

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

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti-B-SiC TAKVİYELİ
Cu METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE
İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

SERHAT ŞAP

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Aydın TURGUT**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Mahir UZUN**

BİNGÖL-2022



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti-B-SiC TAKVİYELİ Cu
METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE İŞLENEBİLİRLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Prof. Dr. Aydın TURGUT danışmanlığında, Serhat ŞAP tarafından hazırlanan bu çalışma 30/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak **oybirliği (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Aydın TURGUT

İmza

Üye : Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

İmza

Üye : Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

İmza

Üye : Doç. Dr. İhsan KIRIK

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem YAR

İmza

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

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

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimimin her anında bana destek olan, akademik bilgi ve tecrübelerinin yanı sıra hayat tecrübelerini ve bilgi birikimlerini sabır ve cömertlikle benimle paylaşan kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. Aydın TURGUT ve Doç. Dr. Mahir UZUN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin başlangıcından bu yana akademik tecrübelerini benden esirgemeyen, Tez İzleme Komitesi üyeleri değerli hocalarım Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ ve Dr. Öğr. Üyesi Adem YAR'a teşekkürü bir borç bilirim. Laboratuvar ve diğer çalışmalarda imkanlarından faydalandığım Bingöl Üniversitesi ve İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü hocalarına ve emeği geçen tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarında bana yardımcı olan Doç. Dr. İhsan KIRIK hocama ve Arş. Gör. Üsâme Ali USCA'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, hayatımın her anında bana destek olan, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem ve babama şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu zorlu süreçte sabır ve metanet ile yanımda olan eşim Dr. Öğr. Üyesi Emine ŞAP'a çok teşekkür ederim.

Serhat ŞAP
Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması.....	4
2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	5
2.1.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	6
2.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	6
2.2. Ana Matris Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	6
2.2.1. Bakır Alaşımları.....	7
2.2.2. Alüminyum Alaşımları	8
2.2.3. Titanyum Alaşımları	9
2.2.4. Magnezyum Alaşımları.....	10
2.3. Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemeler	11
2.3.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler	11
2.3.2. Fiber Takviyeli Kompozitler	12
2.3.3. Tabakalı Kompozitler	13
2.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	13
3. TOZ METALURJİSİ	15
3.1. Tozların Üretimi	15
3.1.1. Mekanik Üretim Yöntemi	16

3.1.2. Atomizasyon Yöntemi	16
3.1.3. Elektrokimyasal Üretim Yöntemi	17
3.1.4. Kimyasal Üretim Yöntemi	17
3.2. Tozların Karıştırılması	17
3.3. Presleme İşlemi	18
3.4. Sinterleme İşlemi	19
3.4.1. Katı Faz Sinterleme	20
3.4.2. Sıvı Faz Sinterleme	21
3.5. T/M Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	22
4. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK	24
4.1. Talaş Kaldırma Mekanizması	24
4.1.1 Kesme Bölgesi	25
4.1.2. Talaşın Uzaklaştırılması	26
4.1.3. Sıcaklık	28
4.2. Talaşlı İmalat Yöntemleri	30
4.2.1. Tornalama	30
4.2.2. Frezeleme	32
4.3. Kesici Takımlar	34
4.3.1. Kesici Takım Malzemeleri	34
4.3.1.1. Yüksek Hız Çeliği (HSS) Takımlar	36
4.3.1.2. Sermet Takımlar	36
4.3.1.3. Seramik Takımlar	37
4.3.1.4. Kaplanmış Karbür Takımlar	37
4.3.1.5. Kübik Bor Nitrür Takımlar	37
4.3.1.6. Tungsten Karbür (WC) Takımlar	37
4.4. Kesme Parametreleri	38
4.5. Talaşlı İmalatta Takım Aşınması	39

4.5.1. Yan Yüzey Aşınması	39
4.5.2. Krater Aşınması	40
4.5.3. Talaş Yığılması (BUE, Built-Up Edge)	40
4.5.4. Çentik Aşınması.....	41
4.5.5. Termal Çatlaklar	42
4.5.6. Plastik Deformasyon.....	43
4.5.7. Takım Kırılması.....	44
5. KAYNAK ÖZETLERİ	46
6. MATERYAL VE YÖNTEM	54
6.1. Kompozit Malzeme Üretim Süreçleri	54
6.1.1. Matris ve Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Toz Partikülleri.....	55
6.1.2. Tozların Karıştırılması ve Kalıp Üretimi	55
6.1.3. Presleme İşlemi.....	57
6.1.4. Sinterleme İşlemi	58
6.1.5. Numune Hazırlama	58
6.2. Mikroyapı Analizi	59
6.3. Mekanik Deneyler	59
6.3.1. Yoğunluk Tespiti	59
6.3.2. Sertlik Deneyi	60
6.3.3. Aşınma Deneyi	61
6.3.4. Çekme Deneyi.....	63
6.3.5. Üç Nokta Eğilme Deneyi	64
6.4. İşlenebilirlik Deneyleri	65
6.4.1. CNC Torna Tezgahı.....	65
6.4.2. Takım Tutucu ve Kesici Takım	67
6.4.3. Yüzey Pürüzlülüğü	69
6.4.4. Kesme Sıcaklığı	70

7. BULGULAR VE TARTIŞMA	71
7.1. Mikroyapı Karakterizasyonu	71
7.1.1. Optik Mikroskop Analizleri	73
7.1.2. SEM-EDS Analizleri	76
7.1.3 X-RD Analizleri.....	82
7.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	84
7.3. Mekanik Özellikler	86
7.3.1. Sertlik Analizleri.....	86
7.3.2. Aşınma Analizleri	87
7.3.3. Çekme Analizleri	96
7.3.4. Üç Nokta Eğilme Analizleri	99
7.4. İşlenebilirlik Özellikleri.....	102
7.4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Analizleri	102
7.4.2. Kesme Sıcaklığı Analizleri	104
7.4.3. Takım Aşınması Analizleri.....	106
7.4.4. Talaş Morfolojisi.....	110
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	113
8.1. Sonuçlar	113
8.2. Öneriler.....	116
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

T/M	: Toz metalurjisi
CNC	: Bilgisayarlı nümerik kontrol
HSS	: Yüksek hız çelikleri
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
BUE	: Kenarda talaş yığılması
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağıtıcı x-ışını spektrometre
X-RD	: X-ışını difraksiyonu
HP	: Sıcak presleme
SPS	: Kıvılcım plazma sinterleme
CNT	: Karbon nano tüp
GNP	: Grafen nano plaka
HPT	: Yüksek basınçlı burulma
WEDM	: Tel erezyon ile elektriksel deşarj işleme
RSM	: Yanıt yüzey metodolojisi
MRR	: Malzeme kaldırma oranı
SWR	: Spesifik aşınma oranı
HB	: Brinell sertlik
HV	: Vickers sertlik
UAT	: Ultrasonik destekli tornalama
Cu	: Bakır
Ti	: Titanyum
B	: Bor
Mg	: Magnezyum
Al	: Alüminyum
Si	: Silisyum
Co	: Kobalt

Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
Bi	: Bizmut
Fe	: Demir
Sn	: Kalay
CrC	: Krom karbür
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ZrO₂	: Zirkonyum oksit
WC	: Tungsten karbür
SiC	: Silisyum karbür
TiC	: Titanyum karbür
TiN	: Titanyum nitrür
Si₃N₄	: Silisyum nitrür
B₄C	: Bor karbür
TiB₂	: Titanyum diborür
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
WS₂	: Tungsten disülfid
Cu₂O	: Bakır oksit

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2.	Farklı malzeme gruplarının çalışma sıcaklığı ve Mukavemet/Ağırlık Oranına göre değişimi.....	5
Şekil 2.3.	Takviye türüne göre kompozit malzemeler, (a) Parçacık takviyeli, (b) Kısa fiber takviyeli, (c) Sürekli fiber takviyeli, (d) Tabakalı.....	11
Şekil 2.4.	Farklı dizilimlere ve morfolojilere sahip fiber takviyeler; a) Rastgele dizilmiş süreksiz, b) Yönlendirilmiş süreksiz, c) Bir yönde pekiştirilmiş sürekli, d) Örgü biçimli fiber takviyeli.....	12
2Şekil 2.5.	Metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde kullanılan yöntemler.....	13
Şekil 3.1.	Farklı geometriye sahip parçacık takviye şekilleri.....	16
Şekil 3.2.	Farklı karıştırma makinaları; a) Dönen tambur, b) Dönen çift koni, c) Vidalı karıştırıcı, d) Bıçaklı karıştırıcı.....	18
Şekil 3.3.	Tozların sıkıştırılmasında işlem basamakları.....	19
Şekil 3.4.	Katı faz sinterleme basamakları.....	21
Şekil 3.5.	Sıvı faz sinterleme aşamaları.....	21
Şekil 4.1.	Ortogonal talaşlı imalatın üç ve iki boyutlu görünüşü.....	25
Şekil 4.2.	Talaş oluşumu sırasında birbiri üzerinden kayan plakalar ve geometrik şekillerinin görünüşü.....	25
Şekil 4.3.	Talaşlı işlem sırasında oluşan makaslama prosesi.....	26
Şekil 4.4.	Farklı işleme parametreleri sonucunda oluşan talaş morfolojileri.....	27
Şekil 4.5.	Talaşların uzaklaştırılması; a) Oluklu tip, b) Engel tipi talaş kırıcılar.....	28
Şekil 4.6.	Tornalama sırasında takım ile iş parçası üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı.....	29
Şekil 4.7.	Klasik universal torna tezgahı.....	30
Şekil 4.8.	Torna tezgahında yapılabilen işlemler.....	32
Şekil 4.9.	Yatay ve düşey eksenli freze tezgahları.....	33
Şekil 4.10.	Frezeleme çeşitlerinden çevresel ve alın frezeleme.....	34
Şekil 4.11.	Tek ve çok kenarlı kesici takımlar.....	35
Şekil 4.12.	Kesici takım malzemelerinin sertlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi....	35

Şekil 4.13.	Demir ve demir dışı metallerin kesme hızı ve ilerleme hızının sertlik ile değişimi.....	38
Şekil 4.14.	Farklı kesme parametreleri altında kesici takımında oluşan yan yüzey aşınma görüntüleri.....	39
Şekil 4.15.	Kesici uç yüzeyinde meydana gelen krater aşınması SEM fotoğrafı.....	40
Şekil 4.16.	Kesici takımında oluşan talaş yığılması; a)Yan görünüş, b)Üst görünüş.....	41
Şekil 4.17.	Kesici takımında oluşan çentik aşınması SEM fotoğrafı.....	42
Şekil 4.18.	Kesici takımında oluşan termal çatlakların SEM fotoğrafı.....	43
Şekil 4.19.	Kesici takım yan yüzeyinde oluşan plastik deformasyon bölgesi SEM fotoğrafı.....	44
Şekil 4.20.	Kesici takımın uç kısmında meydana gelen parça kopması SEM fotoğrafı.....	45
Şekil 6.1.	Kompozit malzeme üretim şeması.....	54
Şekil 6.2.	Tozların tartılmasında ve karıştırılmasında kullanılan; a) Hassas terazi, b) Turbula karıştırıcı.....	56
Şekil 6.3.	Kullanılan kalıplar; a) Sertlik ve aşınma, b) Çekme, d) Üç nokta eğilme, e) İşlenebilirlik.....	56
Şekil 6.4.	Tozların şekillendirilmesinde kullanılan tek eksenli hidrolik pres.....	57
Şekil 6.5.	Isıl işlem uygulanan sinter fırını.....	58
Şekil 6.6.	Mikroyapı analizinde kullanılan cihazlar; a) SEM-EDS, b) X-RD.....	59
Şekil 6.7.	Makrosertlik testinde kullanılan silindirik numune ve ölçüleri.....	60
Şekil 6.8.	Makrosertlik analizi yapılan sertlik cihazı fotoğrafı.....	61
Şekil 6.9.	TURKYUS marka pin-on disk aşınma cihazı.....	62
Şekil 6.10.	Üretilen çekme numunesi ve boyutları.....	63
Şekil 6.11.	SHIMADZU AGS-X çekme test cihazı.....	64
Şekil 6.12.	Üç nokta eğilme test numunesi ve boyutları.....	64
Şekil 6.13.	SHIMADZU AGS-X üç nokta eğilme cihazı.....	65
Şekil 6.14.	Goodway GLS-200 CNC torna tezgahı.....	66
Şekil 6.15.	İşlenebilirlik deney numunesi ve ölçüleri.....	67
Şekil 6.16.	Tornalama işleminde kullanılan DCLNR2525M kodlu takım tutucu.....	67
Şekil 6.17.	CNMG 120408 GT kodlu kesici uç.....	68
Şekil 6.18.	Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.....	69
Şekil 6.19.	Kesme sıcaklığı tespitinde kullanılan; a) Testo 871 termal kamera, b)	70

	Termal görüntü.....	
Şekil 7.1.	Ana matris olarak kullanılan Cu toz partiküllerinin SEM fotoğrafları; a) 250 x, b) 500 x.....	71
Şekil 7.2.	Ti toz partikülünün farklı büyütme oranlarındaki SEM fotoğrafları; a) 250 X, b) 1.00 KX.....	72
Şekil 7.3.	B toz partikülünün farklı büyütme oranlarındaki SEM fotoğrafları; a) 10.00 KX, b) 20.00 KX.....	72
Şekil 7.4.	SiC toz partikülünün farklı büyütme oranlarındaki SEM fotoğrafları; a) 250 X, b) 500 X.....	72
Şekil 7.5.	950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin optik görüntüleri...	73
Şekil 7.6.	1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin optik görüntüleri..	74
Şekil 7.7.	1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin optik görüntüleri..	75
Şekil 7.8.	950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin SEM görüntüleri...	76
Şekil 7.9.	1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin SEM görüntüleri..	77
Şekil 7.10.	1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin SEM görüntüleri..	78
Şekil 7.11.	Farklı oranlarda üretilen kompozitin bölgesel EDS analizleri.....	80
Şekil 7.12.	Ağırlıkça %8 takviye içeren kompozitin elementel haritalama analiz görüntüsü.....	81
Şekil 7.13.	950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin X-RD grafiği.....	82
Şekil 7.14.	1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin X-RD grafiği.....	83
Şekil 7.15.	1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin X-RD grafiği.....	84
Şekil 7.16.	Farklı sinterleme sıcaklıklarının ve takviye oranlarının yoğunluğa etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	85
Şekil 7.17.	Farklı sinterleme sıcaklıklarının ve takviye oranlarının sertliğe etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	87
Şekil 7.18.	Aşınma testi için üretilen numunelerin aşınmadan önceki ve sonraki görüntüleri.....	88
Şekil 7.19.	Şekil 7.19. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	89
Şekil 7.20.	1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	90

Şekil 7.21.	1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	90
Şekil 7.22.	Aşınma testi sırasında oluşan sıcaklığın termal kamera ile çekilen örnek görüntüsü ve sıcaklık dağılımını gösteren fotoğraf.....	91
Şekil 7.23.	950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sıcaklık üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	92
Şekil 7.24.	1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sıcaklık üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	92
Şekil 7.25.	1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sıcaklık üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	93
Şekil 7.26.	950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	94
Şekil 7.27.	1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	95
Şekil 7.28.	1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği.....	95
Şekil 7.29.	Çekme deneyi için üretilen numunelerin deney öncesi ve sonrası görüntüleri.....	96
Şekil 7.30.	Farklı oranlarda üretilen kompozitlerin çekme-uzama grafiği.....	97
Şekil 7.31.	Çekme deneyinden sonra oluşan kırık yüzeylerin SEM fotoğrafları.....	98
Şekil 7.32.	Üç nokta eğilme numunelerinin deney öncesi ve sonrası görüntüleri.....	99
Şekil 7.33.	Farklı oranlarda üretilen kompozitlerin üç nokta deney sonuç grafiği.....	100
Şekil 7.34.	Üç nokta eğilme deneyinden sonra elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri.....	101
Şekil 7.35.	Farklı oranlarda üretilen işlenebilirlik test numuneleri.....	102
Şekil 7.36.	Kesme hızı ve takviye oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 3B yüzey grafiği.....	103
Şekil 7.37.	İlerleme hızı ve takviye oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 3B yüzey grafiği.....	104
Şekil 7.38.	Kesme hızı ve takviye oranının kesme sıcaklığına etkisini gösteren 3B	105

yüzey grafiği.....	
Şekil 7.39. İlerleme hızı ve takviye oranının kesme sıcaklığına etkisini gösteren 3B yüzey grafiği.....	105
Şekil 7.40. Kesme hızı ve takviye oranının takım yan aşınması üzerine etkisini gösteren 3B yüzey grafiği.....	106
Şekil 7.41. İlerleme hızı ve takviye oranının takım yan aşınması üzerine etkisini gösteren 3B yüzey grafiği.....	107
Şekil 7.42. Farklı işlenebilirlik parametreleri ($f_n=0,2$ mm/dev, $V_c=100-150$ m/dak) uygulanan kesici takımda oluşan yan aşınma görüntüleri.....	108
Şekil 7.43. Farklı işlenebilirlik parametreleri ($f_n=0,4$ mm/dev, $V_c=100-150$ m/dak) uygulanan kesici takımda oluşan yan aşınma görüntüleri.....	108
Şekil 7.44. a) Kullanılmamış kesici takım, b) Ağırlıkça %8 takviyeli kompozit numunesinin tornalanması sırasında oluşan üst yüzey aşınma görüntüsü.....	109
Şekil 7.45. Ağırlıkça %4 takviyeli numunenin işlenmesi sırasında kesici takımın üst yüzeyinde oluşan BUE; a) SEM görüntüsü, b) Bölgesel EDS analizi.....	109
Şekil 7.46. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri.....	111
Şekil 7.47. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri.....	111
Şekil 7.48. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri.....	112
Şekil 7.49. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri.....	112

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Bakırın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	7
Tablo 2.2.	Alüminyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	8
Tablo 2.3.	Titanyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	9
Tablo 2.4.	Magnezyum bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	10
Tablo 3.1.	Bazı metal ve alaşımlarının sinterleme sıcaklık ve süreleri.....	20
Tablo 6.1.	Deneylerde kullanılan tozların bazı özellikleri.....	55
Tablo 6.2.	Deneylerde kullanılan tozların ağırlıkça oranları.....	55
Tablo 6.3.	Goodway GLS-200 CNC torna tezgahının bazı özellikleri.....	66
Tablo 6.4.	CNMG 120408 GT kodlu kesici uca ait bazı özellikler.....	68
Tablo 6.5.	TIME 3200 marka yüzey pürüzlülüğü cihazının teknik özellikleri.....	69
Tablo 6.6.	Testo 871 termal kameranın teknik özellikleri.....	70

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti-B-SiC TAKVİYELİ Cu METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bakır matrisli kompozitler çok iyi termal ve elektrik iletkenliği sayesinde elektrik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yapısal uygulamalarda çok sık kullanılan çeliğe nazaran daha zayıf özellikler sergilemesi nedeniyle bakır alaşımlarının kullanımı sınırlı kalmaktadır. Toz metalürjisi metodu; farklı tasarımlara olanak sağlaması, karmaşık ve hassas parçaların üretilebilmesi ve atık malzeme kaybının az olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilen bir imalat yöntemidir.

Bu çalışmada yüksek saflık oranlarına sahip toz partikülleri kullanılarak toz metalürjisi yöntemiyle, ağırlıkça farklı oranlarda ve farklı sinterleme sıcaklıklarında bakır matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde ana matris olarak kullanılan bakırın ortalama partikül boyutu 44 µm'dur. Takviye elemanı olarak kullanılan tozların ortalama partikül boyutları ise Ti; <44, B; <1,8 ve SiC; 45-75 µm olarak temin edilmiştir. Ağırlıkça %0-2-4-6-8 oranlarında güçlendirilen toz partikülleri 600 MPa basınç altında şekillendirilip, optimum sinterleme sıcaklığının belirlenmesi amacıyla 950-1000-1050 °C sıcaklıklarda sinterlenerek bakır matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen kompozit numunelere mikroyapı (SEM, EDS, X-RD), mekanik (yoğunluk, sertlik, aşınma, çekme, üç nokta eğilme) ve işlenebilirlik (yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, takım aşınması, talaş morfolojisi) deneyleri uygulandı. Sertlik ve aşınma deneyleri sonucunda optimum sinterleme sıcaklığı 1050 °C olarak belirlendi. Maksimum sertlik değeri, ağırlıkça %6 takviye oranına sahip numunede 77,74 HB olarak tespit edildi. Sertlikte ağırlıkça %6 takviye oranından sonra düşüş gözlemlenmiştir. Aşınma deneyi neticesinde artan takviye oranı ile birlikte aşınma direncinin de arttığı belirlenmiştir. Çekme ve üç nokta eğilme deneylerinde ise maksimum mukavemet değerlerine (112,96 MPa, 37,76 MPa) ağırlıkça %4 takviye oranına sahip numunelerde rastlanmıştır. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda kompozit malzeme içerisinde bulunan takviye toz oranlarının artması; yüzey pürüzlülüğünün azalmasına, takımın yan ve yüzey aşınma miktarlarının artmasına sebep olmuştur. Ayrıca artan takviye oranlarına paralel olarak talaş tiplerinde de değişiklikler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz metalürjisi, bakır matrisli kompozitler, mikroyapı, mekanik özellikler, işlenebilirlik.

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND MACHINABILITY PROPERTIES OF Ti-B-SiC REINFORCED Cu METAL MATRIX COMPOSITES MANUFACTURED BY POWDER METALLURGY METHOD

ABSTRACT

Copper matrix composites are frequently used in electrical applications due to their very good thermal and electrical conductivity. The use of copper alloys is limited due to weaker properties compared to steel, which is frequently used in structural applications. Powder metallurgy method; It is a preferred manufacturing method for reasons such as enabling different designs, producing complex and sensitive parts, and less waste material loss.

In this study, copper matrix composite materials were produced at different weight ratios and at different sintering temperatures by powder metallurgy method using powder particles with high purity ratios. The average particle size of copper, which is used as the main matrix in the production of composite materials, is 44 μm . The average particle sizes of the powders used as reinforcements are Ti; <44, B; <1.8 and SiC; supplied as 45-75 μm . Copper matrix composite samples were produced by sintering at 950-1000-1050 $^{\circ}\text{C}$ in order to determine the optimum sintering temperature, by shaping the powder particles strengthened at 0-2-4-6-8 wt% under pressure of 600 MPa. Microstructure (SEM, EDS, X-RD), mechanical (density, hardness, abrasion, tensile, three-point bending) and machinability (surface roughness, temperature, tool wear, chip morphology) tests were applied to the produced composite samples. As a result of hardness and wear tests, the optimum sintering temperature was determined as 1050 $^{\circ}\text{C}$. The maximum hardness value was determined as 77.74 HB in the sample with a reinforcement ratio of 6 wt%. A decrease in hardness was observed after the reinforcement ratio of 6 wt%. As a result of the wear test, it was determined that the wear resistance increased with the increasing reinforcement ratio. In the tensile and three-point bending tests, the maximum strength values (112.96 MPa, 37.76 MPa) were found in the samples with a reinforcement ratio of 4 wt%. As a result of the machinability tests, the increase in the reinforcing powder ratios in the composite material; It caused a decrease in surface roughness and an increase in the amount of side and surface wear of the tool. In addition, in parallel with the increasing reinforcement rates, changes in chip types were also detected.

Keywords: Powder metallurgy, copper matrix composites, microstructure, mechanical properties, machinability.

1. GİRİŞ

Birbirlerine pozitif yönde katkıda bulunmak ve yüksek özellikler sağlamak amacıyla iki ya da daha fazla farklı malzemenin belli şartlarda ve oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ürünlere kompozit malzemeler denir [1]. Kompozit malzemelerde bir araya getirilen bileşenlerin hiç birinde tek başına olmayan bir özelliğin elde edilmesi, yani başka bir söylem ile, amaçlar doğrultusunda birleştirilen bileşenlerden çok daha yüksek özellikler barındıran bir ürün imal edilmesi hedeflenmektedir [2]. Böylelikle ortaya çıkan kompozit malzemenin özellikleri ana matristen daha farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Kompozit malzemelerin içyapısında bir ana faz ve ana fazın içerisinde dağılmış olan donatı fazları bulunmaktadır [3]. Üstün özelliklere sahip bu yapıları oluşturan fazlar makroskobik muayene ile gözlenebilmektedir. Kompozit malzemelerde yapı içerisindeki bileşenler birbiri içerisinde çözünme davranışı gösteremezler, başka bir deyişle kimyasal bağ oluşturamazlar. Fakat bazı metal matrisli kompozitlerde düşük oranlarda kompozitin özelliklerini etkileyen ara yüz reaksiyonları görülebilmektedir [4]. Kompozit malzemelerde takviye fazı olarak bilinen farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemeler ve bunların etrafında hacimsel olarak bir ana matris fazı bulunmaktadır [5]. Bu fazlardan takviye fazı kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmekte, matris fazı ise plastik deformasyon sırasında meydana gelebilecek çatlak ilerlemesi ve kopmalarını önleyebilmektedir [6]. Ana matris olarak kullanılan malzemenin başka bir amacı da kompozit malzemeye gelen yükler sırasında takviye malzemelerini bir arada tutabilmek ve yükün malzemeye homojen bir şekilde dağılımını sergileyebilmektir [7].

Toz metalürjisi yöntemi (T/M) ile metallerin şekillendirilmesi çok eski tarihlere dayanmaktadır. Doğada saf halde bulunan metaller, ergitilme imkanları olmadığı için insanlar tarafından çekiçe dövülerek şekillendiriliyordu. Örnek olarak Mısırlılar yaklaşık M.Ö. 3000’li yıllarda demirden birçok el aletleri yapmayı başarmışlardır. Tam anlamıyla

T/M yöntemi kullanılarak parça üretimi 18 ve 19. yüzyıllarda Avrupa’da platin işlenerek gerçekleştirilmiştir. T/M, bir ya da birden fazla toz partiküllerinin belirli

oranlarda bir araya getirilerek preslenmesi ve ardından yüksek sıcaklıklarda sinterlenerek parça imalatını kapsamaktadır. Mikron ya da nano boyutta partikül şeklindeki alaşımlar, saf metaller, seramik, karbon ve plastik malzemeler birbiriyle karıştırılarak şekillendirilebilmektedir [8]. Sonraki aşamada şekillendirilen parçalar ana matris olarak kullanılan bileşenin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterleme işlemi yapılarak partiküllerin temas yüzeyi arasında güçlü bir bağ oluşturulmaktadır. T/M küçük, karmaşık yapıda ve hassas parçaların imalatı için son derece uygundur [9]. Malzeme israfı yok denecek kadar azdır ve istenilen düzeyde gözeneklilik elde edilebilmektedir. T/M yönteminin bu üstün özellikleri sayesinde uçak endüstrisi, otomotiv endüstrisi, elektronik ve manyetik malzemelerin yapımında vb. birçok alanda kullanımı hızla artmaktadır [10]. T/M yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerde ana matris olarak birçok toz partikülleri kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; bakır (Cu), magnezyum (Mg), alüminyum (Al), bizmut (Bi), demir (Fe) ve kalay (Sn) gibi elementler örnek olarak gösterilebilir. Kompozit ve alaşımlarda ana matrisi güçlendirmek amacıyla birçok ilave element kullanılmaktadır [11]. Bunlardan bazıları; Al_2O_3 (Alüminyum oksit), SiC (Silisyum karbür), TiC (Titanyum karbür), Si_3N_4 (Silisyum nitrür), B_4C (Bor karbür), TiB_2 (Titanyum diborür)'dür.

Saf bakır; yüksek elektrik-termal iletkenliği, orta derecedeki mukavemeti, mükemmel korozyon direnci ve kolay şekillendirilebilme gibi üstün özellikleri sayesinde geçmişten günümüze kadar sık kullanım alanlarına sahip bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır [12]. Bakırın yoğunluğu $8,96 \text{ gr/cm}^3$ ve erime sıcaklığı $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Kompozit ve alaşım durumunda bakırın fiziksel özellikleri önemli ölçüde değişebilmektedir [13]. Bakır ve bakır alaşımları kolaylıkla lehimlenebilmekte ve birçok kaynak yöntemi ile (gaz, ark ve direnç) birleştirilebilmektedir. Saf bakır genellikle elektrik telleri ve elektrik kontakları gibi akım geçirmek üzere tasarlanmış birçok parça için yaygın olarak kullanılmaktadır [14]. Bakır, aynı zamanda korozyona karşı üstün dirençleri sayesinde boru, vana ve bağlantı parçalarında da kullanılmaktadır [15,16]. Bakırın üstün iletkenlik ve korozyon özelliklerine karşın zayıf özellikleri de bulunmaktadır [17]. Saf bakır tek başına üstün mekanik özellikleri gösteremez ve mukavemeti düşüktür. Bu nedenle bakırın mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir [18]. Bu amaçla bakıra farklı elementler ilave edilerek mekanik özellikleri güçlendirilebilmektedir.

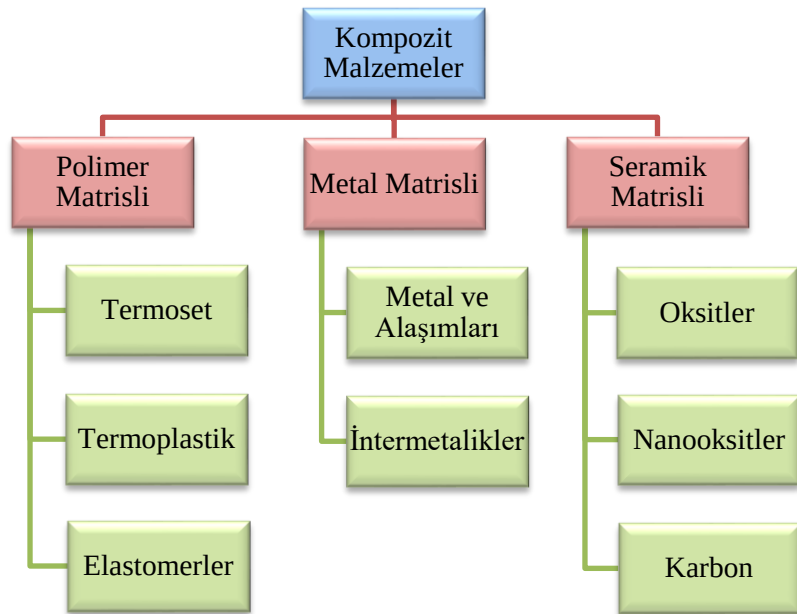
Kompozit malzemeler metallere nazaran daha üstün özellikler göstermesi sebebiyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [19]. Fakat homojen olmayan ve çok fazla aşındırıcı elementlerle güçlendirilmiş kompozit malzemelerin işlenmesi oldukça güçtür. İşleme sırasında kompozit malzemede önemli hasarlar meydana gelebilmekte ve kesici takım üzerinde yüksek oranda aşınmalar oluşabilmektedir. Kompozit malzemelerde tornalama, delme ve frezeleme gibi geleneksel işlenebilirlik uygulamaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [20]. Kompozitlerde takviye olarak kullanılan malzemelerin bazıları takım malzemesi kadar sert, hatta daha fazla sert olabilmesine rağmen geleneksel işleme yolları ile yapılabilir. Çünkü takviyeler genellikle kırılğan olup plastik deformasyondan daha çok gevrek kırılmaya neden olabilmektedir. Kompozit malzemedeki aşındırıcı bileşenler nedeniyle oluşan sertlikten dolayı kesici takımlar doğru bir şekilde seçilmelidir [21]. Bir kompozitin işlenebilmesi; matris malzemesinin özelliğine, takviye elemanlarına ve işleme sürecine bağlıdır. Ayrıca işleme tipi, parça boyutu ve geometrisi, parça sayısı, kesici takım ve parça çeşitliliği oldukça önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Cu ana matris içerisine farklı oranlarda (%0-2-4-6-8) ve farklı sinterleme sıcaklıklarında (950-1000-1050 °C) Ti-B-SiC_p takviye tozları ilave ederek homojen bir mikroyapı ve yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler üretmektir. Kompozit malzeme üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanıldı ve optimum sinterleme sıcaklığı tespit edilmiştir. Bu amaçla üretilen kompozit malzemelere mikroyapı, yoğunluk, sertlik, çekme, üç nokta eğme ve aşınma testleri uygulanmıştır. Sonuçlar saf bakır numuneleri ile karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Ayrıca Ti-B-SiC_p takviyeleri ile güçlendirilmiş bakır kompozitlerinin işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla ilerleme hızı (f_n), kesme derinliği (a_p) ve kesme hızı (V_c) parametreleri tüm kompozit örnekleri üzerinde uygulanmıştır. CNC tornalama sırasında yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, takım aşınması ve talaş morfolojisi analizlerinin farklı takviyedeki kompozitler üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler; birden fazla ve birbirinden farklı metal ya da metal olmayan malzemelerin bir araya getirilerek farklı özelliklere sahip yeni bir ürünün ortaya çıkarılması olarak ifade edilebilir. Ya da başka bir ifadeyle; aynı veya farklı özelliklere sahip malzemelerin en mükemmel özelliklerini bir araya getirerek birbiri içerisinde çözünmeden oluşan malzeme sistemine kompozit malzemeler denir [22]. Teknolojideki gelişmelere paralel olarak geleneksel malzemelere nazaran daha üstün özelliklere sahip olan kompozit malzemelere daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda birçok farklı türde kompozit malzemeler üretilmektedir. Kompozit malzemelerin farklı tür ve üretim yöntemleri ile üretilmesi sebebiyle sınıflandırma yapılabilmektedir. Kullanılan ana matris malzemesine göre kompozitler üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar; metal matrisli, seramik ve polimer matrisli kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1’de kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması görülmektedir.



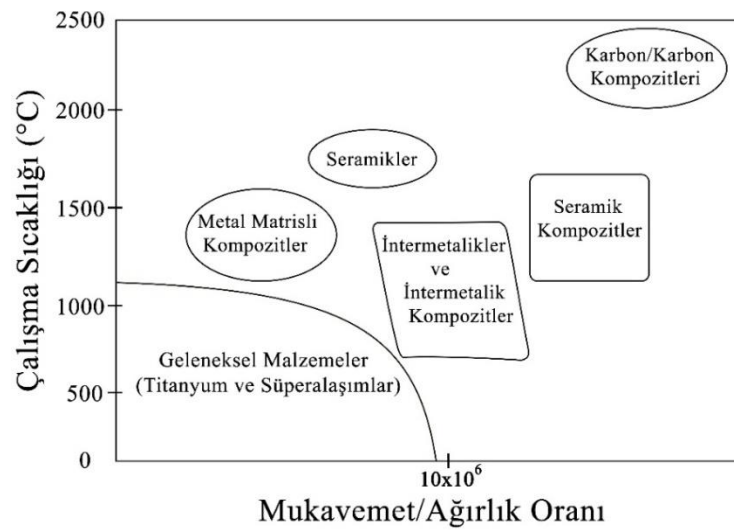
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması [23]

2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Ana matris malzemesi metal olan kompozitlere Metal matrisli kompozitler denir. Metal matrisli kompozitler; sünek ve tok ana matris malzemeleriyle mükemmel mukavemet sergileyen özelliklere sahip seramiklerin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Yoğunluklarının düşük olması ve yüksek aşınma direncine sahip olmaları önemli özelliklerindendir. Metal matrisli kompozitlerde ana matris olarak genellikle Cu, Al, Mg ve Ti gibi metaller kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin takviyesiz metallere göre birçok üstün özellikleri bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yüksek mukavemet
- Mükemmel korozyon direnci
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenlik
- Yüksek sıcaklıklarda iyi sürünme direnci
- Tekrar üretilebilirlik

Metal matrisli kompozitlerin üretilmesinin bir diğer amacı da ana matrisin dayanımını ve elastik modülünü iyileştirmektir. Ana matris malzemesi birçok farklı malzemeden yapılabildiği için farklı elastik modül ve mukavemetli ürünler imal edilebilmektedir. Şekil 2.2’de farklı malzeme gruplarının çalışma sıcaklığı ile mukavemet/ağırlık oranına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2. Farklı malzeme gruplarının çalışma sıcaklığı ve Mukavemet/Ağırlık Oranına göre değişimi [24]

2.1.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Diğer kompozitlere kıyasla polimer matrisli kompozitler maliyet açısından daha ucuz olması sebebiyle endüstride daha sık kullanılmaktadır. Termosetler ve termoplastikler polimer matrisli kompozitlerde ana matris olarak kullanılmaktadır. Epoksi ve polyester termoplastikler grubuna girmektedir. Termoplastik polyester, polietilen, poliamid ve politetrafloretillen ise termoplastikler grubuna girmektedir. Genel olarak B_4C , SiC , Al_2O_3 , aramid, cam ve karbon takviye elemanı olarak kullanılmaktadır [25]. Cam, karbon ve aramid takviyeli kompozitler endüstride daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanım alanları olarak havacılık sektörü, spor malzemeleri ve yapı elemanları örnek olarak gösterilebilir.

2.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli malzemeler yapısında bulunan hidrokarbonlar nedeniyle yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar. Seramik matrisli kompozitler ise yüksek sıcaklıklarda bile kullanılabilmekte ve yoğunluğu yüksek olan metallere alternatif olarak uygulanabilmektedir [26]. Bu malzemeler genellikle sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir. Termal şoklara karşı dayanımları az olmasına rağmen düşük yoğunlukları ve oksidasyona karşı dirençleri sayesinde yüksek sıcaklıklarda oldukça elverişli kompozitlerdir. Ana matris olarak Al_2O_3 , Si_3N_4 ve B_4C gibi malzemeler kullanılmaktadır. Fiber biçimindeki Al_2O_3 ve SiC gibi seramikler ise genel olarak takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır.

2.2. Ana Matris Olarak Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Metal matrisli kompozitlerde matris, ana malzeme olmakla birlikte aynı zamanda takviye elemanlarını saran bir yapı olarak bilinmektedir [27]. Bakır, alüminyum, nikel, magnezyum, titanyum ve süperalaşımlar metal matrisli kompozitlerde ana matris olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [28]. Titanyum, magnezyum ve alüminyum elementleri hafif olmaları sebebiyle diğer metallere kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Savunma, havacılık ve uzay teknolojilerinde ağırlık ciddi oranda etkili olduğu için düşük yoğunluklu hafif metallere daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.1. Bakır Alaşımları

Bakır (Cu), turuncu renkli, kolay şekillendirilebilen, yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip ve çok geniş kullanım alanına sahip bir metaldir. Bakır atomlarının dizilimleri sıkı paket şeklinde yüzey merkezli kübik bir görünümündedirler. Saf bakırın ısı iletkenliği 400 W/(m.k), akma dayanımı 390 MPa ve çekme dayanımı 490 MPa mertebesindedir. Tablo 2.1’de bakırın bazı özellikleri görülmektedir. Tarih boyunca bakırın önemli bir element olmasının sebepleri şunlardır;

- Elektriği mükemmel iletebilmesi
- Yüksek termal iletkenlik
- Korozyona karşı yüksek direnç
- Kolay şekillendirilebilmesi
- Dekoratif bir rengi olması

Tablo 2.1. Bakırın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [29]

Özellik	Değer	Birim
Atom Numarası	29	-
Sınıfı	Geçiş Elementleri	-
Görünüş	Metalik kahverengi	-
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik	-
Atom Ağırlığı	63,546	gr/mol
Yoğunluğu	8,96	gr/cm ³
Sertlik (Vickers)	45-55	MPa
Sertlik (Brinell)	40-50	MPa
Ergime Noktası	1083	°C
Kaynama Noktası	2567	°C
Buharlaştırma Isısı	300	kJ/mol
Isı Kapasitesi	24,440	(25 °C) J/(mol.K)
Isıl İletkenlik	401	W/(m.K)

Alaşımlı ya da alaşımsız olarak kullanılabilen bakır, hemen hemen tüm endüstri dallarında sıklıkla kullanılması sebebiyle kayda değer bir mühendislik ürünüdür.

Alaşımsız olarak daha iyi iletkenlik özelliklerine sahip olması sebebiyle elektrik sanayisinde daha fazla tercih edilmektedir. Bakır matrisli kompozitler genel olarak toz metalürjisi ve metal ergitme yöntemleri kullanılarak seramik, grafit ya da partiküllerle takviye edilerek üretilmektedirler. Darbe dayanımı ve sürtünme dirençlerinin iyi olması sebebiyle birçok endüstri alanında yatak ve burç malzemesi olarak kullanılmaktadır.

2.2.2. Alüminyum Alaşımları

Endüstri alanında çelikten sonra en sık tercih edilen malzemeler içinde alüminyum birinci sırada yer almaktadır. Aynı zamanda doğada en fazla rastlanan metaller arasında bulunmaktadır. Alüminyum tabiatta kararlı bir halde alüminyum oksit olarak bulunmaktadır. Alüminyum oksit indirgenmek suretiyle alüminyum elde edilmektedir. Çok iyi fiziksel ve mekanik özellikleri sayesinde endüstri için büyük önem arz etmektedir. Saf alüminyumun yoğunluk değeri $2,70 \text{ gr/cm}^3$ olup içerisine farklı elementler ilave edilerek çekme mukavemeti yükseltilebilmektedir. Saf alüminyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.2’de görülmektedir.

Tablo 2.2. Alüminyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [30]

Özellikler	Değer	Birim
Atom Numarası	13	-
Görünüş	Gümüşümsü	-
Yoğunluk	2,70	gr/cm^3
Ergime Noktası	660,32	$^{\circ}\text{C}$
Kaynama Noktası	2519	$^{\circ}\text{C}$
Ergime Isısı	10,71	kJ/mol
Buharlaştırma Isısı	294	kJ/mol
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik	-
Elektrik Direnci	26,50	$\text{n}\Omega \cdot \text{m}$ (20°C ’de)
Isıl İletkenlik	237	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Sertlik (Vickers)	50-65	MPa
Sertlik (Brinell)	45-60	MPa

Birçok mükemmel özelliği (korozyona karşı direnç, düşük yoğunluk, yüksek termal ve elektrik iletkenliği) sayesinde alüminyum alaşımları, otomotiv ve havacılık sanayisinde

sıklıkla kullanılmaktadır. Cu, Zn, Mg ve Si gibi bileşenler alüminyum alaşımlarında kullanılmaktadır. Alüminyumun oksijene ilgisinin fazla olması sebebiyle döküm yöntemi ile üretilmesi sırasında mekanik özellikleri kötüleşmektedir [22]. Bunun önüne geçebilmek amacıyla koruyucu atmosfer gazları (helyum, argon, azot) kullanılabilir. kullanılabilmektedir.

2.2.3. Titanyum Alaşımları

Çok iyi korozyon direnci ve yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip olan titanyum, hafif bir element olarak bilinmektedir. İki allotropik kristalize yapıya sahip olan titanyum, düşük sıcaklıkta iken alfa (α), 823 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise beta (β) yapılı bir elementtir. Genel olarak tüm canlılarda ve çevremizde titanyum elementi bulunmaktadır [31]. Titanyum, nükleer sanayide, otomotiv endüstrisinde, elektrik sanayisinde ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 2.3'te titanyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri görülmektedir.

Tablo 2.3. Titanyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [32]

Özellikler	Değer	Birim
Atom Numarası	22	-
Çekme mukavemeti	240-690	MPa
Yoğunluk	4,507	gr/cm ³
Ergime Noktası	1668	°C
Kaynama Noktası	3287	°C
Buharlaşma Isısı	425	kJ/mol
Kristal Yapısı	Hekzagonal	-
Isıl İletkenlik	16,3-22,1	W/(m·K)
Sertlik (Vickers)	5000	HV

Titanyum ile elde edilen alaşımlar uzay endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Ergime sıcaklığının yüksek olması, ısıl genleşme katsayısının ve ısı iletim katsayısının diğer elementlere göre düşük olması tercih sebebi olmaktadır. Yüksek sayılabilecek bir ergime sıcaklığına sahip olmasına rağmen oksidasyon ve korozyon direnci yüksek bir elementtir. Başta oksijen ve karbon olmak üzere bazı elementlerle yüksek oranlarda reaksiyona girme eğiliminde olan bir malzemedir. Titanyum, oksijene olan duyarlılığı nedeniyle

normal oda sıcaklığı şartlarında bile oksitlenmeye maruz kalabilmektedir. Oksitlenmenin önüne geçebilmek için koruyucu atmosfer gazı kullanılmaktadır.

2.2.4. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum elementi genellikle deniz suyu içerisinde eriyik halde bulunan magnezyum klorür bileşiğinden elektrolitik yöntem kullanılarak üretilmektedir. Metal sektöründe kullanılmakta olan magnezyum yoğunluğunun düşük olması sebebiyle en hafif malzeme olarak bilinmektedir. Titanyum, yoğunluk ve bazı kimyasal özellikleri ile plastik malzemelere benzerlik göstermesine rağmen metallerin birçok özelliğini barındırmaktadır. Ayrıca geri dönüşümde tekrar kullanılabilirlik açısından uygun bir malzemedir. Magnezyum metal matrisli alaşımlar; otomobillerde, elektronik ve bilgisayar parçalarında kullanılabilmektedir. En sık kullanılan alaşım grupları; magnezyum-alüminyum ve magnezyum-çinko grupları olarak adlandırılabilir [33]. Tablo 2.4'te magnezyumun bazı özellikleri verilmiştir.

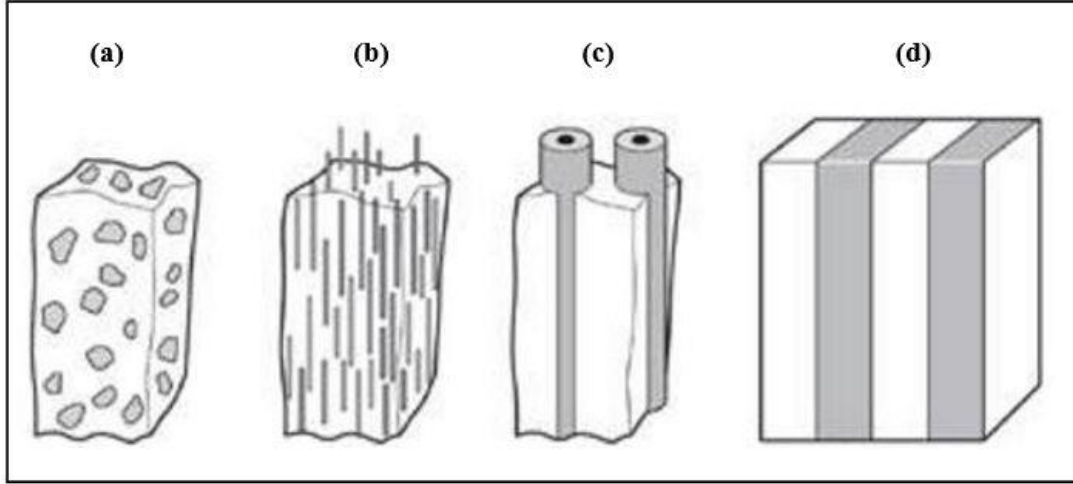
Tablo 2.4. Magnezyum bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [34]

Özellikler	Değer	Birim
Atom Numarası	12	-
Akma Gerilmesi	98	N/mm ²
Yoğunluk	1,74	gr/cm ³
Ergime Noktası	650	°C
Kaynama Noktası	1110	°C
Buharlaştırma Isısı	128	kJ/mol
Kristal Yapısı	Hekzagonal	-
Isıl İletkenlik	156	W/(m·K)
Sertlik (Brinell)	30	HB

Magnezyumun yoğunluğu alüminyuma göre daha düşüktür ve bu sebepten dolayı daha hafif olup alüminyumdan daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Sağlamlık açısından alüminyum kadar dayanıklı olup mukavemet-ağırlık oranı da alüminyuma yakın olabilmektedir. Magnezyum alaşımları üstün özelliklerinin yanı sıra düşük aşınma, yorulma ve sürünme direncine sahiptir

2.3. Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemeler

Takviye türüne göre kompozit malzemeler üç grupta toplanmaktadır. Bunlar; parçacık takviyeli kompozit malzemeler, fiber takviyeli kompozit malzemeler ve tabakalı kompozit malzemelerdir. Şekil 2.3'te takviye türüne göre kompozit malzemeler görülmektedir.



Şekil 2.3. Takviye türüne göre kompozit malzemeler, (a) Parçacık takviyeli, (b) Kısa fiber takviyeli, (c) Sürekli fiber takviyeli, (d) Tabakalı [23]

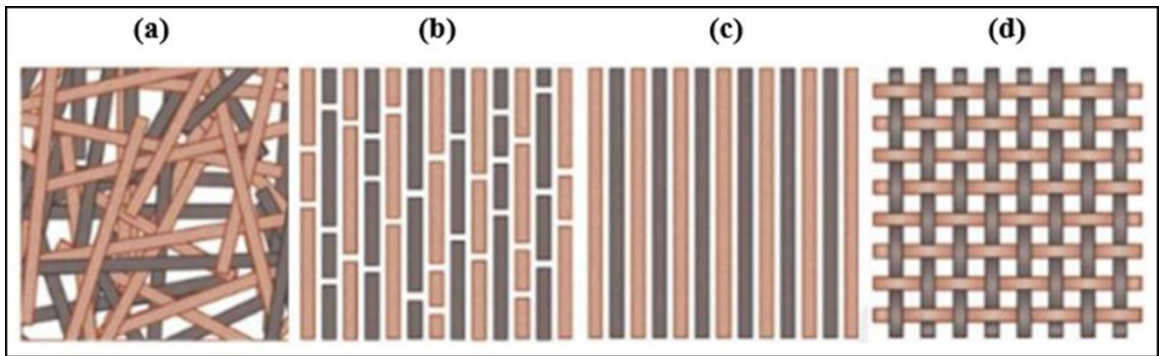
2.3.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Her geçen gün kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar artmakta ve parçacık takviyeli kompozitlerin daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Üretilen kompozitlerin maliyetinin düşük olması ve mükemmel özelliklere sahip olması diğer malzemelerden daha avantajlı olmasına sebep olmaktadır. Parçacık şeklindeki takviye malzemeleri; kübik, dentritik, iğnemsî, yassı, köşeli, çubuksu vb. gibi birçok farklı geometrik şekilde olabilmektedir. Farklı geometrik yapıya sahip parçacık takviyeli partiküller Şekil 2.4'te görülmektedir. Ana matris içerisinde bulunan takviye partikülleri homojen dağılabilir, tek bir noktada toplanarak topaklanabilir ya da yönlendirilmiş halde belli noktalarda konumlanabilirler. Takviye parçacıklarının temel amacı ana matris üzerine gelen yükleri taşımak ve ana matrisin mukavemetini artırmaktır. Matrisin görevi ise takviye elemanlarını sararak gerilimleri azaltmaktır.

Kompozit malzemelerde birçok farklı şekle sahip partiküller kullanılabilir. Takviye parçacıkları genel olarak kompozit yapının sertlik ve mukavemetini arttırmakta ve ana matris malzemesinin türüne göre yoğunlukta da ciddi değişimlere neden olabilmektedir. Kompozit malzemelerde ana matris ve parçacık takviyesi seçimi son derece önemli bir unsurdur. Çünkü mukavemeti yüksek bir yapı oluşturmak için ana matris ile takviye partikülleri arasında iyi bir ara yüzey oluşumu gereklidir. Ayrıca ana matris içerisinde homojen bir şekilde dağılım da mekanik özellikleri kayda değer bir şekilde artırmaktadır [35].

2.3.2. Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitlerde ana matrisin sünek bir malzemeden ve takviye elemanının ise dayanımı ve elastisite modülü yüksek fiber malzemelerden seçilmesi gereklidir. Bu kompozitlerin yükü taşıma becerileri son derece yüksektir. Kompozit malzeme üzerine gelen yükler ana matris üzerinden fiber takviyelere iletilmektedir. Böylece dayanımı yüksek fiber takviyeleri gelen yüklerin büyük bir kısmını karşılayabilmektedir. Ana matris içerisinde konumlandırılan fiber takviyeler yönü tek bir doğrultuda ya da belirli bir yöne doğru yönlendirilebilmektedir. Bu bağlamda kompozit malzeme üzerine gelecek olan yüklerin doğrultusu oldukça önemlidir. Fiber takviye elemanları bu doğrultuda dizilmektedir. Belirli doğrultularda yönlendirilen fiber takviyelerinin yanı sıra örgü şeklinde olan fiber takviyeler de mevcuttur. Fiber takviyeli kompozitler, üstün mekanik özellikleri ve hafif olmaları sebebiyle havacılık ve uzay endüstrilerinde tercih sebebi olan malzemeler arasında sayılmaktadır [36]. Şekil 2.4'te farklı dizilim ve morfolojilere sahip fiber takviyeleri görülmektedir.



Şekil 2.4. Farklı dizilimlere ve morfolojilere sahip fiber takviyeler; a) Rastgele dizilmiş süreksiz, b) Yönlendirilmiş süreksiz, c) Bir yönde pekiştirilmiş sürekli, d) Örgü biçimli fiber takviyeli [36]

Ana matris içerisine mukavemeti ve elastisite modülü yüksek takviye parçacıkları eklemek suretiyle oluşturulan kompozit malzemenin mekanik ve termal özellikleri, iki malzemenin ortak özellikleri olarak varsayılabilmektedir [38]. Metal matrisli kompozitlerin üretim şeklinin belirlenmesinde temel faktörler malzeme kalitesi ve ürün maliyeti olarak söylenebilir. Geliştirilen mekanik özellikler ve maliyetin ucuz olması bu konuda yapılan çalışmalara önemli derecede katkı sağlamaktadır. Buradan yola çıkarak metal matrisli kompozit malzemelerde farklı üretim metotları uygulanmış olup bunları üç grupta toplamak mümkündür. Bunlar aşağıda görüldüğü gibi sıralanabilir.

