

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ BAKIR MATRİSLİ ELEKTRİK İLETKEN KOMPOZİT ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mecit KARADAĞ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sakin ZEYTİN

Temmuz 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

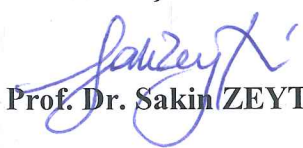
**B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ BAKIR MATRİSLİ
ELEKTRİK İLETKEN KOMPOZİT ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mecit KARADAĞ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 09 / 08 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Sakin ZEYTİN

Jüri Başkanı


Doç. Dr. Nurcan ÇALIŞ
AÇIKBAŞ

Üye


Doç. Dr. Mediha İPEK

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mecit KARADAĞ

09.08.2017

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren tez danışmanın Sayın Prof. Dr. Sakin ZEYTİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen üniversitemiz akademik ve teknik personeline teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan ve beni destekleyen tüm aileme bana desteklerinden dolayı teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER	6
2.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri	7
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	8
2.2.1. Matris malzemesine göre kompozitler	8
2.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler	8
2.2.1.2. Seramik matrisli kompozitler	9
2.2.1.3. Metal matrisli kompozitler	10
2.2.2. Takviye fazının türüne göre kompozitler	11
2.2.2.1. Fiber takviyeli kompozitler	11
2.2.2.2. Tabakalı kompozitler	13
2.2.2.3. Partikül takviyeli kompozitler	15

2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	17
2.3.1. İnfiltrasyon yöntemi	17
2.3.2. Vorteks (Girdap) yöntemi	18
2.3.3. In-situ yöntemi	19
2.3.4. Toz metalurjisi yöntemi	20

BÖLÜM 3.

BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİTLER	23
3.1. Bakır	23
3.1.1. Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri	23
3.1.2. Bakırın kullanım alanları	24
3.1.3. Bakır alaşımları	25
3.2. Bakır Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları	29
3.3. B ₄ C	30
3.3.1. B ₄ C'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	32
3.3.1.1. Sertlik	32
3.3.1.2. Aşınma dayanımı	33
3.3.1.3. Yoğunluk	33
3.3.1.4. Elektriksel direnç	33
3.3.1.5. Mekanik özellikler	34
3.3.2. Bor karbürün kullanım alanları	35
3.3.2.1. Aşınmaya dayanıklılık amaçlı kullanımı	36
3.3.2.2. Zırh malzemesi olarak kullanımı	36
3.3.2.3. Nükleer reaktörlerde kullanımı	36
3.3.2.4. Refrakter malzeme olarak kullanımı	36

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	37
4.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	38

4.3. Çalışmada Kullanılan Cihazlar	38
4.4. Deneysel Çalışmada İzlenen Yol	39
4.5. Numunelerin Hazırlanması	40
4.6. Numunelerin Karakterizasyonu	41
4.6.1. Optik inceleme	41
4.6.2. SEM incelemeleri	41
4.6.3. XRD analizleri	41
4.6.4. Yoğunluk ölçümü	41
4.6.5. Sertlik ölçümü	42
4.6.6. Elektriksel iletkenlik ölçümü	42
4.6.7. Aşınma dayanımı ölçümü	42
 BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR	43
5.1. Toz Karakterizasyonu	43
5.1.1. SEM mikrografileri	43
5.1.2. XRD analizleri	47
5.2. Sinterlenen Numunelerin Karakterizasyonu	49
5.2.1. Optik mikroskop görüntüleri	49
5.2.2. SEM görüntüleri ve EDS analizleri	51
5.2.3. XRD analizleri	58
5.2.4. Yoğunluk ölçümleri	60
5.2.5. İletkenlik ölçümleri	61
5.2.6. Sertlik ölçümleri	62
5.2.7. Aşınma testleri	63
 BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	83

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

EDS	: Enerji saçınımlı spektrum
EDX	: Enerji saçınımlı X ışınları
IACS	: Uluslar arası tavlanmış bakır standardı
İ1	: %1 İnce B ₄ C takviyeli bakır matrisli kompozit numune
İ3	: %3 İnce B ₄ C takviyeli bakır matrisli kompozit numune
İ5	: %5 İnce B ₄ C takviyeli bakır matrisli kompozit numune
K1	: %1 Kalın B ₄ C takviyeli bakır matrisli kompozit numune
K3	: %3 Kalın B ₄ C takviyeli bakır matrisli kompozit numune
K5	: %5 Kalın B ₄ C takviyeli bakır matrisli kompozit numune
PVA	: Polivinil alkol
SB	: Saf bakır numune
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X ışını saçılımı
YMK	: Yüzey merkezli kübik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çeşitli fiber yönlenmelerine sahip kompozit örnekleri	12
Şekil 2.2. Tabakalı kompozit örneği	14
Şekil 2.3. Farklı yönlerde takviye edilmiş kompozitin şematik gösterimi ...	15
Şekil 2.4. İnfiltrasyon yönteminin şematik gösterimi	18
Şekil 2.5. Vorteks (Girdap) yöntemi	19
Şekil 2.6. Toz metalurjisi yönteminin genel şeması	20
Şekil 2.7. Toz karışımı	21
Şekil 2.8. Toz partikülleri arasındaki boyun oluşumu	21
Şekil 3.1. Bakırın kullanım alanları ve oranları	25
Şekil 3.2. Demir dışı metal alaşımlarının sınıflandırılması	26
Şekil 3.3. Elementlerin bakır alaşımlarına etkileri	27
Şekil 3.4. Bor-Karbon ikili denge diyagramı	31
Şekil 3.5. Sertliğin Bor/Karbon oranına bağlı olarak değişimi	32
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada izlenen yol	39
Şekil 4.2. Kompaktlama işleminde kullanılan kalıp ve zımbalar	40
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan ince (7 mikron) B ₄ C tozlarına ait SEM görüntüleri (a) x500, (b) x2000, (c) x4000 büyütme	43
Şekil 5.2. İnce (7 mikron) bor karbür tozlarına ait partikül dağılımı	44
Şekil 5.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaba (60 mikron) bor karbür tozlarının SEM görüntüleri (a) x100, (b) x200, (c) x300 ve (d) x500 büyütme	45
Şekil 5.4. Kaba (60 mikron) bor karbür tozlarına ait partikül dağılımı	45
Şekil 5.5. Deneysel çalışmada kullanılan bakır tozlarına ait SEM görüntüleri (a) x100, (b) x500, (c) x1000 büyütme	46
Şekil 5.6. Bakır tozlarına ait partikül dağılımı	47
Şekil 5.7. Saf bakır tozunun XRD spektrumu	48

Şekil 5.8. İnce (7 mikron) boyutlu B ₄ C partiküllerinin XRD spektrumu.	48
Şekil 5.9. Kaba (60 mikron) boyutlu B ₄ C partiküllerinin XRD spektrumu.. ...	49
Şekil 5.10. Saf bakırın optik mikroskop görüntüleri	50
Şekil 5.11. İnce (7 µm) bor karbür tozları kullanılarak hazırlanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri	50
Şekil 5.12. Kaba (60 µm) bor karbür tozları kullanılarak hazırlanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri	51
Şekil 5.13. Saf bakırın sinterleme sonrası SEM görüntüsü	51
Şekil 5.14. Saf bakır numunenin EDS analizi	52
Şekil 5.15. 7 µm boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %1 takviyeli numunenin SEM görüntüsü	52
Şekil 5.16. Ağırlıkça %1 7 mikron boyutunda bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi	53
Şekil 5.17. 7 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %3 takviyeli numunenin SEM görüntüsü	53
Şekil 5.18. Ağırlıkça %3 7 µm boyutunda bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi	54
Şekil 5.19. 7 µm boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %5 takviyeli numunenin SEM görüntüsü	54
Şekil 5.20. Ağırlıkça %5 7 mikron boyutunda bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi	55
Şekil 5.21. 60 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %1 takviyeli numunenin SEM görüntüsü	55
Şekil 5.22. Ağırlıkça %1 60 mikron boyutundaki bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi	56
Şekil 5.23. 60 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %3 takviyeli numunenin SEM görüntüsü	56
Şekil 5.24. Ağırlıkça %3 60 mikron boyutundaki bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi	57
Şekil 5.25. 60 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %5 takviyeli numunenin SEM görüntüsü	57
Şekil 5.26. Ağırlıkça %5 60 mikron boyutundaki bor karbür içeren	

numunelerin noktasal EDS analizi	58
Şekil 5.27. Sinterlenmiş saf bakırın XRD spektrumu	59
Şekil 5.28. İnce (7 µm) partikül boyutuna sahip bor karbür tozları ile üretilen kompozitlerin XRD spektrumları	59
Şekil 5.29. 60 mikron partikül boyutuna sahip bor karbür tozları ile üretilen kompozitlerin XRD spektrumları	60
Şekil 5.30. Hazırlanan numunelerin relatif yoğunluk yüzdelerinin bor karbür oranına göre değişimi	61
Şekil 5.31. Numunelerin %IACS değerlerinin takviye oranına göre değişimi...	62
Şekil 5.32. Numunelerin sertlik değerlerinin takviye oranına göre değişimi	63
Şekil 5.33. 7 mikron tozlarla üretilen kompozitlerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi	64
Şekil 5.34. 60 mikron tozlarla üretilen kompozitlerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi	64
Şekil 5.35. Kayma mesafesi boyunca sürtünme katsayılarının ortalamasının takviye oranına göre değişimi	65
Şekil 5.36. Kararlı hal sürtünme katsayısı ortalamasının takviye oranına göre değişimi	65
Şekil 5.37. Numunelerin aşınma oranının takviye oranına göre değişimi	66
Şekil 5.38. Aşınma testi karşıt yüzey görüntüleri	67
Şekil 6.1. 60 mikron tozlarla üretilen kompozitlerden elde edilen verilerin birleşik gösterimi	73
Şekil 6.2. 7 mikron tozlarla üretilen kompozitlerden elde edilen verilerin birleşik gösterimi	74

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Metallerin ve seramiklerin elektrik iletkenlik değeri.....	2
Tablo 2.1. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları.....	16
Tablo 3.1. Bakıra ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	24
Tablo 3.2. Alışım elementlerinin bakıra etkisi.....	28
Tablo 3.3. Seramik takviye elemanlarının genel özellikleri.....	29
Tablo 3.4. B ₄ C'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	35
Tablo 4.1. B ₄ C-Cu karışımlarının ağırlıkça yüzdeleri ve numune kodları.....	40
Tablo 5.1. İnce (7 mikron) bor karbür tozlarının partikül boyutu (μm) dağılımı	44
Tablo 5.2. Kaba (60 mikron) bor karbür tozlarının partikül boyutu (μm) dağılımı	46
Tablo 5.3. Bakır tozlarının partikül boyutu (μm) dağılımı.....	47
Tablo 5.4. Numunelerin relatif yoğunluk değeri.....	60
Tablo 5.5. Numunelerin iletkenlik değeri.....	61
Tablo 5.6. Numunelerin sertlik değeri.....	62
Tablo 5.7. Numunelerin aşınma oranları.....	66

ÖZET

Anahtar kelimeler: Metal Matrisli Kompozit, Bakır, B₄C, Toz Metalurjisi

Bu çalışmada takviye oranı ve boyutunun Cu-B₄C kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan numuneler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Matris malzemesi olarak 60 µm boyutundaki Cu tozları ve takviye malzemesi olarak iki farklı boyuttaki (7 ve 60 µm) B₄C tozları kullanılmıştır. Cu matris ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5 oranlarında B₄C tozları ile takviye edilmiştir. Hazırlanan toz karışımları 250 bar yük altında preslenip 750 C° sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sırasında oksitlenmenin engellenmesi için numuneler grafit tozuna gömülmüştür. Elde edilen kompozitlerin elektriksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla ilk olarak kompozitlerin optik, SEM-EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Daha sonra yoğunluk, elektriksel iletkenlikleri, sertlik ve aşınma dayanımları belirlenmiştir. Takviye edilen partiküllerin matris içerisinde tam olarak homojen dağılmadığı görülmüştür. Kompozit numunelerde az miktarda oksitlenme meydana gelmiştir. Takviye işlemine bağlı olarak kompozitlerin sertlikleri önemli ölçüde artmıştır. Kompozit numunelerdeki elektriksel iletkenlikler takviyesiz numune ile kıyaslandığında genel olarak düşüktür. İletkenlikteki azalma da oksitlenmeden dolayı düzenli değildir. 60 µm boyutundaki takviye partiküllerinin kullanıldığı kompozitlerin aşınma oranları 7 µm partikül boyutuna sahip olanlardan daha iyi sonuçlara sahiptir. Sonuç olarak, en uygun sonuçlar 60 µm boyutundaki B₄C tozları ile ağırlıkça %1 oranında takviye edilerek hazırlanan numunelerden elde edilmiştir.

PRODUCTION OF ELECTRICAL CONDUCTIVE B₄C PARTICLE REINFORCED COPPER MATRIX COMPOSITE

SUMMARY

Keywords: Metal Matrix Composite, Copper, B₄C, Powder Metallurgy

In this study, the effect of the reinforcement rate and size on mechanical and electrical properties of Cu-B₄C composites was investigated. The used samples were produced through powder metallurgy method. Copper powders with 60 µm particle size were used as the matrix material and B₄C powders with two different particle size (7 and 60 µm) were used as the reinforcement material. The Cu matrix was reinforced with B₄C powders at ratios of 0, 1, 3 and 5 % by weight. The prepared powders mixtures were pressed with a load of 250 bar and sintered at 750 C° for 2 h. The samples were embedded in graphite to prevent the oxidation during sintering. The electrical and mechanical properties of the obtained composites were determined. For this purpose, optical, SEM-EDS and XRD analyses of composites were done. Then, the density, electrical conductivity, hardness and wear rates of the composites were determined. It was seen that the reinforced particles was not completely homogeneous in matrix. A small amount of the oxidation was occurred at the composite samples. Depending on the reinforcement process, the hardness of the composites significantly increased. Compared with unreinforced samples, the electrical conductivity of the composites was generally low. Also, decreasing in the conductivity were not regular due to the oxidation. The wear rates of the composites that were used reinforcement particles with 60 µm particle size has better results than those with 7 µm particle size. As a result, the best suitable results were obtained from the samples that reinforced with 60 µm B₄C powders at ratio of 1% by weight.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bakır ve bakır alaşımları geleneksel metaller içerisinde üretim ve tüketim açısından demir/çelik ve alüminyumdan sonra en büyük üçüncü gruptur [1,2]. Bakır insanlık tarihi boyunca kullanılan en eski metaldir. Bulunduğu zamandan bu yana insanların hayatlarında hep olmuştur. Hatta bir çağa ismini verecek kadar büyük bir öneme sahiptir. Saf bakır 400 W/mK civarında termal iletkenliğe, 28-40 MPa civarında akma mukavemetine sahip olan bir malzemedir [3].

Tarih boyunca insanlar farklı özellikleri nedeniyle bakırı kullanmışlardır. Bu özellikler şunlardır [3]:

- Kolay şekillenebilirlik,
- Orta derecedeki mukavemet,
- Dekoratif rengi,
- Korozyon direnci,
- Yüksek termal iletkenlik ve
- Yüksek elektriksel iletkenlik.

Bu özelliklerin yanında yüksek ergime noktası, altın ve gümüşe göre düşük maliyeti endüstriyel uygulamalarda bakırın yaygın şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [4-6]. Saf bakır günümüzde kablo ve tellerde, elektrik kontak malzemelerinde ve elektrik akımının geçmesi gereken çok çeşitli uygulamalarda kullanılır [1]. Elektrik elektronik sektörünün yanında bilgisayar sektörü de bakırın kullanıldığı önemli alanlardan biridir.

Gümüş elektrik iletkenliği en yüksek olan malzemedir. Fakat gümüş yüksek maliyeti nedeniyle elektrik kontak malzeme uygulamalarında kullanılmamaktadır [2]. Bakır

gümüşten sonra elektrik iletkenliği en yüksek olan metaldir. Buna bağlı olarak elektrik iletkenliğinin ana talep olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakırın gümüşten sonra elektrik iletkenliği konusundaki en büyük rakibi alüminyumdur, ancak alüminyumun iletkenliği ve mukavemeti bakırınki kadar yüksek değildir [2,3]. Farklı metal ve seramiklerin iletkenlik değerleri Tablo 1.1.'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Metallerin ve seramiklerin elektrik iletkenlik değerleri

Madde	Elektriksel Direnç (ohm-cm)
Gümüş	$1,55 \times 10^{-6}$
Bakır	$1,7 \times 10^{-6}$
Altın	$2,2 \times 10^{-6}$
Alüminyum	$2,7 \times 10^{-6}$
Berilyum	$4,3 \times 10^{-6}$
B ₄ C	10
SiC	10^6
AlN	10^{14}
SiO ₂	10^{22}

1913 yılında bakır %100 olarak standart alan elektrik iletkenlik tablosu oluşturulmuştur. Buna göre halen malzemelerin elektrik iletkenlikleri %IACS (International Annealed Copper Standard) olarak tanımlanmaktadır [2].

Elektronik paketleme, elektrot üretimi ve kontak terminalleri gibi birçok uygulamada yüksek elektrik iletkenliği ile birlikte yüksek dayanım da istenmektedir [7]. Bu uygulamalarda kullanılacak olan malzemelerin yüksek sıcaklıklarda da mekanik özelliklerini kaybetmemesi gerekmektedir. Saf bakırın oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda nispeten düşük mekanik özellikler göstermesi geniş uygulamalarda kullanılmasını sınırlamaktadır [4]. Bunun yanında nispeten düşük sertliği ve zayıf aşınma dayanımı da saf bakırın kullanım alanının genişlemesini engelleyen faktörlerdendir [5,6].

Saf bakırın oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda düşük mekanik özellikler sergilemesi bakırın mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bakır saf hali ile güçlendirmenin tek yolu deformasyon sertleştirmesidir. Ancak saf bakır bu yolla sertleştirilse dahi 100°C'ye yakın sıcaklıklarda yeniden kristalleşme sonucu mekanik özelliklerini kaybetmektedir [8]. Genel olarak bakırın mekanik özelliklerini ve aşınma dayanımını geliştirmek için kullanılan iki yöntem vardır. Bunlardan birincisi yaşlanma sertleşmesi, ikincisi ise sert bir fazı bakır içerisine dağıtmak yoluyla kompozit üretmektir. Yaşlanma sertleşmesi için bakıra krom, zirkonyum gibi ikinci bir faz eklenebilir [6]. Bakır esaslı yüksek dayanımlı alaşımlar otomotiv, havacılık ve elektronik sektöründe kullanılabilmektedir [9]. Yüksek dayanımlı iletkenliği yüksek bakır alaşımları üretmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda Cu-B, Cu-Mg, Cu-Te, Cu-Ag, Cu-Zr-B, Cu-Ti, Cu-Fe-Ag, Cu-Cr-Zr, Cu-Cr ve Cu-Ti-C alaşımları kullanılmıştır [3,9-20.]. Oda sıcaklığındaki mekanik özellikler küçük miktarlarda Cr, Zr, Ag, gibi elementlerin ilavesi ile önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Ancak küçük miktarlardaki alaşım elementlerinin bakıra ilave edilmesi elektrik iletkenliğinde önemli azalmalara neden olmaktadır. Örneğin %0.3 Zn ilave edilmiş bakırın iletkenliğin %85 IACS'ye, %1,25 Al ilavesi ise iletkenliğin %70 IACS'ye düşmesine neden olmaktadır [21]. Bununla birlikte yaşlanma sertleşmesi ile oluşturulan ikinci fazın kabalaşması yani aşırı yaşlanma nedeniyle 500°C civarında bu alaşımlar mekanik özelliklerini yitirirler [6].

Elektronik kontak bileşenleri için kullanılacak malzemeler yüksek sıcaklıklarda da iletkenlik özelliklerini kaybetmeden mekanik özelliklerini koruyabilmelidirler. Bu amaçla seramik partikül takviyeli bakır matrisli kompozitler geliştirilmiştir. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler takviye ve matris malzemelerinin özelliklerini birleştirir [4]. Bakır matrisli kompozit malzemeler oksitler, karbürler ve borürler gibi seramik partiküller ile takviye edildiklerinde elektrik iletkenliklerini ve termal iletkenliklerini çok fazla kaybetmeden iyi mekanik özelliklere sahip olabilirler [21,22]. Bununla birlikte sahip oldukları mekanik özellikleri ve aşınma dayanımlarını yüksek sıcaklıklarda da koruyabilirler [5]. Örneğin bakır matrisli Al₂O₃ partikül takviyeli metal matrisli kompozitler bakır fazının yüksek termal ve elektriksel iletkenliği ile Al₂O₃ fazının yüksek dayanımı ve yüksek termal ve kimyasal

kararlılığını çok iyi birleştirirler [7] Bakır matrisli kompozitler ile sağlanabilen yüksek mukavemet, yüksek iletkenlik, yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı saf bakır ve bakır alaşımları ile kıyaslandığında, elektrik kontak malzemeleri, elektrotlar ve diğer birçok endüstriyel uygulama için çok önemli ve gereklidir [1].

İletken kompozit malzeme üretiminde bakır matrise takviye edilmek üzere kullanılan en önemli takviye elemanları Al_2O_3 ve SiC'dür. Al_2O_3 ve SiC ile yapılan çalışmalarda yüksek elektrik iletkenliğine sahip aşınma dayanımı yüksek bakır matrisli kompozitler üretilmiştir. SiC ile yapılan bir çalışmada sertlik değerleri 133 HV'den 215 HV değerine yükseltilmiş ve iletkenlik değeri %96 IACS olarak elde edilmiştir [1]. Al_2O_3 ile yapılan bir çalışmada sertlikte %30'a yakın artış sağlanırken, elektrik iletkenliği %92 IACS civarında elde edilmiştir [23]. Bu takviye elemanlarının yanında metal matrisli kompozitler için B_4C de önemli bir takviye malzemesidir. İyi kimyasal ve termal kararlılığının yanında, Al_2O_3 ve SiC'e göre daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek sertliğe sahip olması B_4C 'ün de önemli takviye elemanlarından biri olmasını sağlamıştır [24,25]. B_4C , elmas ve c-BN'den sonra en yüksek sertliğe sahip olan malzemedir [26-28]. Bu durum yüksek aşınma dayanımına sahip kompozitlerin üretiminde tercih sebebi olmasını sağlar. B_4C takviyeli metal matrisli kompozitler yüksek sertlikleri, yüksek elastik modülleri ve yüksek toklukları nedeniyle ümit verici malzemelerdendir [29]. B_4C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde B_4C , SiC ve Al_2O_3 'e göre daha iyi bir ara yüzey tutunması sağlamaktadır [30]. Bu durum B_4C ile üretilecek kompozitlerin mekanik özelliklerine olumlu şekilde yansımaktadır. B_4C yüksek ergime noktası nedeniyle $1000^\circ C$ sıcaklıklarda dahi mekanik özelliklerini kaybetmez. Bu durum B_4C 'ün oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda birçok ileri teknoloji uygulamada anahtar bir malzeme olmasını sağlamaktadır[5]. İletkenlik açısından düşünüldüğünde ise B_4C 'ün elektriksel direnci SiC'den daha düşüktür ve bu direnç yükselen sıcaklık ile birlikte daha da azalmaktadır [31]. Bu durum iletkenlik uygulamalarında B_4C 'ün önemli bir takviye elemanı olabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, farklı partikül boyutlarında B_4C tozu kullanılarak bakır matrisli kompozitler farklı takviye oranlarında üretilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak

bu çalışmada sinterlenmiş numunelere presleme işlemi uygulanmamıştır. Her iki partikül boyutu içinde ağırlıkça %1, %3 ve %5 olmak üzere üç farklı oranda takviye ilave edilmiştir. Kompozit numuneler toz metalurjisi yöntemi yoluyla elde edilmiştir. Tek eksenli pres kullanılarak 250 bar basınç altında preslenerek üretilen numunelerde takviye partikül boyutu ve takviye oranının numunenin mekanik ve elektrik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla numuneler üzerinde yoğunluk ölçümü, sertlik testleri, aşınma testleri ve elektrik iletkenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı ve faz analizlerinin belirlenmesi amacıyla SEM-EDS analizi, optik mikroskop ve XRD incelemeleri yapılmıştır.



BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerinin, yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. En az iki farklı malzemenin makro ölçekte birleştirilmesi ile elde edilen kompozit malzemelerde iki bileşen grubu da önemli rol oynar. Daha sert ve daha yüksek dayanıma sahip olan faz takviye fazı olarak adlandırılır. Ana yapı ise matris fazı olarak adlandırılır [32].

Takviye fazının temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise takviyelere yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için takviye elemanlarını bir arada tutmak ve çoğu gevrek ve kırılgan olan takviyeleri dış ve çevresel etkilere korumaktır [33].

İki farklı fazdan meydana gelen tüm malzemeler kompozit malzeme sayılmaz. Bir malzemenin kompozit olup olmadığını belirlemek için aşağıdaki kriterler kullanılabilir [32]:

- Yapay olarak üretilmiş olmalıdır.
- Bileşenleri, bir ara yüzle ayrılabilen kimyasal olarak farklı en az iki malzemenin kombinasyonu olmalıdır.
- Kompozitleri oluşturan farklı malzemeler, üç boyutlu olarak kombine edilmelidir.
- Belirlenen özellikler, kompoziti meydana getiren unsurların hiç biri tarafından tek başlarına sağlanamamalıdır.

Kompozit malzemeler takviye ve matris malzemesinin türüne göre farklı gruplara ayrılmaktadır. Bu kompozitler türlerine göre farklı özellikler göstermekte ve farklı kullanım alanlarına sahip olmaktadır. Özellikle wiskerler, partiküller ve kısa fiberler gibi süreksiz fazlar ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, takviye edilmemiş alaşımlar ile kıyaslandığında yüksek veya düşük sıcaklıklarda yüksek dayanım değerleri, düşük termal genleşme katsayısı, iyi aşınma dayanımı ve yüksek rijitlik gösterirler. Aşınma ve korozyon dayanımını birleştiren seramik partiküllerin, sünek ve şekillendirilebilir metallerle birleştirilmesiyle üretilen kompozitlerin triboloji alanında birçok uygulaması vardır [34]. Son zamanlarda metal/seramik kompozitler termal uygulamalarda da kullanılmaktadır [35].

Metal matrisli kompozitler yüksek elastik modül, yüksek spesifik dayanım, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek aşınma dayanımı ve yüksek termal iletkenlik gibi özellikler göstermektedir. Bu özelliklerine bağlı olarak metal matrisli kompozit malzemeler otomotiv sanayi, havacılık ve uzay sanayi, genel mühendislik uygulamaları, spor aletleri gibi çok çeşitli alanlarda yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır [35,36].

2.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemeler üretildikleri farklı malzemelerin üstün özelliklerine sahip olurlar. Kompozit üreterek geliştirilebilecek özellikler aşağıda listelenmiştir [37]:

- Dayanım
- Korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Estetik özellik
- Ağırlık
- Yorulma ömrü
- Sıcaklığa bağlı davranış
- Isı yalıtımı
- Termal iletkenlik

- Ses yalıtımı.

