

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AlB₄C_p KOMPOZİTLERİNİN TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Met. Müh. Taner HACIOĞLU

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sibel DAĞLILAR (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1 Kompozit Malzemeler.....	3
2.1.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.1.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Elemanları ve Özellikleri.....	6
2.1.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları ve Özellikleri.....	6
2.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	7
2.2.1 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri.....	8
2.2.1.1 Karıştırma Döküm.....	9
2.2.1.2 İnfiltrasyon Yöntemi.....	10
2.2.1.3 Basınçlı Döküm Yöntemi.....	11
2.2.1.4 Püskürterek Biriktirme Yöntemi.....	12
2.2.2 Katı Faz Üretim Yöntemleri.....	13
2.2.2.1 Toz Metalurjisi Yöntemi.....	13
2.2.2.2 Difüzyonla Bağlanma Yöntemi.....	14
2.2.3 İki Faz (sıvı-katı) Üretim Yöntemleri.....	14
2.2.4 Biriktirme Üretim Yöntemleri.....	15
2.2.5 In-situ Üretim Yöntemi.....	15
2.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Arayüzey ve Islatma Sorunu.....	15
2.4 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler.....	17
2.4.1 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	17
2.4.1.1 Otomotiv Endüstrisi.....	17
2.4.1.2 Uzay/Uçak Endüstrisi.....	19
2.4.1.3 Savunma Endüstrisi.....	20
2.4.1.4 Diğer Uygulamalar.....	20
3. TOZ METALURJİSİ.....	22
3.1 Toz Üretim Yöntemleri.....	23
3.2 Presleme Öncesi İşlemler.....	25

3.2.1	Harmanlamanın Etkisi.....	26
3.3	Presleme.....	28
3.3.1	Presleme Yöntemleri.....	30
3.3.1.1	Soğuk Presleme Yöntemleri.....	30
3.3.1.1.a	Tek Yönlü Presleme.....	30
3.3.1.1.b	Soğuk İzostatik Presleme.....	30
3.3.1.2	Sıcak Presleme Yöntemleri.....	30
3.3.1.2.a	Sıcak Presleme.....	31
3.3.1.2.b	Sıcak İzostatik Presleme.....	31
3.4	Sinterleme.....	31
3.5	İkincil İşlemler.....	34
4.	TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ PARTİKÜL TAKVİYELİ MMK MALZEMELERE AİT UYGULAMA ÖRNEKLERİ.....	36
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
5.1	Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	42
5.2	Deneyde Kullanılan Cihazlar.....	45
5.3	Deneylerin Yapılışı.....	47
5.3.1	Birinci Aşama Deneylerin Yapılışı.....	47
5.3.2	İkinci Aşama Deneylerin Yapılışı.....	48
5.3.2.1	Karışım Tozlarının Hazırlanması.....	51
5.3.2.2	Karışım Tozlarının Preslenmesi.....	52
5.3.2.3	Numunelerin Sinterlenmesi.....	53
5.3.4	Numunelerin Mekanik ve Mikroyapısal Karakterizasyonu.....	53
6.	DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	55
6.1	Birinci Aşama Deneylerin Sonuçları ve Tartışma.....	55
6.1.1	Metalografik İnceleme.....	55
6.1.2	Yoğunluk Değerleri.....	58
6.1.3	Sertlik Değerleri.....	59
6.2	İkinci Aşama Deneylerin Sonuçları ve Tartışma.....	61
6.2.1	Metalografik İnceleme.....	61
6.2.1.1	Optik Mikroskop Görüntüleri.....	61
6.2.1.2	SEM Görüntüleri.....	67
6.2.2	Mekanik Muayene.....	78
6.2.2.1	Varyans Analizi (ANOVA)	78
6.2.2.2	Yoğunluk ve Porozite Değerleri.....	84
6.2.2.3	Sertlik Değerleri.....	89
6.2.2.4	Basma Mukavemeti Değerleri.....	91
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
	KAYNAKLAR.....	97
	ÖZGEÇMİŞ.....	103

SİMGE LİSTESİ

cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
dk	Dakika
g	Gram
J	Joule
L	Litre
mg	Miligram
ml	Mililitre
mm	Milimetre
m ²	Metrekare
nm	Nanometre
s	Saniye
µm	Mikrometre
°C	Derece Santigrat
γ_{lv}	Sıvı metalin yüzey gerilimi
γ_{sv}	Katının yüzey enerjisi
γ_{lv}	Katı/sıvı ara yüzey enerjisi
θ	Temas açısı
π	Pi sayısı

KISALTMA LİSTESİ

ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
AMK	Alüminyum Matrisli Kompozit
CVD	Chemical Vapour Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
E	Etki Yüzdesi
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağıtıcı X-ray Spektroskopisi)
FEG-SEM	Field Emission Gun Scanning Electron Microscope (Alan Emisyonlu Tarama Elektron Mikroskobu)
HV	Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
kPa	Kilopaskal
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MPa	Mega Paskal
MPIF	Metal Powder Industries Federation
PMK	Plastik Matrisli Kompozit
PSR	Matris-takviye Elemanı Partikül Boyut Oranı
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SEM	Scanning Electron Misroscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
TFD	Tam Faktöriyel Deney
TM	Toz Metalurjisi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	MMK malzemelerin üretiminde kullanılan uygulamalar.....	8
Şekil 2.2	Karıştırma döküm yöntemi ile MMK üretmek amacıyla tasarlanmış ergitme fırını.....	9
Şekil 2.3	Basıncsız infiltrasyon yöntemi.....	10
Şekil 2.4	Basıncılı infiltrasyon yöntemi.....	11
Şekil 2.5	Kompozit üretiminde kullanılan basıncılı döküm yöntemi.....	12
Şekil 2.6	Püskürterek biriktirme yöntemi.....	13
Şekil 2.7	Tabaka-fiber-tabaka difüzyon bağlama yönteminin uygulama aşamaları.....	14
Şekil 2.8	Temas açısı ölçümü için yapılan sessile drop testi.....	16
Şekil 2.9	Honda Prelude 2.0 1 modelinin döküm yöntemi ile üretilen Al silindir bloğu.....	18
Şekil 2.10	Mikrodalga radyo frekansı yayan, alçak yörünge iletişim uydularında kullanılan AlSiC kompozit malzemeden imal edilmiş bir parça.....	20
Şekil 2.11	Elektrik enerjisi iletiminde kullanılan elektrik kablosu.....	21
Şekil 3.1	Toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretimi.....	23
Şekil 3.2	Farklı boyutlarda partiküllerin rastgele paketlenme sisteminin iki boyutlu görünümü.....	28
Şekil 3.3	Presleme işleminin aşamaları.....	29
Şekil 3.4	Sıcak izostatik presleme işleminin aşamaları.....	31
Şekil 3.5	Sinterleme esnasında difüzyon ile malzeme taşınımı.....	32
Şekil 3.6	Sinterleme işleminin aşamaları.....	33
Şekil 3.7	Sinterleme işleminin üç aşaması esnasında preslenmiş numunenin yoğunlaşma eğrisi.....	33
Şekil 5.1	Deneylerde kullanılan 15 µm tane boyutlu saf Al tozunun partikül boyut dağılımı.....	42
Şekil 5.2	Deneylerde kullanılan 25 µm tane boyutlu saf Al tozunun partikül boyut dağılımı.....	42
Şekil 5.3	Deneylerde kullanılan 58 µm tane boyutlu saf Al tozunun partikül boyut dağılımı.....	43
Şekil 5.4	Deneylerde kullanılan harmanlanmış saf Al tozunun (54 µm) partikül boyut dağılımı.....	43
Şekil 5.5	Deneylerde kullanılan 10 µm tane boyutlu B ₄ C tozunun partikül boyut dağılımı.....	44
Şekil 5.6	Deneylerde kullanılan 32 µm tane boyutlu B ₄ C tozunun partikül boyut dağılımı.....	44
Şekil 5.7	Deneylerde kullanılan 59 µm tane boyutlu B ₄ C tozunun partikül boyut dağılımı.....	44
Şekil 5.8	Alşa marka eğme ve çekme cihaz.....	45
Şekil 5.9	Presleme işleminde kullanılan çelik kalıp.....	46
Şekil 5.10	Sinterleme işleminde kullanılan tüp fırın.....	46
Şekil 5.11	Birinci aşama deneylerde üretilen deney numuneleri.....	47
Şekil 5.12	İkinci aşama deneylerde üretilen deney numunesi.....	53
Şekil 5.13	Basma deneyinde uygulanan yük ile numune yüzeyinde oluşan çatlak.....	54
Şekil 6.1	Birinci aşama deneylerde değişik presleme basıncı uygulanmış numunelerin 350 x büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri (a) 200 MPa (b) 400 MPa (c) 600 MPa(d) 800 MPa.....	55

Şekil 6.2	600 Mpa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 2 saat süre ile Al/B ₄ C numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü.....	56
Şekil 6.3	600 Mpa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 3 saat süre ile Al/B ₄ C numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü.....	56
Şekil 6.4	600 MPa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 4 saat süre ile Al/B ₄ C kompozit numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü.....	57
Şekil 6.5	600 MPa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 5 saat süre ile Al/B ₄ C kompozit numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü.....	57
Şekil 6.6	Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B ₄ C numunelerin presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri.....	59
Şekil 6.7	Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B ₄ C kompozit numunelerin sertlik ile presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri.....	61
Şekil 6.8	10 µm partikül boyutuna sahip B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	62
Şekil 6.9	32 µm partikül boyutuna sahip B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	62
Şekil 6.10	59 µm partikül boyutuna sahip B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	63
Şekil 6.11	10 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	64
Şekil 6.12	32 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	64
Şekil 6.13	59 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	65
Şekil 6.14	10 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	66
Şekil 6.15	32 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	66
Şekil 6.16	59 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500.....	67
Şekil 6.17	10 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	69
Şekil 6.18	10 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B ₄ C içeren AMK malzemenin Al- B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	69
Şekil 6.19	32 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	70
Şekil 6.20	32 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B ₄ C içeren AMK malzemenin Al- B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	70
Şekil 6.21	59 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	71
Şekil 6.22	59 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B ₄ C içeren AMK malzemenin Al- B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	71
Şekil 6.23	10 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.24	10 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin Al-B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.25	32 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	73
Şekil 6.26	32 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin Al-B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	73

Şekil 6.27	59 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	74
Şekil 6.28	59 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin Al- B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	74
Şekil 6.29	10 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	75
Şekil 6.30	10 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin Al- B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	75
Şekil 6.31	32 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	76
Şekil 6.32	32 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin Al-B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	76
Şekil 6.33	59 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü.....	77
Şekil 6.34	59 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B ₄ C içeren AMK malzemenin Al-B ₄ C arayüzeyi SEM görüntüsü.....	77
Şekil 6.35	İki faktörün birbirleri olan etkileşimi.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Kompozit malzemelerin diğer malzeme gruplarına göre üstünlükleri ve eksiklikleri.....	4
Çizelge 2.2	AMK malzemelerin, takviyesiz Al alaşımları, PMK malzemeler ve SMK malzemelere göre üstünlükleri ve eksikliklerinin karşılaştırılması.....	5
Çizelge 2.3	MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları.....	7
Çizelge 2.4	Otomotiv endüstrisinde AMK malzemeleri kullanan firmalar ve üretiminde AMK malzemeler kullanılan çeşitli otomobil parçaları.....	19
Çizelge 3.1	Farklı boyutlu partiküllerin paketlenme yoğunluğuna etkisi.....	26
Çizelge 3.2	Farklı partikül boyutlarının paketlenmeye etkisi.....	27
Çizelge 5.1	Birinci aşama deneylerdeki üretim koşulları.....	48
Çizelge 5.2	Al/ B ₄ C kompozit malzeme üretimi için tam faktöriyel deney tasarımında kullanılan faktörler ve seviyeleri.....	49
Çizelge 5.3	Deney planı.....	50
Çizelge 5.4	Kaplama esnasında uygulanan işlemlerde kullanılan kaplama banyosu bileşenleri ve konsantrasyonları.....	52
Çizelge 6.1	Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B ₄ C numunelerin presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri.....	59
Çizelge 6.2	Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B ₄ C kompozit numunelerin sertlik ile presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri.....	60
Çizelge 6.3	ANOVA işleminin doğrusal model yöntemi çıktısı.....	78
Çizelge 6.4	Al/B ₄ C kompozit numunelerin yoğunluk değerleri için ANOVA tablosu.....	81
Çizelge 6.5	Al/B ₄ C kompozit numunelerin porozite değerleri için ANOVA tablosu.....	82
Çizelge 6.6	Al/B ₄ C kompozit numunelerin sertlik değerleri için ANOVA tablosu.....	83
Çizelge 6.7	Al/B ₄ C kompozit numunelerin basma mukavemeti değerleri için ANOVA tablosu.....	84
Çizelge 6.8	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemelerde yoğunluğa etkisi.....	85
Çizelge 6.9	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemelerde poroziteye etkisi.....	86
Çizelge 6.10	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemenin yoğunluk değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği.....	88
Çizelge 6.11	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemenin porozite değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği.....	89
Çizelge 6.12	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemelerde sertliğe etkisi.....	90
Çizelge 6.13	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemenin sertlik değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği.....	91

Çizelge 6.14	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemelerde basma mukavemetine etkisi.....	92
Çizelge 6.15	Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B ₄ C kompozit malzemenin basma mukavemeti değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği.....	93

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması ve yüksek lisans eğitimim esnasında beni yönlendiren, engin fikir ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Sibel DAĞLILAR'a en derin şükran duygularımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve eleştirilerinden faydalandığım değerli hocam Yrd. Doç Dr. Işıl KERTİ'ye, tezime ait deneylerde üretilmiş numunelerin SEM görüntülerinin alınmasında yardımlarını esirgemeyen İTÜ Kimya-Metalurjisi Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'den Prof. Dr. Gültekin GÖLLER'e, deneysel tasarım aşamasında bizi fikirleri ile yönlendiren ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında değerli fikirlerini cömertçe paylaşan İTÜ Kimya-Metalurjisi Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'den Doç. Dr. Özgül KELEŞ'e ve uygulama çalışmalarım esnasında bana destek veren ve yardımcı olan Met. Yük. Müh. Fatih TOPTAN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana destek olan, tez çalışmam sırasında karşılaştığım her zorluğu paylaşan aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma YTÜ BAPK tarafından 27-07-02-01 nolu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

Metal matrisli kompozit malzemelerin önemi bilim ve teknoloji alanındaki gelişmeler sonucunda gün geçtikçe artmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin en çok kullanılan türlerinden olan alüminyum matrisli kompozit malzemeler (AMK), düşük ağırlık, yüksek spesifik modülü, düşük termal genleşme katsayısı ve iyi aşınma dayanımı özelliklerine sahiptir. Al matrisli kompozitlere yüksek sertlik ve mukavemet kazandırmak amacıyla seramik (Al_2O_3 , SiC, B_4C) partiküller katılmaktadır. Al matrisli kompozit malzemeler, genel olarak otomobil, uçak-uzay, savunma ve spor endüstrisinde kullanılmaktadır. Partikül takviyeli AMK malzemelerin üretim yöntemlerinden biri toz metalurjisidir. Toz metalurjisi yönteminde ergitme yapılmadığı için, özellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip metal ve seramik malzeme içeren kompozitlerin üretim maliyeti düşmektedir.

Bu çalışmada, B_4C takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler iki aşamalı deney uygulaması ile toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Birinci aşama deneyde farklı presleme basıncı, sinterleme süresi ve atmosferinin Al/ B_4C kompozitinin yoğunluk, sertlik değerleri ile mikroyapısal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ölçümler, presleme basıncı artışı ile yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttığını, sinterleme parametrelerinin ise kompozit malzemenin özellikleri üzerinde presleme basıncına nazaran daha az etkiye sebep olduğu görülmüştür. Birinci aşama deneyler sonucunda optimum presleme basıncı 600 MPa olarak belirlenmiş ve ikinci aşama deneylerde kullanılması kararlaştırılmıştır. İkinci aşama deneylerde farklı B_4C takviye elemanı boyutu, matris-takviye elemanı arayüzeyi ile sinterleme süresi ve sıcaklığının kompozitin yoğunluk, sertlik, basma mukavemeti ile mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada deneysel tasarım kullanılmış ve ANOVA ile değişkenlerin malzemenin özelliklerini hangi oranda etkilediği incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, takviye elemanı ön işleminin Al/ B_4C kompozit numunelerinin özelliklerini en fazla etkileyen faktör olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum Matris Kompozitler, B_4C , Kaplama, Toz Metalurjisi, Arayüzey, Basma Mukavemeti.

ABSTRACT

Importance of metal matrix composite materials as a result of development in science and technology is increasing day after day. Aluminum matrix composites are one of the most current type of metal matrix composites, which its light weight, high strength, high specific modulus, low co-efficient of thermal expansion and good wear resistance properties. Ceramic particulates (Al_2O_3 , SiC , B_4C) were added to Al matrix composites for increasing high hardness and stiffness. Generally, Al matrix composites have been used for the automobile, airplane-aerospace, military and sport industries. Powder metallurgy (PM) is a production technique of particulate reinforced AMC's. Usage of powder metallurgy was decreased production costs of composites which containing metal and ceramic materials having high melting temperature due to not melting.

In this study, Al matrix composites reinforced with B_4C with a two stage experiment application were produced using powder metallurgy method. The first stage in experiment the effect of variant compaction pressure, sintering time and sintering atmosphere on density, hardness and microstructural properties were studied. The measurements showed that density and hardness values increased with increasing the compaction pressure. Sintering parameters on the properties of the composite material was observed less than effect of compaction pressure. As a result of the first stage experiments, optimum compaction pressure was determined 600 MPa and was decided using at second stage in experiments. Effect of variant reinforcement size, matrix-reinforcement interface and sintering conditions on microstructure and mechanical properties were investigated at B_4C reinforced aluminium matrix composites were produced with powder metallurgy process at the second stage in experiment. Experimental desing was used in this study and influence rate of variables to properties of materials analyzed by ANOVA. The result show that pre-treatment of reinforcing element which was the most important factor affecting properties of Al/ B_4C composite specimens.

Keywords: Aluminum Matrix Composites, B_4C , Coating, Powder Metallurgy, Interface, Compressive Strength.

1. GİRİŞ

Günümüzde, dünya genelinde istenen özellikleri sağladıkları için gelişmiş malzemelere devamlı artan biçimde ihtiyaç duyulmaktadır. Saf malzemelerin zorlayıcı mühendislik koşullarının gereksinimlerini karşılayamaması nedeniyle kendine has özelliklere sahip kompozit malzemelere olan gereksinim her geçen gün artmaktadır.

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK), birbirinden kimyasal ve fiziksel olarak farklı, en az iki fazdan oluşan ve bu fazların uygun şekilde birbiri içerisinde dağıtılması ile elde edilen, tamamen farklı özellikler sergileyen malzemelerdir. Genellikle metal bir matris içerisinde dağıtılmış fiber veya partikül takviyeden meydana gelirler. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı nedeniyle büyük ağırlık kazancı, olağanüstü boyutsal kararlılık, yüksek sıcaklık dayanımı, iyi yorulma ve aşınma direnci gibi avantajlara sahip MMK malzemelerin gelişimi son 20 yıl içinde, otomotiv, havacılık, elektronik ve spor endüstrisinde desteklenmektedir. Etkileyici mekanik, fiziksel özellikleri ve yüksek sıcaklık kapasitesi metal matrisli kompozit malzemelerin gelişimdeki itici güçtür.

Metal matris olarak alüminyum ile alüminyum alaşımları, sık olarak kullanılmaktadır. Ağırlık tasarrufu ve yüksek özgül mukavemet özelliklerine sahip alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla SiC, Al₂O₃, B₄C gibi sert seramik partiküller ilave edilmektedir.

Toz metalurjisi alüminyum matrisli kompozit malzemeler için mükemmel bir üretim yöntemidir. Bu yöntem kullanılarak yüksek hacim oranına sahip sert takviye elemanının homojen şekilde dağıtılması ve son ürünün tekrar işleme ihtiyaç duyulmadan üretilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca üretim sıcaklığının düşük olması, matris ile takviye elemanı arasında istenmeyen reaksiyonların en aza indirilmesine ve güçlü arayüzey reaksiyonlarının oluşmasını önler. Alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzemelerin üretiminde kullanılan toz metalurjisinin en büyük eksikliği, diğer yöntemlere nazaran daha maliyetli oluşudur.

Bu çalışmada, iki aşamada uygulanan deneylerde çeşitli parametrelerin B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Birinci aşama deneylerde farklı presleme ve sinterleme parametrelerinin numunelerin yoğunluk, sertlik ve mikroyapısal özelliklerini nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. İkinci aşama deneylerde, daha önceki çalışmada elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak, farklı partikül boyutuna sahip B₄C tozları içeren Al matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, takviye elemanı boyutu ve farklı matris-

takviye elemanı arayüzeyinin, B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemenin yoğunluğu, sertliği ve basma mukavemeti gibi mekanik özellikleri ile mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler genel olarak devamlı bir faz (matris) içerisinde dağılmış bileşen (takviye elemanı) ile bu fazın birlikte oluşturduğu, bu yapıyı oluşturan bileşenlerin (matris ile takviye elemanı) özellikleri, geometrileri ve bu bileşenler arasındaki ara yüzeyin özelliklerinden tamamen farklı, kendine has özellikler barındıran malzeme sistemi olarak tanımlanırlar (Surappa, 2003).

Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi incelendiğinde; insanlık tarihinde kullanımlarının çok eskilere dayandığı görülmektedir. Odun benzeri birçok doğal kompozit malzeme insanlar tarafından kullanılmıştır. Ayrıca, insanoğlu kompozit malzemelerin temel prensibi olan bir veya birden fazla malzemenin karıştırılması ve özelliklerin tek malzemede toplanması özelliğini keşfetmiş ve geliştirmiştir. Bu keşfe, çamur ve samanın karıştırılması ile elde edilen basit bir tuğla örnek verilebilir. 20. Yüzyılın son yarısı, kompozit malzemelerde dikkate değer gelişmelerin meydana gelmesi nedeniyle kompozit çağı olarak tanımlanmaktadır (Ralph vd., 1997).

Kompozit malzemelerin bilim ve teknoloji alanındaki gelişmeler sonucunda önemi gittikçe artmaktadır. Artık tek yönlü malzemeler teknolojinin ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Seramik malzemelerin çoğu yüksek sertliğe ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmakla birlikte, kırılgandır. Polimer malzemeler, düşük yoğunluk, nispeten düşük yumuşama ve bozunma sıcaklığı, büyük değişiklikler sergileyen dayanım ve süneklilik gibi özelliklere sahiptir (Smith, 2001). Örneklerde görüldüğü üzere, malzemeler istenen özellikleri tek başına karşılayamamaktadır. Bu nedenle kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve özelliklerinin geliştirilmesi konusunda yoğun çabalar sarf edilmektedir.

Kompozit malzeme genel olarak, matris ve takviye elemanı olarak adlandırılan iki bileşenden oluşmaktadır. Kompozit malzeme üretimi ile malzemelerin dayanım, korozyon ve aşınma direnci, yorulma ömrü, sıcaklığa bağlı davranışı, ısı ve ses yalıtımı, termal iletkenliği, ağırlık kazancı ve estetik özellikleri geliştirilebilir. Bu üstünlüklerin hepsini aynı anda gerçekleştirmek imkansızdır. Kullanım yerine ve özelliklerine bağlı olarak gereksinim duyulan özellikler artırılarak ve kontrol edilerek, isteğe bağlı malzemeler üretilebilmektedir. Kompozit malzemelerin eksiklikleri göz önüne alındığında, en önemli eksikliğin, üretim yöntemlerinin yerleşmemiş ve üretimin gerçekleştirilememiş olması nedeniyle oluşan yüksek maliyet olarak belirtilebilir (Hiçyılmaz, 1999). Kompozit malzemelerin diğer malzeme

gruplarına göre üstünlükleri ve eksiklikleri Çizelge 2.1’de listelenmiştir (Strong, 2007).

