



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al 6061 MATRİSLİ
CÜRUF TAKVİYELİ KOMPOZİTİN KURU KAYMA AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

DİLARA BEYTEKİN

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLFEM BİNAL

BARTIN-2020



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al 6061 MATRİSLİ CÜRUF
TAKVİYELİ KOMPOZİTİN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Dilara BEYTEKİN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Doç. Dr. A. Cahit KARAOĞLANLI	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Nazım KUNDURACI	- Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

BARTIN-2020

KABUL VE ONAY

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL danışmanlığında hazırlamış olduğum “TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al 6061 MATRİSLİ CÜRUF TAKVİYELİ KOMPOZİTİN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

20.05.2020

Dilara BEYTEKİN

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışma dönemimde beni sabır ve anlayışla destekleyerek danışmanlığını üstlenen, değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamda araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar her türlü konuda katkı ve emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarına yön veren kıymetli hocam Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK'e teşekkür ederim.

Kompozit malzeme üretiminin tüm aşamalarında bilgi ve görüşlerini, desteğini ve zamanını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Görevlisi Halil KARAKOÇ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamı destekleyen DÖKSAN Isıl İşlem A.Ş. yöneticilerine, kalite kontrol birimi çalışanlarına ve özellikle birim amirim Zeynep KOSER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmam boyunca desteğini daima hissettiren Emre AYDOĞDU'ya ve yine süreç boyunca yanımda olan tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışmam süresince de tüm sabır ve anlayışlarıyla verdikleri moral ve destek ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, bu hayattaki en büyük şansım, kıymetli aileme sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Dilara BEYTEKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al 6061 MATRİSLİ CÜRUF TAKVİYELİ KOMPOZİTİN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Dilara BEYTEKİN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL

Bartın-2020, sayfa: 98

Bu çalışmada; toz metalurjisi yöntemi ile Al6061 matrisli ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu ve B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemeler üretilerek mekanik özellikleri ve aşınma performansı incelenmiştir. Üretimde Al6061 matris tozu içerisine farklı oranlarda ağırlıkça %0-5-10-15 takviye tozu ilave edilerek Turbula marka üç boyutlu karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılmıştır. Karışan tozlar 550°C’de 200 MPa basınç altında tek yönlü olarak sıcak sıkıştırılmıştır. Elde edilen kompozit malzemelerin sertlik özelliklerini iyileştirmek için alüminyum alaşımlarına en çok uygulanan T6 yaşlandırma ısıl işlemi yapılmıştır. Birbirinden farklı özelliklere sahip olan takviye elemanlarının ilave edildiği alüminyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik, çapraz kırılma dayanımı ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin mikroyapı özellikleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Çapraz kırılma sonrası elde edilen kırık yüzeyler ve aşınma sonrası aşınan yüzeyler Taramalı elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al6061; B₄C; ferrokrom cürufu; yüksek fırın cürufu; mekanik özellik; aşınma dayanımı; sertlik; mikro yapı.

Bilim Kodu: 91528

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF DRY SLIDING WEAR OF AL 6061 MATRIXED SLAG REINFORCED COMPOSITE PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD

Dilara BEYTEKİN

Bartın University

Graduate School

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Gülfem BİNAL

Bartın-2020, pp: 98

In this study; Al6061 matrix ferrochrome slag, blast furnace slag and B₄C particle reinforced composite materials were produced by powder metallurgy method and mechanical properties and abrasion performance were investigated. In the production, 0-5-10-15% by weight of reinforcing powder was added to Al6061 matrix powder and mixed with Turbula brand three-dimensional mixer for 30 minutes. The mixture powders were unidirectionally hot pressed under pressure of 200 MPa at 550 °C. In order to improve the hardness properties of the composite materials, the most commonly applied T6 aging heat treatment was applied to aluminum alloys. Hardness, cross-fracture strength and abrasion properties of aluminum matrix composite materials with reinforcement elements having different properties were investigated. In addition, microstructure properties of composite materials were examined by optical microscope. The fracture surfaces obtained after cross fracture and the wear surfaces after wear were examined by Scanning Electron Microscope (SEM).

Keywords: Al6061; B₄C; ferrochrome slag; blast furnace slag; mechanical property; abrasion resistance; hardness; micro structure.

Scientific Field Code: 91528

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 KOMPOZİT MALZEMELER.....	 3
2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler	7
2.1.1 Seramik Matrisli Kompozitler.....	7
2.1.2 Polimer Matrisli Kompozitler	7
2.1.3 Metal Matrisli Kompozitler.....	7
2.2 Takviye Malzemeleri	9
2.2.1 Alümina (Al_2O_3)	9
2.2.2 Silisyum Karbür (SiC)	10
2.2.3 Bor Karbür (B_4C)	10
2.2.4 Cüruflar	10
2.3 Al Matrisli Kompozitler.....	13
2.3.1 Al Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler	15
 BÖLÜM 3 TOZ METALURJİSİ	 18
3.1 Harmanlama ve Karıştırma.....	21
3.2 Metal Tozlarının Sıkıştırılması	21
3.2.1 Kalıpta Presleme	21
3.2.2 Tek Eksenli Presleme	22
3.2.3 Çift Etkili Presleme	22

3.2.4 İzostatik Presleme	22
3.2.5 Sıcak Presleme	22
3.2.6 Yüksek Enerjili Sıkıştırma	23
3.2.7 Ekstrüzyon Yöntemi ile Sıkıştırma	23
3.2.8 Titreşim ile Sıkıştırma	23
3.3 Sinterleme	23
BÖLÜM 4 AŞINMA	25
4.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	26
4.2 Aşınma Türleri	27
4.2.1 Abrasiv Aşınma	27
4.2.2 Adhesiv Aşınma	28
4.2.3 Korozyif Aşınma	29
4.2.4 Yorulma Aşınması	30
BÖLÜM 5 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	31
BÖLÜM 6 MATERYAL VE METOT	37
6.1 Materyal	38
6.2 Tozların Karakterizasyonu	39
6.3 Kompozit Malzemelerin Üretimi	39
6.3.1 Tozların Karıştırılması	40
6.3.2 Sıcak Presleme İşlemi	41
6.3.3 Isıl İşlem	42
6.4 Malzeme Karakterizasyonu	43
6.4.1 Test Numunelerin Hazırlanması	43
6.4.2 Yoğunluk Ölçümü	43
6.4.3 Mikroyapı analizleri	44
6.4.4 Sertlik Testi	45
6.4.5 Kuru Kayma Aşınma Testi	45
BÖLÜM 7 BULGULAR VE TARTIŞMA	47

7.1 Kullanılan Tozların Karakterizasyonu.....	47
7.2 Yoğunluk Değişimi ve Gözeneklilik	48
7.3 Mikroyapı Analizleri.....	51
7.3.1 Optik Mikroskop Analizleri	51
7.3.2 SEM ve EDS analizleri	60
7.4 Sertlik Değişimi	75
7.5 Kuru Kayma Aşınma Deney Bulguları.....	76
 BÖLÜM 8 SONUÇ VE ÖNERİLER	 90
8.1 Genel Sonuçlar.....	90
8.2 Öneriler	91
 KAYNAKÇA	 92
 ÖZGEÇMİŞ.....	 97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Kompozit bir malzemede ara faz ve arayüzey	5
2.2: Matris malzemesine göre ve takviye malzemesine göre olmak üzere kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	6
2.3: (a) Partikül takviyeli kompozitler, (b) Kısa fiber takviyeli kompozitler, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozitler	9
2.4: Yüksek Fırın.....	12
2.5: Ferrochrom üretim prosesi	13
2.6: Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi.....	17
3.1: Toz metalürjisi yöntemiyle malzeme üretimi akış diyagramı	20
3.2: Sinterleme mekanizmasının SEM ile görünüşü.	24
4.1: Aşınmayı etkileyen faktörler	26
4.2: a) İki elemanlı, b) Üç elemanlı abrasiv aşınma.....	28
4.3: Adhesiv aşınma oluşumunun şematik görüntüsü (a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşumu. (b) bir yüzeyden diğerine malzeme transferi. (c) Oluşan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi ve yüzeyde kırıntı oluşumu.....	29
4.4: Yorulma yüzeyinde çatlak ilerlemesi ve oluşumu	30
6.1: Çalışma kapsamında uygulanan işlemlerin akış şeması.....	37
6.2: Kompozit malzemelerin üretim prosesi.	39
6.3: (a) Hassas mikrotezazi (b) Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı.	40
6 4: Tozların sıcak preslenmesi	41
6.5: Sıcak pres işlemi ile üretilen kompozit malzemeler	41
6.6: Alüminyum ısıt işlem fırını.	42
6.7: Kompozit malzemelere uygulanan ısıt işlem prosesi	42
6.8: Mikroyapı ve aşınma test numunelerinin hazırlanması.....	43
6.9: (a) Leica DM2700M optik mikroskop, (b) JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
6.10: Emcotest DuraScan-70 G5 marka sertlik ölçüm cihazı.	45
6.11: Ball-on disk tribometre cihazı.	46
7.1: Çalışmada kullanılan toz malzemelerin parçacık boyut grafiği.	47
7.2: Çalışmada kullanılan tozların SEM resimleri.	48
7.3: Üretilen malzemelerin % yoğunluk değişimleri.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil	Sayfa
No	No
7.4: Üretilen malzemelerin % gözeneklilik değişimleri.....	50
7.5: Sıcak pres ve ısıtma işlem sonrası Al 6061 mikroyapı görüntüsü.	51
7.6: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %5 B ₄ C takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü	52
7.7: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %10 B ₄ C takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü	52
7.8: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %15 B ₄ C takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü	53
7.9: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %5 YFC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü	54
7.10: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %10 YFC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü	55
7.11: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %15 YFC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.	56
7.12: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %5 FCC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.	57
7.13: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %10 FCC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.	58
7.14: Sıcak presleme ve ısıtma işlem sonrası %15 FCC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü	59
7.15: Takviyesiz Al 6061 SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.....	60
7.16: (a) Sıcak presleme sonrası %10 B ₄ C takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü ve EDS analizi alınan bölgeler (b) 1. bölgenin, (c) 2. bölgenin EDS analizi.....	62
7.17: %10 B ₄ C takviye edilmiş kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (mapping)	63
7.18: %5 B ₄ C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme (d) x3000 büyütme.....	64
7.19: %10 B ₄ C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme (d) x3000 büyütme.....	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
7.20: %15 B ₄ C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme (d) x3000 büyütme.....	65
7.21: (a) Sıcak presleme sonrası %10 YFC takviyeli kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler (b) 1. bölgenin, (c) 2. bölgenin EDS analizi.....	67
7.22: %10 Yüksek fırın cürufu takviye edilmiş kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (mapping).....	68
7.23: %5 YFC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.	70
7.24: %10 YFC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.	70
7.25: %15 YFC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.	71
7.26: Sıcak presleme sonrası %10 FCC takviyeli kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi.	72
7.27: %10 Ferrokrom cürufu takviye edilmiş kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (mapping).....	73
7.28: %5 FCC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.	74
7.29: %10 FCC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.	74
7.30: %15 FCC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.	75
7.31: Üretilen kompozit malzemelerin sertlik değişimleri.....	76
7.32: %5 takviyeli numunelerin hacim kaybı grafiği.....	77
7.33: %10 takviyeli numunelerin hacim kaybı grafiği.....	80
7.34: %15 takviyeli numunelerin hacim kaybı grafiği.....	81
7.35: Takviyesiz Al 6061 numunesinin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı (a) x18 (b) x100	82
7.36: B ₄ C takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altındaki aşınma yüzey fotoğrafı (a) %5 takviyeli (b) %15 takviyeli	83

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
7.37: B ₄ C takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altındaki aşınma yüzey fotoğrafı (a). %5 takviyeli (b). %15 takviyeli	84
7.38: %5 FCC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı (a) x18 (b) x100.....	86
7.39: %15 FCC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı (a) x18 (b) x100.....	87
7.40: %5 YFC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı (a) x18 (b) x100.....	88
7.41: %15 YFC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı (a) x18 (b) x100.....	89

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
2.1: Metal matrisli kompozitlerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin özellikleri	9
2.2: Saf alüminyumun özellikleri	14
2.3: Alüminyum alaşımlarında ısıt işlemleri kodlamaları.	16
6.1: Al 6061 alaşımının kimyasal kompozisyonu.	38
6.2: B ₄ C tozlarının kimyasal kompozisyonu.	38
6.3: Kullanılan YFC ve FCC tozlarının kimyasal kompozisyonu.....	38
6.4: Kullanılan tozların fiziksel özellikleri.....	39
6.5: Çalışmada kullanılan tozların karışım oranları.	40
7.1: Yoğunluk ölçüm sonuçları	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

g	: Gram
cm ³	: Santimetreküp
µm	: Mikrometre
m ²	: Metrekare
ρ	: Yoğunluk
°C	: Derece Santigrat
B ₄ C	: Bor karbür
Al	: Alüminyum
SiC	: Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	: Alümina

KISALTMALAR

Al 6061	: 6061 alüminyum alaşımı
AMK	: Alüminyum Matrisli Kompozit
EDS	: Enerji dağılımlı spektroskopi analizi
HB	: Hardness Brinell
HV	: Hardness Vickers
MMK	: Metal matrisli kompozit
MPa	: Megapascal
SEM	: Tarama elektron mikroskobu
TM	: Toz metalurjisi
XRD	: X-ışınları difraktometresi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
FCC	: Ferrokróm Cürufu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Malzemeler teknolojinin ilerlemesinde önemli rol oynayarak modern uygarlığın gelişmesine olanak sağlamışlardır. MÖ 10.000 yıllarında insanlar sadece taş, ahşap ve kemik parçalarını malzeme olarak kullanmışlardır. Bu malzemelerden kendilerine her türlü alet edevat yapmışlardır. MÖ 1000 ila 3000 yılları arasında yer alan Bronz çağında ise insanlar cevherlerden bakır çıkarabilmişlerdir. M.Ö. 1000'den MS 1860'a kadar olan Demir çağında ise cevherlerden demirin elde edilmesi bir başka önemli gelişmeye yol açmıştır. Isıl işlem süreçleri de bu dönemde geliştirilmiştir. MS 1860 sonrası çelik üretimi için açık ocak süreçleri geliştirilmiştir. Çeliğin inşaat malzemesi olarak genel kullanımı bu dönemde başlamıştır. 1950'den itibaren döneme Silikon Çağı denir. Silikon gelişimi elektronik, bilgisayar ve otomasyonun gelişmesine yol açmıştır. Tarihte, malzemelerin gelişiminin medeniyetin gelişimi için ana faktör olduğu açıkça görülmektedir (Balasubramanian, 2013).

Tasarımcıların geleneksel malzemeleri kullanarak ürettikleri ürünler oldukça sınırlı hale gelmiştir. Bu nedenle, gelişen teknolojinin beklentilerini karşılamak için üstün özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirmeye ihtiyaç oluşmuştur. Bu ihtiyaç duyulan malzemelerin yüksek performans verimliliği ve güvenilirliği olmalıdır. Hafif olmaları ve özelliklerin bir kombinasyonunu göstermeleri gerekmektedir. Bu beklentiler sonucunda karmaşık malzemeler gelişmiştir. Metal ve seramik bazlı kompozitler de bu konuda önemli bir katkı sağlamaktadır (Balasubramanian, 2013).

Kompozit malzemeler için evrensel olarak kabul edilmiş bir tanım yoktur. Literatürdeki tanımlar büyük farklılıklar göstermektedir. Kompozit malzemeler en az iki farklı fazdan oluşmaktadır. Kompozit malzemeler, belirli iyileştirilmiş veya istenen özelliklere ulaşılacak şekilde iki veya daha fazla malzemenin birleşimidir. Bir kompozit malzemede, dağılmış faz (lar) matris adı verilen sürekli bir ortamda dağıtılır. Tek koşul, dağınık fazın orijinalini koruması gerektiğidir (Balasubramanian, 2013). Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerde ana malzeme ve takviye elemanı olmak üzere iki farklı olgu vardır. Ana malzeme ağırlıkça fazla miktarda olan malzemeye denir. Takviye elemanı ise bir veya birden fazla olan ve ana malzemedan az olan elemana denir (Tsai, 2018). Al ve alaşımları, korozyon, hafiflik, süneklik, düşük yoğunluk gibi üstün özelliklerinden dolayı en çok tercih

edilen ana malzemeler arasında yer almaktadır. Takviye elemanı olarak ise B_4C , SiC , Al_2O_3 ve MgO gibi seramik parçacıklar kullanılmaktadır (Ovalı vd., 2018; Karabulut vd., 2016). B_4C elmadan sonra gelen en sert seramiktir. B_4C sert ve hafif olması ile radyasyon emme özelliğinden dolayı oldukça dikkat çeken bir malzeme haline gelmiştir (Adeli vd., 2016).

Ana malzeme üzerinde hafiflik, sertlik, mukavemet gibi özelliklerin iyileştirilmesi talebi, yeni MMC'lerin araştırılmasına ve geliştirilmesine yol açmaktadır. Otomotiv uygulamalarındaki geniş uygulama yelpazesi nedeniyle alüminyum ve alüminyum alaşım matrisli kompozitler dikkat çekmektedir. Alüminyum metal matrisli kompozitler (Al-MMC'ler), Honda, Nissan, Toyota ve General Motors gibi otomobil şirketleri tarafından farklı motor uygulamalarında çeşitli partikül ve fiber tipi takviyeler kullanılarak başarıyla uygulanmıştır. Birçok çalışma, SiC , Al_2O_3 , grafit vb. Takviyelerin farklı işlem teknikleri kullanılarak alüminyum matrise eklendiğinde ve çoğu durumda, güçlendirilmemiş matris alaşımlı malzemeye kıyasla mekanik özelliklerle birlikte tribolojik özelliklerin geliştiğini kaydetmiştir (Lloyd, 2013; Das, 2004; Prasad vd., 2004).

Bu çalışmada, TM yöntemi ile Al6061 esaslı ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu ve B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Cüruf takviyeli kompozit malzemeler ile B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri mukayese edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere T6 ısıtma işlemi (çökelme sertleşmesi) uygulanarak sertlik ve dayanımları artırılmıştır. Daha sonra ise numunelerin her birisinin mekanik testleri (sertlik, çapraz kırılma ve aşınma) yapılarak mikroyapı özellikleri karakterize edilmiştir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte endüstriyel sanayide giderek çoğalan beklentileri karşılayabilecek yeni ve çoklu özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyaç sonucu ortaya çıkan malzemelerden biri de kompozitlerdir. Kimyasal yapıları farklı olan iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan ve daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler kompozit malzemelerdir. Bu birleşimde kompozit malzemeyi var eden malzemeler yapı içerisinde kendi özelliklerini koruyarak daha gelişmiş özelliklere sahip nihai bir ürün oluştururlar (Başer, 2018).

Kompozit malzemeler çok uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Eski çağlarda çanak, çömlek ve tuğla gibi yapı malzemelerini güçlendirmek için saman ve bitkisel lifler kullanılmıştır ki bu parçalar ilk kompozit örneklerini oluşturmuştur. İlerleyen çağlarda (orta çağ) ise savaş aletlerinin dayanımını arttırmak için kılıç ve zırhlar güçlendirici malzemelerle kaplanmıştır. Tarih boyunca bu kompozitlerin çok sayıda başka örneklerine şahit olunmuştur (Kaya, 2019).

Kompozit malzemeler, II. Dünya savaşıyla birlikte mevcut malzemelerin ihtiyaçları karşılayamaz duruma gelmesiyle araştırılmaya başlanmıştır. Malzemelerde mukavemet ve elastik modülünde artış sağlanırken, ağırlıkta azalmanın elde edilmesi ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilirliğin tek bir malzemede toplanması düşüncesi bu malzemeleri giderek daha çok araştırma ve geliştirme yönünde büyük etken olmuştur. Kompozit malzemeler kendine özgü özelliklere sahip değişik fazlardaki malzemelerden oluşur ve bu nedenle literatürde çok fazla malzeme tanımıyla da karşımıza çıkmaktadırlar. Bu değişik fazların birleştirilmesiyle elde edildikleri için monolitik bir alaşımın kendi kendine sahip olmadığı özellikleri de sağlamaktadırlar (Şanlı, 2019).

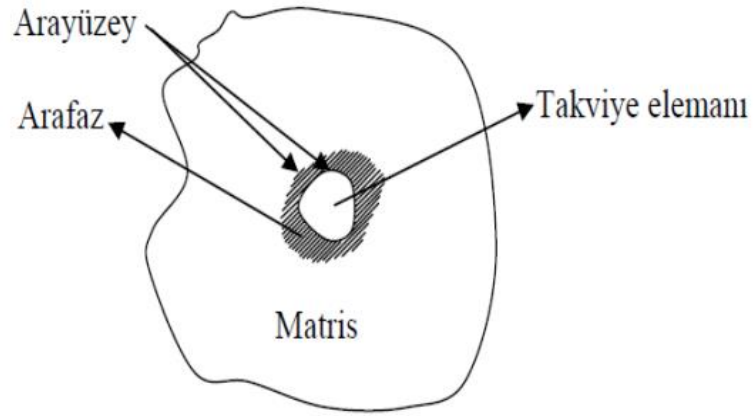
Kompozit malzemelerin birçok üstün özellikleri bulunmaktadır. Bunlar;

- Gelişmiş kırılma tokluğu
- Aşınmaya karşı gelişmiş direnç
- Yüksek yorulma dayanımı
- İyileşmiş mukavemet

- Gelişmiş sıcaklık performansı
- Yüksek korozyon dayanımı
- Rijitlik
- Isıl iletkenlik
- Gelişmiş akustik iletkenlik
- Titreşimleri absorbe edebilme
- Düşük maliyet
- Hafiflik
- Estetik görünüm
- Tasarım esnekliği
- İmalat kolaylığıdır (Karakoç, 2017).

Kompozit malzeme, çekirdek olarak da adlandırılan matris ve takviye malzemesi olmak üzere 2 temel içerikten oluşmaktadır. Matris malzemesinin görevleri; takviye malzemesini muhafaza etmek ve bir arada tutmak, maruz kalınan yükü takviye elemanlarına aktarmak, tokluk ve mukavemete katkıda bulunmaktır. Bunlara ek olarak çatlak oluşumunu veya oluşan çatlağın ilerlemesini de engeller. Takviye malzemesi, eklendiği matrisin ve bunun sonucunda kompozitin mekanik özelliklerini geliştirmek ve kompozite uygulanan yükü üstlenmek için kullanılır (Polat, 2019).

Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde bazı değişkenler etkilidir. Bu değişkenlere; yapıyı oluşturan matris ve takviye malzemelerinin mekanik ve kimyasal özellikleri, şekli, mikroyapıları, malzemelerin hacim oranları, aralarındaki bağın özellikleri, takviye malzemesinin yapı içerisindeki yönelmesi gibi çeşitli değişkenler örnek verilebilir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan fazların birbiri içinde çözünmesi istenmeyen bir durumdur (Kalemtaş, 2014). Fakat az miktarda gerçekleşen çözünürlük, matris- takviye arasındaki bağa olumlu yönde katkı sağlayabilir. Kompozit malzemelerde yapıya uygulanan yükün takviye malzemesine iletimini, ana yapı matris-takviye ara yüzeyi ile sağlar (Şekil 2.1). Bu nedenle matris-takviye ara yüzeyi önemli bir parametredir (Şanlı, 2017). Kompozit malzemelerde ara yüzey karakteristiğinin oluşmasında belirli parametreler etkindir. Kompozit malzemenin üretiminde uygulanan proses sıcaklığı, gerçekleşen difüzyon etkileşimleri ve kalıntı gerilmeler bu parametrelerin temelini oluşturmaktadır (Kara, 2010).

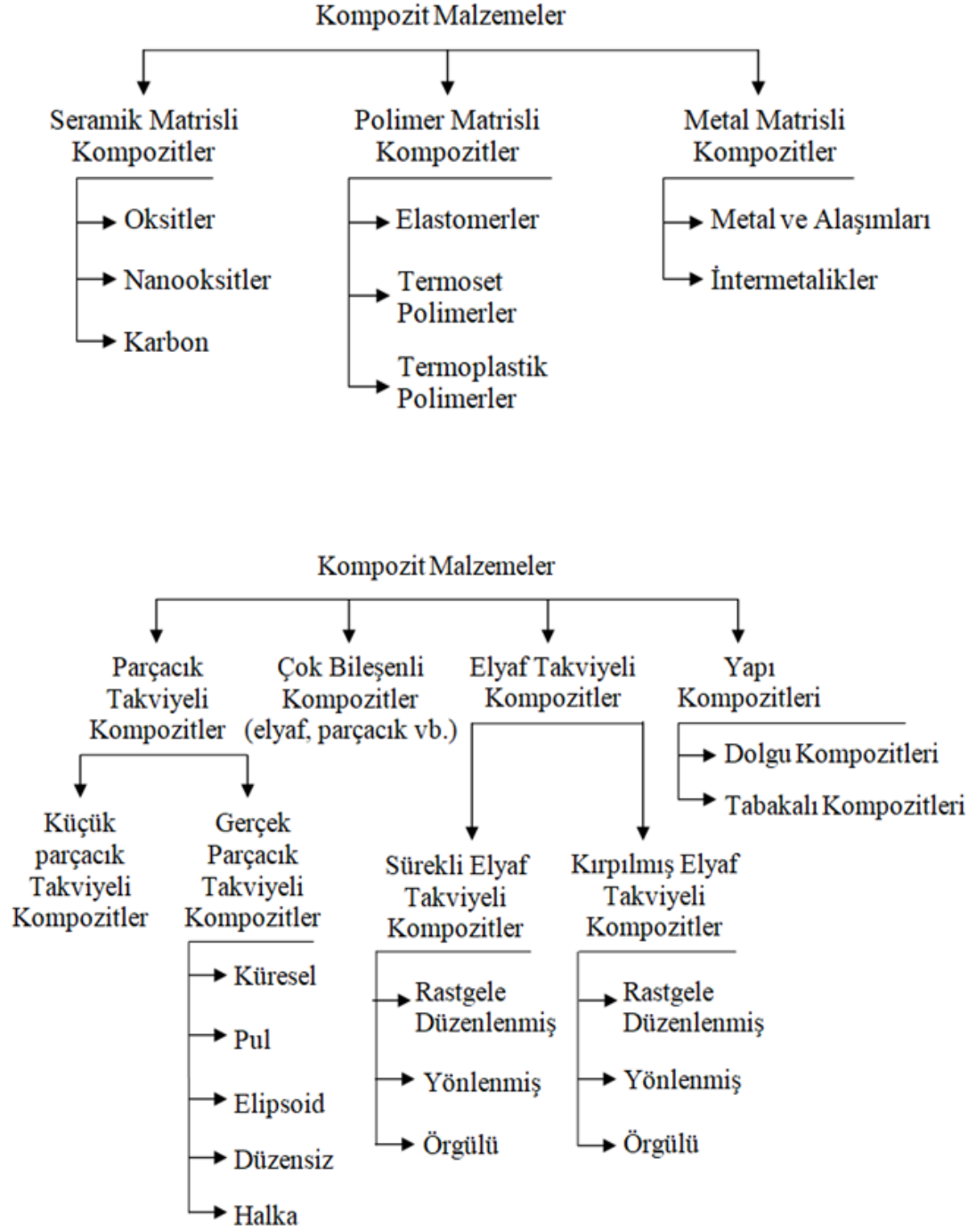


Şekil 2.1: Kompozit bir malzemede ara faz ve arayüzey (Kaya, 2019).

Kompozit malzemeler teknolojinin gelişmesiyle birlikte birçok alanda kendini göstermektedir. Bunlar;

- Savunma sanayi,
- Denizcilik sektörü,
- Tıbbi cihazların üretimi,
- Otomotiv endüstrisi,
- Uzay ve havacılık sektörü,
- Kimya sanayi,
- İnşaat sektörü,
- Elektrik-Elektronik teknolojisi,
- Gıda sektörü,
- Tarım sektörü,
- Enstrüman ve spor malzemeleri imalatıdır (Kumdalı, 2008).

Yapılarında çok çeşitli malzemeler bulunabilen kompozit malzemelerin gruplandırılması da çeşitli biçimlerde yapılabilmektedir. Ancak en yaygın sınıflandırma biçimi olarak, Şekil 2.2’de gösterildiği üzere kendisini oluşturan iki temel malzemeye göre yani matris malzemesine göre ve takviye malzemesine göre değerlendirilmektedir (Kaya, 2019; Şanlı, 2019).



Şekil 2.2: Matris malzemesine göre ve takviye malzemesine göre olmak üzere kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Nazik, 2013).

2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler

2.1.1 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozit malzemeler; yüksek sıcaklık performansı, yüksek elastik modül, yüksek kimyasal olarak kararlılık gibi önemli özelliklere sahiptirler. Erozyon ve aşınmaya karşı dirençli malzemelerdir. Basma mukavemetleri yüksek iken, çekme mukavemetleri düşüktür. Düşük yoğunlukları nedeniyle hafiftirler. Özellikle gelişmiş yüksek sıcaklık performansı beklenen ortam koşullarında polimer matrisli kompozitler kullanılamazken seramik matrisli kompozitler önemli bir alternatiftir. Ancak bu avantajlarının yanı sıra uygulama alanlarını kısıtlayan bazı dezavantajları da mevcuttur. Sert ve kırılgan olmaları, kopma uzaması ve tokluklarının düşük olması, termal şoklara dayanıksız olmaları birçok gelişmiş özelliğine rağmen gölgede kalmasına neden olmaktadır. Bu olumsuz özellikleri liflerle güçlendirmek mümkündür (Kalaycıoğlu, 2010; Kalemtaş, 2015). Matris malzemesi olarak genellikle Al_2O_3 , B_4C SiC , ve Si_3N_4 gibi malzemeler tercih edilmektedir (Kalemtaş, 2015).

2.1.2 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitlerin, metal matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemelere göre avantajı üretim yöntemlerinin ekonomik ve daha basit olmasıdır. Bu nedenle kullanımı yaygındır. En büyük dezavantajı ise termal dayanımlarının düşük olmasıdır. PMK'lerde matris malzemesi olarak, epoksi, polyester, termoplastik polyester, poliamid (PA), politetrafloretillen (PTFA), polietilen (PE) kullanılmaktadır (Şahin, 2015).

2.1.3 Metal Matrisli Kompozitler

Kompozit malzemelerde matris malzemesi seçimi yapılırken kullanılacağı alanlardaki çevre şartları (sıcaklık, korozyon gibi) mukavemet özellikleri ve maliyet göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Matris malzemesinin kompozit malzemeye sağlayacağı faydanın optimum seviyelerde olması, matris malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi belirlenmesiyle doğrudan ilişkilidir (Kumdalı, 2008).

MMK'lerin diğer metallere göre üstünlükleri şunlardır:

- Yüksek mukavemet
- Yüksek spesifik modül
- Yüksek sertlik

- İyileşmiş yorulma direnci
- Gelişmiş yüksek sıcaklık performansı
- Termal şoklara karşı düşük hassasiyet
- Yüksek aşınma direncidir (Uygur ve Saruhan, 2004).

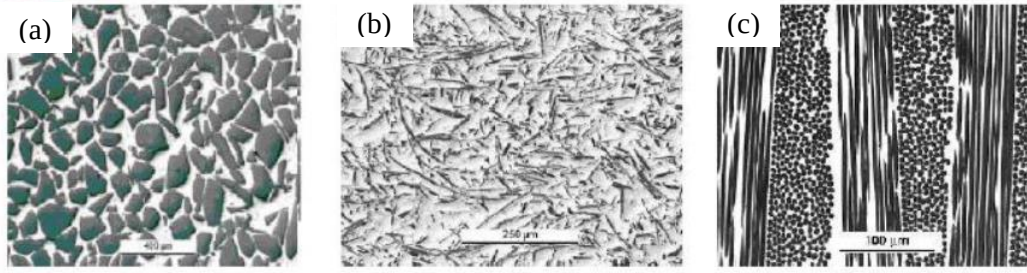
Bu malzemelerin gelişmiş özelliklerinin yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar:

- Yüksek maliyet
- Kompleks imalat süreci
- Metallere göre sünekliğinin düşük olması
- Üretimde kullanılan ekipman bulma sıkıntısı
- Henüz gelişmekte olan bir malzeme grubu olduğu için yeterli bilgiye sahip olunamamasıdır (Kalemtaş, 2014).

Hafif metaller, başta Al ve alaşımları olmak üzere kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak önemli bir tercih sebebidir. Metal matrisli kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan matris malzemesi Al ve Al alaşımlarıdır. Al ve alaşımlarının matris malzemesi olarak tercih edilme sebeplerine sahip olduğu düşük erime sıcaklığı, düşük yoğunluk, ekonomik olması gibi özellikleri örnek verilebilir (Karakoç, 2017).

Metal matrisli kompozitlerde takviye edilen malzeme, meydana gelen kompozitin temel özelliklerinin oluşması bakımından belirleyicidir. Bu nedenle seçim iyi yapılmalı ve takviye elemanının özelliklerinin farkındalığıyla çalışma devam etmelidir. Malzemelerden beklenen özellikler uygulama alanlarına göre değişmektedir (Şanlı, 2019).

Metal matrisli kompozitler içerdiği takviye malzemesi kapsamında; partikül takviyeli, whisker veya kısa fiber takviyeli ve sürekli fiber takviyeli olmak üzere 3 temel başlıkta incelenir (Şekil 2.3). Maliyetleri düşük olan partikül takviyeli metal matrisli kompozitler rijitlikte kayda değer gelişme gösterirler. Ayrıca gösterdikleri izotropik özelliklerin yanı sıra mukavemet açısından kısıtlı kalmaktadır. Zayıf yönleri ise kopmadaki şekil değişikliği ve kırılma tokluğu düşüklüğüdür. Kısa fiber takviyeli metal matrisli kompozitlerin mukavemet özelliği değerlendirildiğinde partikül takviyeli kompozitlere göre daha iyi bir performans sergilediği bilinmektedir. Ancak daha pahalıdırlar. Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler tüm fiberlerin yüksek performans özelliklerini taşımaktadır. Bu kompozitlerin elastiklik modülü ve mukavemet özelliği çok iyidir ve anizotropiktir. Üretim maliyetinin yüksek olması dezavantajıdır (Kalaycıoğlu, 2010).



Şekil 2. 3: (a) Partikül takviyeli kompozitler, (b) Kısa fiber takviyeli kompozitler, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozitler (Kalaycıoğlu, 2010).

2.2 Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemelerde takviye edilecek malzeme, kullanım koşulları ve bu koşullara bağlı olarak istenen mekanik özellikler dikkate alınarak seçilir. Matris malzemesi ile göstereceği uyumluluk da çok önemlidir. Metal matrisli kompozitlerde genellikle SiC, B₄C, TiC, Al₂O₃, SiO₂, TiN, Si₃N₄, AlN, gibi takviye malzemeleri tercih edilir. Tablo 2.1’de bazı takviye malzemeleri ve temel özellikleri gösterilmiştir (Şanlı, 2019).

Tablo 2.1: Metal matrisli kompozitlerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin özellikleri (Şanlı, 2019).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Sıcaklığı (°C)	Sertlik (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Al ₂ O ₃	3,987	2050	22,05	248
SiC	3,2	2730	37	200
B ₄ C	2,51	2763	44,2	650
TiB ₂	4,52	2920	25,5	373
WC	15,88	2870	36	530
Si ₃ N ₄	3,25	1900	30,5	550
AlN	3,33	2780	12,6	390

2.2.1 Alümina (Al₂O₃)

Alümina; yüksek elastik modül, yüksek rijitlik ve gelişmiş termal dayanım gibi mükemmel malzeme özellikleri sayesinde endüstride birçok uygulama için aranan malzemelerden biridir. Kimyasal olarak kararlılık özelliğine sahiptir. Matris malzemesi olarak Al ve alaşımları ile gösterdiği uyum ve sahip olduğu bu özellikler alüminayı endüstride birçok

uygulama için aranan malzemelerden biri haline getirmiştir. Gösterdiği yüksek mekanik performans ile gelişmiş tribolojik özelliklerin istendiği uygulamalarda kullanılır (Yalçinkaya, 2018).

2.2.2 Silisyum Karbür (SiC)

SiC önemli bir takviye elemanıdır. Silisyum karbür maruz kaldığı yüksek sıcaklık koşullarında özelliklerini koruyabilir. Bu özelliği onu takviye malzemeleri arasında önemli bir yere taşımaktadır. Bulundurduğu kovalent bağlar ile yüksek elastik modülüne sahiptir. Diğer takviye malzemelerine göre silisyum karbür takviye edilmiş kompozitlerin işlenebilirlik özelliğinin daha üstün olduğu söylenebilir (Sarı, 2010).

2.2.3 Bor Karbür (B₄C)

Önemli takviye malzemelerinden biri olan B₄C'nin, son derece yüksek sertlik ve rijitlik, yüksek mukavemet, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek darbe ve aşınma dayanımı, yüksek kimyasal kararlık, düşük yoğunluk (2,52 g/cm³) gibi özelliklere sahip olduğu halde maliyetinin yüksek olmasından dolayı henüz Al₂O₃ veya SiC gibi takviye elemanlarına göre istenilen noktaya ulaşamamıştır. B₄C takviyeli kompozitin mekanik özellikleri değerlendirildiğinde kısıtlı kaldığı noktalar bulunmaktadır. Bu kısıtlı özellikler matris seçiminde alüminyum ve alaşımlarının tercih edilmesiyle kayda değer ölçüde geliştirilmektedir (Orhan vd., 2007).