Yukarıda sayılan özelliklerin tamamını bir malzemede birleştirmek mümkün değildir. Üretilecek olan kompozitler kullanım amacına göre istenilen özellikleri geliştirilecek şekilde tasarlanır.

Tüm bu üstün özelliklerin yanında kompozit malzemelerin bazı olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bu olumsuz yönler aşağıda listelenmiştir [38]:

- Üretim zorluğu
- Pahalı olması
- İşlenme problemi, işlenme maliyetinin yüksek olması ve gerekli yüzey pürüzlülüğünün sağlanamaması
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
- Kırılma uzamasının az olması.

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris malzemesine göre veya takviye fazının türüne göre iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Genel olarak kompozit malzemeler matris malzemesinin türüne göre sınıflandırılır.

2.2.1. Matris malzemesine göre kompozitler

Matris malzemesinin türüne göre kompozitler polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli olarak üç gruba ayrılabilir.

2.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, metal ve seramik malzemelere göre daha fazla karmaşık yapıdaki malzemelerdir. Polimer matris malzemeleri ucuzdur ve kolaylıkla çalışılabilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastik modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Termoset ve termoplastikler olarak iki gruptan oluşan polimerler genelde

sürekli fiberler ile takviye edilirler. Matris olarak kullanılan polimerlerden en önemlileri polyeester ve epoksi reçinelerdir [39, 40].

Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemler, elle sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pultrüzyon yöntemi, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleridir [41].

Polimer matrisli kompozitlerin başlıca kullanım alanları, korozyon direnci nedeniyle denizcilik uygulamaları, hafifliği nedeniyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri ile spor malzemeleri, yanmazlık özelliği istenen otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar olarak gösterilebilir [42]

2.2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Metal dışı minerallerin çeşitli ön işlemlerden geçirildikten sonra yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile elde edilen tuğladan cama her türlü ürün seramik olarak adlandırılır [32]. Kompozit malzemelerin üretiminde genel olarak ileri teknoloji seramikler kullanılır. Başlıca ileri teknoloji seramikler aşağıda listelenmiştir [3]:

- Oksitler; Alümina (Al_2O_3), Zirkonya (ZrO_2), Magnezya (MgO)
- Karbürler; SiC , ZrC , WC , B_4C
- Nitrürler; BN , AlN , TiN , ZrN
- Sülfürler; CdS , ZnS
- Silisterler; Mo_2Si , WSi_2
- Borürler; TiB_2 , ZrB_2
- Diğerleri; Fosfürler (BP)

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklıklarda yüksek elastik özellikler gösterirler. Kimyasal olarak inerttirler ve düşük yoğunluğa sahiptirler. Seramikler çok sert ve kırılgandırlar. Bu özelliklerinin yanında termal şok dirençleri ve toklukları düşüktür. Seramik malzemelerin takviye edilmesi ile birlikte mukavemeti yükselmekte ve monolitik seramiklere göre toklukları yirmi kata kadar arttırılabilmektedir.

Tokluktaki artışın en önemli sebebi takviye edilen malzemenin çatlak ilerlemesini engellemesi veya yavaşlatmasıdır [41].

Seramik matrisli kompozitler iki aşamada üretilir. İlk aşamada takviye malzemeleri matris içine dağıtılır. İkinci aşamada ise matris yoğunlaştırılır. İnfiltrasyon, sıcak izostatik presleme, sol-jel, polimer piroliz, kimyasal reaksiyon ve toz metalürjisi yöntemleri seramik matrisli kompozit üretiminde kullanılır [40].

Seramik matrisli kompozitlerin gelişimi iki ana nedenden ötürü diğer kompozitlere göre geri kalmıştır. Bunun ilk nedeni seramik matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerinin yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi ve sadece yüksek sıcaklık takviyeleri ile çalışmasıdır. İkinci nedeni ise üretim sırasındaki yüksek sıcaklığın soğuma sırasında farklı termal genleşme katsayısına sahip olan takviye ve matris malzemesi arasında termal gerilme oluşturmalarıdır. Bu gerilme seramik matrisin kırılması ile sonuçlanır [43].

Seramik matrisli kompozitlerin kullanım alanları, roket ve turbojet motorları, uydular ve biyomedikal malzemeler olarak örneklenebilir [41].

2.2.1.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler yeni nesil mühendislik malzemelerini temsil eder. Bu yeni nesil mühendislik malzemeleri metal matris malzemesinin içerisine çoğunlukla güçlü seramik takviyeler ilave edilerek spesifik dayanım, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı ve elastik modül gibi özelliklerinin geliştirilmesi ile elde edilir. Metal matrisli kompozitler matris alaşımının metalik özellikleri (Süneklik ve tokluk) ile takviye malzemesinin seramik özelliklerini (Yüksek dayanım ve yüksek modül) birleştirir. Bu birleşim metal matrisli kompozitlerin bilimsel, teknolojik ve ticari olarak büyük bir öneme sahip olmasını sağlar [44].

Metal matrisli kompozitlere takviye malzemesi olarak genellikle oksitler, karbür yada nitrürler, matris malzemesi olarak ise genellikle Al, Cu, Fe, Mg, Ti veya Pb gibi

metaller kullanılır. Kullanılan takviye malzemeleri sürekli ve süreksiz fiber, partikül veya whisker şeklinde olabilir [40].

Metal matrisli kompozitlerin monolitik malzemelere göre birçok önemli avantajı vardır. Yüksek spesifik dayanım, yüksek spesifik modül, yüksek sıcaklıklarda daha iyi özellik gösterme, düşük termal genleşme katsayısı, ve daha iyi aşınma dayanımı bu avantajlar içerisinde sayılabilir. Bu özellikleri sayesinde metal matrisli kompozitler geniş bir kullanım alanına sahiptir [43]. Uçak motorları ve otomobil endüstrisi metal matrisli kompozitlerin kullanıldığı önemli uygulama alanlarındandır [44].

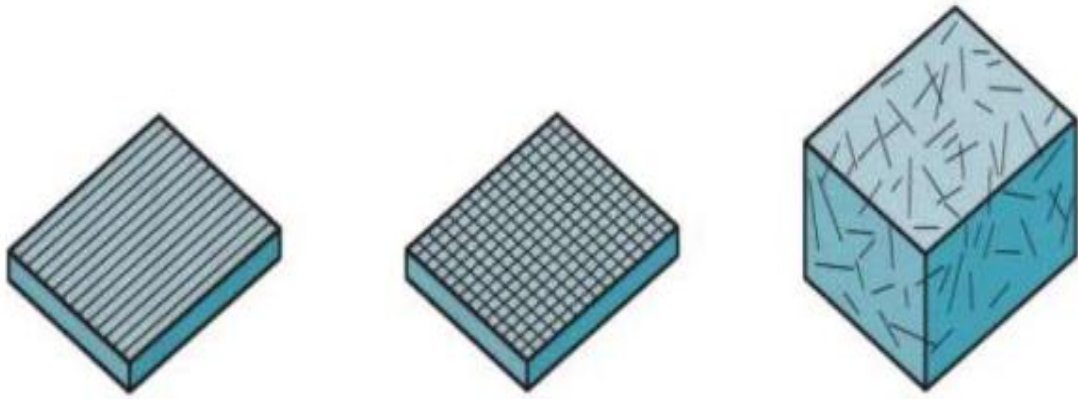
2.2.2. Takviye fazının türüne göre kompozitler

Kompozit malzemeler özelliklerini kullanılan takviye elemanlarından alırlar. Matris malzemesi ile uyumlu takviye elemanının kullanılması istenen üstün özelliklerin sağlanmasını mümkün kılar. Takviye malzemesi olarak genelde oksit, karbür veya nitrür bileşimleri kullanılmaktadır [56].

Takviye fazının türüne göre kompozitler, sürekli ve süreksiz fiber takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve partikül takviyeli kompozitler olarak gruplandırılabilir.

2.2.2.1. Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler sünek matris içerisine, yüksek mukavemet ve yüksek elastik modüle sahip fiberlerin eklenmesi ile elde edilir. Yük taşıma amacıyla kullanılan fiber takviyeli kompozit malzemelerde matris malzemesi uygulanan yükün fiberlere transfer edilmesini sağlar [62]. Çeşitli fiber yönlenmelerine sahip kompozit malzemeler Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Çeşitli fiber yönlenmelerine sahip kompozit örnekleri [65].

Takviye elemanı olarak kullanılan fiberler boyları doğrultusunda bulk formdakiinden daha yüksek mekanik özellikler gösterirler. Bunun sebebi küçük kesit alanlarında dislokasyon kusurlarının oluşumunun azalmasıdır. Kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılacak fiberlerin aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenir [64].

- Fiber doğrultusunda yüksek elastik modül,
- Fiber doğrultusunda yüksek çekme dayanımı,
- Fiberler arasındaki mekanik özellik farklarının az olması,
- Kullanım ve üretimi sırasında kararlı olması,
- Fiber kesitlerinin düzenli olması [64].

Fiberlerin kompozit içerisindeki doğrultuları, yerleşimi ve fiberlerin boyutları üretilen kompozitin özelliklerini etkilemektedir. Kompozite uygulanan gerilme takviye edilen liflerin doğrultusunda ise üretilen kompozit malzemenin dayanımı yüksek olur. Eğer uygulanan yük fiberlere dik doğrultuda ise üretilen kompozitin dayanımı düşük olur [57].

İlk geliştirilen fiber takviyeli metal matrisli kompozitler bor fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerdir. Alüminyumun içerisine hacimce %51 bor katılarak elde edilen kompozitin çekme dayanımı 310 MPa'dan 1417 MPa'a, elastik modülü 69 GPa'dan 231 GPa'a kadar yükselebilmektedir [63].

Yaygın olarak kullanılan elyaf takviye elemanları aşağıda verilmiştir [57].

- Cam fiberler,
- Karbon fiberler,
- Bor fiberler,
- Yapay organik fiberler,
 - Aramid (Kevlar) fiberler
 - Polipropilen fiberler
 - Polietilen fiberler
 - Naylon fiberler

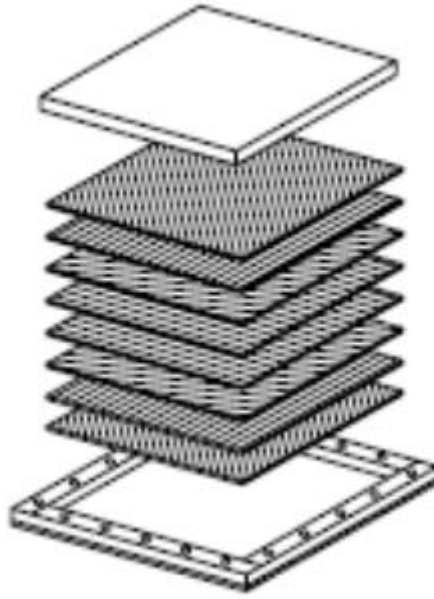
Fiber takviyeli kompozitler uzay ve havacılık sektöründe yüksek rijitlik ve hafifliği nedeniyle yoğun olarak kullanılmaktadır [62].

2.2.2.2. Tabakalı kompozitler

Farklı özelliklere sahip tabakaların üst üste veya yan yana getirilmesiyle meydana gelen tabakalı kompozitler, üretilen tabakaların özelliklerine bağlı olarak aşınma direnci, korozyon dayanımı, yük taşıma kapasitesi gibi uygulama alanlarında kullanılabilir. Tabakalar farklı malzemelerden veya farklı türde takviye elemanlarıyla takviye edilmiş kompozitlerden seçilebilir [62].

Tabakalı kompozitler kullanılan tabaka malzemelerin türlerine göre;

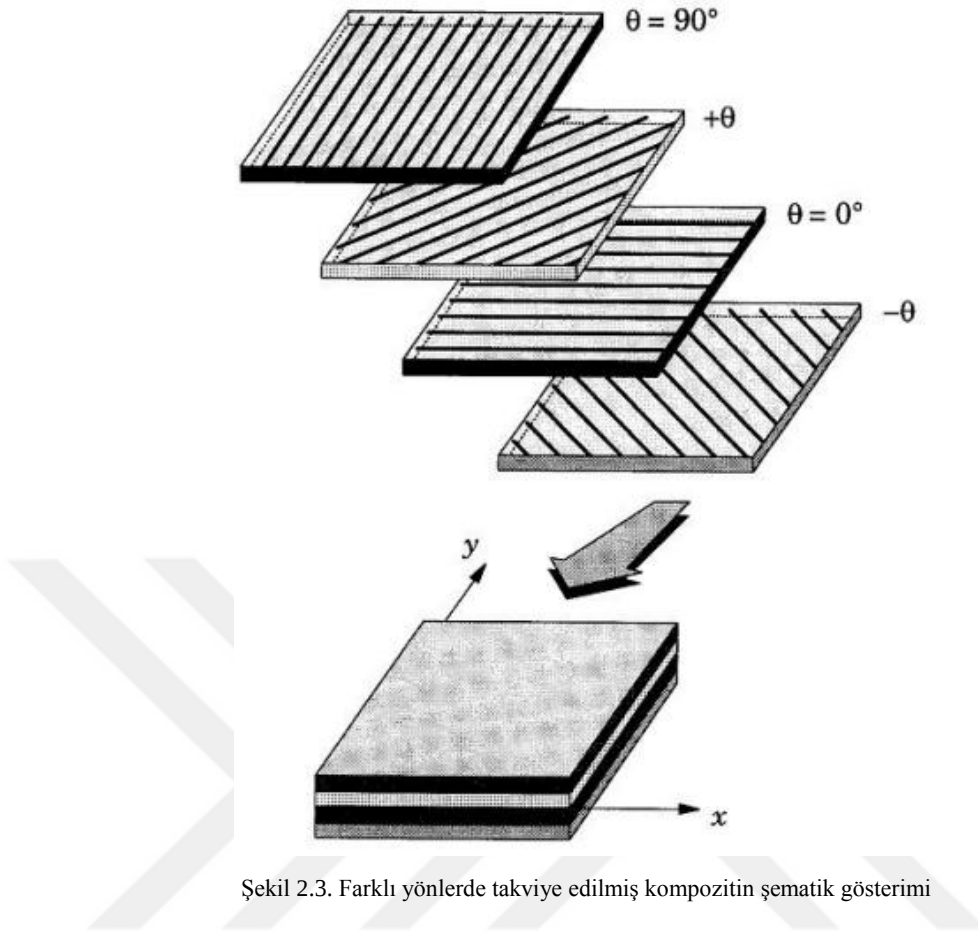
- Farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozitler,
- Tek tür malzemelerden oluşan tabakalı kompozitler olarak iki gruba ayrılabilir [67].



Şekil 2.2. Tabakalı kompozit örneği [66].

Korozyon direncinin zayıf olduğu metallerin üzerine, daha yüksek korozyon dayanımına sahip olan metallerin veya plastiklerin kaplanması ile elde edilen kompozitler tabakalı kompozitlere örnek olarak verilebilir. Bu kompozitlerde kaplama tabakası ile ana malzemenin korozyon direnci artırılır [68].

Tabakalarda bulunan takviye elemanları farklı fiber yönlenmelerine sahip olabilir. Aşağıda farklı takviye yönlenmelerine sahip bir kompozitin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. Farklı yönlerde takviye edilmiş kompozitin şematik gösterimi

2.2.2.3. Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozitler, matris malzemesi içerisinde takviye elemanının partiküller halinde bulunması ile elde edilen kompozitler olarak tanımlanabilir. Matris içerisinde takviye malzemeleri her yönde aynı özelliği gösterdiğinde bu kompozitler izotropiktir [57]. Takviye elemanları küresel, kübik, dikdörtgensel, plaketa şeklinde veya diğer düzenli yada düzensiz şekillerde olabilirler. Partikül takviyeli kompozitlerde metaller, polimerler ve seramikler olmak üzere üç malzeme grubu da matris malzemesi olarak kullanılabilir.

Sermetler seramik-metal kompozitlere örnek olarak verilebilir. Sermetler metal matris içerisine dağıtılmış seramik partiküllerden oluşur. Titanyum karbür veya tungsten karbür içine gömülmüş kobalt yada nikel Sermetlere örnek olarak

verilebilir. Bunlar genellikle sert çelikleri kesici araçlar olarak kullanılırlar. Metal matrisli kompozitlerin çeşitli uygulamaları Tablo 2.1.'de verilmiştir [58].

Tablo 2.1. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları [58].

Metal Matrisli Kompozit Tipi	Endüstriyel Uygulaması	Özel Karakteristiği
Grafit takviyeli Al	Yatak -rulman	- Ucuz - Hafif - Kendi kendini yağlayıcı
- Grafit takviyeli Al - SiC takviyeli Al - Al ₂ O ₃ takviyeli Al	- Otomobil pistonları - Silindir gömlekleri - Piston halkaları - Bağlantı milleri	- Düşük aşınma - Takılmayı engelleme - Soğuk çalışma - Hafiflik - Yakıt koruma - Gelişmiş etkinlik
Grafit takviyeli bakır	Kaymalı elektrik kontakları	- Yüksek iletkenlik - Takılmayı önleme
SiC takviyeli Al	Turbo şarj pervaneleri	Yüksek sıcaklık kullanımı
Cam yada karbon baloncuk takviyeli Al		Ultra hafif malzemeler

Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler, genellikle eş eksenli seramik partiküllerin sonlu hacimlerde metal veya alaşımlarına kaba olarak dağıtılmaları ile üretilirler [59]. Bu üretim yöntemleri temel olarak katı hal ve sıvı hal üretim yöntemleri olarak iki gruba ayrılabilir. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretimleri çoğunlukla toz metalurjisi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin yanında karıştırılmalı döküm yöntemi de sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Takviye edilmemiş matris alaşımları ile kıyaslandığında metal matrisli kompozitler genel olarak yüksek dayanım, yüksek rijitlik, yüksek aşınma dayanımı ve iyi yüksek sıcaklık özellikleri gibi üstün mekanik özelliklere sahiptirler [60]. Bu özelliklerine bağlı olarak bu malzemelerin endüstride kullanım potansiyelleri çok fazladır.

Havacılık sektörü, savunma sanayi, otomotiv sanayi, spor malzemeleri, deniz araçları, gaz türbin motorları, eğlence sektörü, bilgisayar ve termal yönetim uygulamaları bu alanlara örnek verilebilir [60,61].

Seramik partikül takviyesi kompozit malzemelere kullanım alanlarının farklılığından da anlaşılacağı üzere farklı amaçlar doğrultusunda yapılabilir. Üretilen kompozitin nihai özellikleri göz önünde bulundurularak matris malzemesine partiküller farklı oranlarda ilave edilebilir. Seramik partikül takviyeler, aşınma dayanımı ve yapısal uygulamalarda, genellikle hacim oranı %30'un altında olacak şekilde oksitler (Al_2O_3), karbürler (SiC) veya borürler (TiB_2) olabilir. Bununla birlikte elektronik paketleme uygulamalarında %70'ler gibi yüksek hacim oranlarında takviye de kullanılabilir [61].

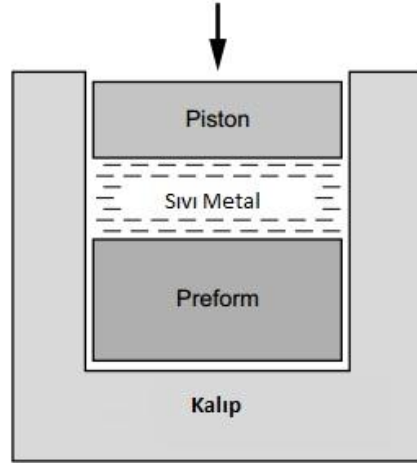
Partikül takviyeli kompozit üretimini etkileyen farklı değişkenler bulunmaktadır. Sıcaklık, partiküllerin ısı işlem süresi, partikül besleme oranı, partikül boyutu-şekli ve partiküllerin hacimdeki dağılım yüzdesi bu değişkenlere örnek olarak verilebilir. Bu değişkenler partiküllerin dağılımını ve bu nedenle de üretilen kompozitin son mekanik özelliklerini etkiler [61]

2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler çok farklı yöntemler ile üretilmektedir. Kompozit malzemelerin başlıca üretim yöntemleri infiltrasyon yöntemi, vorteks yöntemi, in-situ yöntemi, sıkıştırılmalı döküm yöntemi ve toz metalürjisi yöntemi olarak gösterilebilir.

2.3.1. İnfiltrasyon yöntemi

Basıncılı veya basıncsız olarak uygulanabilen infiltrasyon tekniği, farklı yöntemler ile üretilen preformların hazırlanması ile başlar. Sıvı metal infiltrasyon yönteminin en geniş kullanım alanı otomotiv endüstrisi olmakla birlikte termal yönetim uygulamalarında da kullanılmaktadır [45].



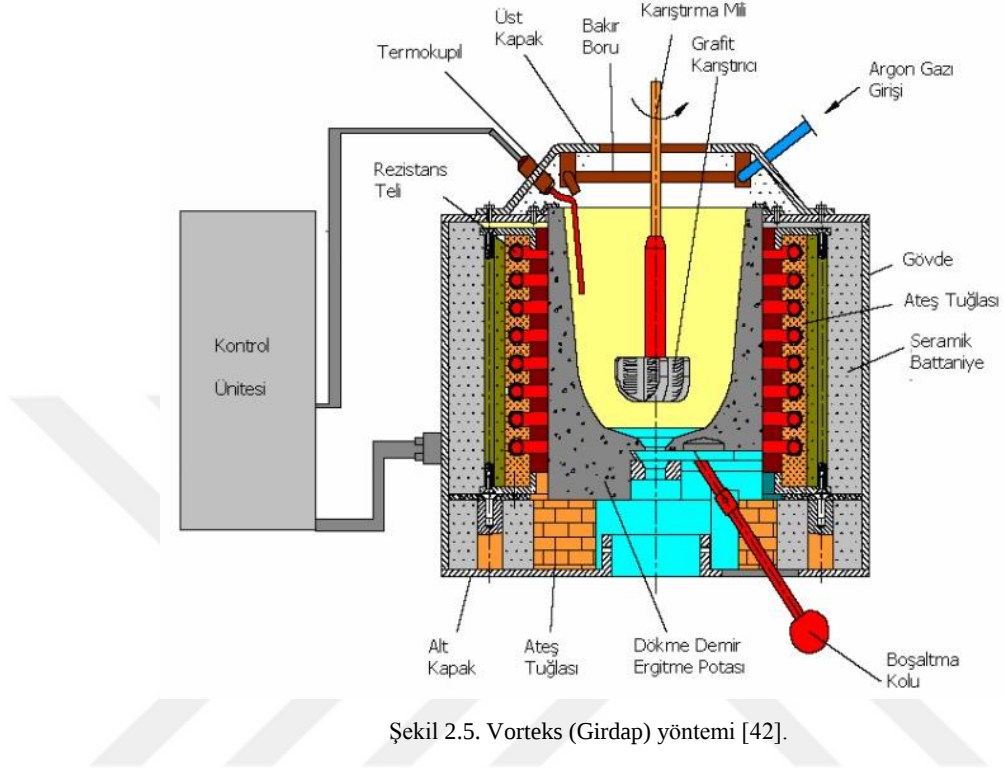
Şekil 2.4. İnfiltrasyon yönteminin şematik gösterimi [50].

Bu yöntemin ilgi görmesinin temel nedeni yüksek hacim oranlarında seramik takviye edilmiş kompozitlerin elde edilebilmesi, kesine yakın şekilde ürün elde edilebilmesi, düşük maliyet etkinliği ve infiltrasyon kolaylığıdır [46,47]. Bununla birlikte yüksek oranlarda seramik takviye içermesi nedeniyle sıvı metal infiltrasyonu yöntemi termomekanik deformasyon veya kırılmaya duyarlı kullanım gerektiren parçalar için uygun değildir [45]. Seramik preformlara sıvı metalin infiltrasyonu homojen takviye şekli, boyutu ve kompozisyonunda kompozit üretimi için kullanılan bir yöntemdir [48].

2.3.2. Vorteks (Girdap) yöntemi

Sıvı faz üretim yöntemlerinin tercih edilmesinin temel sebepleri üretim maliyetinin düşük olması ve son şekline yakın parçaların üretilebilmesidir. Buna karşın sıvı faz üretim yöntemlerinde seramik partiküllerin sıvı metal tarafından ıslatılamaması ve seramik partiküllerin yoğunluklarının düşük olmasından dolayı partiküllerin sıvı metal yüzeyinde yüzmesi gibi önemli sorunlar ile karşılaşilmektedir. Bu sorunları çözmek için kullanılan yöntemlerden biriside vorteks (Girdap) yöntemidir. Bu yöntemde homojen dağılımın sağlanması amacıyla sıvı metal karıştırılarak girdap oluşması sağlanmakta ve seramik partiküller bu girdaba beslenmektedir. Oluşturulan

girdap ile homojen partikül dağılımının sağlandığı sıvı metal kalıba dökülerek son şekline yakın ürün üretilebilmektedir [49].



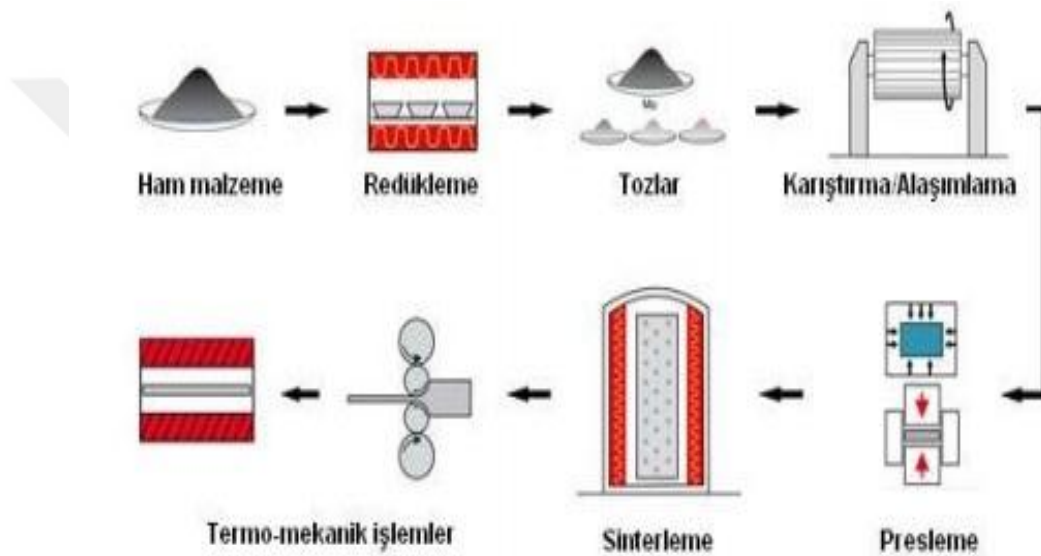
Şekil 2.5. Vorteks (Girdap) yöntemi [42].

