanmazken 1 numaralı noktada eser miktarda (%2,8) O₂ tespit edilmiştir. Şekil 7.47’de Cu-SiC arayüzeyinde oksijene rastlanmamış matristeki beyaz renkte gözükten noktada O₂ ve Al tespit edilmiş olup bu durum parlatmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 7.48’deki EDS alan (map) analizinde de görüldüğü gibi O₂ ve Al’dan aynı noktalarda sinyal alınmıştır. SiC tane boyutunun artışıyla yüzey alanı azalmakta ve buna bağlı olarak

da eser miktarda oksidasyon gözlenmiştir.



Ağ. %	1	2	3	4
C	40.741	5.279	31.753	
O	1.504	1.111	1.557	1.140
Si	15.870	14.440	10.879	
Cu	41.885	79.171	55.811	98.860

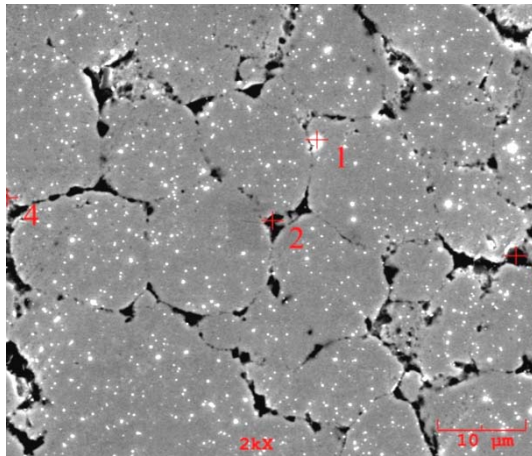
a)



Ağ. %	1	2	3	4
C	43.614	39.112	15.779	
O	0.894	1.096	0.748	
Al	0.222	0.000	0.044	
Si	22.871	22.647	0.103	
Cu	32.399	37.145	83.327	100

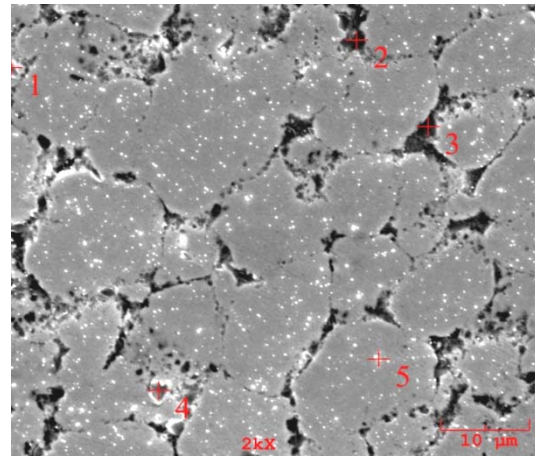
b)

Şekil 7.38. 700°C'de sinterlenmiş 1μm'lik SiC ile takviye edilmiş a) C1St, b) C2St numunesinin EDS analizi



Ağ. %	1	2	3	4
C	2.693	42.172	42.325	26.589
O	8.671	0.462	0.974	3.769
Al	4.324	0.163	0.012	0.058
Si	0.699	27.202	27.348	6.779
Cu	83.613	30.001	29.340	62.805

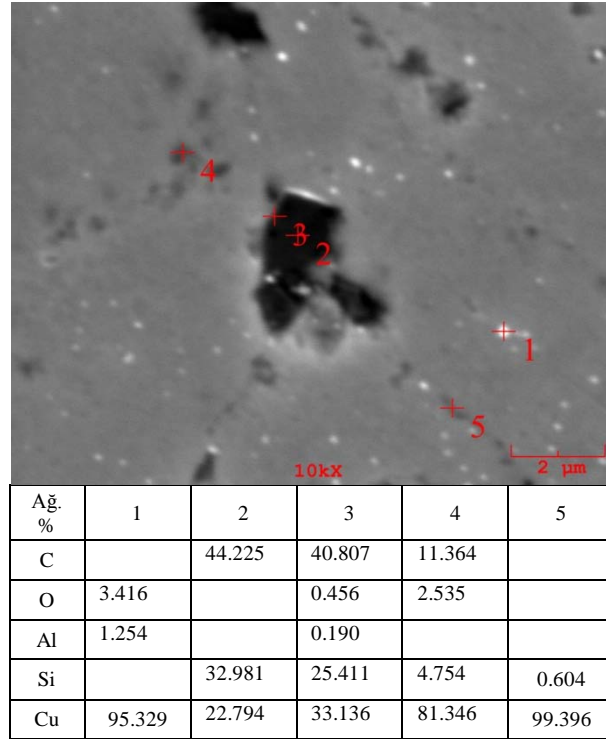
a)



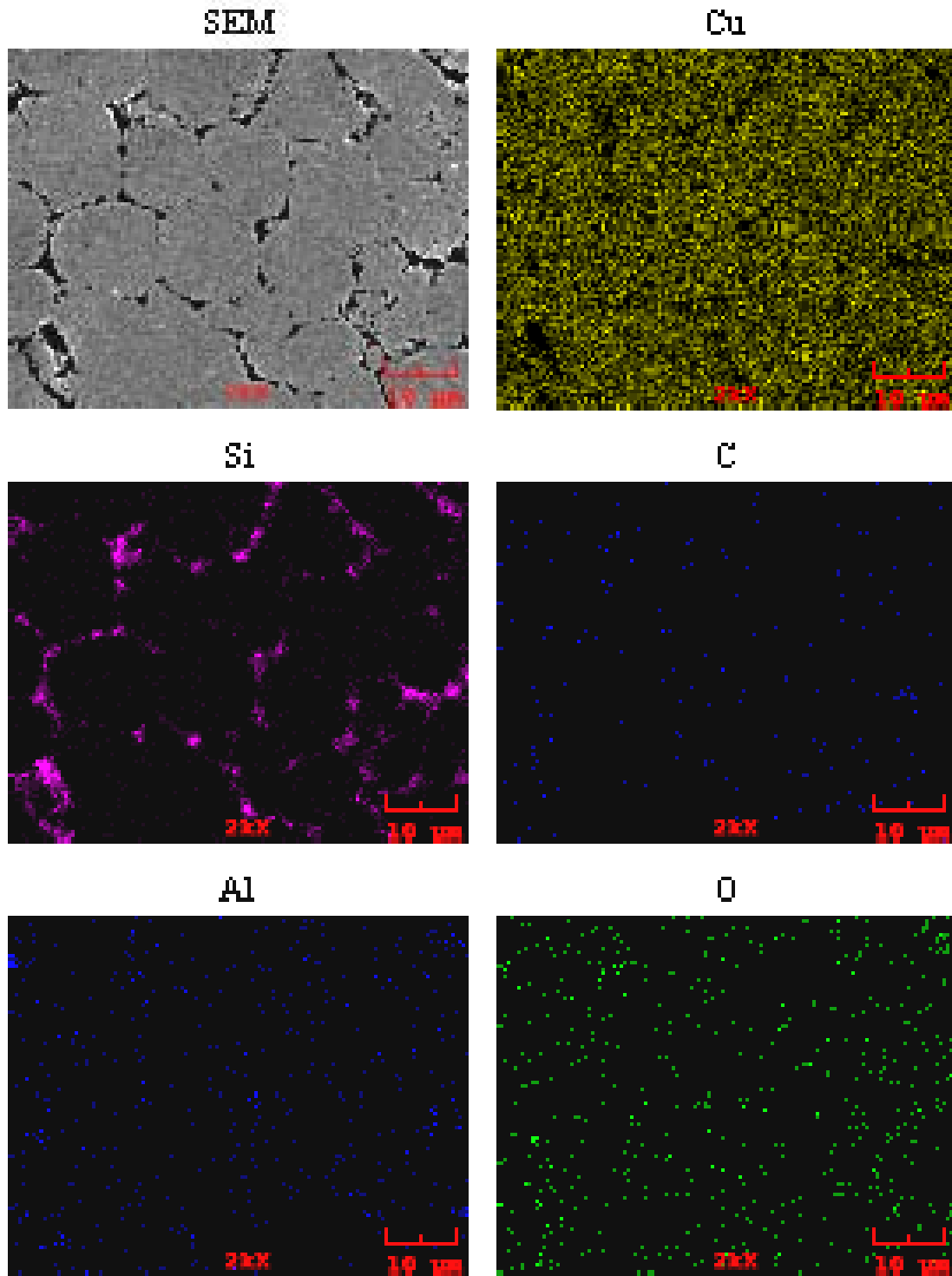
Ağ. %	1	2	3	4	5
C	30.772	45.593	29.824	38.684	15.243
O		3.499			10.586
Al					4.490
Si	19.778	29.367	38.102	26.305	
Cu	49.450	21.541	32.073	35.011	69.681

b)

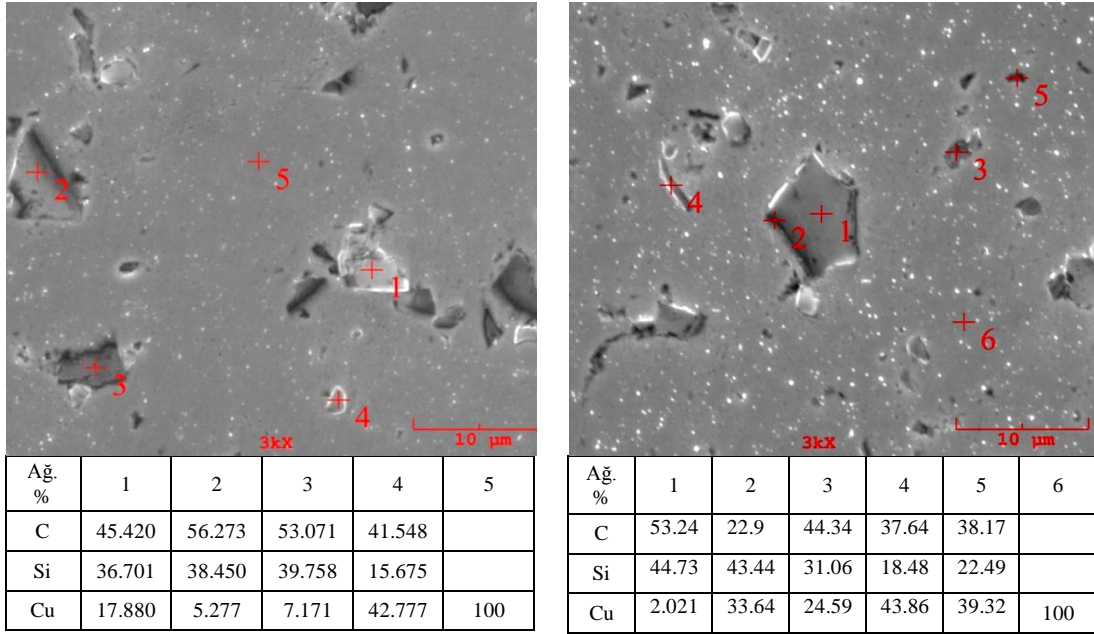
Şekil 7.39. 700°C'de sinterlenmiş 1μm'lik SiC ile takviye edilmiş a) C3St, b) C5St numunesinin EDS analizi



Şekil 7.40. 700°C'de sinterlenmiş 1 μ m'luk SiC ile takviye edilmiş C2St numunesinin EDS analizi



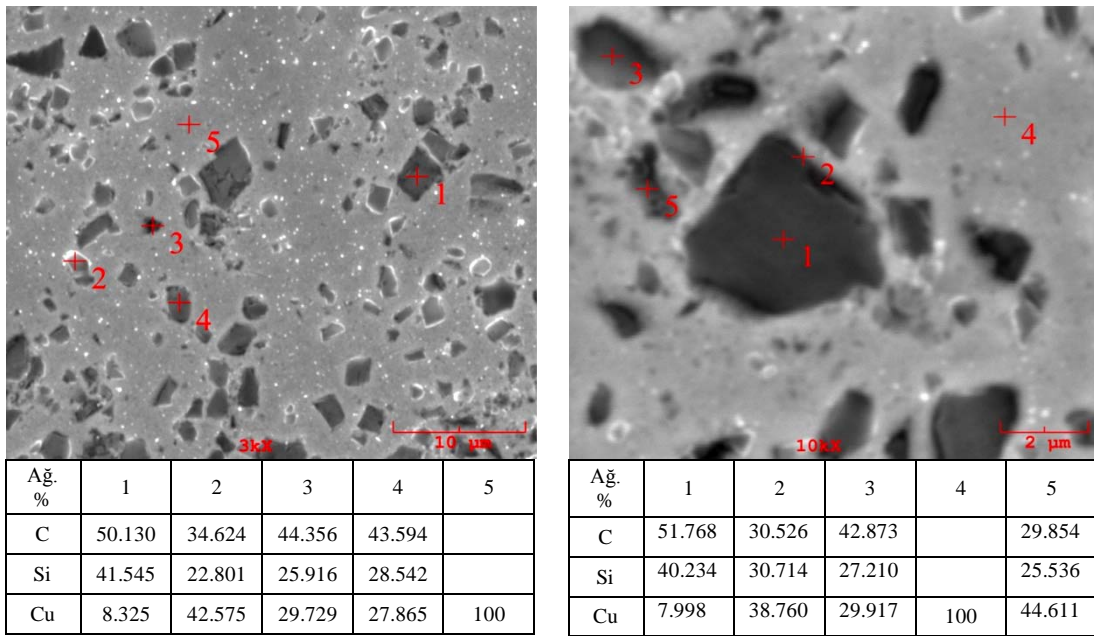
Şekil 7.41. 700°C’de sinterlenmiş 1µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin map analizi



a)

b)

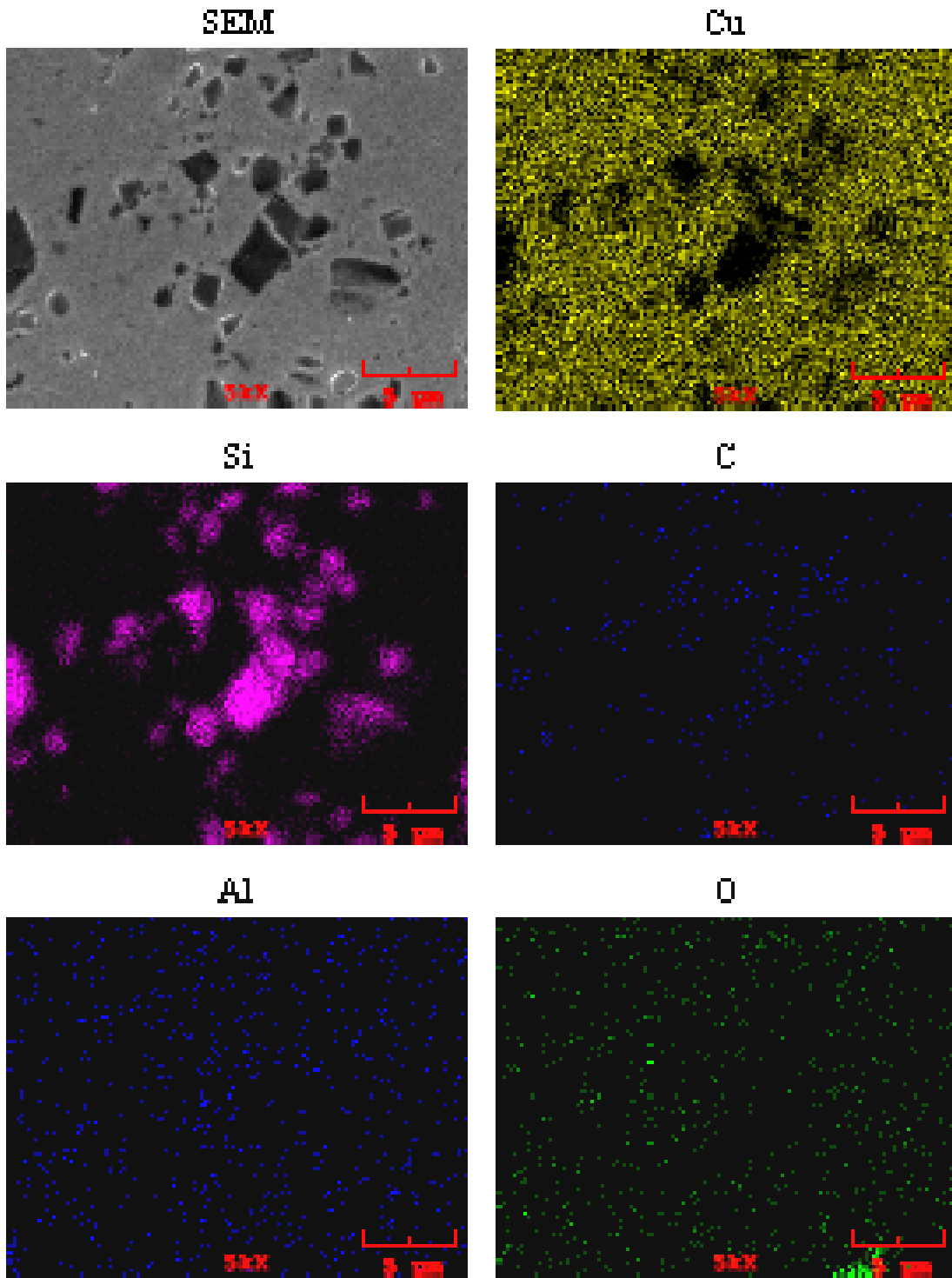
Şekil 7.42. 700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1St, b) C2St numunesinin EDS analizi



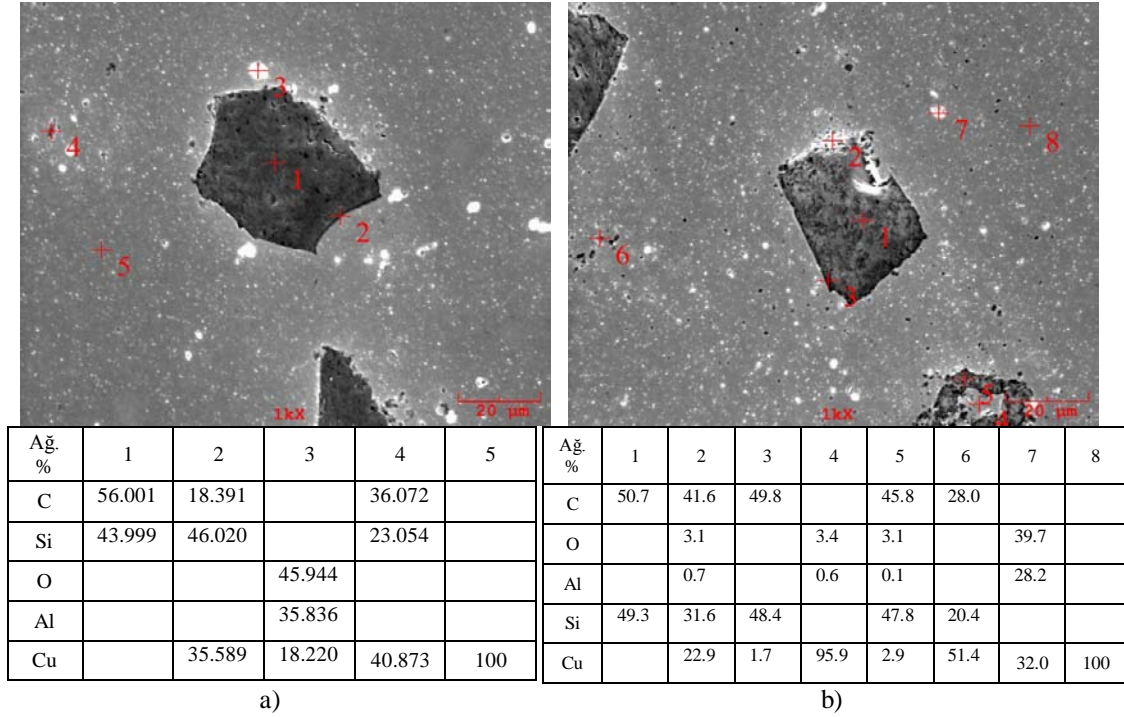
a)

b)

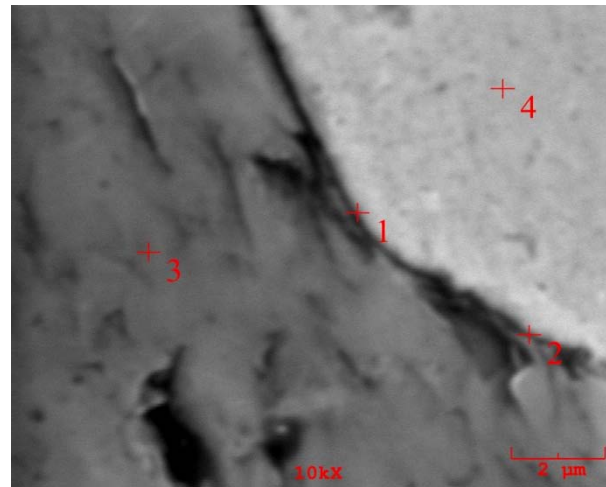
Şekil 7.43. 700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C3St, b) C5St numunesinin EDS analizi



Şekil 7.44. 700°C’de sinterlenmiş 5μm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin map analizi

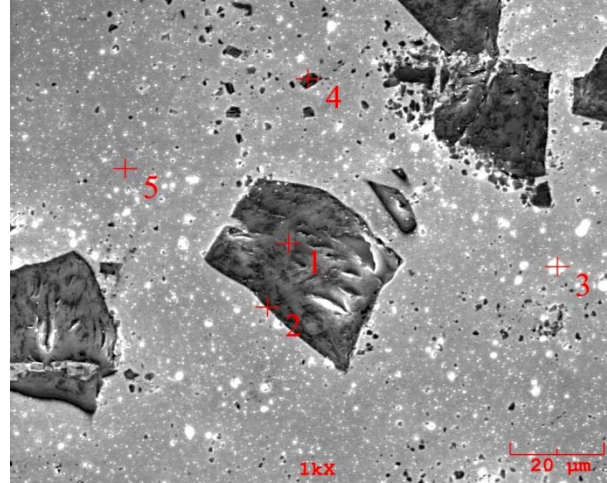


Şekil 7.45. 700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1St, b) C2St numunesinin EDS analizi



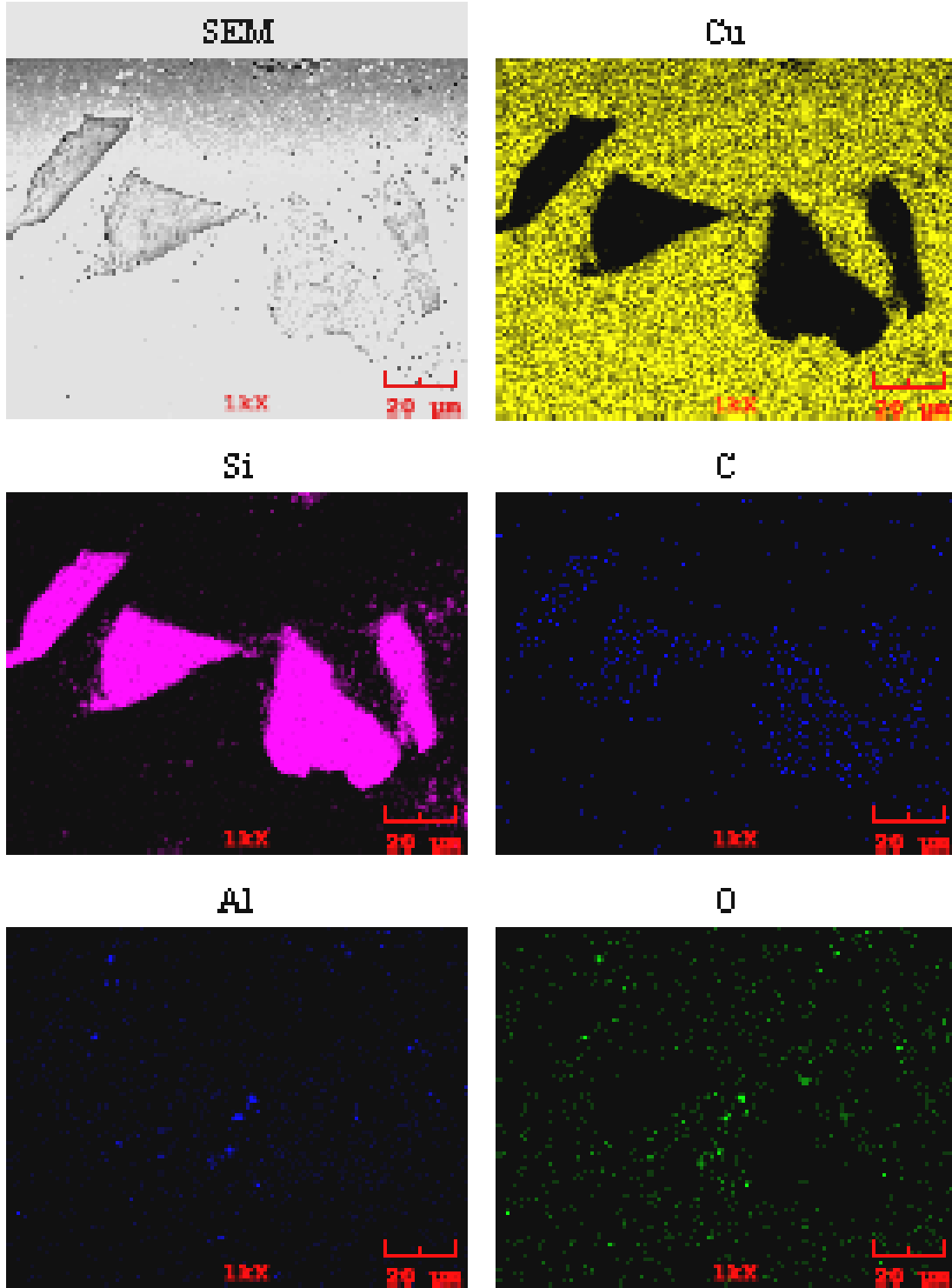
Ağ. %	1	2	3	4
C	25.386	60.905	53.426	
O	2.816			
Al	0.277			
Si	25.106	31.974	46.574	
Cu	46.415	7.121		100