- Sıvı hal üretim yöntemleri
- Katı hal üretim yöntemleri
- Sıvı-Katı hal üretim yöntemleri

3. TOZ METALURJİSİ

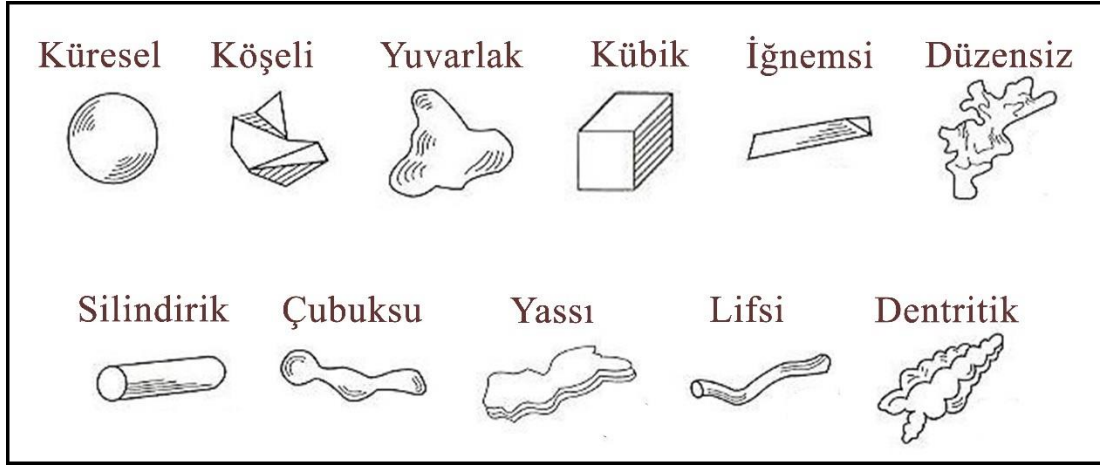
T/M yönteminin tarihi çok eskilere dayanmaktadır. İnkaların toz halindeki altını pişirmek suretiyle takılar yaptıkları bilinmektedir. Milattan sonra 300'lü yıllarda Hindistanda yapılan Delhi sütunu yaklaşık 6,5 ton demir tozu bir araya getirilerek yapılmıştır. Bu zaman dilimlerinde kullanılan paralar da toz şeklindeki bakır, gümüş vb. gibi madenlerden üretiliyordu. T/M, kısaca metal tozlarının belli bir şekle getirilip sinterlenerek yeni bir ürün elde etme işlemidir. Başka bir ifade ile farklı yöntemlerle üretilmesi zor olan ve karmaşık yapılı ürünlerin imalatını kapsayan bir üretim yöntemidir. T/M, ekonomik ve boyutsal hassasiyete sahip malzemelerin üretilmesinde oldukça uygun bir yöntemdir. Bu yöntem ile çok yüksek kalitede ürünler elde edilebilmekte ve malzeme israfı son derece az olabilmektedir. İmalat sürecinden sonra herhangi bir talaşlı imalat işlemine gerek kalmadan hassas yüzeylere sahip parçalar, T/M yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir.

3.1. Tozların Üretimi

T/M yönteminde ilk olarak tozların imal edilmesi gerekmektedir. Tozların üretilmesinde birkaç yöntem uygulanmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Mekanik Üretim Yöntemi
- Atomizasyon Yöntemi
- Elektrokimyasal Üretim Yöntemi
- Kimyasal Üretim Yöntemi

Bir toz partikülünün üretim metodu, üretilen tozun birçok özelliğine direkt olarak etki etmektedir. Üretim metoduna göre değişebilen toz şekilleri farklı formlarda olabilmektedir. Şekil 3.1'de farklı şekillerde olan toz partikülleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Farklı geometriye sahip parçacık takviye şekilleri

3.1.1. Mekanik Üretim Yöntemi

Genelde öğütülen malzemenin katı bir formda kaldığı yöntemlere mekanik üretim yöntemleri adı verilir. Öğütülerek yapılan toz üretimi çok eski bir yöntemdir. Çimento ve seramik sektöründe toz üretimi için tercih edilmektedir. Metalik malzemelerin plastisitesinin yüksek olması sebebiyle metal tozu üretiminde tercih edilmemektedir. Mekanik öğütme sırasında ilk önce çatlak oluşumu başlar ardından kırılma ve yeni yüzey oluşumları ile devam eder. Parçacığın boyutu süreye bağlı olduğu kadar malzeme cinsine de bağlı olabilmektedir. Mekanik üretim metotları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [39].

- Darbe ile toz şekline dönüştürme
- Kırarak üretim
- Öğüterek üretim
- Ezerek, ufalayarak üretim

3.1.2. Atomizasyon Yöntemi

Bu yöntemde toz üretimi için ergiyen tüm metal grubu malzemeleri kullanılabilir. Üretimi; sıvı hale getirilen bir metalin potanın altında bulunan bir delikten akması esnasında erimiş haldeki metalin üzerine basınçlı sıvı ya da gaz verilmesi ile sıvı metalin küçük formlara dönüştürülerek katılaştırılmasıyla elde edilmektedir. Üretilen tozların çok büyük bir bölümü bu yöntem ile üretilmektedir. Diğer üretim yöntemlerine nazaran tane

formu ve boyutunun istenilen düzeyde olması bu yöntemde daha kolaydır. Alaşım tozlarının üretilmesinde daha fazla tercih edilmektedir. Atomizasyon yöntemi ile imal edilen toz partiküllerinin boyutu, dağıtıcı hüzme basıncı ile alakadardır. Basıncın artmasıyla birlikte sıvı haldeki metal, daha fazla püskürtüleceği için daha fazla zerrelere ayrılacaktır. Bu işlemlerden sonra hızlıca soğutma yapılmalıdır. Aksi takdirde tozlar tekrar yapışarak boyutları değişebilmektedir [40].

3.1.3. Elektrokimyasal Üretim Yöntemi

Bu yöntemde sulu bir çözeltiden ya da sıvı tuz banyosundan elektroliz hücresi kullanmak suretiyle tozlar biriktirilmektedir. Çinko, kobalt, bakır, demir, nikel ve fosfor gibi tozların üretiminde genellikle sulu solüsyonların elektrolizi tercih edilmektedir. Üretim iki aşamadan oluşmaktadır. Katod üzerinde toplanan parçalar sonradan öğütülerek toz haline getirilmektedir. Gerilmelerin azaltılması ve yabancı maddelerin bertaraf edilmesi için tavlama yapılmaktadır. Bu yöntem ile ürün saflığı yüksek olmaktadır. Elektrokimyasal yöntemler ile imal edilen toz formları dentritik yapıda düzensiz şekilli olabilmektedir. Tozların büyüklüklerini elektroliz sırasındaki banyo durumları ve daha sonraki işlem adımları büyük oranda etkilemektedir. Bu yöntem sadece saf metallerin üretiminde kullanılmaktadır [39].

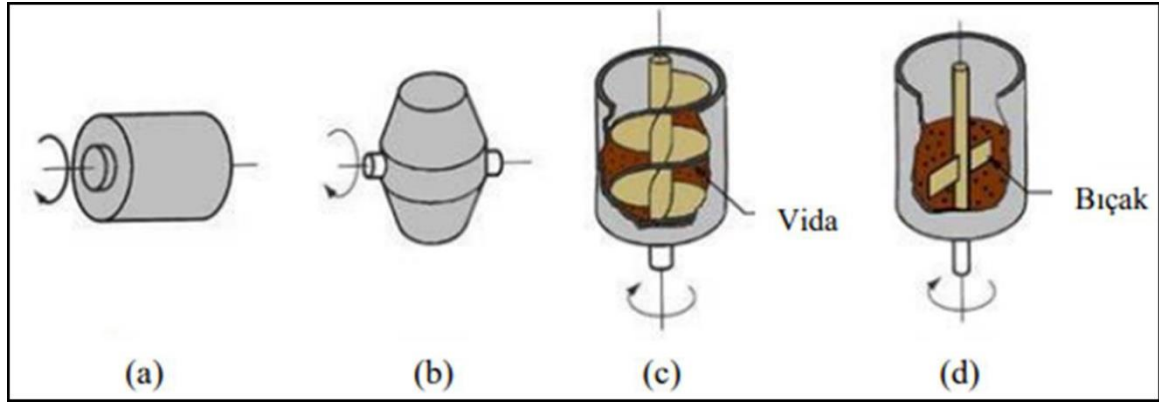
3.1.4. Kimyasal Üretim Yöntemi

Bu yöntemde metal oksitlerin, karbon monoksit ya da hidrojen gibi indirgeyici gazlar aracılığıyla oksitlerinden kimyasal bir şekilde indirgenerek üretim yapılmaktadır. Sünger-demir tozu bu yönteme örnek olarak gösterilebilmektedir [41].

3.2. Tozların Karıştırılması

İki ya da daha fazla toz partikülünün homojen bir dağılım için karıştırma işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Karıştırma işlemi sırasında %0,5-1,5 arasında değişen oranlarda parafin ve metalik stearat gibi yağlayıcılar kullanılmaktadır. Karıştırma sırasında tozlar ve yağlayıcılar homojen bir şekilde karışabilmektedir. Yağlayıcı kullanmak toz partikülleri ile kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha düzgün yüzeyler elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Düzgün bir karışım yapılarak sinterleme aşamasında malzemenin

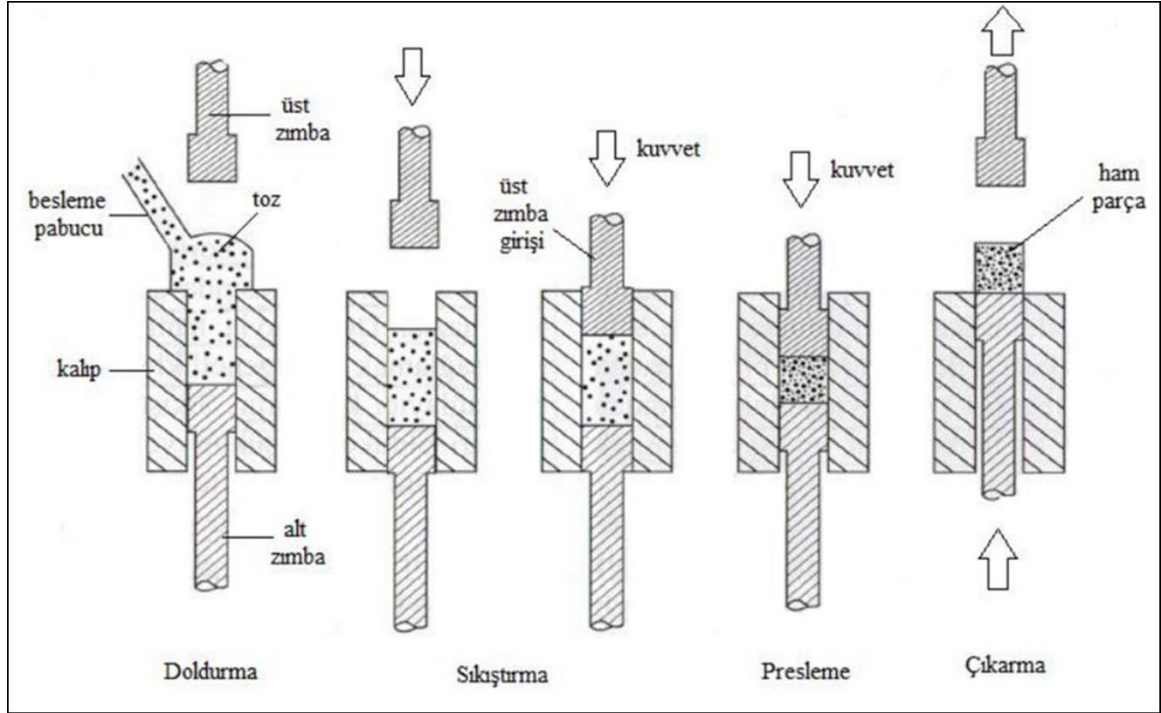
tüm bölgelerinde homojen bir yapı elde edilmektedir. Yağlayıcı kullanılmadığı durumlarda toz partikülleri ile kalıp arasında sürtünme artar ve bu da homojen olmayan bir basınç dağılımına neden olur. Bunun sonucunda da üretilen numune üzerinde gerilim farkları oluşabilmektedir. Malzeme üzerinde oluşan bu gerilim farkları sinterleme sırasında farklı distorsiyonlara sebep olabilmektedir. Yağlayıcı miktarı fazla olursa sinterleme aşamasında malzeme yüzeyinde birçok kabarcık oluşabilmekte ve bu olay yüzey kalitesinin bozulmasına sebep olabilmektedir [42]. Şekil 3.2’de farklı karıştırma makinaları görülmektedir.



Şekil 3.2. Farklı karıştırma makinaları; a) Dönen tambur, b) Dönen çift koni, c) Vidalı karıştırıcı, d) Bıçaklı karıştırıcı [41]

3.3. Presleme İşlemi

Toz metalürjisinde şekillendirme ve yoğunluk gibi parametreler, istenilen ölçülerde yapılmış olan bir kalıp yardımıyla sağlanabilmektedir. Toz partiküllerine uygulanan basınç ile ilk önce toz zerrecikleri birbiri üzerinden kaymak suretiyle her bir toz zerresi yaklaşık 4-6 komşusu ile temas halinde kalıpta sıkışmaya başlar. Uygulanan basıncın artmasıyla birbirine temas eden zerreciklerin sayısı artar. Zerreciklerin sertlik değerlerine göre şekil değişimi başlar ve aralarında bağ oluşur. Nihayetinde bir kalıp içerisinde sıkıştırılmış olan toz zerreciği belli bir dayanıma sahip kütle halinde bir parçaya dönüşür. Presleme işleminden sonra şekillendirilmiş parça kalıp içerisinde sabit bir halde bulunmaktadır. Parçayı kalıptan çıkarmak için bir kuvvete ihtiyaç vardır. Sıkıştırma basıncının artması parçanın kalıptan çıkmasını güçleştirir. Bunun önüne geçebilmek için kalıp yüzeyleri bir miktar yağlanabilmektedir. Şekil 3.3’te tozların sıkıştırma işlem basamakları görülmektedir.



Şekil 3.3. Tozların sıkıştırılmasında işlem basamakları [22]

3.4. Sinterleme İşlemi

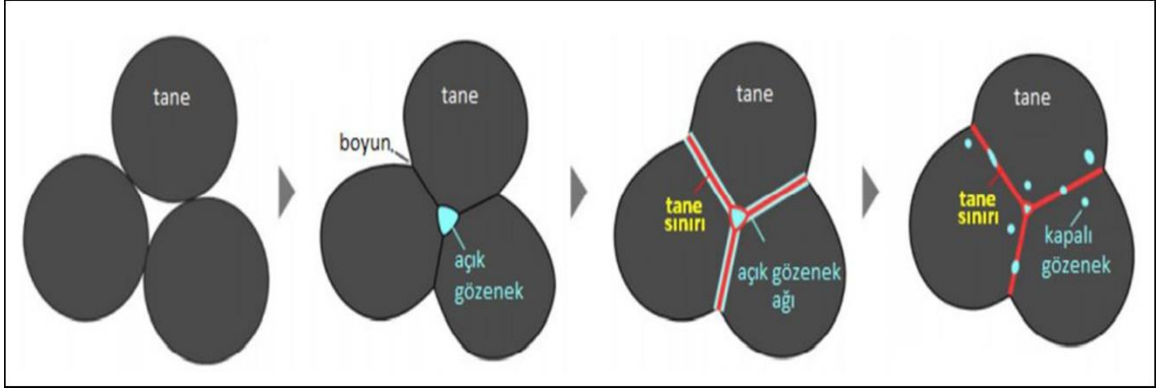
Sinterleme işlemi sıkıştırılmış toz grubunun birbirleriyle bağ oluşturması ve kompozitin mukavemetini artırmak amacıyla ergime sıcaklığının altında bir sıcaklık uygulanması suretiyle yapılan bir aşamadır. Sinterleme sırasında malzemenin yapısına göre uygun sinterleme sıcaklığı ve süresi belirlenmelidir. Sinterleme sıcaklığı genellikle ana matris malzemesinin ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta uygulanabilmektedir. Üretilen malzemelerdeki farklı yoğunluk ve mukavemet değerlerinin asıl sebebi sinterleme sıcaklığı ve süresinin seçimidir. Bu süreç genelde deneysel şartlarla belirlenmektedir. Sinterleme sırasında çok yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı için oksidasyon riski her zaman olabilmektedir. Sinterleme sırasında oksidasyonu önlemek amacıyla hava, azot, argon, oksijen ve hidrojen gibi çeşitli karışım gazları kullanılabilir. Belirlenen sinterleme sıcaklığına ulaşma süresi de oldukça önemlidir. Çok ani ısı artışı ya da ani soğumalar üretilen kompozitlerde termal genleşmeye ve çatlak oluşumlarına sebep olabilmektedir. Üretilen kompozit malzemelerde uygun sinterleme sıcaklığı, uygun koruyucu gazlar ve uygun ısı artışı ya da soğuma parametreleri seçilmezse sinter fırınından çıkan ürünlerin kalitesi azalabilmektedir. Tablo 3.1’de bazı metal ve alaşımların sinterleme sıcaklık ve süreleri görülmektedir.

Tablo 3.1. Bazı metal ve alaşımlarının sinterleme sıcaklık ve süreleri [43]

Toz partikül	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dak.)
Bronzlar	760-870	10-20
Pirinçler	843-898	10-45
Bakır	843-898	12-45
Çelik	1010-1148	8-45
Paslanmaz Çelikler	1010-1148	30-45
Tungsten Karbürler	1426-1482	20-30
Ferit	1204-1482	10-600
Molibden	2054	120
Tungsten	2343	480

3.4.1. Katı Faz Sinterleme

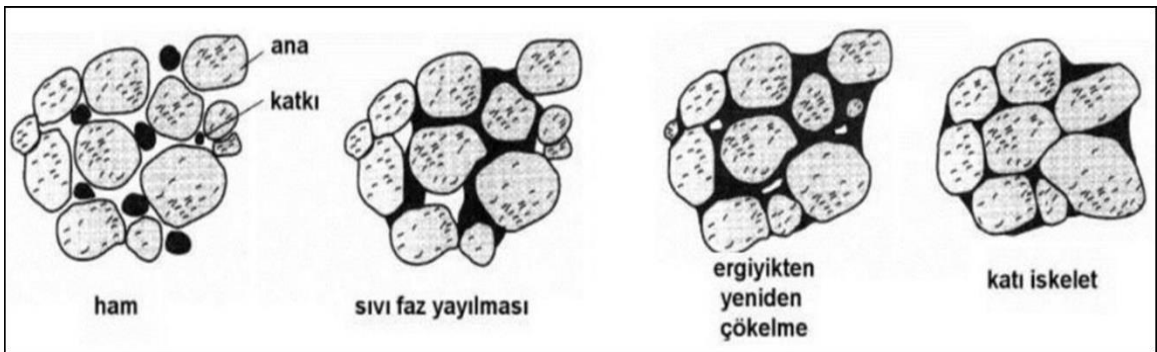
Katı faz sinterleme, tek fazlı ya da birbiri içerisinde çözünemeyen yapılarda görülmektedir. Bu sinterleme mekanizmasında toz partiküllerinin temas noktalarında bir atom difüzyonu meydana gelmektedir. Katı faz sinterleme işlemi dört aşamada oluşmaktadır. İlk aşamada toz partikülleri her ne kadar temas halinde olsalar da birbirlerine sıkıştırma sonucunda sürtünme ile bağlıdır. İkinci adımda toz partikülleri arasında boyun adı verilen temas yüzeyleri oluşmaktadır. Üçüncü adımda oluşan boyunlar genişlemeye başlar ve tane sınırları boyunca çizgi şeklinde uzar. Son adımda ise yoğunluk süreci tamamlanmış olur ve yapı içerisinde bazı bölgelerde gözenekler kalır. Bu süreçte tane boyutunda artış görülebilmektedir [44]. Şekil 3.4'te katı faz sinterleme aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.4. Katı faz sinterleme basamakları [39]

3.4.2. Sıvı Faz Sinterleme

Sinterleme sırasında toz partikülleri arasındaki boş kısımları dolduracak bir sıvı hal oluşumu süreci daha fazla hızlandıracak ve yoğunluğu arttıracaktır. Alüminyum alaşımlarında sıvı faz sinterleme çok sık tercih edilmektedir. Birinci aşamada ilave partikül ana matris ile katı faz sinterlemeyle tepkimeye girerek sıvı faz oluşumu gerçekleşir. İkinci adımda sıvı haldeki faz, partiküllerin arasına dolarak, kapiler basıncın oluşumuyla partiküller tekrar düzenlenir. Bu adımda sinterlemeyi etkileyen ana etken ıslatabilme kabiliyetidir. Üçüncü adımda meydana gelen sıvı faz, partiküller arasında yayınarak katı içerisinde çökeltme meydana gelir. Son adımda tüm boşluklar tamamen sıvı faz ile dolarak malzeme tam yoğun bir hale gelerek işlem tamamlanmıştır. Sıvı faz sinterleme yöntemleri üç grupta toplanabilmektedir. Bunlar; geçici sıvı faz sinterleme, kalıcı sıvı faz sinterleme ve süper katıgen (Super solidus) sıvı faz sinterleme olarak adlandırılabilir. Şekil 3.5'te sıvı faz sinterleme aşamalarını gösteren şema görülmektedir.



Şekil 3.5. Sıvı faz sinterleme aşamaları [39]

3.5. T/M Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

T/M yöntemi kullanılarak parça üretiminin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Burada bazı önemli parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlar; malzemenin ölçüleri, karmaşık yapısı, toleranslar, mekanik-fiziksel özellikler, ekonomiklik ve kalite olarak sıralanabilir. Tüm bu parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda; T/M yönteminin, döküm ve diğer imalat şekillerine kıyasla birçok avantaja sahip olmasına rağmen aynı zamanda bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Avantajlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [45].

- Farklı üretim yöntemlerine kıyasla T/M ile daha kaliteli ve ekonomik ürünler imal edilebilmekte ve malzeme kaybı son derece az olabilmektedir.
- T/M yöntemi ile istenilen oranda gözeneklilik elde edilebilmekte ve bu sayede kendinden yağlamalı burçlar ve kemik yapısına uygun gözenekli implant ürünler imal edilebilmektedir.
- T/M yöntemiyle üretilen malzemelerde yüzey kalitesi oldukça iyi olup, ürünün imalat sürecinden sonra herhangi bir talaşlı imalat yöntemine ihtiyaç kalmamaktadır.
- Farklı üretim yöntemlerine kıyasla, T/M yöntemi ile küçük ve karmaşık şekle sahip malzemeler daha hızlı daha verimli bir şekilde üretilmektedir.
- Farklı üretim metotları ile imal edilmesi mümkün olmayan yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter malzemeler (tungsten, molibden vb.) ekonomik bir şekilde imal edilebilmektedir.
- Yüksek dayanıma sahip sünek ve yüksek termal iletkenliğe sahip amorf yapıları özel malzemelerin üretilmesinde sadece T/M yöntemi kullanılabilir.
- T/M yöntemi ile üretilen ürünlerde çok iyi yüzey kalitesi ve boyutsal hassaslık özellikleri bulunmaktadır.

T/M yöntemi bu avantajları sayesinde yüksek kalitede ve seri imalat ihtiyaçlarını karşılayabilen bir metot olarak farklı üretim metotlarına kıyasla daha fazla tercih edilebilmektedir. Fakat her imalat yönteminde olduğu gibi T/M yönteminin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [45].

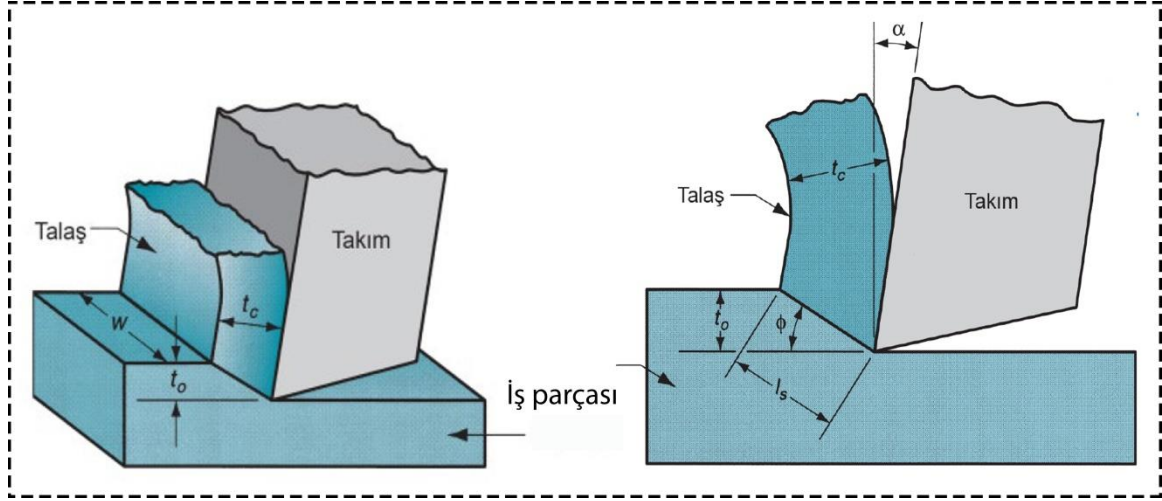
- T/M yönteminde seri imalat yapılmadığı takdirde presleme ve sinter ürünleri gibi ilk yatırım maliyetleri yüksek olabilmektedir.
- Metal toz partiküllerinin maliyeti oldukça yüksek olabilmektedir.
- Yüksek dayanım gerektiren malzemelerde gözenekli yapıların doldurulması ve infiltrasyon gibi işlemlerin uygulanmaması durumunda farklı yöntemlere kıyasla daha kötü mekanik özellikler ve farklı yoğunluk değerleri sergileyebilmektedir.
- T/M yöntemiyle üretilen malzemelerde gözeneklilik arttıkça korozyon direnci ve düşük plastisite özellikleri görülebilmektedir.
- T/M yöntemiyle bazı büyük parçalar imal edilememekte ve tasarım zorlukları yaşanabilmektedir.

4. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

Talaşlı imalat süreci; şekli, ölçüleri ve yüzey kalitesi daha önce tespit edilmiş olan malzemelerin işleme cihazlarında talaş kaldırmak suretiyle yeniden şekillendirilmesini kapsamaktadır. Talaşlı imalat, kesici takım ve iş parçasının belirli hareketleri sayesinde malzeme üzerinde plastik deformasyon oluşturularak gerçekleştirilir [46]. Başka bir deyişle talaşlı imalat, kesici takımın uyguladığı kesme kuvveti ile iş parçası arasındaki etkileşimle doğrudan ilişkilidir. Talaşlı imalat sürecinde mekanik enerji kullanılmaktadır. Talaşlı imalat yöntemi boyutsal hassasiyeti yüksek ve mükemmel yüzey kalitesi istenen durumlarda kullanılır ve çoğunlukla karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesinde tercih edilmektedir. Farklı imal usulleri ile imal edilmiş olan parçaların büyük bir kısmı talaşlı imalat yöntemleri ile işlenerek son ürün halini almaktadır [47].

4.1. Talaş Kaldırma Mekanizması

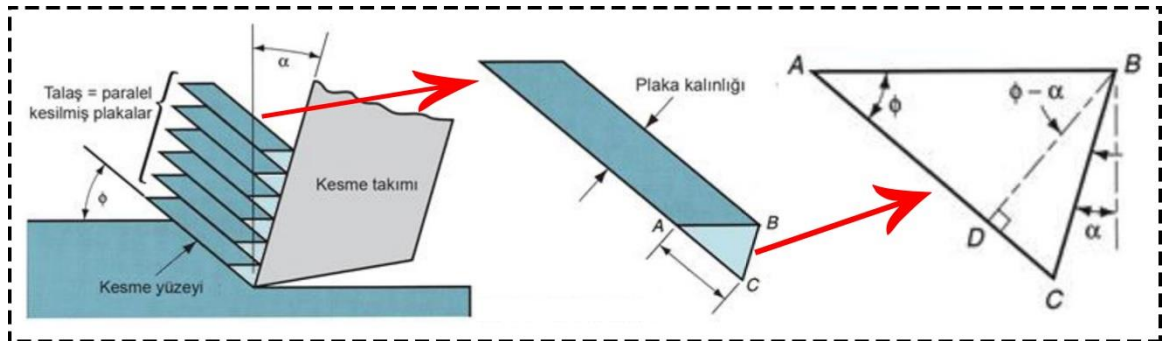
Oldukça kompleks bir yapıya sahip olan talaş kaldırma mekanizmasının daha iyi kavranabilmesi amacıyla üç boyuta sahip takım geometrisi ve iki boyutlu ortogonal geometri biçiminde basitleştirilerek gösterilebilmektedir. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi iş parçası bir levhadan oluşmaktadır. Burada talaş kaldırma sırasında iş parçasının durumunu, takım geometrisinin en önemli etkilerini ve kesici takım ile talaş arasında oluşan etkileşimler görülmektedir. Talaşlı imalat yönteminde görünüm üç boyutlu olmasına rağmen ortogonal kesme modeli iki boyutludur. Ortogonal kesim şeklinde, kesici takım kesme doğrultusuna dik bir konumda bulunmaktadır. İş parçasına takım tarafından bir baskı uygulanmaktadır. Uygulanan bu baskı, iş parçasıyla kesme düzlemi boyunca tekrarlanmakta ve oluşan deformasyona göre talaşların şekli belli olmaktadır. İş parçası istenen şekle getirilirken talaş kaldırmanın etkisiyle kesici takımda deformasyonlar oluşabilmektedir [47].



Şekil 4.1. Ortogonal talaşlı imalatın üç ve iki boyutlu görünüşü [48]

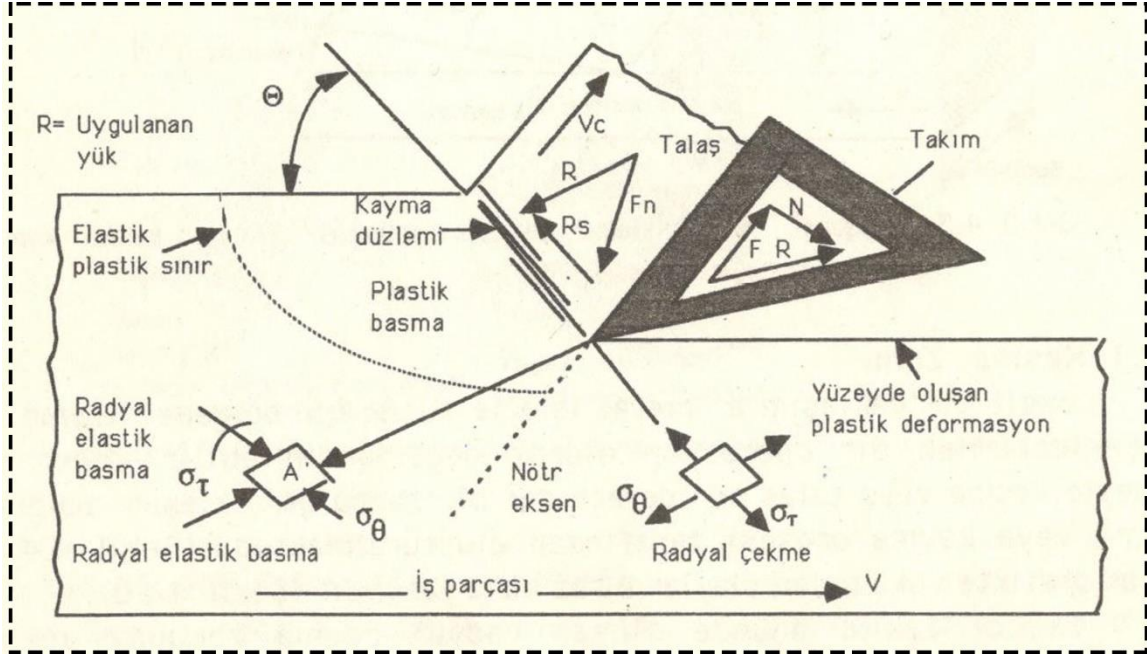
4.1.1 Kesme Bölgesi

Talaş kaldırma işlemi, küçük bir bölgede kayma ile meydana gelen bir oluşum olarak nitelendirilebilir. Başka bir deyişle kesme veya talaşlar oldukça dar bir bölgede vuku bulan bölgesel kesme veya kayma işlemi tarafından yapılmaktadır [47]. Şekil 4.2’de talaş oluşumu sırasında birbiri üzerinde kayan plakalar görülmektedir. Ancak pratikte olan olaylar biraz daha farklı olabilmektedir. Kesici takımın ön kısmında meydana gelen radyal basma bölgesinde, deformasyon ve ciddi oranda şekil değişimine maruz kalan plastik bölge bulunmaktadır. Tüm plastik deformasyon süreçlerinde olduğu gibi radyal basma bölgesi de, elastik ve plastik basma bölgelerinden oluşmaktadır. Elastik basma bölgesi bitiminde plastik basma bölgesi meydana gelir.



Şekil 4.2. Talaş oluşumu sırasında birbiri üzerinden kayan plakalar ve geometrik şekillerinin görünüşü [49]

Talaşlı imalat işlemi sırasında aşırı ısı nedeniyle malzemenin plastik basma bölgesinde ciddi oranda dislokasyon ağları oluşabilmektedir. Bu değişimler sonucunda sertleşme belli bir seviyeye kadar yükselebilmekte ve malzeme kesilme ya da makaslanmaya maruz kalabilmektedir. Şekil 4.3'te talaşlı işlem sırasında oluşan makaslama prosesi görülmektedir.



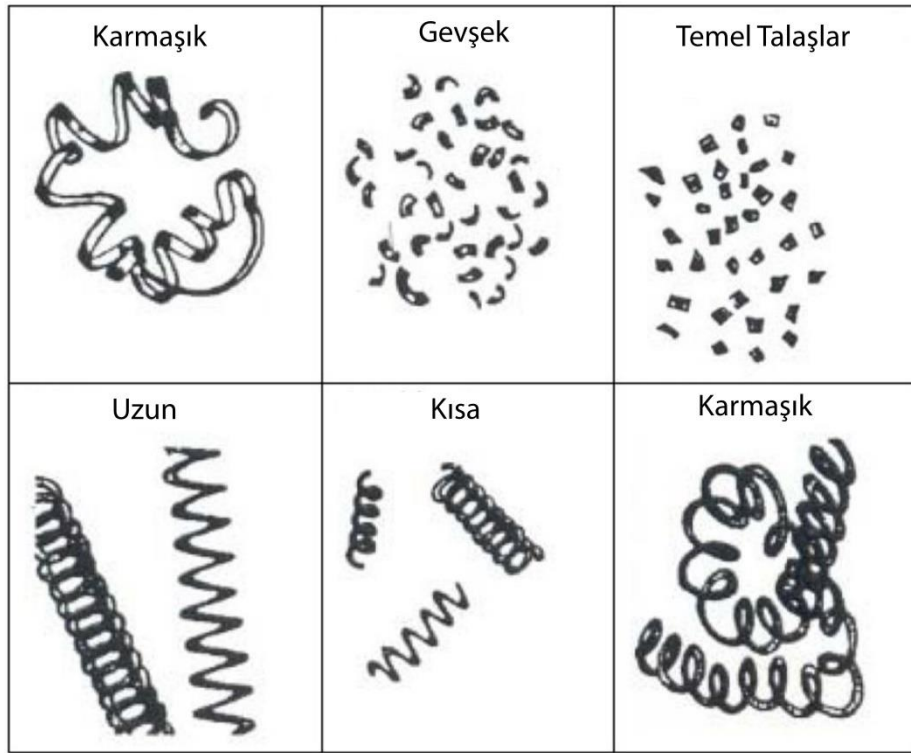
Şekil 4.3. Talaşlı işlem sırasında oluşan makaslama prosesi [47]

Metal tabanlı ürünlerin neredeyse tamamına yakınında şekil değişimi sırasında bir miktar sertleşme görüldüğü bilinmektedir. Kayma düzleminin genişlemesiyle birlikte ana kayma bölgesi adı verilen bir saha oluşabilmektedir. Deformasyon sertleşmesi yüksek olan malzemelerde kayma bölgesine ait kalınlık artar. Yüksek deformasyon sertleşmesi, kayma bölgesinin genişleyerek şekil değiştirmesine ve enerji ihtiyacının artmasına sebep olabilmektedir. Kayma bölgesinde harcanan enerjinin bir bölümü ısı enerjisine dönüşür ve bu sebepten dolayı sıcaklık artar. Sıcaklığın etkisiyle, işlem gören malzemenin akma gerilimi düşmektedir [47].

4.1.2. Talaşın Uzaklaştırılması

Talaşlı imalat uygulanan malzeme üzerinden parça ya da parçacıklar koparmak suretiyle yapılan olaya talaş kaldırma işlemi denir. Metallerde talaş kaldırma işlemi söz konusu

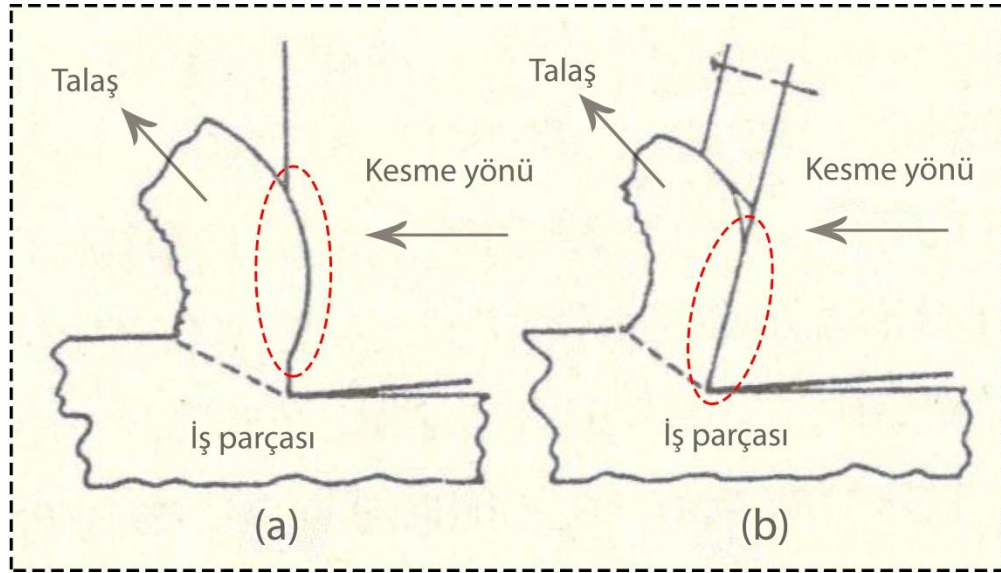
olduğunda şekil değişimine dayanan birçok parametrenin (ısı oluşumu, sürtünme, talaş oluşumları, malzeme yüzeyinde sertleşme, takım aşınması vb.) takımın performansı üzerinde çok ciddi etkilere sahip olduğu bilinmektedir [50]. Kıvrık bir şekilde oluşmaya başlayan talaşlar, malzemenin yapısı ve işleme koşullarından etkilenebilmektedir. Bir kesici takımın uç kısmı ile malzeme üzerinden talaş kaldırılırken iş parçası, kesici takım tarafından deformasyona uğratılır ve talaşlar bir kenara atılır. Kullanılan iş parçasının malzemesine ve uygulanan işlenebilirlik parametrelerine göre ortaya çıkan talaşlar birbirinden farklı yapılarda olabilmektedir. Şekil 4.4'te farklı işlenebilirlik parametreleri sonucunda oluşan talaş morfolojileri görülmektedir.



Şekil 4.4. Farklı işleme parametreleri sonucunda oluşan talaş morfolojileri [51]

Talaşlı imalatla işlenebilirlik özellikleri yüksek olan bu sebepten dolayı imalat çeliği olarak adlandırılan malzemelerde küçük olan talaşlar kesme bölgesinden kolayca uzaklaştırılabilmektedir. Fakat sünek bir malzemede oluşan sürekli talaşlar bazı zorluklara sebep olabilmektedir. Sürekli talaşlar kesme bölgesini doldurarak malzeme ve kesici takımın uç kısmında yumak oluşturmak suretiyle tezgaha ve çalışana bir tehdit oluşturabilirler. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek amacıyla talaş kırıcı sistemler üretilmiştir. Geliştirilen bu talaş kırıcılar, oluşan talaşlar üzerinde ek bir gerilme meydana

getirmek suretiyle talaşları daha küçük parçalara ayrılmasına sebep olur. Talaşlar kıvrılarak bir yumak haline gelerek kırılmaktadır. Bazı durumlarda ise talaşlar bükülmek suretiyle farklı bölgelere çarparak kırılabilmektedir. Sürekli talaşların kesme bölgesinden mutlaka alınması gerekmektedir. Şekil 4.5'te farklı tip talaş kırıcı özelliğine sahip kesme uçları görülmektedir.

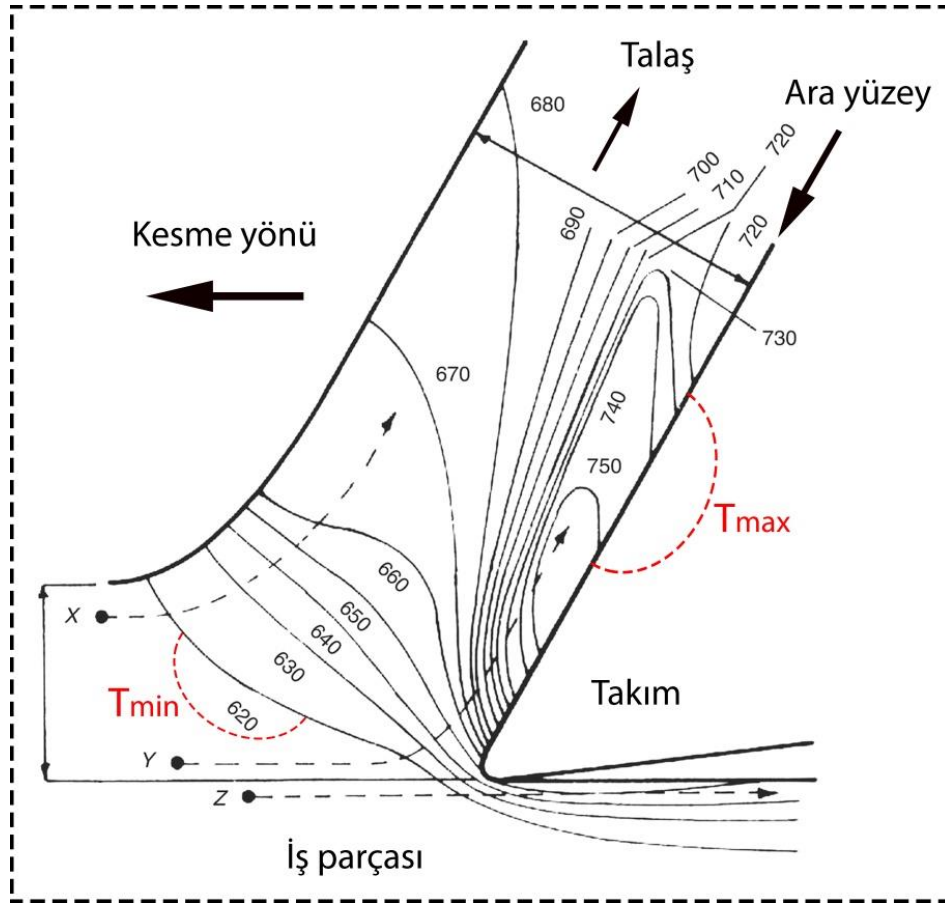


Şekil 4.5. Talaşların uzaklaştırılması; a) Oluklu tip, b) Engel tipi talaş kırıcılar [47]

4.1.3. Sıcaklık

Talaşlı imalat yapılırken harcanan enerji oldukça küçük bir alanda toplanmaktadır. Harcanan bu enerjinin küçük bir kısmı, işlenen malzemede ve oluşan talaşta yüksek oranda dislokasyon yoğunluğu ya da deformasyon enerjisi olarak depolanabilmektedir. Geriye kalan enerjinin büyük çoğunluğu ısıya dönüşmektedir. Kesme bölgesi, işlenen malzeme içerisine doğru ilerleme hızı oranında devam etmektedir. Takım önünde bulunan bölgede daha az bir ısı oluşur ve kesme hızı arttıkça oluşan ısı talaşla birlikte ortamdan uzaklaştırılır. Fakat takım ile talaş yüzeyleri birbiriyle sürekli ilişki halinde oldukları için takımın talaş yüzeyi ile olan bölümü daha fazla ısınmaktadır. Talaş yüzeyi üzerinde meydana gelen sürtünme, ısının artmasında oldukça etkili olabilmektedir. Şekil 4.6'da maksimum ve minimum sıcaklıkların olduğu bölgeler görülmektedir. Maksimum sıcaklık talaş yüzeyi ile takımın uç kısmından bir miktar uzaklıkta meydana

gelebilmektedir (Şekil 4.6). Kesme hızının artmasına paralel olarak maksimum sıcaklık ve ara yüzey sıcaklıkları da artabilmektedir.



Şekil 4.6. Tornalama sırasında takım ile iş parçası üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı [52]

İşleme sırasında harcanan enerjinin tamamının ısıya dönüştüğü varsayılacak olursa boyutsal analiz yardımıyla ısı hesabı yapılabilir. Takım yüzünde meydana gelen ortalama sıcaklık, denklem 4.1'e göre hesaplanabilir.

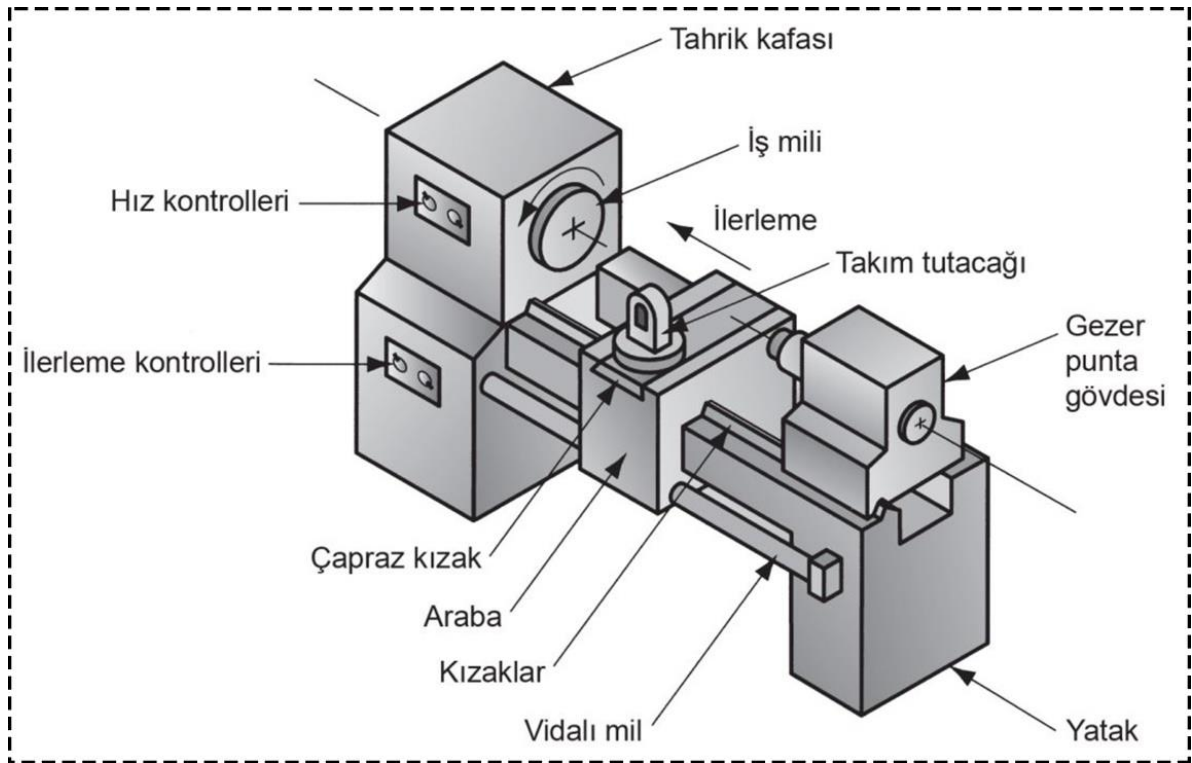
$$T_T = E \cdot [(V \cdot h) / (k \cdot \rho \cdot c)]^{1/2} \quad (4.1)$$

Burada k , ρ , c sırasıyla işlenen malzemenin ısı iletkenlik katsayısını, yoğunluğunu ve özgül ısısını, h talaş kalınlığını, V kesme hızını ve E spesifik kesme enerjisini ifade etmektedir. Mukavemeti yüksek olan malzemelerde kesme hızının artmasıyla sıcaklık artabilmektedir. Aynı zamanda işlenen malzemenin ısı iletkenlik, yoğunluk ve özgül ısı değerlerinin düşük olması da işleme sırasında sıcaklık artışına sebep olabilmektedir.

4.2. Talaşlı İmalat Yöntemleri

4.2.1. Tornalama

Bilgisayar veya operatör yardımıyla kullanılabilen torna tezgahlarında düz ve silindirik yüzeylerin işlenebilmesi sürecine tornalama adı verilir. Torna tezgahı, genel olarak kesici takımın sabit, işlenecek olan malzemenin döndürülmesi prensibine dayanmaktadır. Şekil 4.7’de klasik bir üniversal torna tezgahı görülmektedir.



Şekil 4.7. Klasik üniversal torna tezgahı [49]

Tornalama işleminde malzeme ile kesici ucun hareket ettirilmesiyle talaş kaldırılmaktadır. Bağlanan malzemenin dönme eksenine ile kesici ucun yönü birbirine paralel şekildedir. Kesici takım, dönme eksenine belirli bir açıda ayarlanacak olursa konik bir yüzey oluşur ve buna konik tornalama denir. Kesici takım, dönme eksenine 90° bir açı ile yaklaştırılacak olursa bu işleme alın tornalama adı verilmektedir ve bu işlem neticesinde düz bir yüzey elde edilmektedir. Tornalama sırasında kesme hızı, talaş kaldırma oranı, güç ve işleme süresi gibi birçok parametre daha iyi sonuçlar elde

edebilmek için oldukça önem arz etmektedir. Aşağıda verilen denklemler ile bu parametreler hesaplanabilmektedir.

$$V_c = (\pi \cdot D \cdot n) / 1000 \quad (4.2)$$

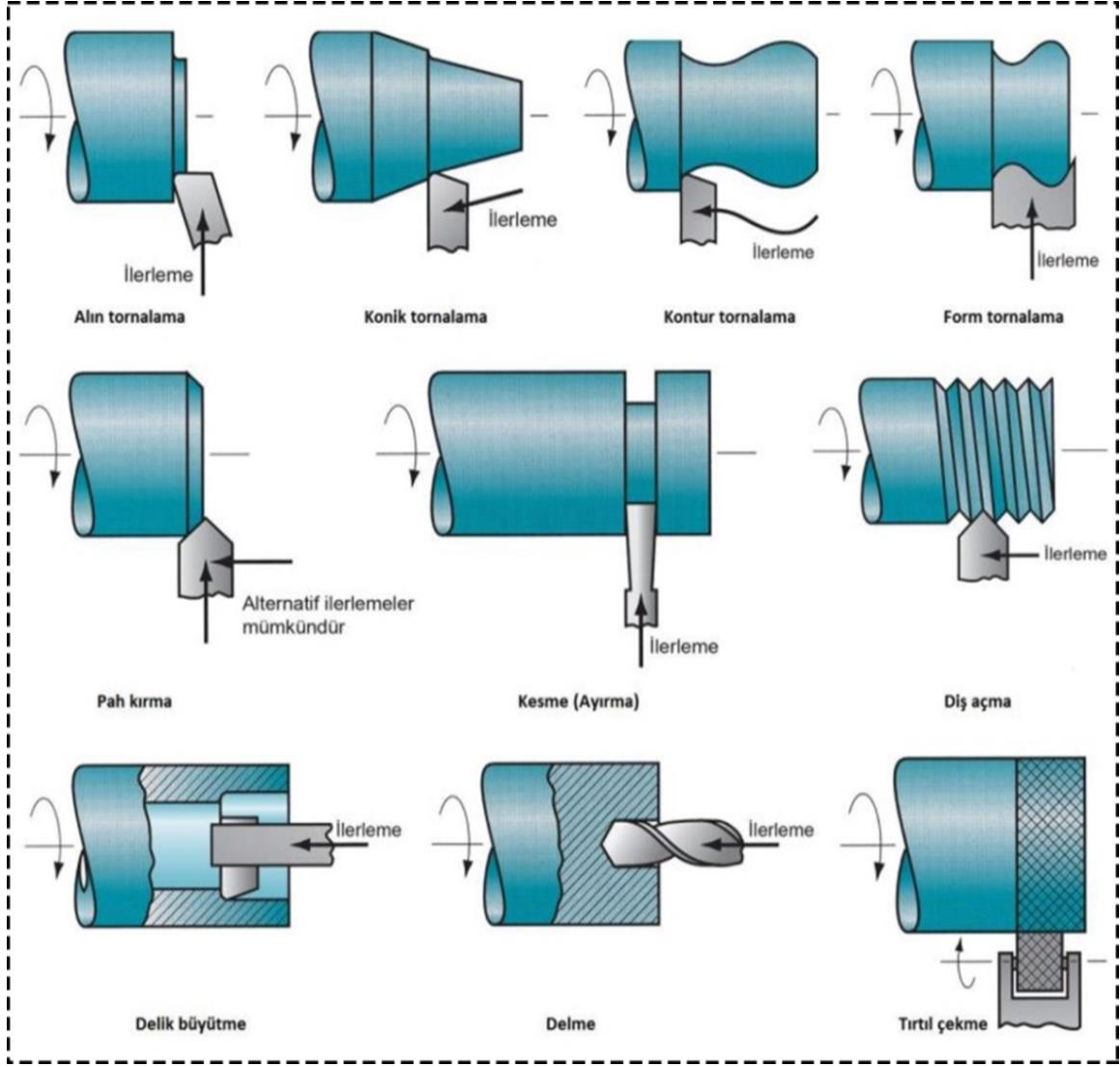
$$Q = V_c \cdot a_p \cdot f_n \quad (4.3)$$

$$P_c = (V_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot k_c) / 60 \cdot 10^3 \quad (4.4)$$

$$T_c = I_m / (f_n \cdot n) \quad (4.5)$$

Burada V_c (m/dak); kesme hızını, D (mm); işlenen çapı, n (dev/dak); iş mili hızını, Q (cm³/dak); talaş kaldırma oranını, a_p (mm); kesme derinliğini, f_n (mm/dev); devir başına ilerlemeyi, P_c (kW); harcanan net gücü, k_c (N/mm²); spesifik kesim gücünü, T_c (dak); kavrama süresini, I_m (mm); işlenmiş uzunluğu ifade etmektedir.