2.3.3. In-Situ yöntemi

In-situ yönteminde takviye fazı matris fazı içerisinde kimyasal reaksiyonlar ile oluşturulur. Yöntemin en büyük avantajı diğer sıvı faz üretim yöntemlerinde karşılaşılan ıslatabilirlik probleminin ve matris-takviye fazları arasındaki ara yüzey uyumsuzluğunun oluşmamasıdır. Ayrıca küçük boyutlu ve tek kristalli takviye partiküllerinin elde edilebilmesi, yüksek sıcaklık kararlılığı, iyi partikül dağılımı, düşük yatırım ve üretim maliyeti de yöntemin önemli avantajları olarak görülebilir. Bunun yanında takviye fazının elde edilmesi ile ilgili termodinamik sınırlamalar yöntemin dezavantajı olarak görülebilir [51].

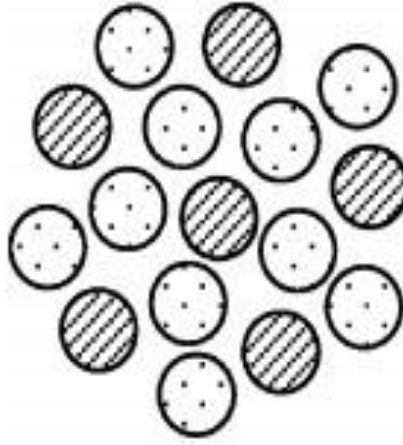
2.3.4. Toz metalurjisi yöntemi

Metal matrisli kompozitler birçok farklı yöntem ile üretilebilmektedir. Temel olarak sıvı ve katı faz üretim yöntemleri olarak iki gruba ayrılabilen bu üretim yöntemlerinden sıvı faz üretim yöntemlerinde partiküllerin homojen şekilde dağıtılamaması ve yüksek sıcaklık nedeniyle ara yüzeyde kimyasal reaksiyon oluşumu gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak bu sorunlar minimize edilebilir [53].

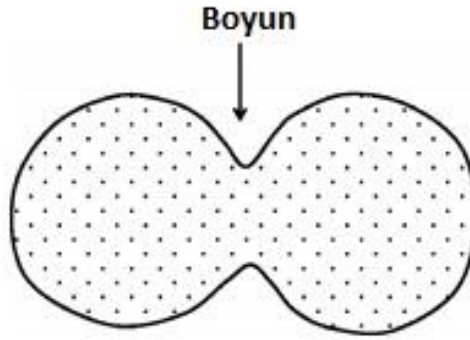


Şekil 2.6. Toz metalurjisi yöntemi genel şeması [52].

Toz metalurjisi yönteminin en yaygın kullanımı süreksiz takviyeli kompozitler üzerinedir. Bu yöntemde önceden hazırlanan tozlar istenilen oranlarda karıştırılır (Şekil 2.7.) ve istenilen şekildeki kalıplarda preslenir. Ardından ergime sıcaklığının altındaki sinterleme sıcaklığında katı faz difüzyonu gerçekleşecek şekilde sinterlenir. Sinterleme sırasında partiküller arasında meydana gelen boyun oluşumu Şekil 2.8.'de görülmektedir. Diğer bir yöntem ise toz karışımlarının sıcak preslerde preslenmesidir. Bu sayede presleme ve sinterleme işlemleri aynı anda gerçekleştirilir. Toz metalurjisi yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.7. Toz karışımı [50].



Şekil 2.8. Toz partikülleri arasındaki boyun oluşumu [50].

Yöntemin başlıca avantajları [54]:

1. Düşük işlem sıcaklığının istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarını kısmen engellemesi.
2. Geleneksel döküm yöntemlerine göre daha kolay olması.
3. Diğer yöntemlerle üretilmeye metal matrisli kompozitlerin bu yöntem ile üretilmesi olarak sayılabilir.

Bu yöntemin avantajlarının yanı sıra bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar kısaca [55]:

1. Takviye elemanı olarak kısa fiberlerin kullanılması durumunda toz karıştırma işlemi sırasında fiberlerin kırılması,
2. Büyük parçalar için çok yüksek basıncın gerekmesi ve bu durumun maliyeti arttırması olarak sayılabilir.



BÖLÜM 3. BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİTLER

3.1. Bakır

Bakır M.Ö. 8000 yılından beri bilinen bir metaldir. İnsanlar için geçmişten beri büyük bir öneme sahip olan bakır tabiatta genellikle bileşikler halinde bulunur. Eski çağlarda insanlar doğada saf olarak buldukları bakırı ev aletleri ve silah yapımında kullanmışlardır. Hatta bir bakır alaşımı olan bronz bir çağa ismini vermiştir. Günümüzde halen yüksek elektriksel ve ısı özelliklerinden dolayı bakır önemli bir metaldir [74].

Elektrik enerjisinin çok önemli olduğu günümüzde bakır metalinin da önemi giderek artmaktadır. Bakır en önemli kullanım alanı olarak elektrik enerjisi üretimi ve dağıtımı gösterilebilir. Elektriğin üretilmesinde, nakledilmesinde ve kullanılmasında en ekonomik iletken bakır metalidir. Evlerimizde kullandığımız çamaşır makinesi, buzdolabı, televizyon gibi tüm elektrikli aletlerde bakır kullanılmaktadır. Kısaca bakırın yaklaşım olarak %80'i elektrik-elektronik sektöründe geri kalan kısmı ise alaşım halinde diğer sektörlerde kullanılmaktadır [75].

3.1.1. Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri

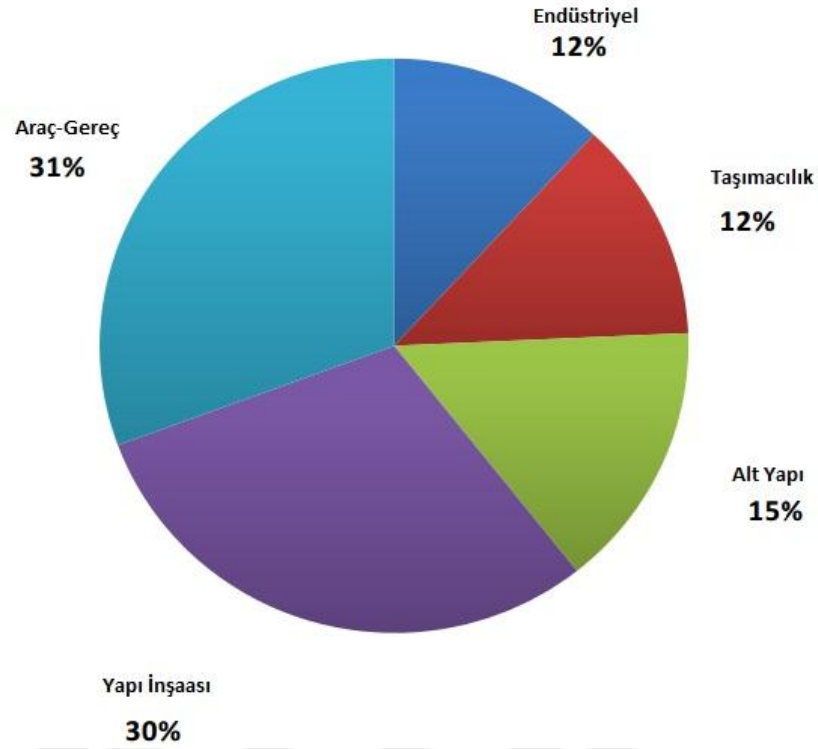
Çağlar boyunca birçok önemli özelliği bakırı daima önemli metaller arasında tutmuştur. Özellikle gümüşten sonra en yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması bakırın en önemli kullanım sebebidir. Bu özelliğinin yanında yüksek ısı iletkenliği, yüksek korozyon direnci, dekoratif rengi, orta seviyedeki mukavemeti ve kolay şekillendirilebilmesi bakırın diğer önemli özellikleri olarak sayılabilir [8]. Tablo 3.1.'de bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.1. Bakıra ait fiziksel ve kimyasal özellikler [8]

Simgesi	Cu
Sınıfı	Geçiş elementi
Grup, periyot, blok	11, 4, d
Rengi	Metalik kahverengi
Kristal Yapısı	Kübik (YMK)
Atom Numarası	29
Atom Ağırlığı	63,546 g/mol
Yoğunluğu	8,9 gr/cm ³
Mohs Sertliği	3,0
Vickers Sertliği	369 MPa
Brinell Sertliği	874 MPa
Ergime Noktası	1083 °C
Kaynama Noktası	2567 °C
Ergime Isısı	43 k.cal
Buharlaştırma Isısı	300,4 kJ/mol
Isı Kapasitesi	24,440 (25 °C)J/(mol.K)
Elektrik İletme Özelliği	%99,95
Elektrik Direnci	16,78 nΩ.m(20 °C’de)
Isıl İletkenlik	401 W/(m.K)
Isıl Genleşme	16,5x10 ⁻⁶ (1/ K) (25 °C’de)

3.1.2. Bakırın kullanım alanları

Günümüzde bakır elektrik, yapı, endüstri, ulaşım, mühimmat ve genel araç-gereçler için sıklıkla kullanılmaktadır. Bakır üzerine yapılan çalışmalar bakır kullanımını gün geçtikçe arttırmaktadır. Şekil 3.1.’de bakırın kullanım alanları ve kullanım oranları gösterilmektedir.

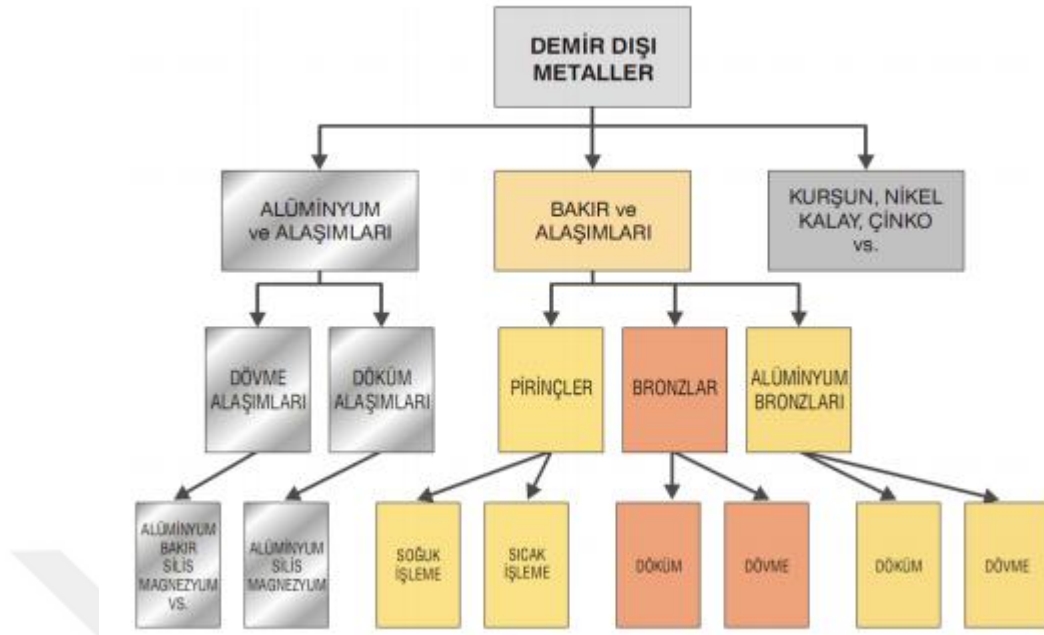


Şekil 3.1. Bakırın kullanım alanları ve oranları [76].

3.1.3. Bakır alaşımları

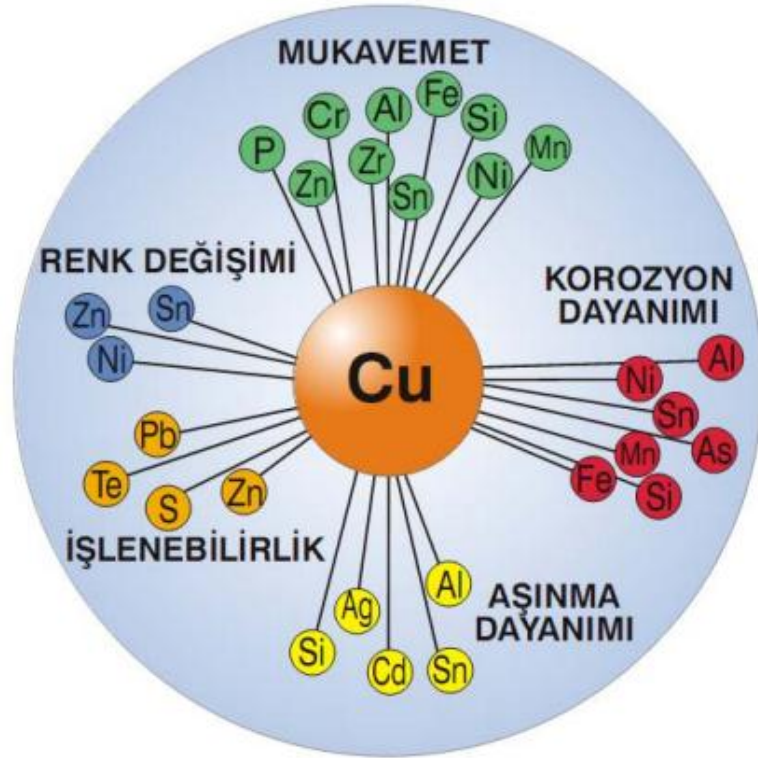
Bakır saf haldeyken yumuşaktır. Bu nedenle dayanıksız olan bakır iletkenlik haricinde kullanılamaz. Bakırı kullanılabilir hale getirmek amacıyla alaşım haline getirilmektedir [77].

Bakır alaşımlarını da içeren demir dışı metal alaşımlarının genel sınıflandırılması Şekil 3.2.'de verilmektedir.



Şekil 3.2. Demir dışı metal alaşımlarının sınıflandırılması [3]

Saf bakıra farklı alaşım elementleri katılarak bakır alaşımının farklı özellikler kazanması sağlanır. Bu amaçla saf bakıra alüminyum, arsenik, berilyum, demir, kurşun, nikel, silisyum, gümüş, kalay ve çinko gibi elementler ilave edilir. Her elementin bakır üzerinde farklı etkisi bulunmaktadır. Şekil 3.3.'de farklı elementlerin bakır üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 3.3. Elementlerin bakır alaşımlarına etkileri [3]

En yaygın olarak kullanılan bakır alaşımları pirinç ve bronzlardır. Bakırın çinko ile değişik oranlarda birleşerek yaptıkları alaşımlara pirinç adı verilir. Ülkemizde pirinçler renklerinden dolayı “sarı” olarak da adlandırılırlar. Yüksek mukavemet ve korozyon dayanımına sahip olan pirinçlerin özellikleri çinko miktarı ile orantılıdır. Endüstriyel olarak kullanılan pirinçler bakır ve çinkonun yanında diğer alaşım elementlerini de içerebilirler. Pirinçlerin en önemli özellikleri atmosferik korozyona dirençli olmaları, sıcak veya soğuk şekillendirilebilmeleri, dövülmeye veya preslenmeye uygun olmaları ve kolay lehimlenebilmeleridir. Pirinçlerin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [8].

- İşlenme kabiliyeti,
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği,
- Tekrar kullanılabilme,
- Kaynaklanabilme,
- Dövülebilirlik,
- Kırılcım çıkarmaz,

- Temin kolaylığı,
- Dekoratif özellik,
- Aşınma dayanımı,
- 200 °C'nin altında özelliklerini koruma,
- Güneş ışını altında rengini koruma,
- Uygun maliyet,
- İyi mukavemet,
- İyi korozyon dayanımı [8]

Bronzlar kalay içeren bakır alaşımlarıdır. Fakat bakırın çinko içermeyen diğer alaşımlarına genel olarak bronz denir. Bronzların çeşitleri alaşıma katılan ana alaşım elementi ile belirlenir. Ana alaşım elementine göre bronzlar kalay, alüminyum ve nikel bronzları olarak üç gruba ayrılırlar [3].

Bakıra ilave edilen alaşım elementlerinin saf bakıra yapacağı katkı sağlayacağı avantajlara göre Tablo 3.2.'deki gibi gruplandırılabilir.

Tablo 3.2. Alaşım elementlerinin bakıra etkisi

Mukavemet Arttırıcılar	Korozyon Dayanımı Arttırıcılar	Aşınma Dayanımı Arttırıcılar	İşlenebilirliği Arttırıcılar
Krom	Nikel	Alüminyum	Tellür
Demir	Kalay	Gümüş	Kurşun
Çinko	Mangan	Silisyum	Kükürt
Nikel	Arsenik	Kadmiyum	Çinko
Alüminyum	Demir	Kalay	
Silisyum	Silisyum	Berilyum	
Fosfor		Kobalt	
Mangan			
Zirkonyum			
Kalay			
Berilyum			
Kobalt			

3.2. Bakır Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları

Metal matrisli kompozitlerde genel olarak sertlikleri, mukavemetleri ve aşınma dayanımları daha yüksek olan seramikler kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde en fazla oksitler, karbürler ve nitrürler olarak üçe ayrılana ileri teknoloji seramikler kullanılır [42]. Genellikle takviye elemanı olarak kullanılan ileri teknoloji seramiklere SiC, Al₂O₃, grafit, TiC ve B₄C örnek verilebilir. Aşağıdaki tabloda (Tablo 3.3.) bazı takviye malzemelerinin genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Seramik takviye elemanlarının genel özellikleri [41]

Takviye Malz.	Yoğunluk (x10 ³ kgm ⁻³)	Isıl Gen. Katsayısı (10 ⁻⁶ C ⁻¹)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modülü (Gpa)	Elektriksel Direnç (ohm-cm)
Al ₂ O ₃	3,98	7,92	2100	221 (1090 °C)	379 (1090 °C)	10 ¹⁴
SiC	3,21	5,40	2750		324 (1090 °C)	10 ⁶
SiO ₂	2,66	<1,08	1710		73	10 ²²
AlN	3,26	4,84	2375	2069 (24 °C)	310 (1090 °C)	10 ¹⁴
B ₄ C	2,52	6,08	2420	2759 (24 °C)	448 (24 °C)	10

SiC: Metal matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye elemanlarından biri silisyum karbürdür. Partikül ve whisker şeklinde takviye elemanı olarak kullanılabilir. SiC'ün en önemli avantajı özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmeleridir [55].

Al₂O₃: İleri teknoloji seramikler içerisinde kullanım oranı en yüksek olan seramik alüminadır. Yüksek mukavemeti, yüksek ergime sıcaklığı ve bununla birlikte düşük elektrik iletkenliği alüminanın refrakterlerde, elektrik yalıtkanlarında, kesici uçlarda, aşınma altında çalışan parçalarda ve kompozit malzemelerde kullanılmasını sağlamıştır. Özellikle kullanımını arttıran özellikleri yüksek aşınma dayanımı, düşük yoğunluğu ve yüksek sıcaklık dayanımıdır. Fakat 1000°C'nin üzerinde aşınma dayanımı azalmaktadır [32].

Grafit: Grafit ve karbon yapılarının temel elementi olan karbonun fiziksel yapısındaki değişime göre adlandırılmaktadır. Kristal yapılarına ve bu yapılardaki kusurlara göre farklı olarak adlandırılmaktadırlar. Örneğin grafit hegzagonal yapıya sahipken, elmas tetragonal yapıya sahiptir. Genellikle karbon olarak adlandırılan yapı kusurlu amorf kristal yapıdadır. 1100 °C proses sıcaklığına, düşük iletkenliğe ve nispeten sert bir yapıya sahiptir. Grafit ise kusursuz kristal yapıdadır. 3000 °C proses sıcaklığına ve nispeten yüksek iletkenliğe sahiptir. Yumuşak ve katı yağlayıcı bir özellik gösterir. Bu özelliği sayesinde sürtünme ve aşınma dayanımı yüksek kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılır [40].

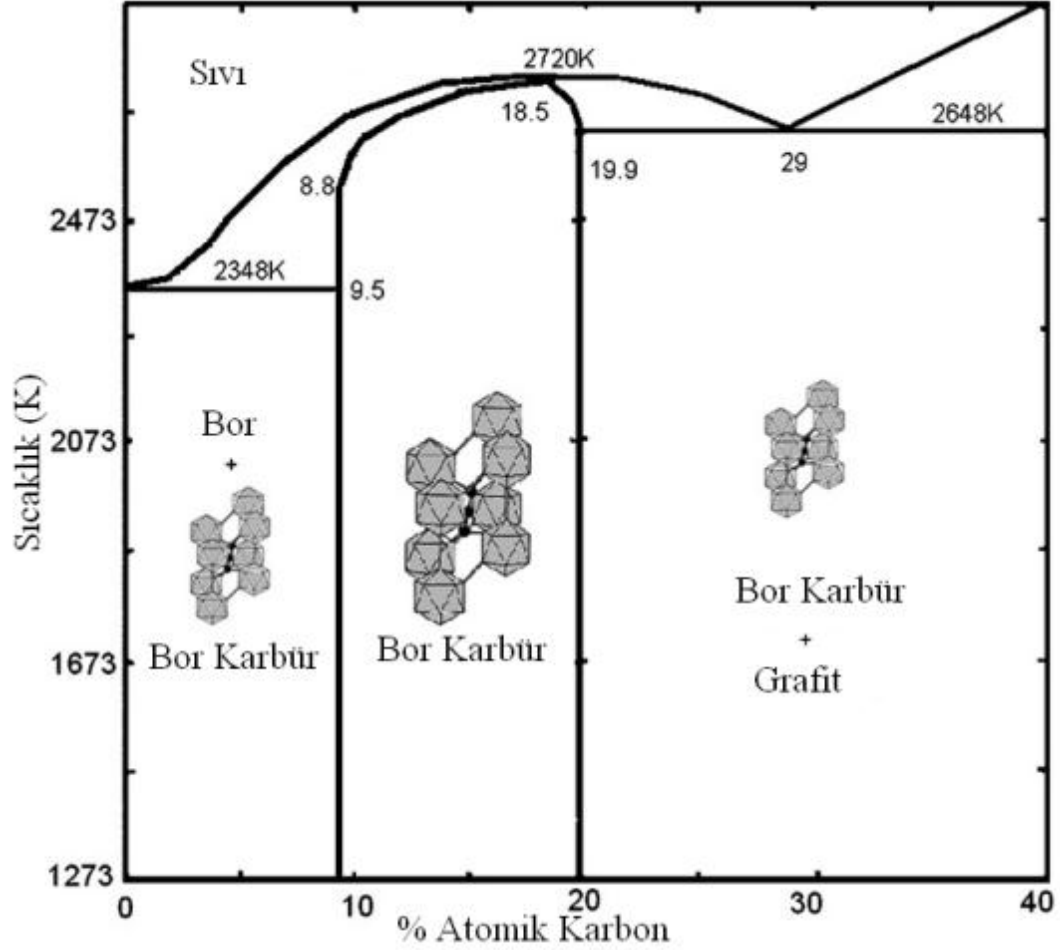
TiC: Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmesi nedeniyle kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. TiC yüksek sıcaklıklarda yüksek modül ve mukavemetini koruyabilmekte bununla birlikte iyi sürünme dayanımı göstermektedir. En büyük dezavantajı ise yüksek yoğunluğudur. Yoğunluğunun yüksek oluşu TiC'ün kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmasının yaygınlaşmasını engellemiştir [62].

3.3. B₄C

Bor karbür elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir [70]. Yüksek sertliği, yüksek ergime sıcaklığı, düşük yoğunluğu, kimyasal maddelere karşı direnç gösterebilmesi ve önemli mekanik özellikleri nedeniyle bor karbür önde gelen ileri teknoloji malzemelerindendir. Bu önemli özellikleri B₄C'ün hafif zırh üretiminde ve yüksek sıcaklık malzemelerinde sıklıkla kullanılmasını sağlamıştır [71].

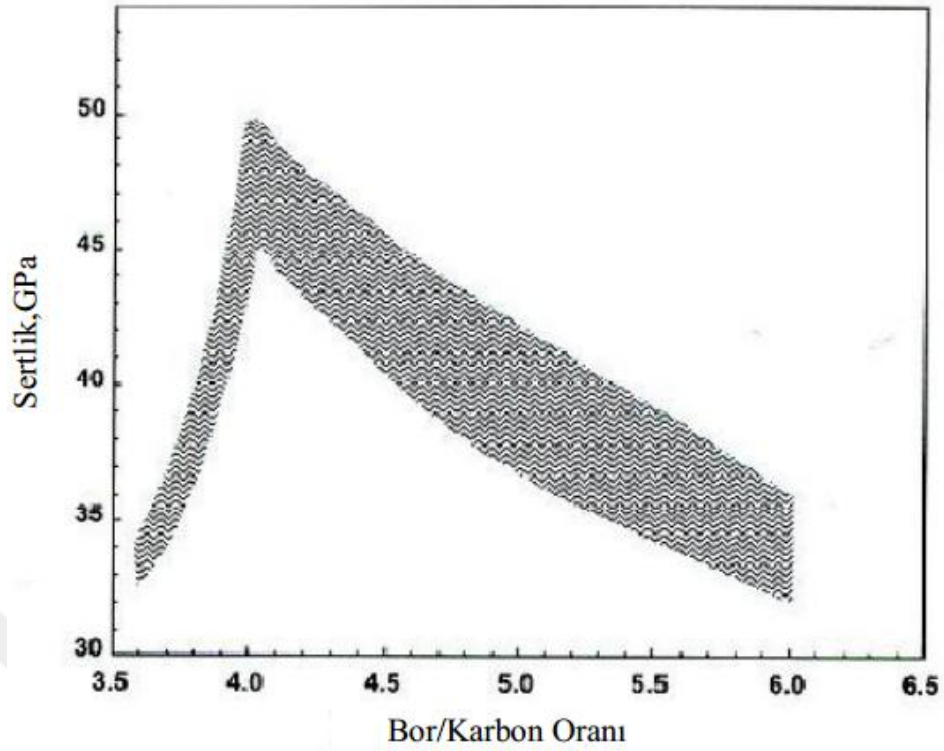
B₄C'ün kimyasal bileşimi çok kararlı bir bileşik olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle asit ve bazlar ile reaksiyon göstermemektedir. Bor karbür dışındaki karbür ve nitrürler erimeden buharlaşırlar fakat bor karbür diğer karbür ve nitrürlerden farklı özellik göstererek 2450 °C'de ergiyerek sıvı hale dönüşür [71].

Bor-karbon sistemindeki tek bileşik bor karbürdür. Şekil 3.4.'de bor-karbon ikili denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.4. Bor-Karbon ikili denge diyagramı [72].

Yüksek verimde bor karbürün elde edilebilmesi için B/C oranına dikkat edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi üretilen bor karbürde maksimum sertliğin elde edilebilmesi için B/C oranının 4 olması gerekmektedir. Bor miktarındaki artış sertliğin düşmesine neden olmaktadır [72].



