

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



**ÜRETİM PARAMETERLERİNİN BAKIR MATRİSLİ
BORKARBÜR TAKVİYELİ SOĞUK PRESLENMİŞ VE
SİNTERLENMİŞ MALZEMELERDE HADDELEME İŞLEMİ
ÖNCESİNDEKİ VE SONRASINDAKİ ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

HASAN S. İBR ENBIA

DOKTORA TEZİ

DR. ÖĞR.ÜYESİ. ÖZKAN ESKİ

HAZİRAN - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

HASAN S. IBR ENBIA TARAFINDAN HAZIRLANAN tarafından hazırlanan “**ÜRETİM PARAMETERLERİNİN BAKIR MATRİSLİ BORKARBÜR TAKVİYELİ SOĞUK PRESLENMİŞ VE SİNERLENMİŞ MALZEMELERDE HADDELEME İŞLEMİ ÖNCESİNDEKİ VE SONRASINDAKİ ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **26.06.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

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

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

Enstitü Müdürü Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ

TAAHHÜTNAME

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

HASAN S. İBR ENBIA

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÜRETİM PARAMETERLERİNİN BAKIR MATRİSLİ BORKARBÜR TAKVİYELİ SOĞUK PRESLENMİŞ VE SİNERLENMİŞ MALZEMELERDE HADDELEME İŞLEMİ ÖNCESİNDEKİ VE SONRASINDAKİ ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

HASAN S. İBR ENBIA

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZKAN ESKİ

Bu çalışmada, 40µm parçacık boyutunda ve %99,9 saflıkta bakır tozunun yanı sıra 25µm, 43µm ve 90µm parçacık boyutunda ve %97,5 saflıkta B₄C takviye tozu kullanılmıştır. Cu/B₄C kompozitleri, 40 MPa basınçta soğuk presleme ve argon gazı (Ar) atmosferinde 850°C karıştırma sıcaklığında 90 dakika süreyle sinterleme yoluyla üretilmiştir. Numuneler toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. B₄C toz oranları (ağırlıkça %5, 10, 15) Cu tozu ile birleştirilmiştir. Numunelere farklı sıcaklıklarda (600°C, 700°C, 800°C) ve haddeleme oranlarında (%10, %20, %30, %40) sıcak haddeleme işlemi uygulanmıştır. Tüm numuneler sıcak haddeleme işleminden önce ve sonra değerlendirilmiştir. Daha sonra sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üretim faktörlerinin sonuçları nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla görüntü almak için optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskopları (SEM), enerji dağılımlı spektroskopi (EDS), XRD ve EDS haritalama analizi kullanıldı. Optimum mekanik özellikler 25 µm tane boyutunda ve ağırlıkça %5 oranında B₄C içeren kompozit yapıda elde edilmiştir. Bu koşullar hem haddelenmiş hem de haddelenmemiş numuneler için farklı sıcaklıklarda (600°C, 700°C, 800°C) ve haddeleme oranlarında (%10, %20, %30, %40) uygulanmıştır. Bu araştırma, bu konuda yapılan sınırlı sayıdaki araştırmalardan biridir.

ANAHTAR KELİMELEER: Sıcak haddeleme, Bakır matrisli kompozitler (CMC'ler), bor karbür (B₄C)

Haziran 2024, 123 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

INVESTIGATION OF EFFECT OF MANUFACTURING PARAMETRES ON PROPERTIES OF COPPER MATRIX BORON CARBIDE REINFORCED COLD PRESSED AND SINTERED MATERIALS BEFORE AND AFTER ROLLING PROCESS

HASAN S. IBR ENBIA

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. ÖZKAN ESKİ**

This study utilizes the use of copper powder with a particle size of 40 μ m and a purity of 99,9%, as well as B₄C reinforcement powder with particle sizes of 25 μ m, 43 μ m, and 90 μ m and a purity of 97,5%. The Cu/B₄C composites were produced by cold pressing at a pressure of 40 MPa and sintering in an argon gas (Ar) atmosphere at a stirring temperature of 850°C for 90 minutes. The samples were produced using the powder metallurgy (P/M) method. The B₄C powder at various rates (5, 10, 15 wt. %) was combined with Cu powder. The specimens were exposed to hot rolling at different temperatures (600°C, 700°C, 800°C) and rolling ratios (10%, 20%, 30%, 40%). The hardness, density, porosity, and transverse rupture strength of all samples were assessed before and after the hot-rolling process. The results were then compared. Optical microscopes (OM), scanning electron microscopes (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), XRD, and EDS mapping analysis were used to take images in order to determine how the manufacturing factors affected the results. The optimal hot rolling conditions for achieving optimal mechanical behavior in the compound involved using a B₄C grain size of 25 μ m and a 5% B₄C in the composite. These conditions were applied at different temperatures (600°C, 700°C, 800°C) and rolling ratios (10%, 20%, 30%, 40%) for both the rolled and original samples. This study is among a limited number of investigations conducted on this particular subject.

KEYWORDS: Hot rolling, Copper, Metal Matrix Composites (MMCs), Boron Carbide (B₄C)

June 2024, 123 Page

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tezim boyunca bana yol gösteren ve her türlü desteği ve imkânı sağlayarak değerli bilgilerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özkan ESKİ 'ye, haddeleme işlemlerinin yapılmasında büyük emekleri ve destekleri olan Doç.Dr.Harun ÇUĞ'a, tezimin hazırlanması sürecinde görüş ve önerilerini paylaşan tez ileme komitesi üyeleri Prof.Dr. Serkan Islak ve Doç.Dr. Temel Kan Bakır'a teşekkür ederim. Son olarak, eğitim aldığım yıllar boyunca ve bu tezi araştırırken, yazarken bana sonsuz destek ve sürekli cesaret verdikleri için aileme şükranlarımı sunarım. Onların desteği olmadan bu başarı mümkün olamazdı.

HASAN S. IBR ENBIA

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMA.....	3
3. KURUMSAL TEMELLER	12
3.1 Kompozit Malzemeler	12
3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	13
3.2.1 Kompozitlerin Matris Yapısı	13
3.2.1.1 Metal matrisli kompozitler	13
3.2.1.2 Polimer matrisli kompozitler.....	14
3.2.1.3 Seramik matrisli kompozitler	14
3.2.2 Kompozitlerin Takviyelerine Göre Sınıfları	15
3.2.2.1 Fiber takviyeli kompozitler	15
3.2.2.2 Partikül takviyeli kompozitler.....	16
3.2.2.3 Tabaka takviyeli kompozitler.....	16
3.3 Kompozit Malzemelerin Önemi	16
3.4 Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları	17
3.5 Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	17
3.5.1 Matris	18
3.5.2 Metal Matrisli Kompozit Takviyesi.....	19
3.5.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması.....	23
3.5.3.1 Bakır esaslı kompozitler.....	23
3.5.3.2 Alüminyum esaslı kompozitler	23
3.5.3.3 Magnezyum esaslı kompozitler.....	24
3.5.3.4 Titanyum esaslı kompozitler	24
3.5.4 Metal Matrisli Kompozitlerin İşlenmesi.....	24
3.6 Toz Metalurjisi	25
3.6.1 Toz Karıştırma	26
3.6.2 Toz Sıkıştırma.....	27
3.6.3 Sinterleme	28
3.6.3.1 Sinterleme aşaması.....	30
3.6.3.2 Sinterleme tipleri.....	31
3.6.3.3 Sinterleme tekniği	33
3.7 Bakır.....	33
3.7.1 Bakır Alaşımli Türler.....	34
3.7.2 Bakırın Mekanik, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	35

3.7.3	Bakır Uygulamaları.....	36
3.8	Bor Karbür (B_4C).....	37
3.8.1	Bor Karbürün Özellikleri	37
3.8.2	Bor Karbürün Kristal Yapısı.....	38
3.8.3	Bor Karbürün (B_4C) Kullanım Alanları.....	40
3.8.3.1	Sertliğe dayalı kullanım	40
3.8.3.2	Nükleer teknolojide kullanım.....	40
3.8.3.3	Kimyasal kullanımlar	40
3.8.3.4	Refrakterlerde kullanım	40
3.9	Haddeleme İşlemi	40
3.9.1	Haddeleme İşleminin İlkeleri.....	41
3.9.2	Haddeleme İşleminin Türleri	42
3.9.2.1	Sıcak haddeleme.....	42
3.9.2.2	Soğuk haddeleme	43
3.9.2.3	Sıcak ve soğuk haddelemenin karşılaştırılması.....	44
3.9.2.4	Haddeleme düzeni	44
3.9.3	Haddeleme Makinesi Türleri	45
3.9.3.1	İki merdaneli haddeleme makinesi.....	45
3.9.3.2	Üç merdaneli haddeleme makinesi	45
3.9.3.3	Dört merdaneli haddeleme makinesi.....	46
3.9.3.4	Altılı soğuk hadde	46
3.9.3.5	Metal haddelemede tane yapısı	46
3.9.3.6	Haddeleme kusurları	47
3.9.3.7	Yüzey kusurları	47
3.9.3.8	İç yapısal kusurlar	48
3.9.4	Yeniden Kristalleşme.....	50
3.9.5	Bakırın Isıl İşlemi	51
3.9.5.1	Bakır için ısı işlem süreçleri.....	52
3.9.5.2	Isıl işlemlerin bakırın özelliklerine etkisi.....	54
3.9.5.3	Isıl işlem görmüş bakırın uygulama alanları	55
3.9.5.4	Düşük sıcaklıklarda sertleşme mekanizmaları	55
3.9.5.5	Yüksek sıcaklıklarda sertleşme mekanizmaları	55
3.9.5.6	Kristalleşme süresi ve sıcaklık arasındaki ilişki.....	57
3.9.6	Haddeleme İşlemlerinin Kompozit Malzemelere Uygulanması.....	58
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
4.1	Numunelerin Hazırlanması	60
4.1.1	Hammaddeler ve Kompozit Üretimi.....	60
4.1.2	Numune Boyutu	62
4.1.3	Presleme İşlemi.....	62
4.1.4	Sinterleme İşlemi	63
4.1.5	Haddeleme İşlemi	64
4.2	Karakterizasyon Teknikleri.....	65
4.2.1	Yoğunluk Ölçümleri	66
4.2.2	XRD Analizi	66
4.2.3	Mikroyapı Analizi.....	67
4.2.3.1	Optik mikroskopi	67
4.2.3.2	Taramalı elektron mikroskopu (SEM-EDS)	68
4.2.4	Mekanik Karakterizasyon	68
4.2.4.1	Sertlik testi	68

4.2.4.2 Üç nokta eğme testi.....	69
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	70
5.1 Optik Mikroskop Analizi	70
5.1.1 25µm Tane Boyutundaki B ₄ C İle Takviye Edilmiş Haddelenmemiş Numunelerin Mikroyapısı.....	70
5.1.2 25µm Tane Boyutundaki B ₄ C İle Takviye Edilmiş Haddelenmiş Numunelerin Mikroyapısı.....	71
5.1.3 25µm Tane Boyutundaki B ₄ C İle Takviye Edilmiş ve Farklı Haddelenme Sıcaklıklarında Haddelenmiş Numunelerin Mikroyapısı.....	72
5.1.4 25µm Boyutunda B ₄ C ile Takviye Edilmiş ve Farklı Haddelenme Oranlarında Haddelenmiş Numunelerin mikroyapısı	74
5.2 XRD (X-ışını Kırınımı) Analizi.....	75
5.3 Haritalama.....	76
5.4 Yoğunluk Ölçümü.....	76
5.4.1 Haddelenmemiş Numuneler İçin Yoğunluk ve Gözeneklilik.....	77
5.4.2 Gözeneklilik, Sertlik, Çapraz Kırılma Dayanımı Sonuçları	79
5.4.2.1 Haddelenmemiş numuneler için gözeneklilik.....	79
5.4.2.2 Haddelenmemiş numunelerin sertlik değerleri.....	81
5.4.2.3 Haddelenmemiş numunelerin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri	82
5.4.3 Haddelenen Numuneler İçin Gözeneklilik	83
5.4.3.1 25µm tane boyutundaki B ₄ C içeren haddelenmiş numuneler için gözeneklilik.....	84
5.4.3.2 43µm tane boyutundaki B ₄ C içeren haddelenmiş numuneler için gözeneklilik değerleri.....	85
5.4.3.3 90µm tane boyutundaki B ₄ C içeren haddelenmiş numuneler için gözeneklilik değerleri.....	86
5.5 Sertlik Testi Sonuçları.....	87
5.5.1 Haddelenen Numuneler için Sertlik Değerleri	88
5.5.1.1 25µm tane boyutuna sahip B ₄ C içeren haddelenen numuneler için sertlik değerleri	88
5.5.1.2 43µm tane boyutuna sahip B ₄ C içeren haddelenen numuneler için sertlik değerleri	90
5.5.1.3 90µm tane boyutuna sahip B ₄ C içeren haddelenen numuneler için sertlik.....	91
5.6 Çapraz Kırılma Dayanımı (ÇKD).....	92
5.6.1. Tane boyutu 25µm B ₄ C içeren haddelenmiş numuneler için çapraz kırılma dayanımı.....	93
5.6.2. 43µm tane boyutuna sahip B ₄ C içeren haddelenmiş numuneler için çapraz kırılma dayanımı.....	95
Şekil 5.20, 43µm tane boyutuna sahip farklı oranlarda B ₄ C içeren farklı sıcaklıklarda haddelenmiş numuneler için çapraz kırılma dayanımı değerlerini göstermektedir. Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
5.6.1.1 Tane boyutu 90µm olan B ₄ C ile takviye edilmiş ve haddelenmiş için haddelenmiş numunelerden elde edilen ÇKD	96
5.7 SEM-EDS Sonuçları	97

5.7.1 SEM-ESD Kırılma Yüzeyi	97
5.7.1.1 25µm tane boyutundaki B ₄ C ile takviye edilmiş numuneler için için SEM-ESD kırılma yüzeyi	97
5.7.1.2 B ₄ C 43µm için SEM-ESD kırılma yüzeyi	100
5.7.1.3 B ₄ C 90µm için SEM-ESD kırılma yüzeyi	102
5.7.2 Numunelerin Yüzey SEM Analizi	105
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ.....	123



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Matris ve takviye elemanına göre kompozitler.....	13
Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları	17
Şekil 3.3 Toz Metalürji İşleminin Üretimi.....	26
Şekil 3.4 TM ile üretilen parçaların otomobil içinde dağılımı.....	26
Şekil 3.5 Turbula mikser	27
Şekil 3.6 Sıkıştırma işlemi	28
Şekil 3.7 Sinterleme sırasında gözenek yapısının değişimi	30
Şekil 3.8 İki küreli model ile sinterleme sırasında parçacıklar arası bağların oluşumu.....	32
Şekil 3.9 Sıvı faz sinterleme işleminin şematik gösterimi	32
Şekil 3.10 Bakır kafes (YMK)	34
Şekil 3.11 Bakır alaşımlarının kullanım alanları.....	36
Şekil 3.12 B ₄ C'nin kristal yapısı.....	39
Şekil 3.13 B-C faz diyagramı.....	39
Şekil 3.14 Haddeleme işleminin temelleri	41
Şekil 3.15 Sıcak haddelemede tane dizilimi düşünülmektedir.....	43
Şekil 3.16 Soğuk haddelemede tane dizilimi	43
Şekil 3.17 Çeşitli haddeleme düzenlemeleri	46
Şekil 3.18 (a) Soğuk işlem görmüş (b) Toparlanma sonrası (c) Yeniden kristalleşme sonrası (d) Tane büyümesi sonrası	47
Şekil 3.19 Haddeleme kusurları	48
Şekil 3.20 Sıcak haddeleme sırasında yeniden kristalleşme	51
Şekil 3.21 Soğuk haddeleme derecesinin saf bakırın tavlama işlemine etkisi	53
Şekil 3.22 Tavlama işlemi şematiği	55
Şekil 3.23 Yeniden kristalleşme, mekanik özellikler ve mikroyapı arasındaki ilişkiler	56
Şekil 3.24 Toparlanma-yeniden kristalleşme-tane büyümesi sıralanmasıyla gerçekleşen olaylarının şematik gösterimi.....	57
Şekil 4.1 (a) Bakır tozlarının (b) Bor karbürün (B ₄ C) SEM-EDS Görüntüleri.....	61
Şekil 4.2 (a) Toz karıştırma makinesi (b) Hassas terazi.....	62
Şekil 4.3 Numunelerin şekli ve boyutları.....	62
Şekil 4.4 Sıkıştırma presi	63
Şekil 4.5 Sinterleme fırını ve grafik sıcaklık döngüsü	64
Şekil 4.6 Haddeleme makinası	64
Şekil 4.7 Zımparalama ve parlatma makinesi	65
Şekil 4.8 Faz analizi tespiti için kullanılan XRD cihazları	67
Şekil 4.9 Optik mikroskop cihazları.....	67
Şekil 4.10 Mikroyapı görüntüleme ve faz analizi cihazları	68
Şekil 4.11 Sertlik ölçüm cihazı	68
Şekil 4.12 Üç nokta eğme testi ve kurulumu için universal çekme testi cihazı	69
Şekil 5.1 X500 büyütmede haddelenmemiş numune B ₄ C 25µm'nin yüzey yapısının optik mikroyapısı	71
Şekil 5.2 X1000 büyütmede 600°C haddeleme sıcaklığında B ₄ C'nin yüzey yapısının mikroyapısı (25µm, ağırlıkça %5)	72

Şekil 5.3 X1000 büyütmede %30 haddeme Oranında B ₄ C'nin yüzey yapısının optik mikroyapısı (25µm, ağırlıkça %5)	73
Şekil 5.4 X1000 büyütmede %30 haddeme oranı ve 600°C haddeme sıcaklığında B ₄ C 25µm'nin yüzey yapısının optik mikroyapısı,	74
Şekil 5.5 B ₄ C 25µm ve ağırlıkça (%5,%10,%15) haddelenmemiş numunelerin XRD analizi	75
Şekil 5.6 B ₄ C 25µm haddelenmemiş numunelerin element haritalama analizi dağılımı	76
Şekil 5.7 B ₄ C 25µm haddelenmemiş numunelerin deneysel yoğunluğu, bağlı yoğunluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişki	78
Şekil 5.8 B ₄ C 43µm haddelenmemiş numunelerin deneysel yoğunluğu, bağlı yoğunluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişki	78
Şekil 5.9 B ₄ C 90µm haddelenmemiş numunelerin deneysel yoğunluğu, bağlı yoğunluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişki	79
Şekil 5.10 25µm tane boyutundaki B ₄ C ile takviye edilmiş haddelenmemiş numunelerin gözeneklilik, sertlik ve ÇKD ilişkisi.....	80
Şekil 5.11 43µm tane boyutundaki B ₄ C ile takviye edilmiş haddelenmemiş numunelerin gözeneklilik, sertlik ve ÇKD ilişkisi.....	80
Şekil 5.12 90µm tane boyutundaki B ₄ C ile takviye edilmiş haddelenmemiş numunelerin gözeneklilik, sertlik ve ÇKD ilişkisi.....	81
Şekil 5.13 Haddelenen numuneler B ₄ C 25µm'in gözenekliliği	84
Şekil 5.14 Haddelenen numuneler B ₄ C 43µm'in gözenekliliği	85
Şekil 5.15 Haddelenen numuneler B ₄ C 90µm'in gözenekliliği	87
Şekil 5.16 B ₄ C 25µm haddelenen numunelerin sertliği	89
Şekil 5.17 B ₄ C 43µm haddelenen numunelerinin sertliği	91
Şekil 5.18 B ₄ C 90µm haddelenen numunelerinin sertliği	92
Şekil 5.19 B ₄ C 25µm haddelenmiş numunelerin ÇKD değeri.....	94
Şekil 5.20 43µm tane boyutunda B ₄ C ile takviye edilmiş numunelerin farklı sıcaklık ve konsantrasyon değerinde haddeme sonrası ÇKD değeri.....	96
Şekil 5.21 B ₄ C 90µm haddelenmiş numunelerin ÇKD değeri.....	97
Şekil 5.22 Ağırlıkça %5 B ₄ C içeren numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntülemesi (a) Haddelenmemiş numune (b) 800°C'de %20 oranında haddelenmiş numune	98
Şekil 5.23 Ağırlıkça %5 B ₄ C'in grafik SEM-EDS verileri (a) Haddelenmemiş numune (b) 800°C haddeme sıcaklığı ve % 20 haddeme oranında haddelenmiş numune	99
Şekil 5.24 Ağırlıkça %5, tane boyutu 43µm B ₄ C numunesinin SEM görüntüleri, (a) Haddelenmemiş numune (b) 800°C Haddeme sıcaklığı ve % 20 haddeme oranında haddelenmiş numune	100
Şekil 5.25 Tane boyutu 43µm B ₄ C numunesinin SEM-EDS verileri (a) Haddelenmemiş numune (b). 800°C haddeme sıcaklığı ve % 20 haddeme oranında haddelenmiş numune	101
Şekil 5.26 90µm tane boyutuna sahip B ₄ C ile takviye edilmiş %5 oranında takviye edilmiş numunenin SEM görüntüleri (a) Haddelenmemiş (b) 800°C'de %20 oranında haddelenmiş	103
Şekil 5.27 Ağırlıkça %5, tane boyutu 90µm B ₄ C haddelenmemiş numunesinin SEM-EDS verileri	104

Şekil 5.28 800°C’de %20 oranında haddelenmiş %5 B ₄ C ihtiva eden numunenin SEM-EDS analizi	105
Şekil 5.29 X500 büyütmede B ₄ C 25µm haddelenmemiş numunenin yüzey yapısı SEM Görüntüsü	106
Şekil 5.30 X500 büyütmede haddeleme sıcaklığı 600°C ağırlıkça %5 B ₄ C 25µm numunesinin yüzey yapısı SEM görüntüleri	107
Şekil 5.31 X500 büyütmede haddeleme oranı %30 ağırlıkça %5 B ₄ C 25µm numunesinin yüzey yapısı SEM görüntüleri	107
Şekil 5.32 X500 büyütmede haddeleme sıcaklığı 600°C, haddeleme oranı %30 B ₄ C 25µm numunesinin yüzey SEM görüntüleri	108



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Kullanılabilecek metal takviye parçacıkları	21
Tablo 3.2 Metal takviyesinde kullanılan çeşitli parçacıkların özellikleri.	21
Tablo 3.3 Bazı kompozit takviye fazın malzemeleri ve uygulamaları.....	22
Tablo 3.4 Bakırın özellikleri	35
Tablo 3.5 Bor karbürün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	38
Tablo 3.6 Sıcak ve soğuk haddelemenin karşılaştırılması bırakır.....	44
Tablo 4.1 Kompozitlerin takviye oranları ve üretim parametreleri	60
Tablo 4.2 Haddelenmiş numunelerin son kalınlığı	65
Tablo 4.3 Tüm numuneler için teorik yoğunluk	66
Tablo 5.1 Haddelenmemiş numunelerin teorik, deneysel yoğunlukları ve gözeneklilikleri	77
Tablo 5.2 Haddelenen numunelerin gözenekliliği	83
Tablo 5.3 Haddelenen numunelerin sertliği	88
Tablo 5.4 Haddelenen numunelerin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
CMMCs	: Bakır Metal Matrisli Kompozitler
PM	: Toz Metalurjisi
IMCs	: Metaller Arası Bileşikler
Cu	: Bakır
B₄C	: Bor karbür
Ar	: Argon
MPa	: Mega Paskal
SPS	: Kıvılcım Plazma Sinterleme
µm	: Mikrometre
XRD	: X-ışını kırınımı
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
KM	: Kompozit Malzeme
ÇKD	: Çapraz Kırılma Dayanımı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
mm	: Milimetre
N	: Newton

1. GİRİŞ

Bor karbür (B_4C), olağanüstü mekanik nitelikler gerektiren uygulamalar için çok umut verici bir malzemedir. Yoğunluğu $2,52 \text{ g/cm}^3$, erime noktası 2450°C , mükemmel aşınma ve korozyon direnci ile 1100°C 'de sabit kalan sertliği ile bu malzeme özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur (Altınsoy vd., 2013). MMK'ler son yıllarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bakır bazlı metal matrisli kompozitlerin sınırlı mukavemeti, çeşitli alanlardaki uygulamalarını kısıtlamaktadır. Seramik parçacıkları kullanılarak, yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikler büyük ölçüde iyileştirilebilir, ancak matrisin elektriksel ve ısı iletkenliği etkilenmez (Sharma vd., 2019). Yüksek iletkenlik, yüksek korozyon direnci ve yüksek mekanik niteliklere olan gereksinimleri nedeniyle, bu malzemeler kullanım için uygundur (Arora vd., 2022; Domnich vd., 2011).

Toz metalurjisi (TM) yöntemi, mühendislik malzemelerinin üretimi alanında giderek daha popüler hale gelmektedir. Toz metalurjisi teknolojisindeki gelişmeler, karmaşık makine bileşenlerinin hızlı üretim oranlarında, yüksek kalitede, düşük boyutsal toleransla ve çeşitli presleme işlemleri kullanılarak uygun maliyetli bir şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır. TM üretim sürecinin doğal bir özelliği, alternatif üretim yöntemleri kullanılarak imal edilmesi zor olan malzemeleri üretme kabiliyetidir (Schneider vd., 2005). Toz metalurjisi (TM) yöntemi, metal tozlarının bir kalıp içinde sıkıştırılması, toz parçacıklarının birbirine kaynaştırılması ve ardından sıkıştırılmış malzemenin sinterlemeye tabi tutulması gibi ardışık süreçleri içerir. Bu yaklaşım, presleme, sinterleme veya sıcak presleme işlemleriyle çeşitli malzemelerin üretimini içerir (Banchhor ve Sahu, 2016; Grum, 2006).

Matris-takviye parçacık boyutu oranı (PSR), toz metalürjisi ile üretilen kompozitlerde takviye parçacıklarının ne kadar eşit dağıldığını belirleyen en önemli faktördür. Daha büyük bir ortalama parçacık boyutu ile karakterize edilen takviyelerin kullanılması, dağılımın homojenliğini artıracaktır. Takviye parçacıklarının boyutu büyüdükçe, sertleşmenin azalması ve hasar oluşumunun hızlanması nedeniyle mekanik özelliklerde bozulma gözlenir. Optimum performans için, daha küçük takviye parçacık

boyutları ile daha düzgün bir uzamsal dağılım arasında bir denge sağlayarak mikroyapıyı iyileştirmek zorunludur (Domnich vd., 2011).

Bu tez, haddeleme sıcaklığı ve haddeleme oranının bir Cu/B₄C kompozitinin sertliği ve çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) üzerindeki etkisinin yanı sıra mikro yapısı ve mekanik özelliklerini araştıracaktır. Tüm deneylerde soğuk presleme ve sinterleme ile üretilen numuneler kullanılmıştır. Numunelerin mikroyapısını ve faz bileşenlerini belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Sertlik testleri gerçekleştirilmiş ve ÇKD'yi ölçmek için üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Bununla birlikte, bildiğimiz kadarıyla, Bakır matrisli kompozitler(CMMC-Copper Metal Matrix Composites) için optimum sıcak haddeleme parametreleri henüz incelenmemiştir. Çalışma sonunda elde edilen veriler toplanarak genel değerlendirmeye alınmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMA

Bu bölümde, toz metalurjisi kullanılarak üretilen seramiklerle güçlendirilmiş metal bazlı matris alaşımlarının üretilmesi ve araştırılmasına ilişkin daha önce yapılmış araştırma çalışmaları sunulmaktadır.

Abdullah vd. (2012), %5 ve %10 takviye içeriğine sahip Al/B₄C kompozitlerinin hazırlanmasını ve fiziksel ile mekanik özelliklerini araştırmıştır. Düşük toz yüklemeli hammadde üretmek için, en iyi parçacık paketlemesini belirlemek amacıyla ince tozlar içeren B₄C karışımlarını incelemiştir. Test bulguları, ağırlıkça %5, 10 parçacık içeren ince parçacıkların iyi akış kabiliyetine sahip hammadde üretebileceğini göstermiştir. Toz metalurjisi ile üretilen kompozitler, düşük yoğunluklara ve homojen mikroyapısal özelliklere sahiptir. Ayrıca, XRD incelemesi takviye ve matris arasında temas etkileşimi olmadığını ortaya koymuştur. Toz metalurjisi ile mükemmel sertliğe sahip Al/B₄C kompozitleri üretilmiştir.

Shukla vd. (2013), kalınlığı %90 oranında azaltılmış sıcak haddelemenin, vakumla sıcak preslenmiş ayırık sertleşmiş Cu-Cr-Nb alaşımlarının ortam ve yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Vakumla sıcak preslenmiş numuneler, alaşım parçacıklarının birleştirilmesiyle üretilmiştir. Sıcak preslenmiş ve sıcak haddelenmiş numunelerin mekanik özellikleri hem ortam hem de yüksek sıcaklıklarda incelenmiştir. Sıcak haddelenmiş ve sıcak preslenmiş malzemeler eşdeğer mukavemete sahip olsa da sıcak haddelenmiş numunenin yüksek sıcaklıktaki sünekliği sıcak preslenmiş alaşıma kıyasla önemli ölçüde iyileşmiştir. Bu, sinterlenmiş malzemelerin önceki parçacık sınır ağının parçalanmasının yanı sıra sıcak haddeleme sırasında gözenek boyutunda ve gözeneklilikte görülen azalma ile ilgilidir.

Altınsoy vd. (2013), soğuk preslenmiş Cu/B₄C kompozitlerinin özelliklerini araştırmıştır. Ticari bakır tozlarına (40µm), mekanik özellikleri ve elektriksel iletkenliğini artırmak için ağırlıkça %0, 1, 2, 3 oranında B₄C (40µm) ilave edilmiştir. Cu/B₄C kompozitler TM işlemi kullanılarak üretilmiş, 700°C’de 2 saat açık ortamda sinterlenmiş ve ardından soğuk preslenmiştir. X-ışını kırınım yöntemi ve SEM-EDS analiz yönteminin her ikisi de sinterlenmiş bileşiklerin temel bileşenler olan Cu ve B₄C

içerdiğini göstermiştir. Elektron mikroskobu (SEM-EDS), B₄C moleküllerinin Cu matrisi içinde homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymuştur. 700°C’de sinterlenen Cu ve Cu/B₄C bileşiklerinin bağıl yoğunluğu %97,5 ile %90,19 arasında değişmiştir. Bileşiklerin nihai sertliği 80,65 ila 87,5 HB arasında değişirken, elektriksel iletkenlikleri %90,04 ila %68,87 IACS arasında değişmiştir. Soğuk preslenmiş bakır (ağırlıkça %1 B₄C bileşikleri) umut verici fiziksel özellikler sergilemiştir.

Ibrahim vd. (2014), %15 B₄C parçacıklarını içeren üç alüminyum metal matrisli kompoziti (MMK) araştırmış ve test etmiştir. Bu malzemelerden ikisinin matrisi saf alüminyum iken, üçüncü maddenin matrisi deneysel bir 6063 alüminyum alaşımıdır. Tüm kompozitler ılık suda soğutulmadan önce 48 saat boyunca yüksek sıcaklıklarda homojenize edilmiştir. Su verilmiş numuneler 25°C ila 400°C arasında değişen sıcaklıklarda 10 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Yaşlandırılmış MMK’ler sertlik ve çekme testlerine tabi tutulmuş ve Zr’nin (Ti ile veya Ti olmadan) ilave edilmesinin Zr bakımından zengin bir faz oluşturarak sertliklerini artırdığı ortaya çıkmıştır. Mg₂Si faz parçacıklarının çökmesi, 6063 esaslı MMK’nin maksimum mukavemetlenmesiyle sonuçlanmıştır. İncelenen MMK’lerin üretimi için mevcut prosedür, matris ve parçacıklar arasında güçlü bir bağlantının yanı sıra matris içinde düzgün bir B₄C dağılımına sahip kompozitlerle sonuçlanmıştır. MMK numuneleri bozulana kadar deforme edildiğinde, B₄C matristen ayrılmadan granüler olarak parçalanmıştır. Zr ve Ti’nin dahil edilmesi, kırılmadan sonra korunan B₄C parçacıklarını çevreleyen koruyucu tabakaların oluşmasına neden olmuştur. Bu koruyucu tabakalar B₄C parçacık boyutundan (15-20µm) etkilenmemiştir. Çatlamış Al 6063/B₄C/15p numunelerinde sıklıkla istifleme hataları görülmüştür. Yaşlanma sırasında zirkonyum-titanyum bileşiklerinin çökmesi kompozit dayanımını artırmıştır.

Yener vd. (2015), soğuk preslenmiş Cu/B₄C kompozitlerinde B₄C oranlarının bağıl yoğunluk, mikro sertlik ve elektriksel özellikler gibi mekanik ve fiziksel parametreler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elektriksel iletkenliği tahmin etmek için eğri uydurma kullanılmıştır. Bir elektrik iletkeni olarak bakırın mekanik özelliklerini geliştirmek için, 40µm parçacık boyutuna sahip ticari bakır tozları ağırlıkça %1,2 ve 3 oranlarında B₄C ile takviye edilmiştir. Cu/B₄C kompozitleri 900°C’de 2 saat süreyle

toz sinterleme tekniği kullanılarak üretilmiştir. X-ışını kırınım analizi ve SEM-EDS, sinterlenmiş kompozitlerin birincil bileşenler olan Cu ve B₄C içerdiğini doğrulamıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), B₄C parçacıklarının bakır matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını ortaya koymuştur. 900°C’de sinterlenen Cu ve Cu/B₄C kompozitlerinin bağıl yoğunlukları %95,7 ile %91,6 arasındadır. Kompozitlerin mikro sertliği 84,5 ile 94,6 HB arasında değişmiştir. Soğuk preslenmiş Cu- ağırlıkça % 1B₄C kompozitlerinin umut verici fiziksel özelliklere sahip olduğu keşfedilmiştir. Cu/B₄C kompozit malzemenin elektriksel iletkenlik ölçümü, modelin bulgularıyla karşılaştırılmış ve %96’nın üzerinde bir genel doğruluk seviyesine ulaşılmıştır.

Öksüz ve Şahin (2016), tarafından yapılan çalışmada, bakır matris, TM tekniği ile Al₂O₃ ve B₄C parçacıkları gibi seramiklerle takviye edilmiştir. Bakır matrisin mikroyapısını incelemek için SEM ve EDS kullanılmıştır. Mikroyapı, matriste tutarlı bir parçacık dağılımının yanı sıra B₄C parçacıkları ile matris arasında güçlü bir bağlanma teması olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, daha büyük Al₂O₃ parçacıklarının dağılımı, kompozitlerde gözenekliliğe ve antiparçacık etkileşimlerine neden olmuştur. Sonuç olarak, B₄C parçacık takviyeli bileşikler, Al₂O₃ parçacık takviyeli bileşiklerden çok daha fazla sertliğe sahiptir. Al₂O₃-Cu ve Cu/B₄C matris esaslı kompozitler, ortalama 45µm parçacık boyutuna ve %99,5 saflığa sahip ticari Cu tozları kullanılarak TM işlemi ile elde edilmiştir. Kompozitler, 10µm parçacık boyutuna ve %99+ saflığa sahip B₄C ve Al₂O₃ tozları kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozitler yaklaşık %10 hacim yüzdesi (hacimce %) parçacık içermektedir. Toz kombinasyonu üzerinde tek eksenli soğuk sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Malzemeler kademeli olarak 880 °C’ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1,5 saat bekletilmiştir. Kesiti alınan numuneler SEM kullanılarak analiz edilmiştir. Kompozitlerin yoğunluğu Arşimet prensibi ile belirlemiştir.

Jain vd. (2016), TM tekniği kullanılarak üretilen ve 590°C’de 9 saat boyunca vakumlu fırında sinterlenen çeşitli oranlarda B₄C (ağırlıkça %2, 4, 6, 8, 10, 12) takviyeli alüminyum ve bakır MMK’leri incelemiştir. Üretilen bileşiklerin mekanik özellikleri onlar için ayırt edicidir. Yüzde ağırlık oranı arttıkça MMK’nin yoğunluğu düşmektedir. Sertlik B₄C parçacıklarının ağırlık oranına bağlı olarak artmıştır. Çekme

dayanımı ve basma dayanımı değerleri, B₄C' nin ağırlık oranındaki artışla %10 değerine kadar artmış, %10'dan yüksek B₄C oranları için düşme görülmüştür.

Mansourzadeh vd. (2016), birikimli hadde bağı (ARB) kullanılarak yapılan Cu/B₄C metal matrisli kompozitleri üzerinde çalışmıştır. Kompozitler, beş Cu alaşım şeridinin asetonla yağdan arındırılması ve çiziklerle kabartılmasıyla yapılmış, ardından 1 mm kalınlık oluşturmak için üst üste yığılmıştır. İkinci adımda kalınlık %50 azaltılmış ve altı döngü ARB ile işlenmiş Cu/B₄C kompozitleri elde edilmiştir. İşlenmiş numunelerin mikroyapısı TEM, SEM ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, ARB döngülerinin sayısının arttıkça takviyelerin daha eşit bir şekilde dağıldığını ve kompozit matris içinde çok küçük taneli bir yapı oluştuğunu göstermiştir. Monolitik Cu numunelerinin mikrosertliği ve çekme dayanımı artan ARB döngüleri ile artmış, ancak kompozitlerin dayanım son döngüye kadar azalmıştır. Kompozitler mekanik özelliklerini iyileştirmelerine rağmen, altı döngüden sonra elektrik iletme kabiliyetlerinde hafif bir düşüş yaşamışlardır.

Eski vd. (2017), bor karbür B₄C eklendiğinde Cu/B₄C kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişiklikleri araştırmıştır. Mikroyapı sertliği ve yoğunluğunu incelemiştir. Ticari bakır tozlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için ağırlıkça %2,5; 5; 7,5 ve 10 oranında 40µm B₄C eklenmiştir. Cu/B₄C bileşikleri argon ortamında 650°C, 750°C ve 850°C'de dört dakika süreyle sinterlenmiştir. Sinterlenmiş ürünlerin elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüş, optik mikroskop, X-ışını kırınım analizleri ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. B₄C'nin Cu matrisi içinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. B₄C oranı arttıkça, bileşiklerin sertliği artmış, ancak yoğunluk düşmüştür.

Khademian vd. (2017), A356 alüminyum alaşımı ile ağırlıkça %3 B₄C kompozit üretmek için karıştırmalı döküm sürecini araştırmışlardır. 750°C, 850°C ve 950°C'lik sıcaklıklarda ve 10, 15, 20 dakikalık karıştırma sürelerinde üretilen kompozitlerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Mekanik nitelikleri artırmak ve mikroyapısal özellikleri değiştirmek için deformasyon işlemleri olarak sıcak ekstrüzyon ve sıcak haddeleme kullanılmışlardır. Sabit bir karıştırma süresinde dökme sıcaklığının artmasının mekanik özellikleri önce iyileştirdiği ve daha sonra

kötüleştirdiği gözlemlenmiştir. Sabit bir sıcaklıkta, nihai gerilme dayanım ve karıştırma süresi benzer bir eğilim izlemiştir. 15 dakikalık karıştırma süresi ve 850°C dökme sıcaklığının en iyi parametreler olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel sonuçlar ısı deformasyon işlemlerinin gözenek boyutunu iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, ısı deformasyon prosedürleri sırasında, takviye fazının dağılımı ayarlanmış ve bu da gelişmiş mekanik özelliklerle sonuçlanmıştır.

Sheng Chen vd. (2018), değişen hacim oranlarında (%0-15) B₄C parçacıklarını içeren bakır matrisli kompozitler önce kıvılcım plazma sinterleme ile üretilmiş ve ardından atmosferik koşullarda sıcak haddelenmiş ve mikroyapıları, faz bileşimleri, mekanik özellikleri ve sinterleme mekanizmalarını incelemiştir. B₄C parçacıklarının bakır matris içinde oldukça eşit bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Kompozitte Cu₂O ve B reaksiyon ürünleri tespit edilmiştir. B₄C parçacık konsantrasyonu arttıkça kompozitlerin nihai çekme dayanımı, akma dayanımı ve kırılma uzaması azalmıştır. Kompozit başarısızlık mekanizmaları arasında arayüzey ayrışması ve - bakır yarılmaya kırıkları yer almıştır. Ayrıca, yakın parçacıklar arasında mikro deşarj meydana gelmiş ve bu da arayüzeyde yüksek bir sıcaklığa neden olmuştur.

Sankar vd., 2018, toz metalürjisinden üretilen ve B₄C ve ezilmiş deniz kabuğu parçacığı takviyeli bakır metal matrisli kompozitlerin(CMMC) mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmıştır. B₄C, üstün tokluk ve aşınma direncine sahip, bilinen en sert üçüncü malzemedir. Deniz kabuklarına kıyı bölgelerinde kolayca erişilebilir. Sonuç olarak, bu çalışmada TM'de uygulanma olasılığı araştırılmaya çalışılmıştır. İki ayrı numune serisi üretilmiştir. Her iki seriden sinterlenmiş numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu, takviyelerin eşit olarak dağılıp dağılmadığını belirlemek için sınırlandırılmıştır. Üretilen tüm numuneler mikrosertlik ve aşınma direnci açısından test edilmiştir. Sonuçlar, %10 bor karbürü %2 deniz kabuğu tozu (ağırlıkça) ilavesinin kompozitin aşınma direncini ve sertliğini artırdığını ortaya koymuştur.

Somani vd. (2018), 'na göre, bakır bazlı metal matrisli kompozitler, üstün elektriksel, ısı ve mekanik özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalar için caziptir. Çeşitli bileşimlerde Cu/SiC kompozitleri üretmek için toz metalurjisi kullanmışlardır. Üç

farklı hacimsel kombinasyon %90 Cu/%10 SiC %85 Cu. Biz %15 SiC, %80 Cu, %20 SiC, %100 Cu kullanmışlardır. Tozu birleştirmek için V şeklinde bir karıştırıcı kullanıldı. Sağlam bir temel elde etmek için toz, 250 MPa basınçta bir hidrolik pres kullanılarak sıkıştırıldı. Daha iyi sonuçlar elde etmek için sinterleme işlemi 950°C’de 60 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Çalışma, bakır esaslı metal matrisli kompozitlerin özelliklerine odaklanmıştır. Cu’da takviye olarak SiC araştırılmıştır. Sinterlenmiş numunelerin morfolojik yüzeyinin yanı sıra kompozitin mikroyapısını incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroyapısal inceleme, Cu ve SiC parçacıkları arasında mükemmel bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Sertlik değeri ve nihai çekme dayanımı, Cu ve SiC parçacıklarının mükemmel arayüzü nedeniyle SiC konsantrasyonu ile artmaktadır. Yoğunluk, Cu’nun SiC’den daha yüksek yoğunluğu nedeniyle en yüksek yoğunluğa sahip saf Cu numuneleri ile ters bir model izler.

Zhang vd. (2019), bakır matrisli kompozitlere grafit ve bor karbür (B₄C) parçacıkları eklemek için toz metalurjisinin nasıl kullanılabileceğini araştırarak hem güçlendirilmiş hem de yağlandırılmış yeni bir sistem oluşturmuştur. Çeşitli B₄C parçacık konsantrasyonlarının kompozit özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. B₄C parçacık içeriğinin bakır matris/grafit kendinden yağlamalı kompozit malzemelerin mikroyapısı, yoğunluğu, gözenekliliği, Vickers sertliği, basınç dayanımı, sürtünme ve aşınma özellikleri üzerindeki etkileri, katı yağlama fazı olarak ağırlıkça %2 grafit tozu eklenerek araştırılmıştır. Bulgular, daha fazla B₄C parçacığı eklemenin faydalı olduğunu göstermektedir. Kompozitler yoğunluk, Vickers sertliği, sıkıştırma dayanımı, sürtünme ve aşınmada önemli artışlar göstermiştir. B₄C parçacıklarının fazlalığı gözenekliliği artırmıştır. Metal matrisin sürekliliği, B₄C parçacıkları tarafından bölünür. Bu durum kompozit malzemenin yoğunluğunu, sertliğini, sıkıştırılabilirliğini ve aşınma direncini azaltır. Ağırlıkça %1,5 B₄C içeren malzemeler, incelenen kompozitler arasında en iyi sürtünme ve aşınma direnci özelliklerine sahip olmuştur.

Chaira ve Prajapati (2019), çalışmasında, ağırlıkça %5, 10, 15 B₄C içeren Cu/B₄C kompozitlerini soğuk toz sıkıştırma ve argon ortamında 1 saat boyunca 900°C’de geleneksel sinterleme kullanarak üretmiştir. Kompozitler X-ışını kırınımı, optik

mikroskopi ve alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak değerlendirilmiştir. Mikroskobik incelemeler, B₄C parçacıklarının bakır matris içinde eşit olarak dağıldığını ve B₄C ile Cu arasında yüksek uyumluluk olduğunu ortaya koymuştur. FESEM ile incelenen mikroyapı, Cu matrisi ile B₄C arasındaki arayüzeyin temiz olduğunu ve arayüzey ürünü oluşmadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca B₄C parçacıklarının ve ağırlık fraksiyonlarının mikroyapı, mekanik özellikler ve elektriksel iletkenliği üzerindeki etkisini de araştırılmıştır. Vickers sertlik değeri, Cu matrisindeki bor karbürün ağırlık yüzdesi ile artmıştır. Saf bakırın sertliği Cu- ağırlıkça %15 B₄C metal matrisli kompozit (MMK) için 38 VHN'den 79 VHN'ye yükselmiştir. Cu- ağırlıkça %5 B₄C MMK maksimum %82 bağıl yoğunluğa sahiptir. 315 MPa değerindeki en yüksek basınç dayanımı Cu- ağırlıkça %15 B₄C MMKte elde edilmiştir. Saf Cu $4,5 \times 10^6$ S/m elektriksel iletkenliğe sahiptir ve bu değer Cu- ağırlıkça %5 B₄C, Cu- ağırlıkça %10 B₄C ve Cu- ağırlıkça %15 B₄C MMK'ler için sırasıyla $1,92 \times 10^6$; $0,75 \times 10^6$ ve $0,32 \times 10^6$ S/m'ye düşmüştür.