Şekil 7.46. 700°C’de sinterlenmiş 30 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C2St numunesinde Cu-SiC arayüzeyinin EDS analizi



Ağ. %	1	2	3	4	5
C	53.819	44.632		48.195	
Si	46.181	47.270		40.110	
O			33.997	11.695	
Al			25.842		
Cu		8.098	40.160		100

Şekil 7.47. 700°C'de sinterlenmiş 30 μm'luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin EDS analizi

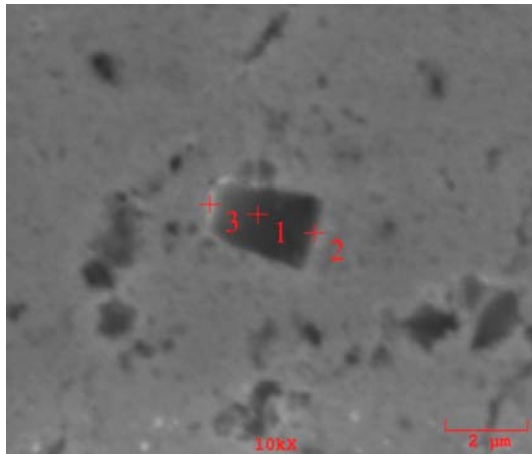


Şekil 7.48. 700°C’de sinterlenmiş 30µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3St numunesinin map analizi

Semente Cu-SiC kompozitlerinin SEM mikrografları, ticari Cu-SiC kompozitlerinininkilerle benzer sonuçları göstermekte olup, matriste serbest gri renkte adacıkların bulunduğu görülmüştür (Şekil 7.49-7.57). Bu bölgelerden alınan SEM-EDS analizlerinde Fe ve O₂ tespit edilmiştir. Fe sementasyon prosesinden

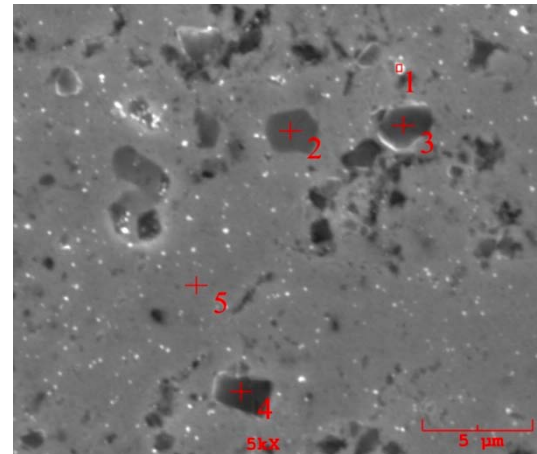
kaynaklanmaktadır ve sinterleme sıcaklığında oksitlenmiştir. Şekil 7.52, 7.54, 7.56'daki EDS alan (map) analizlerinde Fe'li bölgeler açıkça görülmektedir ve oksijen de Fe'in bulunduğu bölgelerde gözlenmiştir.

Şekil 7.49a'da C1Ss numunesinde SiC ile Cu arayüzündeki 2 numaralı noktadan alınan analizde az miktarda O₂ ve beraberinde Al tespit edilmiştir. Bu O₂, SiC yüzeyinden ve aluminadan kaynaklanmaktadır. Şekil 7.49b'de 2 numaralı noktada yüksek miktarda Fe ve O₂ bulunmaktadır. Benzer şekilde Şekil 7.50a'da tespit edilen O₂, Fe'den, 7.50b'deki O₂, SiC yüzeylerinden ve parlatmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 7.51'de 1µm'luk SiC yüzeyi yüksek büyütmede incelenmiş ve 1, 2 ve 3 numaralı noktalarında, SiC'den ve parlatmadan kaynaklanan, az miktarda O₂ tespit edilmiştir. Şekil 7.53'de 5µm'luk SiC ile takviye edilmiş kompozitlerin EDS analizlerinde SiC yüzeylerinde O₂ bulunmuştur.



Ağ. %	1	2	3
O		2.963	
Al		0.528	0.276
Si	54.522	22.598	20.529
Cu	45.478	73.911	79.195

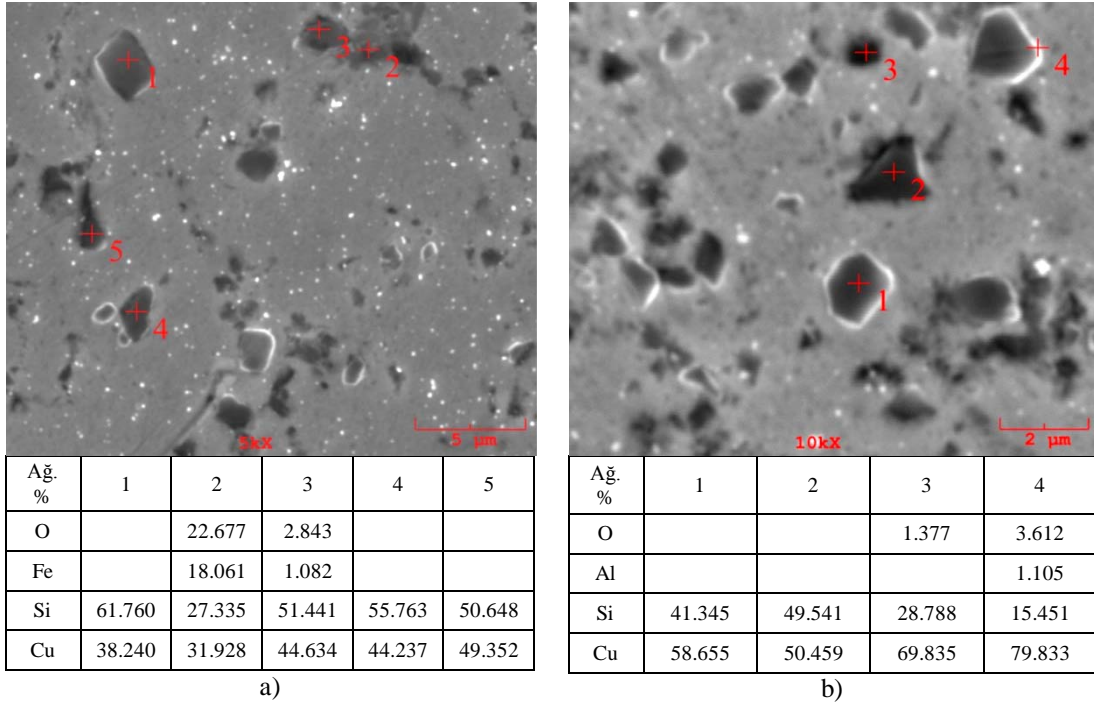
a)



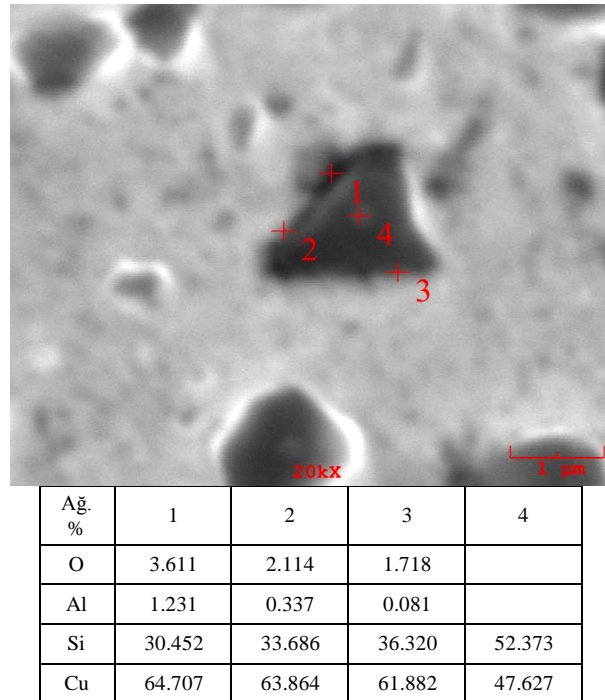
Ağ. %	1	2	3	4	5
O	15.703	36.614			
S		0.269			
Fe		34.597			
Al	9.951				
Si	2.210		61.703	50.018	
Cu	72.136	28.519	38.297	49.982	100

b)

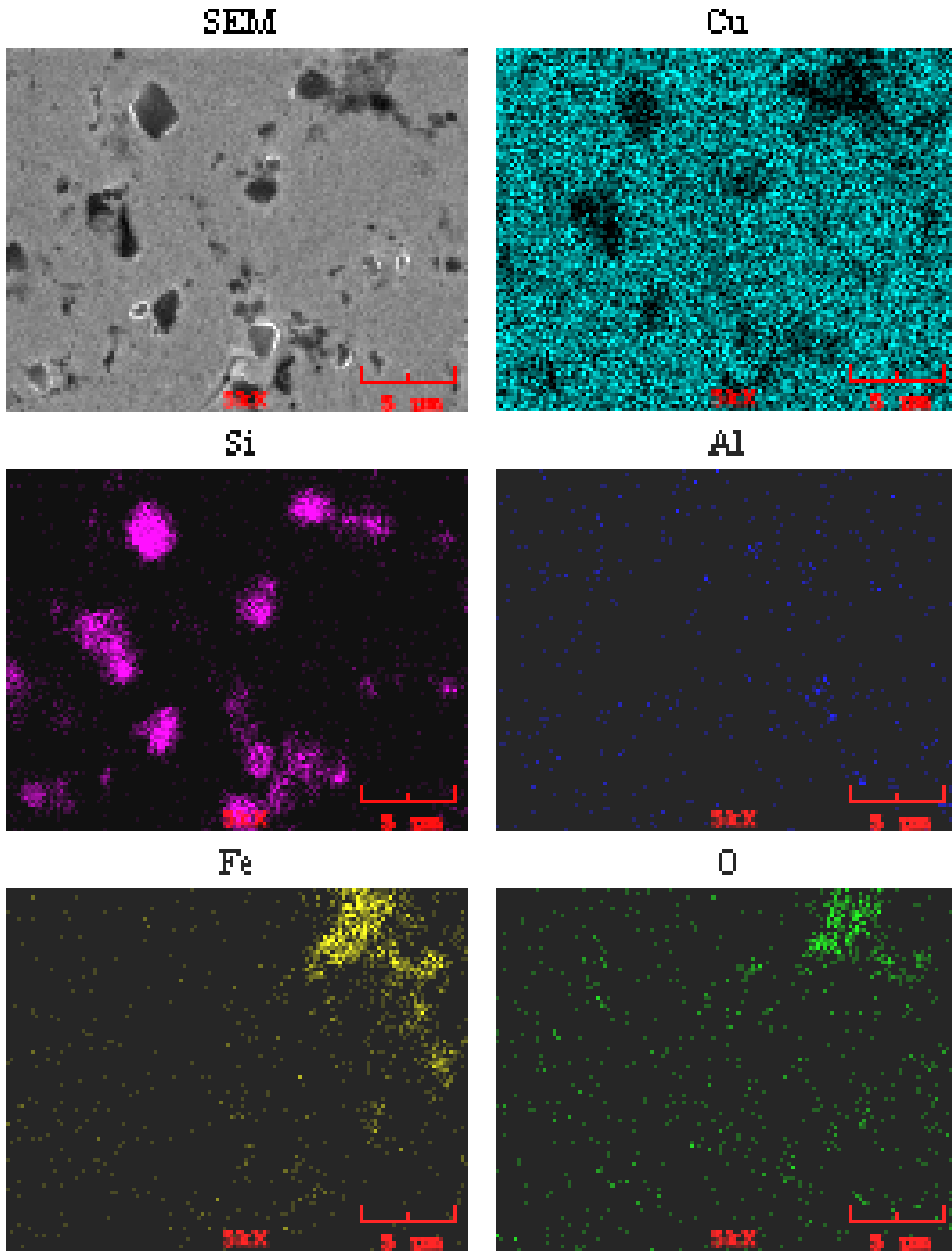
Şekil 7.49. 700°C'de sinterlenmiş 1 µm'luk SiC ile takviye edilmiş a) C1Ss numunesinin, b) C2Ss numunesinin EDS analizi



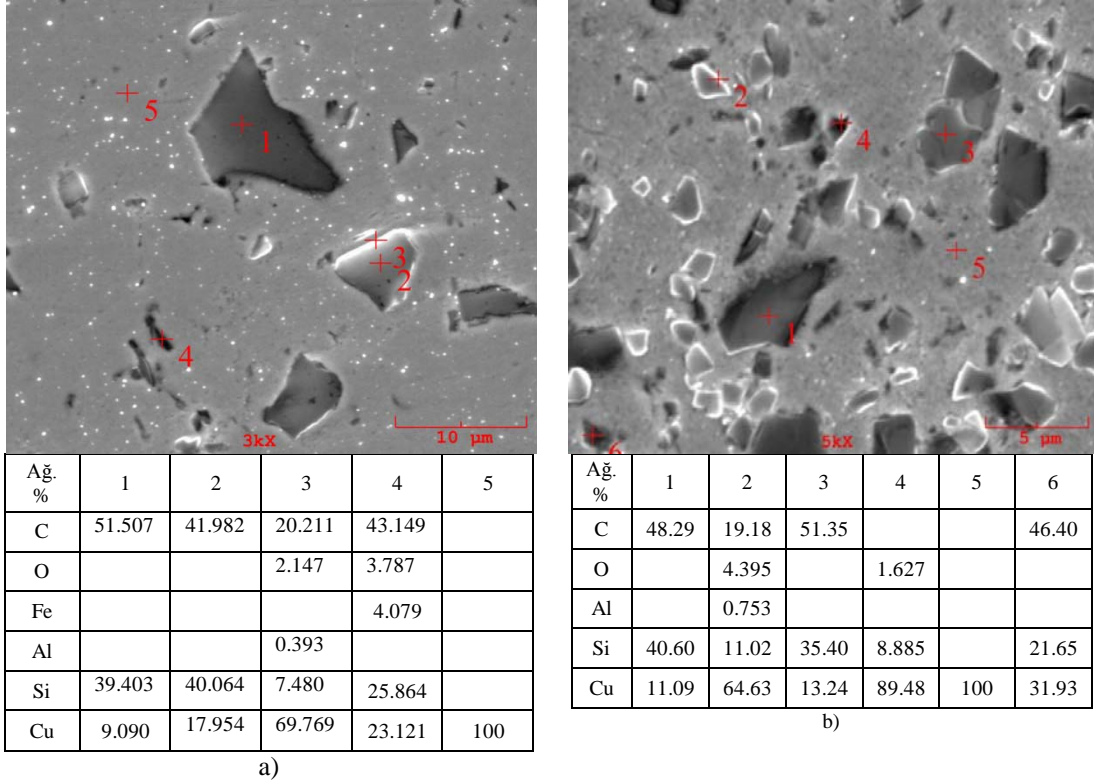
Şekil 7.50. 700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C3Ss, b) C5Ss numunesinin EDS analizi



Şekil 7.51. 700°C’de sinterlenmiş 1 µm’luk SiC ile takviye edilmiş C5Ss numunesinin EDS analizi

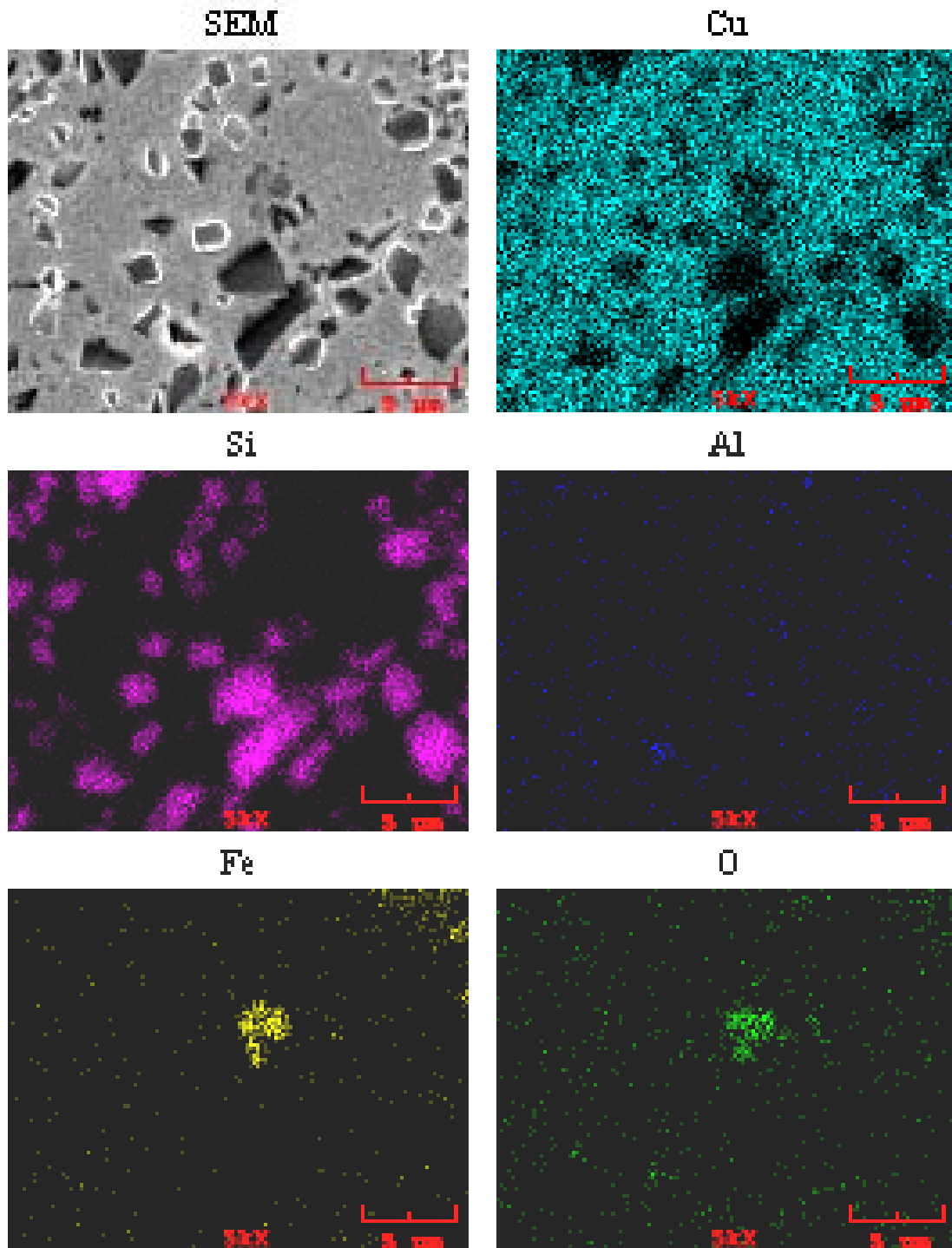


Şekil 7.52. 700°C’de sinterlenmiş 1µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3Ss numunesinin map analizi

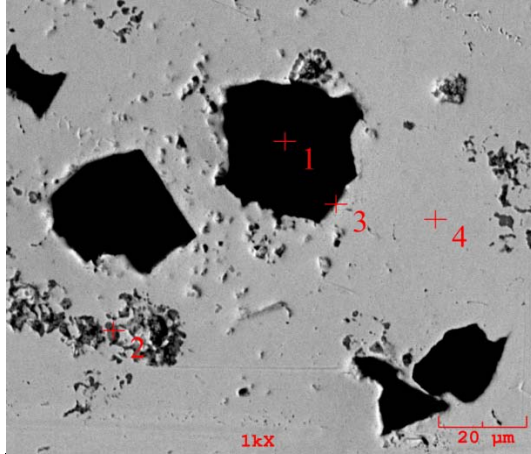


Şekil 7.53. 700°C’de sinterlenmiş 5 µm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C2Ss, b) C5Ss numunesinin EDS analizi

Şekil 7.55’deki mikrograflarda Fe’in bulunduğu bölgeler (gri adacıklar) açıkça gözükmemektedir. Şekil 7.57’de SiC ve etrafından alınan analizlerde O₂’e rastlanmamış, 3 numaralı noktadan alınan analizde Fe ve O₂ tespit edilmiştir. Muhtemelen sementasyon prosesinden kaynaklanan Fe, sinterleme sıcaklığında oksitlenmiştir.