Çizelge 2.1 Kompozit malzemelerin diğer malzeme gruplarına göre üstünlükleri ve eksiklikleri (Strong, 2007)

ÜSTÜNLÜKLER	EKSİKLİKLER
– Düşük ağırlık	– Malzeme maliyeti
– Yüksek rijitlik	– Metal ve kompozit dizaynlarının direkt olarak nadiren değiştirilebilmesi
– Yüksek mukavemet	– Uzun geliştirme süresi
– Belli amaca yönelik özellikler (anizotropik)	– Zor üretim (Manuel, yavaş, çevresel problemler, düşük güvenilirlik)
– Karmaşık şekil elde etme kolaylığı	– Bağlayıcılar
– Toplam sistem maliyetinin az olması	– Düşük süneklik
– Kolaylıkla bağlanma	– Çözücü/nem etkisi
– İyi yorulma dayanımı	– Sıcaklık limitleri
– İyi sönümleme	– Hasar duyarlılığı
– Dahili enerji depolama ve serbest bırakma	– Gizli hasar
– Düşük ısı genleşme	
– Düşük elektrik iletkenliği	
– Gizlilik (düşük radar görünürlüğü)	
– Isıl iletim	

2.1.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genel olarak matris malzemesi veya takviye elemanının tipine göre sınıflandırılmaktadır. Kullanılan matris malzemesine göre kompozit malzemeler; polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK), seramik matrisli kompozit malzemeler (SMK) ve metal matrisli kompozit malzemeler (MMK) olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

PMK malzemeler, hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikleri yanında, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organ uygulamalarında; “optik elyaf” ve basınç ile elektrik üretebilen piezo elektrik özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır. PMK malzemelerde matris malzemesi olarak kopma mukavemeti, yüksek aşınma direnci, kimyasal dirençlerinin yüksek olması sebebiyle sıklıkla termoset matrisler kullanılmaktadır. Termoplastik polimerlerin çeşitleri çok fazla olmasına rağmen üretimlerindeki zorluklar ve

yüksek maliyeti nedeniyle matris olarak kullanılan termoplastikler sınırlıdır. PMK malzemelerde takviye elemanı olarak ise genellikle karbon, fiber ve aramid fiberler kullanılmaktadır.

Seramik matrisli kompozit malzemeler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için kullanılmaktadır. Sert ve kırılgan malzemeler olan seramik malzemeler, çok düşük kopma uzaması ile düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu nedenle takviye malzemesi ile takviye edilirler. SMK malzemelerde; matris malzemesi olarak Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 ve B_4C yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak genellikle Al_2O_3 ve SiC gibi seramik malzemeler fiber formuna getirilerek kullanılmaktadır (Eker, A. A., 2008). Çizelge 2.2’de AMK malzemelerin, takviyesiz Al alaşımları, PMK malzemeler ve SMK malzemelere göre üstünlükleri ve eksiklikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2 AMK malzemelerin, takviyesiz Al alaşımları, PMK malzemeler ve SMK malzemelere göre üstünlükleri ve eksikliklerinin karşılaştırılması (Froyen ve Verlinden, 1994)

	Takviyesiz Al alaşımlarına göre	PMK'lere göre	SMK'lere göre
	Yüksek özgül mukavemet Yüksek özgül rijitlik Yüksek sıcaklıkta sürünme direncinde artış Aşınma dayanımının artışı	Çapraz yönlü mukavemette artış Yüksek tokluk Yüksek hasar toleransı Çevresel etkilere karşı dayanımda artış Yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik Yüksek sıcaklıkta dayanım Yüksek sıcaklıkta dayanım	Yüksek tokluk ve süneklik Üretim kolaylığı Düşük maliyet
ÜSTÜNLÜKLER			
EKSİKLİKLER	Düşük tokluk ve süneklik Daha pahalı ve karmaşık üretim yöntemleri	Daha az gelişmiş teknoloji Özellik bilgisinin daha az oluşu Yüksek maliyet	Yüksek sıcaklıkta dayanımın düşük oluşu

Kompozit malzemelerin içinde MMK malzemeler, yüksek sertlik, yüksek elastiklik modülü, yüksek aşınma ve kırılma direnci, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek mukavemeti gibi pek çok özelliklere sahip olduğundan dikkat çeken malzeme gruplarıdır (Hunt ve Herling, 2004).

2.1.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Elemanları ve Özellikleri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan matris malzemesi, takviye elemanlarının arasına emdirilmeli, takviye elemanını ıslatabilmeli, kimyasal veya belli şartlarda yapışma bağı oluşturmamalı, takviye elemanlarını bir arada tutmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşma sağlayabilmelidir. Bir çok takviye elemanı gevrek ve kırılığandır. Matris bunların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı koruyup dirençlerini arttırmakta, kompozit üzerine gelen yükü takviye elemanına homojen olarak dağıtmakta ve kompozit içerisinde hata olasılığını azaltmaktadır (Ekinci, 2007). Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle Al ve alaşımları, Zn ve alaşımları, Cu ve Mg kullanılmaktadır (Basavarajappa vd., 2006).

2.1.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları ve Özellikleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin içerdikleri takviye elemanları, kimyasal içeriklerine göre karbürlü, oksitli, nitrürlü olmak üzere üç ana grupta; şekilsel özelliklerine göre ise partikül, visker, fiber ve metalik tel takviyesi olarak dört ana grupta toplanmaktadır. MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları Çizelge 2.3’de görülmektedir.

Partikül takviyeli MMK malzemeler en düşük maliyete sahip olup yüksek hacimde takviye ilavesine imkan sağlamaktadır. Partikül takviyeli kompozitlerin üretimi genellikle 3-200 µm çapında partikül takviyesi (Al_2O_3 , SiC, B_4C) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu üretim için genellikle döküm ve toz metalurjisi yöntemi uygulanmakta ve partiküller bazı durumlarda kaplanmaktadır.

Visker takviyeler ise yüksek uzunluk/çap oranına sahip tek kristalli malzemelerdir. Visker takviyeli kompozit malzemeler, izotropik ve anizotropik özellikler göstermektedir.

Çizelge 2.3 MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları (Chawla ve Chawla, 2006).

Takviye Tipi	Uzunluk/Genişlik Oranı	Çap , μm	Örnekler
Partikül	1 – 4	1 – 25	SiC, Al ₂ O ₃ , BN, B ₄ C, WC
Kısa fiber ve whisker	10 – 10000	1 – 5	C, SiC, Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ + SiO
Devamlı fiber	> 1000	3 – 150	SiC, Al ₂ O ₃ , C, B, W, Nb-Ti, Nb ₃ Sn

Fiber takviyeler ise sürekli ve süreksiz olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler yüksek sertlik ve mukavemete sahiptir ve devamlı fiber takviyesi olarak silikon karbür, grafit, alümina ve tungsten fiberler kullanılmaktadır. Kısa fiber ve partikül takviyeli MMK malzemeler ise, takviyesiz metal alaşımlarına göre daha yüksek sertlik, mukavemet ve boyutsal kararlılık göstermektedir. Fiberlerin malzemedeki ana görevi, malzemelerin yüke ve darbeye maruz kaldığı durumlarda matris üzerinde oluşan gerilimleri homojen olarak dağıtarak plastik deformasyonun oluşmasını engellemek ve kompozitlerin yapısal olarak kararlı kalmalarını sağlamaktır (Akın, 2006; Pinto, 2006).

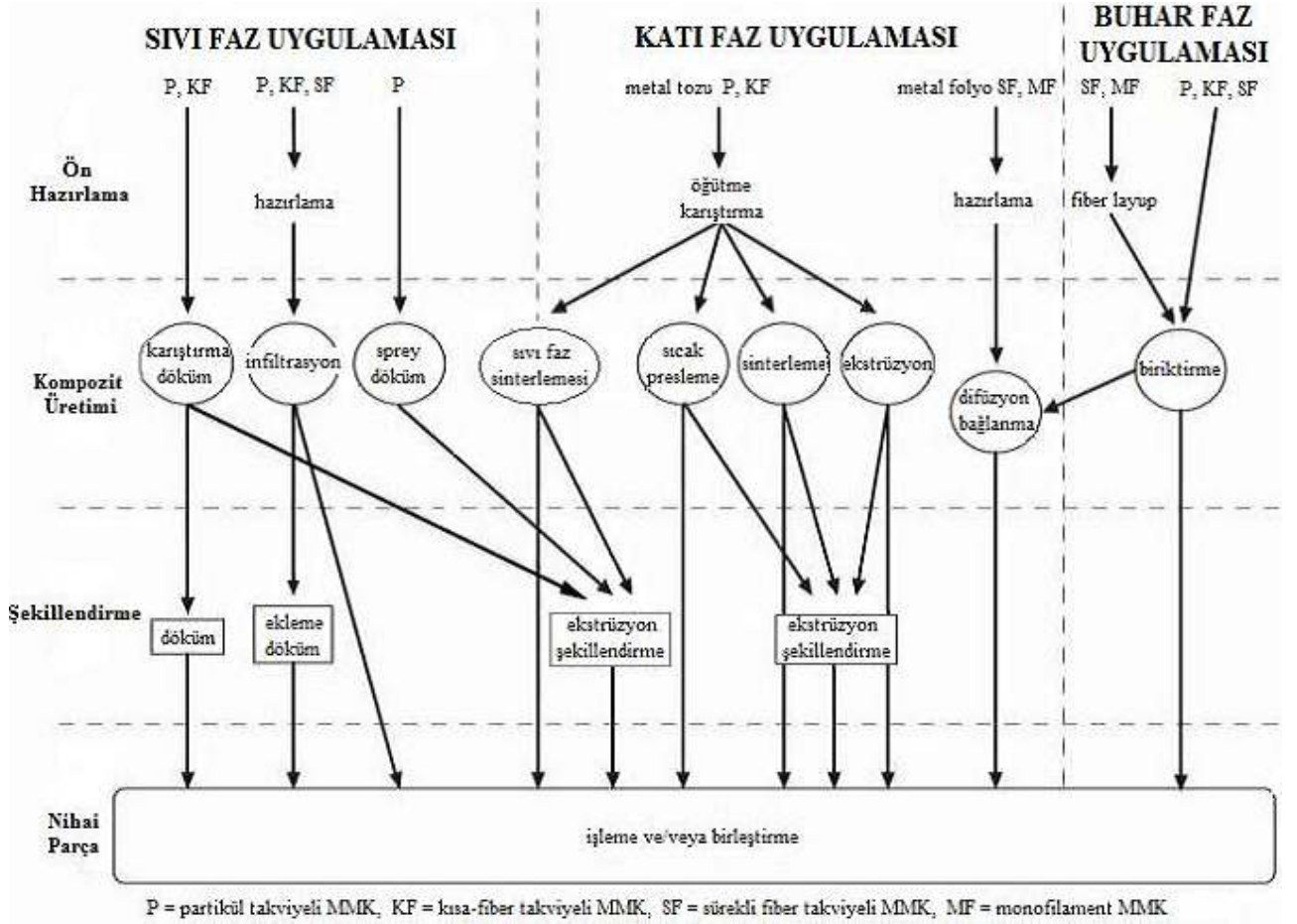
2.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemeler umut verici, yüksek mekanik ve termal özelliklere sahip olmalarına rağmen, sadece çok özel kullanım alanlarında uygulanmaktadır. Kompleks üretim gereksinimleri ve son ürünün yüksek maliyeti gibi eksiklikler metal matrisli kompozit malzemelerin yaygınlaşmasındaki en büyük engellerdir. Takviye elemanı imalatı ve kompozit üretim tekniklerindeki gelişmeler metal matrisli kompozit malzemelerin endüstriyel kullanımının artmasındaki en önemli sonuçlardır (Suresh vd., 1993).

Metal matrisli kompozit malzemelerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini optimize etme çabaları sonucunda her geçen yıl üretim teknolojileri evrim geçirmekte ve gelişmektedir. Üretim yöntemleri metalik matrisin üretim esnasındaki sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır. Dolayısıyla, metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri;

- Sıvı faz üretim yöntemleri
- Katı faz üretim yöntemleri
- İki faz (sıvı-katı) üretim yöntemleri
- Biriktirme üretim yöntemleri
- In-situ üretim yöntemi

olarak 5 gruba ayrılabilir (Rosso, 2006). MMK malzemelerin üretiminde kullanılan uygulamalar şematik olarak Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1 MMK malzemelerin üretiminde kullanılan uygulamalar (Mortensen vd., 2000).

2.2.1 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

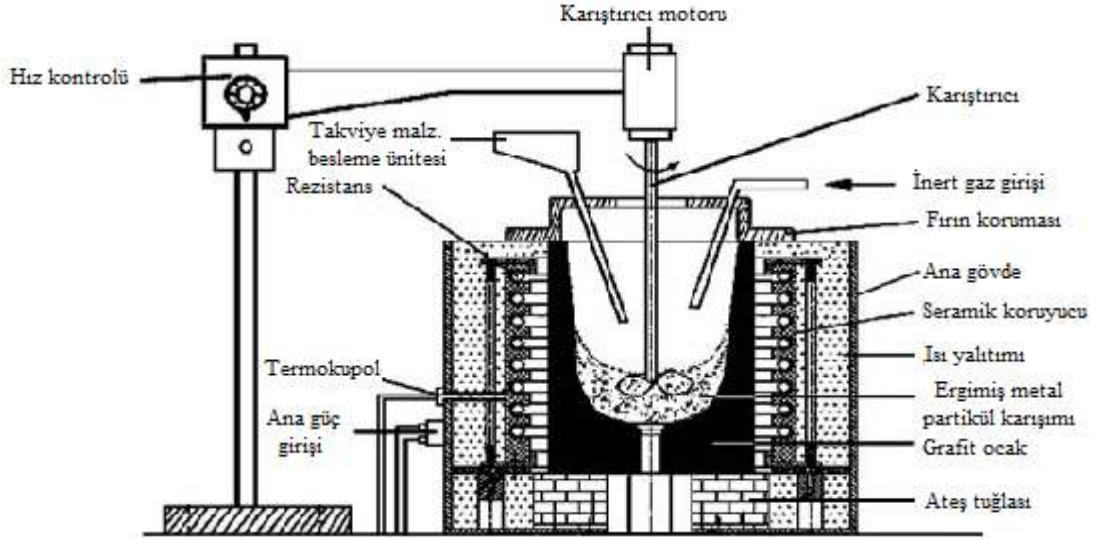
Metal matrisli kompozit malzemelerin sıvı faz yöntemi ile üretiminin günümüzde katı hal (özellikle toz metalurjisi) yönteminden daha ekonomik, avantajlı ve teknik öneme sahip olduğu bilinmektedir. Kompozit malzemelerin sıvı faz yöntemi ile üretimi genel olarak üçe ayrılmaktadır:

- a) Compo-casting veya karıştırma döküm
- b) İnfiltrasyon
- c) Sıkıştırma veya basınçlı döküm (Kainer, 2006).

2.2.1.1.Karıştırma Döküm

Karıştırma döküm yöntemi (Şekil 2.2), karıştırılan ergimiş metal içerisine seramik partiküllerin katılması, partiküllerin homojen dağıtılması için yapılan partikül beslemenin tamamlanması sonrasında karışımın karıştırılması ve ergiyik karışımın dökülmesini içeren bir yöntemdir (Kok, 2005).

Karıştırma döküm yöntemi, özellikle endüstriyel açıdan gelecek vaad eden bir yöntem olarak kabul edilir. Basit, esnek ve yüksek miktarda üretime olanak sağlaması başlıca üstünlükleridir. Bunun yanında, geleneksel metal üretim yöntemi kullanıldığından, ürünün son maliyeti az olmaktadır. Bu sıvı metalurji tekniği, metal matrisli kompozit malzeme üretim yöntemleri arasında en ekonomik olanıdır ve çok büyük boyutlarda malzeme üretimine olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.2 Karıştırma döküm yöntemi ile MMK üretmek amacıyla tasarlanmış ergitme fırını (Çanakçı vd., 2007)

Karıştırma döküm yöntemiyle hazırlanan metal matrisli kompozit malzemelerde, dikkat edilmesi gereken faktörler:

- Takviye elemanının homojen dağıtılmasının zorluğu
- Takviye ve matris malzemesi arasındaki ıslatılabilirlik
- Döküm metal matrisli kompozit malzemelerdeki gözeneklilik

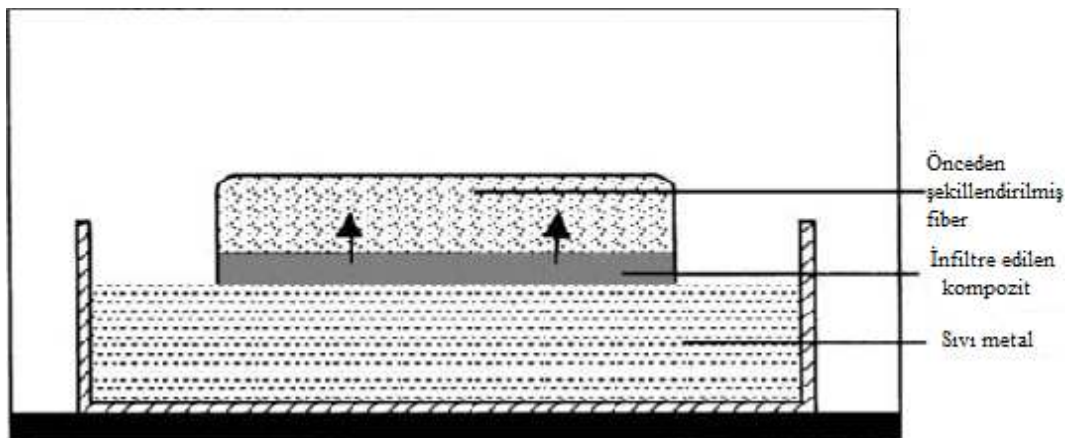
- Takviye ve matris malzemesi arasındaki kimyasal reaksiyonlar olarak sıralanabilir.

Üretilen kompozit malzemenin ideal özellikleri kazanması için; takviye elemanının matris alaşımı içerisinde homojen dağılması ve aralarındaki ıslatılabilirliğin optimize edilmesi gereklidir (Hashim vd., 1999).

2.2.1.2 İnfiltrasyon Yöntemi

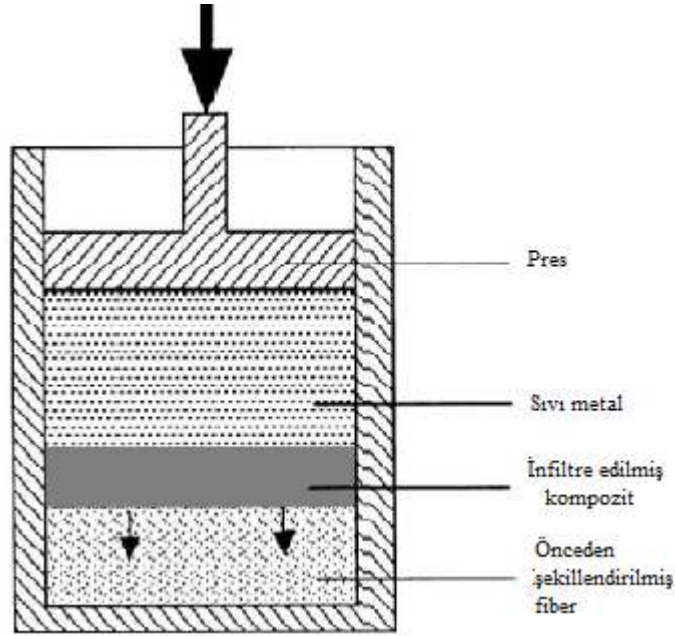
İnfiltrasyon yöntemi devamlı veya kısa fiber, whisker ya da partiküllerden üretilmiş gözenekli kompakt yapının içerisine sıvı metalin infiltre edilmesi olarak tanımlanabilir. İnfiltrasyon yönteminde etkin olan parametreler; takviye elemanının başlangıçtaki bileşimi, morfolojisi, hacim oranı ve sıcaklığı, infiltre edilen metalin başlangıçtaki bileşimi ve sıcaklığı ile dışarıdan uygulanan kuvvetin büyüklüğüdür. Kullanılan infiltrasyon yöntemine göre, metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanının hacim oranı % 10-70 oranında değişmektedir. Bu teknikle üretilen malzemelerde bazı kademelerde gözeneklilik ve lokal takviye elemanının heterojen dağılımı benzeri istenmeyen durumlar oluşabilmektedir (Surappa, 2003; Strong, 2007).

Bu yöntem genel olarak basınçlı ve basınçsız infiltrasyon olmak üzere ikiye ayrılır. Bazı kaynaklar vakumlu infiltrasyon yöntemini de üçüncü bir yöntem olarak tanımlamaktadır. Basınçsız infiltrasyon yönteminde ergimiş metal herhangi bir kuvvet uygulanmadan infiltre edilmektedir (Şekil 2.3). Bu teknik uygulanırken, pahalı ekipmanların kullanılmaması ve takviye elemanının hacim oranının kolaylıkla kontrol edilmesi gibi özellikleri ekonomik olmasını sağlar. Basınçsız infiltrasyon yönteminde azot veya argon gibi özel atmosferik koşullar gereklidir (Qin vd., 2008).



Şekil 2.3 Basınçsız infiltrasyon yöntemi (Suresh vd., 1993)

Basınçlı infiltrasyon yönteminde ise, ergimiş metal ile önceden şekillendirilmiş fiber arasında oluşan ıslatma sorununun üstesinden gelmek için mekanik bir kuvvet uygulanır (Şekil 2.4). Dıştan uygulanan basınç ile ilk amaçlanan kılcal (capillary) kuvvetleri bertaraf etmek olmasına rağmen, yüksek basınç üretim hızının artışı, kimyasal reaksiyonların kontrol edilmesi, matris mikroyapısının düzenlenmesi ve katılaşma büzülmesinin beslenmesi esnasında ürünün daha sağlam oluşu gibi faydalar sağlamaktadır. Presleme kuvveti hidrolik bir pres vasıtasıyla 10-100 MPa kuvvetle ergimiş metal üzerine uygulanarak ergimiş metalin önceden şekillendirilmiş fibere infiltre edilmesini sağlar. Kuvvetin gaz vasıtasıyla tatbik edildiği uygulamalarda bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda takviye elemanının etrafında vakum oluşturmak suretiyle ergimiş metal önceden şekillendirilmiş fibere infiltre edilmektedir (Strong, 2007).