Eski (2021), çalışmalarında, silisyum karbür takviyeli bakır esaslı bir kompozit matriste difüzyon kaynağını araştırmayı araştırmıştır. Bakır alaşımına hacimce %5, %10, %15 SiC gibi çeşitli miktarlarda silisyum karbür eklenmesi dayanımını artırmıştır. Alaşım, 350 MPa basınçta tek yönde soğuk preslenerek ve 45 dakika boyunca 800°C'de sinterlenerek üretilmiştir. Endüstrinin bakır bazlı malzemelerden daha fazla yararlanması için, argon ortamında 2 MPa basınç altında 800°C ve 850°C sıcaklıklarda 30, 45, 60 dakikalık difüzyon sürelerinde difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş SiC kompozitlerin sertliği artan takviye ile artmış, ancak %10'un sonra düşmüştür. Kaynak prosedürlerini takiben sertlikteki değişim, kaynak sıcaklığı ve süresine bağlı olarak paralellik göstermiştir. Soğuk preslenmiş ve sinterlenmiş numunelerin yoğunluğu, artan kaynak sıcaklığı ve süresi ile artmıştır. Buradaki yoğunluk artışı, yapıdaki gözeneklerin azaldığını göstermektedir. Üç nokta eğme testini geçen numunelerin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) ölçülmüştür. Hacimce %10 SiC içeren ve kaynak yapılmayan numune en yüksek ÇKD'ye (433 MPa) sahiptir. Difüzyon kaynağından sonra, 850°C'de 60 dakika boyunca kaynaklanan %10 SiC takviyeli numunede (405,8 MPa) en yüksek enine çekme dayanım elde edilmiştir. Benzer şekilde, 800°C'de 60 dakika boyunca kaynaklanmış numuneler arasında en yüksek çapraz kırılma dayanımı %10 SiC

oranında belirlenmiştir (381,55 MPa). SEM taramaları, 850°C’de 60 dakika yapılan kaynağın en uygun arayüzey ile sonuçlandığını göstermektedir. Bu bağlantılardaki arayüz çizgilerinin çoğu kaybolmuş ve geriye sadece tek bir blok kalmıştır. SEM çalışmaları ve arayüz mikrografları, 850°C’de yapılan difüzyon kaynağının 800°C’ye yapılan kaynağa kıyasla daha üstün sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Elhemsheri ve Eski (2021), saf bakır (Cu) ve ağırlıkça %2,5; 5,0 ve 7,5 bor karbür (B₄C) takviyeli bakır matrisli kompozitlerin birleşme özelliklerini araştırmıştır. Difüzyon kaynağı yöntemi 800°C’de 30, 45 ve 60 dakikalık bekletme süreleri ile gerçekleştirilmiştir. Cu ve metal matrisli kompozitler uygun toz metalurji tekniği kullanılarak üretilmiştir. Cu matrisli kompozitleri Cu’ya bağlamak için DB kullanılmıştır. DB, 2 MPa’lık tek eksenli bir yük kullanmıştır. Difüzyon süresinin ve B₄C parçacıklarının bağlanma kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için benzer olmayan malzemelerin birleştirme kalitesi araştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrofotometrisi (EDS) element analizleri, birleştirme arayüzü özelliklerini ve kesme dayanımı (SS) ölçümleri kullanılarak mekanik karakterizasyonu belirlemek için kullanılmıştır. Saf Cu ve Cu/B₄C kompozitleri, değişen bekletme süreleri için 800°C’de BD tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. Optimum SS değeri 38,3 MPa olup, ağırlıkça %2,5 B₄C fraksiyonu ile 60 dakikalık birleştirme sonrasında elde edilmiştir. SEM, neredeyse tüm numuneler için kaynak bölgesinin örtüştüğünü ortaya koyarak optimum bir kaynak bölgesine işaret etmektedir. SS’nin artan bekletme süresi ile yükseldiği ve artan B₄C yüzdesi ile düştüğü keşfedilmiştir.

Okay ve Islak (2022), toz metalurjisi tekniği kullanılarak üretilen alüminyum matris bor karbür (B₄C) ve karbon nanofiber (CNF) takviyeli hibrit kompozitin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Numuneler, sıcak presleme yöntemi kullanılarak %6 hacim oranlarında üretilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri mikroyapı incelemesi, sertlik ölçümü, çapraz kırılma dayanımı testi ve aşınma testi kullanılarak belirlenmiştir. Çapraz kırılma dayanımını (ÇKD) tahmin etmek için üç nokta eğme testi de kullanılmıştır. Aşınma testleri “ball-on-disc” tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı çalışması, takviye bileşenlerinin alüminyum matris içinde oldukça eşit bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ayrıca, çentik etkisi kırılmayı

gevrek hale getirmiş ve CNF miktarı arttıkça yığılma gelişmiştir. Numunelerin CNF seviyeleri arttıkça sertlik değerleri artmış, ancak ÇKD değerleri düşmüştür. Aşınma testi bulguları, CNF miktarındaki artışın aşınma direncini artırdığını göstermektedir. Numunelerin sürtünme katsayısı değerleri 0,535 ile 0,646 arasında değişmektedir. Sertlik, ÇKD ve aşınma testi sonuçları ile birleştirildiğinde, en uygun numune A1 %7 B₄C %1 CNF olarak belirlenmiştir.

Demir vd. (2023), pres döküm yöntemiyle üretilen AA7075/B₄C kompozitinin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışını B₄C takviye oranının ve tipinin etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarında, B₄C takviye oranının artmasıyla matris içindeki agglomerasyon eğiliminin arttığı ancak B₄C takviyenin AA7075 alaşımının sertliğini, çekme ve eğilme dayanımlarını, elastisite modülünü ve aşınma direncini olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

3. KURUMSAL TEMELLER

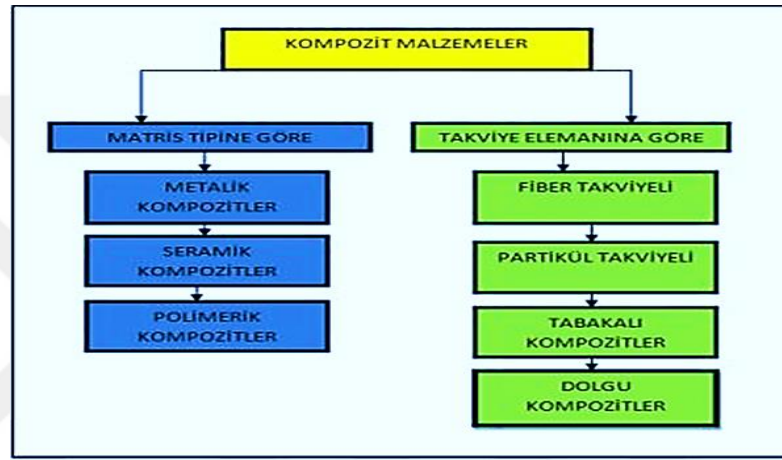
3.1 Kompozit Malzemeler

Eski Mısırlı ve Mezopotamyalı göçmenler kompozitleri ilk olarak M.Ö. 1500’lerde çamur ve saman karışımından sağlam, uzun ömürlü yapılar inşa etmek için kullanmışlardır (Boopalan vd., 2013). Modern dönemde kompozitlerin gelişimi ancak bilim insanlarının plastikleri icat etmesiyle mümkün olmuştur. Bundan önce bilim insanları tutkal ve bağlayıcıları yalnızca bitki ve hayvan kaynaklı doğal reçinelerden elde edebiliyordu. 1900’lerin başında Vinil, polistiren, fenolik ve polyester de dahil olmak üzere birçok plastik türü geliştirilmiştir. Doğal reçinelerin etkinliği, bu yeni sentetik bileşiklerle karşılaştırıldığında yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte, plastik tek başına yapısal amaçlar için yeterli mukavemet sağlama açısından yetersizdi. Mukavemet ve sertliği artırmak için takviye gereklidir. Owens Corning 1935 yılında ilk cam elyafı olan fiberglası tanıtmıştır. Fiberglasın bir plastik polimer ile karıştırılması hem sağlam hem de hafif bir yapı oluşturmuştur. Bu, çağdaş fiber takviyeli polimer (FRP) endüstrisinin başlangıcıdır (Bharat vd., 2022).

Bir kompozit malzeme, bitmiş yapı içinde makroskobik düzeyde ayrı ve farklı kalan, önemli ölçüde çeşitli fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir kombinasyonudur. Bu malzemeler kompozite benzersiz özellikler kazandırmak için birlikte hareket ederler, ancak kompozit içinde farklı malzemeler birbirinden kolayca ayrılabilir; çünkü bunlar birbirleri içinde çözünmez veya birbirlerine karışmazlar (Bommara vd., 2019). Kompozit malzemelerin özellikleri, kendilerini oluşturan malzemelerin özelliklerine ve bunların entegrasyonuna bağlıdır. Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, hafiflikleriyle birlikte sahip oldukları mukavemet ve sertliktir. Üreticiler, uygun bir takviye ve matris malzemesi kombinasyonu seçerek, belirli bir amaca yönelik belirli bir yapı için gereksinimlere tam olarak uyan özellikler üretebilirler. Matris, matrisin genel mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra istenen şekli elde etmek için gereken takviyeyi içerir (Boopalan vd., 2013).

3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler matris türlerine göre sınıflandırılır: Ppolimer matrisli kompozitler (PMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK). Kompozitler takviye türüne göre partikül takviyeli kompozitler, kısa fiber kompozitler (ipliksiler) ve sürekli fiber kompozitler (katman) olarak üçe ayrılır (Nagavally, 2016). Şekil 3.1’de kompozit malzemelerin matris ve takviye türüne göre sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Matris ve takviye elemanına göre kompozitler (Nagavally, 2016)

3.2.1 Kompozitlerin Matris Yapısı

3.2.1.1 Metal matrisli kompozitler

MMK'lerin matris malzemeleri mecburi olarak metaliktir (çoğunlukla alüminyum (Al), magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve titanyum (Ti) ve takviye, oksitler ve karbürler gibi dağılmış seramikler veya metalik (tungsten, molibden ve kurşun) olabilir. Takviye, kompozit malzemenin toplam hacminin yaklaşık %50'sine belirli oranlarda katkıda bulunur. Metal matrisli kompozitler metalik matrisler veya alaşım kompozitlerdir. Daha yüksek sıcaklık direncine, daha yüksek Young modülüne ve daha yüksek süneklik ve tokluğa sahiptir. Sınırlamalar arasında daha yüksek yoğunluk ve parçaların işlenmesinde daha fazla zorluk bulunmaktadır (Sağlam, 2008).

MMK'lerde kullanılan fiber malzemeler alüminyum oksit, grafit, titanyum karbür, silisyum karbür, bor, tungsten ve molibdendir (Zhang vd., 2021). Basınçlı döküm

MMK'ler genellikle kompost malzemelere göre çok daha iyi bir takviye dağılımına sahiptir. Seramik profil, takviyenin gerekli ağırlıktaki kısımlarını birbirine sıkıca bağlayarak hareketi önler. Bu da aglomerasyonu ve dendritik ayrışmayı ortadan kaldırır (Basutkar vd., 2015; Sayuti vd., 2016).

3.2.1.2 Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler), karbon, cam, kevlar veya metal fiberlerin dağınık takviyesi ile termoset plastiklerden veya termoplastik matristen oluşur. Polimerler yapısal olarak metallere veya seramiklerden çok daha karmaşıktır. Polimerler ucuzdur ve işlenmeleri kolaydır. Polimerler daha zayıf mukavemete ve daha düşük kullanım sıcaklığı limitlerine sahiptir. Ultraviyole ışığa ve bazı çözücülere uzun süre maruz bırakılması polimerlerin özelliklerinin bozulmasına neden olabilir. Baskın kovalent bağları nedeniyle, polimerler tipik olarak zayıf ısı ve elektriksel iletkenlik sergiler (Askeland, 2010). Polimerler genellikle kimyasallara karşı metallere daha dayanıklıdır. Yapısal olarak polimerler, zincirin omurgasını oluşturan kovalent bağlı karbon atomlarına sahip dev zincir şekilli moleküllerdir (bu nedenle makromoleküller olarak adlandırılır). Polimerizasyon, küçük moleküllerden büyük moleküller oluşturma sürecidir. Başka bir deyişle polimerizasyon, polimerleri oluşturmak için birçok monomer ve temel yapı taşının birleştirilmesi işlemidir (Askeland, 2010).

3.2.1.3 Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (SMK'ler) genellikle seramik matris yapısına gömülü karbon, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum nitrür (SiN) fiberlerden oluşan bir seramik türüdür yapı (Nagavally, 2016). Seramik matrisli kompozitler, korozyon ortamlara ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri nedeniyle mühendislik malzemelerindeki bir diğer önemli gelişmedir. Seramikler oldukça güçlü ve çok sert bir yapıya sahip olup yüksek sıcaklıklara dayanabilirler, ancak genel olarak daha az sertliğe sahiptirler. Mukavemetlerini 1700°C'ye kadar koruyan matris malzemeleri silikon nitrür, silikon karbür, alüminyum oksit ve mullittir (alüminyum, silikon ve oksijenden oluşan bir bileşik). Karbon-karbon matris kompozitleri, yüksek

sıcaklıklarda oksidasyon direncinden yoksun olmalarına rağmen, 2500°C'ye kadar mukavemetlerinin çoğunu korurlar. Karbon-karbon fiber kompozitler muhtemelen seramik matrisli kompozitler arasında en gelişmiş olanlardır. Havacılık ve uzay endüstrisi bu malzemeleri öncelikle fren malzemesi olarak kullanılmak üzere geliştirmektedir. Şekillendirilmiş karbon veya grafitin emdirilmesi bu tür kompozitler üretir (Chawla, 2012). Elde edilen malzemeler güçlü ve hafiftir ve mükemmel yüksek sıcaklık özelliklerine, iyi korozyon direncine ve iyi termal şok, elektrik ve aşınma özelliklerine sahiptir (Blount ve Windhorst, 1997; Meignanamoorthy vd., 2021). Kolay şekillendirilmeleri onları geniş çaplı uygulamalar için kullanışlı hale getirmektedir. Karbon-karbon fiber SMK'ler ısı yalıtım malzemesi, elektrotlar, rulmanlar, diskler, fren balataları, vidalar ve contalar, nükleer reaktör parçaları, contalar, döküm kalıpları, gaz türbinleri ve motor pistonlarında kullanılmaktadır (Humphreys, 1987 ve Maleque ve Salit, 2013;).

Piyasada bulunan kompozitlerin çoğu polimer bazlı matrislerdir. MMK'ler ve SMK'ler yüksek sıcaklık uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Bir başka kompozit malzeme sınıfı ise çimento matrisine dayanmaktadır (Sayuti, 2016; Jain vd., 2016).

3.2.2 Kompozitlerin Takviyelerine Göre Sınıfları

3.2.2.1 Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde, cam, karbon, bazalt ve kevlar gibi sentetik fiberlerin kompozit bir yapı içinde dağılmış fazı, yüksek mukavemet, sertlik ve kimyasal, sıcaklık ve aşınma direnci gibi gelişmiş malzeme özellikleri ortaya çıkarmıştır (Rajak vd., 2019).

- Kısa fiber takviyeli kompozitler.

Kısa fiber takviyeli kompozitler, rastgele fiber oryantasyonlu kompozitler ve tercih edilen fiber oryantasyonlu kompozitler gibi kesikli fiberler şeklinde dağılmış bir faz ile takviye edilmiş bir matristen oluşur.

- Uzun fiber takviyeli kompozitler

Uzun fiber takviyeli kompozitler, fiberlerin tek yönlü yönlendirilmesi ve fiberlerin çift yönlü yönlendirilmesi gibi sürekli fiberler şeklinde dağılmış bir faz takviyeli bir matristen oluşur (Rajak vd., 2019).

3.2.2.2 Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozitler- Bu Kompozitler, partikül şeklinde dağılmış bir faz ile takviye edilmiş bir matristen oluşur.

- Rastgele partikül oryantasyonuna sahip kompozitler.
- Tercih edilen partikül oryantasyonuna sahip kompozitler.

Bu malzemelerin dağılmış fazı, birbirine paralel olarak yerleştirilmiş iki boyutlu düz levhalıktan (pullar) oluşur (Rajak vd., 2019).

3.2.2.3 Tabaka takviyeli kompozitler

Genellikle tabaka kalıplama kompoziti (SMC) olarak adlandırılan tabaka bazlı kompozitler, genellikle sıkıştırılarak kalıplanan cam takviyeli termoset kalıplama malzemesidir (Rajak vd., 2019).

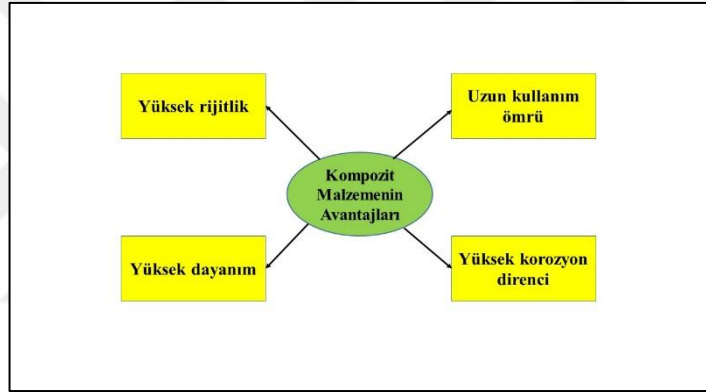
3.3 Kompozit Malzemelerin Önemi

Kompozit malzemeler, olağanüstü niteliklere sahip bir malzeme oluşturmak için iki veya daha fazla farklı unsurun bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu malzemeler genellikle matris olan bir bağlayıcı ve fiberler veya parçacıklar olabilen takviyeden oluşur. Bu malzemeler havacılık ve uzay, otomotiv, inşaat ve spor ekipmanı üretimi gibi çeşitli alanlarda geleneksel malzemelere göre avantajlar sağlamaktadır (Sayuti vd., 2016). Kompozit malzemeler havacılık ve uzay, otomotiv, inşaat, rüzgâr enerjisi, denizcilik, spor ve eğlence, elektronik ve elektrik mühendisliği, petrol ve gaz, medikal ve tüketici ürünleri dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Uyarlanabilirlikleri, geliştirilmiş özellikleri ve kişiselleştirilmiş özellikleri, onları

çeşitli sektörlerde önemli hale getirmekte, teknoloji, verimlilik ve sürdürülebilirliğin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır (Rajak vd., 2019).

3.4 Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları

Üstün mekanik özelliklere sahip gelişmiş kompozit malzemelerin geliştirilmesi mühendislik alanında yeni ufuklar açmıştır çünkü aşınma direnci, elektrik yalıtımı, düşük ısı genleşme, yüksek sertlik, mukavemet ve yorulma direnci gibi birçok avantaja sahiptirler ve bu da onları birçok uygulama için tercih edilen adaylar haline getirmektedir. Şekil 3.2 kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları yer almaktadır (Nagavally, 2016; Sağlam, 2008).



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları (Sağlam, 2008)

3.5 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler, parçacıklar, kısa fiberler, çubuklar veya kalıcı fiberler olabilen stabil ve güçlü bir matris olarak bir metal veya alaşımdan oluşur (Jacoby, 2004). MMK ilk olarak, daha iyi performansın malzeme geliştirme için birincil itici güç olduğu bir zamanda gelişmiş askeri sistemlere yönelik bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır (Miracle, 2005). MMK, sürekli bir metal fazın (matris) bir veya daha fazla takviye edici faz ile birleştirildiği bir malzeme grubu olarak tanımlanabilir. Bu kompozit malzemenin amacı, tamamlayıcı özellikleri seçici olarak iyileştirerek, matrisin zararlı özelliklerini maskeleyerek ve takviye ederek nihai ürünün uygunluğunu artırmaktır. MMK üretildiğinde, iki veya daha fazla madde, belirli bir kullanım için özellikleri orijinal malzemelerden daha üstün olan yeni bir madde oluşturmak üzere fiziksel olarak (kimyasal olarak değil) birleştirildiğinde bir katı

madde oluşur (Smith vd., 2011). Metaller için uygun olan geleneksel alaşımlama yöntemleri, matris ve takviyelerin metalik doğasına rağmen bazen MMK üretiminde başarısız olur. Çünkü böyle bir işlem bileşiğin özünü bozar. Alaşımlardaki fazlar kimyasal veya fiziksel olarak farklılık göstermezken, bir bileşik, bileşenlerinin özelliklerinden tam olarak yararlanmak için bu fazları kasıtlı olarak ayırır. Güçlendirme fazı sistemin birincil taşıyıcı bileşenidir. Bu nedenle, bir kompozit tasarlarken, matris malzemelerden daha iyi mekanik özelliklere sahip takviyeler seçilir. Matris, yük taşıyan takviyeyi bir arada tutmaktan ve bileşiğin yığın şeklini korumaktan sorumludur (Ratke, 2006).

Matris, toplam yükün bir kısmını arayüz boyunca takviyelere dağıtır ve bunun tersi de geçerlidir. Arayüzün verimliliği, yükün matrise ve matristen aktarımını belirler. Matris ve takviye arasındaki yüksek derecede etkileşim MMK'lerin doğasında vardır. Ortaya çıkan mukavemet, matris ve takviye arasındaki arayüzün etkinliği ile doğru orantılıdır. İki fazın kimyasal ve mekanik uyumluluğu arayüzeyin doğasını belirler (Kumar vd., 2021). Düşük sıcaklıkta bir işleme güzergahı veya stabil bileşenler seçmek, kimyasal uyumsuzluk kısıtlamalarının üstesinden gelebilir. Termomekanik uyumsuzluk sorunu, termal değişiklikleri içeren sünek bir matris kullanılarak çözülür. Ayrıca, karşılık gelen bir termal genleşme katsayısına sahip bir çift matris ve takviye seçmeye de yardımcı olur. Kimyasallara veya ısıya farklı tepkiler vermeleri durumunda veya bunların bilinemesi durumunda, iki parçadan bir kompozit üretmek mümkün değilse, matrisle çalışan bir ara faz ve iki parça arasındaki uyumsuzluğu ortadan kaldırmak için aralarına bir takviye konulabilir. Özdeş olmayan herhangi bir stres birikimi, matris ve takviye arasındaki kimyasal reaksiyonu önleyen veya matrise girmesine yardımcı olan bu ara fazı üretir. Takviye parçacıklarının etrafındaki yumuşak, tortusuz katman, yüzeylerinde ortaya çıkan çatlak yayılımını sınırlar, stres değerini kademeli olarak etkili bir şekilde azaltır ve böylece nihai mukavemeti artırır (Jacoby, 2004).

3.5.1 Matris

Kompozit alanında, matris veya matrisler iki önemli role sahiptir. İlk olarak, takviye fazını yerinde sabitler. Daha sonra, harici bir kuvvete maruz kaldığında, malzeme deformasyona uğrar ve gerilimi takviye bileşenlerine aktarır. Matrisin kendisi önemli

bir takviye bileşeni olarak hizmet eder. Belirli çok bileşenli malzemeler (MMK'ler) bu durumu sergiler. Alternatif olarak, bir matrisin yüksek sıcaklıklara ve aşırı soğuğa dayanması gerekebilecek durumlar da vardır. Elektrik akışını iletme veya direnç gösterme, nem girişini önleme veya korozyona karşı koruma sağlama yeteneğine sahiptir. Uygun bir matris malzemesi, takviye edici bir fazı içerecek ve sıkıca tutacak şekilde işleme tabi tutulan herhangi bir katı madde olabilir. Matris metalden oluşuyorsa metal matris olarak adlandırılır. Benzer şekilde, matris bir polimerden oluşuyorsa matris polimer matris olarak adlandırılır (Zhang, vd., 2019).

Matris malzemesi, metalurjik alaşımlarla kimyasal olarak zararlı bir şekilde reaksiyona girmemelidirler. Önemli ölçüde farklı doğrusal ısı genleşme katsayılarına sahip olmamalıdır (Sulaiman vd., 2008). Monolitik malzemelerdeki tane sınırlarına benzeyen ara yüzey, matris ile takviye malzemesi arasındaki bitişik temas alanını ifade eder. Bununla birlikte, bazı durumlarda, bitişik bölge, ara faz olarak adlandırılan farklı bir ilave fazdır. Örnekler arasında takviyeli plastiklerde cam elyafı üzerindeki kaplama ve bir laminantın katmanlarını birbirine bağlayan yapıştırıcı yer alır. Böyle bir ara faz mevcut olduğunda, ara fazın her bir yüzeyi ile bitişik bileşeni arasında bir tane olmak üzere iki ara yüzey vardır. Diğer kompozitlerde, birbirine benzemeyen bileşenlerin yüzeyleri bir ara faz oluşturmak için etkileşime girer. Üretim prosedürleri büyük ölçüde matris niteliklerine ve bunların takviye özelliklerini nasıl etkilediğine bağlıdır. Metal, polimer, seramik, cam ve karbon veya grafit, kompozit işlemede kullanılan en yaygın matrislerden bazılarıdır. Sürekli bir faz olarak tanımlanan matris, bir kompozitte kritik bir rol oynar. Bir matrisin birincil görevi, takviye fazını yerinde tutmak, takviye ile matris arasında bir gerilim aktarım noktası olarak hareket etmek ve aynı zamanda takviyeyi olumsuz koşullardan korumaktır. Kesme modülü, kesme mukavemeti ve işleme özellikleri gibi mekanik nitelikler üzerinde etkisi vardır. Takviye fazı, kompozitlerin birincil yük taşıyan bileşenidir. Bu nedenle, takviye fazının yönü kompozitin özelliklerini kontrol eder (Sulaiman vd., 2008).

3.5.2 Metal Matrisli Kompozit Takviyesi

Matris malzemelerdeki takviyeler üzerine yapılan araştırmalar, farklı faydalar sundukları için farklı tür ve formlara odaklanmaktadır. Bireysel bileşenlerin

özellikleri, kimyasal reaksiyonlar ve ısı genleşme katsayıları, kompozit malzemenin özelliklerini belirleyen işleme yöntemlerinden etkilenir. Yüksek sıcaklık kompozitleri, artan kimyasal reaksiyonlar ve faz kararsızlığı nedeniyle karmaşık bir zorluk teşkil etmektedir (Chawla ve Shen, 2001).

Metal matrisli kompozitlerin özellikleri, arayüzeyin doğası ve meydana gelen reaksiyonlar nedeniyle oluşan reaksiyon ürünlerini büyük ölçüde etkiler. Kompozitlerin dayanıklılığının takviye fazı ile artırılması, takviye fazı ile matris arasındaki arayüzey bağının dayanıklılığına bağlıdır. Arayüzey özellikleri, rijitlik, takviye kalınlığı, yorulma dayanıklılığı, sürünme, ısı genleşme katsayısı ve ısı iletkenlik gibi kompozit özelliklerini belirler. Takviye fazı ve matris etkileşime girdiğinde ve elektron alışverişinde bulunduğu kimyasal bir bağ oluşur. Bu tür kimyasal bağlar metalik, iyonik veya kovalent olabilir. Metalik bağlara sahip arayüzey diğer bağ türlerine göre daha sünektir ve metal matrisli kompozitlerde tercih edilir (Attia, 2001).

Matris ve takviye fazları arasındaki arayüzey, üretim sürecinden etkilenen kritik bir bölgedir. Arayüzey özellikleri kontrol altında tutulmazsa kompozit özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Arayüzey kimyasal reaksiyonları, takviye fazının ayrışması ve ıslanabilirliğin azalması, arayüzey ile ilgili ortaya çıkabilecek başlıca sorunlardır. En yaygın kullanılan takviye konfigürasyonlarının bazı örnekleri aşağıda belirtilmiştir:

- Bor karbür (B_4C).
- Silisyum karbür (SiC).
- Titanyum karbür (TiC).

Takviye seçerken dikkat edilmesi gereken farklı hususlar vardır. Seçim kriterleri, esas olarak kimyasal bileşim, erime noktası, yoğunluk, hacim büzülmesi, şekil ve boyut, kristal yapı, serbest oluşum enerjisi, Young modülü, yayılma yeteneği ve son olarak bulunabilirlik, üretim ve kullanım kolaylığına bağlı olarak belirlenmelidir (İbrahim vd., 1991). Çok sayıda farklı oksit, karbür, nitrür ve borür takviye için uygundur, yaygın olarak kullanılanlar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Kullanılabilecek metal takviye parçacıkları (İbrahim vd., 1991)

Etal-Temel	Karbür	Nitrür	Borür	Oksit
Bor	B ₄ C	BN	-	-
Zirkonyum	ZrC	ZrN	ZrB ₂	ZrO ₂
Alüminyum	-	AlN	-	Al ₂ O ₃
Silikon	SiC	Si ₃ N ₄	-	-
Titanyum	TiC	TiN	TiB ₂	-
Krom	CrC	CrN	CrB	Cr ₂ O ₃
Molibden	Mo ₂ C, MoC	Mo ₂ N, MoN	Mo ₂ B, MB	-
Tungsten	W ₂ C, WC	W ₂ N, WN	W ₂ B, WB	-

Bazı takviye elemanları teknik ve ekonomik açıdan avantajlıdır: Silisyum ve bor karbürler; alüminyum oksit, alüminyum ve bor nitrürler ve titanyum borür. Tablo 3.2’de bu sert malzemelerin genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Metal takviyesinde kullanılan çeşitli parçacıkların özellikleri (Jweeg vd., 2012)

Parçacıkların Türü	SiC	Al ₂ O ₃	AlN	B ₄ C	TiB ₂	TiC	BN
Kristal Türü	Hex	Hex	Hex	Rhomb	Hex	Cub	Hex
Erime Noktası [°C]	2300	2050	2300	2450	2900	3140	3000
Young Modülü [GPa]	480	410	350	450	370	320	90
Yoğunluk [gm cc ⁻¹]	3,21	3,9	3,25	2,52	4,5	4,93	2,25
Isı İletkenliği [W M ⁻¹ K ⁻¹]	59	25	10	29	27	29	25
Mohs-Sertlik	9,7	6,5	-	9,5	-	-	1,0-2,0
Isıl Genleşme Katsayısı [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4,7-5,0	8,3	6,0	5-6	7,4	7,4	3,8

Takviye fazı partiküllü, sürekli veya süreksiz fiberli olabilir. Kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarından bazıları titanyum karbür, tungsten karbür, silisyum nitrür, alüminyum silikat, kuvars, silisyum karbür, grafit, uçucu kül, alümina, cam elyaf, titanyum borürdür. Takviye olarak ikinci faz malzemesi, kompozitlerin işlenmesi sırasında uygulamaya bağlı olarak seçilir (Jweeg vd., 2012). Takviye fazı genellikle partiküller ve fiberler şeklindedir. Partikülün boyutu mikron veya mikrometre cinsinden ifade edilir. Bununla birlikte, süreksiz fiber “en-boy oranı” adı verilen bir terimle tanımlanır. Bu, fiber uzunluğunun çapına olan oranı olarak ifade

edilir. Sıvı alaşım veya metal matris malzemesinin ıslanabilirliğini artırmak için takviye fazı her zaman önceden ısıtılır (Rajak vd., 2019). Bazı potansiyel kompozit takviye malzemeleri ve uygulamaları Tablo 3.3'te listelenmiştir (El-Mahallawy ve Hanafi, 1993).

Tablo 3.3 Bazı kompozit takviye fazın malzemeleri ve uygulamaları (Rajak vd., 2019)

Metal temel	Karbürler	Nitrürler	Boridler	Oksitler	Uygulamalar
Bor	B ₄ C	BN	-	-	Uzay, nükleer
Zirkonyum	ZrC	ZrN	ZrB ₂	ZrO ₂	Uzay, Otomotiv, Nükleer
Alüminyum	-	AlN	-	Al ₂ O ₃	Otomotiv, Metal İşleme
Silikon	SiC	Si ₃ N ₄	-	-	Otomotiv, Uzay, Metal İşleme
Titanyum	TiC	TiN	TiB ₂	-	Uzay
Krom	CrC	-	CrB ₂	CrO ₂	Uzay, Otomotiv
Molibden	MoC	-	MoB	-	Uzay, Otomotiv
Tungsten	WC	-	WB	-	Metal İşleme

Metal matrisli kompozitlerde takviye gereksinimi, üretim ve işleme yöntemlerinin yanı sıra kompozit malzemenin matris sisteminin özellikleri de dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir (İbrahim vd., 1991; Kainer, 2006). Seramik takviye kullanımı için parametreler şunları içerir:

- Düşük yoğunluk.
- Mekanik ve kimyasal uyumluluk (düşük termal genleşme katsayısı).
- Termal kararlılık.
- Yüksek basınç, Young modülü ve çekme dayanımı.
- İyi işlem kabiliyeti (ekonomik verimlilik).

3.5.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması

MMK'leri sınıflandırmak için kullanılan matris malzemeleri bulundukları kategorilerini belirler. Kullanılan tipik metalik matris düzenleri aşağıdaki örnekleri içerir (Seetharaman, 2021):

- Bakır esaslı kompozitler.
- Magnezyum esaslı kompozitler.
- Titanyum esaslı kompozitler.
- Süper alaşım esaslı kompozitler.
- Alüminyum esaslı kompozitler.

3.5.3.1 Bakır esaslı kompozitler

Bakır esaslı kompozitler, farklı özelliklere sahip yeni malzemeler oluşturmak için bakırın özelliklerini alüminyum, magnezyum oksit (MgO), karbon fiberler veya tungsten gibi diğer malzemelerle birleştiren malzemelerdir. Bu kompozitlerin elektriksel iletkenlik, ısı dağılımı ve mekanik mukavemet gibi çeşitli uygulamaları vardır (Silvain vd., 2014).

3.5.3.2 Alüminyum esaslı kompozitler

Alüminyum metal matrisli kompozitler (AMMK'ler) olarak da bilinen alüminyum esaslı kompozitler, alüminyum alaşımlarının istenen özelliklerini silisyum karbür, alümina, grafit, karbon nanotüpler ve bor nitrür gibi takviye malzemeleriyle birleştirir. Bu kompozitler daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı, artan aşınma direnci, daha iyi termal iletkenlik ve artırılmış sertlik gibi avantajlar sunarak onları otomotiv, havacılık, denizcilik, savunma sanayi ve elektronik gibi çeşitli endüstriler için uygun hale getirir. Bu malzemeler geleneksel alüminyum alaşımlarına göre daha verimli ve uygun maliyetli bir alternatif sunmaktadır (Katica vd., 2011).

3.5.3.3 Magnezyum esaslı kompozitler

Magnezyum esaslı kompozitler, farklı özelliklere sahip yeni malzemeler oluşturmak için magnezyum özelliklerini seramik parçacıklar, fiberler veya nanotüpler gibi diğer malzemelerle birleştiren malzemelerdir. Bu kompozitler havacılık, otomotiv ve biyomedikal sektörleri de dahil olmak üzere çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Magnezyum-seramik kompozitler magnezyum esaslı kompozitlere örnektir. Havacılık ve uzay sektörü bunları magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanmaktadır. Magnezyum alaşımlarına alümina (Al_2O_3) gibi sert seramik parçacıkların eklenmesi, kompozitlerin mukavemetini, sertliğini ve aşınma direncini büyük ölçüde artırabilir (Arora vd., 2022).

3.5.3.4 Titanyum esaslı kompozitler

Titanyum esaslı kompozitler, benzersiz özelliklere sahip yeni malzemeler oluşturmak için titanyumun özelliklerini seramik parçacıklar, fiberler veya nanotüpler gibi diğer malzemelerle birleştiren kompozit malzemelerdir. Havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi çeşitli endüstriler bu kompozitleri kullanabilir. Benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri, özellikle de yüksek bağl mukavemetleri ve mükemmel korozyon dirençleri nedeniyle titanyum alaşımları gelişmiş metalik malzemeler olarak kabul edilir. Ulaşım, makine yapımı, yakıt-enerji endüstrisi ve tıp dahil olmak üzere çeşitli endüstriler bunları kullanmaktadır. Titanyum alaşımlarının ana uygulama alanları arasında havacılık ve uzay yapıları, makine yapımı, yakıt-enerji endüstrisi ve tıp yer almaktadır. Titanyum alaşımları, takviye türüne bağlı olan yüksek mukavemet ve sertlikleri nedeniyle metal matrisli kompozitler (MMK'ler) için de uygun malzemelerdir (Motyka, 2021).

3.5.4 Metal Matrisli Kompozitlerin İşlenmesi

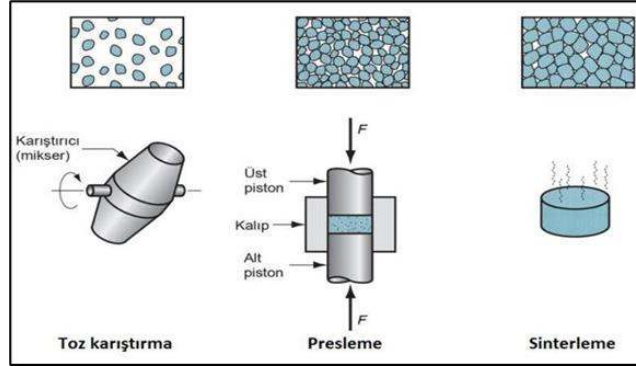
Metal matrisli kompozit malzemeler çeşitli yöntemlerle üretilir. Uygun bir mühendislik sürecinin seçilmesindeki temel nokta, istenen takviye bileşenlerinin (fiber ve partiküller), matris alaşımlarının ve uygulamaların türünü, dağılımını ve miktarını elde etmektir. Üretim yöntemi, işleme ve son işlemin yanı sıra takviye bileşenlerinin

formunu değiştirerek, bileşenlerin aynı bileşimi ve miktarları söz konusu olmasına rağmen farklı karakteristik profiller elde etmek mümkündür (Kainer, 2006).

3.6 Toz Metalurjisi

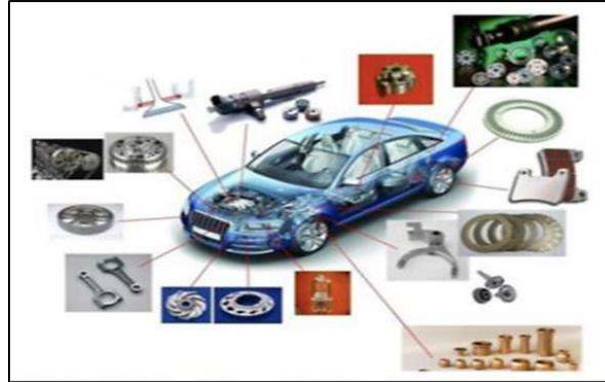
Toz metalurjisi (TM), metal matrisli kompozitler (MMK'ler) üretmek için ingot metalurjisi veya difüzyon kaynağından daha iyi bir yoldur. Ana faydası, düşük üretim sıcaklıklarının güçlü arayüzey reaksiyonlarını önleyerek matris ve takviye arasındaki istenmeyen reaksiyonların sayısını azaltmasıdır. Diğer durumlarda, TM, başka yollarla erişilemeyen malzemelerin (SiC takviyeli Ti alaşımları gibi) elde edilmesini mümkün kılar. TM, diğer alternatif yollara kıyasla takviye olarak parçacık veya iplikler kullanan kompozitlerin elde edilmesini kolaylaştırır ve parçacıkların maliyeti aynı bileşime sahip sürekli fiberlerden daha düşüktür. TM'nin bir diğer avantajı da takviye dağılımındaki homojenliğidir. Bu tekdüzelik sadece yapısal özellikleri iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda tekrar üretilebilirliklerini de artırır. Toz metalurjisi (TM), süreksiz takviyeli MMK üretmek için en yaygın kullanılan yöntemdir (Torralba vd., 2003).

Toz metalurjisi (TM) çok çeşitli malzemeleri sentezlemek için kullanılır. Mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve darbe direnci gibi mükemmel tribolojik ve mekanik özelliklere sahip bileşenler yapmak için oldukça iyi bir yoldur (Seetharaman, 2021). şekil 3.3, metal matrisli kompozitler üretmek için kullanılan geleneksel toz metalurjisi yöntemlerinin şematik bir diyagramını göstermektedir. Süreç, mekanik alaşımlama olarak da bilinen yüksek enerjili bir bilyalı değirmen (gezegen bilyalı değirmen) veya düşük enerjili bir bilyalı değirmen (yatay çalkalayıcı) kullanarak ilk tozların karıştırılması ve harmanlanmasıyla başlar. Birleştirme prosedürleri arasında geleneksel sinterleme, sıcak presleme, kıvılcım plazma sinterleme ve deformasyon destekli sinterleme yer alır. Üretilen metal matrisli kompozitin sıcak ekstrüzyon ve sıcak haddeleme gibi ikincil işlemleri bazen belirli nitelikleri elde etmek için gereklidir (Schneider vd., 2005).



Şekil 3.3 Toz metalürji işleminin üretimi (Schneider vd., 2005)

TM'in uygulama alanları oldukça geniştir. Üreticiler metal tozlarını tungsten lamba filamentleri, diş restorasyonları, yağsız rulmanlar, transmisyon dişlileri, zırh delici balistikler, elektrik kontaktları, nükleer güç yakıt elemanları, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi araba parçaları, ortopedik implantlar, iş makineleri, yüksek sıcaklık filtreleri, uçaklar ve fren balataları oluşturmak, şarj edilebilir piller ve jet motoru bileşenleri için kullanmaktadır. Ayrıca, metal tozları boya pigmentlerinde, gözenekli betonda, baskılı devre kartlarında, zenginleştirilmiş unda, patlayıcılarda, kaynak elektrotlarında, roket yakıtlarında, baskı mürekkeplerinde, kaynak bileşiklerinde ve katalizörlerde de uygulanmaktadır (Sağlam, 2008).



Şekil 3.4 TM ile üretilen parçaların otomobil içinde dağılımı (Sağlam, 2008)

3.6.1 Toz Karıştırma

Toz metalurjisi tekniklerinde karıştırma işlemi, tüm toz metalurjisi prosedüründe önemli bir aşamadır. Bitmiş ürünün istenen niteliklerine bağlı olarak çeşitli kimyalara sahip metal tozlarının veya aynı kimyasal bileşimlere ve boyutlara sahip parçacıkların birleştirilmesini gerektirir. Bu, kalıp presleme işlemi boyunca mümkün olduğunca

fazla sıkıştırılabilirliği korumak için kritik olan homojen bir element karışımını garanti etmek için yapılır. Karıştırma işlemi sırasında, bağlayıcılar veya yağlayıcılar, nihai ürünün özelliklerini ve niteliklerini tanımlamak için metal parçacıklarla reaksiyona girer. Karıştırma işlemi yeni alaşımlar geliştirebildiği ve nihai ürünün özelliklerini düzenleyerek karmaşık parçaların ve bileşenlerin çok çeşitli endüstrilerde üretilmesine olanak tanıdığı için önemlidir (Sağlam, 2008).

Karıştırma cihazı genellikle karıştırılacak malzemeye göre seçilir. Endüstriyel toz karıştırma uygulamalarında genellikle V şeklinde bir karıştırıcı kullanılır. Diğer toz karışım türleri ise Turbula karıştırıcı ve statik karıştırıcılardır (Meher, 2015). Sallayıcı ve karıştırıcı olan turbula toz karıştırmada iyi sonuçlar verir. Turbolar sallayıcı mikseri, farklı ağırlıklara ve farklı parçacık boyutlarına sahip tozların homojen bir karışımı için kullanılır. Şekil 3.5’de gösterilen turbula sallayıcı-mikser, farklı özgül ağırlıklara ve parçacık boyutlarına sahip toz maddelerin homojen bir şekilde karıştırılması için kullanılır (Bauman vd., 2008).

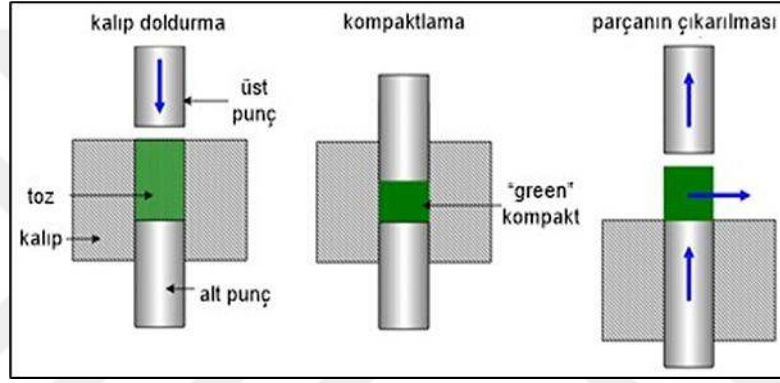


Şekil 3.5 Turbula mikser (Bauman vd., 2008)

3.6.2 Toz Sıkıştırma

Sıkıştırma işlemi, toz metalurjisi sürecinin ikinci aşamasıdır. Metal tozu sıkıştırma, yeşil tozların kapalı bir kalıp zımba düzeneğinde preslenmesi işlemidir. Zımbalar tozları sıkıştırmak için yeterli basınç uygular. Bu adımda, basınç yükü, karışımı sıkıştırır. Şekil 3.6’te sıkıştırma işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Düzenek, alt

ve üst zımbaya sahip bir kalıp içinde gerekli miktarda karışık tozu düzenler. Kalıp duvarı tozu kalıbın içine hapseder. Üst zımba, tozu sıkıştırmak için kuvvet uygulayarak sıkışmayı oluşturur. Bu işlem, uygulanan yüksek basınç nedeniyle presleme olarak da bilinir ve elde edilen ürün green (yeşil) kompakt olarak bilinir. Parçacıklar arası sürtünmeyi ve parçacık-kalıp duvarı sürtünmesini azaltmak için yağlama gereklidir. Genellikle metal tozları sıkıştırma işleminden önce grafit ve çinko stearat tozları gibi yağlayıcılarla karıştırılır. Sıkıştırmada tam yoğunluğa yakın bir yoğunluk elde etmek için soğuk veya sıcak izostatik presleme kullanılabilir (Ünal, 2019).



Şekil 3.6 Sıkıştırma işlemi (Ünal, 2019)

3.6.3 Sinterleme

Sinterleme, termal enerji uygulayarak metal ve/veya seramik tozlarından yoğun katı malzemeler veya bileşenler üretmek için kullanılan bir işleme tekniğidir. 1940'lardan bu yana sinterleme bilimsel olarak incelenmiş ve önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda sinterleme, toz metalurjisi parçaları ve dökme seramik bileşenler de dahil olmak üzere her türlü malzeme üretimi için en önemli aşamadır (Kuang vd., 1997).