Bor karbür seramiklerinin bahsi geçen özellikleri, malzemenin maksimum yoğunlaştırılmasıyla elde edilebilmektedir. B₄C seramikleri için sahip oldukları teorik yoğunluk değerinin %80'inin üstünde sinterleme işlemini gerçekleştirmek oldukça zordur. Bunun sebebi düşük yayınma katsayısıdır. Sonuç olarak sıcak presleme işleminin bu koşulları sağlayan yüksek basınca sahip bir ortamda yapılması gerekir (Seçilmiş, 2017).

2.2.4 Cüruflar

Cüruf, metallerin veya metal içeren cevherlerin eritilmesiyle meydana gelir. Cürufların metalden daha hafif oksit ve silikatlar kompleksi olmalarına bağlı olarak bir yoğunluk farkı oluşur ve yüzeyde biriken bir yan ürün olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz, 2017; Uysal ve Bahar, 2018).

Sanayileşmedeki aktif gelişmelerle, pirometalurjik işlemler esnasında meydana gelen büyük miktarlardaki metalurjik cürufların geri dönüşümü sağlanamazsa atık olarak

değerlendirilmektedir. Bu şekilde atık olarak değerlendirilen malzemelerin ciddi bir kirlilik kaynağı haline gelerek canlı sağlığı bakımından tehlikeli durumlar yaratması söz konusudur. Metalurjik atık üretimini azaltmak için en verimli ve ekonomik yol cürufların yeniden kullanılmasıdır. Geri dönüşüm amacıyla kullanıldıkları uygulamalar dikkate alındığında önemli bir hammadde tanımıyla değerlendirilebilirler. Elde edildiği kuruluşun üretim yöntemine bağlı olarak kimyasal kompozisyonları ve özellikleri büyük farklılıklar göstermektedir (Uysal ve Bahar, 2018; Vapur vd., 2013).

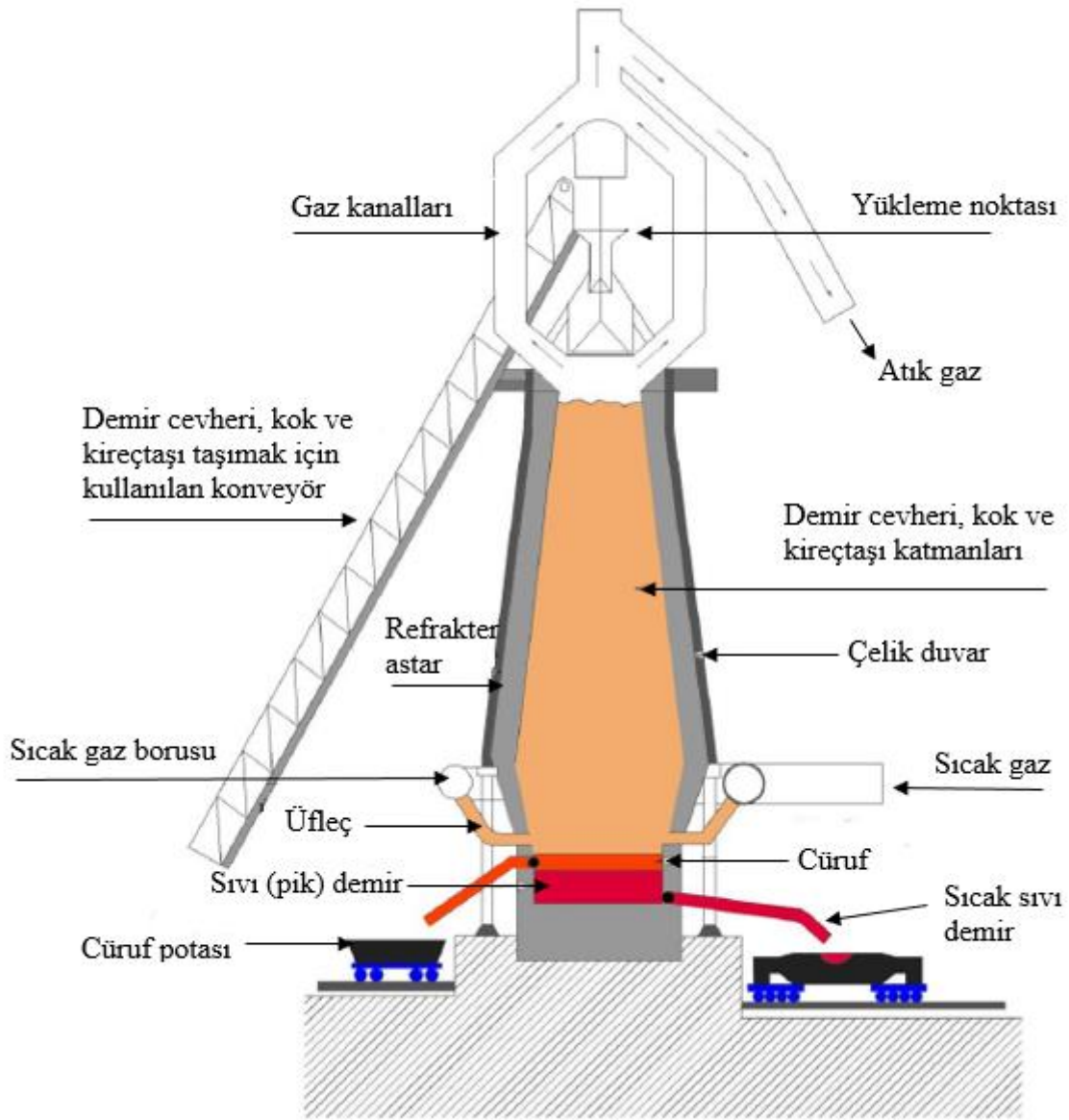
2.2.4.1 Yüksek Fırın Cürufu

Demir-çelik üretiminin gerçekleştiği tesislerde yüksek fırın olarak adlandırılan sistemlerde elde edilen atık ürün yüksek fırın cürufu (YFC) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.4). Demir – çelik tesislerinde, demir cevheri, kok, kireç gibi maddelerin 1500°C-1600°C arasında indirgenmesi esnasında meydana gelmektedir (Uysal ve Bahar, 2018).

Kimyasal bileşimleri, kullanılan hammaddelerin özellikleri ile miktarı ise malzemeyle ilişkilidir. Fakat kimyasal bileşimi temelde $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşmaktadır. Yapısal olarak inorganik bir malzemedir (Yılmaz, 2017).

YFC'nin özelliklerinde etkin olan tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranı değerlendirildiğinde cürufların kristal yapısının da oldukça önemli olduğu açıkça görülmektedir (Uysal ve Bahar, 2018).

YFC'nin geri dönüşüm anlamında, içinde düşük miktarda demir olduğu için özellikle inşaat sektöründe çimento ve beton oluşumunda birçok kullanım imkanı mevcuttur (Uysal ve Bahar, 2018).



Şekil 2.4: Yüksek Fırın (Yılmaz, 2017).

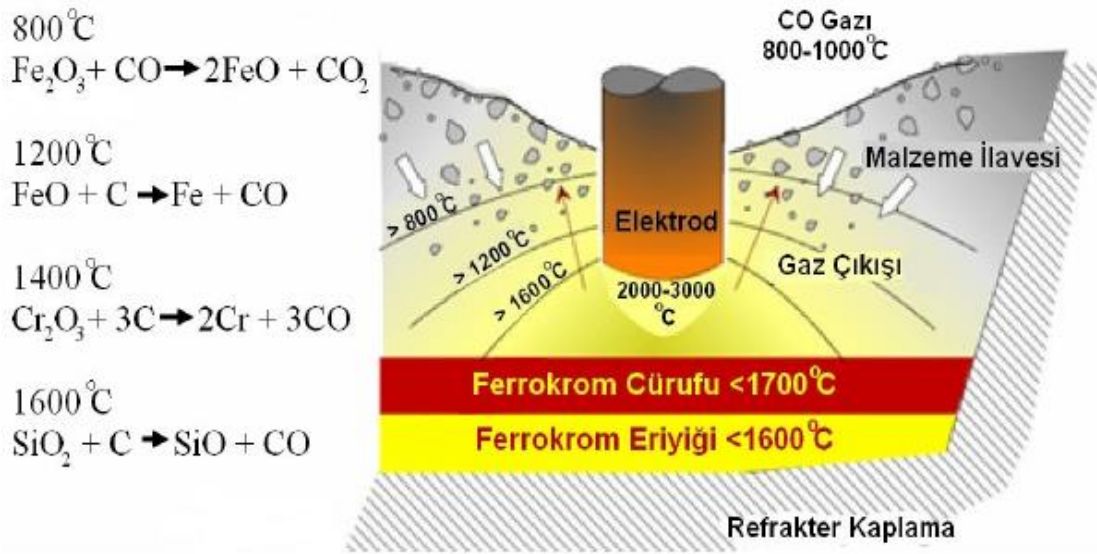
2.2.4.2 Ferrokrom Cürufu

Ferrokrom, paslanmaz ve sıcaklık dayanımına sahip özel çelik malzemelerin imalatında kullanılan bir demir ve krom alaşımıdır. Ferrokrom; kromit cevheri madeninin kok kömürü kullanılarak elektrikli ark ocaklarında ısıtılması ile üretilmektedir (Şekil 2.5). Cürufu ise bu üretim prosesi nihayetinde elektrik ark fırınlarında meydana gelen atık malzemelerdir (Yılmaz, 2017).

Ferrokrom üretimi sırasında metal yüzeyinde bir miktar SiO_2 ve indirgenmeyen oksitler bir tabaka meydana getirir. Sonrasında meydana gelen cüruf olarak ifade edilen bu tabaka

kalıplara dökülerek ayrılır. Cürufların sahip olduğu özellikler soğutulma şekillerine göre değişkenlik gösterir. Havada ve yavaş soğutulduklarında meydana gelen kristal bir yapıdır. Bu şekilde “Havada soğutulmuş elektrik ark fırını cürufu” (EAF cürufu) adını alır. (Uysal ve Bahar, 2018)

Günümüzde yapı malzemeleri olarak geri dönüşüme uğrayan cürufun çoğunluğunu kristal yapıya sahip, havada soğutulmuş cüruf meydana getirir (Uysal ve Bahar, 2018).



Şekil 2.5: Ferrokrom üretim prosesi (Vapur vd., 2013).

2.3 Al Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler içinde başlıca kullanılan matris malzemesi sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyumun düşük yoğunluğuna rağmen mekanik özelliklerinin iyi olması büyük bir avantaj sağlar. Mükemmel mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle uçak, havacılık, otomobil ve diğer çeşitli alanlarda mühendislik uygulamalarında kullanılır. Otomobil sektöründe fren kampanası, silindir, silindir gömlekleri, pistonlar, piston takma halkaları gibi bileşenler, kuru kayma aşınması özelliklerinin öne çıktığı kompozit malzemeler tarafından üretilmektedir. Doğada kararlı bir bileşik olarak bulunan alüminyum oksitin indirgenmesiyle alüminyum metali üretilir. Alüminyumun sahip olduğu bazı özellikler Tablo 2.2 de verilmiştir (Başer, 2018).

Tablo 2.2: Saf alüminyumun özellikleri (Başer, 2018).

Kristal Yapı	YMK
Atom numarası	13
Yoğunluk	2,7 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	660,3°C
Kaynama Noktası	2519°C
Elastik Modülü	66 GPa
Çekme Dayanımı	230-570 MPa
Sertlik	167 MPa
Young Modülü	70-79 GPa
Isıl İletim Katsayısı	230 W/mK
Isıl genleşme Katsayısı	24x 10 ⁻⁶
Elektrik İletim Katsayısı	40 m/Ωmm ²

Alüminyum en çok değerlendirilen malzemelerden biridir. Alüminyum alaşımları hafiftir, nispeten yüksek mukavemete sahiptir, sıfır altı sıcaklıklarda sünekliğini korur. Korozyona karşı yüksek dirence sahiptir ve toksik değildir. Alaşıma bağlı olarak 482°C ile 660°C arasında bir erime aralığına sahiptirler. Alüminyum alaşımları kompozit malzemelerde ana metal matris elemanı olarak kullanılır. 2000, 5000, 6000 ve 7000 alaşım serileri gibi alüminyum alaşımları kompozit üretiminde en çok kullanılan malzemelerdir. Mukavemet/ağırlık oranı ve diğer mekanik özelliklerindeki üstünlükleri nedeniyle çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Ancak bu alaşımlar aşınma ve tribolojik uygulamalarda düşük dirence sahiptir (Bhaskar vd., 2018).

Alüminyum, kompozit üretiminde farklı yöntemlere uyum sağlayabilen bir malzemedir. Doğada en çok bulunan elementlerden olması, maliyet bakımından uygun olmasını sağlar. Bir diğer ve önemli özelliği ise sınırlı kalan özelliklerinin ısıtma işlemi ile geliştirilebilmesidir (Kaykılarlı, 2018).

Alüminyum matrisli kompozitler yüksek işlevselliğiyle birçok uygulamada kullanılmıştır. Kullanım nedenleri arasında yakıt tüketimini düşürmeye olan faydası bakımından hem ekonomik hem de çevresel bir fayda getirdiğini belirtmek gerekir. Alüminyum matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmaların artması, monolitik malzemelerin yerine bir alternatif malzeme haline gelmesine ve mühendislik tasarımlarının değişmesine neden olmaktadır. Daha iyi bir sistem ve tasarım için umut vericidir (Kaykılarlı, 2018).

Al matrisli kompozitlerde yaygın olarak Al_2O_3 , TiC, SiC, TiB₂, B₄C gibi geliştirilebilir özelliklere sahip partikül takviyeleri kullanılır. Bu özellik çok nadir malzemede mevcuttur ve bu malzemenin dikkat çekme sebebidir. B₄C dikkat çekici üstün özelliklere sahiptir. Ancak maliyet olarak yüksek olması bu konuda çalışma yapılmasını kısıtlayan önemli bir konudur. Bu partiküllerin Al alaşımlarıyla birleşmesiyle elde edilen kompozit malzemelerin, özellikle abrasiv aşınma direnci artmaktadır (Kumdalı, 2008).

Takviyeli alaşımların takviyesiz malzemelere göre genel avantajları aşağıdaki gibidir:

- Yüksek mukavemet
- İyileşmiş sertlik
- Mekanik sönümlenme özellikleri.
- Yüksek sıcaklık performansı
- Kontrollü termal genleşme katsayısı
- Kararlı termal özellikler
- Gelişmiş ve özel elektrik performansı
- Daha iyi aşınma ve aşınma direnci

Toz metalürjisi yöntemi, alüminyum matrisli kompozitlerde diğer üretim yöntemlerine göre proses esnasında yüksek sıcaklık gerektirmemesi, malzemenin özelliklerinin geliştirilmesi ve bu konuda bir kontrol mekanizmasına sahip olması bakımından oldukça avantajlıdır (Polat, 2019).

2.3.1 Al Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Isıl işlem, malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek gayesiyle uygulanan bir ısıtma ve soğutma işlemler bütünüdür.

Alaşımların sertliği ve mukavemeti yaşlandırma işlemi ile artırılır. Tavlama işlemi ile ise denge dışı fazların ve içyapıda bulunan kusurların ortadan kaldırılması hedeflenmektedir (Nalçacıoğlu, 2017).

Alüminyum alaşımları çökelme sertleşmesine verdikleri tepkilere bağlı olarak ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan alaşımlar olarak sınıflandırılırlar. Isıl işlem uygulanabilen alaşımlarda bulunan elementler, yüksek sıcaklıklarda büyük ölçüde katı halde erime özelliklerine sahiptirler. 2xxx, 6xxx, 7xxx serileri içerdikleri elementlerin etkileriyle ısıl işlem uygulanabilen alaşımlardandır (Dağdelen ve Ulus, 2016).

Gerçekleştirilen ısıt işlemler literatürde F, O, H, W, T gibi kısaltmalarla belirtilir (Tablo 2.3). Kısaltmalarda F üretildiği gibi anlamına gelmektedir. O tavlınmış malzeme anlamına gelirken, H şekil değıştirme sertleşmesi işlemini ifade eder. W ise malzemenin çözelti ısıt işlemi aşamalarından geçmiş olduğunu ifade eder (Vatansever vd, 2018).

Tablo 2.3: Alüminyum alaşımlarında ısıt işlem kodlamaları (Dağdelen & Ulus, 2016).

Temper no	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlınmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
W	Çözeltiye alınmış
T	Yaşlandırılmış
T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşlanmış
T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmış
T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlanmış
T7	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanmış
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş, yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlanmış

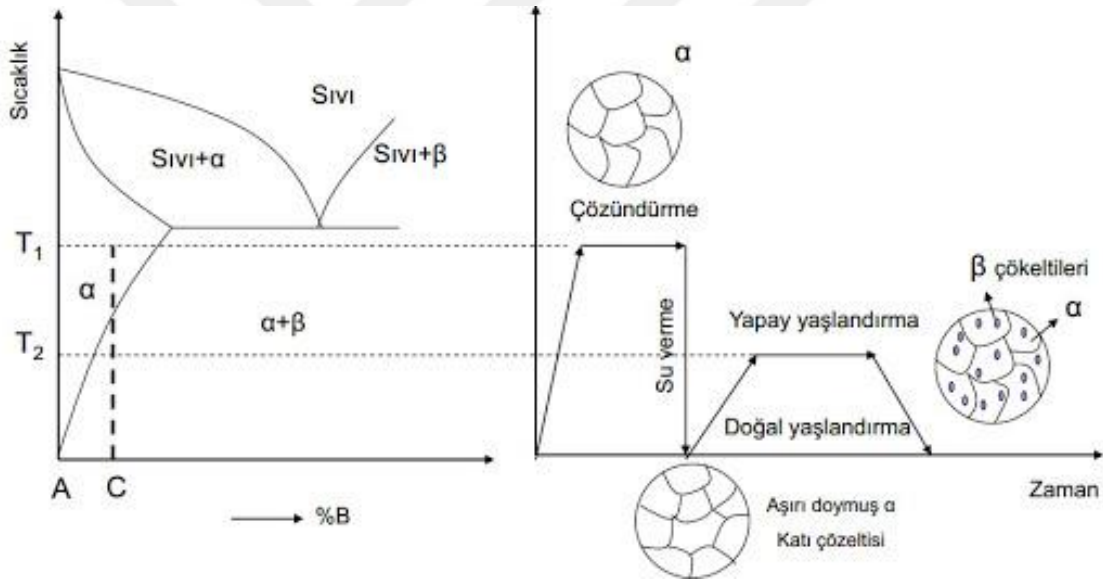
Ticari karşılığı Al-Si-Mg alaşımı olarak bilinen 6xxx serisi Al alaşımlarına en çok T6 yaşlandırma ısıt işlemi uygulanarak mekanik özellikleri arttırılmaktadır (Baydemir, 2018).

2.3.1.1 T6 Isıt İşlemi

T6 ısıt işlemi ilk olarak çözeltiye alma, daha sonrasında su verme (ani soğutma) ve son olarak yapay biçimde yaşlandırma olmak üzere 3 temel basamakta meydana gelmektedir (Şekil

2.6). Çözeltiye alma basamağı aşırı doymuş katı bir eriyik yapı elde etmek amacıyla uygulanır. Bu yöntemde tek fazlı bir yapı elde edebilmek için alaşım solvüs çizgisi üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır ve kontrolsüz yapılar çözünene kadar bekletilir. Çözeltiye alma adımından sonra alaşım önemli bir adım olan su verme işlemi ile ani olarak soğutulur. Su verme işlemi ile alaşım içinde çözünmüş halde bulunan elementlerin çökmesi engellenir. Bu sayede safsızlıklar giderilir ve düşük sıcaklık değerlerinde aşırı doymuş bir yapı elde edilmiş olur. Su verme işlemi tek fazlı yapının korunmasını sağlar (Nalçacıoğlu, 2017).

T6 ısıtılmasının son adımı yaşlandırma işlemidir. Mukavemeti iyileştiren elementler yapıda kararlı çökeltiler oluşturur. Bu durumun sonucunda malzemenin birçok mekanik özelliği iyileşmiş olur. Yaşlandırma bir fırın içerisinde oda sıcaklığından yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirildiği için yapay yaşlandırma olarak adlandırılır. İstenen özelliklerin maksimum olarak sağlanması için yaşlandırma işlemi önemli bir adımdır (Vatansever vd., 2018).



Şekil 2.6: Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi (URL-1, 2020).

BÖLÜM 3

TOZ METALURJİSİ

Toz Metalurjisi, belirli boyuttaki tozların termik ve mekanik etkilerle birleştirilmesiyle malzeme üretme tekniğidir. Toz metalurjisi yöntemini öne çıkaran özelliklerinden birisi kompleks ve hassas boyut toleranslarına sahip yüksek kalitede malzemelerin uygun bir maliyetle üretilmesine imkan sağlamasıdır (Munis, 2017). Yöntem malzemelerin verimli bir şekilde kullanımına ve diğer yöntemlere göre enerji tasarrufu gözetilerek üretimin gerçekleşmesini sağlar. Tüm bu sahip olduğu özellikler ve gelişmeye açık bir yöntem oluşu yeni malzemelerin geliştirilmesi ve üretilmesine olanak tanımaktadır (Kalaycıoğlu, 2010).

TM yöntemi yeni bir teknoloji gibi görünse de aslında oldukça eski metalürji tekniklerinden biridir. Sümerlerin 4000 yıl önce alet ve silah yapımında toz üretim yöntemlerini kullanmış olması, Mısırlıların M.Ö. 3000 yıllarında demir tozlarını kullanması, yine İnkaların mücevherlerinin altın tozlarından oluşması ve M.S. 300 yıllarında 6,5 ton demir tozu kullanılarak Hindistan'daki Delhi sütununun yapılması toz metalürjisinin tarihi temellerinin en güzel örnekleridir. Geleneksel üretim yöntemlerinin gelişen teknoloji ile malzemelerden beklenen performans bakımından yetersiz kalması, yeni bir arayış ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyacın artması ve toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerden istenilen özellikleri sağlayabilmesi, metal esaslı tozların zaman içerisinde önem kazanmasını sağlamıştır (Munis, 2017; Tsukerman, 1965).

Toz metalurjisi yöntemiyle, diğer yöntemlerle üretimi ve birbirleriyle karışımı zor olan malzemeler, ergime derecesi çok yüksek olan malzemeler, gözenekli bir yapı istenen yatak malzemeleri, yüksek sertliğe sahip alaşımlar gibi birçok spesifik özelliği barındıran malzemelerin üretimi sağlanabilmektedir (Kaykılarlı, 2018).

TM teknolojisinin geleneksel yöntemlere göre avantajları genel olarak bu şekilde sıralanabilir:

- Malzemenin kimyasal yapısının ve mikroyapı kontrolünün sağlanması mümkündür.
- Yüksek yüzey kalitesi beklenen ürünler için uygundur.

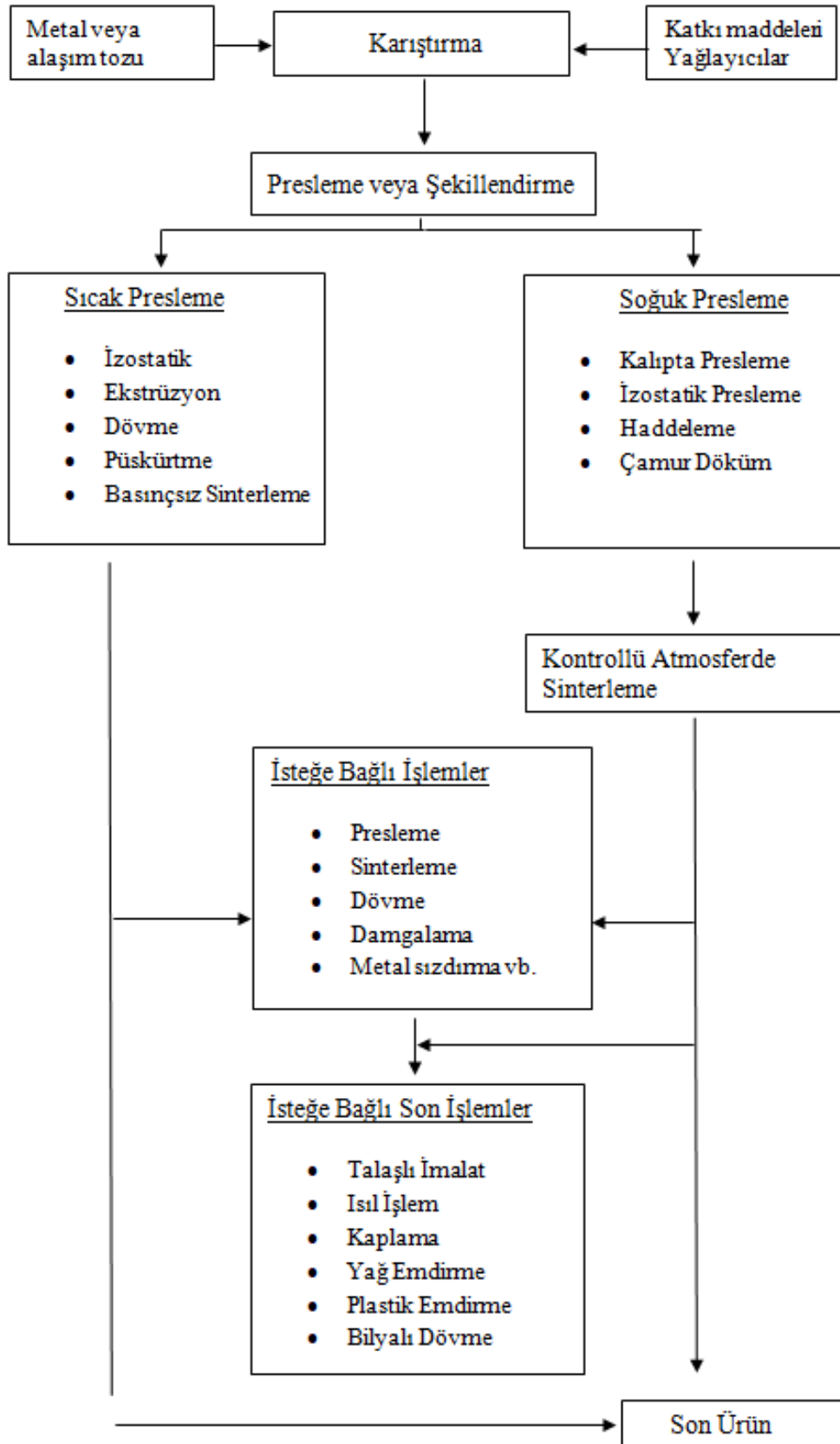
- Şekil olarak karmaşık yapıya sahip malzemelerin üretimi diğer yöntemlere göre kolaydır.
- Düşük boyutsal toleransa sahip parçaların üretimine imkan sağlar.
- Ergime sıcaklığı yüksek malzemelerin üretimi için uygundur.
- Malzeme kaybı olmadan üretime olanak sağlar. Tozlar ürünün yaklaşık %97'sini oluşturur.
- Gözeneklilik oranı kontrol edilebilir.
- Geleneksel yöntemlerle karıştırılamayacak malzemeleri birleştirilebilir.
- Seri üretim olarak değerlendirildiğinde maliyet bakımından uygundur.
- Çevreye olan olumsuz etkileri daha azdır (Karakoç, 2017).

Toz metalürjisi yönteminin bu özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da vardır. Örneğin;

- İlk yatırım maliyeti oldukça yüksektir.
- İstenen kompozisyona göre her malzemenin üretimi için uygun değildir.
- Tolerans hassasiyeti talaşlı imalata göre düşüktür.
- Genel proses sonrasında özellikleri daha fazla geliştirmek için ek işlemler gerektirir.
- Parça boyutuna göre yüksek basınç parametreleri gerekebilir.
- Temiz ve özenli bir çalışma ortamı gerektirir.
- Üretim ortamı İş sağlığı ve güvenliği bakımından risk içerir (Karakoç, 2017).

Toz metalürjisi yöntemi genel olarak toz üretimi ve karakterizasyonu, toz karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme adımlarından oluşur. Toz metalürjisine ait akış diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir. Tozların üretimi ve ardından karakterizasyonu yapıldıktan sonra hazır hale gelen tozların karıştırılması sağlanır. Karıştırma işlemi tamamlanan tozlar kalıba alınır ve uygun görülen bir yük değeri altında sıcak veya soğuk olarak sıkıştırılır. Ancak sıcak presleme ile üretim, ara yüzey bağını iyileştirmek ve partikül kırılmasını önlemek açısından daha kalitelidir (Tsukerman, 1965).

Üretilcek malzemelerde homojen bir yapının elde edilmesi için tane boyutu önemlidir. Malzemenin nihai mekanik mukavemeti, karışımdaki ana metalin erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta (erime noktasının %66-75'i) gerçekleştirilen yüksek sıcaklıkta bir işlemin (sinterleme) sonucu olarak elde edilir. Sinterleme ile taneler arası bağ sağlanır ve istenen özellikler güçlendirilerek malzeme son halini alır. Sinterleme parametreleri (süre, sıcaklık vb.) kompoziti meydana getiren malzemelerin özelliklerine göre seçilir (Şahin, 2015).



Şekil 3.1: Toz metalurjisi yöntemiyle malzeme üretimi akış diyagramı diyagramı (German, 1984).

3.1 Harmanlama ve Karıştırma

Toz metalurjisi yönteminde ilgili malzemeyi belirledikten sonra harmanlama ve karıştırma adımına geçilir. Bu iki terim birbirinden farklı anlamlar taşımaktadır. Harmanlama, kimyasal özellikleri aynı fakat farklı tane boyutlarındaki tozların karıştırılması iken; karıştırma, kimyasal özellikleri farklı fakat aynı veya farklı tane boyutundaki tozların karıştırılması işlemidir (Şanlı, 2019). Toz metalurjisi yönteminde kullanılacak farklı tozların bir araya gelmesi, her bölgede eşit dağılım sergileyecek biçimde karışması ve toz içerisindeki nem ve taşıma sırasındaki şartlara bağlı oluşan segregasyonun ortadan kalkması bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Karıştırma ve harmanlama işlemleri özel olarak üretilmiş makinalarda yapılır (Kumdalı, 2008).

3.2 Metal Tozlarının Sıkıştırılması

Tozların harmanlama ve karıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra, presleme aşamasına geçilir. Presleme, toz metalurjisi için çok kritik bir adımdır. Sinterleme sonrası malzemenin elde edilen mukavemet ve yoğunluğu presleme parametrelerine bağlıdır. Yani meydana gelen son ürünün yoğunluğu ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler (Karakoç vd, 2018).

Presleme işlemiyle karışım sinterleme işlemi için istenen boyut ve şekle, gözenek oranına ve yine sinterleme işlemi için yeterli olacak dayanıma ulaşmış olur (Kaykılarlı, 2018). Toz metalurjisinde kullanılan malzemelere ve istenen özelliklere göre çeşitli şekillendirme yöntemleri mevcuttur. Tek veya çift eksenli presleme, kalıpta presleme, izostatik presleme, haddeleme, yüksek enerjili presleme, ekstrüzyon, serbest döküm, sıcak presleme, şerit döküm bunlardan bazılarıdır (Kumdalı, 2008).

3.2.1 Kalıpta Presleme

Bir yönden veya her iki yönden basınç uygulayarak yapılan kalıp içerisinde sıkıştırma oldukça tercih edilen toza şekil verme işlemidir. Bir yönden sıkıştırma işleminde alt zımba sabit üst zımba hareketli olup, üst mekanizmanın hareketi ile alt mekanizmaya doğru malzeme sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırılan parçadaki yoğunluk üst zimbadan hareketle alt zımba doğrultusunda gittikçe azalma eğilimi göstermektedir (Kaykılarlı, 2018).

3.2.2 Tek Eksenli Presleme

Bu yöntemde kuvvetin tek eksenli olarak tek bir yönden uygulanması sağlanır. Presleme işlemi sonrasında yoğunluk, basıncı uygulayan mekanizmanın altında daha yüksektir. Bu nedenle homojen bir yoğunluk dağılımı söz konusu değildir (Munis, 2017).

3.2.3 Çift Etkili Presleme

Çift etkili presleme yönteminde, tek eksenli presleme yönteminden farklı olarak kalıp sabit, alt ve üst mekanizma hareketlidir. Bu yöntemde, iki yönden uygulanan kuvvet yardımı sayesinde parça içinde yoğunluk dağılımı homojene yakındır (Kaykılarlı, 2018).

3.2.4 İzostatik Presleme

Bu sistemde sıkıştırma, homojen bir yapı elde etmek amacıyla, basıncı bir gaz ya da sıvı yardımıyla malzemeye her yönden ve aynı değerinde uygulayarak yapılır. Bütün yönlerde eşit yoğunluk, eşit büzülme ve eşit mukavemet sağlanır (Munis, 2017).

3.2.5 Sıcak Presleme

Malzemenin sinterlenmesi ve preslenmesi işlemlerinin aynı anda uygulandığı bir yöntemdir. Bu şekilde yoğun ve homojen bir mikroyapı elde edilmektedir. Sıcak presleme işlemi sinterleme davranışı zayıf olan ve sıvı faz yöntemi ile üretilmeyen malzemelerin üretilmesi için alternatif bir yöntemdir. Bu yöntem tozlara uygulandığı gibi daha önce şekillendirme yapılmış parçalara da uygulanabilir (Kumdalı, 2008).

Sıcak pres yönteminin diğer yöntemlere göre birçok avantajı mevcuttur. Bu avantajlar;

- Presleme ve sinterleme işleminin bir arada uygulanabilmesi
- Sert iş malzemelerinin teorik yoğunluğuna ulaşılması
- Üretilen malzemelerin iç yapılarının düzgün olması
- Ekonomik olarak uygun olmasıdır (Nas vd., 2013).

Sıcak pres yönteminin kullanıldığı başlıca uygulama alanları ise;

- Hafif kompozitler
- Titanyum havacılık yapıları
- Yarı iletken kaplama hedef malzemeleri
- Yüksek performans manyetikleri
- Aşınmaya dayanıklı malzemeler
- Yapay implantlar
- Zırh delici malzemelerin üretilmesinde kullanılması gibi sıralanabilir (Nas vd., 2013).

3.2.6 Yüksek Enerjili Sıkıştırma

Yüksek enerjili sıkıştırma, numunelere 50 milisaniye kadar bir zamanda büyük bir basınç (mekanik, havalı ve patlama vb.) uygulanarak gerçekleştirilen bir yöntemdir (Kumdalı, 2008).

3.2.7 Ekstrüzyon Yöntemi ile Sıkıştırma

Toz şekillendirilmede çok fazla kullanılmakta olan bir tekniktir. Bu teknikte sıkıştırma işlemi tozun kapalı bir kap içine alınarak ısıtılmasıyla gerçekleşir. Yüksek yoğunluklu parçalar elde etmek için ekstrüzyon yöntemi uygundur. Eğer tozlar ekstrüzyon yöntemi ile sıkıştırma işleminin öncesinde ısıya maruz kaldıkları herhangi bir işlemde geçmişse sonrasında sinterleme işlemine gerek duyulmamaktadır (Munis, 2017).

3.2.8 Titreşim ile Sıkıştırma

Bu yöntemde kalıp içindeki toza basınç ve frekans zamanlamasıyla titreşim uygulanmasıyla malzeme meydana gelir (Munis, 2017).

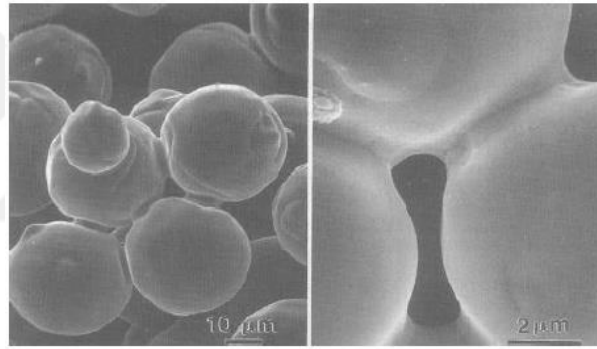
3.3 Sinterleme

Toz metalürjisi prosesinde parçacıklar arasında bağ oluşumunu ve belirli özelliklerin daha iyi hale gelmesini sağlamak amacıyla uygulanan ısıl işlem sinterleme olarak adlandırılır (Şanlı, 2019).

Tarihte çanak, çömleklerin pişirilmesi sinterlemenin en eski örneklerine rastlanıldığının kanıtıdır. Ancak 1940’lardan sonra sinterleme teknolojisinde kayda değer ilerlemeler olmuş ve bilimsel olarak araştırma konusu haline gelmiştir (Kalaycıoğlu, 2010).