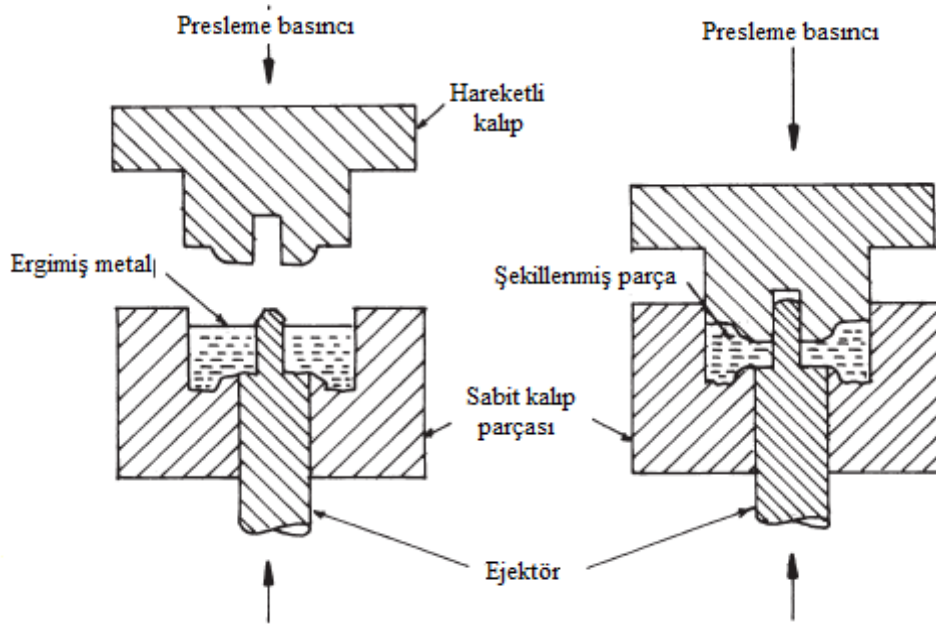


Şekil 2.4 Basınçlı infiltrasyon yöntemi (Suresh vd., 1993)

2.2.1.3 Basınçlı Döküm Yöntemi

Basınçlı döküm yöntemi (Şekil 2.5), son şekline yakın döküm kompozit malzemeler üretmek amacıyla, hidrolik plakalar arasına yerleştirilmiş kapalı kalıplarla uygulanan presleme basıncı altında ergimiş metale şekil verme tekniğidir. Pres uygulanmadan önce sıvı metalle doldurulacak önceden şekillendirilmiş seramikler önceden ısıtılmış kalıba yerleştirilir. Uygulanan presleme basıncı 100-200 MPa aralığındadır. Eğer metal, partikül, kısa fiber veya metal sıcaklığı gerekli değerden düşük ise, döküm ürünlerinin kalitesi de düşük olabilir. Bu proses ilk olarak devamlı fiberlerin basınçlı dökümü için geliştirilmiştir, ancak günümüzde partikül ve kısa fiberlerin ergimiş metal ile karıştırılması ve üretimi işleminde de

kullanılmaktadır (Ahmad, 2001).

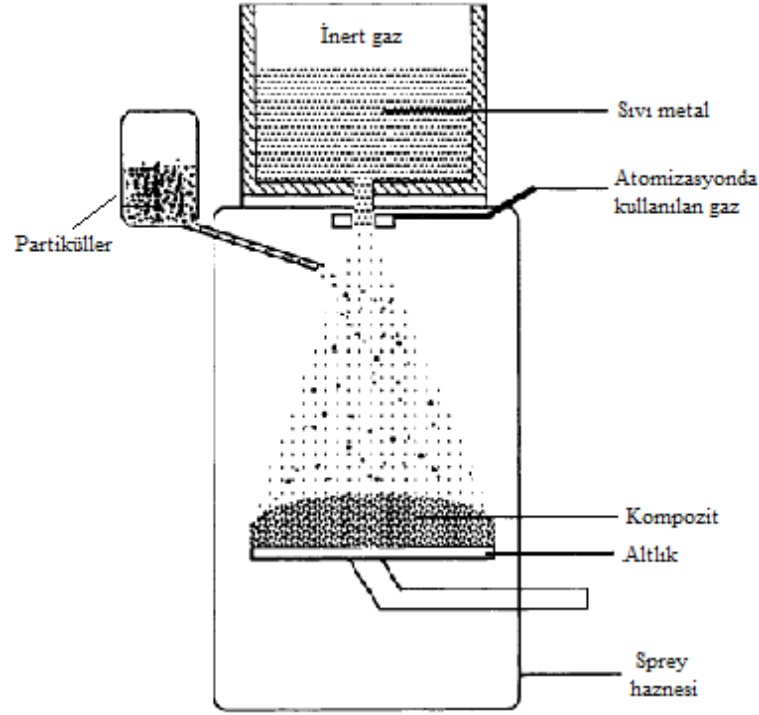


Şekil 2.5 Kompozit üretiminde kullanılan basınçlı döküm yöntemi (Ahmad, 2001)

2.2.1.4 Püskürterek Biriktirme Yöntemi

Püskürterek biriktirme yöntemi (Şekil 2.6), ergimiş metal damlacıklarının takviye elemanı ile birlikte bir altlık üzerine püskürtülerek biriktirilmesi yöntemidir. Buna alternatif olarak, takviye elemanı altlık üzerinde bulunmakta ve ergimiş metal bu yüzey üzerine püskürtülmektedir. Ergimiş metalin püskürtülme metodu ve takviye elemanı ile ergimiş metalin karışma yöntemi, çeşitli püskürterek biriktirme yöntemleri arasındaki farklardır. Püskürterek biriktirme yönteminde en önemli parametreler; metal damlacıklarının akma hızı (velocity), boyut dağılımı ve başlangıç sıcaklığı, takviye elemanının besleme hızı ile altlık malzemesinin sıcaklığı ile pozisyonudur. Çoğu püskürterek biriktirme yönteminde, ergimiş metalden istenen düzeyde damlacıklar üretmek için (genellikle 300 μm çapına kadar) gazlar kullanılır. Partiküller damlacık akışının içine veya damlacık akışıyla kullanılan gaz arasına enjekte edilmektedir.

Püskürterek biriktirme yönteminin sağladığı üstünlükler arasında, matris mikroyapısında küçük tane boyutu ve düşük segregasyon sayılabilir. Bunun yanında, ergiyik metal ve takviye elemanı kısa bir süre temas ettiğinden, ara yüzey reaksiyonları minimize edilir. Bu yöntem esnasında kullanılan gazların maliyetinin yüksek olması, toplanması ve giderilmesi gereken atık toz miktarının çok olması diğer yöntemlere göre eksiklikleridir (Suresh vd., 1993).



Şekil 2.6 Püskürterek biriktirme yöntemi (Suresh vd., 1993)

2.2.2 Katı Faz Üretim Yöntemleri

Katı faz üretim yöntemlerinde matris ile takviye elemanı arasındaki kimyasal etkileşim çok azdır. Katı faz yöntemlerinde matris ile takviye malzemesinin birbiriyle tam olarak karıştırılması gerekliliği vardır. Basit olarak ele alındığında, bu yöntemler matris tozunun takviye elemanı ile karıştırılması ve karışımın klasik toz metalurjisi yöntemleri ile (soğuk presleme ve sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme) numune eldesini amaçlar. Katı faz üretim yöntemleri arasında bulunan toz metalurjisi dışında sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem de, difüzyonla bağlanma yöntemidir.

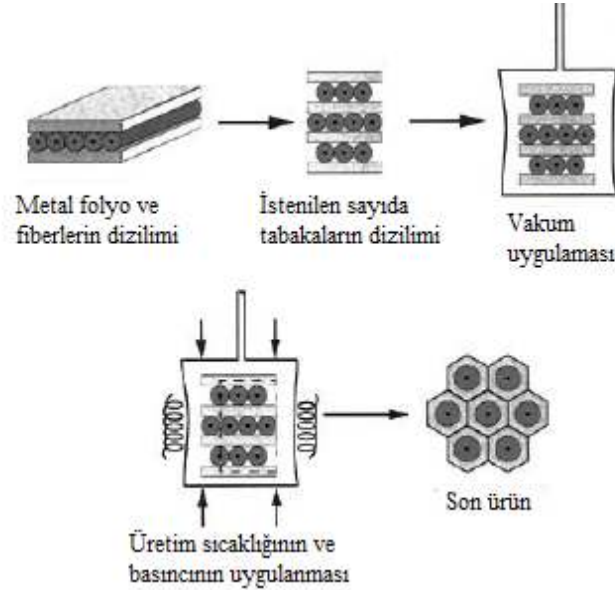
2.2.2.1. Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz Metalurjisi yöntemi daha çok partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bunun iki nedeni vardır: matris malzemesinin visker ve fiber takviye malzemeleri ile karıştırılması zordur ve presleme esnasında fiber takviye malzemesi nedeniyle kırılmaların gerçekleşmektedir. Matris ve takviye elemanının karıştırılmasından sonra, gözenekli yapıyı ortadan kaldırmak ve mukavemet sağlamak için presleme ve sinterleme işlemi yapılır. Sinterleme işleminde seramik takviye elemanının yoğunlaşma hızı metal matristen düşüktür ve seramik partiküller bu sıcaklıkta sinterlenmez ve yoğunlaşmaya katkıda bulunmazlar. Bu nedenle partikül takviye oranı % 40'ın üzerinde olan MMK malzeme üretimi oldukça zordur (Evans vd., 2003).

2.2.2.2. Difüzyonla Bağlanma Yöntemi

Difüzyonla bağlanma aynı veya farklı metallerin birleştirilmesinde sıkça kullanılan katı faz üretim yöntemidir. Bu yöntemin genel üstünlükleri, çok çeşitli matris malzemelerin kullanımı, fiber yönlendirilmesi ve dağılımının kontrolüdür. Eksik yönleri, uzun üretim zamanı, yüksek üretim sıcaklığı ve presleme kuvveti ile karmaşık parça üretimindeki zorluklardır. Difüzyonla bağlanma işleminde mekanik özelliklerin kontrolünde fiber dağılımı en önemli etkindir. Fiberlerin birbirine yakın ve temas halinde oluşu, fiber kırılması ve/veya matris hasarı ile sonuçlanmakta, sonuç olarak çok büyük ve lokal stres birikimleri oluşmaktadır. Bu parçaya uygulanan herhangi bir basınç, parçada kırılmalara ve hatalara yol açar.

Difüzyonla bağlanma yönteminde, matris alaşımdan üretilmiş folyolar, matris tozu ile organik bağlayıcıdan oluşan toz karışımı ile fiberler önceden belirlenmiş şekilde dizilir. Dizilmiş tabakalar vakum ortamda, sıcak presleme işlemiyle şekillendirilir (Şekil 2.7). Bu işlem dışında sıcak izostatik presleme işlemi kullanılmakta, kalıp içerisine konan parçaya her yönden eşit miktarda presleme kuvveti uygulanarak, karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan sağlanmaktadır (Chawla ve Chawla, 2006).



Şekil 2.7 Tabaka-fiber-tabaka difüzyon bağlama yönteminin uygulama aşamaları (Chawla ve Chawla, 2006)

2.2.3 İki Faz (Sıvı – katı) Üretim Yöntemleri

İki faz teknikleri matris elemanının faz diyagramında hem katı hem sıvı bölgede bulunduğu matris ve takviye elemanının karıştırılması işlemidir. İki-faz teknikleri; ospray biriktirme, compodöküm, çok fazlı malzemelerin değişken biriktirilmesi teknikleridir.

2.2.4 Biriktirme Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzeme üretimi için biriktirme teknikleri, kompozit formunu oluşturmak amacıyla fiberlerin matris malzemesi ile kaplanması ve yapısal şeklini sağlamak için difüzyon bağlama işleminden oluşmaktadır. Bu yöntemler ile üretilen kompozit malzemeler döküm yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerden daha homojendir. Biriktirme teknikleri; daldırma kaplama, elektrokaplama, spreyci biriktirme, CVD (kimyasal buhar biriktirme), PVD (fiziksel buhar biriktirme), spreyci biçimlendirme teknikleri olmak üzere 6 ana gruptan oluşmaktadır.

2.2.5 In-situ Üretim Yöntemi

In-situ üretim yöntemleri, ergimiş metal ile kullanılan gaz arasındaki reaksiyonun kontrolü ve takviye elemanlarını oluşturmak amacıyla bileşenler arasında endotermik reaksiyonları oluşturma olmak üzere iki safhadan oluşur. Kontrollü reaksiyonlara örnek olarak laksiye prosesi verilmektedir. Bu prosede Al ve Al_2O_3 karışımını elde etmek için ergimiş Al okside edilir (Torralba vd., 2003).

2.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Arayüzey ve İslatma Sorunu

Matrisi ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bölgesi, üretim esnasında etkilenen en önemli bölgedir. Ara yüzey bölgesinde oluşan sorunlar, kompozit malzemenin özelliklerinin azalmasında başrol oynamaktadır. Ara yüzey ile ilgili başlıca sorunlar; ara yüzeyde oluşan kimyasal reaksiyonlar, takviye elemanının ayrışma (azalma) ve matris ile takviye elemanı arasındaki ıslatmanın az oluşudur. Bu ara yüzey sorunları her sistem için farklılık gösterir. Bundan dolayı, bütün sistemler için uygulanabilir ve istenen ara yüzeyi dizayn etmek oldukça zordur. İstenen özelliklerde ara yüzey elde etmek için kullanılan bazı yöntemler: matris bileşiminin değiştirilmesi, takviye elemanının kaplanması ile özel işlemlerin uygulanması ve proses parametrelerinin kontrol edilmesidir. Tüm bu yöntemler arasında en önemli teknik, takviye elemanının kaplanmasıdır.

Ara yüzey davranışının, metal matrisli kompozit malzemelerin özellikleri üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Kompozit malzemelerin takviye elemanı ile güçlendirilmesi, matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının güçlü olmasına bağlıdır. Güçlü bir ara yüzey yükün matristen takviye elemanına transferini ve aktarılmasına olanak sağlar.

İslatma, MMK malzeme üretiminde ara yüzeyde güçlü kimyasal bağ oluşumu için gerekli önemli bir konudur. Ergimiş metal yüzeyindeki oksit filmleri ile takviye elemanının yüzeyine absorblanmış kirleticiler ergimiş metal ile takviye elemanı arasında ıslatma sorunu

yaratmaktadır. Bir katının bir sıvı tarafından ıslatılması olarak tanımlanan temas açısı (θ), Young-Dupre eşitliği (2.1) ile ilişkilendirilebilir:

$$\gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (2.1)$$

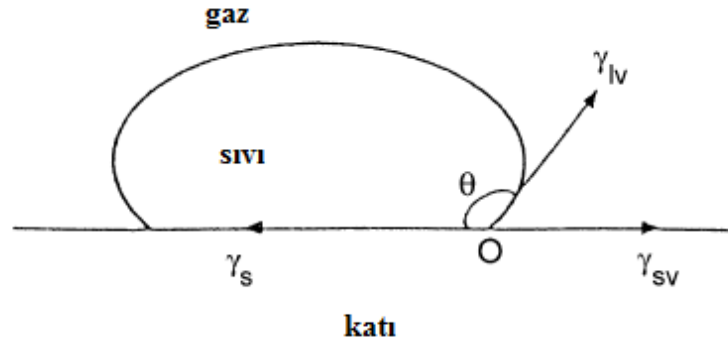
γ_{lv} sıvı metalin yüzey gerilimini, γ_{sv} katının yüzey enerjisini ve γ_{sl} ise katı/sıvı ara yüzey enerjisini ifade eder. Yukarıdaki eşitlik göz önüne alındığında, temas açısı, katının yüzey enerjisinin (γ_{sv}) artması, katı/sıvı ara yüzey enerjisinin (γ_{sl}) azalması ya da sıvının yüzey geriliminin azalmasıyla azalmaktadır (Rajan vd., 1998). Islatılabilirlik temas açısının büyüklüğü ile tanımlanabilir:

$\theta = 0$, mükemmel ıslatma,

$\theta = 180$, ıslatma yok

$0 < \theta < 180$, kısmi ıslatma

Yukarıda görüleceği üzere, temas açısının az olması ıslatılabilirliği arttırmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Temas açısı ölçümü için yapılan sessile drop testi (Hashim vd., 2001)

Kompozit malzemelerde istenilen özelliklerde ara yüzey bölgesi elde edilmesi birkaç faktöre bağlıdır:

- a) Matris malzemesinin takviye elemanını istenen derecede ıslatması için matris ve takviye elemanı arasındaki temas
- b) Ara yüzeyde çok düşük oranda kimyasal reaksiyon ve fazlar arasında düşük veya hiç difüzyon meydana gelmemesi

Sıvı matris malzemesinin takviye elemanını ıslatabilmesi için bazı işlemler uygulanmaktadır:

A) Matris alaşımına alaşım elementleri eklemek: Alaşım elementlerinin katılması ıslatmayı destekleyerek takviye elemanı ile matris arasında bağlanmayı artırır. Magnezyum, kalsiyum, titanyum veya zirkonyum gibi metallerin ergimiş metale eklenmesi, ergiyeğin yüzey gerilimini, katı/sıvı ara yüzey enerjisini azaltmakta ve meydana gelen kimyasal reaksiyonlarla

ıslatmanın desteklenmesini sağlamaktadır.

B)Seramik partiküllerini kaplamak: Genellikle metalik olmayan partiküllerin yüzeylerini sıvı metalle ıslatmak oldukça zordur. Partiküllerin çeşitli metallerle kaplanması, ıslatmanın arzulanan şekilde gerçekleşmesini sağlar. Bunun nedeni, sıvı metallerin genellikle katı metalleri kolayca ıslatması, inter-metalik bileşenlerin durumu veya karşılıklı çözünmenin oluşmasıdır.

C)Seramik partiküllere işlem uygulama: Partiküller ergiyik içerisine dağıtılmadan önce, ısıtma işlemi kullanılarak partikül yüzeyinden absorblanmış gazlar oluşması sağlanır ve partikülün yüzey özellikleri değiştirilir. Bu yöntem uygulanarak, seramik partikül yüzeyinde oksit tabakası oluşturulabilmekte ve ıslatma kabiliyeti arttırılmaktadır.

Bu yöntemlere ek olarak, ultrasonik, çeşitli aşındırma (asit uygulaması) teknikleri, uygun atmosfer içerisinde ısıtma ve partikül yüzeylerinin temizlenmesi yöntemi ile ergiyik-partikül etkileşimi arttırılır (Hashim vd., 2001).

2.4 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler

Alüminyum alaşımları çok uzun bir süredir MMK malzemelerde en sık kullanılan matris malzemelerindendir. Bunun en önemli nedeni, birçok kullanım alanı için birinci gereklilik olan düşük yoğunluk özelliğidir. Mg ve Ti gibi düşük yoğunluğa sahip alaşımlarla karşılaştırıldığında, maliyeti daha azdır. Alüminyum alaşımlarının yüksek mukavemet, işlenebilirlik, ulaşılabilirlik, süneklik ve korozyon dayanımı gibi özellikleri, AMK malzemelerin otomotiv, uzay/uçak, savunma, elektronik, spor endüstrisi benzeri gelişmiş kullanım alanlarında kullanılmasına imkan vermektedir (Froyen ve Verlinden, 1994; Torralba vd., 2003).

2.4.1 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler genel olarak otomotiv, uzay/uçak, savunma, elektronik, spor endüstrisi ve nükleer alanda kullanım alanı bulmaktadır.

2.4.1.1 Otomobil Endüstrisi

Düşük ağırlıklı malzemeler grubundan olan Al matrisli kompozit malzemeler sahip oldukları gelişmiş özelliklere ve performansa bağlı olarak çeşitli otomotiv parçalarının üretiminde kullanılabilmektedir. Son kırk yıllık süreçte, partikül takviyeli MMK malzemelerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle son on yılda Al matrisli kompozit malzemelerin, parça üretiminin istenilen teknolojik düzeye ulaşması ile otomotiv

endüstrisinde ticari kullanımı mümkün hale gelmiştir (Prasada ve Asthana, 2004).

AMK malzemeler son yıllarda özellikle hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, düşük ısı genleşme katsayıları ve iyi aşınma dirençleri gibi özellikleriyle otomobillerde motor pistonu, silindir gömleği, fren diski/kampanası gibi uygulamalarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır (Toptan vd., 2006). Şekil 2.9'da Honda Prelude 2.0.1 modelinin döküm yöntemi ile üretilen Al silindir bloğu görülmektedir.



Şekil 2.9 Honda Prelude 2.0 1 modelinin döküm yöntemi ile üretilen Al silindir bloğu (Miracle, 2005)

Otomotiv endüstrisinde başta SiC/Al ve Al/Al₂O₃ olmak üzere Al matrisli partikül takviyeli kompozit malzemeler başarıyla üretilmektedir. Al matrisli kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanımına verilebilecek en göze çarpan örnek, Honda şirketi tarafından 90'ların başında Al motor bloklarını geliştirmesidir. Çizelge 2.4'te otomotiv endüstrisinde AMK malzemeleri kullanan firmalar ve üretiminde AMK malzemeler kullanılan çeşitli otomobil parçaları verilmiştir (Prasada ve Asthana, 2004).

Çizelge 2.4 Otomotiv endüstrisinde AMK malzemeleri kullanan firmalar ve üretiminde AMK malzemeler kullanılan çeşitli otomobil parçaları (Prasada ve Asthana, 2004)

Üretici	Üretilen parça ve kompozit
Duralcan, Martin Marietta, Lanxide	Pistonlar, Al/SiCp
Duralcan, Lanxide	Fren diskleri, calipers, liners, Al/SiCp
Nissan	Piston kolu, Al/SiCw
Toyota	Piston halkaları, Al/Al ₂ O ₃ (saffil) & Al/Boriaw
Zollner	Pistonlar, Al/fiberfrax
Honda	Motor blokları, Al/Al ₂ O ₃ – Cf
Lotus Elise, Volkswagon	Fren diskleri, Al/SiCp
Chrysler	Fren diskleri, Al/SiCp

2.4.1.2 Uzay/Uçak Endüstrisi

Uzay/uçak endüstrisinde kullanılacak malzemelerde istenen en önemli özellik ağırlık kazancı sağlamasıdır. Ayrıca malzemelerin daha yüksek dayanım, mukavemet, yüksek sıcaklık kabiliyeti, hasar toleransı (süneklik, kırılma tokluğu ve yorulma dayancını içerir) ve korozyon dayanımına sahip olması beklenir. AMK malzemeler istenen özellikleri sağlama potansiyeline sahiptirler. Bunlar; uçak yapısal iskeleti, motoru ve uzay uygulamalarında kullanılan malzemeler olarak iki grupta incelenebilirler.

Uçak yapısal iskeleti yapımında, birinci amaç yüksek mukavemete sahip malzemeler geliştirmektir. Geliştirilen malzemeler SiC ve Al₂O₃ fiber takviyeli Al-alaşımları, yüksek mukavemetli Al alaşımları ve SiC partikül takviyeli Al-Li alaşımlarıdır. Al matrisli kompozit malzemelerin uçak endüstrisindeki uygulama alanları, uçak arka dikey kanatları, çeşitli kanat parçaları, kapılar, tekerlekler, hız kesiciler benzeri uçak parçalarıdır. Uçak motorunda istenen özellikler ise, daha uzun kullanma ömrü, yüksek itme gücü-ağırlık oranı, yüksek yakıt etkinliği ve az maliyettir. Al-bazlı MMK malzemeler uçak motorunun çeşitli parçalarının (düşük ve yüksek basınç komproser muhafazası ve pervane diskleri) yapımında da kullanılmaktadır (Froyen ve Verlinden, 1994; Hunt ve Herling, 2004).

Uzay uygulamalarında, dünya yörüngesinde bulunan tipik bir uydu, vakum, termal radyasyon, atomik oksijen, mikrometeorlar ve çeşitli yabancı maddeler gibi istenmeyen durumlarla karşılaşır. İlk başarılı uygulama B/Al kompozitinin kullanımıdır. Bu kompozitin titanyum

alaşımından yapılan parça yerine kullanımı ile % 45 oranında ağırlık kazancı sağlanmıştır. Bir diğer uygulama ise, Gr/Al kompozitinin Hubble Uzay Teleskobunda kullanılmasıdır (Rawal, 2001). Şekil 2.10'da mikrodalga radyo frekansı yayan, alçak yörünge iletişim uydularında kullanılan AlSiC kompozit malzemeden imal edilmiş bir parça görülmektedir.