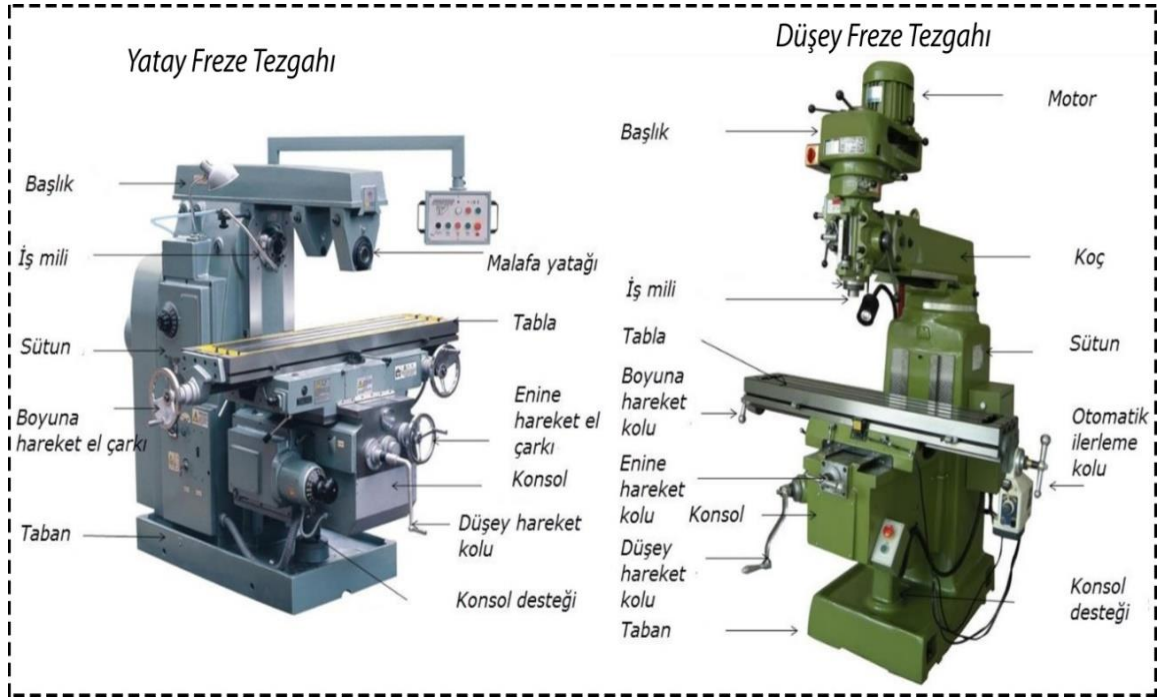
Genel olarak silindir şeklindeki parçaların işlenebilmesinde kullanılan torna tezgahları bazı ek donanımlar vasıtasıyla diş açma, frezeleme, delik delme ve konik tornalama gibi farklı işlevlerin yapılmasında da kullanılabilmektedir. Bir torna tezgahının temel karakteristikleri; ayna çapı, ayna ve punta arasındaki mesafe ve puntanın yüksekliği gibi parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler sayesinde torna tezgahında işlenebilecek parçaların maksimum ve minimum standartları bilinmektedir. Şekil 4.8’de torna tezgahı ile yapılabilen işlemler görülmektedir.



Şekil 4.8. Torna tezgahında yapılabilen işlemler [49]

4.2.2. Frezeleme

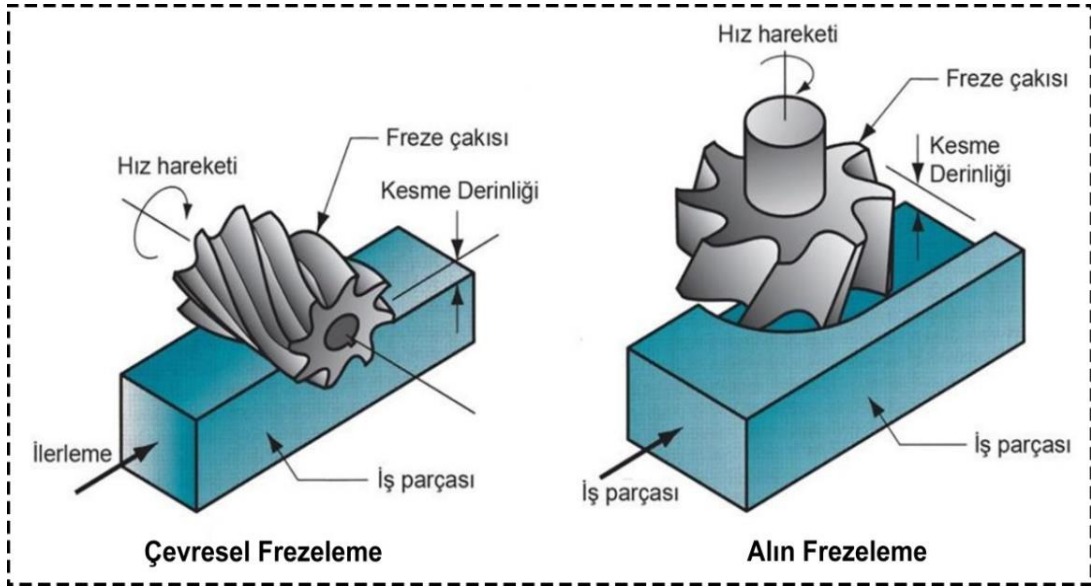
Frezeleme işlemi yatay ve düşey olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Yatay frezeleme çoğunlukla çevresel ya da levha frezeleme, düşey frezeleme ise yüzey frezeleme olarak bilinmektedir. Yatay ve düşey frezeleme birbirine göre bazı farklılıklar içermektedir. Şekil 4.9’da yatay ve düşey freze tezgahlarını gösteren temsili fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 4.9. Yatay ve düşey eksenli freze tezgahları [53]

Yatay frezelemede, kesici takımın dıştaki kısmına monte edilmiş dişler aracılığıyla yüzey işlenmektedir. İşlenen yüzey kesici takımın dönme eksenine paralel bir konumdadır. Düz ve istenen farklı formlarda yüzeyler yatay frezeleme ile uygulanabilir. Elde edilen yüzeyin kesit ölçüsü kesici takımın eksenel yöndeki ölçüsü ile aynı şekildedir. Yatay frezeleme yöntemi genel olarak yatay milli tezgahlarda kullanılmaktadır.

Düşey frezelemede kesici takım ile işlenen yüzey arasında 90° 'lik bir açı bulunmaktadır. Kesme işleminin büyük bir kısmı kesici takımın dış bölümü tarafından sağlanmaktadır. Düşey eksenli frezeleme işlemi yatay ve düşey milli tezgahlarda yapılabilir. Şekil 4.10'da yatay ve dikey eksenli freze tezgahlarını ve parçalarını gösteren fotoğraf görülmektedir.

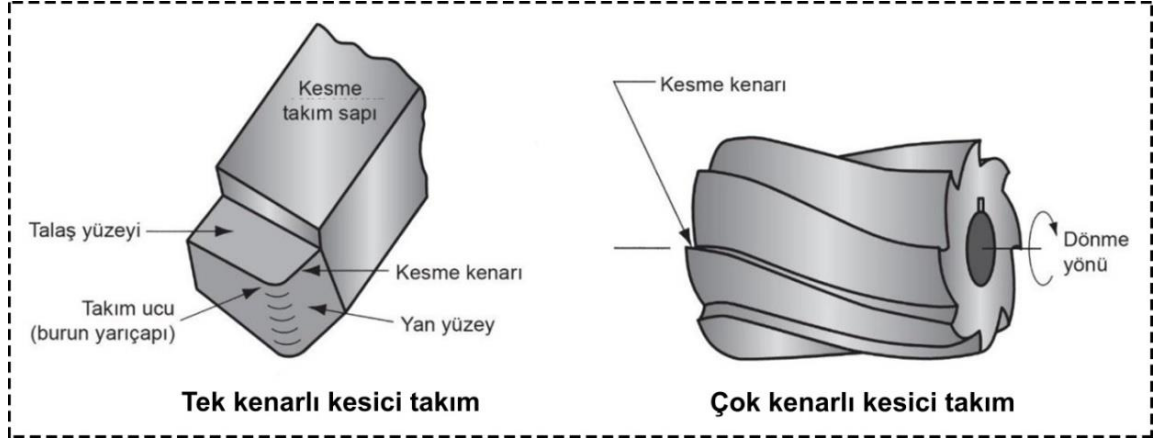


Şekil 4.10. Frezeleme çeşitlerinden çevresel ve alın frezeleme [49]

4.3. Kesici Takımlar

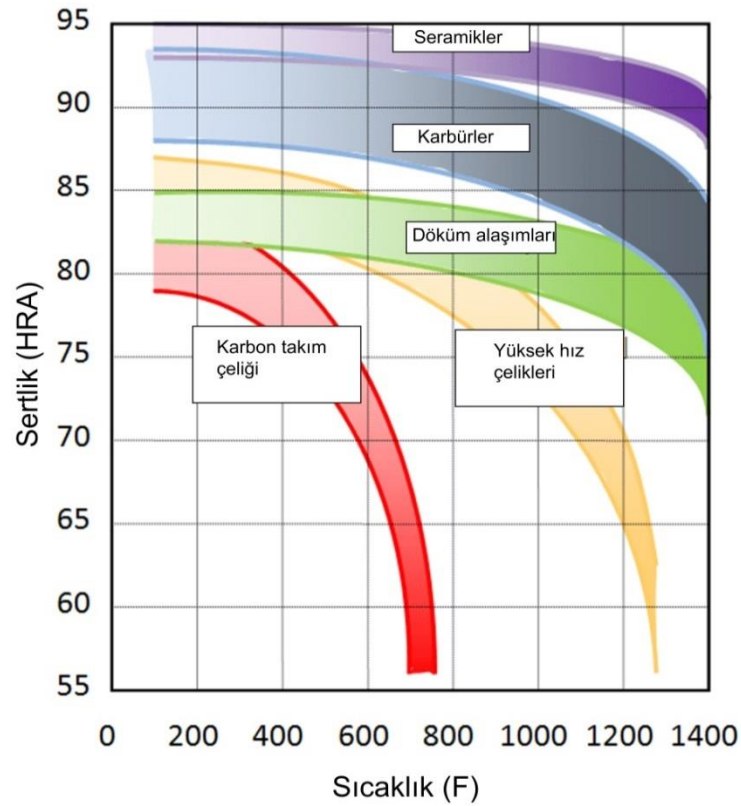
4.3.1. Kesici Takım Malzemeleri

Uygun malzeme seçimi ve uygun geometriye sahip bir kesici takım seçilmesi, metallerin işlenebilirliği açısından oldukça önemli parametrelerdir. Çok geniş bir yelpazede bulunan performans ve kapasiteye sahip çeşitli kesici takım malzemeleri bulunmaktadır. Kesici takımlar talaşlı imalat sektöründe oldukça önem arz etmektedir. Kesici takımın malzeme seçimi, kesme parametreleri ve uygun geometriye sahip takım seçimi işlenebilirlikte verimi direkt olarak etkilemektedir. Şekil 4.11’de farklı geometrilere sahip kesici takımlar görülmektedir.



Şekil 4.11. Tek ve çok kenarlı kesici takımlar [49]

Talaşlı imalat sektöründe yaşanan teknolojik gelişmeler sayesinde, işlenmesi çok zor olan malzemelerin bile yüksek kesme ve işleme hızlarında işlenebilmesi mümkün olabilmektedir. Kesme ve malzeme işleme hızlarının yüksek olması verimlilik açısından oldukça önem arz etmektedir. Şekil 4.12’de kesici takım malzemelerinin sertlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.12. Kesici takım malzemelerinin sertlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi [54]

Kesici takımlar oldukça zor koşullarda (yüksek sıcaklık, sürtünme ve gerilme) çalışmaktadır. Kesici takımın zor koşullarda çalışabilmesi için aşağıda bulunan özelliklere sahip olması gerekmektedir.

- Sertliği yüksek olmalı.
- Kesici kenarlar aşınmaya ve talaş biriktirmeye karşı dirençli olmalı.
- Tokluğu yüksek olmalı.
- Yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini muhafaza edebilmeli.
- Deformasyona karşı mukavemeti yüksek olmalı.
- Kimyasal kararlılığı yüksek olmalı.
- Gerekli ısı özelliklere sahip olmalı.
- Elastiklik modülü yüksek olmalı.
- Takım ömrü uzun olmalı.
- İyi bir yüzey kalitesine ve uygun geometriye sahip olmalı.

4.3.1.1. Yüksek Hız Çeliği (HSS) Takımlar

Taylor ve White tarafından 1900'li yıllarda üretilen yüksek hız çelikleri karbon ve alaşımlı takım çeliklerine göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Takım çelikleri ile aynı takım ömrüne sahip olmakla birlikte kesme hızları, müsaade edilen değerin iki katı kadar olabilmektedir. Bu sebepten dolayı yüksek hız çeliği, yani HSS (high speed steel) olarak adlandırılmaktadır. Yüksek hız takım çelikleri; dövme, toz metalürjisi ve döküm yöntemleriyle üretilmektedir. Döküm ve dövme yönteminin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar; kaba karbür partiküllerinin oluşumu, karbür segregasyonu ve homojen olmayan bir şekilde dağılım olarak sayılabilir. Bu sorunlarla karşılaşmamak için ön alaşımlandırılmış çok küçük boyutlara sahip toz halindeki takım çeliği karışımlarının sıcak izostatik preslenmesi esasına dayanan toz metalürjisi yöntemi uygulanabilmektedir.

4.3.1.2. Sermet Takımlar

Sinterlenmiş karbürlerin bir alt grubu olan sermetlerde ana matrise bağlanma metalik bir faz ile meydana gelmektedir. Çelik malzemelerin kesme işlemlerinde Ni (Nikel) ve Mo (Molibden) matrisli TiC takviyeli takımların kullanımı giderek daha fazla

yaygınlaşmaktadır. TiC ve TiN karışımı takımlar ise daha yüksek ısı dirence sahiptir ve çok yüksek kesme hızlarında da kullanılabilir.

4.3.1.3. Seramik Takımlar

Al_2O_3 gibi seramik tozları kaplama haricinde sinterleme ya da sıcak presleme yoluyla değiştirilebilir uç şeklinde üretilebilmektedir. Bu seramik malzemeler herhangi bir bağlayıcıya gerek kalmadan yüksek sıcaklıklarda sinterlenebilmektedir. Bu seramik takımlar az miktarlardaki tekrarlı yorulmalar altında ve yüksek kesme hızlarında kullanım için oldukça uygun olabilmektedir. Son zamanlarda seramik takımların güvenilirliği konusunda önemli derecede yenilikler kaydedilmiş ve kullanım alanları gün geçtikçe daha fazla artmaktadır.

4.3.1.4. Kaplanmış Karbür Takımlar

Difüzyon bariyerine, süreksiz kesmede uygun tokluğa ve sert bir yüzey yapısına sahip olan kesici takımlar daha çok tercih edilmektedir. Sinterlenmiş karbür takımlarda takım yüzeyi 5 μm kalınlığa sahip TiC, TiN veya Al_2O_3 ile kaplanarak istenilen özelliklere ulaşılabilmektedir. PVD (fiziksel buhar biriktirme) veya CVD (kimyasal buhar biriktirme) kaplama yöntemleriyle farklı birkaç katmandan meydana gelen ve farklı özelliklerde kaplamalar uygulanabilmektedir. Kaplanmış karbür takımlar torna ve frezelerde, çelik ve dökme demirlerin işlenmesinde çok sık kullanılır.

4.3.1.5. Kübik Bor Nitrür Takımlar

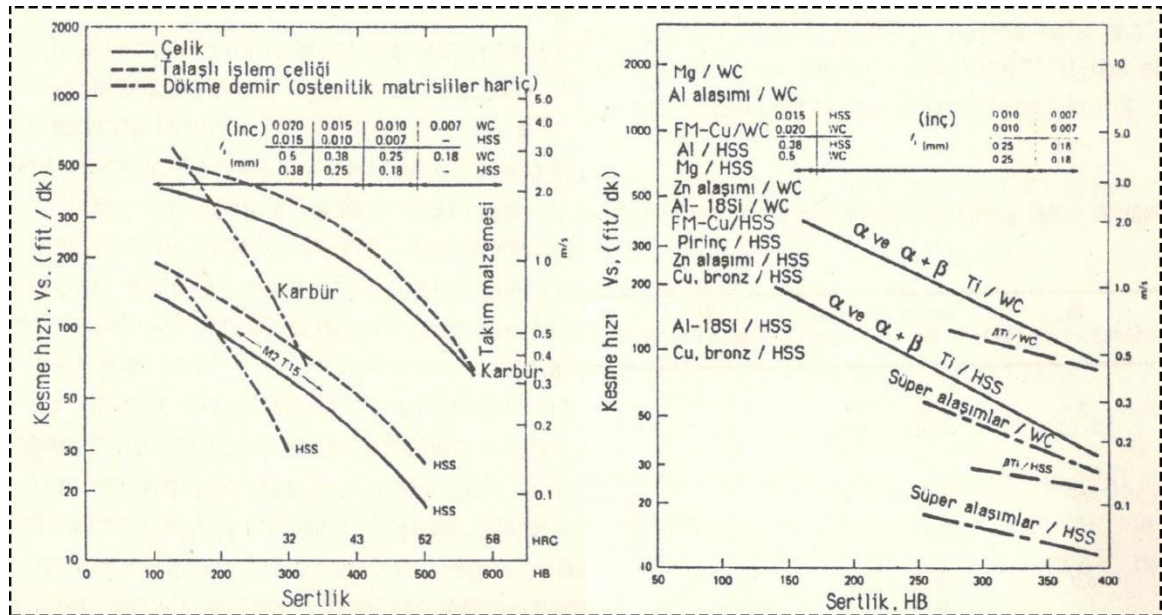
Elmasta en sert malzeme olan kübik bor nitrür yüksek sıcaklık ve basınçlar altında üretilebilmektedir. Sinter karbürlerin yüzeyi 0,5 mm kalınlıkta katman şeklinde kübik bor nitrür ile kaplanabilmektedir. Kesici takımlar arasında kübik bor nitrür ile üretilen takımların en büyük avantajı sert alaşımlı çeliklerin işlenmesinde oldukça verimli olmasıdır.

4.3.1.6. Tungsten Karbür (WC) Takımlar

Son zamanlarda talaşlı imalat sektöründe en çok kullanılan takımlardan biri de tungsten karbür takımlardır. WC takımlar, uygun sertlik, kırılma tokluğu ve ekonomik olmaları gibi özellikleri sayesinde daha fazla tercih edilmektedir. İşleme sırasında, ortalama 850 °C üzerine çıkan sıcaklıklarda termal etkilerden dolayı oluşan aşınma artabilmektedir. WC takımlar WC ve Co (kobalt) toz partiküllerinin sinterlenmesiyle üretilmektedir. Karışım içerisinde farklı oranlardaki Co donatı oranı sertlik ve tokluğu etkilemektedir [55].

4.4. Kesme Parametreleri

Talaşlı imalatla işlemeye başlamadan önce atılacak olan adımlar planlanmaktadır. Planlama yaparken işlenecek olan parçanın malzemesinin, işlenebilme yeteneğinin, boyutlarının, istenen yüzey kalitesinin ve uygulanacak işleme yönteminin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Talaşlı imalat yöntemi seçildikten sonra takım ve iş parçası için en uygun kesme hızı ve ilerleme miktarı tespit edilmelidir. İşlenecek malzeme miktarının fazla olması halinde kesme hızı ve ilerleme miktarları fazla verilerek işlem hızlandırılır ve buna adıma kaba işleme denir. Kaba işleme bittikten sonra iyi bir yüzey kalitesi ve boyutsal toleranslar elde etmek amacıyla ince işleme adımına geçilir. Şekil 4.13'te demir ve demir dışı metallerin kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak sertlik grafikleri görülmektedir.



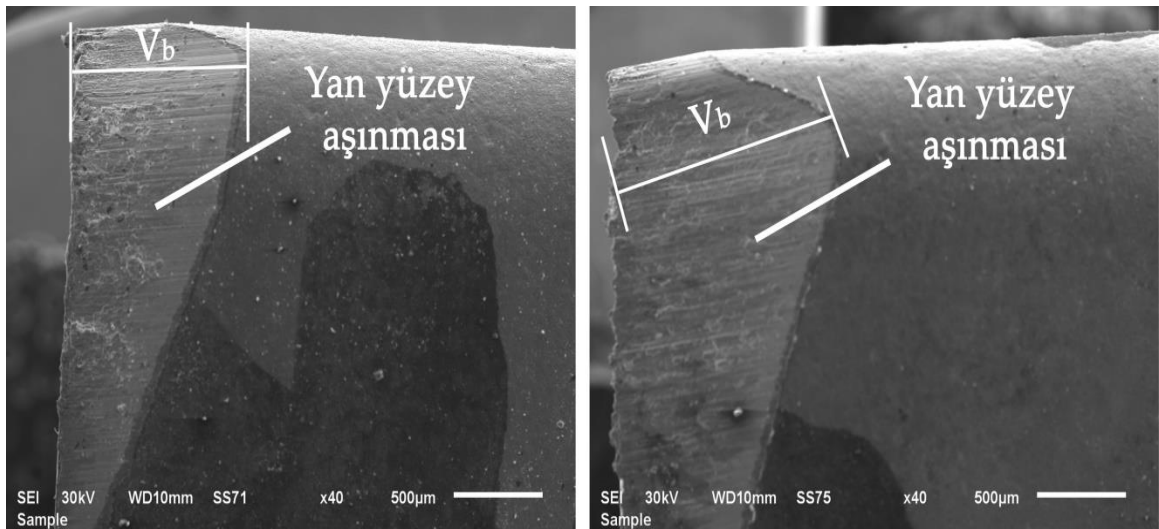
Şekil 4.13. Demir ve demir dışı metallerin kesme hızı ve ilerleme hızının sertlik ile değişimi [47]

4.5. Talaşlı İmalatta Takım Aşınması

Talaşlı imalat yapılırken kullanılan kesici takımlarda yüksek sıcaklık ve gerilmelerden kaynaklanan, farklı şekillerde meydana gelebilen aşınmalar oluşabilmektedir. Bu aşınmaların kontrolü ve azaltılması gerek üretilen parçanın kalitesi açısından gerekse maliyet açısından oldukça önem arz etmektedir. Kesici takımların kullanılmasına engel olan bu tahribatları 7 grupta toplayabiliriz.

4.5.1. Yan Yüzey Aşınması

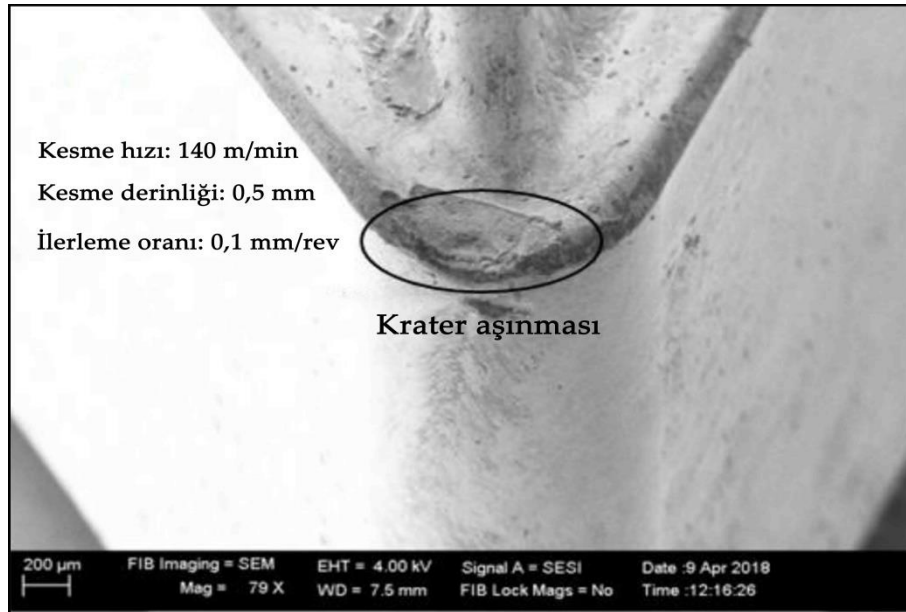
Kesme işlemi sırasında kesici takımın yan kısımlarında oluşan aşınmaya yan yüzey aşınması denilmektedir. Kesici takımın yan kısımlarında işlenen bölgeye dik yönlü gelen kuvvetlerin etkisi ile oluşan yüksek sıcaklık ve termal gerilmeler neticesinde aşınmalar meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak kesici takım üzerinde deformasyon ve işlenen parça üzerinde de ölçü hataları oluşabilmektedir. Genel olarak yan yüzeylerde oluşan aşınma mekanizması abrasif aşınma olarak nitelendirilmektedir. Yan kısımlarda oluşan aşınma devam ederken kesici kenardaki aşınma da artmaya devam eder ve belli bir orandan sonra aşınma hızı çok yükselir. Diğer aşınma türlerine göre yan yüzey aşınması, daha hızlı olur ve takım ömrünü etkileyen önemli bir unsurdur [55]. Şekil 4.14'te farklı kesme parametreleri uygulanan tornalama işlemi sonrasında kesici takımda meydana gelen yan yüzey aşınmaları görülmektedir.



Şekil 4.14. Farklı kesme parametreleri altında kesici takımda oluşan yan yüzey aşınma görüntüleri [56]

4.5.2. Krater Aşınması

Kesici takım yüzeyinde boşluk şeklinde görülen deformasyona krater aşınması adı verilir. Yan yüzey aşınma tipine nazaran daha yavaş oluşmasına rağmen dikkate alınması gereken bir aşınma türüdür. Krater aşınması, difüzyon ya da ısıl yumuşama ve plastik deformasyon etkisiyle sürekli artarak devam edebilmektedir. Bu aşınma türü genellikle yüksek sıcaklıklardan dolayı meydana gelmektedir. Krater aşınması kısa sürede takım için çok farklı durumlara yol açmaz. Zaman içerisinde kararlı bir yapıya sahip yığılma kenarı oluşabilmekte ve kesici takım büyük bir pozitif talaş açısına sahip olmasına rağmen görevini devam ettirebilmektedir. Fakat uzun süren krater aşınmaları sonucunda kesici takımın kenar kısımlarında büyük oranda tahribatlar meydana gelebilmekte ve ani kenar kırılmaları oluşabilmektedir. Bu nedenle krater aşınmasından kaçınmak amacıyla tedbirler alınmalıdır. Farklı kesme hızları ve kaplama yapılmış olan kesici uçların kullanılmasıyla krater aşınması azaltılabilmektedir. Şekil 4.15'te kesici uç yüzeyinde meydana gelen krater aşınması görülmektedir.

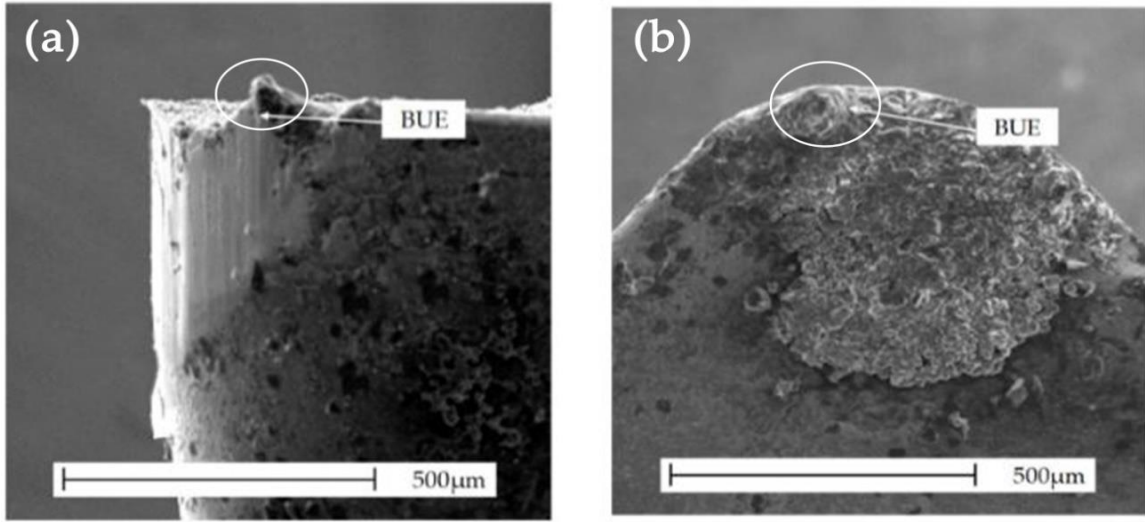


Şekil 4.15. Kesici uç yüzeyinde meydana gelen krater aşınması SEM fotoğrafı [57]

4.5.3. Talaş Yığılması (BUE, Built-Up Edge)

Talaş yığılması genel olarak sünek ya da yumuşak malzeme gruplarının talaşlı imalatı sırasında gözlenen bir durumdur. Kesici takım üzerine yapışan talaşlar işleme süresine

bağlı olarak daha fazla birikmeye başlar ve bir yığın şeklinde birikir. Şekil 4.16'da kesici takım yan ve üst yüzeylerinde oluşan talaş yığılması görülmektedir.

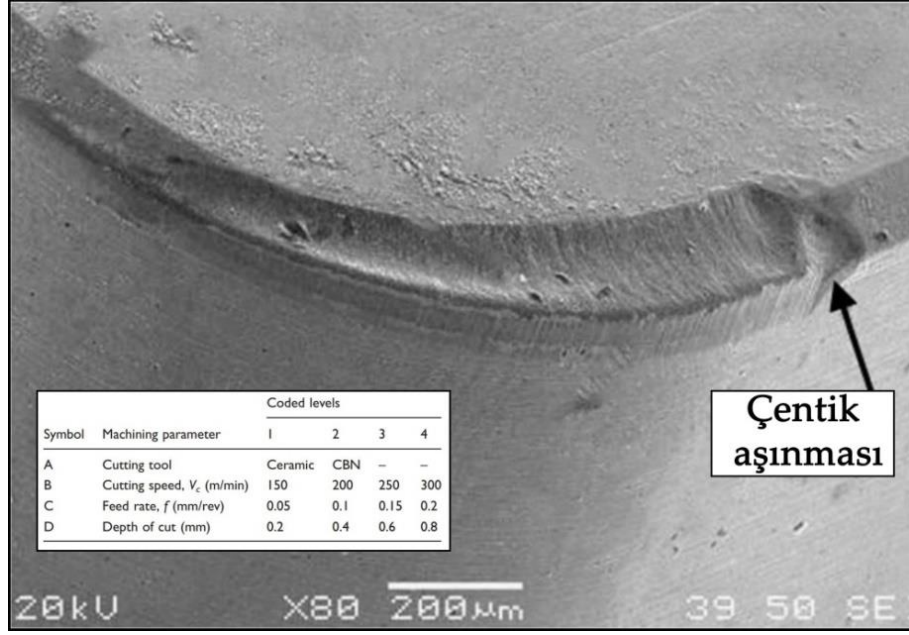


Şekil 4.16. Kesici takımda oluşan talaş yığılması; a) Yan görünüş, b) Üst görünüş [58]

Talaş birikmesi kesici takımın geometrisini değiştirdiği için istenen bir durum değildir. Fakat bazı kaba işleme durumlarında aşınmanın azalmasına yardımcı olabilmektedir. Talaş yığılmasını önlemek için kesme hızı arttırılabilir, daha fazla keskinliğe sahip kenarlar tercih edilebilir ya da pozitif talaş açıları kullanılabilir [55].

4.5.4. Çentik Aşınması

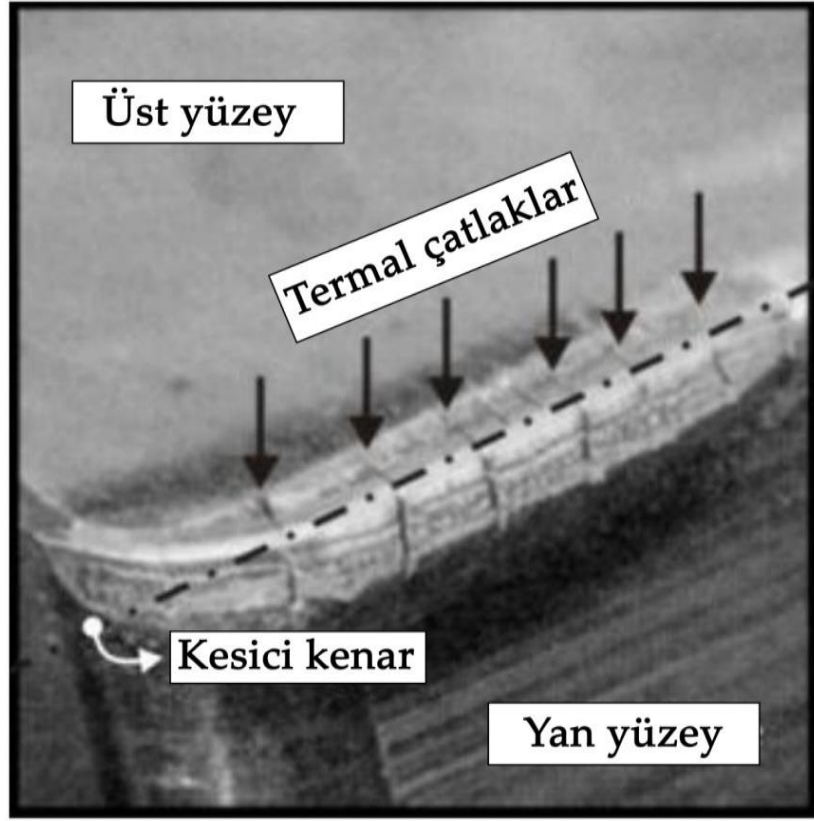
Genel olarak kaba tornalama işlemi sırasında oluşan devamlı talaşlar çentik aşınmasına sebep olabilmektedir. Bu aşınma türü kesme derinlik çentiği olarak da bilinir. Kesici ucun üzerinde, kesilmemiş yüzey bölgesinde ve hatta talaşın serbest durumda olduğu kısımlarda bile görülebilmektedir. Çentik aşınması genel olarak abrazif aşınmadan dolayı meydana gelmektedir. İşlenen parçanın sert katmanlarından ya da işleme sırasında oluşan sertlikten dolayı da çentik aşınması oluşabilmektedir. Şekil 4.17'de çentik aşınması oluşan SEM fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.17. Kesici takımında oluşan çentik aşınması SEM fotoğrafı [59]

4.5.5. Termal Çatlaklar

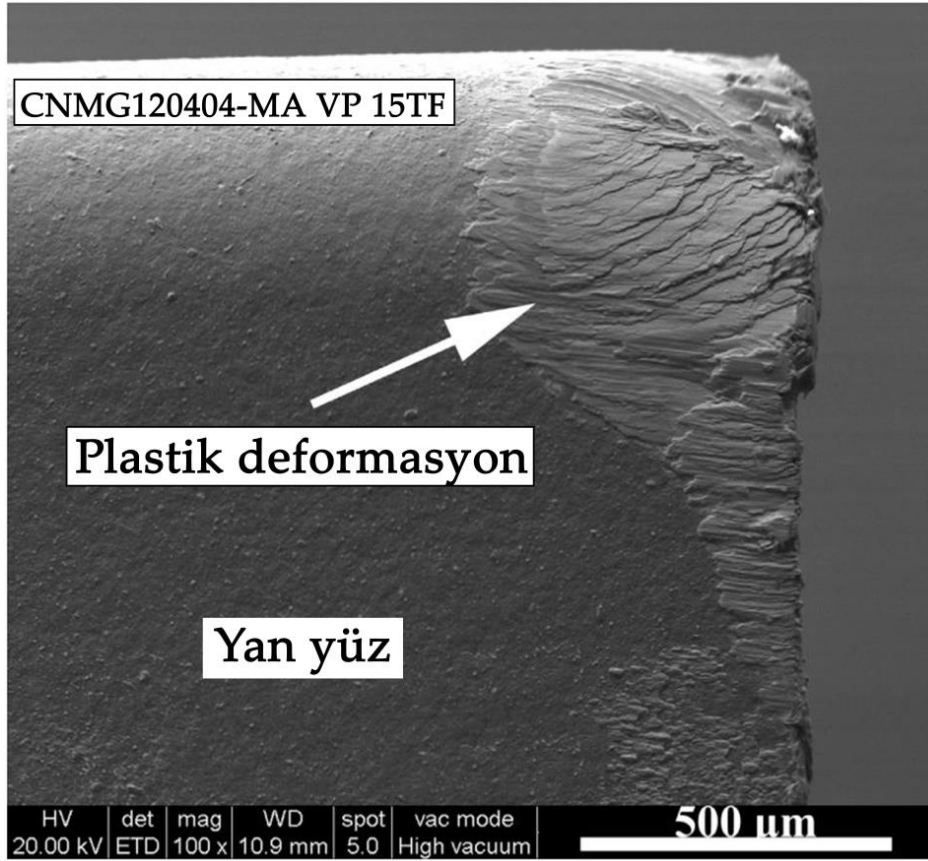
Talaşlı imalat sırasında oluşan vuruntu veya takım ile talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklığın çok fazla artmasıyla birlikte kesici takımında termal çatlaklar meydana gelmektedir. Bu aşınma tipinde termal çatlakların yönü genellikle kesici uca 90 °C'lik bir açı ile oluşmaktadır. Termal çatlaklar oluşuktan sonra kenarlarda kırılma ya da parça kopması görülebilmektedir. Şekil 4.18'de kesici takım kenarlarında oluşan termal çatlaklar görülmektedir.



Şekil 4.18. Kesici takımında oluşan termal çatlakların SEM fotoğrafı [60]

4.5.6. Plastik Deformasyon

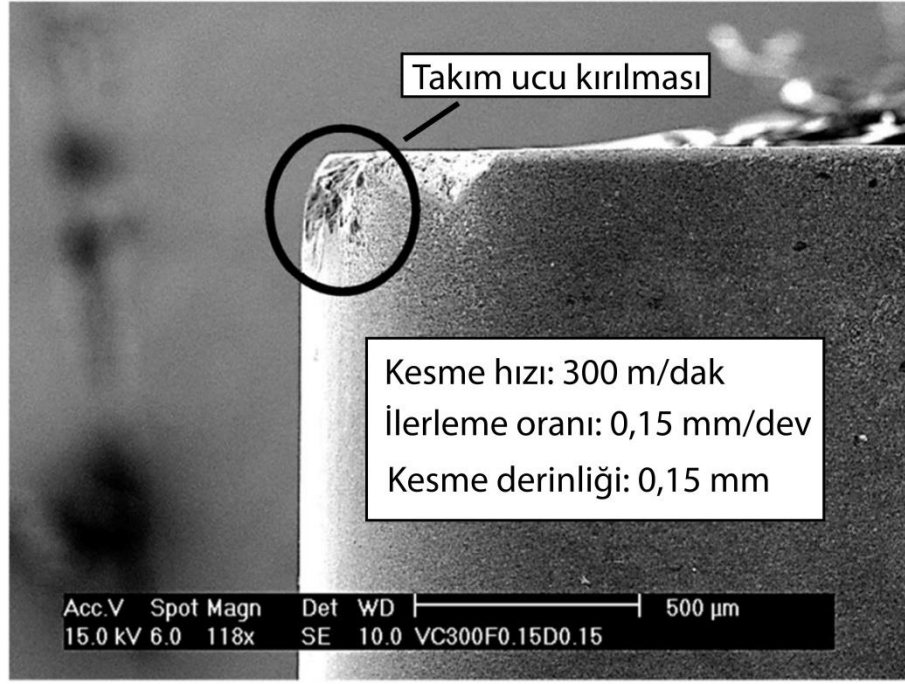
Kesici kenar üzerindeki yüklerin ciddi oranda yükseldiği zamanlarda kesici takımlarda plastik deformasyon meydana gelmektedir. İlerleme hızının ya da kesme derinliğinin çok fazla olması genel olarak plastik deformasyonun neden olabilmektedir. Tungsten karbür veya yüksek hız çelikleri gibi kesici takımlarda termal yumuşama etkisi ile plastik deformasyon görülebilmektedir. Boyutsal hassasiyeti ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemesi sebebiyle, plastik deformasyon istenen bir durum değildir. Titanyum alaşımlarının işlenebilirlik parametrelerinin araştırılması amacıyla yapılan bir çalışmada TiAlN kaplı sement karbür kullanılarak optimal kesme parametreleri tespit edilmiştir. Şekil 4.19’da titanyum alaşımının işlenmesi neticesinde kesici sement karbür takımın yan yüzeyinde oluşan plastik deformasyon bölgesi görülmektedir.



Şekil 4.19. Kesici takım yan yüzeyinde oluşan plastik deformasyon bölgesi SEM fotoğrafı [61]

4.5.7. Takım Kırılması

Kesici takım üzerinden büyük oranda bir ya da birkaç parçanın kopması ya da kırılması durumudur. Genel olarak diğer aşınma türlerinin devam etmesi neticesinde oluşan bir aşınma tipi olarak değerlendirilmektedir. Kesici takımın kırılmasını önlemek amacıyla tok bir yapıya sahip kesici uç kullanılmalı veya farklı geometriye sahip, kama açısı daha büyük bir kesici takım tercih edilmelidir. Kırılgan malzemelerden üretilen kesici takımların ani kırılma riskleri bulunmaktadır. Bu duruma özellikle seramik ve sinter karbür gibi kırılgan malzemelerden üretilen kesici takımlarla yapılan süreksiz kesme durumlarında sıklıkla rastlanmaktadır. Modern imalat yöntemleri ile üretilen sıfır ve negatif talaş açısına sahip kesici takımları kullanmak ve uygun talaşlı imalat koşullarının seçilmesiyle takımın kırılma ihtimali azalmaktadır. Şekil 4.20’de Inconel 718 malzemesinin tornalanması sonucunda kesici takım üzerinde meydana gelen takım ucu kırılması SEM fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.20. Kesici takımın uç kısmında meydana gelen parça kopması SEM fotoğrafı [62]

5. KAYNAK ÖZETLERİ

Bai et al. [63], basınçlı infiltrasyon yöntemi ile bakır matrisi içerisine elmas ve bor ilave ederek Cu-xB/elmas (ağırlıkça x=0,1-0,2-0,3-0,4-0,5 ve 1,0) kompozitlerini üretmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda Cu-B/elmas kompozitlerinde iyi bir arayüzey bağı oluştuğunu ve mekanik özelliklerde iyileşme görüldüğünü bildirmişlerdir. Çekme, basınç ve eğilme mukavemetlerinin önce arttığını ve sonra artan bor içeriği ile azaldığını, maksimum çekme mukavemetinin 204 MPa olduğunu, maksimum basınç mukavemetinin 608 MPa olduğunu ve ağırlıkça %0,5 B ilavesindeki kompozitlerde maksimum eğilme mukavemetinin (513 MPa) görüldüğünü rapor etmişlerdir.

Bahador et al. [64] mekanik alaşımlama ve ardından kıvılcım plazma sinterleme yöntemlerini kullanılarak ve bakır matrisi içerisine farklı miktarlarda TiB₂ ekleyerek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerde yüksek nispi yoğunluk (~%99) ve elektrik iletkenliği (~83-%88 IACS) elde edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca en iyi çekme mukavemeti (283 ±4 MPa) ve sertliğin (120 ±10 HV) %5 takviyeli numunede belirlendiğini rapor etmişlerdir.

Barmouz et al. [65] sürtünme karıştırma yöntemini kullanarak 30 nm ve 5 µm SiC partikülleri ile güçlendirilmiş bakır bazlı kompozitler üretmişlerdir. Sürtünmeli karıştırma ile işlenmiş malzemelerin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve aşınma direnci özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, SiC partikülleri olmadan sürtünme karıştırma uygulanmasının, yüzde uzama oranını önemli ölçüde arttırdığını (2,5 kattan fazla) ve bakırın mukavemetini azalttığını bildirmişlerdir. Mikro ve nano boyutlu SiC parçacıklarının eklenmesiyle, gerilme mukavemetinin ve uzama yüzdesinin azaldığını tespit etmişlerdir. Hacim fraksiyonunun artırılmasının veya takviye partikül boyutunun azaltılmasının, gerilme mukavemetini ve aşınma direncini arttırdığını ve uzama yüzdesini düşürdüğünü rapor etmişlerdir.

Usca et al. [66] bakır ana matris içerisine B ve CrC toz partikülleri ilave ederek soğuk presleme yöntemiyle yeni kompozit malzemeler üretmişlerdir. Daha sonra ürettikleri kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, takviye oranı, yanak aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıkları üzerindeki tornalama parametrelerini yöneten faktör olduğu bildirilmiştir. İkincil etki olarak, kesme hızı ve ilerleme hızı, sırasıyla kesme sıcaklıkları ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha az katkıda bulunan etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir. Son olarak, kesme başlangıcı ile malzemedeki deformasyon mekanizması değiştiği için takviye oranının talaş oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Singh et al. [67] ürettikleri Cu–15Ni–8Sn kompozitin paslanmaz çelik 440C karşı yüzeyine karşı kuru kayma aşınması, havada ve akan Ar gazında disk üzerinde pim test cihazı kullanılarak incelemişlerdir. Aşınmış pimin kesit SEM fotoğrafında, dış yüzeyi ve deforme olmuş tabakayı ayıran ince bir tabaka ile örtülü, oldukça deforme olmuş bir alt yüzey tabakası ortaya çıkardığını bildirmişlerdir. Kapaklı katmanın kesitsel TEM araştırmaları, bunun değişen tane boyutu ve kompozisyona sahip nano taneler içeren bir dizi mekanik olarak karıştırılmış katman olduğunu rapor etmişlerdir. SEM mikrograflarında ayrıca deforme olmuş yüzey altı tabakası ile örtü tabakası arasındaki ara yüzey civarında yüzey altı çatlaklarının oluşumunu da ortaya çıkardığını rapor etmişlerdir.

Li et al. [68] bakır içerisine sabit oranda Al, ve belirli oranlarda TiC parçacıkları ilave ederek yeni bir stokiyometrik olmayan Cu-Al kompozitleri üretmişlerdir. Mikroyapıda TiC parçacıklarının matris taneleri içerisinde uygun bir şekilde dağıldığını bildirmişlerdir. Sonuç olarak üretilen kompozitlere uygulanan çekme deneyleri neticesinde 0,5TiC/Cu-Al kompozitinin 498 MPa'lık bir çekme mukavemeti ve oda sıcaklığında %10,5'lik bir çekme uzaması sergilediğini rapor etmişlerdir. 0,5TiC/Cu-Al kompozitinin mekanik özelliklerinin bu kadar iyileştirilmesinde ince taneli güçlendirmenin, dispersiyon güçlendirmesinin ve katı çözelti güçlendirme dahil olmak üzere birçok güçlendirme mekanizmasının etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Jha et al. [69] yüksek enerjili bilyeli öğütme ve ardından sıkıştırma ve sinterleme yoluyla farklı yüzdelerde TiC (ağırlıkça %0, 2, 4, 6 ve 8) ile güçlendirilmiş Cu-4Ni matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Sürtünme ve aşınma davranışlarını 5, 10, 15 ve 20 N'luk dört

farklı normal yükte incelemiştir. Sonuç olarak kompozit malzemelerin sertliğinin, ağırlıkça %4 TiC ilavesine kadar arttığını, bunun ötesinde azaldığını bildirmişlerdir. Aşınma hızı, yük ile lineer olarak artmıştır. Bununla birlikte, kompozitlerin, matris alaşımından daha düşük bir aşınma oranı sergilediğini, bunun da kompozitlerin nispeten daha yüksek sertliğinden kaynaklanmış olabileceğini rapor etmişlerdir. Ağırlıkça %4 TiC ilaveli kompozitin, daha yüksek sertliği ve diğer malzemelere kıyasla nispeten daha büyük kalınlıkta bir transfer tabakası tutma kabiliyeti nedeniyle sürtünme ve aşınma açısından optimum performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Jamwal et al. [70] karıştırmalı döküm işlemi ile SiC-grafit takviyesinin saf bakırın özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hazırlanan numunelerin mikroyapı, fazı, yoğunluğu, sertliği ve aşınma oranını incelenmiştir. X-ışını kırınımı, takviye ile matris arasında ara yüzey bağları sonucunda ara faz oluşumunun olmadığını ortaya çıkarmışlardır. Yumuşak yapısından dolayı grafit ilavesi ile sertliğin azaldığı tespit etmişlerdir. Ağırlıkça %5 takviye içeren kompozit minimum aşınma oranı ve maksimum korozyon direnci gösterdiğini bildirmişlerdir. Mevcut kompozitin, özellikle ısı eşanjörlerinde termal yönetim uygulamaları için faydalı olacağını rapor etmişlerdir.

Chmielewski et al. [71] sıcak presleme (HP) ve kıvılcım plazma sinterleme (SPS) teknikleri kullanarak elde ettikleri bakır-silisyum karbür kompozitlerinin mikro yapısı ve termal özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Mikroyapısal analiz sonucunda, SPS işleminde sinterlenmiş kompozitlerin durumunda daha iyi bir yoğunlaşma görüldüğünü bildirmişlerdir. TEM incelemeleri sonucunda, metal-seramik sınırına yakın bölgede metalik matris alanında silikon varlığını ortaya çıkarmışlardır. Cu-SiC arayüzünde, malzemelerin termal iletkenliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olan sıcak presleme yöntemiyle elde edilen kompozitlerin önemli ölçüde kusurlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Chen et al. [72] sıcak haddeleme yöntemini ile saf bakır tozu matris materyali ve B₄C parçacık olarak parçacık takviyesi kullanarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Hazırlanan B₄C/Cu matris kompozitlerinin mikroyapı morfolojisi, faz ve mekanik özelliklerini test analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre; B₄C/Cu matris kompozitlerinde, B₄C parçacıklarının Cu matrisinde homojen bir şekilde dağıldığını ve B₄C partikülü ile Cu matrisi arasındaki arayüzün iyi bir şekilde bağlandığını bildirmişlerdir. Ayrıca kompozit malzemelerdeki B₄C parçacıkların artmasıyla gerilme

mukavemetinin arttığını, hacimce %5 takviye içeren numunenin en iyi gerilme mukavemetini (326 MPa) ve en iyi uzamayı (%5,5) sergilediğini rapor etmişlerdir.

Balalan and Gulan [73] toz metalürjisi ile sıcak presleme yöntemini kullanarak yaptıkları bir çalışmada bakır içerisine farklı oranlarda (ağırlıkça %1,5-3-4,5-6) B₄C ilave ederek ve ayrıca %13 Al ilave ederek bakır matrisli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Deneyler sonucunda, B₄C içeriğinin artmasıyla bağlı yoğunluk değerlerinin azaldığını ve nispeten etkili bir bağlanma sağlandığını bildirmişlerdir. Ayrıca üretilen numunelerde homojen bir dağılım sağlandığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, Al ilavesi ile Cu-Al matrisli numunelerin sertliğinde ve eğilme mukavemetinde önemli artışlar olduğunu rapor etmişlerdir.