Sıcaklığın sinterleme işleminde en belirleyici parametre olduğu söylenebilir. Çünkü sıcaklık ne kadar yüksek olursa sinterleme adımı, aktif atom ve boşluk çokluğu nedeniyle o kadar çabuk sonuca ulaşır. Yüksek sıcaklığın yanı sıra sinterleme hızı ve süresi, yapılan presleme işleminde uygulanan basınç gibi değişkenler sinterleme adımını etkileyen diğer faktörlerdir (Dere, 2019).

Sinterleme esnasında, yüksek sıcaklığın etkisiyle, birbiriyle temas eden parçacıklar aralarında Şekil 3.2’de görüldüğü üzere boyunlaşma adı verilen yapıyı oluşturarak bağlanmaya başlarlar. Boyunlaşma ile birlikte başlayan, parçacıkların birbirine bağlanması başta mukavemet olmak üzere birçok özelliğin gelişmesini sağlamaktadır (Dere, 2019).



Şekil 3.2: Sinterleme mekanizmasının SEM ile görünüşü (Şanlı, 2019).

Başlıca uygulanan sinterleme proseslerinin ilki katı hal sinterlemesidir. Bu sinterleme mekanizmasında uygulanan sıcaklık değerinde karışım tozun katı formdayken yoğunlaşması söz konusudur. İkinci yöntem sıvı faz sinterlemesidir. Bu sinterleme prosesi esnasında ise toz karışımında sıvı faz oluşumu söz konusudur.

Sinterleme üzerine yapılan çalışmalar sonucunda;

- Boyunlaşmanın sonucunda parçacıkların birbiriyle etkileşiminin zamanla arttığı,
- Tane köşelerinin ve temas bölgelerinin yuvarlaklaştığı,
- Gözenek hacminin azaldığı,
- Yoğunlukta bir artış meydana geldiği belirtilmektedir (Munis, 2017).

BÖLÜM 4

AŞINMA

Aşınma; malzemelerin diğer bir malzemeyle karşılıklı etkileşimi neticesinde oluşan mekanik etkiler sebebiyle yüzeyde meydana gelen hasarlar bütünüdür (Gök, 2008).

Malzemelerde oluşan hasarın aşınma olarak değerlendirilebilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekir.

- İzafi hareketin (sürtünme) olması,
- Basınç meydana getiren bir etkinin olması,
- Etkinin istem dışı gerçekleşmesi,
- Hareketin yavaş ancak devamlı olması,
- Yüzeyde bir deformasyon yaratması (Kurt, 2010; Seçilmiş, 2017).

Birbirlerine temas eden malzemelerin yüzeylerinin oksit tabakası ve yağlayıcılar tarafından korunması mümkündür. Ancak oksit tabakasının kırılması veya yağlayıcının bozulması gibi durumlar yüzeylerin birbirine temas etmesi ihtimalini ortaya çıkarmaktadır. Temas sonucu sürtünme oluşur ve bu da devamında aşınmaya sebebiyet verir. Aşınma, malzemelerin ömürleri ve performanslarının azalmasına ve hatta kullanılamayacak duruma gelmesine neden olur. Bu da büyük miktarlarda ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Yalçınkaya, 2018).

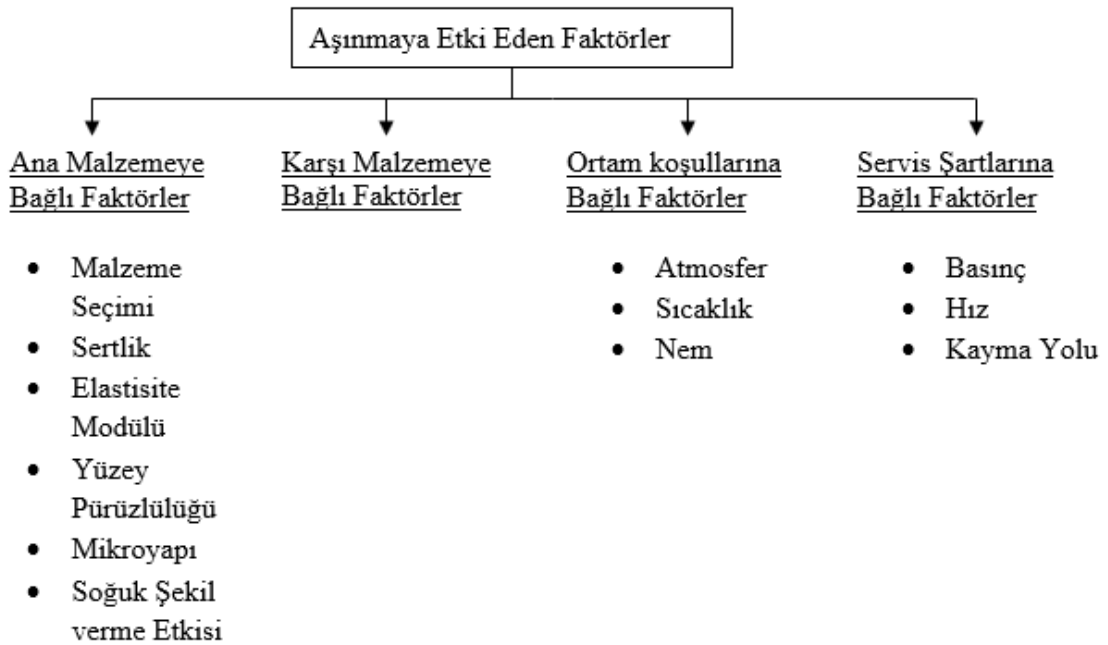
Endüstride en çok karşılaşılan hasar türünün başında aşınma gelmektedir. Aşınmanın yüksek olduğu, oksit tabakası ve yağlayıcının yeterli olmadığı durumlarda malzemenin aşınma mukavemetini arttırmak kullanım ömrünü uzatma konusunda önemli bir etkidir (Kurt, 2010). Metal matrisli kompozitler daha iyi aşınma direnci ve sürtünme özellikleri sayesinde silindir gömleği, piston, fren diski, şaftlar gibi otomotiv parçalarında kullanılabilmektedir. Özellikle Al esaslı ve seramik takviye edilmiş kompozit malzemeler, çalışma koşullarında aşınmaya karşı en yüksek direnç ve üstün performans gösteren malzemelerdir (Yalçınkaya, 2018).

Yumuşak yapı içerisinde sert fazlar oluşturarak, daha iyi aşınma direnci ve tokluk sağlanabiliyor olması kompozit malzemeleri geleneksel malzemelere göre daha dikkat çekici hale getirmektedir. Matris ile takviye fazlarının sertliği ve kırılma tokluğu, sert

partiküllerin özellikleri (dağılım, miktar, boyut) malzemenin aşınma direncini belirleyen özelliklerdir. Malzemelerin aşınma direncini belirleyen bu özelliklerin yanı sıra termal ve kimyasal davranışları da önemlidir (Seçilmiş, 2017).

4.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Bir malzemenin aşınma davranışını etkileyen birçok parametre vardır. Malzemelerin aşınma durumuna karşı gösterdiği davranış Şekil 4.1’ de görüldüğü üzere; ana malzeme, karşı malzeme, ortam koşulları ve servis koşullarıyla ilişkili olarak değişiklik göstermektedir (Kiraz, 2019; Gök, 2008).



Şekil 4.1: Aşınmayı etkileyen faktörler.

Malzemenin çalışacağı ortamda aşınma hasarının herhangi bir türüne maruz kalma ihtimali söz konusu ise bu duruma uygun bir malzeme seçimiyle oluşabilecek kayıplar en aza indirilebilir. Bu nedenle malzemenin çalışacağı ortam koşulları önemli bir parametredir (Yalçinkaya, 2018).

Sertlik aşınmayı etkileyen en önemli özelliklerdendir. Malzemenin sertliğinin artması ile aşınmaya dayanımı da artar ve oluşabilecek deformasyonların önüne belirli ölçüde geçilebilir.

Elastisite modülü ile aşınma direnci doğru orantılıdır. Çünkü malzemelerin elastik modülü ve akma sınırı arttıkça malzemelerin temas ettiği alan da azalır (Kiraz, 2019).

Yüzey pürüzlülüğü nedeniyle tek bir pürüze etkiyen yüklerin artması sonucunda gerilme yığılmaları oluşur ve temas noktaları şekil değiştirir. Bu durum aşınma miktarının artmasına neden olur. İşleme sonucu malzeme yüzeyleri temiz ise yüzeyler arasında soğuk kaynak artışı meydana gelir (Kiraz, 2019).

Malzemelerin içyapı karakteristikleri de oldukça önemlidir. Malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikleri önemli derecede etkiler. Malzeme içerisindeki farklı mikro yapıların aşınmaya karşı gösterdikleri direnç değerleri de farklıdır (Gök, 2008).

Soğuk şekil değişiminde malzeme deformasyona uğradıkça sertleşir. Bu duruma pekleşme adı verilir. Gerçekleşen pekleşme olayı malzemenin aşınmaya olan direncinin de artmasını sağlar (Gök, 2008).

Karşı malzemeye bağlı faktörlere tane özellikleri örnek verilebilir. Aşınma ve tane büyüklüğü arasında ters bir orantı söz konusudur (Kiraz, 2019).

Ortam koşullarına bağlı faktörler ele alındığında; atmosfer, nem ve sıcaklık malzemenin aşınma davranışını etkiler. Birbiriyle etkileşim içinde olan malzeme yüzeylerinde sürtünmeden dolayı sıcaklığın artmasıyla malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği direnç de değişir (Gök, 2008).

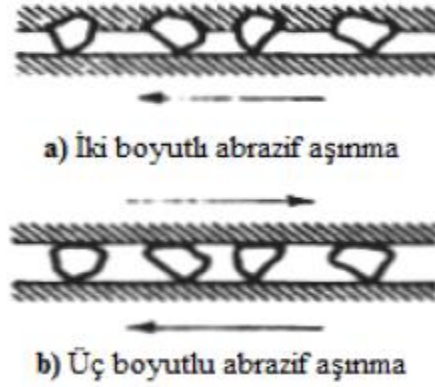
Servis koşullarına bağlı faktörler olarak yüke maruz kalan yüzeydeki basıncın artması ve sürtünme hızının artması aşınmayı artırır. Kayma mesafesinin artması da zamanla aşınma miktarının artmasına neden olur (Seçilmiş, 2017).

4.2 Aşınma Türleri

4.2.1 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma yükün ve hareketin etkisi ile sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüz veya taneler aracılığıyla, yük ve hareket sonucunda diğer cismin yüzeyini çizmesi ve talaş kaldırması olarak tanımlanır. Yani temel olarak abrasiv aşınma temas halinde olan iki yüzey arasında sertlik farkı olduğunda veya arada sert partiküllerin de olduğu durumlarda ortaya çıkan aşınmadır. İki ya da üç elemanlı olarak gerçekleşir (Şekil 4.2). Sürtünen cisimlerin etkileşimleri sonucu oluşan aşınma iki elemanlı, ara yüzeyde bulunan sert parçacıkların

sürtünen cisimleri çizmesi sonucu meydana gelen aşınma ise üç elemanlı aşınmadır (Yalçinkaya, 2018). İki elemanlı abrasiv aşınmaya sürtünen yüzeye ait tümsekler sebep olur. Üç elemanlı aşınmaya ise kayan yüzeyler arasında serbestçe hareket edebilen sert parçacıklar sebep olur (Kurt, 2010).



Şekil 4.2: a) İki elemanlı, b) Üç elemanlı abrasiv aşınma (Seçilmiş, 2017).

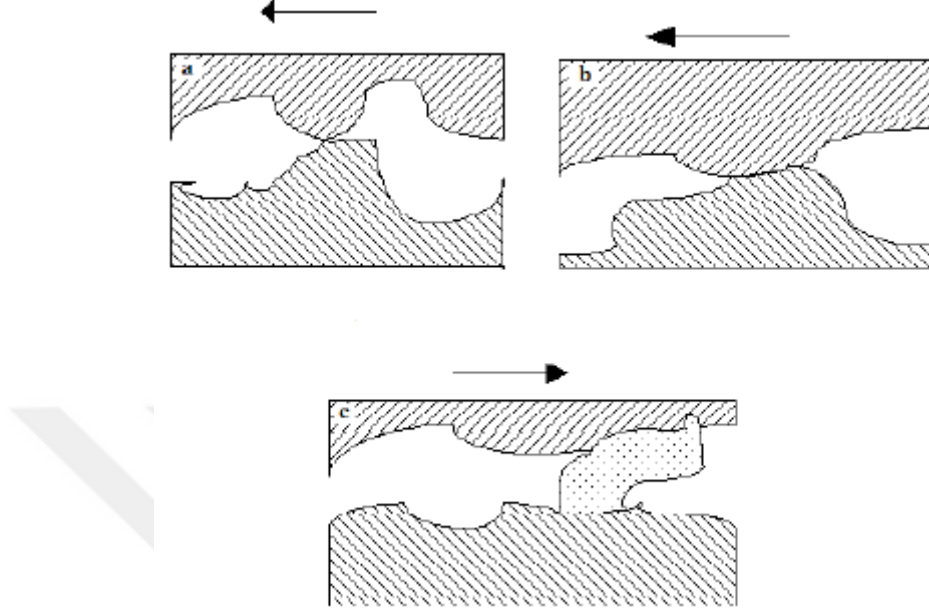
Abrasiv aşınmayı etkileyen başlıca temel faktörler, aşındırıcı parçacığın malzeme yüzeyine göre sertlik durumu ve maruz kalınan yükün uyguladığı basınç şiddetidir. Malzemeye gelen normal yük azaltılarak abrasiv aşınma hızı da azaltılabilir. Bu şekilde parçacıklar yüzeye daha az batar. Böylece çapak kaldırma durumunun azalması sağlanır (Kurt, 2010).

4.2.2 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, basınç altında iki metal yüzeyin birbirleri üzerinde kayması sonucunda meydana gelir. Kafes yapıları benzer olan iki metalin, temas halindeki yüzeyleri arasında adhezyon kuvveti olarak adlandırılan bir çekim söz konusudur. Malzeme ağırlığı veya bir dış kuvvet etkisinin artmasıyla iki yüzeyin temas eden pürüzleri yükü taşıyamayacak hale gelir. Bu durumun sonucu olarak da akma sınırı geçilir ve plastik deformasyon meydana gelir. Uygulanan yük etkisiyle, malzemelerin arasındaki yağ tabakası kopar ve küçük temas noktaları oluşur (Yalçinkaya, 2018).

Bu parçalanma esnasında malzeme atomları doğrudan temasa geçme imkanı bulur. Bunun sonucunda bölgesel soğuk kaynama şeklinde kaynak bağları oluşur. İzafi hareketin de etkisiyle yüzeydeki sıcaklık artar. Artan sıcaklıkla birlikte kaynama bağlarının olduğu bölgeden veya metalin yüzeyinden parçacık kopar. Kopan metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest olarak bulunabilirler veyahut metallere birine yapışabilirler (Gök, 2008). Kayma

devam ettiğinde oluşan bağ kırılır, yüzeylerin birinde boşluklar diğer yüzeyde ise çıkıntılar oluşur ve yapışkan parçalar yüzeylerin aşınmasına sebep olur (Şekil 4.3) (Yalçinkaya, 2018).



Şekil 4.3: Adhesiv aşınma oluşumunun şematik görüntüsü (a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşumu. (b) bir yüzeyden diğerine malzeme transferi. (c) Oluşan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi ve yüzeyde kırıntı oluşumu (Kurt, 2010).

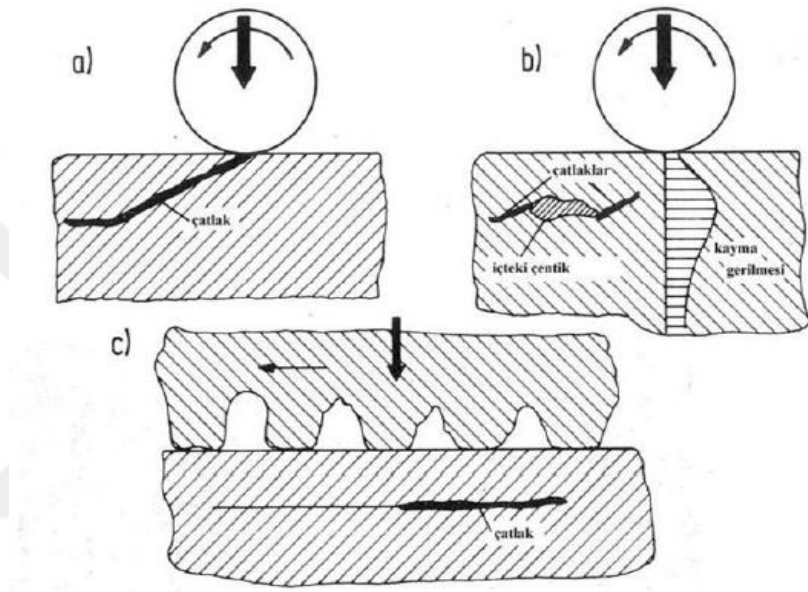
4.2.3 Korozi Aşınma

Oksit tabakası sayesinde korozi ortamlara karşı dayanıklı olan metallerin, uğradıkları darbe sonucu yüzeyindeki oksit tabakası kırılması söz konusu olabilir. Kırılma sonucu temas eden yüzeyler, ortam ile reaksiyona girer. Reaksiyon ürünleri yüzey üzerinde tabaka oluşturur. Temas noktalarında çatlak oluşumu ya da abrasiv etkenlerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar. Böylece metal yüzeyi korumasız kalır ve korozyon aşınması oluşur (Yalçinkaya, 2018).

Korozyon aşınması, diğer aşınma türlerine göre malzemedeki yarattığı hasar değerlendirildiğinde, hafif bir aşınma türüdür. Ciddi boyutlara ulaşabilmesi için malzemenin nemli bir ortama ve yüksek sıcaklıklara maruz kalması gerekir (Seçilmiş, 2017).

4.2.4 Yorulma Aşınması

Makine parçaları tekrarlı ve değişken olan yüklere maruz kaldıklarında yüzeylerinin altında yorulmadan kaynaklı çatlaklar ve bölgesel kopmalar meydana gelir. Oluşan çatlaklar Şekil 4.4'te de görüldüğü üzere zamanla ilerler ve malzeme yüzeyinde meydana gelen kısmi çözülmelerle parçacık kopmasına neden olurlar. Genelde dişli çarklar, rulmanlar ve kamlar gibi makine elemanlarında, kavitasyon durumunda çalışan pompalarda yuvarlanma hareketi gerçekleştiren parçaların yüzeyinde oluşur (Yalçınkaya, 2018; Gök, 2008).



Şekil 4.4: Yorulma yüzeyinde çatlak ilerlemesi ve oluşumu (Başer, 2018).

BÖLÜM 5

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İdusuyi ve Olayinka (2019) tarafından yapılan çalışmada alüminyum metal matrisli kompozitlerin kuru kayma aşınma özellikleri incelenmiştir. Bu konuda yapılan birçok çalışma incelenerek takviye partikülleri, uygulanan yük, kayma mesafesi, kayma hızı gibi parametrelerin kompozit malzemenin aşınma davranışı üzerindeki etkilerine dair yorum getirilmiştir. Aşınma mekanizmaları ile ilgi de bilgi verilmiştir. İncelenen çalışmalarla sert takviye partiküllerinin ve takviye oranındaki artışın aşınma direncini arttırdığı, uygulanan yük ile aşınma kaybının doğru orantılı olduğu sonuçlarına varılmıştır. Alüminyum metal matrisli kompozitlerde oluşabilen aşınma mekanizmaları; adhesiv, abrasiv, delaminasyon ve titreşimli aşınma olarak belirtilmiştir. Yüksek yüklerde delaminasyon aşınması baskınken, düşük yük koşullarında ve güçlendirilmiş kompozitlerde abrasiv aşınmanın görülmesinin daha olası olduğu sonucuna varılmıştır.

Bhaskar vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada Alüminyum kompozitlerin kuru kayma aşınması üzerine uygulanan yük (N), kayma hızı (m/s) ve kayma mesafesi (m) gibi aşınma parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Birçok Al alaşımı için yapılmış çalışmalar incelenmiş ve elde edilen en uygun deneysel parametreler rapor edilmiştir. En yaygın kullanılan aşınma test cihazının pin-on disk olduğu sonucuna varılmıştır.

Dhanashekar vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada geleneksel toz metalurjisi yöntemi kullanılarak Al6061/SiC kompozitleri üretilmiştir. SiC partikülleri ağırlıkça %2,5 %5 ve %7,5 oranında takviye edilmiştir. Karıştırılan tozlar 350 MPa basınç altında tek eksenli olarak preslenmiş ve 610 - 640 °C sıcaklık aralığında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası elde edilen yoğunluğun maksimum seviyede olduğu gözlenmiştir. Çalışma sonucunda takviye oranının artmasıyla sertlik ve basınç dayanımı artmıştır. Üretilen kompozit malzemenin, aşınmaya karşı Al6061 alaşımına kıyasla daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir.

Mosleh-Shirazi vd. (2016) Al/SiC nanokompozitlerinde SiC içeriğinin kuru kayma aşınması, korozyon ve korozyon aşınma davranışlarındaki etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada SiC hacimce %1, %2 ve %3 oranlarında eklenmiş olup Al/SiC nanokompozitleri soğuk presleme ve sıcak ekstrüzyon ile sentezlenmiştir. Presleme işlemi 750 MPa sabit basınç altında gerçekleşmiştir. Sonrasında ise 500°C'de sıcak ekstrüde

edilmiştir. Son halini alan malzemelerin, elektrokimyasal polarizasyon testi ile %3 NaCl çözeltisi içindeki korozyon direnci testi yapılmıştır. Kuru kayma aşınma testleri, pin-on disk ile gerçekleştirilmiş olup pim olarak 3 mm çapında bir Si_3N_4 topu kullanılmıştır. Tüm testler, kaymaya karşılık gelen normal bir 2 N yük altında 2,0 mm çapında bir daire yol boyunca 1 cm/s kayma hızı ve 12,6 m kayma mesafesi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemenin kuru kayma aşınması ve korozyon direncinin SiC içeriğinin artmasıyla iyileştiği tespit edilmiştir.

Gao vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı presleme sıcaklıklarında sentezlenen $\text{B}_4\text{Cp}/\text{Al6061}$ kompozitlerinin mikroyapısal özellikleri ve mekanik davranışları incelenmiştir. Ağırlıkça %90 Al6061 tozları ve ağırlıkça %10 B_4C parçacıkları bir bilyeli değirmende karıştırılmıştır. Daha sonra vakum ortamında 15 MPa basınç altında 560°C, 580°C ve 600°C olmak üzere farklı sıcaklıklarda sıcak presleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Numuneleri kalıptan kolay çıkarmak için çelik kalıbın iç yüzeyine bor nitrür püskürtülmüştür. Çapı 45 mm ve yüksekliği 20 mm olan sinterlenmiş numunelere 500°C'de sıcak haddelendirme uygulanarak kalınlığı %87,5 oranında azaltılmıştır. Haddelenen numuneler 520°C de 2 saat çözeltiye alındıktan sonra su verme işlemi ile hızla soğutulmuştur. Daha sonra 20°C'de 72 saat (T4) ve 175°C'de 5 saat (T6) olmak üzere iki farklı yaşlandırma yöntemi uygulanmıştır. Presleme sıcaklığı arttıkça kompozit yoğunluğunun arttığı, partikül dağılımının iyileştiği görülmüştür. Presleme sıcaklığı 560°C'dan 580°C'e çıkarıldığında akma mukavemeti ve kopma uzamasının yükseldiği, ara yüzey bağının iyileştiği sonucuna varılmıştır.

Hışman Çelik ve Seçilmiş (2017), toz metalurjisi yöntemi ile üretilen farklı B_4C oranı ile takviye edilmiş Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarını araştırmışlardır. B_4C tozları ağırlıkça %4, %8, %12 ve %16 oranında takviye edilmiştir. Hazırlanan karışımlar 350 MPa altında soğuk preslenmiştir. Atmosferik ortamda 580°C'de 90 dk sinterlendikten sonra mikro sertlik ve aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri 5 N, 10 N ve 15 N yük altında olmak üzere farklı kayma mesafelerinde (250 m, 500 m, 750 m ve 1000 m) ve sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeyler optik mikroskop, SEM, EDS analizleri ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda B_4C takviye oranının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı ve aşınma davranışında iyileşmeler söz konusu olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısı takviye oranı arttığı, sinterleme işleminin atmosferik ortamda gerçekleşmesinden dolayı malzeme yüzeyinde oksitlenmelerin meydana geldiği görülmüştür.

Soorya Prakash vd. (2015), tarafında yapılan çalışmada kaya tozu takviye edilmiş Al6061 matrisli kompozitin yoğunluk, sertlik ve kuru kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Kaya tozu boyutları 10, 20 ve 30 μm ve kütlece ağırlık oranı %5, %10 ve %15'tir. Kaya tozu bir ön ısıtma fırınında 600°C'ye kadar ön ısıtılmış ve erimiş metale ilave edilmiştir. Karışım daha sonra yaklaşık 720°C'ye kadar ısıtılmış ve bir karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Fırın sıcaklığı, 10 dakika boyunca 720°C'de sabit tutulmuş ve ıslanabilirliği arttırmak için kütle oranı %1,5 olan magnezyum eklenmiştir. Daha sonra, erimiş metal kalıba dökülmüş ve kompozit elde edilmiştir. Aşınma testleri pin-on disk metoduyla 10N, 20N ve 30N yük altında, üç farklı kayma hızında (2, 3 ve 4 m/s) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kaya tozu takviyesinin, takviyesiz Al6061 alaşımına göre aşınma davranışını iyileştirdiği ancak takviye oranı arttıkça aşınma oranının da arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi takviye oranı arttıkça bağlanma mukavemetinin azalması olarak görülmektedir.

Zhang vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada homojen ve katmanlı B₄C/Al kompozitlerinin faz dönüşümü ve mekanik özellikleri incelenmiştir. B₄C partikülleri hacimce %5, %15, %25 oranlarında takviye edilmiştir. Malzemeler 680°C sıcaklıkta ve 30 MPa basınç altında vakum ortamında sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Çalışma sonunda homojen Al/B₄C kompozitler ile kıyaslandığında katmanlı Al/B₄C kompozitlerde optimum sertlik ve kırılma tokluğu değerlerinin görüldüğü sonucu varılmıştır.

Reddy ve Kaliveeran (2019) tarafından yapılan çalışmada farklı yükler altında Al 6061 ve Al 6082 alaşımlarının kuru kayma sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri pin-on disk kullanılarak yapılmıştır. Al 6061 için 10 N ve 15 N yük uygulanmış ve sürtünme katsayıları sırasıyla 0,5 ve 0,58 olarak tespit edilmiştir. Al 6082 için ise sırasıyla 0,6 ve 0,45 olarak kaydedilmiştir. Al alaşımlarında normal yükteki artıştan kaynaklı olarak aşınma hacminde de artış gözlenmiştir.

Ramesh ve Safiulla (2007) tarafından yapılan çalışmada sıcak ekstrüde edilmiş Al6061 bazlı kompozitlerin aşınma davranışı araştırılmıştır. Takviye olarak SiC, Al ve seryum oksit kullanılmıştır. Kompozitler, çok yönlü ve ekonomik olmasından dolayı vorteks yöntemiyle işlenmiştir. Döküm kompozitler 550°C sıcaklıkta sıcak ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Ekstrüzyon işlemi gören kompozitlerin döküm kompozitlere kıyasla incelenen tüm yük ve kayma hızları altında daha yüksek mikro sertlik ve daha düşük aşınma oranlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. İncelenen tüm sistemler arasında Al 6061-Seryum oksit, aynı test koşullarında en düşük aşınma oranına sahiptir.

Gladson vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada pirinç kabuğu külü takviye edilmiş Al6061 matrisli kompozitinin kuru kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Pirinç kabuğu külü ağırlıkça %2, 4, 6, 8 oranlarında takviye edilmiştir. Pirinç kabuğu külü dünya genelinde fazla miktarda bulunan bir tarımsal atıktır ve çalışma içerisinde ekonomik ve umut verici bir takviye malzemesi olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kompozit malzemeler 630°C'de karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiştir. Aşınma testi 10, 20, 30, 40 ve 50 N yük değerlerinde olmak üzere 2 m/s kayma hızı ve 2000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda pirinç kabuğu küllerinin takviyesinin başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve sertlik ve aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Takviye oranı arttıkça aşınma türünün adhesiv aşınmadan abrasiv aşınmaya dönüştüğü gözlemlenmiştir.

Dinaharan vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada sürtünme karıştırma yöntemi kullanılarak sentezlenen ve takviye malzemesi olarak hacimce %0,6, %12 ve %18 oranında uçucu kül kullanılan Al 6061 matrisli kompozitin mikroyapı ve aşınma davranışı incelenmiştir. Uçucu kül, termik santrallerin toprak kirliliğine neden olan muazzam miktarlarda bulunan kömür yanmasının atık ürünüdür. Hazırlanan kompozitler optik mikroskop, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve elektron geri saçılmış diyagramı (EBSD) kullanılarak karakterize edilmiştir. Aşınma davranışı pin-on disk kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda uçucu kül parçacıklarının homojen olarak dağıldığı ve uçucu kül parçacıklarının dahil edilmesi ile alüminyum matrisli kompozitin mikro sertliğini ve aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Akbar vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada T6 ısıtıl işleminin, Al6061/Al₂O₃ kompozitlerinin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkileri incelenmiştir. İlk olarak Al₂O₃ partikülleri ıslatılabilirlik özelliğini arttırmak amacıyla akımsız kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Al6061 – Al₂O₃ kompozitin karıştırma döküm işlemleri 500 rpm ve 700-720°C'de gerçekleştirilmiştir. T6 ısıtıl işleminde çözeltiye alma işlemi 6 saat boyunca 540°C'de gerçekleştirilmiştir. Daha sonra su, yağ ve tuz çözeltisi (%10) olmak üzere farklı ortamlarda soğutma işlemi uygulanmıştır. Ardından 4 saat boyunca 200°C'de yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda akımsız kaplama işleminin ıslatılabilirlik özelliğini arttırdığı ve partikül dağılımının daha düzgün olmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Soğutma hızının sertlik özelliklerini etkilediği, yüksek soğutma hızının sertliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca soğutmada kullanılan su ve yağa göre tuzlu suda soğutulan numunelerde daha yüksek sertlik elde edilmiştir.

Gangadharappa vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada boksitten alümina üretimi sırasında ortaya çıkan atık kırmızı çamur takviyesinin sertlik, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 30-40nm boyutlu kırmızı çamur parçacıkları, bir fırında 400°C'ye ön ısıtılmış ve hacimce %5, %10, %15 ve %20 oranında Al6061 alaşımına takviye edilerek karıştırma döküm yöntemiyle Al6061 matrisli kompozit malzeme üretilmiştir. Sonrasında mekanik özellikleri geliştirmek için T6 ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Aşınma davranışları pin-on disk mekanizması kullanılarak 0,5 kg, 1 kg ve 1,5 kg yük altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kırmızı çamur içeriği arttığında sertliğin arttığı ve aşınma oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.

Karakoç vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada toz metalurjisi ile üretilen Al6061 / SiC / B₄C hibrid kompozitlerin aşınma ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Matris malzemesi Al6061 ve takviye malzemeleri; ağırlıkça %3 B₄C + %9 SiC, %6 B₄C + %6 SiC, %9 B₄C + %3 SiC, %12 B₄C ve %12 SiC olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlar 300 MPa basınç altında soğuk preslemeye tabi tutulmuş ve sonrasında 1 saat boyunca 550°C'de sinterlenmiştir. Ardından aynı sıcaklıkta ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Son olarak kompozit malzemelere T6 ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Kompozit malzemeler 530 ° C'de 1 saat çözündürmeye tabi tutulmuş ve su içinde soğutulmuştur. Soğutulan numuneler 10 ° C/dakika ısıtma hızında 175 ° C'de ısıtılarak 8 saat yapay olarak yaşlandırılmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek sertlik %12 B₄C takviyeli kompozitlerde ölçülmüştür. En düşük sertlik takviyesiz Al6061 alaşımında elde edilmiştir. En yüksek aşınma direnci, B₄C'nin sertliği ve matris ve SiC'nin iyi yapışma özellikleri nedeniyle %9 B₄C +%3 SiC numuneleri için elde edilmiştir.

Veeres Kumar vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada Al 6061/ SiC kompozitlerinin mekanik ve kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Kompozit malzemeler 400 rpm'lik bir hız ve 710°C'lik bir dökme sıcaklığı altında karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiştir. Takviye edilen SiC oranı ağırlıkça %2 ile %6 arasında değişmektedir. Kuru kayma aşınma deneyleri, sabit kayma hızında ($V = 2,62 \text{ ms}^{-1}$) bilgisayar destekli bir pin-on disk aşınma test makinesi kullanılarak 10 ila 60 N arasında değişken yükler altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda takviye oranı arttıkça sertlik artmıştır. %6 oranında SiC içeren kompozitin gerilme mukavemeti özelliği diğer kompozitlerden daha fazladır. Uygulanan yükteki artış aşınmada hacim kaybını arttırmıştır. Takviye oranının artmasıyla aşınma dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir.

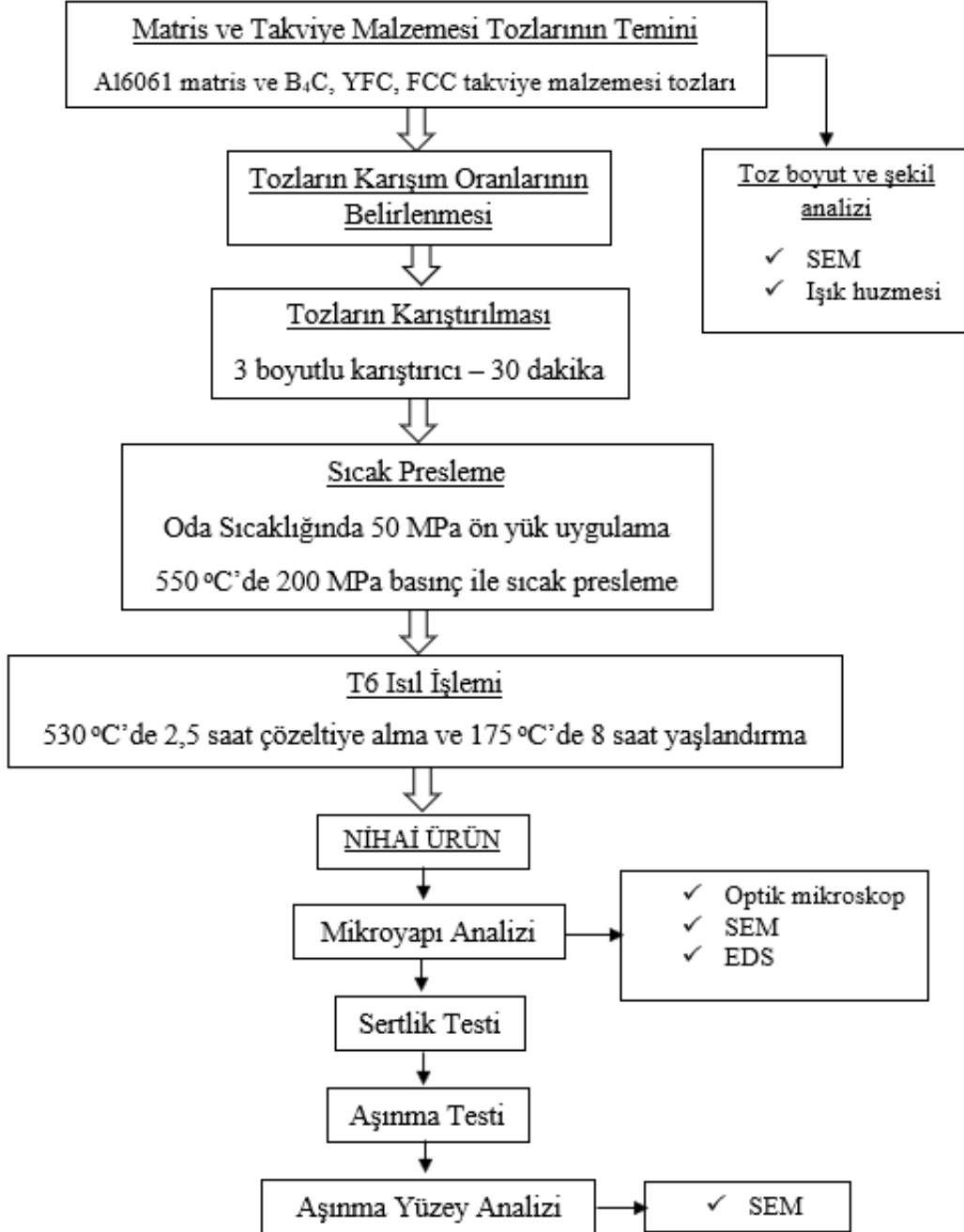
Natrayan ve Kumar (2019) tarafından yapılan çalışmada Al6061 / Al₂O₃ / SiC kompozit sıkıştırma döküm yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. Takviye olarak ağırlıkça %5 Al₂O₃ ve ağırlıkça %5 SiC seçilmiştir. Ayrıca ıslatılabilirliği arttırmak ve takviyelerin matriste eşit olarak dağılması sağlamak için ağırlıkça %1 magnezyum parçacıkları eklenmiştir. Takviye partikülleri mevcut nemi gidermek için 250°C'de ön ısıtılıp daha sonra ilave edilmiştir. 100 MPa sıkıştırma basıncı, 15 s dökme süresi ve 150°C kalıp sıcaklığı parametreleri altında tutulmuştur. Erimiş alaşım 250 rpm'de 10 dakika karıştırılmıştır. Çalışmada kuru kayma aşınma davranışını 10, 20, 30 N yük, 1, 1,5 ve 2 m / s kayma hızı ve 800, 1200, 1600 m kayma mesafesi parametreleri altında incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşınma oranı ve sürtünme katsayısının uygulanan yük ile doğru orantılı; kayma hızı ve kayma mesafesi ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.



BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması kapsamında Al 6061 esaslı ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu ve B₄C parçacık takviyelendirilmiş kompozit malzemeler sıcak presleme tekniği ile üretilmiştir. Bu tez çalışmasında yapılan bütün işlemler Şekil 6.1’de şematik olarak açıklanmıştır.



Şekil 6.1: Çalışma kapsamında uygulanan işlemlerin akış şeması.

6.1 Materyal

Metal matrisli kompozit malzemelerde ana malzeme ile takviye elemanı kullanılmaktadır. Bu çalışmada ana malzeme olarak Al 6061 metal tozları (D50: 75 µm), takviye elemanı olarak ise Ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu ve B₄C seramik tozu (D50: 15 µm) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tozların kimyasal kompozisyonları Tablo 6.1, 6.2 ve 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.1: Al 6061 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Bileşen	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Mn
Değer	%63,10	%0,49	%0.39	%0.18	%0.21	%0.12	679 PPM	131 PPM	440 PPM

Tablo 6.2: B₄C tozlarının kimyasal kompozisyonu.

Bileşen	Bor	Karbon	Demir	Toplam B+C
%	77,5	21,5	0,2	98

Tablo 6.3: Kullanılan YFC ve FCC tozlarının kimyasal kompozisyonu.

Bileşen	Kompozisyon (%)	
	Yüksek Fırın Cürufu	Ferrokrom Cürufu
SiO ₂	34,8	32,59
Al ₂ O ₃	9,401	20,74
Fe ₂ O ₃	2,028	2,597
CaO	38,79	1,851
MgO	4,398	31,92
SO ₃	1,39	0,446
Kızdırma kaybı	-	0,94
Na ₂ O	0,221	0,079
K ₂ O	1,51	0,273
Cr ₂ O ₃	0,009	7,891
MnO	4,371	0,152
P ₂ O ₅	0,02	0,012
TiO ₂	1,58	0,381

Tablo 6.4: Kullanılan tozların fiziksel özellikleri.

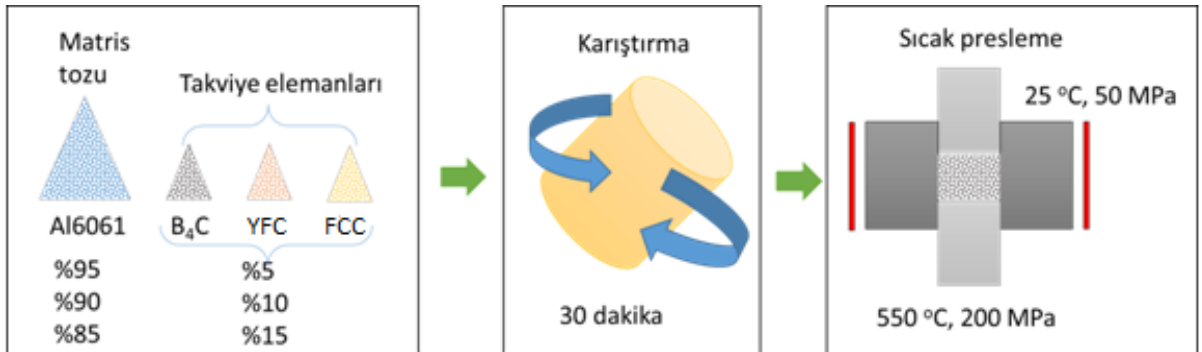
Özellikler	Al 6061	B ₄ C	Yüksek Fırın Cürufu	Ferrokrom Cürufu
Parçacık boyutu D50 (μm)	75	15	15	15
Parçacık şekli	Küresel	Köşeli	Karmaşık, Keskin köşeli, küresel	Karmaşık
Yoğunluk [g/cm ³]	2,70	2,52	3,91	3,25

6.2 Tozların Karakterizasyonu

Tozların tane şekillerinin ve safsızlıklarının belirlenmesi için Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde yer alan JEOL JSM 6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) analizleri yapılmıştır. Tozları SEM cihazında görüntüleyebilmek için metalografik olarak epoksi reçine yüzeyine soğuk gömme yapılmıştır. Soğuk gömme yapılan tozların şekil tayini için SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca tozların safsızlıklarını belirleyebilmek için tozların EDS analizleri de yapılmıştır. Tozların ortalama tane boyut dağılımı lazerle boyut ölçme cihazında belirlenmiştir. Lazerle boyut ölçme ünitesi Fraunhofer teorisine göre çalışarak tozların boyutlarını ölçmektedir.

6.3 Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit malzemelerin üretimi Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin üretim basamakları Şekil 6.2’de verilmiştir.



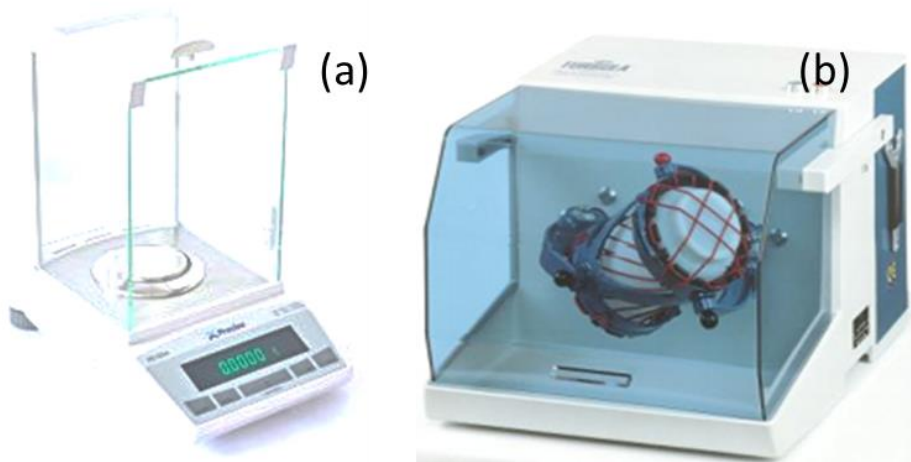
Şekil 6.2: Kompozit malzemelerin üretim prosesi.

6.3.1 Tozların Karıştırılması

İlk olarak ağırlıkça karışım oranları belirlenen tozlar (Al 6061 tozları ile ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 oranlarında Ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu ve B₄C tozları) hassas ölçüm yapan (0,1 mg hassasiyetindeki) mikro terazide tartılmıştır (Tablo 6.5). Tartılarak hazırlanan tozlar özel karıştırma ünitesine konularak 30 dakika boyunca 3 boyutlu harmanlama yapılmıştır. Harmanlamada T2 F tipi üç boyutlu Turbula marka karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 6.3).

Tablo 6.5: Çalışmada kullanılan tozların karışım oranları.

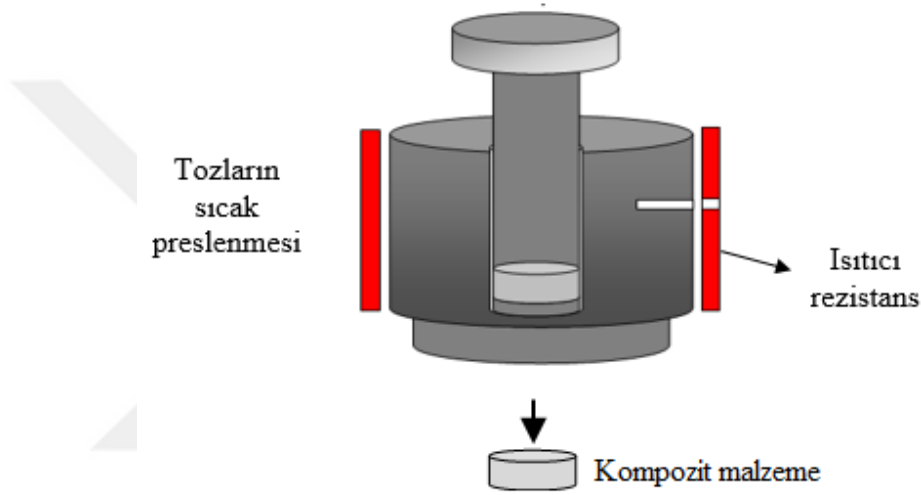
Malzeme No	Ağırlıkça % karışım oranları			
	Al 6061	B ₄ C	YFC	FCC
N1	100	--	--	--
N2	95	5	--	--
N3	90	10	--	--
N4	85	15	--	--
N5	95	--	5	--
N6	90	--	10	--
N7	85	--	15	--
N8	95	--	--	5
N9	90	--	--	10
N10	85	--	--	15



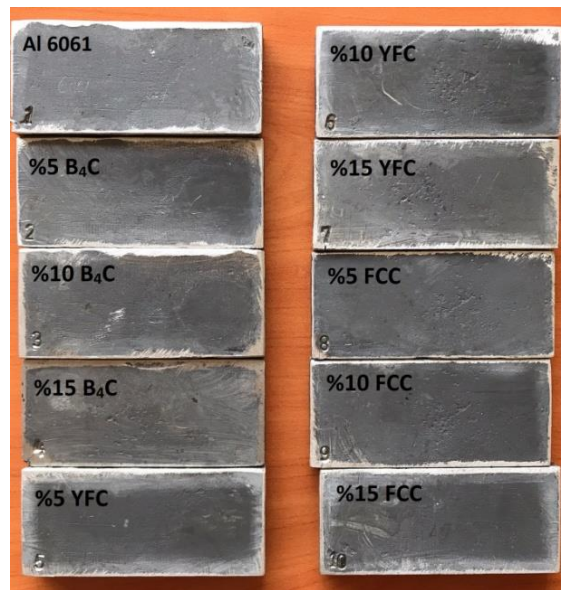
Şekil 6.3: (a) Hassas mikroterazi (b) Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcısı.

6.3.2 Sıcak Presleme İşlemi

Karışım tozlar yüksek tonajlı hidrolik pres yardımı ile preslenmiştir. Karışım tozlar tartıldıktan sonra özel olarak tasarlanmış sıcak presleme kalıbının içerisine konularak ilk olarak oda sıcaklığında 50 MPa yük altında soğuk olarak preslenmiştir. Soğuk olarak preslenen tozlar kalıp içerisinden çıkarılmadan 550°C ye kadar getirilmiş ve 30 dakika beklendikten sonra 200 MPa basınç altında sıcak presleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.4’de tozların sıcak preslenme işlemi şematik olarak verilmiştir. Sıcak preslenen toz metal blok numune oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra kalıp içerisinden çıkartılarak 90x40x12 mm ölçülerinde kompozit malzemeler üretilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.4: Tozların sıcak preslenmesi.



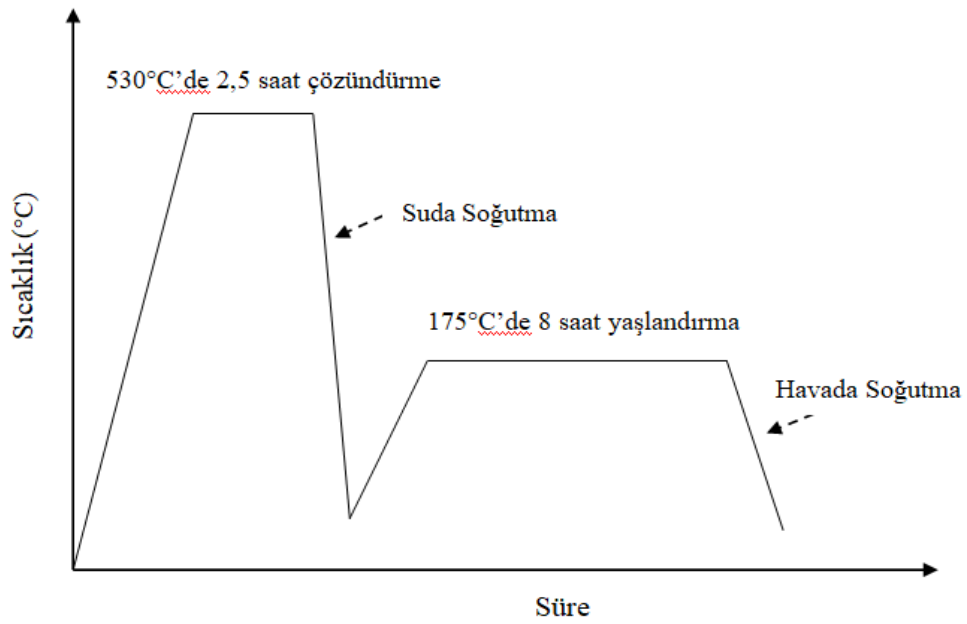
Şekil 6.5: Sıcak pres işlemi ile üretilen kompozit malzemeler.

6.3.3 Isıl İşlem

Kompozit malzemelerin üretim sonrası ısıl işlemi Döksan Isıl İşlem A.Ş. firmasında, alüminyum ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.6). Elde edilen numunelere fırın içerisinde 530°C sıcaklıkta 2,5 saat çözündürme işlemi uygulanmış ve hemen ardından su verilerek hızlı soğutma yapılmıştır. Su verilerek soğutulan numuneler 175°C sıcaklıkta 8 saat suni yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 6.7).



Şekil 6.6: Alüminyum ısıl işlem fırını.

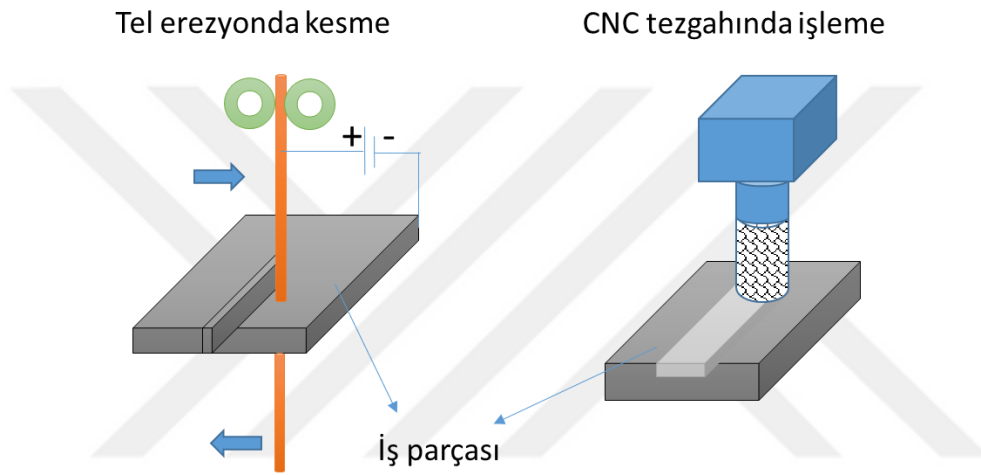


Şekil 6.7: Kompozit malzemelere uygulanan ısıl işlem prosesi.

6.4 Malzeme Karakterizasyonu

6.4.1 Test Numunelerin Hazırlanması

Üretilen kompozit malzemelerden yoğunluk, miroyapı, sertlik ve aşınma test numunesi elde edebilmek için önce tel erozyonda kesme işlemi yapılmış ardından CNC tezgahlarında işleme yapılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında Mitsubishi Marka CNC Tel Erozyon Makinesi (Poyraz CNC firması) kullanılmıştır. Tel erozyon ile kesilen mekanik test numuneleri standart ölçülerine getirebilmek için CNC freze tezgâhında yüzeyleri frezelenerek mekanik testlere hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8: Mikroyapı ve aşınma test numunelerinin hazırlanması.

6.4.2 Yoğunluk Ölçümü

Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre 0,1 mg hassasiyetindeki Sartorius marka terazi kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak Eşitlik 6.1 kullanılarak teorik yoğunluk bulunmuştur.

$$\%p_{karışım} = [(\%W)_1 \times p_1] + [(\%W)_2 \times p_2] + \dots + [(\%W)_n \times p_n] \quad (6.1)$$

Burada;

$p_{karışım}$ = Toz karışımın teorik yoğunluğu

$(\%W)_n$ = Her bir bileşenin karışım içindeki ağırlıkça yüzdesi

p_n = Her bir bileşenin yoğunluğudur.

Deneyisel yoğunluk, başka bir deyişle gerçek yoğunluk Arşimet prensibine dayanan kit yardımı ile ölçülen yoğunluk değeridir. İlk olarak numunenin havadaki ve sudaki ağırlık değerleri ölçülmüştür. Daha sonra havadaki ağırlık değeri sudaki ağırlık değerine bölünmüş ve katalogdan alınan katsayı (Rho) ile çarpılarak numunenin yoğunluğu Eşitlik 6.2 ile bulunmuştur.

$$p_{deneysel} = \frac{W}{G} \times Rho \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (6.2)$$

Burada;

W = numunenin havadaki ağırlığı

G = numunenin sudaki ağırlığı

Toz karışımın % yoğunluk değeri ise Eşitlik 6.3'te verilen oranlama ile hesaplanmıştır.

$$\%p_{karışım} = \frac{\text{Deneyisel yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk}} \times 100 \quad (6.3)$$

Bu değerler doğrultusunda % gözeneklilik değeri ise Eşitlik 6.4 ile hesaplanmıştır.

$$\%gözeneklilik = 100 - (\%p_{karışım}) \quad (6.4)$$

6.4.3 Mikroyapı analizleri

Üretilen kompozit levhalar mikroyapısal analizler için tel erozyon tezgâhında kesilmiştir. Kesilen numuneler sulu olarak farklı zımparalarda (400, 600, 800, 1000 ve 1200) aşındırılmıştır. Yüzeyleri zımpara ile aşındırılan numuneler elmas süspansiyonlar yardımı ile 6, 3 ve 1 mikronluk keçeler yardımı ile parlatılmıştır. Mikroyapıda tane ve tane sınırlarını görebilmek için Keller çözeltisi ile dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskopta (Leica DM2700M) yapılmıştır (Şekil 6.9-a). Matris ve takviye malzemesi arasındaki uyumu görebilmek için ayrıca SEM (Taramalı elektron Mikroskobu JEOL JSM 6060LV) analizi yapılmıştır (Şekil 6.9-b).



Şekil 6.9: (a) Leica DM2700M optik mikroskop, (b) JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu.

6.4.4 Sertlik Testi

TM yöntemi ile üretilmiş ve T6 yaşlandırma işlemi uygulanan kompozit malzemelerin sertlik değerleri Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir. Emcotest DuraScan-70 G5 marka sertlik ölçme cihazında sertlikler alınmıştır (2,5/31,25) (Şekil 6.10).



Şekil 6.10: Emcotest DuraScan-70 G5 marka sertlik ölçüm cihazı.

6.4.5 Kuru Kayma Aşınma Testi

Kuru-kayma aşınma testleri Ball-on disk tribometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.11). Numuneler deney cihazının döner tablasına yerleştirilerek sabitlenmiştir. Testler oda sıcaklığında çelik bilya kullanılarak uygulanmıştır. Aşınma testleri 0,03 m/sn kayma hızında 1, 3, 5 ve 7 N yükler altında gerçekleştirilmiştir. Numunelere toplamda 100 m'lik yollar aldırılmıştır.



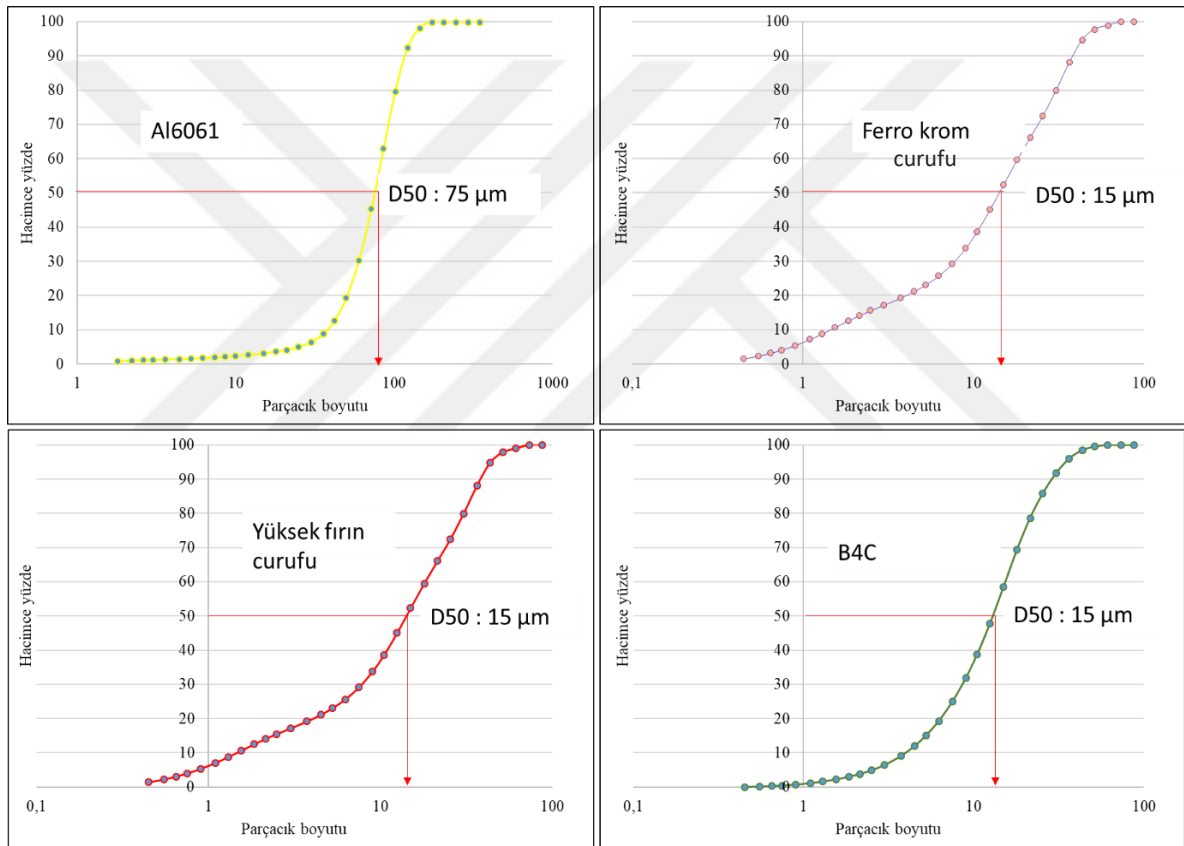
Şekil 6.11: Ball-on disk tribometre cihazı.

BÖLÜM 7

BULGULAR VE TARTIŞMA

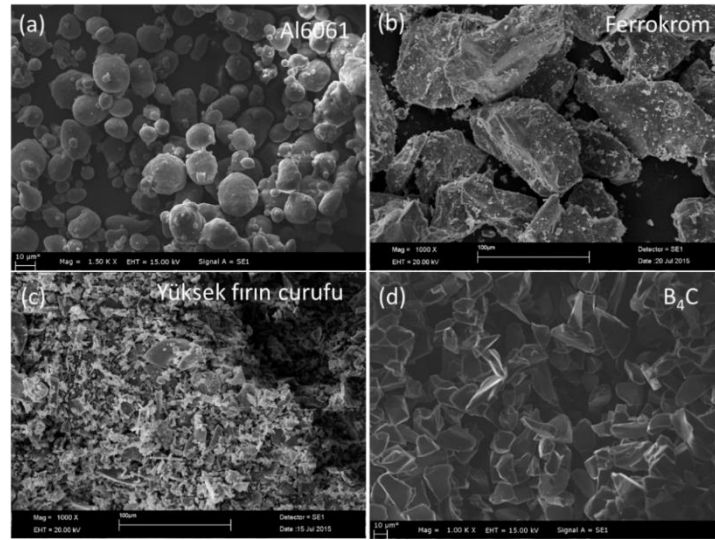
7.1 Kullanılan Tozların Karakterizasyonu

Şekil 7.1’de verilen tozların parçacık boyut dağılımı analiz sonuçları incelendiğinde Al 6061 alaşım tozlarının D50 ortalama toz tane boyutu 75 mikron, Ferrokrom cürufu, yüksek fırın cürufu ve B₄C tozlarının ise D50 ortalama parçacık boyutlarının 15 mikron olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.1: Çalışmada kullanılan toz malzemelerin parçacık boyut grafiği.

Şekil 7.2’de farklı büyüklüklerdeki tozlar üzerinden alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Yüksek fırın cürufu tozlarının prizmatik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.2-c). Ferrokrom cürufu tozlarının küresel forma daha yakın olduğu (Şekil 7.2-b) ve yüksek fırın cüruf tozları ile kıyaslandığında daha az keskin köşelere sahip bulunduğu görülmektedir.



Şekil 7.2: Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri.

7.2 Yoğunluk Değişimi ve Gözeneklilik

Sıcak presleme sonrası T6 yaşlandırma işlemi yapılan numunelerin deneysel yoğunlukları ölçülmüştür (Tablo 7.1). Numunelerin deneysel yoğunlukları ve teorik yoğunlukları arasındaki fark kullanılarak % yoğunluk ve % gözeneklilik oranları hesaplanmıştır.

Tablo 7.1: Yoğunluk ölçüm sonuçları

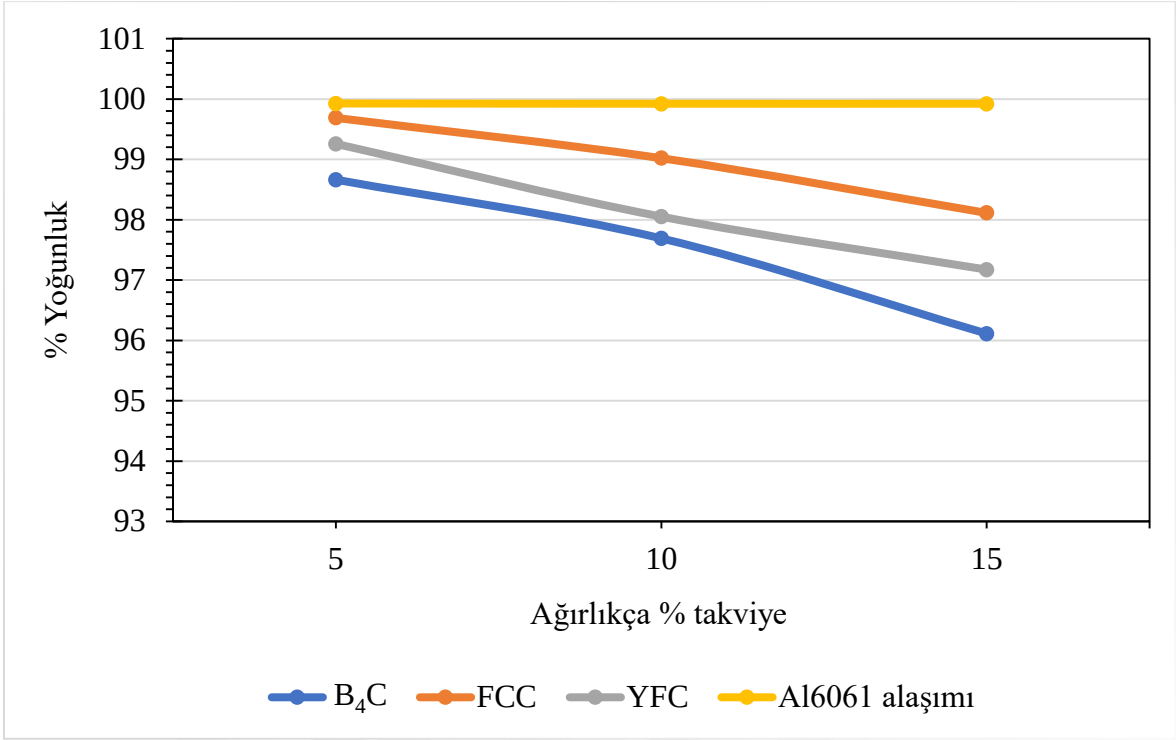
Malzeme	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel yoğunluk (g/cm ³)	% Yoğunluk
Al6061	2,7	2,698	99,9
%5 B ₄ C + Al6061	2,691	2,655	98,7
%10 B ₄ C + Al6061	2,682	2,62	97,7
%15 B ₄ C + Al6061	2,673	2,569	96,1
%5 YFC + Al 6061	2,7605	2,74	99,3
%10 YFC + Al 6061	2,821	2,766	98,1
%15 YFC + Al 6061	2,8815	2,8	97,2
%5 FCC + Al 6061	2,7275	2,719	99,7
%10 FCC + Al 6061	2,755	2,728	99,0
%15 FCC + Al 6061	2,7825	2,73	98,1

Toz metal kompozit malzemelerin üretiminde takviye oranının artmasıyla ortaya çıkan sıkıştırılabilirlik problemlerinden dolayı yoğunluklarda düşüş yaşanabilmektedir (Kondo vd., 2014). Tozların sıcak preslenmesi ile beraber bu durum en aza indirilebilmektedir (Kim, 2014; Jin vd., 2011). Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığında, tozların sıcak olarak preslenmesi ile teorik yoğunluğa yakın yüksek yoğunluklu parçalar üretilmiştir. Farklı çalışmada da teorik yoğunlukların deneysel yoğunluklardan bir miktar düşük olduğu görülmüştür (Karabulut vd, 2013; Karakoç vd., 2018).

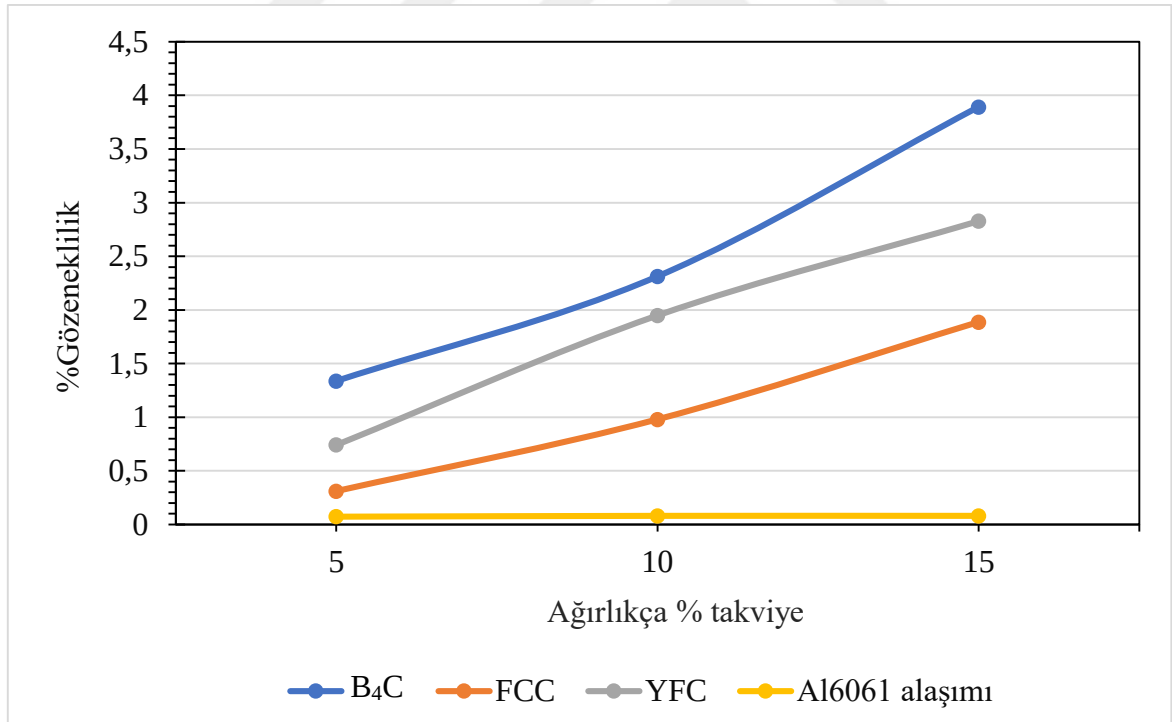
Şekil 7.3'te yer alan % yoğunluk grafiği incelendiğinde en düşük yoğunluk %15 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde görülmüştür. %15 B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerde % yoğunluk 96,1 olarak hesaplanmıştır. En yüksek % yoğunluk değeri ise Al6061 malzemesinde %99,9 olarak bulunmuştur. % yoğunluk değerleri her üç kompozit malzemede de takviye elemanının artması ile beraber azalmıştır. Bunun sebebi takviye oranının artmasıyla ortaya çıkan sıkıştırılabilirlik problemleri ve gözeneklilik miktarının artmış olmasıdır.

% yoğunluk değerinin tam tersi olan % gözeneklilik oranı 100 değerinden % yoğunluk değerinin çıkarılması ile elde edilmektedir. Yapılan çalışmada takviye elemanlarının artması ile beraber % yoğunluk değeri azalmış ve % gözeneklilik oranının arttığı görülmüştür. Gözeneklilik miktarı en yüksek olan malzeme %15 B₄C parçacık ilaveli kompozit malzemedir. Bu değer %3,8 olarak bulunmuştur. En düşük gözeneklilik ise takviyesiz olan Al6061 malzemesinde %0,07 çıkmıştır (Şekil 7.4).

Artan takviye oranı ile kompozit malzemenin yapısında bulunan yüksek sertliğe ve buna bağlı olarak düşük sıkıştırılabilirliğe sahip takviye partikül miktarının artmasıyla birlikte gözenekliliğin artması, üretilen kompozitin genel sıkıştırılabilirliğinin azalmasından ileri gelmektedir. Sonuç olarak, artan takviye oranı ile gözenekliliğin arttığı, dolayısıyla relatif yoğunluğun azaldığı yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. Şanlı ve Kalaycıoğlu tarafından yapılan çalışmalar da bu durumu desteklemektedir (Şanlı, 2019; Kalaycıoğlu, 2010).



Şekil 7.3: Üretilen malzemelerin % yoğunluk değişimleri.

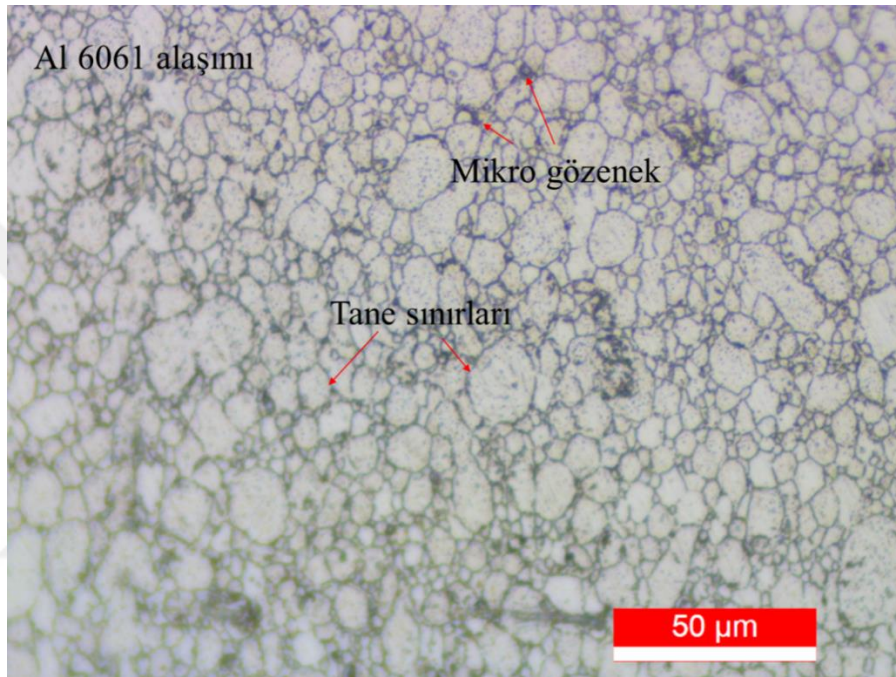


Şekil 7.4: Üretilen malzemelerin % gözeneklilik değişimleri.