Şekil 2.10 Mikrodalga radyo frekansı yayan, alçak yörünge iletişim uydularında kullanılan AlSiC kompozit malzemeden imal edilmiş bir parça (Miracle ve Donaldson, 2001)

2.4.1.3 Savunma Endüstrisi

Savunma endüstrisinde Al matrisli kompozit malzemelerin balistik alanında kullanılması düşünülmektedir. Balistik alanında kullanılan seramik malzemeler yüksek sertlik ve aşınma direnci, yüksek elastik modülü ve yüksek mukavemet, hafiflik gibi özelliklerinden dolayı, kendilerine çarpan mermiyi kırma, aşındırma ve söndürme özelliklerine sahiptir. Fakat düşük toklukları sorun yaratmaktadır. Bu nedenle, seramiklere kıyasla daha yüksek tokluğa sahip olan seramik-metal kompozit malzemelerin alternatif bir malzeme olması düşünülmektedir. Sonuçta, yüksek kırılma tokluğuna sahip, yapısal işlevi de olan, hafif ve çoklu çarpmalara dayanıklı B_4C -Al kompozit malzemelerinin kullanılması planlanmaktadır (Arslan, 2001). Güvenli ölçümler sonucunda SiC whisker'li AMK malzemeler gelişmiş askeri tanklarda ayak paleti olarak kullanılmakta ve üretilmektedir. Bu şekilde tankın ağırlığını azaltmada önemli yol katedilmiştir (Güneş, 2006).

2.4.1.4 Diğer Uygulamalar

Metal matrisli kompozit malzemeler, düşük termal genleşme katsayısı, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik katsayısı gibi özelliklere sahip olduğundan, elektrik parça uygulamalarında tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerin elektrik ve termal özellikleri matris malzemesine bağlıdır ve takviye/hacim oranı ile düşmektedir. Mikrodalga ve elektronik devre (package) malzemelerinin maruz kaldığı, 65 ile 125 °C arasında termal çevrim yüklemesi, parçaların hasarına sebep olmaktadır. Bu amaçlar için, hacimce % 20 ile 40 arasında SiC_p takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi iletiminde kullanılan elektrik kablosu Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11 Elektrik enerjisi iletiminde kullanılan elektrik kablosu (Miracle ve Donaldson, 2001)

Bunun dışında tenis raketleri, kayaklar, bisiklet çatısı (frame), tekerlek jantları ve golf sopası gibi sportif alanda kullanılan malzemelerin üretiminde de alüminyum matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Tüm bu uygulamalarda düşük ağırlık için yoğunluk ve aynı zamanda mukavemet için elastisite modülü önemli malzeme özellikleridir. Örnek verilecek olursa, grafit/epoksi raketlerle karşılaştırıldığında, %20 SiC partikül takviyeli Al matrisli kompozit raketler, düşük maliyetlerde %25 titreşim azalması ve mukavemet artışı sağlamıştır (Ahlatçı, 2003).

Al matrisli kompozit malzemelerin potansiyel kullanım alanlarından bir diğeri, nükleer korumadır. B_4C takviyeli Al matrisli kompozit malzeme içerisinde bulunan B_4C 'ün izotop B_{10} 'u doğal yoldan absorblaması, nükleer koruma alanında harcanmış yakıt çubuklarının depolanmasında bu kompozit türünün kullanılmasına imkan sağlamaktadır (Hunt ve Herling, 2004).

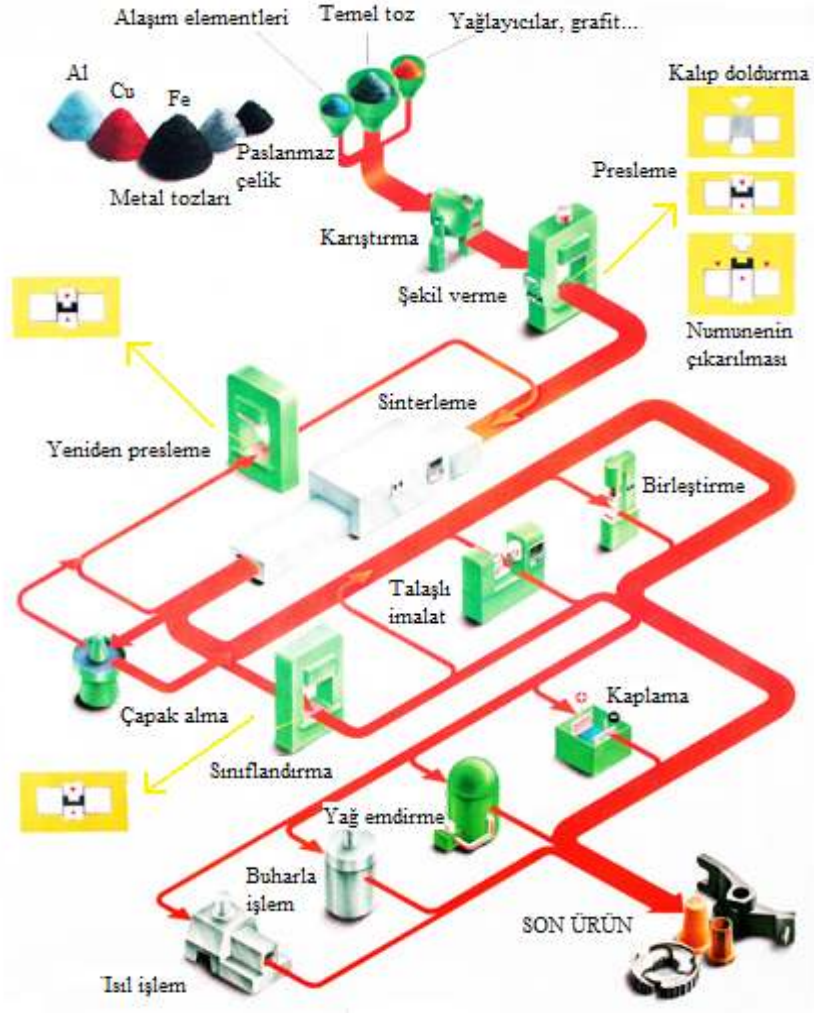
3.TOZ METALURJİSİ

İleri bir imalat yöntemi olan toz metalurjisi, teknolojik malzemelerin üretilmesine çok uygun, küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlayan bir yöntemdir. Toz metalurjisi, son şekle yakın üretim süreçleri olarak sinterleme, sıcak izostatik presleme, toz metal enjeksiyonu, nano-parçacık teknikleri, mekanik alaşımlama gibi konularla sürekli büyüyen bir pazara sahip olan ileri teknolojilerden biridir. Çok karmaşık şekilli ürünlerin daha kolay bir şekilde elde edilmesinde uygulanan bir teknolojidir (Ünlü vd., 2009).

Toz metalurjisi, metalik ve metalik olmayan farklı malzemeler kullanılmasına olanak veren bir yöntemdir. Son ürünün metalurjik içeriği ve yoğunluğu kolayca kontrol edilmekte ve toz metalurjisi günümüz dizayn mühendislerinin gün geçtikçe dikkatini çekmektedir. Üretim hızı çok yüksektir, tozun kalıba doldurulması ve toz karışımının şekillendirilmesi bir saniyeden kısa sürede gerçekleşmektedir. İşlem esnasında meydana gelen toz kaybı sinterleme sırasında oluşan hatalı parçalarla oluşan kayıplar dışında oldukça düşüktür. Bu nedenle toz metalurjisinin maliyet verimliliği fazlasıyla yüksektir. Sinterlenmiş parçaların yüzeyleri oldukça düzgündür ve ikincil işlemlere gerek duyulmaz. Bu özellik tungsten karbür, titanyum karbür ve elmas matrisler benzeri işlenmesi zor malzemelerin işlenmesine imkan verir. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların gözeneklilik miktarı kolaylıkla kontrol edilmekte ve filtre parçaları, kendinden yağlamalı burçlar gibi özel parçalar üretilebilmektedir. Ayrıca küçük, karmaşık şekilli parçalar da bu yöntemle basit bir şekilde üretilmektedir.

Toz metalurjisinin birçok üstünlüğü yanında bazı eksiklikleri de mevcuttur. Yüksek mukavemetli, aşınma direnci yüksek çelikler kalıp üretiminde kullanıldığından, toz metalurjisinde kullanılan kalıplar oldukça maliyetlidir. Toz metalurjisi yönteminin döküm, dövme gibi geleneksel yöntemlere alternatif olması, en az 15000 parça gibi yüksek üretim miktarları ile mümkündür. Az miktarda parça üretimi bu yöntemi ekonomik olmaktan çıkarır. Azami toz metalurjik parça boyutu presleme sırasında gerekli presleme basıncı nedeniyle sınırlanmakta, bundan dolayı küçük boyutlu parçalar üretilmektedir. Dizayn sınırlamaları da toz metalurji üretimini etkilemekte, üretilen parçalarda kalınlık/genişlik oranı 3:1 oranını geçmemektedir. Bazı toz karışımları kullanılarak üretilen sinterlenmiş parçalarda, kırılma problemi oluşmakta, bu problem parçaların tekrar preslenmesi ile asgari düzeye indirilmektedir (Waters, 1996).

Toz metalurjik ürünler değişik üretim metodlarıyla imal edilmekle birlikte, toz metalurjisi yöntemi; toz üretimi, tozun yağlayıcı ve karıştırıcı maddeler ile birlikte harmanlanması, soğuk presleme ve sonrasında yapılan gaz giderme işlemi, sinterleme veya sıcak presleme ve son olarak ikincil işlemler sıralaması ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretimi [3]

3.1 Toz Üretim Yöntemleri

Toz metalurjik tozların üretiminde atomizasyon, mekanik alaşımlama, öğütme, elektroliz ve kimyasal indirgenme yöntemleri kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir.

Atomizasyon ile toz üretimi, bir indüksiyon fırınında hazırlanan ergiyik metalin bir veya daha fazla nozul vasıtasıyla sıvı metal huzmesi halinde bir hazneye akıtılması ve bu huzme üzerine basınçlı gaz veya su jeti uygulaması ile toz üretimi aşamalarından oluşmaktadır. Elde edilen toz malzeme haznenin altında toplanmaktadır. Genel olarak su ve gaz atomizasyon yöntemi

olarak iki ana gruba ayrılır.

Gaz atomizasyon yönteminde gaz olarak su buharı, hava, hidrojen, azot ve argon gazları kullanılmaktadır. Ortamın inert olması sebebiyle üretilen tozun kirlilik içermemesi, tozun homojen ve küresel geometriye sahip olması bu yöntemin sağladığı üstünlüklerdir. Su atomizasyon yönteminde, ergiyik metal üzerine su jeti uygulanması ile toz malzeme üretilmektedir. Suyun soğutma hızının gaza nazaran yüksek olması, toz malzemede kimyasal ayrışmanın daha az, tozların şeklinin daha düzensiz, toz yüzeyinin daha kaba ve oksitli olmasına neden olmaktadır (Verlinden ve Froyen, 1994).

Mekanik alaşımlama, bilye ve elemental toz karışımı kullanılarak bir öğütücü veya yüksek enerji değirmeninde mikro alaşımlı kompozit toz üretme yöntemidir. Mekanik alaşımlama esnasında, metal tozunun karışma, soğuk kaynak, kırılma ve tekrar kaynak gibi işlemlere tekrar tekrar maruz kalması, malzeme içerisindeki inklüzyonların homojen dağılımını ve sonuç olarak homojen malzeme eldesini sağlamaktadır (Upadhyaya, 1996).

Öğütme işleminde, metallerarası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılğan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler. Fakat öğütme işlemi bir çok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar.

Elektroliz, elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçilerek, bir çok metalin sünger veya toz durumunda katot uzerinde biriktirilmesi işlemidir. Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilebilir.

Kimyasal indirgenme, en çok demir tozlarının üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin olduğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir. Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir. Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır [2].

3.2 Presleme Öncesi İşlemler

Metal tozlarının presleme işlemi ile şekillendirilmesini kolaylaştırmak ve tozlara istenen özellikleri kazandırmak için çeşitli ön işlemler gereklidir. Bu işlemler; tavlama, tozun karıştırılması, toz boyutunun azaltılması, toz granülasyonu (topaklaştırma) ve harmanlamadır.

Tavlama işlemi toz yüzeyinde bulunan oksijen, hidrojen ve azotun yüzeyden uzaklaştırılması ve tozun yumuşatılarak daha kolay preslenmesi için yapılır. Bu işlem için atmosfer korumalı veya vakum fırını kullanılmakta ve sinterleme etkisini azaltmak için tavlama sıcaklığı düşük tutulmaktadır.

Önceden çeşitli yöntemlerle hazırlanmış alaşımlı veya saf metal tozları parçada istenen bileşimi sağlayacak oranlarda bağlayıcı ve yağlayıcı gibi katkı maddeleri ile birlikte karıştırıcılarda homojen olarak karıştırılır. Karıştırıcı tipi, geometrisi, hacmi ve iç yüzeyinin alanı, karıştırma öncesi ve sonrası toz malzemesinin hacmi, karışımı oluşturan tozların karakteristik özellikleri, besleme ve boşaltma aletlerinin tipi, konumu ve sayısı, karıştırma hızı, süresi, sıcaklığı, ortamı ile nem gibi birçok değişken karıştırma işlemi etkilemektedir. Karıştırmanın verimliliği, toz karışımının karıştırıcı hacminin % 50-60'ını oluşturması ile maksimum seviyeye çıkmaktadır. Optimum karıştırma süresi 5-30 dakika olmakla birlikte, kullanılan malzeme ve istenen özelliklere göre değişim göstermektedir.

Boyut küçültme işlemleri çoğunlukla dar partikül boyut dağılımlarında yüzey alanını arttırmak amacıyla uygulanmakta ve homojen olmayan karışımlarda dağılım ve kimyasal reaksiyon oranının iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

Preslemede kullanılacak metal tozları gerek presleme kolaylığı, gerekse parça dayanımı açısından aynı metal tozundan farklı partikül boyutlarında belli oranlarda biraraya getirilerek bir harman elde edilir. Bu işlem mekanik alaşımlama amacıyla farklı malzeme tozlarının da istenen oranlarda karıştırılması ile yapılabilir. Harmanlama ile ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 3.2.1'de verilmiştir.

Tungsten, molibden ve WC-Co gibi düzgün sert tozların preslenmesi ve presleme sonrası kullanımı oldukça güçtür. Bu nedenle, bu tozlara granülasyon yöntemi uygulanarak büyük topaklar oluşturulur. Toz-organik bulamacı devamlı karıştırıcılarda karıştırılmakta ve oluşan topaklara ısı uygulanarak uçucu ajan ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Sonuçta sert, sıkı paketlenmiş topaklar elde edilir.

Partiküllerin bir araya gelerek toplanmaları olarak tanımlanabilen paketlenme, presleme ve sinterleme davranışlarını etkilemesi açısından önemlidir. Özellikle presleme verimliliği

partikül paketlenmesine bağlıdır (Bakkaloğlu, 2004).

3.2.1 Harmalamanın Etkisi

Koordinasyon sayısı veya bir partikülün temas nokta sayısı, paketlenme esnasında partiküllerin (paketlenme faktörü) geometrik düzenlenmesini tanımlayan önemli bir parametredir. Tek boyutlu partiküllerin paketlenmesi ile: (1) koordinasyon sayısı kesin aralıkta düzenlenmekte, (2) Paketleme metodu ile ortalama koordinasyon sayısı değişmekte, (3) Genellikle, yoğun paketlenmede yüksek koordinasyon sayısına ulaşılmaktadır (Pinson vd., 1998).

Kepler 1611 yılında tek boyutlu partiküllerin hücrenin en fazla $\pi/\sqrt{18} \approx 0,740480$ yani %74'lük kısmının doldurulabileceğini savunmuş ve bu teori Hales tarafından 1998 yılında kanıtlanmıştır (Hsiaang, 1993). Farklı boyutlu partiküllerin paketlenmesinde ise partiküller arasında kalan boşluklar daha küçük boyutlu partiküller ile doldurulmakta ve paketlenme faktörü artmaktadır. Horsfield'in paketlenme hakkında yaptığı çalışmalarda elde ettiği değerler Çizelge 3.1'de görülmektedir. Her defasında bir önceki partikülden daha küçük çapa sahip partikül eklendiğinde, boşluklar sonradan eklenen partiküller tarafından doldurulmakta ve teorik boşluk değeri azalmaktadır. Pratikte ise bu yüksek yoğunluklara oluşmak oldukça güçtür (Gotoh vd., 1997).

Çizelge 3.1 Farklı boyutlu partiküllerin paketlenme yoğunluğuna etkisi (Gotoh vd., 1997)

Partikül boyutu	D_{P1}/D_{P2}	Boşluk
Tek boyutlu	1	0,2595
İki farklı boyutlu	0,414	0,207
Üç farklı boyutlu	0,225	0,190
Dört farklı boyutlu	0,177	0,158
Beş farklı boyutlu	0,116	0,149
Çok ince	İnce	0,039

Farklı boyutlarda partiküllerin paketlenmesinde en önemli koşul, boşlukların ikinci bileşenin ilavesi ile tüm hacimde bir genleşme oluşmadan doldurulmasıdır. Partiküllerin tane boyutlarının birbirlerine yakın olması durumunda, temas noktalarında diğer partikülü temas noktalarından iterek hacimsel genleşme meydana gelerek yoğunluk değerinin düşmesine sebebiyet verir. Buna engel olmak için, Furnas bağıntısında faydanılabilir. Bu bağıntıya göre, maksimum paketlenme bileşiminde büyük partiküllerin hacim yüzdesi küçük partiküllerin

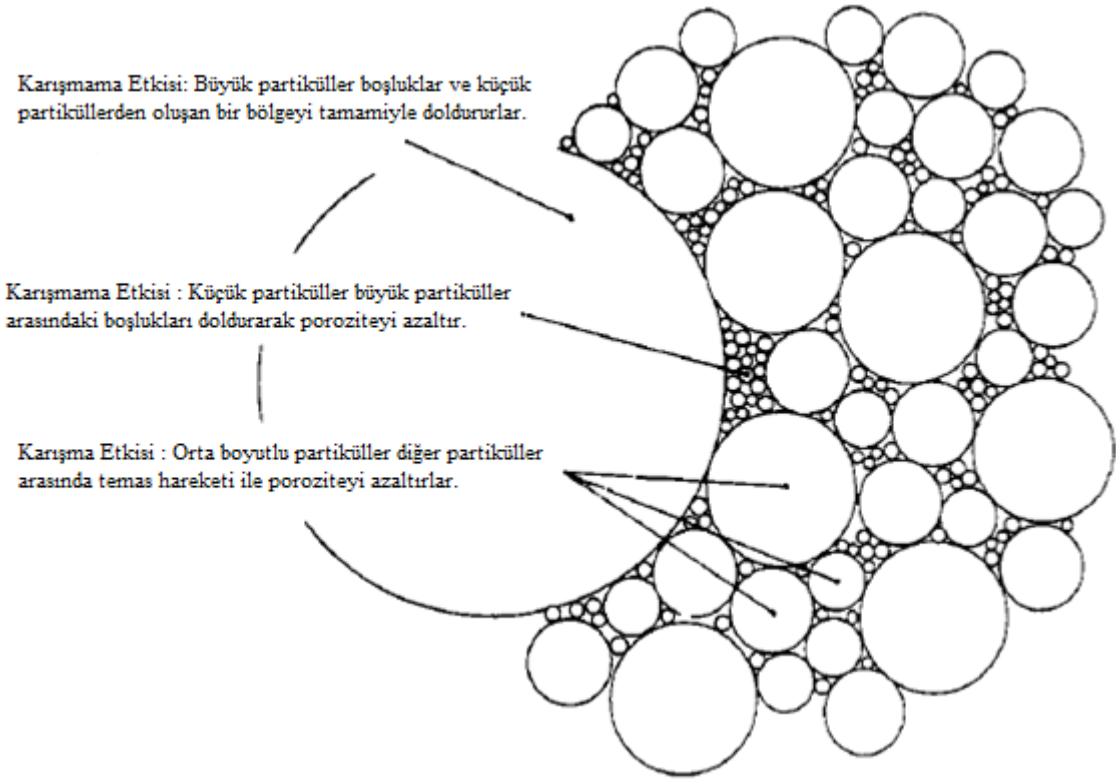
hacim yüzdesinden daha büyüktür. Minimum spesifik hacim (maksimum paketlenme) doyma noktası olarak adlandırılır. Belli bir bileşim sınırına kadar büyük partiküllerin % miktarı arttığında paketlenme yoğunluğu artar.

Pinson, Zou, Yu, Zulli ve McCarthy yaptıkları çalışmada, farklı boyutlara sahip partiküllerin farklı hacim oranlarında porozitenin değişimine değinmişlerdir. İlk karışımda tek tip partiküller kullanıldığında en yüksek porozitenin olduğu, yapı içerisinde farklı boyutlarda partiküllerin kullanımı ile porozitenin azaldığı net olarak gösterilmiştir. Paketlenme içerisinde büyük partikül miktarının artması ile porozite azalmış, diğer bir anlamda daha yoğun bir yapı elde edilmiştir (Pinson vd., 1998).

Çizelge 3.2 Farklı partikül boyutlarının paketlenmeye etkisi (Pinson vd., 1998)

Karışım	Hacim Oranı (%)			Ortalama Koordinasyon Sayısı	Porozite
	25,4 mm	12,7 mm	6,4 mm		
1	-	100	-	6,240	0,406
2	28	72	-	6,442	0,388
3	72	28	-	6,199	0,379
4	28	-	72	6,158	0,345
5	50	-	50	6,428	0,308
6	72	-	28	6,275	0,299

Farklı boyutlarda partiküllerin rastgele paketlenme sisteminin iki boyutlu görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir. Büyük partiküllerin arasındaki boşluklu yapının daha küçük partiküller tarafından doldurulduğu şekilde görülmektedir.



Şekil 3.2 Farklı boyutlarda partiküllerin rastgele paketlenme sisteminin iki boyutlu görünümü (Yu ve Standish, 1991)

3.3 Presleme

Toz metalurjisinde presleme aşaması en önemli işlemi oluşturmaktadır. Preslemede ulaşılan yoğunluk değerleri toz metalurjisi yöntemi ile imal edilen parçaların mekanik özelliklerini birinci dereceden etkiler. Presleme ile imal edilecek parçanın istenen düzeyde şekil ve boyutlara, yoğunluğa ve mekanik dayanıma sahip olması amaçlanır. Metal tozlarının preslenmesi sırasında, presleme koşullarına ve toz malzemesinin özelliklerine bağlı üç önemli olay gerçekleşir. Bu olaylar:

- a) Paketlenme (Toz tanelerinin düzen değiştirmesi, köprülerin çökmesi, boşlukların dolması) : Presleme amacıyla tozun kalıba doldurulması esnasında, toz taneleri arasında köprü oluşur. Özellikle toz karışımlarının harmanlanması hem presleme basıncının ve preslenmiş yoğunluğun artmasını sağlar.
- b) Elastik-plastik deformasyon (Kontakt deformasyonu, toz tane yüzey yuvarlaklığının düzelmesi, oksitlerin kırılması, mekanik zincirleme): Tanelerin temas noktaları artan basınçla oluşan elastik-plastik deformasyon sonucu büyür. Bu esnada tane yüzeylerindeki oksitler kırılarak daha iyi zincirleme şeklinde temas yüzeyleri oluşur.