Akbarpour et al. [74], hibrit Cu/SiC-CNT nanokompozit üretmek ve bakırın mikroyapısını, sertliğini, sürtünmesini ve korozyon davranışını iyileştirmek için pul toz metalürjisi ve kıvılcım plazma sinterleme tekniği kullanmışlardır. Mikroyapısal karakterizasyonda, SPS işlemi sırasında matris tane büyümesinin azaldığını ve hibrit donatıların eklenmesi ve homojen dağılımı ile düşük açılı tane sınırlarının arttığını bildirmişlerdir. Bakır matrisine gömülü takviyelerin, yerel stres/gerilme konsantrasyonuna ve bakır parçacıklarının sertleşmesinde artışa neden olduğunu, bunun da tane boyutunda ~%26 azalma (419'dan 307 nm'ye ortalama tane boyutu değişikliği) ve sertlikte ~%55 iyileşmeye neden olduğunu tespit etmişlerdir. Hibrit SiC ve CNT takviyelerinin eklenmesi, bakırın aşınma oranını ve sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. Uygulanan 20 N kuvvette aşınma izi genişliği ve ortalama sürtünme katsayısının, kompozit için güçlendirilmemiş bakıra göre sırasıyla ~%17, %79 ve ~%54 oranında azaldığını rapor etmişlerdir.

Li et al. [75], nano-karbon takviyeli Cu/Ti₃SiC₂/C nanokompozitlerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Grafen nano plakaların (GNP'ler) içeriğindeki değişikliğin, toplam içeriği ve çok duvarlı karbon nano tüplerinin öncülüğünde nano kompozitlerin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerinde çok küçük bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Mikroskobik analizler sonucunda grafen nanoplateletlerin ve çok duvarlı karbon nanotüplerin ilavesinin, nanokompozitlerin aşınma direncini artırmaya yardımcı olduğunu ifade etmişlerdir.

Schubert et al. [76], bakır/silisyum karbür ve bakır/elmas kompozitlerini toz metalurjisi ile üretmişlerdir. Kompozitlerin bağlanma mukavemeti ve termo-fiziksel özelliklerinde iyileştirmeler için arayüz reaksiyonlarını kontrol edip SiC tozları üzerinde buharla biriktirilmiş bir molibden kaplama yapmış ve küçük karbür oluşturmaları, örn. X-Cr, B, Cu-elmas kompozitlerde ara yüzey bağlanmasını geliştirmişlerdir.

Dos Santos et al. [77], farklı oranlarda üretilen Cu-Mo-Ni kompozitlerini 1120 ve 1280 °C sıcaklıklarda sinterleyerek yoğunluk ve gözenek morfolojisini geliştirmişlerdir. Yüksek sinterleme sıcaklığının metalik matrisin bileşimsel homojenliğini arttırdığını, mikroyapının azalan miktarda Ni-ostenit içeren bir ferrit, perlit ve martensit karışımından evrimleştiğini vurgulamışlardır.

Uzun et al. [78], toz metalurjisi yöntemi kullanarak Cu matrisi içerisine farklı oranlarda CrC ilave ederek kompozit bir malzeme üretmişlerdir. Yaptıkları SEM incelenmesinde, eş eksenli tanelerden oluşan Cu matrisi içerisinde CrC fazının dengeli dağıldığını gözlemlemişlerdir. Sertlik ölçümlerinde ise CrC oranı arttıkça buna bağlı olarak sertliğin arttığını tespit etmişlerdir.

Okumuş and Turgut [79], metal-matris kompozit plakaları, farklı düzlem içi yönelimlere sahip olan ve belirli bir istifleme sırasında birbirine bağlayarak tek yönlü olarak güçlendirilmiş, lifli kompozit tabakalardan oluşturmuşlardır. Delik büyüklüğüne göre kritik yük, kat laminasyon geometrisi, plaka kalınlık oranı, yükleme tipleri ve malzeme modül oranı üzerindeki etkileri araştırmışlardır.

Abd El Aal [80], yaptığı bir çalışmada mikro boyutlu Cu ve Cu-SiC toz numunelerinin toz metalurjisi ve ardından sinterleme veya HPT (yüksek basınçlı burulma) ile konsolidasyonunun mikro yapının gelişimi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmış ve mikrosertlik, yoğunluk gibi mekanik özelliklerin iyileştiğini bildirmiştir.

Abd-Elwahed and Meselhy [81], tarafından yapılan bir çalışmada toz metalurjisi ile Cu-ZrO₂/GNPs hibrit nanokompozitlerin özellikleri araştırılmıştır. Cu-ZrO₂/GNPs hibrit nanokompozitlerin geliştirilmesinde üç farklı GNP içeriği kullanılmıştır. Grafen içeriğinin hibrit nanokompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkisi de detaylı olarak araştırılmıştır. Mikroyapıların analizi, termal ve mekanik özellikler,

mekanik ve termal özelliklerin grafen ağırlık yüzdesine önemli ölçüde bağımlı olduğunu ortaya koymuştur.

Akbarpour et al. [82], yaptıkları bir çalışmada nanokristalin Cu ve Cu-SiC kompozit tozları hazırlamak için yüksek enerjili mekanik öğütme kullandıklarını bildirmişlerdir. Tozları sıcak preslemiş ve konsolide edilmiş malzemelerin mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. SiC nanopartiküllerinin %2'si ile güçlendirilmiş sıcak preslenmiş bakırın sıkıştırma akma gerilimi 630 (± 12) MPa kadar olduğu bildirilmiştir. Kompozitin mekanik özelliklerindeki artışın, nano yapıli taneciklerin ve SiC nano partiküllerinin homojen dağılımının sonucu olduğu tespit edilmiştir. SiC nano partikülleri, imalat işlemi sırasında tane büyümesinin engellenmesi, gelişmiş dislokasyon sertleşmesi ve muhtemelen Orowan mekanizması ile mekanik özellikleri etkilediği bildirilmiştir.

Bazarnik et al. [83] yaptıkları bir çalışmada Cu, Cu-10SiC ve C-20SiC numuneleri SPS tekniği ile başarılı bir şekilde konsolide etmişlerdir. Bununla birlikte, Cu matrisi ve SiC parçacıkları arasındaki arayüzlerde gözenekler ve boşlukların kaldığı bildirilmiştir. HPT ile daha fazla işlem, kalıntı gözenekliliği önemli ölçüde azaltmanın yanı sıra Cu matrisi ve SiC parçacıkları arasındaki bağlanmayı artırdığı bildirilmiştir. SiC nanopartiküllerinin varlığı ve Cu matrisinde rafine edilmiş bir mikro yapı, Cu ve Cu-SiC örneklerindeki mikro sertlikte bir artışa katkıda bulunduğunu bildirilmiştir.

Cao et al. [84] yaptıkları bir çalışmada grafit ve tungsten disülfid içeren bakır matrisli kompozitler, sürtünme ve aşınma davranışlarını araştırmak için 1-5 N'luk yükler altında hazırlamış ve test etmişlerdir. Cu-24 hacim WS_2 kompozitin, aynı hacim fraksiyonu katı yağlayıcıya sahip Cu-24 hacim grafit kompozite kıyasla daha yüksek bir mekanik performans ve daha düşük aşınma oranı sunduğunu bildirilmiştir.

Chen et al. [85] yaptıkları bir çalışmada Cr_xO_y -CNT hibrit ile güçlendirilmiş saf Cu matris kompoziti toz metalurjisi ile üretmişlerdir. Mikroyapısal analizde, arayüzde Cu_2O nanopartiküllerinin oluşumunun arayüzey bağına katkıda bulunduğunu ve hacimce %1,0 hibrit takviyenin Cr_xO_y -CNT/Cu kompoziti üzerinde, 402,6 MPa'lık mükemmel nihai mukavemet sergilediği bildirilmiştir.

Gill and Kumar [86] yaptıkları bir çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle Cu-Mn kompozit elektrotları üretmiş ve mikrosertlik için optimum proses koşullarında işlenen yüzey sementit oluşumuna bağlı olarak %93,7 iyileşme gösterdiğini ve R_a değeri 3,11 μm olan yüzey pürüzlülüğü elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Karakulak [87] yaptığı bir çalışmada farklı oranlarda titanyum içeren toz metalurjik malzemeleri sıcak presleme yöntemiyle sinterleyerek üretilmiş ve üretilen malzemelerin yoğunlukları, mikroyapısal özellikleri, sertlikleri ve aşınma dayanımlarını incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda titanyum partikülleri etrafında farklı katmanlardan oluşan intermetalik fazlar oluştuğunu belirtmiştir. Oluşan intermetaliklerin malzemenin sertliğini ve aşınma dayanımını arttırdığını tespit etmiş. Ayrıca aşınmış yüzeylerde yapılan incelemeler malzemenin sertliğinin değişmesiyle birlikte aşınma mekanizmasında değiştiğini bildirmiştir.

Avishan et al. [88], Cu-Ni-Mo esaslı TM parçaların işlenebilirliği üzerinde östemperleme sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. 10x10x55 mm boyutlarında olan deney parçalarını 300, 340 ve 375 °C’ de östenitleştirme işlemi sonrası; 100 dakika boyunca 870 °C’de östemperlemeye tabi tutmuşlardır. İşlenebilirliği değerlendirmek için delme testleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ölçümlerini yapmışlardır. Düşük sıcaklıktaki östemperleme mikroyapının ince beynitli ferrit ve düşük karbonlu östenit içermesine yol açmış ve sertliğin artmasına neden olmuştur. 375 °C’de yapılan östemperlenmiş parçalar kalın östenit tabakası ihtiva ettiğinden dolayı düşük sıcaklıklarda yapılanlara göre işlenebilirliğinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Daymi et al. [89], yaptıkları çalışmada; Ti-6Al-4V alaşımı kullanarak talaş morfolojisi ve kesme kuvvetlerinin üzerine farklı kesme hızlarının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 50 ve 250 m/dak arasında değişen kesme hızları, 0,1 ve 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 1 mm kesme derinliği kullanmışlardır. İşlemleri Sandvik TNMG 160408 PM 4005 kaplamalı kesici uç kullanarak kuru ortamda yapmışlardır. 50 m/dak kesme hızında sürekli talaş, 100 m/dak arasında değişen hızlarda kesintili talaş ve 125 m/dak üzerindeki hızlarda tırtıklı veya kayma talaş oluştuğunu ortaya koymuşlardır. İş parçasının temperlenmesinden kaynaklanan ısıl yumuşama ve sertleşme arasındaki farklılıklardan dolayı kesintili talaşın meydana geldiğini açıklamışlardır. Yüksek kesme hızlarında

sıcaklığın stabilize olması ve sürtünmenin sınırlı olması nedeniyle kesme kuvvetlerinde düşüş kayıt etmişlerdir.

Ponnuvel and Senthilkumar [90], alüminyum-grafit-bor karbür metal matrisli kompozitin işlenebilirlik davranışını, tel kesme elektrik deşarjlı işleme (WEDM) yöntemi ile araştırmışlardır. Deneyleri yanıt yüzeyi metodolojisinin (RSM) merkezi kompozit yüz merkezli tasarımı kullanılarak tasarlamışlar ve etki edirlilik fonksiyonunun uygulanmasıyla çoklu kalite özellikleri, çentik genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranının (MRR) aynı anda optimize etmişlerdir. Deneysel değerlerden, daha düşük bor karbür takviyesi ile daha iyi çıktı tepkilerinin elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Arunkumar et al. [91], kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış alüminyum-silikon karbür-grafit hibrit kompozitin sertliğini ve kesme mukavemetini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu kompozitte Al6061, SiC miktarı ağırlıkça %2,5 ila %10 arasında değişen ve grafit miktarı ağırlıkça %1 ila %4 arasında değişen matris malzemesi olarak kullanmışlardır. Kompozitlerin sertliğinde, kriyojenik işlemde sonra %6-8 oranında artış gözlemlendiği kaydedilmiştir. Ayrıca nihai kesme kuvvetinin, kriyojenik işlemde sonra %2-3 iyileştirme gösterdiğini rapor etmişlerdir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın kompozit üretim aşamaları, mekanik deneyleri ve işlenebilirlik çalışmaları Bingöl Üniversitesi, İnönü Üniversitesi ve Munzur Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri ise Bingöl Üniversitesi ve İnönü Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır.

6.1. Kompozit Malzeme Üretim Süreçleri

Bu çalışmada Cu matrisli, Ti-B-SiC toz partikülleri ile güçlendirilmiş kompozit numuneler üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretim sürecine dair şema Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1. Kompozit malzeme üretim şeması

6.1.1. Matris ve Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Toz Partikülleri

Bu tez çalışmasında, bakır matrisli kompozit malzemeler üretmek amacıyla Nanokar ve Ege Nanotek firmalarından metal toz partikülleri temin edilmiştir. Ana matris olarak kullanılan, yüksek saflık oranına sahip bakırın ortalama toz boyutu $44\ \mu\text{m}$ 'dur. Saf bakırı güçlendirmek için takviye elemanları olarak Ti, B ve SiC tozları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan Ti-B-SiC toz partiküllerinin boyutları ise sırasıyla $44\text{-}1,8\text{-}50\ \mu\text{m}$ 'dur. Kompozit numuneler, farklı oranlarda (ağırlıkça %2-4-6-8) takviye elemanları kullanılarak üretilmiştir. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de deneylerde kullanılan tozların bazı özellikleri ve ağırlıkça oranları görülmektedir.

Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan tozların bazı özellikleri [92]

Tozlar	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime sıcaklığı (°C)	Partikül boyutu (μm)	Saflık (%)
Cu	8,96	1083	44	$\geq 99,90$
Ti	4,54	1668	44	$\geq 99,90$
B	2,34	2180	1,8	$\geq 99,00$
SiC _p	3,21	2730	45-75	$\geq 99,00$

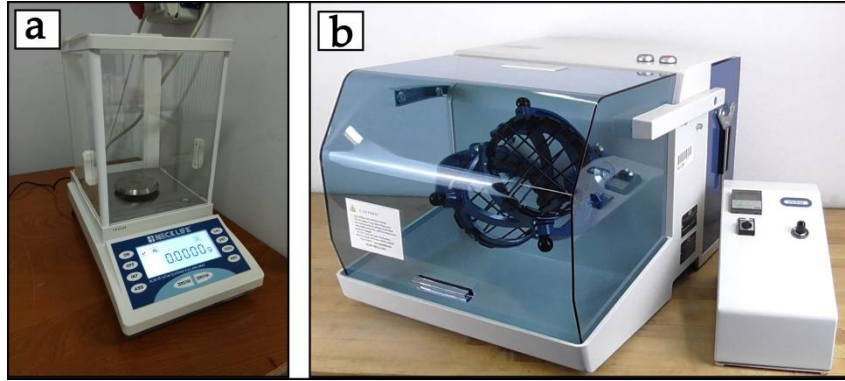
Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan tozların ağırlıkça oranları [92]

Numuneler	Cu oranı (ağ. %)	Ti oranı (ağ. %)	B oranı (ağ. %)	SiC _p oranı (ağ. %)	Numune sayısı (Adet)
Saf numune	100	-	-	-	18
Cu/Ti-B-SiC _p ağ. %2	98	0,50	0,25	1,25	18
Cu/Ti-B-SiC _p ağ. %4	96	1,00	0,50	2,50	18
Cu/Ti-B-SiC _p ağ. %6	94	1,50	0,75	3,75	18
Cu/Ti-B-SiC _p ağ. %8	92	2,00	1,00	5,00	18

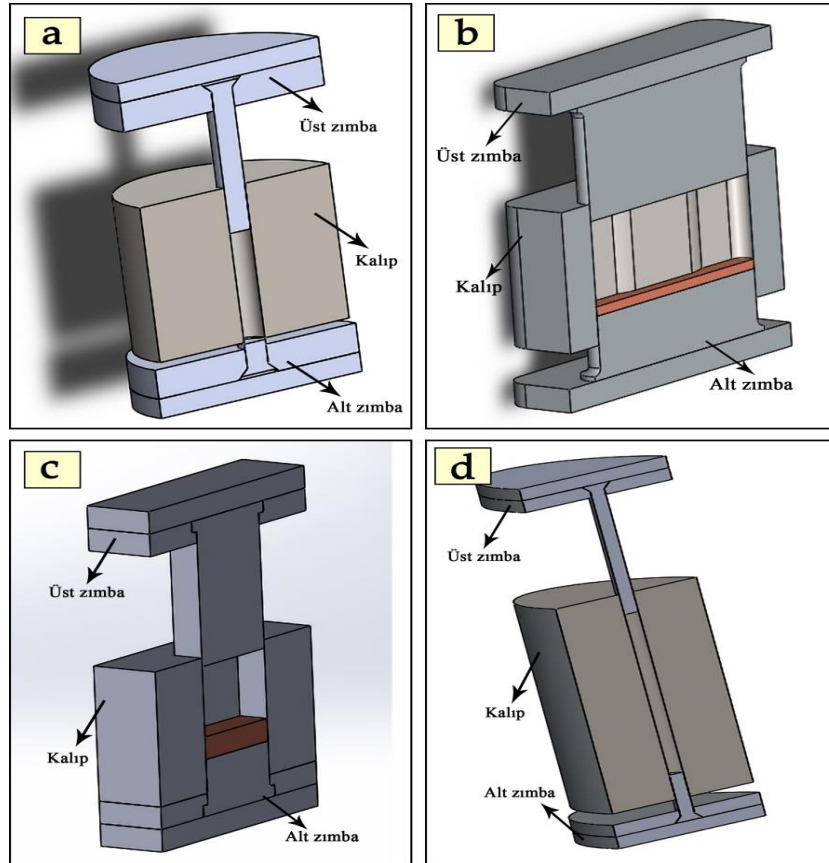
6.1.2. Tozların Karıştırılması ve Kalıp Üretimi

Kompozit üretiminde kullanılacak olan toz partikülleri ilk olarak elektrikli bir fırında yaklaşık $100\ ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kurutma işlemine tabi tutuldu. Kurutulan toz partikülleri Tablo 2'de verilen oranlara göre, $0,01\ \text{mm}$ hassasiyete sahip Necklife FA2004 (Şekil 6.2a) model hassas ölçüm cihazında tartılarak karışım için hazırlanmıştır. Hassas bir şekilde tartılan toz partikülleri bir turbula karıştırıcıda (Şekil 6.2b) 4 saat boyunca karıştırılmıştır.

Toz partiküllerinin hazırlanması sırasında herhangi bir bağlayıcı kullanılmamıştır. Şekil 6.2’de tozların tartılmasında ve karıştırılmasında kullanılan cihazlar görülmektedir.



Şekil 6.2. Tozların tartılmasında ve karıştırılmasında kullanılan; a) Hassas terazi, b) Turbula karıştırıcı



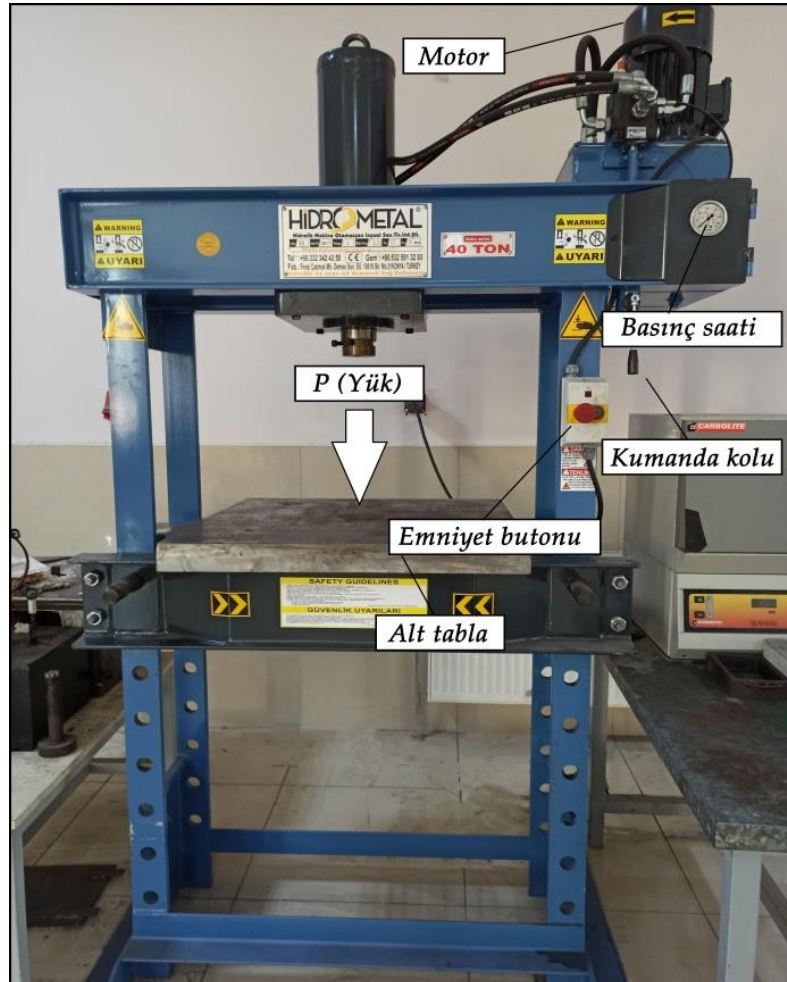
Şekil 6.3. Kullanılan kalıplar; a) Sertlik ve aşınma, b) Çekme, d) Üç nokta eğilme, e) İşlenebilirlik

Karışım tozlarının preste şekillendirilebilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan kalıplar İstanbul ilinde kalıp imalatı yapan özel bir firmaya yaptırılmıştır. AISI D2 takım çeliğinden

Üretilen kalıplar tel erozyon yöntemi ile imal edilmiştir. Sertlik, aşınma, çekme,  nokta eğilme ve işlenebilirlik deney numuneleri için dört farklı kalıp üretilmiştir (şekil 6.3).

6.1.3. Presleme İşlemi

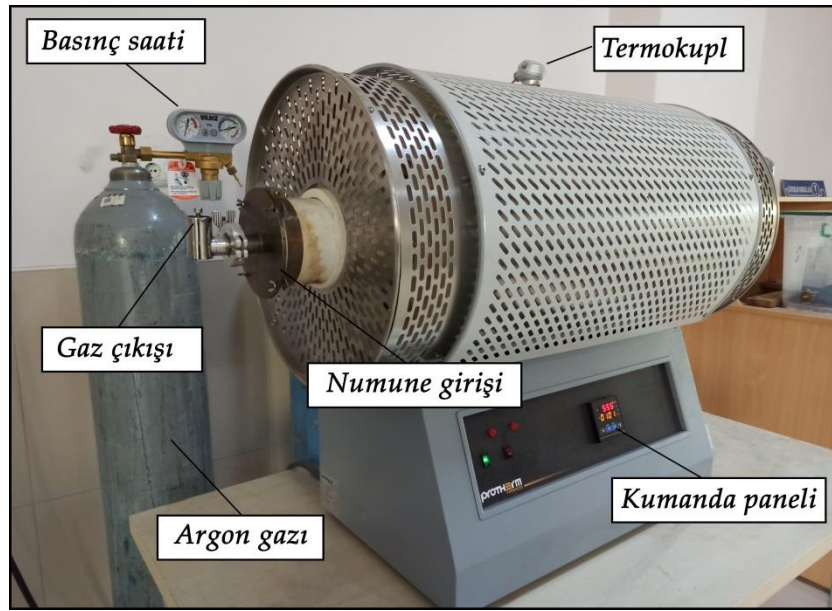
Homojen bir şekilde karıştırılan tozlar farklı deneyler için üretilen kalıplara doldurularak 600 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Presleme işlemi için 40 ton kapasiteli, tek eksenli hidrolik bir pres makinesi kullanılmıştır. Toz partiküllerinin kalıp cidarlarına yapışmasını önlemek ve şekillendirilen numunelerin kolay bir şekilde çıkarılmasını sağlamak amacıyla kalıplar çinko stearat ile yağlanmıştır. şekil 6.4'te tozların sıkıştırılmasında kullanılan pres görülmektedir.



şekil 6.4. Tozların şekillendirilmesinde kullanılan tek eksenli hidrolik pres

6.1.4. Sinterleme İşlemi

Presleme işleminden sonra, şekillendirilen ham numuneler argon gazı eşliğinde Protherm HLF-50 model sinter fırınında dakikada 10 °C ısıtma ve soğutma hızında ortalama 60 dakika boyunca sinterleme yapılmıştır. Optimum sinterleme sıcaklığının belirlenmesi amacıyla sertlik ve aşınma deney numuneleri üç farklı sıcaklıkta (950-1000-1050 °C) sinterlenmiştir. Tüm deney numuneleri oda sıcaklığında ve aynı deney koşullarına tabi tutulmuştur. Şekil 6.5'te ısıtma işlemde kullanılan sinter fırını görülmektedir.



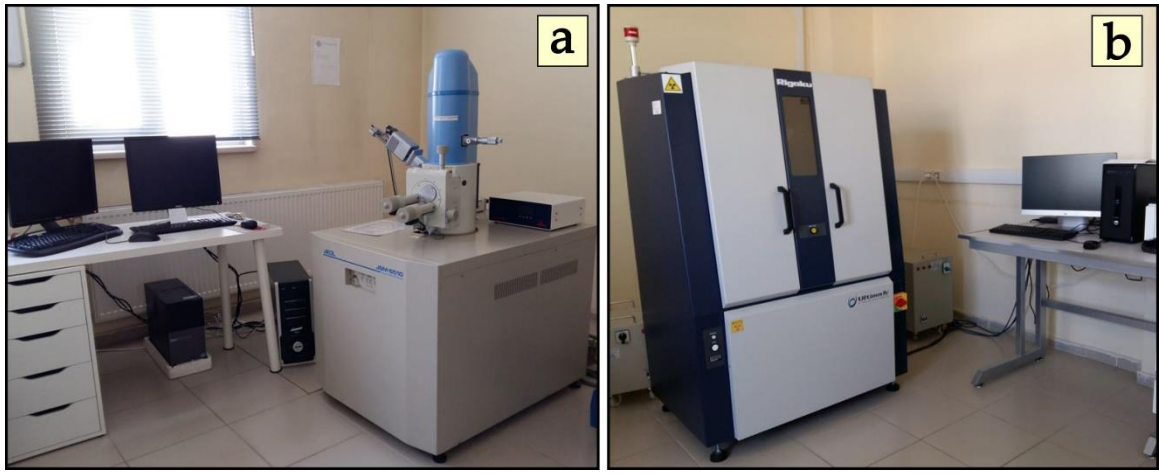
Şekil 6.5. Isıl işlem uygulanan sinter fırını

6.1.5. Numune Hazırlama

Sinterleme işlemi uygulanan numunelerin yüzeyleri mikroyapı ve sertlik analizleri için P240-P400-P600-P800-P1000-P1200 grid silisyum karbür zımpara kağıtları ile verilen sırayla zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler etil alkol ile temizlendikten sonra parlatma çuhasında 3 µm elmas süspansiyon ile cila işlemi yapılarak parlatılmıştır. Parlatılan numunelere, tane sınırlarını görmek amacıyla %20 nital solüsyonu ile yüzey dağlama işlemi yapılmış ve daha sonra yüzeyler etil alkol ile temizlenmiştir.

6.2. Mikroyapı Analizi

Mikroyapı analizleri için hazırlanan numuneler Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezinde analiz yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin iç yapıları hakkında bilgi edinmek amacıyla JEOL JSM 6510 Taramalı Elektron Mikroskop kullanılarak SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Kompozitlerin içyapılarında oluşan fazları tespit etmek amacıyla RIGAKU ULTIMA IV X-Ray Kırınım Spektrometresi (X-RD) kullanılarak X-RD analizleri yapılmıştır. Şekil 6.6'da mikroyapı ve faz analizlerinde kullanılan cihazlar görülmektedir.



Şekil 6.6. Mikroyapı analizinde kullanılan cihazlar; a) SEM-EDS, b) X-RD

6.3. Mekanik Deneyler

6.3.1. Yoğunluk Tespiti

Farklı donatı oranlarında ve farklı sinterleme sıcaklıklarında üretimi gerçekleştirilen Cu/Ti-B-SiC kompozitlerinin yoğunlukları Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Yoğunluk değerlerinin hesaplanmasında aşağıda görülen denklemler (Denklem 6.1-6.2-6.3) kullanılmıştır.

$$\rho_{\text{teorik}} = \left[(W_{\text{Cu}} \cdot \rho_{\text{Cu}}) + (W_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{Ti}}) + (W_{\text{B}} \cdot \rho_{\text{B}}) + (W_{\text{SiCp}} \cdot \rho_{\text{SiCp}}) \right] \quad (6.1)$$

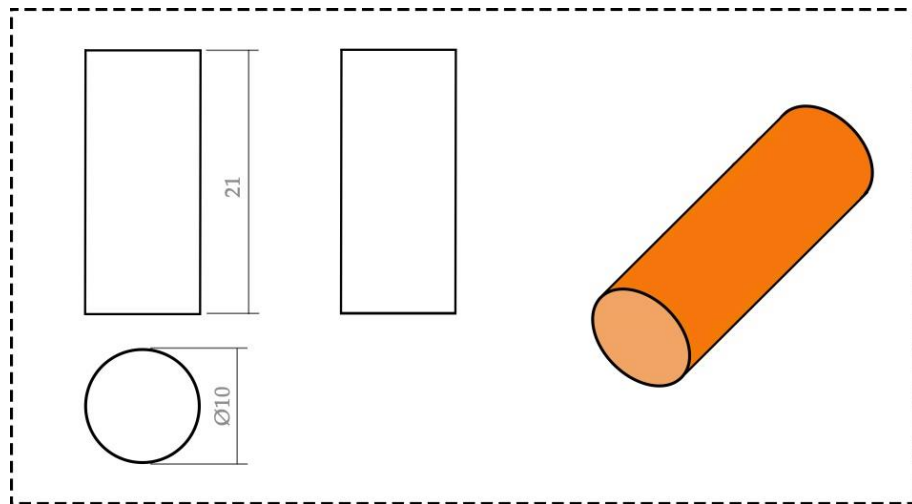
$$\rho_{\text{deneysel}} = \left[m_{\text{hava}} / (m_{\text{hava}} - m_{\text{su}}) \right] \cdot \rho_{\text{su}} \quad (6.2)$$

$$\rho_{\text{bağıl}} = \left(\rho_{\text{deneysel}} / \rho_{\text{teorik}} \right) \cdot 100 \quad (6.3)$$

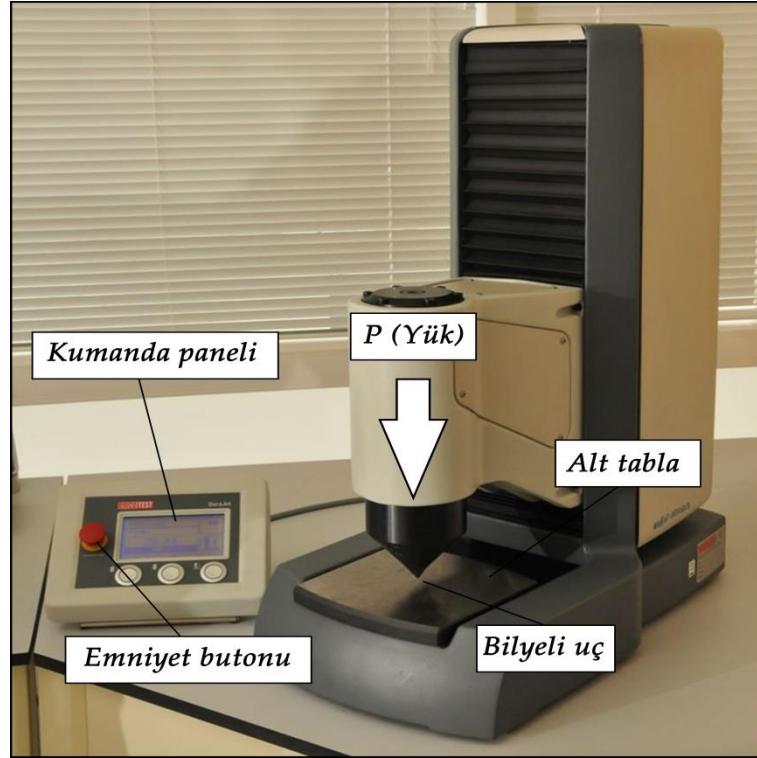
Burada W (%), tozların ağırlıkça yüzde oranlarını; ρ (gr/cm³), yoğunluğu; m_{hava} (gr), numunelerin havadaki ağırlığını; m_{su} (gr), numunelerin sudaki ağırlığını ifade etmektedir. Üretilen kompozitlerin farklı oranlarda ve farklı sinterleme sıcaklıklarındaki yoğunluk değişimleri incelenmiştir.

6.3.2. Sertlik Deneyi

Sertlik deneyi için üretilen numunelerin makrosertlik değerlerini tespit etmek amacıyla Brinell sertlik metodu kullanılmıştır. Makrosertlik analizleri Munzur Üniversitesi, Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan EMCO TEST Durajet marka sertlik cihazında yapılmıştır. Deneylerde hata payını azaltmak amacıyla her numuneden 5 adet sertlik değeri kayıt altına alınmıştır. Tüm sertlik ölçümlerinde yüzeyleri temizlenmiş ve parlatılmış olan her numuneye 10 saniye boyunca 10 kg ön yük uygulanmıştır. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de sertlik numunesi ile sertlik ölçüm cihazına ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 6.7. Makrosertlik testinde kullanılan silindirik numune ve ölçüleri



Şekil 6.8. Makrosertlik analizi yapılan sertlik cihazı fotoğrafı

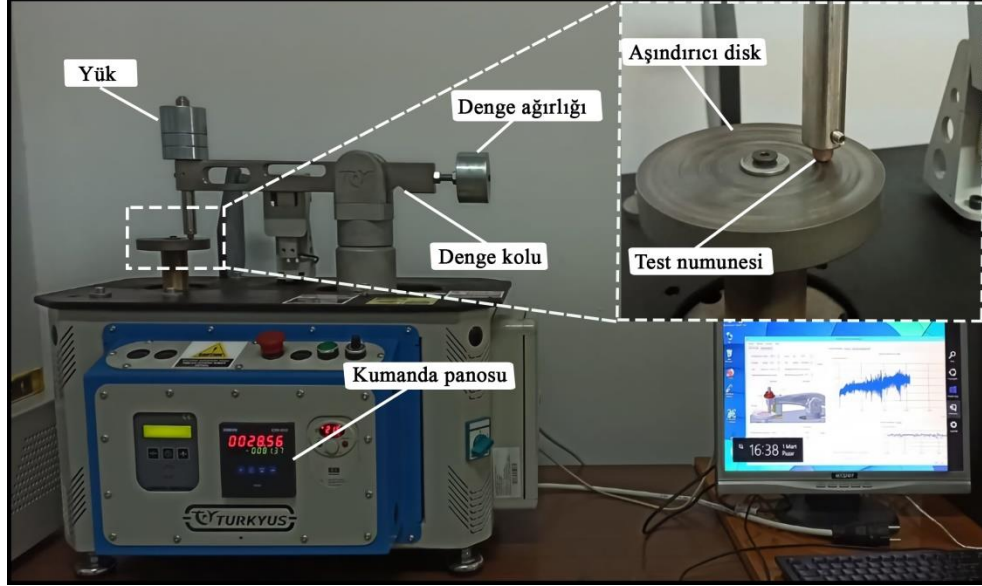
Brinell sertlik metodu ile tatbik edilen yükün tespiti için aşağıdaki denklem (Denklem 6.4) kullanılmaktadır. Burada P (kgf), uygulanacak kuvveti; C, numune malzemesine göre değişen sabiti; D (mm), ise kullanılacak bilye çapını ifade etmektedir. Denklemde kullanılan sabit katsayı (C); bakır, pirinç ve bronz malzemeler için 10 olarak kabul edilmektedir. Bilye çapı 2,5 mm olarak belirlenmiştir. Denklem 6.4'e göre yapılan hesaplama sonucunda sertlik deneyi için uygulanacak olan yük 62,5 kgf olarak tespit edilmiştir. Böylece her numune için 5 farklı bölgeden alınan makrosertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak son test sonuçları kayıt altına alınmıştır.

$$P = C \cdot D^2 \quad (6.4)$$

6.3.3. Aşınma Deneyi

Aşınma testi için üretilen silindirik test numunelerinin uç kısımları, aşınma ve sürtünme davranışlarının tespit edilmesi amacıyla konik bir hale getirilmiştir. Aşınma testleri, oda sıcaklığında bir laboratuvar ortamında (21–26 °C ve %55–75 bağıl nem) kuru kayma koşulları altında yapılmıştır. Aşınma testleri, İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği

bölümü laboratuvarında bulunan TURKYUS marka bir tribo test cihazında kuru kayma koşulları altında pin-on-disc yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.9'da aşınma test cihazına ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 6.9. TURKYUS marka pin-on disk aşınma cihazı

Aşınma testinde kullanılan aşındırıcı disk, AISI D2 kalite takım çeliği kullanılarak tel erozyon yöntemi ile üretilmiş ve yüzey nitrüleme ile sertleştirilmiştir. Her bir aşınma numunesine kuru kayma koşulları altında 2000 m aşınma mesafesi ve 1,5 m/s aşınma hızı parametreleri uygulanmıştır. Farklı oranlarda ve farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen her deney numunesine 15, 20 ve 25 N'luk yükler uygulanmıştır. Sürtünme kuvvetleri, aşınma testi esnasında tribo test cihazına bağlanan bir gerinim ölçer ile belirlenmiştir. Ortalama sürtünme katsayıları ve spesifik aşınma oranları (SWR-Specific Wear Rate) aşağıdaki denklemlere (Denklemler 6.5-6.6-6.7) göre hesaplanmıştır.

$$\mu = F / N \quad (6.5)$$

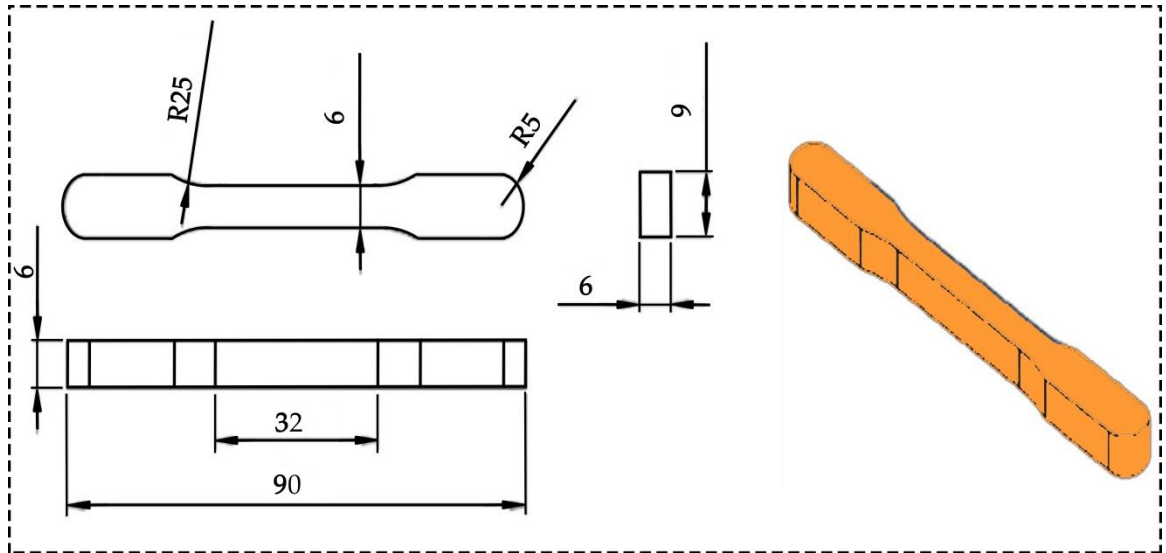
$$V_L = \Delta_m / \rho \quad (6.6)$$

$$SWR = V_L / (N \cdot X) \quad (6.7)$$

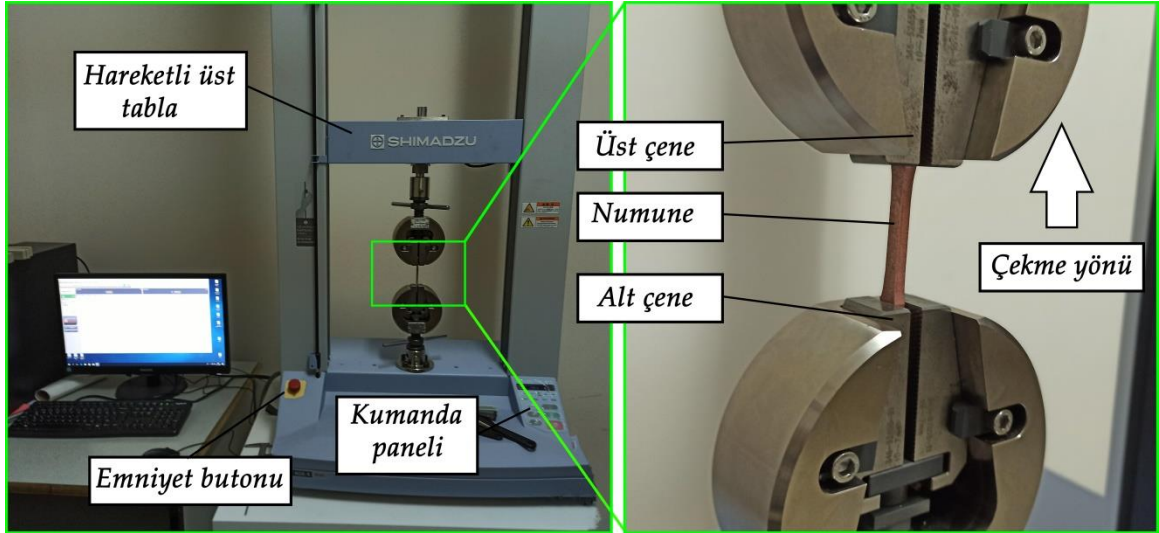
Burada μ , ortalama sürtünme katsayısını; F (N), sürtünme kuvvetini; N (N), aşınma deneyi esnasında uygulanan yük miktarını; V_L (mm³), toplam hacim kaybını; Δ_m (gr), kütle kaybını; ρ (gr/cm³), yoğunluğu; X (m), aşınma mesafesi ve SWR (mm³/Nm), spesifik aşınma oranını temsil etmektedir. Ayrıca uçları konik hale getirilen numunelerin aşınma çap görüntüleri elde edilmiştir.

6.3.4. Çekme Deneyi

Çekme deneyi için hazırlanan numuneler mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 100 kN çekme ve basma kapasitesine sahip SHIMADZU AGS-X marka test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Testler oda sıcaklığında 1 mm/dak çekme hızında yapılmış olup hata payını azaltmak amacıyla her farklı oran için deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Ayrıca çekme deneyinden sonra numunelerin kırık yüzeylerinde oluşan yapıları incelemek amacıyla SEM fotoğrafları alınarak fraktografik analizler yapılmıştır. Şekil 6.10'da Metal Powder Industries Federation standartlarına uygun şekilde hazırlanan çekme test numune ölçüleri görülmektedir. Şekil 6.11'de çekme test cihazı görülmektedir.



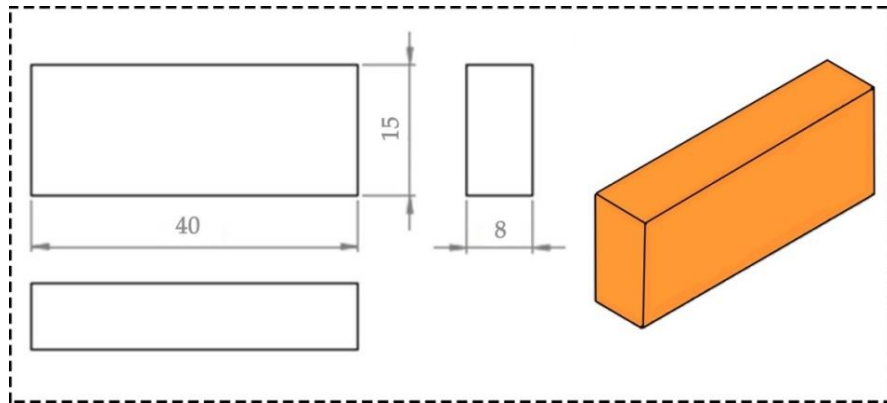
Şekil 6.10. Üretilen çekme numunesi ve boyutları



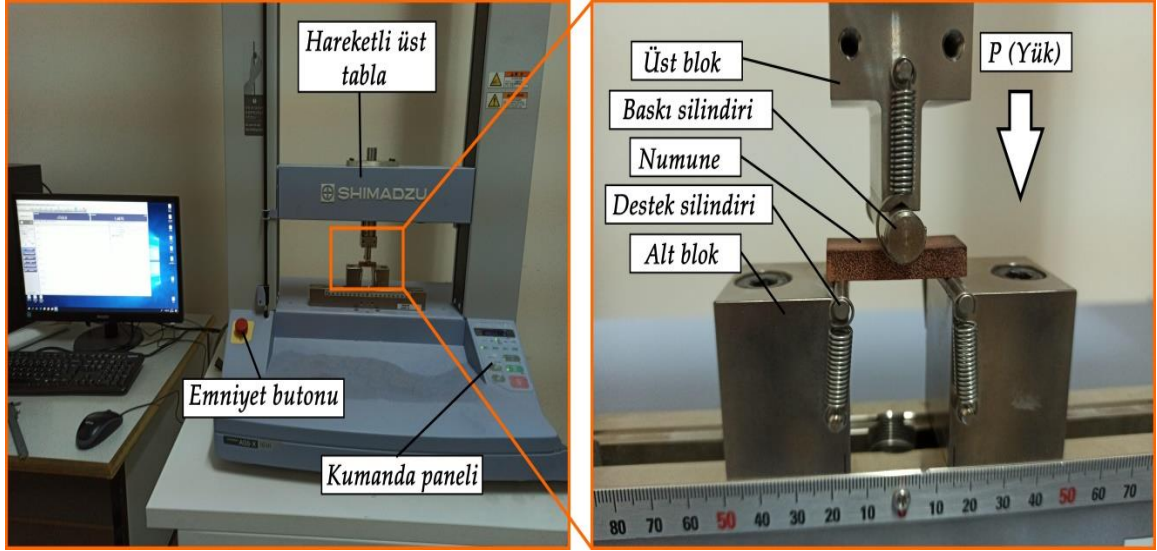
Şekil 6.11. SHIMADZU AGS-X çekme test cihazı

6.3.5. Üç Nokta Eğilme Deneyi

Metal Powder Industries Federation standartlarına uygun olarak üretilen üç nokta eğilme test numunesi ve ölçüleri Şekil 6.12’de görülmektedir. Üç nokta eğilme deneyleri, İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 100 kN çekme ve basma kapasitesine sahip SHIMADZU AGS-X marka test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Testler oda sıcaklığında 1 mm/dak basma hızında yapılmış olup hata payını azaltmak amacıyla her farklı oran için deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Ayrıca üç nokta eğilme deneyinden sonra numunelerin kırık yüzeylerinde oluşan bölgeler SEM analizleri ile incelenmiştir. Şekil 6.13’te üç nokta eğilme test cihazı görülmektedir.



Şekil 6.12. Üç nokta eğilme test numunesi ve boyutları



Şekil 6.13. SHIMADZU AGS-X üç nokta eğilme cihazı

6.4. İşlenebilirlik Deneyleri

Bu çalışmanın işlenebilirlik deneyleri Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan bilgisayar kontrollü CNC torna tezgahında yapılmıştır. Talaşlı imalat işlemleri sonrasında gerekli analizler ise Bingöl Üniversitesi, Merkezi laboratuvar ve araştırma merkezinde yapılmıştır.

6.4.1. CNC Torna Tezgahı

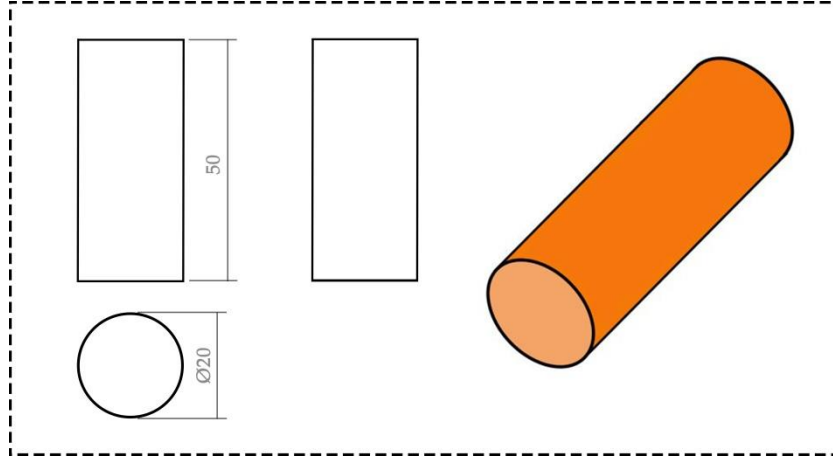
İşlenebilirlik deneyleri taretli yatay tipte Goodway GLS-200 CNC torna tezgahında yapılmıştır. Tüm deney aşamaları kuru kesme koşulları altında yapılmıştır. Üretim sürecinde yüzeyde meydana gelen kalıntı ve yükseklik farklarından kesici takımı korumak amacıyla 1mm kesme derinliğinde yüzey tabakası kaldırılmıştır. Şekil 6.14'te işlenebilirlik deneylerinin yapıldığı bilgisayar kontrollü yatay torna tezgahı görülmektedir. Şekil 6.15'te üretilen işlenebilirlik numunesi ve ölçüleri görülmektedir. Tablo 6.3'te Goodway GLS-200 CNC torna tezgahının bazı özellikleri görülmektedir.



Şekil 6.14. Goodway GLS-200 CNC torna tezgahı

Tablo 6.3. Goodway GLS-200 CNC torna tezgahının bazı özellikleri

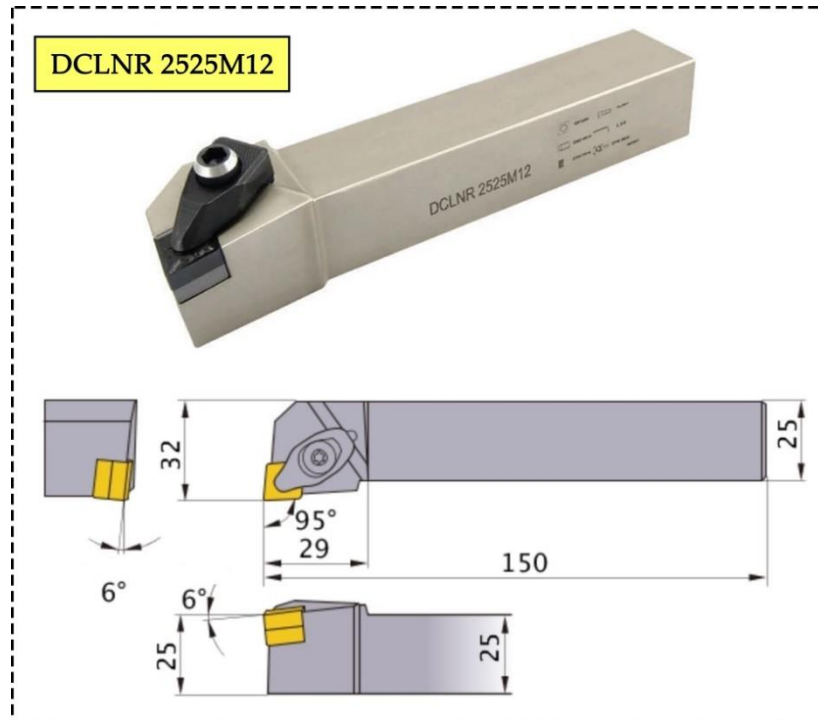
CNC Torna tezgahı	Goodway GLS-200
Maksimum Çevirme Çapı	Ø 400 mm
Maksimum Tornalama Çapı	Ø 230 mm
Standard Ayna Ebadı	6"/ 8"
Maximum Tornalama Boyu	600 mm
Maksimum Ayna Hızı	6000 rpm / 4500 rpm
Voltaj	AC 200/220 +10% -15 %3 faz
İş Mili Hızları	60 ~ 6000 rpm / 45 ~ 4500 rpm
İş Mili motoru	Fanuc 11/15 KW Motor
Taret Tahriği	Hidrolik
Makina ağırlığı	3500 kg



Şekil 6.15. İşlenebilirlik deney numunesi ve ölçüleri

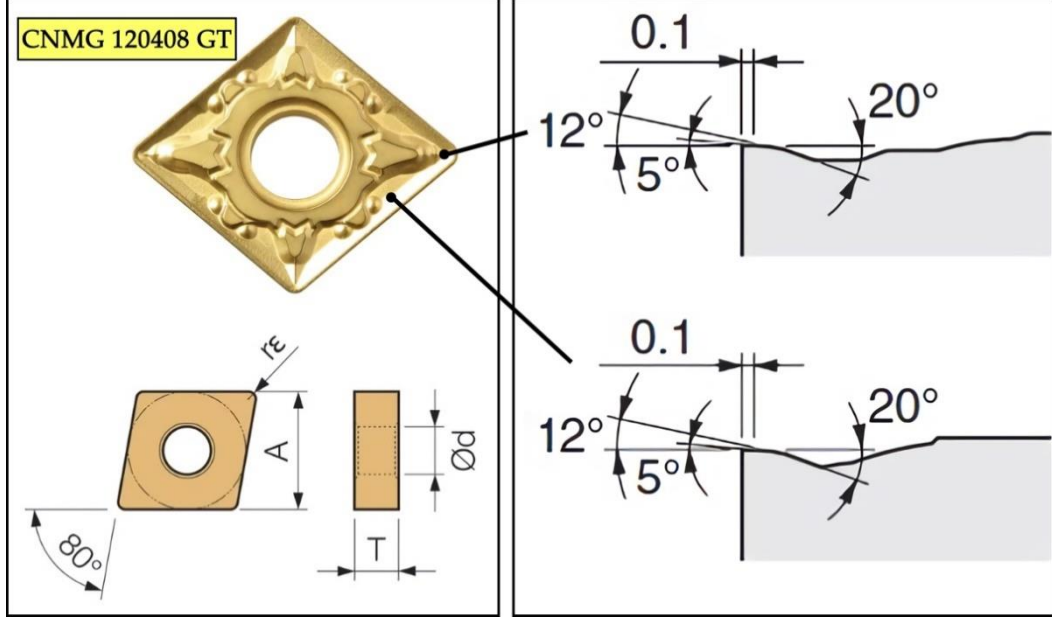
6.4.2. Takım Tutucu ve Kesici Takım

Tornalama işlemi için değiştirilebilir uçlu tornalama takımları kullanılmıştır. Bu takım, takım tutucu olarak ISO 3685'te belirtilen özelliklerde, testlerin yapılacağı CNC torna tezgahına uygun olarak DCLNR2525M12 kodlu takım tutucu seçilmiştir. Şekil 6.16'da takım tutucuya ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 6.16. Tornalama işleminde kullanılan DCLNR2525M12 kodlu takım tutucu [93]

Kesici takım olarak CNMG 120408 GT kodlu kesici uç kullanılmıştır. Şekil 6.17’de kesici uç olarak kullanılan takım görülmektedir. Tablo 6.4’te CNMG 120408 GT kodlu kesici takıma ait özellikler görülmektedir.