7.3 Mikroyapı Analizleri

7.3.1 Optik Mikroskop Analizleri

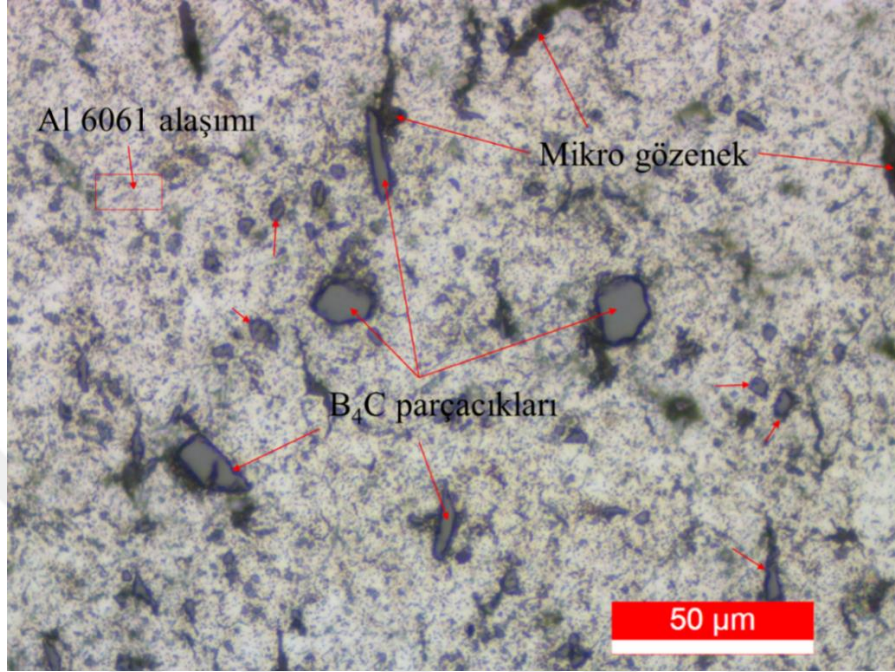
Üretilen kompozit malzemelerin farklı büyütme oranlarında optik mikroskopta görüntüleri alınmıştır. Şekil 7.5'te yer alan Al6061 alaşımı incelediğinde yok denecek kadar az miktarda mikro gözenek olduğu görülmektedir. Ayrıca dağlama sonrası görüntü alındığından tane ve tane sınırları da açıkça görülmektedir. Al6061 alaşımında eş eksenel taneler oluşmuştur.



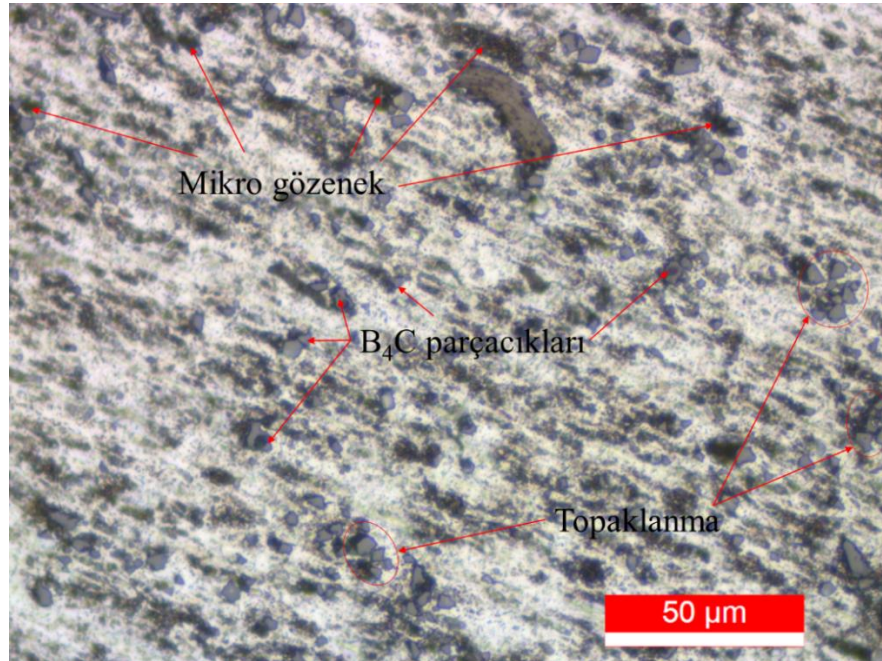
Şekil 7.5: Sıcak pres ve ısıtma işlem sonrası Al 6061 mikroyapı görüntüsü.

Şekil 7.6, 7.7 ve 7.8'de sırasıyla %5, %10 ve %15 B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapıları gösterilmiştir. %5 B₄C takviyeli kompozit malzemeye bakıldığında parçacıkların matris fazı içerisinde homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 7.6). Ayrıca B₄C parçacık ilavesinin az olmasından dolayı topaklaşmanın oluşmadığı görülmektedir. %10 B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemeler incelendiğinde ise mikro gözeneklerin ve topaklanmaların olduğu görülmüştür (Şekil 7.7). Takviye malzemesi boyutu matristen küçük olduğunda matris ve takviye arasında yeterli yüzey bağı sağlanamayabilir. Takviye tane boyutu ile matris tane boyutu arasında artan boyut farkının, takviye tozların matris tanelerinin arasında birikmesi ile sonuçlanarak burada topaklanmalara ve porozitenin artmasına sebep olmaktadır. (Çolak ve Turhan, 2016). B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerde takviye miktarının artması ile beraber

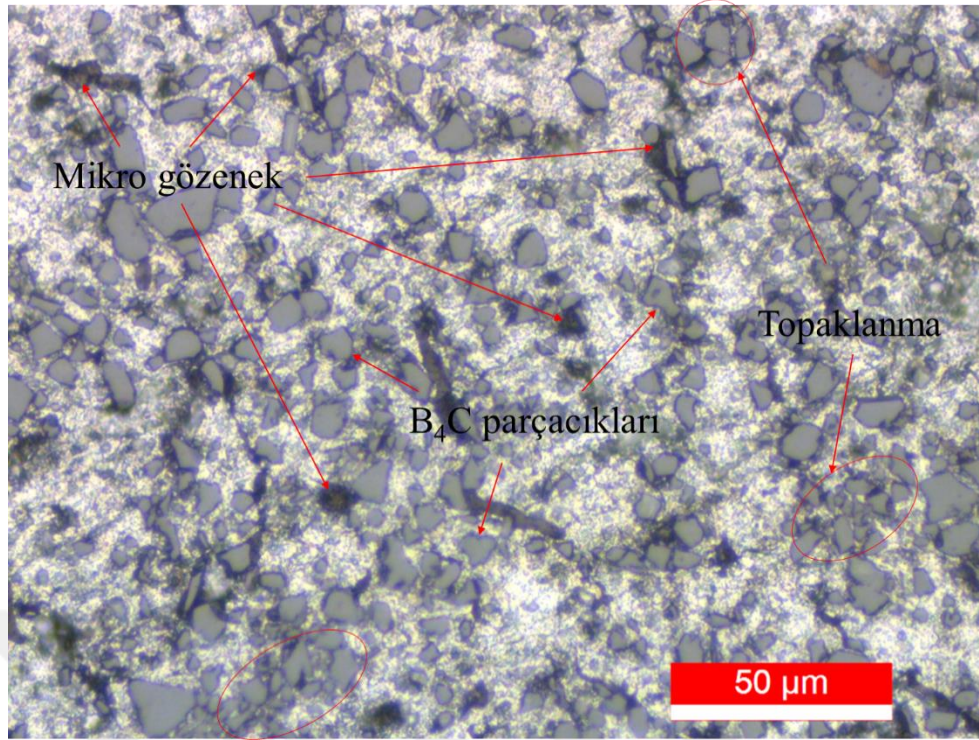
topaklanmaların arttığı görülmektedir (Karabulut vd., 2016). Benzer bir şekilde bu çalışmada da %15 B₄C parçacık ilaveli kompozit malzemede de topaklanmaların arttığı görülmüştür. Ayrıca mikro gözenekler de artmıştır (Şekil 7.8).



Şekil 7.6: Sıcak presleme ve ısıtıl işlem sonrası %5 B₄C takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

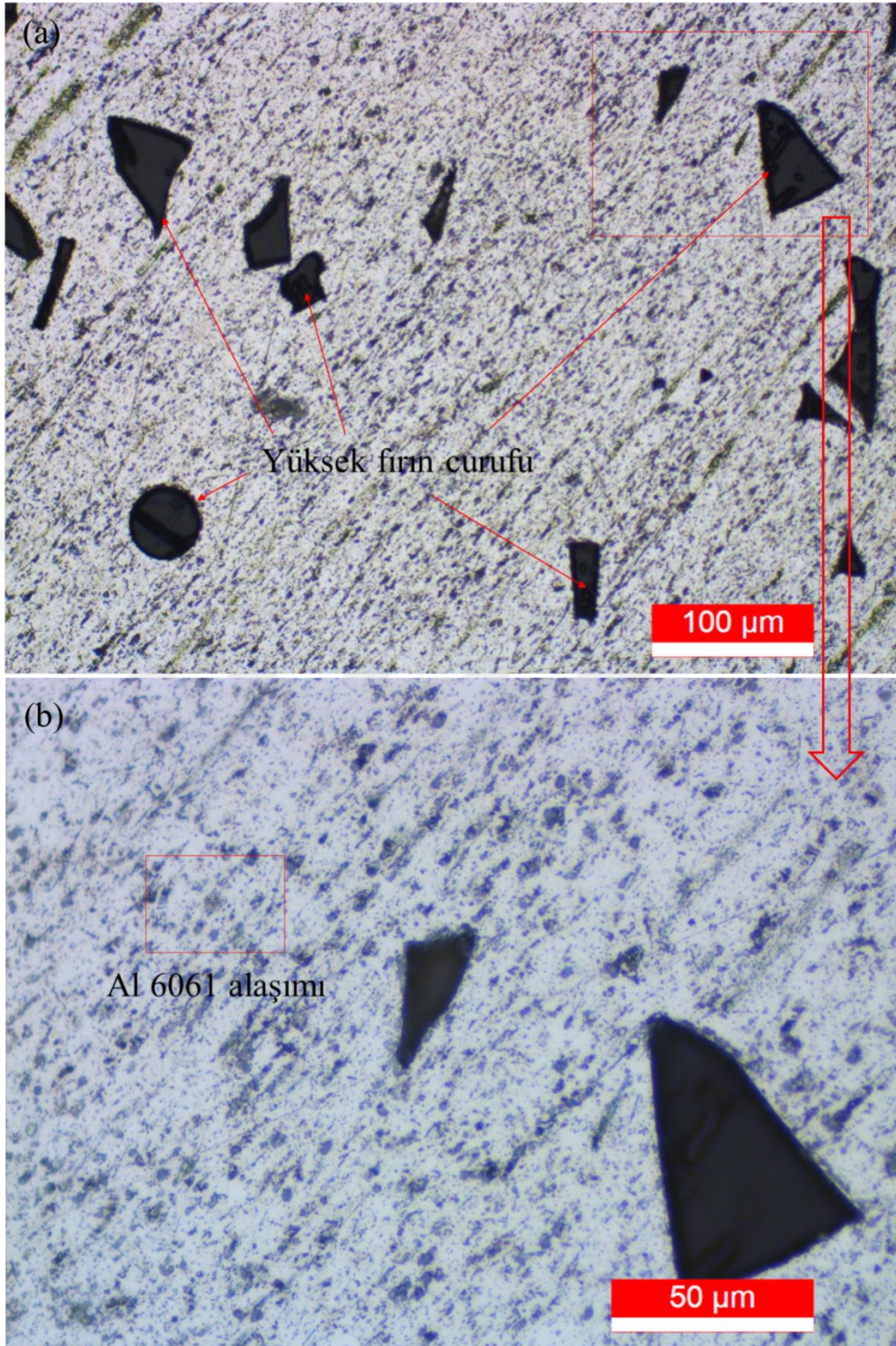


Şekil 7.7: Sıcak presleme ve ısıtıl işlem sonrası %10 B₄C takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

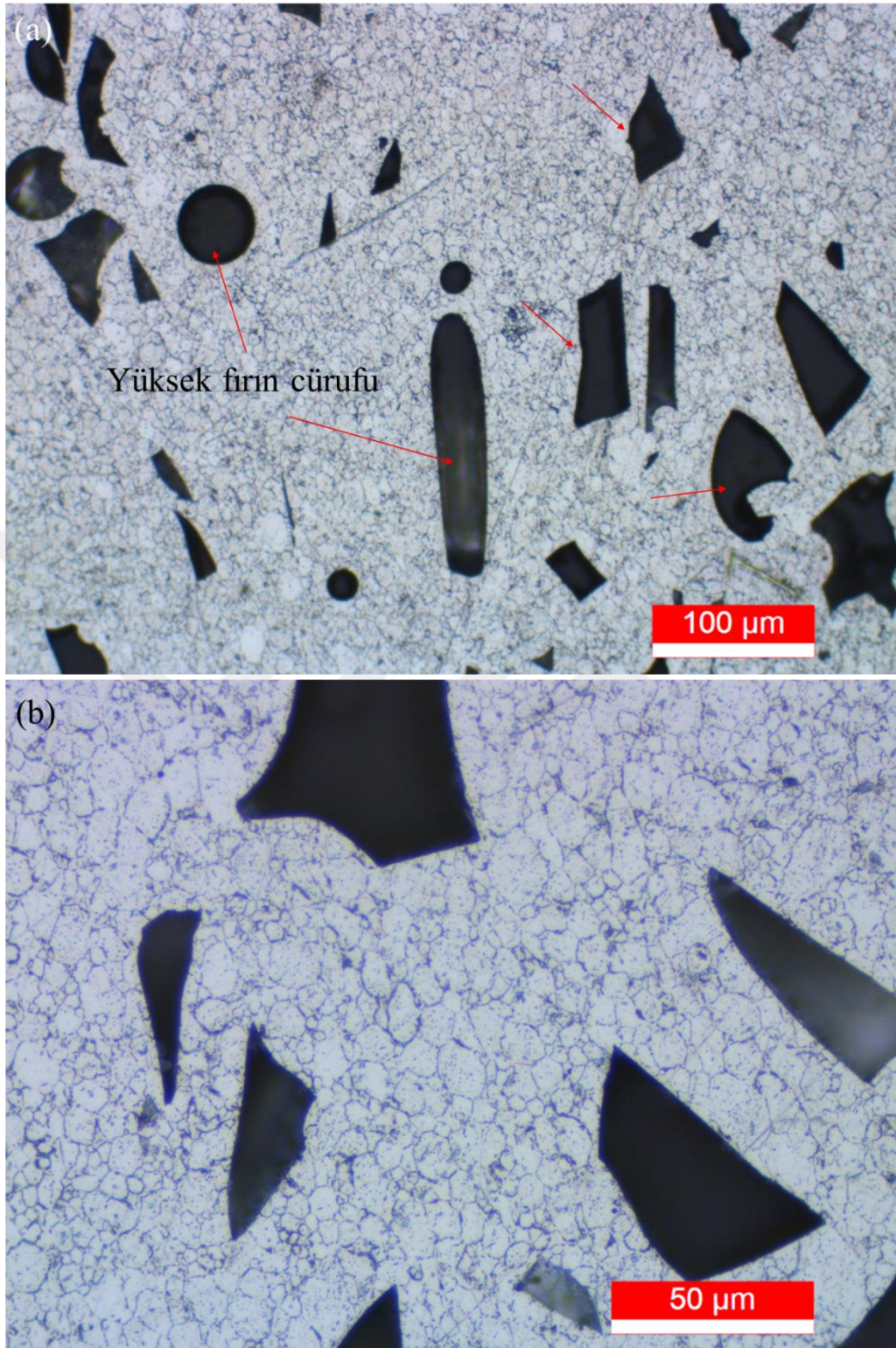


Şekil 7.8: Sıcak presleme ve ısıtma işlemi sonrası %15 B₄C takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

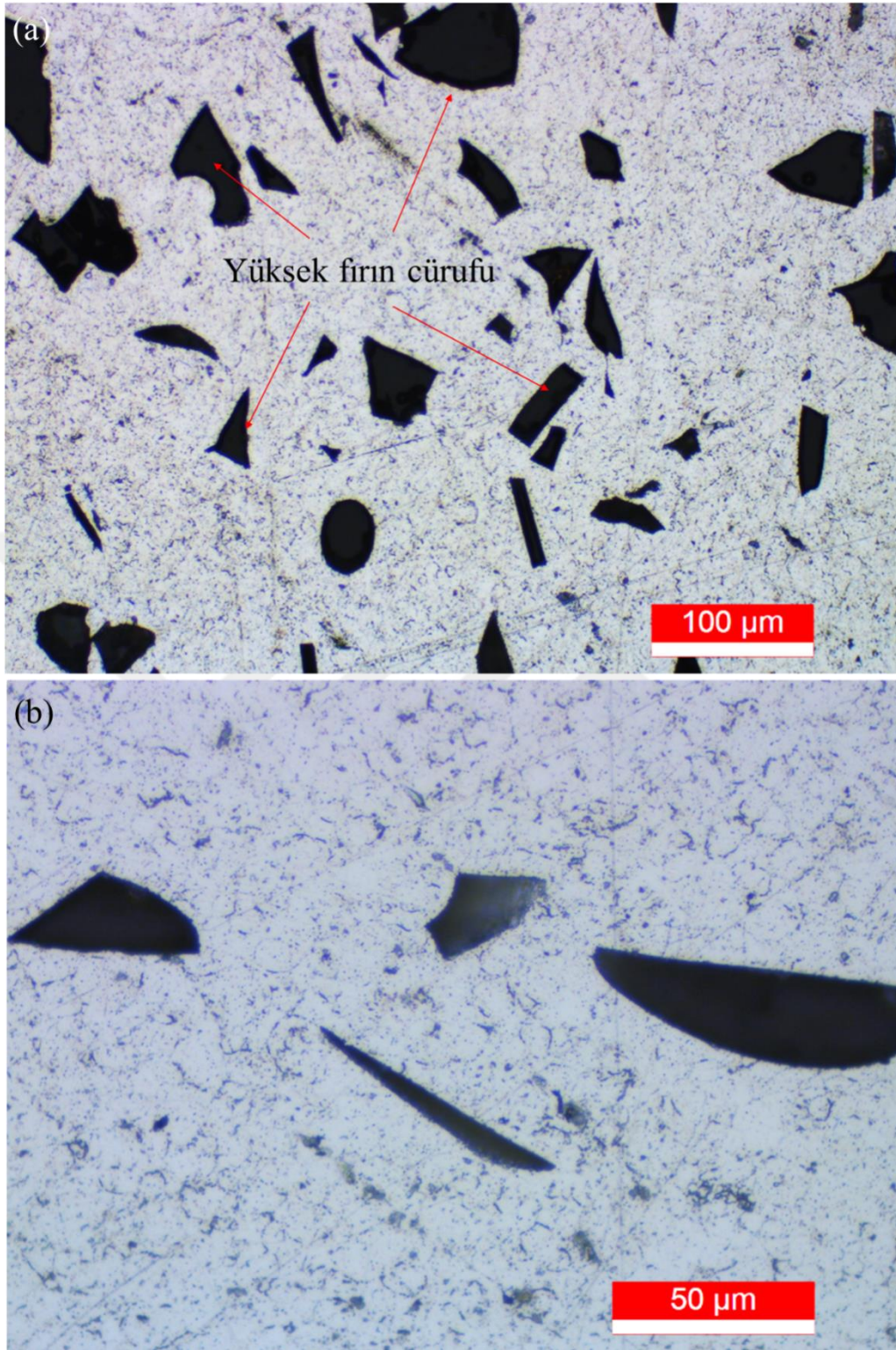
Şekil 7.9, 7.10 ve 7.11’de sırasıyla %5, %10 ve %15 oranlarında YFC parçacık ilaveli kompozit malzemelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.9’da yer alan %5 YFC ilaveli kompozit malzemede küresel, prizmatik ve iğnemsî şekillere sahip YFC’lerin homojen dağıldığı görülmektedir. %10 ve %15 YFC takviyeli kompozit malzemelerde de benzer şekilde sahip parçalar olmakla beraber sayısında artış olmaktadır (Şekil 7.10 ve 7.11). Mikroyapıların hepsi incelendiğinde YFC takviyeli kompozitler B₄C takviyeli kompozitlere göre daha iyi yoğunluk değerine sahiptir ve buna istinaden mikro gözeneklilik değeri de çok daha azdır.



Şekil 7.9: Sıcak presleme ve ısıt işlemler sonrasında %5 YFC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

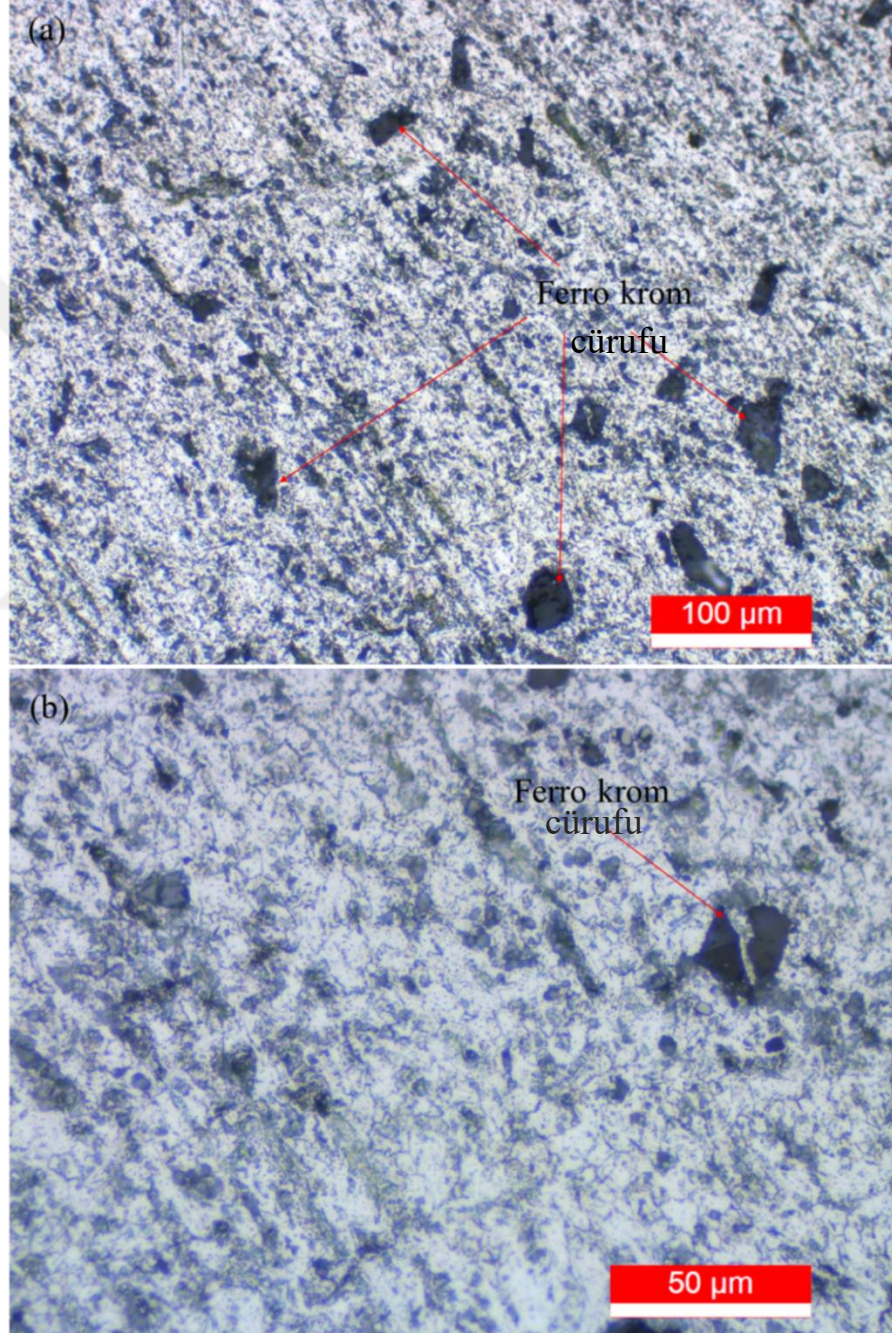


Şekil 7.10: Sıcak presleme ve ısıt işlem sonrası %10 YFC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

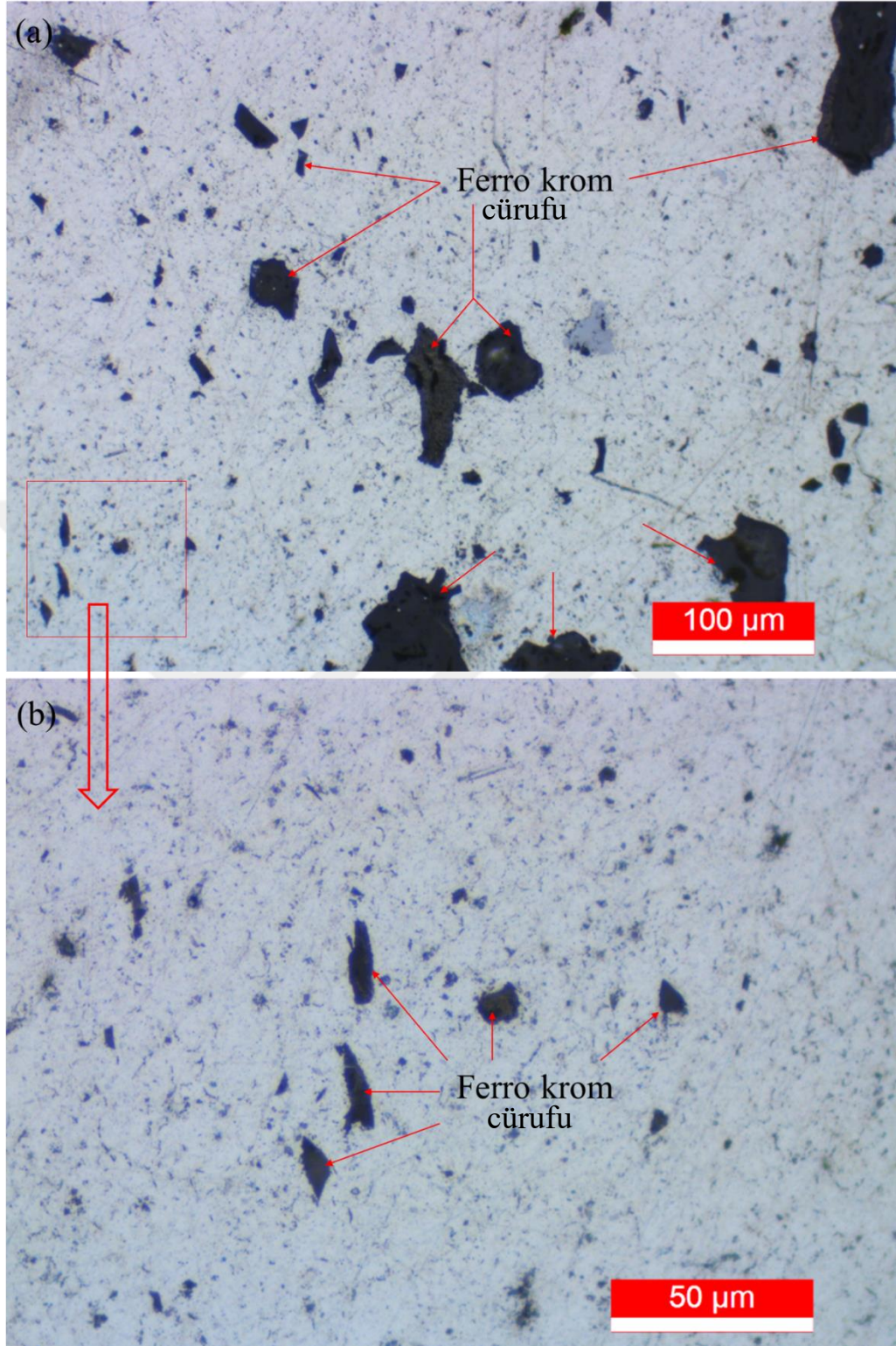


Şekil 7.11: Sıcak presleme ve ısıt işlem sonrası %15 YFC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

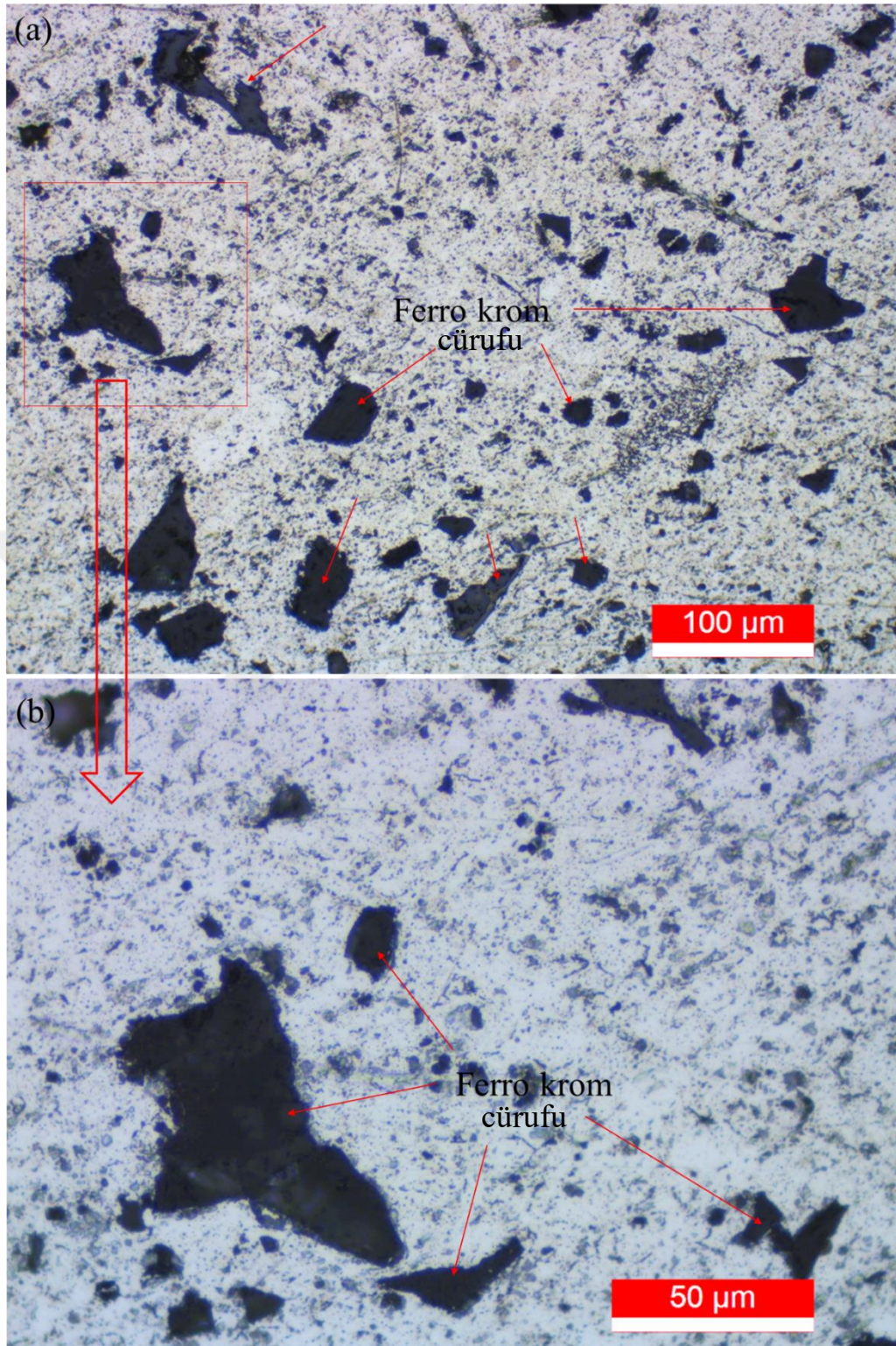
Şekil 7.12’de %5 Ferrokrom cürufu parçacık takviyeli kompozit malzemelere ait mikroyapı görüntülerinde FCC’lerin matris içerisinde homojen olarak dağıldıkları tespit edilmiştir. FCC oranının artması ile birlikte parçacıkların birbirine yaklaştığı ve boyutlarının irili ufaklı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7.13 ve 7.14). Sıcak presleme işleminin bir sonucu olarak üretilen FCC takviyeli kompozit malzemelerde elde edilen yüksek yoğunluk sebebiyle mikro gözeneklilik minimum seviyededir.



Şekil 7.12: Sıcak presleme ve ısıtım işlem sonrası %5 FCC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.



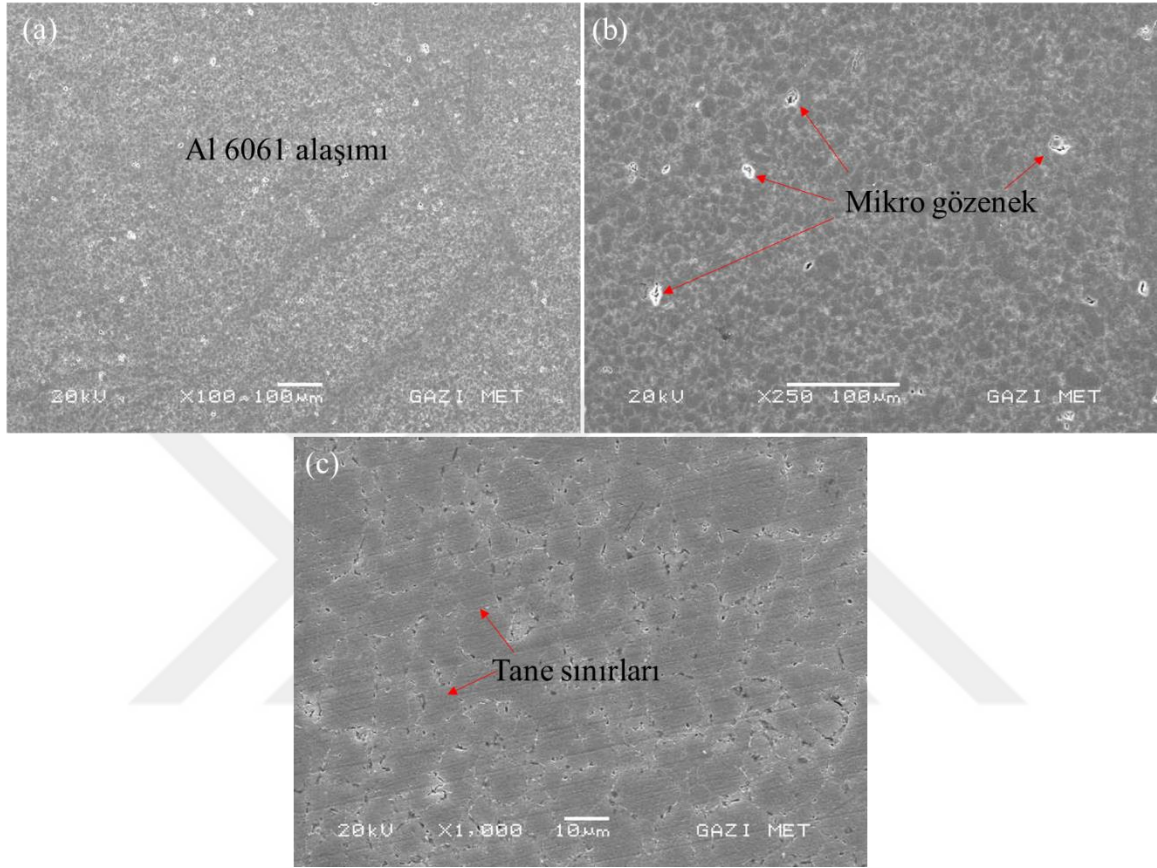
Şekil 7.13: Sıcak presleme ve ısıt işlem sonrası %10 FCC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.



Şekil 7.14: Sıcak presleme ve ısıt işlem sonrası %15 FCC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüsü.

7.3.2 SEM ve EDS analizleri

Şekil 7.15'te Al6061 malzemesinin farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri verilmiştir. Tane ve tane sınırları belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca yapı içerisinde eser miktarda mikro gözenekler oluşmuştur.