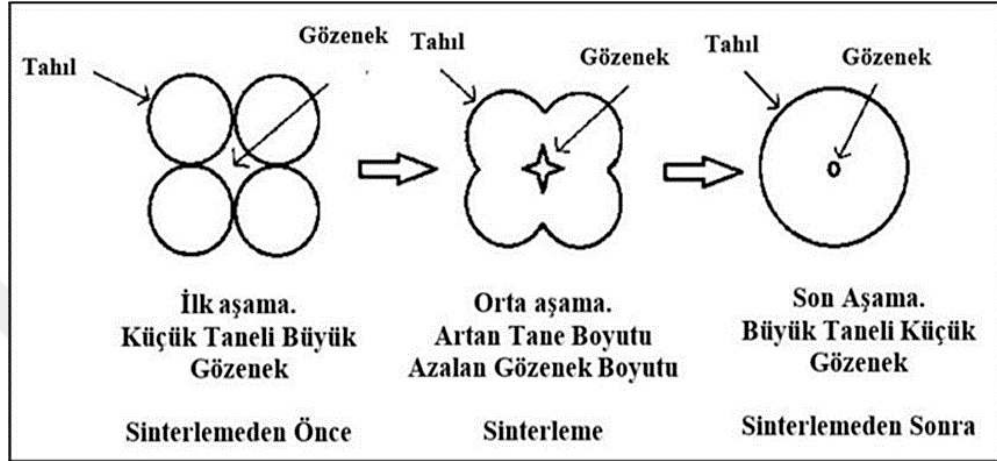
Sinterleme, temas eden parçacıkları katı bir nesneye bağlamak için kullanılan ısı bir işlemdir. Sinterleme, çoğu seramik ve sement karbürlerin, bazı metallerin ve polimerin birleştirilmesinde çok önemlidir. Şekillendirilmiş gövdenin sinterlemeden önce zayıf olmasına rağmen, fırınlamadan sonra özellikleri diğer üretim yöntemleriyle elde edilen özelliklerle rekabet eder hale gelir (German, 2013). Yeşil kompaktlar yeterli mukavemete sahip değildir ve küçük yükler altında bile hasara uğrayabilirler

Çünkü parçacıklar birbirlerine gevşek bir şekilde bağlanmıştır. Ayrıca bu kompaktlarda parçacıklar arasında gözeneklilik vardır. Gözenekliliği ortadan kaldırmak ve toz parçacıkları arasında metalurjik bir bağ kurmak için sıkıştırma işleminden sonra sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Sinterleme, parçacıklar arası difüzyon, plastik deformasyon, tane oluşumu ve tane büyümesi süreçleriyle parçacıkların kimyasal olarak bağlanmasını sağlamak için kompaktın erime noktasının altındaki bir sıcaklığa ısıtıldığı süreçtir. Sinterleme, kompaktların yüzeyinde oksidasyonu önlemek için kontrollü bir atmosferde gerçekleştirilmelidir. Argon, helyum ve nitrojen gibi gazlar sinterleme ortamları olarak kullanılır (Ünal, 2019). Modern sinterleme uygulamalarında, fırın içindeki ortam kontrol edilebilmektedir. Bu gibi durumlarda, ortamın oksidasyona neden olmaması için kontrol altında tutulması gerekir. Kontrol işlemi mevcut oksitlerin giderilmesini arttıran indirgeyici bir ortam sağlamak için yapılır. Ayrıca karbürleme ortamı sağlamak ve preslemede kullanılan yağlayıcıların ve bağlayıcıların giderilmesine yardımcı olmak için de kullanılır (Al-mangour ve Angeles, 2016). Toz parçacıklarının bağlandığı bir işlem olan sinterleme, semente karbürden imal edilen kesici takımlar ve elektronikte kullanılan silikatla bağlı alümina dahil olmak üzere teknolojik açıdan önemli çeşitli ürünler üretir. Katı hal sinterleme, ferrit mıknatıslarda, yarı saydam alümina zarflarda, uranyum dioksit yakıtta ve sert silisyum karbür aşınma parçalarında kullanılır (Kuang vd., 1997). Sinterleme sürecini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bu faktörlerden bazıları sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve sinterleme ortamıdır. Sinterleme sıcaklığı genellikle metalin erime sıcaklığının %90 civarındır. Daha yüksek sinterleme sıcaklıkları daha yüksek yoğunlaştırma sağlar. Daha uzun sinterleme süreleri genellikle daha yüksek yoğunluğa yol açar. Benzer şekilde, daha yüksek bir başlangıç yoğunluğu daha yüksek bir sinterlenmiş yoğunlukla sonuçlanır (Ünal, 2019). Sinterleme sırasında aşağıdaki aşamaların gerçekleştiği bilinmektedir:

- Belverme yoluyla parçacık bağlanması (temas noktalarında yapılır).
- Temas noktaları boyunlara doğru büyür.
- Gözenek kanalının kapanması (Parçacıklar arasındaki gözeneklerin boyutu küçülür).
- Gözeneklerin büzülmesi (özellikle boyun bölgelerindeki parçacıklar arasında tane sınırları gelişir).

3.6.3.1 Sinterleme aşaması

Sinterlemenin temel amacı difüzyon, basınç ve ısı etkileriyle parçacıklar veya tozlar arasındaki boşlukları ortadan kaldırmaktır. Sinterleme işlemi Şekil 3.7’da gösterilen şekilde üç aşamadan oluşur (Wiley, 2011).



Şekil 3.7 Sinterleme sırasında gözenek yapısının değişimi (Wiley, 2011)

- Başlangıç aşaması

Başlangıç aşamasında, tek tek parçacıklar arasında içbükey bir boyun oluşur ve parçacıklar arası boyun hızla büyür. Yoğunlaştırma miktarı azdır ve bu aşama bağlı yoğunluk %65’e ulaştığında %3-5’lik doğrusal büzülme ile sona erer. Taneler birbirleriyle temas halindedir; tane sınır alanları büyür ve taneler birleşmeye başlar (Kuang vd., 1997; Meher, 2015).

- Ara aşama

İkinci aşamada, bitişik taneler arasında boyunlar oluşur. Çok sayıda küçük tane yerine, birkaç büyük taneler meydana gelir. Gözenekler sinterleme öncesine göre daha küçüktür. Ancak, taneler birleşmez. Bu aşamada tane büyümesi devam eder. Bu nedenle, bu aşama ara aşama olarak adlandırılır. Ara aşamada, gözenek yapısı pürüzsüz ve birbirine bağlı hale gelir. Yoğunlaştırma ve tane büyümesi arttıkça, gözenek yarıçapı azalır (Kuang vd., 1997).

- Son aşama

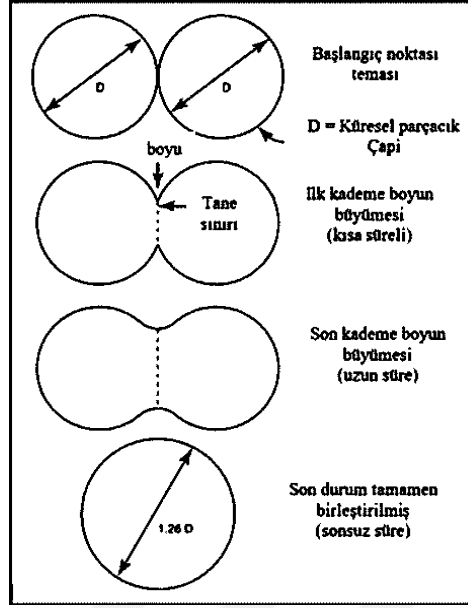
Yavaş bir süreç olan sinterlemenin son aşamasında, gözenekler tanelerin köşelerinde izole hale gelir ve küresel gözenekler yığın difüzyon mekanizmaları ile küçülür. Bu aşamada, sürekli gözenek büzülmesi meydana gelir ve yavaş yavaş tamamen kaybolur. Birleştirme işlemi tamamlanır. Taneler kalsine edilmiş porselenden elde edilenlerden daha büyüktür. Küçük gözenekler oluşur. Yüzey alanı küçülür. Diğer iki aşamanın yüzey alanından daha küçüktür (Kuang vd., 1997). Sinterlemenin son aşaması yaklaşık %95'lik bir bağıl yoğunluğa ulaşabilir. Ancak, tanelerden daha büyük olan gözenekler nispeten daha yavaş büzülür. Sinterlemenin son aşaması uzun süreli bir süreç olduğundan, tanelerin boyutu hızla artarken, daha büyük taneler içindeki gözenekler yavaşça büzülür (Aytimur vd., 2014; Kuang vd., 1997).

3.6.3.2 Sinterleme tipleri

Sinterleme işlemi, fırınlanan bileşime ve ısı işlem sırasında oluşan ikinci fazın derecesine bağlı olarak dört tipe ayrılır.

- Katı faz sinterleme

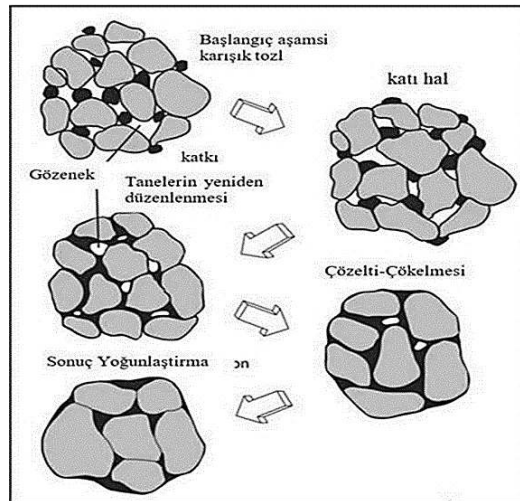
Bu yöntemde, sentezlenen green (yeşil) gövde yüksek bir sıcaklığa, tipik olarak malzemenin erime sıcaklığının 0,5-0,9 katına kadar ısıtılır. Burada sıvı mevcut değildir ve atomik difüzyon veya malzeme taşınımı ortak parçacıklar üretir ve gözenekliliği azaltır. Bu, Şekil 3.8'de gösterilen şekilde katı hal sinterlemesinde tüm bileşenlerin işlem boyunca katı kaldığı anlamına gelir. Tane şekli değişiklikleri yoğunlaştırmayı gerçekleştirirken, hacim ve tane sınırı difüzyonu kütle taşınımını gerçekleştirir. Fonksiyonel seramikler ve birçok silikat olmayan seramik bu yöntemle işlenir (Iyasara vd., 2015).



Şekil 3.8 İki küreli model ile sinterleme sırasında parçacıklar arası bağların oluşumu (Iyasara vd., 2015).

- Sıvı faz sinterleme

Sıvı faz sinterleme, sinterleme sıcaklığında az miktarda sıvı içerir. Mevcut sıvının hacim yüzdesi orijinal katı karışımınınkinden daha azdır, bu nedenle gözenek boşluğunu doldurmak için yetersizdir. Daha düşük sıcaklıklarda, sıvı faz öncelikle katının çözünmesi ve yeniden çökmesi yoluyla yoğunlaştırmanın artmasını sağlar ve bu da hızlı kütle taşınımına olanak tanır. Bu durum Şekil 3.9’de gösterilmiştir. Ürünün tam olarak yoğunlaştırmasını sağlamak için ek işlemler gereklidir. Bu yöntemle WC/Co, W/Ni/Fe ve diğer seramikler üretilir (German vd., 2009; Iyasara vd., 2015).



Şekil 3.9 Sıvı faz sinterleme işleminin şematik gösterimi (German vd., 2009)

3.6.3.3 Sinterleme tekniği

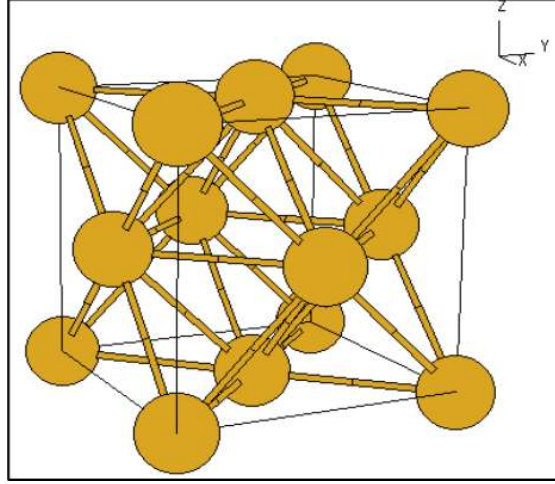
Gerekli uygulama için istenen yoğunluk, mikro yapı ve faz bileşimine sahip yoğun seramikler elde etmek için çok çeşitli sinterleme teknikleri geliştirilmiştir. Genel olarak, basınçsız sinterleme ve basınç destekli sinterleme, bir seramik veya seramik tozu kompaktını sinterlemenin iki ana yöntemidir. Basınç destekli sinterleme kıvılcım plazma sinterleme (SPS), sıcak presleme (HP) ve sıcak izostatik preslemeyi (HIP) içerir (Magnani vd., 2001; Sonber vd., 2013).

3.7 Bakır

İnsanların kullandığı en eski metal bakırdır. Tarih öncesi çağlardan beri kullanılmaktadır. İnsanlar 10.000 yılı aşkın süredir bakır madenciliği yapmaktadır (Pearce, 2019). Bakır (Cu) doğal metal olarak ve kuprit, malakit, azurit, kalkopirit ve bornit minerallerinde bulunur. Ayrıca genellikle gümüş üretiminin bir yan ürünüdür. Sülfürler, oksitler ve karbonatlar en önemli cevherlerdir (Manrique vd., 2019).

Bakır, mükemmel ısı iletkenliği ve korozyon direncine sahip çok yönlü bir mühendislik malzemesidir ve çeşitli mühendislik uygulamaları için uygundur. İşlenebilirliği, sünekliği ve korozyon direnci onu elektrik ve elektronik endüstrilerinde vazgeçilmez bir malzeme haline getirmektedir. Bakırın yüksek elektriksel ve ısı iletkenliği, üretim kolaylığı, estetik açıdan çekiciliği ve belirli özelliklere sahip yüzlerce faydalı alaşım oluşturma yeteneği gibi özellikleri sayesinde kullanımı artmaktadır (Cartigueyen ve Mahadevan, 2015).

Bakır, yüzey merkezli kübik kafese (YMK) sahip polimorf olmayan bir metaldir (Şekil 3.10). Saf bakır kırmızımsı bir renktedir. Erime sıcaklığı 1083°C ve yoğunluğu 8,9 g/m³ olup alüminyumdan üç kat daha ağırdır. Bakırın ısı ve elektriksel iletkenliği 391 W/mK olup, gümüşe kıyasla daha düşük, ancak alüminyuma kıyasla 1,5 kat daha büyüktür (Sankar vd., 2018).



Şekil 3.10 Bakır kafes (YMK) (Sankar vd., 2018)

Bakır esaslı metal matrisli kompozitler elektronik ambalajlama, direnç kaynağı elektrotları ve ısı eşanjörleri dahil olmak üzere elektrik ve elektro teknik uygulamalar için gelecek vaat eden malzemelerdir (Baczewska ve Wąsik, 2016). Bakır matrisine seramik parçacıkların dahil edilmesiyle, bu malzemeler saf bakıra kıyasla daha yüksek mekanik özellikler sunarak elektronik ambalajlama, direnç kaynağı elektrotları ve ısı eşanjörleri gibi çeşitli uygulamalar için ideal hale gelir (Canakci vd., 2014).

3.7.1 Bakır Alaşım Türleri

Düşük mukavemet ve aşınma direnci bakırın uygulama alanını sınırlamaktadır. Bakır matrise sert parçacıkların eklenmesi, bakırın mekanik performansını ve aşınma direncini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda toz metalurjisi tekniği gibi kompozit üretimine yönelik bazı geleneksel teknolojiler ile birlikte istenen elektriksel ve ısı iletkenliğinin korunmasına ve bakırın uygulama alanının genişletilmesine katkıda bulunur (Dixit ve Srivastava, 2018).

Seramik parçacık takviyeli metal matrisli kompozit (MMK) üretimi için in situ bir teknik geliştirilmiştir. Elektrot malzemesi olarak oksitleyici, borür ve karbür gibi seramik parçacık takviyeli bakır esaslı metal matrisli kompozitler (MMK) geliştirilmiştir, bunun nedeni ise seramik parçacıkların yüksek sıcaklıklarda kararlı olmasıdır (Fan vd., 1994). Bakır esaslı kompozitlerin başlıca faydaları daha düşük yoğunluk, artmış yorulma mukavemeti, üstün korozyon direnci ve daha yüksek özgül mukavemettir. Bakır, elektriksel iletkenliği için verimli bir malzeme olarak bilinir,

ancak daha verimli hale getirmek için farklı malzemelerle takviye ederek mekanik özelliklerini iyileştirmek gerekir. Katı hal süreci, metal matris ile seramik takviye arasındaki reaksiyonları en aza indirerek takviye ile matris arasındaki bağı artırır. Takviye ve matris arasındaki ısı ilişkisi değişmeden kalır. Isıl genleşme katsayısı uyumsuzluğu yüksek artık gerilime yol açar, bu da kompozitin çekme sünekliğinin düşük olmasına neden olur (Shehata vd., 2009). Bakır esaslı kompozit malzemeler, bakır tozlarının dispersiyon tozları ile mekanik olarak karıştırılması, soğuk presleme ve ardından dövme veya ekstrüzyon yoluyla sıcak konsolidasyon gibi toz metalurjisi yöntemleriyle üretilmektedir. Bu yöntemle kompozit malzemelerin üretimi nispeten basit hale gelmektedir (Shehata vd., 2009).

3.7.2 Bakırın Mekanik, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Gümüş, altın, platin ve cıvadan daha aktif olan bakır elementinin kimyasal sembolü Cu'dur. Atom numarası 29, atom ağırlığı 63,546 g/mol; rengi ise kırmızımsı-turuncudur. Bakırın 27 izotopu olmasına rağmen, sadece ikisi karardlıdır ve atom numaraları sırasıyla 63 ve 65'tir. Bakır, bir geçiş metali olarak, altın ve gümüş ile birlikte periyodik tablonun 11. grubunda yer alır. Mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip olan bakır, gümüşten sonra diğer tüm elementler arasında en iyi iletken malzemedir. Bakırın diğer fiziksel, kimyasal ve mekanik çeşitli özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir (Aydın, 2013).

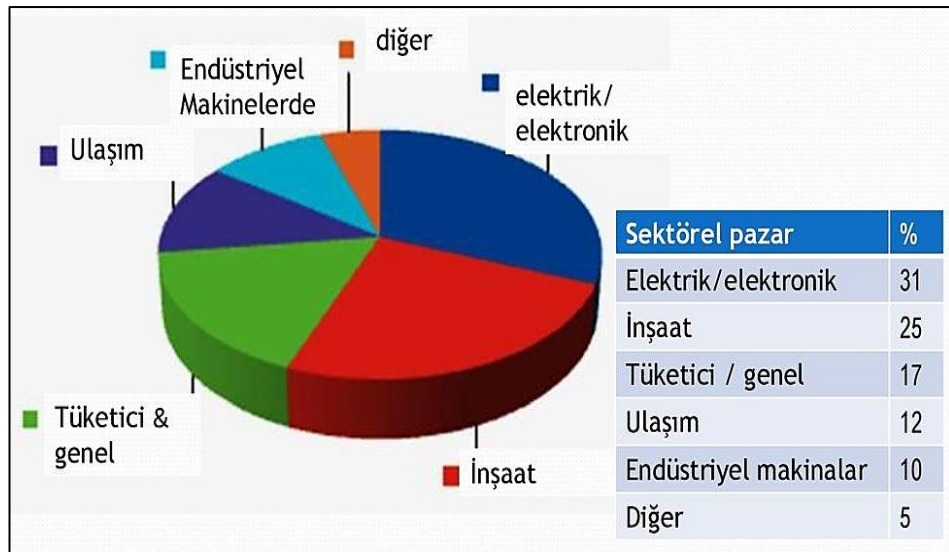
Tablo 3.4 Bakırın özellikleri (Aydın, 2013)

Sembol	Bakır (Cu)	Atom Numarası	29
Yoğunluk (RT)	8,96 g/cm ³	Sıvı Yoğunluğu	8,02 g/cm ³
Erime Noktası	1084°C	Isıl İletkenlik	401 W/mK
Kaynama Noktası	2562°C	Young Modülü	110-128 GPa
Poisson Katsayısı	0,34	Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik
Isıl Genleşme	16,5 µm/ mK	Elektrik Yalıtımı	16,78 n.Ω.m

Bakırın mekanik özellikleri durumuna bağlıdır ve kafes yapısı ile tanımlanır. Bakır, oda sıcaklığında ve daha düşük sıcaklıklarda iyi şekillendirilebilirliğe ve tokluğa sahiptir. Sıcaklığın artırılması bakırın mukavemet özelliklerini sürekli olarak azaltır. Ayrıca, yaklaşık 500°C'de bakırın teknik plastik özellikleri azalır. Bu özelliğinden dolayı bakırın 800°C ila 900°C'de soğuk şekillendirilmesi veya sıcak şekillendirilmesi uygundur. Soğuk şekillendirme mukavemet özelliklerini iyileştirir ancak sünekliği azaltır. Döküm bakır 160 MPa'lık bir mukavemete sahiptir. Sıcak haddeleme bakırın mukavemetini 220 MPa'ya çıkarır. Bakır, soğuk deformasyonla iyi bir sünekliğe sahiptir (Fintov ve Konen, 2012).

3.7.3 Bakır Uygulamaları

Bakır ve bakır alaşımları çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilmektedir. Şekil 3.11'te bakırın bazı uygulamaları yer almaktadır (Fintov ve Konen, 2012). Mükemmel iletkenliği ile bakır, her türlü elektrik ve elektronik uygulama için vazgeçilmez bir malzemedir ve dünya çapında bakır kullanımının yaklaşık 1/3'ünü oluşturur. Sıhhi tesisat, çatı kaplama, musluklar, vanalar vb. dahil olmak üzere inşaat, korozyona karşı yüksek direnç göstermeleri nedeniyle bakır ve alaşımları için bir diğer önemli uygulama alanıdır. Bakır, işlenebilirliği ve dayanıklılığının yanı sıra ısı ve elektriksel iletkenliği sayesinde enerji ve ulaşım endüstrisinde (otomobiller, uçaklar, trenler, gemiler vb.), endüstriyel makine ve ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.11 Bakır alaşımlarının kullanım alanları (Aydın, 2013)

Ayrıca bakır, çinko, kalay veya alüminyum gibi diğer metallerle birleşerek pirinç, bronz gibi bir alaşım oluşturduğunda farklı özellikler sergiler ve çok sayıda özel uygulamada kullanılabilir. Bakır ingot, katot, levha, tel veya çubuk olarak üretildiğinden, bakır ve alaşımları çoğunlukla ekstrüzyon, haddeleme, çekme, eritme, elektroliz veya atomizasyon yoluyla tel, levha, plaka veya toz gibi yeni bir forma dönüştürüldükten sonraki uygulamalarda kullanılır (Aydın, 2013).

3.8 Bor Karbür (B₄C)

Bor karbür (B₄C) yüksek teknoloji seramikleri arasında önemli bir yere sahiptir. Elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzeme olan bor karbür, üretilebilirlik açısından en sert malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Bor-karbon sistemindeki en kararlı bileşik olan bor karbür, yaklaşık %9-%20 gibi geniş bir çözünürlüğe sahip tek bir faz olarak bulunmaktadır. Bor karbür, asit ve bazlarla kolayca reaksiyona girmez (Khanra, 2007).

3.8.1 Bor Karbürün Özellikleri

Bor karbür (B₄C), silisyum karbür, kübik bor nitrür ve elmas gibi metalik olmayan sert malzemelerle aynı kategoride yer alan oksitsiz bir seramiktir. İlk karbon bazlı malzemeler, 1883 yılında Joly tarafından üretilmiş olup onu 1894'te Moissan izlemiştir. 1934 yılında Ridgway, bu tür bor-karbon bileşiklerinin bileşimini analiz etmiş ve BC'yi stokiyometrik oran için kimyasal formül olarak belirlemiştir (Domnich vd., 2011).

Bor karbür (B₄C) yüksek sertliği (Vickers ölçeğinde 2900 kg/mm²), yüksek Young modülü (450-470 GPa) ve düşük yoğunluğu (2,52 g/cm³) ile karakterizedir, Kırılma tokluğu 2,9-3,7 MPa ve erime noktası 2445 °C'dir. Karbürün ısı ve elektriksel iletkenlikleri B, C oranına ve safsızlık miktarına göre değişir. Hidroflorik asit, sülfürik asit ve nitrik asit gibi çok güçlü asit karışımlarında yavaşça çözünebilir ve bazı metaller, metal hidrürler, metal oksitler ve borürler oluşturabilir. Bor karbürdeki bor içeriği %78 ile %85 arasında değişmektedir. Piyasada bulunan bor karbürdeki ikinci faz grafitir ve mukavemetini sınırlar. Bor ve karbon arasında hesaplanan kovalent bağ enerjisi 9,42 eV iken iyonik bağ enerjisi 1,41 eV olarak hesaplanmıştır. Bu bağlama

enerjileri, bağın doğasının yaklaşık %90 kovalent olmasıyla tutarlıdır (Domnich vd., 2011). Bu yüksek kovalentlik özelliği, bor karbür ile ilişkili aşırı sertliği ve Young modülünü açıklar. Bor karbürün yüksek sertliğine rağmen, yüksek bağlama mukavemeti, düşük koordinasyon sayısı (esas olarak kovalent bağlanma nedeniyle) ve kaplamalı kayma sistemlerinin eksikliği, dislokasyon hareketine karşı direncine katkıda bulunarak kırılma bir mekanik davranış oluşturur. Bor karbürün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Bor karbürün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Domnich vd., 2011; Wiley, 2011; Donald ve Mcmillan, 1976)

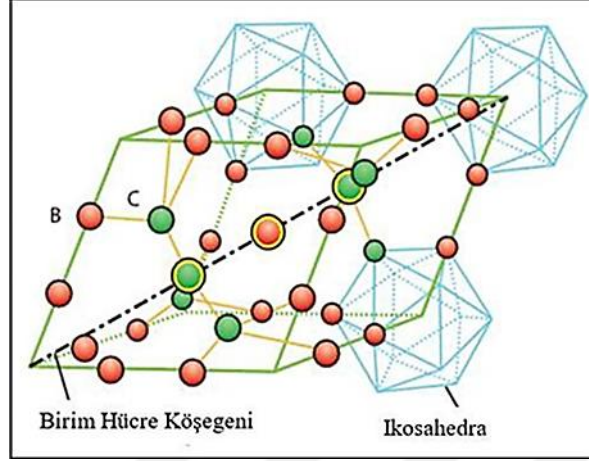
Birleşim	(B ₄ C)	Yoğunluk	2,52 (g/cm ³)
Moleküler Ağırlık	55,26	Kristal Yapı	Rhombohedral
Renk	Siyah	Erime Noktası	2450°C
Sıkıştırma Dayanım	2750 (MPa)	Elektriksel İletkenlik	140 (Ω ⁻¹ m ⁻¹)
Sertlik	27,4-34,3 (GPa)	Uzay Grubu	R ³ m
Young Modülü	290-450 (GPa)	Kafes Parametreleri	a ⁰ =0,55991, c ⁰ =1,20740 (nm)
Poisson Katsayısı	0,18	Birim Hücre Hacmi	3,27809 (nm ³)

Bor karbür, sertliği, tokluğu ve aşınma direnci de dahil olmak üzere üstün nitelikleri nedeniyle çok sayıda sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tank zırhlarında, kurşun geçirmez yeleklerde, nükleer kontrol çubuklarında, aşındırıcılarda ve diğer uygulamalarda çeşitli kullanımları vardır, bu da onu mühendislik ve endüstriyel ortamlarda çok yönlü ve kullanışlı bir malzeme haline getirir (Donald ve Mcmillan, 1976; Wiley, 2011).

3.8.2 Bor Karbürün Kristal Yapısı

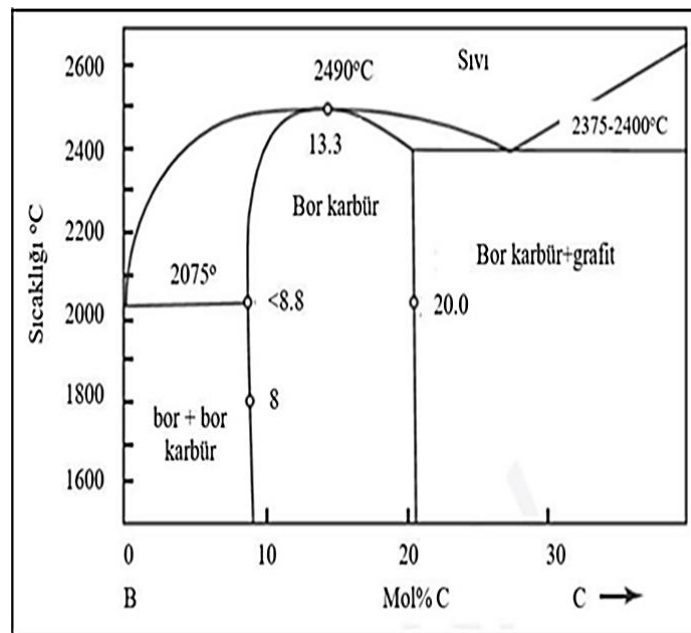
Birim hücre 15 atom içerir ve bunların dizilimi köşelerde sekiz ikosahedron (yirmi eşkenar üçgen yüzlü) oluşturur ve bunlar eşkenar dörtgenin c eksenini boyunca uzanan ikosahedronlar arası üç atomlu zincirlerle birbirine bağlanır (altıgen bir birim hücre için). Gövdesel diyagonal C-B-C ikosahedronlar arası zincir, stokiometrik B₄C

yapısındaki $B_{11}C$ ikosahedronları birbirine bağlar (Kovziridze vd., 2013; Schwetz, 2000). Bor karbür birim hücresi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 B_4C 'nin kristal yapısı (Schwetz, 2000)

Bor karbürün %8,8 ila %20 karbon veya $B_{10}C$ ila B_4C kompozit aralığında katı bir çözelti olarak bulunmaktadır (Skorokhod vd., 1996). Karbon ve bor atomlarının ikosahedron veya ikosahedronlar arası zincir kafes bölgelerinde disposisyonu bu bileşim aralığını açıklamaktadır. 20'yi aşan bir karbon içeriği B_4C ve serbest grafit Şekil 3.13'da gösterilen oluşumla sonuçlanır. Stokiyometrik bileşimin karbon içeriği azaldığında, bor atomları karbon atomlarının yerini alarak borca zengin bor karbür oluşturur (Domnich vd., 2011).



Şekil 3.13 B-C faz diyagramı (Domnich vd., 2011)

3.8.3 Bor Karbürün (B₄C) Kullanım Alanları

3.8.3.1 Sertliğe dayalı kullanım

Bor karbür, taşlama, bindirme ve parlatma gibi işlemlerde aşındırıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek sertliği, malzemeyi yüzeylerden verimli bir şekilde çıkarmasını sağlayarak kesici takımların, taşlama çarklarının ve aşındırıcı tozların üretiminde yararlı olmasını sağlar (Schwetz, 2000).

3.8.3.2 Nükleer teknolojide kullanım

Nükleer reaktörler, kontrol çubukları üretmek için bor karbür kullanır. Reaktör çekirdeği, fazla nötronları absorbe ederek fizyon reaksiyonlarının hızını düzenlemek için bu kontrol çubuklarını yerleştirir. Bor karbürün yüksek nötron soğurma kesiti onu bu amaç için mükemmel bir malzeme haline getirir (Mikhaelia vd., 2021).

3.8.3.3 Kimyasal kullanımlar

Bor karbür en kararlı bileşiklerden biridir. Mineral asitler veya sulu alkali tarafından çözülmez; ancak, karışık hidroflorik-sülfürik asit veya hidroflorik-nitrik asit tarafından yavaşça ayrıştırılır (Schwetz, 2000). Bor karbür tozu, çelik ve diğer demir esaslı malzemelerin yüzey tabakasına bor eklemek için kullanılır.

3.8.3.4 Refrakterlerde kullanım

Bor karbür, yüksek sıcaklık fırınları, fırınlar ve reaktörlerin yapımında kullanılan refrakter malzemelere dahil edilir. Bu malzemeler, önemli deformasyon veya bozulma olmaksızın aşırı sıcaklıklara dayanabilen astarlar, tuğlalar ve şekiller oluşturur. (Schwetz, 2000).

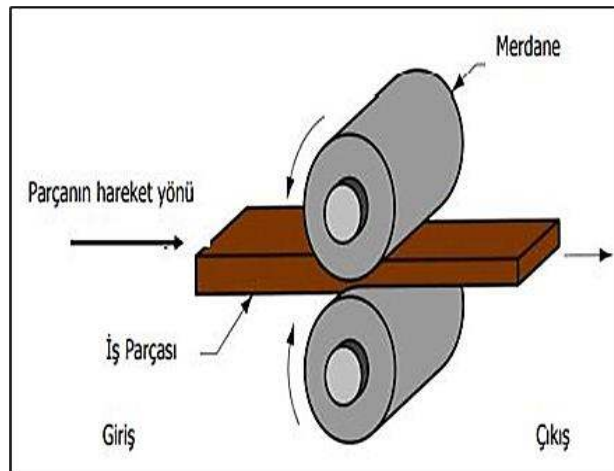
3.9 Haddeleme İşlemi

Haddeleme, metali tekdüze hale getirmek için bir veya daha fazla çift merdaneden geçirerek kalınlığını azaltan bir metal şekillendirme işlemidir. 1600'lerin başında

başlayan bu işlem, metal parçaları ve nesneleri mekanik deformasyon yoluyla şekillendirerek kütlelerini korur. Haddeleme sınıflandırması, sıcak haddeleme işlemi olmak üzere haddelenmiş metalin sıcaklığına dayanır. Metalin sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeyse, işlem sıcak haddeleme olarak, metalin sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaysa, işlem soğuk haddeleme olarak nitelendirilir. Bu haddeleme işlemi, malzeme bilimindeki plastik deformasyon esaslarına uygun gerçekleştirilir (Ray, 2016). Makara çiftlerini içeren makara stantları, metali verimli bir şekilde işlemek için haddehanelerde düzenlenir. Çelik fabrikalarındaki haddehane bölümleri yarı mamul döküm ürünlerini bitmiş ürünlere dönüştürür. Amaç, metalin uzunluğunu artırarak ve genişliğini biraz artırarak kalınlığını azaltmaktır (Rentz vd., 1999).

3.9.1 Haddeleme İşleminin İlkeleri

Haddeleme ilkeleri, metali farklı yönlerde (saat yönünde ve saat yönünün tersine) dönen iki merdane arasındaki bir boşluktan geçirerek ince, uzun bir tabaka haline getirmek için kullanılan bir işlemdir (Agrawal ve Chauhan, 2013). İki merdane arasındaki boşluğun, oluşturulacak malzeme parçasının kalınlığından daha küçük olması gerekir. Metal parça, merdanelerin arasına konulduğunda, merdanelerden gelen bir sürtünme ve sıkıştırma kuvveti ile karşılaşır, ince ve uzun veya orijinal uzunluğundan daha uzun olacak şekilde sıkıştırılır (Şekil 3.14). Parça, merdaneler



Şekil 3.14 Haddeleme işleminin temelleri (Deepika vd., 2016)

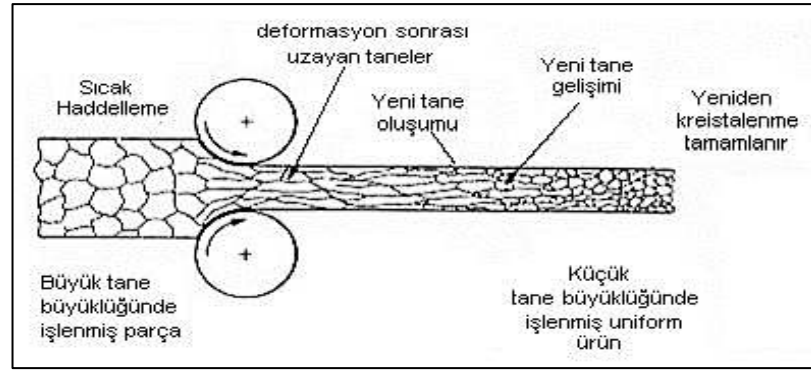
arasındaki boşluktan geçerek yolunu tamamladığında, orijinalinden daha az kalınlığa sahip olmalı, uzunluğu ve genişliği artmalıdır (Deepika vd., 2016). Kalınlıktaki bu azalma “geri çekiş” olarak adlandırılır ve uzunluk ve genişlikteki artış sırasıyla “mutlak uzama ve yayılma” olarak adlandırılır (Kittiphat ve Sunthorn, 2014). Haddeme işlemleri, malzemenin homojenliğini ve deformasyon sürecinden kaynaklanan özellik değişimini sağlamak için haddelenen iş bileşeni geometrisine uygun olmalıdır (Bhoyar ve Umredkar, 2020).

3.9.2 Haddeme İşleminin Türleri

Haddeme işlemi en yaşamsal metal şekillendirme işlemlerinden biridir. Haddeme, demir ve demir dışı metallerin en az %95'ini, plakalar, folyolar, şeritler ve çubuklar, kirişler, raylar ve dikişsiz boru gibi istenen kesitlere dönüştürür. Sıcak haddeme, soğuk haddeme, yassı haddeme ve kontrollü haddeme olmak üzere çok sayıda haddeme işlemi vardır (Ikumapayi vd., 2019).

3.9.2.1 Sıcak haddeme

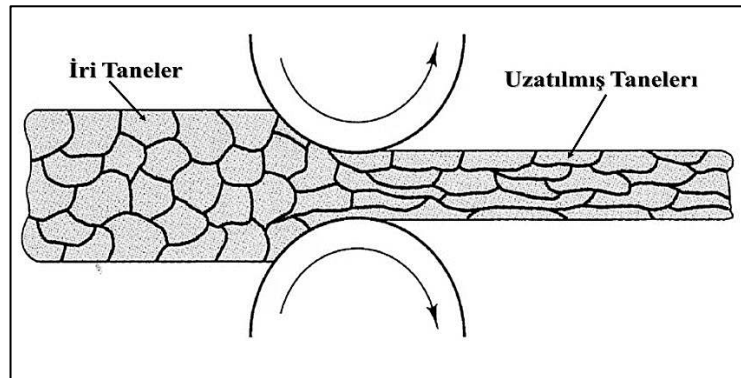
Şekil 3.15’da gösterildiği gibi sıcak haddeme, metal parçaların yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ısıtılması durumunda meydana gelen metal işleme sürecini içerir. Sıcak haddemenin, malzeme taneleri deformasyonunun metalin sertleşmesini önleyen eş eksenli mikro yapısını koruduğu ve tüm metal işlemlerinin içinde en yüksek tonaja sahip olduğu düşünülmektedir (Bhaduri, 2018). Sıcak haddemede enerji maliyetlerinde hızlı ve etkili bir azalma da dahil olmak üzere çeşitli avantajlar ortaya çıkmaktadır. Böylece, olumsuzluklara neden olan çatlaklar ve diğer kusurlar önlenirken işlem performansı iyileştirilir. Haddeme öncesi ısıtma işlemi kalınlık yönünde gerilme özelliklerinin bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, düzensiz soğumadan kaynaklanan artık gerilme eğilimi, metalik malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir (Ikumapayi vd., 2019). Sıcak haddelenmiş malzemeler otomotiv jantları, tekerlekleri ve kavramalarında, tarım ve gıda işleme endüstrilerinde ve caddeler ve otoyollar için ray korkuluklarında ve pek çok alanda kendilerine uygulama alanı bulmaktadır (Ikumapayi vd., 2019).



Şekil 3.15 Sıcak haddellemede tane dizilimi düşünülmektedir (Bhaduri, 2018)

3.9.2.2 Soğuk haddelleme

Soğuk haddelleme, metal yeniden kristalleşme sıcaklığının altındayken (genellikle oda sıcaklığında) gerçekleşir, bu da gerinim sertleşmesi yoluyla mukavemeti %20'ye kadar artırır. Bu, metalin akma dayanımını ve sertliğini artırır. Bu, metalin kristal yapısına defektler ekleyerek ve daha fazla kaymayı önleyen sertleştirilmiş bir mikroyapı oluşturarak yapılır. Metal oda sıcaklığında olduğu için, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki metale göre daha az biçimlendirilebilir. Bu da soğuk haddelemeyi Şekil 3.16'deki sıcak haddeleden daha yoğun emek gerektiren ve maliyetli bir işlem haline getirir. Ayrıca yüzey kalitesini iyileştirir ve daha sıkı toleranslar sağlar. Yaygın olarak soğuk haddelenmiş ürünler arasında levhalar, şeritler ve çubuklar bulunur; bu ürünler genellikle sıcak haddelenmiş aynı ürünlerden daha küçüktür. İş parçalarının daha küçük boyutları ve sıcak haddelenmiş yapıya kıyasla daha yüksek mukavemetleri nedeniyle, Şekil 3.16'de gösterildiği gibi dörtlü yüksek veya altılı soğuk hadde kullanılır. Soğuk haddelleme, bir iş parçasının kalınlığını tek bir geçişte sıcak haddelleme kadar azaltamaz (Ray, 2016).



Şekil 3.16 Soğuk haddellemede tane dizilimi (Ray, 2016)

3.9.2.3 Sıcak ve soğuk haddelemenin karşılaştırılması

İşlem sıcaklığı, soğuk ve sıcak haddeleme arasında farklıdır. Sıcak haddeleme işlemi yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılır, bu noktada taneler haddeleme işleminden sonra yeniden biçimlendirilir ve gerilimsiz bir durumda bırakılır. Soğuk haddeleme ise, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleşir, düz ve uzamış taneler elde edilir ve malzemeyi anizotropik bir durumda bırakır (Tablo 3.6) (Bhaduri, 2018; Ray, 2016).

Tablo 3.6 Sıcak ve soğuk haddelemenin karşılaştırılması bırakır (Bhaduri, 2018; Ray, 2016)

Sıcak Haddeleme	Soğuk Haddeleme
Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilir	Yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleştirilir
Haddeleme işleminden sonra bile tanecik homojenliği	Haddelemeden sonra taneler uzatılacak
Yüzey kalitesi kötü olacak	Yüzey kalitesi iyi olacak
Çiçek ve kütük gibi yarı mamul ürünler üretilmektedir. Yapısal şekiller de üretilir	Plakalar, levhalar, levhalar ve folyolar gibi bitmiş ürünler üretilir
Deformasyon için gereken yük daha azdır	Deformasyon için gereken yük daha fazladır
Merdaneler ve stok arasındaki sürtünme katsayısı daha yüksektir	Merdaneler ve stok arasındaki sürtünme katsayısı nispeten düşüktür
Yakın boyutlu toleranslar elde edilemez	Kesit boyutları toleransları kapatmak için tamamlanabilir
Daha az maliyetli	Daha maliyetli
Merdane yarıçapının boyutu genellikle daha yüksektir	Nispeten merdane yarıçapı daha küçüktür

3.9.2.4 Haddeleme düzeni

Haddeleme için gerekli minimum merdane sayısı ikidir ve maksimum sayı gerekli redüksiyon miktarına, haddelenen metalin türüne aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

- Merdaneli haddeleme makinesi: burada iki, üç ve dört merdane kullanılır.
- Altılı soğuk hadde: bir dizi merdane birlikte kullanılır.

- Planeter hadde: merdaneler gezegen hareketi şeklinde düzenlenmiştir.
- Tandem (ardışık) hadde: sürekli haddeleme için sürekli bir merdane düzeni kullanılır.
- Sendizmir hadde: altılı soğuk haddeye benzer (Ray, 2016).

3.9.3 Haddeleme Makinesi Türleri

Haddelemede, haddelenen malzemenin kesitini küçültmek için merdaneler araç olarak kullanılır. Bunlar yüksek sertlik ve mukavemete sahip aletlerdir. Hem kesitsel hem de yassı ürünler bu aletlerin kullanımını gerektirir. Merdane, haddeleme sırasında yüksek bir yüke maruz kalır ve bu da merdane ile malzeme arasındaki temas alanında aşınmaya neden olur. Merdanenin gövdesi, haddelenen ürünün profiline bağlı olarak, levhaların (plakalar veya şeritler) haddelenmesi için düz (yassı) veya şekillendirilmiş malzemenin (kesitler) haddelenmesi için oluklu olabilir. Merdanelerin, hadde makinesinde normal ve normal olmayan haddeleme koşullarından kaynaklanan her türlü gerilimi ve yükü ve ayrıca haddeleme sırasında merdanenin aşınmasıyla değişen gerilimleri de dikkate alması gerekir. Sargıların tasarımı, ayırma kuvvetleri, torklar ve sargılar arasındaki yüksek basınçların kullanılmasında olağanüstü gereksinimleri karşılamalıdır. Buna ek olarak, merdanenin malzemeye temas ettiği alan üstün aşınma direnci göstermelidir. Sargılar kırılmaya, dökülmeye ve korozyona karşı dayanıklı ve dirençli olmalı ve mükemmel performans sağlamalıdır (Wusatowski, 2013).

3.9.3.1 İki merdaneli haddeleme makinesi

İki merdaneli haddeleme makinesinde aynı hızda ancak zıt yönlerde dönen iki yatay merdane bulunur. Stant olarak bilinen sağlam dik yan çerçeveler, merdaneleri destekleyen yatakları içerir. Üst merdaneyi yükselterek veya alçaltarak merdaneler arasındaki boşluk ayarlanabilir (Bhoyar ve Umredkar, 2020).

3.9.3.2 Üç merdaneli haddeleme makinesi

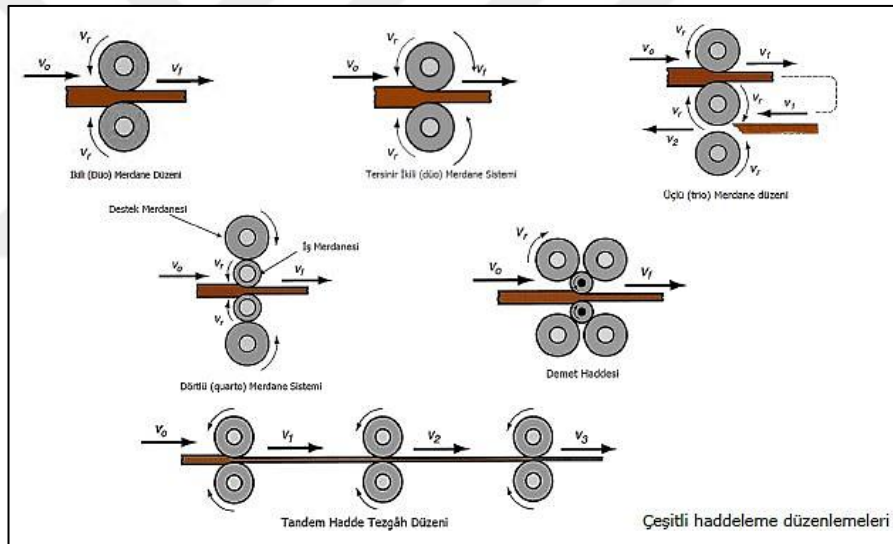
Üst üste dizilmiş üç paralel merdaneden oluşur. Üst ve alt merdanelerin dönüş yönleri aynıdır, ancak ara merdane bunların her ikisine de zıt yönde döner (Bhoyar ve Umredkar, 2020).

3.9.3.3 Dört merdaneli haddeleme makinesi

Esasen iki merdaneli haddeleme makinesidir, ancak küçük boyutlu merdanelere sahiptir. Pratik olarak dört yatay merdaneden oluşur; ortadaki iki merdanenin boyutu üst ve alt merdaneden daha küçüktür.