Şekil 6.17. CNMG 120408 GT kodlu kesici uç [56]

Tablo 6.4. CNMG 120408 GT kodlu kesici uca ait bazı özellikler [56]

ISO numarası	CNMG 120408 GT
Kesici takım yönü	Nötr
Kesici takımın kalınlığı	4,76 mm
Kesici takım köşe yarıçapı	0,8 mm
Talaş kırıcı kodu	GT
Talaş kırma tarzı	Kalıplı, iki tarafta
Boşluk açısı	0 °
Kesici takım malzemesi	Karbür
Kaplama malzemesi	TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN
Dahili açısı	80 °
Bağlanma şekli	Vidalı
Üst yüzey	Negatif
Şekil	Eşkenar dörtgen
Kesici kenar sayısı	4

6.4.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Tornalama işlemleri sonrasında numunelerin işlenen yüzeylerdeki yüzey pürüzlülüğünü ölçmek amacıyla TIME 3200 marka pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Bu cihaza ait fotoğraf Şekil 6.18’de görülmektedir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4288 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümü sırasında örnekleme uzunluğu 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Hata payını azaltmak amacıyla her numuneden beş kez ölçüm alınmış ve sonuçlar bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) belirlenmiştir. Tablo 6.5’te TIME 3200 marka yüzey pürüzlülüğü cihazının teknik özellikleri görülmektedir.



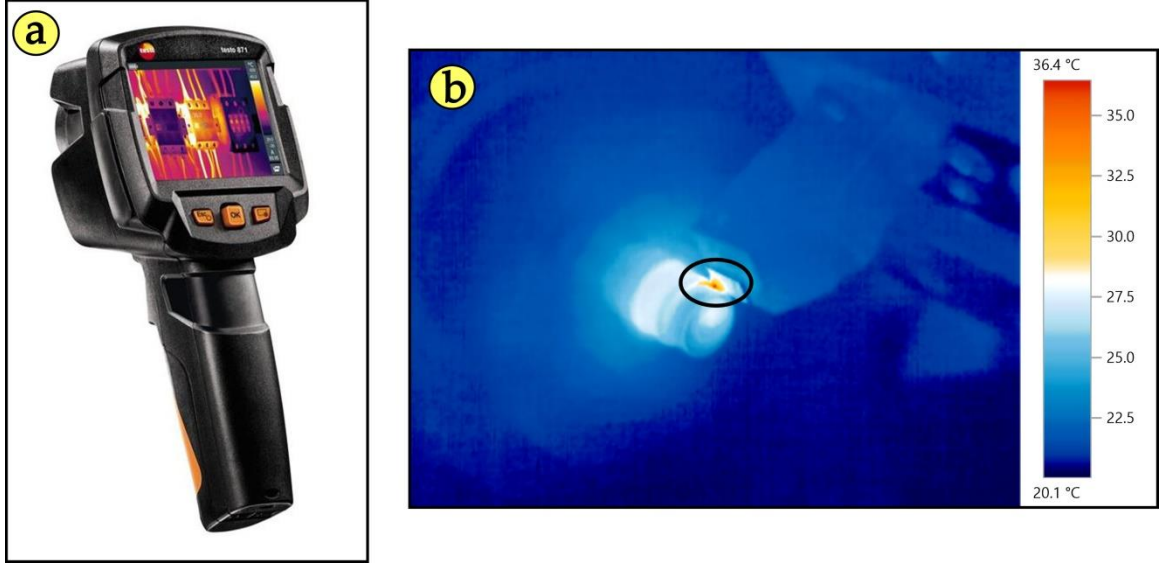
Şekil 6.18. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Tablo 6.5. TIME 3200 marka yüzey pürüzlülüğü cihazının teknik özellikleri

Parametreler	Oran
Limit	0,25 mm
n*limit	51
Standart	ISO
Oran	$\pm 80 \mu\text{m}$
Filtre	RC
Ekran	Ra

6.4.4. Kesme Sıcaklığı

CNC torna tezgahında yapılan işlenebilirlik deneyleri sırasında oluşan kesme sıcaklıklarını belirlemek amacıyla Testo 871 marka termal kamera kullanılmıştır. Şekil 6.19'da kesme sıcaklıklarının tespitinde kullanılan termal kamera ve örnek bir fotoğraf görülmektedir. Tablo 6.6'da termal kameranın teknik özellikleri görülmektedir.



Şekil 6.19. Kesme sıcaklığı tespitinde kullanılan; a) Testo 871 termal kamera, b) Termal görüntü

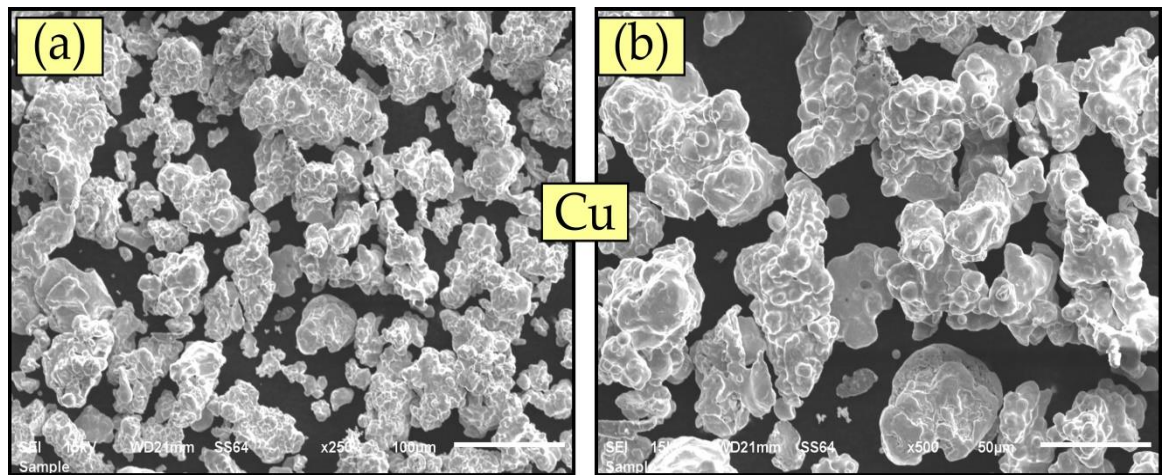
Tablo 6.6. Testo 871 termal kameranın teknik özellikleri

Testo 871 özellikler	Değer
Emisivite	0,01 - 1
Sıcaklık ölçüm aralığı	-30 ... +100 °C; 0 ... +650 °C
Çalışma sıcaklık aralığı	-15 ... +50 °C
Koruma sınıfı	IP54
Görüş alanı	35° x 26°
Spektral aralık	7,5 ... 14 µm
Ekran seçeneği	IR görüntü/ gerçek görüntü
İnfrared çözünürlük	240 x 180 piksel
Minimum odak mesafesi	< 0,5 m
Termal duyarlılık	90 mK
Renkler	4 (demir, gökkuşağı, soğuk-sıcak, gri)

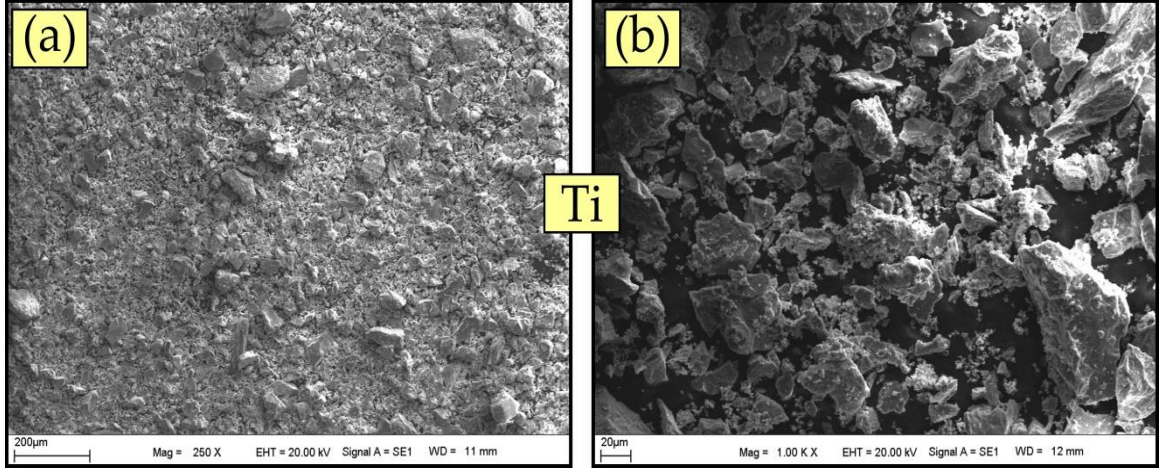
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

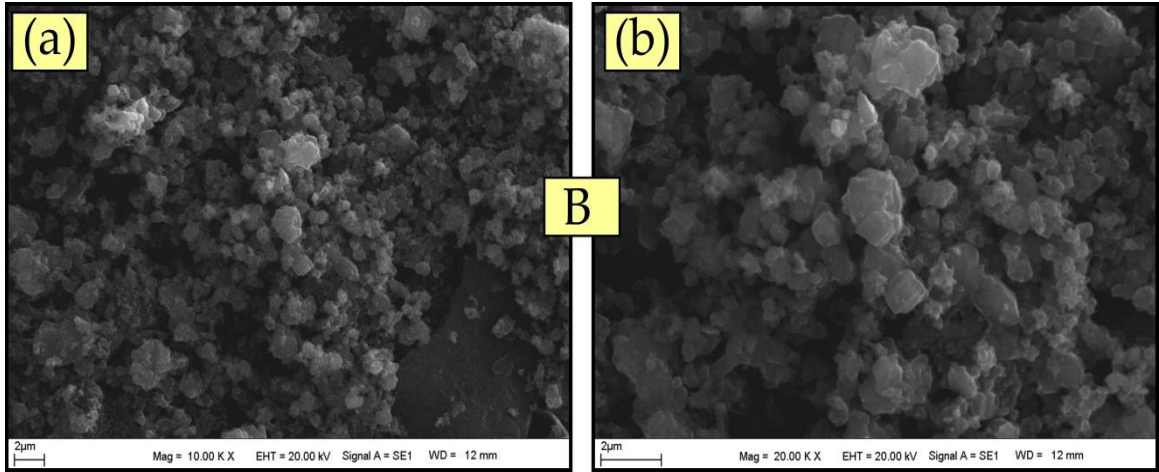
Toz metalürjisi metodu ile üretilen malzemelerde elde edilecek olan ürünün fiziksel ve yapısal özellikleri kullanılan toz partiküllerinin özelliklerine ve üretim parametrelerine ciddi oranda bağlı olabilmektedir. Toz partikül şeklinin nihai ürün üzerinde çok daha fazla etkisi bulunmaktadır. Bununla birlikte toz partiküllerinin üretim yöntemleri de toz şeklinin değişmesinde oldukça etkili olabilmektedir. Bu çalışmada Cu ana matris içerisine farklı oranlarda ilave edilen Ti, B ve SiC takviye tozları kullanılarak Cu/Ti-B-SiC kompozit malzemeleri üretilmiştir. Ana matris olarak kullanılan Cu tozları gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olup düzensiz ve yuvarlak bir yapıya sahiptir. Takviye elemanı olarak kullanılan Ti ve SiC toz partikülleri keskin köşeli ve karmaşık bir yapıya sahiptir. B tozunun ise karmaşık ve düzensiz bir yapıya sahip olduğu yapılan SEM analizlerinden anlaşılmaktadır. Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’te kullanılan matris ve takviye toz partiküllerinin farklı büyütme oranlarına sahip SEM fotoğrafları görülmektedir.



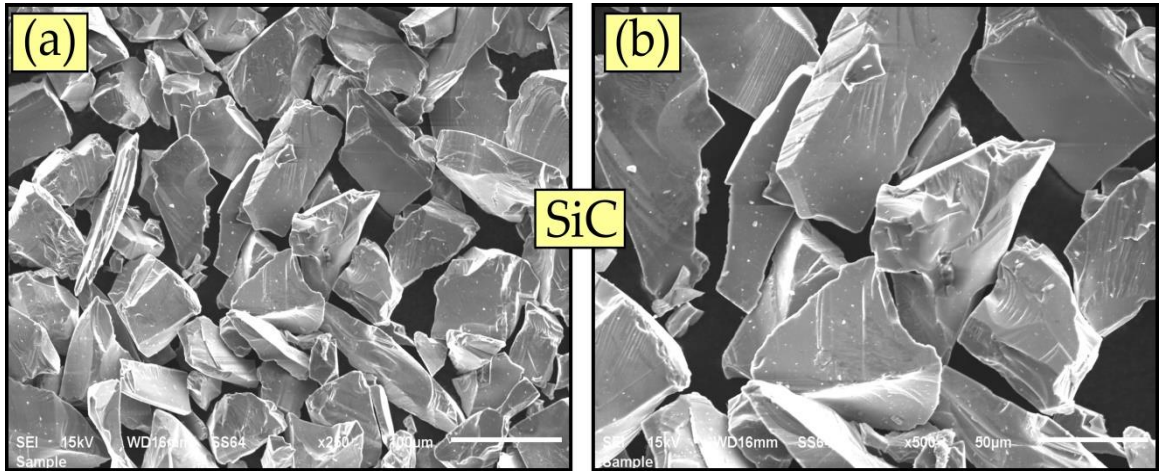
Şekil 7.1. Ana matris olarak kullanılan Cu tozunun SEM fotoğrafları; a) 250 x, b) 500 x [92]



Şekil 7.2. Ti tozunun farklı büyütme oranlarındaki SEM fotoğrafları; a) 250 x, b) 1.00 Kx [92]



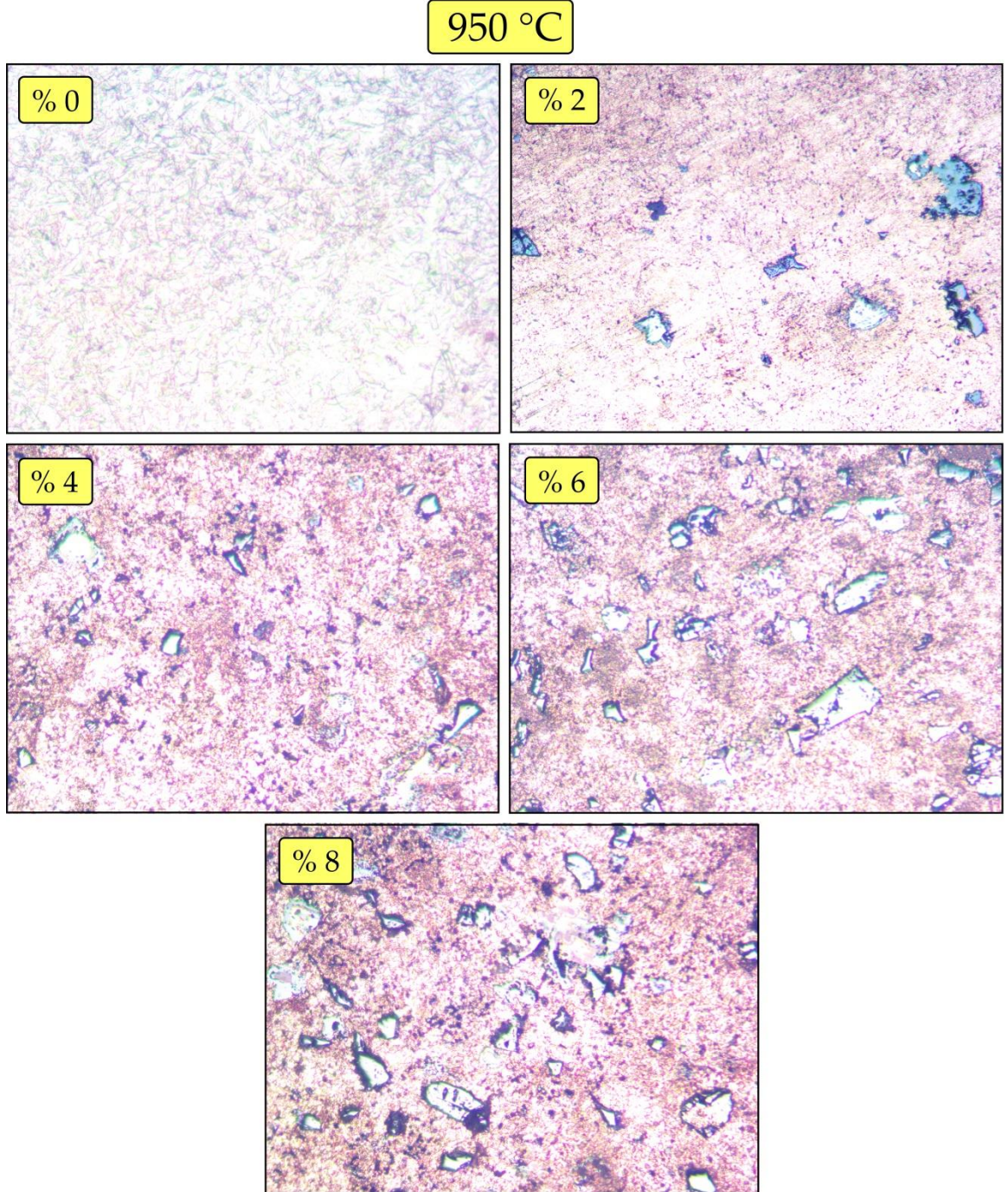
Şekil 7.3. B tozunun farklı büyütme oranlarındaki SEM fotoğrafları; a) 10.00 Kx, b) 20.00 Kx [92]



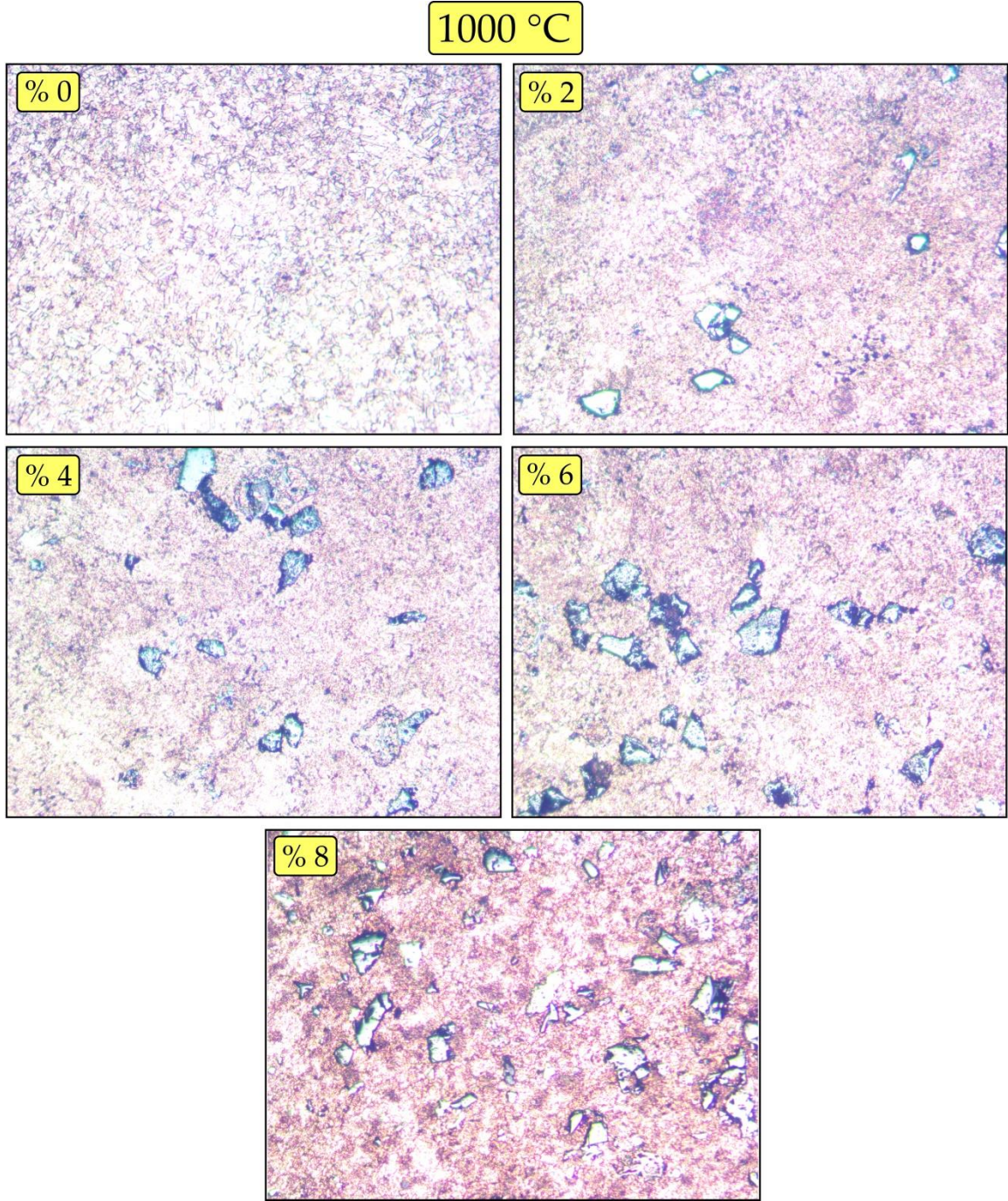
Şekil 7.4. SiC tozunun farklı büyütme oranlarındaki SEM fotoğrafları; a) 250 x, b) 500 x [92]

7.1.1. Optik Mikroskop Analizleri

Ti-B-SiC takviye tozları ile güçlendirilmiş ve üç farklı sıcaklıkta (950-1000-1050 °C) sinterlenmiş bakır kompozitlerine ait optik görüntüler Şekil 7.5-7.6-7.7’de görülmektedir.



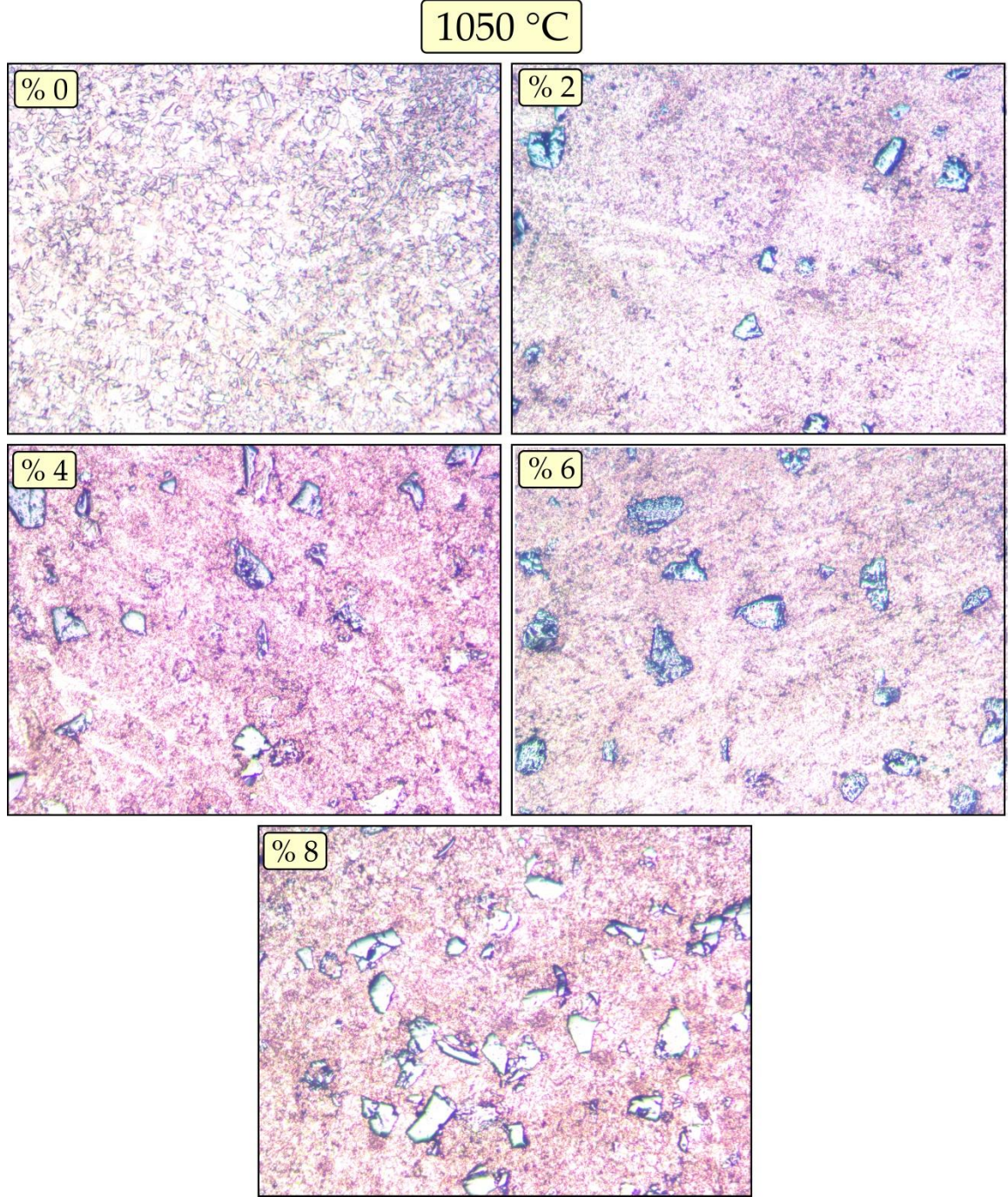
Şekil 7.5. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin optik görüntüleri



Şekil 7.6. 1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin optik görüntüleri

Optik fotoğraflarda takviye partikülleri ve ana matris net bir şekilde görülmektedir ve genel olarak takviye partiküllerinin homojen bir dağılım sergilediği söylenebilir. Homojen dağılımın, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Lee et al. [94], takviye partiküllerinin homojen dağılmaması durumunda üretilen kompozitin mekanik ve elektriksel özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilenebileceğini rapor etmişlerdir. Şap [95], deneysel olarak yaptığı bir çalışmada bakır

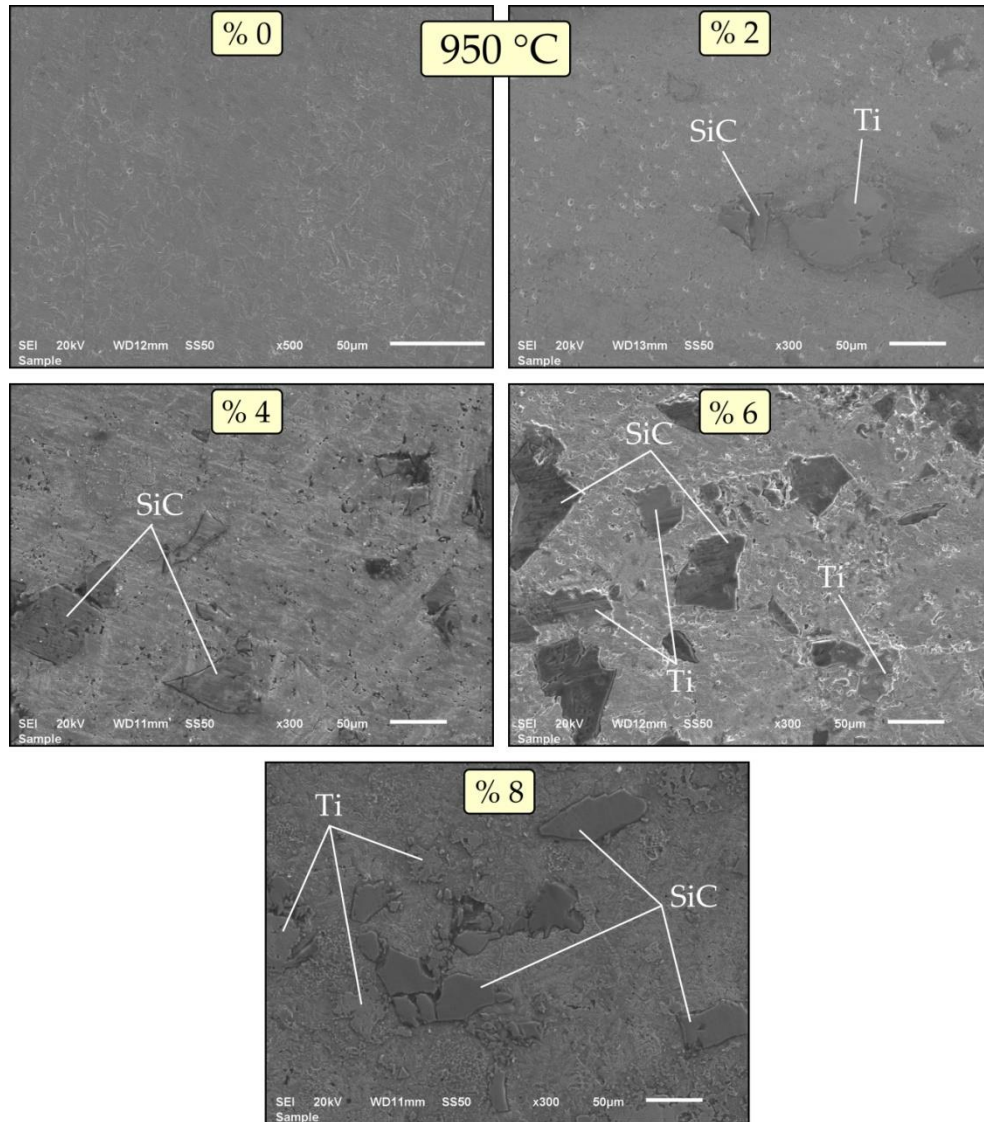
ana matris içersine farklı oranlarda Mo-SiC toz partikülleri ilave ederek Cu/Mo-SiC kompozit numuneler üretmiş ve takviye toz partiküllerinin matris yapı içersinde homojen bir şekilde dağılmasının mekanik özellikleri etkilediğini bildirmişlerdir.



Şekil 7.7. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin optik görüntüleri

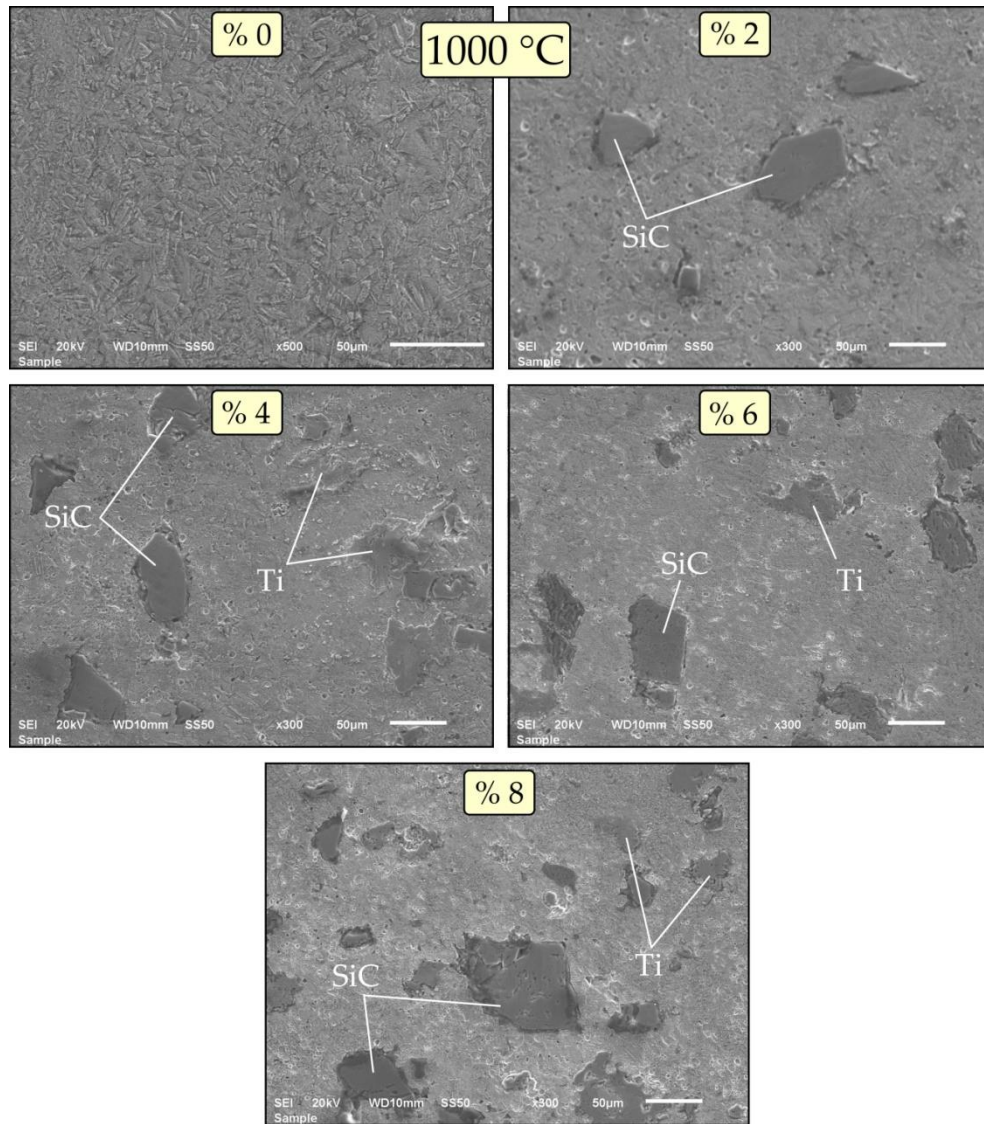
7.1.2. SEM-EDS Analizleri

Farklı sıcaklıklarda (950, 1000, 1050 °C) ve farklı takviye oranlarında üretilen Cu/Ti-B-SiC kompozitlerine ait SEM fotoğrafları Şekil 7.8-7.9 ve 7.10’da görülmektedir. SEM fotoğrafları genel olarak incelendiğinde takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir. Aynı zamanda matris yapının bakırca zengin olduğu ve herhangi bir topaklanmaya (aglomerasyon) rastlanmadığı SEM fotoğraflarından görülmektedir.



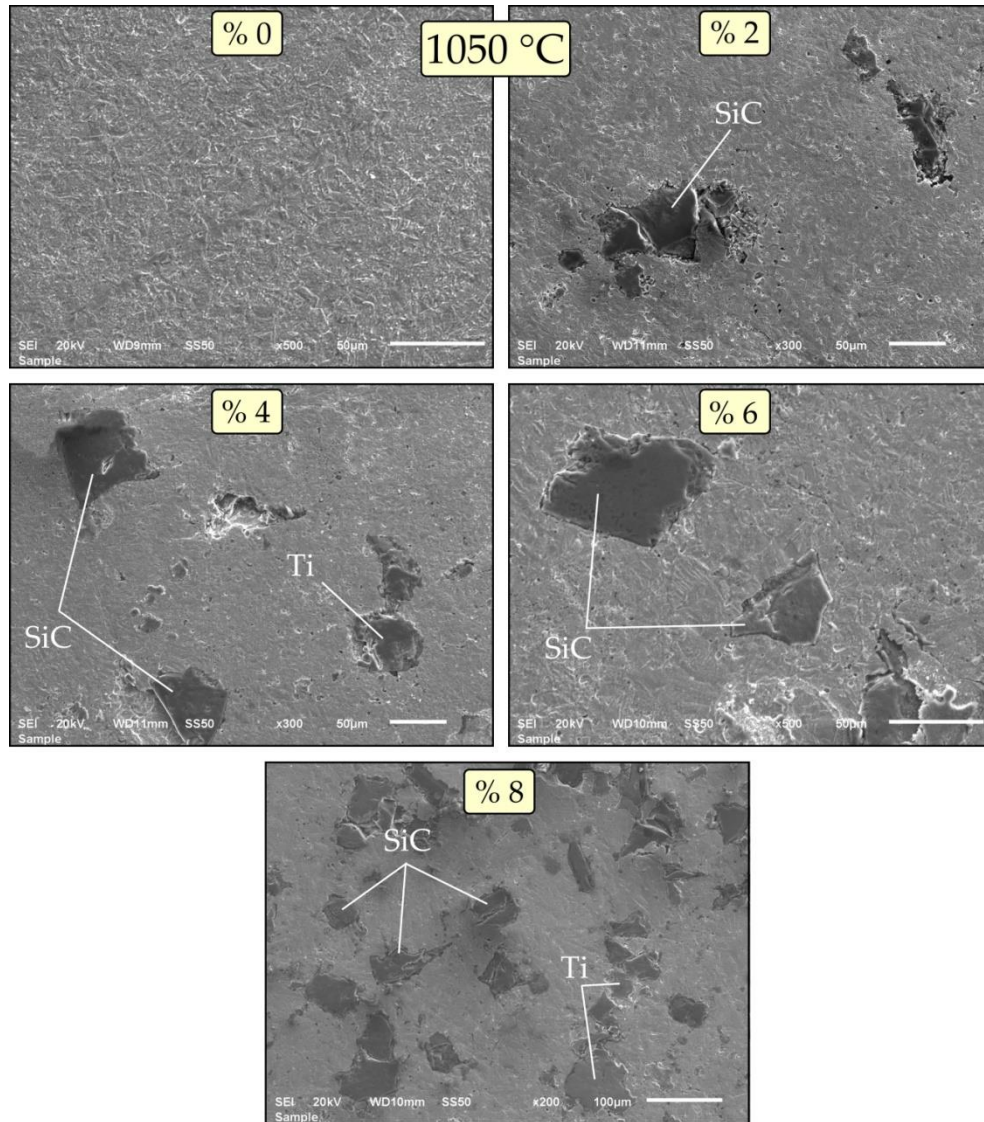
Şekil 7.8. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin SEM görüntüleri

SEM fotoğraflarında, takviye toz partikülleri ile ana matris arasında bazı boşluklar olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan toz partiküllerinin ısı genleşme katsayısındaki farklılıklardan dolayı bakır ve takviye partikülleri arasında arayüz boşlukları oluştuğu düşünülmektedir. Bu boşluklar yoğunluğu ciddi oranda etkileyebilmektedir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte boşlukların azaldığı görülmektedir. Long et al. [96], bakır (Cu) ana matris içerisine belirli oranlarda karbon nanotüp (CNT) ve titanyum diborür (TiB_2) mikropartikülleri ekleyerek metal matrisli kompozitler üretmişlerdir. Mikroyapıda CNT ve Cu matris arasında mükemmel bir iç stres ve iyi bir arayüzey bağı oluştuğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 7.9. 1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin SEM görüntüleri

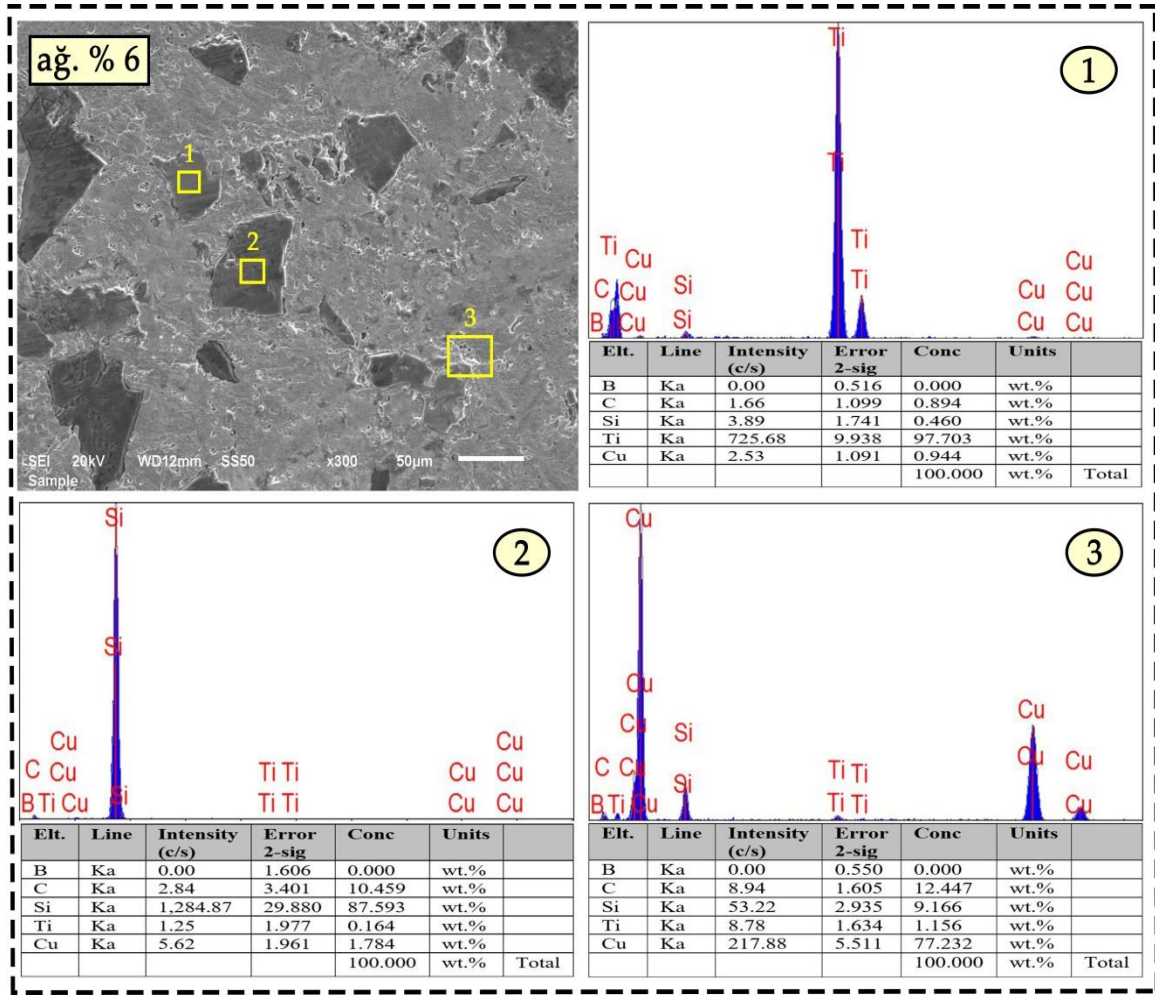
Mikroyapıda genel olarak açık ve koyu renkli bölgelerin olduğu görülmektedir. Açık renkli bölgeler bakır matris yapıyı göstermektedir. Koyu renkli bölgeler ise bakır ana matris içerisinde gömülü halde bulunan güçlendirici takviye elemanlarını göstermektedir. Mikroyapı fotoğraflarından da anlaşıldığı gibi bakır ana matris tane sınırlarındaki takviye elemanları görülmektedir. Literatürde sinterleme sıcaklığındaki artışın tane büyümesine neden olduğu rapor edilmiştir [97]. Takviye partikülleri ile matris ara yüzeyinde oluşan boşlukların bir diğer sebebinin de matris ile takviye elemanlarının yetersiz yapışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.10. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin SEM görüntüleri

Ana matris, kompozit malzemeyi oluşturan ve takviye elemanlarını bir arada tutan ana yapıdır. Bu yapı, birçok özelliğine bağlı olarak takviye elemanları üzerinde etkili olan aşamaları oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerde matris yapı, sinterleme sırasında gerilme ve termal şoklar sebebiyle oluşabilecek çatlaklara engel olabilmektedir. Bu çalışmada takviye malzemesi olarak Ti, B ve SiC toz partikülleri seçilmiştir. SEM fotoğraflarından da görüldüğü gibi Ti ve SiC toz partikülleri keskin köşeli kenarlara sahiptir. Bu formlar sayesinde takviye elemanları ile desteklenen matris yapı kompozit malzeme üzerine gelen yükleri kolaylıkla taşıyabilmektedir. Aynı zamanda ana matrisin takviye parçacıklarını sarmak suretiyle dış etkenlerden koruduğu görülmektedir. SEM fotoğrafları dikkatli bir şekilde incelendiğinde sinterleme sıcaklığının artmasına paralel olarak matris yapı ile takviye elemanları arasındaki arayüz boşluklarının azaldığı görülmektedir. Belirli oranlarda kullanılan B toz partikülleri, termal iletkenliğin artırılması ve ara yüz bağını güçlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Matris yapı içerisinde homojen bir dağılım ve iyi bir ara yüzey bağı oluşturulması mekanik özellikler açısından oldukça etkili olabilmektedir.

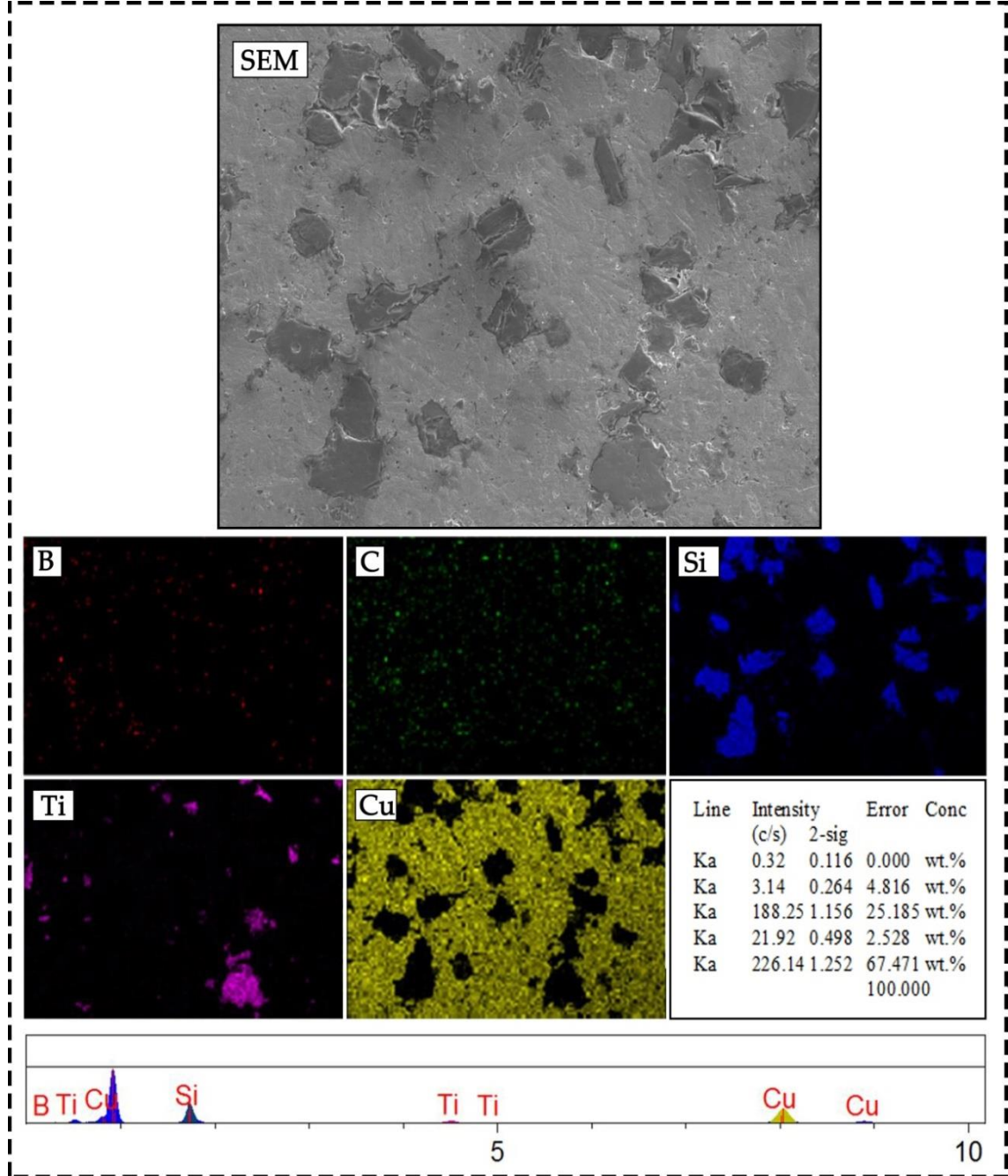
SEM/EDS analizinden de anlaşılabacağı üzere matris yapı içerisinde gömülü halde bulunan takviye elemanları tespit edilmiştir. Yapılan tespitler neticesinde 1 nolu bölgenin Ti toz partikülüne ait olduğu ve 2 nolu bölgenin SiC toz partikülüne ait olduğu belirlenmiştir. 3 nolu bölge ise bakırca zengin ve aynı zamanda diğer toz parçacıklarının da olduğu bir bölge olduğu tespit edilmiştir. Parçacık boyutunun çok küçük olması sebebiyle B, matris yüzeyinde görülememektedir. SEM/EDS analiz sonuçlarına göre numune içerisinde oksit ya da herhangi bir yabancı bileşene rastlanmamıştır. Sinterleme sırasında kullanılan koruyucu argon gazının oksitlenmeyi engellediği düşünülmektedir. Liu et al. [98], Cu içerisine Ti ve SiC ilave ederek ürettiği alaşımdaki Ti-Si-C partiküllerinin SEM/EDS analizi ile tespit edildiğini bildirmişlerdir. Ti ve SiC ilavesinden sonra Cu ana matrisinde iki fazın oluştuğu gözlemlenmiştir. Siyah olanların yaklaşık 1-3 µm büyüklüğünde olduğunu ve diğerlerinin gri parçacıklardan ve iğnelerden oluştuğunu rapor etmişlerdir. Şekil 7.11’de ağırlıkça %6 takviyeli kompozit numuneye ait bölgesel SEM/EDS analiz fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 7.11. Farklı oranlarda üretilen kompozitin bölgesel EDS analizleri

Şekil 7.12’de ağırlıkça %8 takviye içeren bakır kompozit numunesine ait elementel haritalama analiz fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflardan da anlaşılabacağı gibi bakırca zengin matris yapı ve takviye elemanları net bir şekilde görülmektedir. B toz partikülünün çok küçük boyutta olması sebebiyle matriste açıkça görülmemektedir. Kırmızı renkle temsil edilen fotoğraf B, yeşil renkle temsil edilen fotoğraf C, mavi renkle temsil edilen fotoğraf Si, pembe renkle temsil edilen fotoğraf Ti ve sarı renkle temsil edilen fotoğraf bakır ana matris yapıyı göstermektedir. Böylelikle SEM/EDS analizi ile tespiti yapılan toz partiküllerinin varlığı aynı zamanda haritalama analizi ile doğrulanmıştır. Ayrıca haritalama analizi ile elde edilen bakır tane sınırları dikkatli bir şekilde incelendiğinde sıvı faz sinterlemenin oluşmadığı görülmektedir. Al-Cu-Mg matrisine SiC ilave edilerek üretilen bir alaşım malzemesinde takviye elemanı olarak kullanılan SiC toz partiküllerinin elementel haritalama analizi ile belirlendiği rapor

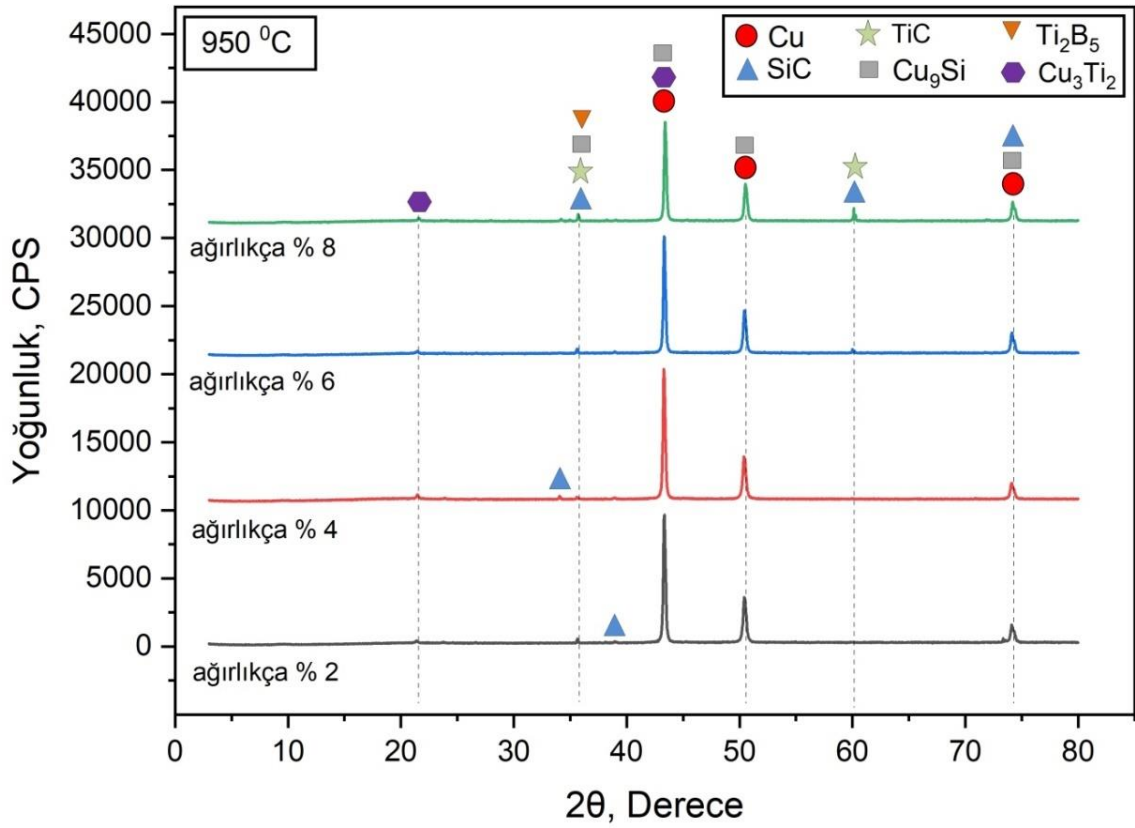
edilmiştir [99]. Essam ve Mohammed [100], yaptıkları çalışmada bakıra belirli oranlarda (ağırlıkça %0-1-2-4-8) SiC ekleyerek nanokompozit malzemeler üretmişlerdir. Farklı oranlarda ürettikleri numuneler üzerinde haritalama analizini kullanarak nanokompozitlerde takviye parçacıklarının varlığını tespit etmişlerdir.