Şekil 3.5. Sertliğin Bor/Karbon oranına bağlı olarak değişimi [72].

3.3.1. B₄C'ün fiziksel ve mekanik özellikleri

3.3.1.1. Sertlik

Çalışmalarda bor karbürün sertliği 20 ila 78 GPa arasında değişmektedir. B₄C bileşiği için varsayılan Vickers sertliği 32 GPa olarak kabul edilmektedir. Bor karbür elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir. Bor karbür sertliğini yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmektedir. Yapılan çalışmalarda 1300 °C'ye kadar sertlikte azalmanın olmadığı gözlenmiştir [73].

Mohs sertlik ölçeğinde elmas en sert malzeme olarak 10 değerine sahiptir. Bor karbür ise 9,32 sertlik değerine sahiptir [71].

3.3.1.2. Aşınma dayanımı

Bor karbürün yüksek sertliği aşınma direncinin de yüksek olmasını sağlamaktadır. Bor karbürün aşınma dayanımı hakkında fikir sahibi olmak adına diğer sert malzemelerin aşınma dirençleri ile kıyaslandığında elmas 0,613 ile aşınma dayanımı en yüksek malzeme iken B_4C 0,422 ve SiC 0,314 olarak değerlendirilebilir [73].

3.3.1.3. Yoğunluk

Bor karbürün yoğunluk değeri yapıdaki bor ve karbon miktarına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin B_4C 'ün yoğunluğu $2,52 \text{ gr/cm}^3$ iken $B_{13}C_2$ 'ün yoğunluğu $2,488 \text{ gr/cm}^3$ ve $B_{10,5}C$ 'ün yoğunluğu $2,465 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Yapıdaki bor miktarının artması yoğunluğun azalmasına neden olmaktadır. Bu azalma borun atom ağırlığının karbonunkinden düşük olmasından kaynaklanmaktadır [71].

3.3.1.4. Elektriksel direnç

Elektriksel direnç açısından bor karbür, grafit ve silisyum karbürüne benzer özellikler göstermektedir. SiC oda sıcaklığında $0,2-10 \text{ ohm.cm}$ elektriksel dirence sahipken B_4C benzer şekilde $0,2-10 \text{ ohm.cm}$ elektriksel dirence sahiptir. Bor karbürün elektriksel direnci sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda bor karbürün elektriksel direnci düşmektedir. Örneğin oda sıcaklığında 10 ohm.cm elektriksel dirence sahip olan bor karbürün elektriksel direncinin $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ civarındaki sıcaklıklarda $0,2 \text{ ohm.cm}$ değerine kadar düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte bor karbür silisyum karbür ile kıyaslandığında akım geçirme kabiliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer özelliklerinde olduğu gibi elektriksel özelliklerde bor-karbon oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [71].

3.3.1.5. Mekanik özellikler

Yüksek sertlik ve ergime noktasına sahip bor karbürün mekanik özellikleri de çok önemlidir. Bor karbür mukavemet-yoğunluk oranı bakımından incelendiğinde çok önemli bir malzemedir. Yüksek mukavemeti kristal yapıdaki atomların kovalent bağlar ile bağlanmasından kaynaklanmaktadır. Sıcak presleme ve mikro yapı bor karbürün mukavemet değerlerini etkileyen faktörlerdendir. Yapıya bor eklemek mukavemet değerlerinde artışa neden olmaktadır. Sıcak preslenmiş numuneler 300-500 MPa arasında eğme mukavemeti göstermektedir [73].

Yüksek sıcaklıklarda mukavemetinde sertlikte azalma gözlemlense de azot gazı atmosferinde 1500 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda mukavemette herhangi bir azalma görülmemiştir. Diğer taraftan 600-1000 °C sıcaklıkları arasında yapılan eğme testlerinde oksitlenmeye bağlı olarak bor karbürün mukavemetinde azalmalar olduğu görülmektedir. Bu mukavemet kaybının önlenmesi amacıyla yapıya Si ve Al katkıları yapılabilmektedir. Bu ilaveler oksitlenmenin önüne geçerek yüksek sıcaklıklardaki bor karbürün mukavemet kaybını engelleyebilmektedir [73]. Tablo 3.4.'de bor karbürün mekanik ve fiziksel özellikleri özet halinde sunulmuştur.

Tablo 3.4. B4C'ün fiziksel ve mekanik özellikleri [72].

Mol Ağırlığı (g/mol)	55,25	
Renk	Siyah	
Teorik Yoğunluk (kg/m ³ .10 ⁻³)	2,52	
Ergime Sıcaklığı (°C)	2470	
Kristal Yapısı	Rhombohedral	
Latis Parametreleri	a (nm)	0,561
	b (nm)	-
	c (nm)	1,212
Termal Genleşme katsayısı α (10 ⁻⁶ /K)	298-772 K	4,78
	773-1273 K	5,54
	1273-1773 K	6,02
	1773-2273 K	6,53
Termal İletkenlik Katsayısı κ (W/m.K)	298-773 K	28,0
	773-1273 K	16,0
Mikro sertlik (1N) (GPa)	31,5	
Young Modülü, E (Gpa)	427	
Poisson Oranı, ν	0,17-0,21	
Eğme Mukavemeti,σ _{eğme} (MPa)	340	
Basma Mukavemeti, σ _{basma} (MPa)	1660	
Çekme Mukavemeti, σ _{çekme} (MPa)	73	
Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	2,9-3,7	
Elektriksel Direnç ρx10 ⁸ (Ω.m)	~1000	

3.3.2. Bor karbürün kullanım alanları

Bor karbür sahip olduğu üstün fiziksel ve mekanik özelliklere bağlı olarak çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Aşağıda farklı başlıklar altında bu kullanım alanlarına çeşitli örnekler verilmiştir.

3.3.2.1. Aşınmaya dayanıklılık amaçlı kullanımı

Bor karbür yüksek sertliği sahip bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı aşındırıcı olarak kullanılabilir. Bunun yanında aşınmaya dayanıklı olması istenen makine parçalarının üretiminde de kullanılmaktadır. Kumlama ve su-jeti ile kesmede kullanılan nodullar bu kullanıma örnek verilebilir [73].

3.3.2.2. Zırh malzemesi olarak kullanımı

Bor karbürün yüksek sertliği, yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu zırh malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Bor karbür kullanılarak üretilen zırhların %20 daha hafif olması beklenmektedir. Bu durum bu zırhların kullanıldığı araçların daha hızlı hareket edebilmesini sağlamakta ve manevra kabiliyetlerini arttırmaktadır [71].

3.3.2.3. Nükleer reaktörlerde kullanımı

Bor karbür nükleer reaktörlerde radyasyondan korunma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bor karbürün nükleer amaca yönelik kullanımın sebebi yüksek nötron emme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bor karbüre bu yeteneği veren yapısında bulunan bor elementidir. Bu nedenle nükleer amaçla kullanılan bor karbürlerin yapısında daha yüksek miktarda bor bulunması istenmektedir. Bor karbürün nükleer santrallerdeki bir başka kullanımı da yakıt yükleme çubuğu olarak kullanımıdır [71].

3.3.2.4. Refrakter malzeme olarak kullanımı

Bor karbür magnezyum-karbon refrakterinde antioksidan olarak kullanılır [73].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bakır elektriksel iletkenliğin yüksek olmasının istendiği durumlarda en yaygın olarak kullanılan metaldir. Bazen endüstriyel uygulamalarda sadece yüksek elektriksel iletkenlik yeterli olmamaktadır. Elektrik iletkenliğinin yanında yüksek mekanik özellikler, hatta bu özelliklerin yüksek sıcaklıklarda dahi korunabilmesi gibi ihtiyaçlar doğabilmektedir. Yüksek mekanik özellikler bakırın alaşımlanması ile elde edilebilmesine rağmen bu alaşımlama işlemi elektriksel iletkenlikten feragat edilmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte alaşımlama ile elde edilen yüksek mekanik özellikler yüksek sıcaklıklarda korunamamaktadır. Yüksek mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmek amacıyla partikül takviyeli kompozitler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yüksek mekanik özelliklere ve yüksek elektrik iletkenliğine sahip partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi hedeflenmiştir. Bu amaçla takviye elemanı olarak B_4C partikülleri, matris malzemesi olarak ise bakır tozları kullanılmıştır. Kompozit malzemenin üretimi toz metalurjisi yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada takviye iki farklı partikül boyutuna sahip ($7\ \mu m$ ve $60\ \mu m$) B_4C tozları, matris malzemesi olarak ise $63\ \mu m$ 'den küçük boyuta sahip bakır tozları kullanılmıştır. B_4C tozları ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında bakır tozuna katılmıştır. Hazırlanan toz karışımları tek eksenli preste 250 bar basınçta preslenerek ve $750\ ^\circ C$ sıcaklıkta 2 saat süre ile sinterlenmiştir.

Çalışmada üretilen B_4C -Cu kompozitlerin mekanik, mikroyapı, elektriksel özellikleri ve aşınma davranışları belirlenmiş ve bu özelliklere takviye elemanının partikül boyutunun ve takviye elemanı oranının etkisi incelenmiştir. Bu inceleme sayesinde

en uygun sertlik-elektriksel iletkenlik değerlerinin sağlandığı takviye boyutu ve oranı belirlenmiştir.

4.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çalışmada matris malzemesi olarak 63 μm 'den küçük (SENTESBİR, %99,9 safiyette) partikül boyutuna sahip bakır tozları, takviye elemanı olarak ise 60 μm ve 7 μm partikül boyutuna sahip B_4C tozları kullanılmıştır. Sinterleme sırasında bakırın oksitlenmesini önlemek amacıyla numuneler grafit tozuna gömülmüştür. Tozların karıştırılması sırasında homojen karışım elde edilebilmesi için toz karışımına polivinil alkol (PVA) ilave edilmiştir.

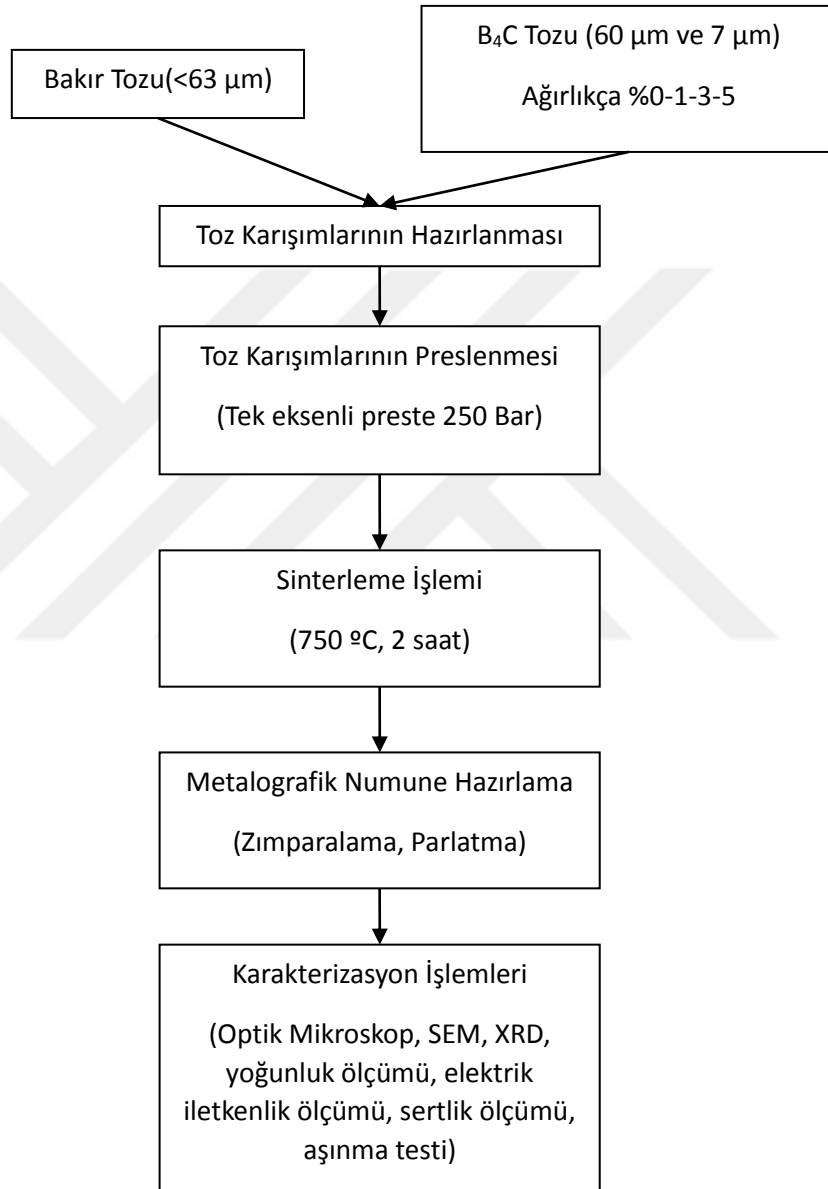
4.3. Çalışmada Kullanılan Cihazlar

Deneysel çalışmalarda şu cihazlar kullanılmıştır:

- a) Toz karışımlarının kompaktlanması, 30 tonluk hidrolik pres
- b) Kompaktların sinterlenmesi, Magma Therm fırın
- c) Yoğunluk ölçümleri, Shimadzu marka hassas terazi ve yoğunluk ölçüm kiti
- d) Metalografik numune hazırlama, Metkon marka otomatik zımparalama ve parlatma cihazı
- e) Optik mikro yapıların elde edilmesi, Zeiss AX10 marka optik mikroskop
- f) SEM-EDS çalışmaları: Jeol JSM 6060-LV marka EDS destekli SEM cihazı
- g) XRD analizlerinde: Rikagu X-Ray Diffractometer cihazı
- h) Sertlik ölçümü: Digirock-RBOV sertlik ölçüm cihazı
- i) Elektriksel iletkenlik ölçümleri, four point probe tipi iletkenlik ölçüm cihazı
- j) Aşınma testleri, ileri-geri hareket yapan aşınma test cihazı
- k) Aşınma iz derinliklerinin belirlenmesi, SurfTest SJ 400 marka yüzey profilometresi

4.4. Deneyisel Çalışmada İzlenen Yol

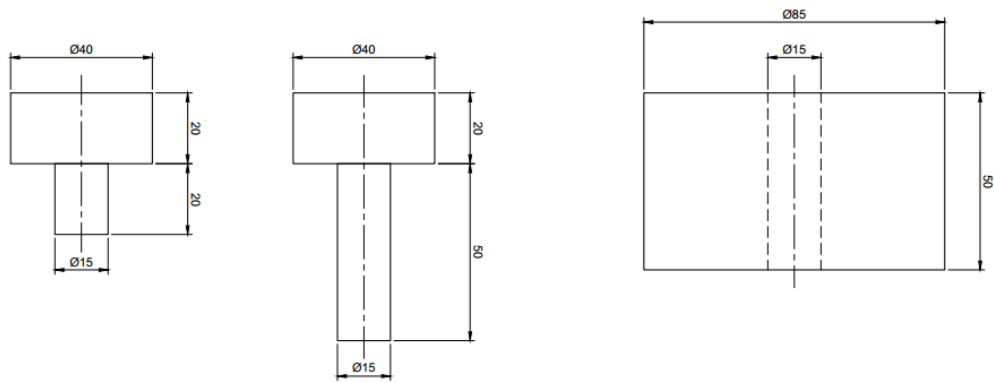
Genel anlamda deneyisel çalışmalarda izlenen yol aşağıdaki gibidir. Şekil 4.1.'de deneyisel çalışmanın şematik olarak gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Deneyisel çalışmada izlenen yol.

4.5. Numunelerin Hazırlanması

Deneysel çalışmaya ilk olarak toz karışımlarının hazırlanması ile başlanmıştır. İki farklı partikül boyutuna (60 μm ve 7 μm) sahip B₄C tozları, ortalama 63 μm altı tane boyutuna sahip saf bakır tozları ile aşağıdaki tabloda (Tablo 4.1.) belirtilen oranlarda karıştırılarak 7 farklı toz karışımı elde edilmiştir. Hazırlanan toz karışımları tek eksenli preste 250 bar basınç altında preslenerek kompaktlar üretilmiştir. Tozların kompaktlanması işleminde Şekil 4.2.'deki kalıp ve zımbalar kullanılmıştır. Üretilen kompaktlar 750 °C sıcaklıkta 2 saat sinterlenerek numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler metalografik olarak hazırlanıp karakterizasyon işlemlerine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.2. Kompaktlama işleminde kullanılan kalıp ve zımbalar.

Tablo 4.1. B₄C-Cu karışımlarının ağırlıkça yüzdeleri ve numune kodları

60 μm B ₄ C toz ilaveli			7 μm B ₄ C toz ilaveli		
Kod	Cu	B ₄ C	Kod	Cu	B ₄ C
SB	100	0	SB	100	0
K1	99	1	İ1	99	1
K3	97	3	İ3	97	3
K5	95	5	İ5	95	5

Hazırlanan numunelerin karakterizasyonunda aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

- Optik inceleme,

- SEM incelemesi,
- XRD analizi,
- Yoğunluk ölçümü,
- Elektriksel iletkenlik ölçümü,
- Sertlik ölçümü,
- Aşınma dayanımı ölçümü.

4.6. Numunelerin karakterizasyonu

4.6.1. Optik inceleme

Hazırlanan numuneler sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemlerine tabii tutulmuştur. Metalurjik olarak hazır hale getirilen numuneler optik mikroskop altında incelenmiştir.

4.6.2. SEM incelemeleri

Hazırlanan numunelerin detaylı incelemelerinin yapılması amacıyla SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

4.6.3. XRD analizi

Hazırlanan numunelerin sinterleme işlemi sonrasında yapılarında farklı bir fazın oluşup oluşmadığı, oksitlenmenin veya Cu matris ile B_4C arasında herhangi bir ara fazın meydana gelip gelmediğini belirlemek amacıyla XRD analizleri yapılmıştır.

4.6.4. Yoğunluk ölçümü

Bu çalışmada hazırlanan numunelerin yoğunlukları Archimed prensibine göre belirlenmiştir.

4.6.5. Sertlik ölçümü

Çalışmada hazırlanan numunelerin sertlik ölçümleri Brinell metoduna göre yapılmıştır.

4.6.6. Elektriksel iletkenlik ölçümü

Hazırlanan numunelerin elektriksel iletkenlikleri Four Point Probe cihazıyla ohm kanuna göre ölçülmüş ve saf bakırın elektrik iletkenliği ile kıyaslayarak değerlendirilmiştir.

4.6.7. Aşınma dayanımının ölçümü

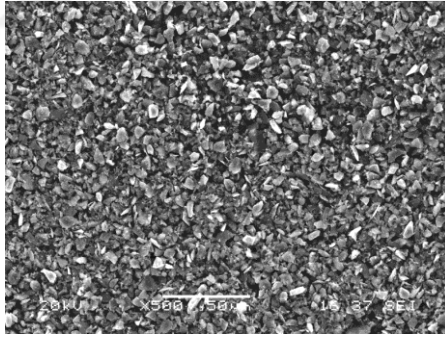
Tüm malzemelerin aşınma davranışları karşıt hareketli (ileri-geri) aşınma test cihazında incelenmiştir. İleri-geri aşınma testi, levha üzerinde bilye temas geometrisine sahip, ASTM G133 standardında tanımlanan ileri-geri aşınma test cihazında normal atmosferik şartlarda (25 ± 5 °C, % 40 ± 5 nem) gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak 10 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılmıştır. Bu deneyler, 1 N yük altında $1,7 \text{ cm s}^{-1}$ kayma hızıyla 50 m kayma mesafesinde uygulanmıştır. Deney sonrası bilye yüzeyi üzerindeki aşınma izleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında malzeme yüzeyleri üzerinde gelişen aşınma izleri yüzey profilometresi ile analiz edilmiştir ve yüzey profilleri aracılığıyla aşınma oranları hesaplanmıştır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR

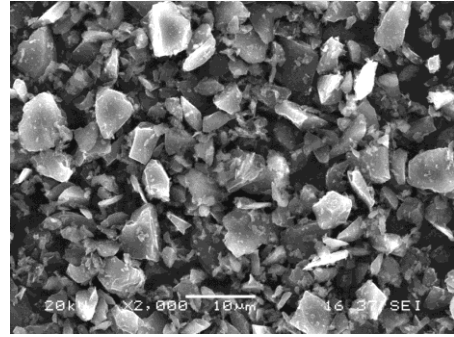
5.1. Toz Karakterizasyonu

5.1.1. SEM mikrografileri

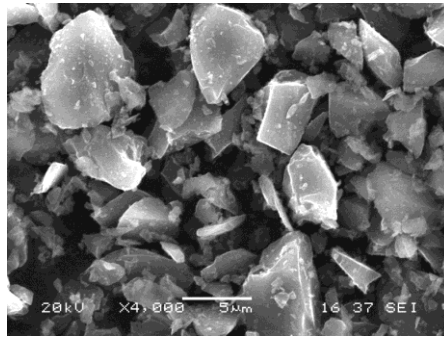
Deneysel çalışmalarda takviye elemanı olarak kullanılan ince ($7\ \mu\text{m}$) ve kalın ($60\ \mu\text{m}$) B_4C tozları ve matris malzemesi olarak kullanılan bakır tozlarının SEM görüntüleri Şekil 5.1.-5.6.'da verilmektedir. Kullanılan tozların partikül boyutları da ölçülmüş ve Tablo 5.1.-5.3.'de ölçülen değerler ve bu değerlerin ortalamaları verilmiştir.



(a)

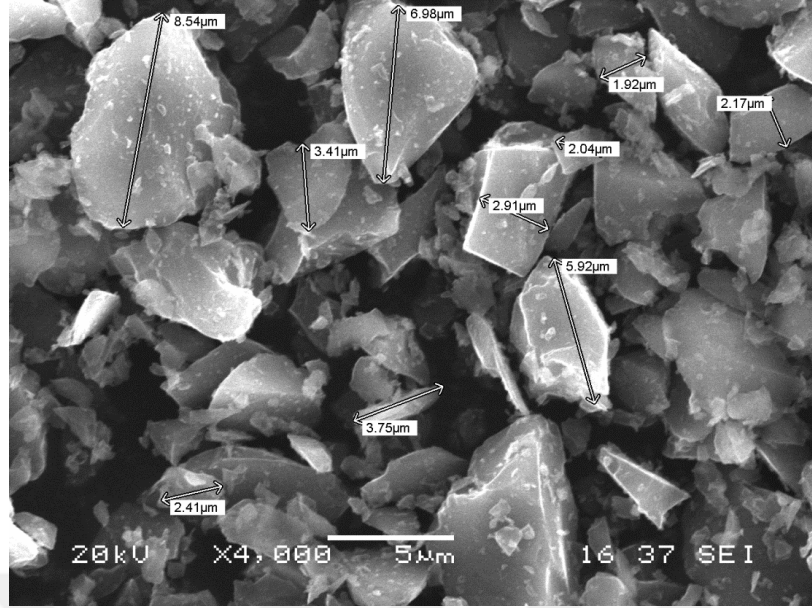


(b)



(c)

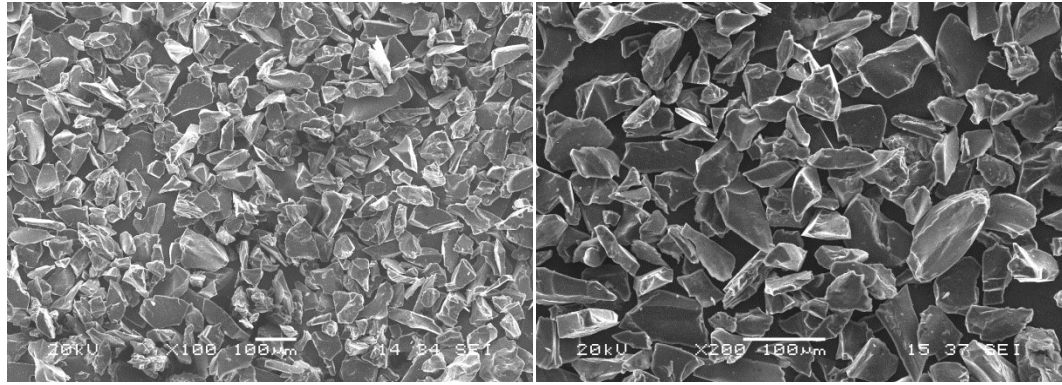
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan ince (7 mikron) B_4C tozlarına ait SEM görüntüleri (a) x500, (b) x2000, (c) x4000 büyütme.



Şekil 5.2. İnce (7 mikron) bor karbür tozlarına ait partikül dağılımı.

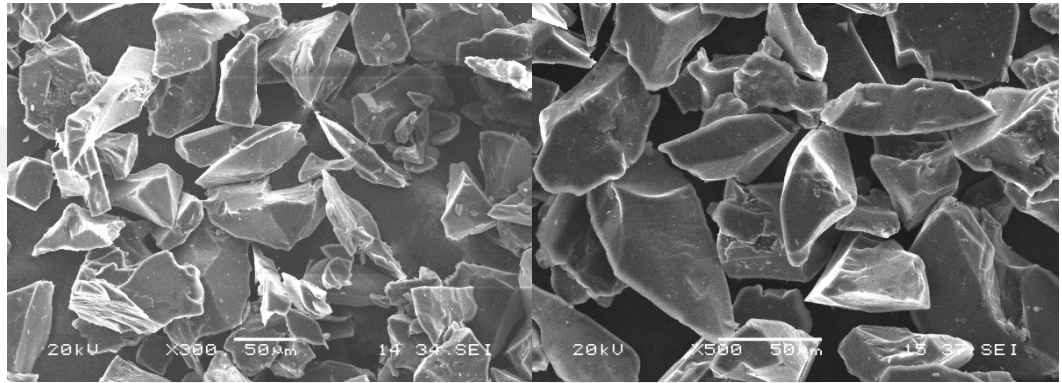
Tablo 5.1. İnce (7 mikron) bor karbür tozlarının partikül boyutu (μm) dağılımı.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
8,54	6,98	3,41	2,41	3,75	2,91	5,92	2,04	1,92	2,17	4,01



(a)

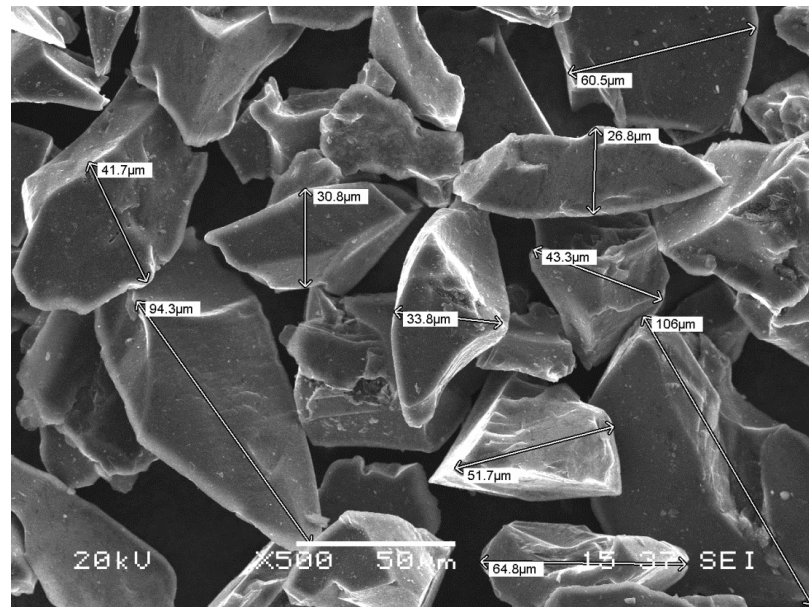
(b)



(c)

(d)

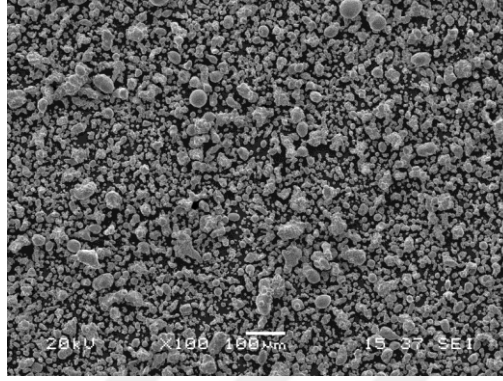
Şekil 5.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaba (60 mikron) bor karbür tozlarının SEM görüntüleri (a) x100, (b) x200, (c) x300 ve (d) x500 büyütme.