3.9.3.4 Altılı soğuk hadde

Sert, ince malzemelerin haddelenmesi için iki küçük merdanenin her birinin iki veya daha fazla büyük destek merdanesi tarafından desteklendiği özel bir dört merdaneli haddeleme değirmen türüdür (Wusatowski, 2013). Çeşitli hadde türleri Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



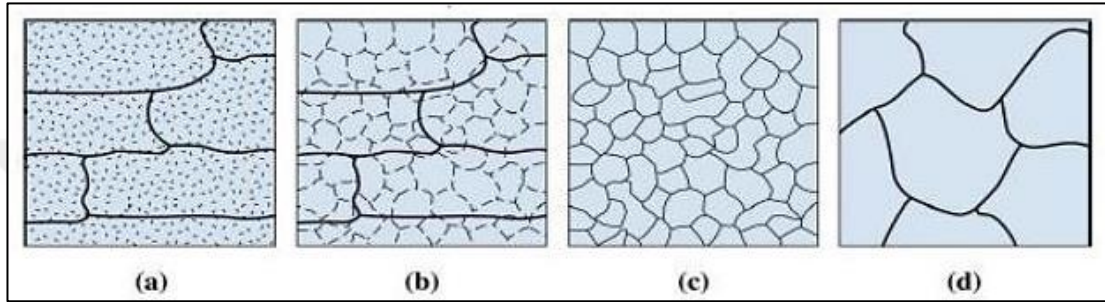
Şekil 3.17 Çeşitli haddeleme düzenlemeleri (Wusatowski, 2013)

3.9.3.5 Metal haddelemede tane yapısı

Bir tane yapısı, farklı şekilde yönlendirilmiş ve tane sınırlarıyla çevrelenmiş tanelerin düzenlenmesi olarak görülebilir. Tane, kristal kafesin sürekli yönelimine sahip bir metal bölgesidir. Soğuk ve sıcak haddelemede, tane yapısı sıcaklık etkisi nedeniyle farklıdır (Agrawal ve Chauhan, 2013).

Şekil 3.18 soğuk (a) ve sıcak (b) haddeleme gerçekleştiği zamandaki tane yapısını göstermektedir. Sıcak haddeleme tane boyutunu etkili bir şekilde azaltarak süneklik

ve mukavemette önemli iyileşmeler sağlar. Şekil 3.18c düzgün olmayan taneli ingotların sıcak haddeleme yoluyla düzgün tanelere dönüşümünü göstermektedir. Soğuk haddeleme yeniden kristalleşme sıcaklığının altında meydana gelir, bu nedenle kristal yapıda kusurlar ortaya çıkar ve sertleştirilmiş mikroyapı ile kayma önlenir Şekil 3.18d. Sıcak haddeleme yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilir ve ortalama taneler azaltıldıktan sonra denge tane yapısı korunur (Ikumapayi vd., 2019; KurzydŁowski, 1999).



Şekil 3.18 (a) Soğuk işlem görmüş (b) Toparlanma sonrası (c) Yeniden kristalleşme sonrası (d) Tane büyümesi sonrası (Ikumapayi vd., 2019)

3.9.3.6 Haddeleme kusurları

Haddeleme kusurları, haddeleme işlemi sırasında ortaya çıkan sorunlardır, söz konusu kusurlar haddelenmiş plakaların ve levhaların yüzeylerinde mevcut olabilir veya iç yapısal kusurlar olabilir. Kusurlar sadece yüzey görünümünü bozdukları için değil, aynı zamanda mukavemet, şekillendirilebilirlik ve diğer üretim özelliklerini olumsuz etkileyebildikleri için de istenmeyen durumlardır. Bu kusurlar yüzey kusurları ve iç yapısal kusurlar olmak üzere iki ana tipte sınıflandırılabilir (KurzydŁowski, 1999).

3.9.3.7 Yüzey kusurları

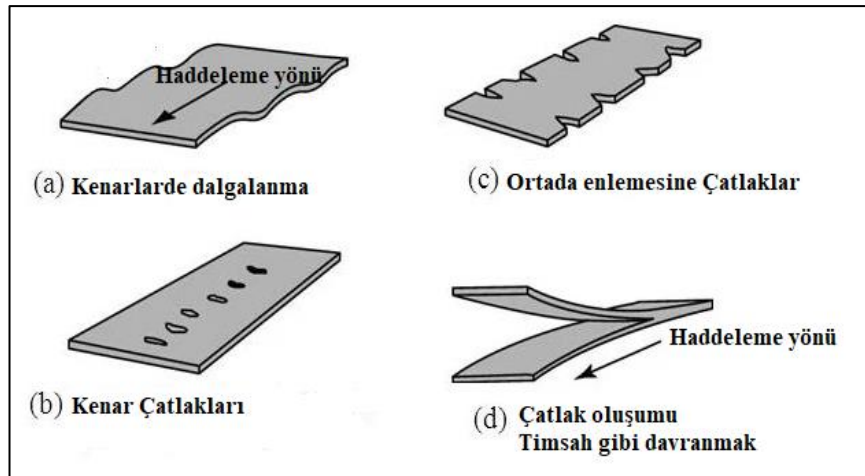
Yüzey kusurları haddelenmiş malzemenin yüzeyinde görülür ve düzensiz deformasyon, çatlaklar veya çizikler gibi değişkenlerden kaynaklanabilir. Yaygın yüzey kusurları pul çöküntüleri, kenar kırıkları ve çizikleri kapsar. Makaradaki boşluklar, kalınlık farkları, eşit olmayan gerilim dağılımı veya aşırı soğutma gibi defektler nihai üründe kusurlara yol açabilir (KurzydŁowski, 1999).

3.9.3.8 İç yapısal kusurlar

İç yapısal kusurlar malzemenin yüzeyinde görünmez ancak malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını etkileyebilir. Bazı yaygın iç yapısal kusurlar arasında Şekil 3.18’de gösterildiği gibi dalgalı kenar çatlakları, şeridin ortasında enlemesine çatlaklar, kenar çatlakları ve timsah ağzı şeklinde hareket eden çatlaklar yer alır. Bu kusurlar eşit olmayan gerilim dağılımı, aşırı su verme veya metalurjik zayıflıklar gibi faktörlerden kaynaklanabilir (KurzydŁowski, 1999).

➤ Dalgalı kenarlar

En yaygın haddeleme kusurlarından biri, kenardaki liflerin merkezdekilerden daha uzun görünmesidir. Bu durum, içbükey merdaneler büküldüğünde meydana gelir ve elastik deformasyonlara yol açar. Merkezdeki kalınlık, kenarların daha uzun olduğu anlamına gelir. Basınç yükünün sapması veya haddeleme parçasının orta kısmının bükülmesi çeşitli haddeleme kusurlarına neden olabilir. Merdane boşluklarında bir kusur olduğunda, merdane saclarında değişim meydana gelir. Hacim ve genişlik sabit olacak şekilde kalınlık değişirse, merkez kenarlardan daha kısa olabilir. Bu durumda Şekil 3.19a’da gösterildiği gibi kenar kısmı sıkışma halinde ve merkez kısmı ise gerilim altında olabilir. Dalgalı kenarlar için çözüm, merdanelere bir “kavis” sağlamaktır. Haddeleme yükleri altında sapmanın etkisini dengelemek için orta kısımda hafifçe dışbükey hale getirilir (Ikumapayi vd., 2019).



Şekil 3.19 Haddeleme kusurları (Ikumapayi vd., 2019)

➤ **Ortada enlemesine çatlaklar**

Bu durum, metal levhanın ortasında küçük çatlakların oluşması şeklinde açıklanır. Ortada enlemesine çatlakları, merdaneler yüksek haddeleme basıncı altında büküldüğünde en yaygın görülen kusurdur. Kenarlarda basınç gerilmesine ve merkezde çekme gerilmesine neden olur. Şekil 3.19b'deki ortada enlemesine çatlakların oluşmasına yol açan durum ise homojen deformasyonla iş parçasında indüklenen bu çekme gerilmeleridir. Bu haddeleme kusuru, şeridin gerilme dağılımı eşit olmadığına ortaya çıkan bir tür dalgalı çatlaktır. Şeridin merkez hattında bir fermuar şeklinde görülür; bu nedenle ortada enlemesine (fermuar) çatlakları olarak adlandırılır (Ikumapayi vd., 2019).

➤ **Kenar çatlakları**

Sıcak merdaneler soğutulduğunda kenar çatlakları oluşur. Şerit üzerinde aşırı su verme etkilerine neden olur. Kenarları soğutmak için fazla su kullanılır. Fazla su kullanımı (Şekil 3.19c)'de gösterildiği gibi düz olmayan şeritlere neden olabilir. Sürtünme kuvveti köşeleri engellediği ve orta kısmın uzunluğunu artırdığı için metalin kenarları yuvarlanır (Ikumapayi vd., 2019).

➤ **Timsah ağzı şeklinde hareket eden çatlaklar**

Haddeleme işlemi sırasında, metal stok katmanlarının ayrılması mümkündür, bu da timsah ağzı şeklinde hareket eden çatlaklara sahip levhaların oluşmasına neden olur. (Şekil 3.19d) sacın kavisli yüzeye yapıştığını ve merdanelerin yönüne uyarak düzlem üzerinde levhaların oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Timsah ağzı şeklinde hareket eden çatlaklar, çoğunlukla bileşenlerin sac kalınlığı boyunca eşit olmayan dağılımından kaynaklanır. Metalde bir çatlak olarak kendini gösteren bu kusuru önlemek hayati önem taşır. Bu çatlak katmanların ayrılmasına ve levhadaki boşlukların genişlemesine neden olur. Deformite bir timsahın ağız boşluğunu andırır, bu nedenle timsah ağzı şeklinde hareket eden çatlaklar olarak adlandırılır (Ikumapayi vd., 2019).

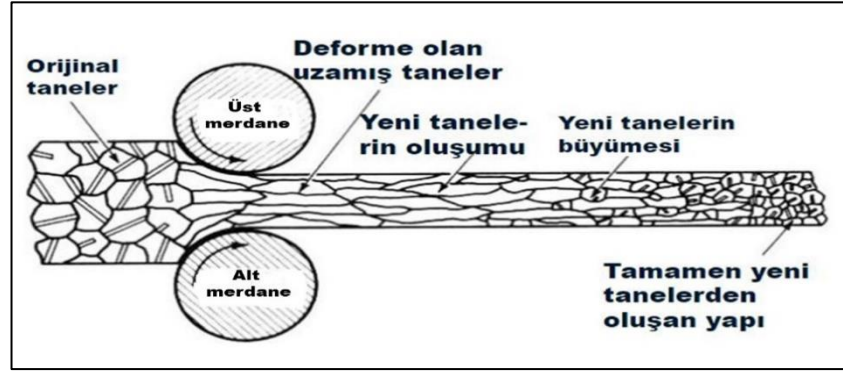
Haddeleme kusurlarını önlemek için haddeleme işlemini dikkatle kontrol etmek ve yüksek kaliteli malzeme ve ekipman kullanmak önemlidir. Bu, yüksek elastik modüllü merdanelerin kullanılmasını, haddeleme kuvvetinin azaltılmasını ve şekil değişikliklerini ve kusurları en aza indirmek için sürekli haddeleme tekniklerinin kullanılmasını içerebilir. Ayrıca, haddeleme ekipmanının bakımını düzgün bir şekilde yapmak ve herhangi bir kusuru mümkün olan en kısa sürede tespit edip düzeltmek için haddeleme işlemi sırasında malzemeyi izlemek kritik önem taşır (Ikumapayi vd., 2019).

3.9.4 Yeniden Kristalleşme

Yeniden kristalleşme, sıcak haddeleme işlemi sırasında metallerde meydana gelen, metalin çalışırken veya haddelenirken yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde plastik olarak deforme olduğu bir süreçtir. İşlem, malzemenin kristalleşme için gerekenden daha yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Yeni, gerilimsiz taneler eski, deforme olmuş tanelerin içinde ve tane sınırlarında çekirdeklenir ve gelişir, gerilme sertleşmesinin neden olduğu bozulmuş tanelerin yerini alır. Metalin mekanik özellikleri eski, daha sünek ve daha zayıf haline geri döner (Alaneme ve Okotete, 2019).

Sıcak ve soğuk haddeleme arasındaki ayrım, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığına göre işleme sıcaklığına dayanır. Haddeleme, söz konusu metalin sıcaklığına göre sınıflandırılır. Metal kompozitin sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığını aşarsa, işlem sıcak haddeleme olarak bilinir (Şekil 3.20). Soğuk haddeleme, kompozitin sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığından düşük olduğunda gerçekleşir. Kompozitin sıcaklığı, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde kaldığından emin olmak için haddeleme sırasında izlenir. Sıcaklık bu seviyenin altına düşerse, sıcak haddeleme olarak kabul edilmez. Östenit taneleri haddelenirken deforme olur veya uzar. Ancak bu uzamış taneler deformasyon bölgesinden çıkar çıkmaz yeniden kristalleşmeye başlar. Sıcaklık üst kritik sıcaklığın altına düştüğünde tek yönlü östenit taneleri parçalanır. Bunların yerini çekirdeklenen, yeniden kristalleşen ve bir ferrit-perlit yapısı oluşturan yeni bir tane dizisi alır. Yeniden kristalleşen ferrit-perlit taneleri

denge mikroyapısını korur ve metalin tek yönlü olmasını ve işlenerek sertleştirilmesini önler (Agrawal ve Chauhan, 2013).



Şekil 3.20 Sıcak haddeleme sırasında yeniden kristalleşme (Chauhan ve Agrawal, 2013)

3.9.5 Bakırın Isıl İşlemi

Bakır, diğer şekillendirilebilir metallere benzer şekilde, metalin elastik sınırının üzerinde gerilime maruz kalmasını gerektiren plastik deformasyona uğrayabilir ve bu da dislokasyonların yer değiştirmesine neden olur. Bu süreç haddeleme, ekstrüzyon, çekme, delme ve diğer benzer eylemleri içerir. Deformasyon devam ettikçe, metalin birim alanı başına düşen dislokasyon sayısı giderek artar. Bu, deformasyon arttığında dislokasyon sayısının da arttığını ve bu dislokasyonların hareketliliğini engelleyen tane sınırlarının oluşmasına yol açtığını gösterir. Sonuç olarak, takip eden deformasyon süreci de yüksek miktarda uygulanan stres gerektirecektir (Olokode vd., 2008).

Bakır kübik kristal yapıya (yüzey merkezli kübik) sahiptir ve bu da yüksek sünekliği açıklar. Bakırın bükülmesi, kafes içinde dislokasyon adı verilen kusurlar eklediği için deformasyon sertleşmesine (veya gerinim sertleşmesine) neden olur (Banerjee ve Bhargava, 2017). Bu kusurlar ek deformasyonu önleyerek bakırı daha sert ve güçlü hale getirir ve daha fazla şekil değiştirmesini zorlaştırır.

Yeniden kristalleşme ve tavlama, soğuk işlemeden sonra saf bakıra uygulanan birincil ısıtma işlemleridir. Saf bakırın yeniden kristalleşmesi tipik olarak 375°C ile 700°C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleşir. 600°C, farklı oranlarda soğuk işlem görmüş bakırın ısıtma işlemleri için sıklıkla kullanılan bir ara sıcaklıktır.

Bakır ve bakır alaşımlarının ısıtılma işlemi sık uygulanan bir prosedürdür. Saf bakır ve bazı bakır alaşımlarına deformasyon sertleşmesi uygulanabilir ve güçlendirilebilir. 590°C’de, metalin orijinal tane yapısı tamamen değişir; buna rağmen, kazanımlarda fark edilebilir bir artış olmaz. Bu anlayışla, bakır ve bakır alaşımları ile çalışmak ve onları yüksek sünekliğe kadar tavlama yapmak mümkündür. Ayrıca, yaklaşık 590°C’ye kadar ısıtılarak, ısıtılma malzemenin çekirdeğine iyice nüfuz etmesi için yeterince uzun süre orada tutularak ve daha sonra herhangi bir soğutma hızı ayarı yapılmadan ortam sıcaklığına düşmelerine izin verilerek tavlatabilirler (Fintov ve Konen, 2012).

3.9.5.1 Bakır için ısıtılma işlem süreçleri

Bakır ve alaşımları, mukavemet, sertlik, süneklik, iletkenlik, darbe direnci ve esnek olmama gibi çeşitli özellik kombinasyonlarını elde etmek için ısıtılma işlemine tabi tutulabilir. Bakır ve alaşımları için yaygın ısıtılma işlemleri aşağıdakileri içerir:

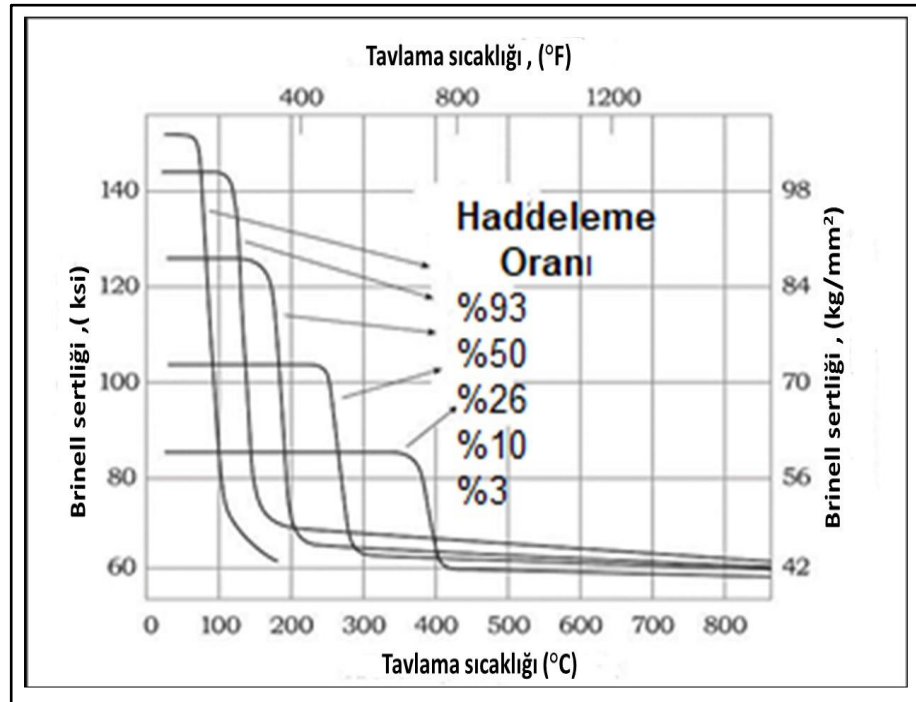
➤ Tavlama

Bakırın tavlama için yüksek sıcaklık gerekir. Bakır 1085°C’de erir ve tavlama genellikle erime noktasının yarısından daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir; daha yüksek sıcaklıklar daha hızlı tavlama neden olur. Normal sıcaklık 400°C’dir, ancak saf bakır ve çeşitli popüler bakır alaşımları için bu sıcaklık genel olarak 590 ila 620°C arasında değişir. Tavlama, yapının oluşmasına ve yeni, gerilimsiz tanelerin üretilmesine neden olur (Li ve Zinkle, 2012). Yeni taneler, deformasyonun neden olduğu dislokasyonları ve diğer kusurları ortadan kaldırarak malzemeyi doğal yumuşak durumuna geri getirir. Başlangıç şeklinde olmasa da, deformasyondan sonra şeklini korur ve kolayca geri bükülebilir ((Banerjee ve Bhargava, 2017).

Tavlama sıcaklığı bakırın mekanik özellikleri üzerinde etkili olabilir; 500°C ile 600°C arasındaki sıcaklıklarda tavlama, yeniden kristalleşme nedeniyle metalin plastik özelliklerini artırırken, 460°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan tavlama yeniden kristalleşmiş tane büyümesine, kopma dayanımında ve sertliğinde azalmaya ve uzamaya neden olabilir (Alhajji, 2016).

Tavlama yoluyla kayda değer bir süneklik elde etmek için bakır ve bakır alaşımları, malzeme çekirdeğinin tamamen nüfuz etmesini sağlayacak kadar uzun süre bu sıcaklığa ısıtılmalı ve ardından doğal olarak oda sıcaklığına gelmesine izin verilmelidir. Bu gecikmeli soğutma, yeni üretilen taneleri sabit tutar ve gergin durumlarına geri dönmelerini önler. Metalik malzemelerin tavlama işlemiyle ilgili genel adımlar aşağıdaki gibidir:

- Isıtma: Malzeme, genellikle yeniden kristalleşme sıcaklığından daha yüksek olan belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Sıcaklık, malzemenin bileşimine ve istenen etkiye göre belirlenir.
- Emdirme: Malzeme doğru sıcaklığa ulaştığında, homojen bir ısınmayı garanti etmek için belirli bir süre yerinde tutulur. Bu emdirmeye süresi iç gerilimleri azaltır ve malzemenin mikro yapısını daha homojen hale getirir.
- Soğutma: Emdirme işleminden sonra malzeme kademeli olarak soğutulur. Soğutma hızı malzemeye ve istenen niteliklere göre değişebilir. Yavaş soğutma hızları genellikle maksimum yumuşaklık ve süneklik elde etmek için kullanılır, ancak daha hızlı soğutma hızları daha fazla sertlik gibi alternatif niteliklerle sonuçlanabilir.



Şekil 3.21 Soğuk haddeleme derecesinin saf bakırın tavlama işlemine etkisi (Bhargava ve Banerjee, 2017)

Şekil 3.21, önceki soğuk işlemin saf bakırın tavlama davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir. Soğuk işlem derecesi kabaca %10'dan az olduğunda yeniden kristalleşme genellikle meydana gelmez. Soğuk işlem derecesi %10 ila %20 arasında olursa, yeniden kristalleşme sıcaklığı yükselir. Yeniden kristalleşme tipik olarak en az %20'lik bir soğuk şekillendirme gerektirir. Birçok durumda, son tavlamayı takiben ince taneli bir yapı oluşturmak için yüksek düzeyde soğuk işlem arzu edilir (Banerjee ve Bhargava, 2017).

➤ **Su verme ve temperleme**

Su verme, martenzit benzeri bir dönüşümü ve ardından malzemeyi sertleştirmek için temperlemeyi içerir.

Su verme, maddenin atomlarını sabitlemek için ısıtılmış bir metali hızlı bir şekilde soğutma işlemidir, bu da kristal kafeste birçok kusurla sert ancak kırılgan bir mikro yapıya neden olarak malzemenin sertliğini ve kırılma hassasiyetini artırır. Temperleme, kristal kafesin sertliğini ve kusur yoğunluğunu azaltırken esnekliğini artırmak için soğutulmuş metalin sıcaklığını düşürme işlemidir (Agrawal ve Chauhan, 2013).

➤ **Çözündürme işlemi ve çökeltme (yaşlandırma) sertleşmesi**

Bu yöntem, bileşenleri katı bir çözültiden çöktürerek mukavemeti artırır. Belirli bakır alaşımlarını normalde soğuk işlemeyle elde edilen seviyelerin üzerinde güçlendirmek için kullanılır.

3.9.5.2 Isıl işlemlerin bakırın özelliklerine etkisi

Bakır malzemelere ısı işlem uygulanmasının amacı; mikroyapı değişikliği, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, elektriksel iletkenliğinin optimizasyonu, ısıl iletkenliğin ayarlanması, korozyon direncinin iyileştirilmesi şeklinde sınıflandırılabilir.

3.9.5.3 Isıl işlem görmüş bakırın uygulama alanları

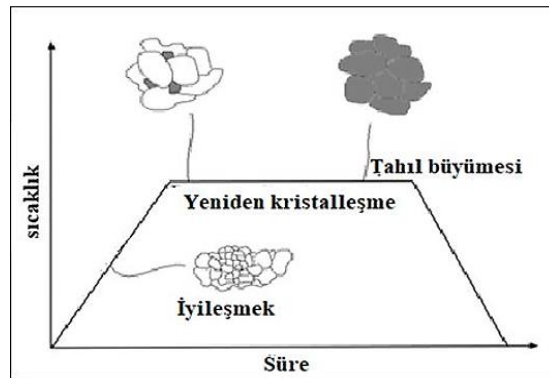
Isıl işlem görmüş bakır ve alaşımları elektrik alanında, metalürji ve aslaşım oluşturmada, otomotiv, uzay ve havacılık alanında, ısı eşanjörlerinde ve radyatörler gibi geniş bir alandaki uygulamalarda kullanılmaktadır.

3.9.5.4 Düşük sıcaklıklarda sertleşme mekanizmaları

Gerinim sertleşmesi veya deformasyon sertleşmesi olarak da bilinen soğuk işleme, bakır ve alaşımları için düşük sıcaklıklarda kullanılan önemli bir sertleştirme yöntemidir. Yeniden kristalleşmeden daha düşük sıcaklıklarda, bu işlem malzemeyi plastik olarak deforme eder. Deformasyon, kristal kafeste dislokasyonlar oluşturarak bunların hareketliliğini kısıtlar ve böylece malzemenin mukavemetini ve sertliğini artırır (Wiedersich, 1964).

3.9.5.5 Yüksek sıcaklıklarda sertleşme mekanizmaları

Yüksek sıcaklıklarda bakır ve alaşımları, çökelme sertleşmesi veya yaşlanma sertleşmesi olarak bilinen yüksek sıcaklıklarda farklı şekilde sertleşir. Bu teknik, alaşım bileşenlerinin eşit şekilde çözünmesini sağlayan malzemenin çözelti ile ısıtılmasını içerir. Bunu takiben, Şekil 3.22 malzemenin aşırı doymuş durumunu korumak için hızlı bir şekilde su vermesini göstermektedir. Belirli bir sıcaklıkta yaşlandırmadan sonra mikroyapının içinde ince çökelti oluşur, dislokasyon hareketini önler ve mukavemet ve sertliği artırır (Wiedersich, 1964). Metalik malzemelerin tavlama işleminde yer alan genel adımlar aşağıdaki gibidir:



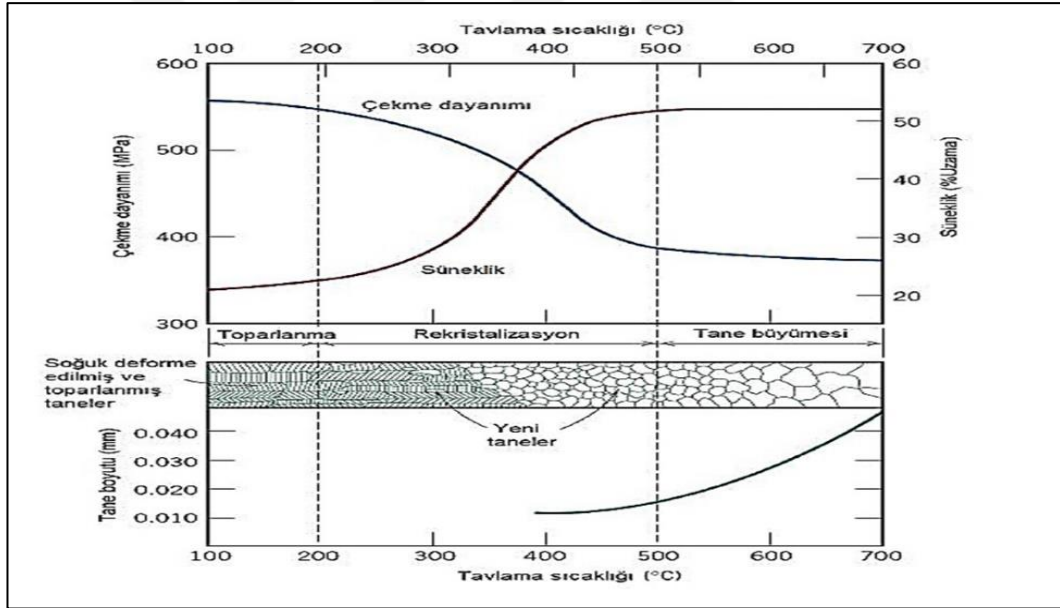
Şekil 3.22 Tavlama işlemi şematığı (Alaneme ve Okotete, 2019)

➤ Toparlanma aşaması

Bu aşamada metalin elektriksel iletkenliği, iç enerji ve termal genleşme gibi fiziksel nitelikleri eski haline getirilmeye çalışılır. Malzemelerin ısıtılması sıcaklıklarını yükseltir, metalleri yumuşatır ve iç gerilimi azaltır (Alaneme ve Okotete, 2019).

➤ Yeniden kristalleşme aşaması

Malzemeler bu aşamada yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üzerinde ancak erime noktalarının altında ısıtılır. Metal kristal oluşumlarında deforme olmuş tanelerin yerini yeni gerilimsiz taneler alır. Şekil 3.23’de gösterildiği gibi, yeni gerilimsiz taneler çekirdeklenir ve gelişir, bu da yeni tanelere sahip ve artık gerilimsiz olan malzemelerle sonuçlanır (Banerjee ve Bhargava, 2017).



Şekil 3.23 Yeniden Kristalleşme, mekanik özellikler ve mikroyapı arasındaki ilişkiler (Alaneme ve Okotete, 2019)

➤ Tane büyümesi aşaması

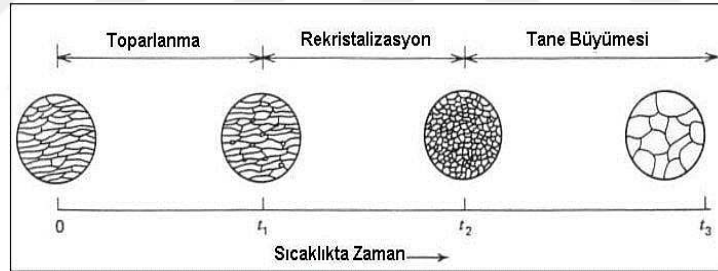
Bu aşama yeniden kristalleşmeyi takiben gerçekleşir ve metallerin mikroyapısı soğudukça daha kaba hale gelir. Malzemeler bu dönemde mukavemet kaybedebilir. Malzemeler tane gelişiminden geçer ve bunu, kaybedilen mukavemeti geri kazanmak

için su verme ve temperleme gibi sertleştirme işlemleri takip edebilir (Alaneme ve Okotete, 2019).

3.9.5.6 Kristalleşme süresi ve sıcaklık arasındaki ilişki

Şekil 3.24, analiz edilen malzemeye ve kristalleşmenin gerçekleştiği koşullara bağlı olarak değişen kristalleşme süresi ile sıcaklık arasındaki bağlantıyı göstermektedir. Temel olarak bazı genel kavramlar belirtilebilir:

- Sıcaklık hızı: Sıcaklığın artırılması kristalleşme oranını hızlandırır. Bunun nedeni, daha yüksek sıcaklıkların daha fazla termal enerji sağlaması ve bunun da malzeme içindeki atomların veya moleküllerin hareketliliğini artırmasıdır. Sonuç olarak, çekirdeklenme ve büyüme süreçleri yüksek sıcaklıklarda daha hızlı ilerleyerek kristalleşme sürelerinin kısalmasına yol açar (Alaneme ve Okotete, 2019).



Şekil 3.24 Toparlanma-yeniden kristalleşme-tane büyümesi sıralanmasıyla gerçekleşen olayların şematik gösterimi (Alaneme ve Okotete, 2019)

- Optimum Sıcaklık Aralığı: Daha yüksek sıcaklıklar tipik olarak daha hızlı kristalleşmeyi destekler; yine de belirli bir malzeme için çekirdeklenme ve büyüme süreçleri arasındaki dengenin ideal olduğu optimum bir sıcaklık aralığı olabilir. Bu sıcaklık aralığından sapılması, tane büyümesinin artması, faz ayrışması veya kusurların oluşması gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilir; bunların tümü kristalleşme sürelerini uzatabilir veya malzeme özelliklerine zarar verebilir.
- Matrisin Yumuşatılması: Yüksek sıcaklıklarda, metal matrisli kompozitler yumuşayarak yeniden kristalleşme sırasında deformasyona ve tane sınırı göçüne olanak sağlar. Matris malzemesinin daha yüksek sıcaklıklarda artan esnekliği, yeni

tanelerin üretimini ve gelişimini kolaylaştırarak daha kısa yeniden kristalleşme sürelerine katkıda bulunur (Alaneme ve Okotete, 2019).

Kimyasal bileşim, mikro yapı, katışkılar (safsızlıklar) ve işleme koşulları kristalleşme kinetiğini etkileyen faktörlerden sadece birkaçıdır. Artan sıcaklık kristalleşme sürecini hızlandırır, yapısal dönüşüm mekanizmaları ve istenen özellikleri elde etmek için ideal sıcaklık aralığınının uygun seçilmesi gerekir (Alaneme ve Okotete, 2019).

3.9.6 Haddeleme İşlemlerinin Kompozit Malzemelere Uygulanması

Haddeleme ve sıcak haddeleme yöntemleri, tıpkı geleneksel metallerde olduğu gibi kompozit malzemelerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler kompozit malzemeleri şekillendirmek ve katılaştırmak için ısı ve basınç kullanır (Zabihi vd., 2013).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan literatür incelemelerinde, bakır –bor karbür metal matrisli kompozitlerin optimum mekanik özellikleri %5-10 aralığında B₄C ihtiva eden numuneerde elde edilmiş olduğundan deneysel aralık maksimum %15 olarak belirlenmiştir. Sıcak kalıpta presleme işlemi gerek işlem zorluğu gerekse kalıpların yüksek basınçlar karşısındaki dayanımlarının düşük olması nedeniyle bir takım dezavantajlar içermektedir. Bu nedenle üretim yöntemi olarak soğuk presleme ve sonrasında sinterleme işlemi ile numune üretimi tercih edilmiştir.

Sıcak haddeleme işlemi levha veya ince parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda merdaneler arasından geçirilmek suretiyle şekil verilen bu işlem hem malzemenin daha küçük kuvvetler altında şekillenmesi hem de iç yapıdaki tanelerin eski haline dönmesinin daha kolay olması ve bunun sonucunda da daha büyük oranlarda yeniden haddelenebilmesine olanak tanınması açısından tercih edilen bir üretim yöntemidir. Bu amaçla yeniden kristalleşmenin daha hızlı olması maksadıyla haddeleme sıcaklıkları 600°C, 700°C ve 800°C olarak seçilmiştir. Böylece deneylerde haddeleme sıcaklığının bakır matrisli kompozitlerdeki etkisi de incelenmiştir.

Yeniden kristalleşme genellikle %10 dan daha yüksek oranda şekil değiştirmiş malzemeler üzerinde belirgin etkiye sahiptir. Sıcak haddeleme işleminde inceltmenin soğuk haddeleme işlemine göre daha yüksek yapılabilmektedir. Bu nedenle sıcak haddelemede haddeleme oranları %10, %20, %30 ve %40 olarak belirlenmiş, böylece haddeleme oranlarının etkisi de incelemelere dahil edilmiştir.

Bilindiği üzere B₄C dünyada bilinen en sert üçüncü maddedir. Bakır gibi yüksek oranda dövülebilirlik özelliğine sahip malzemelerde, şekil değişimi sırasında gerek dislokasyonların gerekse tane hareketlerine karşı engel teşkil edecek ve böylece bakırın sertliğini artıracaktır. Gerek B₄C yoğunluğunun gerekse B₄C tane boyutunun etkisini de incelemek için 25µm, 43µm ve 90µm tane boyutuna sahip takviyeler kullanılmıştır. B₄C yapı içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında katılmış böylece takviye yoğunluğunun etkilerinin de incelenmesi hedeflenmiştir.

Matris malzemesi olarak %99,5 saflıkta 40µm tane boyutuna sahip bakır tozları kullanılmıştır. Her üç B₄C tane boyutunda da aynı tane boyutuna sahip bakır tozu kullanılmıştır. Böylece bakır tozlarına göre takviye tozlarının boyutunun sıcak haddelemeye etkisi de incelenmiştir.

Sonuç olarak 3 farklı kimyasal karışım, 3 farklı haddeleme oranı, 3 farklı B₄C tane boyutu başta olmak üzere 4 farklı haddeleme oranına sahip numuneler deneylerde kullanılmıştır. 117 farklı parametreye göre üretilen numuneler deneylerde kullanılmıştır. Her bir numune grubuna ait 6 adet numune üretilmiştir. Üretim parametreleri Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kompozitlerin takviye oranları ve üretim parametreleri

Cu (wt.)%	%95, %90, %85
B₄C (wt.)%	%5, %10, %15
Tane Boyutları B₄C (µm)	25µm, 43µm, 90µm
Haddeleme Sıcaklığı (°C)	600°C, 700°C, 800°C
Haddeleme Oranları (%)	%10, %20, %30, %40
Sinterleme Sıcaklığı (°C)	850°C
Sinterleme Süresi (dak)	90 (dak)

Sıcak haddelemenin iç yapı ve mekanik özelliklere etkisi 3 noktalı eğme deneyi, optik mikroskop(OM) ile yüzey incelemesi,SEM-EDS ve XRD analizi, element haritalama, sertlik ölçümü ve kırık yüzeylerin incelenmesi ile analiz edilmiş, elde edilen bulgular haddelenmemiş numuneler ile karşılaştırılmıştır.

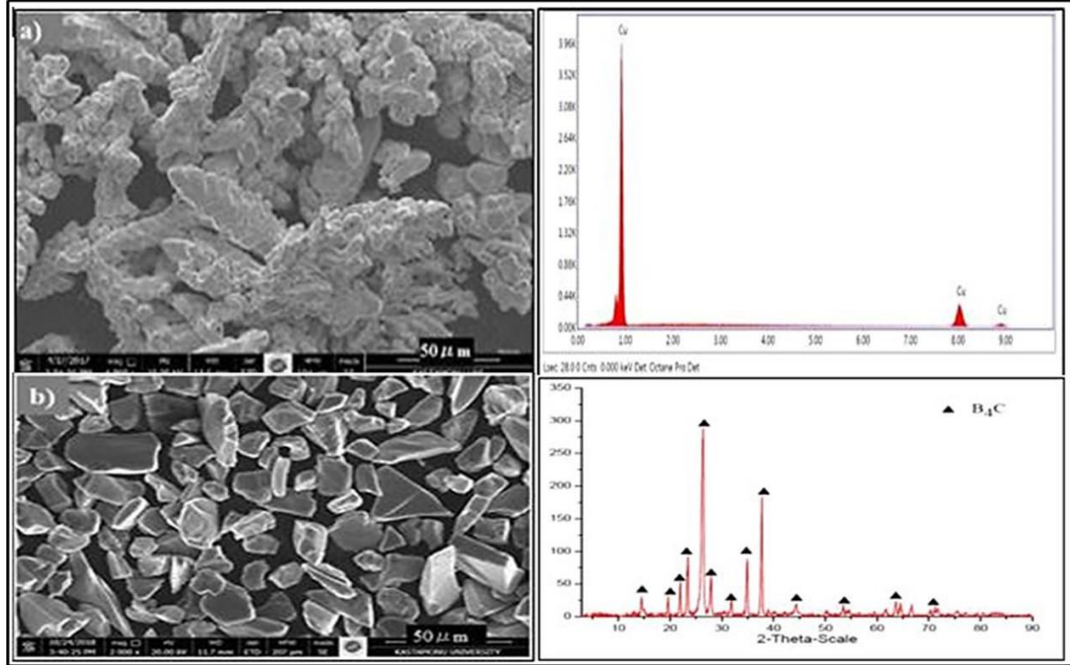
Gerek deneylerde kullanılan ham maddeler gerekse üretim ve test yöntemleri ilerleyen bölümde verilmiştir.

4.1 Numunelerin Hazırlanması

4.1.1 Hammaddeler ve Kompozit Üretimi

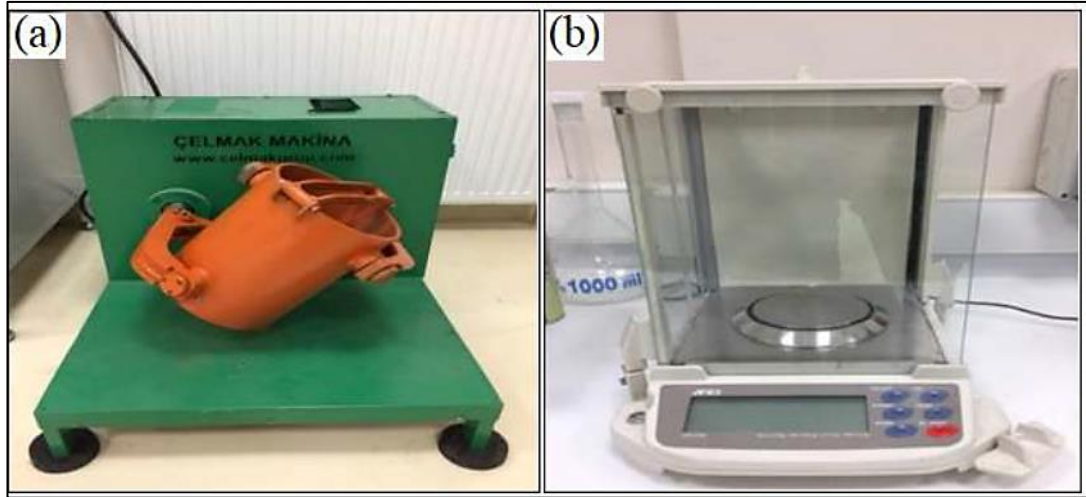
Bu çalışmada matris olarak bakır (Cu) ve takviye olarak bor karbür (B₄C) kullanılmıştır. Bakır tozu %99 saflıkta ve 40µm tane boyutunda, B₄C ise %99 saflıkta ve (25µm, 43µm, 90µm) tane boyutlarındadır. Deneylerde kullanılacak numuneler

soğuk presleme yöntemi ile toz metalurjisi yöntemiyle (TM) üretilmiş ve Numune üretiminde kullanılan bakır ve B₄C tozlarına ait SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekil 4.1a’da bakır tozlarına ait görüntü yer almaktadır. Şekil 4.1b ise B₄C parçacıklarının ait keskin köşeli bir morfolojiye sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.1 (a) Bakır tozlarının (b) Bor karbürün (B₄C) SEM-EDS Görüntüleri

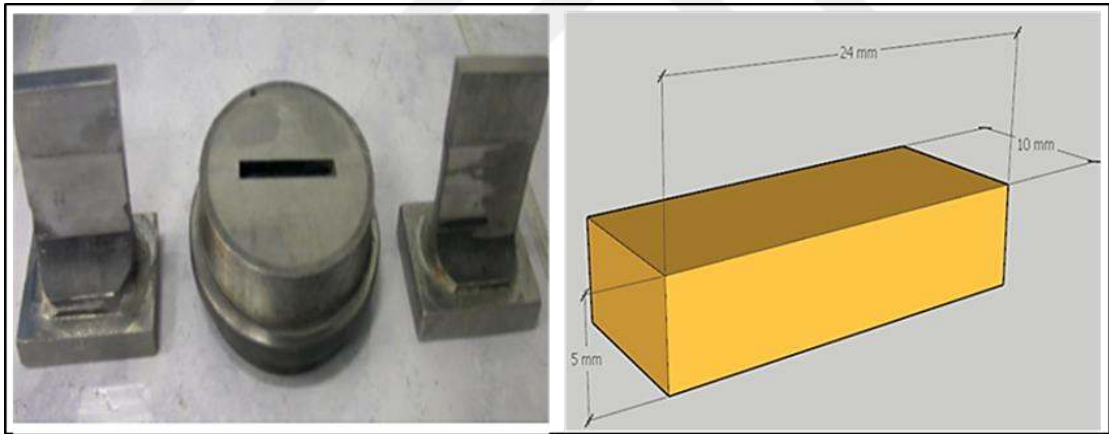
Farklı takviye oranları için gerekli olan bakır ve B₄C miktarı 0,001 gram hassasiyete sahip elektronik bir terazi kullanılarak tartılmak suretiyle hazırlanmıştır. Kompozit üretim matrisinde istenen performansı elde etmek için, seçilen tozların uygun şekilde karıştırılması ve homojen bir şekilde dağıtılması gerekir. Bu amaçla üç eksenli dönme prensibiyle çalışan bir toz karıştırıcı (turbula) kullanılmıştır. Düzenli karıştırmayı sağlamak ve topaklanmayı önlemek için, tozlar çeşitli boyutlarda 11 çelik bilye seti ile birlikte plastik bir kaba konulmuş, karıştırıcı miksera yerleştirilmiş ve dakikada 45 devirde 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Tozlar karıştırılmadan önce 0,001 gram hassasiyete sahip elektronik hassas terazide tartılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan karıştırıcı ve hassas terazi Şekil 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4.2 (a) Toz karıştırma makinesi (b) Hassas terazi

4.1.2 Numune Boyutu

Deneylerde 24x10x5 boyutlarında numuneler Şekil 4.3’de gösterilen kalıp kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 4.3 Numunelerin şekli ve boyutları

4.1.3 Presleme İşlemi

Presleme işlemin geçmeden önce kalıp alkol-çinko streat karışımı ile yağlanmış, kalıp kuruduktan sonra 5.1 mm yüksekliğe sahip numune ağırlığı kadar toz karışımı hassas terazide tartılmak suretiyle kalıba dökülmüş ve ardından kalıp tek yönlü olarak manubir el hidrolik pres kullanılarak (Şekil 4.4) oda sıcaklığında sıkıştırılmıştır. Tozların yeterli plastik şekil değişimine ulaşması ve birbirine tutunması için 1 dakika süreyle 500 MPa basınç altında tutulmuşlardır ve sonra kalıptan çıkarılmıştır.



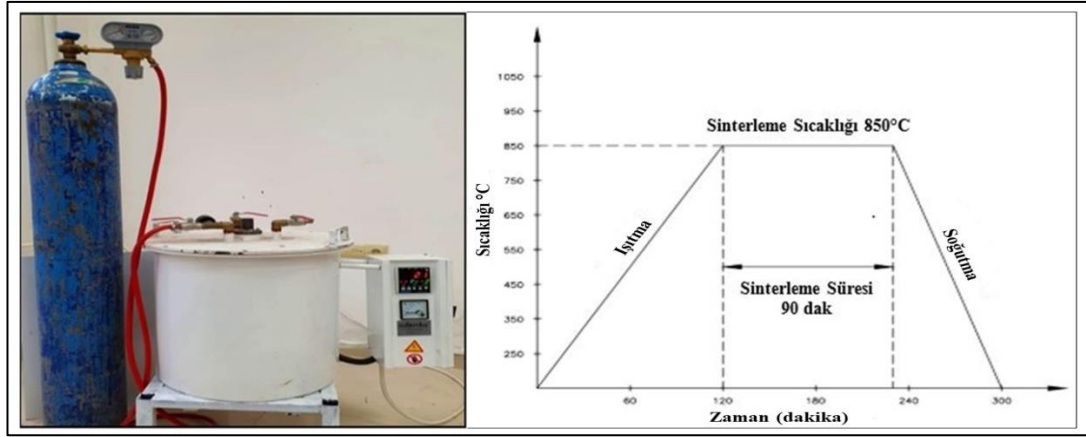
Şekil 4.4 Sıkıştırma presi

4.1.4 Sinterleme İşlemi

Sinterleme, sıkıştırılmış bir tozun erime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta kararlı bir katıya dönüştürülmesi için bir fırında kontrollü ısıtmaya tabi tutulduğu bir yöntemdir. Parçacık difüzyonu sayesinde parçacıkların mekanik esneklik ve dayanım akzanırlar, taneler arasında bir bağ oluşur. Oluşan bağın daha kolay ve hızlı olabilmesi için sıcaklığa ihtiyaç vardır. Bakır B₄C kompozitler ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda 850°C civarındaki sinterleme sıcaklıklarının optimum sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle üretilen numunelerin sinterleme işlemi 850°C 'de yapılmıştır. Yüksek sıcaklıkta ortamın korozyona neden olmaması için kontrollü bir ortamın sağlanması mecburidir. Sinterleme işlemi argon (Ar) atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

Isıtma, cihazın gücüne de bağlı olarak 7°C/ dakikalık bir ısıtma hızı gerçekleşmiştir. Sinterleme sıcaklığına 120 dakikada ulaşılmış, bu sıcaklıkta 90 dakika beklenmiş ve bu sürenin sonunda doğal soğumaya geçilmiştir.