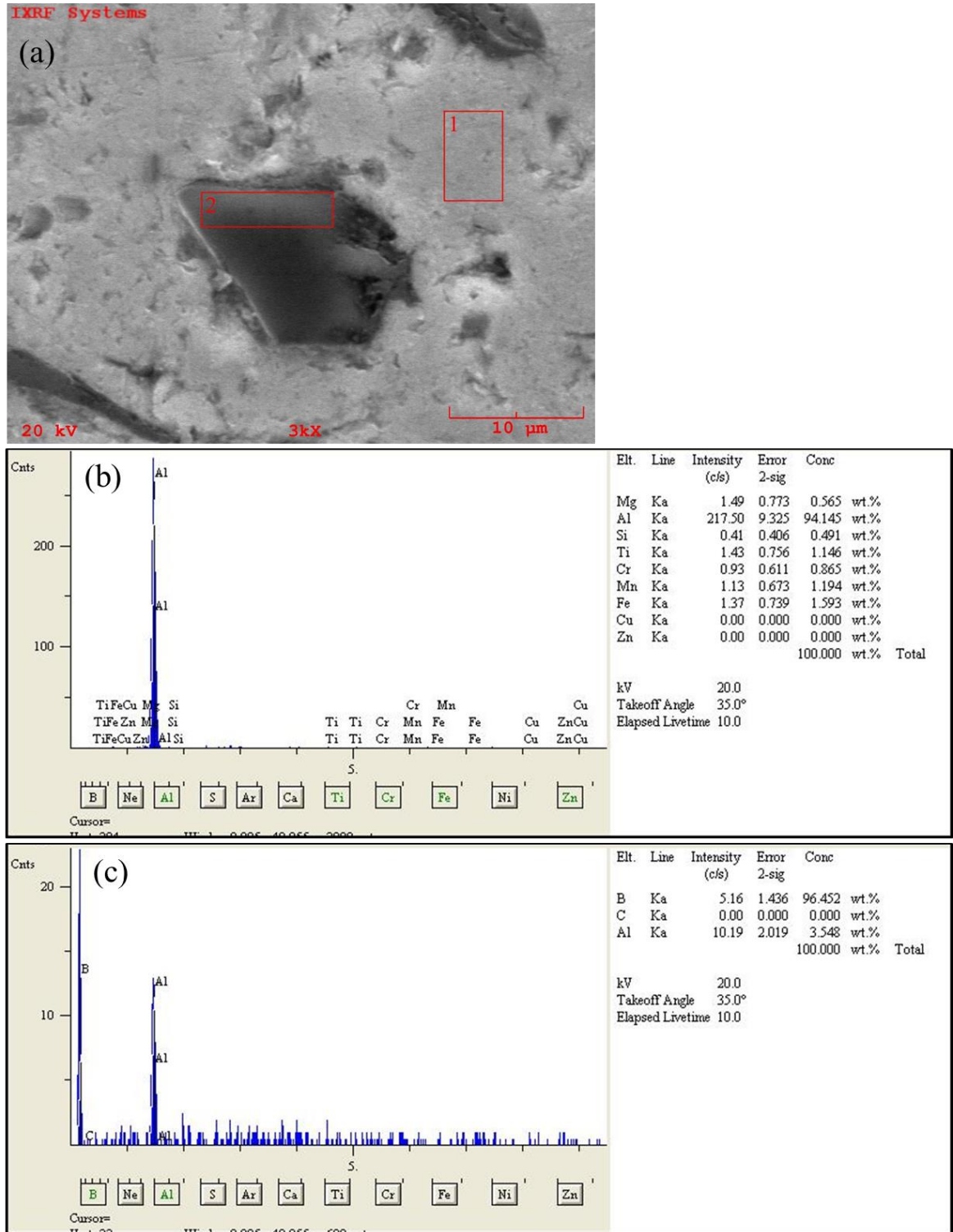
Şekil 7.15: Takviyesiz Al 6061 SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.

Şekil 7.16'da %10 oranında B₄C takviye edilen malzemenin SEM görüntüleri ve EDS sonuçları verilmiştir. 1 numaralı alan matris yeri yani Al6061 alaşımını gösterirken koyu gri olan yer ise B₄C parçacığını göstermektedir. Her iki alana da uygulanan EDS analizi varılan sonucu desteklemektedir. 1 numaralı alandan alınan EDS sonucunda Al miktarının en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. 2 numaralı alanda ise Bor miktarının fazla olduğu görülmüştür.

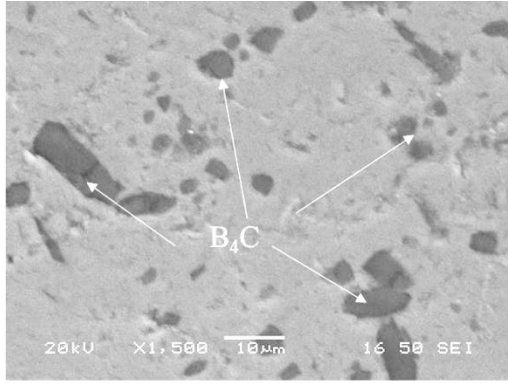
Şekil 7.17'de %10 oranında B₄C parçacık ile takviyelendirilmiş kompozit malzemenin SEM görüntüsü ve haritalama (mapping) görüntüleri verilmiştir. Haritalama tekniği ile kompozit malzemelerin içerisinde bulunan elementlerin varlığını ve dağılımlarını belirlemek

mümkündür. Şekil 7.17’de bulunan SEM görüntüsüne baktığımızda koyu renkli olan parçacıkların B_4C parçacıklarıdır. B_4C parçacıkları olduğunu haritalamada yer alan “B” (bor) ve “C” (karbon) elementlerinin oluşum konumlarından anlaşılabilmektedir. Kırmızı renkle gösterilen B elementleri koyu renkli olan parçacıkların konum yerleri ile örtüşmektedir. SEM görüntüsü incelendiğinde B_4C parçacığında çatlak olduğu görülmektedir. B_4C parçacıkları elmastan sonra gelen en sert malzemelerden biri olduğu için presleme anında uygulanan yüke bağlı olarak çatlak oluşabilmektedir. Al 6061 matris içerisinde yer alan ve katkı oranı yüksek olan Mg parçacıkları ise (mor renkli) yapının tamamında homojen dağılım sergilemiştir.

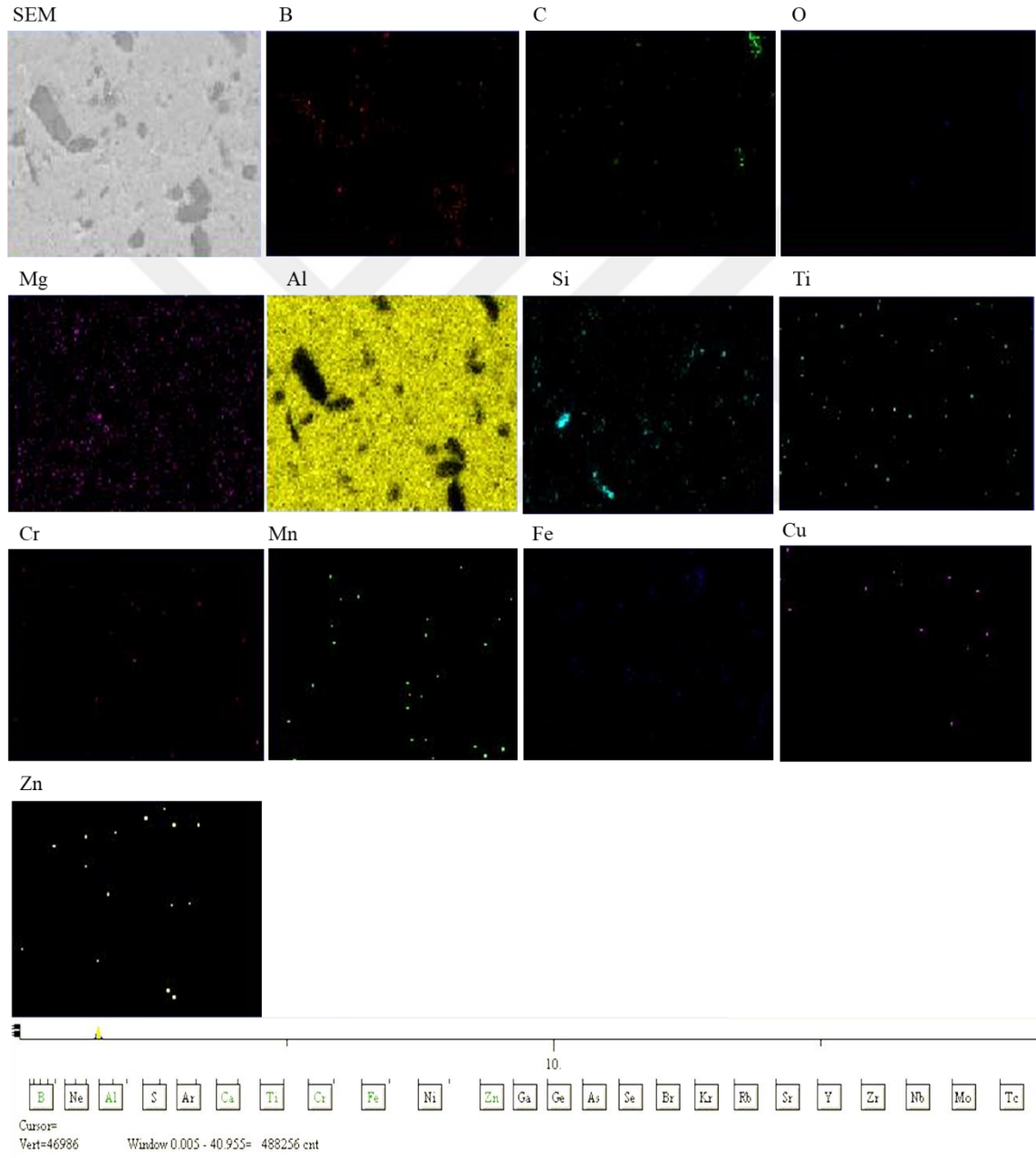




Şekil 7.16: (a) Sıcak presleme sonrası %10 B4C takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü ve EDS analizi alınan bölgeler (b) 1. bölgenin, (c) 2. bölgenin EDS analizi.

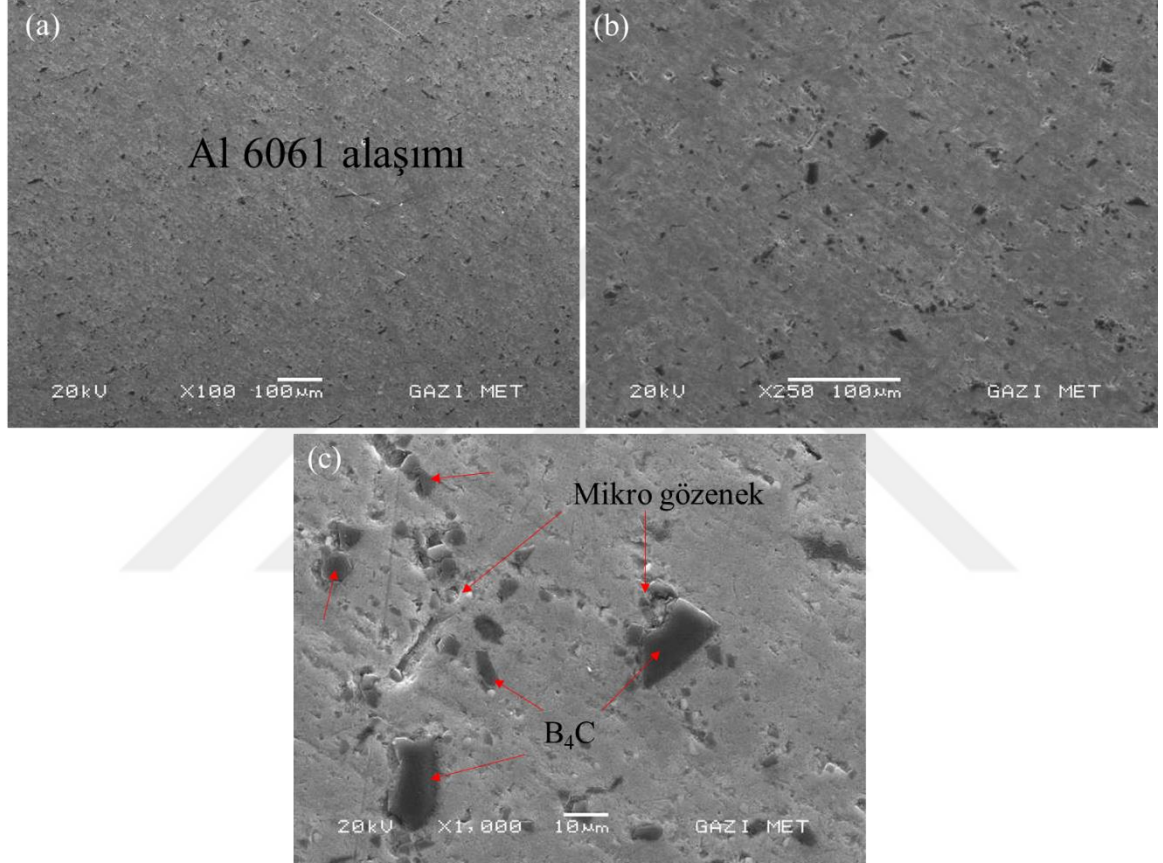


Fast map

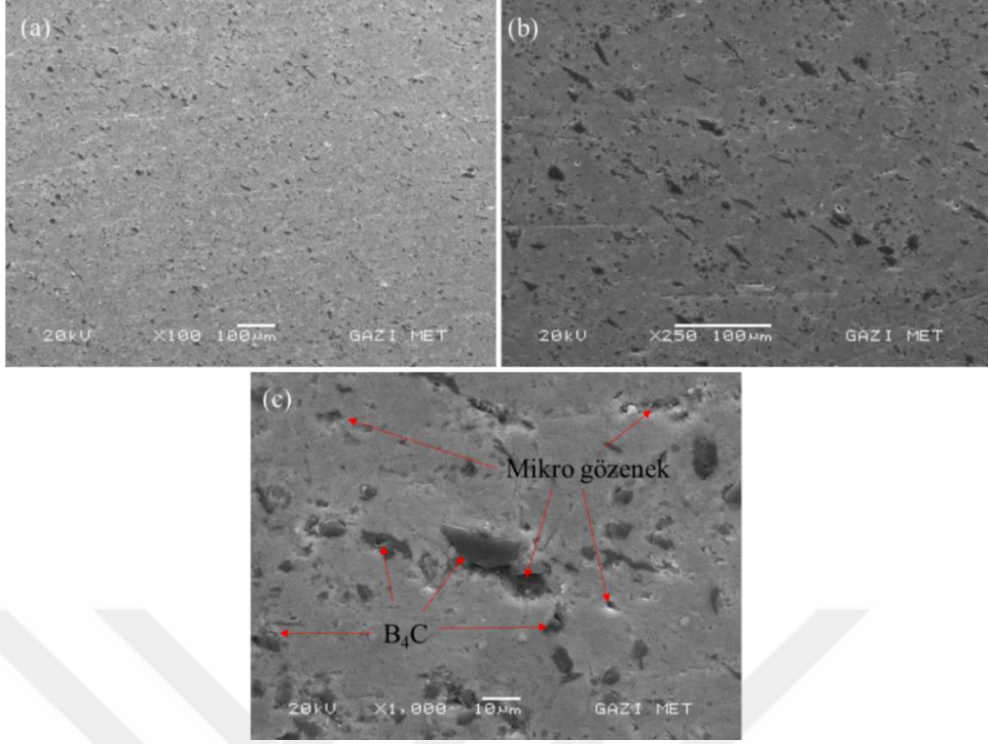


Şekil 7.17: %10 B₄C takviye edilmiş kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (mapping).

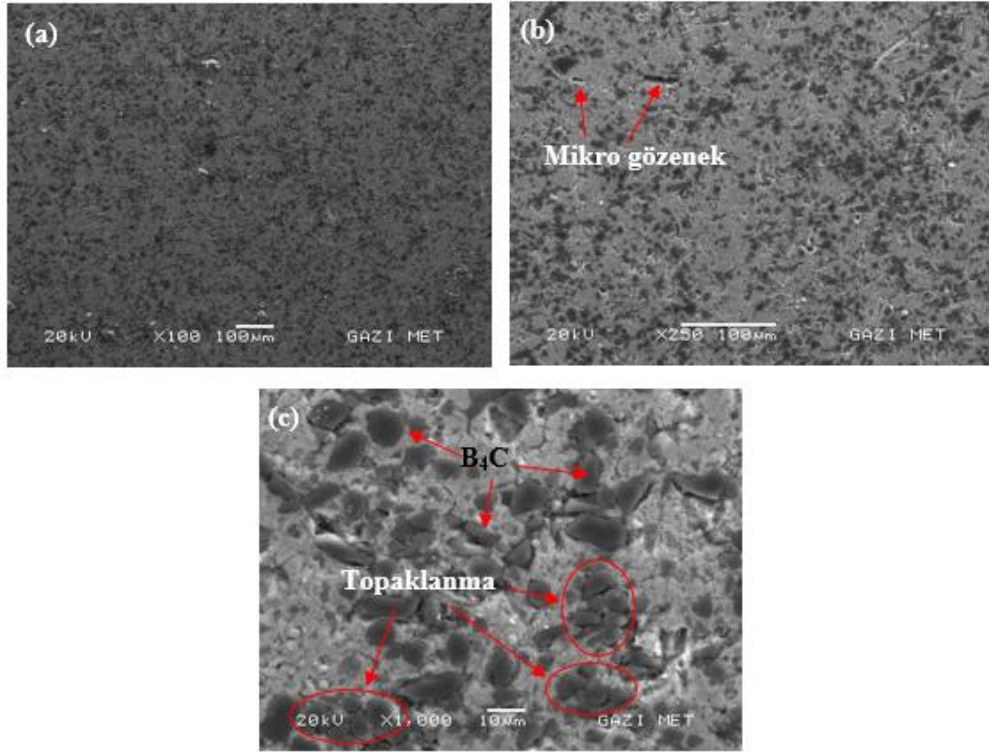
%5 B₄C parçacık ilaveli kompozit malzemede parçacıkların homojen dağılım sergilediği görülmüştür (Şekil 7.18). Ayrıca parçacıkların etrafında mikro gözenekler oluşmuştur. %10 parçacık ilaveli kompozit malzemede ise parçacıklar birbirlerine daha fazla yaklaşmışlardır (Şekil 7.19). %5 parçacık ilaveli kompozit ile kıyaslandığında ise mikro gözenekler daha fazla artmıştır. %15 B₄C parçacık takviyeli kompozitlerde ise topaklanmaların olduğu görülmüştür (Şekil 7.20).



Şekil 7.18: %5 B₄C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme (d) x3000 büyütme.



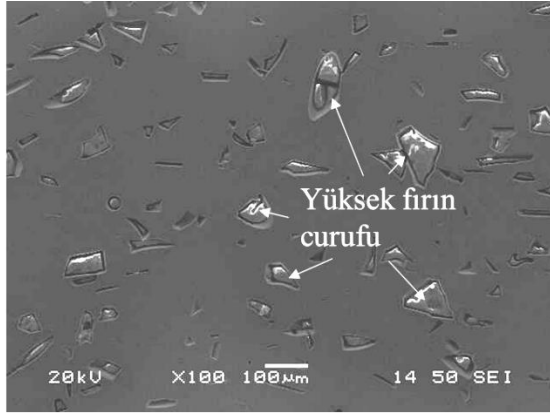
Şekil 7.19: %10 B₄C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme (d) x3000 büyütme.



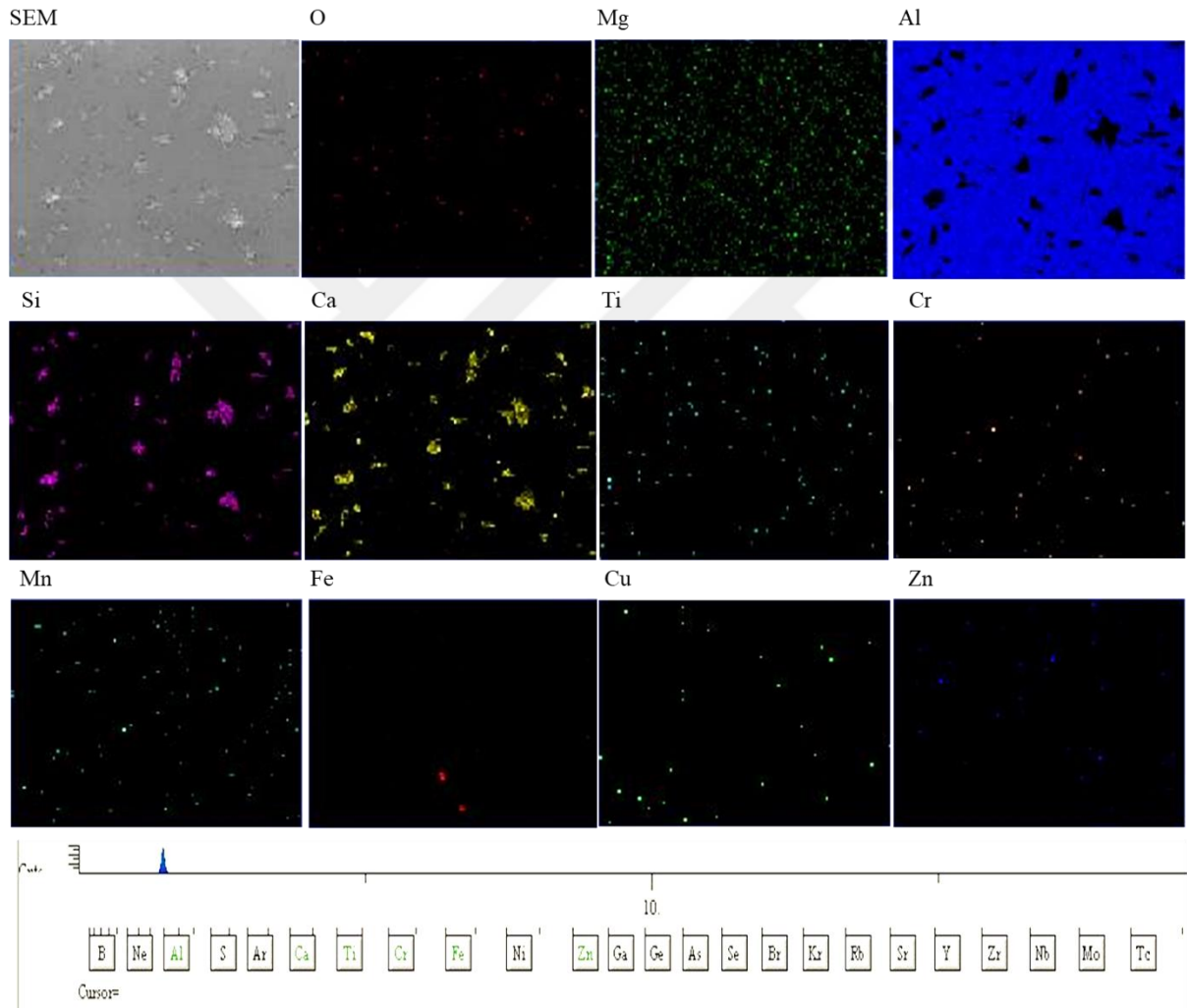
Şekil 7.20: %15 B₄C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme (d) x3000 büyütme.

Şekil 7.21’de %10 YFC takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü ve EDS sonuçları verilmiştir. SEM görüntüsünde 1 numaralı bölgeden alınan EDS sonuçlarına göre Al 6061 alaşımının genel yapısına uygun alaşım elementlerine rastlanmıştır. 2 numaralı bölgeden alınan EDS sonucuna göre ağırlıklı olarak Si, Ca, Al, Mg ve O elementlerine rastlanmıştır. Dolayısı ile 2 numaralı bölgedeki parçacığın YFC olduğu anlaşılmıştır. 2 numaralı bölgedeki parçacığın rengine benzeyen diğer parçacıklarda Al 6061 matris içine gömülü olarak kalmıştır. SEM görüntüsü incelendiğinde parçacıkların değişik şekillere sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 7.22’de yer alan X100 büyütmedeki SEM görüntüsü incelendiğinde yüksek fırın curuflarının matris yapı içerisinde gömülü olarak meydana geldiğini ve matris ile arasında boşlukların olduğu görülmektedir. Yüksek fırın curufunun varlığını haritalama da yer alan resimlerden anlayabilmekteyiz. “Ca”, “Si” ve “Fe” alaşım elementlerinin varlığı yüksek fırın curufunun oluşum konumları ile örtüşmektedir. Dolayısı ile bu alaşım elementlerinin konum yerleri yüksek fırın curufunun varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca SEM görüntüsünü incelediğimizde yüksek fırın curufu ile Al 6061 matris arasında boşluk oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu boşluklar matris fazının kendisinde oluşmadığından uygulanan presleme basıncının yeterli geldiği fakat yine de yüksek fırın curufu ile Al6061 matris arasında boşluk oluştuğu düşünülmektedir. Al alaşımları içerisinde takviyelendirilen bazı seramik malzemelerin vb. elemanların uyum sağlayamadığı bilinmektedir bilinmektedir (Shorowordi vd., 2003). Uyumun sağlanabilmesi için çeşitli araştırmaların literatürde devam ettiği bilinmektedir. Uyumsuzluğun en çok bilindiği takviye elemanlarından birisi B₄C’dir. Yapılan çalışmada benzer bir uyumsuzluğun yüksek fırın curufu ile Al 6061 arasında olduğu görülmektedir. Yüksek fırın curufu ile Al 6061 matris fazı arasında yer alan bu boşluğun ara yüzey bağının iyi olmadığını göstermektedir. Kompozit malzemelerde arayüzey bağının üstün mekanik özellik sergileyecek şekilde optimum seviyede olması istenmektedir Ara yüzey bağı matrise uygulanan yükü takviye elemanına iletmesi istenmektedir. Dolayısı ile takviye elemanı ile matris fazı arasında yer alan ara yüzey bağının boşluk oluşturmaması istenir (Metcalf, 2016).

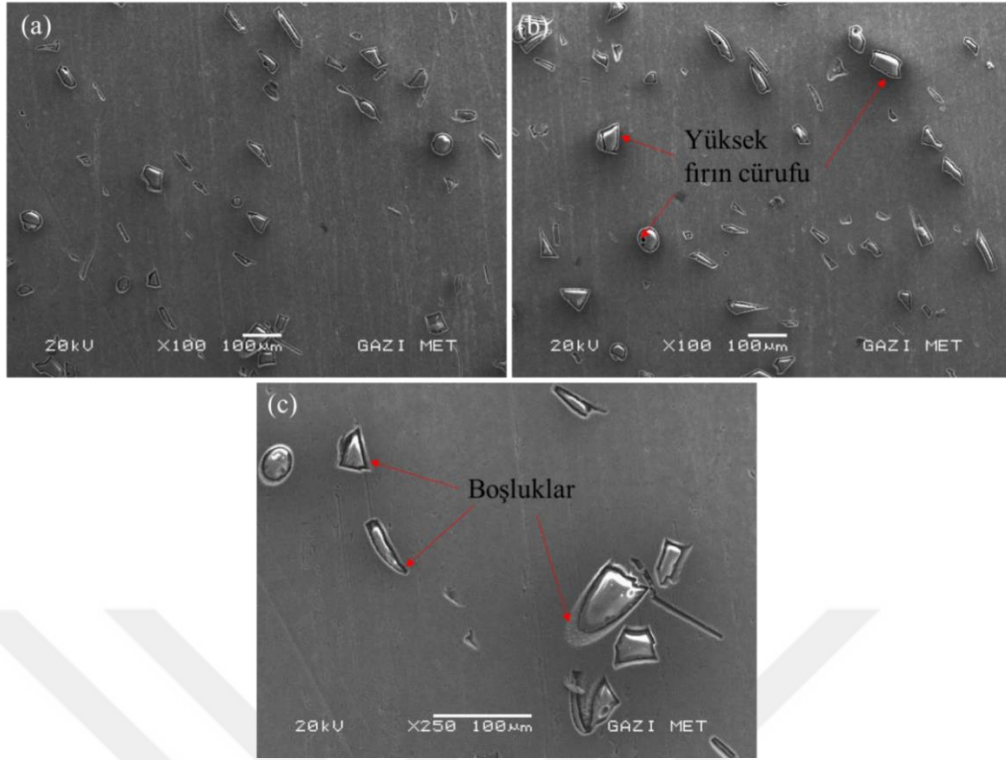


Fast map

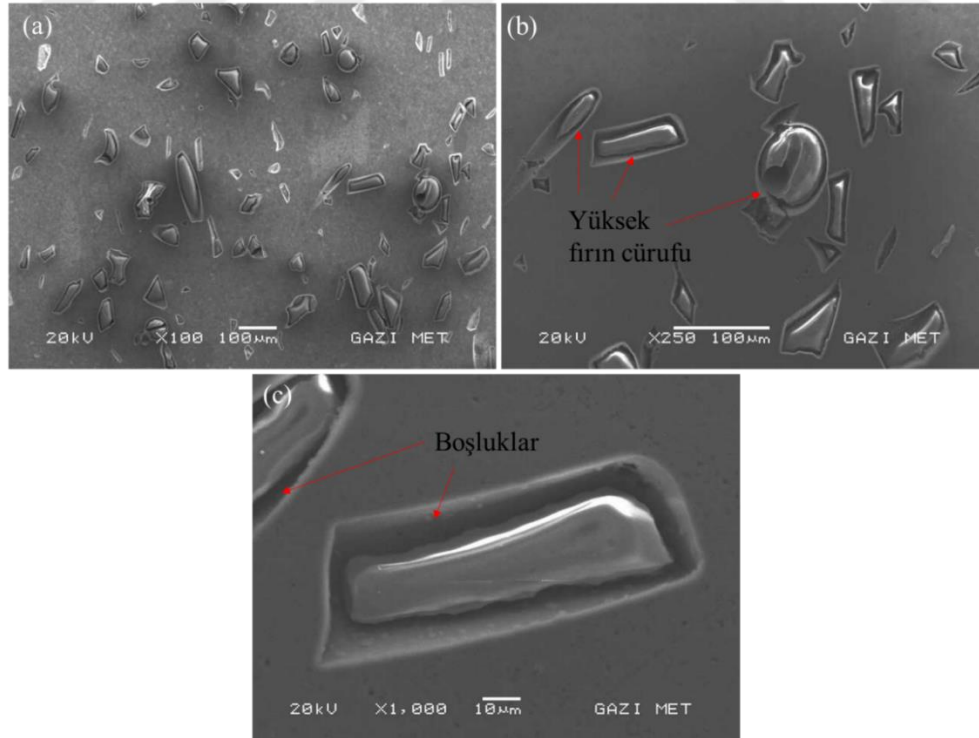


Şekil 7.22: %10 YFC takviye edilmiş kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (mapping).

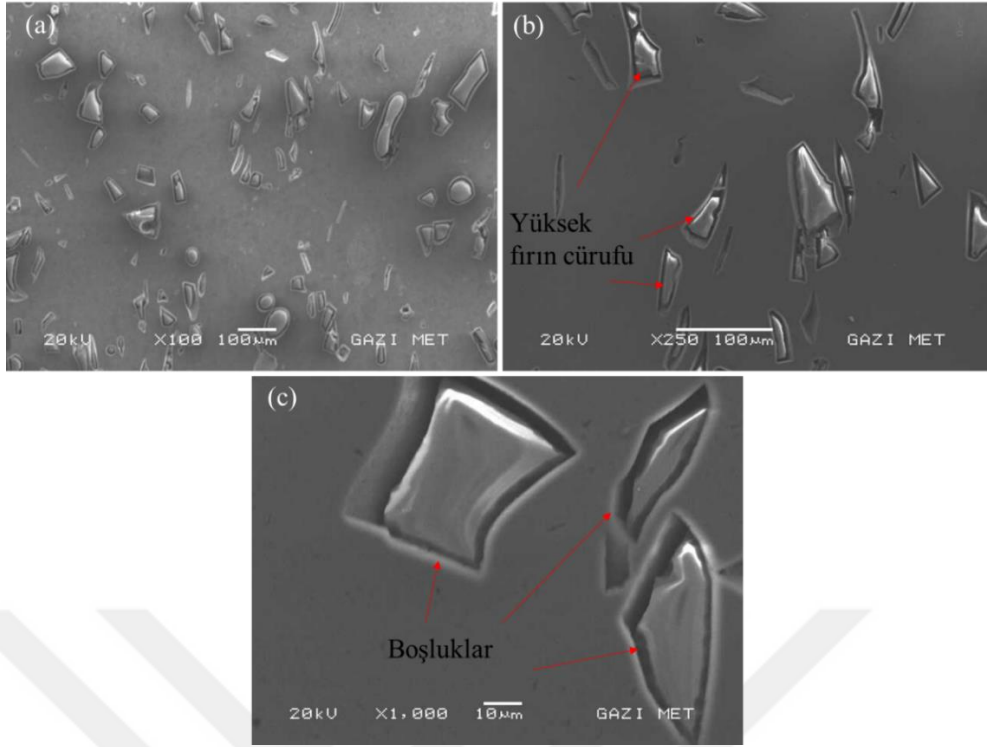
Toz metalurjisi tekniğinde tozların şekillerinin ve parçacık boyutlarının mekanik özelliklere etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada küresel, karmaşık keskin köşeli, iğnemsî ve çubuk şeklinde YFC tozlarının olduğu görülmektedir. İğnemsî ve karmaşık şekilli tozların matris yapı içerisinde çatlak oluşturma eğilimleri olduğu bilinmektedir. Küresel şekilli tozlar ise yapının güçlendirilmesini sağlar (Gai vd., 2008; Samel & Newkirk, 2015). Çalışmada her iki şekilli tozlarında olması çalışmaya yenilik katmaktadır. Toz metal kompozit malzemelerde matris yapı ile takviye elemanı arasında bir uyum vardır. Bu uyum arayüzey bağı olarak nitelendirilir. Ara yüzey bağı matrise uygulanan yükü takviye elemanına iletir. Bu nedenle arayüzey bağının optimum derecede iyi olması istenilir (Chang ve Zhao, 2013). Mikroyapı görüntülerinde ana matris fazı ve takviye elemanı arasındaki mesafe (boşluk olup olmama durumu) ara yüzey uyumunu vermektedir (Shorowordi vd., 2003). Kompozit malzemelerde ara yüzey karakteristiğinin oluşmasında belirli parametreler etkindir. Kompozit malzemenin üretiminde uygulanan proses sıcaklığı, gerçekleşen difüzyon etkileşimleri ve kalıntı gerilmeler bu parametrelerin temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki YFC sem görüntüsü incelendiğinde takviye elemanı ile Al 6061 matris arasında boşlukların oluştuğu, matris ile takviye fazı arasındaki arayüzey bağının sağlanamadığı görülmektedir (Şekil 7.23, 7.24 ve 7.25). Bazı boşlukların da bu bağın zayıf olmasından kaynaklı olarak zımparalama anında YFC parçacıklarının Al 6061 matrisinden çıkarak oluşturduğu söylenebilir. Takviye malzemesinin yüzeyinin pürüzlü olmasının, tutunmayı sağlayarak bağ oluşumunu kolaylaştırdığı bilinmektedir (Şahin, 2015). YFC parçacık yüzeylerinin pürüzsüz ve camsı olmasının Al 6061 ve YFC arasındaki mekanik bağın sağlanamamasında dolayısıyla arayüzey bağının yetersiz kalmasında etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.23: %5 YFC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.



Şekil 7.24: %10 YFC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.

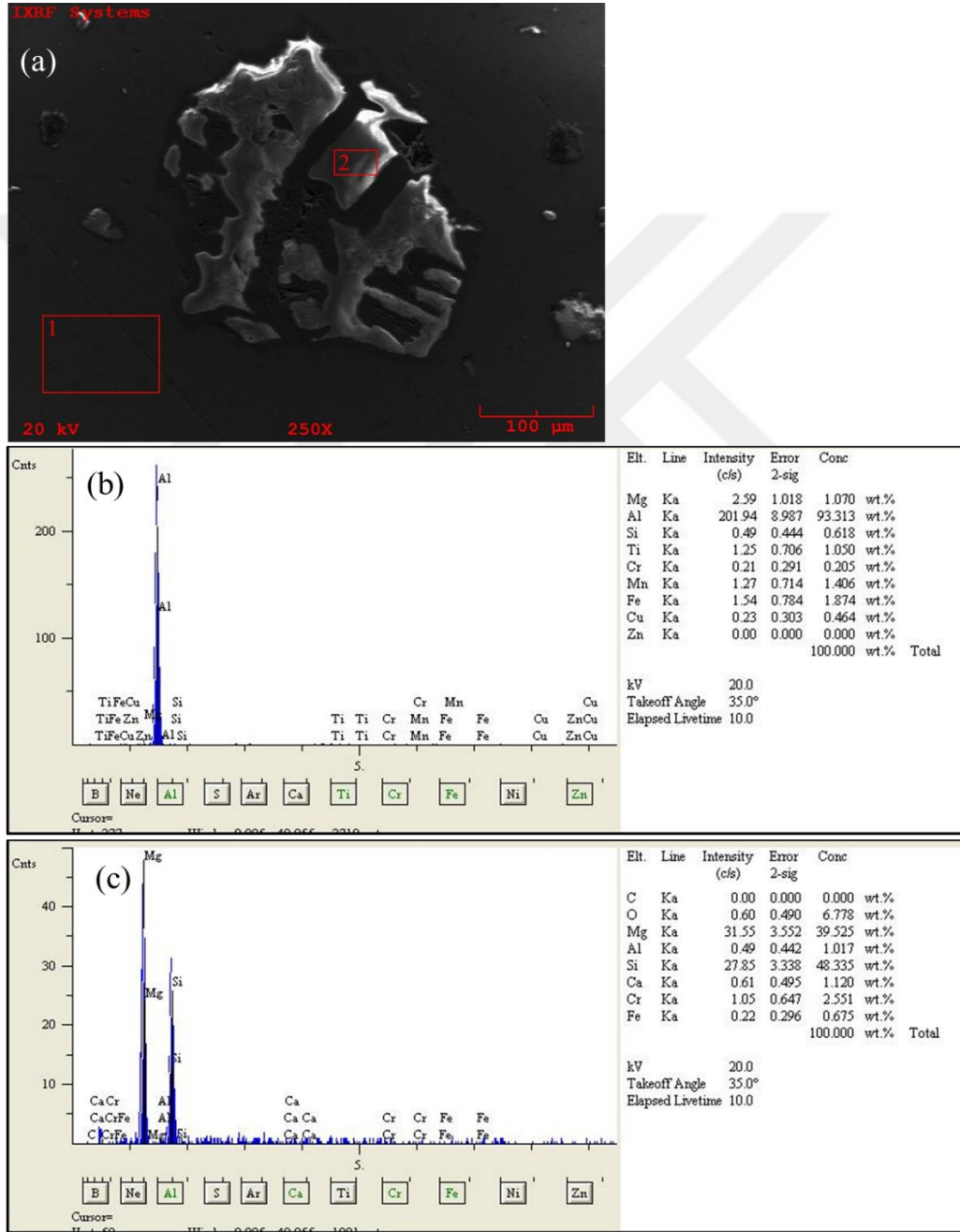


Şekil 7.25: %15 YFC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.