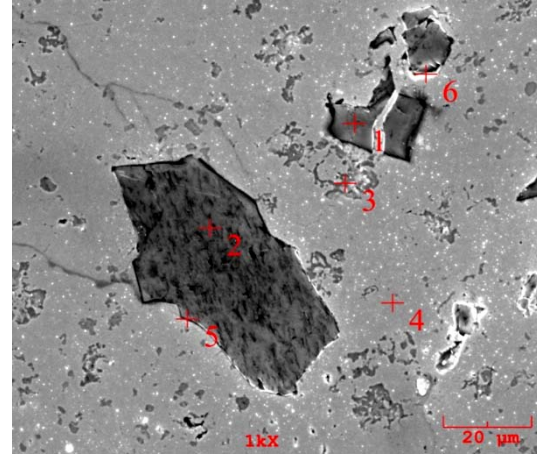


Şekil 7.54. 700°C’de sinterlenmiş 5µm’luk SiC ile takviye edilmiş C3Ss numunesinin map analizi



Ağ. %	1	2	3	4
C	51.704	4.789	8.063	
O		28.896	5.193	
Al			1.476	
Fe		18.235		
Si	48.296	0.577	8.357	
Cu		47.503	76.912	100

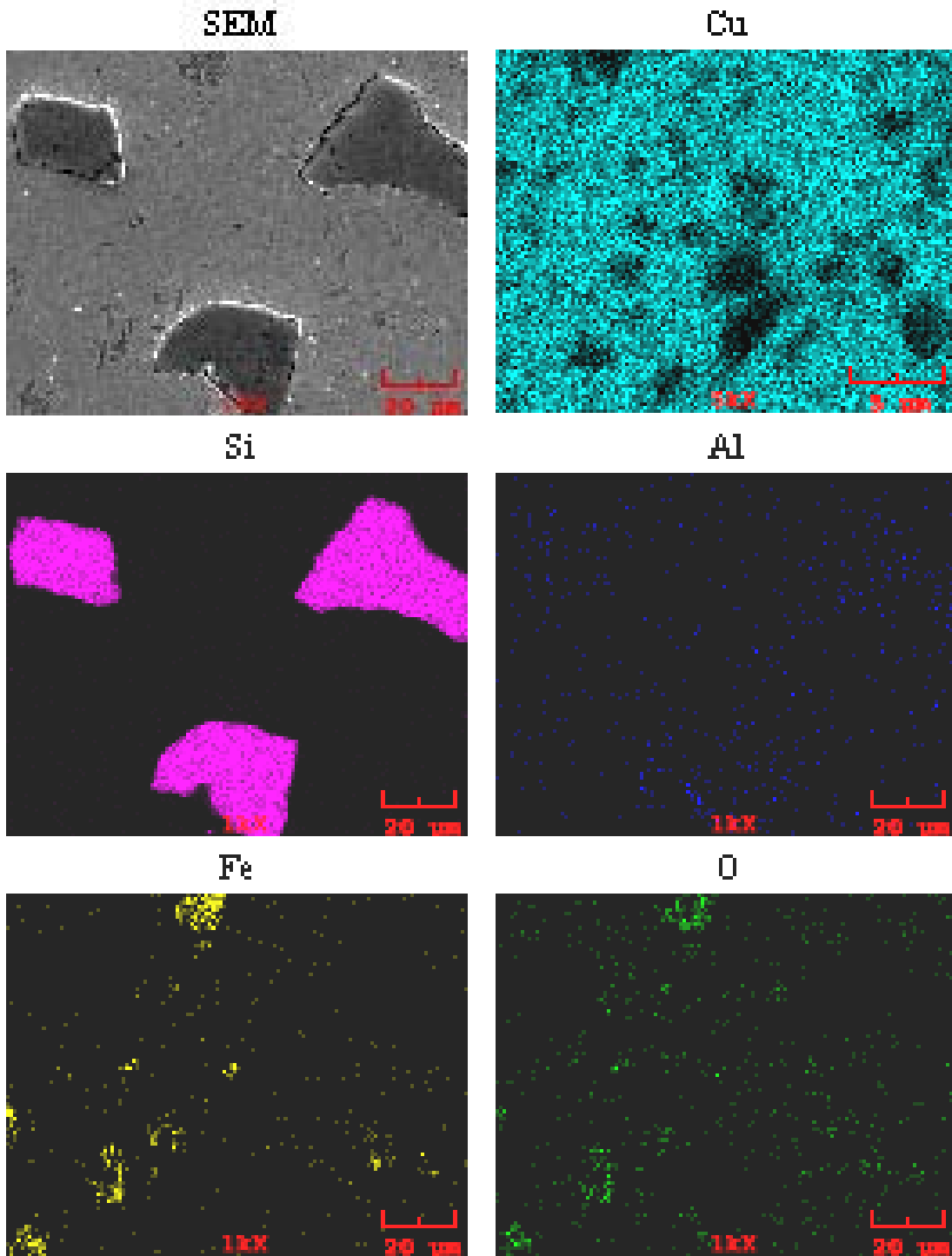
a)



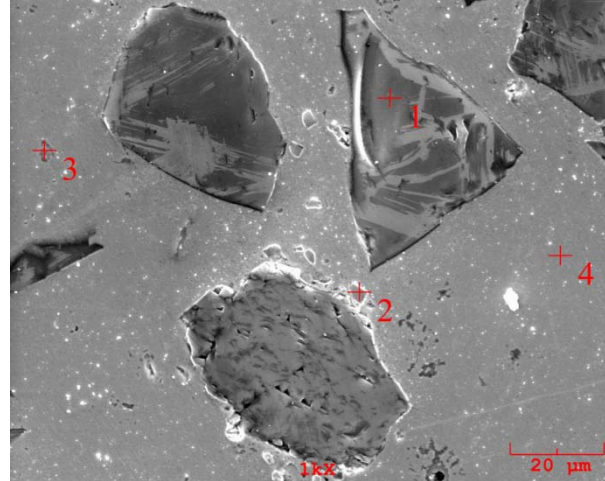
Ağ. %	1	2	3	4	5	6
C	56.18	58.07	7.596			18.42
O			25.94			5.174
Fe			23.14			
Al						1.189
Si	43.81	41.92			90.27	5.514
Cu			43.31	100	9.72	69.6

b)

Şekil 7.55. 700°C’de sinterlenmiş 30 μm’luk SiC ile takviye edilmiş a) C1Ss, b) C2Ss numunesinin EDS analizi



Şekil 7.56. 700°C’de sinterlenmiş 30μm’luk SiC ile takviye edilmiş C3Ss numunesinin map analizi



Ağ. %	1	2	3	4
C	51.921	50.014		
O			24.161	
Fe			12.045	
Si	48.079	35.691		
Cu		14.294	63.794	100

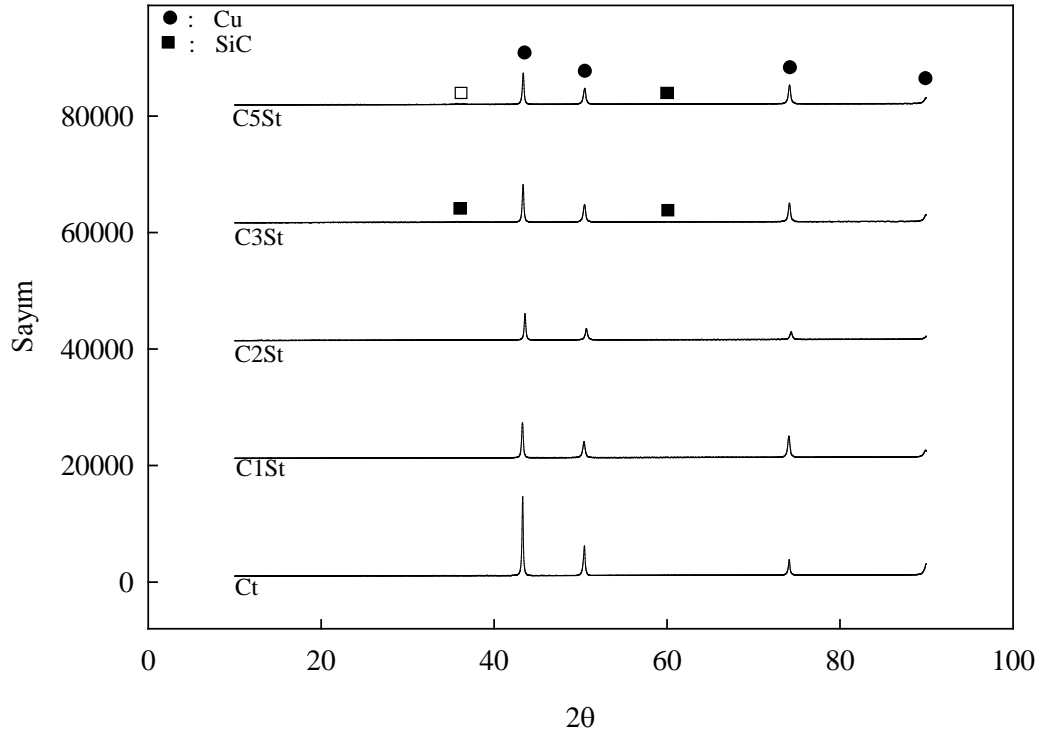
Şekil 7.57. 700°C'de sinterlenmiş 30 µm'luk SiC ile takviye edilmiş C5Ss numunesinin EDS analizi

7.2.3. XRD

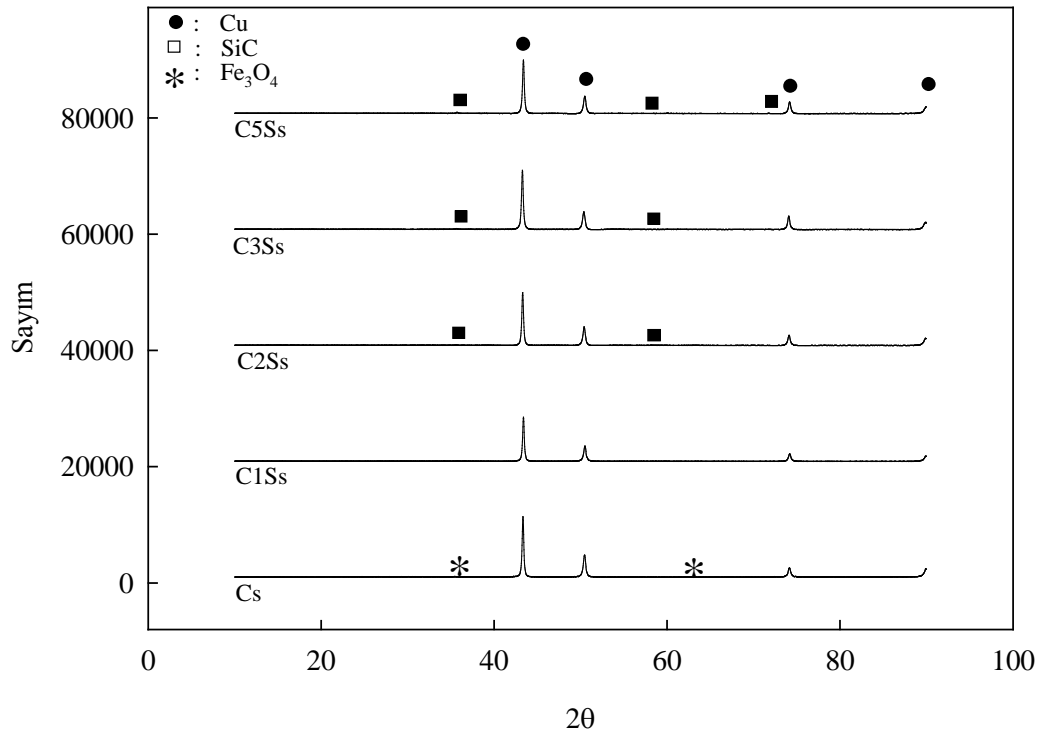
Farklı sıcaklıklarda 2 saat sinterlenen kompozitlere ait XRD paternleri Şekil 7.58 - 7.63'de görülmektedir. Ticari ve semente bakır tozları kullanılarak üretilen kompozitlerin XRD paternleri birbirlerine benzer olup, bakır ve SiC pikinden oluşmaktadır. Ağırlıkça %SiC miktarı arttıkça SiC pikleri belirginleşmektedir.

700°C ve 900°'de sinterlenmiş kompozitlerin XRD analizlerinde herhangi bir bakır oksit pikine rastlanmaz iken 950°C ve 1000°C'de sinterlenmiş kompozitlerin XRD analizlerinde az da olsa Cu_2O piki gözlenmiştir (Şekil 7.60, 7.61). Cu_2O piki, 950°C'de sadece C5St kompozitinde, 1000°C'de ise C2St, C3St ve C5St kompozitlerinde tespit edilmiştir. Bu muhtemelen bakırın artan sinterleme sıcaklığı ile oksidasyona eğiliminin artmasından kaynaklanmaktadır [126].

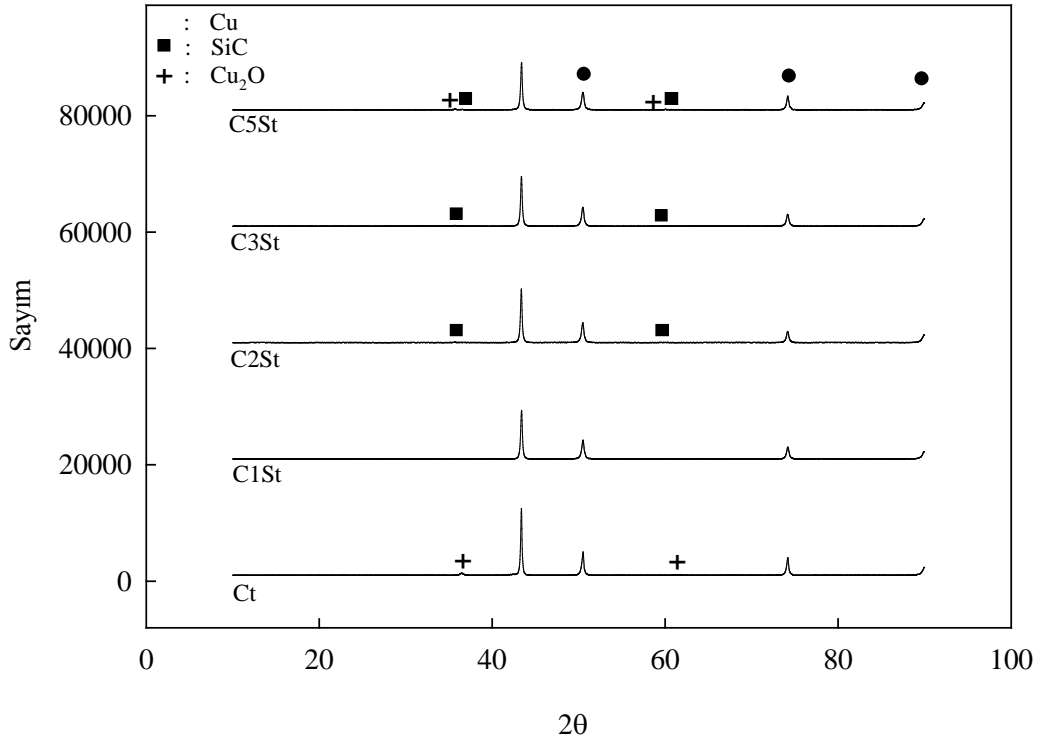
Şekil 7.59 ve 7.63a'da bakır ve SiC dışında Fe_3O_4 piki görülmektedir. Fe, bakır tozunun üretimi esnasında çözültide kalmış ve sinterleme sıcaklığında oksitlenmiştir ancak, kompozitlerin relatif yoğunluk, sertlik ve iletkenliğine etki etmemektedir.



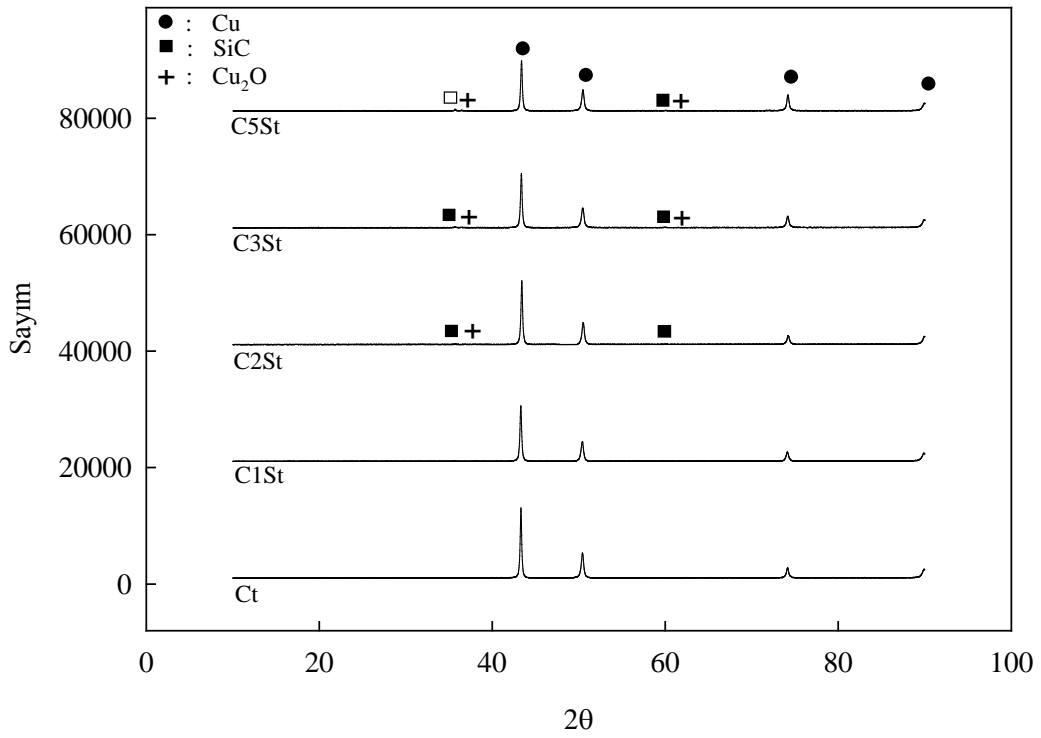
Şekil 7.58. 900 °C' de sinterlenen Cu (ticari)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri



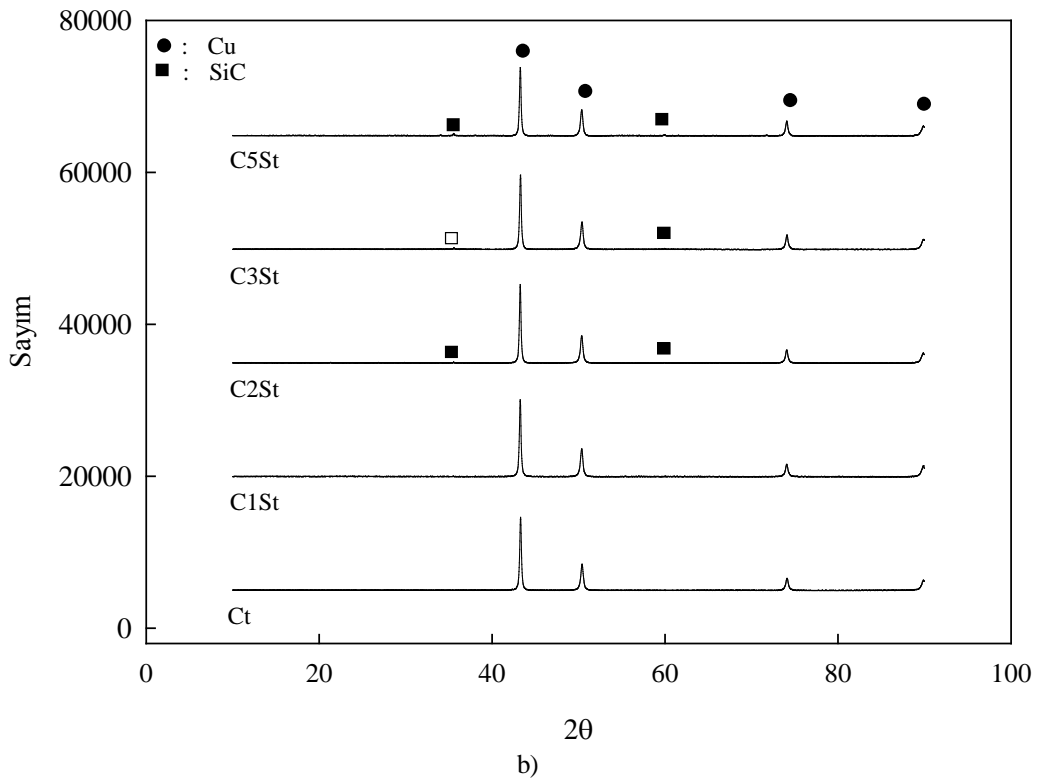
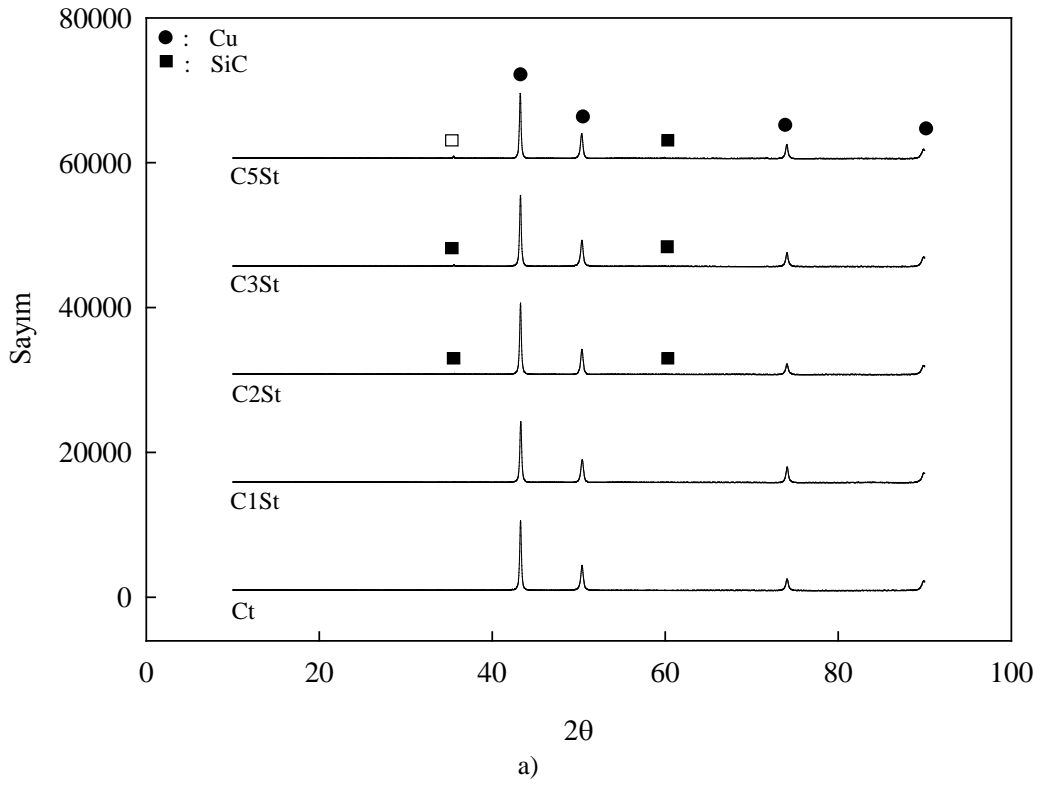
Şekil 7.59. 900 °C' de sinterlenen Cu (semente)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri



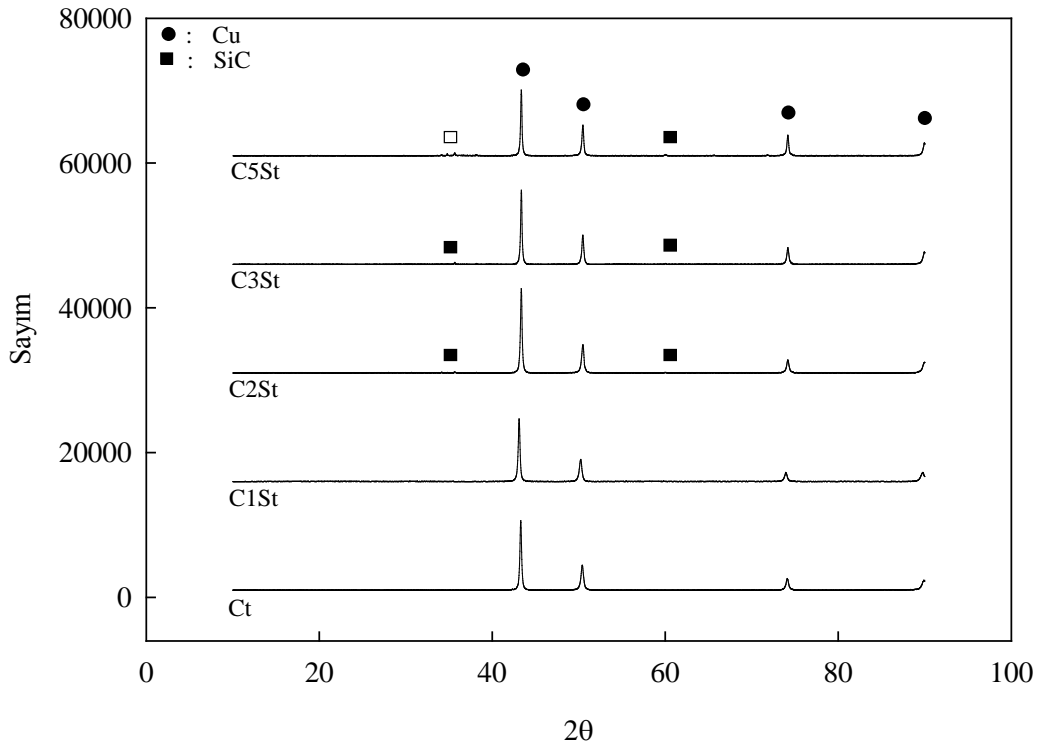
Şekil 7.60. 950 °C' de sinterlenen kompozitlerin XRD paternleri



Şekil 7.61. 1000 °C' de sinterlenen kompozitlerin XRD paternleri

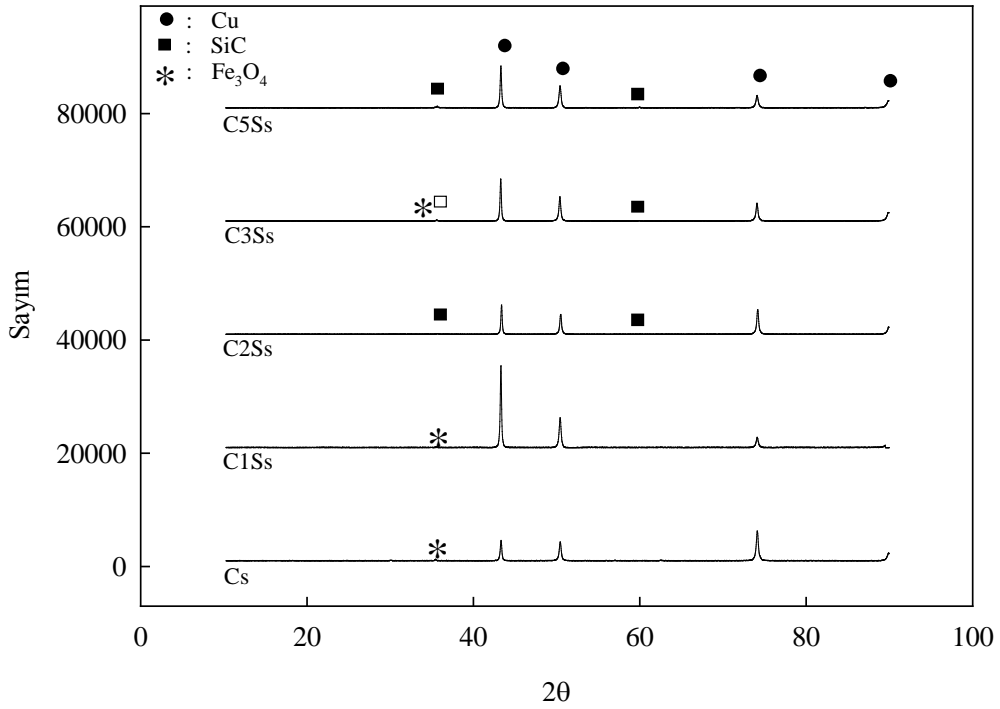


Şekil 7.62. 700 °C’de sinterlenen a) 1 μ m, b) 5 μ m ve c) 30 μ m tane boyutunda SiC içeren Cu (ticari)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri



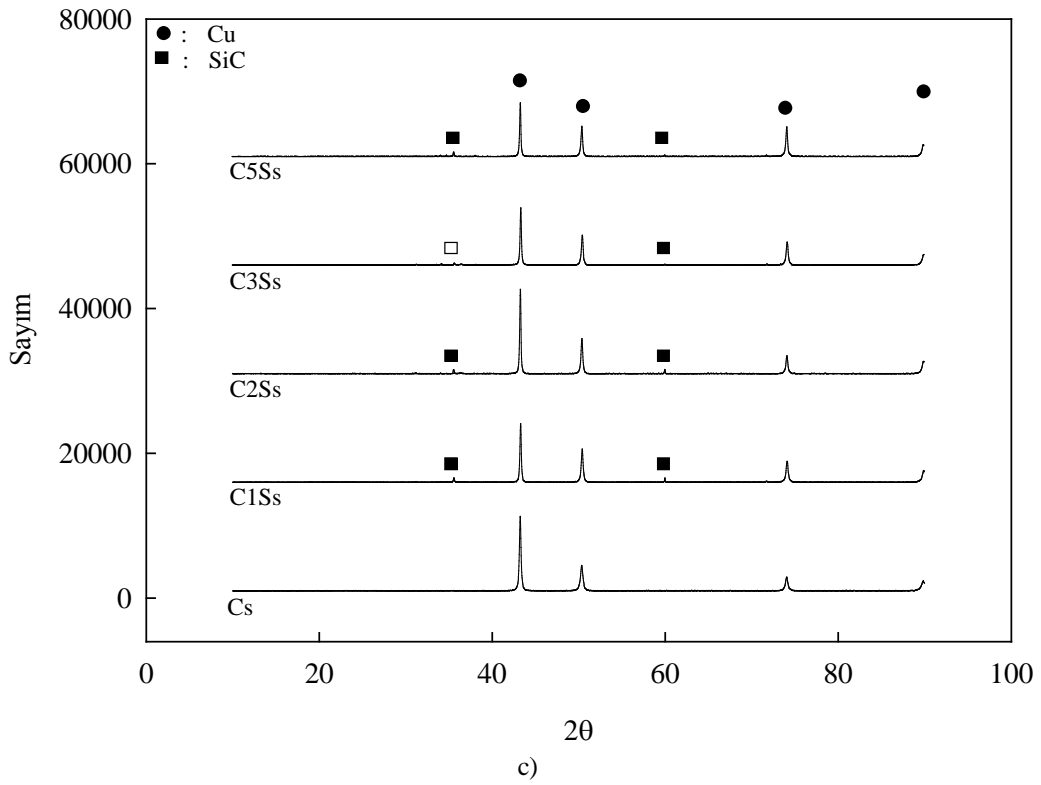
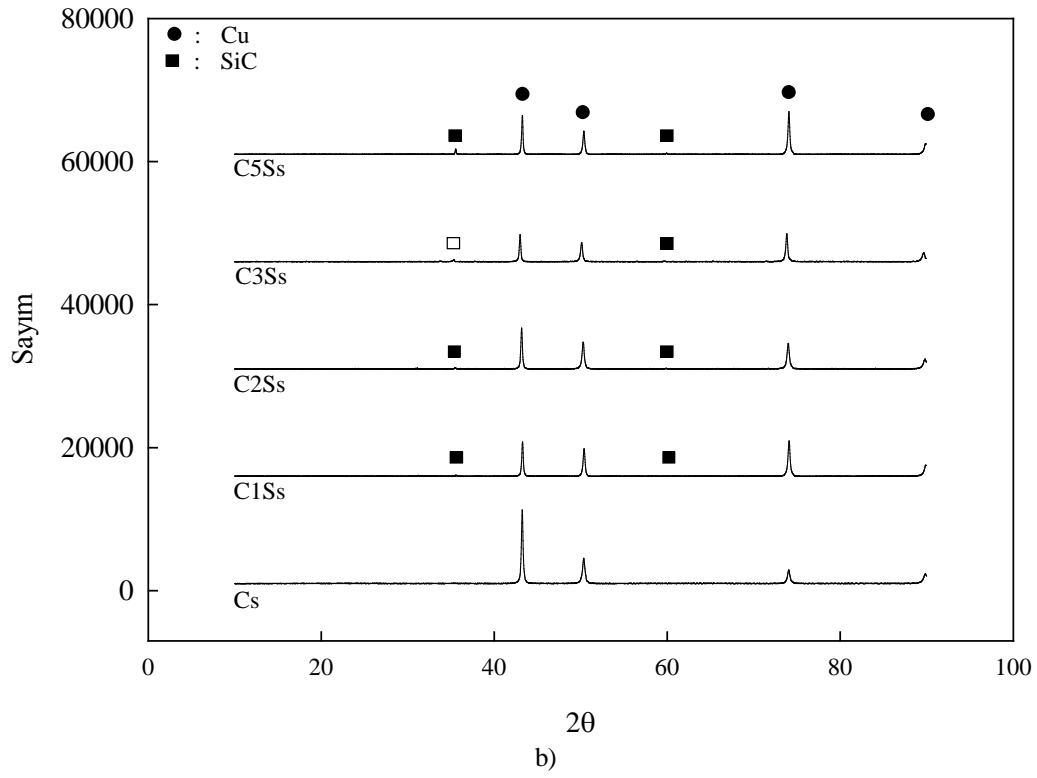
c)

Şekil 7.62(Devam) 700 °C'de sinterlenen a) 1µm, b) 5µm ve c) 30µm tane boyutunda SiC içeren Cu (ticari)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri



a)

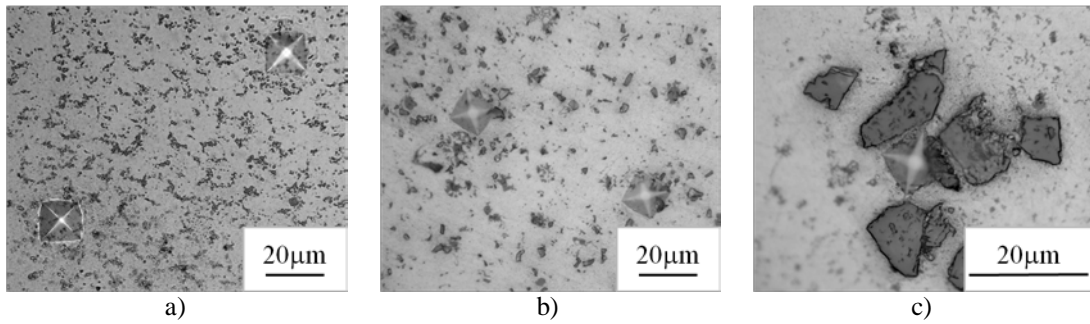
Şekil 7.63. 700 °C'de sinterlenen a) 1µm, b) 5µm ve c) 30µm tane boyutunda SiC içeren Cu (semente)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri



Şekil 7.63 (Devam) 700 °C’de sinterlenen a) 1μm, b) 5μm ve c) 30μm tane boyutunda SiC içeren Cu (semente)-SiC kompozitlerinin XRD paternleri

7.2.4. Sertlik

Ticari ve semente bakır tozları ile elde edilen Cu ve Cu-SiC kompozit numunelerin, farklı sinterleme sıcaklığı ve takviye miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri (HV) Tablo 7.5’de verilmiştir. Kompozit numunelerde sertlik ölçümü Cu ve SiC tanelerini homojen olarak kapsayacak şekilde iz oluşturulmasına dikkat edilerek yapılmıştır (Şekil 7.64). Cu ve 1-5 μm ’luk SiC takviyeli Cu-SiC kompozitlerinin sertlik ölçümlerinde 50gr yük, 30 μm ’luk SiC takviyeli Cu-SiC kompozitlerinin sertlik ölçümlerinde ise, sertlik izinin Cu ve SiC’ün her ikisinde kapsaması için 100gr yük kullanılmıştır. Cu ve Cu-SiC kompozitlerinin sertlik değerleri mikrosertlik cihazında en az beş farklı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.64a) 1 μm , b) 5 μm ve c) 30 μm partikül boyutuna sahip Cu-SiC kompozitindeki sertlik izi görüntüsü

700 °C’ de sinterlenen farklı boyuttaki SiC ile takviye edilmiş kompozit numunelere ait mikrosertlik değerleri (HV) saf bakırla birlikte Tablo 7.6’da verilmiştir. Kompozitlerin sertliğinin SiC içeriğine ve partikül boyutuna bağlı olarak değişimi Şekil 7.65-7.66’daki kontür diyagramları yardımıyla görülmektedir. Ayrıca yorumlamada kolaylık sağlaması amacıyla Şekil 7.67-7.68’de sütun ve çizgi grafikleri verilmiştir.

Tablo 7.5 Farklı sıcaklıklarda sinterlenen Cu-SiC kompozitlerinin elde edilen Vickers sertlik değerleri

Numune	Sıcaklık(°C)		
	900	950	1000
	Sertlik (HV)		
Ct	126 ± 2,1	123 ± 1,0	124 ± 4,1
C1St	136 ± 5,6	132 ± 3,2	137 ± 2,6
C2St	141 ± 3,6	134 ± 1,1	139 ± 2,6
C3St	147 ± 2,5	147 ± 2,4	142 ± 5,5
C5St	149 ± 3,1	154 ± 4,6	146 ± 1,2
Cs	118 ± 3,8	-	-
C1Ss	122 ± 2,6	-	-
C2Ss	136 ± 1,5	-	-
C3Ss	140 ± 3,0	-	-
C5Ss	144 ± 3,0	-	-

Tablo 7.5'te kompozit numunelerin farklı sinterleme sıcaklığı ve takviye miktarına bağlı olarak değişen sertlik değerleri (HV) çok büyük farklılıklar göstermemiştir. Genel olarak artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte, matrisin yumuşamasından dolayı, kompozitlerin sertliği az da olsa azalmaktadır.

Tablo 7.5'e göre 900°C'de ticari bakır tozundan sinterlenen numunenin sertliği 126 HV, semente bakır tozundan sinterlenen numunenin sertliği 118 HV'dir. Bu değerler bakırın literatürde belirtilen 37 HV olan sertlik değerinden oldukça yüksektir ve muhtemelen sinterleme sonrasında yapılan sıcak presten kaynaklanmaktadır. Ağ.%1 SiC ilavesi ile ticari tozlardan hazırlanan kompozitin sertliği 136 HV'e, semente tozlardan hazırlanan kompozitin sertliği 122 HV değerine yükselmiştir. SiC içeriği arttıkça kompozitlerin sertlik değerleri artmıştır. Sünek bakır matrisin sertliği sert disperse faz ilavesiyle artmaktadır [127, 128]. Zaten bu çalışmanın amacı, sünek olan bakır matrisin sertliğini artırırken elektrik iletkenliğini de optimum seviyelerde tutmaktır. Sertlik malzemenin lokal plastik deformasyona karşı direnç kabiliyetini gösteren fiziksel bir parametredir. Yüksek sertliğe sahip takviye bileşeni olarak davranan SiC latiste distorsiyona sebep olan plastik deformasyon meydana

geldiğinde, dislokasyonların hareketine engel olmakta bu kompozit malzemede yüksek oranda iç gerilmelerin oluşumuna sebep olmaktadır. Latiste iç gerilmelerle üretilen çok sayıdaki dislokasyonların hareketi disperse fazı ve tane sınırı tarafından engellenmekte bu da malzemede mukavemet artışına neden olmaktadır [35, 85].

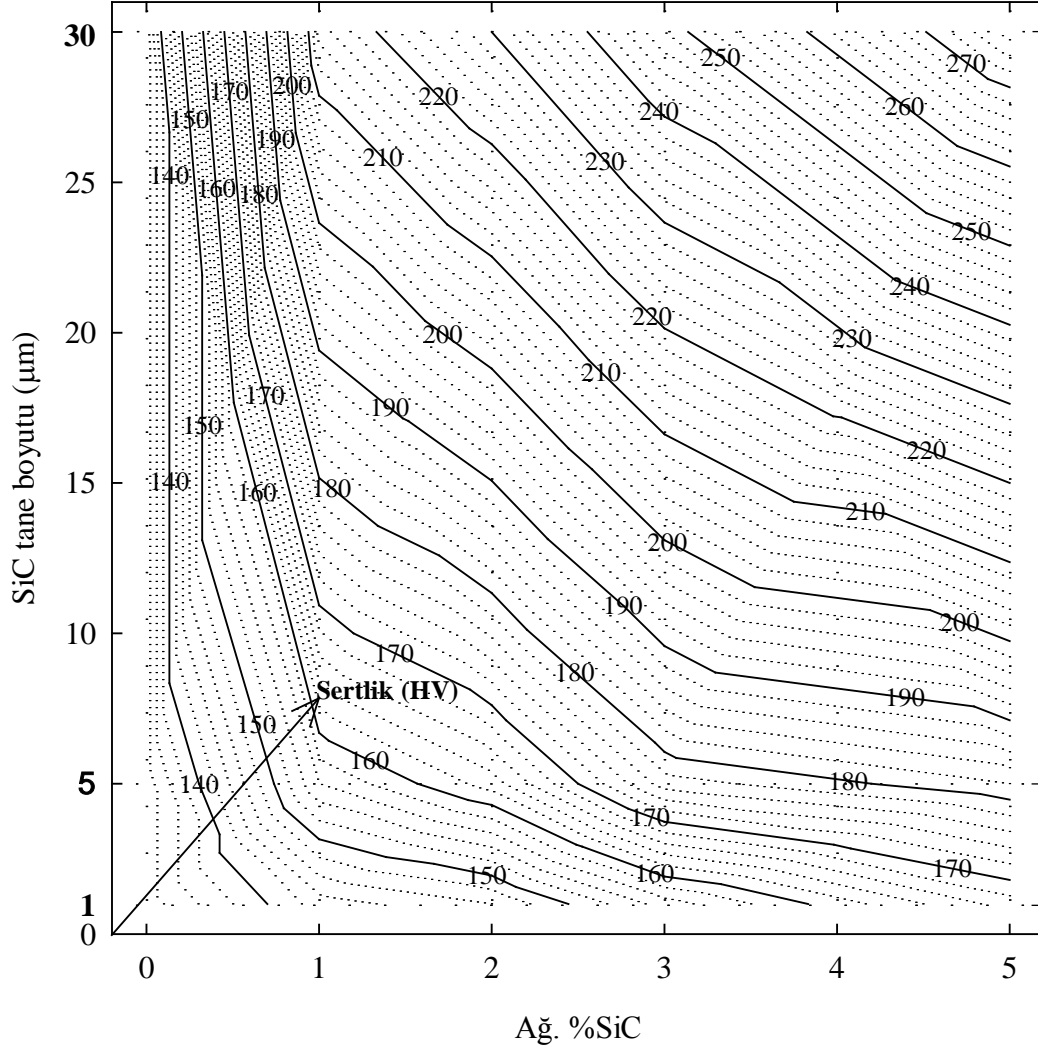
Genel olarak ticari bakır tozu kullanılarak sinterlenen numunelerin sertliği, sement bakır tozu kullanılarak sinterlenen numunelerden bir miktar yüksektir. Bu durum ticari tozlardan hazırlanan numunelerin çok az farkla da olsa daha yüksek olan yoğunluklarından kaynaklanabilir.

Tablo 7.6. 700°C’de sinterlenmiş Cu-SiC kompozitlerinin mikrosertlik değerleri

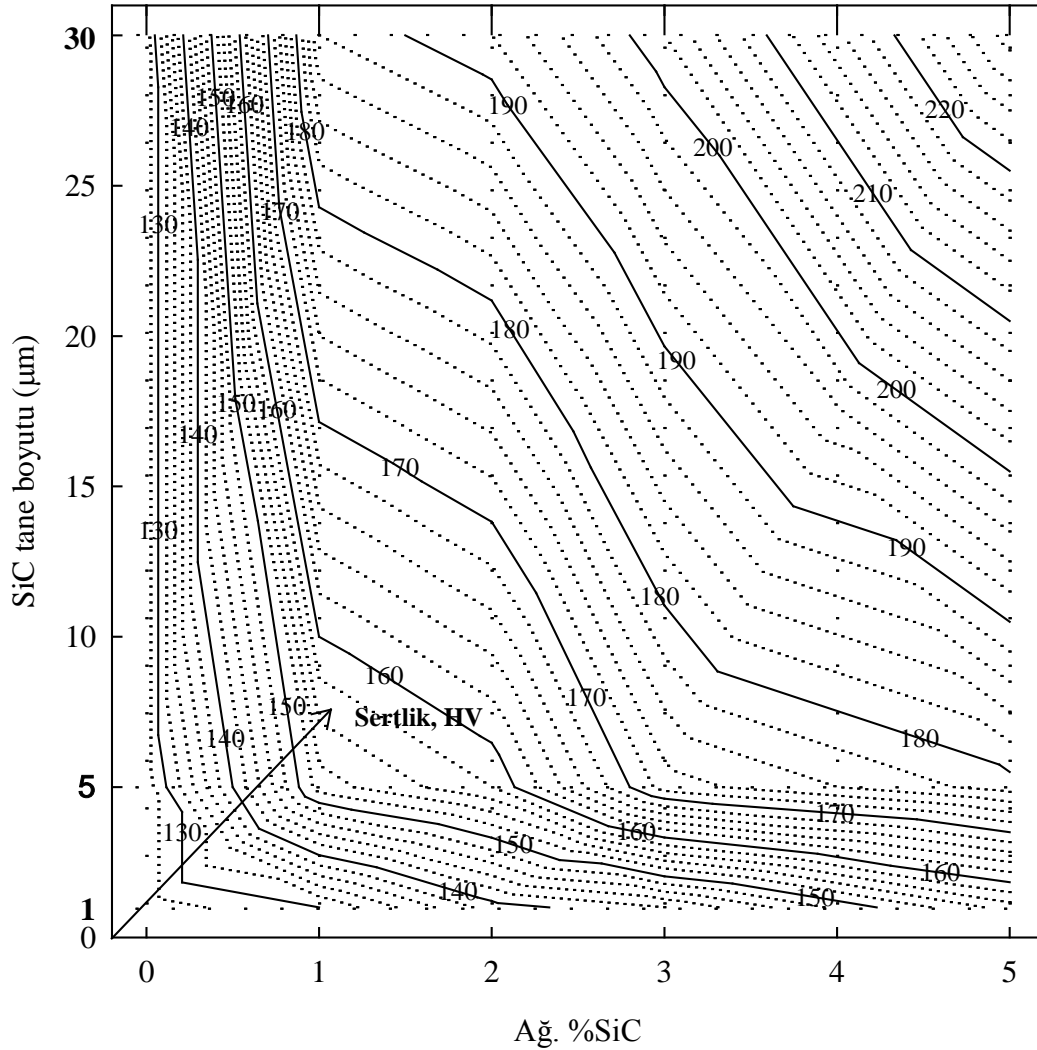
Numune	SiC tane boyutu (μm)		
	1	5	30
	Sertlik (HV)		
Ct	133 \pm 2,9	133 \pm 2,9	133 \pm 2,90
C1St	143 \pm 3,0	156 \pm 5,6	215 \pm 17,0
C2St	146 \pm 4,2	163 \pm 4,6	230 \pm 13,4
C3St	155 \pm 1,0	177 \pm 5,3	248 \pm 15,5
C5St	167 \pm 3,7	182 \pm 6,3	277 \pm 32,0
Cs	127 \pm 1,2	127 \pm 1,2	127 \pm 1,20
C1Ss	130 \pm 2,8	153 \pm 4,2	188 \pm 13,8
C2Ss	139 \pm 7,6	158 \pm 2,1	192 \pm 14,0
C3Ss	142 \pm 6,0	173 \pm 3,5	202 \pm 15,0
C5Ss	155 \pm 0,6	179 \pm 6,0	229 \pm 30,0

Sinterleme sıcaklığının 700°C’ye düşmesi ile tüm numunelerde sertlik değerleri artmıştır. Örneğin ticari Cu numunesi için 900°C’de 126 HV iken 700°C’de 135 HV, sement Cu’ın 900°C’de 118 HV iken 700°C’de 127 HV’ye ulaşmıştır. Bu artış SiC takviyeli numunelerde daha belirgindir. Ayrıca takviye edilen SiC partikül boyutu artışıyla sertlik değerleride oldukça artmıştır. 1 μm ’luk SiC takviyeli CuSs kompozitinin sertliği 155 HV iken, 30 μm partikül boyutlu SiC takviyesinde 229

HV'dir. Kompozit numunelerin mikrosertlik değerlerinin SiC partikül boyutunun artmasıyla daha da artmasının nedeni, indenterin sert takviye bileşenine temas alanının artması olabilir.

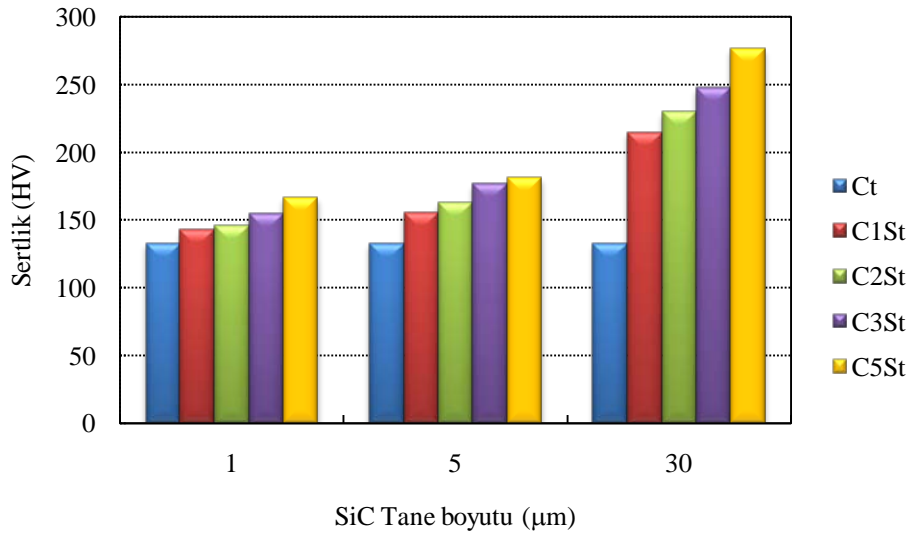


Şekil 7.65. 700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertliğinin kontür diyagramında değişimi.

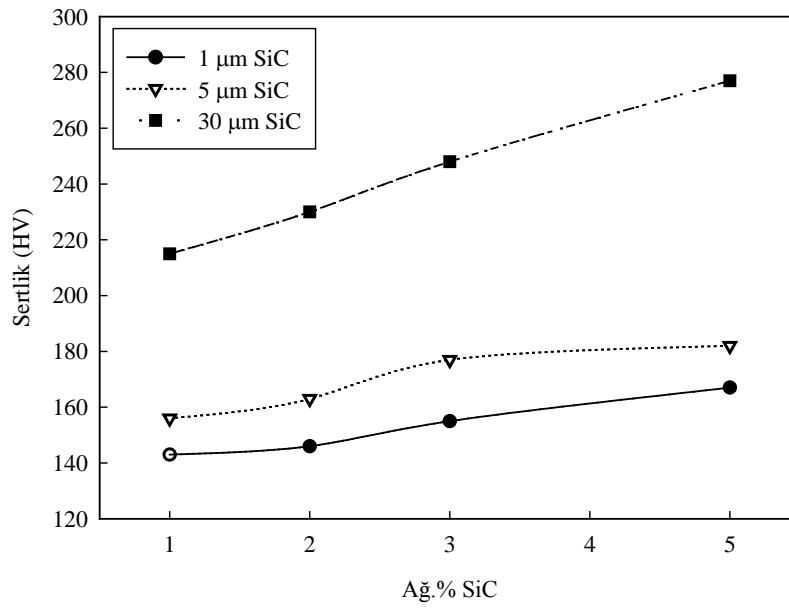


Şekil 7.66. 700°C’de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertliğinin kontür diyagramında değişimi.

Kontür diyagramlarından ağ.%SiC miktarı ve SiC tane boyutu arttıkça numunelerin sertlik değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca şekil 7.67a ve 7.68a’da verilen sütun grafiklerinden numunelerdeki sertlik artış oranının 30 μm ’luk SiC ile takviye edilen kompozitlerde çok daha fazla olduğu görülmektedir.