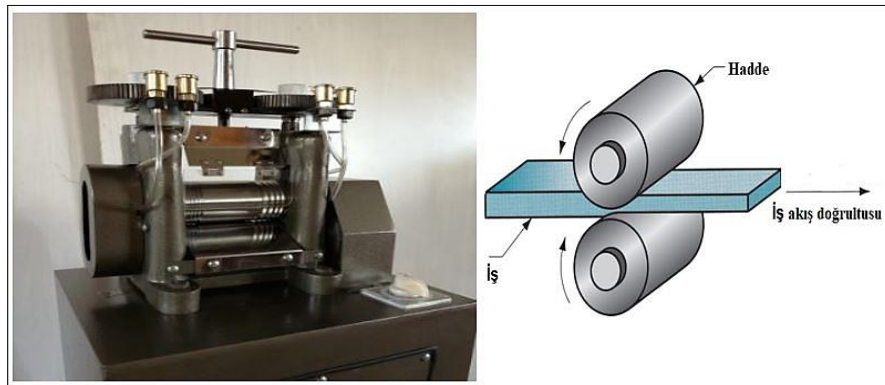
Tüm bu işlemler argon gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleminin yapıldığı cihaz ve işlem grafiği Şekil 4.5 de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Sinterleme fırını ve grafik sıcaklık döngüsü

4.1.5 Haddeme İşlemi

Sinterlenmiş numuneler haddeme işlemine geçmeden önce yüzeydeki düzensizlik vokalıp izlerinin giderilmesi amacıyla 400 mesh kum su zıparsı ile düzeltme işleminden geçirilmiş, korozyonun önlenmesi için alkolle yıkanmış ve kurutulmuştur. Haddeme işlemi için Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarları'nda bulunan haddeme cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.6). Haddeme sıcaklığının etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla 600°C, 700°C, ve 800°C'lik 3 farklı haddeme sıcaklığında işlem gerçekleştirilmiştir. Haddeme işlemi %10, %20, %30, %40 oranında yapılmıştır.



Şekil 4.6 Haddeme makinası

Haddeme cihazı yanında bulunan tav fırınında numuneler işlem sıcaklığına kadar ısıtılmış, fırından alınan numuneler hemen merdanelerden geçirilmek suretiyle haddeme işlemi zaman kaybetmeksizin yapılmıştır. Haddemede kullanılan merdanelerin çapı 70 mm ve merdanelerin dönüş sayısı dakikada 30 dur. Haddeme

hızı 6.5 m/dakika olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin haddeleme öncesindeki ve sonrasındaki kalınlıkları Tablo 4.2’de gösterilmiştir. .

Tablo 4.2 Haddelenmiş numunelerin son kalınlığı

Haddeleme Oranları	Nihai Kalınlık
%0	5 mm
%10	4,5 mm
%20	4 mm
%30	3,5 mm
%40	3 mm

4.2 Karakterizasyon Teknikleri

Her kategoriden, farklı B₄C tane boyutlarına (25µm, 43µm, 90µm) ve takviye oranlarına (%5, %10, %15) sahip üçer numune seçilmiştir. Bu numuneler sıcak haddeleme işlemine tabi tutulmadan önceki özelliklerin belirlenmesi için refereans olarak alınmıştır. Daha sonra, her kategoriden 36 numune alınarak, farklı haddeleme sıcaklıklarında (600°C, 700°C, 800°C) ve farklı oranlarında (%10, %20, %30, %40) sıcak haddeleme işlemine tabi tutulmuş bu şekilde toplam 108 numune elde edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için numuneler sırasıyla (320, 400, 600, 800, 1200 mesh) su zımparası kullanılarak zımparalanmıştır. Son yüzey iyileştirmesi, numunelerin 3 mikronluk METKON marka elmas çözelti kullanılarak parlatılması suretiyle yapılmıştır. Yüzey hazırlama işlemleri Kastamonu Üniversitesi Malzeme ve Metallurji Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında Metkon Gripo 2 zımparalama ve yüzey parlatma cihazıyla yapılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Zımparalama ve parlatma makinesi

Yüzey hazırlama işleminden sonra korozyon oluşumunu önlemek amacıyla numuneler metil alkol ile yıkanmış ve kırıltılmıştır. Mikroyapı analizleri yapılmadan önce numuneler 50 ml damıtılmış su, 50 ml HCl çözeltisi ve 5 g FeCl₃ içeren bir karışımla 20 saniye süreyle dağlama işlemine tabi tutulmuştur.

4.2.1 Yoğunluk Ölçümleri

Herhangi bir bileşiğin deneysel yoğunluğu, kompozit bileşenlerinin yoğunluğuna bağlıdır. Deneyler için üretilen numunelerin takviye oranlarına bağlı olarak teorik yoğunlukları Tablo 4.3'te verilmiştir. Yapılan tüm yoğunluk ölçümleri Archimedes yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3 Tüm numuneler için teorik yoğunluk

Kompozitler	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)
Bakır (Cu)	8,96
Bor karbür (B ₄ C)	2,52
Cu %95 + B ₄ C %5	8,638
Cu %90 + B ₄ C %10	8,316
Cu %85 + B ₄ C %15	7,994

4.2.2 XRD Analizi

X-ışını analizinin birincil amacı, sıcak haddeleme işleminin ve üretimdeki değişkenlerin kompozit malzemenin kristal yapısını nasıl etkilediğini, farklı fazların oluşup oluşmadığını belirlemektir. Şekil 4.8 bu araştırmada kullanılan Bruker D8 Advance marka X-ışını ekipmanını göstermektedir.

Difraksiyon paterni, 20° ila 80°'lik bir tarama aralığı boyunca, 20°/dak hızında ve 0,05°'lik adımlarla düzenli olarak toplanmıştır. Hedef malzeme olarak Cu K α (1,5 = 1,542 Å) seçilmiş ve X-ışını sistemi 20 kV'luk bir hızlandırma geriliminde çalıştırılmıştır.

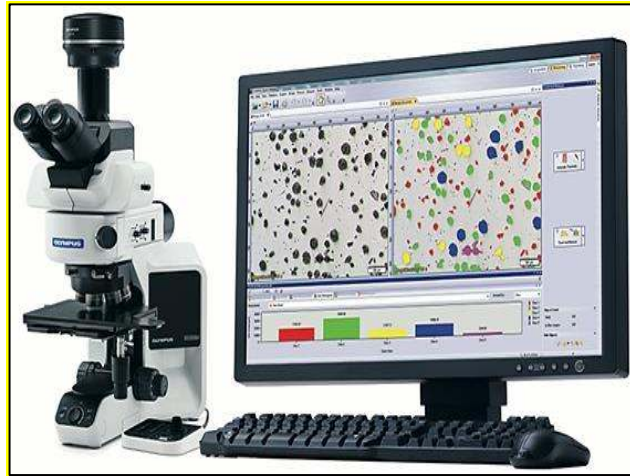


Şekil 4.8 Faz analizi tespiti için kullanılan XRD cihazları

4.2.3 Mikroyapı Analizi

4.2.3.1 Optik mikroskopi

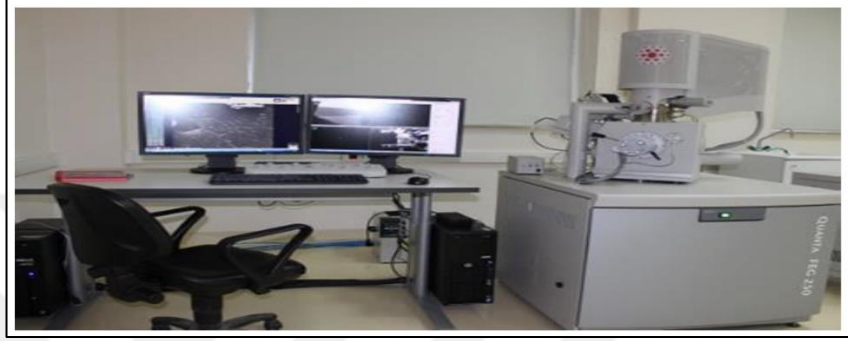
Numunelerin iç yapısının optik mikroskop (OM) altına incelenmesi için öncelikle yüzey hazırlama ve dağlama işlemleri yapılmıştır. Dağlanan malzemelerin iç yapı görüntülenmesi Şekil 4.9’da görülen Olympus GX41 inverted (ters) metal mikroskop kullanılarak yapılmıştır.



4.9 Optik mikroskop cihazları

4.2.3.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS)

İç yapıların ve kırılma yüzeylerinin daha büyük büyütme oranlarında görüntülenebilmesi ve EDS analizleri için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan FEI marka Quanta 250 FEG model (Şekil 4.10), bir taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 4.10 Mikroyapı görüntüleme ve faz analizi cihazları

4.2.4 Mekanik Karakterizasyon

4.2.4.1 Sertlik testi

Soğuk presleme işleminden sonra sinterlenen ve sinterlendikten sonra farklı oranlarda haddeleme işlemine tabi tutulan numunelerin sertlikleri Kastamonu Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan Brinnel sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 4.11). Ölçümler 62,5 kg yük altında 2,5 mm çapında bir çelik bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler , en yüksek ve en düşük değer çıkartılarak diğer 5 ölçüm değerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.11 Sertlik ölçüm cihazı

4.2.4.2 Üç nokta eğme testi

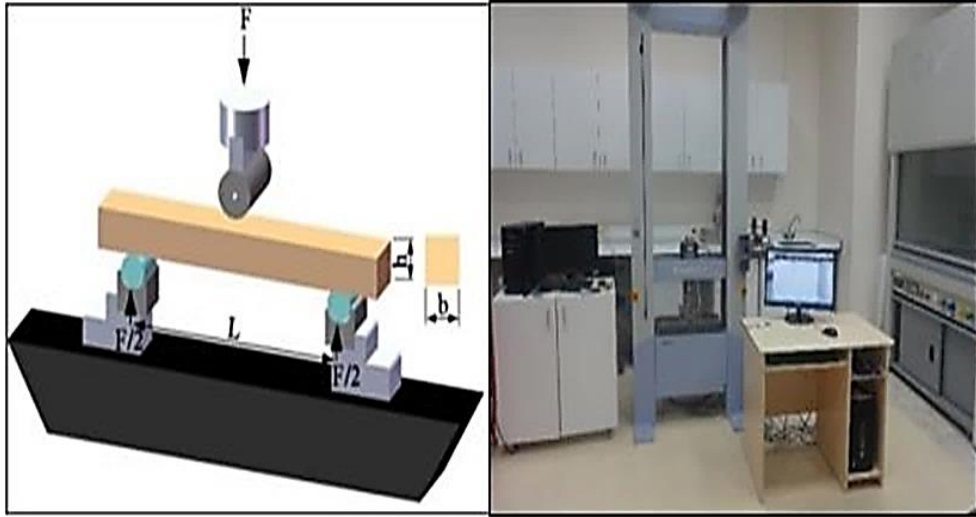
Yapışma dayanımını kontrol etmek ve bakır matrisli kompozitlerin enine kopmaya karşı ne kadar dirençli olduğunu görmek için ASTM B 528-83a'ya göre üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Testler Kastamonu Üniversitesi Laboratuvarında SHİMADZU marka universal çekme testi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ekipman maksimum 50 KN kapasiteye ve 0,5 mm/dak test hızına sahiptir (Şekil 4.12). Çapraz kırılma dayanımı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir:

$$P = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

Burada:

P = Eğilme dayanımı (MPa), F= Kopma anında numuneye uygulanan kuvvet (N)

L= Destek noktaları arasındaki mesafe (mm), b = Numune genişliği (mm), h = Numunenin yüksekliği (mm).



Şekil 4.12 Üç nokta eğme testi ve kurulumu için universal çekme testi cihazı

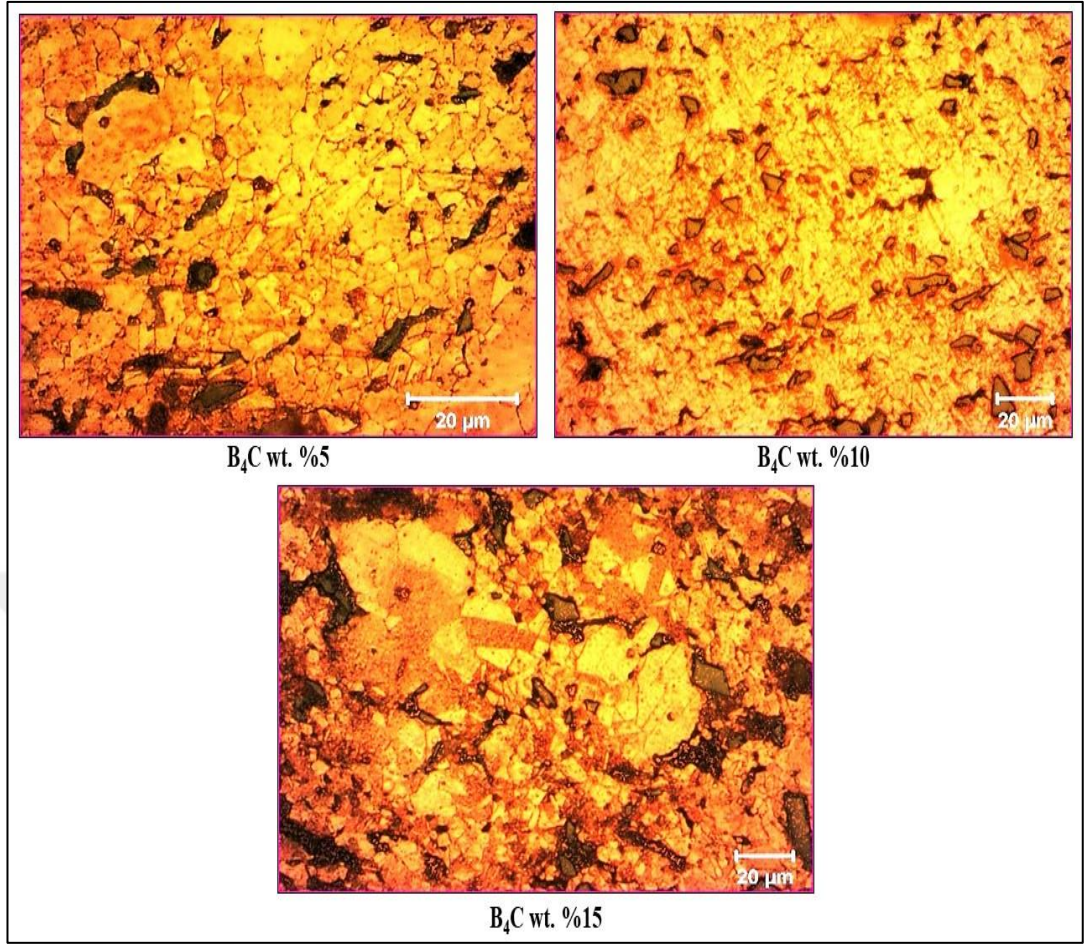
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Cu/B₄C kompozitlerinin mekanik ve iç yapı incelemeleri için yapılan SEM, EDS, XRD ve haritalama çalışmaları, sertlik ve yoğunluk yoğunluk ölçümleri, üç noktalı eğme deneyi sonuçları irdelenecektir. Sonuçlar sıcak haddelenmiş ve haddelenmemiş numunelerin sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

5.1 Optik Mikroskop Analizi

5.1.1 25µm Tane Boyutundaki B₄C İle Takviye Edilmiş Haddelenmemiş Numunelerin Mikroyapısı

Şekil 5.1, 90 dakika süreyle 850°C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulan, ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında B₄C ihtiva eden bakır matrisli kompozitinin optik mikroyapısını göstermektedir. Resimde bakır matris açık renkli bölgeler olarak gösterilirken, siyah köşeli formlar takviye görevi gören B₄C parçacıklarını temsil etmektedir. Optik mikroskop görüntülemesinden B₄C tanelerinin bakır matris içindeki dağılımının homojen olduğu görülmüştür. Mikroskobik özellikler bakır tane sınırlarından ayırt edilebilir (Prajapati ve Chaira, 2019). Elde edilen optik görüntülerde artan takviye oranına bağlı olarak yapıda boşlukların meydana geldiği ve arttığı görülmektedir. Artan takviye oranına bağlı olarak boşluk miktarının artması aynı zamanda yoğunluk ölçümlerinden de anlaşılmaktadır. %5 B₄C içeren numune için gözeneklilik oranı %6,51 iken, %15 B₄C içeren numune için gözeneklilik oranı %11,83 olarak ölçülmesi de bunun bir göstergesidir. B₄C parçacık seviyesi ağırlıkça %15'i aştığında B₄C partiküllerinin agregasyonları görülmüştür. Şekil 5.1, kompozit yapıdaki B₄C takviye malzemesi parçacıklarının belirgin kenarlara sahip olduğunu ve presleme işlemi sırasında hasar görmediğini göstermektedir.

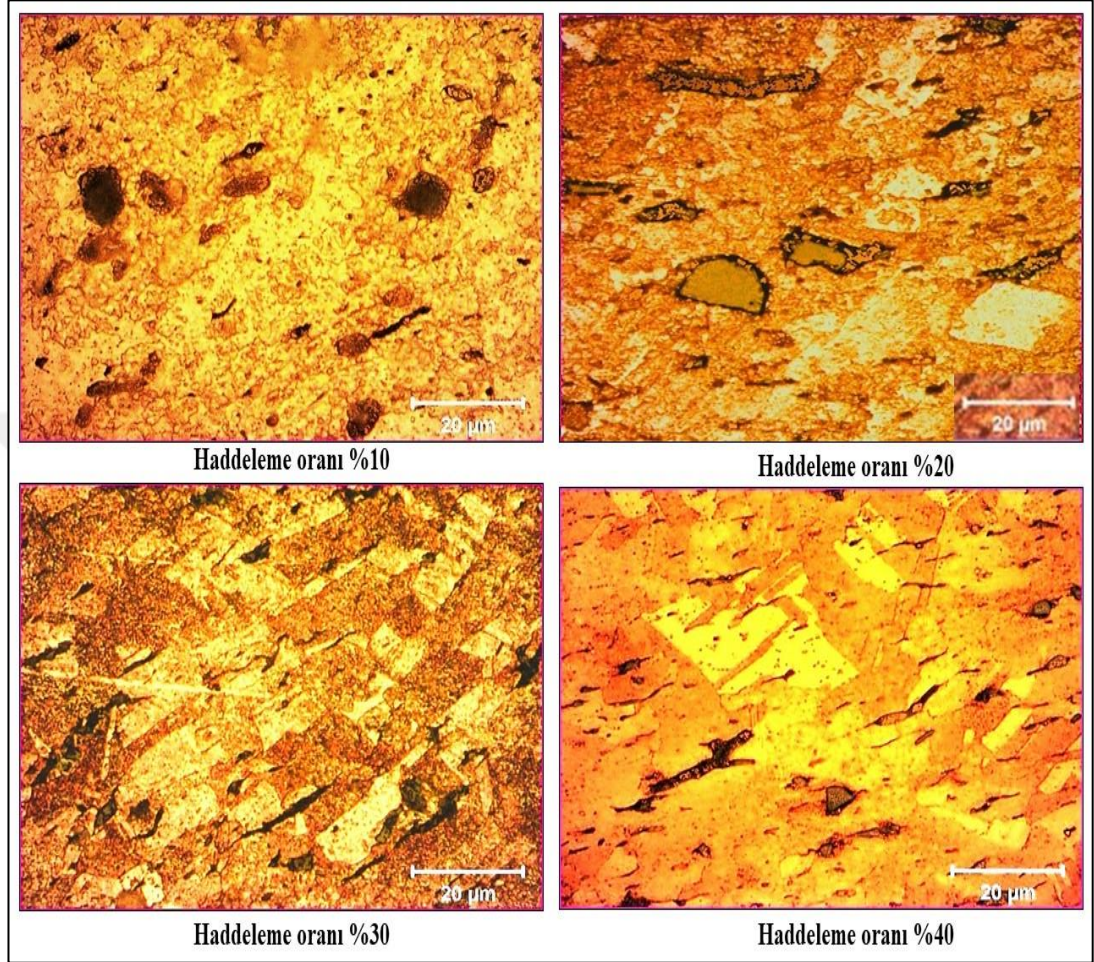


Şekil 5.1 X500 büyütmede haddelenmemiş numune B₄C 25µm'nin yüzey yapısının optik mikroyapısı

5.1.2 25µm Tane Boyutundaki B₄C İle Takviye Edilmiş Haddelenmiş Numunelerin Mikroyapısı

Şekil 5.2'de ağırlıkça %5 oranında 25µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilen bakır matrisli kompozit malzemenin 600 °C'de %10- %20, %30 ve %40 oranında haddeleme işlemi sonrasındaki optik mikroskop ile çekilmiş iç yapıları görünüşleri verilmiştir. Görüntüler, bakır matris içinde B₄C parçacıklarının düzgün bir dağılımını ortaya koymaktadır. Şekil 5.2, tanelerin haddeleme yönü boyunca uzama sergilediğini ve uzunluklarının kalınlıktaki azalma ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu durum malzemenin hızlı moleküler hareketi tetikleyen dinamik yeniden kristalleşme sıcaklığıyla ilişkilidir. Haddeleme oranları arttıkça gözeneklilikte de buna bağlı olarak azalma gözlenmektedir (Sara, 2022). Gözeneklilik %10 oranında haddeleme için %8,12 olarak ölçülmüş ve artan haddeleme oranıyla kademeli olarak azalarak %40'haddeleme oranı için %4,96 değerine düşmüştür. Sıcak haddeleme işlemi

sırasında haddeleme yönü, Cu matrisindeki B₄C takviyesinin yönelimini belirlemiştir. B₄C içeriği arttıkça, bu durum daha belirgin hale gelmektedir (Lee vd., 2021).

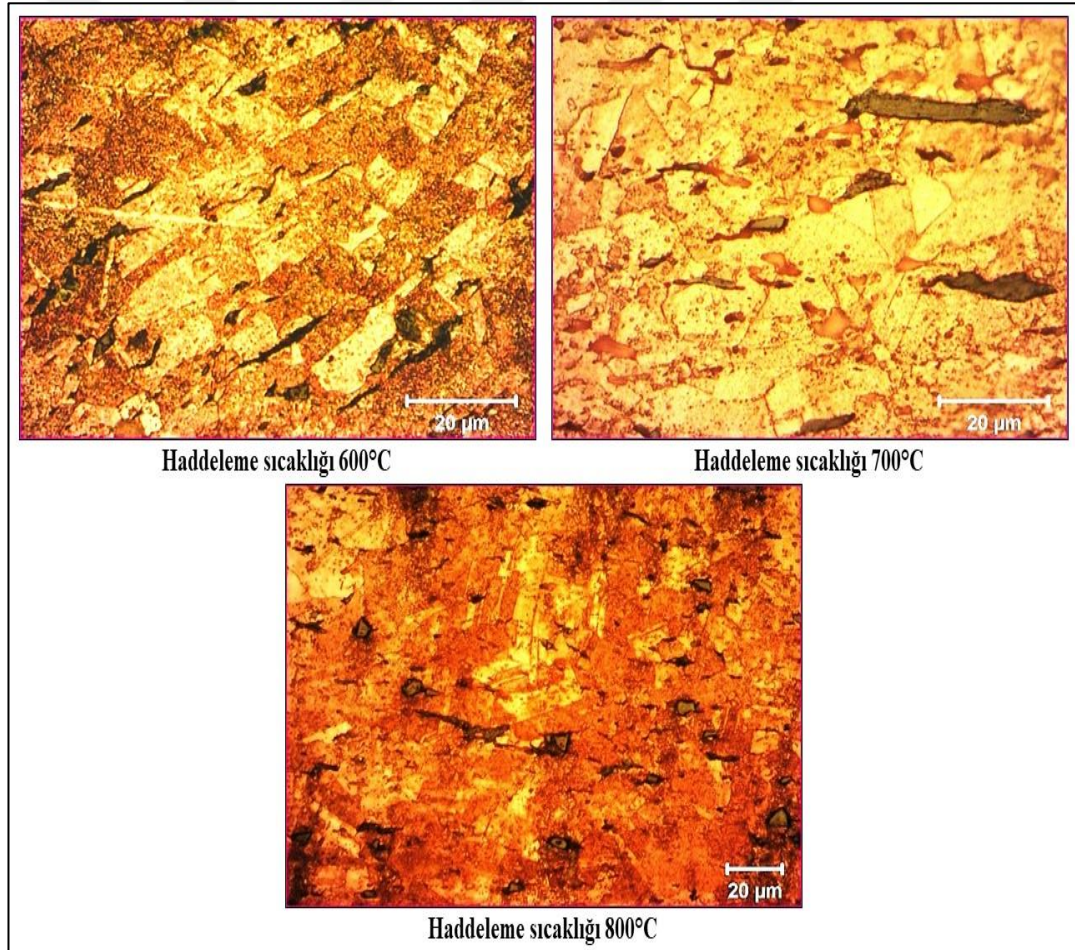


Şekil 5.2 X1000 büyütmede 600°C Haddeleme Sıcaklığında B₄C'nin yüzey yapısının mikroyapısı (25µm, ağırlıkça %5)

5.1.3 25µm Tane Boyutundaki B₄C İle Takviye Edilmiş ve Farklı Haddeleme Sıcaklıklarında Haddelenmiş Numunelerin Mikroyapısı

Şekil 5.3, 600°C, 700°C, 800°C'de haddelenmiş numunelerin (25µm tane boyutunda ve ağırlıkça %5 oranında takviye edilmiş) %30 oranında haddelenmiş Cu/B₄C kompozitinin optik mikroskop altında alınmış görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.3, B₄C parçacıklarının haddeleme sonrasında da matris içindeki homojen dağılımını göstermektedir. Küçük bor karbür (B₄C) parçacıkları daha büyük olanların arasında dağılmış halde bulunmakta ve bakır (Cu) parçacıkları bunları çevrelemektedir. Haddeleme parçacık dağılımını iyileştirir ve

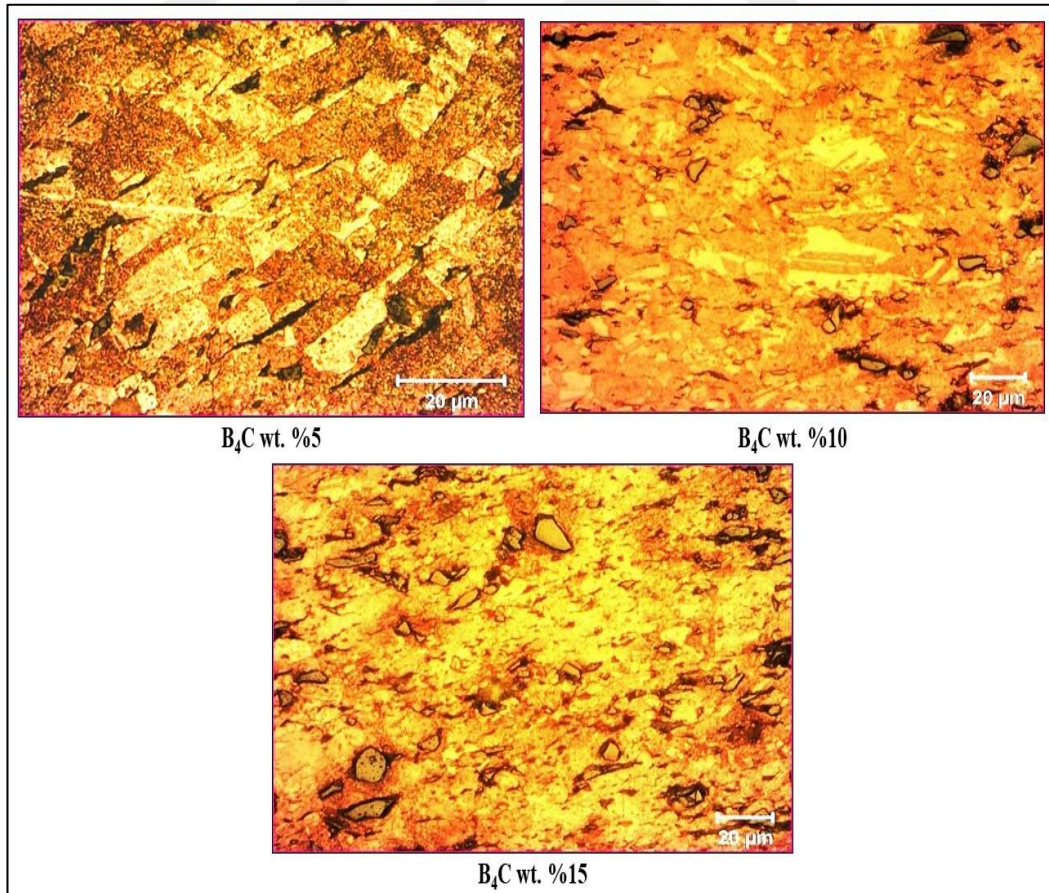
topaklanmayı azaltırken aynı zamanda parçacık ve matris ıslatmasını iyileştirmiş ve boşlukları azaltmıştır. Basınç gerilmelerine bağlı olarak B₄C tanelerinde belirgin bir kırılma ya da deformasyon gözlenmemiştir. 600°C'de %30 oranında haddelenen numunelerde gözeneklilik %5,41 olarak bulunmuşken (700°C 'de tüm numunelerde hafif bir artma görülmekle birlikte) 800 °C'de haddelenen numunelerde azalarak %4,70 oranında bulunmuştur. Sıcak haddelemenin yönü, Cu matrisindeki B₄C takviyesinin yöneliminde etkili olmuştur. B₄C malzemesi arttıkça, bu davranış daha görünür hale gelir (Lee vd., 2021). Şekil 5.3, bakır tanelerin haddeleme yönünde uzadığını ve kalınlık azaldıkça tane uzunluğunun arttığını göstermektedir. Genişlik yönünde, sıcak haddelenmiş numunelerin haddelenmemiş numunelere kıyasla bir miktar artma görülmüştür.



Şekil 5.3 X1000 büyütmede %30 Haddeme Oranında B₄C'nin yüzey yapısının optik mikroyapısı (25µm, ağırlıkça %5)

5.1.4 25µm Boyutunda B₄C ile Takviye Edilmiş ve Farklı Haddelenme Oranlarında Haddelenmiş Numunelerin mikroyapısı

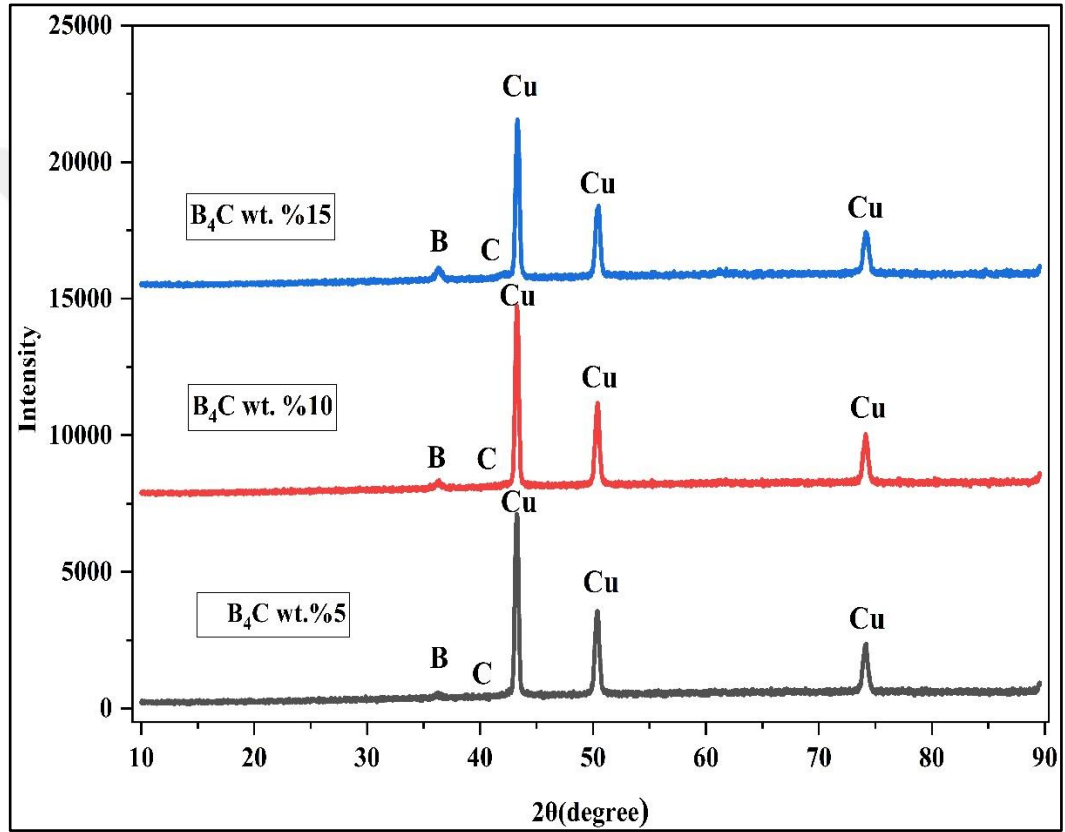
%5, %10 ve %15 oranında 25µm boyutunda B₄C ile takviye edilmiş bakır matrisli kompozit malzemenin 600°C sıcaklıkta %30 oranında haddelenmesi sonrasında oluşan iç yapılarının optik mikroskop görüntülerini Şekil 5.4’de verilmiştir. B₄C dağılımının düzenli olduğu, topaklanmaların olmadığı görülmektedir. Parçacıkların homojen bir şekilde dağılması, üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru olarak belirlenebilmesinde önemlidir. Sıcak haddeleme, boşlukların azaltılması ve tanelerin daha kolay deforme olarak boşlukları doldurmasından dolayı yoğunlukta artmaya neden olmaktadır. Ortan hadde oranına bağlı olarak gözeneklilik azalmakta ve yoğunluk artmaktadır. Sertlikteki artışın önemli bir nedeni de gözeneklilik miktarındaki azalmadır. Sıcak haddeleme işleminin sık görülen bir sonucu da haddeleme yönünde parçacık uzamasıdır (Lee vd., 2021).



Şekil 5.4 X1000 büyütmede %30 haddeleme oranı ve 600°C haddeleme sıcaklığında B₄C 25µm’nin yüzey yapısının optik mikroyapısı

5.2 XRD (X-ışını Kırınımı) Analizi

Numune üretim aşamasında ve daha sonraki işlemler sırasında yapıyı oluşturan bileşenler arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olup olmadığını ve yeni fazların oluşup oluşmadığını belirlemek için XRD analizi yapılmıştır (Şekil 5.5). Oluşabilecek yeni faz veya fazlar, bir malzemenin mekanik özelliklerini değiştiren mikroyapısal değişime neden olur.



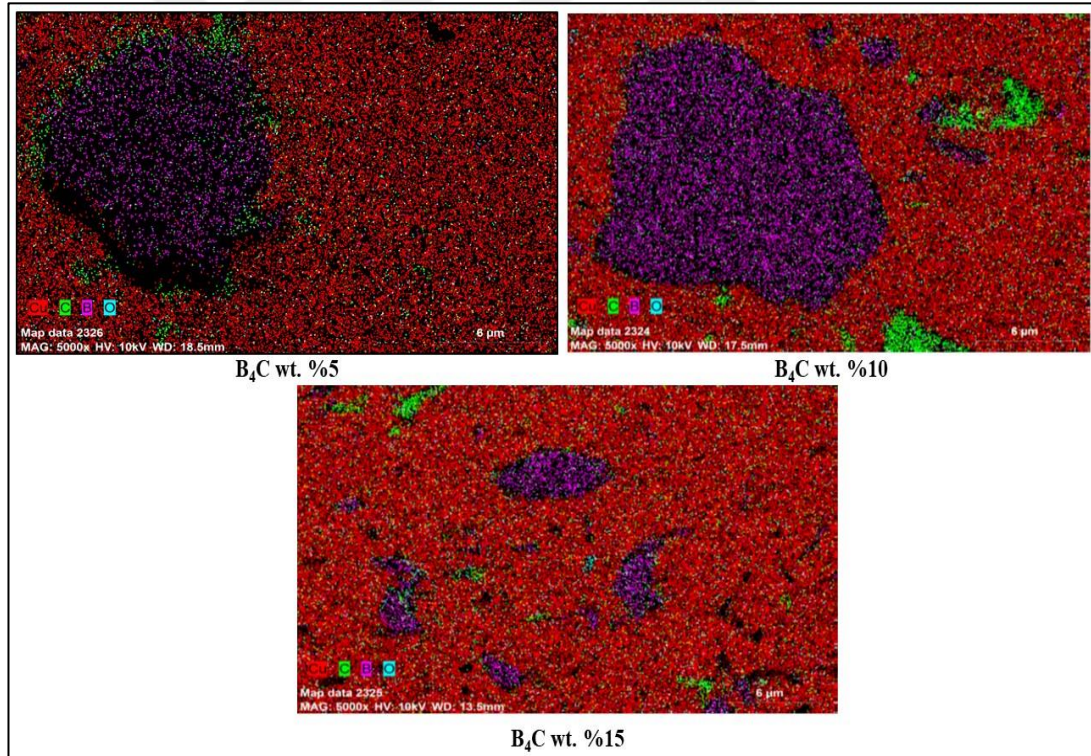
Şekil 5.5 B₄C 25µm ve ağırlıkça (%5, %10, %15) haddelenmemiş numunelerin XRD analizi

Şekil 5.5, 25µm boyutunda ve farklı ağırlık oranlarında (%5, %10, %15) B₄C taneleri ile takviye edilmiş bakır matrisli kompozit yapının XRD analizini göstermektedir. Grafiklerde sadece bakır ve B₄C pikleri görülebilmektedir. XRD spektrumları, kompozit malzemedeki düşük konsantrasyonunun bir sonucu olarak bor karbürün zayıf piklerini, buna karşılık bakır için güçlü bir pik dağılımı vermektedir. ve düşük içeriklerinden dolayı B₄C için çok zayıf bir pik göstermektedir. Bakır fazı baskındır. Sonuç olarak, Cu ve B₄C matrisleri arasında herhangi bir arayüzey etkileşimi

olmadığını, yeni fazların oluşmadığını, moleküller arasında etkileşim olmadığı ortaya görülmektedir (Balalan ve Gulan, 2019; Prajapati ve Chaira, 2019).

5.3 Haritalama

Cu/B₄C kompozitinde çeşitli bileşenlerin varlığını göstermek için, ağırlıkça %5, %10 ve %15 B₄C içeren numuneler üzerinde element haritalaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6). Bakır (Cu), bor (B) ve karbür (C) gibi elementel varlıklar sırasıyla kırmızı, mavi ve yeşil renklerle gösterilmiştir. Haritalama gösterimi, haddelenmemiş numunelerdeki Cu/B₄C kompozitlerinin ortak arayüzü boyunca konsantrasyon gradyanlarının veya atom taşınmasının olmamasıyla kanıtlandığı gibi, kompozit boyunca iyileşmelerin homojen dağılımını göstermektedir (Prajapati ve Chaira, 2019; Sathiskumar vd., 2014).



Şekil 5.6 B₄C 25µm Haddelenmemiş Numunelerin Element Haritalama Analizi dağılımı

5.4 Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ve gözeneklilik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda Arşimet yöntemini kullanılarak yapılmıştır.

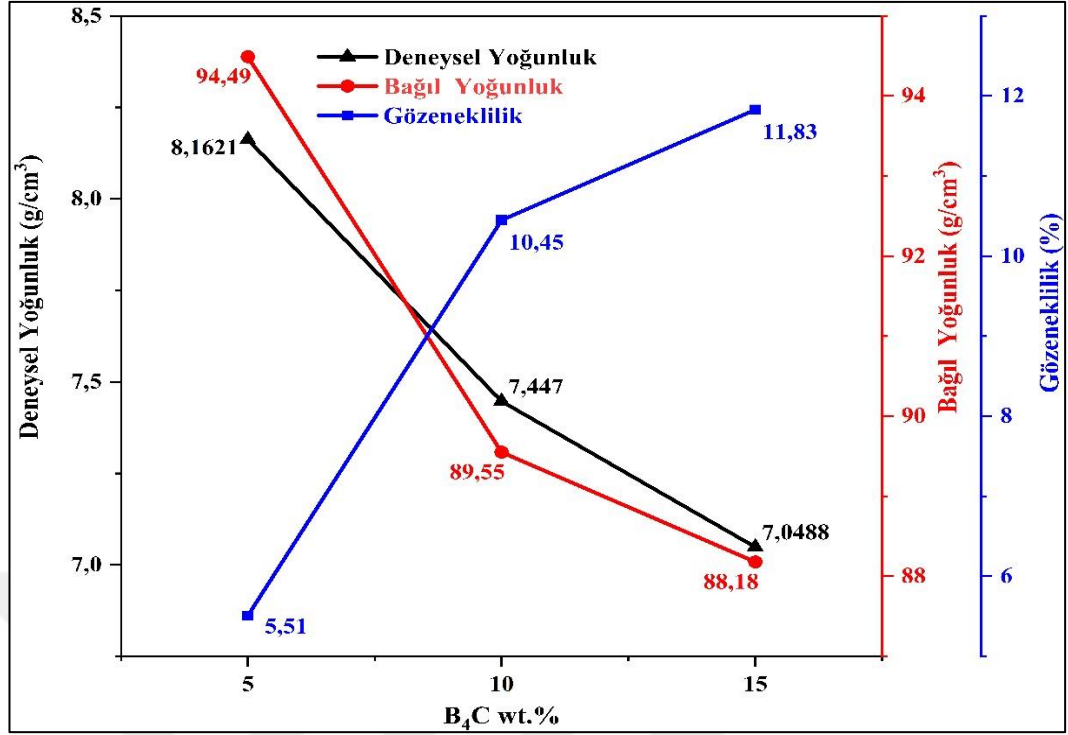
5.4.1 Haddelenmemiş Numuneler İçin Yoğunluk ve Gözeneklilik

Karşım oranları ve B₄C tanelerinin boyutuna göre bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Tablo 5.1’de verilmiş, grafik olarak da Şekillerde 5.7-5.9 gösterilmiştir.

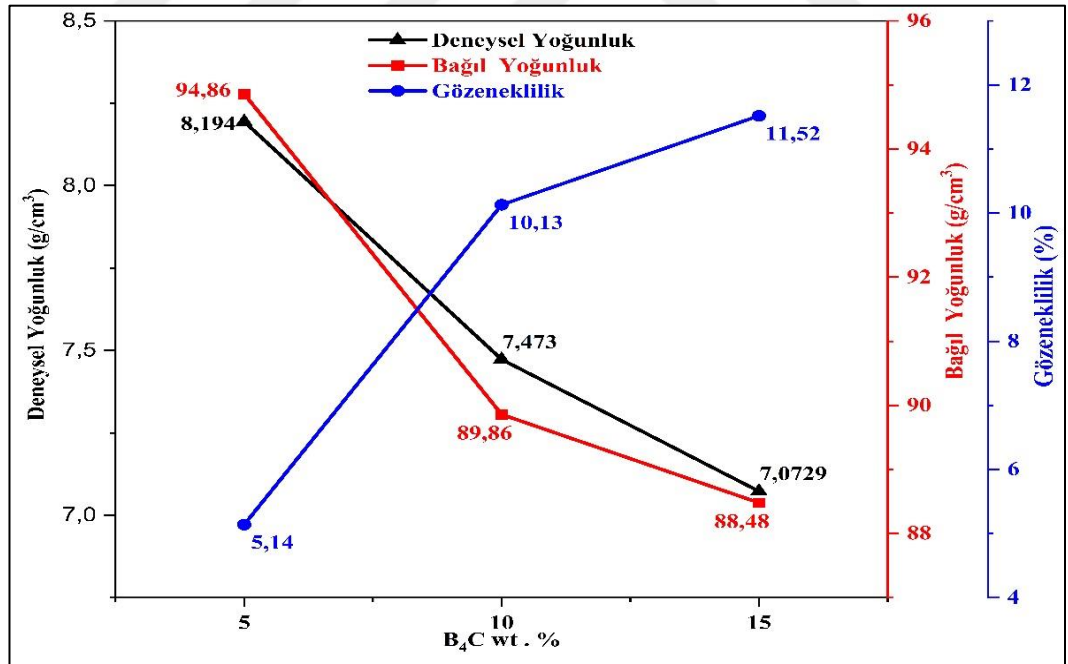
Tablo 5.1 Haddelenmemiş numunelerin teorik, deneysel yoğunlukları ve gözeneklilikleri

Tane Büyüklüğü (μm)	B ₄ C ağı. (%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik (%)	Sertlik (HB)
25μm	%5	8,638	8,1621	94,49	5,51	43
	%10	8,316	7,4470	89,55	10,45	46
	%15	7,994	7,0488	88,18	11,83	50
43μm	%5	8,638	8,1940	94,86	5,14	42
	%10	8,316	7,4730	89,86	10,13	44
	%15	7,994	7,0729	88,48	11,52	49
90μm	%5	8,638	8,2199	95,16	4,8	40
	%10	8,316	7,5559	90,86	9,14	43
	%15	7,994	7,1052	88,88	11,12	46

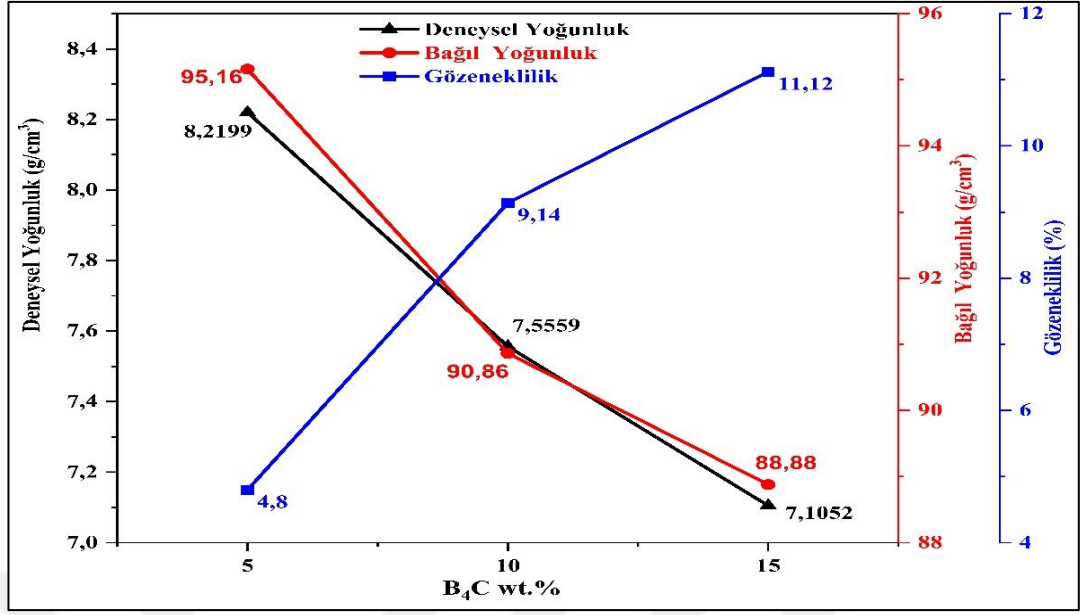
Deneysel yoğunluk değerleri 7,0488 ila 8,2199 g/cm³ ve bağıl yoğunluk değerleri %88,18 ila %95,16 arasındadır. Bu da sinterleme sıcaklığının uygun olduğunu göstermektedir. Deneysel ve teorik yoğunluk değerleri arasındaki maksimum farklar yani bir anlamda da gözeneklilik en yüksek takviye oranına sahip numunelerde ölçülmüştür. B₄C oranı azaldıkça aynı boyuttaki taneler için yoğunluklar arasındaki fark da azalmıştır. Teorik ve deneysel yoğunluklar arasındaki maksimum fark 0,94 gr/cm³ ile, ağırlıkça %15 oranında 25μm tane boyutuna sahip numunede elde edilmiştir. Bu durum, bu numunede maksimum gözenekliliğin oluştuğunu göstermektedir. B₄C oranı arttıkça gözeneklilik artmaktadır, bu da daha yüksek B₄C oranlarının sinterleme sırasında difüzyonun azalmasına yol açtığını göstermektedir. B₄C ağırlıkça %5 oranında B₄C ihtiva eden kumun tüm numuneler arasında en düşük gözenekliliği sergilemiştir, bu da daha iyi sinterleme ve yoğunlaşma olduğunu göstermektedir (Sharma vd., 2019). Bileşikteki takviye malzemesi oranı azaldıkça gözeneklilik değeri de azalmaktadır (Kumar ve Rai, 2018; Shu vd., 2021).