Şekil 7.12. Ağırlıkça %8 takviye içeren kompozitin elementel haritalama analiz görüntüsü

7.1.3 X-RD Analizleri

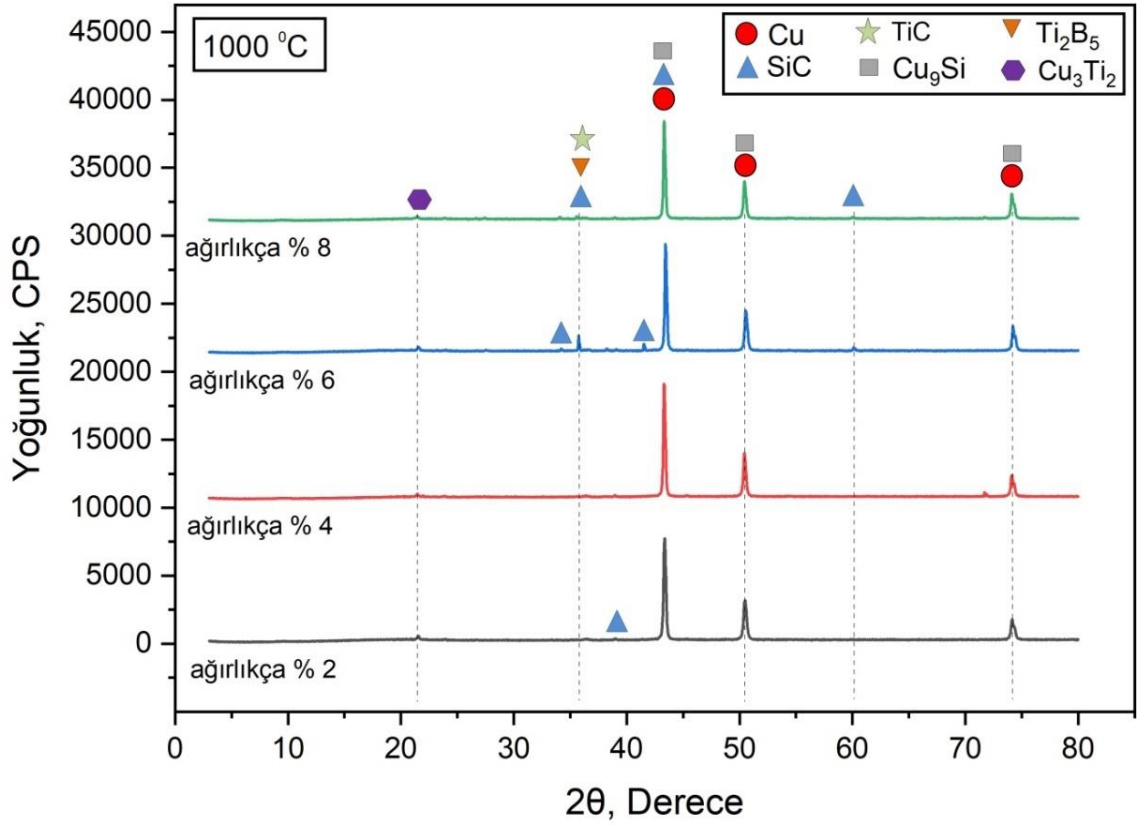
Farklı sıcaklıklarda (950, 1000 ve 1050 °C) 60 dakika boyunca sinterlenen ve ağırlıkça farklı takviye oranlarına (%0-2-4-6-8) sahip bakır kompozit numunelerine ait X-RD desenleri Şekil 7.13-7.14 ve 7.15'te görülmektedir. X-RD grafiklerinden de anlaşıldığı gibi ana fazların; Cu (bakır), Cu₉Si (silisyum bakır) ve SiC (silisyum karbür) fazlarından oluştuğu görülmektedir. Aynı zamanda yapıda TiC (titanyum karbür), Ti₂B₅ (bor titanyum) ve Cu₃Ti₂ (bakır titanyum) fazlarının da oluştuğu tespit edilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında koruyucu argon gazı kullanılması sebebiyle herhangi bir oksidasyona rastlanmamıştır.



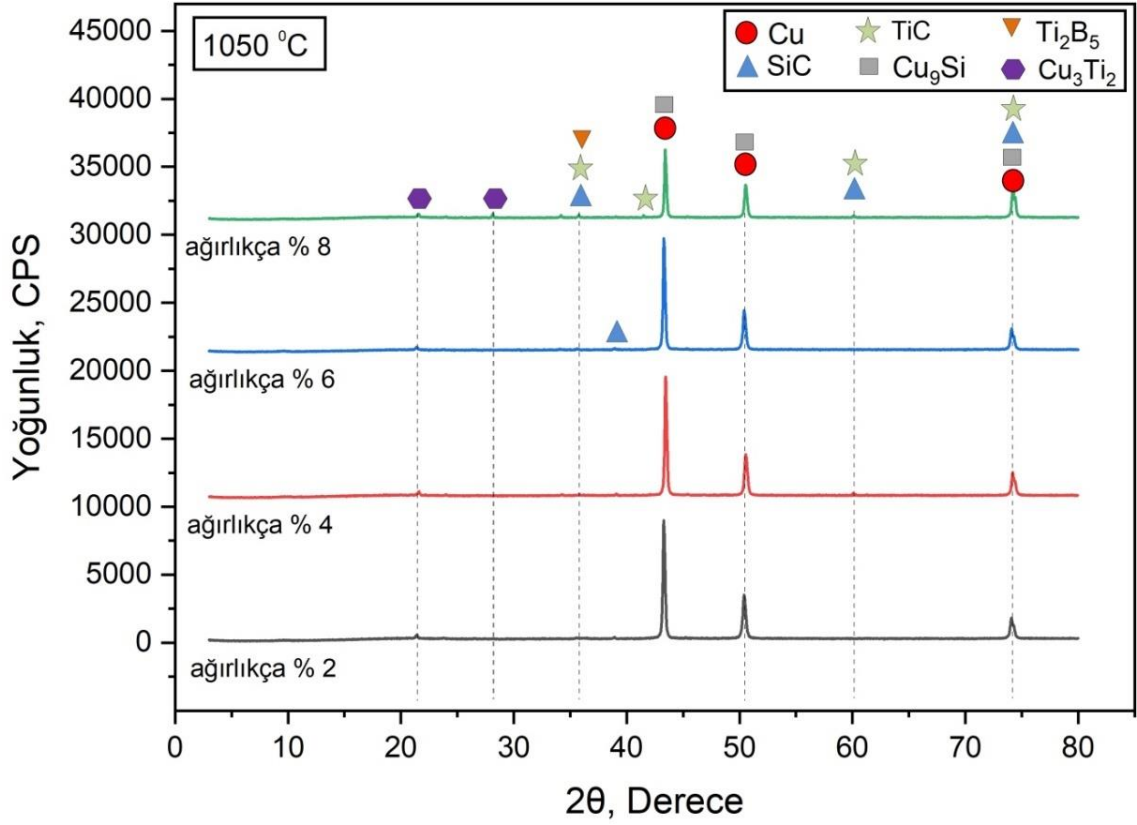
Şekil 7.13. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin X-RD grafiği

Akkaş [101], bakır-nikel tozu karışımına ağırlıkça farklı oranlarda bor karbür ve silisyum karbür parçacıkları ekleyerek kompozit malzemeler üretmiştir. Sinterleme işlemi sonrasında yapılan X-RD analizleri sonucunda; bakır, nikel, silisyum, karbon ve bor elementleri arasında Cu_{0.81}Ni_{0.19}, NiCu, SiC, Ni₃B, NiSi ve BNi₂ fazlarının oluştuğunu rapor etmiştir. Sadeghi et al. [102], Cu, Ti ve C tozlarının bir karışımından nanokompozit

malzemeler üretmişlerdir. Üretilen nanokompozit malzemelerin XRD modellerinin sadece Cu ve TiC ile ilgili kırınım tepeleri gösterdiğini ve başka hiçbir faz tanımlanmadığını bildirmişlerdir. Uzun ve Çetin [103] deneysel olarak yaptıkları bir çalışmada bakır içerisine farklı oranlarda Co ve CrC ilave ederek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin X-RD analizleri sonucunda oluşan piklerin kompozitlerin karışım oranlarıyla paralel olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca matris içerisinde Co-CrC takviye partiküllerinin artmasıyla kristalit boyutunun azaldığını gözlemlemişlerdir.



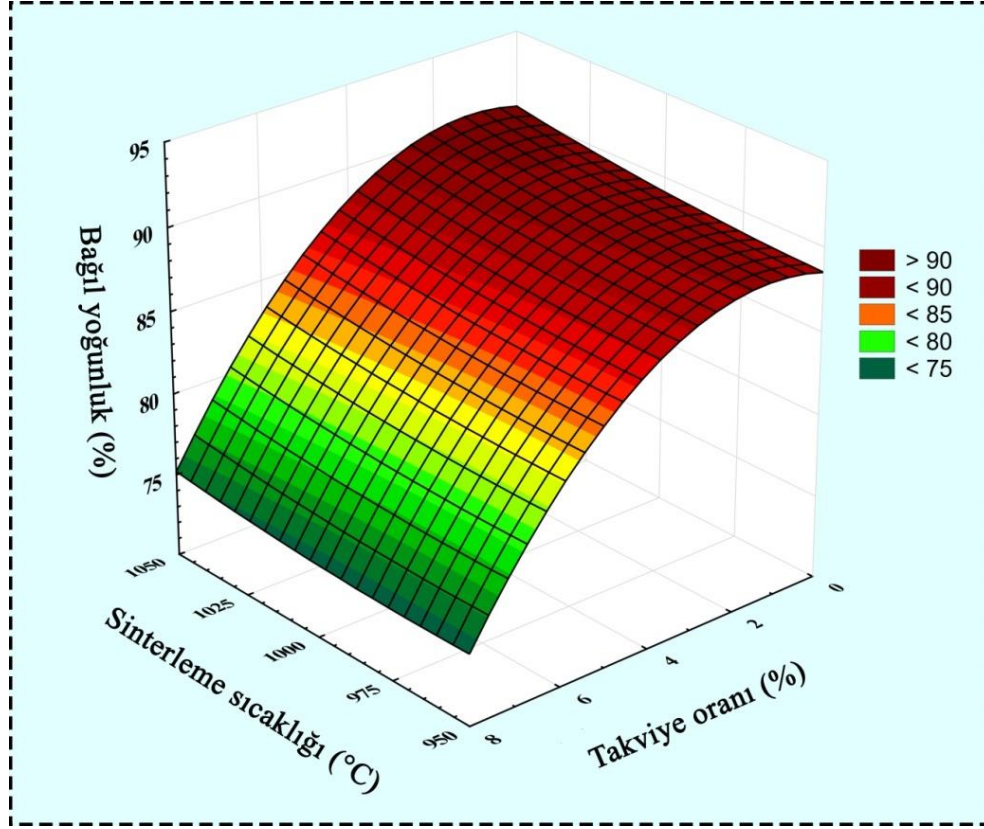
Şekil 7.14. 1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin X-RD grafiği



Şekil 7.15. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozit numunelerin X-RD grafiği

7.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde en önemli faktörlerden biri de yoğunluk miktarıdır. Yoğunluğu etkileyen en önemli parametre ise sinterleme sıcaklığıdır. Sinterleme sırasında oluşan gözeneklilik oranı, mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte partiküller arasındaki etkileşim, dolayısıyla boyun oluşumu ve difüzyon hızlanmaktadır. Aynı zamanda malzeme bileşenlerinin yanlış karıştırılması, sinterleme hataları ve sinterleme sonrası büzülme gibi problemlerden dolayı boşluklar ve gözenekler oluşabilmektedir. Şekil 7.16'da farklı sıcaklıklarda ve farklı oranlarda güçlendirilen kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk 3 boyutlu yüzey grafiği görülmektedir.



Şekil 7.16. Farklı sinterleme sıcaklıklarının ve takviye oranlarının yoğunluğa etkilerinin 3B yüzey grafiği

Genel olarak artan takviye elemanları oranı ile yoğunlukların azaldığı görülmektedir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi en yüksek yoğunluk değerlerinin 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde görüldüğü tespit edilmiştir. Bağıl yoğunluk analizi sonuçlarına göre optimum sinterleme sıcaklığı 1050 °C olarak belirlenmiştir. Bağıl yoğunluk değerlerinin tüm sinterleme sıcaklıklarında ağırlıkça %2'ye kadar artış gösterdiği ve daha sonra azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu bağlamda takviye elemanı olarak kullanılan parçacıkların bağıl yoğunluğun azalmasında etkili olduğu söylenebilir. Burada üç farklı sinterleme sıcaklığı karşılaştırılmış ve en yüksek sinterleme sıcaklığının yoğunluğa etkisi kanıtlanmıştır. En yüksek yoğunluk değeri, ağırlıkça %2 takviye oranı ile 1050 °C'de sinterlenen numunede %92,25 olarak belirlenmiştir. Sap [104], bakır ana matrisle farklı oranlarda (ağırlıkça %5-10-15) Co-Ti toz partikülleri ekleyerek kompozit malzemeler üretmiştir. Ürettiği kompozit malzemelerin en yüksek yoğunluğunun ağırlıkça %5 takviyeli numunede bulunduğunu bildirmiştir.

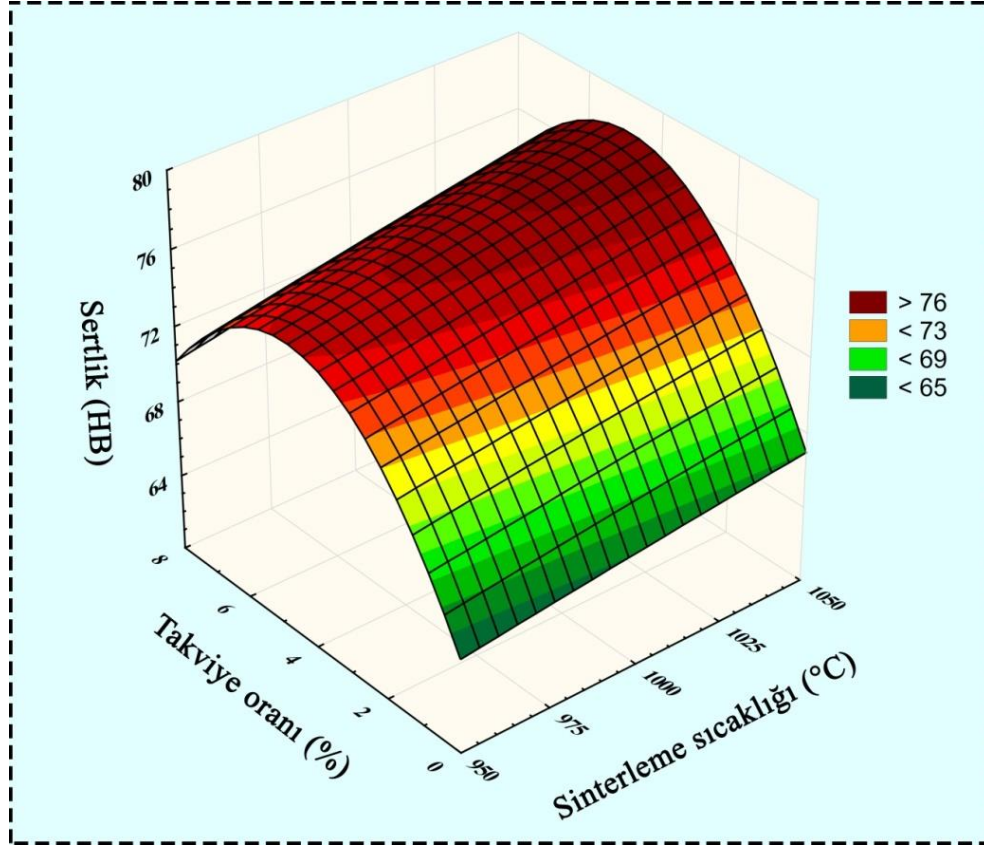
7.3. Mekanik Özellikler

Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sertlik, aşınma, çekme ve üç nokta eğilme gibi analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırma yapılarak mukayese edilmiş ve mekanik özellikler irdelenmiştir.

7.3.1. Sertlik Analizleri

Sertlik, mekanik özelliklerin belirlenmesinde en önemli faktörlerden biridir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen metal matrisli kompozitlerde, sinterleme sıcaklığı ve gözeneklilik oranı, sertlik üzerinde oldukça önemli etkilere sahiptir [105]. Metal matrisli kompozitlere eklenen takviye partikülleri de sertlik üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Yapılan sertlik analizinde farklı oranlarda ve farklı sinterleme sıcaklıklarında Ti-B-SiC takviye partiküllerinin Cu matrisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı oranlarda ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen kompozit numunelere ait makrosertlik 3 boyutlu yüzey grafiği Şekil 7.17’de görülmektedir. Grafikten de görüleceği gibi sinterleme sıcaklığının 1050 °C’ye yükselmesiyle sertlikte önemli artışların meydana geldiği görülmektedir. Genel olarak, takviye oranındaki artış, sertlikte kademeli artışlara neden olmuştur. Ağırlıkça %6 takviyeli numunelerin sertliğinde artışlar, ağırlıkça %8 takviyeli numunelerde ise sertlikte azalma tespit edilmiştir. Genel olarak, metal matrisli kompozitlerde sert takviye parçacıklarının artmasıyla kompozit malzemenin deformasyona karşı direncinin arttığı bildirilmiştir [106]. Bu çalışmada ağırlıkça %6’dan sonra sertlik değerlerindeki düşüşün nedeninin kompozit malzemeyi kırılgan hale getiren B partiküllerinin oranındaki artış olduğu düşünülmektedir. Optimum sertliğin, ağırlıkça %6 takviye içeren numunelerde görüldüğü tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri, 1050 °C’de sinterlenmiş, ağırlıkça %6 takviyeli numunede, 77,74 HB olarak tespit edilmiştir. Takviye tozu partikülleri ile güçlendirilen test numunelerinin belirli bir seviyeden sonra mekanik karakterizasyonu olumsuz etkilediği görülmüş ve optimum oran belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı optimum sinterleme sıcaklığı 1050 °C olarak belirlenmiştir. 950 °C’de sinterlenen saf bakır numunesinde en düşük sertlik değeri, 64,40 HB olarak belirlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Jinwei et al. [107], Cu ana matrise farklı oranlarda (ağırlıkça %1-2-3-4) TiB₂/TiN seramik takviye malzemeleri ekleyerek kompozit malzemeler

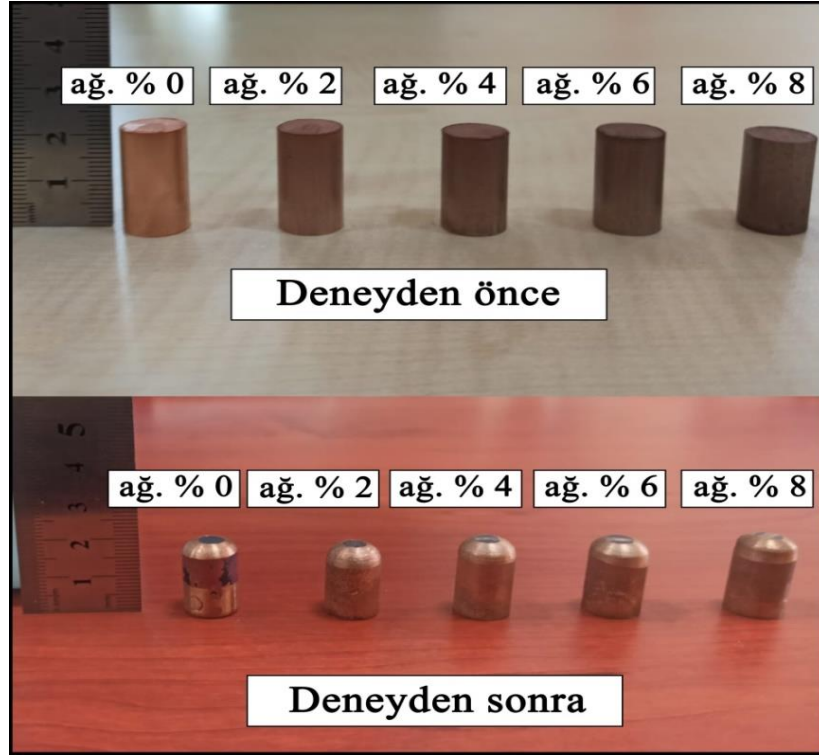
üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerde takviye oranındaki artışın sertlikte de artışlara yol açtığını bildirmişlerdir.



Şekil 7.17. Farklı sinterleme sıcaklıklarının ve takviye oranlarının sertliğe etkilerinin 3B yüzey grafiği

7.3.2. Aşınma Analizleri

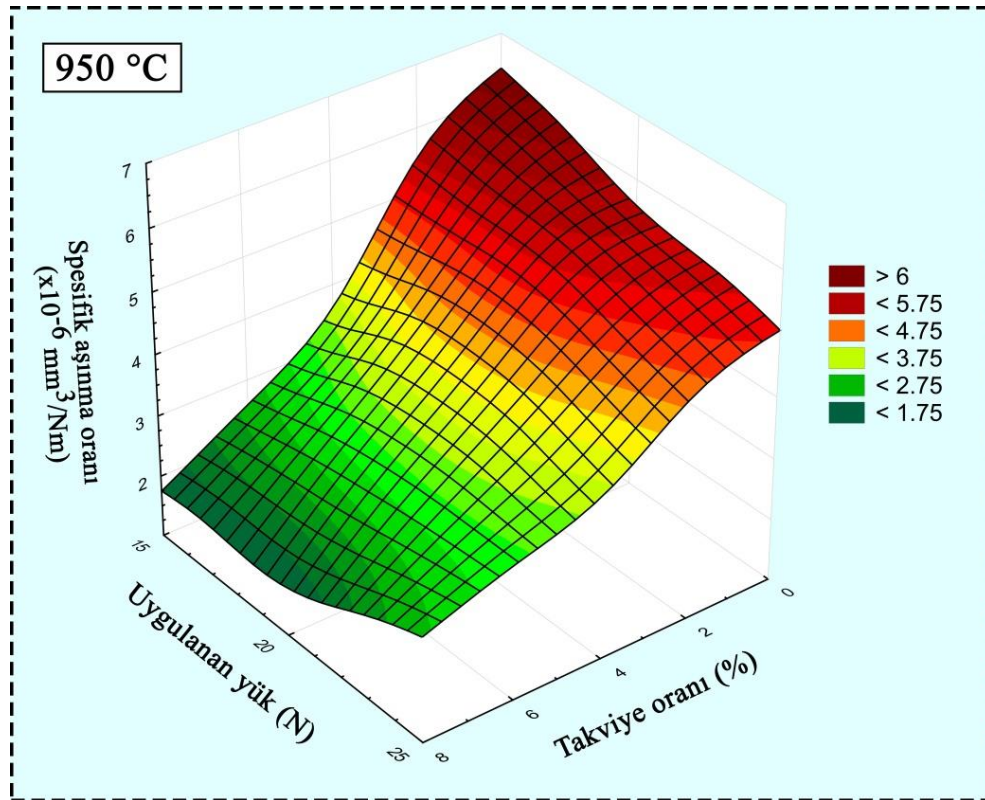
Şekil 7.18’de farklı oranlarda ve farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen aşınma test numunelerinin fotoğrafları görülmektedir. Aşınma testinin her numuneye aynı standartlarda uygulanabilmesi amacıyla test numunelerinin uç kısımları konik hale getirilerek aşınma çapları oluşturulmuştur.



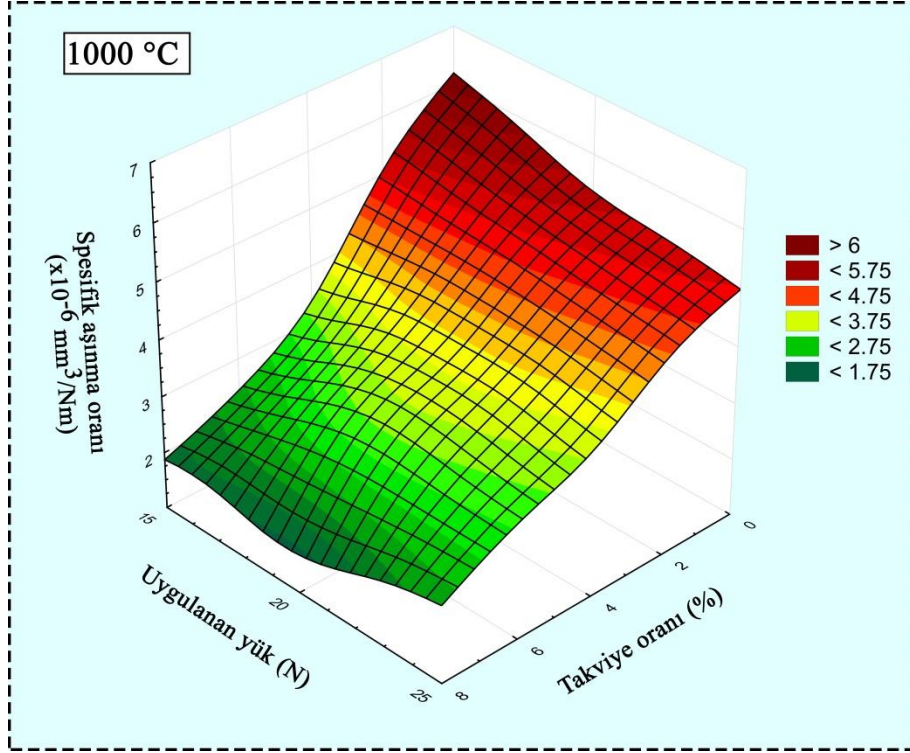
Şekil 7.18. Aşınma testi için üretilen numunelerin aşınmadan önceki ve sonraki görüntüleri

Malzemelerin aşınması genellikle kütle kaybı ve aşınma oranı ile tespit edilmektedir. Spesifik aşınma oranı ise, uygulanan yük ve aşınma mesafesi de dikkate alındığından, kompozit malzemenin aşınma özelliğinin belirlenmesinde daha önemli bir rol oynayabilmektedir [108]. Radhika ve Raghu [109], Al bazlı LM13/AlN takviyeli metal matris kompozitlerini başarıyla üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerde aşınma testi sırasında uygulanan yükün, aşınma hızı ve aşınma mesafesi üzerinde önemli etkilere sebep olduğunu rapor etmişlerdir. Şekil 7.19-7.20 ve 7.21’de farklı aşınma parametrelerinin spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri görülmektedir. 3 boyutlu yüzey grafikleri incelendiğinde genel olarak sinterleme sıcaklıklarının artmasıyla birlikte spesifik aşınma oranı değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. En düşük spesifik aşınma oranı değerleri; 950 °C için $1,9590 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, 1000 °C için $1,7248 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve 1050 °C için $1,5545 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak tespit edilmiştir. Aşınma testinden elde edilen verilere göre spesifik aşınma oranı için optimum sinterleme sıcaklığının 1050 °C olduğu tespit edilmiştir. En düşük spesifik aşınma oranı değerleri, 20 N yük uygulanan, ağırlıkça %8 takviyeli numunelerde gözlenmiştir. Takviye artışı ile ters orantılı olarak spesifik aşınma oranı değerlerinde düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Buna dayanarak, güçlendirme

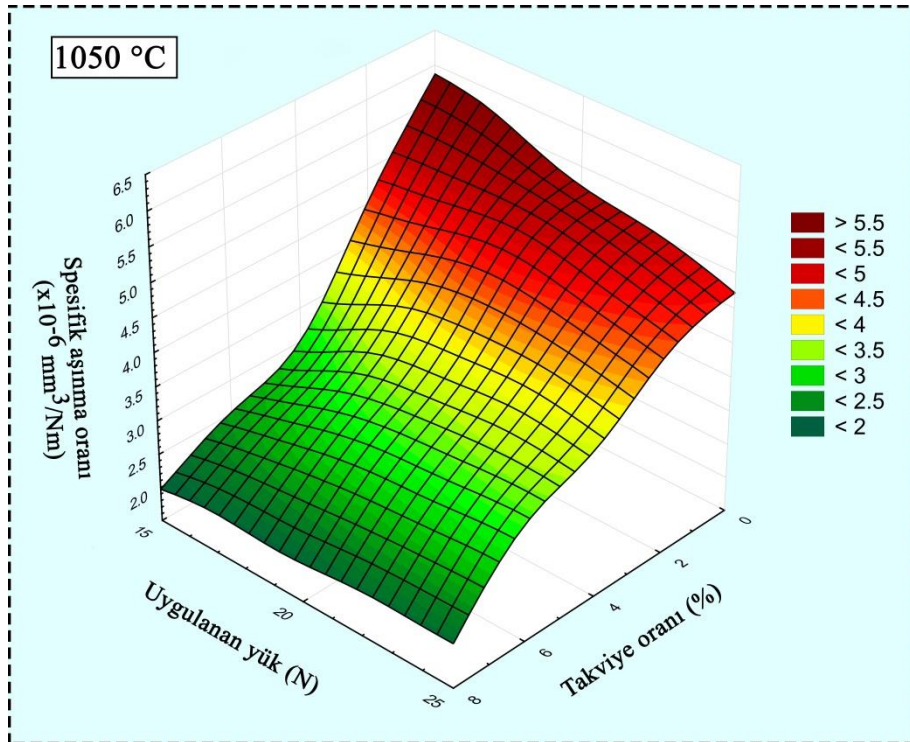
oranlarındaki artışın aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu söylenebilir. Uzun et al. [110], Cu ana matrisine CrC takviye elemanı ekleyerek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Artan CrC partikül takviyesi ile aşınma direncinde önemli artışlar olduğunu rapor etmişlerdir. CrC partikül takviyeli numunelerin aşınma direnci saf bakır numunelerle karşılaştırıldığında, CRC partikül takviyeli numunelerin daha iyi aşınma direnci gösterdiğini bildirmişlerdir. Xie et al. [111], TiB_2-Fe_2B hibrit parçacıklarının Cu ana matrisine ilave ederek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretilen kompozit içerisindeki TiB_2-Fe_2B hibrit parçacıklarının artmasıyla beraber aşınma ve sertlik direncinin de arttığını rapor etmişlerdir. Zhao et al. [112] tarafından Cu- Ti_3AlC_2 kompozitlerinin elektriksel sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Artan partikül takviyesi ile kompozitlerin aşınma direncinin başlangıç durumundan kademeli olarak arttığını ve daha sonra sabit kaldığını bildirmişlerdir.



Şekil 7.19. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği

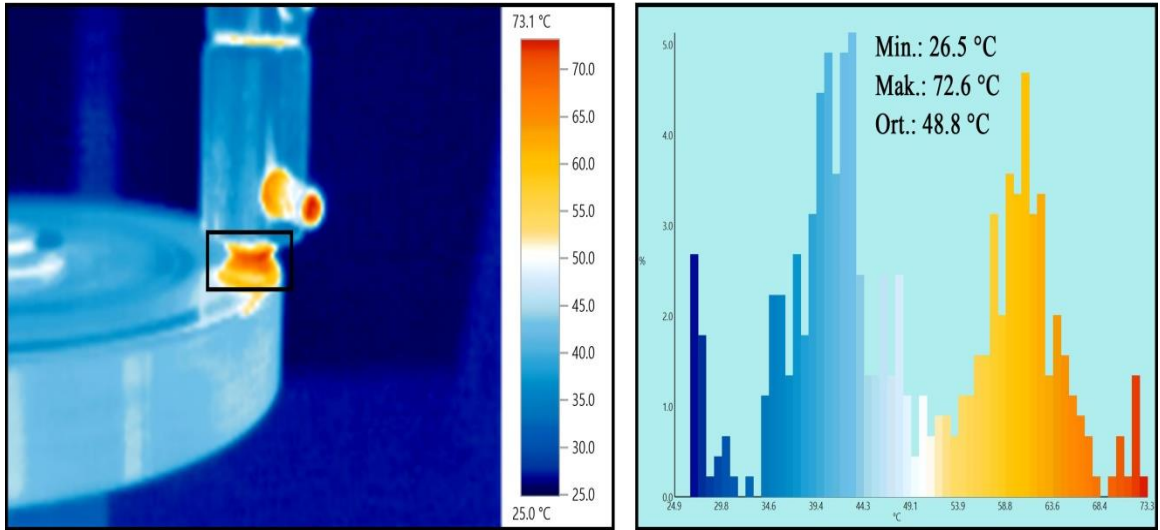


Şekil 7.20. 1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği

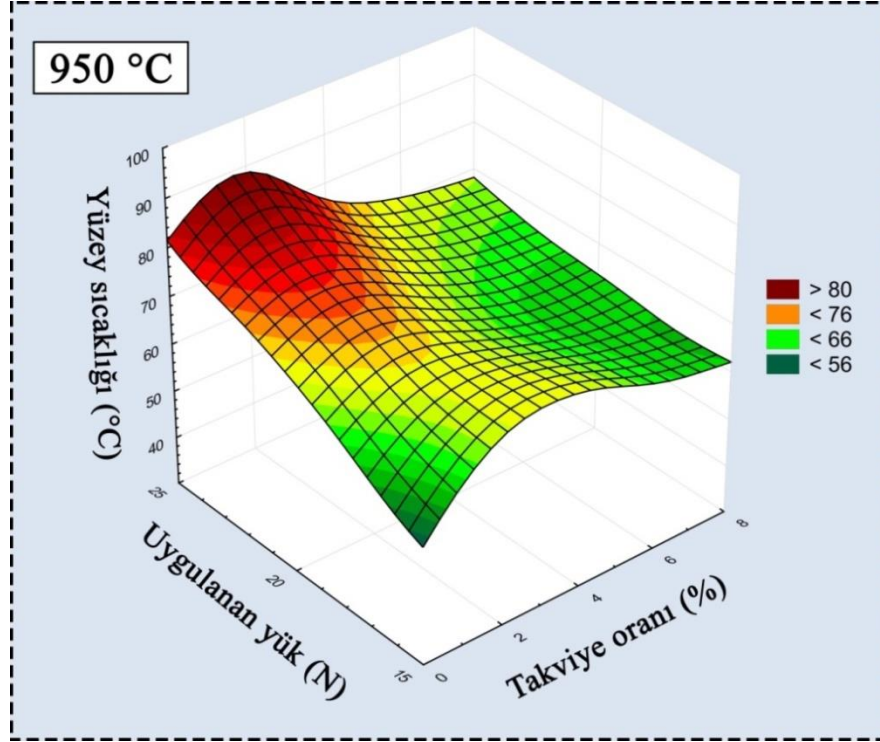


Şekil 7.21. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının spesifik aşınma oranı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği

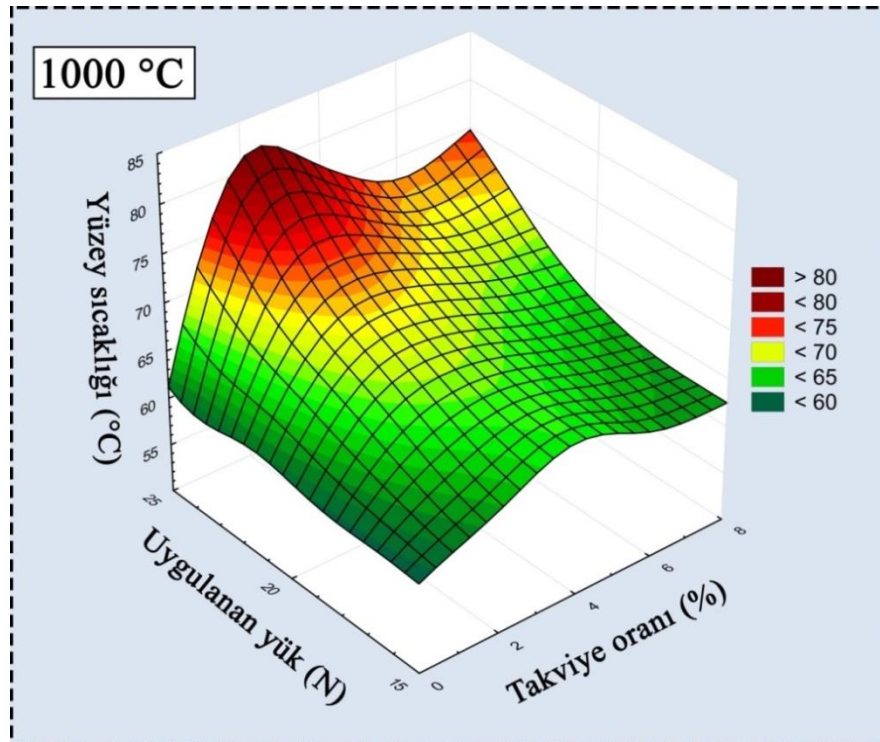
Aşınma testi sırasında meydana gelen sıcaklık artışları çok karmaşık bir süreçtir. Uygulanan yük, kesme hızı, güçlendirme oranı ve ısı iletim katsayısı gibi birçok parametre bu süreci etkileyebilmektedir. Şekil 7.22’de ise aşınma testi sırasında çekilen termal fotoğraf görülmektedir. Şekil 7.23-7.24 ve 7.25’te farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen kompozit malzemelerin uygulanan yük ve güçlendirme oranına bağlı olarak aşınma testi sırasında oluşan sıcaklık değişimlerini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri görülmektedir. Tüm test numunelerinde, uygulanan yükteki artışa paralel olarak sıcaklıkların da arttığı görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının etkisi açısından bakıldığında sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte aşınma yüzey sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Aşınma testi sırasında oluşan minimum ve maksimum sıcaklıklar sırasıyla 53,9 °C ve 95,4 °C olarak tespit edilmiştir. Cheng et al. [113], Cu–15Ni–8Sn–0,8Nb alaşımı üzerinde aşınma testi sırasında oluşan sıcaklıkların, kesme hızı ve normal yükler ile arttığını bildirmişlerdir. En yüksek sıcaklıkların 25 N yüklü numunelerde olduğunu rapor etmişlerdir. Jayashree et al. [114], çelik bir yüzeye karşı kuru olarak kayan Cu esaslı metal matrisli bir kompozitin tribo-oksidatif aşınması sırasında, pim sıcaklığının kayma hızıyla arttığını ve temas basıncından önemli ölçüde etkilenmediğini rapor etmişlerdir.



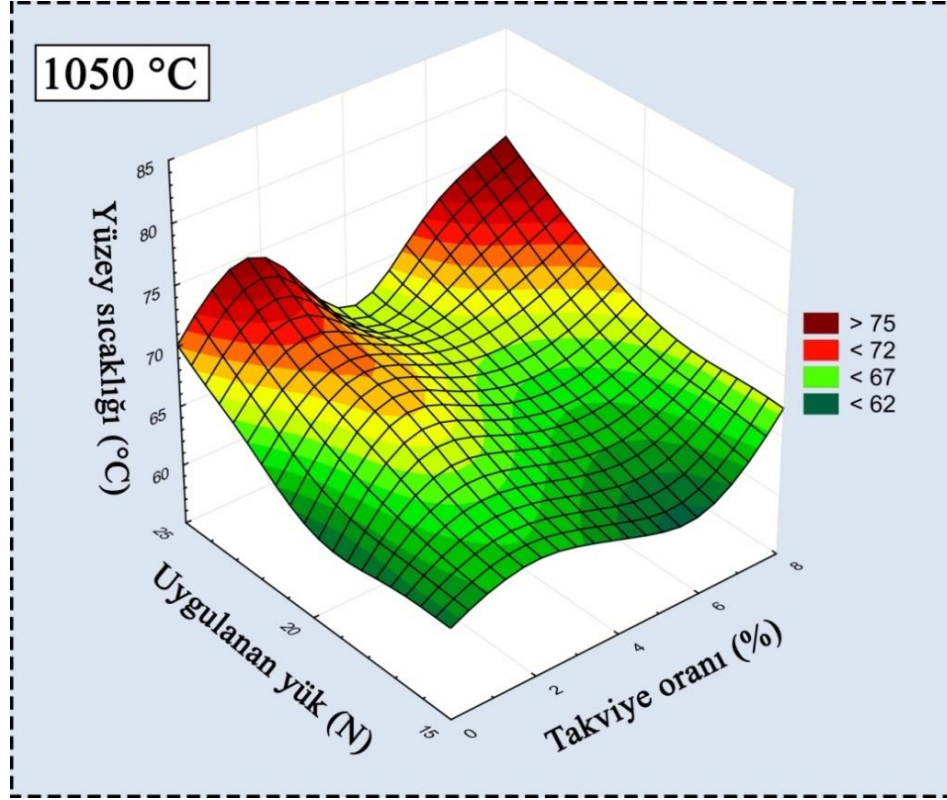
Şekil 7.22. Aşınma testi sırasında oluşan sıcaklığın termal kamera ile çekilen örnek görüntüsü ve sıcaklık dağılımını gösteren fotoğraf



Şekil 7.23. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sıcaklık üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği



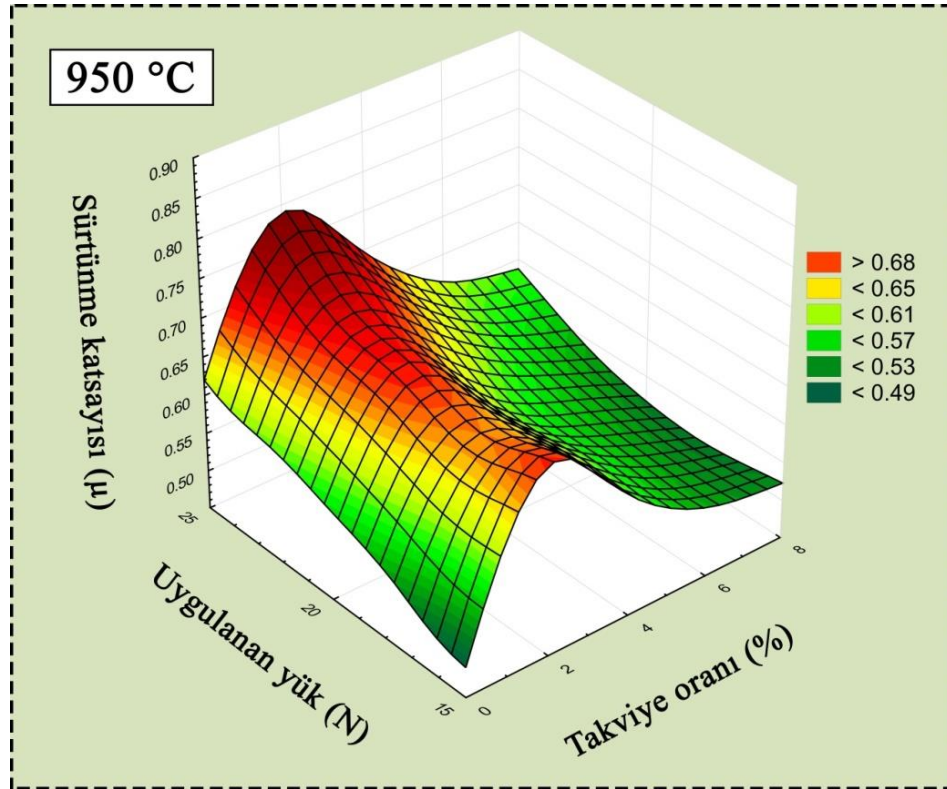
Şekil 7.24. 1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sıcaklık üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği



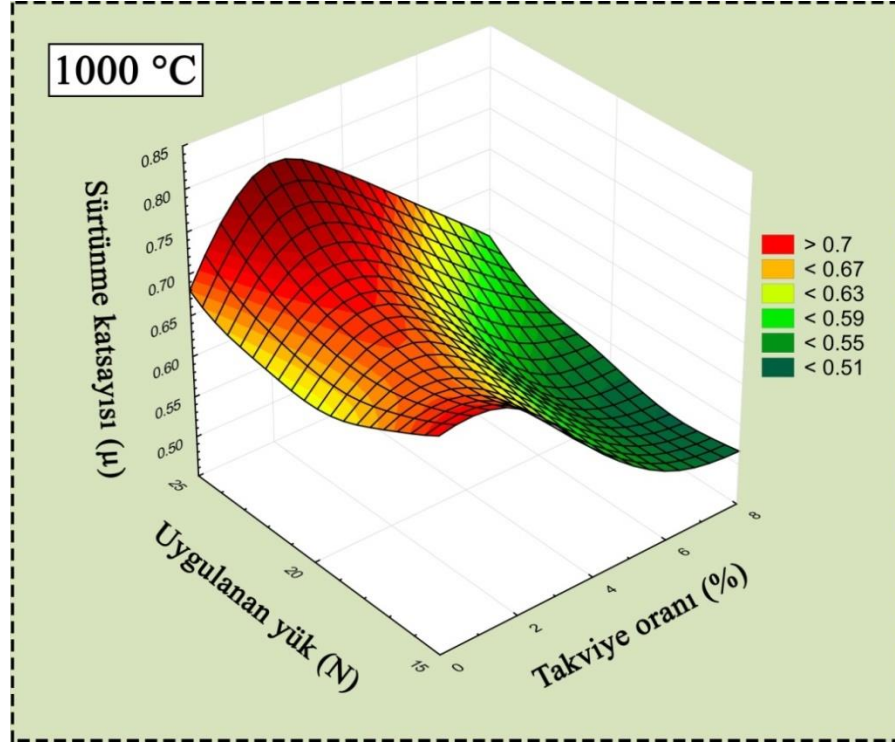
Şekil 7.25. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sıcaklık üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği

Aşınma testi sırasında kompozit malzemelerin aşınma verileri tribometre cihazı ile kayıt altına alınmıştır. Farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen kompozit numunelerin, Denklem 6.5'e göre elde edilen ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri Şekil 7.26-7.27 ve 7.28'deki 3 boyutlu yüzey grafiklerinde görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılabacağı üzere uygulanan yük arttıkça sürtünme katsayılarının da arttığı görülmektedir. Cui et al. [115], ürettikleri Cu-Fe-SiC kompozitlerine aşınma testi uygulanması sonucunda kayma hızı ve nano-SiC içeriğinin artmasıyla sürtünme katsayılarının da arttığını rapor etmişlerdir. Termomekanik deformasyon ve aşınma gibi faktörlerin sürtünme katsayısında değişikliklere neden olabileceği belirtilmiştir [113]. Sürtünme profili kayan temas fonksiyonu tarafından stabilize edildikten sonra her test için ortalama sürtünme katsayısında marjinal bir artış rapor edilmiştir [116]. Takviye partiküllerinin sürtünme katsayısında artışa neden olduğu görülmektedir. Saf bakır ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %2 takviye içeren numunelerin sürtünme katsayısında artış ve sonraki oranlarda azalma tespit edilmiştir. Sert takviye partiküllerinin aşınmaya karşı yüksek direnç gösterdiği bilinmektedir [117]. Genel olarak, partikül takviyesinin ağırlık oranının artması ile aşınma direncinin artması ve düşük bir sürtünme katsayısına sahip olması

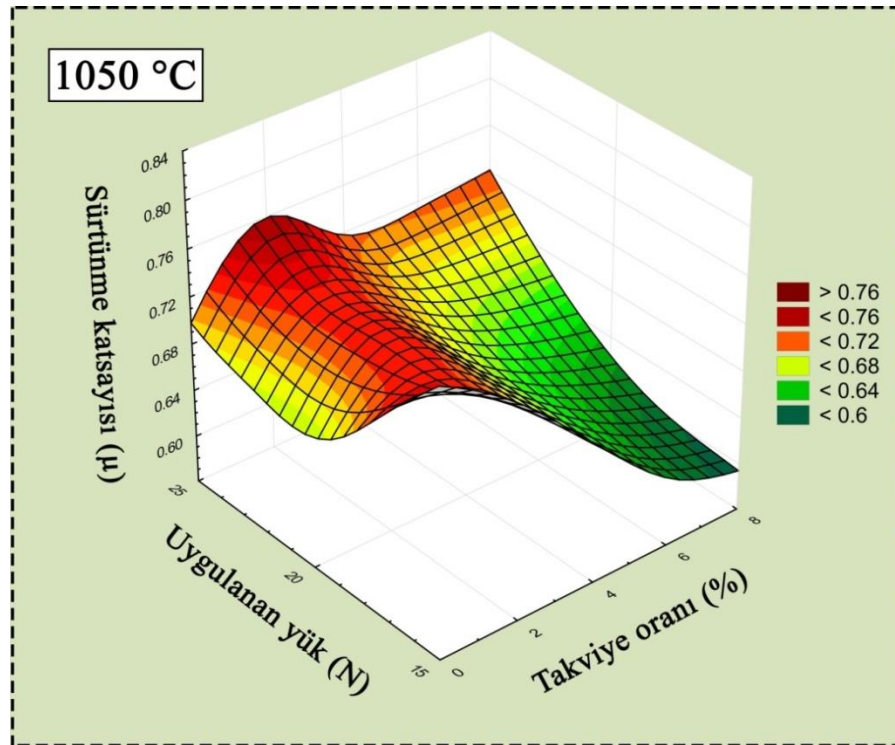
beklenmektedir. Bu çalışmada, takviye partiküllerinin ağırlık oranı arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. Makine elemanları birbirleri üzerinde çalışırken sürekli ya da belirli aralıklarla temas halindedir. Bu temas, aralarında bir sürtünme kuvveti oluşturmaktadır. Sürtünme katsayısı ne kadar büyük olursa, sürtünme kuvveti o kadar büyük olur ve makine elemanları birbiri üzerinde kolayca kayamaz. Böylece makine elemanları daha kolay aşınabilmektedir. Bu bağlamda sürtünme katsayısı 3 boyutlu yüzey grafikleri incelenerek en düşük sürtünme katsayısına sahip sinterleme sıcaklığı belirlenebilir. Elde edilen 3 boyutlu yüzey grafik verilerden de görüldüğü gibi sürtünme katsayısı açısından değerlendirildiğinde optimum sinterleme sıcaklığı, 1050 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.26. 950 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği



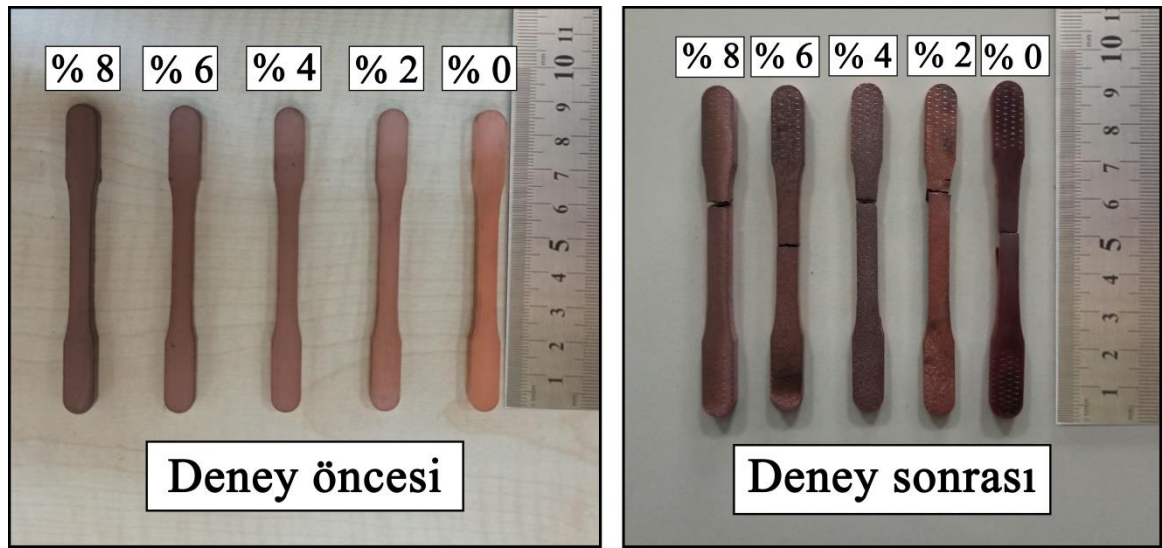
Şekil 7.27. 1000 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği



Şekil 7.28. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerde uygulanan yük ve takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiği

7.3.3. Çekme Analizleri

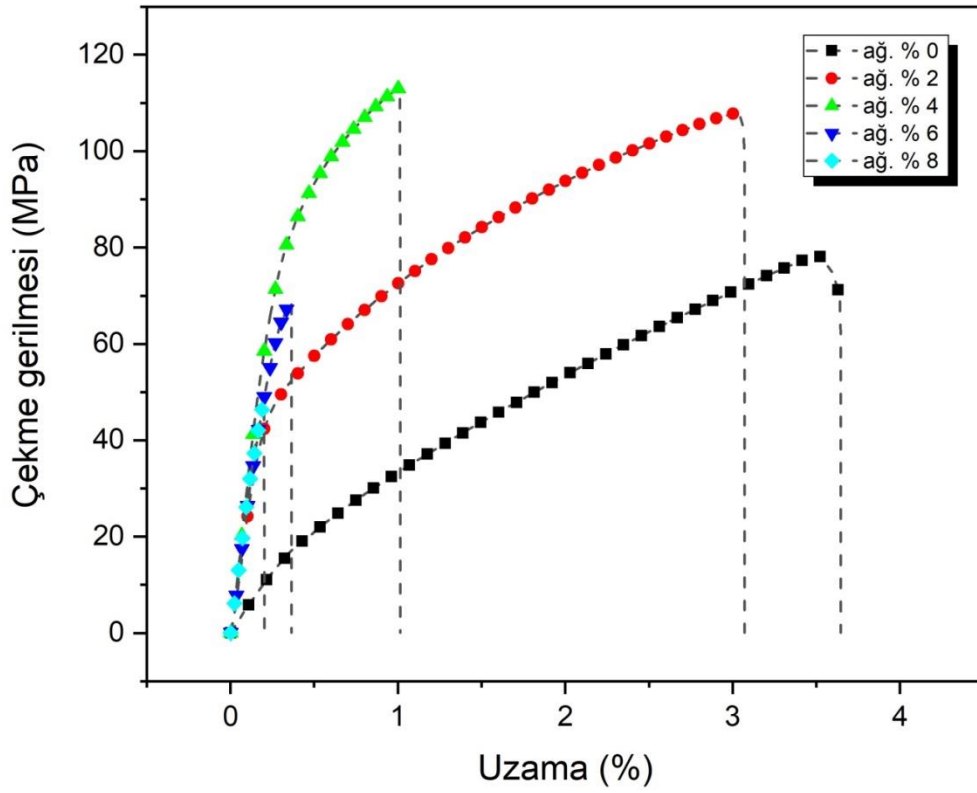
Sertlik ve aşınma deneyleri sonucunda optimum sinterleme sıcaklığı 1050 °C olarak belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak çekme deneyi için hazırlanan numuneler belirlenen optimum sıcaklıkta sinterlenerek çekme deney numuneleri üretilmiştir. 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen ve farklı takviye oranlarında üretilen çekme deney numunelerinin deneyden önce ve deneyden sonraki fotoğrafları Şekil 7.29’da görülmektedir. Şekil 7.30’da ise 1050 °C’de sinterlenmiş Cu/Ti-B-SiC kompozitlerinin çekme uzama grafiği görülmektedir.