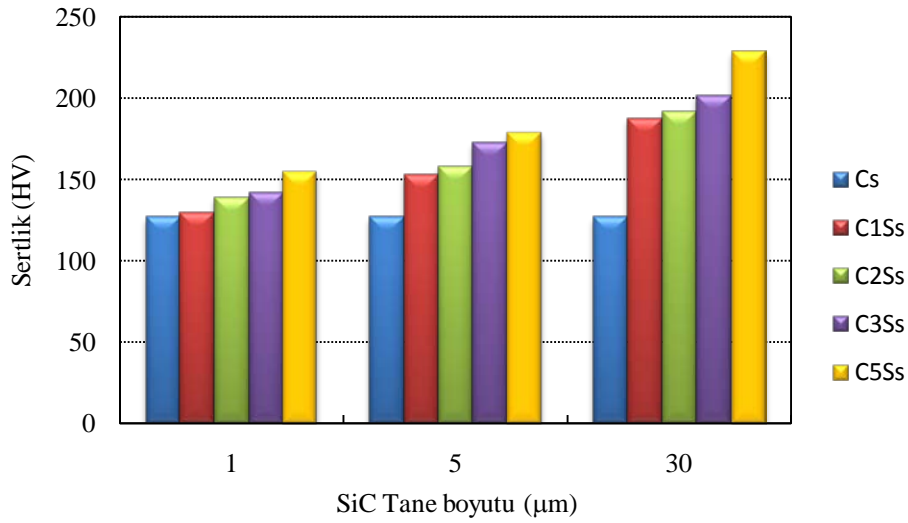


a)

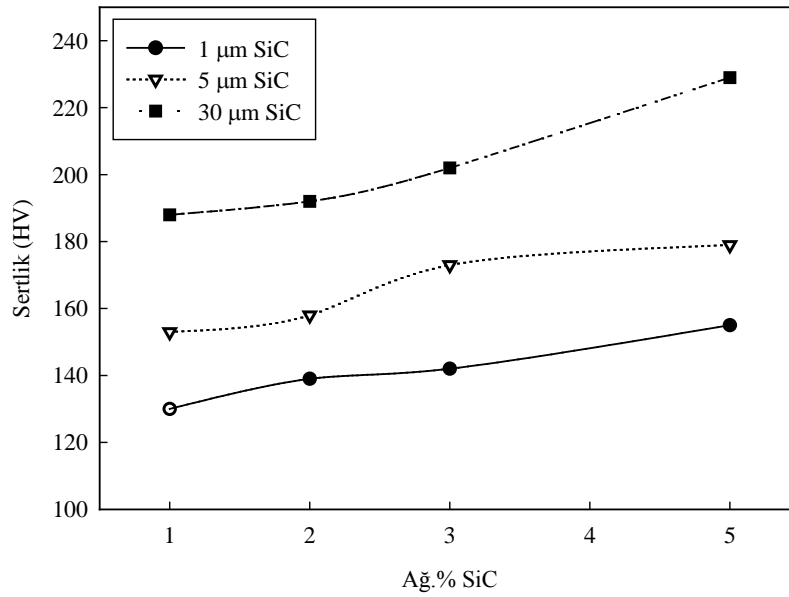


b)

Şekil 7.67. Ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertlik değişiminin a) sütun grafiği, b) çizgi grafiği



a)



b)

Şekil 7.68. Semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak sertlik değişiminin a) sütun grafiği, b) çizgi grafiği

7.2.5 Elektrik iletkenliği

Ticari Cu ve Cu-SiC numunelerinin farklı sinterleme sıcaklığı (900°C, 950°C, 1000°C) ve takviye miktarına bağlı olarak değişen elektriksel iletkenlik değerleri GE marka iletkenlik test cihazında ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 7.7’de verilmiştir. Bu tabloya göre kompozitlerin elektrik iletkenlikleri, artan sinterleme sıcaklığı ile

birlikte genel olarak azalma eğilimindedir ve yoğunluk artışına bağlı olarak elektrik iletkenliğinde artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Ct numunesinin elektrik iletkenlik değeri %98,8 IACS, Cs'nin %93 olarak tespit edilmiştir ve artan SiC oranı ile birlikte elektrik iletkenlik değerlerinde azalmalar görülmüştür. Saf bakır içerisine katılan partiküller (veya atomlar) yapıyı (kafesi) distorse etmek suretiyle elektriksel direnci artırır. Bir metalin elektrik iletkenliği temel olarak iç yapısındaki elektronların hareketine bağlıdır. Bakır matrikste takviye bileşeni olarak kullanılan SiC partikülleri yapıyı distorse ederek elektronların hareketini önlemekte böylece artan SiC miktarı ile kompozitin elektrik iletkenliği azalmaktadır [35, 118, 119]. Mikroyapı incelemelerinde nispeten yüksek sıcaklıklarda sinterlenen yüksek SiC içerikli numunelerde bakır partiküllerini çevreleyen silisyum karbür ağının düzenli yapısının bozulmaya yüz tuttuğu belirtilmiştir. SiC'ün düzenli olmayan dağılımı, aynı içeriğe sahip düzenli SiC dağılımına karşılık elektrik iletimini daha fazla düşürmüştür.

Tablo 7.7. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen Cu-SiC kompozitlerinin elektrik iletkenlikleri (%IACS)

Numune	Sıcaklık(°C)		
	900	950	1000
	Elektriksel İletkenlik (% IACS)		
Ct	98,8 ± 0,6	96,7 ± 1,3	93,0 ± 1,6
C1St	87,7 ± 0,8	85,9 ± 0,9	87,0 ± 1,1
C2St	83,0 ± 1,3	75,5 ± 1,5	82,4 ± 1,1
C3St	72,7 ± 1,7	68,2 ± 0,9	70,1 ± 0,9
C5St	59,9 ± 1,6	53,3 ± 1,0	59,3 ± 1,3
Cs	93,0 ± 1,4	-	-
C1Ss	60,3 ± 1,9	-	-
C2Ss	46,5 ± 1,3	-	-
C3Ss	60,1 ± 1,7	-	-
C5Ss	53,1 ± 1,3	-	-

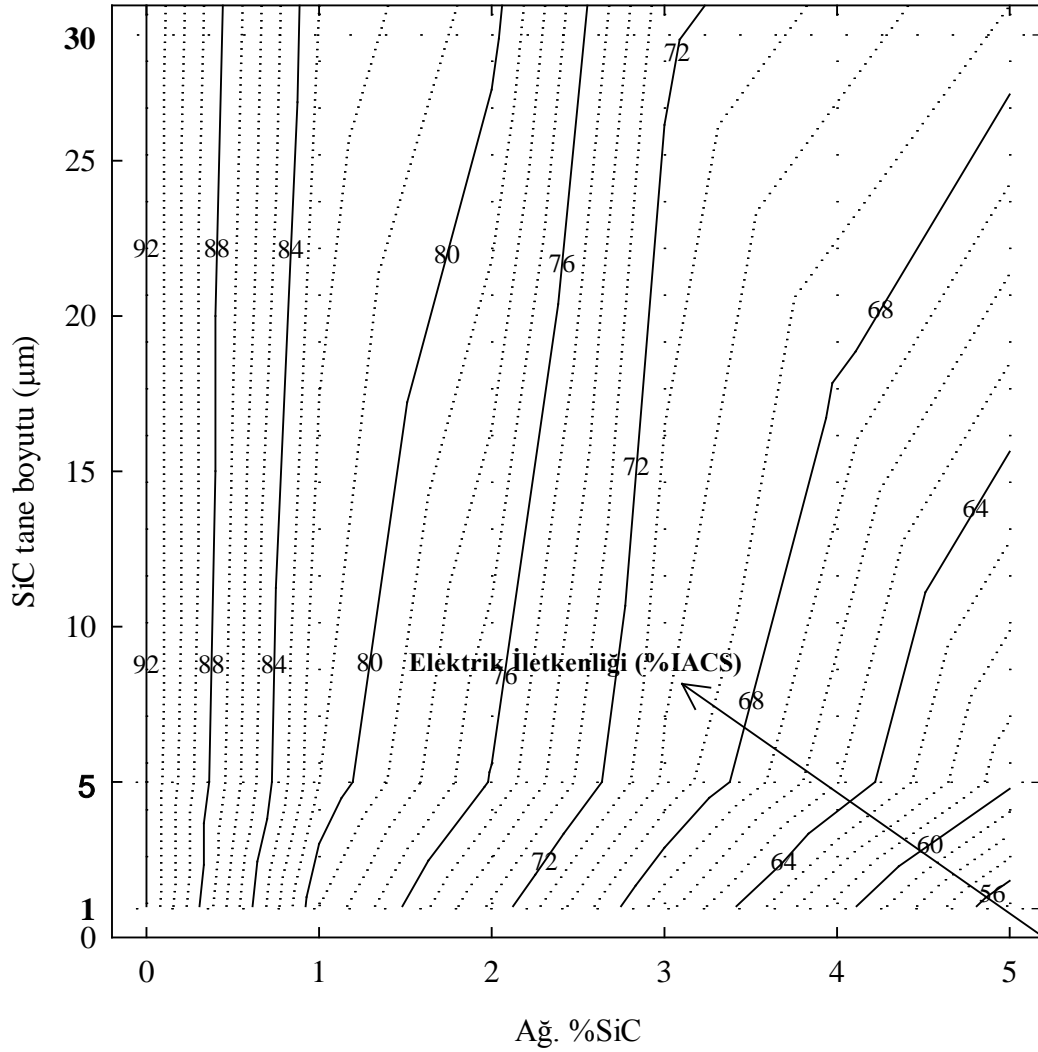
Tablo 7.7'den görüldüğü gibi 900°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin elektriksel iletkenliklerinde (özellikle ağ. % 1 ve 2 SiC içeren kompozitlerde) çok düşüş görülmüştür. Ct'ye ağ.%1 SiC ilavesiyle elektrik iletkenliği %98,8'den %87,7 IACS'ye düşmekte iken Cs'ye aynı oranda SiC ilavesiyle iletkenlik %93'ten %60 IACS'ye inmiştir. Bu nedenle sinterleme sıcaklığı kademeli olarak 900 °C' den 850-800- 750 ve 700°C'ye indirilmiş, fakat 700°C dışındaki sinterleme sıcaklıklarında istenen iletkenlik değerleri elde edilememiştir. 700 °C' de başarılı olunmuş ve kalan çalışmalar 700 °C sinterleme sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.8'de farklı partikül boyutlarında SiC ile takviye edilmesi suretiyle 700°C'de 2 saat grafitte gömülerek sinterlenen ve sonrasında sıcak preslenerek elde edilen Cu ve Cu-SiC kompozitlerine ait elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir. Tablodan SiC partikül boyutu arttıkça kompozitlerin elektriksel iletkenliklerinin arttığı görülmektedir. 1µm'luk SiC takviyesinde C1St ve C1Ss'in elektrik iletkenlikleri sırasıyla %85,9 IACS ve %79 IACS, 30µm'luk SiC takviyesinde %91,3 IACS ve %83 IACS olarak tespit edilmiştir. Saf bakır içerisine katılan SiC partiküllerinin boyutu azaldıkça elektronlar saçılır ve böylelikle mobilite ve iletkenlik azalır [112].

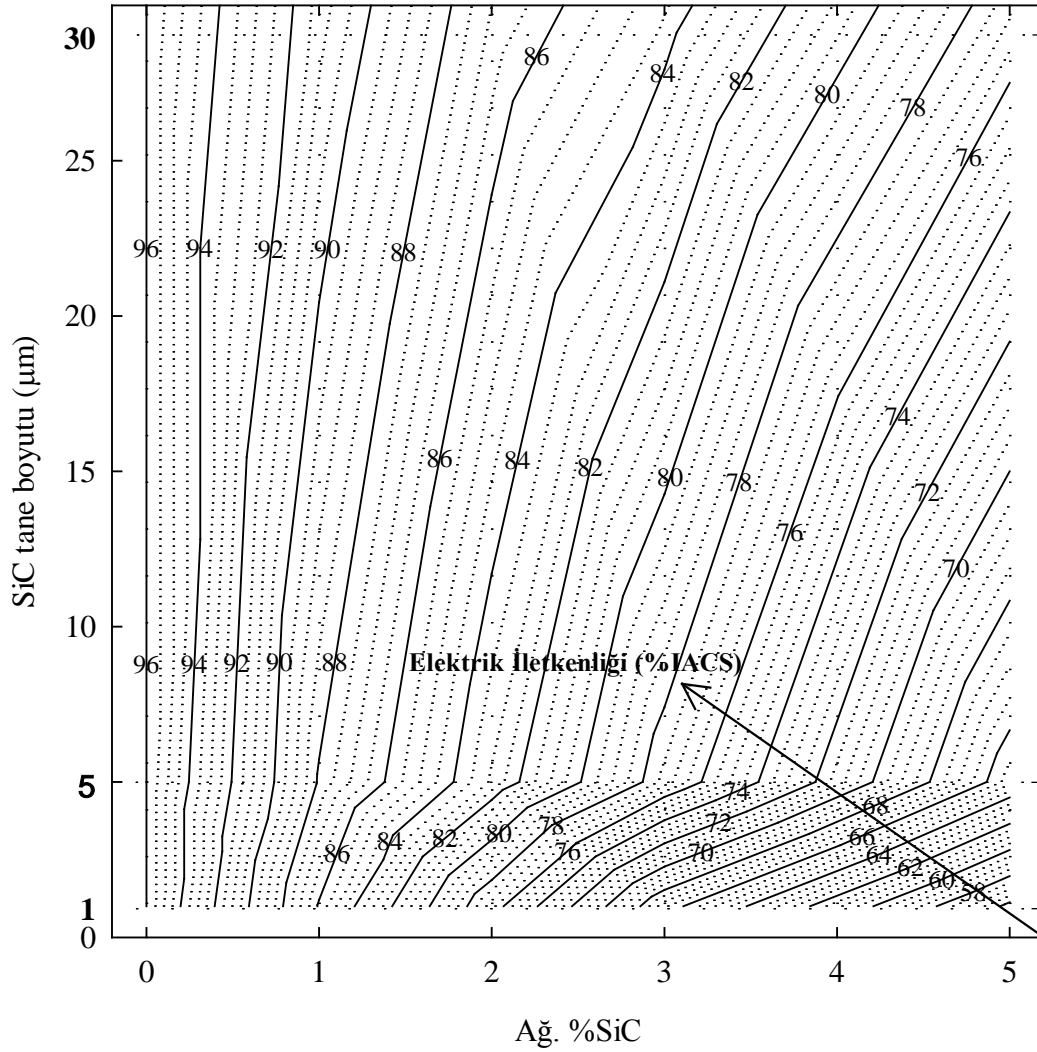
Tablo 7.8. 700 °C’de sinterlenen farklı tane boyutlarında SiC içeren Cu-SiC kompozitlerinin elektriksel iletkenlik değerleri

Numune	SiC tane boyutu (μm)		
	1	5	30
	Elektriksel İletkenlik (% IACS)		
Ct	$95,6 \pm 1,7$	$95,6 \pm 1,4$	$95,6 \pm 0,6$
C1St	$85,9 \pm 0,7$	$87,9 \pm 1,1$	$91,3 \pm 1,3$
C2St	$76,7 \pm 0,8$	$82,9 \pm 1,7$	$87,0 \pm 1,6$
C3St	$66,6 \pm 0,9$	$77,3 \pm 0,9$	$84,6 \pm 1,1$
C5St	$55,7 \pm 1,1$	$65,2 \pm 1,3$	$77,2 \pm 1,2$
Cs	$91,7 \pm 1,8$	$91,7 \pm 1,8$	$91,7 \pm 1,7$
C1Ss	$79,0 \pm 1,4$	$81,0 \pm 1,1$	$83,0 \pm 0,7$
C2Ss	$72,8 \pm 1,0$	$75,9 \pm 1,3$	$80,5 \pm 1,4$
C3Ss	$66,4 \pm 0,9$	$69,8 \pm 0,9$	$72,4 \pm 1,5$
C5Ss	$54,9 \pm 1,2$	$60,3 \pm 1,2$	$69,0 \pm 1,8$

700°C’de sinterlenmiş numunelerin elektriksel iletkenlik değerlerinin SiC içeriğine ve boyutuna bağlı olarak değişimi Tablo 7.8’deki verilerden hareketle Şekil 7.69 ve 7.70’de kontür diyagramlarında ve yorum kolaylığı için Şekil 7.71 ve 7.72’de sütun ve çizgi grafiği olarak verilmiştir.

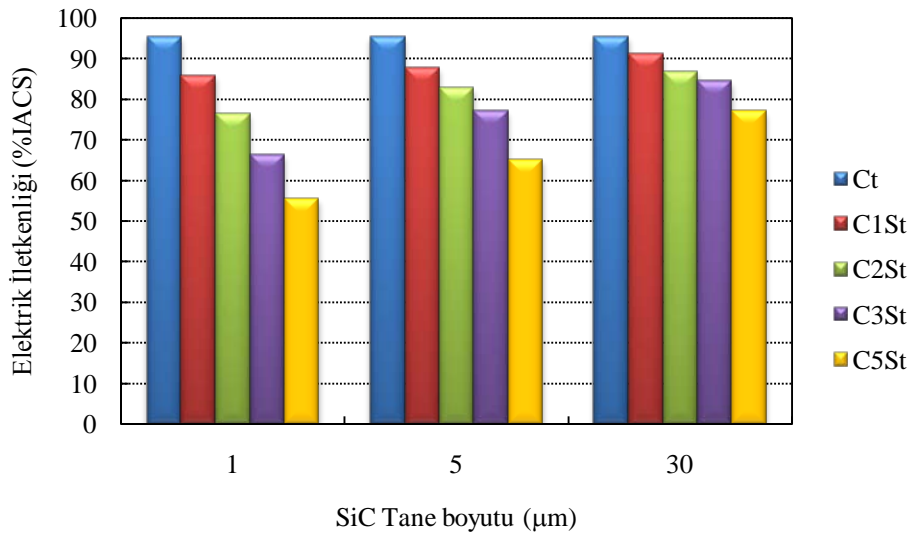


Şekil 7.69. 700°C’de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin kontür diyagramında değişimi.

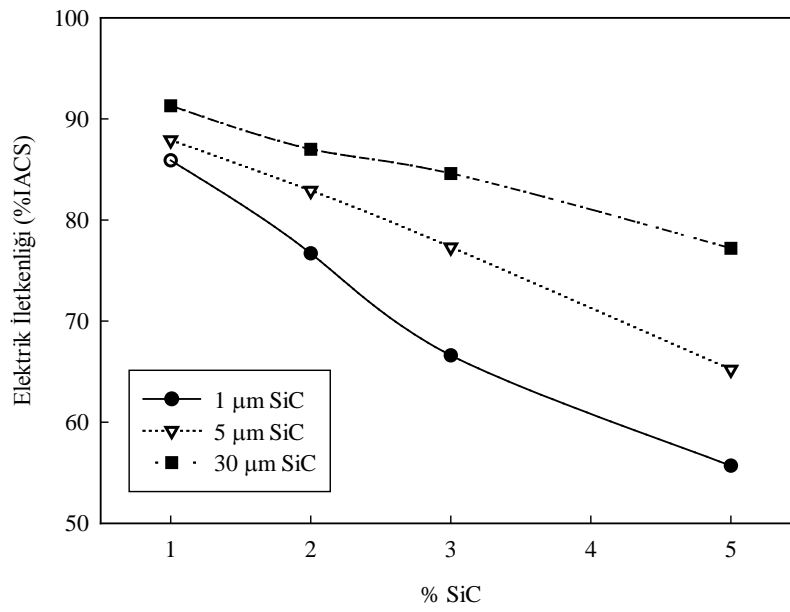


Şekil 7.70. 700°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin kontür diyagramında değişimi.

Şekil 7.69 ve 7.70'deki kontür diyagramlarından ağ.%SiC miktarı arttıkça kompozitlerin elektrik iletkenliklerinin azaldığı ve SiC tane boyutundaki artış ile birlikte de arttığı görülmektedir.

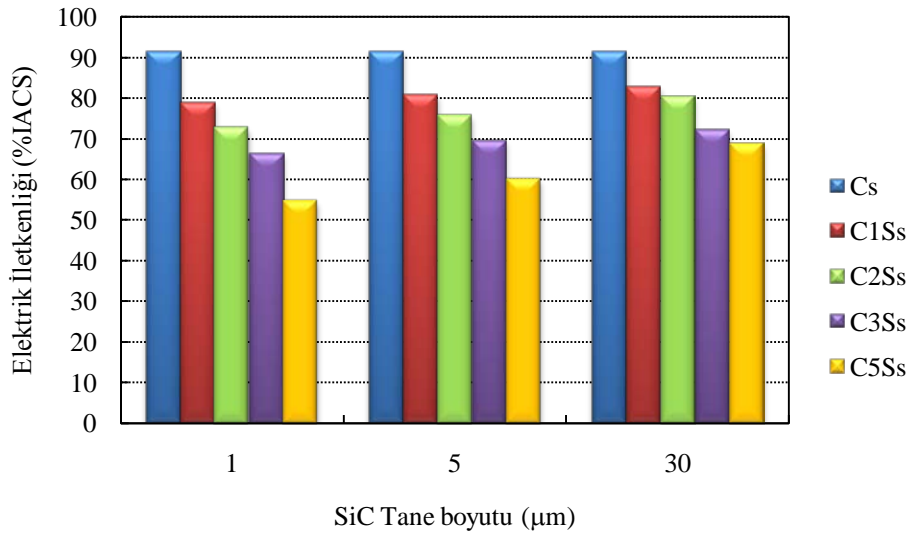


a)

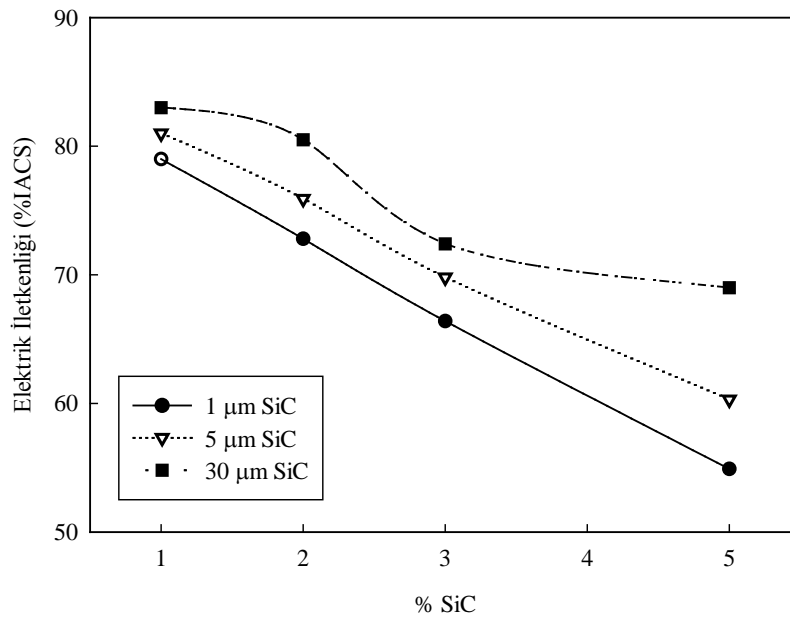


b)

Şekil 7.71. 700°C'de sinterlenen ticari Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin a) sütun grafiği, b) çizgi grafiği



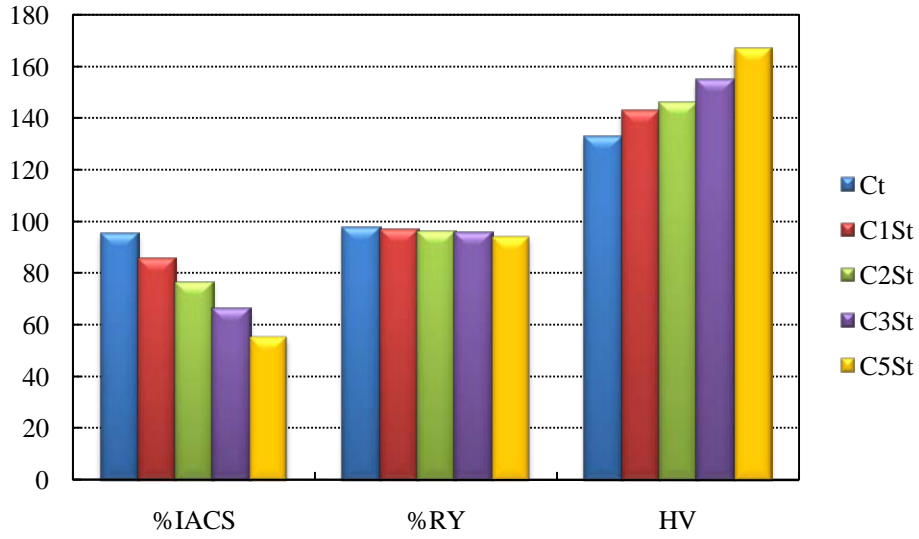
a)



b)

Şekil 7.72. 700°C'de sinterlenen semente Cu-SiC kompozitlerinin SiC boyut ve içeriğine bağlı olarak elektrik iletkenliğinin a) sütun grafiği, b) çizgi grafiği

Şekil 7.73'de 700°C'de sinterlenmiş 1μm partikül boyutuna sahip SiC ile takviye edilmiş kompozitlerin relatif yoğunluk, elektrik iletkenlik ve sertlik değerleri arasındaki ilişki %SiC'e bağlı olarak görülmektedir. Şekilden artan SiC miktarı ile kompozitlerin relatif yoğunluk ve elektrik iletkenlikleri azalırken sertliklerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca tüm bu özellikler SiC partikül boyutunun artışıyla artış sergilemektedir.