Şekil 5.7 B₄C 25µm haddelenmemiş numunelerin deneysel yoğunluğu, bağıl yoğunluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişki



Şekil 5.8 B₄C 43µm haddelenmemiş numunelerin deneysel yoğunluğu, bağıl yoğunluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişki



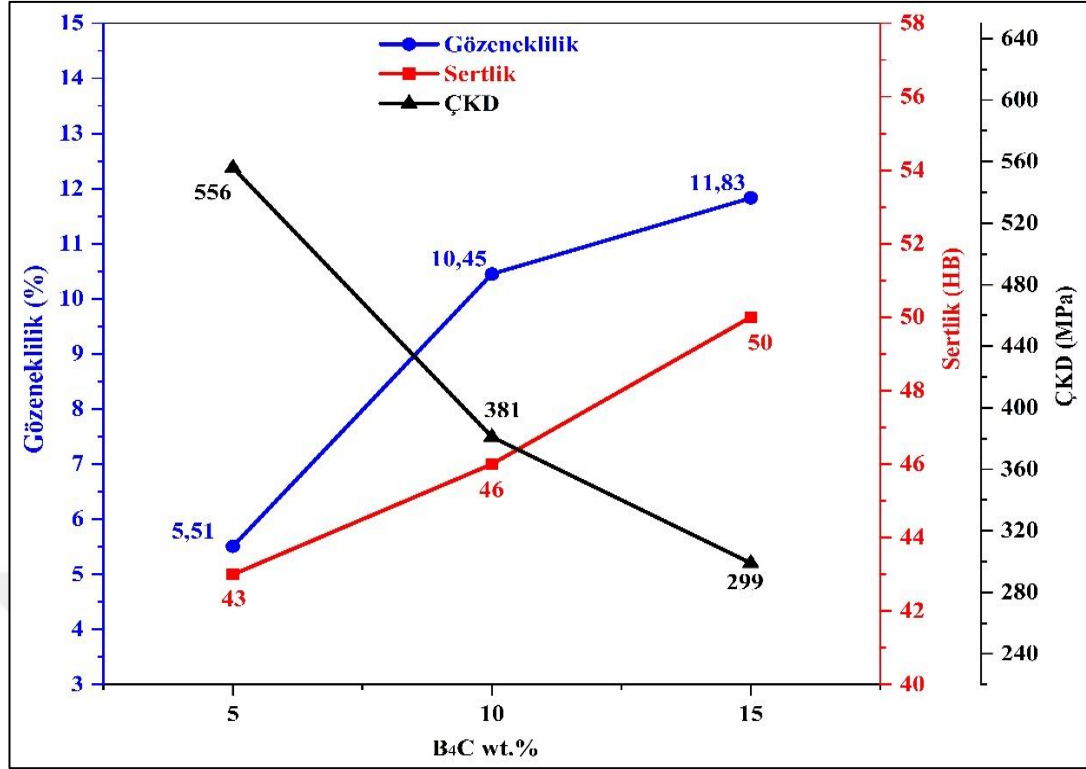
Şekil 5.9 B₄C 90µm haddelenmemiş numunelerin deneysel yoğunluğu, bağıl yoğunluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişki

5.4.2 Gözeneklilik, Sertlik, Çapraz Kırılma Dayanımı Sonuçları

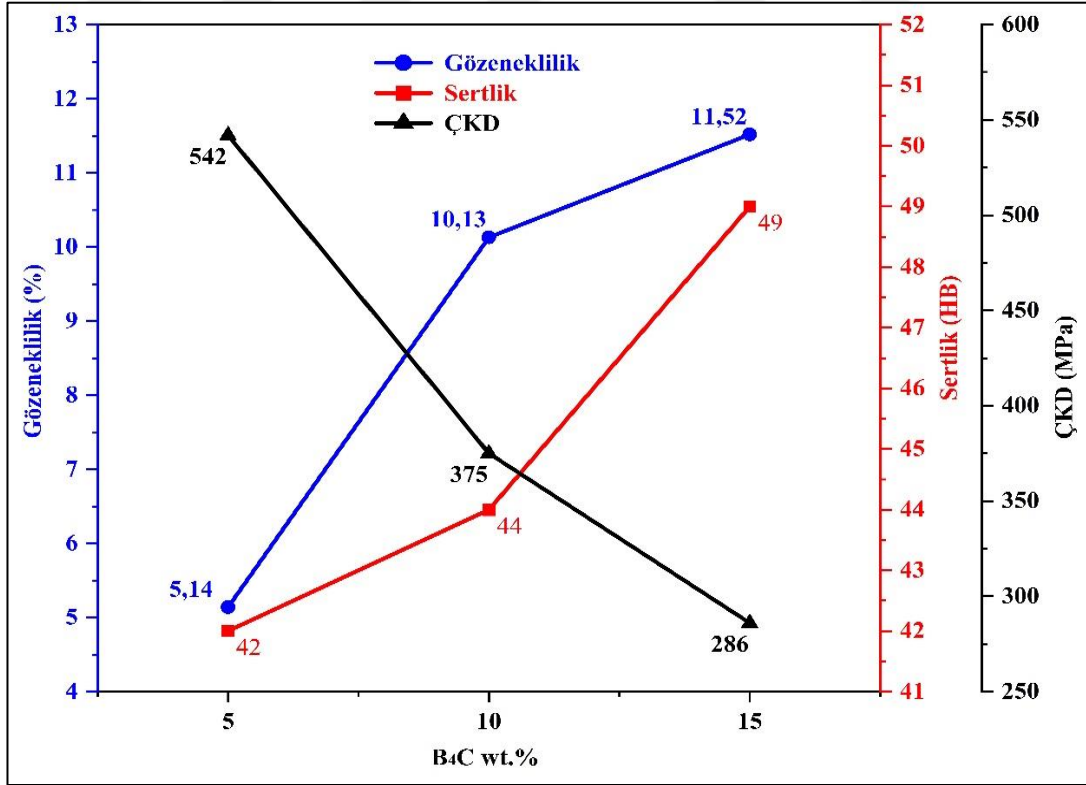
5.4.2.1 Haddelenmemiş numuneler için gözeneklilik

Sonuçlar, B₄C oranının artırılmasının numunelerdeki gözeneklilik değerleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. B₄C oranının %5'ten %15'e çıkarılmasıyla gözeneklilik artmaktadır, bu da B₄C miktarı ile gözeneklilik arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. B₄C'nin düşük yoğunluğu ve yüksek termal kararlılığı gibi fiziksel özellikleri sinterleme sürecini etkilemektedir (Balalan ve Gulan, 2019). Şekil 5.10-5.12'da görüleceği gibi, kompozit içindeki B₄C oranı arttıkça gözeneklilik de artmaktadır.

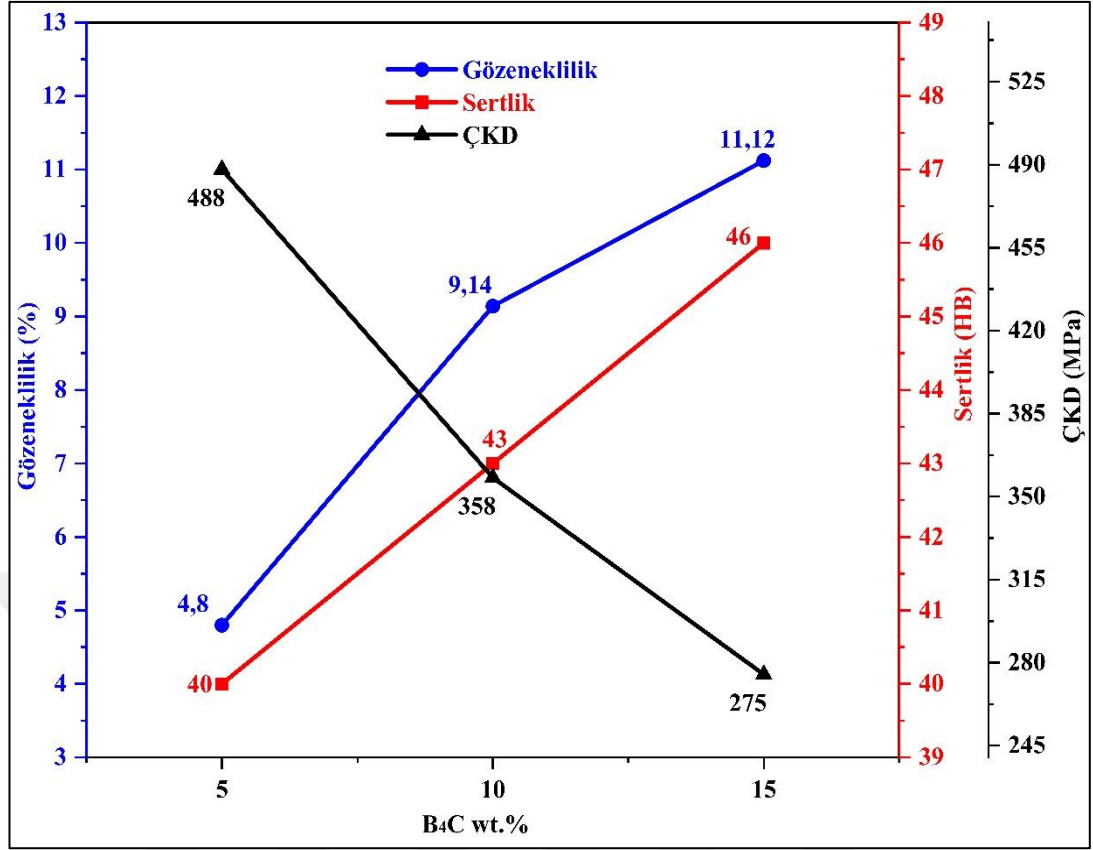
Yoğunluk değerlerinden tüm B₄C boyutu için takviye oranı arttıkça gözeneklilik oranının arttığı görülmüştür. Aynı zamanda gözeneklilik değerleri ile çapraz kırılma dayanımı arasında da bir ilişki olduğu görülmektedir. Gözeneklilik oranının artmasına bağlı olarak çapraz kırılma dayanımı değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10 25µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş haddelenmemiş numunelerin gözeneklilik, sertlik ve ÇKD ilişkisi



Şekil 5.11 43µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş haddelenmemiş numunelerin gözeneklilik, sertlik ve ÇKD ilişkisi



Şekil 5.12 90µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş haddelenmemiş numunelerin gözeneklilik, sertlik ve ÇKD ilişkisi

5.4.2.2 Haddelenmemiş numunelerin sertlik değerleri

Haddelenmemiş numunelerin sertlik değerleri Şekil.5.10-5.12’de gösterilmiştir. Sertlik sonuçları, numunelerdeki B₄C takviye oranının artmasının tüm tane boyutları (25µm, 43µm, 90µm) için sertliğin artmasına neden olduğunu göstermektedir. B₄C ağırlık oranı azaldığında azalmaktadır (Eski vd., 2017). Bu bulgu, seramiklerin mekanik özellikleri ile tutarlıdır (Domnich vd., 2011; Sharma vd., 2019). B₄C oranı arttığında, kompozitin homojenliği ve yoğunluğu azalma eğilimi göstermektedir (gözeneklilik oranı artmaktadır. Daha küçük tane boyutları tipik olarak daha geniş bir tane sınırı alanı ile sonuçlanır ve bu da kompozitin dayanımını artırmaktadır. Numunelerin sertlikleri %15 oranında B₄C ihtiva eden numunelerde daha yüksektir. %15 oranında 23µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş numunelerde 50 HB maksimum sertlik değeri elde edilmiştir. Tane boyutlarının artmasıyla elde edilen sertlik değerlerinde azalma görülmüştür. %15 oranında B₄C ile takviye edilmiş numunelerde 43µm tane boyutundaki numunelerde 49 HB, 90µm tane

boyutu ile takviye edilen numunelerde 46 HB sertlik değeri elde edilmiştir. Tane boyutunun artmasıyla birlikte Cu/B₄C temas yüzey alanları azalacağından malzemenin sertliği artmaktadır. Benzer durumlar %5 ve %10 oranında B₄C ile takviye edilen numunelerde de artan tane boyutunda daha düşük sertlikle sonuçlanmıştır. Buradaki ölçüm sonuçlarındaki B₄C takviyelerinin tane boyutunun azalması oluşan sertlik için etkin bir parametredir. Ortalama olarak tane boyutunun iki katına çıkması sertlikte yaklaşık olarak %3-4 oranında bir artışa sebep olmaktadır.

5.4.2.3 Haddelenmemiş numunelerin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri

Haddelenmemiş numuneler için B₄C oranına ve B₄C tane boyutuna göre çapraz kırılma dayanımı değerleri Şekil 5.10-5.12’de verilmiştir. Tüm B₄C tane boyutları için artan B₄C oranına bağlı olarak ÇKD değerlerinde güçlü bir azalma ortaya çıkmıştır. Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere artan B₄C takviye oranlarında ÇKD değeri hızla düşmektedir. Bu düşüş B₄C tane boyutunun artmasıyla ters orantılı olarak azalmaktadır. Artan B₄C tane boyutu aynı oranda takviye edilen numunler için çapraz kırılma dayanımı değerlerini düşürmektedir.

En yüksek ÇKD değeri 23µm tane boyutunda ve %5 oranında B₄C ihtiva eden numunede 556 MPa olarak ölçülmüştür. %10 oranında takviye edilen numunede 381 ve %15 oranında takviye edilen numunede 299 MPa olarak ölçülmüştür.

En düşük ÇKD değeri 90µm tane boyutundaki B₄C taneleriyle takviye edilen numunelerde ölçülmüştür. %5 oranında 488, %10 oranı için 358 ve %15 oranı için minimum değer olan 275 MPa değeri ölçülmüştür.

Haddelenmemiş numunelerden elde edilen ÇKD değerlerinden artan B₄C oranına ve B₄C tanelerinin boyutunun artmasına bağlı olarak ÇKD değerinin düştüğü sonucu çıkarılabilir.

B₄C oranının artması sinterleme işlemi sırasında malzemenin yoğunlaşması ve tane sınırı bağlanması üzerinde engelleyici bir etkiye sahip olması nedeniyle gözenekliliğin artmasına neden olmaktadır. Yoğunluk ÇKD değerleri üzerinde etkilidir.

5.4.3 Haddelenen Numuneler İçin Gözeneklilik

Tablo 5.2 Haddelenen numunelerin gözenekliliği

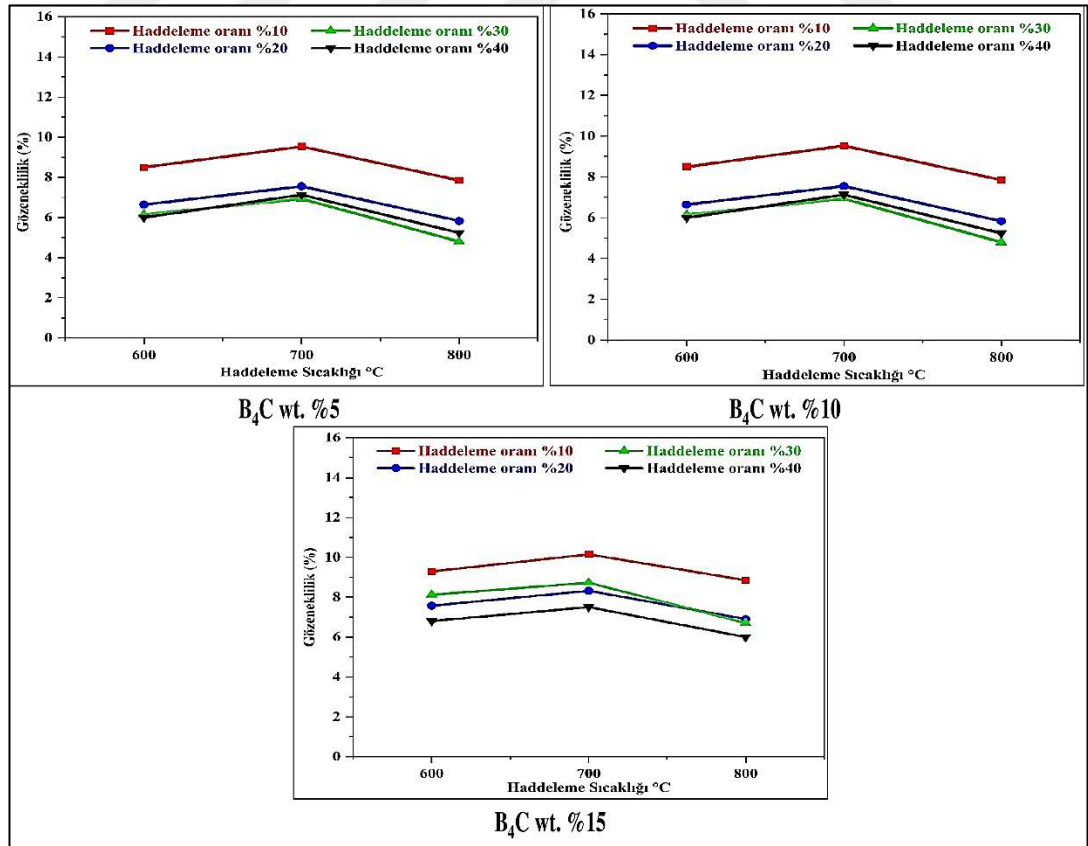
Tane Büyükliği (μm)	B_4C ağ. (%)	Haddeleme Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Haddeleme Oranı			
			%10	%20	%30	%40
25 μm	%5	600 $^{\circ}\text{C}$	8,12	6,11	5,41	4,96
		700 $^{\circ}\text{C}$	8,73	7,22	5,83	5,10
		800 $^{\circ}\text{C}$	7,35	5,65	4,70	4,37
	%10	600 $^{\circ}\text{C}$	8,50	6,64	6,15	6
		700 $^{\circ}\text{C}$	9,53	7,55	6,93	7,13
		800 $^{\circ}\text{C}$	7,85	5,83	4,80	5,24
	%15	600 $^{\circ}\text{C}$	9,29	7,57	8,12	6,8
		700 $^{\circ}\text{C}$	10,15	8,32	8,73	7,5
		800 $^{\circ}\text{C}$	8,85	6,90	6,70	6
43 μm	%5	600 $^{\circ}\text{C}$	6,92	6,43	5,38	4,12
		700 $^{\circ}\text{C}$	7,85	7,14	6	4,94
		800 $^{\circ}\text{C}$	6,33	5,63	5	3,3
	%10	600 $^{\circ}\text{C}$	8,76	6	5,50	4,35
		700 $^{\circ}\text{C}$	9,83	7	6,12	5
		800 $^{\circ}\text{C}$	8,10	5,85	5,15	4
	%15	600 $^{\circ}\text{C}$	9,44	8,12	7,60	6,91
		700 $^{\circ}\text{C}$	10,56	9,69	8,75	7,44
		800 $^{\circ}\text{C}$	8,73	7,85	7	6
90 μm	%5	600 $^{\circ}\text{C}$	6,44	5,17	4,25	3,41
		700 $^{\circ}\text{C}$	7,36	5,98	4,77	3,90
		800 $^{\circ}\text{C}$	5,73	4,70	3,75	3,11
	%10	600 $^{\circ}\text{C}$	7,40	6,20	5,73	5,10
		700 $^{\circ}\text{C}$	8,11	7,44	6,44	6
		800 $^{\circ}\text{C}$	6,63	5,88	5,11	4,53
	%15	600 $^{\circ}\text{C}$	10,25	9,54	6,55	7,45
		700 $^{\circ}\text{C}$	11,82	10,19	7,12	7,97
		800 $^{\circ}\text{C}$	9,97	9,1	5,32	6,15

Haddemeleme işlemi sonrasında numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüş ve gözeneklilik oranları hesaplanmıştır. 600°C, 700°C ve 800°C’de %10-20-30 ve %40 oranında haddelenen numunelerin gözeneklilik oranları Tablo 5.2 ‘de verilmiştir.

Elde edilen gözeneklilik oranlarından artan haddemeleme sıcaklıklarına bağlı olarak gözeneklilik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yüksek B₄C tane boyutunda daha yüksek gözeneklilik değeri saptanmıştır. Artan haddemeleme sıcaklığı ve oranına bağlı olarak gözeneklilik miktarında bir azalma ortaya çıkmıştır.

5.4.3.1 25µm tane boyutundaki B₄C içeren haddelenmiş numuneler için gözeneklilik

Deneysel sonuçlar, B₄C oranı ile numunelerdeki gözeneklilik değerleri arasında bağ olduğunu göstermiştir. B₄C oranının %5'ten %15'e yükseltilmesi gözeneklilikte de artışa neden olmuştur (Şekil 5.13). Tüm numunelerin gözeneklilik değerleri.

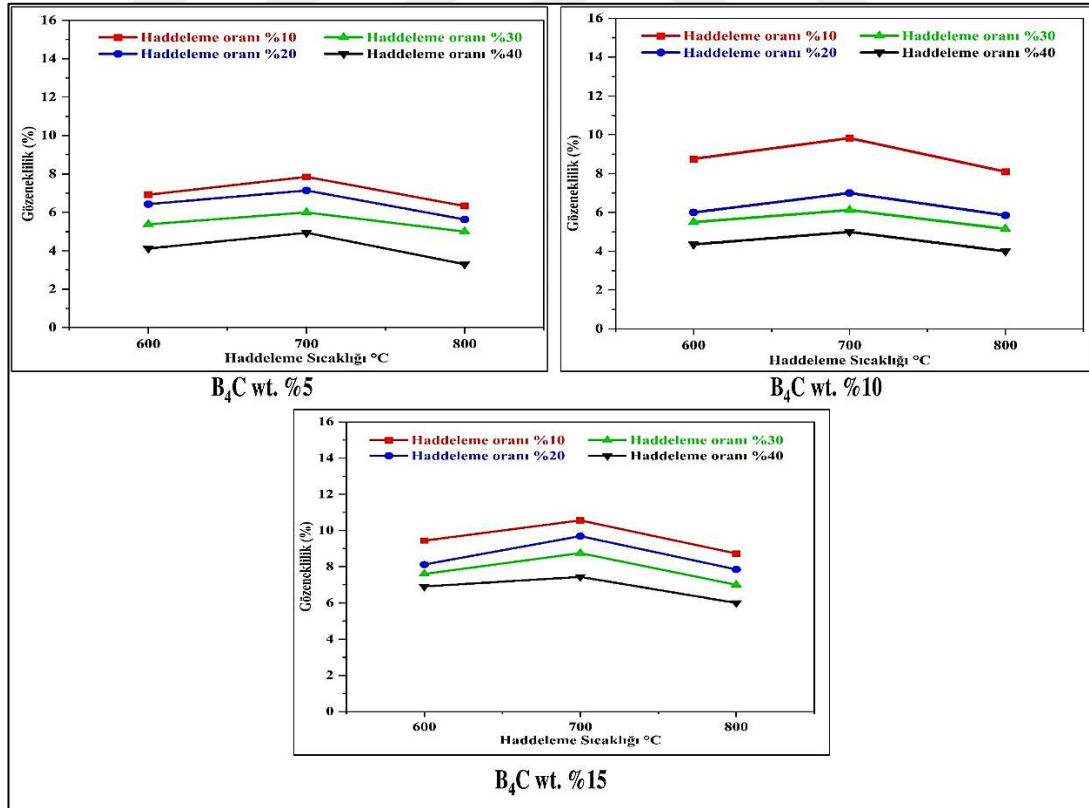


Şekil 5.13 Haddelenen numuneler B₄C 25µm’in gözenekliliği

Haddeleme sıcaklığı arttıkça azalan bir eğilim sergilemektedir. Bu davranış, daha yüksek sıcaklıklarda artan plastik deformasyon ve sinterlemeye bağlanabilir, bu da gözenekliliğin azalmasına yol açar (Altınsoy vd., 2013; Sharma vd., 2019). B₄C oranı arttıkça, Cu/B₄C kompozitinin gözeneklilik değerleri de artmaktadır. Bu davranış, kompozit malzemede B₄C parçacıklarının artan gözenekliliğine bağlanabilir (Pul, 2018; Yener vd., 2015). Haddeleme sıcaklığı, haddeleme oranı ve B₄C oranının tümü, 25µm tane boyutunda Cu/B₄C kompozitin gözeneklilik değerleri üzerinde etkili faktörlerdir

5.4.3.2 43µm tane boyutundaki B₄C içeren haddelenmiş numuneler için gözeneklilik değerleri

Gözeneklilik, kompozit malzemelerin mekanik ve genel özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Şekil 5.14, B₄C oranına bağlı olarak farklı B₄C tane boyutu ve haddeleme oranına bağlı olarak yapıdaki gözeneklilik oranlarını göstermektedir.



Şekil 5.14 Haddelenen numuneler B₄C 43µm'in gözenekliliği

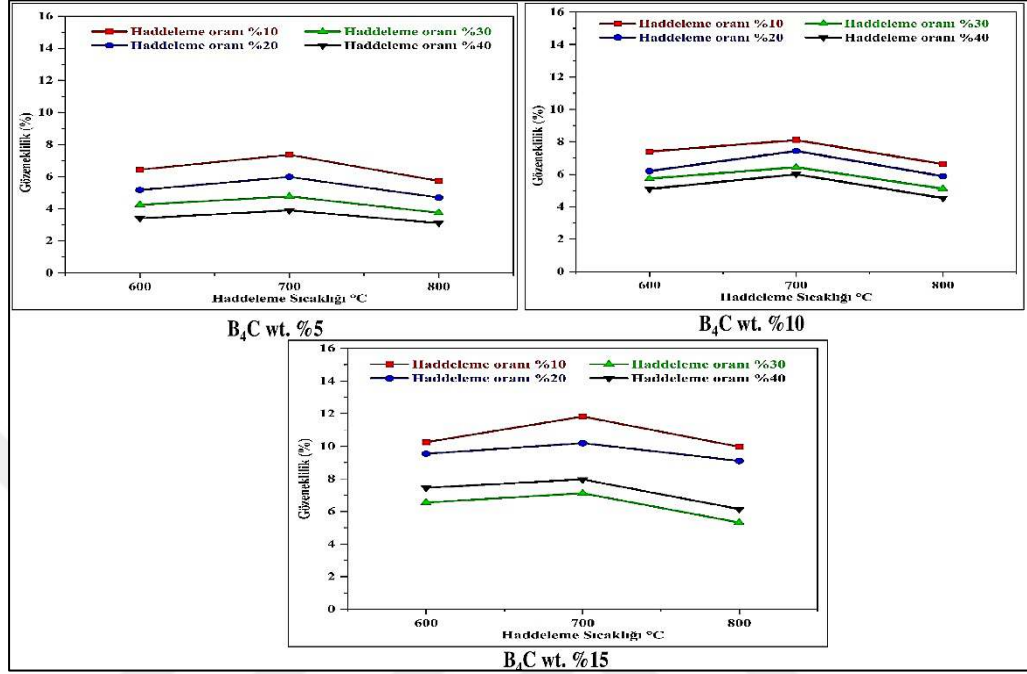
Gözeneklilik değerleri B₄C oranıyla olarak artmaktadır. Bu, sinterleme işlemi sırasında difüzyonu değiştiren ve kompozitte artan gözeneklilikle sonuçlanan B₄C mekanik özellikleriyle tutarlıdır (Sharma vd., 2019; Zhang vd., 2022). Gözeneklilik artan haddeleme oranı ile azalmaktadır. Daha yüksek haddeleme oranları, sıcak haddeleme işlemi sırasında parçacıkların hareket etmesine ve daha homojen hale gelmesine yardımcı olmaktadır. Bu, mikro yapıyı daha yoğun hale getirir ve içindeki gözenek miktarını azaltır. 800°C’de, gözeneklilik değerleri artan haddeleme oranı ile azalmış ve en düşük gözeneklilik değerlerini ortaya çıkarmıştır. B₄C oranı, haddeleme sıcaklığı ve haddeleme oranı arasındaki dinamik etkileşim, Cu/B₄C kompozitlerinin gözeneklilik miktarını etkilemektedir (Mansourzadeh vd., 2016).

5.4.3.3 90µm tane boyutundaki B₄C içeren haddelenmiş numuneler için gözeneklilik değerleri

Sıcaklık 600°C’den 800°C’ye yükseldikçe, tüm numunelerin gözeneklilik değerleri artış göstermektedir (Şekil 5.15). Sıcaklık 600°C’de ve %10 haddeleme oranında, (ağırlıkça %5, %10, %15) B₄C oranları için gözeneklilik değerleri sırasıyla (%6,44; %7,40 ve %10,25)’dir. Aynı haddeleme oranında sıcaklık 800°C’ye yükseldiğinde, gözeneklilik %5,73; %6,63 ve %9,97’e yükselmiştir.

Haddeleme oranının artması gözeneklilik değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. 700°C’de ve ağırlıkça %15 B₄C ihtiva eden numunelerde gözeneklilik %10 haddeleme oranında %11,82 olarak ölçülürken %20 oranında şekil haddeleme için %7,12; %30 haddeleme oranında %7,12’ye düşmüştür. 90 µm tane boyutunda ve %15 oranında B₄C ihtiva eden numunelerde %40 oranında haddeleme işleminden sonra tüm haddeleme sıcaklıklarında gözeneklilik mikarlarında bir miktar artış görülmüştür. Gözeneklilikte meydana gelen artış oranı %1’den daha düşüktür. Bunun nedeni büyük tane boyutundaki B₄C tanelerinin yer değişimi sırasında meydana getirdiği boşluklar olarak nitelendirilebilir. Aynı zamanda %40 oranında haddeleme sırasında yapıdaki gözeneklerin uzadığı gözlenmiştir. Bazı uzun B₄C tanelerinin haddeleme doğrultusunda yönlendiği de iç yapı görüntülerinde tespit edilmiştir. Haddeleme sırasında gözeneklerin birkaç küçük gözeneğe ayrılmasına yol açabilmektedir (Reddy

vd., 2019a, 2019b). Bu durum aynı amanda kompozit içinde homojen bir B₄C dağılımı elde etmenin zorluklarıyla açıklanabilir (Karakoç vd., 2018).



Şekil 5.15 Haddelenen numuneler B₄C 90µm'in gözenekliliği

5.5 Sertlik Testi Sonuçları

Haddeme işleminden sonra elde edilen numunelerin sertliği bir Brinell sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler 62,5 kg yük ve 2,5 mm çapında bir çelik bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune üzerinde toplam 7 ölçüm yapılmış, en yüksek ve en düşük değer hesaplamalara katılmamıştır. Ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması sertlik değeri olarak alınmıştır.

Ölçümler öncesinde numunelerin yüzeyleri tem ölçüm yapılacak yüzeyde hem de tabana gelecek yüzeyde zımparalanmış, sinterleme sonrası oluşan tabakalar giderilmiştir. Ölçümler sırasında ölçüm noktalarının daha yüksek oranda plastik şekil değişimine neden olacağından kenar bölgelere gelmemesine, batan bilye izine yakın bölgelerde meydana gelecek plastik deformasyonların malzemenin mekanik özelliklerini değiştireceğinden ölçüm noktalarının birbirine yakın olmamasına özellikle dikkat edilmiştir.

5.5.1 Haddelenen Numuneler için Sertlik Derğerleri

Haddeleme işlemi sonrasında elde edilen sertlik değeri Tablo 5.3’de verilmiştir.

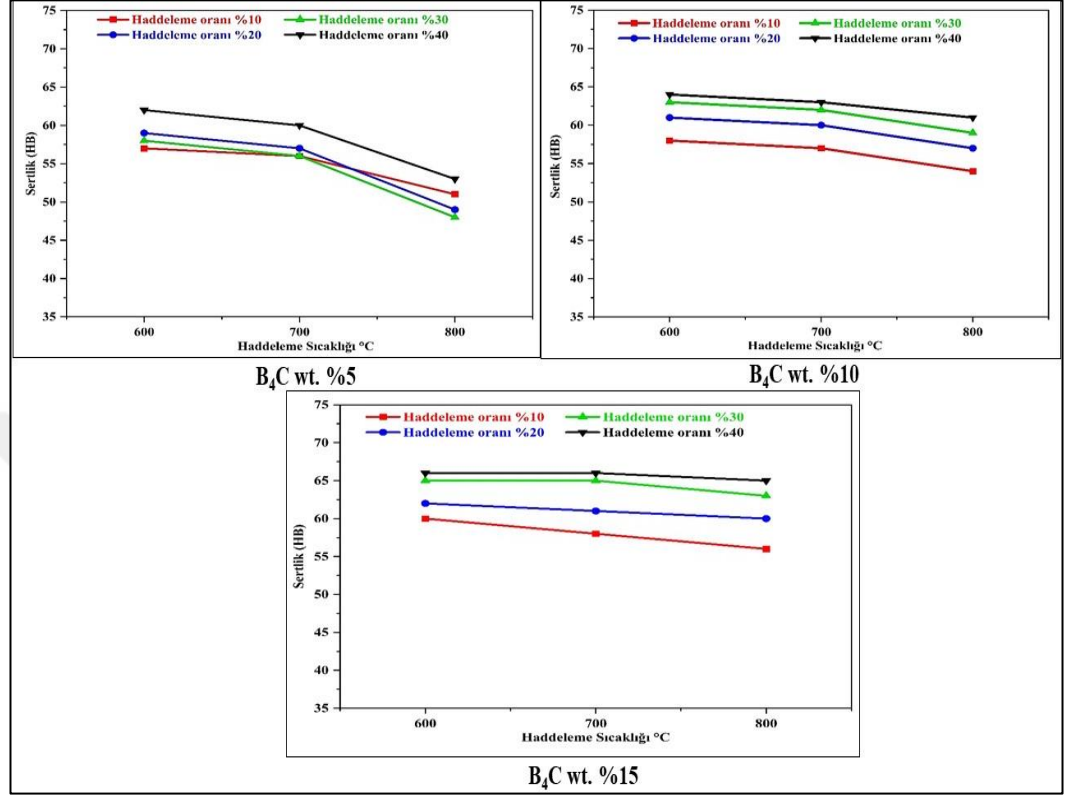
Tablo 5.3 Haddelenen numunelerin sertliği

Tane Büyüküğü (μm)	B ₄ C ağ. (%)	Haddeleme Sıcaklığı (°C)	Haddeleme oranı			
			%10	%20	%30	%40
25 μm	%5	600°C	57	59	58	62
		700°C	56	57	56	60
		800°C	51	49	48	53
	%10	600°C	58	61	63	64
		700°C	57	60	62	63
		800°C	54	57	59	61
	%15	600°C	60	62	65	66
		700°C	58	61	65	66
		800°C	56	60	63	65
43 μm	%5	600°C	56	59	60	62
		700°C	54	56	56	58
		800°C	48	47	46	49
	%10	600°C	58	61	63	64
		700°C	57	59	60	62
		800°C	55	57	58	60
	%15	600°C	60	62	64	66
		700°C	59	60	63	64
		800°C	57	59	60	62
90 μm	%5	600°C	54	56	59	61
		700°C	52	53	56	60
		800°C	46	47	48	50
	%10	600°C	56	58	60	63
		700°C	54	55	59	62
		800°C	51	53	56	59
	%15	600°C	58	60	64	65
		700°C	56	58	61	63
		800°C	53	55	58	61

5.5.1.1 25 μm tane boyutuna sahip B₄C içeren haddelenen numuneler için sertlik değeri

25 μm tane boyutuna sahip B₄C ile takviye edilmiş ve haddelenmiş numunelerden elde edilen sertlik değeri Şekil 5.16’da verilmiştir. Haddelenmiş numunelerin sertlik değeri, haddelenmemiş numunelere kıyasla tüm B₄C oranları için artan B₄C oranlarında yükselmiştir. Haddeleme sıcaklığının artmasıyla da ters orantılı olarak

aalmıştır. artan haddeleme sıcaklıklarıyla (600°C, 700°C, 800°C) artmıştır. En yüksek sertlik değerleri azalmıştır.



Şekil 5.16 B₄C 25µm haddelenen numunelerin sertliği

En yüksek sertlik değeri %15 oranında B₄C ihtiva eden numunelerde ölçülmüştür. Haddeleme oranını %10 dan fazla olduğunda neredeyse tüm haddeleme sıcaklıklarında sertlik değeri birbirine çok yakın ölçülmüştür. Yüksek B₄C oranları için haddeleme sıcaklığının yapı üzerindeki etkilerinden çok B₄C yoğunluğu sertlik üzerinde belirgin etkiye sahip olmuştur.

%5 oranında B₄C ihtiva eden numunelerde haddeleme sıcaklığına bağlı olarak sertlikteki değişim daha belirgindir. Artan haddeleme sıcaklıklarında sertlikazalmaktadır. Özellikle 700°C lik ve 800°C'lik haddeleme sıcaklıkları sonrası sertlik değerlerindeki fark oldukça belirgindir. %20 oranda hddelenmiş %5 oranında B₄C ihtiva eden numuende 600°C de elde edilen sertlik değeri 59 HB iken 700°C'de 57 HB ve 800°C'de 49 HB olmuştur. %30 haddeleme oranlarında bu değerler sırasıyla 58 HB,56 HB ve 48 HB olmuştur.

Sıcaklıktaki artış, yeniden kristalleşmenin kapsamını etkileyerek yeniden kristalleşmiş tanelerin boyutunda bir büyümeye yol açmıştır (Mansourzadeh vd., 2016; Zhang vd., 2022). Tüm numunelerin sertliği, B₄C oranındaki artışa paralel olarak belirgin bir şekilde artmıştır.

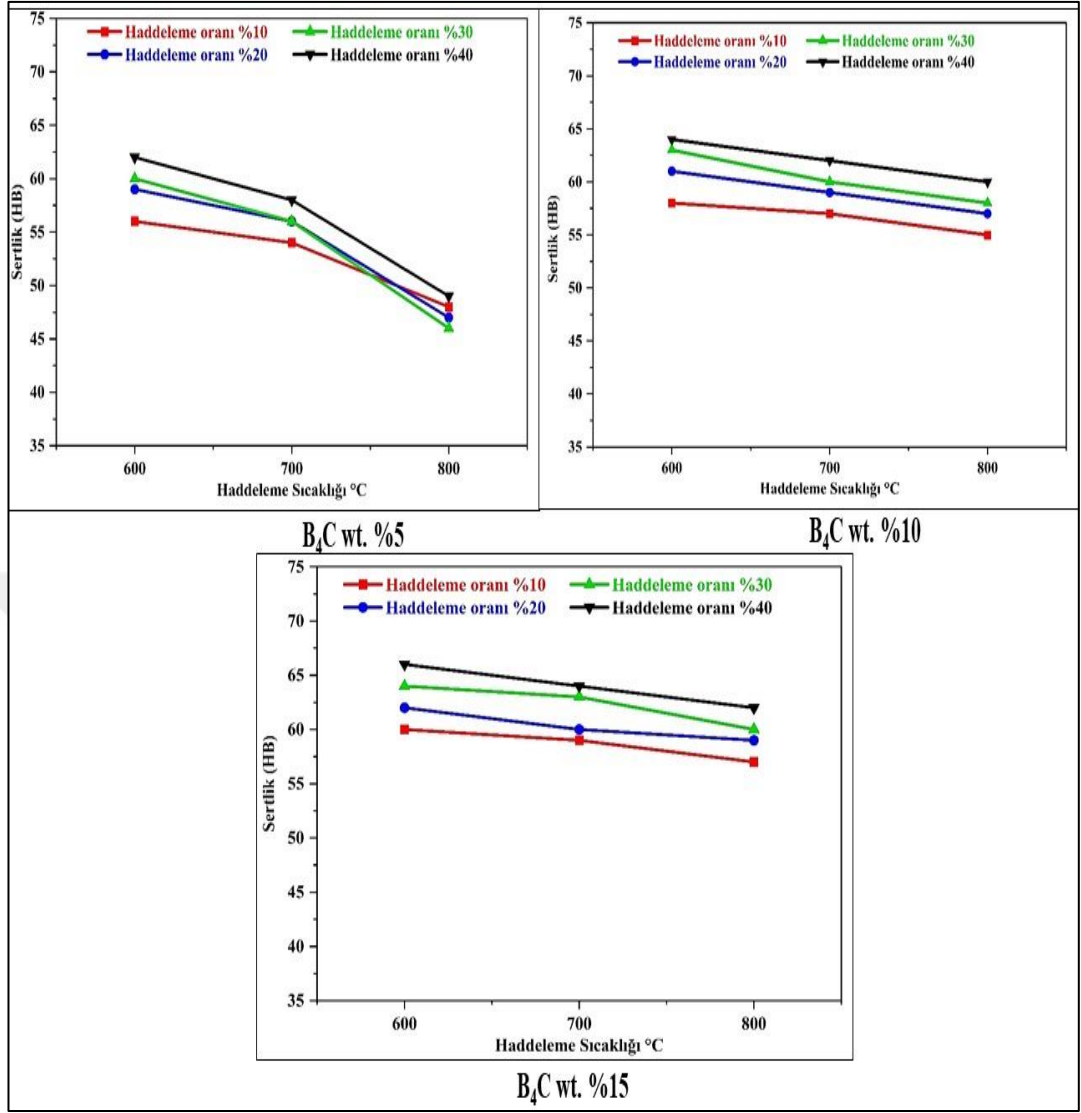
Ağırlıkça %15 B₄C iktiva eden 600°C’de %40 oranında haddelenen numunelerde en yüksek sertlik değeri olan 66 HB sertlik değeri ölçülmüştür. En düşük sertlik değerleri tüm B₄C oranları için %10 oranındaki haddeleme oranlarında ölçülmüştür.

5.5.1.2 43µm tane boyutuna sahip B₄C içeren haddelenen numuneler için sertlik değerleri

Şekil 5.17’de, 43µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş numunelerde haddeleme sonrasında elde edilen sertlik değerleri haddeleme oranlarına ve haddeleme sıcaklıklarına bağlı olarak gösterilmiştir. %5 B₄C oranıyla 800°C’de haddelenen numuneler hariç, haddeleme sıcaklıkları ve haddeleme oranları arttıkça numunelerin sertliğinin arttığını göstermektedir. Buradaki fark 1 HB değeri düzeyindedir ve %10 haddeleme oranı için 48 HB olan sertlik değeri %20 için 47 HB, %30 haddeleme oranında 47 HB olarak ölçülmüş ve %40 haddeleme oranında ise yükselerek 49 HB olmuştur. Belirgin anlamlı bir değişim oluştuğunu belirtmek güçtür. Bu durumda, sertlikteki azalma, B₄C parçacıkları ile Cu matrisi arasındaki termal genleşme katsayısındaki eşitsizliğe bağlanmaktadır (Tayebi vd., 2019).

Maksimum sertlik değerleri 600°C sıcaklıkta, %40 hadde ve %15 B₄C oranı için 66 HB olarak ölçülmüştür. B₄C oranındaki artışla birlikte, haddelenmemiş malzemelerin yoğunluğu artmış ve gözenekliliği azalmış, bu da numunelerin daha yüksek bir sertliğe sahip olmasına yol açmıştır (Altınsoy vd., 2013). B₄C takviyelerinin eklenmesi, dislokasyonların arayüzlerde hareketini durdurarak numunelerin daha güçlü olmasına yardımcı olur, bu da güçlendirme mekanizmalarını tetikler (Zabihi vd., 2013).

43µm tane boyutunda B₄C iktiva eden numunelerde en düşük sertlik değerleri 800°C’de haddelenen numunelerde ölçülmüştür (Tablo 5.3).