Şekil 7.29. Çekme deneyi için üretilen numunelerin deney öncesi ve sonrası görüntüleri

Grafikten de anlaşılabacağı gibi, ağırlıkça %2 takviyeli numune ve saf bakır numunesi yüksek uzamaya sahiptir. Ağırlıkça %4-6-8 ile takviye edilen numunelerin daha düşük elastik uzama gösterdiği görülmektedir. Takviye oranı arttıkça uzamanın azaldığı tespit edilmiştir. Buna dayanarak, takviye oranı arttıkça kompozit malzemenin daha kırılgan hale geldiği söylenebilir. Çekme mukavemeti, saf bakır numunesinden ağırlıkça %4 takviyeli numuneye kadar yükselme eğilimindedir. Ağırlıkça %4 takviyeli numuneden itibaren çekme mukavemeti değerlerinin düştüğü görülmektedir. En yüksek çekme mukavemetinin (112,96 MPa) ağırlıkça %4 takviyeli numunede olduğu gözlenmiştir. Cu ana matrisine eklenen B parçacıkları, kompozit malzemeyi daha kırılgan hale getirebilmektedir. Bu nedenle üretilen kompozitlerin çekme dayanımı azalmaktadır. Bazarnik et al. [83] saf bakıra belirli miktarlarda SiC ekleyerek çekme mukavemetinde

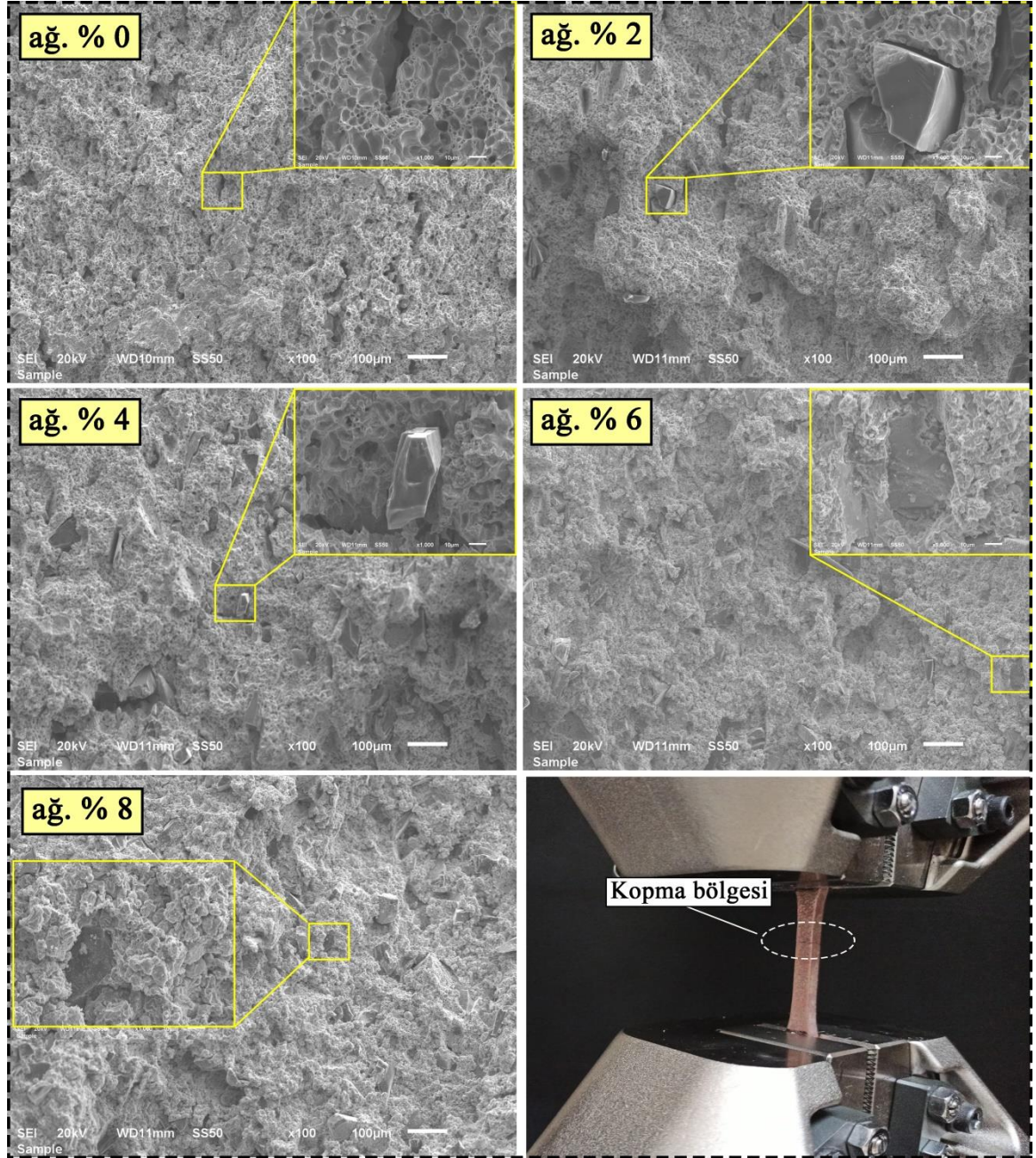
önemli artışlar elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Deng et al. [118], Cu-12Al-6Ni-xTi alaşımlarının sertliğini ve çekme dayanımını araştırmış ve artan Ti ilavesiyle çekme dayanımının (412,2 MPa) biraz arttığını (22 MPa) ve daha sonra azaldığını bildirmişlerdir. Chen et al. [119], Cu içerisine farklı oranlarda CNT ve Cr_xO_y nanoparçacıkları ekleyerek çekme mukavemetinde değişen artışlar saptandığını bildirmişlerdir. Sap [120], saf Cu'ya belirli oranlarda Co-Mo tozları ekleyerek hibrit kompozit malzemeler üretmiştir. Üretilen kompozit numunelere çekme testi uygulanmıştır. Deney sonunda ağırlıkça %5 Co-Mo takviyeli numunenin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu ve buna paralel olarak sünekliğin arttığı bildirilmiştir.



Şekil 7.30. Farklı oranlarda üretilen kompozitlerin çekme-uzama grafiği

Şekil 7.31'de çekme testinden sonra numunelerin kopma bölgelerinden alınan SEM fotoğraflarındaki yüzey morfolojileri görülmektedir. Kırık yüzeylerdeki görüntüler farklı büyütme oranlarında alınarak kopma bölgesindeki oluşumlar daha ayrıntılı bir şekilde gözlemlenmiştir. SEM fotoğraflarından mikro ve makro gözenekler açıkça görülmektedir. Ayrıca yüksek büyütme oranına sahip SEM fotoğraflarında, bakır tane sınırlarındaki boyun oluşumları dikkat çekmektedir. Kırık yüzeylerdeki yükseklik farkları da belirgin bir şekilde görülmektedir. Saf bakır numunesinden alınan SEM fotoğrafındaki

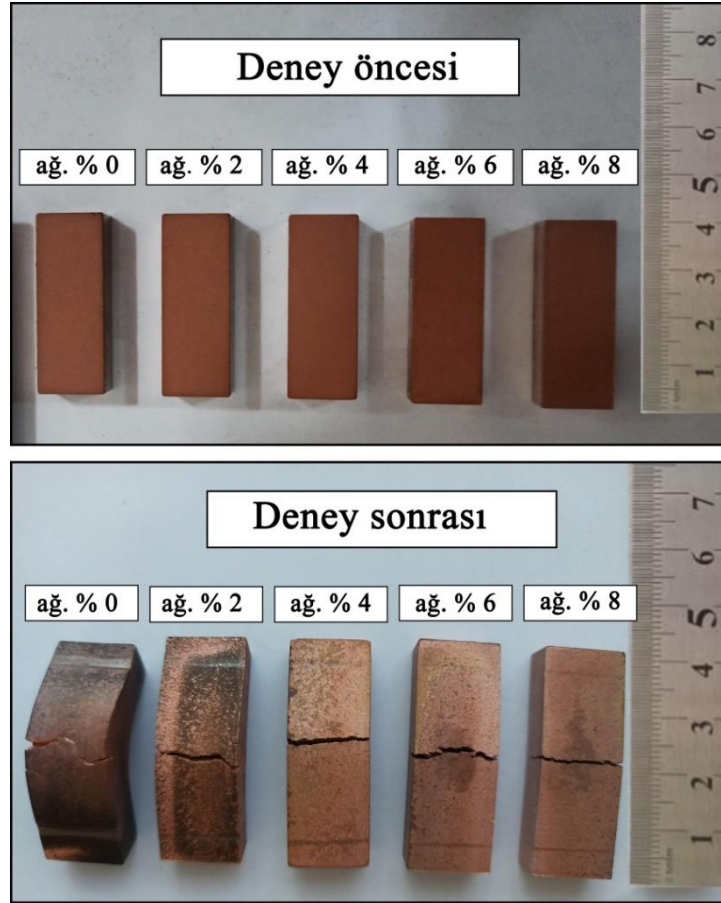
yükseklik farklarının, takviye ilave edilen numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Ana matrise gömülü olan takviye partikülleri, ağırlıkça %2-4-6 ve 8 takviyeli numunelerde açıkça görülmektedir. Kırık yüzeylerde herhangi bir topaklanmaya (aglomerasyona) rastlanmamıştır.



Şekil 7.31. Çekme deneyinden sonra oluşan kırık yüzeylerin SEM fotoğrafları

7.3.4. Üç Nokta Eğilme Analizleri

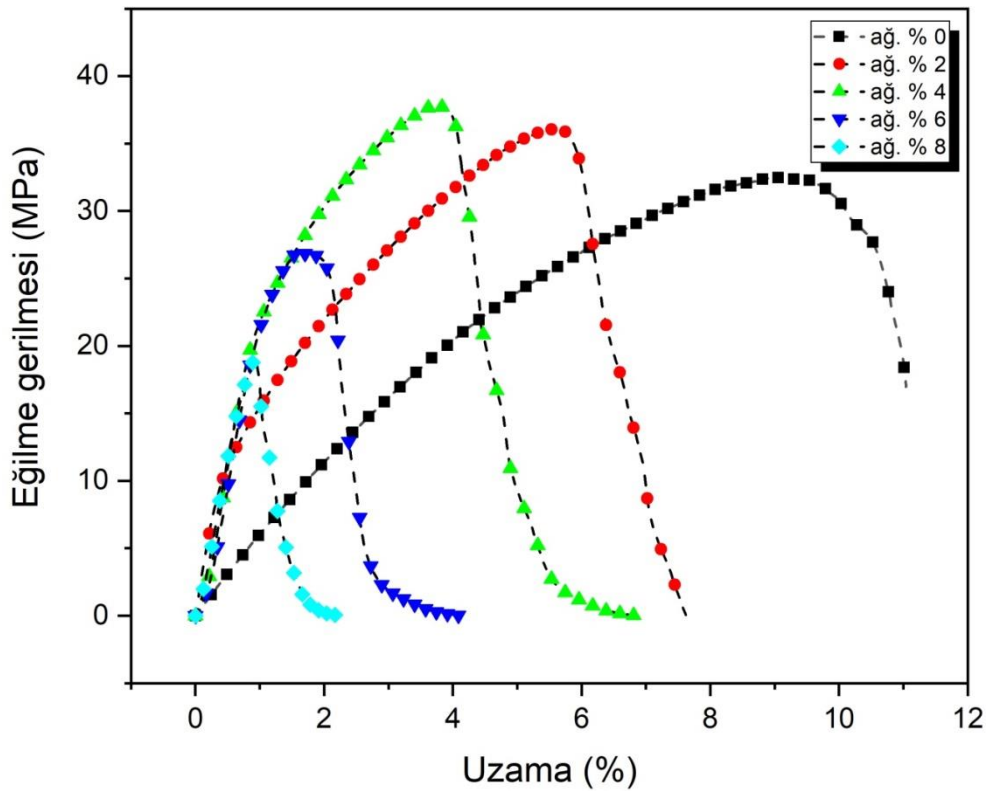
Optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenen 1050 °C’de sinterlenen kompozit malzemelere üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Şekil 7.32’de üretilen kompozitlerin deney öncesi ve deney sonrası çekilen fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 7.32. Üç nokta eğilme numunelerinin deney öncesi ve sonrası görüntüleri

Test numunelerinin takviye oranına bağlı olarak eğilme gerilmeleri Şekil 7.33’teki grafikte görülmektedir. Grafikte farklı oranlardaki kompozit malzemelerin neden olduğu plastik deformasyon nedeniyle lineer olmadığı tespit edilmiştir. Bu grafikteki tepe noktaları farklı oranlarda üretilen kompozit malzemelerin kırılma noktalarını temsil etmektedir. 1050 °C’de farklı takviye oranlarında sinterlenen numunelerin üç nokta eğilme deneyinden elde edilen veriler saf bakır numunesi ile karşılaştırılmıştır. Ağırlıkça %4 takviye içeren numunede en yüksek eğilme gerilmesi 37,76 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük eğilme gerilmesi ise ağırlıkça %8 takviyeli kompozit numune için

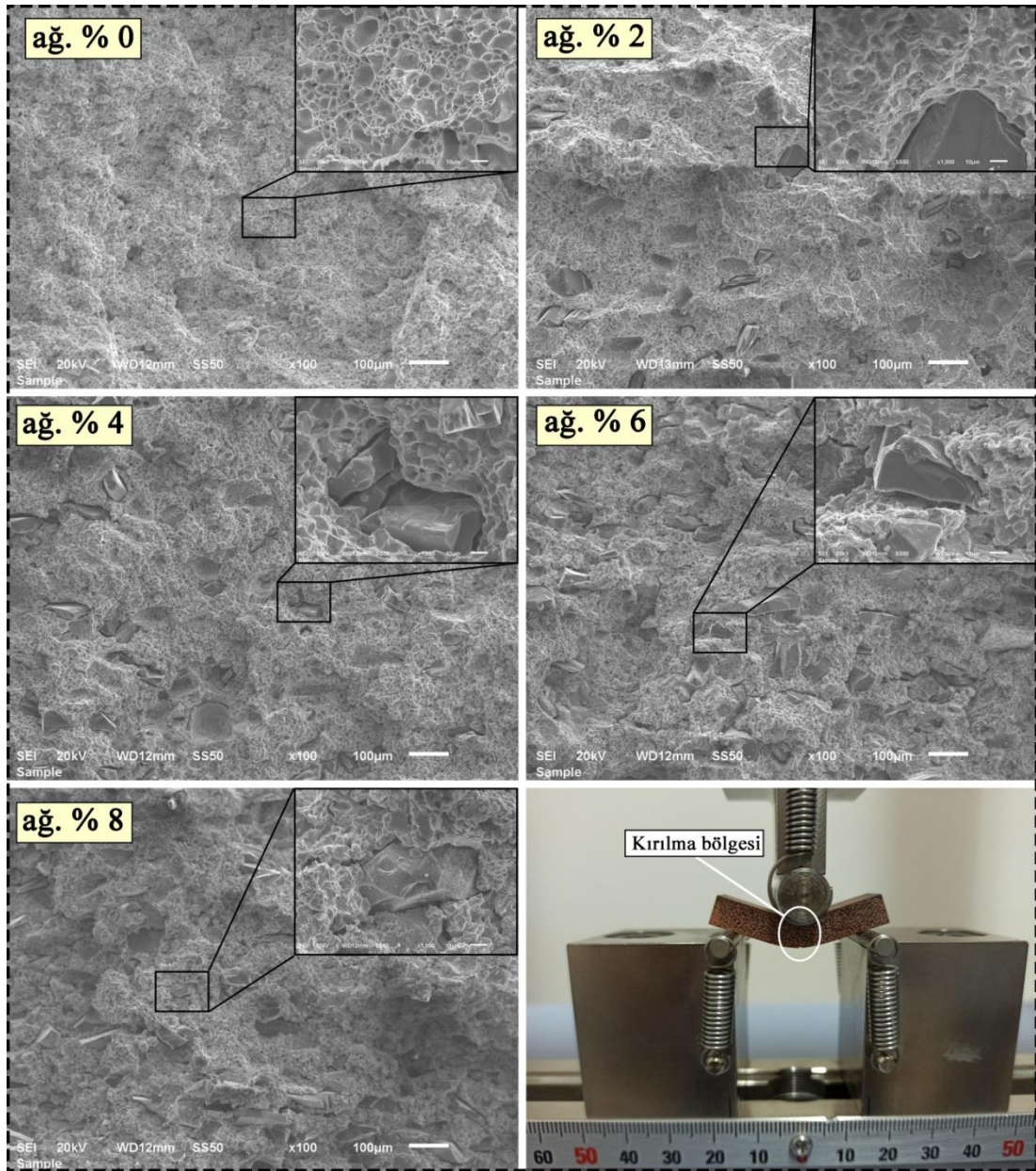
18,96 MPa olarak tespit edilmiştir. Genel olarak takviye oranının artmasıyla eğilme mukavemetinin bir miktar arttığı ve ardından azaldığı görülmektedir. En yüksek elastik uzamanın saf bakır numunesinde, en düşük uzamanın ise ağırlıkça %8 takviyeli numunesinde olduğu anlaşılmaktadır. Takviye oranı ne kadar yüksek olursa, elastik uzamanın o kadar düşük olduğu söylenebilir. Deneysel olarak yapılan bir çalışmada, B partiküllerinin oranının artmasıyla kompozit malzemenin eğilme mukavemetinin azaldığı rapor edilmiştir [121]. Xiao et al. [122], Cu-Sn-Ti kompozit alaşımlarına tungsten karbür (WC) ekleyerek aşındırıcı segment numuneleri üretmişlerdir. Ağırlıkça %25 WC partikülleri içeren numunelerin eğilme mukavemetinde bir artış ve daha fazla WC içeren numunelerde bir azalma meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Islak et al. [123], bakıra ağırlıkça %1, 3, 5, 10 ve 15 oranında titanyum karbür (TiC) ekleyerek kompozit malzemeler üretti. Üç nokta eğilme testi sonucunda TiC ilavesi ne kadar yüksekse eğilme dayanımının o kadar düşük olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 7.33. Farklı oranlarda üretilen kompozitlerin üç nokta deney sonuç grafiği

Şekil 7.34'te üç nokta eğilme testi sonucu oluşan kırık yüzeylerin SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından da anlaşılabacağı gibi, mikroyapıda takviye partiküllerindeki artış açıkça görülmektedir. Saf bakırın kırılma yüzeyinde sünek bir

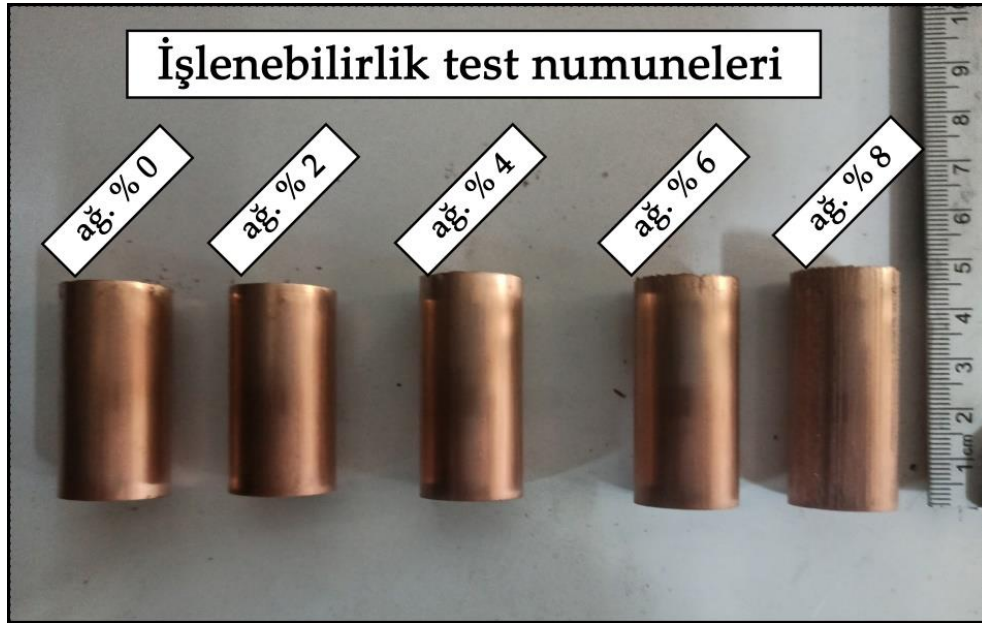
davranış sergilediği görülmektedir. Eğilme mukavemeti test sonuçlarına bakıldığında, en yüksek elastik uzama değerlerine saf bakır numunesinin sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yüzeylerdeki yükseklik farkları tüm fotoğraflarda net olarak tespit edilmiştir. Kırık yüzeylerde mikro ve makro düzeyde gözenekler mevcuttur. Bu gözeneklilik ağırlıkça %2 takviyeli numunede en düşük olarak belirlenmiş ve artan takviye oranına paralel olarak gözeneklilik artmıştır. Yoğunluk testi sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Kırık yüzeylerde bulunan takviye partikülleri açıkça görülmektedir.



Şekil 7.34. Üç nokta eğilme deneyinden sonra elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri

7.4. İşlenebilirlik Özellikleri

Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen silindir şeklindeki numunelerin işlenebilirlik özellikleri, talaşlı imalatla bu numuneler için en uygun yöntem olan tornalama işlemiyle yapılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri ISO 3685 kalite standartlarına uygun olarak yapılmış olup her bir deney için yeni kesici takımlar kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak; iki farklı kesme hızı (100 ve 150 m/dak), iki farklı ilerleme hızı (0,2 ve 0,4 mm/dev) ve bir kesme derinliği (0,5 mm) seçilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin işlenebilirlik özellikleri; yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve talaş morfolojisi açısından ele alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 7.35'te işlenebilirlik test numunelerine ait fotoğraf görülmektedir.

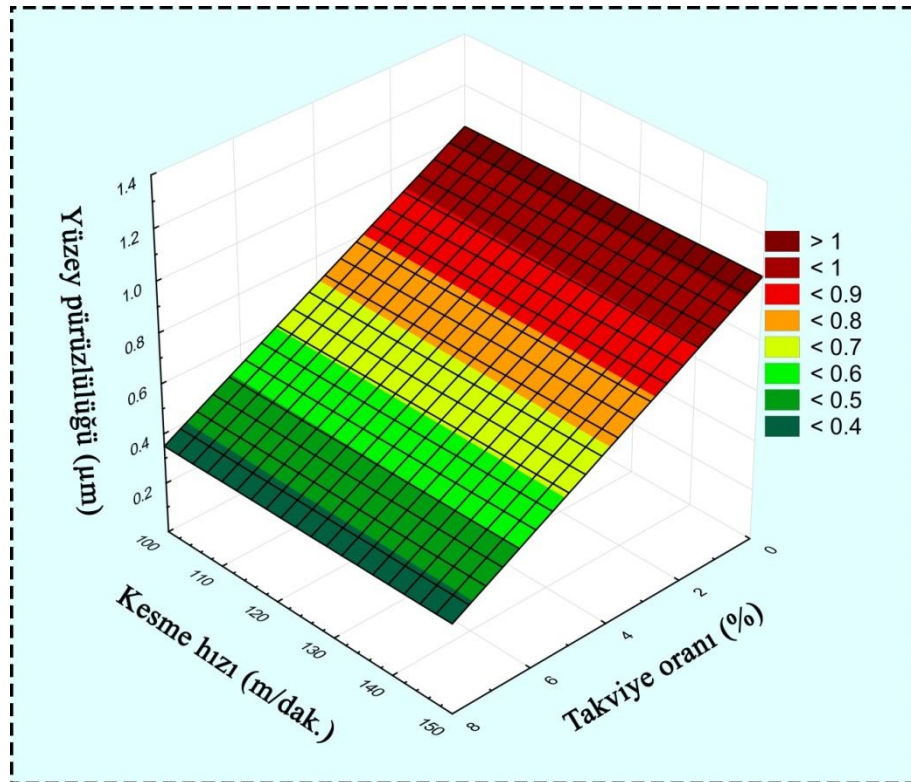


Şekil 7.35. Farklı oranlarda üretilen işlenebilirlik test numuneleri

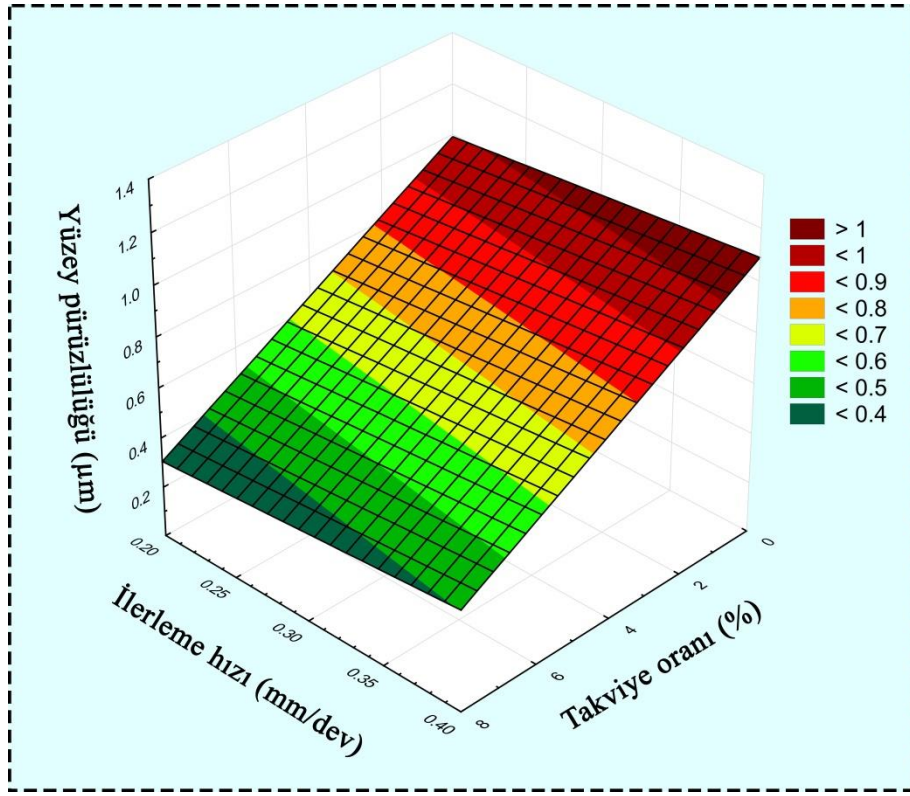
7.4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Analizleri

Şekil 7.36 ve 7.37, farklı işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini gösteren 3 boyutlu yüzey grafiklerini göstermektedir. Genel olarak sonuçlar; artan takviye oranı ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığını göstermektedir. İlerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde az da olsa artış meydana geldiği görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünde bir miktar azalma tespit edilmiştir. Genel olarak

kesme hızının artması ile plastik deformasyon kolaylaşabilmekte ve daha rahat bir talaş akışı gözlemlenebilmektedir [124]. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Torres et al. [125], Al-Cu alaşımlarının kuru tornalama sırasında yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Deneyler sonucunda tüm yüzey pürüzlülük özellikleri arasında ilerleme hızının en etkili faktör olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu araştırmada yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden elemanın takviye oranı olduğu görülmüştür. Takviye oranı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. B takviye oranının artmasıyla, kesici takım ile kesilen malzeme arasında bir yağlayıcı görevi görmesi sebebiyle hareket ettiği için kesici takım tarafından daha iyi talaş kaldırmaya yol açmaktadır. Sonuç olarak, Cu ana matristeki partikül takviye oranı arttıkça tornalama işleminden sonra yüzey pürüzlülüğünün azaldığı belirlenmiştir. Ramkumar et al. [126], Cu-10Zn matrisine belirli oranlarda Al_2O_3 eklenmesiyle mekanik alaşımlama ile nano ve mikro boyutlu kompozitler üretildiğini bildirmişlerdir. Sonuç olarak nanokompozitlerin yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma tespit edildiğini bildirmişlerdir.



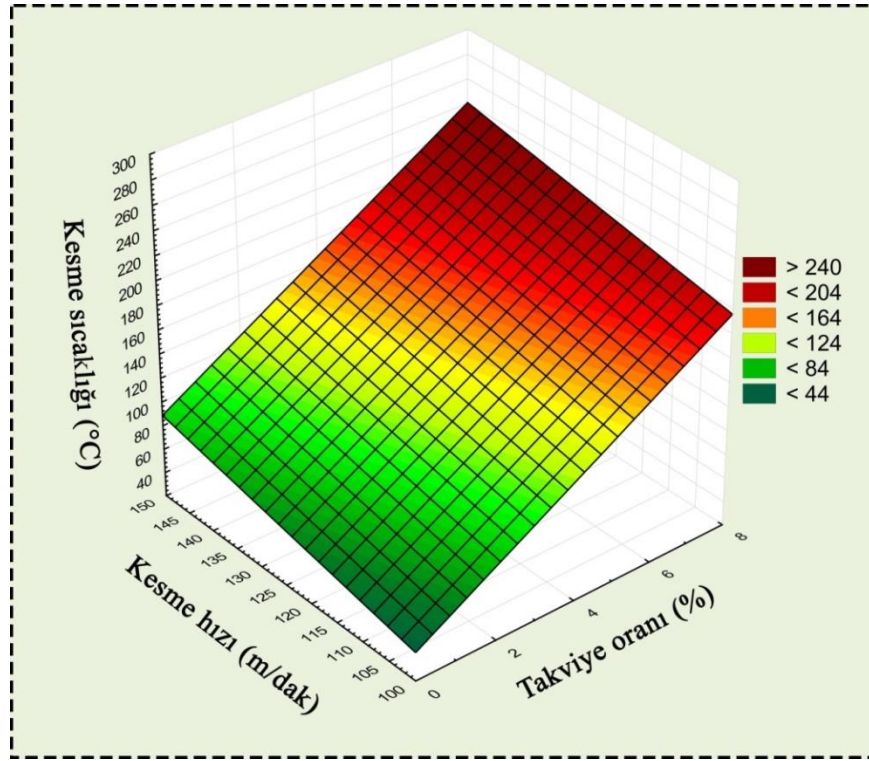
Şekil 7.36. Kesme hızı ve takviye oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 3B yüzey grafiği



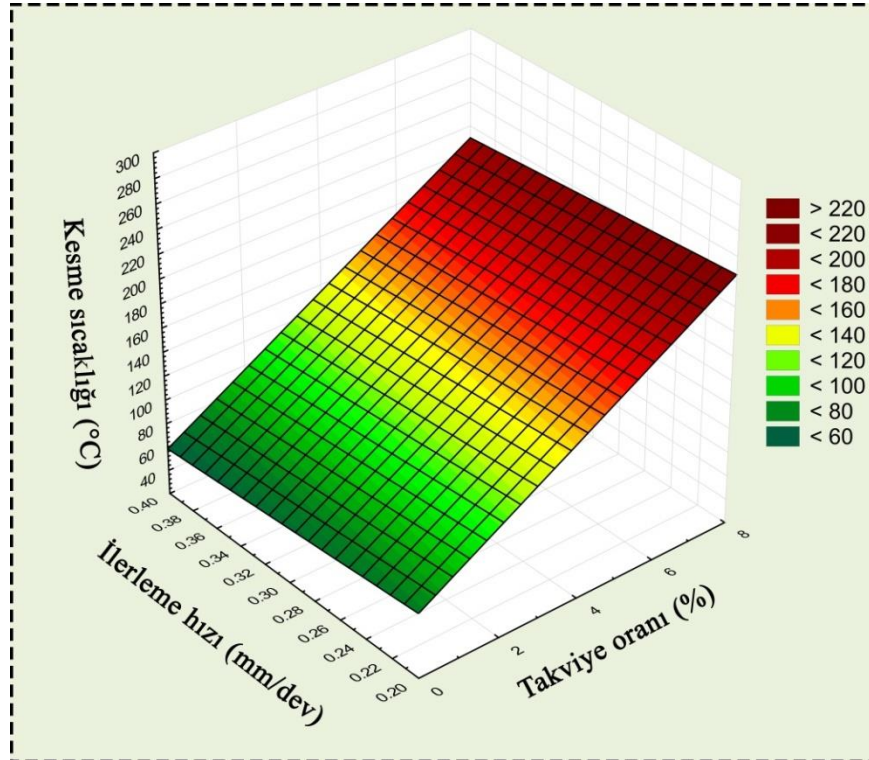
Şekil 7.37. İlerleme hızı ve takviye oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 3B yüzey grafiği

7.4.2. Kesme Sıcaklığı Analizleri

Şekil 7.38 ve 7.39’da 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen, farklı işleme koşulları altında işlenen kompozitlerin kesme sıcaklıklarının 3 boyutlu yüzey grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, takviye oranları arttıkça kesme sıcaklıklarının arttığı dikkat çekmektedir. Kesme sıcaklıkları 30 °C ile 260 °C arasında değişmektedir. Takviye oranındaki artışın kesme sıcaklığını artırması, kompozitteki sert takviye partiküllerinin sürtünme katsayısının artması ile açıklanabilir. Ayrıca ilerleme hızının kesme sıcaklığını çok fazla etkilemediği ve kesme hızındaki artışın kesme sıcaklığında artışa neden olduğu söylenebilir. Literatürde, iki karşıt temas yüzeyi arasındaki kesme hızının artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının da artacağı rapor edilmiştir [127]. Gatto et al. [128] kesme hızındaki bir artışın kesme sıcaklığını artıracağını ve ayrıca yüzey pürüzlülüğünü, takım aşınmasını ve takım ömrünü etkileyeceğini bildirmiştir. Batista et al. [129] başlangıçta takım ve malzeme arasındaki sürtünmenin temas alanındaki sıcaklığı artıracağını bildirmiştir.



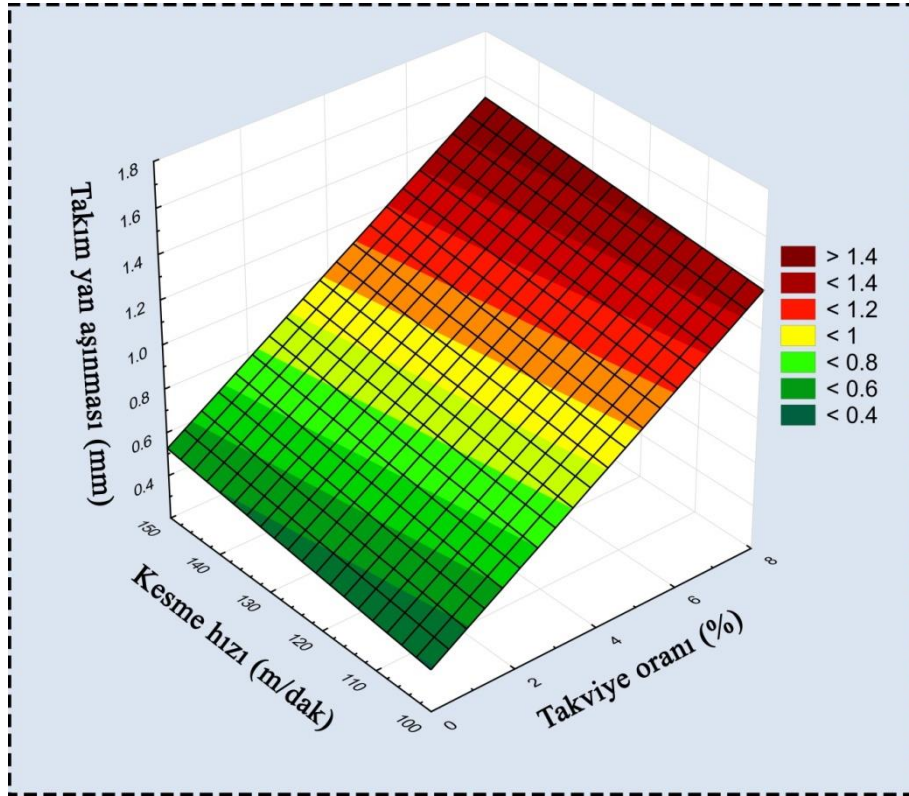
Şekil 7.38. Kesme hızı ve takviye oranının kesme sıcaklığına etkisini gösteren 3B yüzey grafiği



Şekil 7.39. İlerleme hızı ve takviye oranının kesme sıcaklığına etkisini gösteren 3B yüzey grafiği

7.4.3. Takım Aşınması Analizleri

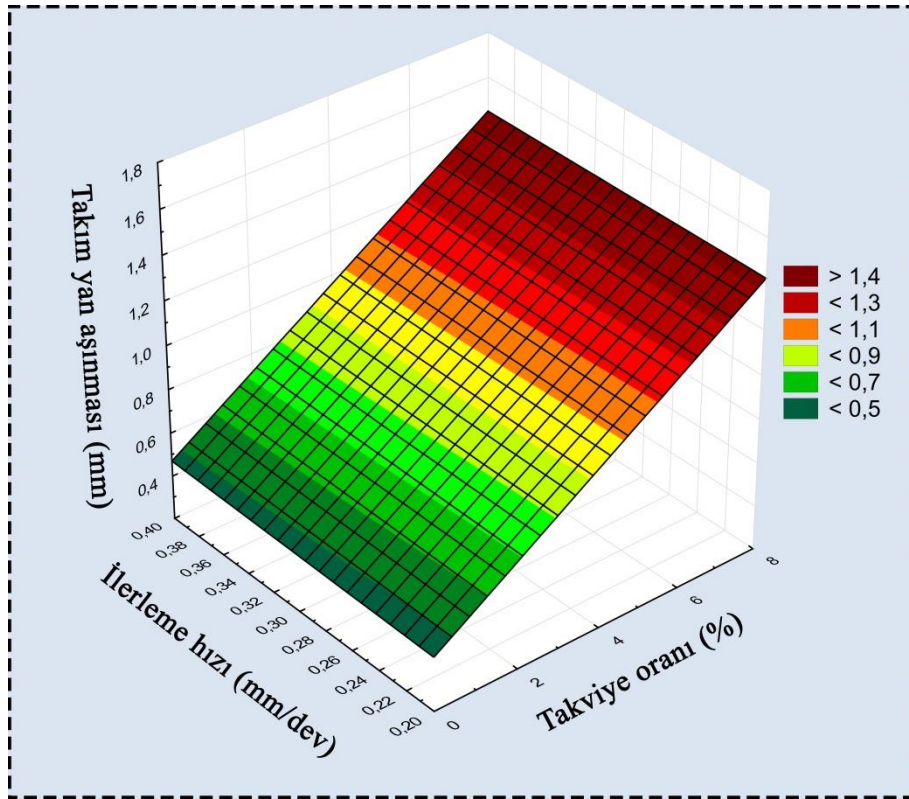
Şekil 7.40 ve 7.41’de farklı aşınma parametrelerinin yan aşınma üzerindeki etkilerini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri görülmektedir. 3 boyutlu yüzey grafiklerinde, takviye oranı, ilerleme hızı ve kesme hızının takım yan aşınması üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir.



Şekil 7.40. Kesme hızı ve takviye oranının takım yan aşınması üzerine etkisini gösteren 3B yüzey grafiği

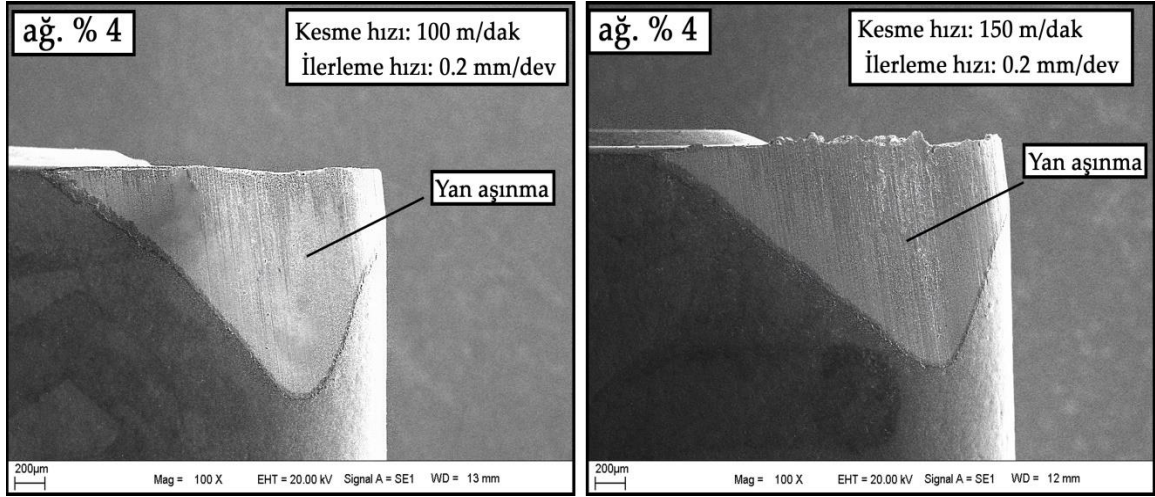
3 boyutlu yüzey grafikleri incelendiğinde genel olarak takviye oranlarının artmasıyla beraber kesici takım yan aşınma değerlerinin de arttığı görülmektedir. Saf bakır numunelerinin işlenmesinde minimum kesici takım yan aşınması gözlemlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında, takviye partiküllerinin sertliği nedeniyle takviye oranı arttıkça kesici takım yan aşınması da artmaktadır. İlerleme hızının kesici takım yan aşınma oranı üzerinde daha az etkili olduğu söylenebilir (Şekil 7.41). Minimum kesici takım yan aşınması, daha düşük bir ilerleme hızı seçilerek elde edilebilmektedir. Kesme hızının ve takviye oranının kesici takım yan aşınması üzerindeki etkilerine değinecek olursak; kesme hızının artmasıyla kesici takım yan aşınmasının arttığı gözlemlenmiştir. Deneysel

olarak yapılan bir çalışmada, Al 7075 matrisli hibrit kompozitlerin tornalanmasında, kesme hızının artmasıyla yanak aşınmasının arttığı rapor edilmiştir [130]. Genel olarak 3 boyutlu yüzey grafiklerine bakıldığında kesme hızı ve ilerleme hızının artmasının takım yan aşınmasını arttırdığı görülmektedir. İşleme sırasındaki yüksek sıcaklıklar da aynı zamanda kesici takım yan aşınması üzerinde oldukça önemli etkilere sahiptir [131]. Senthilkumar and Tamizharasan [132], kesme bölgesinde artan sıcaklıkla takım yan aşınmasının da aynı şekilde artacağını bildirmişlerdir.

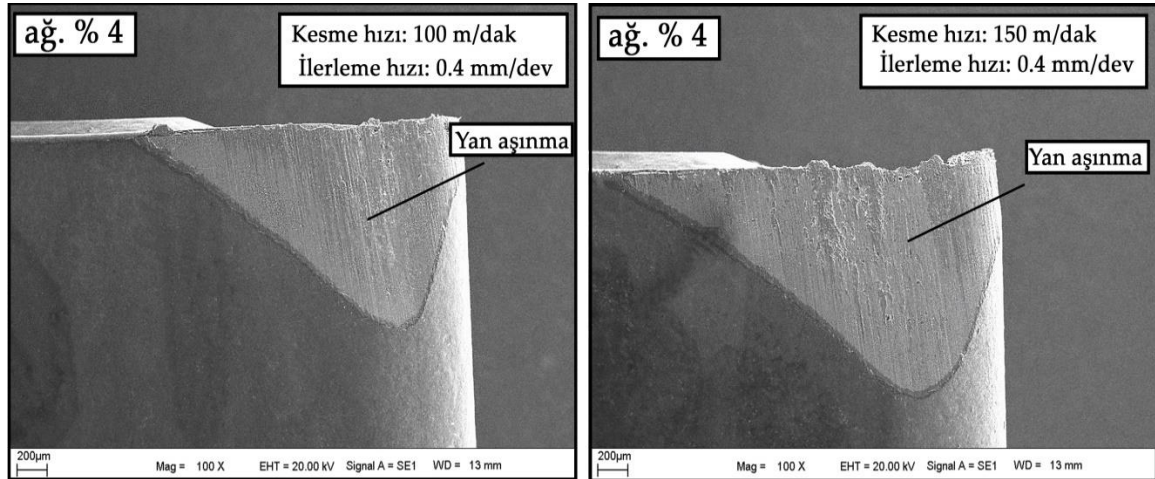


Şekil 7.41. İlerleme hızı ve takviye oranının takım yan aşınması üzerine etkisini gösteren 3B yüzey grafiği

Şekil 7.42 ve 7.43'te 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen ağırlıkça %4 güçlendirme oranına sahip ve farklı işlenebilirlik parametreleri (Kesme hızı: 100-150 m/dak, İlerleme hızı: 0,2-0,4 mm/dev) koşulları altında işlenen kompozit numunelere ait kesici takım yan aşınma SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından, kesici takım yan aşınma miktarları net bir şekilde görülmektedir. Kesici takım üzerinde görülen açık renkli bölgelerin yan aşınma bölgeleri olduğu tespit edilmiştir.

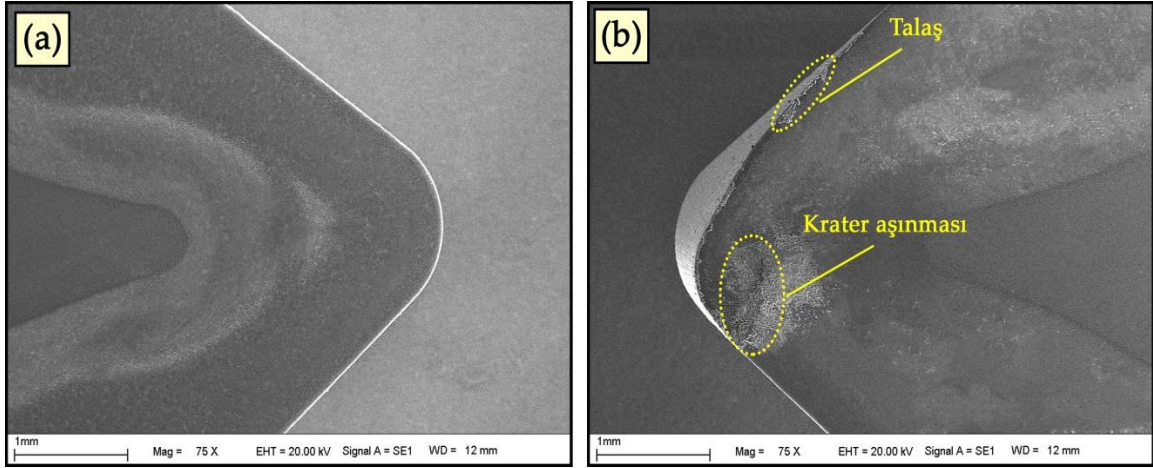


Şekil 7.42. Farklı işlenebilirlik parametreleri ($f_n=0,2$ mm/dev, $V_c=100-150$ m/dak) uygulanan kesici takımında oluşan yan aşınma görüntüleri



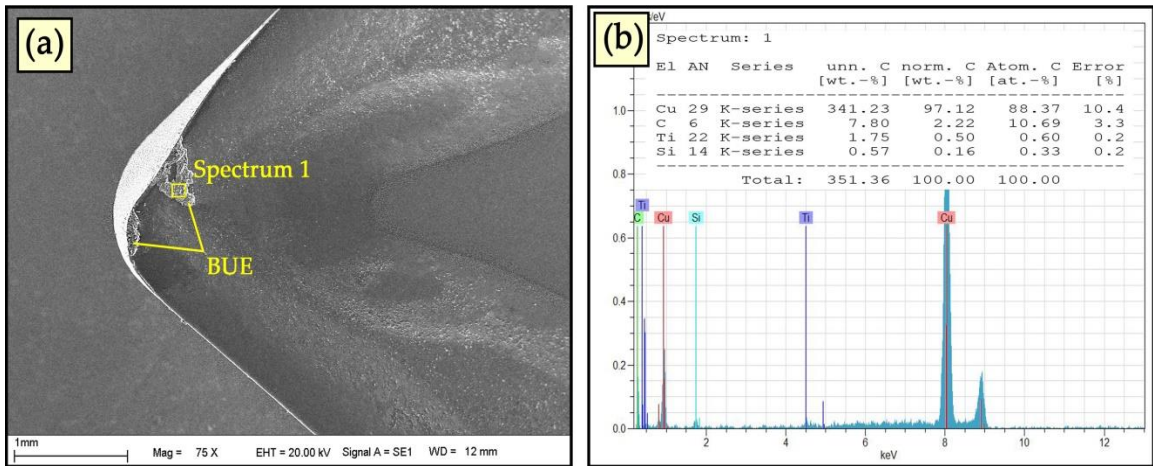
Şekil 7.43. Farklı işlenebilirlik parametreleri ($f_n=0,4$ mm/dev, $V_c=100-150$ m/dak) uygulanan kesici takımında oluşan yan aşınma görüntüleri

Şekil 7.44'te kullanılmamış bir kesici takım ve farklı işleme koşullarında, ağırlıkça %8 takviyeli kompozit numunenin tornalanmasında kullanılan kesici takım üst yüzeyinde oluşan aşınma tiplerini gösteren SEM fotoğrafları görülmektedir. Farklı oranlarda üretilen kompozit numunelerin farklı işleme koşullarındaki aşınma tipleri de oldukça farklılık göstermiştir. Genel olarak kesici takımlarda en çok göze çarpan aşınma türleri; yapışma ve krater aşınmasıdır. İşleme sırasında oluşan yüksek sıcaklıkların krater aşınmasına neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 7.44'te üst yüzeyde meydana gelen krater aşınması ve talaş yapışması net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.44. a) Kullanılmamış kesici takım, b) Ağırlıkça %8 takviyeli kompozit numunesinin tornalanması sırasında oluşan üst yüzey aşınma görüntüsü

Kesici takımlarda meydana gelen aşınma türlerinden birisi de BUE olarak adlandırılan talaş yığılmasıdır. Şekil 7.45'te ağırlıkça %4 takviyeli kompozit numunesinin tornalanması sırasında kesici takım üst yüzeyinde oluşan talaş yığılması SEM/EDS fotoğrafı görülmektedir. Talaş yığılması şeklinde olduğu düşünülen bölgeden yapılan EDS analizi (Şekil 7.45b) ile doğrulama yapılmıştır. Talaş yığılması, kuru kesme koşulları altında görülen en yaygın aşınma türlerinden biri olarak bilinmektedir. Sarıkaya and Güllü [133] kesme hızının artmasıyla BUE oluşumunun azaldığını bildirmişlerdir.