Şekil 7.73. 700°C’de sinterlenmiş 1µm partikül boyutuna sahip SiC ile takviye edilmiş kompozitlerin relatif yoğunluk, elektrik iletkenlik ve sertlik değerleri arasındaki ilişki

7.2.6 Kontak Testi

Kontaktörler, aşırı yük işletme şartları dahil, normal devre şartlarında akımları kapamaya, taşımaya ve kesmeye yetenekli uzaktan kumanda edilebilen anahtarlama düzenekleridir. Kullanım yerleri çok çeşitlidir; elektrik motorlarına yol verilmesinde, kompanzasyon, ısıtma cihazlarının devreye girip çıkması gibi neredeyse bütün devrelerde ve sistemlerde kullanılırlar [129, 130].

Genel olarak kontaktörler aslında kolay kolay arıza yapmayan cihazlardır. Seçim doğru yapıldıysa ve işletme şartları bozuk değilse, bir kontaktör milyonlarca kez güvenli bir şekilde açma-kapama yapabilir [130].

Kontaktörlerin en önemli elemanı kontaklardır. Devrenin sürekli çalıştırılması ve de açma kapama kumandasının verilmesi bakımından kontaklar önemli bir önem taşırlar. Kontak malzemesinin elektrik ve ısı iletkenliği yüksek olmalı, kapama açma sırasında ark etkisi ile kontak malzemesinde yanma ve buharlaşma olmamalı ve çalışma süresince kontakta erime eğilimi olmamalıdır. Kontaklar iki parçadan oluşur; bunun bir parçası sabit kontak, diğeri hareketli kontak [129].

Bu kontaklardaki temaslar elementel metaller, kompozitler veya alaşımlar tarafından yapılabilir. Kontak malzemelerin çalışma koşullarına göre beş gruba ayırabiliriz:

- 1) Çok sık açıp kapama durumunda bile olsa, akımın kontak yüzeyini etkilememesi için gerekli kontak malzemeleri: Örneğin, Ag, Au, Rh, Pt
- 2) Doğru akım koşulları altında anottan katoda malzeme taşınımının gözlemlendiği yerlerde düşük akım ve düşük voltaj için gerekli kontak malzemeleri: Örneğin, Cu, Ag, Au, Pd, Pt ve bunların alaşımları
- 3) Doğru akım koşulları altında katottan anoda malzeme taşınımının gözlemlendiği yerlerde orta dereceli elektrik yükleri için gerekli kontak malzemeleri: Örneğin, Cu, Ag, Pd, Pt, W ve bunların alaşımları
- 4) Yanmanın olabildiği yüksek elektrik yüklü yerler için gerekli olan kontak malzemeleri: Örneğin, Mo, W, Cr ve bunların alaşımları
- 5) Tahrip edici (sülfürleyici ve oksitleyici) çalışma şartlarında kullanılan kayma tipi kontak malzemeleri [131].

Elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan temel malzeme olan gümüşe olan talep elektrik endüstrisindeki ve işlenmesindeki yükselen gelişme ile artmaktadır. Fakat gümüşün yüksek maliyeti ve azlığı sorun teşkil etmektedir. Bu yüzden elektrik anahtarlarının kontak terminallerinde gümüşün nasıl korunacağı ve yerine başka bir malzemenin kullanımı acil bir problem olmaktadır. Temel olarak kontak malzemelerinin iyi bir termal ve elektrik iletkenliği yanı sıra belli bir mukavemet değerine sahip olması gerekmektedir. İnce seramik partikülleri ile mukavemeti arttırılmış bakır matrisli kompozitler, neredeyse bakıra eşdeğer oranda elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir ve gümüş kontakların yerini alacak en ideal malzemedir [132].

Bu alanda SiC takviyeli bakır matrisli kompozitler, bakırın yüksek termal iletkenliği ve düşük termal genişleme katsayısı ile SiC'ün yüksek mukavemeti ve termal iletkenliği nedeniyle tercih edilmektedir ve Cu-SiC kompozitlerinin SiC'den daha iyi termal şok direncine sahip olduğu belirtilmektedir [90].

Cu-SiC ile ilgili mevcut literatür çalışmalarında takviye bileşeni SiC'ün miktarı ağırlıkça %20'lerin üzerinde olup, daha çok aşınma amaçlıdır.

Deneysel çalışmalarda üretilen Cu-SiC kompozitlerin kontak malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını görmek amacıyla C3Ss ve Cs numuneleri kontak (açma

kapama) testine tabi tutulmuştur. Numunelere 3000, 6000, 9000 kez açma kapama yapıldıktan sonra malzeme kaybı rapor edilmiş, yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve sonrasında 12000 ve 21000 kez açmaya kapama kadar deney devam ettirilmiştir.

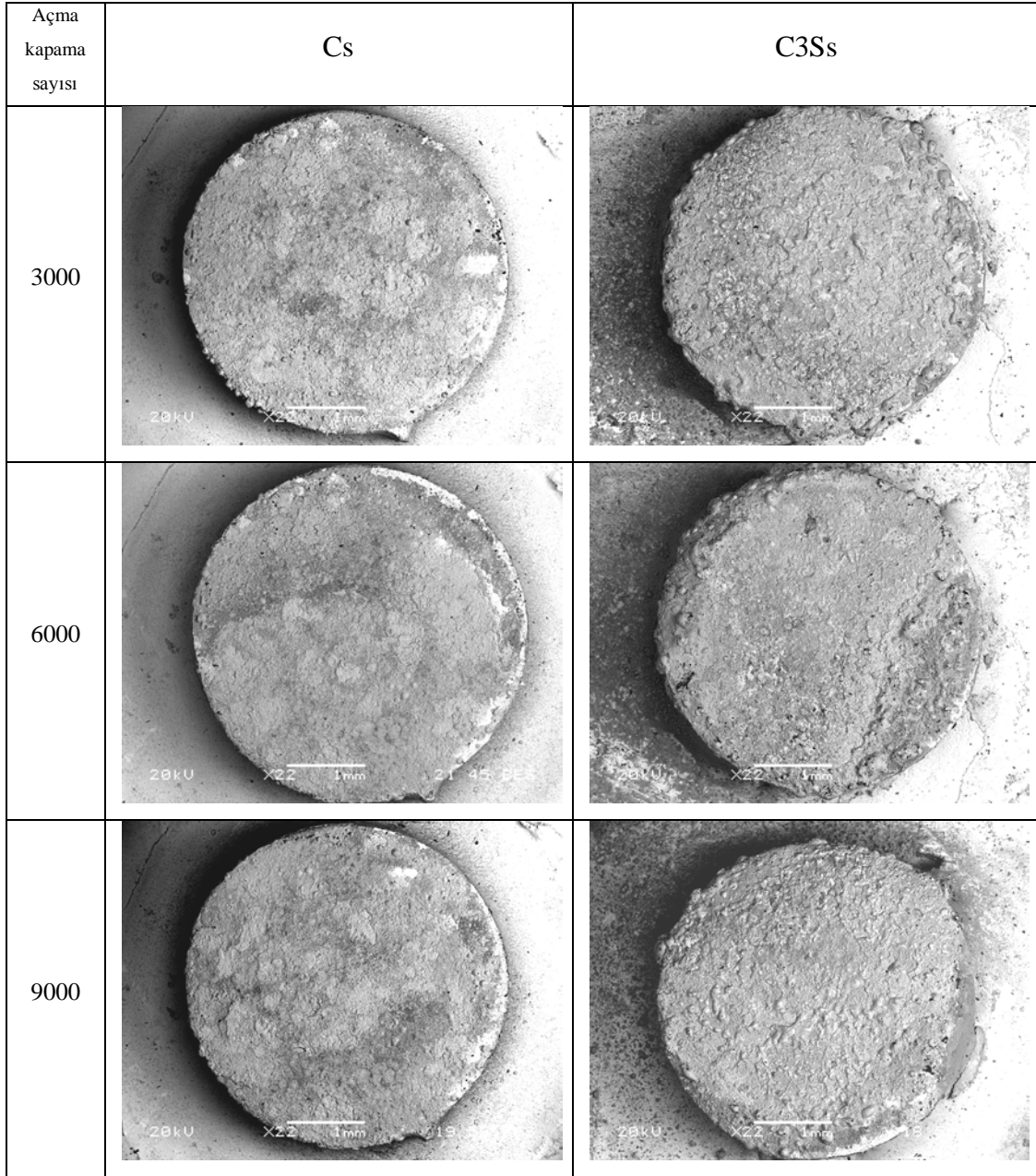
Numunelerin 3000- 6000 ve 9000 açma kapama sonrasındaki yüzey SEM görüntüleri Şekil 7.74- 7.76'da görülmektedir. SiC takviyeli kontaklar ısındığı zaman takviye elemanı, ısıyı absorbe edip kontağı soğutmali ve ark oluşumunu geciktirmeli, bu sayede de saf bakıra göre daha az malzeme kaybı olmalıdır [133].

Fakat SEM mikrograflarından C3Ss'nin yüzeyinin Cs'ye göre daha fazla deforme olduğu görülmektedir. Tablo 7.9'dan artan çevrim sayısı ile her iki kontakta da malzeme kaybının arttığı ve C3Ss'deki malzeme kaybının Cs'den daha fazla olduğu görülmekte olup bu sonuçlar Şekil 7.77'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

C3Ss'nin Cs'den daha mukavemetli olmasından dolayı daha az malzeme kaybı olması beklenir. Ancak, kontak mukavemeti için yüksek sıcaklıkta kararlılık ve sertlik yeterli özellikler olmayıp, ayrıca düşük elektriksel dirence sahip olmaları gereklidir. Düşük direnç kontakta daha az ısının ortaya çıkmasını sağlamaktadır [133]. Her iki numuneye sinterleme işlemi sonrasında uygulanan sıcak presleme, sertlik artışı sağlamıştır. Cs ve C3Ss'nin sertlik değerleri sırasıyla 127 ve 142 HV iken elektrik iletkenlikleri %92 ve %66 IACS'dir. Bu sonuçlar doğrultusunda Cs'deki malzeme kaybının az olması beklenen bir sonuçtur ve takviye fazının miktarı ağırlıkça %1'den çok olmamalıdır.

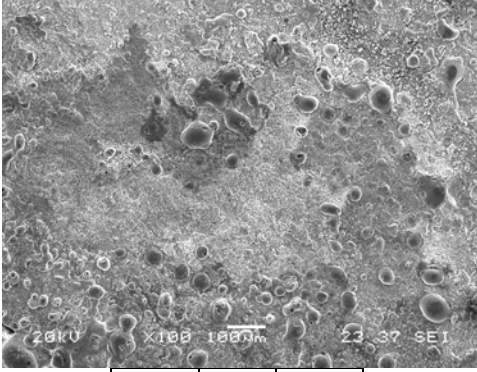
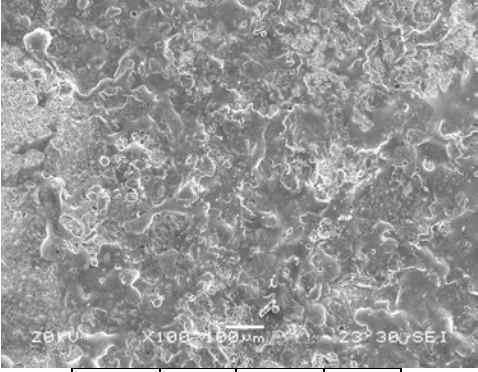
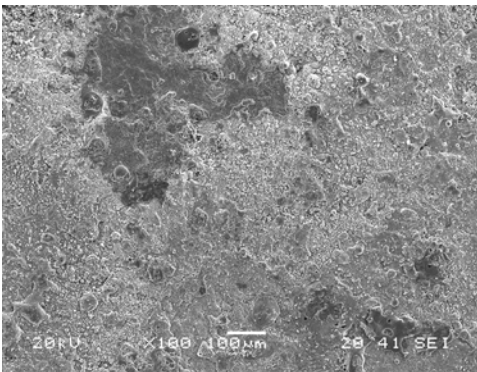
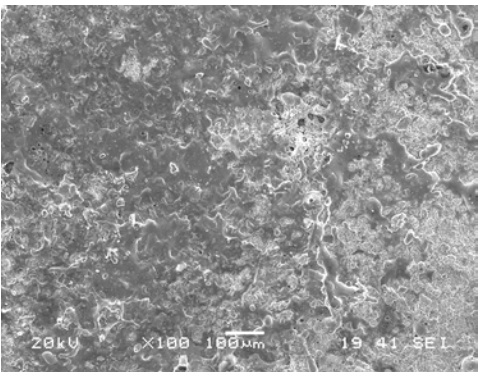
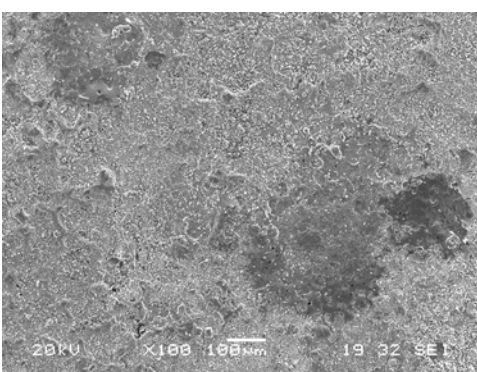
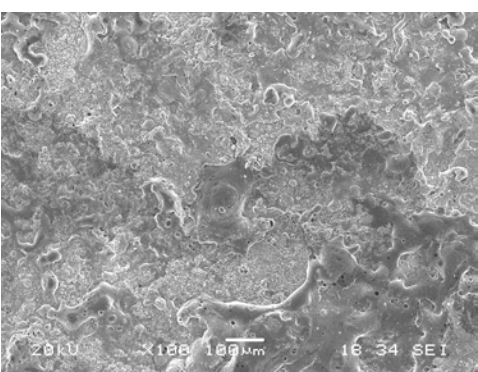
Tablo 7.9. Artan çevrim sayısı ile kontaklardaki ağırlık kaybı

Numune	Açma kapama (çevrim) sayısı				
	3000	6000	9000	12000	21000
% Ağırlık kaybı					
Cs	0,02	0,06	0,12	0,18	0,34
C3Ss	0,09	0,26	0,48	0,62	1,36



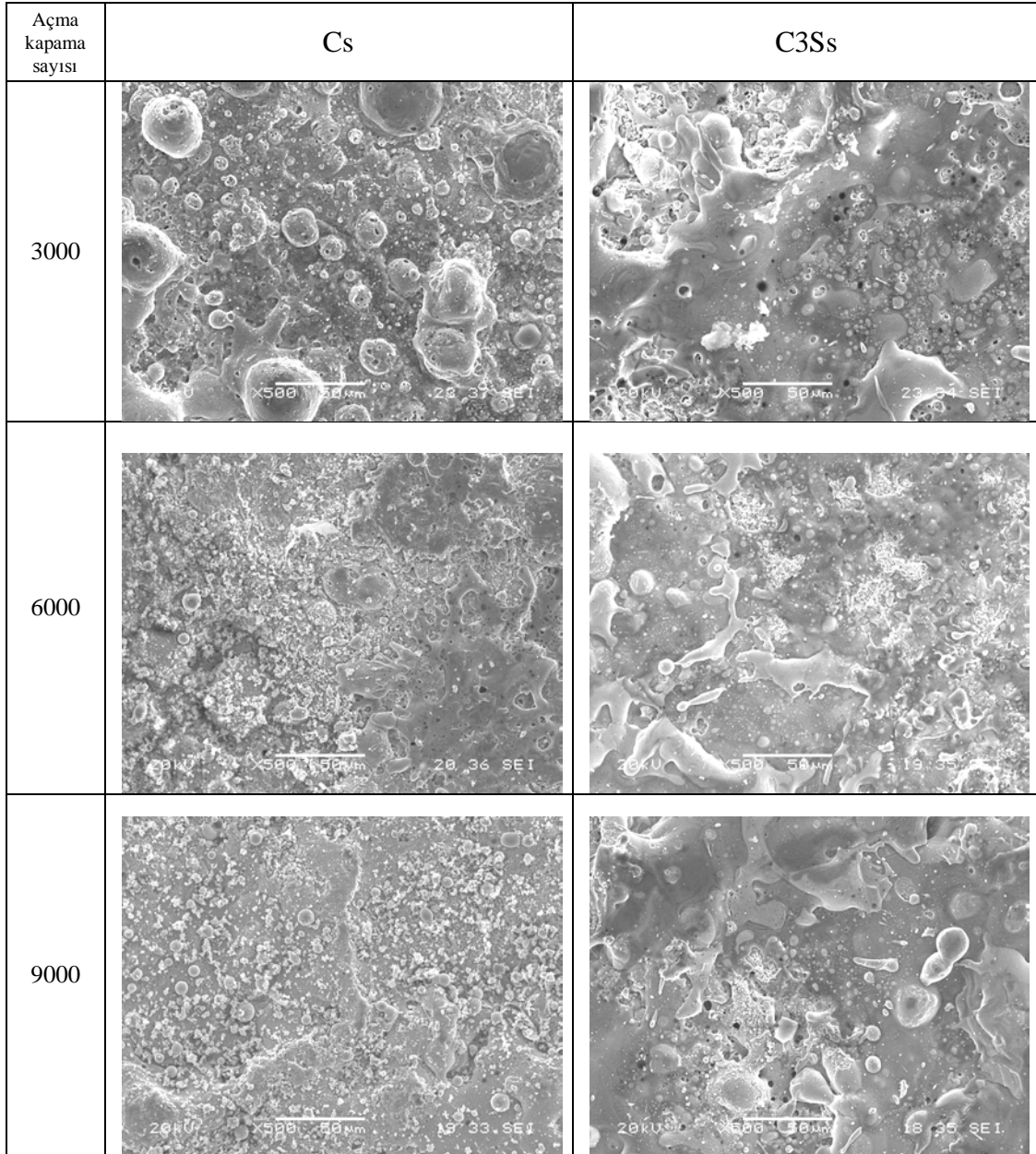
Şekil 7.74. Cs ve C3Ss numunelerinin 3000, 6000 ve 9000 açma kapama sonarında 22X büyütmedeki SEM mikrografları

Şekil 7.74’de sol sütunda saf bakır, sağ sütunda %3 SiC katkılı Cu-SiC kompozit malzemelerin makroskopik yüzey görüntüleri verilmiştir. Saf bakır malzeme yüzeylerinin daha az zarar gördüğü anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, C3Ss malzemesindeki kayıp, saf bakıra nazaran biraz daha yüksektir.

Açma kapama sayısı	Cs	C3Ss														
3000	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>O</th> <th>Fe</th> <th>Cu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>13.597</td> <td>1.809</td> <td>84.594</td> </tr> </tbody> </table>	O	Fe	Cu	13.597	1.809	84.594	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>O</th> <th>Fe</th> <th>Cu</th> <th>Si</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>24.432</td> <td>2.270</td> <td>63.802</td> <td>9.496</td> </tr> </tbody> </table>	O	Fe	Cu	Si	24.432	2.270	63.802	9.496
O	Fe	Cu														
13.597	1.809	84.594														
O	Fe	Cu	Si													
24.432	2.270	63.802	9.496													
6000	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>O</th> <th>Fe</th> <th>Cu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18.796</td> <td>0.979</td> <td>80.224</td> </tr> </tbody> </table>	O	Fe	Cu	18.796	0.979	80.224	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>O</th> <th>Fe</th> <th>Cu</th> <th>Si</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23.999</td> <td>2.466</td> <td>63.873</td> <td>9.662</td> </tr> </tbody> </table>	O	Fe	Cu	Si	23.999	2.466	63.873	9.662
O	Fe	Cu														
18.796	0.979	80.224														
O	Fe	Cu	Si													
23.999	2.466	63.873	9.662													
9000	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>O</th> <th>Fe</th> <th>Cu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>16.877</td> <td>1.180</td> <td>79.582</td> </tr> </tbody> </table>	O	Fe	Cu	16.877	1.180	79.582	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>O</th> <th>Fe</th> <th>Cu</th> <th>Si</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20.725</td> <td>2.625</td> <td>70.775</td> <td>5.875</td> </tr> </tbody> </table>	O	Fe	Cu	Si	20.725	2.625	70.775	5.875
O	Fe	Cu														
16.877	1.180	79.582														
O	Fe	Cu	Si													
20.725	2.625	70.775	5.875													

Şekil 7.75. Cs ve C3Ss numunelerinin 3000, 6000, 9000 açma kapama sonarında 100X büyütmedeki SEM mikrografları ve genel EDS analizleri

Şeıl 7.75'teki mikrograflarda SiC içeren malzemelerde koyu renkli bölgelerin miktarı fazladır. Bu bölgelerin oksitli olduğu anlaşılmıştır.

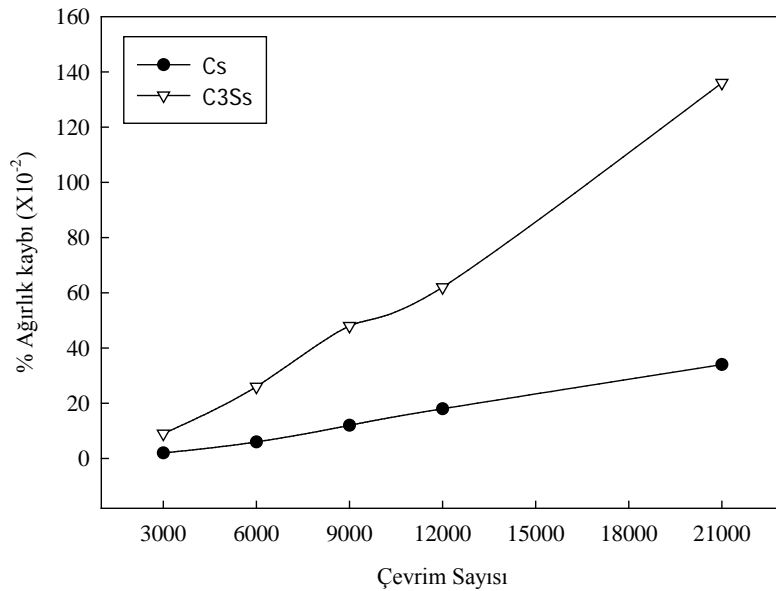


Şekil 7.76. Cs ve C3Ss numunelerinin 3000, 6000, 9000 açma kapama sonarında 500X büyütmedeki SEM mikrografları

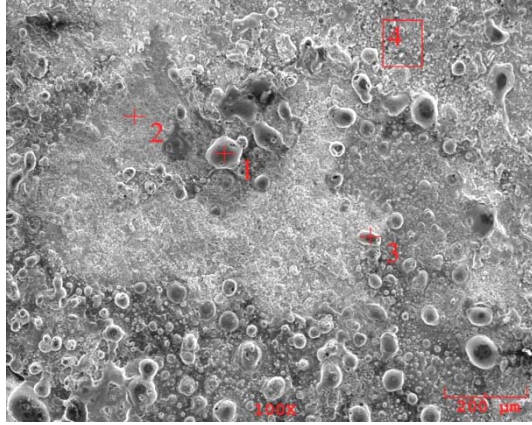
Kontak numune yüzeylerinden alınan EDS analiz sonuçları Şekil 7.78-7.83'te verilmiştir. Artan çevrim sayısı ile birlikte kontaklardaki malzeme kaybı artmaktadır ve bu, kontak yüzeylerinde oluşan bakır oksit miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Bakır oksit miktarının artması, kontağın direncini artırarak kontaklar arasında ark oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Ana matrise göre daha fazla sertliğe sahip olan bakır oksit, kontağın kapanması sırasında mekanik etkiyle kırılmakta ve kırılan bu parçacıkların boyutları artan kontak sayısı ile daha da küçülmektedir. Bu esnada kontağın devreyi anahtarlamasından dolayı meydana gelen

ark sebebiyle bu küçük boyutlu tozlar, yüzeyden kontak alanı dışına itilmektedir. Bu sayede kontaklardaki kayıplar geri beslemeli bir mekanizmayla artmaktadır [133]. Bu durum Cs numunesinin Şekil 7.78-7.80'deki EDS analiz sonuçları ile desteklenmektedir. Küre şeklindeki noktalardan alınan analizlerde O miktarı fazladır ve artan çevrim sayısı ile bu yapıların parçalanıp küçüldüğü gözükmektedir. Muhtemelen yüzeyden ayrılan bakır tozlarında bölgesel olarak erimeler meydana gelerek arkın etkisiyle oksitlenmiş ve artan çevrim sayısı ile bu oksitler parçalanmış, boyutları küçülmüştür.