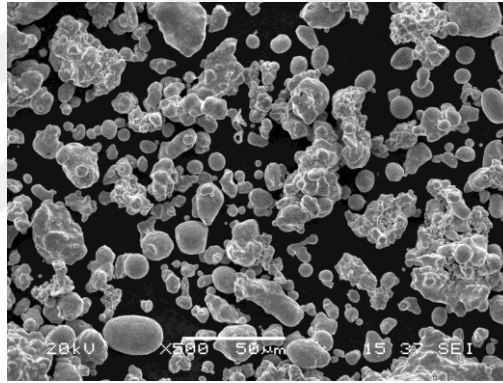
Şekil 5.4. Kaba (60 mikron) bor karbür tozlarına ait partikül dağılımı.

Tablo 5.2. Kaba (60 mikron) bor karbür tozlarının partikül boyutu (μm) dağılımı.

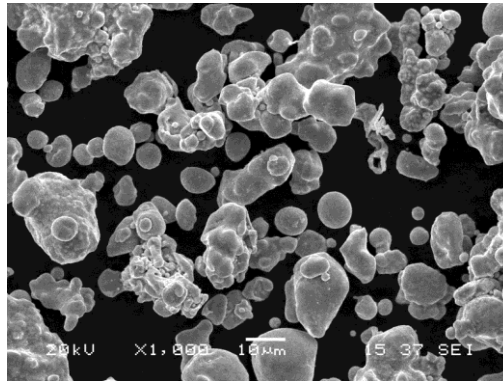
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
41,7	94,3	30,8	33,8	51,7	64,8	106	43,3	26,8	60,5	55,37



(a)

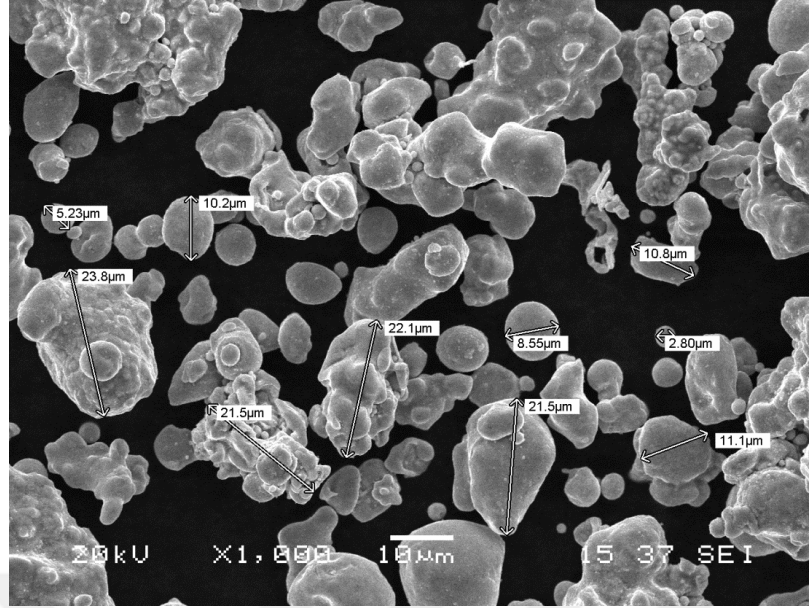


(b)



(c)

Şekil 5.5. Deneysel çalışmada kullanılan bakır tozlarına ait SEM görüntüleri (a) x100, (b) x500, (c) x1000 büyütme.



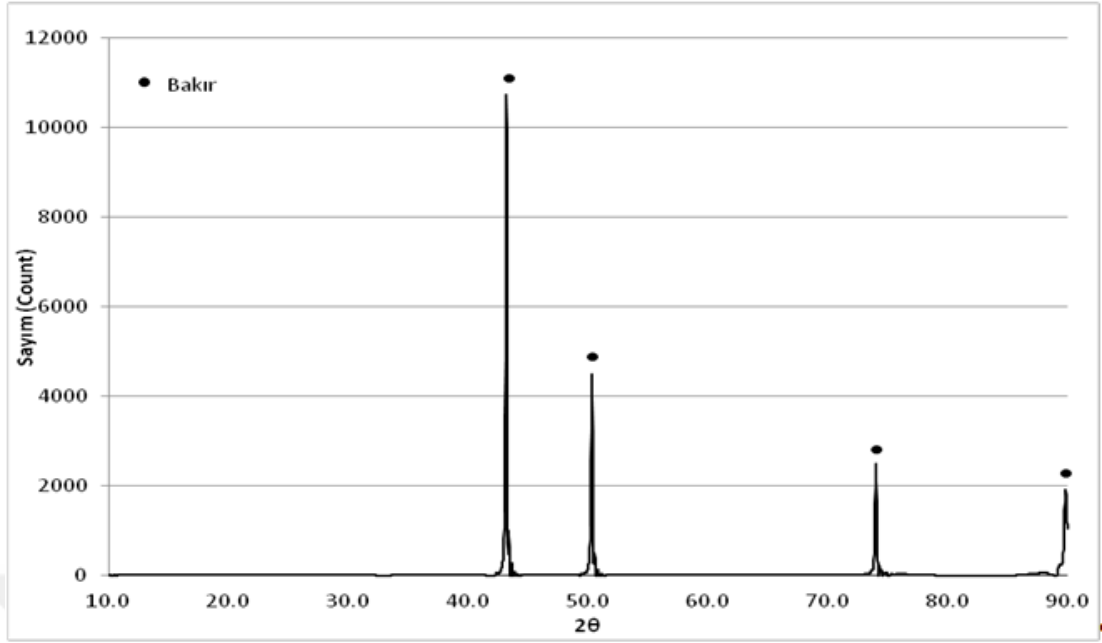
Şekil 5.6. Bakır tozlarına ait partikül dağılımı.

Tablo 5.3. Bakır tozlarının partikül boyutu (μm) dağılımı.

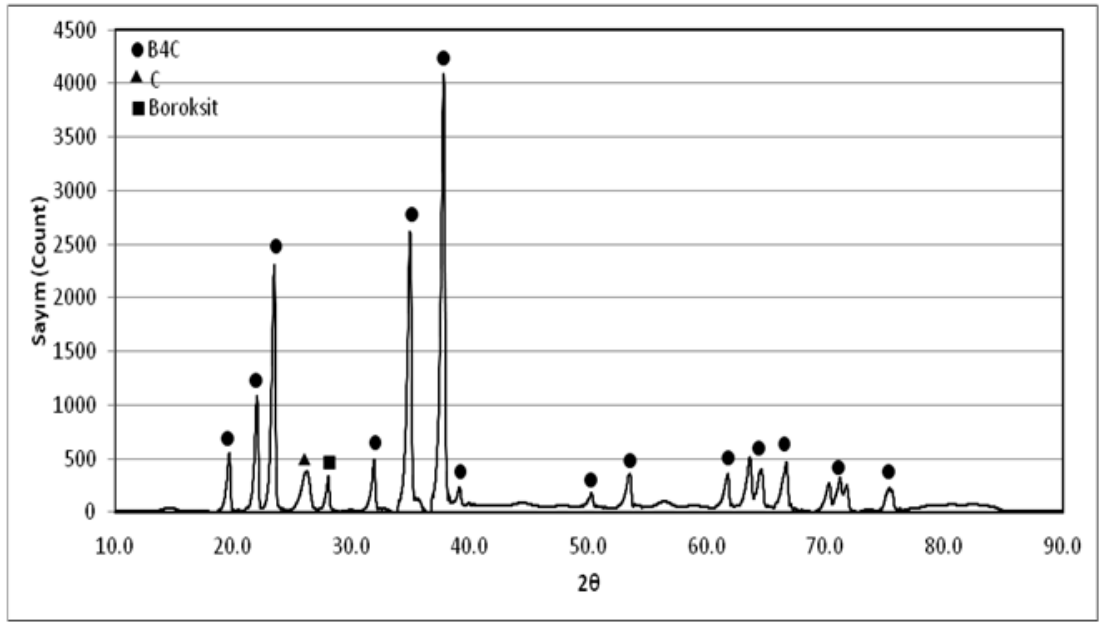
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
5,23	10,2	23,8	21,5	22,7	8,55	21,5	2,8	10,8	11,2	13,79

5.1.2. XRD analizleri

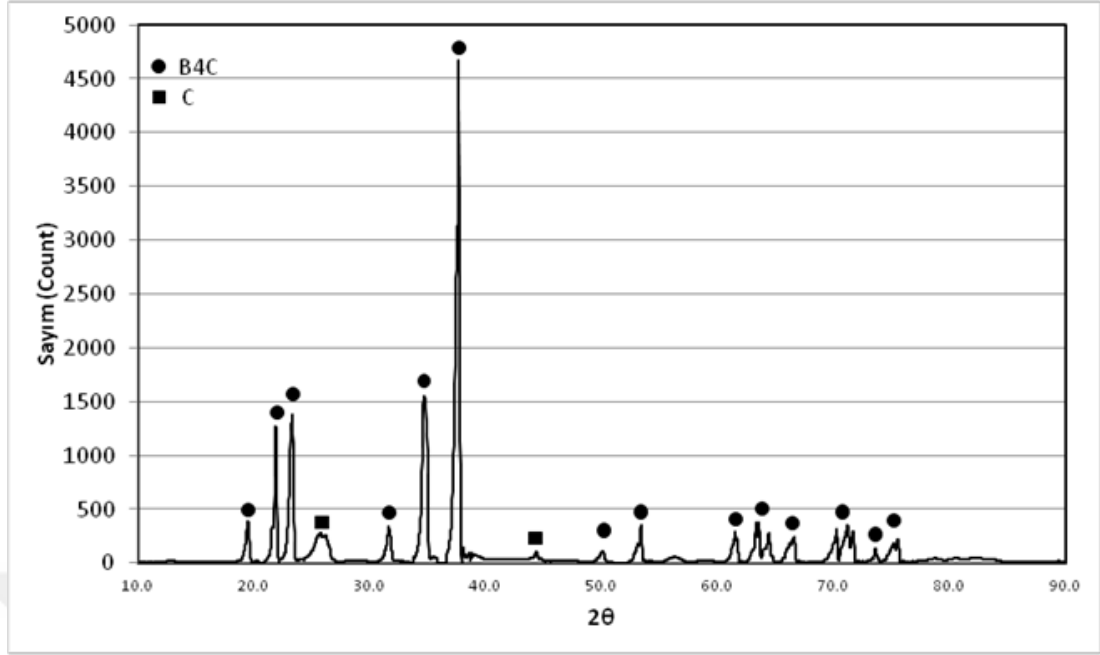
Kullanılan tozların bileşenlerinin belirlenmesi amacıyla XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmektedir (Şekil 5.7.- Şekil 5.9.).



Şekil 5.7. Saf bakır tozunun XRD spektrumu.



Şekil 5.8. İnce (7 mikron) boyutlu B₄C partiküllerinin XRD spektrumu.

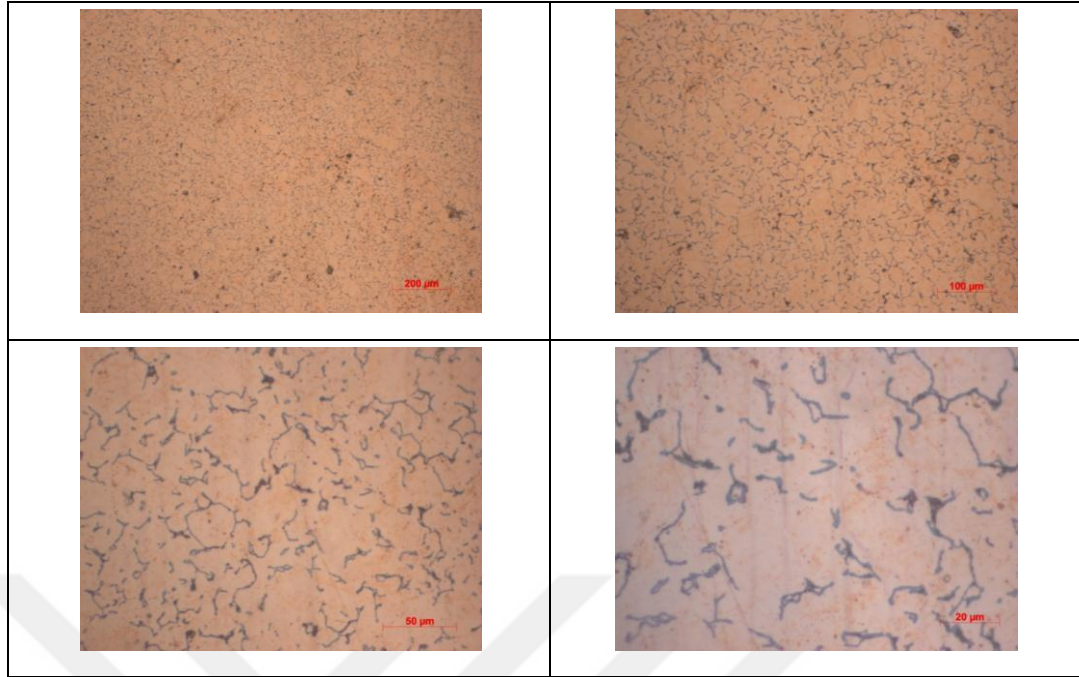


Şekil 5.9. Kaba (60 mikron) boyutlu B₄C partiküllerinin XRD spektrumu.

5.2. Sinterlenen Numunelerin Karakterizasyonu

5.2.1. Optik mikroskop görüntüleri

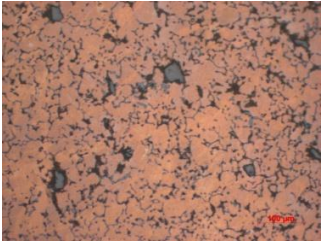
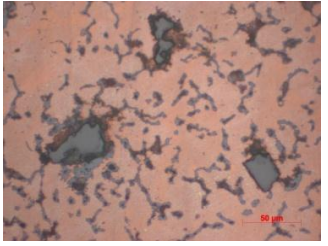
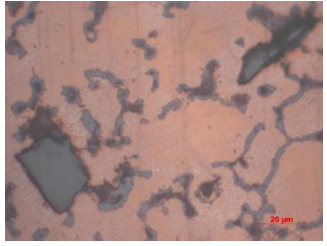
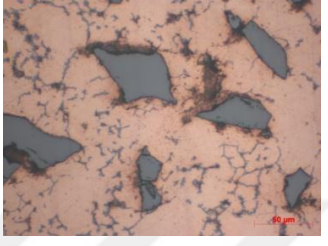
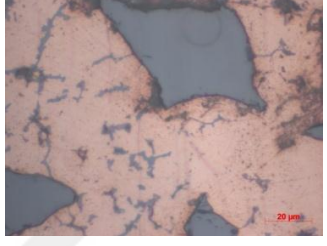
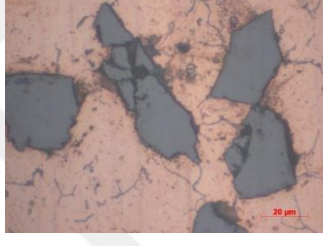
Sinterlenen numunelere ait mikro yapı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 5.10. Saf bakırın optik mikroskop görüntüleri

% B ₄ C	Optik Mikroskop Görüntüleri		
1			
3			
5			

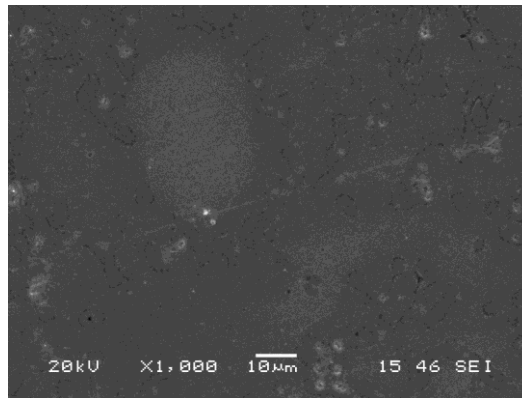
Şekil 5.11. İnce (7 µm) bor karbür tozları kullanılarak hazırlanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri

% B ₄ C	Optik Mikroskop Görüntüleri		
1			
3			
5			

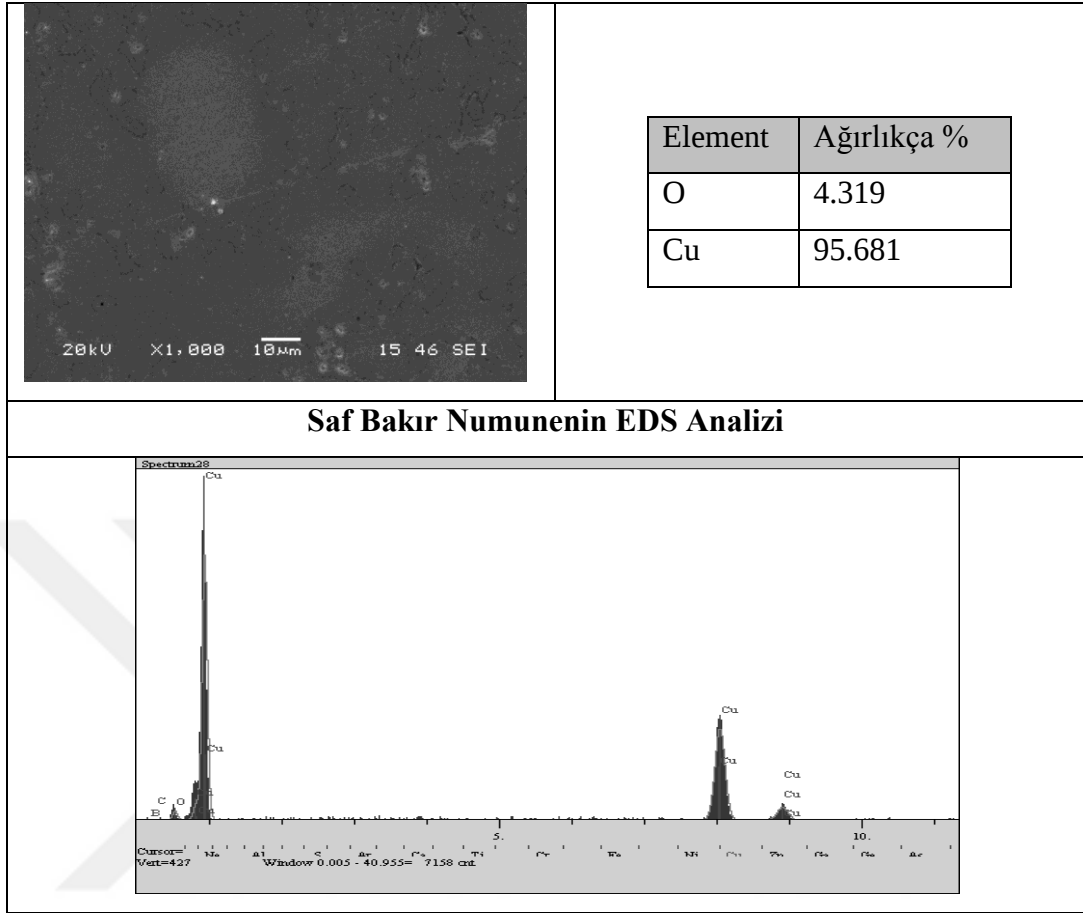
Şekil 5.12. Kaba (60 μm) bor karbür tozları kullanılarak hazırlanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri

5.2.2. SEM görüntüleri ve EDS analizleri

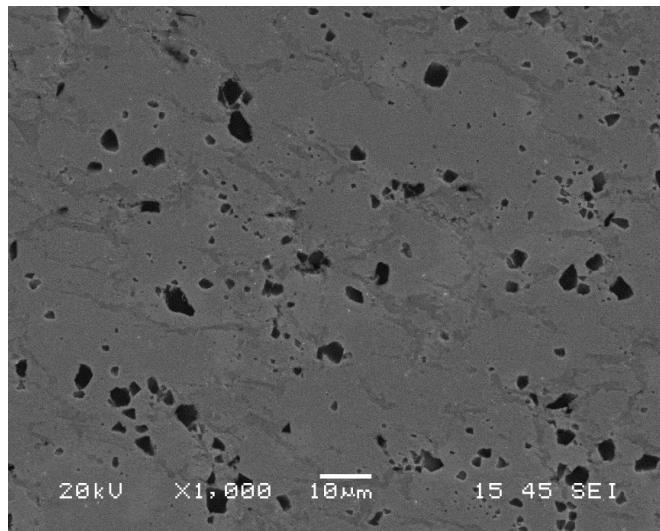
Numunelere yapılan SEM görüntülemeleri ve EDS analizleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Tüm numuneler için SEM görüntüleri alınmış ve noktasal EDS analizi yapılmıştır.



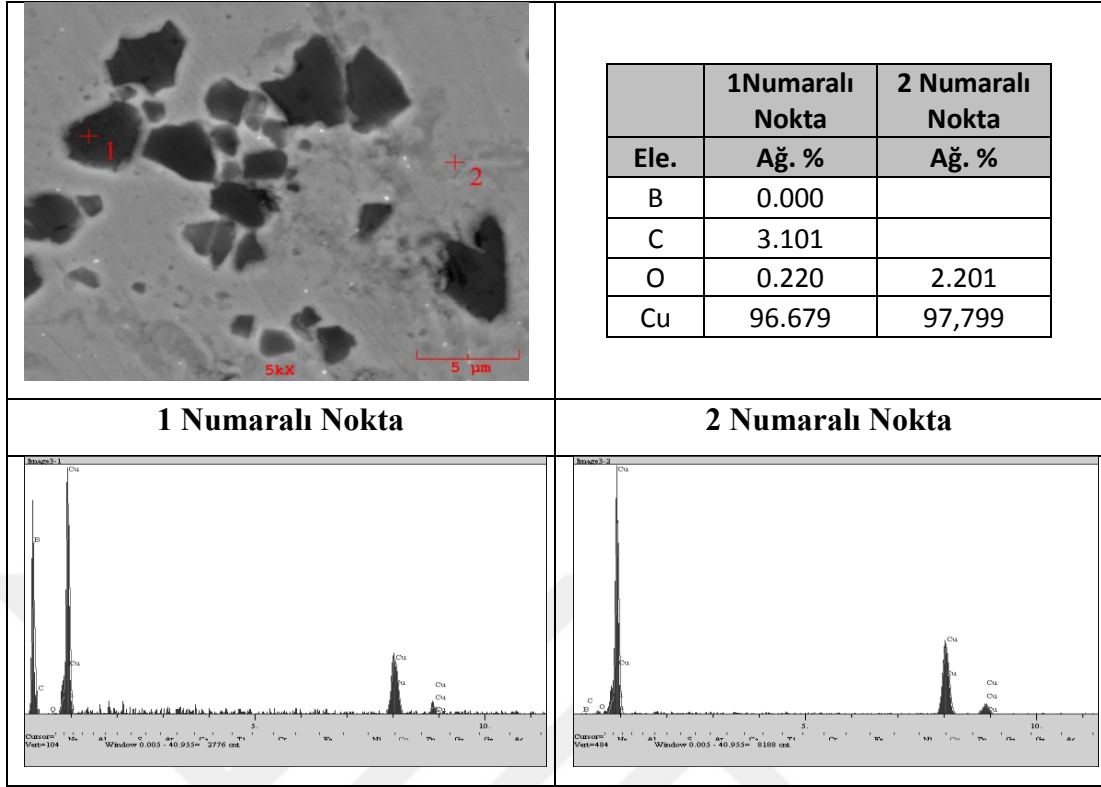
Şekil 5.13. Saf bakırın sinterleme sonrası SEM görüntüsü



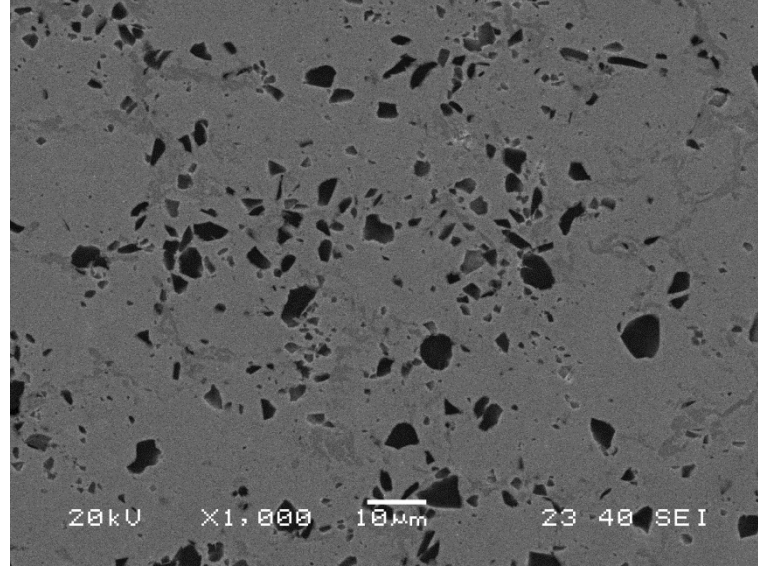
Şekil 5.14. Saf bakır numunenin EDS analizi