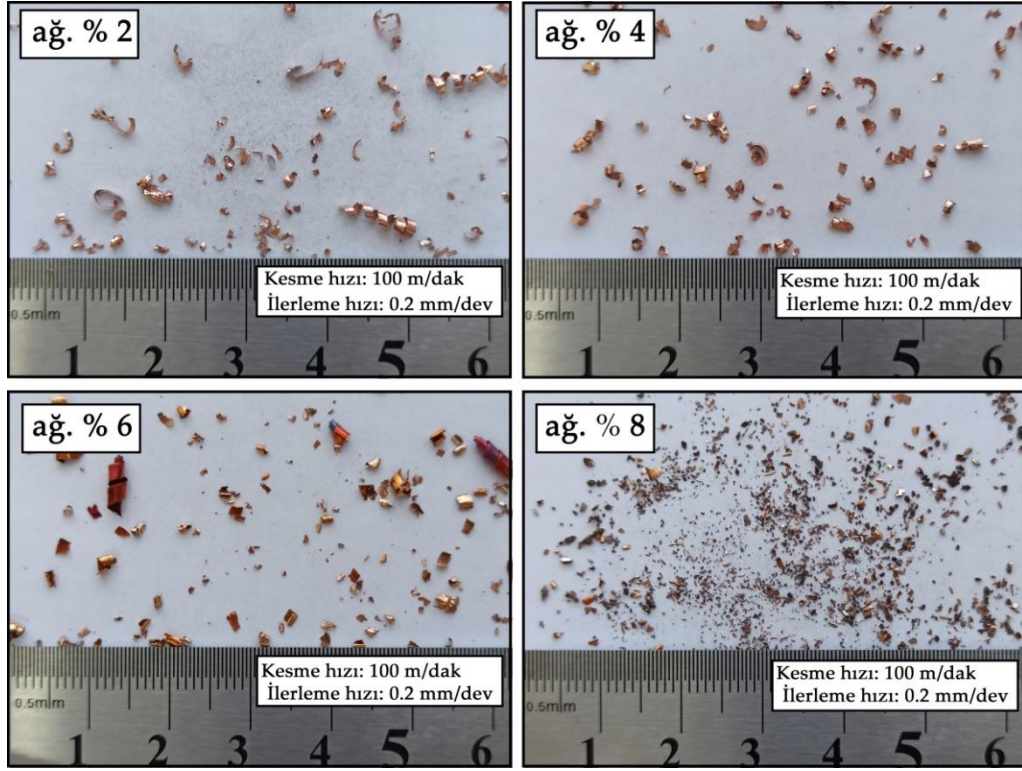


Şekil 7.45. Ağırlıkça %4 takviyeli numunenin işlenmesi sırasında kesici takımın üst yüzeyinde oluşan BUE; a) SEM görüntüsü, b) Bölgesel EDS analizi

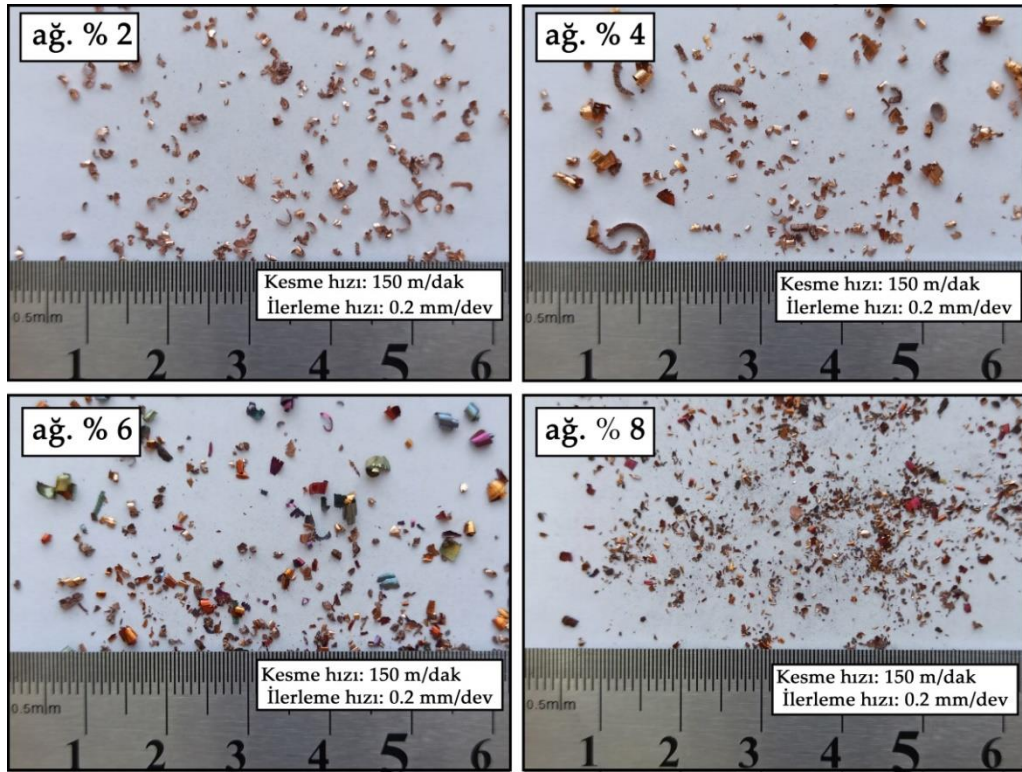
7.4.4. Talaş Morfolojisi

Talaş morfolojisi, kesme mekanizmasının bir parçası olarak işlenebilirlik özellikleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Talaş türleri, aslında kesme işleminin uygun bir şekilde yapılıp yapılmadığını gösteren bir klavuz niteliğindedir. Çünkü istenmeyen şekillerde oluşan talaşlar; titreşim, aşırı takım aşınması ve düşük parça kalitesi gibi istenmeyen sorunlara yol açabilmektedir. İstenmeyen talaşlar kesme işlemi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu nedenle, talaş izleme ve karakterizasyon, işlenebilirliğin önemli bir bölümünü kapsamaktadır. Tornalama sırasında öncelikle istenilen talaş şeklinin belirlenmesi gerekmektedir. Temel olarak, uzun talaşlar, iş parçası ve kesici takımın etrafını sarma potansiyeline sahiptir ve bu da kesici takımın arızalanmasına neden olmaktadır [134]. Çok uzun talaşlar istenmediği gibi toz şeklinde talaşlarda kesme alanını kirlettiği için pek tercih edilmemektedir. Tornalamada uygun bir kesme işlemi için, talaşların belirli bir boy uzamasından önce kırılması istenmektedir. Talaş kırma mekanizmaları arasında en çok istenen kendi kendine kırılmadır.

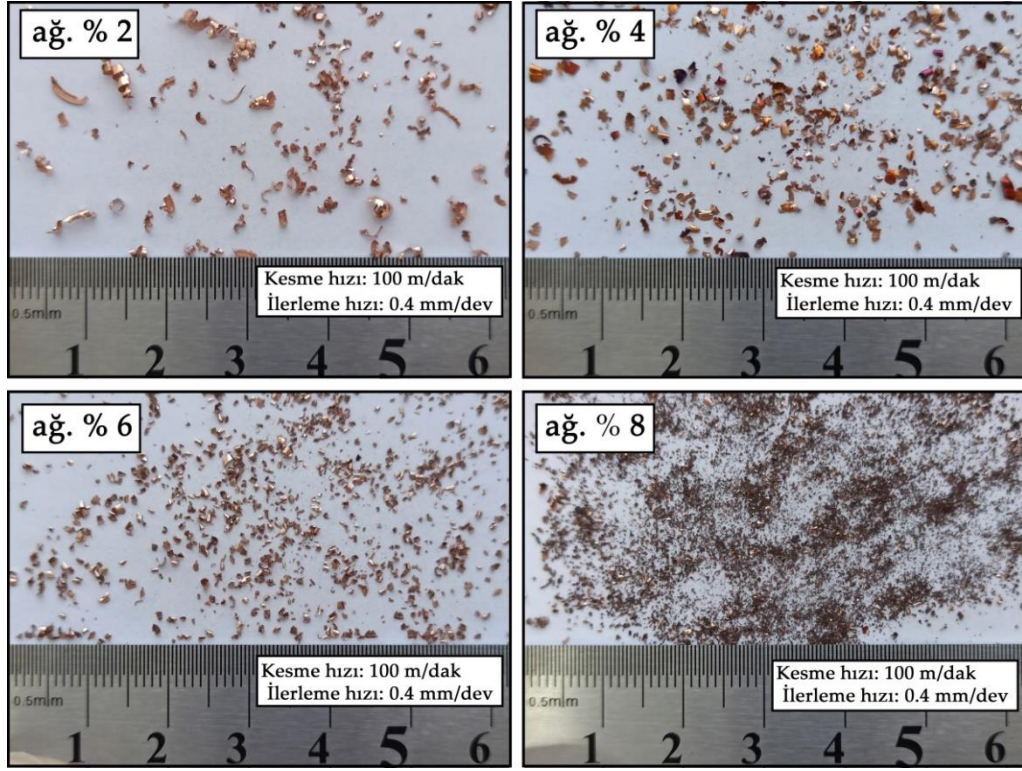
Şekil 7.46-7.47-7.48 ve 7.49’da farklı oranlarda ve farklı işleme parametreleri (Kesme hızı: 100-150 m/dak, İlerleme hızı: 0,2-0,4 mm/dev) altında oluşan talaş tiplerini gösteren fotoğraflar görülmektedir. Genel olarak takviye oranlarının artmasıyla oluşan talaş türlerinin giderek küçüldüğü ve toz haline dönüştüğü görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi ilerleme hızı ve takviye hızının artmasıyla oluşan talaşların küçüldüğü tespit edilmiştir. Buradan takviye ve ilerleme hızının talaş morfolojisini etkilediği söylenebilir. Yapılan bir çalışmada, farklı takviye partiküllerinin etkisiyle matris malzemesinin sünekliğinin azaldığı ve süreksiz talaşların oluştuğu bildirilmiştir [130]. Tamizharasan et al. [135] toz metalurjisi yöntemiyle Al-4Cu-7,5SiC kompozitleri üretmişlerdir. TNMG 120404 karbür uçlar kullanarak tornalama testleri gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, kesme hızının talaş morfolojisini %64,13 ve kesme derinliğini %35,26 etkilediğini göstermiştir. Bai et al. [136], kuru ultrasonik destekli tornalama (UAT) ve geleneksel tornalamada Al/SiC_p metal matrisli kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, ultrasonik destekli tornalamada daha iyi yüzey topografyası ile sürekli ve yarı sürekli talaşlar elde edildiğini bildirmişlerdir.



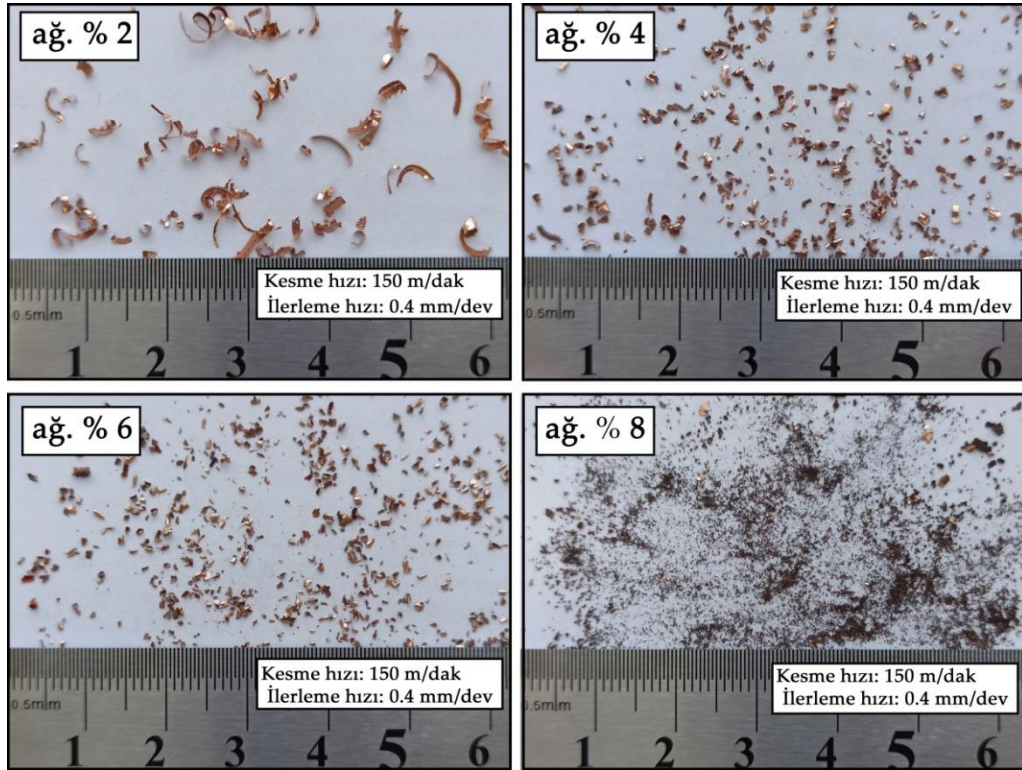
Şekil 7.46. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri



Şekil 7.47. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri



Şekil 7.48. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri



Şekil 7.49. Farklı işleme parametreleri uygulanması sonucunda oluşan talaş morfolojileri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile farklı oranlarda üretilen Cu/Ti-B-SiC hibrit metal matrisli kompozit malzemelerin farklı sinterleme sıcaklıklarındaki mikroyapı, sertlik ve aşınma özellikleri araştırılmıştır. Belirlenen optimum sintreleme sıcaklığında çekme, üç nokta eğilme ve işlenebilirlik özellikleri araştırılarak farklı oranlarda üretilen kompozitlerin deneyleri yapılmıştır. Detaylı bir şekilde irdelenen deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Farklı sinterleme sıcaklıklarda (950, 1000, 1050 °C) ve farklı takviye oranlarında üretilen Cu/Ti-B-SiC kompozitlerine ait SEM sonuçlarına genel olarak bakıldığında takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda matris yapının bakırca zengin olduğu ve herhangi bir topaklanmaya (aglomerasyon) rastlanmadığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte matris ile takviye parçacıkları arasındaki boşlukların azaldığı gözlemlenmiştir.
- Üretilen kompozit numunelerden yapılan SEM/EDS analizlerine göre matris yapı içerisinde gömülü halde bulunan takviye elemanları tespit edilmiştir. Yapılan tespitler neticesinde SEM/EDS analizi ile Ti ve SiC toz partikülleri tespit edilmiş, parçacık boyutunun çok küçük olması sebebiyle B, matris yüzeyinde görülememiştir. Ayrıca matris yapının bakırca zengin bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca SEM/EDS analiz sonuçlarına göre yapı içerisinde oksit ya da herhangi bir yabancı bileşene rastlanmadığı belirlenmiştir.
- Yapılan elementel haritalama analizi (Mapping) ile SEM/EDS analizinde tespiti yapılan toz partiküllerinin varlığı doğrulanmıştır. Ayrıca elementel haritalama analizi ile elde edilen görüntülerde bakır tane sınırları dikkatli bir şekilde incelendiğinde sıvı faz sinterlemenin oluşmadığı tespit edilmiştir.

- Yapılan X-RD analizi sonucunda üretilen kompozit malzemelerde oluşan fazlar tespit edilmiştir. Ana fazların; Cu (bakır), Cu₉Si (silisyum bakır) ve SiC (silisyum karbür) fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Aynı zamanda yapıda TiC (titanyum karbür), Ti₂B₅ (bor titanyum) ve Cu₃Ti₂ (bakır titanyum) fazlarının da oluştuğu tespit edilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında koruyu argon gazı kullanılması sebebiyle herhangi bir oksidasyona rastlanmadığı görülmüştür.
- Yoğunluk ölçümleri sonucunda, genel olarak artan takviye oranları ile yoğunlukların azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk değerlerinin 1050 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde görüldüğü belirlenmiştir. Bağlı yoğunluk analizi sonuçlarına göre optimum sinterleme sıcaklığı 1050 °C olarak tespit edilmiştir. Takviye oranlarına göre yoğunluk değerlendirildiğinde, tüm sinterleme sıcaklıklarında ağırlıkça %2'ye kadar artış gösterdiği ve daha sonra azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. En yüksek yoğunluk değeri, ağırlıkça %2 takviye oranı ile 1050 °C'de sinterlenen numunede %92,25 olarak tespit edilmiştir.
- Mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir parametre olan sertlik analizi sonucunda, genel olarak sinterleme sıcaklığının artmasının kompozitlerin sertliği üzerinde olumlu etkilere sebep olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik açısından optimum sinterleme sıcaklığının 1050 °C olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak takviye oranlarının artmasıyla beraber sertlik oranların da kademeli artışlar tespit edilmiştir. Sertlik değerlerinde, ağırlıkça %6 takviyeli numunelere kadar artışlar olduğu, ağırlıkça %8 takviyeli numunelerde ise azalmalar olduğu gözlenmiştir. Belirli bir orandan sonra sertlikteki azalmalar, B oranının artmasına atfedilmektedir. Optimum sertliğin, ağırlıkça %6 takviye içeren numunelerde görüldüğü tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri, 1050 °C'de sinterlenmiş, ağırlıkça %6 takviyeli numunede, 77,74 HB olarak tespit edilmiştir.
- Yapılan aşınma analizleri neticesinde genel olarak sinterleme sıcaklıklarının artmasıyla birlikte spesifik aşınma oranı değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. En düşük spesifik aşınma oranı değerleri; 950 °C için $1,9590 \times 10^{-6}$ mm³/Nm, 1000 °C için $1,7248 \times 10^{-6}$ mm³/Nm ve 1050 °C için $1,5545 \times 10^{-6}$ mm³/Nm olarak tespit edilmiştir. Aşınma testinden elde edilen verilere göre

spesifik aşınma oranı için optimum sinterleme sıcaklığının 1050 °C olduğu belirlenmiştir. Takviye artışı ile ters orantılı olarak spesifik aşınma oranı değerlerinde düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Güçlendirme oranlarındaki artışın aşınma direnci üzerinde olumlu etkilere sebep olduğu belirlenmiştir. Aşınma testi sırasında sıcaklık ölçümlerine göre, tüm test numunelerinde, uygulanan yükteki artışa paralel olarak sıcaklıkların da arttığı tespit edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının etkisi açısından bakıldığında sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte aşınma yüzey sıcaklıklarının azaldığı belirlenmiştir. Aşınma testi sırasında oluşan minimum ve maksimum sıcaklıklar sırasıyla 53,9 °C ve 95,4 °C olarak tespit edilmiştir. Genel olarak takviye partiküllerinin sürtünme katsayısında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Saf bakır ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %2 takviye içeren numunelerin sürtünme katsayısında artış ve sonraki oranlarda azalma tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı açısından değerlendirildiğinde optimum sinterleme sıcaklığı, 1050 °C olarak belirlenmiştir.

- Optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenen 1050 °C’de üretilen numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi neticesinde ağırlıkça %2 takviyeli numune ve saf bakır numunesinin yüksek uzamaya sahip olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %4-6-8 ile takviye edilen numunelerin daha düşük elastik uzama gösterdiği tespit edilmiştir. Çekme mukavemetinin, saf bakır numunesinden ağırlıkça %4 takviyeli numuneye kadar yükselme eğiliminde olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %4 takviyeli numuneden itibaren çekme mukavemeti değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. En yüksek çekme mukavemetinin (112,96 MPa) ağırlıkça %4 takviyeli numunede olduğu gözlenmiştir.
- Optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenen 1050 °C’de üretilen numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçlarına göre ağırlıkça %4 takviye içeren numunelerde en yüksek eğilme gerilmesi 37,76 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük eğilme gerilmesi ise ağırlıkça %8 takviyeli kompozit numune için 18,96 MPa olarak tespit edilmiştir. Genel olarak takviye oranının artmasıyla eğilme mukavemetinin bir miktar arttığı ve ardından azaldığı belirlenmiştir. En yüksek elastik uzamanın saf bakır numunesinde, en düşük uzamanın ise ağırlıkça %8 takviyeli numunesinde olduğu görülmüştür.

- Optimum sinterleme sıcaklığı olarak belirlenen 1050 °C’de üretilen numunelerin işlenebilirlik deneylerinde, yüzey pürüzlülüğü analizi sonuçlarına göre artan takviye oranı ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. İlerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde az da olsa artışların meydana geldiği belirlenmiştir. Kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünde bir miktar azalma tespit edilmiştir. Tornalama sırasında kesici takım ile malzeme yüzeyinde oluşan sıcaklıkların ölçülmesi neticesinde, takviye oranları arttıkça kesme sıcaklıklarının da arttığı görülmüştür. Kesme sıcaklıklarının 30 °C ile 260 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Takviye oranındaki artışın kesme sıcaklığını artırması, kompozitteki sert takviye partiküllerinin sürtünme katsayısının artmasına atfedilmektedir. Ayrıca ilerleme hızının kesme sıcaklığını çok fazla etkilemediği ve kesme hızındaki artışın kesme sıcaklığında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak takviye oranlarının artmasıyla beraber kesici takım yan aşınma değerlerinin de arttığı görülmüştür. Saf bakır numunelerinin işlenmesinde kesici takım yan aşınmasının minimum düzeyde olduğu gözlenmiştir. Takviye partiküllerinin sertliği nedeniyle takviye oranı arttıkça kesici takım yan aşınmasının da arttığı tespit edilmiştir. İlerleme hızının kesici takım yan aşınma oranı üzerinde daha az etkili olduğu görülmüştür. Kesme hızının artmasıyla birlikte kesici takım yan aşınmasının da arttığı belirlenmiştir. Genel olarak takviye oranlarının artmasıyla oluşan talaş türlerinin giderek küçüldüğü ve toz haline dönüştüğü görülmüştür. İlerleme hızı ve takviye hızının artmasıyla oluşan talaşların küçüldüğü tespit edilmiştir. Buradan takviye ve ilerleme hızının talaş morfolojisini etkilediği belirlenmiştir.

8.2. Öneriler

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada yapılan yöntemler ve uygulamalar dışında aşağıdaki öneriler uygulanabilir.

- Üretilen kompozit malzemelerin oranları, presleme basınçları ve sinterleme süreleri değiştirilebilir.
- Üretilen kompozit malzemelerde daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşabilmek için sıcak presleme yöntemi uygulanabilir.

- Üretilen kompozit malzemelerin kimyasal, termal ve elektriksel özellikleri araştırılabilir. Özellikle, farklı yağlama koşulları altında aşınma davranışları ve farklı ortamlarda korozyon dirençleri incelenebilir.
- Üretilen kompozit malzemelere alternatif işleme yöntemleri (frezeleme, delme, taşlama vb.) uygulanabilir.
- İşleme yöntemlerinin uygulanmasında enerji tüketimi belirlenebilir ve yenilenebilir üretim için çalışmalar yapılabilir.
- Farklı takviye oranlarının etkilerinin ve işlenebilirlik üzerindeki farklı kesim parametrelerinin etkilerinin tahmin modelleri yapay zeka yöntemleri kullanılarak oluşturulabilir.
- Ek olarak, yapay zeka ile birlikte metasezgisel optimizasyon algoritmaları (parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritma, yapay arı algoritması vb.) kullanılarak üretimi yapılmayan farklı oranlardaki kompozit malzemelerin deney sonuçlarının tahmini yapılabilir. Bu alanda literatüre çok önemli katkılar yapılabilir.
- Ayrıca üretilen kompozit malzemelerin farklı birleştirme teknikleri kullanılarak kaynak edilebilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bohorquez CD, Perez SP, Sarmiento A, Mendoza ME (2020) Effect of Temperature on Morphology and Wear of A Cu-Ti-TiC MMC Sintered by Abnormal Glow Discharge. *Materials Research Express* 7: 02650
- [2] Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Şap S, Giasin K, Pimenov DY (2021) Tribological Aspects, Optimization and Analysis of Cu-B-CrC Composites Fabricated by Powder Metallurgy. *Materials* 14: 4217
- [3] Uzun M, Usca ÜA (2017) Farklı Oranlarda Cr Partikül Takviyesinin Cu Matrislikompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Mikroyapısına Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi* 8: 797-803
- [4] Yücel A (2015) Bor Karbür Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerden Kam Üretiminin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, s. 117
- [5] Usca ÜA, Şap S, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Karabiber A, Pimenov DY, Giasin K, Wojciechowski S (2022) Estimation, Optimization and Analysis Based Investigation of the Energy Consumption in Machinability of Ceramic-Based Metal Matrix Composite Materials. *Journal of Materials Research and Technology* 17: 2987-2998
- [6] Çelik E, Aslan AK (2018) Effect of Post-Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Fe-Co Powder Alloy Fabricated by Hot Pressing. *Archives of Metallurgy and Materials* 63: 371-377
- [7] Cao F, Dong G, Jiang Y, Xiao P, Wang T, Liang S (2020) Effect of La Addition on Microstructures and Properties of TiB₂(-TiB)/Cu Hybrid Composites Prepared by In Situ Reaction. *Materials Science and Engineering: A* 789: 139605
- [8] Şap S, Değirmenci Ü, Usca ÜA, Uzun M (2021) Hibrit Takviyeli Bakır Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Derleme. *Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi* 2: 35-46
- [9] Çelik E, Aslan AK (2017) The Effect of Porosity and Cu Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Co Alternative Powder Metallurgy Compound. *Science of Sintering* 49: 225-234
- [10] Şap S (2019) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Sinterlenen Sert Metallerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri 1. Uluslararası Malatya Uygulamalı Bilimler Kongresi Malatya, s. 393-400
- [11] Şap S (2019) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Titanyumun Biyomedikal Uygulamalarda Kullanımı 1. Uluslararası Malatya Uygulamalı Bilimler Kongresi Malatya, s. 385-392

- [12] Adineh M, Doostmohammadi H (2019) Microstructure, Mechanical Properties and Machinability of Cu–Zn–Mg and Cu–Zn–Sb Brass Alloys. *Materials Science and Technology* 35: 1504-1514
- [13] Bobrynina EV, Larionova TV, Kol'tsova TS, Zhang Y, Liang X, Tolochko OV (2020) Preparation, Structure and Properties of Copper-Based Composites with Additions of Fullerenes and Fullerene Soot. *Metal Science and Heat Treatment* 62: 70-75
- [14] Aguilar C, Guzmán D, Castro F, Martínez V, de Las Cuevas F, Lascano S, Muthiah T (2014) Fabrication of Nanocrystalline Alloys Cu–Cr–Mo Super Saturated Solid Solution by Mechanical Alloying. *Materials Chemistry and Physics* 146: 493-502
- [15] Akramifard HR, Shamanian M, Sabbaghian M, Esmailzadeh M (2014) Microstructure and Mechanical Properties of Cu/SiC Metal Matrix Composite Fabricated via Friction Stir Processing. *Materials & Design* 54: 838-844
- [16] Şap S, Şap E, Kırık İ (2019) Biyomalzeme Olarak Kullanılan Mühendislik Ürünleri III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi Malatya, s. 200-207
- [17] Aguilar C, Ordonez S, Marín J, Castro F, Martínez V (2007) Study and Methods of Analysis of Mechanically Alloyed Cu–Mo Powders. *Materials Science and Engineering: A* 464: 288-294
- [18] Bai G, Wang L, Zhang Y, Wang X, Wang J, Kim MJ, Zhang H (2019) Tailoring Interface Structure and Enhancing Thermal Conductivity of Cu/diamond Composites by Alloying Boron to the Cu Matrix. *Materials Characterization* 152: 265-275
- [19] Chmielewski M, Nosewicz S, Wyszowska E, Kurpaska Ł, Strojny-Nędza A, Piątkowska A, Bazarnik P, Pietrzak K (2019) Analysis of the Micromechanical Properties of Copper-Silicon Carbide Composites Using Nanoindentation Measurements. *Ceramics International* 45: 9164-9173
- [20] Clauß B, Nestler A, Schubert A, Dietrich D, Lampke T (2019) Investigation of Surface Properties in Turn Milling of Particle-Reinforced Aluminium Matrix Composites Using MCD-Tipped Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105: 937-950
- [21] Das B, Roy S, Rai RN, Saha SC (2016) Study on Machinability of In Situ Al–4.5%Cu–TiC Metal Matrix Composite-Surface Finish, Cutting Force Prediction Using ANN. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 12: 67-78
- [22] Günay M (2009) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Si/SiC_p Kompozitlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 232
- [23] Karakoç H (2017) T/M Yöntemi ile B₄C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin ve Balistik Performansının İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 177

- [24] Lilholt H (1991) Aspects of Deformation of Metal Matrix Composites. *Materials Science and Engineering: A* 135: 161-171
- [25] Baharvandi HR, Hadian AM, Alizadeh A (2006) Processing and Mechanical Properties of Boron Carbide–Titanium Diboride Ceramic Matrix Composites. *Applied Composite Materials* 13: 191-198
- [26] Kalemtaş A (2014) Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *J Putech&Composites* 22: 18-30
- [27] Ekici E (2012) Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 209
- [28] Şap S, Şap E, Kırık İ (2019) Titanyum ve Alaşımlarının Biyomalzeme Olarak Kullanılması III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi Malatya, s. 1052-1059
- [29] Efe FÇ (2010) SiC Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Sakarya Üniversitesi, Sakarya, s. 196
- [30] Yıldız İ (2012) Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Nikel Esaslı Malzemelerin Konvensiyonel ve Mikrodalga Radyasyonu Isıtma Yöntemleri Kullanılarak Sert Lehmlenebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, s. 176
- [31] Topbaş MA (1993) Book Isıl İşlemler. Prestij Basım-Yayın, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [32] Işık FM (2007) Titanyum Alüminat İntermetalik Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, s. 88
- [33] Askeland DR (1998) Book The Science and Engineering of Materials. PWS Publishing Company, Boston, s. 260-275
- [34] Mert F, Özdemir A, Karataş Ç (2010) Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi* 13: 165-176
- [35] Pul M (2010) Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 210
- [36] Berthelot J-M (2012) Book Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York
- [37] Adin H, Turgut A (2013) The Effects of Width on the Strength of Adhesively Bonded Z Joints Subjected to Tensile Loads. *The Journal of Adhesion* 89: 1-18

- [38] Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ (1999) Metal Matrix Composites: Production by the Stir Casting Method. *Journal of Materials Processing Technology* 92-93: 1-7
- [39] Gökçe A (2013) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, s. 248
- [40] Koç V (2006) Toz Metalurji Tekniği ile Üretilen Bir Paslanmaz Çelikte Katkı Elemanlarının Aşınma Direncine Etkileri. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 95
- [41] Şenel MC (2018) Grafen-Seramik Tanecik Takviyeli Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretimi, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, s. 183
- [42] Yalçın ED (2018) ZA27/Grafen/B4C Nanokompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, s. 148
- [43] Ulutaş A (2014) Bor Takviyeli Bakır Kompozitinin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Mekanik-Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 110
- [44] Tanaka H, Yamamoto A, Shimoyama J-i, Ogino H, Kishio K (2012) Strongly Connectedex Situ MgB₂ Polycrystalline Bulks Fabricated by Solid-State Self-Sintering. *Superconductor Science and Technology* 25: 115022
- [45] Yalçın B (2007) Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, s. 163
- [46] Altın A, Gökkaya H, Nalbant M (2006) İşleme Parametrelerinden Kesme Hızının Inconel 718 Süper Alaşımın İşlenebilirliğine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21:
- [47] Çiğdem M (2006) Book İmal Usulleri. 2, Çağlayan Basımevi, İstanbul
- [48] Groover MP (2010) Book Principles of Modern Manufacturing. John Wiley & Sons Inc
- [49] <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller> (erişim tarihi: 07.11.2021).
- [50] Özsoy Y (2008) Değişken İlerlemeli Tornalamada Talaş Kırılması ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 109
- [51] Anicic O, Jovic S, Camagic I, Radojkovic M, Stanojevic N (2018) Measuring of Cutting Forces and Chip Shapes Based on Different Machining Parameters. *Sensor Review* 38: 387-390

- [52] Ueda T (2014) Cutting Temperature. CIRP Encyclopedia of Production Engineering, (eds.) Laperrière L, Reinhart G, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s. 334-345
- [53] <https://tf.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/033003> (erişim tarihi: 14.11.2021).
- [54] Piljek P, Keran Z, Math M (2014) Micromachining. Interdisciplinary Description of Complex Systems 12: 1-27
- [55] Kaya E (2019) Farklı Kesici Takım Malzemeleri Kullanarak NiTi Şekil hafızalı Alaşımların İşlenebilirlik Davranışlarının Araştırılması ve Performans Parametrelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, s. 207
- [56] Şap E, Usca UA, Gupta MK, Kuntoğlu M (2021) Tool Wear and Machinability Investigations in Dry Turning of Cu/Mo-SiC_p Hybrid Composites. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 114: 379-396
- [57] Patil N, Gopalakrishna K, Sangmesh B, Sudhakar K, Vijaykumar G (2018) Performance Studies on Cryogenic Treated Carbide Cutting Tool for Turning of AISI304 Steel. Journal of Mechanical Engineering Sciences 12: 3927-3941
- [58] Díaz-Álvarez A, Díaz-Álvarez J, Cantero JL, Miguélez H (2019) Sustainable High-Speed Finishing Turning of Haynes 282 Using Carbide Tools in Dry Conditions. Metals 9: 989
- [59] Kacal A, Yıldırım F (2013) Application of Grey Relational Analysis in High-Speed Machining of Hardened AISI D6 Steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 227: 1566-1576
- [60] de Melo AC, Milan JCG, Silva MBd, Machado ÁR (2006) Some Observations on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering 28: 269-277
- [61] Ren Z, Qu S, Zhang Y, Li X, Yang C (2018) Machining Performance of TiAlN-Coated Cemented Carbide Tools with Chip Groove in Machining Titanium Alloy Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B. Metals 8: 850
- [62] Cantero JL, Díaz-Álvarez J, Infante-García D, Rodríguez M, Criado V (2018) High Speed Finish Turning of Inconel 718 Using PCBN Tools under Dry Conditions. Metals 8: 192
- [63] Bai G, Zhang Y, Dai J, Wang X, Zhang H (2020) Mechanical Properties of Cu-B/Diamond Composites Prepared by Gas Pressure Infiltration. Journal of Materials Engineering and Performance 29: 3107-3119
- [64] Bahador A, Umeda J, Yamanoglu R, Ghandvar H, Issariyapat A, Abu Bakar TA, Kondoh K (2020) Deformation Mechanism and Enhanced Properties of Cu-TiB₂ Composites Evaluated by the In-Situ Tensile Test and Microstructure Characterization. Journal of Alloys and Compounds 847: 156555

- [65] Barmouz M, Asadi P, Besharati Givi MK, Taherishargh M (2011) Investigation of Mechanical Properties of Cu/SiC Composite Fabricated by FSP: Effect of SiC Particles' Size and Volume Fraction. *Materials Science and Engineering: A* 528: 1740-1749
- [66] Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Sap E, Gupta MK (2021) Investigations on Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Temperature, and Chip Formation in Machining of Cu-B-CrC Composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 116: 3011-3025
- [67] Singh JB, Cai W, Bellon P (2007) Dry Sliding of Cu–15wt%Ni–8wt%Sn Bronze: Wear Behaviour and Microstructures. *Wear* 263: 830-841
- [68] Li M, Zhai H, Huang Z, Liu X, Zhou Y, Li S, Li C (2015) Tensile Behavior and Strengthening Mechanism in Ultrafine TiC0.5 Particle Reinforced Cu–Al Matrix Composites. *Journal of Alloys and Compounds* 628: 186-194
- [69] Jha P, Gautam RK, Tyagi R (2017) Friction and Wear Behavior of Cu–4 wt.%Ni–TiC Composites under Dry Sliding Conditions. *Friction* 5: 437-446
- [70] Jamwal A, Prakash P, Kumar D, Singh N, Sadasivuni KK, Harshit K, Gupta S, Gupta P (2019) Microstructure, Wear and Corrosion Characteristics of Cu Matrix Reinforced SiC–Graphite Hybrid Composites. *Journal of Composite Materials* 53: 2545-2553
- [71] Chmielewski M, Pietrzak K, Strojny-Nedza A, Kaszyca K, Zybala R, Bazarnik P, Lewandowska M, Nosewicz S (2017) Microstructure and Thermal Properties of Cu-SiC Composite Materials Depending on the Sintering Technique. *Science of Sintering* 49: 11-22
- [72] Chen H-s, Zhang Y-y, Nie H-h, Wang J-f, Wang W-x, 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: 1460-1467
- [73] Balalan Z, Gulan F (2019) Microstructure and Mechanical Properties of Cu-B₄C and CuAl-B₄C Composites Produced by Hot Pressing. *Rare Metals* 38: 1169-1177
- [74] Akbarpour MR, Mousa Mirabad H, Khalili Azar M, Kakaei K, Kim HS (2020) Synergistic Role of Carbon Nanotube and SiC_n Reinforcements on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Cu-Based Nanocomposite Developed by Flake Powder Metallurgy and Spark Plasma Sintering Process. *Materials Science and Engineering: A* 786: 139395
- [75] Li W, Jiang X, Gao J, Li Y, Wang H, Zhu D (2017) Friction and Wear Properties of Nano-Carbon Reinforced Cu/Ti₃SiC₂/C Nanocomposites. *Materials Testing* 59: 981-989
- [76] Schubert T, Trindade B, Weißgärber T, Kieback B (2008) Interfacial Design of Cu-Based Composites Prepared by Powder Metallurgy for Heat Sink Applications. *Materials Science Engineering: A* 475: 39-44

- [77] Dos Santos DT, Salemi A, Cristofolini I, Molinari A (2019) The Tensile Properties of A Powder Metallurgy Cu–Mo–Ni Diffusion Bonded Steel Sintered at Different Temperatures. *Materials Science and Engineering: A* 759: 715-724
- [78] Uzun M, Münis MM, Usca ÜA (2018) Farklı Oranlarda Crc Partikül Takviyesi Kullanılarak Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilmiş Cu Matrisli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22: 495-501
- [79] Okumuş F, Turgut A (2001) The Effects on Critical Load of Metal-Matrix Composite Plates with a Hole Under In-Plane Loadings *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 80265. American Society of Mechanical Engineers, pp 47-57
- [80] Abd El Aal MI (2017) Effect of High-Pressure Torsion Processing on the Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Consolidated Micro Size Cu and Cu-SiC Powders. *Advanced Powder Technology* 28: 2135-2150
- [81] Abd-Elwahed M, Meselhy A (2020) Experimental Investigation on the Mechanical, Structural and Thermal Properties of Cu–ZrO₂ Nanocomposites Hybridized by Graphene Nanoplatelets. *Ceramics International* 46: 9198-9206
- [82] Akbarpour M, Salahi E, Hesari FA, Yoon E, Kim H, Simchi A (2013) Microstructural Development and Mechanical Properties of Nanostructured Copper Reinforced with SiC Nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A* 568: 33-39
- [83] Bazarnik P, Nosewicz S, Romelczyk-Baishya B, Chmielewski M, Nędza AS, Maj J, Huang Y, Lewandowska M, Langdon T (2019) Effect of Spark Plasma Sintering and High-Pressure Torsion on the Microstructural and Mechanical Properties of a Cu–SiC Composite. *Materials Science and Engineering: A* 766: 138350
- [84] Cao H, Qian Z, Zhang L, Xiao J, Zhou K (2014) Tribological Behavior of Cu Matrix Composites Containing Graphite and Tungsten Disulfide. *Tribology Transactions* 57: 1037-1043
- [85] Chen X, Bao R, Yi J, Fang D, Tao J, Li F (2021) Enhancing Mechanical Properties of Pure Copper-Based Materials with Cr_xO_y Nanoparticles and CNT Hybrid Reinforcement. *Journal of Materials Science* 56: 3062-3077
- [86] Gill AS, Kumar S (2016) Surface Roughness and Microhardness Evaluation for EDM with Cu–Mn Powder Metallurgy Tool. *Materials Manufacturing Processes* 31: 514-521
- [87] Karakulak E (2017) Toz Metalurjik Cu-Ti Malzemelerin Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu/Sintering and Characterization of Powder Metallurgic Cu-Ti Alloys. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 13: 245-250
- [88] Avishan B, Yazdani S, Jalali Vahid D (2011) Effect of Austempering Temperature on Machinability of Cu–Ni–Mo Alloyed Austempered Ductile Iron for Heavy Section Parts. *International Journal of Cast Metals Research* 24: 22-27

- [89] Daymi A, Boujelbene M, Ben Salem S, Sassi B, S T (2009) Effect of the Cutting Speed on the Chip Morphology and the Cutting Forces. *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering* 1(2): 77-83
- [90] Ponnuvel S, Senthilkumar N (2018) A Study on Machinability Evaluation of Al-Gr-B₄C MMC Using Response Surface Methodology-Based Desirability Analysis and Artificial Neural Network Technique. *International Journal of Rapid Manufacturing* 8: 95-122
- [91] Arunkumar K, Krishnappa G, Kasthuriangan S, Vinay P (2018) An Experimental Investigation on Hardness and Shear Behavior of Aluminum, Silicon Carbide, and Graphite Hybrid Composite with and without Cryogenic Treatment. *Materials Today: Proceedings* 5: 916-921
- [92] Şap S, Turgut A, Uzun M (2021) Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Cu/Ti-B-SiC_p Hybrid Composites. *Ceramics International* 47: 29919-29929
- [93] http://www.mitsubishicarbide.net/mhg/turning_tools (erişim tarihi erişim tarihi: 14.11.2021).
- [94] Lee DW, Ha GH, Kim BK (2001) Synthesis of Cu-Al₂O₃ Nano Composite Powder. *Scripta Materialia* 44: 2137-2140
- [95] Şap E (2021) Investigation of Mechanical Properties of Cu/Mo-SiC_p Composites Produced with P/M, and Their Wear Behaviour with the Taguchi Method. *Ceramics International* 47: 25910-25920
- [96] Long F, Guo X, Song K, Jia S, Yakubov V, Li S, Yang Y, Liang S (2020) Synergistic Strengthening Effect of Carbon Nanotubes (CNTs) and Titanium Diboride (TiB₂) Microparticles on Mechanical Properties of Copper Matrix Composites. *Journal of Materials Research and Technology* 9: 7989-8000
- [97] Swikker KRJ, Kanagasabapathy H, Manickam IN, Nadar NVP, Alwin S (2020) Effect of Sintering Temperature on Grain Growth and Mechanical Properties of Copper/Graphene Nanosheet Composite. *Diamond and Related Materials* 110: 108111
- [98] Liu Q, Miao W, Ding H, Glandut N, Jia H, Li C (2020) The Introduction of SiC into Cu Melts Based on Ti-SiC System and Its Transformation. *Journal of Materials Research and Technology* 9: 2881-2891
- [99] Yang Z, Fan J, Liu Y, Nie J, Yang Z, Kang Y (2021) Strengthening and Weakening Effects of Particles on Strength and Ductility of SiC Particle Reinforced Al-Cu-Mg Alloys Matrix Composites. *Materials* 14(5): 1219
- [100] Moustafa EB, Taha MA (2021) Evaluation of the Microstructure, Thermal and Mechanical Properties of Cu/SiC Nanocomposites Fabricated by Mechanical Alloying. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 28: 475-486

- [101] Akkaş M (2021) Production and Characterization of Boron Carbide and Silicon Carbide Reinforced Copper-Nickel Composites by Powder Metallurgy Method. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 52: 32-42
- [102] Sadeghi N, Aghajani H, Akbarpour MR (2018) Microstructure and Tribological Properties of In-Situ TiC-C/Cu Nanocomposites Synthesized using Different Carbon Sources (Graphite, Carbon Nanotube and Graphene) in the Cu-Ti-C System. *Ceramics International* 44: 22059-22067
- [103] Uzun M, Çetin MS (2021) Investigation of Characteristics of Cu Based, Co-CrC Reinforced Composites Produced by Powder Metallurgy Method. *Advanced Powder Technology* 32: 1992-2003
- [104] Şap E (2021) Microstructure and Mechanical Effects of Co-Ti Powder Particles on Cu Matrix Composites. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals* 62: 107-118
- [105] Şap E (2021) Güçlendirilmiş Bakır Esaslı Kompozit Malzemelerin Mikroyapı ve Sertlik Özellikleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 11: 590-598
- [106] Kumar J, Singh D, Kalsi NS, Sharma S, Pruncu CI, Pimenov DY, Rao KV, Kapłonek W (2020) Comparative Study on the Mechanical, Tribological, Morphological and Structural Properties of Vortex Casting Processed, Al-SiC-Cr Hybrid Metal Matrix Composites for High Strength Wear-Resistant Applications: Fabrication and Characterizations. *Journal of Materials Research and Technology* 9: 13607-13615
- [107] Jinwei Yin PZ, Hanqin Liang, Dongxu Yao, Yongfeng Xia, Kaihui Zuo, YuPing Zeng (2020) Microstructure and Mechanical Properties of Cu Matrix Composites Reinforced by TiB₂/TiN Ceramic Reinforcements. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 33: 1609-1617
- [108] Şap S, Uzun M, Usca ÜA, Pimenov DY, Giasin K, Wojciechowski S (2021) Investigation on Microstructure, Mechanical, and Tribological Performance of Cu Base Hybrid Composite Materials. *Journal of Materials Research and Technology* 15: 6990-7003
- [109] Radhika N, Raghu R (2017) Investigation on Mechanical Properties and Analysis of Dry Sliding Wear Behavior of Al LM13/AlN Metal Matrix Composite Based on Taguchi's Technique. *Journal of Tribology* 139: 041602
- [110] Uzun M, Munis MM, Usca ÜA (2018) Different Ratios CrC Particle-Reinforced Cu Matrix Composite Materials and Investigation of Wear Performance. *Journal of Engineering Research Application* 8: 1-7
- [111] Xie M, Wu C, Zhou S, Jin J, Zhao S, Chen D (2021) TiB₂ and Fe₂P with Nanotwins-Reinforced Cu-Based Immiscible Composites Fabricated by Selective Laser Melting: Formation Mechanism and Wear Behavior. *Journal of Alloys and Compounds* 864: 158716

- [112] Zhao H, Feng Y, Qian G, Huang X, Guo S, Sun X (2019) Effect of Ti_3AlC_2 Content on Electrical Friction and Wear Behaviors of Cu- Ti_3AlC_2 Composites. *Tribology Letters* 67: 96
- [113] Cheng J, Mao M, Gan X, Lei Q, Li Z, Zhou K (2021) Microstructures, Mechanical Properties, and Grease-Lubricated Sliding Wear Behavior of Cu-15Ni-8Sn-0.8Nb Alloy with High Strength and Toughness. *Friction* 9: 1061-1076
- [114] Jayashree P, Bortolotti M, Turani S, Straffelini G (2019) High-Temperature Tribo-Oxidative Wear of a Cu-Based Metal-Matrix Composite Dry Sliding Against Heat-Treated Steel. *Tribology Letters* 67: 110
- [115] Cui G, Ren J, Lu Z (2017) The Microstructure and Wear Characteristics of Cu-Fe Matrix Friction Material with Addition of SiC. *Tribology Letters* 65: 108
- [116] Nautiyal H, Kumari S, Rao US, Tyagi R, Khatri OP (2020) Tribological Performance of Cu-rGO-MoS₂ Nanocomposites under Dry Sliding. *Tribology Letters* 68: 29
- [117] Usca ÜA, Uzun M, Sap S, Kuntoğlu M, Giasin K, Pimenov DY, Wojciechowski S (2021) Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Temperature and Chips Morphology Evaluation of Al/TiN Coated Carbide Cutting Tools in Milling of Cu-B-CrC Based Ceramic Matrix Composites. *Journal of Materials Research and Technology* 16: 1243-1259
- [118] Deng Z, Yin H, Zhang C, Li W (2020) Microstructure and Mechanical Properties of Cu-12Al-6Ni with Ti Addition Prepared by Powder Metallurgy. *Materials Science and Engineering: A* 803: 140472
- [119] Chen X, Bao R, Yi J, Fang D, Tao J, Li F (2021) Enhancing Mechanical Properties of Pure Copper-Based Materials with Crxoy Nanoparticles and CNT Hybrid Reinforcement. *Journal of Materials Science* 56: 3062-3077
- [120] Sap E (2020) Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Based Co-Mo-Reinforced Composites Produced by the Powder Metallurgy Method. *Journal of Materials Engineering and Performance* 29: 8461-8472
- [121] Jiang Y, Dincer Yilmaz NE, Barker KP, Baek J, Xia Y, Zheng X (2021) Enhancing Mechanical and Combustion Performance of Boron/Polymer Composites via Boron Particle Functionalization. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13: 28908-28915
- [122] Xiao H, Xiao B, Wu H, Xiao B, Yan X, Liu S (2019) Microstructure and Mechanical Properties of Vacuum Brazed CBN Abrasive Segments with Tungsten Carbide Reinforced Cu-Sn-Ti Alloys. *Ceramics International* 45: 12469-12475
- [123] Islak S, Buytoz S, Eski Ö (2015) Effects of TiC Content on Transverse Rupture Strength (TRS) of Cu-TiC Composites Produced Using Powder Metallurgy (PM) Technique. *Journal of Optoelectronics Advanced Materials* 17: 211-215

- [124] Akkus H, Yaka H, Ugur L (2017) Statistical Analysis of Surface Roughness in Turning Process. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences 23: 390-394
- [125] Torres A, Puertas I, Luis C (2015) Surface Roughness Analysis on the Dry Turning of an Al-Cu Alloy. Procedia engineering 132: 537-544
- [126] Ramkumar KR, Sivasankaran S, Alaboodi AS (2017) Effect of Alumina Content on Microstructures, Mechanical, Wear and Machining Behavior of Cu-10Zn Nanocomposite Prepared by Mechanical Alloying and Hot-Pressing. Journal of Alloys and Compounds 709: 129-141
- [127] Xu J, Li C, Chen M, El Mansori M, Paulo Davim J (2020) On the Analysis of Temperatures, Surface Morphologies and Tool Wear in Drilling CFRP/Ti6Al4V Stacks under Different Cutting Sequence Strategies. Composite Structures 234: 111708
- [128] Gatto A, Iuliano L, Atzeni E, Minetola P, Salmi A (2015) On the Behaviour of Reinforcements Beneath the Surface in Turning of Metal-Matrix Composites (MMCs). Journal of Composite Materials 50: 2487-2494
- [129] Batista M, Del Sol I, Gomez-Parra A, Ramirez-Peña M, Salguero J (2019) Study of the Tool Wear Process in the Dry Turning of Al-Cu Alloy. Metals 9(10): 1094
- [130] Ajithkumar JP, Anthony Xavior M (2019) Flank and Crater Wear Analysis During Turning of Al 7075 Based Hybrid Composites. Materials Research Express 6: 086560
- [131] Şap E, Usca ÜA, Gupta MK, Kuntoğlu M, Sarıkaya M, Pimenov DY, Mia M (2021) Parametric Optimization for Improving the Machining Process of Cu/Mo-SiC_p Composites Produced by Powder Metallurgy. Materials 14: 1921
- [132] Senthilkumar N, Tamizharasan T (2014) Experimental Investigation of Cutting Zone Temperature and Flank Wear Correlation in Turning AISI 1045 Steel with Different Tool Geometries. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences 21: 139-148
- [133] Sarıkaya M, Güllü A (2015) Multi-Response Optimization of Minimum Quantity Lubrication Parameters Using Taguchi-Based Grey Relational Analysis in Turning of Difficult-To-Cut Alloy Haynes 25. Journal of Cleaner Production 91: 347-357
- [134] Şap S, Uzun M, Usca ÜA, Pimenov DY, Giasin K, Wojciechowski S (2022) Investigation of Machinability of Ti-B-SiC_p Reinforced Cu Hybrid Composites in Dry Turning. Journal of Materials Research and Technology 18: 1474-1487
- [135] Tamizharasan T, Senthilkumar N, Selvakumar V, Dinesh S (2019) Taguchi's Methodology of Optimizing Turning Parameters over Chip Thickness Ratio in Machining P/M AMMC. SN Applied Sciences 1: 160
- [136] Bai W, Roy A, Sun R, Silberschmidt VV (2019) Enhanced Machinability of SiC-Reinforced Metal-Matrix Composite with Hybrid Turning. Journal of Materials Processing Technology 268: 149-161