EDS analiz sonuçlarının gösterildiği tablolarda bakırca zengin noktalar mavi renkte boyanmıştır. Şekil 7.79.b'deki 5 numaralı ve Şekil 7.80'deki 6 numaralı noktalardan alınan analizlerde nerdeyse %100'e yakın Cu tespit edilmiştir. Bu bölgeler ortalama kontak yüzeyinin altında bir kota sahip olduğundan dolayı bozunmadan kalmışlardır. Yapıda hala saf halde bakırın bulunması kontak malzemesinin daha çok çevrimlere dayanabileceğini göstermektedir. Artan kontak sayısı ile birlikte mekanik tesir etkisiyle deformasyonların arttığı bölgesel ergimelerle birlikte sıvanmalar olduğu görülmektedir (Şekil 7.76). Bu sonuçlar literatür ile uyumludur.

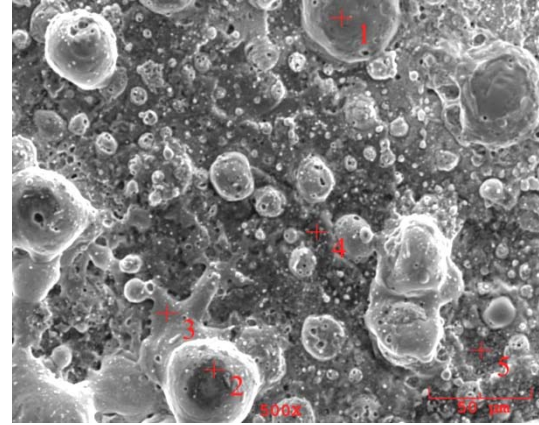


Şekil 7.77. Artan çevrim sayısı ile kontaklardaki ağırlık kaybı değişimi



Ağ. %	1	2	3	4
O	15.522	5.271	16.792	15.828
Fe	2.972	1.139	2.416	2.117
Cu	81.506	93.591	80.791	82.055

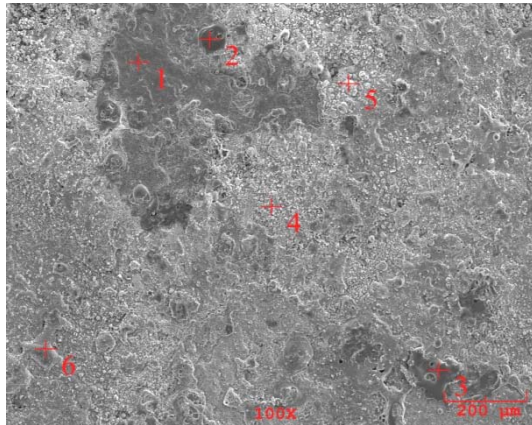
a)



Ağ. %	1	2	3	4
O	9.622	19.848	11.386	18.737
Fe	1.705	3.796	2.340	1.488
S				1.244
Cu	88.673	76.355	86.275	78.531

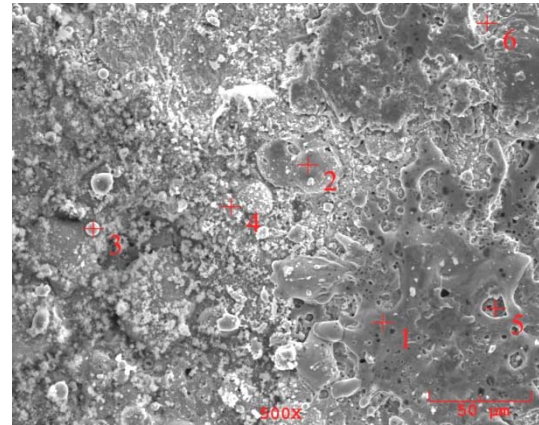
b)

Şekil 7.78. Cs numunesinin 3000 açma kapama sonrasında a) 100X, b) 500X büyütmedeki EDS analizi



Ağ. %	1	2	3	4	5	6
O	4.364	18.21	16.31	33.87	30.10	26.48
Fe		1.350	1.098	0.620	1.138	0.421
Cu	95.63	80.43	82.58	65.51	68.76	73.09

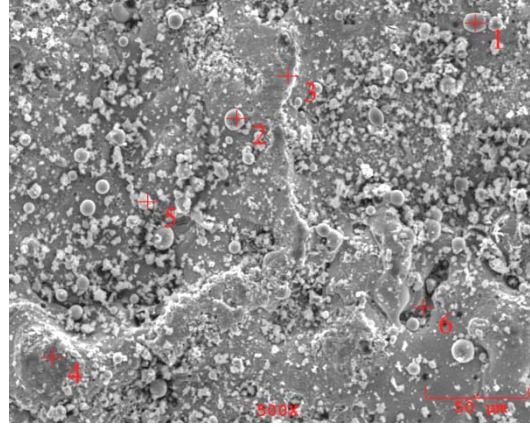
a)



Ağ. %	1	2	3	4	5	6
O	19.44	14.22	22.22	18.51	2.070	21.18
Fe	1.627	1.332	1.175	0.639	1.998	0.913
Cu	78.92	84.44	76.59	80.84	95.93	77.90

b)

Şekil 7.79. Cs numunesinin 6000 açma kapama sonrasında a) 100X, b) 500X büyütmedeki EDS analizi



Ağ. %	1	2	3	4	5	6
C		15.66				
O	16.25	17.68	23.900	20.87	17.87	1.641
S			0.328			
Fe	1.181	0.845	1.035	1.158	0.765	0.510
Cu	82.56	65.79	74.737	77.96	81.35	97.85

Şekil 7.80. 9000 açma kapama sonrasında Cs numunesinin EDS analizi

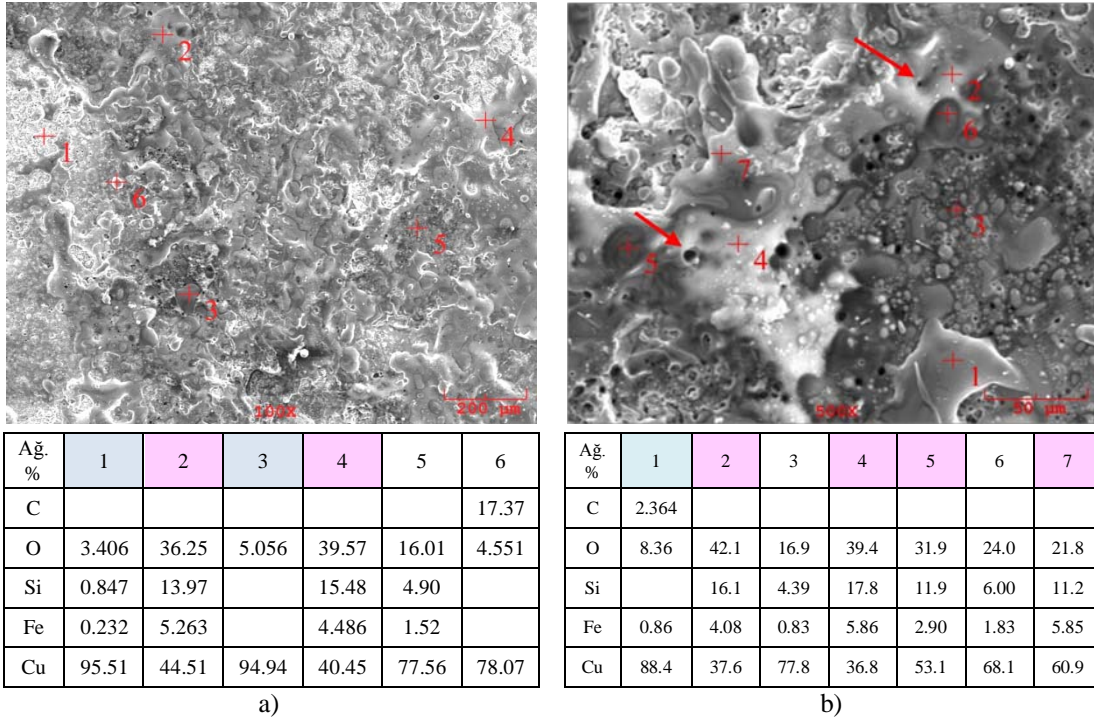
C3Ss'nin EDS analiz sonuçlarında Cu ve O dışında Si'ca zengin camsı görünümlü yapılar görülmektedir, tablolarındaki bu noktalar pembe renkte boyanmıştır. Muhtemelen SiC ark etkisiyle artan temas sıcaklıklarında oksitlenmiş ve/veya Cu-Si bileşikleri oluşmuştur.

Kang ve arkadaşları [90] plazma kaplanmış Cu-SiC kompozitinde SiC'ün termal ayrışmasını incelemişler ve SiC'ün 1100°C'lerde Si ve az miktarda C'a ayrışarak Cu ile temasa geçtiğini belirtmişlerdir. Zielinski ve arkadaşları [134] SiC'ün yüksek sıcaklıklarda kararlı olmadığını ve parçalanarak bakır silisyum katı çözeltilisini oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Çözünen Si, Cu-SiC kompozitinin termal ve elektriksel özelliklerini düşürür. Bu bakımdan Cu ve SiC arasındaki arayüzey reaksiyonunu önlemek için difüzyon bariyeri gereklidir. Literatürde refrakter metalleri (örneğin Ta, W), nitrür veya karbürleri (örneğin TiN, TaN) ve bileşikleri (örneğin TiW) içeren birçok farklı difüzyon bariyerleri mevcuttur [134].

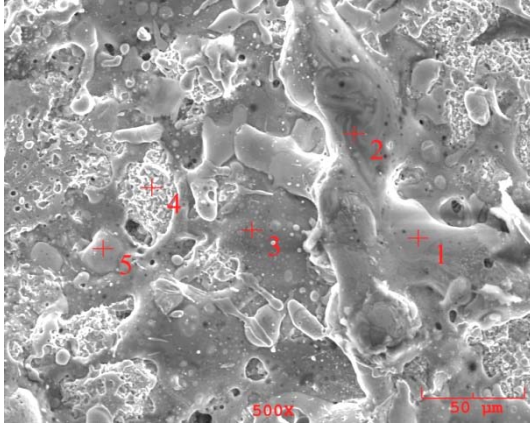
Şekil 7.81.b'de Si'ca zengin ok ile gösterilen bölgelerde kabarcık ve gözenekler dikkati çekmektedir. Gerek iletim direncinden gerekse de arktan dolayı ortaya çıkan ısı sebebiyle kontak malzemesinin yapısı içerisinde gaz boşluklarında bulunan gazların iç basıncının artması sebebiyle, yüzeye sızdığı ve erimiş halde bulunan

metal yüzeyini kabarttığı düşünülmektedir [133]. Mikrograflarda kontak yüzeylerinde gözükten birçok mikro por gaz reaksiyonlarından kaynaklanabilir. SiC'ün ayrışmasından sonra, ayrılmış C spontane bir şekilde O ile reaksiyona girer ve böylelikle karbondioksit (CO₂) ve karbonmonoksiti (CO) oluşturur [90].

Mikrograflarda gözükten mikro çatlaklar yüzeyin gevrek bir yapıda olduğunu ve muhtemelen kontak yüzeyinin ince bir film halinde oksitle kaplanmış olabileceğini göstermektedir [133]. Bu durum özellikle artan kontak sayılarında belirgindir (Şekil 7.83b).

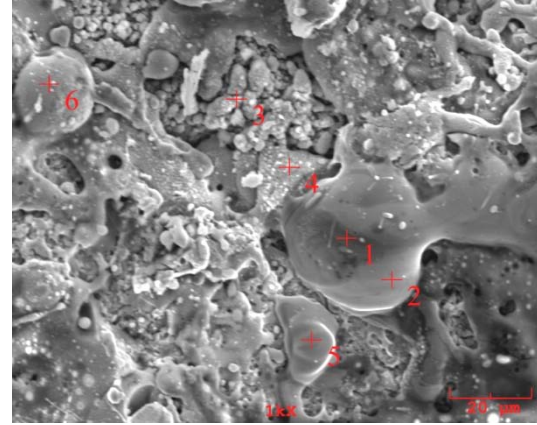


Şekil 7.81. C3Ss numunesinin 3000 açma kapama sonrasında a) 100X, b) 500X büyütmedeki EDS analizi



Ağ. %	1	2	3	4	5
S			2.847		
O	6.395	53.846	32.881		23.524
Si	0.806	23.249	12.776		6.353
Fe			5.586	0.847	1.437
Al		0.175	0.283		
Cu	92.799	22.731	45.626	99.153	68.686

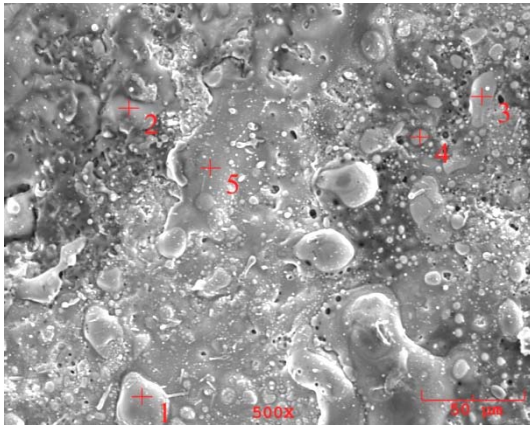
a)



Ağ. %	1	2	3	4	5	6
O	30.32	8.885	29.45	30.59	7.273	9.876
Si	11.81		8.195	10.03		
Fe	4.163	0.586	0.622	1.273	0.435	0.753
Cu	53.69	90.52	61.72	58.10	92.29	89.37

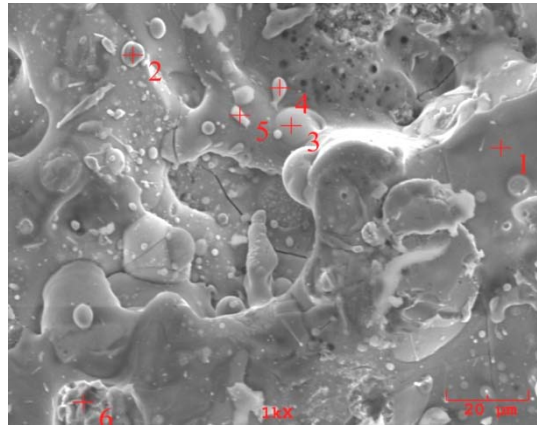
b)

Şekil 7.82. C3Ss numunesinin 6000 açma kapama sonrasında a) 500X, b) 1000X büyütmedeki EDS analizi



Ağ. %	1	2	3	4	5
O	16.497	37.767	3.811	6.328	33.023
Si	2.689	14.433			10.574
Fe	1.322	6.833	0.545	0.780	3.777
Cu	79.492	40.967	95.644	92.892	52.625

a)



Ağ. %	1	2	3	4	5	6
O	42.05	7.707	8.085	49.89	51.44	11.06
Si	17.77	0.939	1.630	15.83	14.76	0.219
Fe	8.527	1.152	1.024	6.112	5.813	0.226
Cu	31.64	90.20	89.26	28.15	27.97	35.09

b)

Şekil 7.83. C3Ss numunesinin 9000 açma kapama sonrasında EDS analizi

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma bakır matriksin SiC seramik toz ile takviye edilerek yüksek iletken ve nispeten yüksek mukavemetli bir bakır kompozitinin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Bakır matriks içerisine sert partiküllerin ilavesi; bakır matriksin sadece mekanik performans ve aşınma dayanımını artırmakla kalmaz, aynı zamanda elektrik ve ısı iletkenliğini de korur. Böylece bakırın uygulama alanı genişletilmiş olur. Bu kompozitler; röleler, iletkenler, elektrik anahtarları, akım devresi kesicileri, elektrik temas malzemeleri ve nokta kaynak uygulamalarında kullanılabilirler [73, 83, 94].

Yapılan çalışmada, sementasyon yöntemi ile çöktürülerek elde edilen bakır tozlarının elektrik iletkenliğinden kaybı en aza indirecek fakat yeterli mukavemet artış etkisi sağlayacak kadar (%1-5 mertebelerinde) SiC ile takviye edilmiştir. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacı ile aynı oranlarda SiC içeren ticari bakır tozları kullanılarak Cu-SiC kompozitleri ve saf Cu üretilmiştir.

Bakır tozu üretimi sementasyon yöntemiyle CuSO_4 tuzundan çöktürme ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak $10\mu\text{m}$ tane boyutundaki ticari bakır tozu ile $1\mu\text{m}$ tane boyutundaki SiC tozundan ağırlıkça %100Cu, %99Cu+%1SiC, %98Cu+%2SiC, %97Cu+%3SiC ve %95Cu+%5SiC bileşiminde toz karışımları mekanik olarak karıştırılarak elde edilmiştir. Tozlar çelik bir kalıp içerisine yerleştirilerek tek yönde 280 MPa basınç uygulayarak sıkıştırılıp disk şeklinde numuneler elde edilmiş ve bu numuneler 900, 950 ve 1000 °C'de 2 saat süre ile grafit tozuna gömülerek sinterlenmişlerdir .

Ticari bakır tozu kullanılarak üretilen kompozitlerle yapılan deneyler sonucunda

900°C optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiş ve bu sıcaklıkta sementasyonla elde edilen bakır tozu kullanılarak Cu ve Cu-SiC kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Ticari bakır tozları kullanılarak elde edilen optimum sinterleme sıcaklığı 900°C de istenilen elektrik iletkenlik değerleri elde edilirken, semente bakır tozları kullanılarak aynı sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin düşük olması nedeni ile daha düşük sinterleme sıcaklıkları (850°C, 800°C, 750°C, 700°C) denenmiş ve 700°C sinterleme sıcaklığında beklenen elektriksel iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Semente bakırın 700°C'de sinterlenmesiyle yüksek iletkenlik değerlerine sahip Cu-SiC kompozit üretimi tamamen bu çalışmada üretilen bir bilgidir.

Takviye fazının tane boyutları da değiştirilerek (1µm, 5µm, 30µm) özellikler üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar ticari tozlarla kıyaslanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin disperse fazın miktarı ve partikül boyutuna bağlı olup; iletkenlik, yoğunluk ve sertlik değişimlerinin birbirlerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

En iyi sonuçlara 700°C sinterleme sıcaklığında ve 30µm partikül boyutunda SiC takviyesi ile ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda sementasyon yöntemiyle üretilen Cu-SiC kompozitlerinin ticari Cu-SiC kompozitlerine çok yakın özellikler sergilediği ve ticari Cu-SiC kompozitlerinin yerine ikame edebileceği sonucuna varılmıştır. Ticari bakır tozları yerine semente bakır tozlarının kullanılabilmesi ekonomik açıdan çok büyük önem arz etmektedir.

700°C sıcaklıkta ve açık atmosferde sinterleyerek toz metalurjisi yöntemiyle Cu-SiC kompozit üretimine rastlanılmamıştır. Bu çalışmada elde edilen kompozitlerin sertlik ve iletkenlik değerleri mevcut çalışmalardan daha yüksek seviyelerdedir.

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Tozların SEM incelemelerinde; ticari bakır tozunun küresel şekilli ve 10µm tane boyutunda, semente bakır tozunun küresele yakın şekilli olup tanelerinde belirgin topaklanma olduğu tespit edilmiştir. Aglomerelerin boyutları 2-6µm

arasında değişmekte iken yüksek büyütmelelerde yaklaşık 100nm'ye yakın parçacıklardan oluştuğu görülmüştür.

2. Semente bakır tozunun saflığı %99,87 olup içerisinde eser miktarda O₂, Fe ve S tespit edilmiştir. Muhtemelen Fe sementasyon işleminden çözeltiye geçmiştir, S yıkama esnasında kalmıştır ve O₂ ise tozun kurutulması sırasında oksidasyon ile oluşmuştur. Takviye bileşeni olarak kullanılan SiC partikülleri 3 farklı boyutta olup keskin köşelidir.

3. Ticari ve semente bakır tozlarının XRD analizleri benzer olup her iki tozda çok az miktarda Cu₂O tespit edilmiştir. Eser miktarda da olsa ticari bakır tozundaki oksit muhtemelen tozun zamanla hava ile olan reaksiyonundan, semente bakır tozundaki oksit ise tozların vakumlu etüvde kurutulması sırasında oksijen ile olan reaksiyonu sonucunda oluşmuştur. Pik alanlarından yapılan hesaplamalarda ticari bakır tozundaki Cu₂O'in %1,6, semente bakır tozundaki Cu₂O'in %1'lik bir alanı işgal ettiği belirlenmiştir. Bu oran tozun saflığını çok fazla etkilememektedir. Ayrıca semente bakır tozunun oksit içeriğinin ticari bakır tozunun oksit içeriğinden daha düşük olması tozun başarılı bir şekilde üretildiğini göstermektedir.

4. Özellikle elektrik iletkenliğinin üretilen bulk numunelerin relatif yoğunlukları ile yakın bir ilişkisi vardır. Hazır bakır tozları kullanılarak sinterlenmiş numunelerin Archimed prensibi ile belirlenen relatif yoğunlukları artan %SiC miktarı ile 900°C için %98,2'den %92'ye, 950°C için %97,8'den %89'a ve 1000°C için %97'den %91,5'e düşmüştür. Genel olarak sinterleme sıcaklığının, kompozitlerin relatif yoğunlukları üzerine önemli bir etkisinin olmadığı ve SiC içeriğinin artışı ile relatif yoğunlukların azaldığı gözlenmiştir. Semente bakır tozları kullanılarak sinterlenmiş kompozitlerin relatif yoğunlukları artan SiC miktarı ile 900°C için %98'den %91,2'ye azalmıştır.

700°C'de sinterlenmiş ticari Cu-SiC kompozitlerinin relatif yoğunlukları, %SiC artışı ile, %98'den %91,8'e, semente Cu-SiC kompozitlerinin relatif yoğunlukları ise %97,5'ten %90,9'a azalmıştır ve 900°C'de sinterlenen numunelerin yoğunluklarından bir miktar daha düşüktür. 700°C'de sinterlenen ticari bakır tozların

yoğunlukları semente bakır tozlarınınkinden daha yüksektir. SiC partikül boyutunun artmasıyla birlikte kompozitlerin yoğunluklarında artış görülmüştür. 1 μ m'luk SiC takviyesinde C1St (ticari Cu + %1SiC) ve C1Ss (semente Cu + %1SiC) için relatif yoğunluklar sırasıyla %97,3 ve %96,2 iken 30 μ m'luk SiC takviyesinde bu değerlerin %97,7 ve 97'ye arttığı tespit edilmiştir.

5. Kompozitlerin % IACS cinsinden ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri yoğunluk ve sertlik sonuçları ile uyum içerisindedir. 900°C'de sinterlenmiş C1St numunesinin iletkenliği %87,7, C1Ss numunesinin %60,3 olarak tespit edilmiştir. %60,3 olarak ölçülen iletkenliği iyileştirmek amacıyla semente Cu-SiC kompozitleri için daha düşük sinterleme sıcaklıkları denenmiş ve 700°C optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Kompozitlerin elektriksel iletkenlikleri artan SiC miktarı ile azalmakta iken, SiC partikül boyutundaki artış ile artmaktadır. Ticari Cu-SiC kompozitleri için elektriksel iletkenlik 1 μ m'luk SiC takviyesinde artan %SiC ile %85,8'den %55,7'ye, semente Cu-SiC kompozitleri için %79'dan %54,9'a düşmekte iken bu değerler 30 μ m'luk SiC takviyesi için sırasıyla %91,3 - %77,2 ve %83 - %69 aralığında değişmiştir. Katkısız ticari ve semente bakırın iletkenlikleri sırasıyla %95,6 ve %91,3 olarak tespit edilmiştir. SiC'ün semente bakır tozundan elde edilen kompozitlerdeki düzenli olmayan dağılımı, aynı içeriğe sahip hazır bakır tozundan elde edilen kompozitin elektrik iletkenliğinden daha düşük olmasına neden olmuştur.