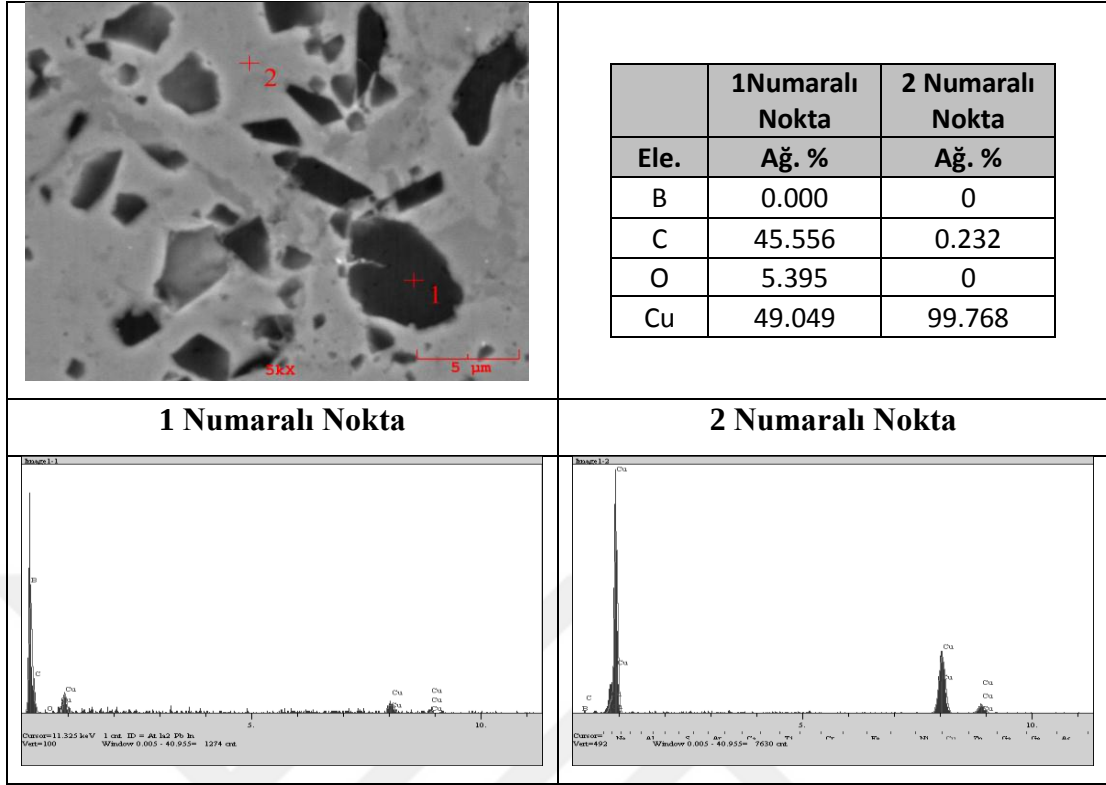
Şekil 5.15. 7 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %1 takviyeli numunenin SEM görüntüsü



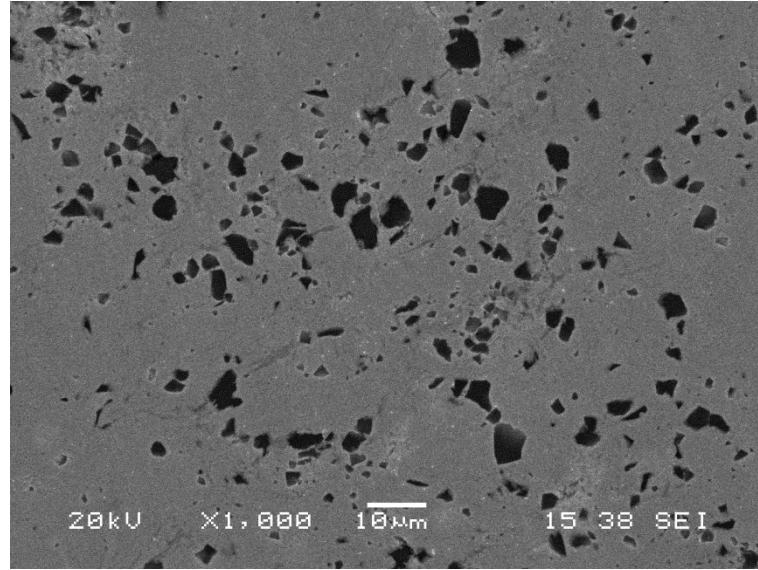
Şekil 5.16. Ağırlıkça %1 7 mikron boyutunda bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi



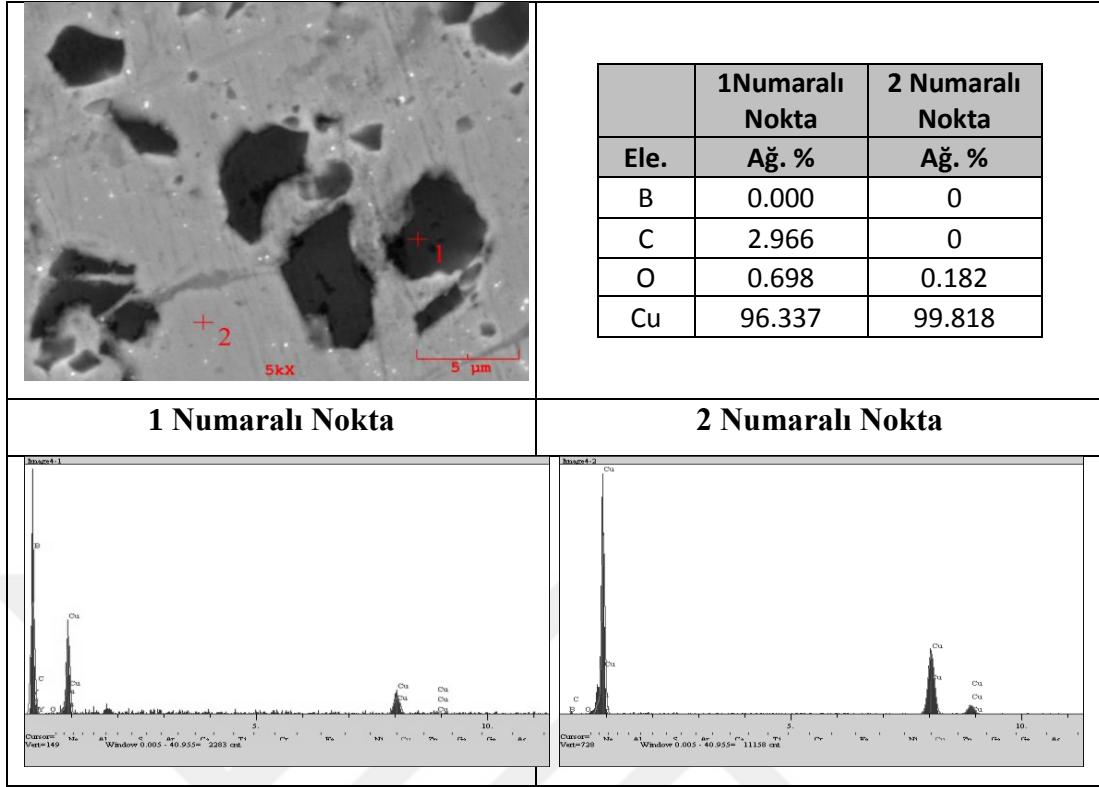
Şekil 5.17. 7 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %3 takviyeli numunenin SEM görüntüsü



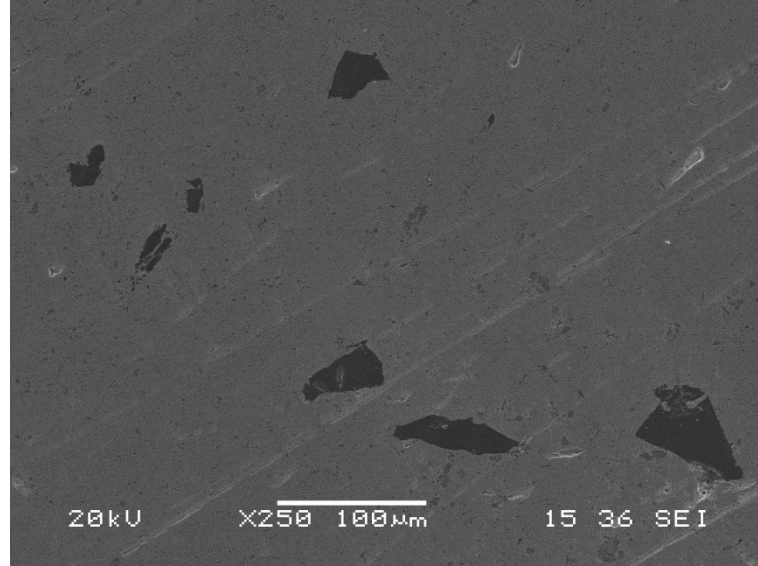
Şekil 5.18. Ağırlıkça %3 7 μm boyutunda bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi



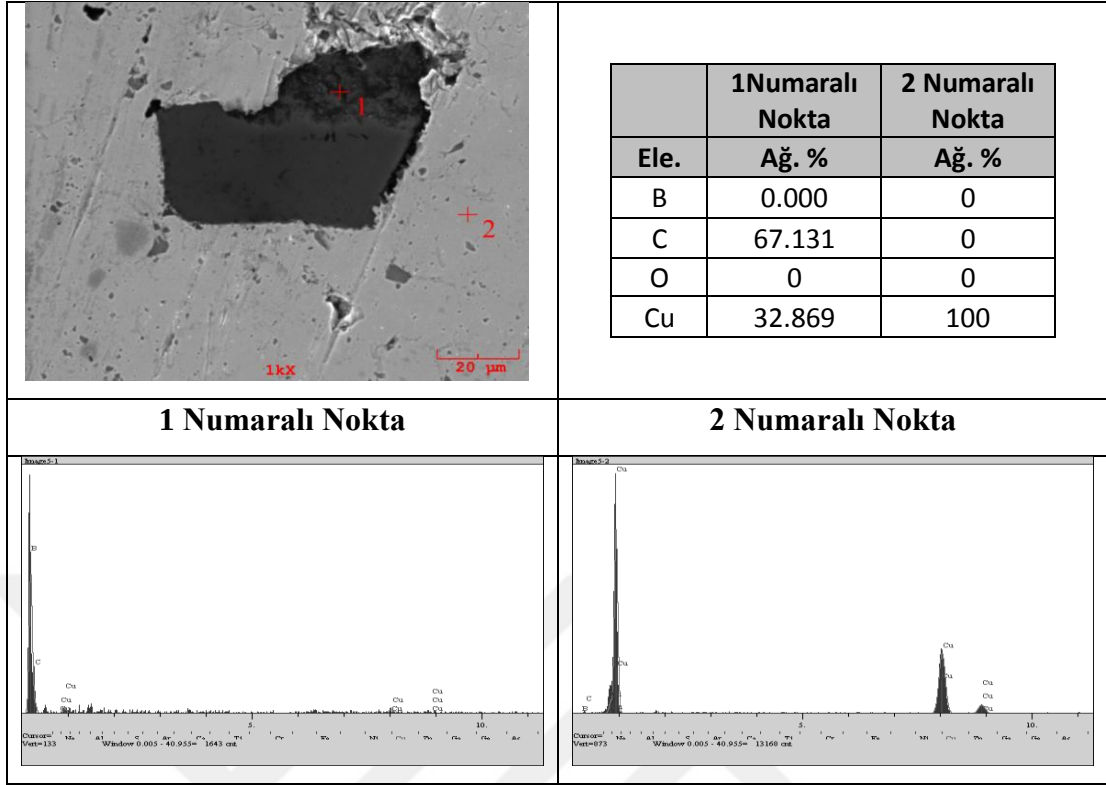
Şekil 5.19. 7 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %5 takviyeli numunenin SEM görüntüsü



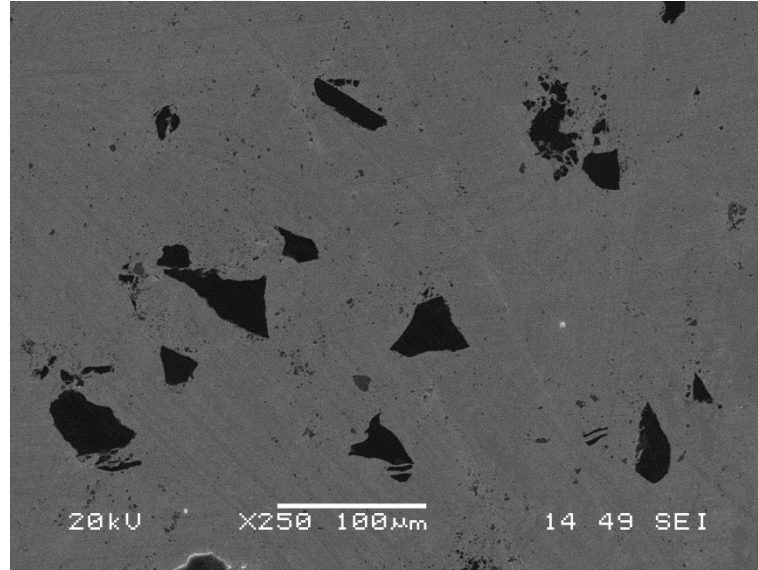
Şekil 5.20. Ağırlıkça %5 7 mikron boyutundaki bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi



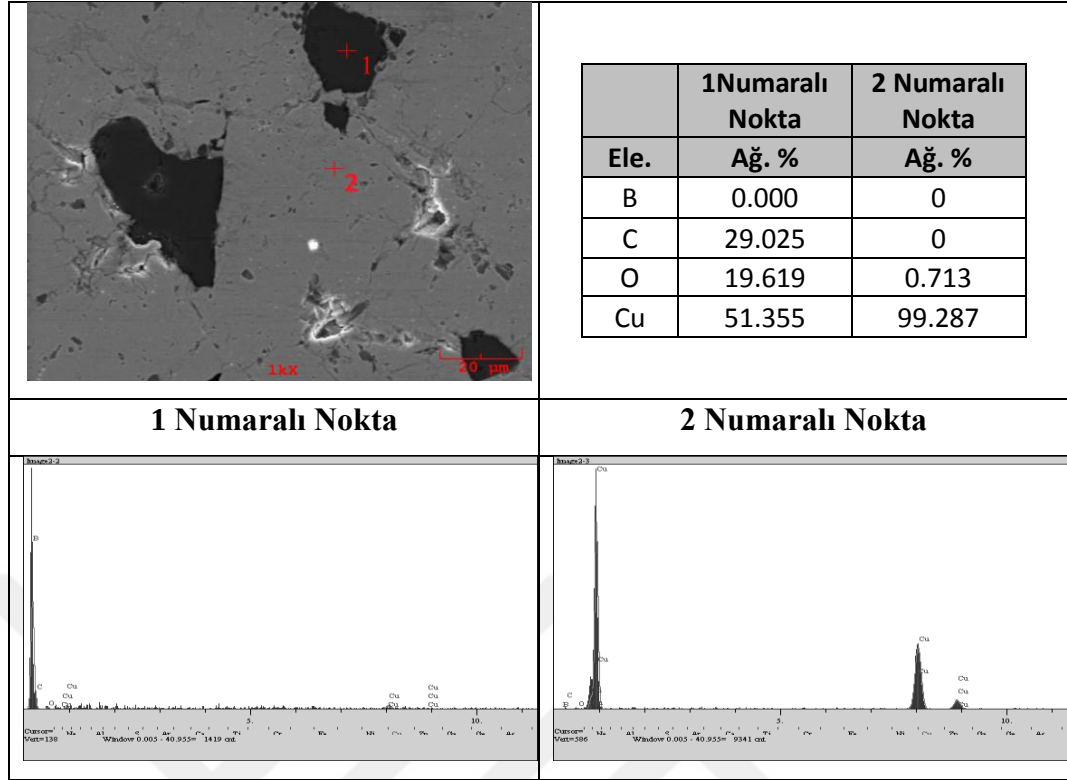
Şekil 5.21. 60 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %1 takviyeli numunenin SEM görüntüsü



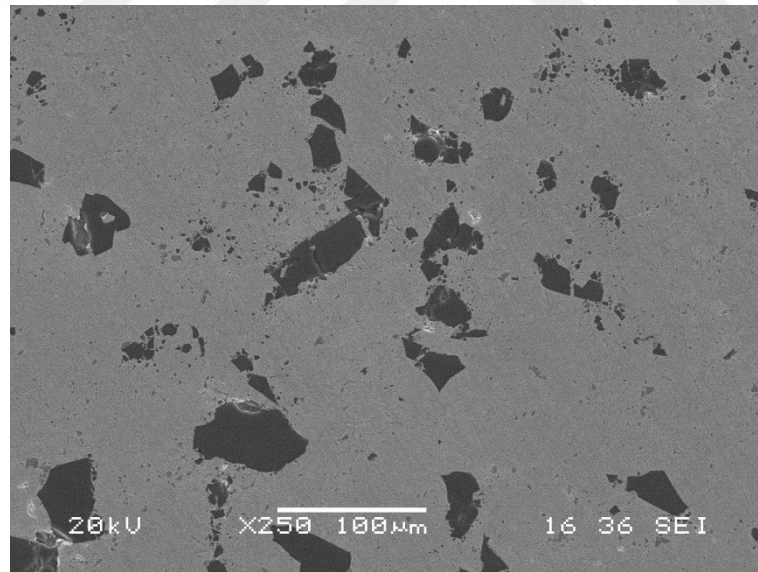
Şekil 5.22. Ağırlıkça %1 60 mikron boyutundaki bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi



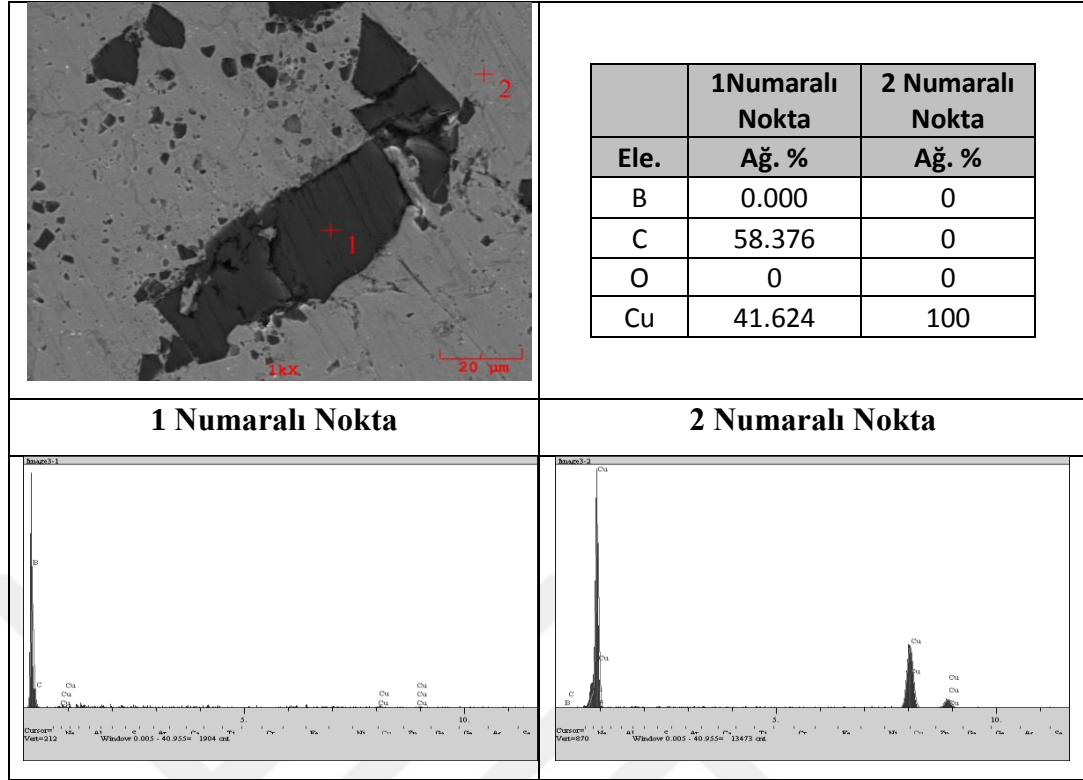
Şekil 5.23. 60 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %3 takviyeli numunenin SEM görüntüsü



Şekil 5.24. Ağırlıkça %3 60 mikron boyutundaki bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi



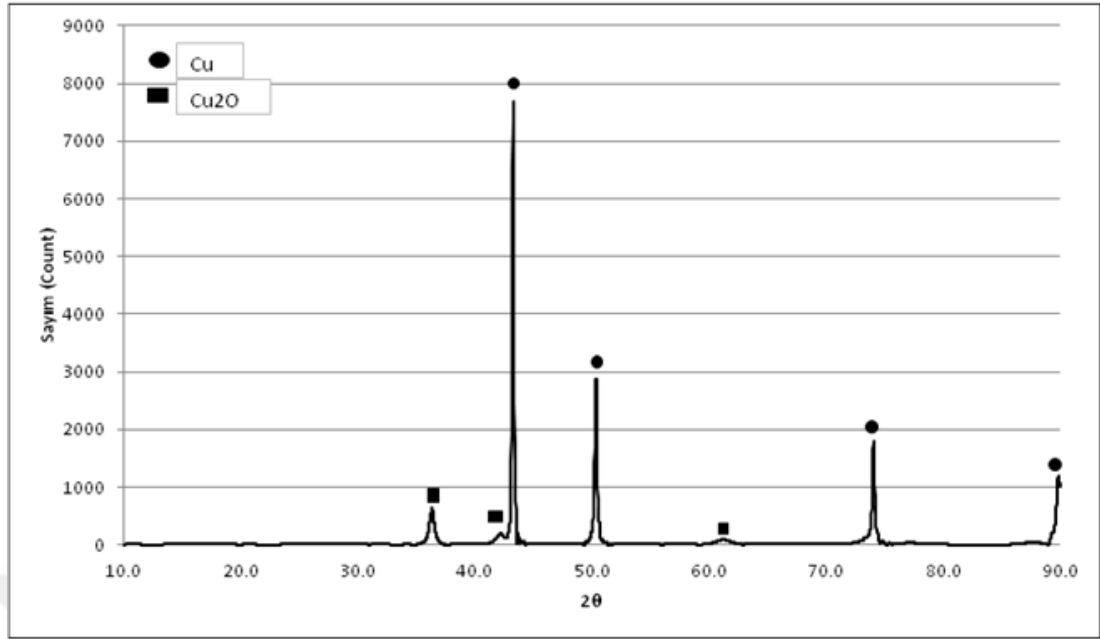
Şekil 5.25. 60 mikron boyutundaki bor karbür tozları ile ağırlıkça %5 takviyeli numunenin SEM görüntüsü



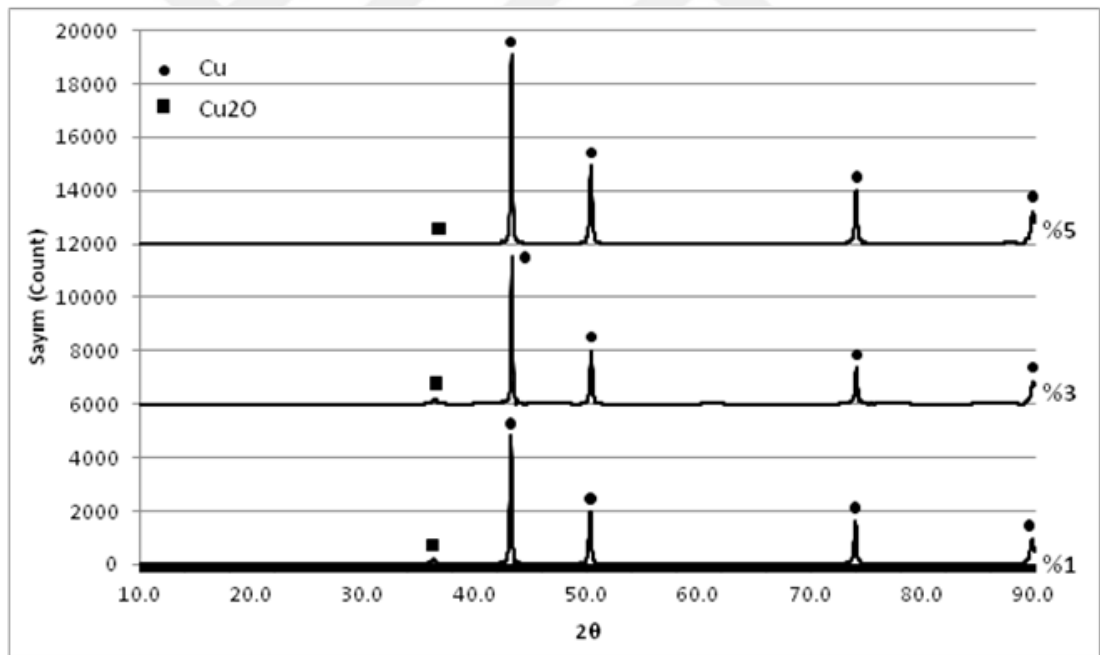
Şekil 5.26. Ağırlıkça %5 60 mikron boyutundaki bor karbür içeren numunelerin noktasal EDS analizi

5.2.3. XRD analizleri

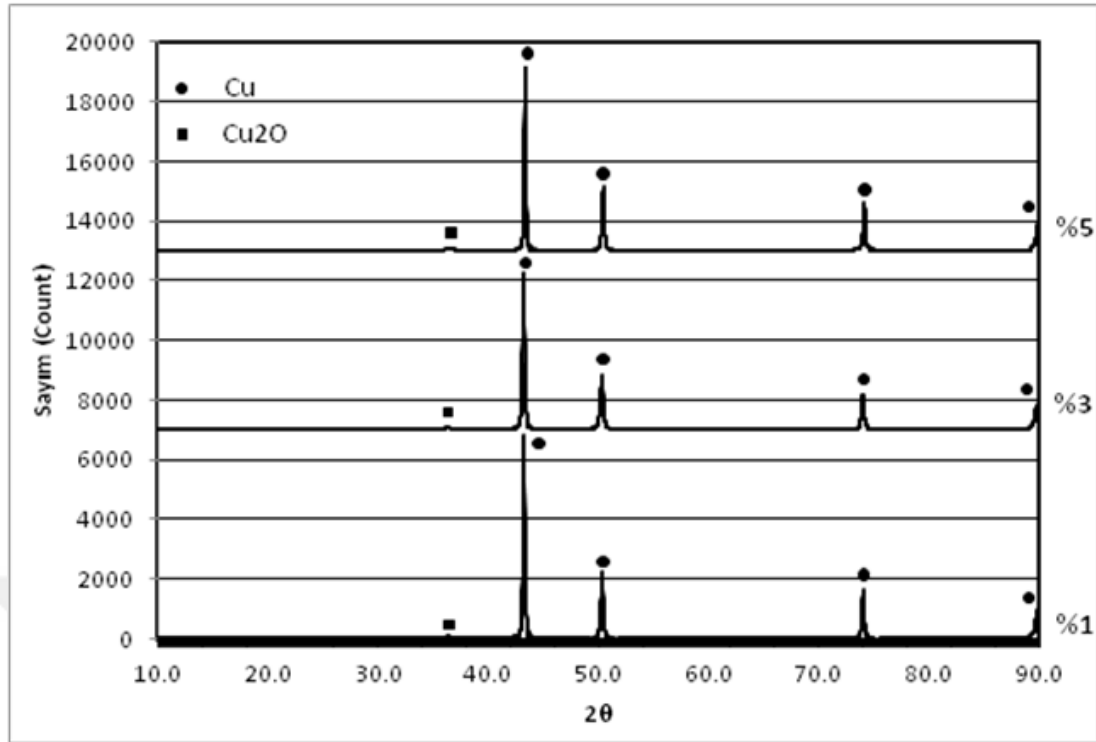
Numunelerin her birine XRD analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda elde edilen pikler aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.27.-5.29.) görülmektedir.