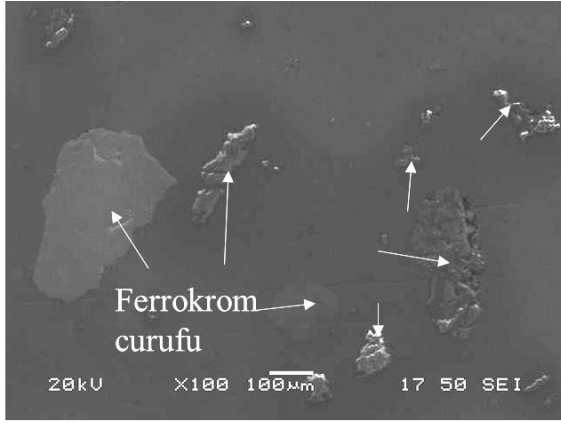
Şekil 7.26’da %10 FCC takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü ve EDS sonuçları verilmiştir. SEM görüntüsü incelediğinde 2 numaralı bölgede görülen açık renkli parçacık Ferrokrom takviye elemanıdır. Şekil 7.27’de yer alan ferrokrom curufu takviyeli kompozit malzemelerde ise ara yüzey bağının iyi olduğu görülmektedir. Ara yüzey bağının iyi olduğunu takviye elemanı ile matris fazı arasında boşluk oluşmamasından anlaşılabılır. Yüksek fırın curufunda olduğu gibi bazı elementlerin varlığı ferrokrom curufunun varlığını ispatlamaktadır. “Mg”, “Si”, “Ca”, “Cr”, “Mn” ve “Fe” elementlerinin konumu ferrokrom curufunun konumunu göstermektedir.

Ferrokrom parçacığı ile yüksekfırın curufu birbiri ile mukayese edildiğinde ferrokrom curufunun Al6061 matrisine gömüldüğü ve arayüzeyinde boşlukların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ferrokrom parçacıkları incelendiğinde karmaşık şekilli ve süngerimsi bir şekile sahip olduğu görülebilir. Ferro krom curuf takviyeli kompozit malzemelerin (%5-10 ve 15) mikroyapılarında mikro gözenek miktarı minimum seviyededir (Şekil 7.28, 7.29 ve 7.30). Bu durumun Al6061/ferrokrom cürufu arayüzey bağının iyi olması ve sıcak presleme yöntem parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Toz metalurjisi ile çeşitli yöntemler kullanılarak parçalar üretilebilmektedir. Klasik yöntemde tozlar tartılır,

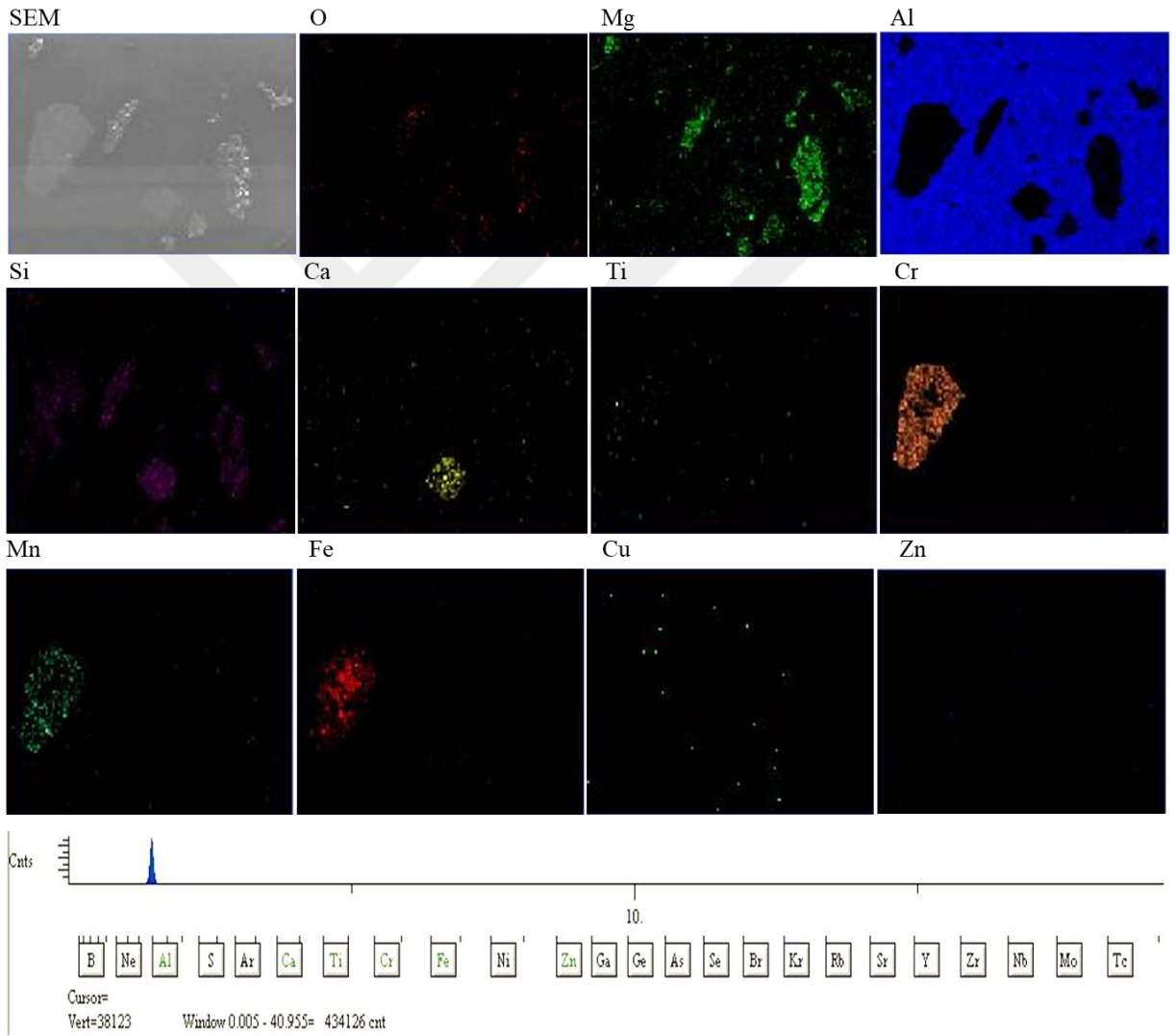
karıştırılır, preslenir ve sinterlenir (Upadhyaya, 1997). Teknolojinin gelişmesi ile beraber toz metal parçaların üretim metotları da geliştirilmiştir (Angelo & Subramanian, 2008). Sıcak presleme yönteminde karışım tozlar sıcaklık ve basınç altında sinterlendiğinden klasik yöntem ile üretilen parçalara göre daha yoğun parçaların üretilmesine imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada sıcak preslenme ile tam yoğunluğa yakın FKC takviyeli kompozit numuneler üretilmiştir.



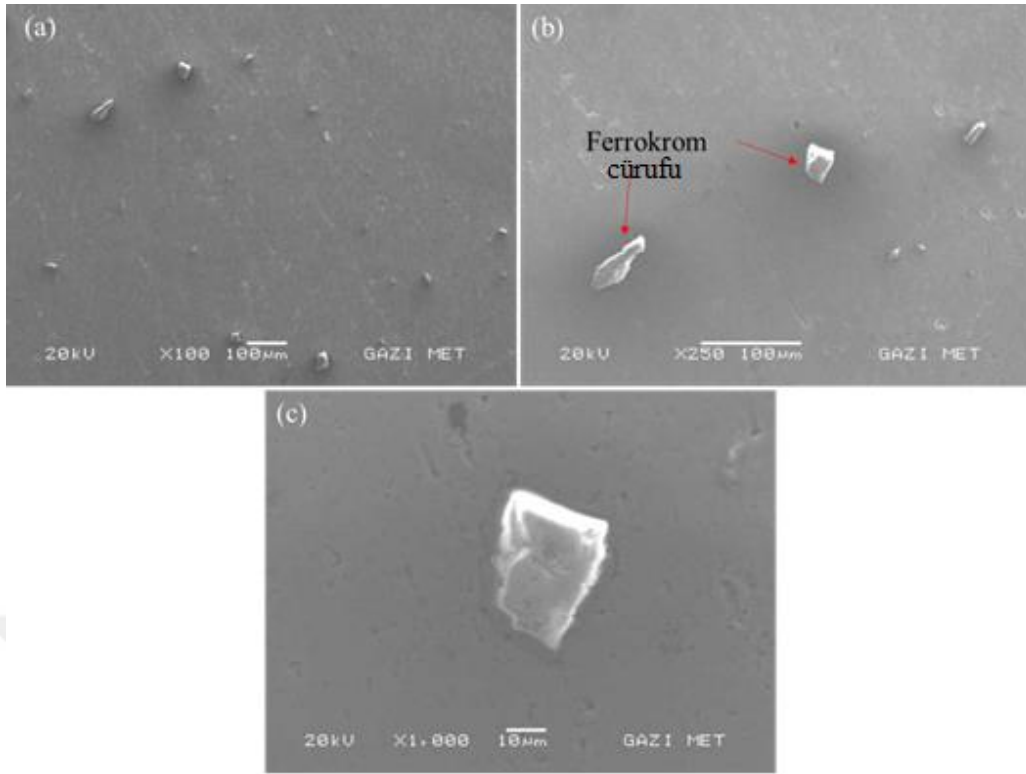
Şekil 7.26: Sıcak presleme sonrası %10 FCC takviyeli kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi.



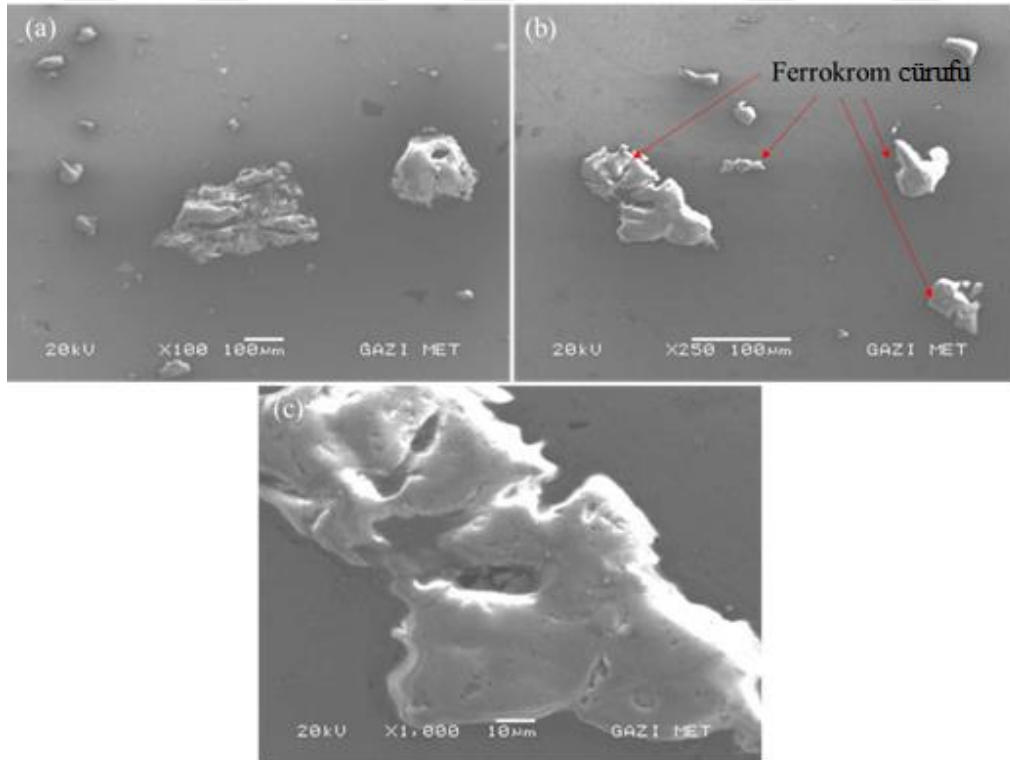
Fast map



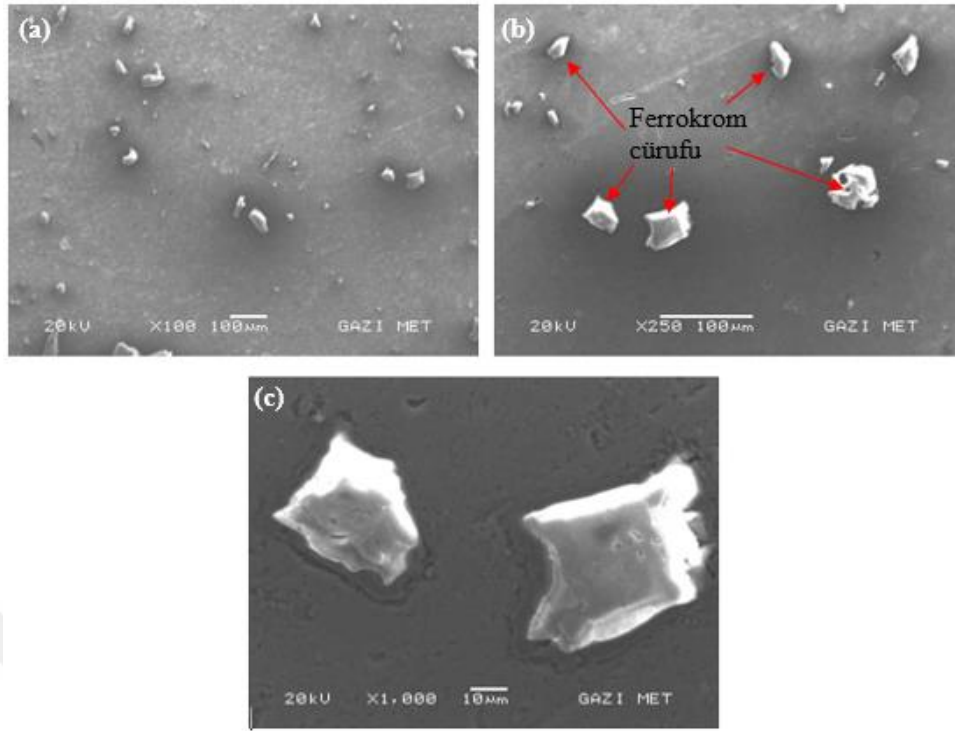
Şekil 7.27: %10 Ferrokrom cürufu takviye edilmiş kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (mapping).



Şekil 7.28: %5 FCC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.



Şekil 7.29: %10 FCC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.



Şekil 7.30: %15 FCC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri (a) x100 büyütme (b) x250 büyütme (c) x1000 büyütme.

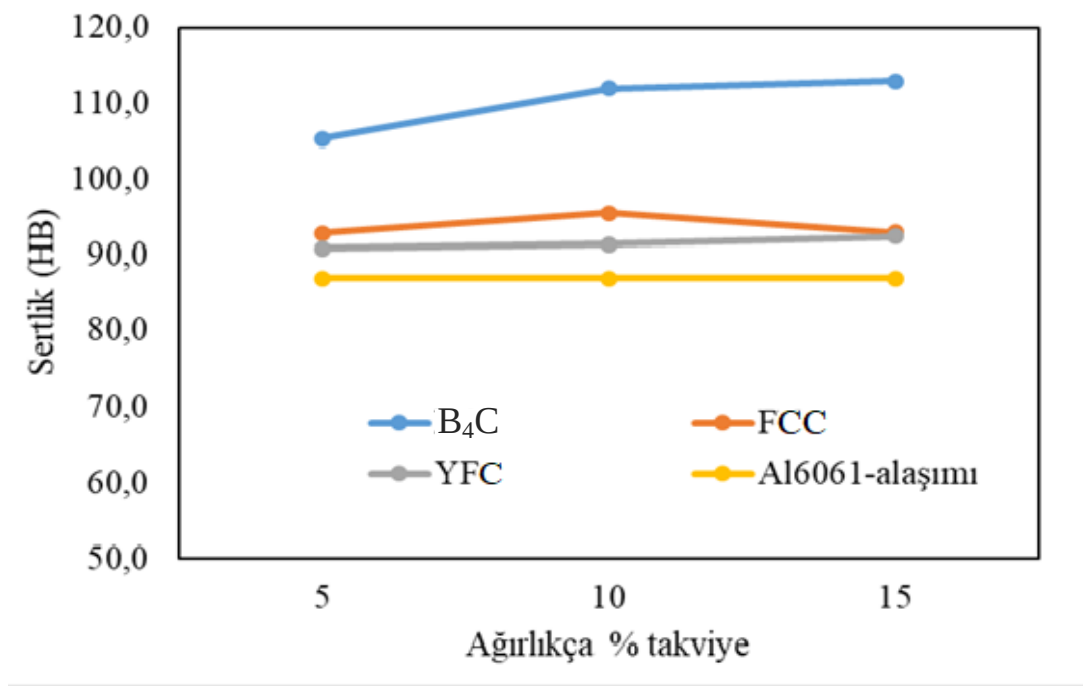
7.4 Sertlik Değişimi

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin sertliklerini ölçmeden önce 530°C’de çözündürme hemen ardından suda soğutma ve 175°C’de 8 saat yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu ısıtma işlemi sonrası alınan sertlik değerlerine ait grafik 7.31’de verilmiştir. Sertlik değişimleri incelendiğinde B_4C miktarındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Sertlik artışı; B_4C parçacıklarının matris yapı içerisinde giderek artan gerilme enerjilerine neden olmalarından kaynaklanmaktadır (Zhang vd., 2004).

Kompozit malzemelerde yoğunluk, malzemenin mekanik özelliklerinde büyük bir etkidir. Sıcak presleme işlemi ile YFC ve FCC takviyesiyle yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla YFC ve FCC takviyesinin sertlik değerinde takviyesiz Al 6061’e göre iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Şanlı A., yapmış olduğu çalışmada yüksek fırın cürufu takviyesi ile birlikte sertlik değerlerinde benzer sonuçları elde etmiştir (Şanlı, 2017). YFC takviyeli kompozitlere göre FCC takviyeli kompozitlerin daha fazla sertlik değerine ulaşmasının sebebinin ferrokrom cürufunun içermiş olduğu yüksek Al_2O_3 ve MgO oranından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Akbar vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada T6 ısıtıl işleminin, Al6061/Al₂O₃ kompozitlerinin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Isıl işlem esnasında soğutma hızının sertlik özelliklerini etkilediği, yüksek soğutma hızının sertliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca soğutmada kullanılan su ve yağa göre tuzlu suda soğutulan numunelerde daha yüksek sertlik elde edilmiştir. Çalışma sonucunda Al₂O₃ takviyesinin takviyesiz numuneye göre sertlik değerinde artış sağladığı ve T6 işleminin bu değeri daha da iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Akbar vd., 2020).

Balaji vd. tarafından yapılan çalışmada ise Al 6061 alaşımı, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş olan MgO takviyeli Al 6061 matrisli kompozit malzeme ile kıyaslanmıştır. MgO takviyesinin benzer şekilde mekanik özelliklerini iyileştirerek sertlik değerini yükselttiği görülmüştür (Balaji vd., 2015).



Şekil 7.31: Üretilen kompozit malzemelerin sertlik değişimleri.

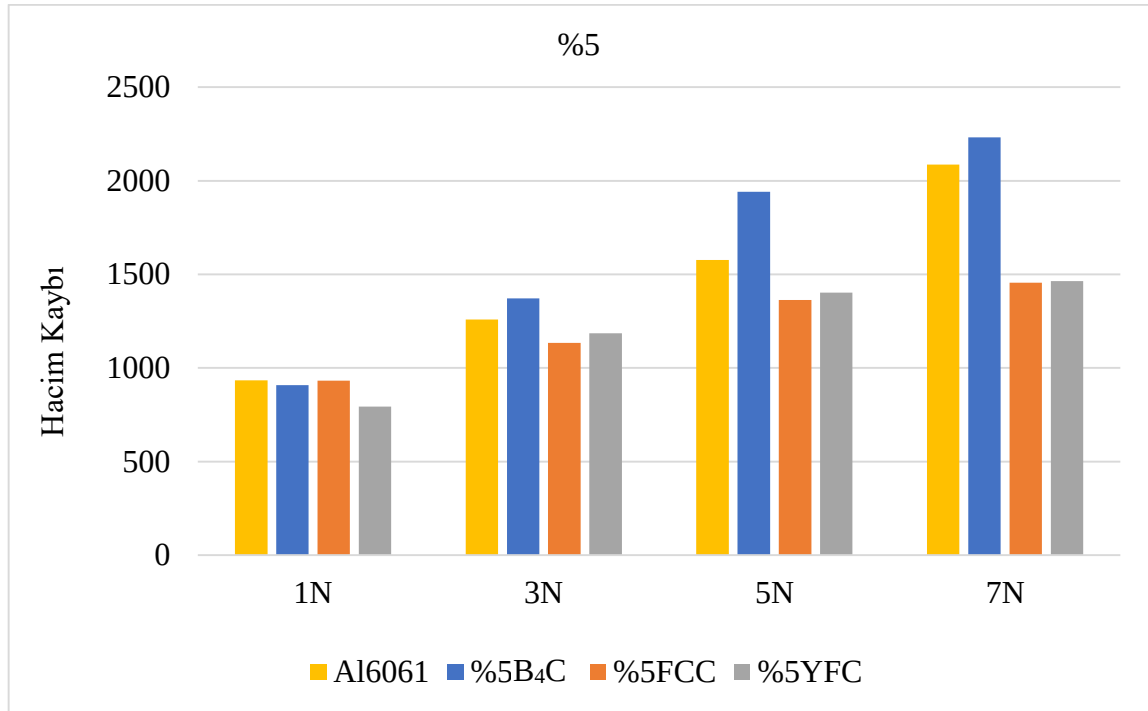
7.5 Kuru Kayma Aşınma Deney Bulguları

Malzemelerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde etkili olan birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar tribolojisi incelenen malzemenin özellikleri, karşı malzemenin özellikleri, deneyde veya servis şartlarında kullanılan parametreler, çevre şartları gibi parametrelerdir (Çelik ve Seçilmiş, 2017).

Bir malzemenin tribolojik performansında etkili olan özellikler düşünüldüğünde malzemenin mikro yapısından hatta atomik boyutundan başlayıp üretim yöntemine kadar birçok özellikten bahsedilebilir. Örneğin; üretilen malzemenin, döküm veya dövme yolu ile mi üretilmiş olduğu, dolu bir malzeme mi olduğu yoksa toz metalurjisi ile üretilen kompozit bir malzeme mi olduğu oldukça önemlidir. Çalışmada üretilen malzeme toz metalurjisi yöntemi ile üretildiği için, malzemenin karışım kompozisyonu bu kompozisyondaki matris ve takviye edici oranı, bu malzemelerin özellikleri gibi faktörlerin yanında üretimden gelen bazı faktörlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Örnek olarak presleme basıncı, süresi, sıcaklığı ve benzeri özellikler sayılabilir. Malzeme ve üretim yöntemi için bu örnekler çoğaltılabilir (Hasırcı ve Gül, 2010).

Tribolojik testlerde kullanılan yük, kayma hızı, çalışma sıcaklığı, kullanılan aşındırıcı gibi parametrelerin her biri numunelerin incelenmesinde önemli parametrelerdir. Ancak tribolojinin aşınma kısmında etkili deney parametreleri olarak, yük ve kayma hızı verilebilir (Gök, 2008).

Yukarıda kısaca anlatılanların ışığında %5 oranında B₄C, YFC ve FCC ile takviye edilen numunelerin 1, 3, 5 ve 7 N'luk yükler altında 0,03 m/s kayma hızında ve 100 metre yol sonunda elde edilen hacim kaybı grafikleri Şekil 7.32'de verilmiştir.



Şekil 7.32: %5 takviyeli numunelerin hacim kaybı grafiği.

Şekil 7.32'daki grafik incelendiğinde öncelikle artan yüklerle birlikte tüm numunelerde artan bir hacim kaybı görülmüştür. Bu durumun temel mekaniğinde aşındırıcı ucun karşı yüzeyden malzeme kaldırabilmesi için iki ana kuvvete ihtiyacı vardır. Bunlardan birincisi ucu karşı yüzey malzemesine nüfuz ettirecek olan batma kuvvetidir. Diğerisi ise batan ucun önünde biriken malzemeyi keserek veya kazıyarak bulunduğu yerden kopararak atık bir malzeme haline getirecek olan kesme kuvvetidir. Kuru kayma aşınmalarında batma kuvvetine karşı koyan, malzemenin hacim sertliği veya kompozit bir malzemede takviye edicilerin sertliğidir. Bu sertlik değeri ne kadar yüksek olursa cisim kendine batmak isteyen karşı yüzeye o kadar yüksek tepki göstereceğinden dolayı aşındırıcının batma etkisi azalacak dolayısıyla aşınma direnci artacaktır. Artan yük ile birlikte numunelerdeki hacim kaybının artması öncelikle bu ilke ile ilişkilendirilebilir. Çünkü artan yük ile birlikte numune yüzeyine gelen basma kuvveti artacağı için aşındırıcı uç daha fazla yüzeye batacaktır. (Kiraz, 2019)

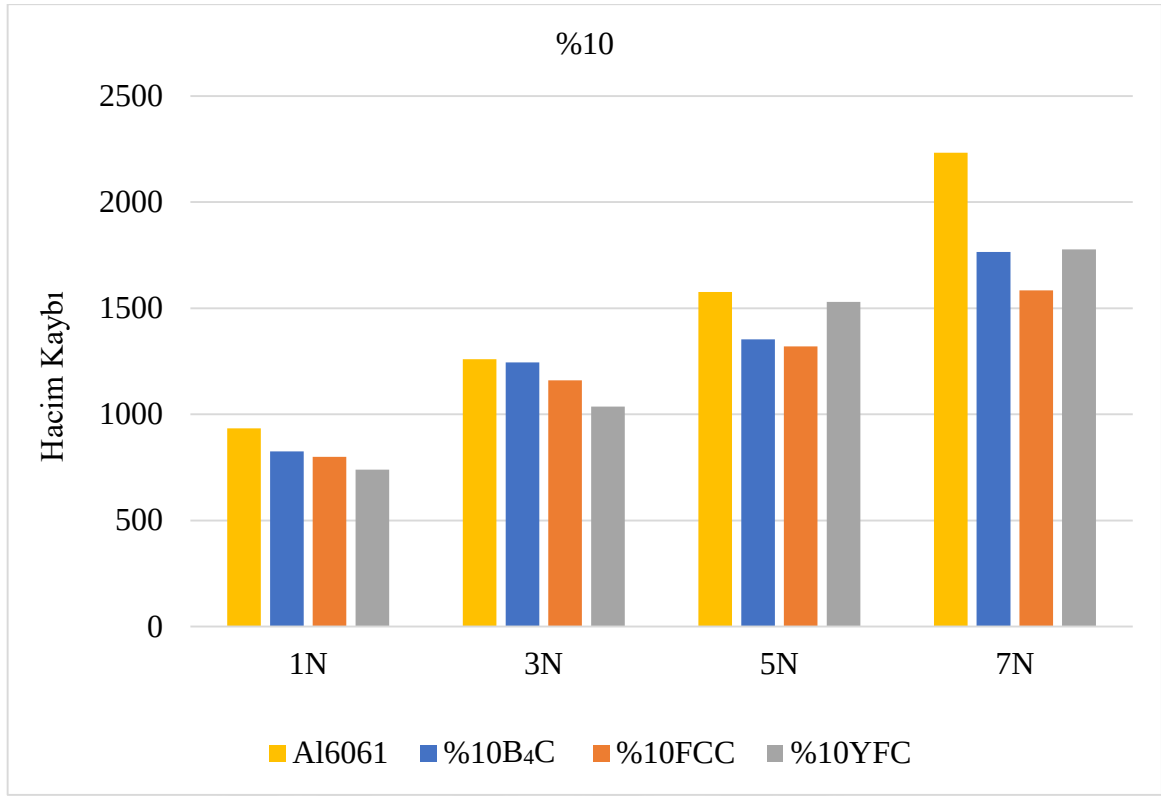
Şekil 7.32'da 1 N yük altında elde edilen hacim kaybı değerleri birbirine yakındır. Artan yüklerle birlikte fark açılmaktadır. En çok hacim kayıpları 3, 5 ve 7 N'luk yüklerde başta takviyesiz Al 6061 numunesinde görülürken bunu B₄C takviyeli numuneler izlemiştir. Takviyesiz Al 6061 numunesinin en düşük sertlik derecesine sahip olması bu durumun sebebi olarak gösterilebilir. Ancak en yüksek hacim sertliğine sahip B₄C takviyeli numunenin hacim kaybının yüksek olması, üzerinde düşünülmesi gerekli bir durumdur. %5 B₄C ilavesinin kompozit malzemede aşınma direnci sağlanması açısından yetersiz kaldığı çalışma sonucunda açıkça görülmüştür. Hasırcı ve Gül tarafından yapılan çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al matrisli ve hacimce %5, %10 ve %15 oranında B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin 10 ve 20 N yük altında aşınma davranışları incelenmiş ve %5 takviye oranına sahip kompozit malzemenin bu durumu destekler biçimde aşınma direnci açısından yetersiz kaldığı görülmüştür (Hasırcı ve Gül, 2010).

Yukarıdaki paragraflarda malzemelerin kuru kayma aşınma davranışlarında iki farklı kuvvetten bahsedilmiş ve basma kuvveti açıklanmaya çalışılmıştır. İkinci kuvvet kesme işlemini gerçekleştirmektedir. Burada en yüksek takviye edici partikül sertliğine sahip B₄C'nin olumsuz bir etkisi ortaya çıkmaktadır. Artan yüklerle birlikte daha derine batan aşındırıcı bilyanın önünde daha çok takviye edici partikül bulunmaktadır. Aşındırıcı bilyanın nisbi hareketi ile önündeki B₄C partikülleri harekete geçmekte ve aynı bir abrasiv etki ile önündeki matris tabakasına zarar vermektedir. Çelik vd. tarafından yapılan çalışmada %6,

%8, %12, %16 oranlarında B₄C ile takviyelendirilmiş Al matrisli kompozit malzemeye ait kuru kayma aşınma deneyi sonuçlarında hacim kaybının, uygulanan yükün artmasıyla arttığı, takviye oranının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Matristeki kesme etkisine karşı direnci olan B₄C takviyesinin varlığının, kompozitlerin gerilme enerjisini, sertliği ve basınç dayanımı artırdığı, ancak artan yük ile plastik deformasyon arttığı için kompozit malzemelerde ağırlık kaybının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yapılan çalışmada elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. (Çelik ve Seçilmiş, 2017). Diğer tarafta FCC ve YFC ile takviyeli numunelerin daha az hasara uğraması konusunda takviye edici partiküllerin morfolojilerine ve sertliklerine bağlı olarak matris tabakaya daha az zarar verdiği düşünülebilir. Bu partiküller üzerlerine gelen basınç kuvvetine bağlı olarak kırılmış veya B₄C ile kıyaslandığında daha düşük sertliğe sahip olduklarından önlerindeki matris tabakayı kesecek mukavemeti göstermemiş olabilirler.

Şekil 7.33'te kütlece %10 oranında takviye edici kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin 1, 3, 5 ve 7 N'luk yükler altında kuru-kayma deneyine tabi tutulduktan sonra elde edilen hacim kaybı grafikleri verilmiştir. Yine artan yüke bağlı olarak numunelerdeki hacim kaybı artmıştır. 1 ve 3 N'luk yükler altında gerçekleştirilen deneylerde en fazla hacim kaybı takviyesiz Al 6061 numunesinde tespit edilirken bunu B₄C takviyeli numune izlemektedir. Üçüncü aşınma performansını YFC takviyeli numune göstermiştir. En iyi performans ise FCC ile takviyeli numunede görülmüştür.

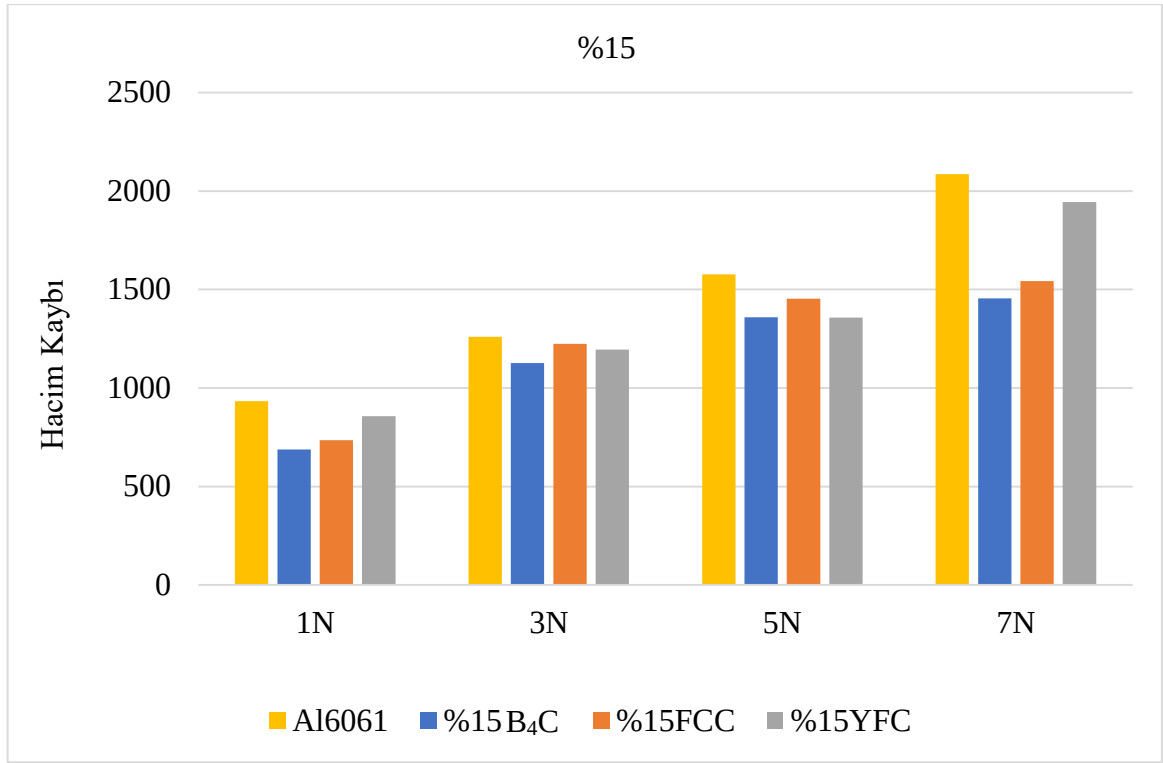
Yükün 5 ve 7 Newton'a çıkması ile numunelerin aşınma performansında değişim gözlemlenmiştir. Her iki yükte de takviyesiz Al 6061 ve YFC ile takviyeli numunede hacim kayıplarının daha fazla olduğu buna karşın B₄C takviyeli ve FCC ile takviyeli numunelerin daha iyi aşınma performansı gösterdiği anlaşılmıştır. Bu durum yükün malzemenin aşınma mekanizmasında bazı değişimler meydana getirdiği şeklinde açıklanabilir. Bu mekanizmalar numunelerin SEM fotoğrafları ile birlikte aşınma izi fotoğrafları incelenirken açıklanacaktır.



Şekil 7.33: %10 takviyeli numunelerin hacim kaybı grafiği.

Şekil 7.34’de kütlece %15 oranında takviye edici kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin 1- 7 N’luk yükler altında kuru-kayma deneyine tabi tutulduktan sonra elde edilen hacim kaybı grafikleri verilmiştir. Yine 1 ve 3 N’luk yükler için bu takviye edici oranı kırılma veya aşınma morfolojisinin değiştiği bir oran olarak görülebilir. %10 takviyeli numunelerde 1 ve 3 N’luk yüklerde aşınma direnci performansı YFC, FCC, B₄C ve Al 6061 olurken %15’lik kompozit numunelerde bu durum B₄C, YFC, FCC ve takviyesiz Al 6061 şeklinde değişim göstermeye başlamıştır.