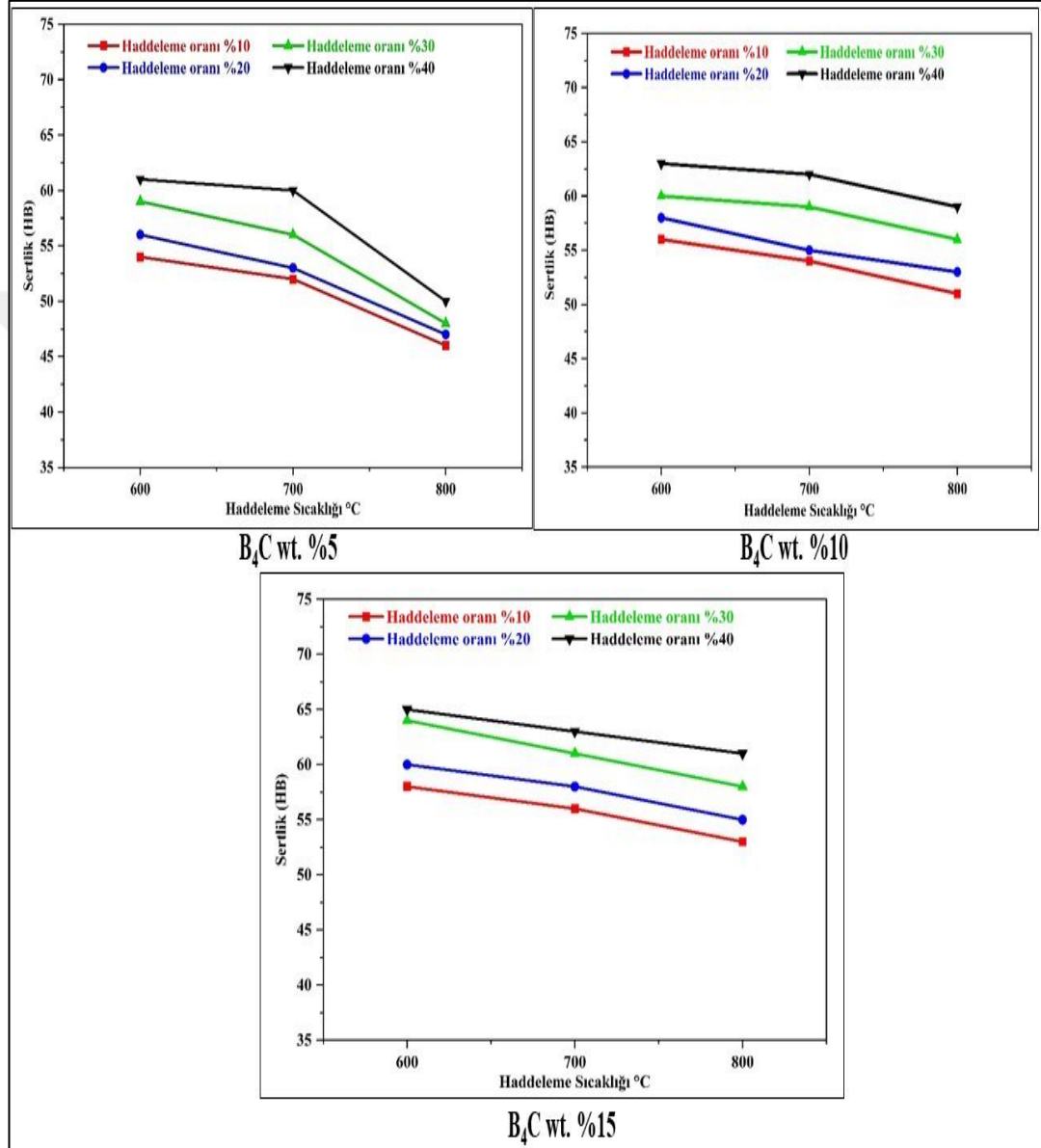


Şekil 5.17 B₄C 43µm haddelenen numunelerinin sertliği

5.5.1.3 90µm tane boyutuna sahip B₄C içeren haddelenen numuneler için sertlik

90µm tane boyutuna ve farklı oranlarda sahip B₄C ile takviye edilmiş numunelerin farklı sıcaklıklarda ve oranlarda haddelene işlemi sonrasında ölçülen sertlikleri Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Ölçülen maksimum sertlik %15 oranında B₄C ihtiva eden numunelerin 600°C’de %40 oranında haddelenmesi sonrasında 66 HB olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri diğer tane boyutuna sahip numunelerde olduğu gibi artan B₄C oranına bağlı olarak 600°C’de haddelenmiş numunelerde oluşmuştur. Benzer şekilde artan B₄C oranına bağlı olarak da sertlik değerleri yükselmektedir.

Sertlik, tüm haddeleme oranlarında 800°C sıcaklıkta bir azalma gösterir. B₄C parçacıklarının etrafında dislokasyonların oluşması, B₄C parçacıkları ile Cu matrisi arasındaki ısı genleşme katsayısı farkıyla açıklanabilir (Karakoç vd., 2018; Mo vd., 2016; Öksüz ve Şahin, 2016).



Şekil 5.18 B₄C 90µm haddelenen numunelerinin sertliği

5.6 Çapraz Kırılma Dayanımı (ÇKD)

Haddeme işlemine tabi tutulan numuneler üç noktalı eğme deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) Tablo 5.4’de verilmiştir.

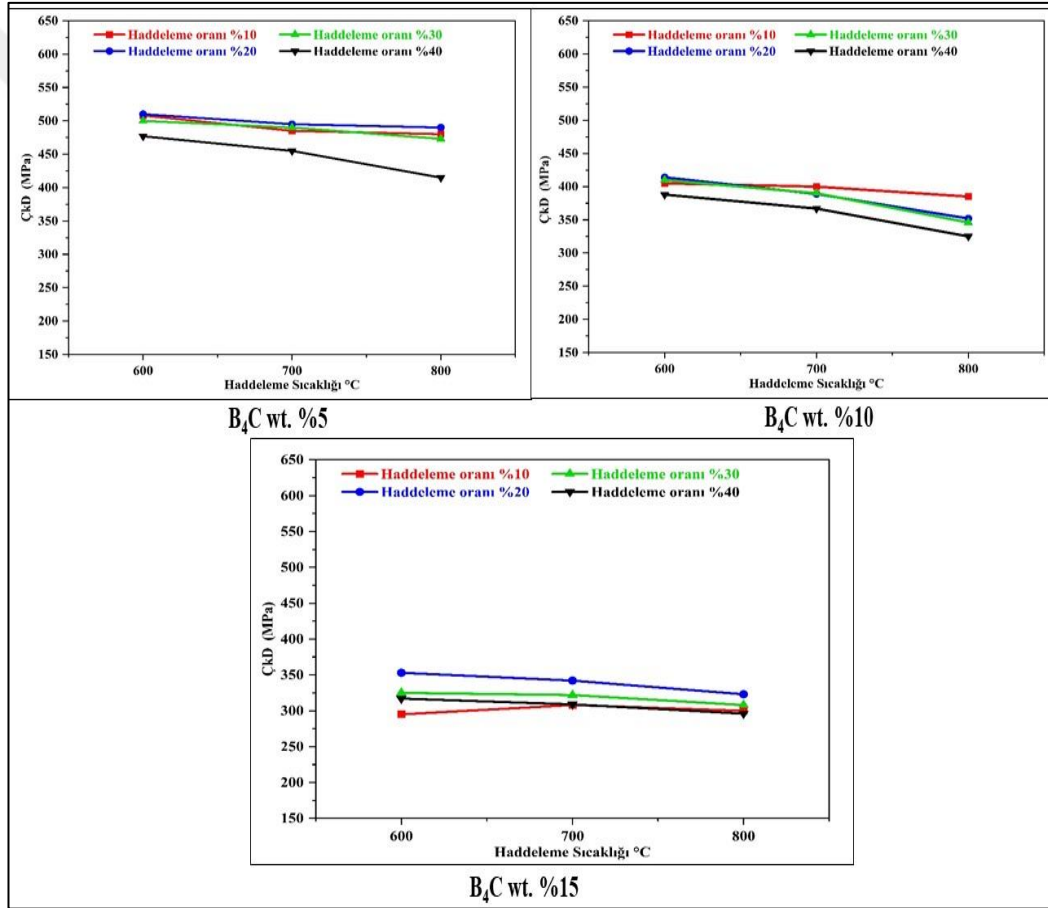
Tablo 5.4 Haddelenen numunelerin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri

Tane Büyüklüğü (μm)	B ₄ C ağ. (%)	Haddeleme Sıcaklığı (°C)	Haddeleme Oranı			
			%10	%20	%30	%40
25 μm	%5	600°C	508	510	500	477
		700°C	485	495	490	455
		800°C	480	490	473	415
	%10	600°C	405	414	410	388
		700°C	400	389	390	367
		800°C	385	352	346	325
	%15	600°C	395	353	325	317
		700°C	308	342	322	309
		800°C	300	323	308	296
43 μm	%5	600°C	495	515	502	455
		700°C	480	513	483	440
		800°C	449	495	468	387
	%10	600°C	386	402	410	365
		700°C	375	390	390	350
		800°C	346	359	357	316
	%15	600°C	298	292	305	330
		700°C	310	279	298	298
		800°C	270	256	284	289
90 μm	%5	600°C	476	461	455	420
		700°C	452	455	437	410
		800°C	437	454	426	365
	%10	600°C	405	400	395	380
		700°C	387	380	370	361
		800°C	370	382	360	328
	%15	600°C	340	318	310	355
		700°C	327	302	297	332
		800°C	318	292	288	325

5.6.1. Tane boyutu 25 μm B₄C içeren haddelenmiş numuneler için çapraz kırılma dayanımı

Şekil 5.19’da farklı oranlarda 25 μm tane boyutuna sahip B₄C taneleri ile takviye edilmiş, farklı oranlarda haddeleme ve sıcaklıklarda haddelenen numunelere ait

kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri verilmiştir. Artan sıcaklığa bağlı olarak sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu, artan sıcaklık yumuşatma etkisinin bir sonucudur ve bu da kompozit malzemede bulunan takviye mekanizmalarını azaltır (Pressureless, 2013). ÇKD değerlerindeki düşüş, en yüksek haddeleme sıcaklığı olan 800°C'de en belirgindir ve bu sıcaklığın yüksek mukavemetli kompozitler elde etmek için daha az elverişli olduğunu göstermektedir. Ölçülen en yüksek ÇKD değeri 600°C'de ve %5 oranında B₄C oranında takviye içeren numunelerde ölçülmüştür. Artan B₄C ve hadde sıcaklığına bağlı olarak ÇKD değerleri azalmıştır. %15 oranında B₄C içeren numunelerde haddeleme sıcaklığına bağlı olarak değişim minimumdur.



Şekil 5.19 B₄C 25µm haddelenmiş numunelerin ÇKD değeri

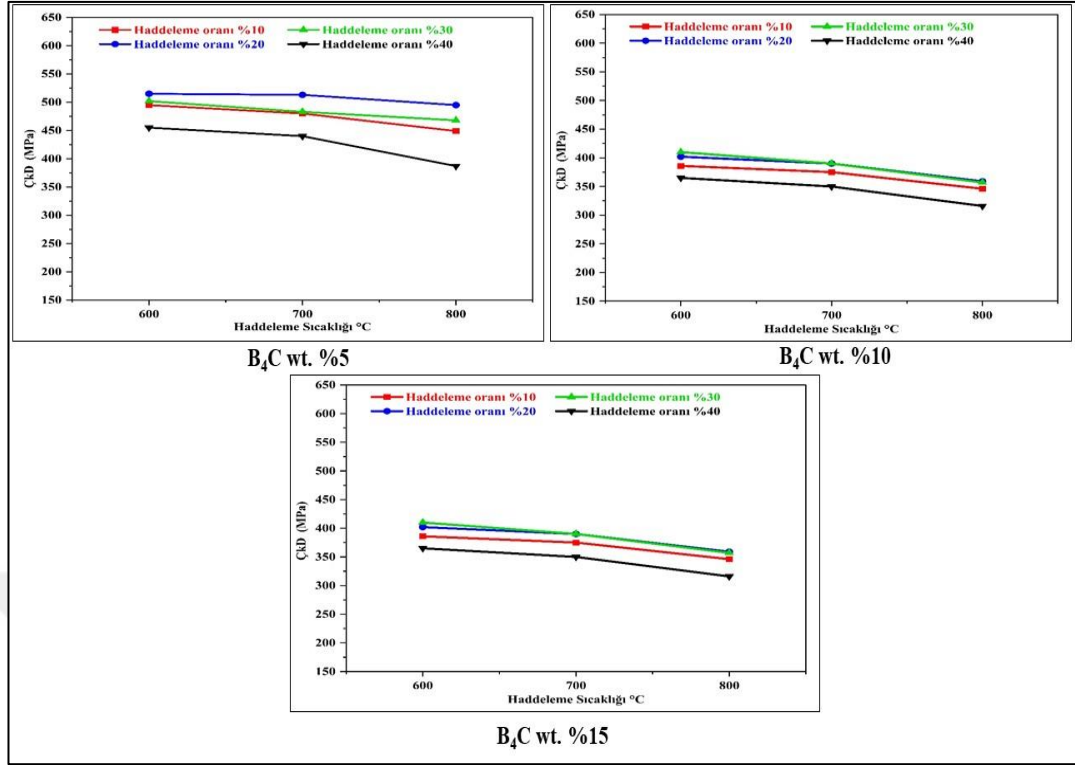
B₄C oranlarındaki bir artış, çapraz kırılma dayanımı değerlerinde bir düşüşle sonuçlanır. Bunun nedeni, B₄C partiküllerinin stres yoğunlaştırıcı olarak hareket ederek kompozitin genel dayanımını azaltmasıdır. B₄C sert ve kırılmanlı olduğu için kompoziti zayıflatır. Kompozitin içine konulması ise kompozitte daha az stres konsantrasyonu ve daha az bağlanma ile sonuçlanır (Eski, 2023). 600°C haddeleme

sıcaklığında, %5 B₄C oranı en yüksek çapraz kırılma dayanımını vermektedir. Tüm haddeme oranları için B₄C ağırlıkça %15 oranında en düşük çapraz kırılma dayanımını sergilemektedir. Daha yüksek haddeme sıcaklıkları tane büyümesinin artmasına neden olur, bu da tane sınırı etkileşimlerinin azalması ve gözenekliliğin artması nedeniyle dayanımın azalmasına neden olur. Daha düşük haddeme sıcaklıkları, daha ince mikro yapılara ve daha yoğun tane dolgusuna sahip olduklarından ÇKD değerlerini artırmak için de faydalıdır (Ekici vd., 2016; Ipek vd., 2017). 25µm tane boyutunun sonuçları göz önüne alındığında, daha küçük tane boyutlarının daha homojen bir mikroyapının oluşumunu kolaylaştırdığı için genellikle daha yüksek mukavemet değerlerine katkıda bulunduğu görülmektedir (Rajeshkumar vd., 2020).

5.6.2. 43µm tane boyutuna sahip B₄C içeren haddelenmiş numuneler için çapraz kırılma dayanımı

Şekil 5.20, 43µm tane boyutuna sahip farklı oranlarda B₄C içeren farklı sıcaklıklarda haddelenmiş numuneler için çapraz kırılma dayanımı değerlerini göstermektedir.

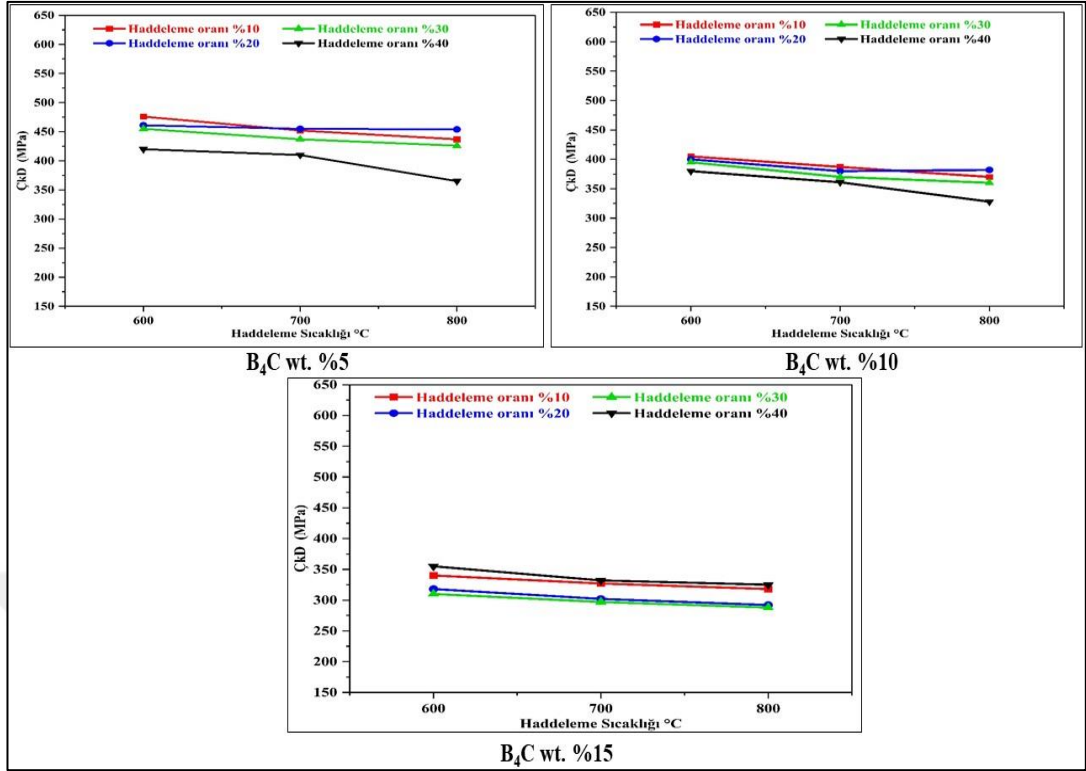
Maksimum ÇKD değerleri %5 oranında B₄C ihtiva eden numunelerin 600°C’de haddelenmesi sonrasında ölçülmüştür. Minimum ÇKD değerleri maksimum takviye oranı olan %15 B₄C takviyeli numunelerin 800°C sıcaklıkta haddelenmesi neticesinde ölçülmüştür. %20 oranında haddelenmiş numunelerde ÇKD değerinde bir miktar artma gözlenmiştir. Sıcaklık ve plastik deformasyon kombinasyonu ara yüzey bağlanmasının artmasına ve çapraz kırılma dayanımının iyileşmesine yol açmaktadır. 700°C haddeme sıcaklığında, ÇKD değerleri özellikle %20 haddeme oranında ve ağırlıkça %5 B₄C’de artmış ve iyileşmiştir, bu da termal genleşme ile takviyeler arasında optimum bir denge olduğunu göstermektedir. 800°C haddeme sıcaklığında, daha yüksek sıcaklığın bir sonucu olarak, kompozitin yeniden kristalleşmesi meydana gelmiş ve ÇKD değerinde gözle görülür bir düşüşe yol açmıştır (Islak, 2012; Junaedi vd., 2016).



Şekil 5.20 43µm tane boyutunda B₄C ile takviye edilmiş numunelerin farklı sıcaklık ve konsantrasyon değerinde haddelenme sonrası ÇKD değeri

5.6.1.1 Tane boyutu 90µm olan B₄C ile takviye edilmiş ve haddelenmiş için haddelenmiş numunelerden elde edilen ÇKD

90µm tane boyutundaki B₄C taneleriyle takviye edilmiş ve farklı oranlarda Cu/B₄C kompozitinin çapraz kırılma dayanımı (ÇKD) değerleri, Şekil 5.21’te gösterilmiştir. Tüm haddelenme ve takviye oranında, sabit tane boyutuna rağmen artan haddelenme oranlarına bağlı olarak ÇKD değerinde sürekli bir düşüş meydana gelmektedir. Bunun nedeni, sürekli plastik deformasyonun dislokasyonların birikmesine yol açarak takviye etkisini azalttığı dislokasyonların ortaya çıkmasıdır (Zabihi vd., 2013). 700°C haddelenme sıcaklığında, ÇKD değerleri haddelenme oranlarına daha farklı bir tepki göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda artan plastik deformasyonun tane sınırlarını etkileyerek kompozit dayanımını etkilediği daha yüksek haddelenme oranları ile ÇKD değerindeki düşmüştür, 800°C haddelenme sıcaklığında tüm haddelenme oranlarında (%10, %20, %30, %40) ÇKD’de bir düşüşe neden olmaktadır (Zheng vd., 2014). Bu durum, yüksek sıcaklıkların yeni tanelerin oluşumunu tetikleyerek önceki plastik deformasyon yoluyla elde edilen güçlendirme etkilerini yok ettiği dinamik yeniden kristalleşmenin yaygınlığına dayandırılabilir (Chen vd., 2018).



Şekil 5.21 B₄C 90µm haddelenmiş numunelerin ÇKD değeri

%15 oranında 90µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş numunelerde tüm hadde sıcaklıklarına %30 haddeleme oranına kadar ÇKD değerleri azalma gösterirken %40 oranındaki haddeleme oranında ÇKD değerlerinde artma görülmüştür. Benzer bir durum 43µm tane boyutuna sahip B₄C ile takviye edilmiş numunelerde de görülmektedir.

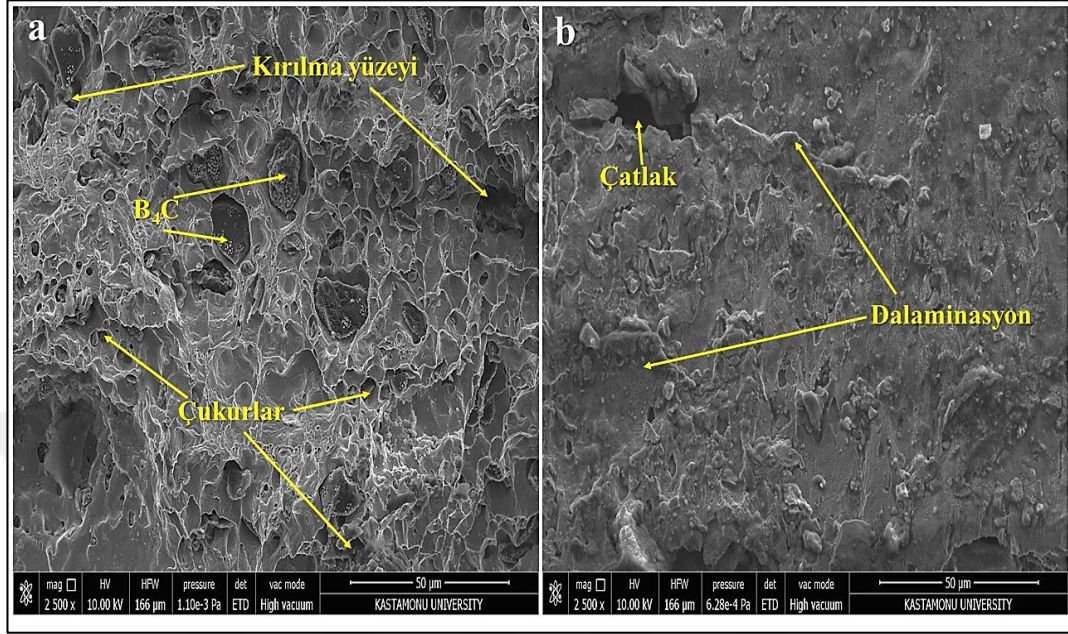
5.7 SEM-EDS Sonuçları

5.7.1 SEM-ESD Kırılma Yüzeyi

5.7.1.1 25µm tane boyutundaki B₄C ile takviye edilmiş numuneler için SEM-ESD kırılma yüzeyi

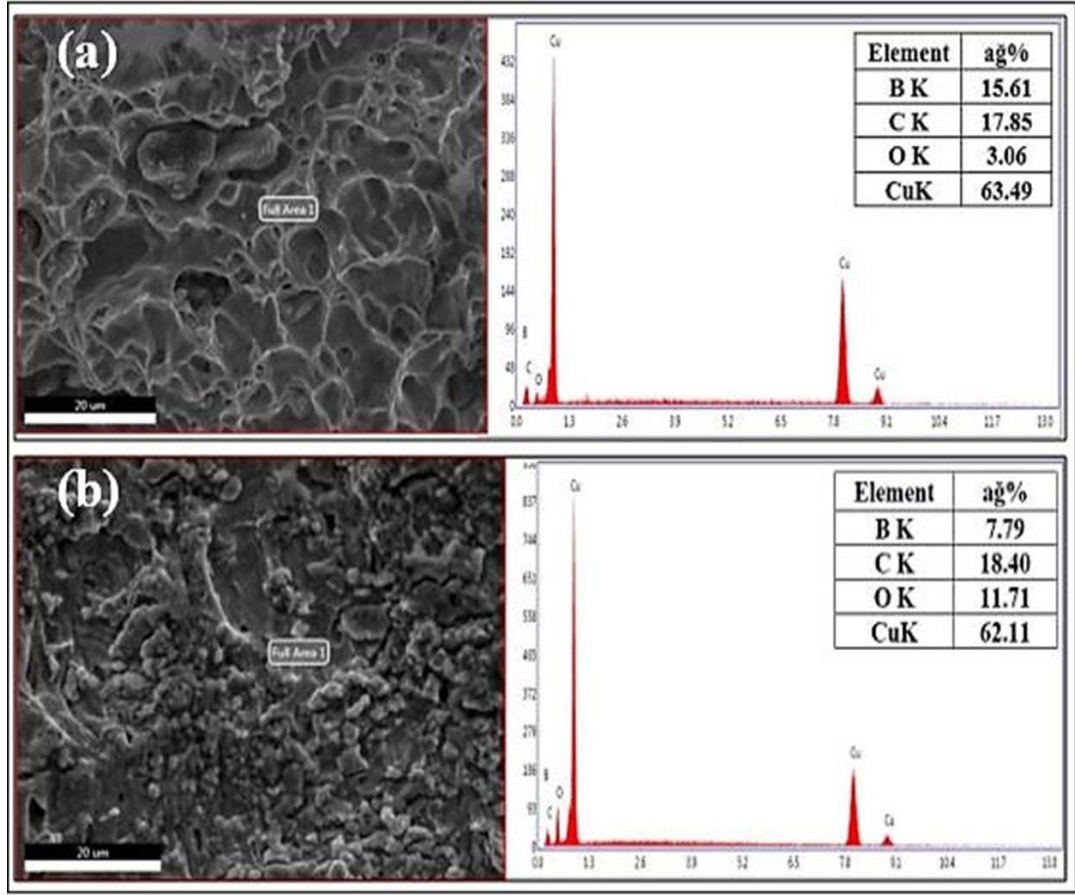
Şekil 5.22'de üç nokta eğme testindeki numunelerin kırılma yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınan yüzey görüntülerini verilmiştir. Numunelerdeki takviye oranı %5'dir. Şekil 5.22a'da haddelenmemiş ve Şekil 5.22b'de 800°C'de %20

oranında haddelenmiş numunenin üç noktalı eğme deneyi sonrasında oluşan kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.22 Ağırlıkça %5 B₄C içeren numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntülemesi (a) Haddelenmemiş numune (b) 800°C’de %20 oranında haddelenmiş numune

Şekil 5.22a’daki SEM görüntüleri, bakır matris içinde mikro çukurların oluştuğunun, numunelerin sünek kırılmaya maruz kaldığının ve haddelenmemiş numunenin düşük sertlik sergilediğinin ancak yüksek eğilme direnci gösterdiğinin kanıtıdır. Mikro çukurların varlığı, bakır matris ile B₄C arasında bir bağ oluştuğunu göstermektedir. Buna karşılık, Şekil 5.22b’de verilen 800°C’de %20 oranında haddelenmiş %5 oranında B₄C ihtva eden numunede yüksek haddeleme sıcaklığı nedeniyle gevrek bir yapı görülmektedir. Bu, önemli plastik deformasyona işaret etmektedir. Plastik deformasyon, artan haddeleme oranı ile gevrek kırılma eğilimi artar (Chen vd., 2018). Delaminasyon oluşumu, kompozitin yüksek sıcaklıklara ve mekanik deformasyona maruz kaldığı sıcak haddeleme işlemi sırasında meydana gelmektedir (Prakash vd., 2018).



Şekil 5.23 Ağırlıkça %5 B₄C'in grafik SEM-EDS verileri (a) Haddelenmemiş numune (b) 800°C Haddelenme sıcaklığı ve % 20 haddelenme oranında haddelenmiş numune

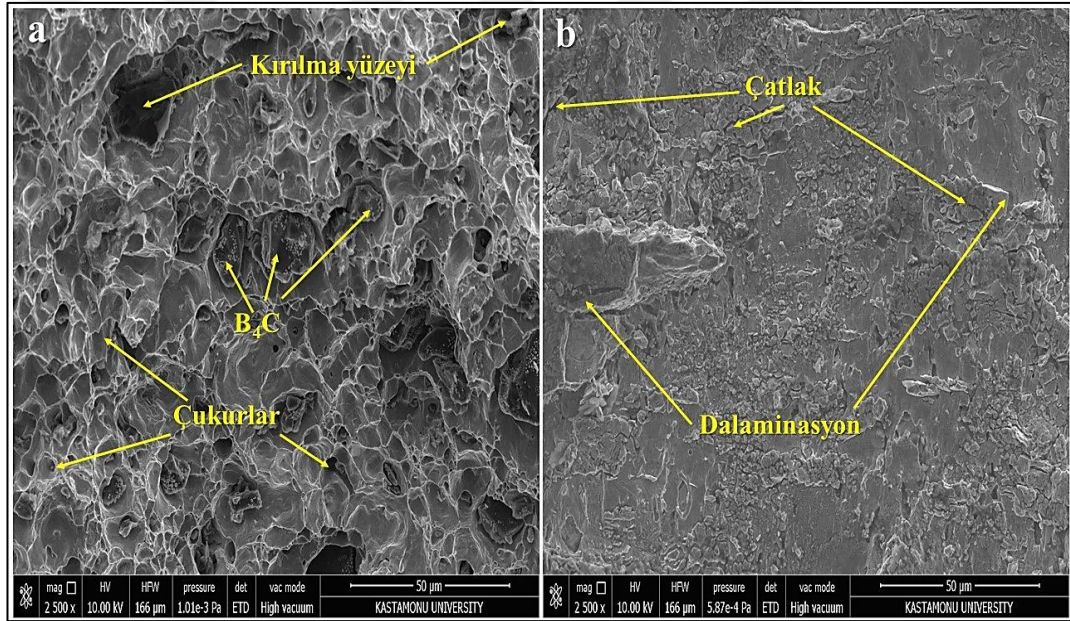
Şekil 5.23a %5 oranındaki B₄C ihtiva eden numunenin EDS analizini göstermektedir. Haddelenmemiş numunenin yapısında bor (ağırlıkça %15,61), karbon (ağırlıkça %17,85), bakır (ağırlıkça %63,49) ve oksijen (ağırlıkça %3,06) elementlerinin varlığı görülmektedir. Bu da kompozit yapıda bor karbürün varlığını kanıtlamaktadır. Yapıdaki oksijen işlem öncesinde bekleme süresinde meydana gelmiştir. Yapıda yeni bir faz oluşumu gözlenmemiştir.

Haddelenmiş numuneye ait EDS grafiği (Şekil 5.23b)'de gösterilmektedir. EDS analizi yapıda bor (ağırlıkça %7,79), karbon (ağırlıkça %18,40), bakır (ağırlıkça %62,11) ve oksijen (ağırlıkça %11,71) gibi elementlerin varlığını göstermektedir. Bu numune, oksijen pikinin yoğunluğunu göstermektedir. Atmosfer şartlarında koruyucu ortam olmadan 800°C'lik yüksek haddelenme sıcaklığı nedeniyle yapıda oksijen oranı artmıştır (%11,71). Yapıda delaminasyon görülmektedir. Bunun nedeni, yüksk

sıcaklıktaki ve haddeleme oranındaki artış sonucunda meydana gelen delaminasyondur (Selvakumar ve Narayanasamy, 2015; Shorowordi vd., 2003).

5.7.1.2 B₄C 43µm için SEM-ESD kırılma yüzeyi

Şekil 5.24a ve b, 43µm tane boyutuna sahip ve ağırlıkça %5 B₄C içeren numunelerin 2500x'te büyütülmüş taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografisini göstermektedir. Şekil 5.24a, düşük sertlik sergileyen ancak 542 MPa'lık yüksek bir çapraz kırılma dayanımına sahip olan haddelenmemiş numuneyi göstermektedir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları, üç nokta eğme testlerinden kaynaklanan kırılma yüzeylerini ve bakır matris içinde küçük çukurların.



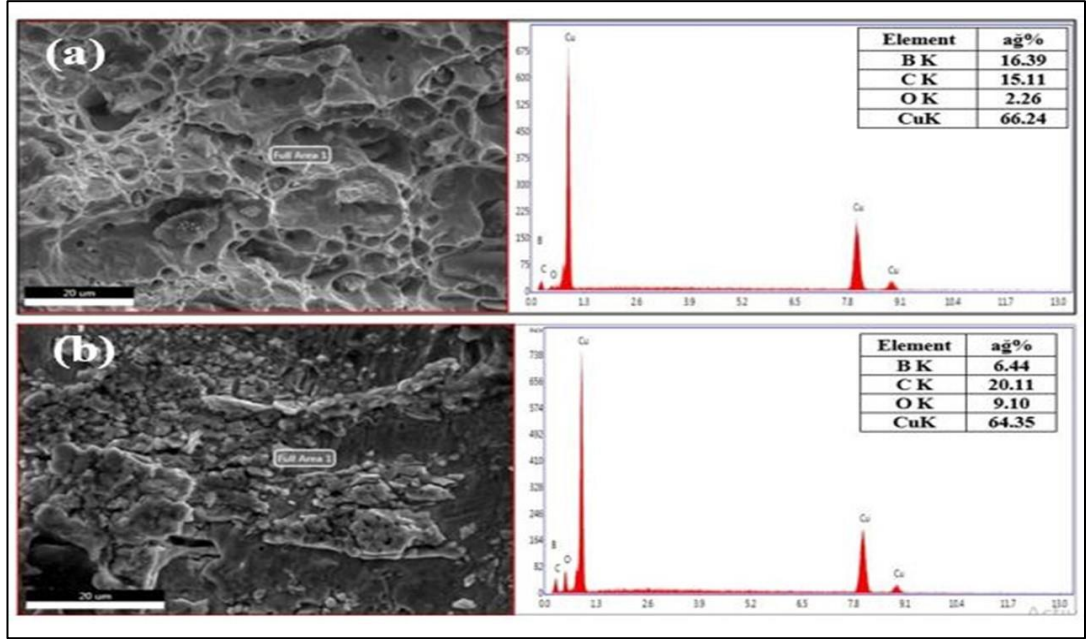
Şekil 5.24 Ağırlıkça %5, tane boyutu 43µm B₄C Numunesinin SEM görüntüleri, (a) Haddelenmemiş numune (b) 800°C Haddeleme sıcaklığı ve %20 haddeleme oranında haddelenmiş numune

Oluşmasından kaynaklanan sünek bir kırılma mekanizmasını ortaya çıkarmaktadır. Şekilde gösterildiği gibi, kırılma yüzeyinde kırıkların ve plastik deformasyonun varlığı gözlemlenebilir (Chen vd., 2018).

Haddelenmiş numune %20 haddeleme oranı ve 800°C haddeleme sıcaklığında 45,8 HB sertlik, 495 MPa çekme dayanımı sergilemektedir. Şekil 5.24b'de gösterilen numune, haddeleme oranı ve yüksek haddeleme sıcaklığının bir sonucu olarak sünek

bir yapı sergilemiştir. Bunun nedeni, yapının yeniden kristalleşmesi ve sıcak haddeleme işlemi sırasında delaminasyon oluşumuna yol açan yüksek miktarda oksijenin varlığıydı. Kompozit malzeme yüksek sıcaklıklara ve mekanik deformasyona maruz bırakılmıştır (Prakash vd., 2018).

Haddelenmemiş numune, öncelikle kırılmış yüzeyin farklı alanlarına odaklanarak EDS incelemesine tabi tutulmuştur. Şekil 5.25a'da B₄C ve C'ye karşılık gelen net pikler bulunmaktadır. Bunlar yapının bor (ağırlıkça %16,39), karbon (ağırlıkça %15,11), bakır (ağırlıkça %66,24) ve oksijen (ağırlıkça %2,26) içerdiğini göstermektedir. Takviye oranı arttıkça bu piklerin büyüklüğü artmış, ancak yapıda yeni bir faz ortaya çıkmamıştır.



Şekil 5.25 Tane boyutu 43µm B₄C numunesinin SEM-EDS verileri (a) Haddelenmemiş numune (b). 800°C haddeleme sıcaklığı ve %20 haddeleme oranında haddelenmiş numune

Şekil 5.25b, haddelenmiş numune üzerinde yapılan EDS analizinin sonuçlarını göstermektedir. Yapı içerisinde bor (ağırlıkça %6,44), karbon (ağırlıkça %20,11), bakır (ağırlıkça %64,35) ve oksijen (ağırlıkça %9,10) bulunduğunu göstermektedir. Kırılma yüzeyi enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak analiz edilmiş ve bu numunede oksijen pikinin çok daha güçlü olduğu görülmüştür. Haddelenmemiş numune ile karşılaştırıldığında, 800°C'lik yüksek haddeleme sıcaklığı ve %20'lik haddeleme oranı sonucunda kompozitin oksijen içeriği %9,10'a

yükselmiştir. Bu da %6,2 gözenekliliğe, 45,8 HB sertlik değerine ve 495 MPa ÇKD değerine yol açmıştır. Bu, sıcaklıktaki artışın ve artan haddeleme oranının bir sonucudur (Selvakumar ve Narayanasamy, 2015).

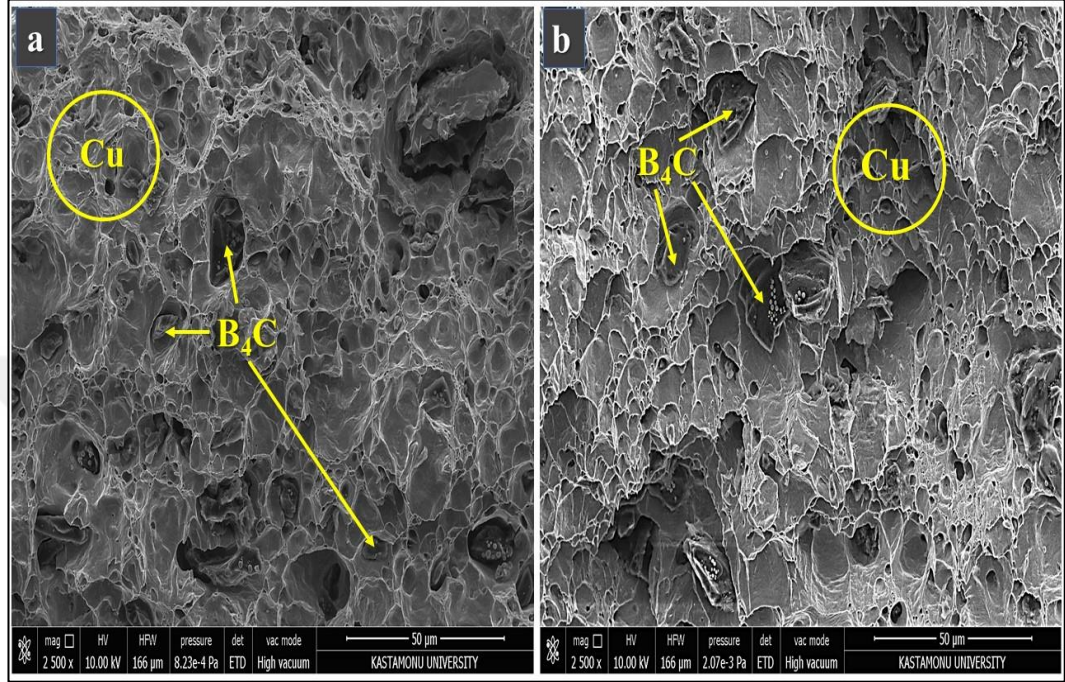
Sıcak haddeleme işlemi sırasında, kompozit malzemelerde delaminasyon meydana gelebilir. Bu durum özellikle kompozit, bakır esaslı bir metal ve bor karbür matrisi gibi farklı özelliklere sahip farklı malzemelerden oluştuğunda geçerlidir. Sıcak haddeleme işlemi, bileşiğin yüksek sıcaklıklara ve mekanik deformasyona maruz bırakmaktadır. Bakır ve borkarbür arasındaki ısıl genleşme katsayısı farkı vardır.

Bu farklılıklar, farklı genleşme ve büzülme oranlarıyla sonuçlanır ve bu da iç yapıda gerilimlerin oluşmasına neden olur. Bu gerilimler kompozit katmanlar arasında delaminasyona veya kusurlara neden olabilir (Selvakumar ve Narayanasamy, 2015). Metal bileşenler ve seramikler arasında düzgün bir bağlanma, sıcak haddeleme sırasında delaminasyonu önlemek için çok önemlidir. Kompozit başlangıçta düzgün bir şekilde bağlanmamış veya karıştırılmamışsa veya katmanlar arasında delikler veya boşluklar varsa, haddeleme kuvvetleri ve sıcaklıklar bu sorunları daha da kötüleştirerek delaminasyona yol açabilir (Wisnom, 2012). Sıcak haddeleme işlemi sırasında tekdüze olmayan ısıtma veya soğutma, kompozit içinde sıcaklık değişimlerine neden olur. Bu değişimler katmanlar arasında diferansiyel genleşme ve büzülmeye yol açabilir ve bu da delaminasyona neden olabilir. Nem, kompozit malzemenin katmanları arasına nüfuz ederek yapışkan bağları zayıflatabilir ve delaminasyona neden olabilir. Kompoziti nemli veya ıslak ortamlara maruz bırakan uygulamalar da önemli bir sorun teşkil eder (Prakash vd., 2018).

5.7.1.3 B₄C 90µm için SEM-ESD kırılma yüzeyi

Şekil 5.26a, b’de 90 µm tane boyutundaki B₄C taneleriyle %5 oranında takviye edilen haddelenmemiş ve 800°C’de %20 oranında haddelenmiş numunelerin 2500X büyütme oranında çekilmiş kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini verilmiştir. Şekil 5.26a haddelenmemiş, (Şekil 5.26b) 800°C sıcaklıkta ve %20 haddeleme oranında haddelenmiş ağırlıkça %5 B₄C içeren numunelerin üç noktalı eğme sonucunda oluşan kırık yüzeylerini vermektedir. Açık renkli alanlar bakır (Cu) tarafını temsil ederken,

siyah köşe şekilleri bor karbür (B_4C) partiküllerinin varlığını göstermektedir. B_4C 'nin bakır matrisli kompozitte düzgün bir şekilde dağıldığı ve kompozitte bazı gözenekler olduğu gözlenmiştir (Eski ve Elhemşeri, 2021).

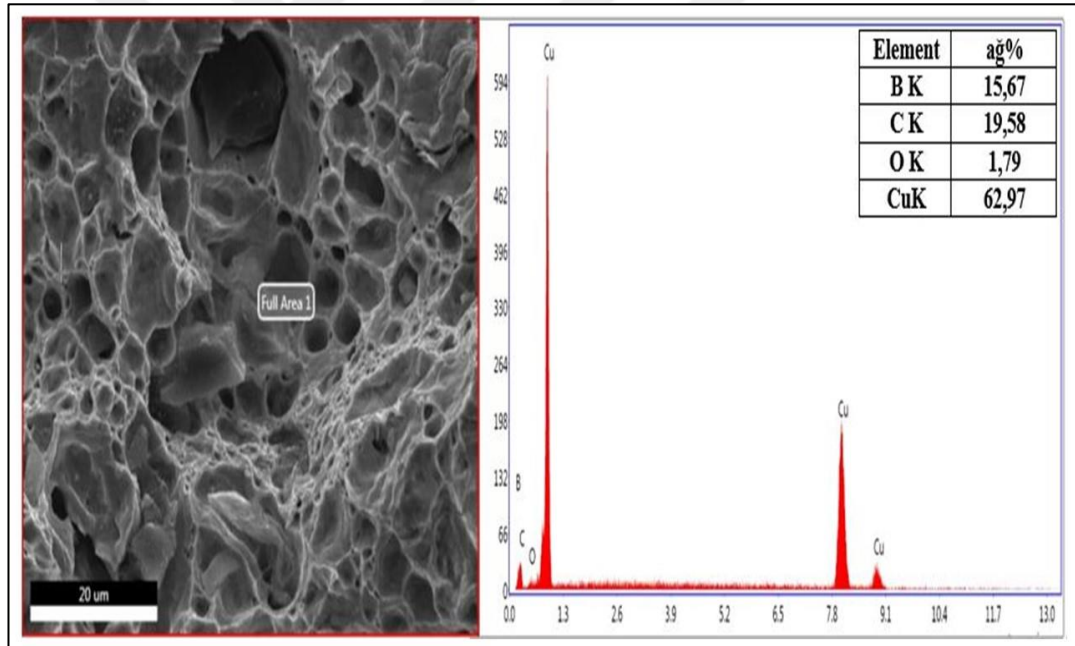


Şekil 5.26 90µm tane boyutuna sahip B_4C ile takviye edilmiş %5 oranında takviye edilmiş numunenin SEM görüntüleri (a) Haddelenmemiş (b) 800°C'de %20 oranında haddelenmiş

SEM-EDS analizlerinden, B_4C moleküllerinin matris yapısına dahil olduğu gözlemlenmiştir. Eğme testinden sonra kırılma yüzeyinde kalan B_4C parçacıkları, matris ve takviye parçacıkları arasında iyi bir ara bağlantı olduğunun göstermektedir. Uygulanan haddeleme basıncının dislokasyonun zorlanmış hareketine neden olması nedeniyle sıcak haddelenmiş numunelerin kırılma yüzeylerinde bazı çatlama etkileri gözlenmiştir. Kırılan yüzeyde boşlukların ve küçük çukur şekillerinin varlığı, hem kompozit hem de sıcak haddelenmiş numuneler için iyi süneklik göstermektedir (Karakoç vd., 2018). Şekil 5.26a ve b'de gösterilen kırılma yüzeyleri, sünek kırılmanın bir göstergesi olan yapıdaki çukurları ortaya koymaktadır. Sünek kırılma, çatlığa yol açan mikro boşlukların çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi yoluyla gerçekleşir. (Şekil 5.26a ve b) kırılma yüzeyi örneklerini göstermektedir. (Şekil 5.26a) kontrol numunesi ile (Şekil 5.26b) sıcak haddeleme işlemi arasında çukur boyutunda neredeyse hiçbir fark gözlenmemektedir. Çukurlu bir yüzey dışında, numuneler tane

sınırı kırılmasının bir sonucu olarak alan fraksiyonunun düz bir yüzeyini göstermektedir (Chen vd., 2018).