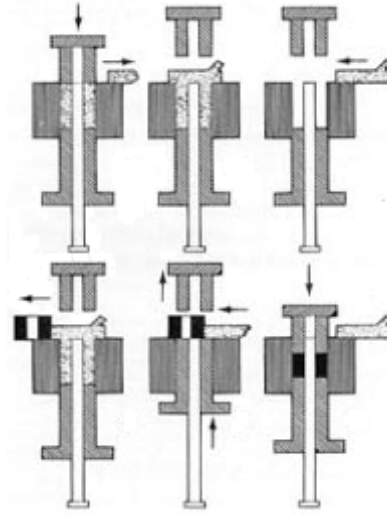
c) Sünük tozlarda soğuk sertleşme, kırılğan tozlarda kırılma: Plastik deformasyon gösteren tozlarda ilk olarak elastik deformasyonla sıkışan taneler basınçla toz malzemesinin akma sınırına ulaştığında taneler şekil değıştirtir, boşluklar azalır ve relatif yoğunluk artar. Presleme işleminde kaba metal tozlarında ulaşılan yoğunluk değeri ince tozlara nazaran daha yüksektir (Bakkaloğlu, 2004).

Toz malzemelerin preslenmesi işleminde gerçekleştirilmek istenen amaçlar;

- Metal tozunu istenilen boyutta kompakt hale getirmek
- Sinterleme sonrası elde edilen son ürünlerde herhangi bir boyutsal değışikliğin oluşmaması
- İstenilen gözenek tipi ve oranının elde edilmesi
- Preslemeden sonra yapılacak işlemler için gerekli mukavemeti sağlamaktır.

Presleme işlemi genel olarak;

- İletim için gerekli miktarda toz karışımının kalıba doldurulması,
- İstenen preslenmiş (green) yoğunluk ve mukavemete ulaşmak için presleme basıncının uygulanması,
- Üst zımbanın numuneden uzaklaştırılması (Preslenmiş numunenin zarar görmemesi için dikkatli davranılır),
- Numunenin kalıp içerisinden çıkartılması olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Presleme işleminin aşamaları [1]

3.3.1 Presleme Yöntemleri

Presleme yöntemlerini soğuk ve sıcak presleme olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Bu iki yöntem arasındaki fark, sıcaklığın uygulanış zamanıdır. Soğuk preslemede, preslemeden sonra sıcaklık (sinterleme) uygulanırken, sıcak preslemede presleme basıncı ve sıcaklık birlikte uygulanmaktadır.

3.3.1.1 Soğuk Presleme Yöntemleri

Soğuk presleme yöntemlerinde malzemeler herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmadan sadece presleme basıncı uygulanarak şekillendirilir.

3.3.1.1.a Tek Yönlü Presleme

Tek yönlü presleme işleminde presleme kuvveti tek yönlü uygulanır. Presleme basıncı arttıkça, paketlenme artmakta, gözeneklilik miktarı azalmaktadır. Yüksek presleme basıncında partiküller birbirleri ile soğuk kaynamakta ve deforme olmakta, preslenmiş numunenin mukavemeti artmaktadır. İşlem esnasında kalıp duvarları ile toz karışımı arasındaki sürtünmenin azaltılması amacıyla yağlayıcılar kullanılmaktadır. Presleme işlemi sonrasında numune kalıp içerisinden çıkartılır (Verlinden ve Froyen, 1994).

3.3.1.1.b Soğuk İzostatik Presleme

Soğuk izostatik presleme işleminde kauçuk veya plastikten yapılmış esnek bir kalıp toz karışımı ile doldurulur ve yağ, su gibi bir sıvı vasıtasıyla presleme kuvveti kalıbın bütün kısımlarına eşit miktarda uygulanır. Presleme basıncı değerleri 1400 MPa'a kadar çıkmakla birlikte, bu işlem genellikle 380 MPa'dan daha düşük presleme basıncında uygulanır.

Soğuk izostatik presleme işleminin, preslenmiş numunede homojen ve yüksek yoğunluk (tek yönlü preslemeye nazaran % 5-10 daha fazla), yüksek mukavemet, azaltılmış iç gerilimler, ilave malzeme kullanılmaksızın presleme yapılması, kompleks parçaların üretimi, düşük malzeme ve ikinci işlem maliyeti gibi üstünlükleri vardır. Bunun yanında, preslenmiş numunenin boyutsal kararlılığı, yüzey kalitesi, kalıp ömrü ve üretim hızı tek eksenli preslemeye göre daha kötüdür (Upadhyaya,1996).

3.3.1.2 Sıcak Presleme Yöntemleri

Bu yöntemlerde sıcaklık ve basınç birlikte uygulanmaktadır. Şekillendirme ve sinterleme işlemleri aynı anda yapıldığı için, yüksek yoğunluk ve hızlı üretim sağlanır. Bu yöntemde soğuk preslemeye göre daha yüksek mukavemet, sertlik, yoğunluk yanında numunede gaz

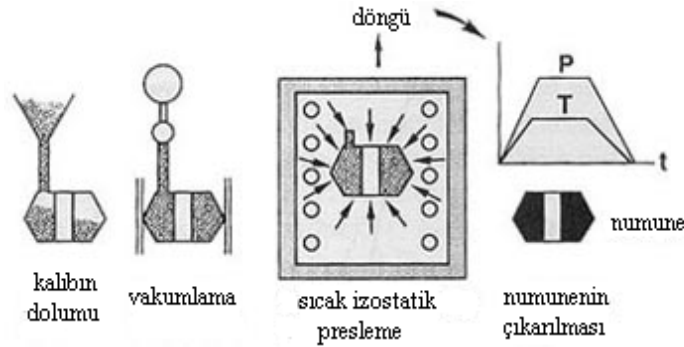
miktarı ve büzülmenin daha az olması gibi üstünlüklere sahiptir.

3.3.1.2.a Sıcak presleme

Sıcak presleme, sıcak ekstrüzyon ve sıcak dövmeye göre daha sınırlı uygulanan bir yöntemdir. Genellikle seramik ve sert metal tozlarının yoğunlaştırmada tercih edilir.

3.3.1.2.b Sıcak izostatik presleme

Sıcak izostatik presleme içerisinde ısıtıcı bulunan yüksek basınç kabı ve gövdeden oluştan tesisat içerisinde ger  ekleşt  tirilir. Toz karışımı ilk olarak kalıp içerisine doldurulur ve vakumlama işlemi uygulanır. Daha sonra kalıba her yönden eşt miktarda basınç ile sıcaklık uygulanır ve son ürün elde edilir (Şekil 3.4). Yöntemin en önemli   st  nl    , üç boyutlu ve homojen yüksek yoğunluk sağlamasıdır. İzostatik presleme için genellikle 100 MPa basınçlara kadar argon gazı kullanılır. İzostatik preslerin dizaynında temel problem, içine toz doldurulmuşt kalıbın prese kolay ve hızlı şekilde boştaltma yapamamasıdır (Bakkaloğlu, 2004).

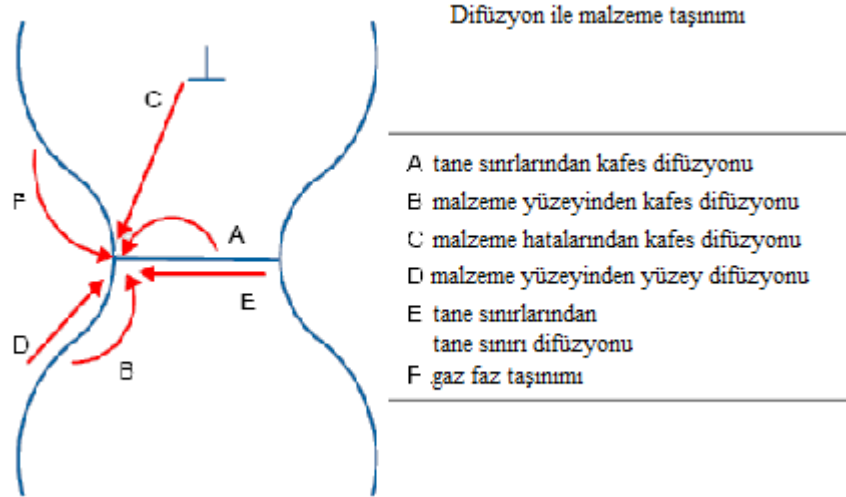


Şekil 3.4 Sıcak izostatik presleme işleminin aştamaları [1]

3.4 Sinterleme

Sinterleme, preslenmişt parçaların temel bileşt  ninin ergime derecesi altındaki bir sıcaklıkta koruyucu atmosfer altında uygulanması, parçada bulunan gözenekli yapının ortadan kaldırılması ile mukavemet ve sertlik kazandırma işlemidir. Mikroskopik   l  kte incelendiğinde, partiküllerin temas noktalarında boyun oluştumu ve bu oluştumun b  y  d     gözlenir. Sinterleme işleminde itici güç tozun yüzey enerjisinin azalmasıdır. İtici güç bileşt  nlerden birinin ergime derecesinin üstünde sinterleme sıcaklığı uygulanması ile artmaktadır. Sinterleme işlemi malzeme taştınımı (difüzyon) ile ger  ekleşt  r. Malzeme taştınımı (Şekil 3.5); tane sınırları, yüzey ve malzeme hatalarından tane difüzyonu, tane sınırlarından

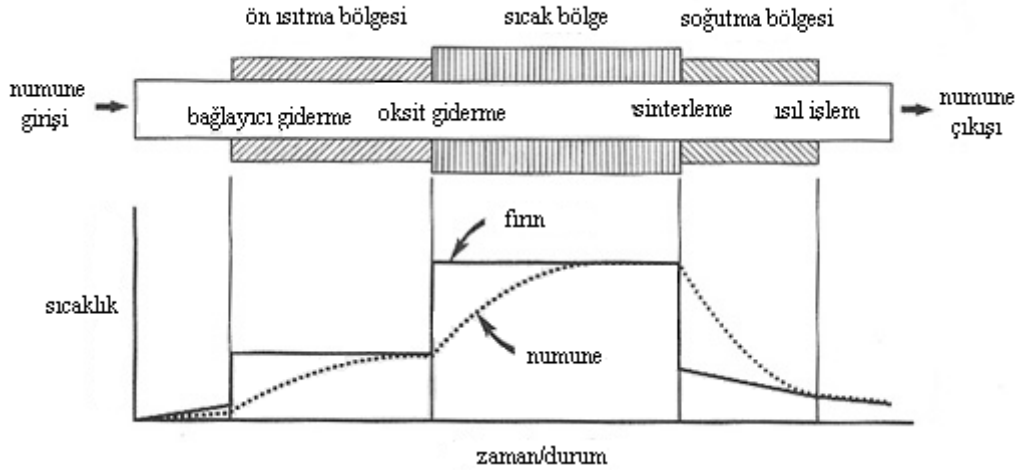
sınır difüzyonu, malzeme yüzeyinden yüzey difüzyonu ve malzeme yüzeyinden gaz fazı taşınımı olmak üzere altı değişik şekilde gerçekleşmektedir (Verlinden ve Froyen, 1994).



Şekil 3.5 Sinterleme esnasında difüzyon ile malzeme taşınımı (Verlinden ve Froyen, 1994)

Preslenmiş parçaların sinterlenebilirliğini ve sinterlenmiş mikroyapılarını etkileyen değişkenler malzeme değişkenleri ve proses değişkenleri olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Malzeme değişkenleri, tozun kimyasal bileşimi, tozun boyutu ve boyut dağılımı, tozun şekli ve tozun topaklaşma derecesi gibi değişkenlerden oluşur ve tozun preslenebilme ile sinterlenme kabiliyeti etkiler. Bilhassa, iki tip toz içeren preslenmiş parçalarda toz karışımının homojenliği birincil öneme sahiptir. Proses değişkenlerinin çoğunluğunu ise, sinterleme sıcaklığı, zamanı, atmosferi, basıncı, ısıtma ve soğutma hızı gibi termodinamik değişkenler oluşturur (Kang, 2005).

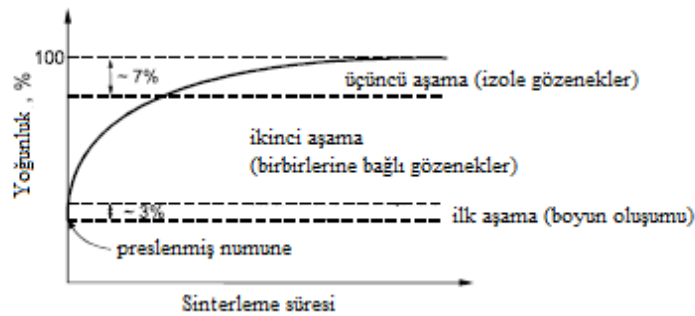
Sinterleme işleminde ilk olarak, preslenmiş parça sinterleme fırınına yavaşça yerleştirilir. Sinterleme fırını içerisinde sıcaklık, sinterleme sıcaklığına ulaşana kadar ön ısıtma bölgesinde yavaşça artar. Parça fırın içerisinde ilerledikçe, ön ısıtma zonunda, parça içerisindeki bağlayıcı malzemeler buharlaşır, hareketli gaz çıkışı ile uzaklaştırılır. Sıcak sinterleme bölgesinde, toz taneleri arasında metalurjik bağlar oluşur ve parça soğutma bölgesinden fırının dışına alınır. Sinterleme işleminin aşamaları Şekil 3.6'da görülmektedir [1].



Şekil 3.6 Sinterleme işleminin aşamaları [1]

Sinterleme işlemi genel olarak katı faz ve sıvı faz sinterlemesi olarak ikiye ayrılır. Tozu oluşturan malzemelerin ergime sıcaklıkları birbirinden farklıdır. Sinterleme sıcaklığı ergime sıcaklığı en düşük olan toz bileşiminin altında ise taneler birbirleri ile katı fazda bağlanır ve katı faz sinterlemesi gerçekleşir. Katı faz sinterlemesi işlemi;

- Toz partiküllerinin arasında boyun formlarının oluşumu,
- Gözenek geometrisinin değişmesi ve malzemenin büzülmesi,
- Tane büyümesi ile gözeneklerin izolasyonu ve artık porozitenin ortadan kalkması olarak üç kademe gerçekleşmektedir. Bu üç kademe esnasında porozitenin azalması, numune yoğunluğunun artmasını sağlamaktadır. Sinterleme işleminin üç aşaması esnasında preslenmiş numunenin yoğunlaşma eğrisi Şekil 3.7’de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.7 Sinterleme işleminin üç aşaması esnasında preslenmiş numunenin yoğunlaşma eğrisi (Kang, 2005)

Eğer sinterleme sıcaklığı, tozu oluşturan bileşenlerden birinin ergime sıcaklığı üzerinde seçilirse bu durumda sıvı faz sinterlemesi söz konusudur. Sıvı faz sinterlemesinde ergiyen bileşen, katı halde bulunan tanelerin yüzeyini ıslatarak bağlanmayı sağlar. Ergiyen faz

gözenekleri doldurarak veya sıvı-katı hareketi ile gözenek miktarını en aza indirmektedir. Sonuçta çok daha yüksek yoğunlukta sinterleme gerçekleşir (Verlinden ve Froyen, 1994; Bakkaloğlu, 2004).

3.5 İkincil İşlemler

İkincil işlemler sinterleme işleminden hemen sonra uygulamaya konmaktadır. Bu işlemler, ikinci presleme, yağ emdirme, yüzey sertleştirme ve temperleme, yüzey kaplama, talaşlı imalat, çapak alma, infiltrasyon gibi işlemlerden oluşur.

İstenilen mekanik ve manyetik özelliklerin sağlanmasında gerekli olan parça yoğunluğunu elde etmek için bir gözenek azaltma işlemi olan ikinci presleme kullanılır. Preslenmiş parçanın 700-800°C arasında ön sinterlenmesi ile yağlayıcılar yanar ve yeniden kristalleşme meydana gelir. İç gerilmeler ve pekleşme kaldırıldığından malzeme sünekliğini tekrar kazanır. İkinci preslemeden sonra parçalar ikinci defa sinterlenir.

Yağ emdirme yöntemi, opsiyonel bir uygulamadır. % 25-30 oranında gözenek içeren parçalar içerisine bu gözenekleri dolduracak şekilde yağ emdirilir. İlk olarak parça içerisindeki hava vakumla ortamdan alınır, yağ emdirilir ve vakum kaldırılır. Sonuç olarak mikrogözeneklerine yağ emdirilmiş parça elde edilir. Bu yöntemle üretilen en yaygın parçalar kendinden yağlamalı burçlar olarak bilinen sinter burçlardır.

Sinterlenmiş parçaların yüzeyi elektrokaplama, galvanizleme ve kimyasal buhar biriktirme benzeri işlemlerle kaplanabilir. Elektrokaplama işlemi esnasında elektrolit korozyon problemi yaşamamak için emdirme işlemi yapılır. Buhar biriktirme ise takımlarda aşınma dayanımını arttırmak için uygulanır.

Sinterlenmiş parçaların üretilmesindeki en önemli çekicilik karmaşık şekiller ve dar toleransa sahip parçaların üretilebilmesi olmasına rağmen, bazı sınırlamalar bulunur. Bundan dolayı frezeleme, delik delme (presleme doğrultusuna dik delikler), diş açma gibi talaşlı imalat operasyonları, kalıpta presleme ile elde edilemeyen şekillerin başarılabilmesinde kullanılır. Sinterlenmiş metallerin talaşlı imalatı genellikle aynı bileşimdeki döküm-dövme alaşımlarından daha kolaydır. Presleme ve talaşlı imalattan kaynaklanan çapakları almak için tamburlama en yaygın kullanılan yöntemdir ve bazı durumlarda içinde aşındırıcı toz bulunan sıvı ortamlar kullanılmaktadır.

İnfiltrasyon işleminde, parça içerisindeki birbirleri ile bağlantılı gözenekler, ana metalin sinterleme sıcaklığından daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip bir alaşımla doldurulur. İnfiltrasyon yöntemi uygulanan parçalar sızdırma yapmaz ve mekanik özelliklerinde artış

meydana gelir. Ancak bu parçaların boyut hassaslığı azalır (Waters, 1996 , [2]).

4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ PARTİKÜL TAKVİYELİ MMK MALZEMELERE AİT UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Yapılan akademik çalışmalarda toz metalurjisi yöntemi ile partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzeme üretimi döküm ve infiltrasyon yöntemlerine nazaran daha az çalışılmıştır. Düşük yoğunluk, elmasın sertliğinin hemen altındaki sertlik değeri, mükemmel ısı kararlılığı ve dikkate değer kimyasal tepkisizliği ile B_4C takviye elemanını metal esaslı kompozit malzemeler için çekici bir kuvvetlendirici eleman yapmıştır. Bunun yanında yüksek mukavemet veya iyi aşınma direnci istenen kullanım alanlarında SiC'e iyi bir alternatif yaratmaktadır.

Topçu, Gülsoy, Kadioğlu ve Güllüoğlu yaptıkları çalışmada, B_4C takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi ile üretmiş ve farklı B_4C oranları ile sinterleme sıcaklığının parçaların yoğunluk, sertlik, darbe direnci ve sürünme değerlerine olan etkilerini araştırmışlardır. 10 μm boyutunda saf Al ve ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında B_4C tozları karıştırılmış, elde edilen toz karışımı 250 MPa presleme basıncında soğuk preslenmiştir. Preslenmiş parçalar 600, 625 ve 640°C'ta sinterlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, sinterleme sıcaklığı arttıkça yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluğa yaklaştığı, sertlik değerlerinin ise B_4C oranı ve sinterleme sıcaklığı ile doğru orantılı arttığı gözlemlenmiştir. Ancak 625°C üzerindeki sinterleme sıcaklığının sertlik üzerindeki etkisi % 15 B_4C oranı üzerinde azalmıştır. Artan B_4C oranı ve sinterleme sıcaklığının darbe dayanımı üzerinde azaltıcı etki gösterdiği ve % 15 B_4C oranı üzerindeki değerlerde gözenekliliğin önemli derecede azalmasına bağlı olarak kuvvetin 59 J'den 9 J'e düştüğü görülmüştür. Sürünme değerlerinin ise artan B_4C oranı ile azaldığı gözlemlenmiştir (Topçu vd., 2009).

Ahmad, Jamaludin, Hussain ve Ahmad yaptıkları çalışmada, farklı takviye elemanı boyutunun Al_2O_3/Al kompozit malzemenin yoğunluk ve sertliği üzerine etkilerini araştırmış, saf alüminyum tozları ile % 10 oranında ve farklı boyutlarda (0.3, 1.0, 3.0, 12.5 ve 25.0 μm) Al_2O_3 partiküllerini 115 dev/dk. hızda 8 saat süre ile karıştırmışlardır. Toz karışımı 250 MPa presleme basıncında preslenmiş, normal atmosfer altında 600°C'da 300 dakika süre ile sinterlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, partikül boyutunun azalması ile yoğunluk ve sertlik değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir (Ahmad vd., 2005).

Özkan (2007) yaptığı çalışmada, alüminyum tozları içerisine ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranında SiC seramik tanecikleri katarak 1,5 ve 3,5 saat süre ile 450 dev/dak. dönüş hızında karıştırmıştır. 650 MPa presleme basıncında preslenen numuneler, mukavemet sağlamak amacıyla 600°C'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Takviye elemanı boyut ve % oranının

artması ile numunelerin yoğunlukları artmış, SiC takviye elemanının % oranının artması ve tane boyutunu azalması ile porozite oranlarının arttığı gözlenmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde, SiC oranının ve boyutlarının artması ile numunelerin sertliği arttığı görülmüştür.

Kretz, Gacsi, Kovacs ve Pieczonka yaptıkları çalışmada, Ni kaplı ve kaplı olmayan SiC partikülleri ve saf Al tozlarını kullanarak toz metalurjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretimi yapmış ve farklı SiC boyutu (8, 14, 70 μm) ve Ni kaplamanın kompozit malzemenin sertlik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 20 μm Al ile % 5 oranında SiC tozları karıştırılmış, 200 MPa presleme basıncında preslenmiş ve azot atmosferinde 640°C'de sinterlenmiştir. Kaplanmış SiC partiküllerinin Al partikülleri ile daha iyi temas ettiği ve daha iyi sertlik değeri elde edildiği belirlenmiştir (Kretz vd., 2004).

Abejonar, Velasco ve Martinez yaptıkları çalışmada, mekanik alaşımlama uygulanan Al+% 10 B₄C sisteminde karıştırma süresi, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı gibi üretim parametrelerinin optimizasyonunu amaçlamışlardır. Karıştırma süresi 2 saat aralıklı 0-12 saat, presleme basıncı 500, 600, 700 MPa, sinterleme sıcaklığı ise 600, 610, 620, 635 ve 650°C olarak belirlenmiştir. Presleme işlemi tek yönlü pres ile, sinterleme işlemi ise 30 dakika N₂H₂O/0,1CH₄ atmosferi altında 30 dakika gerçekleştirilmiştir. Homojen partikül dağılımı ve B₄C dağılımının yüksek preslemeye olanak sağlaması nedeniyle optimal mekanik alaşımlama süresi 12 saat, presleme basıncı 700 MPa ve sinterleme sıcaklığı 635 °C olarak elde edilmiştir (Abejonar vd., 2007).

Hiçyılmaz (1999) yaptığı çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile SiC ve Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozit malzeme üretmiş ve mekanik özelliklerini incelenmiştir. Elde edilen bu kompozit malzemelerin mikroyapı incelemesi sonucunda SiC ve Al₂O₃ takviye elemanlarının homojen olarak dağıldıkları gözlenmiştir. Mekanik özelliklerin matrisi oluşturan alüminyum tozunun boyutuna bağlı olduğu ve toz boyutu azaldıkça iyileştiği görülmüştür. Takviye elemanı bulunmayan malzemelerin çekme ve darbe özelliklerinin takviye elemanı bulunanlara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Takviye elemanı arttıkça kompozit malzemelerin sertliği ve aşınma dayanımı artmıştır.