Şekil 5.27. Sinterlenmiş saf bakırın XRD spektrumu



Şekil 5.28. İnce (7 μm) partikül boyutuna sahip bor karbür tozları ile üretilen kompozitlerin XRD spektrumları



Şekil 5.29. 60 mikron partikül boyutuna sahip bor karbür tozları ile üretilen kompozitlerin XRD spektrumları

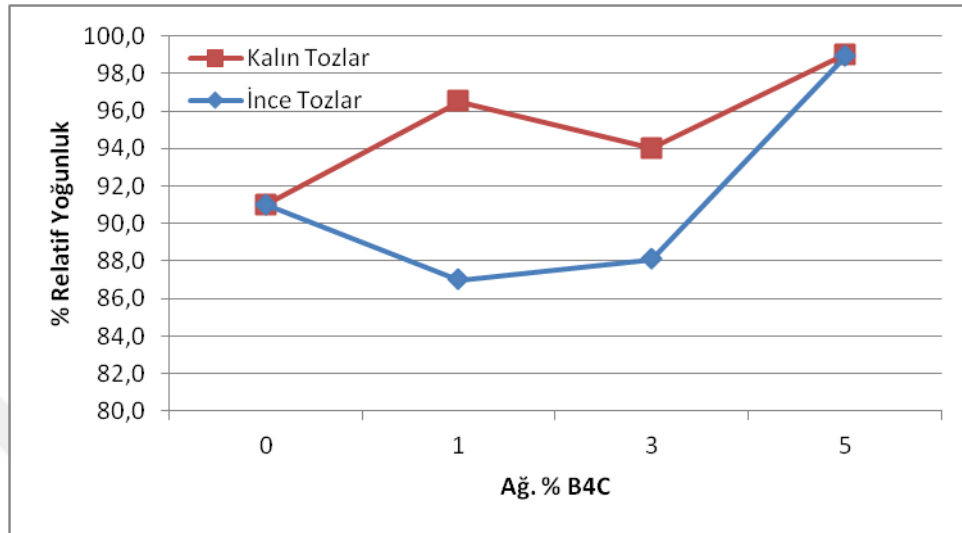
5.2.4. Yoğunluk ölçümleri

Hazırlanan numunelerdeki yoğunluk ölçümleri Archimed prensibine göre yapılmıştır. Ölçüm sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.4.'de verilmiştir.

Tablo 5.4. Numunelerin relatif yoğunluk değerleri

Numune Kodu	Bulk Yoğunluk (gr/cm ³)		Ortalama Relatif Yoğunluk (%)
	1. Numune	2. Numune	
SB	91,35	90,97	91,1
K1	96,19	96,68	96,4
K3	95,51	94,06	94,7
K5	99,07	98,98	99,0
İ1	87,32	86,72	87,0
İ3	87,39	88,71	88,1
İ5	98,59	99,20	98,9

Ölçüm işlemi tüm karışımlarda 2 farklı numunede yapılmıştır. Tüm numunelerin relatif yoğunlukları alınıp ortalama değer belirlenmiştir. Aşağıdaki şekilde relatif yoğunluk değerleri ve takviye oranı arasındaki ilişki grafik olarak gösterilmektedir.



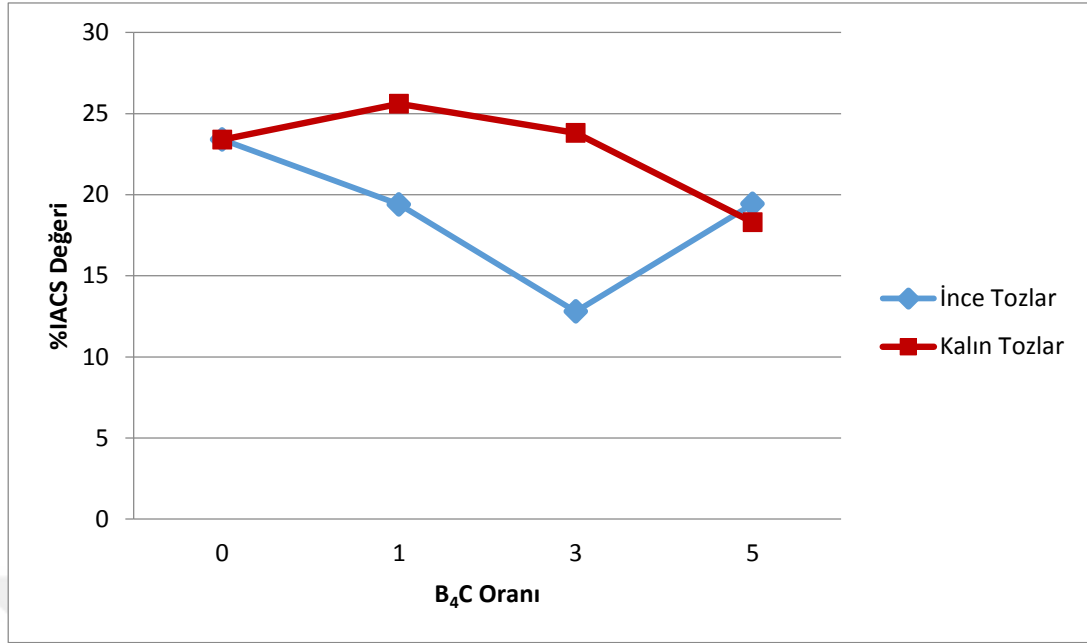
Şekil 5.30. Hazırlanan numunelerin relatif yoğunluk yüzdelерinin bor karbür oranına göre değışimi

5.2.5. İletkenlik ölçümleri

Yapılan iletkenlik testlerinin sonuçları aşağıdaki Tablo 5.5.'da verilmiştir. Elektrik iletkenlik değерlerinin takviye oranına göre değışimleri Şekil 5.30.'da grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 5.5. Numunelerin iletkenlik değерleri

Numune	%IACS Değeri
SB	23,4
K1	25,6
K3	23,8
K5	18,3
İ1	19,4
İ3	12,8
İ5	19,43



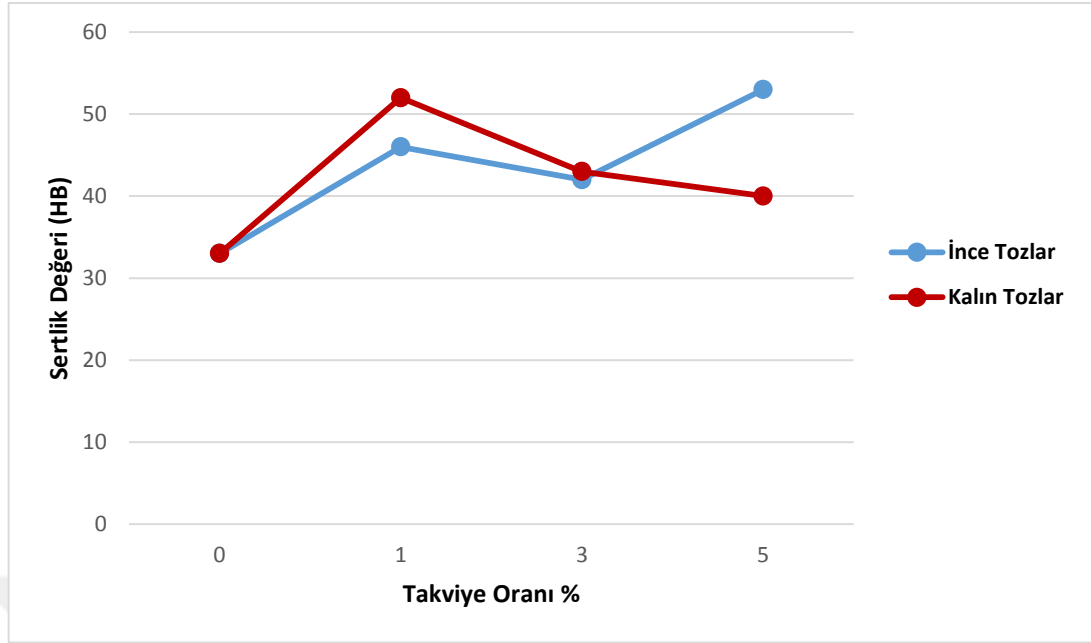
Şekil 5.31. Numunelerin %IACS değerlerinin takviye oranına göre değişimi

5.2.6. Sertlik ölçümleri

Numunelerin sertlik ölçümleri Brinell yöntemine göre 2,5 mm. çaplı bilye kullanılarak 62,5 kg. ağırlık altında yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Tablo 5.6.'da verilmektedir. Şekil 5.31.'de elde edilen sertlik değerlerinin grafiksel olarak gösterilmektedir.

Tablo 5.6. Numunelerin sertlik değerleri

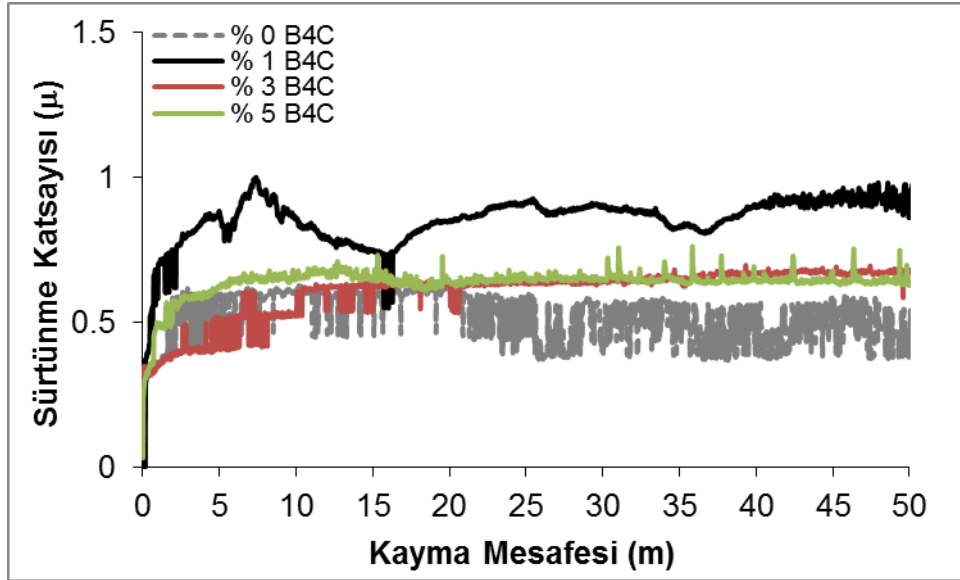
Sertlik Değerleri (HB)			
SB	K1	K3	K5
33	52	43	40
	İ1	İ3	İ5
	46	42	53



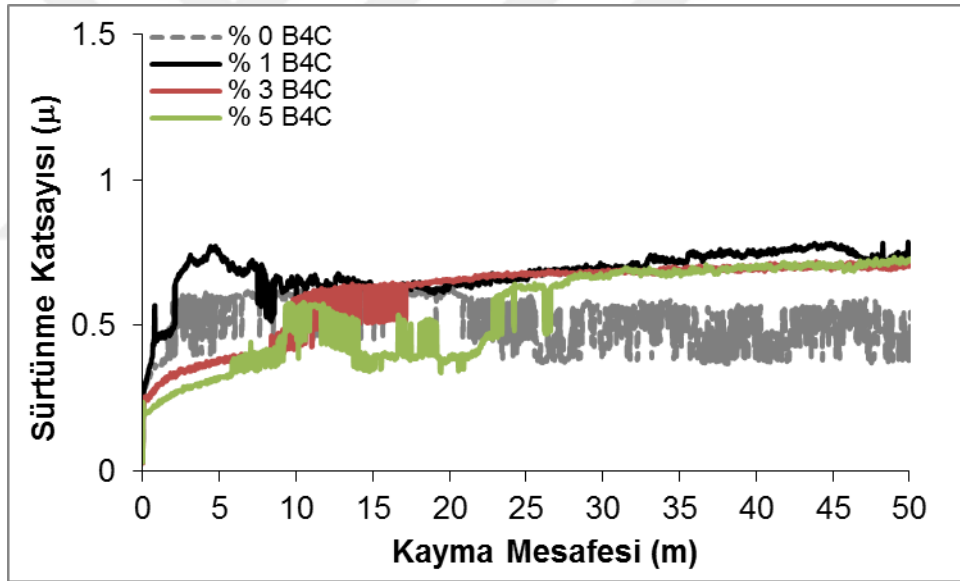
Şekil 5.32. Numunelerin sertlik değerlerinin takviye oranına göre değişimi

5.2.7. Aşınma testleri

Yapılan aşınma testleri sonucunda numune ile aşındırıcı bilye arasında meydana gelen sürtünme kuvvetleri belirlenmiştir. Bilye aşınma izleri görüntülenmiştir. Profilometre cihazı kullanılarak numunede oluşan izlerin hacimleri belirlenmiş ve bu hacimlerden aşınma oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.33.- 5.38.'de ve Tablo 5.7.'de verilmektedir.



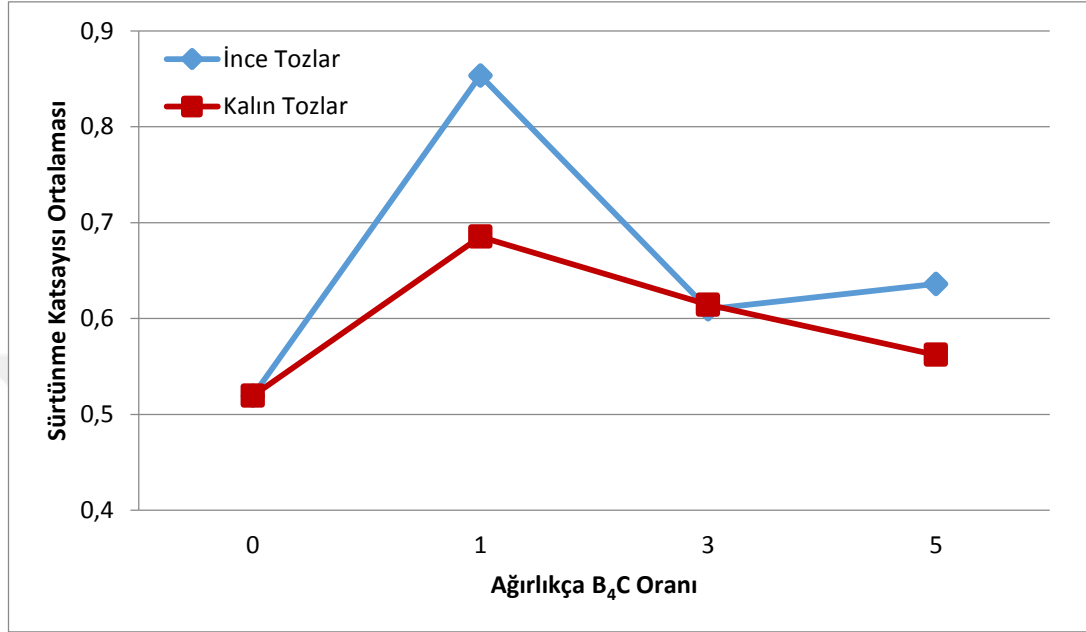
Şekil 5.33. 7 mikron tozlarla üretilen kompozitlerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi



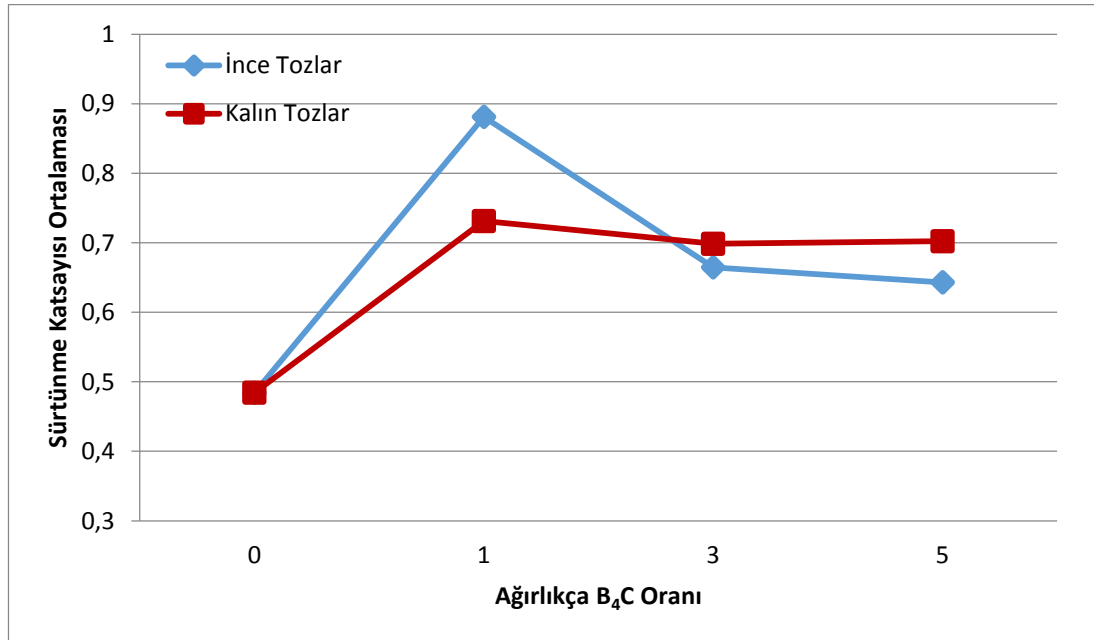
Şekil 5.34. 60 mikron tozlarla üretilen kompozitlerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi

Sürtünme kuvvetleri kayma mesafesine bağlı olarak ölçülmüş ve bu kuvvetlerden sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Bu sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimleri Şekil 5.32.-5.33. nolu grafiklerde verilmektedir. Bu grafiklerden tüm kayma mesafesi boyunca oluşan sürtünme katsayılarının ve bu katsayıların kararlı hale ulaştıktan sonraki değerlerinin ortalamaları alınmış ve takviye oranına bağlı olarak aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Şekil 5.32. ve Şekil 5.33. incelendiğinde ince tozların kullanıldığı numunelerde 20 metreden sonra kalın

tozların kullanıldığı numunelerde ise 30 metreden sonra nispeten kararlı hale ulaşıldığı görülmektedir. Hesaplamaların eşit şartlarda olması açısından kararlı hal ortalamaları 30 metreden sonra hesaplanmıştır.



Şekil 5.35. Kayma mesafesi boyunca sürtünme katsayılarının ortalamasının takviye oranına göre değişimi

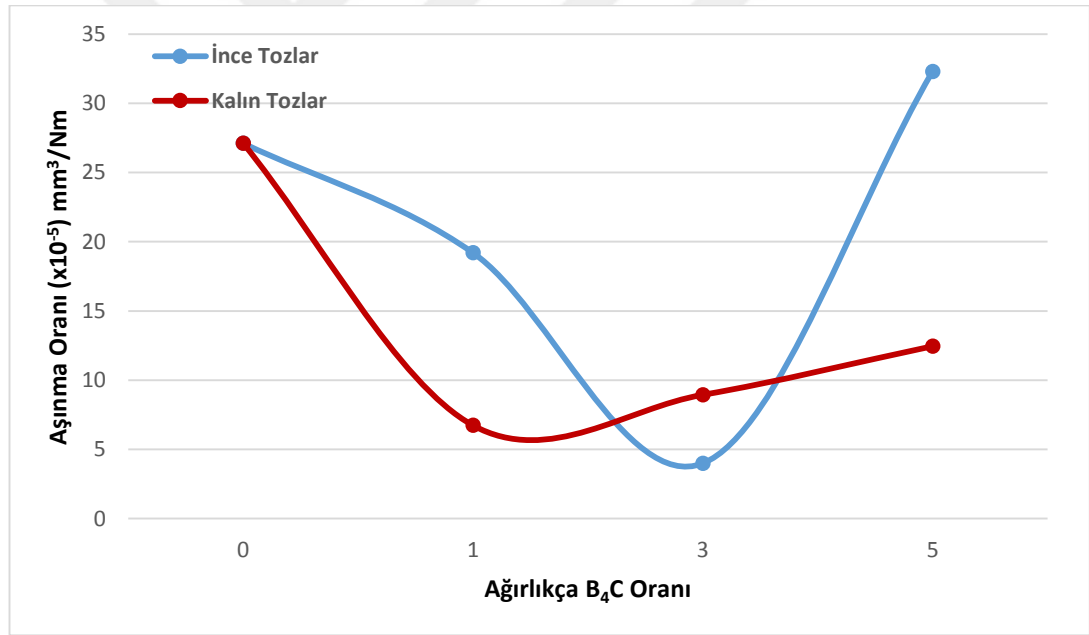


Şekil 5.36. Kararlı hal sürtünme katsayısı ortalamasının takviye oranına göre değişimi

Numune üzerinden profilometre yardımıyla aşınma hacimleri hesaplanmış ve buradan aşınma oranları belirlenmiştir. Bu oranlar aşağıdaki Tablo 5.7.'de ve grafikte (Şekil 5.38.) görülmektedir.

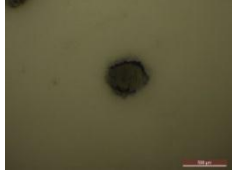
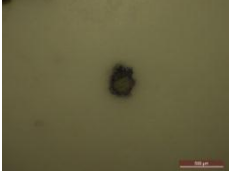
Tablo 5.7. Numunelerin aşınma oranları

Takviye Oranı	Aşınma Oranı ($\times 10^{-5}$) mm^3/Nm	
	İnce Toz İlaveli Kompozitler	Kaba Toz İlaveli Kompozitler
%0	27,11	27,11
%1	19,2	6,73
%3	3,99	8,94
%5	32,3	12,45



Şekil 5.37. Numunelerin aşınma oranının takviye oranına göre değişimi

Aşınma testi sonucunda karşıt yüzeyde meydana gelen aşınma optik olarak görüntülenmiştir. Bu görüntüler Şekil 5.38.'de verilmektedir.

	Ağırlıkça % B ₄ C Oranı			
	0	1	3	5
İnce Tozlar				
Kalın				

Şekil 5.38. Aşınma testi karşıt yüzey görüntüleri

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmalara kullanılacak tozların karakterizasyonu ile başlanmıştır. Tozların karakterizasyonunda SEM görüntüleri ve XRD analizleri kullanılmıştır. İnce B₄C (7 µm) tozlarına ait SEM görüntüleri incelendiğinde ince bor karbür tozlarının köşeli bir morfolojiye sahip oldukları görülmektedir. Beklenen ölçü sınırlarının üzerinde olan partiküller bulunmakla birlikte ince boyuttaki partiküller de yüksek miktarda bulunmaktadır. Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi ince partikül boyutundaki tozların çokluğu ortalama partikül boyutunun 7 µm'nin altında olmasına neden olmaktadır. Ortalama partikül boyutu Tablo 5.1.'de hesaplanmıştır. Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi kaba bor karbür (60 µm) partikülleri de köşeli bir morfolojiye sahiptir. Kaba bor karbür tozları ince bor karbür tozları ile kıyaslandığında daha homojen bir partikül boyutu dağılımı göstermektedir. Tablo 5.2.'de ve Şekil 5.4.'de ölçülen partikül boyutlarının ortalaması görülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan bakır tozlarının SEM mikrofrafisi Şekil 5.5.'de verilmektedir. Bakır tozlarının morfolojisi genel olarak küreseldir. Yapıda belirgin bir topaklanma mevcuttur. Topaklanmış partiküllerin boyutları belirtilen partikül boyutları içerisinde kalmaktadır. Partikül boyutu dağılımının homojen olmadığı görülmektedir. Bakır tozlarının matris malzemesi olarak kullanılacak olması göz önüne alındığında bu partikül boyutu dağılımının bu şekilde olması sıkı paketlenme açısından avantaj olabilir. Şekil 2.6.'da bakır tozunu partikül boyutu dağılımı ve Tablo 5.3.'de ortalama partikül boyutu verilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında yapılan XRD analizleri göstermektedir ki matris elemanı olarak kullanılan bakır tozlarında herhangi bir safsızlık bulunmamaktadır (Şekil 5.7.). Bor karbür tozları ile yapılan XRD analizlerinde ise iki toz boyutunda da ortak olarak serbest karbon görülmektedir (Şekil 5.8.-5.9.). Bu karbonun bor karbür üretim prosesinden geldiği düşünülmektedir. İnce bor karbür partiküllerinin

analizinde karbonun yanında bor oksit de bulunmaktadır. Boroksitin de üretim prosesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tozların karakterizasyonunun ardından sinterlenen numunelerin karakterizasyonuna geçilmiştir. Numunelerin optik mikroskop altındaki resimleri incelendiğinde partiküllerin dağılımının tam olarak homojen şekilde sağlanamadığı görülmektedir (Şekil 5.11.-5.12.). Takviye partiküllerinin aralarındaki mesafeler orantısızdır. Takviye oranındaki artış optik mikroskop resimlerinden de anlaşılabılır. Mikroskop görüntülerine göre matris partikülleri arasındaki sinterlenme tam olarak sağlanamamıştır. Yüzeyde takviye elemanlarının yanında partiküller arası sinterlemenin gerçekleşemediği boşluklar da bulunmaktadır. Bu boşlukların mekanik ve elektriksel özellikleri negatif yönde etkilediği düşünülmektedir.

Yapılan SEM görüntülemesinde de partiküller arası boşluklar kılcal gri bölgeler olarak görülmektedir. Elde edilen SEM görüntüleri optik mikroskop görüntüleri ile yüksek oranda benzerdir. SEM görüntüleri incelendiğinde takviye elemanlarının matris içerisindeki dağılımının, optik mikroskop görüntülerine uyumlu şekilde, tam olarak homojen olmadığı görülmektedir. Partiküller bölgesel olarak birikmiş ve partiküllü bölgeler arasında geniş boşluklar bulunmaktadır. SEM görüntüleri incelendiğinde tüm takviye elemanları için partikül boyutu dağılımı uniform değildir. Özellikle ince partikül boyutuna sahip tozların partikül boyutu dağılımı kaba tozlara göre daha düzensizdir. Kaba partikül boyutuna sahip tozlar ince tozlara göre daha uniform bir dağılıma sahip gibi görünse de daha yüksek büyütme oranına sahip şekillerde görüldüğü gibi çok küçük partiküller de yapıda bulunmaktadır.