6. Sinterlenmiş numunelerin optik ve SEM incelemelerinde SiC partiküllerinin homojen bir şekilde dağıldığı ve genellikle bakır tane sınırlarında toplandığı görülmüştür. Numunelerde, SiC taneciklerinin genel olarak matriks içerisinde uniform bir dağılımının görülmesine karşılık bazı bölgelerde, özellikle 1 μ m partikül boyutuna sahip SiC için, SiC aglomerasyonları mevcuttur. Genel olarak izole SiC taneciklerinin bakır matriks tarafından gayet iyi bir şekilde sarıldığı gözlenmiştir. Bu durum memnuniyet verici olmakla beraber, numune hazırlama sırasında bakırın plastik deformasyonu ile sert SiC taneciklerini sarmış olması mümkündür. Yüksek sıcaklıkta sinterlenen numunelerde özellikle yüksek SiC bileşimlerinde SiC tanelerinin bakır tanelerinin içlerine girdiği gözlenmiştir. Yüksek %SiC oranlarındaki Cu-SiC kompozitlerindeki SiC'ün tane içerisine doğru dispersiyonu muhtemelen

sıcak preslemeden kaynaklanmaktadır.

7. Ticari bakır tozları kullanılarak sinterlenmiş numunelerin EDS incelemelerinde belirgin bir oksidasyon bulgusuna rastlanmamıştır. Semente bakır tozlarınıninkilerde mikrograflarda matristen farklı, daha koyu gri renkte alanlar mevcuttur. Bu bölgelerin EDS analizlerinde Fe ve O₂ tespit edilmiştir. Fe, bakır tozunun üretiminden kaynaklanmaktadır ve muhtemelen sinterleme sıcaklıklarında oksitlenmiştir. Aynı sonuçlar XRD analizleri ile de teyit edilmiştir. Genel olarak Cu-SiC ara yüzeylerinden alınan EDS nokta analizlerinde azda olsa oksijen tespit edilmiştir ve O₂ miktarı artan SiC yüzdesi ile birlikte artış göstermiştir. Bu durum SiC'ün işlem sıcaklıklarında bozunmaya başlamasından kaynaklanmaktadır. SiC'ün tane boyutunun artmasıyla birlikte yüzey alanının azalmasından dolayı ara yüzeylerdeki O₂ miktarı azalmıştır. Buna paralel olarak artan yoğunluk değerleri bu bulguyu doğrulamaktadır ve doğal olarak da yoğunluk değerleri artmıştır.

8. Ticari ve semente bakır tozları ile farklı sıcaklık ve bileşimlerde sinterlenmiş numunelerin XRD analiz sonuçları birbirlerine benzer nitelikte olup; 700°C ve 900°C'de sinterlenmiş kompozitlerin XRD analizlerinde herhangi bir bakır oksit varlığı gözlenmemiştir. 950°C ve 1000°C'de sinterlenmiş kompozitlerin XRD analizlerinde çok küçük Cu₂O pikine rastlanmıştır. 700°C'de sinterlenmiş semente bakır ve 1µm'luk SiC içeren kompozitlerin XRD analizlerinde Cu ve SiC dışında çok küçük Fe₃O₄ pikine rastlanmıştır ki bu sonuç aynı numunelerin EDS incelemelerinde de gözlenmiştir, bu bakır tozunun üretiminden kaynaklanmaktadır. Kompozitlerdeki SiC miktarı arttıkça SiC piki belirgin olmaktadır.

9. Sinterlenmiş ürünlerde indentasyon tekniği ile ölçülen sertlik değerleri SiC miktarının ve boyutunun artışı ile artış göstermiştir. Optimum çalışma sıcaklığı olarak belirlenen 700°C'de sinterlenmiş kompozitlerde en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Ticari Cu-SiC kompozitlerin sertlik değerleri 1µm'luk SiC için artan %SiC ile 143 HV'den 167 HV'e, 30µm'luk SiC için 215 HV'den 277 HV'e, semente Cu-SiC kompozitlerin sertlik değerleri 1µm'luk SiC için 130 HV'den 155 HV'e, 30µm'luk SiC için 188 HV'den 229 HV'e yükselmiştir.

10. C3Ss ve Cs numuneleri, kontak ömrü deneyi için 3000, 6000, 9000, 12000 ve 21000 açma kapama testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları C3Ss için %0,09- %1,36 arasında değişirken Cs için %0,02-0,34 aralığında değişmiştir. SEM incelemeleri ve ağırlık kayıpları sonuçlarına göre C3Ss'deki malzeme kaybı Cs'den daha fazla olduğu tespit edilmiştir. İki numunenin sertlik değerleri, sinterleme sonrasında uygulanan prestren dolayı birbirlerine yakın iken, Cs'nin iletkenliği C3s'den daha yüksektir. Kontak malzemesinin mukavemetlerinin yüksek olmasının yanında, ısı ve elektrik iletkenliklerinin de yüksek olması kontaklardaki malzeme kaybını azaltmaktadır. Ayrıca gerçekleştirilen EDS analizleri sonuçlarında açma kapama testleri sırasında SiC'in parçalandığı ve muhtemelen Si'un Cu ve O₂ ile reaksiyona girdiği tespit edilmiştir, bu durum malzeme kaybını arttırmaktadır. Açma-kapama sayısının artmasıyla kontak yüzeyindeki bakır oksit miktarı artmıştır. Artan bakır oksit miktarı ise kontağın direncini arttırmakta ve bu durum geri beslemeli olarak devam ederek kontak kayıplarını arttırmaktadır.

Bundan sonra bu konuda yapılabilecek ve daha ileriye götürebilecek öneriler şunlardır:

1. Bu çalışmada başarılı olarak nano mertebesinde semente bakır üretildi. Ancak nano mertebesindeki bakır tozlarının topaklanma eğilimi yüksek olduğundan bu problem iyileştirilebilir.
2. Semente bakır tozunda üretim aşamasında oluşan safsızlıkları elimine etmek için kontrollü yıkama işlemi yapılmalıdır.
3. Daha yoğun ve yüksek iletkenliğe sahip bir kompozit üretmek için basınçlı sinterleme yapılabilir.
4. Semente bakır tozu ile takviye bileşeni SiC arasında iyi bir ıslatma sağlayabilmek ve SiC'ün işlem sıcaklıklarında dekompozisyonunu önlemek için yüzeyleri bir ön kaplanma işlemine tabi tutulabilir.
5. C1Ss, C1St, ve Ct numuneleri açma kapama testine tabi tutulup sonuçlar mukayese edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] KOÇAK, H., Bakır alaşımları el kitabı, yonca ajans- Ofset Matbaacılık, III. Baskı, Yayın No:6.
- [2] www.bpc.edu/mathscience/chemistry/electrical_conductivity.html
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Copper>
- [4] www.cda.org.uk
- [5] SCHATT, W., WIETERS, K.P., Powder metallurgy processing and materials, europen powder metallurgy association (EPMA), 1997.
- [6] KWON, DH., NGUYEN, TD., HUYNH, KX., CHOI, PP., CHANG, MG., YUM, YJ., KİM, JS., KWON, YS., Mechanical, electrical and wear properties of Cu-TiB nanocomposites fabricated by MA-SHS and SPS, Ceramic Processing Research, 7, (3), pp. 275-279, 2006.
- [7] ZHAN, Y., ZHANG, G., The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiCp/Cu composites, Materials Letters, , 57, pp.4583-4591, 2003
- [8] ALTINSOY, İ., Alümina takviyeli bakır kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2009.
- [9] YING, D.Y., ZHANG, D.L., Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling, Materials Science & Engineering A, 286, pp.152-156, 2000.
- [10] www.magnet.fsu.edu/magtech/facilities/materials/highstrength.html
- [11] MAZUMDAR, S., K., Composites manufacturing: materials, product and process engineering, CRC Press LLC, 2002.
- [12] ŞAHİN, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
- [13] AKDAŞ, H., Alüminyum matrisli Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemiyle üretimi ve kuru aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Eylül 2007.
- [14] AKBULUT, H., Alümina fiber takviyeli Al-Si MMK' in üretimi ve

mikroyapı özellik ilişkileri, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi, 1994.

- [15] <http://www.hho.edu.tr/huten/>
- [16] GAY, D., HOA, S.V., TSAI S.W., Composite materials design and applications, CRC Press, Washington, 2003.
- [17] Composites, ASM Handbook, 21, pp.1-20, 2001.
- [18] JONES, M, R., Mechanics of composit materials, Taylor & Francis, 1999.
- [19] ASLAN, S., SiC ve Grafit takviyeli çinko alüminyum hibrid kompozit malzemelerin aşınma davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, SA.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [20] PETERS, S.T., Handbook of Composites, Chapman&Hall, Cambridge Universty Press, England, 1998.
- [21] CHAWLA, K.K., Ceramiz matrix composites, Kluwer Academics Publishers, 2003.
- [22] DEMİRKESEN, E., Kompozit malzemeler, İ. T. Ü. Kimya Fakültesi, 1. baskı, 1995.
- [23] http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son.pdf
- [24] KAZANÇ, V., Kompozit malzemeler ve yapı özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, 2002.
- [25] CHUNG, D., Composite materials: Science and aplications, Springer, London, 2003.
- [26] ÇALIN, R., Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Haziran 2006.
- [27] HARIS, B., Engineering Composite Materials, second edition, 1999.
- [28] KUMAR, C.K., Composite Materials, Socorro, New Mexico, 1987.
- [29] GÜLTEKİN, D., Metal matriksli kompozit fren diski balatası üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2007.
- [30] CLYNE, T. V., Metal matrix composites: matrices and processing, encyclopaedia of materials: Science and Technology, Cambridge University Press, Cambridge 2001.

- [31] CHANG, S., Y., CHEN, C., F., LIN, S., J., KATTAMIS, T., Z., Electrical resistivity of metal matrix composites, *Acta Materials*, 51, pp.6191-6302, 2003.
- [32] FUKUDA, H., Micromechanical strength theory of hybrid composites, *Advanced Composite Mater*, Vol 1, No 1, cigo.J, p.39.
- [33] KENNEDY, FE., BALBAHADUR, AC., LASHMORE, DS., The friction and wear of Cu-based silicon carbide particulate metal matrix composites for brake applications, *Wear*, 203-204, pp. 715-727, 1997.
- [34] SHU, K-M., TU, G.C., The microstructure and the thermal expansion characteristics of Cu/SiCp composites, *Materials Science & Engineering*, 349, pp.236-247, 2003.
- [35] ZHU, J., LIU, L., ZHAO, H., SHEN, B., HU, W., Microstructure and performance of electroformed Cu/nano-SiC composite, *Materials & Design*, 28, pp. 1958-1962, 2007.
- [36] TAYA, M., & ARSENAULT, R., *Metal matrix composites, Thermo mechanical Behavior*, Pergamon Pres.
- [37] GEORGE, I., RACK, HJ., *Powder processing of metal matrix composites*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [38] www.bpc.edu/mathscience/chemistry/electrical_conductivity.html
- [39] RICHARD, B., *The elements copper*, Marshall Cavendish Corporation, Newyork, 2001.
- [40] http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/c0991344c3d760a_ek.pdf
- [41] www.metalurji.org.tr/dergi/dergi133/d133_3444.pdf
- [42] <http://ansiklopedi.turkcebilgi.com/Bak%C4%>
- [43] <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/oik511/>
- [44] CANKURT, S., *Ekstraktif metalurji uygulaması, Bakır, Dağ Matbacılık*, 1-11, 1973.
- [45] GÜLFEN, M., *Kalkopirit cevherindeki bakırın sülfürik asit çözeltisinde çözünürlüğünün incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstirüsü, Haziran 2002.*
- [46] http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/314b9674c86e3f9_ek.pdf.
- [47] <http://www.chemicalelements.com/elements/cu.html>.

- [48] KANG, H.K., Microstructure and electrical conductivity of high volume Al₂O₃-reinforced copper –matrix composites Produced by plasma spray, Surface and Coatings Technology, 190, pp.448-452, 2005.
- [49] <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektör/1-8.pdf>.
- [50] www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2006/09/
- [51] <http://64.90.169.191/aplications/industrial/DesignGuide/electrical.html>
- [52] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials>
- [53] SCHWARTZ, M., Encyclopedia of materials, parts, and finishes, Second Edition, CRC Pres, 2002.
- [54] www.elektrosan.com.tr
- [55] KUTZ, M., Handbook of material selection, John Wiley&Sons, Newyork, 2002.
- [56] <http://nonferrous.keytometals.com>
- [57] ONARAN, K., Malzeme bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, 1999.
- [58] <http://www.makinamuhendisi.com/idx/4/118/Malzeme-DatabaseMaterial>
- [59] www.turkcebilgi.net
- [60] <http://www.ekimya.com/article.php?artid=23&action=part4>
- [61] SMITH, W., Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill College, 1992.
- [62] <http://bakir-metalurji-malzeme.blogspot.com/>
- [63] GAVGALI, M., TOTIK, Y., NEVILE, A., Yapay deniz suyunda farklı hızlarda Cu-%10 Ni alaşımının erozyon-korozyon davranışı, Journal of Engineering Science, 2. Sayı, Cilt 8, 155-160, 2002.
- [64] <http://www.msxlabs.org/forum/kimya/25352-madencilik-terimleri-sozlugu-b.html>
- [65] XU, Q., ZHANG, X., HAN, J., HE, X., KVANIN, V.L., Comustion synthesis and densification of titanium diboride-copper matrix composite, Materials Letters, 57, pp. 4439-4444, 2003.
- [66] DOBRZANSKI, L.A., Significance of materials science for the future development of societies, Journal of Materials Processing Technology, 175, pp.133-148, 2006.

- [67] <http://www.matweb.com/reference/copper-alloys.aspx>
- [68] AHMED, R. N., RAMESH, C.S., Tribological properties of cast Copper-SiC-Graphite hybrid composites, International Symposium of Research on Materials Science and Engineering, Chennai India, December 20-22, 2004.
- [69] www.key-to-metals.com
- [70] SAĞLAM, İ., Cu-Cr-Zr alaşımında yaşlandırma ısıl işleminin, elektrik iletkenliği ve aşınma davranışları üzerine etkisinin incelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ocak, 2008.
- [71] LEE, D.W., KIM, B.K., Nanostructured Cu-Al₂O₃ composite produced by thermochemical process for electrode application, Materials Letters, 58, pp. 378-383.
- [72] MOUSTAFA, SF., HAMID, ZA., ELHAY, AM, Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique, Materials Letters, Elsevier, 53, pp. 224-249, 2002.
- [73] MOTTA, M.S., JENA, P.K., BROCCHI, E.A., SOLORZANO, I.G., Characterization of Cu-Al₂O₃ nano-scale composites synthesized by in situ reduction, Materials Science and Engineering C, 15, pp. 175-177, 2001.
- [74] YING, D.Y., ZHANG, D.L., Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling, Materials Science & Engineering A, 286, pp. 152-156, 2000.
- [75] JENA, P.K., BROCCHI, E.A., MOTTA, M. S., In-situ formation of Cu-Al₂O₃ nano-scale composites by chemical routes and studies on their microstructures, Materials Science & Engineering A, 313, pp. 180-186. 2001.
- [76] ADRIC, Z., TASIC, M., KORAC, M., JORDAVIC, B., MARICIC, A., Influence of alumina content on the sinterability of the Cu-Al₂O₃ pseudo alloy (composite), MTAEC9, 38(5), 245, 2004.
- [77] CHENG, J., WANG, M., ZHOU, L., YANHUI, W., Nano scale Al₂O₃ dispersion-strengthened copper alloy produced by internal oxidation, China-EU Forum on Nanosized Technology, 2006.
- [78] <http://www accuratus.com/silicar.html>
- [79] YILDIRIM, İ., ARPACI, A., Basıncısız Sinterlenmiş SiC' de iç yapının kırılma tokluğuna etkisi, İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt 3, Sayı:1, s. 98-104, Şubat 2004.

- [80] CHOYKE, WJ., MATSUNAMI, H., PNSL, G., Silicon Carbide, Springer-Verlag Heidelberg New York, 2004.
- [81] HARRIS, GL., Properties of Silicon Carbide, Inspec, London, 1995.
- [82] FENG, ZC., ZHAO, JH., Silicon Carbide Materials, Processing, and Devices, Taylor&Francis, New York, 2004.
- [83] ZHANG, R., GAO, L., GUO, J., Effect of Cu₂O on the fabrication of SiCp/Cu nanocomposites using coated particles and conventional sintering, Composites, 35, pp. 1301-1305, 2004.
- [84] TREICHLER, R., WEISSGAERBER, T., KIENDL, T., TOFSIMS Analysis of Cu-SiC Composites for Thermal Management Applications, Elsevier, 252, pp. 7086-7088, 2006.
- [85] ZHU, J., LIU, L., HU, G., SHEN, B., HU, W., DING, W., Study on Composite Electroforming of Cu/SiC Composites, Materials Letters, 58, pp. 1634-1637, 2004.
- [86] http://www.dynacer.com/silicon_carbide.htm
- [87] <https://www.ifm.liu.se/semicond/new/sic/>
- [88] ZOU, G., CAO, M., LIN, H., JIN, H., KANG, Y., CHEN, Y., Nickel layer deposition on SiC nanoparticles by simple electroless plating and its behaviors, Power Technology, 168, pp. 84-88, 2006.
- [89] NAGEL, R., WEYRICH, K., HOFMANN, D.H.H., BALOGH, A.G., Heavy ion induced intermixing of metal/SiC interfaces, NIM B, 178, pp. 315-318, 2001.
- [90] KANG, H.K., KANG, S.B., Thermal decomposition of silicon carbide in a plasma sprayed Cu/SiC composite deposit, Materials Science and Engineering A, 428, pp. 336-345, 2006.
- [91] VILLEGAS, M., SIERRA, T., LUCAS, F., FERNANDEZ, J.F., CABALLERO, A.C., Oxidation treatments for SiC particles and its compatibility with glass, Journal of the European Ceramic Society, 27, pp. 861-864, 2007.
- [92] STOBIERSKI, L., GUBERNAT, A., Sintering of silicon carbide I. Effect of carbon, Ceramics International, 29, pp. 287-292, 2003.
- [93] QUANLI, J., HAIJUN, Z., SUPING, L., XIAOLIN, J., Effect of particle size on oxidation of silicon carbide powders, Ceramics International, 33, pp. 309-313, 2007.

- [94] ZHANG, R., GAO, L., GUO, J., Temperature-sensitivity of coating copper on sub-micron silicon carbide particles by electroless deposition in a rotation flask, *Surface and Coatings Technology*, 166, pp. 67-71, 2003.
- [95] RADO, C., DREVET, B., EUSTATHOPOULOS, N., The role of compound formation in reactive wetting: the Cu/SiC system, *Acta Materialia*, 48, pp. 4483-4491, 2000.
- [96] LUO, X., YANG, Y.Q., LIU, Y.C., MA, Z.J., YUAN, M.N., CHEN, Y., The fabrication and property of SiC fiber reinforced copper matrix composites, *Materials Science and Engineering A*, 459, pp. 244-250, 2007.
- [97] ZHANG, L., QU, X., DUAN, B., HE, X., REN, S., QĪN, M., Microstructure and thermo-mechanical properties of pressureless infiltrated SiC/Cu composites, *Composites Science and Technology*, 68, pp. 2731-2738, 2008.
- [98] SHU, K.M., TU, G.C., Study of electrical discharge grinding using metal matrix composite electrodes, *Machine Tools and Manufactures*, 43, pp. 845-854, 2003.
- [99] TJONG, S.C., LAU, K.C., Tribological behaviour of SiC particle-reinforced copper matrix composites, *Materials Letters*, 43, pp. 274-280, 2000.
- [100] BOR, F.Y.; Madencilik, *Cilt VII, Sayı 2, s. 97* (1968).
- [101] http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/bf8710b43df3f2c_ek.pdf
- [102] <http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/283.pdf>
- [103] <http://www.copper.org/education/production.html>
- [104] FOUAD , O.A., ABDEL, B.S.M., Cementation-induced recovery of self-assembled ultrafine copper powders from spent etching solutions of printed circuit boards, *Powder Technology*, 159, pp. 127-134, 2005.
- [105] DEMĪRKIRAN, N., EKMEKYAPAR, A., KŪNKŪL, A., BAYSAR, A., A kinetic study of copper cementation with zinc in aqueous solutions, *International Journal of Mineral Processing*, 82, pp. 80-85, 2007.
- [106] DŌNMEZ ,B., SEVĪM, F., SARAÇ, H., A Kinetic study of the cementation of copper from sulphate solutions onto a rotating aluminum disc, *Hydrometallurgy*, 53, pp. 145-154, 1999.
- [107] DIB, A., MAKHLOUFI, L., Cementation treatment of copper in wastewater: mass transfer in a fixed bed of iron spheres, *Chemical Engineering and Processing*, 43, pp. 1265, 1273, 2004.

- [108] FOUAD, O. A., BASIR, S. M., Cementation-induced recovery of self-assembled ultrafine copper powders from spent etching solutions of printed circuit boards, *Powder Technology*, 159, pp. 127–134, 2005.
- [109] STEFANOWICZ, T., OSIFISKA, G., NAPIERALSKA-ZAGOZDA, S., Copper recovery by the cementation method, *Hydrometallurgy*, 47, pp. 69-90, 1997.
- [110] DJOUDI, W., AISSANI, F., BOUROUINA, S., Optimization of copper cementation process by iron using central composite design experiments, *Chemical Engineering Journal*, 133, pp. 1-6, 2007.
- [111] KARAVASTEVA, M., Kinetics and deposit morphology of copper cementation onto zinc, iron and aluminium, *Hydrometallurgy*, 76, pp. 149-152, 2005.
- [112] ASKELAND, D.R., *The science and engineering of materials*, Brooks/Cole Engineering Division, 1984.
- [113] GUY, A.G., *Elements of physical metallurgy*, Addison-wesley publishing company, inc, 1959.
- [114] http://www.kehribar-amber.com/kehribarın_fiziksel_kimyasal_özellikleri.php
- [115] http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_tarihi
- [116] <http://www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/IOLTP/2279/unite06.pdf>.
- [117] CALLISTER, W.D., *Materials science and engineering*, John Wiley & Sons, 2007.
- [118] SMIHT, W., *Principles of materials science and engineering*, second edition, McGraw-Hill, 1990.
- [119] RICHERSON, D.W., *Modern ceramic engineering*, Taylor & Francis CRC Press, 2006.
- [120] GERMAN, R.M., *Powder metallurgy and particulate materials processing*, Metal powder industries federation, USA., 2005.
- [121] GUABIN, L., JIBING, S., QUANMEI, G., RU, W., Fabrication of the nanometer $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite by internal oxidation, *Materials Processing Technology*, 170, pp.336-340, 2005.
- [122] <http://www.answers.com>

- [123] EFE, Ç.G., ALTINSOY, İ., İPEK, M., ZEYTİN, S., BİNDAL, C., Some properties of Cu-SiC composites produced by powder metallurgy method, Kovove Metallic Materials, in press.
- [124] SHU, K.M., TU, G.C., Fabrication and characterization of Cu-SiC composites for electrical discharge machining applications, Taylor & Francis, 14, 4, pp. 483- 502, 2001.
- [125] LEE, D.W., HA, G.H., KIM, B.K., Synthesis of Cu-Al₂O₃ nano composite powder, Scripta Materialia, 44, pp. 2137- 2140, 2001.
- [126] <http://jchemed.chem.wisc.edu/JCESoft/CCA/CCA3/MAIN/REDOXCU/PAGE1.HTM>
- [127] EFE, Ç.G., ALTINSOY, İ., PEK, M., ZEYTİN, S., BİNDAL, C., Investigation of some properties of SiC particle reinforced copper composites, 5. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı, Ankara, 8-12 Ekim 2008.
- [128] EFE, Ç.G., ALTINSOY, İ., YENER, T., İPEK, M., ZEYTİN, M., BİNDAL, M., Charectarization of Cu-SiC composites”, 4th International Conference on Powder Metallurgy, Craiova, Romania, July 8-11, 2009.
- [129] <http://elektrikteknisyeni.blogcu.com/elektrik-malzemeleri/4507347>
- [130] <http://www.federal.com.tr/tr/v2/Katalog/11-Kontaktorler.pdf>
- [131] GÜLER, Ö., oksit takviyeli bakır kompozitin mekanik alaslama yöntemi ile üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
- [132] SHI, Z., YAN, M., The preparation of Al₂O₃-Cu composite by internal oxidation, Applied Surface Science, 134, pp. 103- 106, 1998.
- [133] EVIN, E., GULER, O., The investigation of contact performance of oxide reinforced copper composite via mechanical alloying, Journal of Materials Processing Technology, 209, pp. 1286- 1290, 2009.
- [134] ZIELINSKI, W., WEIBGARBER, T., KIEBACK, B., Interfacial design of Cu-SiC composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications, Composites, 38, pp. 2398- 2403, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Gözde ÇELEBİ EFE, 25/12/1979 yılında Adapazarı'nda doğdu. Adapazarı Atatürk İlkokulu'nu, Adapazarı Atatürk Ortaokulu'nu ve Adapazarı Atatürk Süper Lisesi'ni bitirdi. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında doktora öğrencisidir. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk annesidir.