Rahimian, Ehsani, Parvin ve Baharvandi yaptıkları çalışmada, Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üreterek, takviye elemanının boyutunun, sinterleme süresi ve sıcaklığının, kompozit malzemenin özellikleri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, üç farklı boyutta Al₂O₃ tozu, Al tozları ile 60 dakika boyunca 150 dev/dk. hızda karıştırılmış, tek eksenli presleme işleminden geçirilmiş ve argon atmosferinde

500, 550 ve 600°C’de, 30, 45, 60 ve 90 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sertlik ve basma dayanımı değerlerinin, takviye boyutunun büyümesi ile düştüğü, ancak sinterleme sıcaklığının artması ile yükseldiği gözlemlenmiştir. Yüksek sinterleme sıcaklığında elde edilen yüksek sertlik değerlerine, düşük sinterleme sıcaklığında daha uzun sinterleme süresinde ulaşılmaktadır (Rahimian vd., 2009).

Lillo (2005) çalışmasında, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak sinterleme ve sıcak izostatik presleme ile imal edilen B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ile mikroyapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişki üzerine inceleme yapmıştır. %10 B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozit çubuklar 412 °C’de 2 saat süre ile ısıtılma işlemi tabii tutulmuş ve soğutulmuştur. Bu numunelerin karakterizasyonu sonucunda yapı içerisinde topaklaşan B₄C partikülleri ve bazı artık gözenekler görülmüştür. Mekanik özellikler değerlendirildiğinde, çok az artan elastiklik modülü, düşük çekme mukavemeti ve önemsenmeyecek ölçüde süneklik gözlemlenmiştir. Bunun üzerine numunelere ekstrüzyon işlemi uygulanmış ve numunelerin özellikleri tekrardan incelenmiştir. Mikroyapı incelemesinde B₄C partiküllerinin yeniden dağıldığı, artık gözeneklerin yok olduğu, elastik modülü ile diğer mekanik özelliklerde de artış olduğu tespit edilmiştir. Malzemedeki en büyük gelişme, kırılma uzamasında % 10’un üzerinde artış kaydedilmesidir.

Meydanoğlu, Mindivan, Kayalı ve Çimenoglu yaptıkları çalışmada, sıcak presleme yöntemiyle üretilen B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin sertlik ve kuru kayma koşullarındaki aşınma davranışlarını incelenmişlerdir. Ağırlıkça %10 oranında iki farklı tane boyutunda (10 µm ve 25 µm) B₄C tozu ile Al tozu 2 saat süre ile karıştırılmış, 625 MPa presleme basıncı altında 350°C’de 2 saat süreyle preslenmiştir. B₄C partiküllerinin yapı içerisinde homojen şekilde dağıldığı, artan tane boyutu ile sertlik değerinde % 20’ye varan sertlik artışı olduğu gözlenmiştir. Artan sertliğe bağlı olarak aşınma direnci de yaklaşık üç kat artmıştır (Meydanoğlu vd., 2006).

Zhan, Liu, Zhai, Fu ve Zhang yaptıkları çalışmada, SiC takviye elemanını Ni kaplayarak arayüzeyel modifikasyonun SiC/Cu kompozit malzemelerin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, SiC partikülleri akımsız kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Kapanmış ve kaplanmamış SiC partikülleri % 10 oranında saf Cu partikülleri ile karıştırılmış, soğuk preslenmiş ve çözünmüş amonyak gazıyla 820°C’de 3 saat süre ile sinterlenmiş, sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. Ni kaplı SiC takviyeli kompozit malzemelerde porozite oluşumunun azaldığı, sertlik ve mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir (Zhan vd., 2003).

Çalışkan, Soy, Altinkök ve Demir yaptıkları çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile Al_2O_3 partikül takviyeli ve Al matrisli kompozit malzeme üretmiş, farklı takviye elemanı oranı ve presleme basıncının, yoğunlaşma davranışı ve sertliğe etkisini araştırmışlardır. Al tozlarına % 5, 10, 15, 20, 25 oranında Al_2O_3 takviye elemanı ilave edilmiş ve 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Toz karışımları 200, 300, 400, 500 ve 600 MPa presleme basıncında preslenmiş ve Ar atmosferi altında $640^\circ C$ 'de sinterlenmiştir. Al_2O_3 partikül oranının artması, yoğunluk değerlerinde düşüşe, sertlik değerlerinde ise artışa neden olmuştur. Presleme basıncı arttıkça, yoğunluk ve sertlik sonuçlarının arttığı görülmüştür (Çalışkan vd., 2006).

Cambroner, Sanchez, Ruiz-Roman ve Ruiz-Prieto yaptıkları çalışmada, mekanik alaşımlama yöntemi ile çeşitli seramik tozlar (Si_3N_4 , TiB_2 ve B_4C) içeren Al matrisli kompozit malzemeler üretmiş ve bunların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 7000 serisi Al tozları % 5 oranında seramik tozlar ile (Si_3N_4 , TiB_2 ve B_4C) 150 dev/dk. hızda 12 saat boyunca karıştırılmış ve 500 dev/dk. hızda yarım saat süreyle mekanik alaşımlamaya tabii tutulmuştur. Toz karışımı 200 MPa presleme basıncında preslenmiş, koruyucu grafit filmi oluşturmak amacıyla $150^\circ C$ 'ye ısıtılmış ve $500^\circ C$ sıcaklıkta ekstrüze ettikten sonra ısıtma işlemi uygulanmıştır. Ekstrüze edilen numunelerde seramik partiküllerin homojen şekilde dağıldığı ve az miktarda porozite olduğu görülmüştür. Ayrıca ısıtma işlemi tabii tutulan ekstrüze numunelerde mekanik özelliklerde iyileşme olduğu belirtilmiştir (Cambroner vd., 2003).

Moustafa, Abdel-Hamid ve Abd-Elhay yaptıkları çalışmada, Ni kaplanmış ve kaplanmamış SiC ve Al_2O_3 takviyeli Cu matrisli kompozit malzemeler üretmiş, uygulanan kaplama işleminin kompozit malzemenin yoğunlaşma davranışı, yoğunluk, porozite ve basma mukavemeti gibi özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Cu tozları ağırlıkça % 20 SiC ve Al_2O_3 tozlarıyla (kaplamalı ve kaplamasız) 360 dev/dk. hızda 6 saat karıştırılmıştır. 600 MPa presleme basıncında preslenen kompozit numuneler, saf hidrojen atmosferinde $900^\circ C$ 'de sinterlenmiştir. Kaplanmış takviye elemanı içeren kompozit malzemelerde, yoğunlaşma hızı 2,5 kat artmıştır. Kaplama uygulanan kompozit malzemelerde yoğunluk ve basma mukavemeti değerlerinin arttığı, porozitenin ise azaldığı belirtilmiştir (Moustafa vd., 2002).

Kılıç (2007) yaptığı çalışmada, SiC takviyeli Al matrisli kompozit malzeme üretmiş, farklı SiC oranı ve boyutunun yoğunluk (presleme ve sinterleme sonrası), porozite, sertlik, aşınma dayanımı ve mikroyapısal özelliklere etkisini araştırmıştır. Farklı tane boyutlarında (2,87; 9,21; 14,39 ve 33,17 μm) SiC partikülleri, %5, 10 ve 15 oranında olmak üzere Al tozu ile karıştırılmış, 800 MPa presleme basıncında preslenmiş ve argon kontrollü tüp fırında $650^\circ C$ 'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Deneysel bulgular incelendiğinde, SiC partiküllerinin

boyutu azaldıkça yoğunluğun arttığı, porozitenin ise azaldığı gözlemlenmiştir. SiC pariküllerinin hacim olarak artışı, porozitenin artmasına neden olmuştur. Sertlik değerlerinin, takviye elemanı boyutunun ve miktarının artması ile arttığı, aşınma dayanımı değerlerinin partikül boyutunun artması ile arttığı, partikül miktarının artışı ile azaldığı görülmüştür.

Slipenyuk, Kuprin, Milman, Goncharuk ve Eckert yaptıkları çalışmada, farklı boyutlarda (3 ve 14 μm) ve oranlarda (%0, 5, 10, 25, 20) SiC partikülleri ile farklı boyutlarda (40, 80, 130 ,180 μm) Al tozlarını farklı matris-takviye elemanı boyut oranında (2,9'dan 12,9'a kadar) kullanarak toz metalurjisi yöntemi ile kompozit malzemeler üretmiş ve bu değişkenlerin kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Hazırlanan toz karışımları soğuk presleme yöntemi ile preslenmiş ve ekstrüze edilmiştir. Takviye elemanının yapı içerisinde dağılımı incelendiğinde, SiC miktarı ve matris-takviye elemanı boyut oranı artışı, SiC partiküllerinin homojen dağılımını olumsuz etkilemiştir. SiC partiküllerindeki boyut artışı kompozit malzemenin elastiklik modulünde artış sağlamış, küçük boyutlardaki SiC partikülleri ise kompozit malzemenin akma gerilimi ve çekme dayanımında artışı desteklemiştir (Slipenyuk vd., 2006).

Köksal, Şahin ve Akgün (2008) yaptıkları çalışmada, Al esaslı Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretmiş ve Al_2O_3 oranına göre numunelerin mikrosertlik, mekanik özellik değişimi ve kırılma davranışını araştırmışlardır. Saf Al tozları ile % 0-5-7,5-12,5 ağırlık oranında Al_2O_3 tozları 1 saat süreyle karıştırılmış, 96 kPa basınçla preslenmiş ve 620°C'de 60 dakika süre ile sinterlenmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimler incelendiğinde, Al_2O_3 miktarının artışı ile çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinde düşüş gerçekleşmiş, sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Köksal vd., 2008).

Rahimian, Parvin ve Ehsani (2010) yaptıkları çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozit malzeme üretmiş ve Al_2O_3 takviye elemanının boyut ve oranının, kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik, mikroyapı, aşınma direnci, akma ve basma dayanımı ile uzaması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada çeşitli boyut (3, 12, 48 μm) ve ağırlık oranlarındaki (%0-20) Al_2O_3 tozları, Al tozları ile 150 dev/dk. karıştırma hızında bir saat süre ile karıştırılmıştır. 440 MPa presleme basıncında preslenen numuneler 45 dakika boyunca 550°C'de sinterlenmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde, partikül oranı arttıkça yoğunluğun azaldığı, partikül boyutu arttıkça önce yoğunluk artışı, daha sonra azalma olduğu gözlenmiştir. Takviye elemanındaki boyut azalması, takviye elemanı dağılımının olumsuz etkilenmesine neden olup homojenizasyonu olumsuz şekilde etkilemiş,

sertlik değerlerinde artış sağlamıştır. Küçük takviye boyutlarında basma gerilmeleri değerleri daha yüksek olup, takviye elemanı oranı %0'dan % 10'a artarken basma gerilmelerinde artış, % 10'dan daha yüksek takviye elemanı oranında ise azalış gerçekleşmiştir (Rahimian vd., 2010).

Araştırmacılar toz metalurjisi yöntemiyle üretilen partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerde; genel olarak presleme basıncı, farklı takviye elemanı boyutu ve hacmi, sinterleme sıcaklığı ve süresi, matris-takviye elemanı arayüzeyi gibi değişkenlerin kompozit malzemenin yoğunluk (presleme ve sinterleme sonrası), sertlik, takviye elemanı dağılımı, mekanik özellikler (çekme dayanımı, basma dayanımı, aşınma direnci, kırılma tokluğu, darbe direnci) ve mikroyapısal özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmalarda presleme basıncı artışının kompozit malzemenin yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttırdığı (Çalışkan vd., 2006; Abejonar vd., 2007) belirtilmiştir.

Partikül takviye elemanı boyutu ve hacminin kompozit malzemelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi, kompozit malzeme hakkında yapılan çalışmaların en çok yoğunlaştığı alandır ve çalışmalar sonucunda elde edilen datalar değişkenlik göstermektedir. Sinterleme sıcaklığı ve süresinde ise genellikle kompozitin yoğunluk ve sertlik üzerine etkisi incelenmiştir.

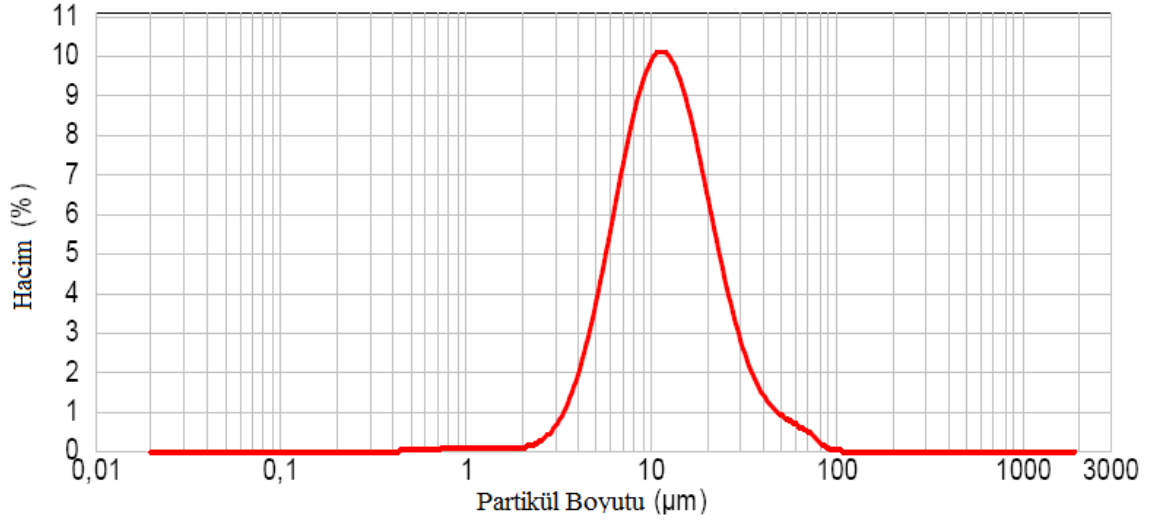
Kompozit malzemelerde matris-takviye elemanı arayüzeyi, mekanik özellikleri etkileyen en önemli kısımdır. Arayüzeyi geliştirmek amacı ile en yaygın uygulanan yöntem, takviye elemanını yüzeyinin kaplanarak, matris-takviye elemanı arasında bağ kuvvetinin artırılmasıdır. Araştırmacılar, bu konuda yaptıkları çalışmalarda, kaplama işleminin kompozit malzemenin özellikle sertlik ve mekanik özelliklerine büyük katkı sağladığını belirtmişlerdir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

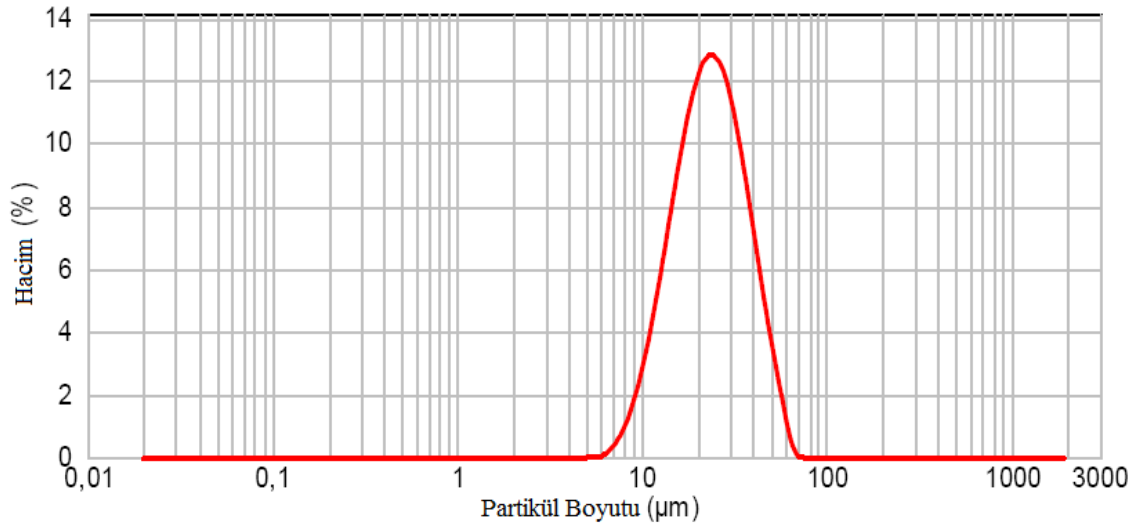
Bu çalışmada, Al matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalar iki aşamada yürütülmüştür.

5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

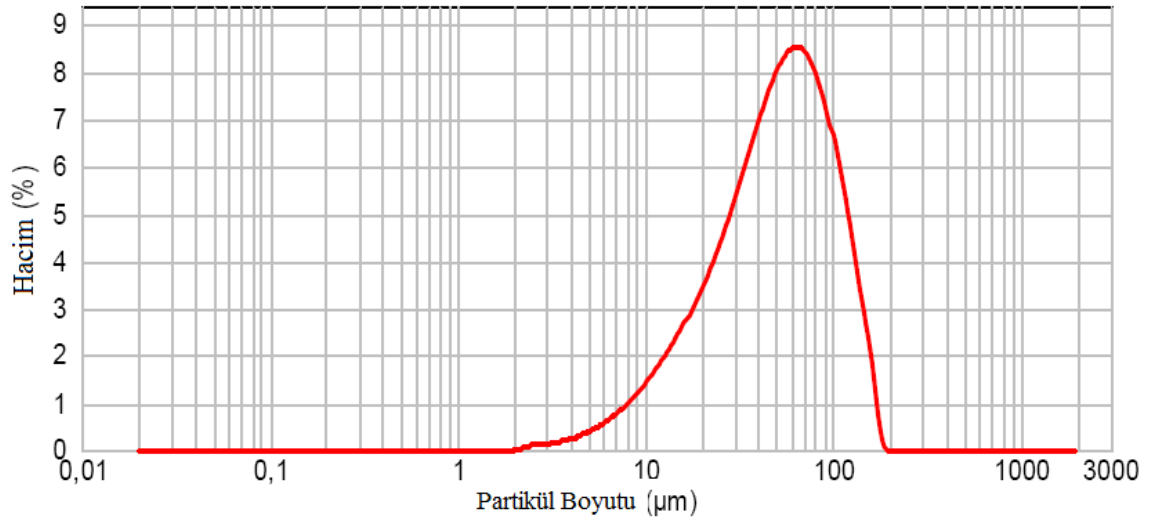
Deneylerde matris malzemesi olarak kullanılan ve Goodfellow Cambridge Limited şirketinden temin edilmiş, 3 farklı tane boyutuna sahip (15, 25, 58 μm) saf alüminyum tozu partikül boyut dağılımları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3’de görülmektedir. İkinci aşama deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan harmanlanmış alüminyum tozunun partikül boyut dağılımı Şekil 5.4’de verilmiştir.



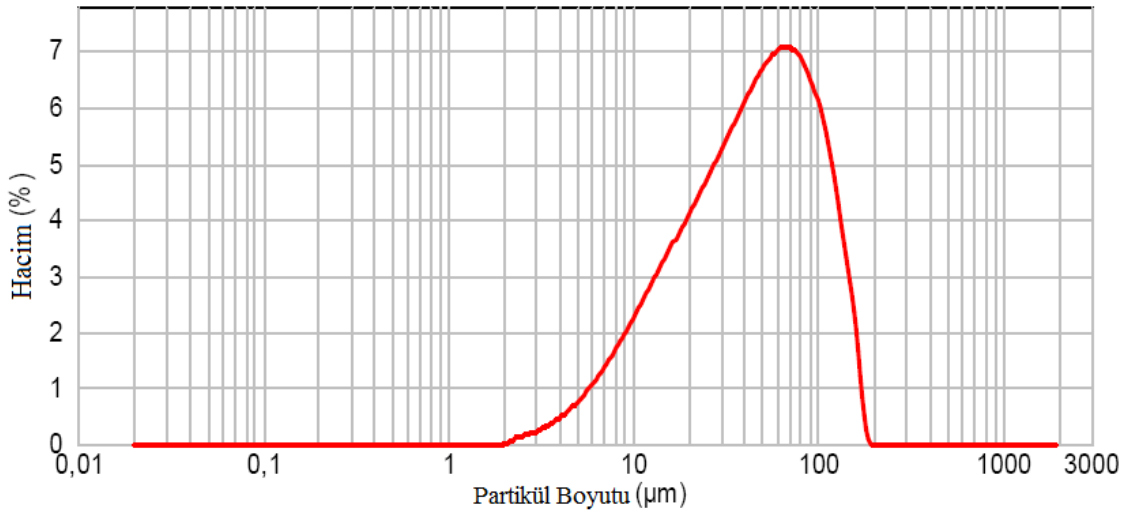
Şekil 5.1 Deneylerde kullanılan 15 μm tane boyutlu saf Al tozunun partikül boyut dağılımı



Şekil 5.2 Deneylerde kullanılan 25 μm tane boyutlu saf Al tozunun partikül boyut dağılımı

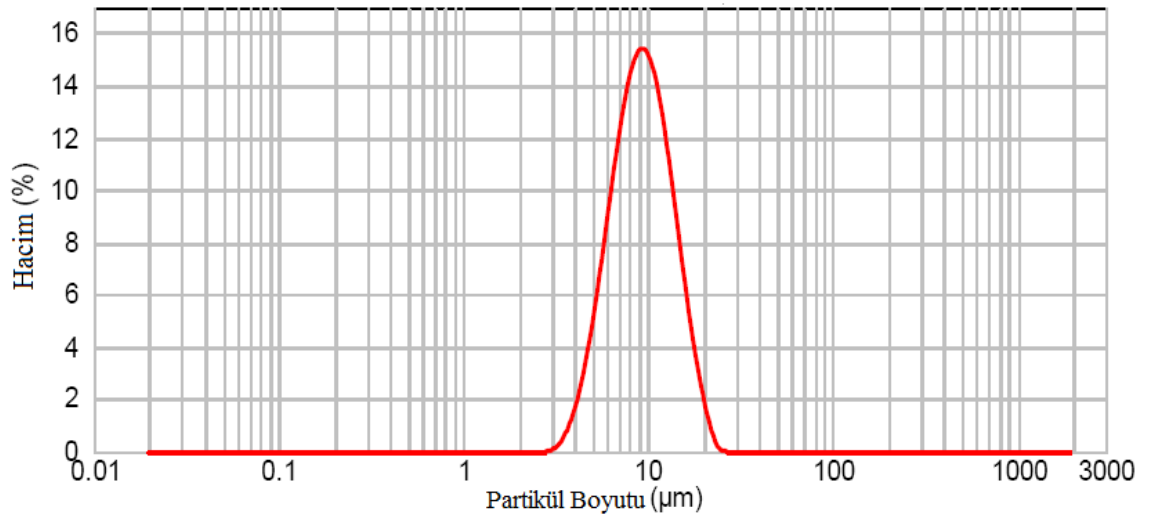


Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan 58 μm tane boyutlu saf Al tozunun partikül boyut dağılımı