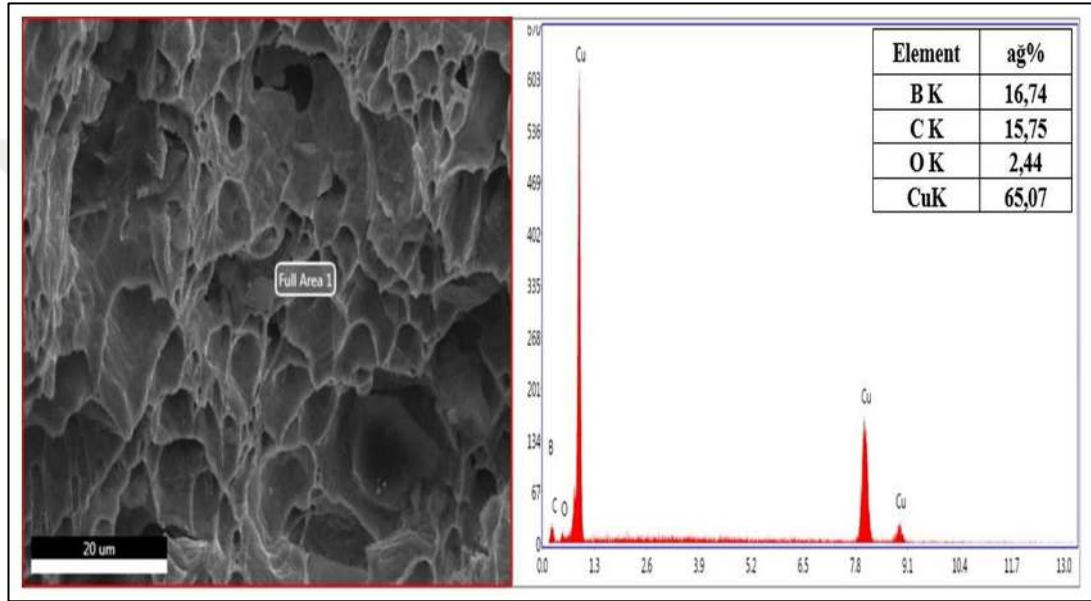
Şekil 5.27’de %5 oranında 90µm tane boyutuna sahip B₄C ile takviye edilmiş ve 800°C’de %20 oranında haddelenmiş numunenin kırılma yüzeyinin SEM ve EDS analizi sonuçları gösterilmiştir. Yapıda bor (ağırlıkça %15,67), karbon (ağırlıkça %19,58), bakır (ağırlıkça %62,97) ve oksijen (ağırlıkça %1,79) elementlerinin varlığını göstermektedir. Bu, kompozit yapıda B₄C’nin varlığını kanıtlamaktadır. Bakır ve kompozit numunelerde az miktarda oksijen vardır. Bu muhtemelen sinterleme sırasında veya kırılma süresi ile inceleme zamanı arasındaki beklemeden dolayı matrisin oksidasyonundan kaynaklanmıştır (Altınsoy vd., 2013). Bakır matris ve B₄C partikülleri arasında iyi bir bağlanma mevcuttur (Efe vd., 2012).



Şekil 5.27 Ağırlıkça %5, tane boyutu 90µm B₄C haddelenmemiş numunesinin SEM-EDS verileri

Şekil 5.28, ağırlıkça %5 B₄C oranında 90µm tane boyutuna sahip B₄C ile takviye edilmiş numunenin SEM-EDS analizini göstermektedir. Numunenin yapısında bor (ağırlıkça %16,74), karbon (ağırlıkça %15,75), bakır (ağırlıkça %65,07) ve oksijen (ağırlıkça %2,44) elementlerinin varlığını göstermektedir. Bu da kompozit yapıda B₄C’nin varlığını kanıtlamaktadır. B₄C ve C piklerinin oluştuğu ve artan takviye oranları ile bu piklerin yoğunluklarında artışlar olduğu görülmektedir. Yapı içerisinde

yeni bir faz oluşmamaktadır. EDS analizinden, yüzeyde artan sıcaklığa bağlı olarak kısmen de olsa oksit oluştuğu görülmektedir. Bakır ve kompozit numunelerde az miktarda oksijen elementi bulunmuştur, bu durum muhtemelen sinterleme sırasında matrisin oksidasyonundan kaynaklanmıştır. (Altınsoy vd., 2013). EDS’de bulunan az miktardaki oksijenin, numune hazırlama veya haddelenmenin ortam şartlarında yapılması sırasında oluşan bir oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Shorowordi vd., 2003).

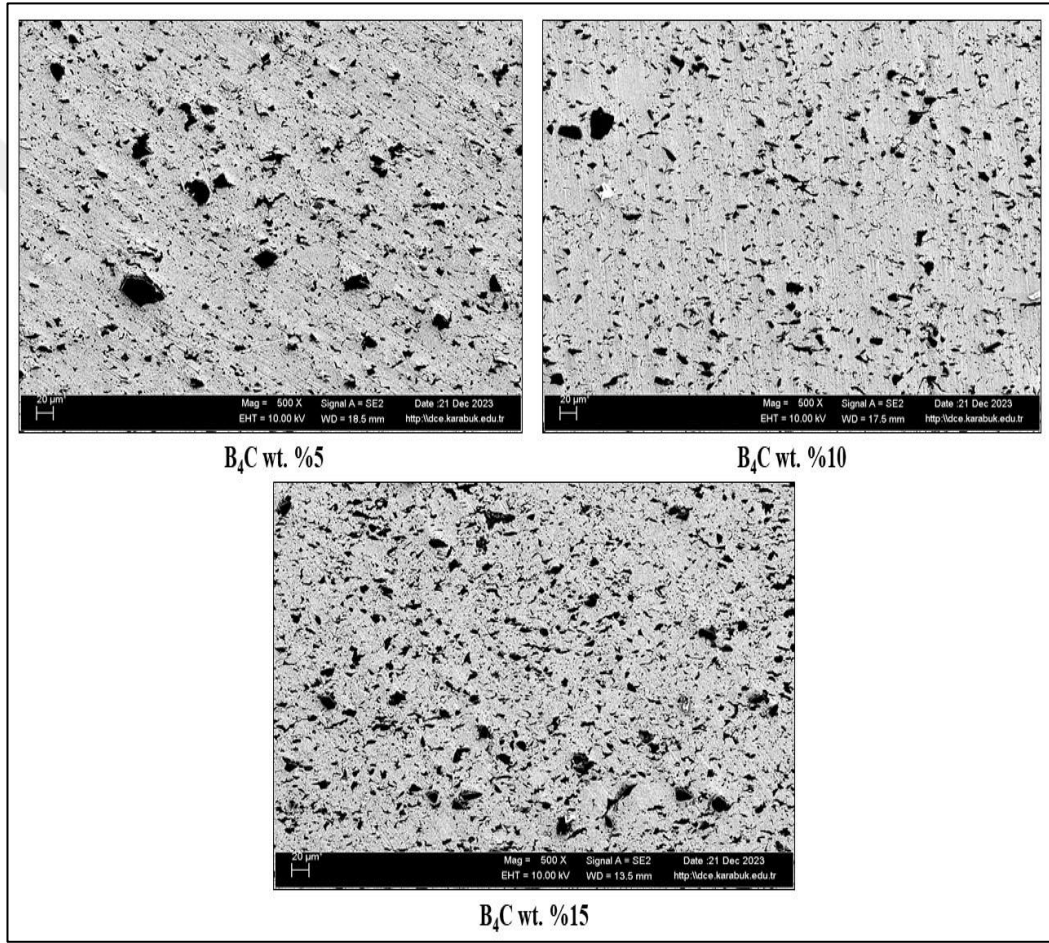


Şekil 5.28 800°C’de %20 oranında haddelenmiş %5 B₄C ihtiva eden numunenin SEM-EDS analizi

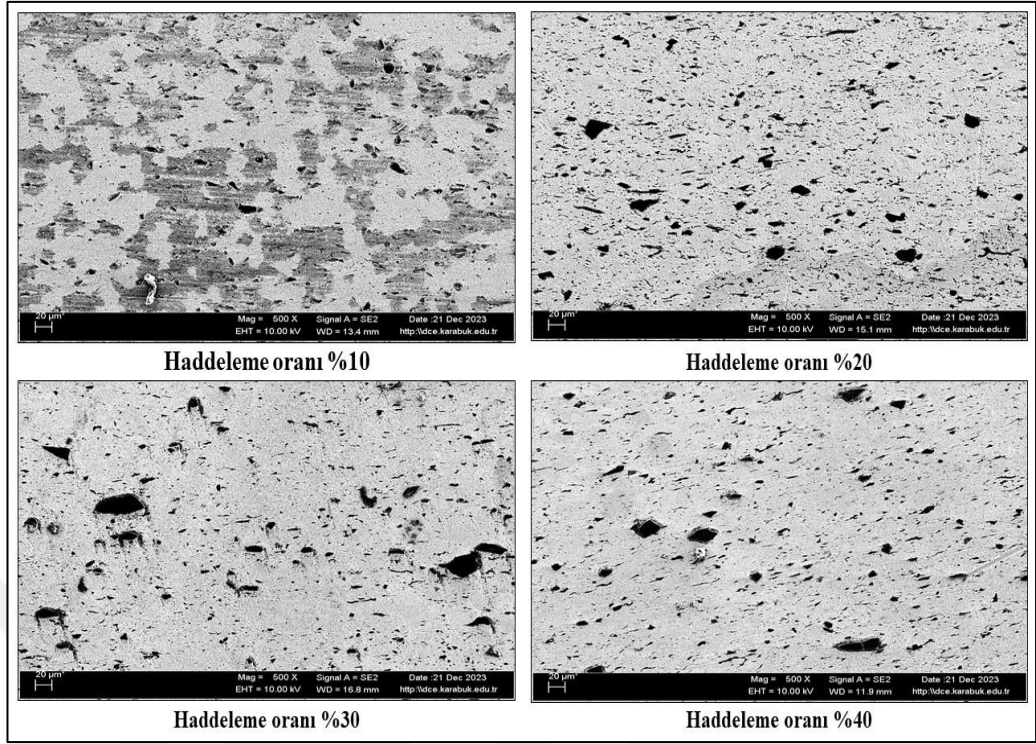
5.7.2 Numunelerin Yüzey SEM Analizi

Şekil 5.29-5.32’de, değişen B₄C tane boyutuna ve oranlarına (%5, %10, %15) sahip %30 oranında haddelenmiş numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden, B₄C parçacıklarının bakır (Cu) matris içindeki dağılımında herhangi bir yığılma olmadığını, homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Artan B₄C oranına bağlı olarak yapı içerisinde gözenekliliğin arttığı görülmektedir. Bakır ile B₄C tanelerinin temasının düzgün olduğu, taneler ile bakır yüzey arasında belirgin boşlukların olmadığı görülmektedir. Temas, iyi bağlanmaya sahiptir (Chen vd., 2018). Şekil 5.29’de, B₄C ağırlıkça %15’e yükselmesinin B₄C fazı ile matris fazı arasındaki bağlanmanın azalmasına ve gözenekliliğin artmasına neden olmaktadır.

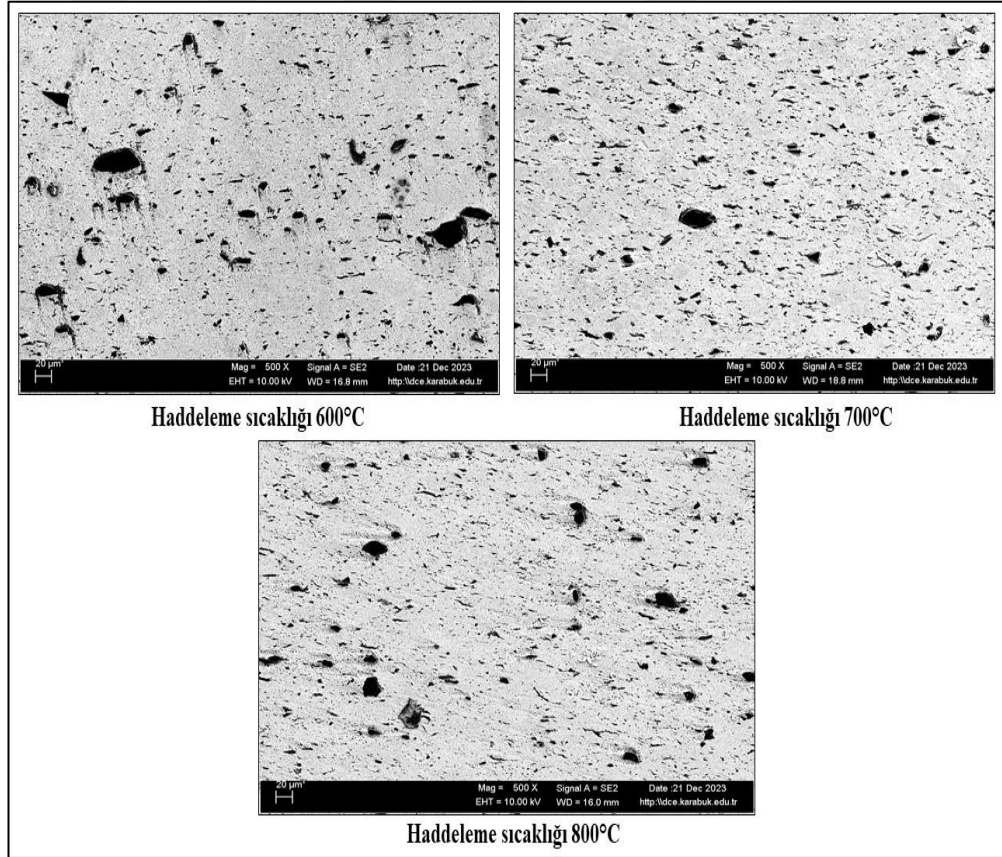
Haddelenmiş numunelerde gözenek oranı azalmaktadır. Artan haddeleme oranlarına bağlı olarak B₄C tanelerinin haddeleme doğrultusunda yönlendiği görülmektedir. Yüksek oranda ve büyük tane boyutuna sahip numunelerde yoğun olmamakla birlikte lokal B₄C yoğunlaşmaları görülebilmektedir. B₄C tanelerinin dağılımı düşük takviye oranlarında daha düzgün bir dağılım göstermektedir. İç yapı görüntülerinden haddeleme oranına ve haddeleme sıcaklığına bağlı olarak dağılımda homojenliğin değişmediği görülmektedir.



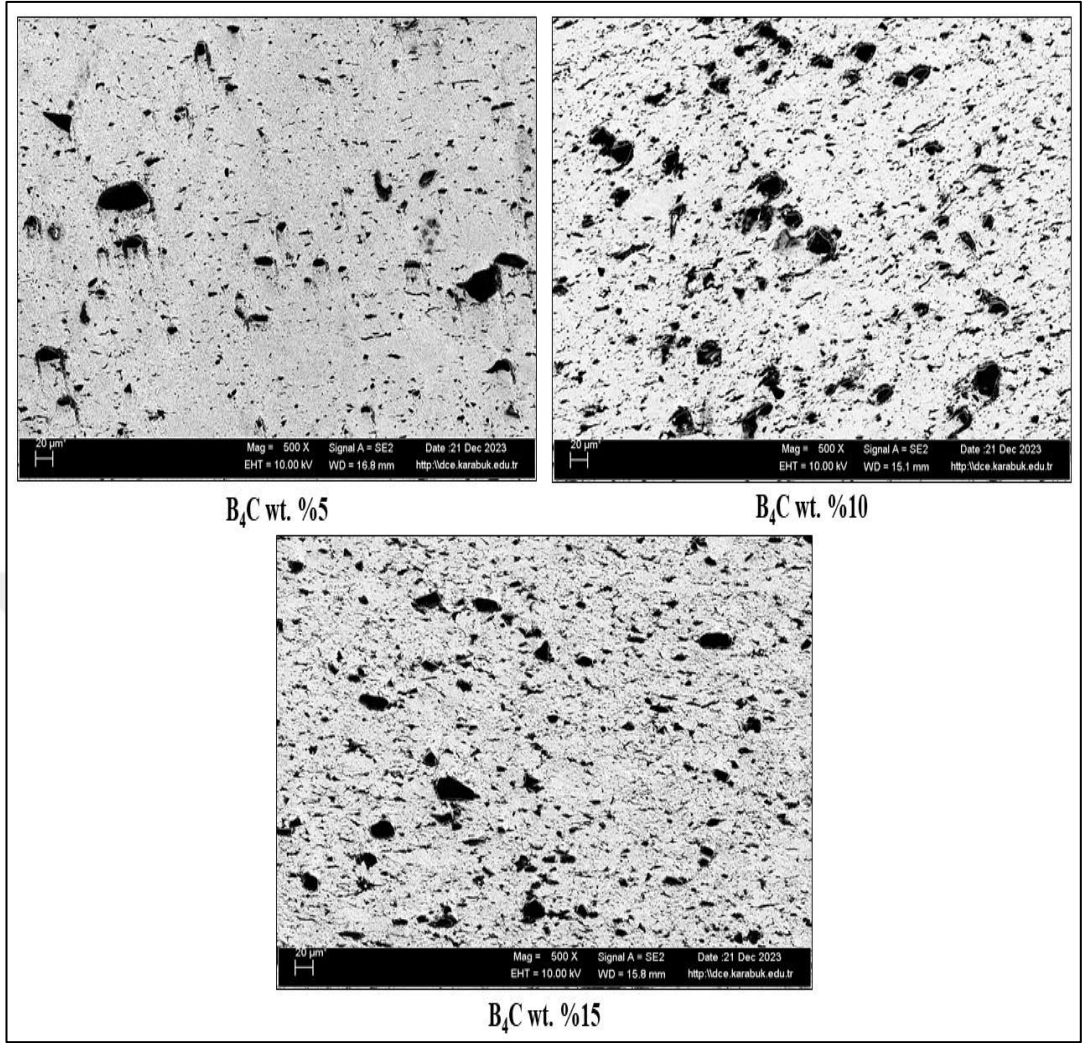
Şekil 5.29 X500 büyütmede B₄C 25µm haddelenmemiş numunenin yüzey yapısı SEM Görüntüsü



Şekil 5.30 X500 büyütmede Haddeleme sıcaklığı 600°C ağırlıkça %5 B₄C 25µm numunesinin yüzey yapısı SEM Görüntüleri



Şekil 5.31 X500 büyütmede Haddeleme oranı %30 ağırlıkça %5 B₄C 25µm numunesinin yüzey yapısı SEM görüntüleri



Şekil 5.32 X500 büyütmede Haddelenme sıcaklığı 600°C, Haddelenme oranı %30 B₄C 25µm numunesinin yüzey SEM Görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ağırlıkça üç farklı oranda(%5, %10 ve %15) ve parçacık parçacık boyutunda (25 μ m, 43 μ m ve 90 μ m) B₄C takviyeli bakırmatrixli kompozitlerin sıcak haddeleme işlemi sonrasında özellikleri, tane boyutu, takviye B₄C tane boyutu, hadde sıcaklıkları ve oranları açısından incelenmiştir. Haddeleme öncesi ve sonrası iç yapı ve mekanik özellikler incelenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular başlıca:

- B₄C tane boyutları ve oranı, takviye elemanlarının yapı içindeki homojen dağılımını etkilememiştir. %15 oranında yüksek oranda B₄C ihtiva eden numunelerde az sayıda lokal yoğunlaşmalar görülse de kayda değer bir olumsuzluk teşkil edecek düzeyde değildir.
- Haddeleme sonrasında yapı içerisinde B₄C taneciklerinin yapı içindeki homojen dağılımı değişmemiştir.
- Haddeleme sıcaklığının en düşük derecesi olan 600°C’de gerek sertli gerekse ÇKD değerleri maksimumda elde edilmiştir. Artan haddeleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ve ÇKD değerli azalmıştır.
- B₄C’ün yapı içindeki takviye oranı arttıkça yapıdaki gözeneklilik miktarı artmıştırEn yüksek gözeneklilik oranları %15 oranında B₄C ihtiva eden haddelenmemiş numunelerde, en düşük gözeneklilik değerleri %5 oranında B₄C ihtiva eden numunelerde ölçülmüştür. Gözeneklilik oranı %10 civarında büyük bir artış göstermiştir.
- Sinterleme sonrasında elde edilen haddelenmemiş numunelerde elde edilen ÇKD değerleri maksimumdur. Sıcak haddeleme tüm numunelerin haddelenmemiş numunelere göre ÇKD değerini düşürmüştür. Minimum azalma 600°C’de haddelenen numunelerde ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıkta haddeleme işlemi kompozit yapının ÇKD değerlerini düşürmüştür.

- Artan haddeleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik değeri azalmıştır. Bakır esaslı kompozit üretiminin temel amaçlarından bir tanesi yumuşak ve aşınmaya karşı düşük direnç özelliklerinin iyileştirilmesidir. Bu nedenle yüksek sertlik değerleri elde etmek için haddeleme sıcaklığının düşük seçilmesi önemlidir.
- Haddeleme oranının artması ile birlikte sertlik değerleri artmıştır. Bunda plastik şekil değişimi sonrasında oluşan toparlanma etkilidir. Yeniden kristalleşme sıcaklık ve süreye bağlıdır. Düşük haddeleme sıcaklıklarında numunelerin yeniden kristalleşme sıcaklığına kadar soğuması daha hızlı gerçekleştiğinden plastik şekillenmenin kazanımları daha belirgin olarak yapıda muhafaza edilmektedir. Düşük haddeleme sıcaklıkları daha yüksek sertlik ve ÇKD değerleri açısından daha uygundur.
- Haddeleme oranına bağlı olarak yapının gözenekliliğinde azalma görülmüştür. Daha yoğun, gözeneklilik oranı düşük malzemelerde mekanik özelliklerin daha iyi sonuçlar vereceği, özellikle de ısı iletim kabiliyetini artıracaktır.
- Sertliğin artmasına bağlı olarak ÇKD değerleri azalmaktadır. Sertliğin artmasının aşınma özelliklerini iyileştireceği aşıkardır. Bu nedenle ÇKD ve sertlik arasındaki ilişkinin optimum değerde olduğu işlem parametreleri kullanılabilir. Yapılan deneylerde haddelenmemiş numunelerin ÇKD değerine en yakın sonuçlar 600°C’ de %5 oranında B₄C ihtiva eden numunelerde elde edilmiştir.
- Gerek sertlik gerekse ÇKD dayanımı açısından en iyi sonuçlar %5 oranında ve 25 µm tane boyutuna sahip B₄C ile takviye edilmiş numunelerde elde edilmiştir.

Özetle; B₄C ile takviye edilmiş bakır matrisli kompozitlerin sıcak haddeleme işlemine tabi tutulabileceği, mekanik özelliklerin düşük tane boyutuna sahip olan B₄C ile ve düşük haddeleme sıcaklıklarında elde edilebileceği ortaya çıkmıştır.

Öneriler:

Bu çalışmadan elde edilen yukarıdaki sonuçlar ışığında, ileride yapılacak çalışmalara yön verebilmek amacıyla aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Yeniden kristalleşme sıcaklığı civarında yapılacak sıcak ve soğuk haddelemenin metal matrisli kompozitlerin mekanik ve iç yapı özelliklerine etkisi.
- Tane boyutu 25µm'den daha düşük tane boyutuna sahip B₄C ile takviye edilen metal matrisli kompozitlerin haddeleme sonrası mekanik özelliklerinin araştırılması.
- Haddeleme hızlarının yapıya etkisi.
- Metal matrisli kompozitlerin oda sıcaklığında dövülebilirliği.
- Haddeleme işleminin ısı iletim özelliklerine etkisi ve yapının abrazif ortamlarda ısı geri kazanımında kullanılabilirliği.
- Haddeleme işleminin diğer imalat yöntemlerine (lehimleme, kaynak, yapıştırma vb) etkisi.

Araştırılabilir. Bu tür çalışmalar ince levha şeklinde metal matrisli kompozitlerin üretimne ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdullah, Y., ve Kamarudin, N. (2012). Al/B₄C Composites with 5 and 10 wt% reinforcement content prepared by powder metallurgy. *Journal of Nuclear and related Technologies*, 9(01), 43-48.
- Abukhdair, O. F. (2021). Soğuk Preslenmiş ve Sinterlenmiş Silikon Karbür Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Difüzyon Kaynağının İncelenmesi. *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Acoby, M. (2004). Composite Materials Custom blending of materials with distinct characteristics leads to advanced composites with tailor-made properties. *Chemical & Engineering News*, 82(35), 34–41.
- Adindu C. Iyasara, Azubuike Thaddeus C., Oduagwu Ferdinand Azubuike, Tse Daniel T., ve Isiaka O. Odewale. (2015). The role of sintering in the production of ceramic materials. *1st National Conference/Exhibition SIT 2015*, 2–16, Unwana.
- Alaneme, K. K., ve Okotete, E. A. (2019). Recrystallization mechanisms and microstructure development in emerging metallic materials: A review. *Journal of science: Advanced materials and devices*, 4(1), 19-33.
- Alhajji, E. (2016). Cold roll and anneal of Cu: metallography, microscopy, hardness. Lab Report, *North Carolina State University Department of Materials Science and Engineering*. North Carolina
- Altinsoy, I., Efe, F. G. C., Aytaş, D., Kılıç, M., Ozbek, I., ve Bindal, C. (2013). Some properties of Cu-B₄C composites manufactured by powder metallurgy. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 1(1). 34–38.
- Arora, G. S., Saxena, K. K., Mohammed, K. A., Prakash, C., ve Dixit, S. (2022). Manufacturing techniques for Mg-based metal matrix composite with different reinforcements. *Crystals*, 12(7), 945.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Material*. Boston: Cengage Learning.
- Attia, A. N. (2001). Surface metal matrix composites. *Materials ve Design*, 22(6), 451-457.
- Aytimur, A., Koçyiğit, S., ve Uslu, İ. (2014). Calcia Stabilized Ceria Doped Zirconia Nanocrystalline Ceramic. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 24(6), 927–932.
- Balalan, Z., ve Gulan, F. (2019). Microstructure and mechanical properties of Cu-B₄C and CuAl-B₄C composites produced by hot pressing. *Rare Metals*, 38(12), 1169–1177.

- Bandar, A. M. (2015). Powder metallurgy of stainless steel: State of the art, challenges and development. A. Pramanik and AK Basak (Eds.), *Stainless Steel*, (pp 37-80). Jubail: Nova Science Publishers.
- Basutkar, A., Bhanudas Kolekar, A., Basutkar, A. G., ve Kolekar, A. (2015). A Review on Properties and Applications of Ceramic Matrix Composites. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 2(12), 28–30.
- Bauman, I., Ćurić, D., ve Boban, M. (2008). Mixing of solids in different mixing devices. *Sadhana*, 33, 721-731.
- Bhaduri, A. (2018). *Mechanical properties and working of metals and alloys* (Vol. 264). Singapore: Springer Singapore.
- Bharat, N., & Bose, P. S. C. (2022). An overview of production technologies and its application of metal matrix composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2), 1946-1962.
- Bhargava, A. K., ve Banerjee, M. K. (2017). Heat-Treating Copper and Nickel Alloys. *Comprehensive Materials Finishing*, 2, 398-420.
- Bhojar, V., ve Umredkar, S. (2020). Manufacturing Processes Part II: A Brief Review on Forging. *International Journal of Innovations in Engineering and Science*, 5, 25–32.
- Bommara, B., Devaiah, M., Laxmi Reddy, P., ve Ravindra Gandhi, M. (2019). Thermal Characterization of Fiber Reinforced Polymer Composites and Hybrid Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 10(03), 1055–1066.
- Boopalan, M., Niranjanaa, M., ve Umapathy, M. J. (2013). Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 54–57.
- Canakci, A., Varol, T., Cuvalci, H., Erdemir, F., Ozkaya, S., & Yalcin, E. D. (2014). Synthesis of novel CuSn10-graphite nanocomposite powders by mechanical alloying. *Micro and Nano Letters*, 9(2), 109–112.
- Cartigueyen, S., & Mahadevan, K. (2015). Role of Friction Stir Processing on Copper and Copper based Particle Reinforced Composites – A Review. *Journal of Materials Science & Surface Engineering*, 2(2), 133–145.
- Celebi Efe, G., Altinsoy, I., Ipek, M., Zeytin, S., & Bindal, C. (2012). Effects of SiC particle size on properties of Cu-SiC metal matrix composites. *Acta Physica Polonica A*, 121(1), 251–253.
- Chauhan, P. S., & Agrawal, C. M. (2013). A Case Study of the Effectiveness of Rolling Process to Manufacture the Strip of Leaf Spring. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 1(1), 71–75.

- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*, (New York: Springer Science & Business Media.
- Chawla, N., & Shen, Y. L. (2001). Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Advanced Engineering Materials*, 3(6), 357–370.
- Chen, H. S., Wang, W. X., Nie, H. H., Zhou, J., Li, Y. L., Liu, R. F., Zhang, Y. Y., & Zhang, P. (2018). Microstructure evolution and mechanical properties of B₄C/6061Al neutron absorber composite sheets fabricated by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 730, 342–351.
- Chen, H. sheng, Zhang, Y. yang, Nie, H. hui, Wang, J. feng, Wang, W. xian, Zhou, J., & Zhang, P. (2018). The microstructure and mechanical properties of the B₄C/Cu matrix composite fabricated by SPS-HR. *Materials Science and Technology*, 34(12), 1460–1467.
- Deepika, V., Bhanu, S., Student, P. G., & Malleshham, P. (2016). Sheet Metal Rolling Using Two Roller Powered Machine. *International Journal in IT and Engineering*, 4(1), 1–12.
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., Kilickap, E., & Kalkanli, A. (2023). The effect of B₄C reinforcements on the microstructure, mechanical properties, and wear behavior of AA7075 alloy matrix produced by squeeze casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(6), 2574–2584.
- Dixit, M., & Srivastava, R. K. (2018, June). Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of Copper prepared by Powder Metallurgy route. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 377(1), 012209, Sikkim.
- Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., & Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: Structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(11), 3605–3628.
- Donald, I. W., & McMillan, P. W. (1976). Ceramic-matrix composites. *Journal of materials Science*, 11, 949–972.
- Dutta, S. (2011). Hot rolling practice—an attempted recollection. *B. Tech.(Hons.) IIT Executive Director ISP & RMD*. 2573347749, 563447.
- Ekici, E., Özçatalbaş, Y., & Gülesin, M. (2016). Mechanical and fracture behavior of B₄C reinforced Al composites produced by hot pressing. *Materials Testing*, 58(2), 133–139.
- El Mahallawy, N., & Taha Hanafi, M. A. (1993). Reinforcement Considerations for High Temperature Metal Matrix Composites. *Key Engineering Materials*, 79–80, 1–14.

- Eski, Ö. (2023). The effect of rolling temperature and rolling ratio on hardness and ÇKD boron carbide 10% wt. B₄C reinforcement copper matrix composite. *Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies*, 3(3), 71–89.
- Eski, Ö., & Elhemsheri, M. A. M. (2021). Effect of bonding time and boron carbide percentage on diffusion bonding characteristics for copper/copper matrix composites (Cu + Cu%B₄C). *Materials Today: Proceedings*, xxxx.
- Eski, Ö., Islak, S., & Urayli, Ç. (2017). The Effect of Boron Carbide Amount on Microstructure and Electrical Properties of Cu-B 4 C Composite Materials. In *1st International Conference of Advanced Materials and Manufacturing Technologies (ICAMT)*, 1, 25-27, Karabuk
- Fan, Z., Miodownik, A. P., Chandrasekaran, L., & Ward-Close, M. (1994). The Young's moduli of in situ Ti/TiB composites obtained by rapid solidification processing. *Journal of Materials Science*, 29(4), 1127–1134.
- German, R. M. (2013). History of sintering: Empirical phase. *Powder Metallurgy*, 56(2), 117–123.
- German, R. M., Suri, P., & Park, S. J. (2009). Review: Liquid phase sintering. *Journal of Materials Science*, 44(1), 1–39.
- Greim, J., & Schwetz, K. A. (2006). Boron carbide, boron nitride, and metal borides. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 6, 219-236.
- Grum, J. (2006). Review: Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing: The Processes, Materials, Products, Properties, and Applications. *International Journal of Materials and Product Technology*, 27(3/4), 290.
- Hareesha, G., Chikkanna, N., Doddamani, S., & Kallimani, A. S. (2021). Effect of addition of sic particles on the microstructure and hardness of Al-SiC composite. *Metallurgical and Materials Engineering*, 27(1), 49–56.
- Hidalgo-Manrique, P., Lei, X., Xu, R., Zhou, M., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2019). Copper/graphene composites: a review. *Journal of Materials Science*, 54(19), 12236–12289.
- Humphreys, J. (1987). Composites for automotive on-engine applications. *Materials and Design*, 8(3), 147–151.
- Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J. (1991). Particulate reinforced metal matrix composites—a review. *Journal of materials science*, 26, 1137-1156.
- Ibrahim, M. F., Ammar, H. R., Samuel, A. M., Soliman, M. S., Almajid, A., & Samuel, F. H. (2014). Mechanical properties and fracture of Al-15 vol.-%B₄C based metal matrix composites. *International Journal of Cast Metals Research*, 27(1), 7–14.

- Ikumapayi, O. M., Akinlabi, E. T., Onu, P., & Abolusoro, O. P. (2020). Rolling operation in metal forming: Process and principles—A brief study. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1644-1649.
- Ipek, H. (2017). Tribological properties of boron carbide reinforced copper based composites. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(1), 102-107.
- Jain, S., Rana, R. S., & Jain, P. (2016). Study of microstructure and mechanical properties of Al-Cu metal matrix reinforced with B₄C particles Composite. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(1), 499-504.
- Junaedi, H., Ibrahim, M. F., Ammar, H. R., Samuel, A. M., Soliman, M. S., Almajid, A. A., & Samuel, F. H. (2016). Effect of testing temperature on the strength and fracture behavior of Al-B₄C composites. *Journal of Composite Materials*, 50(20), 2871–2880.
- Jweeg, M. J., Hammood, A. S., & Al-Waily, M. (2012). Experimental and theoretical studies of mechanical properties for reinforcement fiber types of composite materials. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 12(04), 62.
- Kainer, K. U. (2006). Basics of metal matrix composites. *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, 1-54.
- Karabulut, Ş., Karakoç, H., & Çıtak, R. (2016). Influence of B₄C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061/B₄C composites. *Composites Part B: Engineering*, 101, 87–98.
- Karakoç, H., Karabulut, Ş., & Çıtak, R. (2018). Study on mechanical and ballistic performances of boron carbide reinforced Al 6061 aluminum alloy produced by powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, 148, 68–80.
- Khademian, M., Alizadeh, A., & Abdollahi, A. (2017). Fabrication and Characterization of Hot Rolled and Hot Extruded Boron Carbide (B₄C) Reinforced A356 Aluminum Alloy Matrix Composites Produced by Stir Casting Method. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(6), 1635–1646.
- Khanra, A. K. (2007). Production of boron carbide powder by carbothermal synthesis of gel material. *Bulletin of Materials Science*, 30(2), 93–96.
- Konečná, R., & Fintová, S. (2012). Copper and copper alloys: casting, classification and characteristic microstructures. *Copp. Alloy.-Early Appl. Curr. Perform.-Enhancing Process*, 3-30.
- Kovziridze, Z. D., Mestvirishvili, Z., Tabatadze, G., Nizharadze, N. S., Mshvildadze, M., & Nikoleishvili, E. (2013). Improvement of Boron Carbide Mechanical Properties in B₄C-TiB₂ and B₄C-ZrB₂ Systems. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 03(02), 43–48.

- Kuang, X., Carotenuto, G., & Nicolais, L. (1997). Review of ceramic sintering and suggestions on reducing sintering temperatures. *Advanced Performance Materials*, 4(3), 257–274.
- Kumar, A., & Rai, R. N. (2018). Fabrication, microstructure and mechanical properties of boron carbide (B_4C) reinforced aluminum metal matrix composite-a review. *In IOP conference series: materials science and engineering*, 377(1), 012092, Sikkim.
- Kurzydłowski, K. J. (1999). Structure and Properties of Metals. *Acta Physica Polonica A*, 96(1), 69–79.
- Lee, D., Kim, J., Lee, S. K., Kim, Y., Lee, S. B., & Cho, S. (2021). Effect of boron carbide addition on wear resistance of aluminum matrix composites fabricated by stir casting and hot rolling processes. *Metals*, 11(6), 989.
- Li, M., & Zinkle, S. J. (2012). Physical and mechanical properties of copper and copper alloys. *Comprehensive Nuclear Materials*, 1–5, 667–690.
- Liu, Y., Peng, H., Wei, L., Peng, H., Ma, D., & Leng, Y. (2023). Influence of B_4C Particle Size on the Microstructure and Mechanical Properties of B_4C/Al Composites Fabricated by Pressureless Infiltration. *Metals*, 13(8), 1358.
- Magnani, G., Beltrami, G., Minocari, G. L., & Pilotti, L. (2001). Pressureless sintering and properties of aSiC- B_4C composite. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 633–638.
- Mansourzadeh, S., Hosseini, M., Salahinejad, E., & Yaghtin, A. H. (2016). Cu- (B_4C) p metal matrix composites processed by accumulative roll-bonding. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(6), 613-620.
- Maleque, M. A., ve Salit, M. S. (2013). *Materials selection and design*. Singapore: Springer.
- Meher, A. (2015). Synthesis and Characterization of Cu-graphite-SiC Hybrid Metal Matrix Composite Prepared by Powder Metallurgy Route. Yüksek lisans Tezi, *National Institute of Technology*. Rourkela.
- Meignanamoorthy, M., Ravichandran, M., Mohanavel, V., Afzal, A., Sathish, T., Alamri, S., ... & Saleel, C. A. (2021). Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of boron carbide reinforced aluminum alloy (Al-Fe-Si-Zn-Cu) matrix composites produced via powder metallurgy route. *Materials*, 14(15), 4315.
- Mikhaelia, L. Y., & Khakim, A. (2021, February). Comparison of Boron Carbide, Gadolinium Oxide, and Hafnium as Qualified Molten Salt Reactor's Control Rods Material. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1), 012004, Surakarta.
- Miloš, K., Jurić, I., & Škorput, P. (2011). Aluminium-based composite materials in construction of transport means. *Promet-Traffic&Transportation*, 23(2), 87-96.

- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites science and technology*, 65(15-16), 2526-2540.
- Mo, Z., Liu, Y., Geng, J., & Wang, T. (2016). The effects of temperatures on microstructure evolution and mechanical properties of B₄C-AA2024 composite strips prepared by semi-solid powder rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 652, 305–314.
- Motyka, M. (2021). Titanium alloys and titanium-based matrix composites. *Metals*, 11(9), 11–14.
- Nagavally, R. R. (2016). Composite Materials- History, Types, Fabrication Techniques, Advantages, and Applications. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 2, 25–30.
- Okay, F., & Islak, S. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Boron Carbide and Carbon Nanofiber Reinforced Hybrid Composites. *Science of Sintering*, 54(2), 125–138.
- Öksüz, K. E., & Şahin, Y. (2016). Microstructure and hardness characteristics of Al₂O₃-B₄C particle-reinforced Cu matrix composites. *Acta Physica Polonica A*, 129(4), 650–652.
- Olokode, O. S., Bolaji, B. O., & Aiyedun, O. (2008). Effects of Process Annealing on Mechanical Properties of Strain-Hardened Copper: A Case of Kabel Metal Nigeria Limited. *Pacific Journal of Sciences, and Technology*, 9(2), 278–283.
- Pearce, M. (2019). The ‘Copper Age’—A history of the concept. *Journal of World Prehistory*, 32(3), 229-250.
- Prakash, K. S., Gopal, P. M., Anburose, D., & Kavimani, V. (2018). Mechanical, corrosion and wear characteristics of powder metallurgy processed Ti-6Al-4V/B₄C metal matrix composites. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1489-1496.
- Prajapati, P. K., & Chaira, D. (2019). Fabrication and characterization of Cu–B₄C metal matrix composite by powder metallurgy: Effect of B₄C on microstructure, mechanical properties and electrical conductivity. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 673-684.
- Pul, M. (2018). Effect of B₄C reinforcement ratio and sintering temperature on the mechanical behavior in Al-B₄C composites. *Science of Sintering*, 50(1), 51–61.
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.
- Rajeshkumar, L., Suriyanarayanan, R., Hari, K. S., Babu, S. V., Bhuvaneshwari, V., & Karunan, M. J. (2020). Influence of boron carbide addition on particle size of copper zinc alloys synthesized by powder metallurgy. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 954 (1), 012008, Tamilnadu.

- Ratke, L. (2006). Materials sciences. In *Utilization of Space: Today and Tomorrow* (pp. 297-340). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ray S. (2016). Introduction to Rolling Process. In: Principles and Applications of Metal Rolling. *Cambridge University Press*, 1-29.
- Reddy, B. V. R., Maity, S. R., & Pandey, K. M. (2019). Effect of warm rolling on microstructure, porosity, and hardness of a spray-formed LM25 aluminum alloy. *Materials Physics and Mechanics*, 42(3), 288–295.
- Rentz, O., Jochum, R., & Schultmann, F. (1999). Report on Best Available Techniques (BAT) in the German Ferrous Metals Processing Industry, Final Draft. *French-German Institute for Environmental Research University of Karlsruhe (TH)*, Karlsruhe.
- Rüşen, A. (2013). Usage of boron compounds in copper production. Doktora tezi, *Middle East Technical University*. Ankara.
- Sağlam, A. (2008). Production and Characterization of Al-Based Metal Matrix Composites By High Eenergy Ball Milling and Squeeze Casting Techniques. Yüksek lisans Tezi, *Dokuz Eylül university Graduate School of Natural and Applied Sciences*. Izmir
- Sahu, P. S., & Banchhor, R. (2016). Fabrication methods used to prepare Al metal matrix composites- A review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 03(10), 123–132.
- Sankar, M., Devaneyan, S. P., Pushpanathan, D. P., & Myska, D. (2018). Microstructural Characterization and Mechanical Behavior of Copper Matrix Composites Reinforced by B₄C and Sea Shell Powder. *Journal of Casting & Materials Engineering*, 2(1), 24.
- Sathiskumar, R., Murugan, N., Dinaharan, I., & Vijay, S. J. (2014). Fabrication and characterization of Cu/B₄C surface dispersion strengthened composite using friction stir processing. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(1), 83–87.
- Sayuti, M., Sulaiman, S., Baharudin, B., & Arifin, M. (2016). *Metal Matrix Composite Products by Vibration Casting Method*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.04082-0>, Erişim tarihi: 11/02/2024
- Schneider, L. C. R., Hainsworth, S. V., Cocks, A. C. F., & Fitzpatrick, M. E. (2005). Neutron diffraction measurements of residual stress in a powder metallurgy component. *Scripta Materialia*, 52(9), 917–921.
- Seetharaman, S. (2021). Fundamentals of Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 1, 11-29.
- Selvakumar, N., & Narayanasamy, P. (2016). Optimization and effect of weight fraction of MoS₂ on the tribological behavior of Mg-TiC-MoS₂ hybrid composites. *Tribology Transactions*, 59(4), 733-747.

- Serkan Islak. (2012). Effect of boron carbide on the microstructure and the mechanical properties of segments produced using hot pressing method. *Scientific Research and Essays*, 7(23), 2095–2103.
- Sharma, D. K., Sharma, M., & Upadhyay, G. (2019). Boron carbide (B₄C) reinforced aluminum matrix composites (AMCs). *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(1), 2194–2203.
- Shehata, F., Fathy, A., Abdelhameed, M., & Moustafa, S. F. (2009). Preparation and properties of Al₂O₃ nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing. *Materials and Design*, 30(7), 2756–2762.
- Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., & Froyen, L. (2003). Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: A comparative study. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 738–743.
- Shu, D., Li, X., & Yang, Q. (2021). Effect on microstructure and performance of B₄C content in B₄C/Cu composite. *Metals*, 11(8).
- Shukla, A. K., Suresh Kumar, R., Narayana Murty, S. V. S., & Mondal, K. (2013). Enhancement of high temperature ductility of hot-pressed Cu-Cr-Nb alloy by hot rolling. *Materials Science and Engineering A*, 577, 36–42.
- Silvain, J. F., Veillère, A., & Lu, Y. (2014). Copper-carbon and aluminum-carbon composites fabricated by powder metallurgy processes. *Journal of Physics: Conference Series*, 525(1).
- Skorokhod, V., Vlajic, M. D., & Krstic, V. D. (1996). Mechanical properties of pressureless sintered boron carbide containing TiB₂ phase. *Journal of Materials Science Letters*, 15(15), 1337–1339.
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2011). *Foundations of Materials Science and Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Somani, N., Sharma, N., Sharma, A., Gautam, Y. K., Khatri, P., & Solomon, J. A. A. (2018). Fabrication of Cu-SiC composites using powder metallurgy technique. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28136-28141.
- Sonber, J. K., Murthy, T. C., Subramanian, C., Hubli, R. C., & Suri, A. K. (2013). Processing methods for ultra high temperature ceramics, *MAX phases and ultra-high temperature ceramics for extreme environments* (pp. 180-202). Hershey: IGI Global.
- Sulaiman, S., Sayuti, M., & Samin, R. (2008). Mechanical Properties of The As-Cast Quartz Particulate Reinforced LM6 Alloy Matrix Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1–3), 731–735.
- Sunthorn, S., & Kittiphath, R. (2014). The Effect on Rolling Mill of Waviness in Hot Rolled Steel. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 8(12), 2021–2026.

- Suresh Kumar, S., Thirumalai Kumaran, S., Velmurugan, G., Perumal, A., Sekar, S., & Uthayakumar, M. (2021). Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 50(xxxx), 1022–1031.
- Tayebi, M., Jozdani, M., & Mirhadi, M. (2019). Thermal expansion behavior of Al–B₄C composites by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 809, 151753.
- Torralba, J. D., Da Costa, C. E., & Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 203-206.
- Ünal, R. (2019). Powder forming. M.Koç & T. Özel (Eds), *Modern manufacturing processes* (PP 65-87). New York: John Wiley & Sons
- Wąsik, M., & Karwan-Baczewska, J. (2016). Copper metal matrix composites reinforced by titanium nitride particles. *Key Engineering Materials*, 682, 270–275.
- Wiedersich, H. (1964). Hardening mechanisms and the theory of deformation. *JOM*, 16(5), 425–430.
- Wiley, C. S. (2011). Synergistic methods for the production of high-strength and low-cost boron carbide. Doktora Tezi, *School of Materials Science and Engineering Georgia Institute of Technology*. Atlanta
- Windhorst, T., & Blount, G. (1997). Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications. *Materials & Design*, 18(1), 11-15.
- Wisnom, M. R. (2012). The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1965), 1850-1870.
- Wusatowski, Z. (2013). *Fundamentals of rolling*. London: Elsevier.
- Yener, T., Altinsoy, I., Yener, S., Celebi Efe, G., Ozbek, I., & Bindal, C. (2015). An evaluation of cu-b₄c composites manufactured by powder metallurgy. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 1045-1047.
- Yu-nan, T., Zhi-he, D., Li-ping, N., & Ting-an, Z. (2019). Research on the Properties of Boron Carbide Particle-Reinforced Copper-Matrix/Graphite Self-Lubricating Composite Materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 60, 319-327.
- Zabihi, M., Toroghinejad, M. R., & Shafyei, A. (2013). Application of powder metallurgy and hot rolling processes for manufacturing aluminum/alumina composite strips. *Materials Science and Engineering: A*, 560, 567-574.
- Zhang, G. M., Huang, H. G., Zhang, H. Z., Shi, Y. M., Zhang, Y. Q., & Jiang, Y. H. (2022). Effect of rolling temperature on microstructure and properties of ta31

titanium alloy hot rolled plate. *Suxing Gongcheng Xuebao/Journal of Plasticity Engineering*, 29(11), 224–232.

Zhang, Q., Qin, Z., Yan, R., Wei, S., Zhang, W., Lu, S., & Jia, L. (2021). Processing technology and ballistic-resistant mechanism of shear thickening fluid/high-performance fiber-reinforced composites: a review. *Composite Structures*, 266(26), 113806.

Zheng, R., Chen, J., Zhang, Y., Ameyama, K., & Ma, C. (2014). 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.