Numunelere SEM görüntülemelerinin yanında EDS analizleri de yapılmıştır. Saf bakırın EDS analizinde bakırın yanında bir miktar da oksijen bulunmaktadır (Şekil 5.14.). Toz haldeki saf bakırın XRD analizlerinde oksijen bulunmadığı göz önüne alındığında sinterlenen numunelerdeki oksijenin sinterleme işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kompozit numunelerin EDS analizleri incelendiğinde kalitatif olarak bor varlığı görülmektedir. Fakat EDS analizinin sodyum altı elementleri kantitatif olarak belirlemekte yetersiz kaldığından dolayı

ağırlıkça yüzde olarak belirlenememektedir. Bu yüzden EDS analizlerinde bor piki görülmesine rağmen ağırlıkça yüzde sıfır olarak belirlenmiştir. Yapıda belirlenen karbon miktarı büyük oranda bor karbürün varlığından kaynaklanmaktadır. Kompozit numunelerde de saf bakırda olduğu gibi bir miktar oksit bulunmaktadır. Bu oksitlerin de sinterleme sırasında oluştuğu düşünülmektedir.

Hazırlanan kompozit numunelerde sinterleme sonrası farklı bir faz yapısının oluşup oluşmadığını belirlemek amacıyla XRD analizi yapılmıştır. Saf bakıra yapılan XRD analizinde bir miktar bakır oksit (Cu_2O) bileşiği oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.27.). Bunun dışında yapıda farklı bir faz bulunmamaktadır. Numunelerin sinterlenmesi sonucunda yapıda bir miktar oksitlenme olduğu EDS analizinde de belirlenmiştir. Üretilen kompozitlerde gerçekleştirilen XRD analizleri incelendiğinde saf bakırda olduğu gibi az miktarda bakır oksit bulunduğu görülmektedir (Şekil 5.28.-5.29.). Saf bakırın ve kompozitlerin sinterlenmesi işlemi sırasında peletlerin gömüldüğü karbon oksitlenmeyi tam olarak engelleyememiştir. Bununla birlikte analiz sonucunda kompozit malzemelerin yapısında bor karbür fazı da görülememektedir. Kompozitin oran olarak az miktarda bor karbür içermesi ve ana faz olan bakırın pik şiddetinin yaklaşık olarak bor karbürün pik şiddetinin iki katı seviyelerinde olması kompozitteki bor karbürün XRD cihazının denetleme sınırlarının altında kalmasına neden olması mümkündür. Bu nedenle XRD analizlerinde yapıda bulunmasına rağmen bor karbür piki saptanamamıştır. SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde yapıdaki bor karbürün varlığı açık olarak görülebilmektedir (Şekil 5.15.-5.26.).

Yoğunluk testleri sonucunda elde edilen değerlere göre aynı katkı oranında kaba B_4C partikülleri kullanılarak hazırlanan numunelerin yoğunlukları daha yüksektir. Bu durumun partikül sayısının, dolayısıyla takviye matris malzemesi ara yüzeyinin azalması ile ilişkili olduğu düşünülebilir. Nitekim benzer çalışmalarda da buna benzer sonuçlar ile karşılaşmış ve bu durumun takviye-matris malzemesi ara yüzeyinin azalmasına bağlı olduğu belirlenmiştir [8]. Şekil 5.30.'da B_4C takviye oranına bağlı olarak relatif yoğunluk yüzdesi değişimi gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi takviye oranı ve yoğunluk arasında kesin bir ilişkiye rastlanmamıştır. Buna rağmen ince B_4C tozları ile üretilen kompozitlerde %1 takviye oranında

yoğunluk azalırken takviye oranının artması ile yoğunlukta da artış gözlemlenmektedir. Kaba B_4C tozları kullanılarak üretilen kompozitlerde sabit bir artış bulunmamakla birlikte relatif yoğunluğun takviye oranı ile birlikte artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durum sert takviye elemanlarının tozların sıkıştırılmasını kolaylaştırmasından kaynaklanabilir. Hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlara göre yoğunluk, takviye partikül boyutu ve takviye oranı arasında kesin bir ilişki belirlenemese de genel olarak takviye partikül boyutunun ve takviye oranının artması ile relatif yoğunluğun arttığı söylenebilir.

Numunelerin elektrik iletkenlikleri %IACS olarak belirlenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 5.5.'de verilmektedir. Elde edilen iletkenlik değerlerinin çok düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Saf bakır kullanılarak üretilen numunenin iletkenlik değerinin düşük olması hazırlanan kompozitlerin iletkenlik değerlerinin de düşük olmasını açıklamaktadır. Matris malzemesinin oksitlenmesi nedeniyle iletkenliğinin düşmesi kompozitlerin iletkenliklerinin de düşük olmasına neden olmuştur. Değerler incelendiğinde takviyesiz numunenin iletkenliğinin K1 (60 mikron tozlarla ağırlıkça %1 takviyeli numuneler) ve K3 (60 mikron tozlarla ağırlıkça %3 takviyeli numuneler) kodlu numunelerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma SB (Saf bakır) numunesinde meydana gelen oksitlenme ve saf bakır numunenin yoğunluğunun düşük olması sebep olabilir. Bunun dışında kaba tozlarla üretilen numuneler incelendiğinde takviye oranı arttıkça elektrik iletkenliğinin düştüğü görülmektedir. Bu durum genel literatüre uyum göstermektedir. İnce takviye elemanları kullanılarak üretilen kompozitlerde ise iki takviye oranında (%1 ve %3) takviye oranındaki artışa bağlı olarak iletkenlikte azalma meydana gelmiş fakat %5 takviye oranında iletkenliğin arttığı görülmüştür. Bu artışın kompozit numunenin üretim prosesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

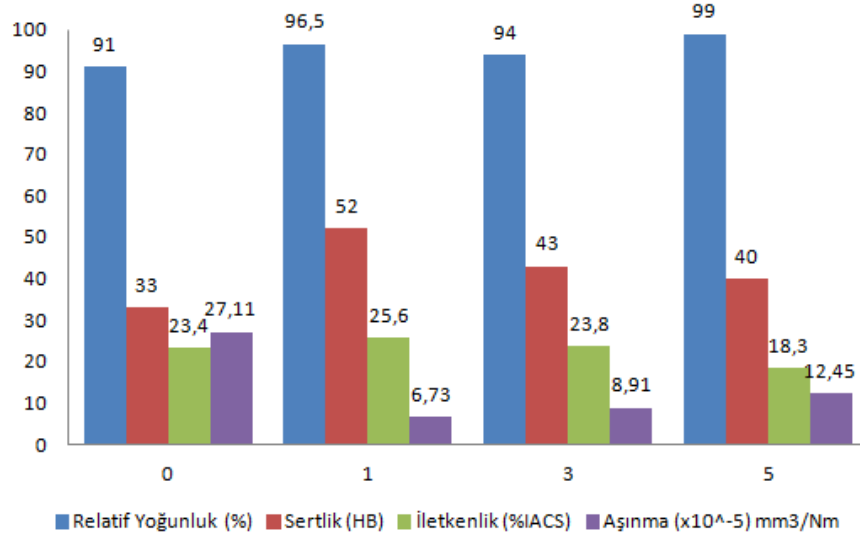
Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda genel literatürün aksine kaba tozların kullanıldığı numunelerde takviye oranının artması ile sertlikte düşüş görülmüştür (Şekil 5.32.). Takviye edilmiş numunelerin tamamında sertliğin takviyesiz bakırdan daha yüksek olmasına rağmen, takviye oranındaki artış sertliğin düşmesine neden olmaktadır. Takviye elemanlarının matris içerisinde homojen olarak dağıtılamaması

sertlik ölçümlerindeki düzensizliği açıklayabilir. Partiküllerin homojen olarak dağıtılamamasının hem dispersiyon sertleşmesine hem de matristeki dislokasyon hareketlerinin engellenmesine mani olması sertlikteki artışı da engellemektedir.

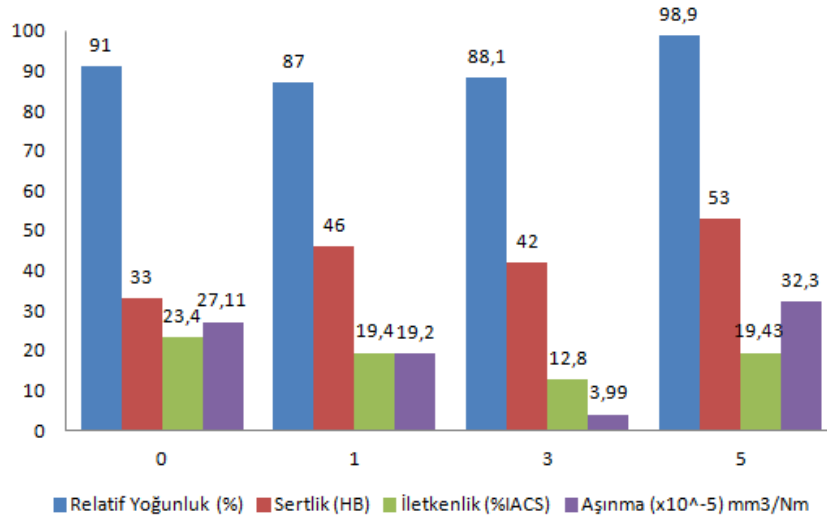
İnce tozlarla hazırlanan numunelerde de takviye edilen numunelerin tamamında saf bakıra göre sertlikte %60'a varan artışlar sağlanmıştır. Genel olarak takviye oranındaki artış ile sertlikte de artış gözlemlenmekle birlikte ağırlıkça %3 takviye edilmiş numunenin sertliğinde bir miktar düşüş meydana gelmiştir (Şekil 5.32.). Bu düşüşün üretim parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Takviye elemanının kompozit içerisinde homojen olarak dağıtılamaması bu duruma sebep olabilir.

Aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayı eğrilerinde ortalama 20 metre mesafeye kadar katsayıların düzensiz olduğu görülmüştür (Şekil 5.33.-5.34.). İnce tozlar kullanılarak üretilen kompozit numunelerde alıştırma aşaması 2 metre civarında tamamlanırken kaba tozlarda bu mesafe 10 metreye yaklaşmaktadır. Şekil 5.33.'deki ince tozların sürtünme katsayıları incelendiğinde %1 oranında takviye edilen kompozitin sürtünme katsayısı dağılımının çok değişken olduğu görülmektedir. 40 metrelik kayma mesafesine kadar yoğun bir dalgalanma bulunmaktadır. %3 ve %5 oranlarında takviye edilen numunelerde sürtünme katsayıları birbirine yakındır. Buna karşın %5 takviyeli kompozitin eğrisinde pikler görülmektedir. Bu durum numune yüzeyindeki takviyelerin kopmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Nitekim aşınma oranları incelendiğinde % 5 takviyeli kompozitin aşınma oranı saf bakırdan bile daha yüksektir. Karşıt yüzeylere bakıldığında %5 takviyeli numunede kullanılan bilyenin yüzeyine yüksek oranda B₄C'ün tutunduğu görülmektedir (Şekil 5.38.). Bu veriler %5 takviye oranına sahip kompozitte aşınma oranının yüksek olmasının nedenini açıklamaktadır. Şekil 5.34. incelendiğinde ince tozlara göre kaba tozların sürtünme katsayıları daha düzenlidir. %1 ve %5 takviye oranına sahip numuneler 17 metre civarında kararlı hale geçmiştir. %5 takviyeli numune ise 27 metre civarında kararlı hale geçmiştir. Elde edilen tüm sürtünme katsayılarının değerlerine bakıldığında takviye oranındaki artış ile sürtünme katsayısında bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.35.). Fakat kararlı

haldeki sürtünme katsayılarının ortalaması 3 numune içinde birbirine çok yakındır (Şekil 5.36.). Şekil 5.37.'de kaba tozlarla takviye edilmiş numunelerde takviye oranındaki artışın aşınma oranını da arttırdığı görülmektedir. Bu durum numunelerin yüzeylerindeki takviye partiküllerinin kırılması ve yerinden çıkarak karşıt yüzeye yapışmasından kaynaklanmaktadır. Sürtünme katsayısı grafiğinden de görüleceği gibi takviye oranı arttıkça değerlerin kararlı hale geçme mesafeleri de artmıştır. Aşınma oranındaki artışın kararlı hale geçene kadar oluşan aşınmadaki farktan kaynaklandığı düşünülmüştür. Nitekim karşıt yüzeyler incelendiğinde de takviye oranının artışıyla karşıt yüzeye yapışan takviye elemanlarının arttığı görülmektedir. Buna rağmen hem ince hem kaba tozlar ile üretilen kompozitlerde bir numune (İnce toz %5) hariç tüm numunelerde aşınma değerlerinde iyileşme görülmüştür. Özellikle kaba tozlarla üretilen kompozitlerde aşınma oranında %55 ile %75 arasında azalama görülmüştür (Şekil 5.37.). Aşınma oranının arttığı numunede ise bu durumun yüzeyden kopan takviye elemanlarının fazlalığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.1. 60 mikron tozlarla üretilen kompozitlerden elde edilen verilerin birleşik gösterimi



Şekil 6.2. 7 mikron tozlarla üretilen kompozitlerden elde edilen verilerin birleşik gösterimi

Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, numunelerin sertlik ve aşınma değerlerinde takviye işlemi sonucunda önemli gelişmeler sağlanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Şekil 6.2. ve 6.3.'de gösterilmektedir. Düşük takviye oranı ve ikinci presleme işlemi yapılmamasına rağmen sertlik değerlerinde %65'e varan artış, aşınma oranlarında ise %75'e varan azalmalar kaydedilmiştir. Bununla birlikte yoğunluk ile bu değerler arasında bağlantı saptanmamıştır. Bu durum takviye dağılımı veya takviye ile matris arasındaki bağ kuvveti gibi diğer parametrelerin yoğunluktan daha önemli olduğunu göstermektedir. Elektrik iletkenliği konusunda ise istenen sonuçlar elde edilememiştir. Bunun en temel sebebi grafitte gömerek yapılan sinterleme işleminde oksitlenmenin engellenememesi ve numuneler içerisinde kalan kapalı boşluklar gösterilebilir.

Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında sonraki çalışmaların daha verimli olması adına aşağıdaki öneriler göz önünde bulundurulabilir. Bunlar:

- Tozların kompaktlanması işlemi daha yüksek basınçlarda yapılabilir. Bu durum hem matris ve takviye arasındaki bağı güçlendirip hem de numune içerisindeki kapalı boşlukların oluşmasını engelleyerek kompozitin mekanik ve elektriksel özelliklerini daha yüksek oranda iyileştirebilir.

- b. Sinterleme işlemi koruyucu gaz atmosferinde yapılabilir. Bu işlem oksitlenmeyi engelleyerek iletkenlik ile ilgili daha yüksek değerlerin elde edilmesini sağlayabilir.
- c. Matris malzemesi olarak daha küçük partikül boyutuna sahip partiküller kullanılabilir. Bu durum takviye elemanlarının matris malzemesi tarafından sarılmasını kolaylaştırarak daha yüksek özelliklere sahip kompozitlerin üretilmesini sağlayabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Efe, G. C., Ipek, M., Zeytin, S., Bindal, C., An investigation of the effect of SiC particle size on Cu-SiC composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(4): 1813-1822, 2012.
- [2] Efe, G. C., Zeytin, S., Bindal, C., The effect of SiC particle size on the properties of Cu-SiC composites. *Materials & Design*, 36: 633-639, 2012.
- [3] Altınsoy, İ., Alümina Takviyeli Bakır Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.
- [4] Zhan, Y., Zhang, G., The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiC p/Cu composites. *Materials Letters*, 57(29): 4583-4591, 2003.
- [5] Altınsoy, İ., Efe, G. C., Aytaş, D., Kılıç, M., Ozbek, İ., Bindal, C., Some Properties of Cu-B4C Composites Manufactured by Powder Metallurgy. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 1(1): 34-38, 2013.
- [6] Akhtar, F., Askari, S. J., Shah, K. A., Du, X., Guo, S., Microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and wear behavior of high volume TiC reinforced Cu-matrix composites. *Materials characterization*, 60(4): 327-336, 2009.
- [7] Ying, D. Y., Zhang, D. L., Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling. *Materials Science and Engineering: A*, 286(1): 152-156, 2000.
- [8] Efe, G. F. Ç., SiC Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010.
- [9] Gorsse, S., Ouvrard, B., Gouné, M., Poulon-Quintin, A., Microstructural design of new high conductivity-high strength Cu-based alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 633: 42-47, 2015.
- [10] Zhu, C., Ma, A., Jiang, J., Li, X., Song, D., Yang, D., Yuan, Y., Chen, J., Effect of ECAP combined cold working on mechanical properties and electrical conductivity of Conform-produced Cu-Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 582: 135-140, 2014.

- [11] Zhu, D. C., Ke, T. A. N. G., Song, M. Z., Tu, M. J., Effects of annealing process on electrical conductivity and mechanical property of Cu-Te alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16(2): 459-462, 2006.
- [12] Ning, Y. T., Zhang, X. H., Wu, Y. J., Electrical conductivity of Cu-Ag in situ filamentary composites. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17(2): 378-383, 2007.
- [13] Ye, Y., Yang, X., Wang, J., Zhang, X., Zhang, Z., Sakai, T., Enhanced strength and electrical conductivity of Cu-Zr-B alloy by double deformation-aging process. Journal of Alloys and Compounds, 615: 249-254, 2014.
- [14] Semboshi, S., Takasugi, T., Fabrication of high-strength and high-conductivity Cu-Ti alloy wire by aging in a hydrogen atmosphere. Journal of Alloys and Compounds, 580: S397-S400, 2013.
- [15] Song, J. S., Hong, S. I., Park, Y. G., Deformation processing and strength/conductivity properties of Cu-Fe-Ag microcomposites. Journal of alloys and compounds, 388(1): 69-74, 2005.
- [16] Mishnev, R., Shakhova, I., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Deformation microstructures, strengthening mechanisms, and electrical conductivity in a Cu-Cr-Zr alloy. Materials Science and Engineering: A, 629: 29-40, 2015.
- [17] Xia, C., Zhang, W., Kang, Z., Jia, Y., Wu, Y., Zhang, R., Xu, G., Wang, M., High strength and high electrical conductivity Cu-Cr system alloys manufactured by hot rolling-quenching process and thermomechanical treatments. Materials Science and Engineering: A, 538: 295-301, 2012.
- [18] Wei, K. X., Wei, W., Wang, F., Du, Q. B., Alexandrov, I. V., Hu, J., Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of industrial Cu-0.5% Cr alloy processed by severe plastic deformation. Materials Science and Engineering: A, 528(3): 1478-1484, 2011.
- [19] Dobatkin, S. V., Gubicza, J., Shangina, D. V., Bochvar, N. R., Tabachkova, N. Y., High strength and good electrical conductivity in Cu-Cr alloys processed by severe plastic deformation. Materials Letters, 153: 5-9, 2015.
- [20] Wang, F., Li, Y., Wakoh, K., Koizumi, Y., Chiba, A., Cu-Ti-C alloy with high strength and high electrical conductivity prepared by two-step ball-milling processes. Materials & Design, 61: 70-74, 2014.
- [21] Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., Włosiński, W., The production and application of metal matrix composite materials. Journal of Materials Processing Technology, 106(1): 58-67, 2000.

- [22] Tu, J. P., Wang, N. Y., Yang, Y. Z., Qi, W. X., Liu, F., Zhang, X. B., Lu, H. M., Liu, M. S., Preparation and properties of TiB₂ nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing. *Materials Letters*, 52(6): 448-452, 2002.
- [23] Lee, D. W., Kim, B. K., Nanostructured Cu–Al₂O₃ composite produced by thermochemical process for electrode application. *Materials Letters*, 58(3): 378-383, 2004.
- [24] Baradeswaran, A., Perumal, A. E., Influence of B₄C on the tribological and mechanical properties of Al 7075–B₄C composites. *Composites Part B: Engineering*, 54: 146-152, 2013.
- [25] Baradeswaran, A., Vettivel, S. C., Perumal, A. E., Selvakumar, N., Issac, R. F., Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B₄C and graphite reinforced aluminium hybrid composites. *Materials & Design*, 63: 620-632, 2014.
- [26] Topcu, I., Gulsoy, H. O., Kadioglu, N., Gulluoglu, A. N., Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1): 516-521, 2009.
- [27] Zheng, R., Chen, J., Zhang, Y., Ameyama, K., Ma, C., Fabrication and characterization of hybrid structured Al alloy matrix composites reinforced by high volume fraction of B₄C particles. *Materials Science and Engineering: A*, 601: 20-28, 2014.
- [28] Lee, B. S., & Kang, S., Low-temperature processing of B₄C–Al composites via infiltration technique. *Materials Chemistry and Physics*, 67(1): 249-255, 2001.
- [29] Liu, B., Huang, W., Huang, L., Wang, H., Size-dependent compression deformation behaviors of high particle content B₄C/Al composites. *Materials Science and Engineering: A*, 534: 530-535, 2012.
- [30] Dou, Y., Liu, Y., Liu, Y., Xiong, Z., Xia, Q., Friction and wear behaviors of B₄C/6061Al composite. *Materials & Design*, 60: 669-677, 2014.
- [31] Klimiec, E., Stobierski, L., Nowak, S., Zaraska, W., Kuczyński, S., Electric properties of monophase polycrystalline sinters SiC, B₄C, TiC and their composites as non-inductive volume resistors. *Journal of electroceramics*, 26(1-4): 90-98, 2011.
- [32] Kurt, H., Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [33] Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2006.

- [34] Kaftelen, H., Ünlü, N., Göller, G., Öveçoğlu, M. L., Henein, H., Comparative processing-structure-property studies of Al-Cu matrix composites reinforced with TiC particulates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(7): 812-824, 2011.
- [35] Shu, K. M., Tu, G. C., The microstructure and the thermal expansion characteristics of Cu/SiC_p composites. *Materials Science and Engineering: A*, 349(1): 236-247, 2003.
- [36] Sapate, S. G., Uttarwar, A., Rathod, R. C., Paretkar, R. K., Analyzing dry sliding wear behaviour of copper matrix composites reinforced with pre-coated SiC_p particles. *Materials & Design*, 30(2): 376-386, 2009.
- [37] Cilasun, N. S., Karıştırmalı Döküm Yöntemi İle SiC Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2013.
- [38] Korçak, M., Seramik Takviyeli Çinko Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [39] Topuz, A., Döküm ve Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Üretilen AA 2014-Al₄C₃ Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [40] Gültekin, D., Metal Matrisli Kompozit Fren Diski, Balatası Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
- [41] Toptan, F., Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi İle Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [42] Soy, U., SiC/B₄C Takviyeli Metal Matriks Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.
- [43] Rosso, M., Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1): 364-375, 2006.
- [44] Kok, M., Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(3): 381-387, 2005.
- [45] Miracle, D. B., Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites science and technology*, 65(15): 2526-2540, 2005.

- [46] Yao, Y. T., Jiang, L., Fu, G. F., Chen, L. Q., Wear behavior and mechanism of B₄C reinforced Mg-matrix composites fabricated by metal-assisted pressureless infiltration technique. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(8): 2543-2548, 2015.
- [47] Qi, Q., Liu, Y., Zhang, H., Li, Y., Liang, H., Huang, Z., Processing and microstructure characterization of SiC_p/Hastelloy (Ni–Mo–Cr) composites prepared by pressureless infiltration. Journal of Alloys and Compounds, 639: 330-335, 2015.
- [48] Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., Gutierrez, C. A., Soltani, N., Effect of rice-husk ash on properties of laminated and functionally graded Al/SiC composites by one-step pressureless infiltration. Journal of Alloys and Compounds, 644: 256-266, 2015.
- [49] Altuner, S., Y₂O₃ Kaplanmış Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [50] Chung, D. D. L., Composite Materials: Science and Applications, Springer, London, 2010.
- [51] Toptan, F., Alüminyum Matrisli B₄C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [52] Gök, M. G., B₂O₃ Katkılı Kontak Malzemesi Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2010.
- [53] Moustafa, S. F., Abdel-Hamid, Z., Abd-Elhay, A. M., Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique. Materials Letters, 53(4): 244-249, 2002.
- [54] Tekmen, Ç., Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi İle Üretimi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [55] Nazik, C., Alüminyum Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
- [56] Pul, M., Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.

- [57] İpek, G., Tabakalı Kompozit Malzemelerin Burkulma Davranışına Çoklu Süreksizlik Bölgesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
- [58] Islam, S., Computational Modelling of Particulate Composites Using Meshless Methods, Doctoral dissertation, Cardiff University, Institute of Mechanics and Advanced Materials Theoretical and Computational Mechanics, Cardiff, 2011.
- [59] Kurtoğlu, A., Aluminum Oxide and Titanium Diboride Reinforced Metal Matrix Composite and Its Mechanical Properties, PhD Thesis, Middle East Technical University, Institute of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2004.
- [60] Oguocha, I. N., Characterization of Alurninum Alloy 2618 and Its Composites Containing Alumina Particles, Doctoral dissertation, University of Saskatchewan, College of Graduate Studies and Research Saskatoon, 1999.
- [61] Uribe-Restrepo, C., Process-dependent Microstructure and Severe Plastic Deformation in SiC_p Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites, PhD Thesis, University of Central Florida Orlando, College of Engineering and Computer Science, Orlando, 2006.
- [62] Kalaycıoğlu, A. S., SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi İle Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010.
- [63] Cerit, A. A., Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2004.
- [64] Sezer, H., Mathematical Modeling of Dislocation-Fiber Interactions In Composite Materials, Master Science Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, 2009.
- [65] Bulut, M., Türkiye’de Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Bitirme Projesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [66] Eryiğit, E., Tabakalı Kompozit Çubuklarda Yanal Yük Etkisi İle Oluşan Burkulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [67] Metin, M., E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.

- [68] Barut, C., Aramid Esaslı Kompozit Malzemelerin Balistik Performanslarının ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2015.
- [69] Topalak, M., Tabakalı Kompozit Levhalarda Cıvata ve Kör Perçinlerin Birleşmeye Olan Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2012.
- [70] Deepa, J. P., Resmi, V. G., Rajan, T. P. D., Pavithran, C., Pai, B. C., Studies on the effect of processing parameters on electroless coating of copper on boron carbide particles. Transactions of the Indian Institute of Metals, 64(1-2): 47-51, 2011.
- [71] Çelebi, C., Bakır Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
- [72] Uzun, D., Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Sermet Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [73] Karabaş, K., Bor Karbür Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [74] Gülfen, M., Kalkopirit Cevherindeki Bakırın Sülfürik Asit Çözeltisinde Çözünürlüğünün İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002.
- [75] http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi133/d133_3444.pdf, Erişim Tarihi: 30.03.2016.
- [76] World Copper Factbook, International Copper Study Group, 2015.
- [77] http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/c0991344c3d760a_ek.pdf, Erişim Tarihi: 30.03.2016.

ÖZGEÇMİŞ

Mecit Karadağ, 25.04.1988 tarihinde Bilecik’te doğdu. Osmaneli Balaban İlköğretim Okulunu, Adapazarı Mithatpaşa Şükrü Ayna Süper Lisesini bitirdi. 2010 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrencisidir. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.