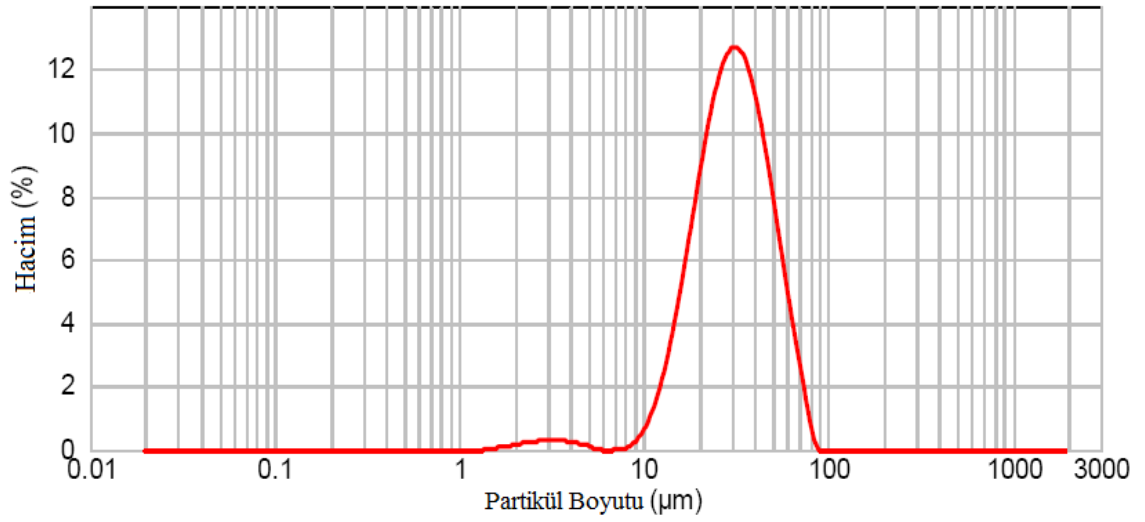


Şekil 5.4 Deneylerde kullanılan harmanlanmış saf Al tozunun (54 μm) partikül boyut dağılımı

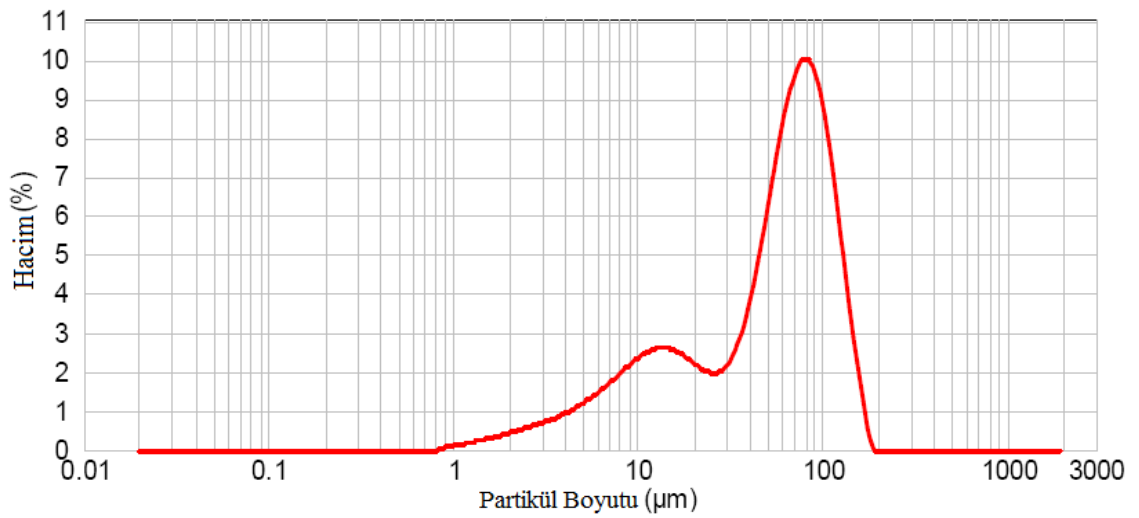
Takviye elemanı olarak 3 farklı tane boyutuna sahip (10, 32 ve 59 μm) B_4C tozu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan B_4C tozlarının partikül boyut dağılımları Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.5 Deneylerde kullanılan 10 μm tane boyutlu B_4C tozunun partikül boyut dağılımı



Şekil 5.6 Deneylerde kullanılan 32 μm tane boyutlu B_4C tozunun partikül boyut dağılımı



Şekil 5.7 Deneylerde kullanılan 59 μm tane boyutlu B_4C tozunun partikül boyut dağılımı

5.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Deneysel çalışmalar öncesinde, Al ve B₄C tozlarının partikül boyutlarının belirlenmesi için, partikül boyut dağılım analizleri yapılmıştır. Saf Al ve B₄C tozlarının homojen şekilde karışması için bilyeli değirmen ve alümina bilyeler kullanılmıştır. Toz karışımının preslenmesi işleminin gerçekleştirildiği Alşa eğme ve çekme cihazı Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8 Alşa marka eğme ve çekme cihazı

Şekil 5.9’de toz karışımına istenen şekli ve yoğunluk artışını sağlamak amacıyla kullanılan çelik kalıp görülmektedir. Presleme işlemi ardından numunelerde mukavemet artışı sağlamak amacıyla sinterleme işleminin yapıldığı Protherm markalı PTF-12/75/600 tipi tüp fırını Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.9 Presleme işleminde kullanılan çelik kalıp



Şekil 5.10 Sinterleme işleminde kullanılan tüp fırın

Numunelerin yoğunluk değerleri 0,1 mg hassasiyetli A&G Company markalı AND-1653 tipi hassas terazide ölçülmüştür. Sertlik değerleri, Vickers mikrosertlik cihazında 500 gr yük altında elde edilmiştir. Numuneleri metalografik incelemeye hazırlamak amacıyla Struers'den temin edilen elmas zımpara ve solüsyonlar kullanılmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemelerinde Leica IMC 1000 optik mikroskobu, EDS donanımlı JEOL 5400 LV SEM cihazı ve JEOL JSM 7000F alan emisyonlu tarama elektron mikroskobu (FEG-SEM) kullanılmıştır. Basma mukavemeti ölçümleri Alşa marka eğme ve çekme cihazı kullanılarak yapılmıştır.

5.3 Deneylerin Yapılışı

Deneysel çalışmalar iki aşamada ele alınmıştır. Birinci aşama deneylerde farklı presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin numunelerin yoğunluk (presleme ve sinterleme sonrası yoğunluk), mikrosertlik ve mikroyapısal özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. İkinci aşama deneylerde ise, birinci aşamada elde edilen optimal presleme basıncı kullanılmış, farklı takviye elemanı tane boyutu, matris-takviye elemanı arayüzeyi, sinterleme sıcaklığı ve süresinin, numunelerin yoğunluk, mikrosertlik, basma mukavemeti değerleri ile mikroyapısal özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

5.3.1 Birinci Aşama Deneylerin Yapılışı

58 μm boyutundaki saf Al tozu ağırlıkça %10 oranında 32 μm boyutuna sahip B_4C partikülleri ile kuru ortamda 150 devir/dak. hızda 5 saat karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. 0,1 mg hassasiyetli terazide 0,75 gr'lık numuneler şeklinde tartılan toz karışımları, 200, 400, 600 ve 800 MPa yük altında tek eksenli preste çelik kalıp içerisinde preslenerek 10 cm çapında numuneler elde edilmiştir (Şekil 5.11). Presleme işlemi esnasında sürtünmeyi azaltmak amacıyla her numunenin preslenmesinden önce kalıbın iç yüzeyi ve zımbanın dış yüzeyi %3'lük stearik asit-alkol çözeltisi ile yağlanmıştır. Preslenen numuneler tüp fırın içerisinde açık atmosferde ve argon gazı ortamı altında 550°C'de, 2, 3, 4 ve 5 saat süreyle sinterlenmiştir. Çizelge 5.1'de birinci aşama deneylerdeki üretim koşulları verilmiştir.



Şekil 5.11 Birinci aşama deneylerde üretilen deney numuneleri

Çizelge 5.1 Birinci aşama deneylerdeki üretim koşulları

Numune	Presleme Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Atmosferi
S1	200	2	Açık
S2	200	2	Argon
S3	400	2	Açık
S4	400	2	Argon
S5	600	2	Açık
S6	600	2	Argon
S7	600	3	Argon
S8	600	4	Argon
S9	600	5	Argon
S10	800	2	Açık
S11	800	2	Argon

5.3.2 İkinci Aşama Deneylerin Yapılışı

Birinci aşama deneylerde elde edilen optimum presleme basıncı (600 MPa) ışığında, ikinci aşama deneylerde istatistiksel deneysel tasarım kullanılmıştır. Geleneksel deneysel tasarımlarda her bir parametrenin deney üzerindeki etkisini araştırmak için diğer bütün parametreler sabit tutularak her seferinde bir parametre denenir. Çalışmada istatistiksel deneysel tasarım kullanılmasının en büyük nedeni, geleneksel deneysel tasarımlara nazaran maksimum anlamlı verilerin daha az zaman, kaynak ve harcama ile elde edilmesidir. Bunun yanında istatistiksel deneysel tasarım deney hatalarının minimuma indirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Çalışmalarımızdaki parametrelere uygun olarak, 3^4 tam faktörlü, 4 bağımsız değişkenli tam faktöriyel tasarım yapılmıştır. Tam Faktöriyel Deney (TFD)'de her bir faktörün her seviyesi için eşit sayıda gözlem yapılarak, faktörlerin diğer faktörlerden bağımsızca ürün performansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. TFD performansına etki eden faktörlerin sayısının en az bir en çok beş olduğu durumlar için kullanılmaktadır (Taylan, 2009). Bu deneyde kullanılan faktörler, takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemidir. Çizelge 5.2'de Al/B₄C kompozit malzeme üretimi için tam faktöriyel deney tasarımında kullanılan faktörler ve seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 5.2 Al/ B₄C kompozit malzeme üretimi için tam faktöriyel deney tasarımında

kullanılan faktörler ve seviyeleri

Sembol	Faktörler	Kodlanmış Faktör Seviyeleri		
		Düşük (-1)	Orta (0)	Yüksek (+1)
A	takviye elemanı partikül boyutu (μm)	10	32	59
B	sinterleme süresi (saat)	2	4	6
C	sinterleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	550	590	630
D	takviye elemanı ön işlemi	As-received	Kısmi oksidasyon	Ni kaplama

Deneysel tasarım sonuçlarının analizi MiniTab 15 istatistik paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MiniTab 15 programında alınan deney planı Çizelge 5.3’de verilmiştir. Deney planı tam faktöriyel deney tasarımı ile belirlenmiş olup, programın belirlediği üretim sırasına sadık kalınarak gerçekleştirilmiş ve her bir parametre ve seviye kombinasyonu deneneceği için, $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet kompozit numune üretilmiştir. Hangi faktörlerin Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk, porozite, sertlik ve basma mukavemeti değerlerini önemli ölçüde etkilediği kontrol etmek amacıyla MiniTab 15 programı kullanılarak varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır (Şahin, 2010). ANOVA tablosu ortalamalar arasındaki farklılıkların test edilmesinde kullanılır.

Çizelge 5.3 Deney planı

RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C	D
1	1	1	-1	-1	1	0
2	1	1	0	1	-1	1
3	1	1	0	-1	0	0
4	1	1	-1	1	0	0
5	1	1	1	0	1	0
6	1	1	-1	0	1	-1
7	1	1	1	-1	-1	0
8	1	1	1	-1	-1	1
9	1	1	-1	1	-1	0
10	1	1	0	0	1	-1
11	1	1	0	-1	1	-1
12	1	1	1	1	-1	-1
13	1	1	1	0	0	1
14	1	1	1	1	1	0
15	1	1	1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	1	1
17	1	1	0	1	-1	-1
18	1	1	1	1	-1	1
19	1	1	1	0	-1	1
20	1	1	1	0	0	0
21	1	1	1	1	0	0
22	1	1	0	-1	-1	0
23	1	1	1	-1	1	1
24	1	1	1	0	1	1
25	1	1	0	-1	-1	-1
26	1	1	0	0	-1	1
27	1	1	0	-1	1	0
28	1	1	0	0	1	0
29	1	1	1	-1	1	0
30	1	1	0	-1	0	1
31	1	1	-1	-1	1	-1
32	1	1	0	1	0	-1
33	1	1	-1	-1	-1	1
34	1	1	0	1	1	-1
35	1	1	-1	0	0	-1
36	1	1	1	0	1	-1
37	1	1	-1	0	0	1
38	1	1	1	-1	0	1
39	1	1	0	0	-1	0
40	1	1	0	1	1	1
41	1	1	1	0	-1	0
42	1	1	1	1	1	-1
43	1	1	1	1	-1	0
44	1	1	0	1	1	0
45	1	1	-1	0	-1	0
46	1	1	0	0	0	1
47	1	1	-1	1	-1	1
48	1	1	-1	0	-1	-1
49	1	1	0	0	-1	-1
50	1	1	0	-1	1	1
51	1	1	-1	1	-1	-1
52	1	1	1	0	-1	-1

53	1	1	-1	-1	0	-1
54	1	1	1	-1	0	0
55	1	1	-1	-1	0	0
56	1	1	-1	-1	1	1
57	1	1	-1	1	1	-1
58	1	1	0	0	0	0
59	1	1	-1	0	1	0
60	1	1	-1	1	1	0
61	1	1	0	-1	-1	1
62	1	1	-1	1	1	1
63	1	1	1	0	0	-1
64	1	1	0	1	-1	0
65	1	1	-1	0	-1	1
66	1	1	0	1	0	1
67	1	1	0	0	0	-1
68	1	1	-1	0	1	1
69	1	1	-1	0	0	0
70	1	1	-1	-1	-1	0
71	1	1	-1	1	0	1
72	1	1	1	1	0	1
73	1	1	1	-1	0	-1
74	1	1	0	-1	0	-1
75	1	1	-1	-1	0	1
76	1	1	-1	1	0	-1
77	1	1	1	1	0	-1
78	1	1	1	-1	-1	-1
79	1	1	-1	-1	-1	-1
80	1	1	0	1	0	0
81	1	1	0	0	1	1

* **A:** (-1 = 10 μm) : (0 = 32 μm) : (1 = 59 μm) **B:** (-1 = 2 saat) : (0 = 4 saat) : (1 = 6 saat) **C:** (-1 = 550 $^{\circ}\text{C}$) : (0 = 590 $^{\circ}\text{C}$) : (1 = 630 $^{\circ}\text{C}$) **D:** (-1 = Kaplamasız B_4C) : (0 = Kısmi oksidasyon) : (1 = Ni kaplama)

5.3.2.1 Karışım Tozlarının Hazırlanması

Deneylerde 15, 25 ile 58 μm partikül boyutundaki saf Al tozları sırasıyla ağırlıkça % 10, 10 ve 80 oranında karıştırılarak harmanlama işlemi yapılmıştır. Yapı içerisinde maksimum paketlenme bileşimini elde etmek amacıyla büyük partiküllerin hacim yüzdesi küçük partiküllerin hacim yüzdesinden daha büyük seçilmiştir. Matris ve takviye elemanı arayüzeyindeki etkileşimi araştırmak için B_4C tozları saf, kısmi oksidasyon ve nikel kaplı olarak üç ayrı şekilde hazırlanmıştır.

Kısmi oksidasyon işlemini gerçekleştirmek için, ortalama partikül boyutları 10, 32 ve 59 μm , spesifik yüzey alanları 0,705, 0,253 ve 0,176 m^2/g olan, her biri $0,5 \pm 0,01$ gr olan B_4C tozları ile porselen kroze kullanılmıştır. Her üç partikül boyutundaki B_4C tozları 650°C 'de farklı sürelerde Protherm marka fırında oksidasyona tabii tutulmuştur. Krozeye eşit yığın yüksekliğinde konan B_4C tozlarının tartım işlemleri 0,1 mg hassasiyetli terazi ile

gerçekleştirilmiştir. B₄C tozlarının fırınlanmadan önceki ve sonraki ağırlık farkı ölçülerek, B₄C tozlarının yüzeyinin yaklaşık 500 nm’lik kısmi oksidasyon ile oksit kaplanması amaçlanmıştır. Denemeler sonucunda, 10 µm ortalama partikül boyuna sahip B₄C tozlarında 27 dakika, 32 µm ortalama tane boyuna sahip B₄C tozlarında 19 dakika ve 59 µm ortalama partikül boyuna sahip B₄C tozlarında ise 33 dakika sürede istenen oksit tabakasına ulaşıldığı belirlenmiştir.

Ni kaplama işlemi, B₄C partiküllerinin yüzeylerinin akımsız nikel kaplama yöntemiyle Ni-P tabakaları ile kaplanması şeklinde yapılmıştır. B₄C partiküllerinin yüzeylerinin yaklaşık 500 nm’lik Ni tabakası ile kaplanmıştır. Kaplama esnasında uygulanan işlemlerde kullanılan kaplama banyosu bileşenleri ve konsantrasyonları Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4 Kaplama esnasında uygulanan işlemlerde kullanılan kaplama banyosu bileşenleri ve konsantrasyonları

Aşama	Ni-P Kaplama Solüsyonları
Hassaslaştırma	6,31 g/l Sn ²⁺ 40 ml/l serbest HCl
Aktivasyon	0,12 g/l Pd ²⁺ 2,5 ml/l serbest HCl
Ni-P Kaplama	12g/l Ni ²⁺ 20 g/l NaH ₂ PO ₂ .H ₂ O 120 g/l Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .5.5H ₂ O

Karıştırma işleminde, harmanlanmış saf Al tozu (54 µm) ve ağırlıkça % 10 oranında 10, 32 ve 59 µm ortalama partikül boyutundaki, saf, kısmi oksidasyon ve nikel kaplı B₄C tozlarının her biri, bilyeli değirmende 150 dev/dk. karıştırma hızında ve 5 saat süreyle karıştırılmıştır.

5.3.2.2 Karışım Tozlarının Preslenmesi

Ön çalışmada, en yüksek yoğunluk ve sertlik değerlerinin 600 MPa presleme basıncında elde edilmesi sebebiyle, çalışmada presleme basıncı 600 MPa olarak belirlenmiştir. Her numune için hassas terazide 2,1 gr toz karışımı tartılmış, tek eksenli preste çelik kalıp içerisinde preslenerek 10 cm çapında ve boyunda toplam 81 adet numune elde edilmiştir (Şekil 5.12). Her presleme işlemi öncesinde, sürtünmeyi azaltmak için kalıbın iç yüzeyi ve zımbanın dış yüzeyi % 3’lük stearik asit-alkol çözeltisi ile yağlanmıştır.



Şekil 5.12 İkinci aşama deneylerde üretilen deney numunesi

5.3.2.3 Numunelerin Sinterlenmesi

Preslenen numuneler sinterleme sıcaklığı ve süresine göre çeşitli gruplara ayrılmış ve 550, 590 ve 630°C de, 2, 4 ve 6 saat süre ile Protherm marka tüp fırında sinterlenmiştir. Fırın istenen sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılmış ve numuneler bir kızak vasıtasıyla fırın merkezine yerleştirilmiştir. Sinterleme esnasında numunelerin oksitlenmesini engellemek amacıyla, sinterleme işlemi argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

5.3.4 Numunelerin Mekanik ve Mikroyapısal Karakterizasyonu

Deney numunelerinin karakterizasyonu, yoğunluk, sertlik ve basma mukavemeti ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin sinterleme sonrası yoğunluk değerleri arşimet prensibine göre çalışan 0,1 mg hassasiyetli A&D GR-200 marka hassas terazi kullanılarak elde edilmiştir.

Sertlik ölçümleri için bütün numunelerin yüzeyleri 600'lük elmas zımparada zımparalanarak oksit tabakasından temizlenmiştir. Numunelere uygulanan zımparalama işlemi sonrası Vickers (HV₅₀₀) mikrosertlik yöntemi kullanılarak, sertlik ölçüm cihazında 500 gr yük altında gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçüm işleminin ardından, deney numunelerinin yüzeyleri Struers'den temin edilen elmas zımpara ve su bazlı elmas ve kolloidal silika solüsyonları vasıtasıyla zımparalanarak ve parlatılarak mikroyapı karakterizasyonuna hazır hale getirilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntüleri Leica IMC 1000 optik mikroskobu, JEOL JSM 7000F alan emisyonlu tarama elektron mikroskobu (FEG-SEM) ile EDS donanımlı JEOL JSM 5400 LV tarama elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak elde edilmiştir.

Basma deneyi ise, TSE 206 standartına bağı kalınarak, Alşa eğme ve çekme cihazı makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basma deneylerinde deney cihazı kafası, numunelerin konulduğu tabla ve numune eksenlerinin aynı doğrultuda olmasına dikkat edilmiştir. Deneyden önce bütün numunelerin tabanları ve tablalar aseton ile temizlenerek, kirlilikler giderilmiştir. Deney hızı 0,5 mm/dk. olarak belirlenmiş, yük numune yüzeyinde ilk çatlama meydana gelene kadar uygulanmıştır (Şekil 5.13).



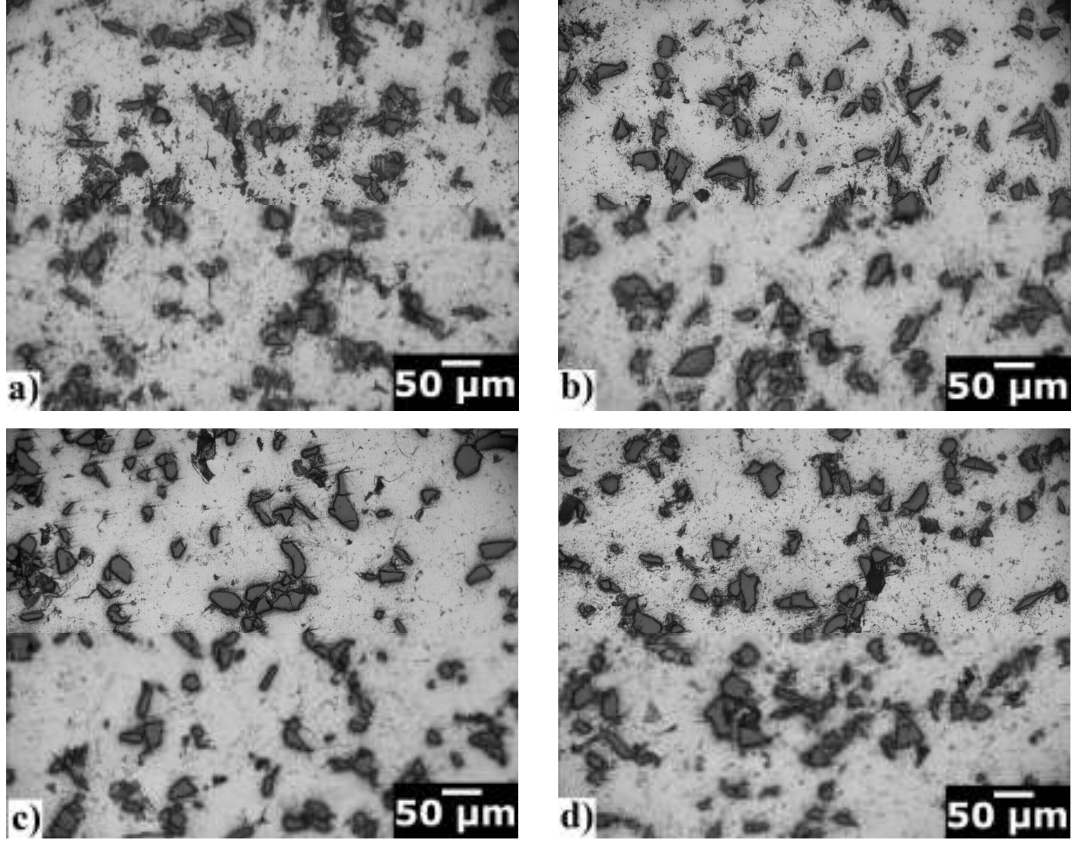
Şekil 5.13 Basma deneyinde uygulanan yük ile numune yüzeyinde oluşan çatlak

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1 Birinci Aşama Deneylerin Sonuçları ve Tartışma

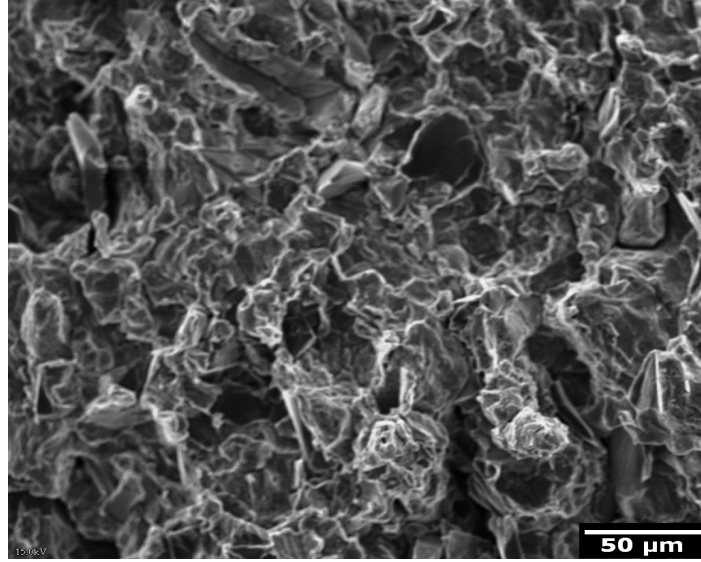
6.1.1 Metalografik İnceleme

Numunelerden alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Mikroyapısal incelemede B_4C partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağılmakla birlikte, bazı bölgelerde partiküllerin aglomere olduğu tespit edilmiştir.