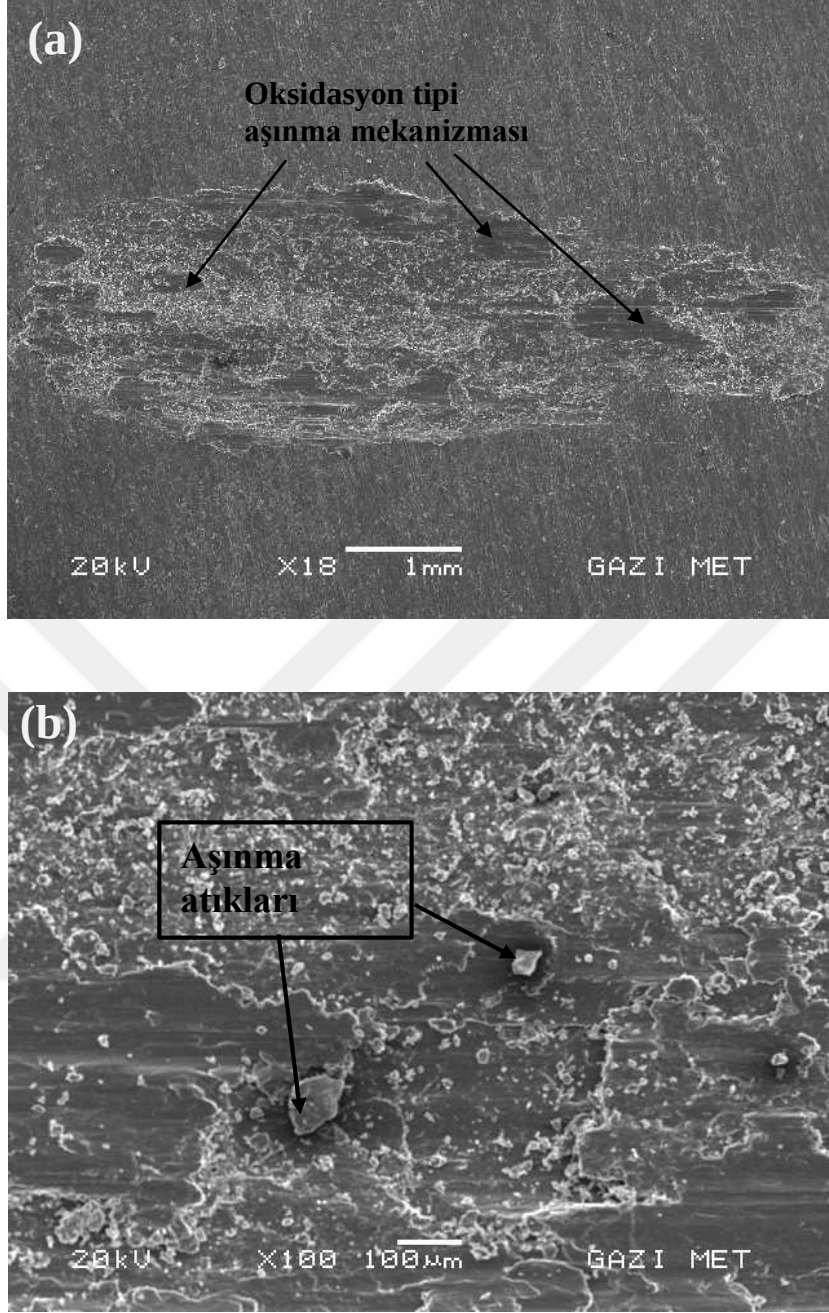
Idusuyi ve Olayinka tarafından yapılan çalışmada alüminyum metal matrisli kompozitlerin birçok parametre altında aşınma davranışlarını incelenmiş ve benzer şekilde, uygulanan yük arttıkça hacim kaybında da artış olduğu sonucu elde edilmiştir (Idusuyi & Olayinka, 2019).



Şekil 7.34: %15 takviyeli numunelerin hacim kaybı grafiği.

Şekil 7.35'ta takviyesiz Al 6061 numunesinin 7 N'luk yük altında aşındırma işleminden sonra SEM mikroskobu ile yüzeyinden alınan aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.35 (a) incelendiğinde açık ve koyu renkli iki bölge görülmektedir. Küçük adacıklar halinde bulunan, daha koyu renkli ve pürüzsüz olan yüzeyleri oksidasyon aşınması olarak nitelendirmek mümkündür. Diğer bölgeler ise aşınma esnasında yüzeyden koparak sisteme dahil olan aşınma atığı partikülleridir. Şekil 7.35 (b)'de daha açık görülmektedir.

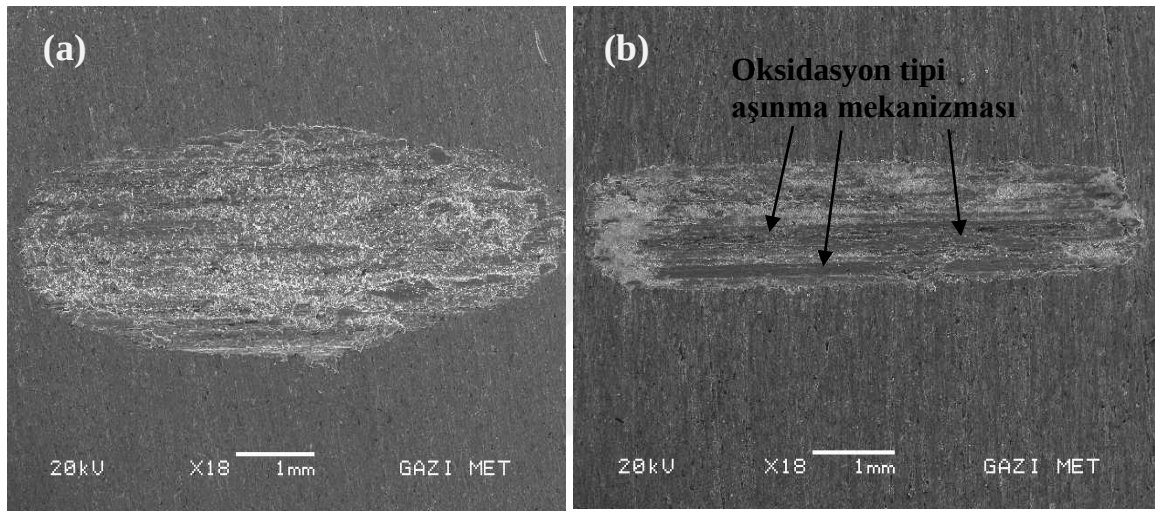
Reddy ve Kaliveeran tarafından yapılan çalışmada Al 6061 ve Al 6082 alaşımlarına ait 10 N ve 15 N altında kuru kayma aşınma davranışı incelenmiş ve Al 6061 için aşınma esnasında aşınma kanalları ve çukurların oluştuğu tespit edilmiştir (Reddy ve Kaliveeran, 2019).



Şekil 7.35: Takviyesiz Al 6061 numunesinin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı (a) x18 (b) x100.

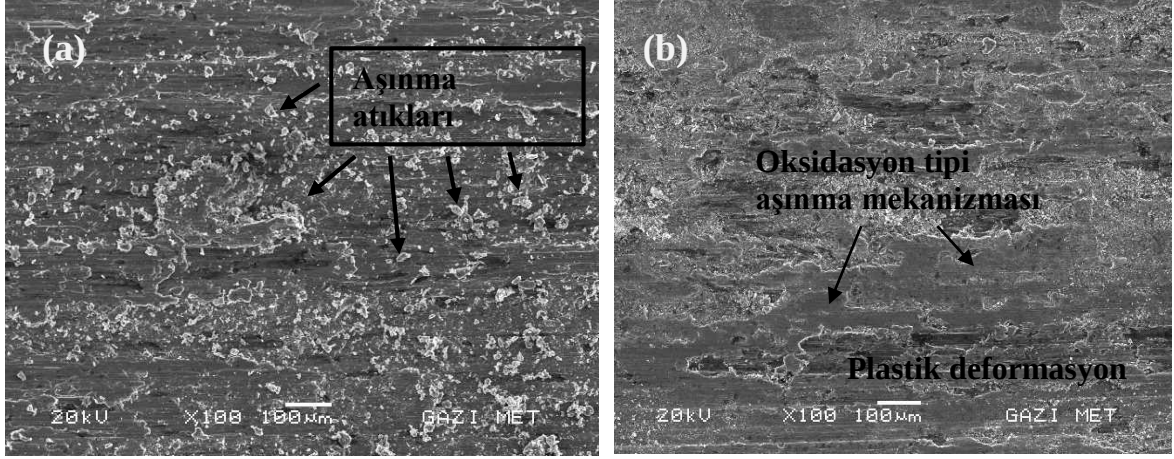
Şekil 7.36 (a)'da %5 B₄C takviyeli numunenin 18x büyütme SEM aşınma izi görüntüsü, Şekil 7.36 (b)'de ise 18x büyütmede %15 B₄C takviyeli numunenin görüntüsü verilmiştir. Kompozit malzemede matris içerisindeki takviye edici oranının artması iz genişliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Yani matris içerisindeki sert fazın artması aşındırıcı bilyanın matrise hasar verme oranını azaltmaktadır. İki görüntü incelendiğinde iki farklı aşınma mekanizmasının varlığı görülmektedir. Özellikle Şekil 7.36 (b)'de iz içerisinde görülen koyu

siyah çizgisel bölgelerin oksidasyon aşınması olarak değerlendirilmesi mümkündür. Oksidasyon aşınması kurukayma aşınması esnasında etkileşimli yüzeyler arasında meydana gelen sürtünmeye bağlı olarak oluşan ısının, malzemenin yüzeyinde bir oksit tabakası meydana getirmesi olayıdır. Basınç altında iki yüzeyin etkileşimi sonucunda malzeme yüzeyinde pürüzler vasıtası ile oluşan kaynak bağlarının tekrar kopması sonucunda aşınma partikülleri oluşur. Tekrarlı yükler altında oluşan bu aşınma atıklarının bir kısmı oksitlenerek tekrar yüzeye yapışır. Bu tabakanın oluşması aşınma direncini olumlu yönde etkilemekte, sürtünme katsayısını düşürmektedir. Zamanla bu tabaka tekrar kalkarak aşınma şartlarına bağlı olarak yüzeyde tekrar oluşur (Kiraz, 2019).



Şekil 7.36: B₄C takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altındaki aşınma yüzey fotoğrafı (a) %5 takviyeli (b) %15 takviyeli.

Şekil 7.37 (a)'da %5 B₄C takviyeli numunenin 100x büyütmedeki SEM aşınma izi görüntüsü; (b)'de ise %15 B₄C takviyeli numunenin 100x büyütmedeki SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.35 (a)'da birçok aşınma atığı partikül görülmektedir. Şekil 7.37 (b)'de ise plastik deforme olan bir yüzey ile şekil üzerinde pürüzsüz olarak görülen oksit tabakası görülebilir.



Şekil 7.37: B₄C takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altındaki aşınma yüzey fotoğrafı
(a) %5 takviyeli (b) %15 takviyeli.

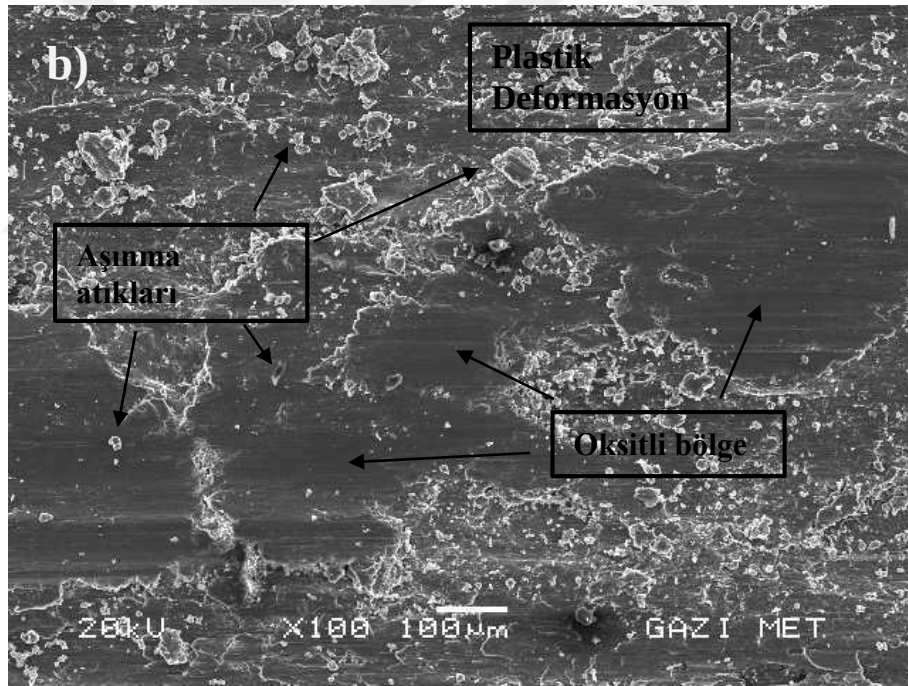
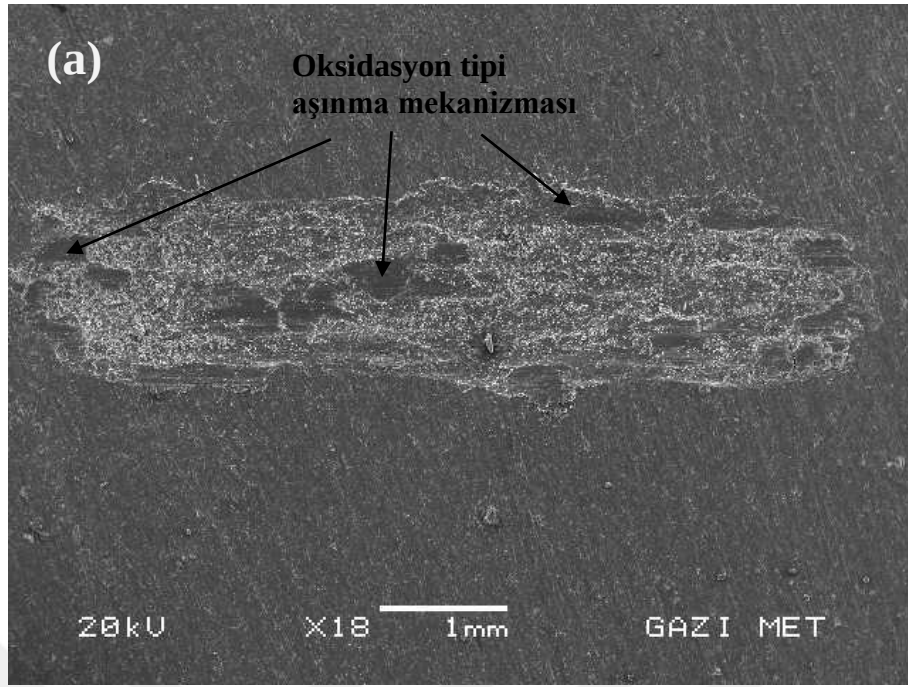
Rajesh vd. tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça %9 seramik bor karbür partikül takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma testi pin-on disk yöntemi kullanılarak 9,8 N, 29,4 N, 49,0 N ve 68,6 N yükler altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda alınan görüntülerde yüzeylerin ince parçacık tabakası ile kaplandığı tespit edilmiştir. Bu tabaka karakteristikleri, kayma sırasında sürtünmeden kaynaklanan ısınmanın neden olduğu oksidatif aşınmanın göstergesidir ve elde edilen sonuçları destekler niteliktedir (Rajesh vd., 2016).

Dinaharan vd. tarafından yapılan çalışmada sürtünme karıştırma yöntemi kullanılarak sentezlenen ve takviye malzemesi olarak hacimce %0,6, %12 ve %18 uçucu kül kullanılan Al 6061 matrisli kompozitin mikroyapı ve aşınma davranışı incelenmiştir. Çalışma sonucunda 20 N yük altında benzer aşınma mekanizmaları görülmüş ve oluşan aşınma kalıntılarının zamanla ince bir tabaka oluşturarak aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir.

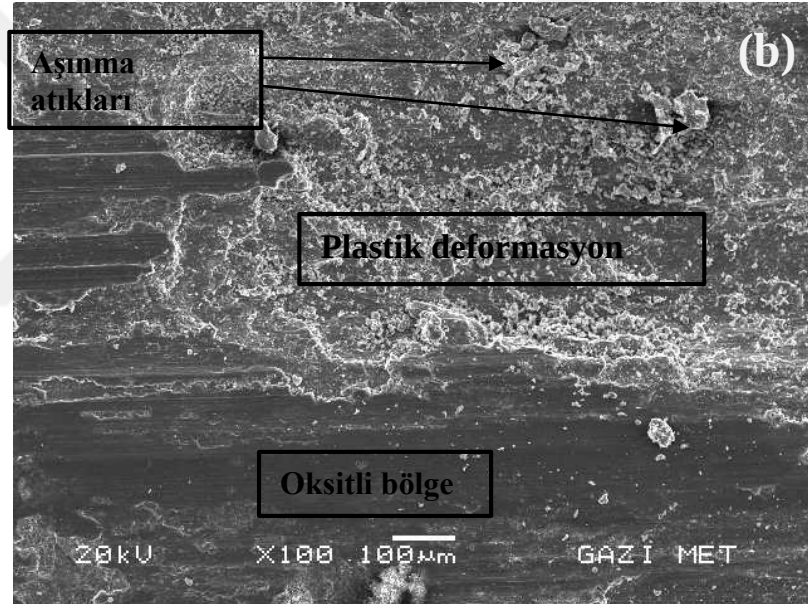
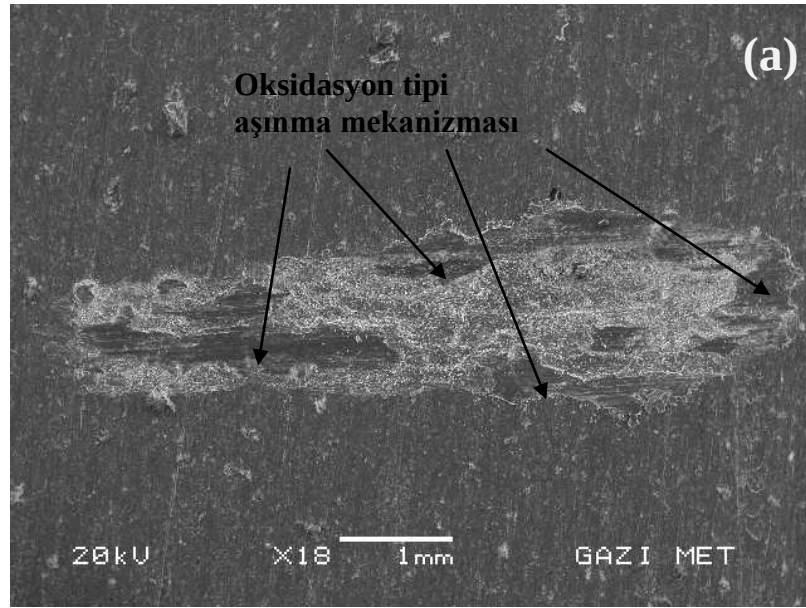
Çelik ve Seçilmiş tarafından toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %4, %8, %12 B₄C oranı ile takviye edilmiş Al 6061 matrisli kompozitlerin 5, 10 ve 15 N yükler altında aşınma davranışı incelenmiş ve takviye oranı arttıkça aşınma ile birlikte numune yüzeylerinde çizikler, çatlaklar ve çukurlaşmalar izlenerek aşınma yüzeylerinde yapışmalar olduğu görülmüştür (Çelik ve Seçilmiş, 2017).

Şekil 7.38 (a)-(b)'de % 5 FCC takviyeli numunenin farklı büyütmelelerdeki SEM aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.39 (a)-(b)'de ise %15 FCC takviyeli numunenin farklı büyütmelelerdeki SEM aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Hem %5 hemde %15 takviyeli numunelerde benzer aşınma mekanizmaları görüldüğü için sadece Şekil 7.39 (a)-(b)'de verilen SEM aşınma izi fotoğrafları yorumlanacaktır. Şekil 7.39 (a)'da görüldüğü gibi oksidasyon tipi aşınma mekanizması koyu siyah ve pürüzsüz olarak yüzeyin daha azınlık kısmını oluşturmaktadır. Diğer bölgeler ise plastik deformasyon ve aşınma atık partiküllerinde oluşan aşınmış bölgeleri göstermektedir.



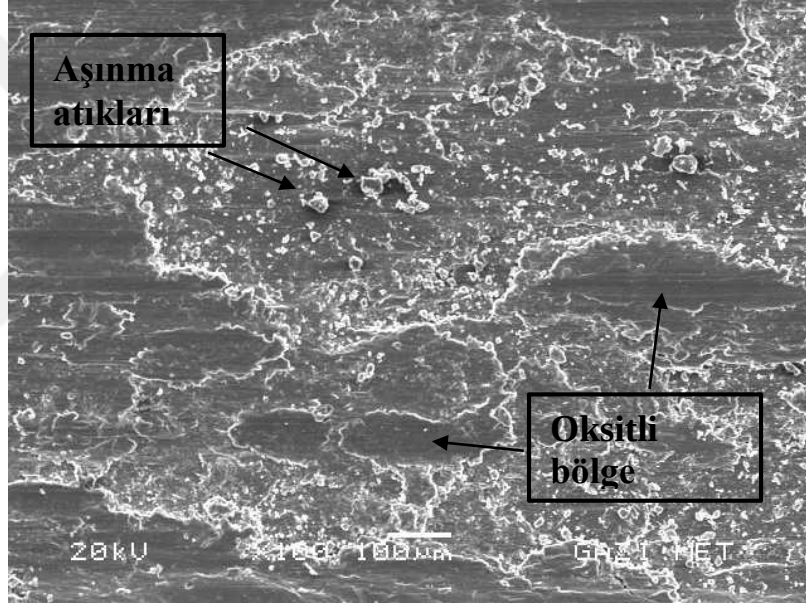
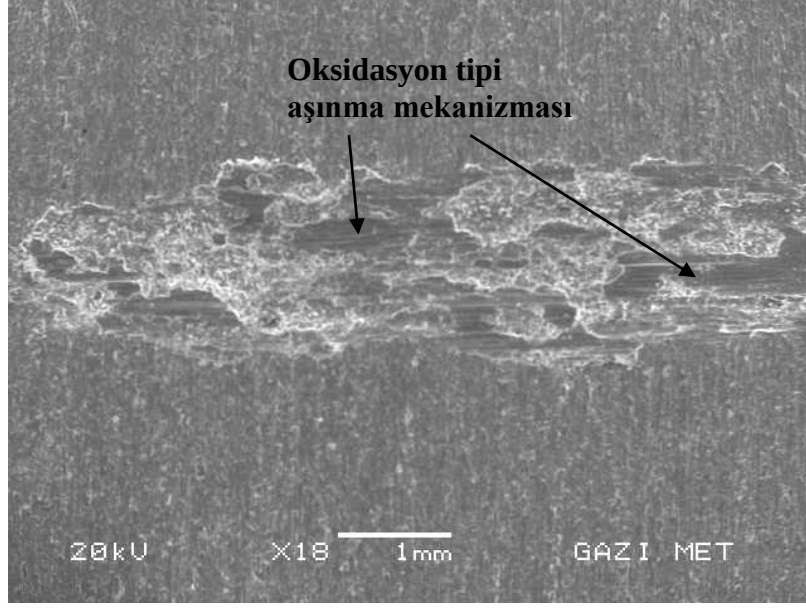


Şekil 7.38: %5 FCC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı
(a) x18 (b) x100.

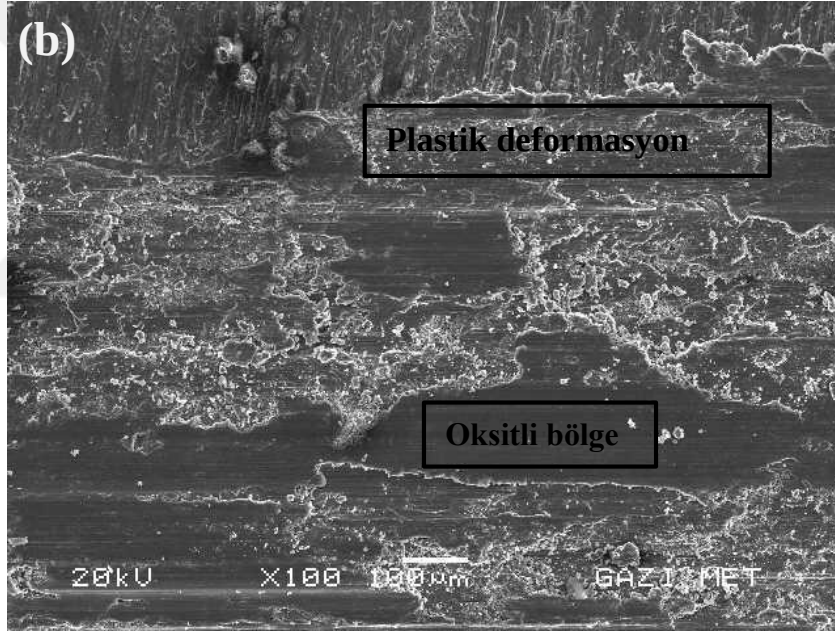
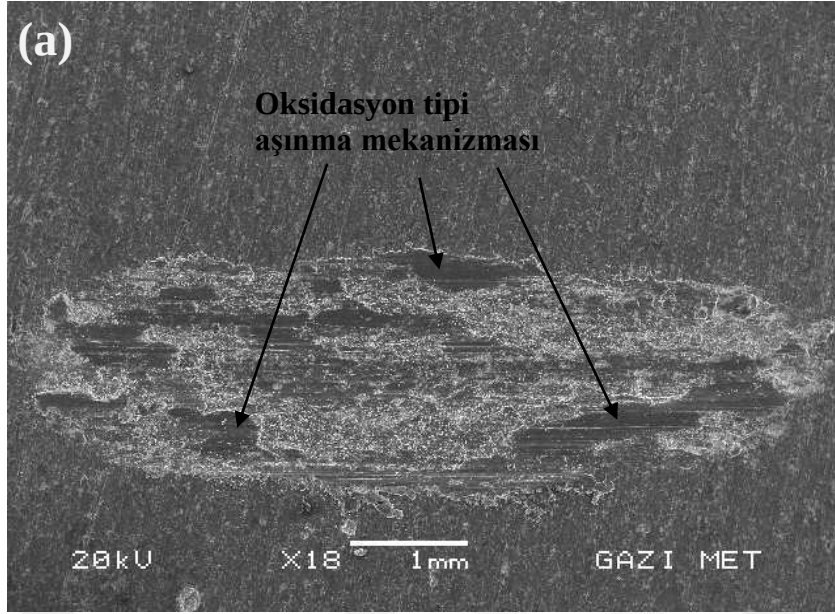


Şekil 7.39: %15 FCC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı
(a) x18 (b) x100.

Son olarak Şekil 7.40'ta %5 YFC takviyeli ve 7.41'de %15 YFC takviyeli olmak üzere kompozit numunelerin SEM aşınma izi görüntüleri verilmiştir. Daha önceki numunelerde de olduğu gibi benzer aşınma mekanizmalarına bu numunelerde de rastlanmıştır.



Şekil 7.40: %5 YFC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı
(a) x18 (b) x100.



Şekil 7.41: %15 YFC takviyeli kompozit numunenin 7 N yük altında aşınma yüzey fotoğrafı
(a) x18 (b) x100.

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1 Genel Sonuçlar

Bu çalışmada Al 6061 alaşım tozları ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında yüksek fırın cüruf tozu, ferrokrom cüruf tozu ve ticari bor karbür tozları ile harmanlanarak toz metalürjisi yöntemi ile kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin tribolojik özellikleri incelenerek aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Hem takviyesiz hem de takviyeli numuneler TM yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.
2. Takviyesiz olarak TM yöntemi ile üretilen Al 6061 numunesinin aşınma direnci diğer numunelere göre daha düşük olmuştur.
3. Numunelerin hacimsel sertlik değerleri düşük dereceden yükseğe doğru takviyesiz Al 6061, yüksek fırın cürufu ile takviyeli, ferrokrom cürufu ile takviyeli ve bor karbür tozları ile takviyeli kompozit numuneler olarak bulunmuştur.
4. Artan takviye oranına bağlı olarak numunelerin sertliklerinde artış olmuş ancak bu B₄C takviyeli numunelerde daha belirgin olmuştur.
5. Yükün artması ile numunelerin hacim kayıplarında artış görülmüştür.
6. En iyi aşınma direnci %15 oranında takviye edilen kompozit numunelerde görülmüştür.
7. Kuru-kayma işlemine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde tribolojik katman oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu katman oksit tabakası veya sır tabakası olarak da adlandırılmaktadır.
8. Aşınma mekanizmaları olarak plastik deformasyon ve oksidasyon aşınmaları tespit edilmiştir.

8.2 Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen verilere göre gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

1. Kompozit numune üretiminde takviye edici olarak kullanılan cüruflar farklı boyutlarda üretilerek bu boyut farkının aşınmaya olan etkisi araştırılabilir.
2. Özellikle nano boyuta gelen malzemelerin özellikleri makro boyutları ile kıyaslandığında önemli değişimler sergilemektedir. Bu bağlamda cürufların nano boyuta getirildikten sonra takviye edici özellikleri incelenebilir.
3. Takviye edicilerin oranları değiştirilerek daha rasyonel bir aşınma haritası çıkartılabilir.
4. Kompozit numunelerin abrasif aşınma dirençleri incelenerek buradaki tribolojik davranışları incelenebilir.
5. Kompozit malzeme üretiminde sıcak presleme işlemi için farklı sıcaklık ve basınç değerlerinin etkisi incelenebilir veya kompozit malzemeler ekstrüzyon gibi yüksek yoğunlaştırma işlemleri ile üretilir.
6. Düşük oranlarda YFC ve FCC partikülleri B_4C ile takviye edilerek hibrit kompozitler üretilir ve özellikleri incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Adeli, R., Shirmardiab, S., & Ahmadi, S. (2016). Neutron irradiation tests on B₄C/epoxy composite for neutron shielding application and the parameters assay. *127*, 140-146.
- Akbar, H. I., Surojo, E., Ariawan, D., & Probowo, A. (2020). Experimental study of quenching agents on Al6061–Al₂O₃ composite: Effects of quenching treatment to microstructure and hardness characteristics. *Procedia Materials Science*, 6.
- Angelo, P., & Subramanian, R. (2008). *Powder Metallurgy: siece technology and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Balaji, P., Arun, R., JegathPriyan, D., Madhan Ram, I., & Manikandan, E. (2015). Comparative Study of Al 6061 Alloy with Al 6061– Magnesium Oxide (MgO) Composite. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4).
- Balasubramanian, M. (2013). *Composite Materials and Processing*. CRS Press.
- Başer, M. S. (2018). Alüminyum Esaslı Titanyum Tri-Alüminit Takviyeli kompozitlerin Savurma Döküm Yöntemiyle Üretimi ve şınma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 90 s.
- Baydemir, E. (2018). Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilen AA6061 Matrisli Al₂O₃ Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 81 s.
- Bhaskar, K., Sundarrajan, S., Rao, B., & Ravindra, K. (2018). Effect of reinforcement and wear parameters on dry sliding wear of aluminum composites - A review. *5(2)*, 5891-5900.
- Chang, I., & Zhao, Y. (2013). Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications. *Elsevier*.
- Çelik, Y., & Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B₄C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2218-2224.
- Çolak, N., & Turhan, H. (2016). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Al-Si/B₄C Kompozit Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 28(2), 259-266.
- Dağdelen, E., & Ulus, A. (2016). Aluminum Sheet Production: Heat Treatment of Aluminium and Temper Designations of Aluminium Alloys. *18th International Metallurgy & Materials Congress*.
- Das, S. (2004). Development of aluminium alloy composites for engineering applications. *57(4)*, 325-34.
- Dere, M. A. (2019). Toz Metalurjisi ile Demir Bazlı Matrisli TiB₂ Takviyeli Kompozitlerin

Üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya, 130 s.

German, R. M. (1984). *Powder Metallurgy Science*. MPIF Princeton N.J. .

Gök, M. S. (2008). Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine TIG Kaynak Metoduyla Kaplanan Östenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 136 s.

Hasırcı, H., & Gül, F. (2010). B₄C /Al Kompozitlerin Takviye Hacim Oranına Bağlı Olarak Abrasif Aşınma Davranışının İncelenmesi.

Idusuyi, N., & Olayinka, J. (2019). Dry sliding wear characteristics of aluminium metal matrix composites: a brief overview. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3).

Kalaycıoğlu, A. S. (2010). SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı , Antalya, 132 s.

Kalemtaş, A. (2014). Makale. *Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış*.

Kalemtaş, A. (2015). Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler.

Kara, A. (2010). Karşıt Ekstrüzyon İşleminin Al Esaslı Seramik Takviyeli Kompozitlerde Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri

Karabulut, Ş., Gökmen, U., & Çinici, H. (2016). Study on the mechanical and drilling properties of AA7039 composites reinforced with Al₂O₃/B₄C/SiC particles. 93, 43-55.

Karakoç, H. (2017). TM yöntemiyle B₄C takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik özelliklerinin ve Balistik Performanslarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 155 s.

Karakoç, H., Karabulut, Ş., & Çıtak, R. (2018). Study on mechanical and ballistic performances of boron carbide reinforced Al 6061 aluminum alloy produced by powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, (148), 68-80.

Kaya, A. (2019). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29(38-45).

Kaykılarlı, C. (2018). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Grafen Katkılı Al-Cu Alaşımının Sertlik ve Aşınma Değerlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 83 s.

Kiraz, A. T. (2019). Polimer matrisli demiroksit takviyeli kompozit malzemenin kuru kayma

aşınma davranışı. Yüksek Lisans Tezi. Bartın: Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı 58 s.

- Kumdalı, F. (2008). Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yönemi İle Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul 73 s.
- Kurt, H. (2010). Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi, Ankara, 101 s
- Lloyd, D. (2013). Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. 39(1), 1-23.
- Metcalfe, A. (2016). *Interfaces in Metal Matrix Composites: Composite Materials* (Cilt 1). Elsevier.
- Munis, M. M. (2017). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Krom Karbür Takviyeli Bakır Matrisli Kompozit Malzemenin Üretilmesi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bingöl, 74 s.
- Nalçacıoğlu, C. (2017). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımlarında T6 ısıtım İşlem Parametrelerinin Elektrik İletenliği ve Korozyon Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 61 s.
- Nas, E., Gökkaya, H., & Sur, G. (2013). Sıcak presleme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin üretilebilirliği üzerine bir değerlendirme. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 3(2), 56-65.
- Nazik, C. (2013). Alüminyum Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 108 s.
- Orhan, A., Gür, A., & Çalgül, U. (2007). Al Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi. 4, 8-13.
- Ovalı, İ., Albayrak, S., Esen, C., & Karakoç, H. (2018). Effect of Gr Contents on Wear Properties of Al₂₀₂₄/MgO/Al₂O₃/Gr Hybrid Composites. 167, 02010.
- Polat, S. F. (2019). Al₂O₃, TiB₂ Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Sıcak Presleme ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya, 97 s.
- Prasad, S., & Asthana, R. (2004). Aluminium metal–matrix composites for automotive applications: Tribology considerations. 17(3), 445-53.
- Rajesh, G., Auradi, V., & Kori, S. (2016). Mechanical Behaviour and Dry Sliding Wear Properties of Ceramic Boron Carbide Particulate Reinforced Al6061 Matrix

- Composites. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 75(2), 1-8.
- Reddy, I., & Kaliveeran, V. (2019). Dry sliding friction and wear of Al 6061 and Al 6082 alloys under different normal loads. *Materials Today: Proceedings*.
- Sarı, F. N. (2010). Karşıt Ekstrüzyon İşleminin Al esaslı Seramik Takviyeli Kompozitlerde Tribolojik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. Kayseri, 119 s.
- Seçilmiş, K. (2017). Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Farklı Oranlarda B₄C Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman 86 s.
- Shorowordi, K., Laoui, T., Haseeb, A., Celis, J., & Froyen, L. (2003). Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 738 - 743.
- Şahin, Y. (2015). *Kompozit Malzemelere giriş*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Şanlı, A. (2017). Al 6061 matrisli SiC, Al₂O₃ ve yüksek fırın curufu takviyeli hibrit kompozitlerin yorulma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın,
- Şanlı, P. (2019). Farklı Oranlardaki Takviye Elemanlarıyla Katkılandırılmış Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 133 s.
- Tsai, S. W. (2018). *Introduction to Composite Materials*.
- Tsukerman, S. (1965). *Powder Metallurgy*. Pergamon Press.
- Upadhyaya, G. (1997). *Powder Metallurgy Technology*. Cambridge Int Science Publishing.
- URL-1. (27.04.2020). Dönüşüm Isıl İşlem San. ve Tic. Ltd. Şti: <http://www.donusumisilislem.com/yaslandirma.html>
- Uygur, İ., & Saruhan, H. (2004). Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri. 8(1).
- Uysal, F., & Bahar, S. (2018). Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. 19(1), 37-52.
- Vapur, H., Top, S., Teymen, A., & Türkmenoğlu, M. (2013). Elazığ Ferrokrom Tesisi Cürufalarının Agrega Özelliklerinin. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 77- 88.
- Vatansever, F., Ertürk, A., & Karabay, S. (2018). Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi. 20(60).
- Yalçınkaya, F. (2018). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Alüminyum Matrisli ve

Alümina Takviyeli Kompozit Malzemenin Abrasiv Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 113 s.

Yılmaz, H. (2017). Rwat (Rubber wheel abrasion test) ile endüstriyel atıkların Al 6061 üzerinde aşındırma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 67 s.

Zhang, H., Ramesh, K., & Chin, E. (2004). High Strain Rate Response of Aluminium 6092/B₄C Composites.



ÖZGEÇMİŞ