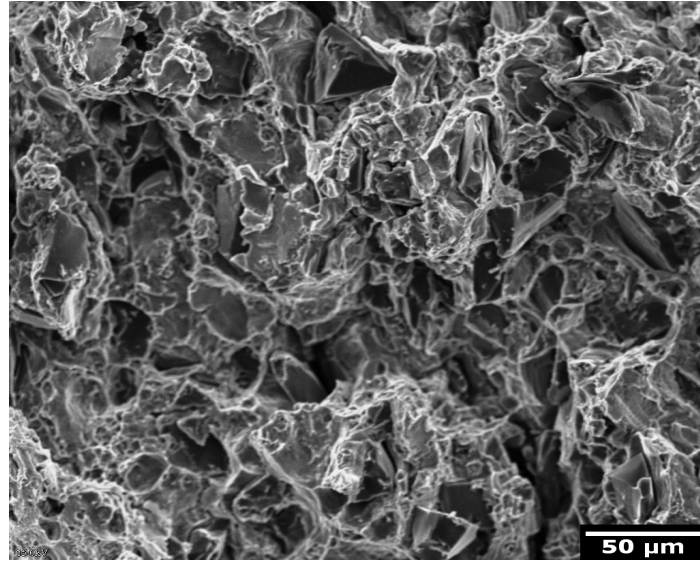
Şekil 6.1 Birinci aşama deneylerde değişik presleme basıncı uygulanmış numunelerin 350 x büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri (a) 200 MPa (b) 400 MPa (c) 600 MPa (d) 800 MPa

Sinterleme süresinin kompozitin sinterleme davranışı ve Al- B_4C partikülleri arasındaki etkileşimi üzerine etkisini incelemek amacıyla S6, S7, S8 ve S9 nolu numunelerin kırılma yüzey görüntüleri alınmıştır. 550°C’ta 2 saat sinterlenmiş S6 numunesinde sinterleme süresinin sinterleme mekanizmalarını gerçekleştirmekte yetersiz kaldığı, partiküllerin presleme işlemine maruz kalmış numune görüntüsü sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 6.2).

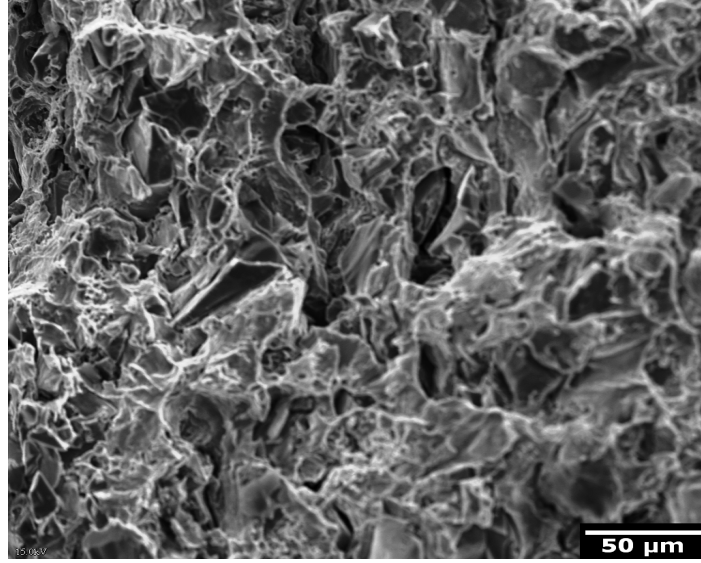


Şekil 6.2 600 Mpa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 2 saat süre ile Al/B₄C numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü

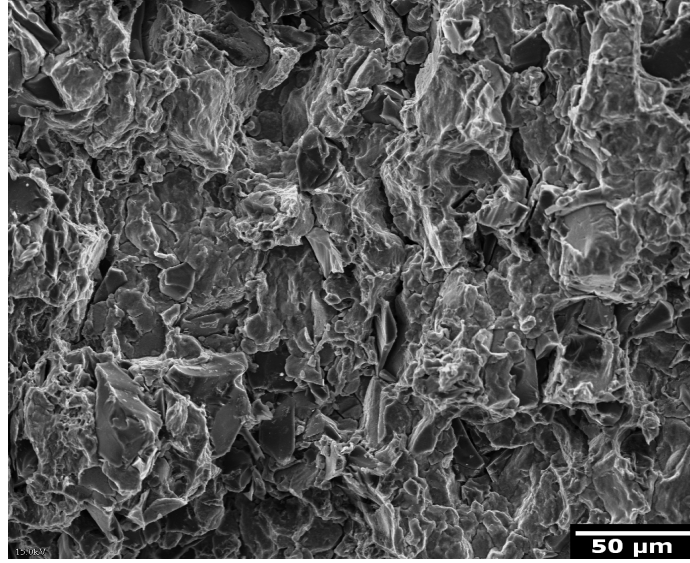
S7, S8 ve S9 numunelerinde kırılma yüzeyi görüntülerinde ise sinterleme süresinin artması ile partiküllerin birbirleri arasında malzeme taşınımının arttığı ve bunun sonucunda sinterlemenin başarı ile gerçekleştiğini görülmüştür. Fakat B₄C partiküllerinin kırılma esnasında yapıdan ayrılırken partikülsüz büyük boşluklar bırakması (Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5) matris-takviye elemanı arayüzeyinde yeterli bağ kuvvetinin oluşmadığının bir göstergesidir (Gan vd., 2007). Bunun nedeni, matris ile takviye elemanı arasındaki uyumsuzluğun güçlü bir arayüzey bağının oluşmasını engellemesidir. Bu uyumsuzluk kırılmanın matris ile takviye elemanı arayüzeyinde gerçekleşmesine neden olmuştur.



Şekil 6.3 600 Mpa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 3 saat süre ile Al/B₄C numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü



Şekil 6.4 600 Mpa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 4 saat süre ile Al/B₄C numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü



Şekil 6.5 600 Mpa basınçla preslenen, argon atmosferinde 550 °C’de 5 saat süre ile Al/B₄C numunesinin 350 x büyütmedeki kırılma yüzey görüntüsü

6.1.2 Yoğunluk Değerleri

Birinci aşama deneylerde, 200, 400, 600 ve 800 MPa presleme basınçlarında preslenerek, açık atmosfer ve argon gazı ortamı altında 550°C’de, 2, 3, 4 ve 5 saat süreyle sinterlenen Al/B₄C kompozit numunelerin presleme sonrası (green density) ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

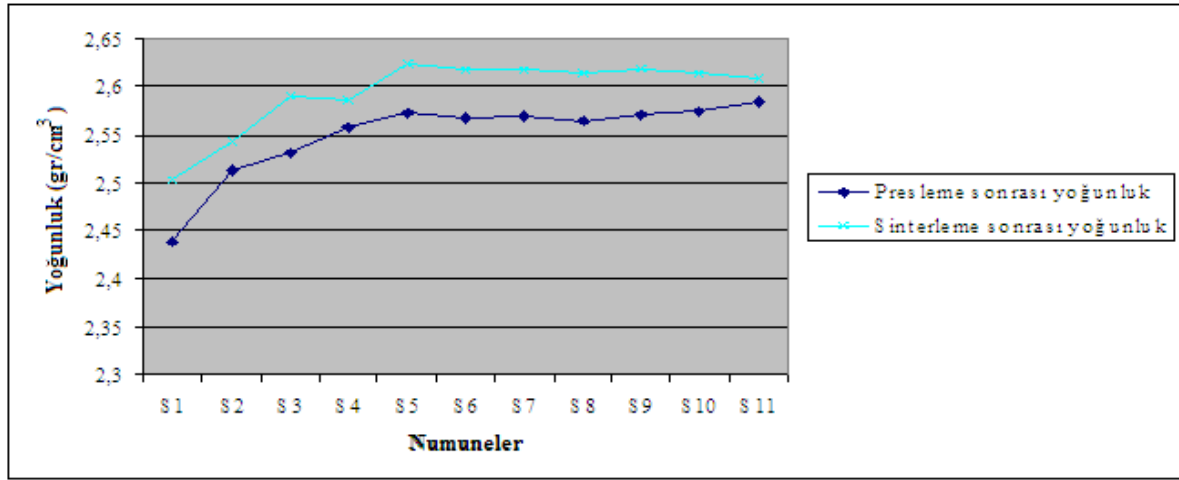
Elde edilen sonuçlarda, presleme sonrası yoğunluk değerlerinin presleme basıncının artışı ile doğru orantılı biçimde arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, presleme basıncı yükseldikçe, partiküllerin birbirleri üzerlerinde kayarak konum değiştirmeleri ve yeniden düzenlenmeleridir. Bu esnada, uygulanan basıncın tozun akma gerilmesi sınırını aşması ile partiküllerde plastik deformasyon meydana gelir ve temas alanı büyür. Deformasyon sonrası partiküllerin şekli değişir, deformasyon sertleşmesi meydana gelir, plastik akma ile poroziteler dolar ve malzemenin yoğunluğu artar. En yüksek presleme sonrası yoğunluk 800 MPa presleme basıncı uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalarda yoğunluk artışını doğrulamaktadır (Gökçe ve Fındık, 2008).

Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk değerleri ise sinterleme işlemi esnasında oluşan difüzyon ile malzeme taşınımı mekanizması sonucu numunelerin gözenekliliğinin azalması ile artış göstermiştir. Fakat 600 MPa presleme basıncına kadar devamlı artan yoğunluk değerleri 800 MPa presleme basıncında düşüş göstermiştir. Yoğunluk değerinin düşmesinin nedeni, artan presleme basıncıyla, meydana gelen aşırı plastik deformasyonun pekleşmeye neden olmasıdır. Bunun yanında, sinterleme süresi ve sinterleme atmosferi parametreleri, yoğunluk değerleri üzerinde presleme basıncı kadar etkili olmamıştır. Sinterleme sonrası en iyi yoğunluk değeri, 600 MPa presleme basıncı ve açık atmosfer sinterleme işleminde elde edilmiştir.

Çizelge 6.1 Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B₄C numunelerin presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri

Numune	Presleme Sonrası Yoğunluk	Teorik Yoğunluk (%)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk	Teorik Yoğunluk (%)
S1	2,4387 ± 0,008155	90,96	2,5038 ± 0,011053	93,39
S2	2,5130 ± 0,00502	93,73	2,5420 ± 0,007495	94,81
S3	2,5307 ± 0,022242	94,39	2,5910 ± 0,025725	96,64
S4	2,5574 ± 0,013431	95,39	2,5860 ± 0,011414	96,46
S5	2,5719 ± 0,001344	95,93	2,6229 ± 0,01617	97,83
S6	2,5675 ± 0,012239	95,76	2,6167 ± 0,006081	97,60
S7	2,5687 ± 0,003041	95,81	2,6174 ± 0,019903	97,63
S8	2,5635 ± 0,017324	95,62	2,6139 ± 0,02093	97,50
S9	2,5709 ± 0,007968	95,89	2,6184 ± 0,007283	97,67
S10	2,5743 ± 0,004814	96,02	2,6129 ± 0,010536	97,46
S11	2,5834 ± 0,01942	96,36	2,6092 ± 0,004596	97,32

* **S1**: 200 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S2**: 200 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi; **S3**: 400 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S4**: 400 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi; **S5**: 600 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S6**: 600 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi; **S7**: 600 MPa: 3 Saat: Argon Atmosferi; **S8**: 600 MPa: 4 Saat: Argon Atmosferi; **S9**: 600 MPa: 5 Saat: Argon Atmosferi; **S10**: 800 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S11**: 800 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi.



Şekil 6.6 Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B₄C numunelerin presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri

6.1.3 Sertlik Değerleri

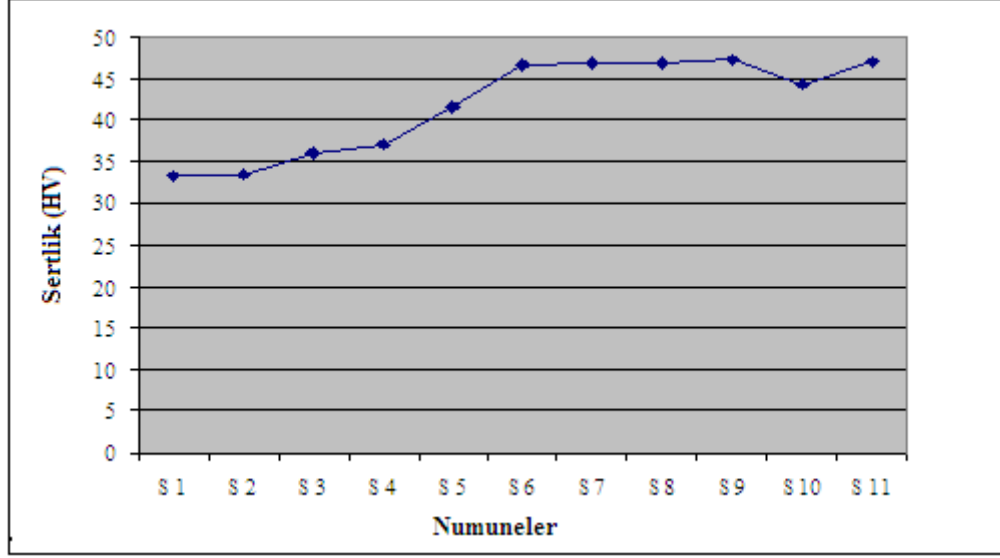
Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B₄C kompozit numunelerin, ölçümler sonucunda elde edilen sertlik değerleri ile presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B₄C kompozit numunelerin sertlik ile presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri

Numune	Mikrosertlik (HV ₅₀₀)	Presleme Sonrası Teorik Yoğunluk (%)	Sinterleme Sonrası Teorik Yoğunluk (%)
S1	33,2 ± 2,729	90,96	93,39
S2	33,4 ± 0,481	93,73	94,81
S3	36,1 ± 0,255	94,39	96,64
S4	37,08 ± 0,361	95,39	96,46
S5	41,5 ± 0,986	95,93	97,83
S6	46,56 ± 2,406	95,76	97,60
S7	46,87 ± 1,156	95,81	97,63
S8	46,91 ± 0,697	95,62	97,50
S9	47,32 ± 0,968	95,89	97,67
S10	44,29 ± 0,348	96,02	97,46
S11	46,99 ± 1,424	96,36	97,32

* **S1**: 200 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S2**: 200 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi; **S3**: 400 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S4**: 400 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi; **S5**: 600 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S6**: 600 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi; **S7**: 600 MPa: 3 Saat: Argon Atmosferi; **S8**: 600 MPa: 4 Saat: Argon Atmosferi; **S9**: 600 MPa: 5 Saat: Argon Atmosferi; **S10**: 800 MPa: 2 Saat: Açık Atmosfer; **S11**: 800 MPa: 2 Saat: Argon Atmosferi.

Numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, presleme basıncının artması ile sertlik değerlerinin önemli ölçüde arttığı, sertlik değerlerini etkileyen en önemli parametre olduğu net bir şekilde görülmektedir. 200 ve 400 MPa presleme basıncında istenen sertlik değerlerine ulaşılammış, 600 Mpa presleme basınç değerlerinde yüksek oranda sertlik artışı meydana gelmiştir (Şekil 6.7). Presleme basıncının 800 MPa değerinde uygulandığı numunelerde ise, sertlik değerlerinde bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Sertlik değerlerinin azalma sebebi, artan presleme basıncıyla, yapıda aşırı plastik deformasyon meydana gelmesi ve pekleşmenin oluşmasıdır. Argon atmosferinde üretilen numunelerde, açık atmosferde üretilenlere göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Ölçümlerde S9 nolu numunenin en yüksek sertliğe sahip numune olduğu görülmüştür. Bunun nedeni sinterleme süresinin artışı ile kompozit numunenin yapı içerisinde gözeneklerin azalması ve mukavemetinin artmasıdır.



Şekil 6.7 Birinci aşama deneylerde üretilmiş Al/B₄C kompozit numunelerin sertlik ile presleme ve sinterleme işlemi sonrası yoğunluk değerleri

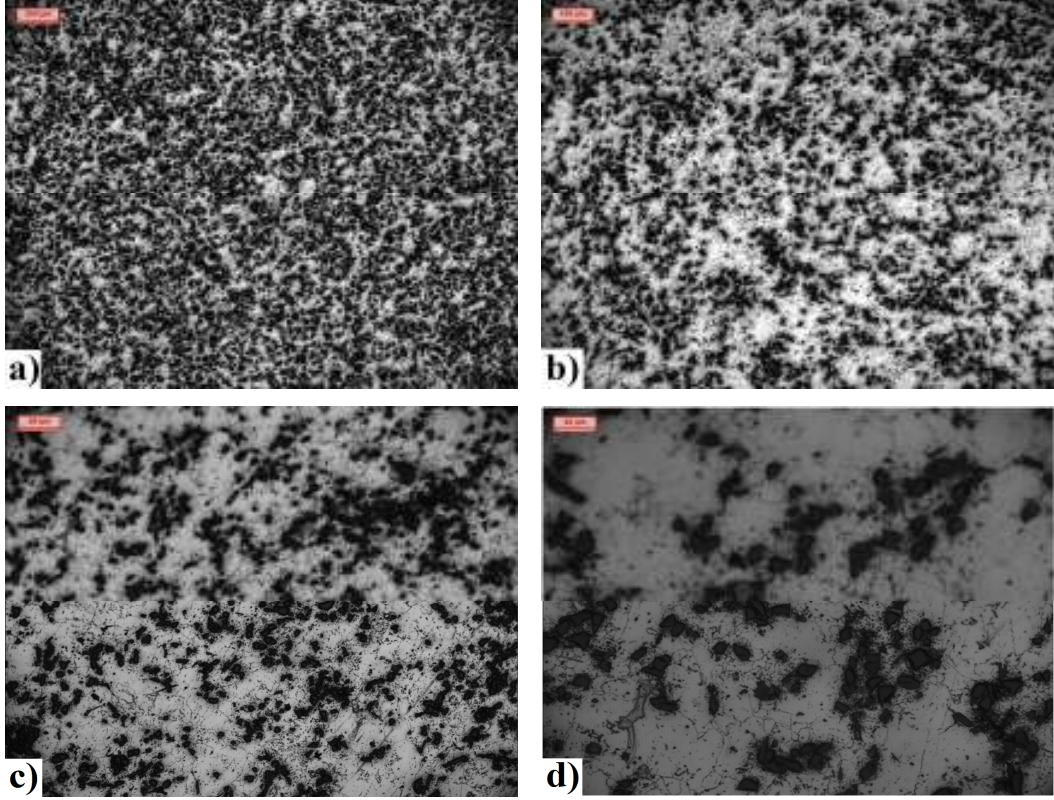
6.2 İkinci Aşama Deneylerin Sonuçları ve Tartışma

6.2.1 Metalografik İnceleme

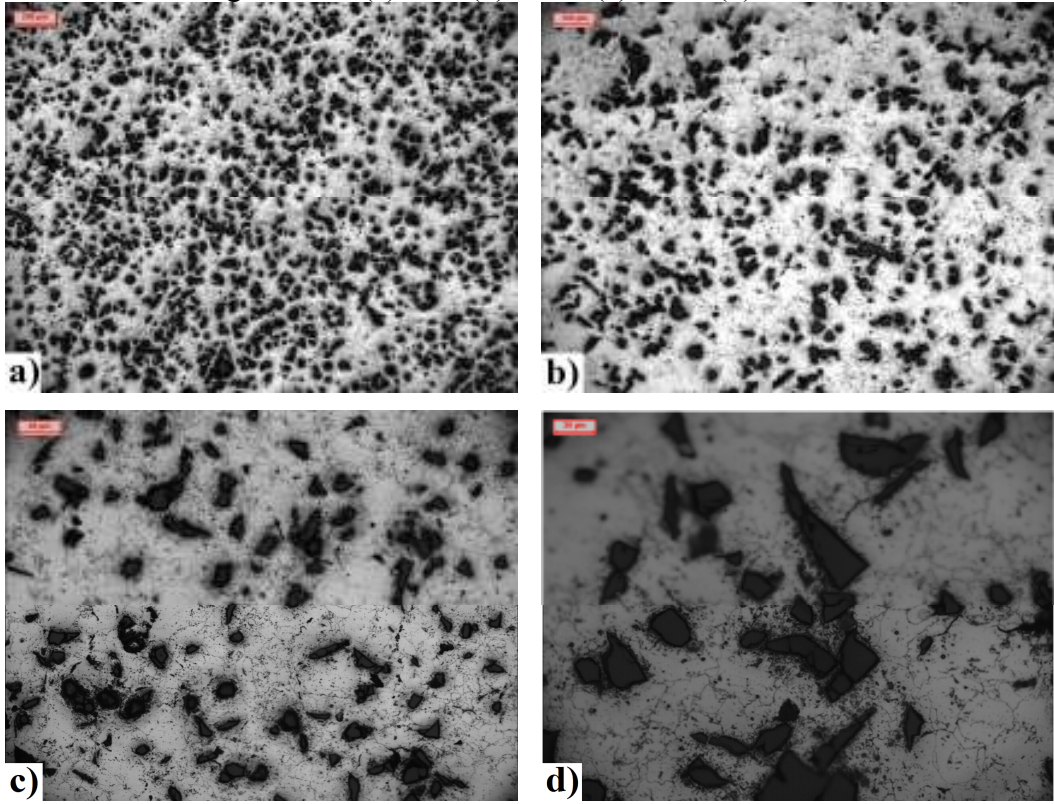
6.2.1.1 Optik Mikroskop Görüntüleri

Al matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi, çelik kalıp içerisinde tek eksenli presleme yöntemi ile presleme ve yatay tüp fırınında sinterleme işlemlerini kapsamaktadır. 15, 25 ve 58 µm partikül boyutuna sahip (sırasıyla % 10, 10, 80 oranında harmanlanmış) saf Al tozlarına (54 µm), 10, 32 ve 59 µm partikül boyutuna sahip B₄C tozları, ağırlıkça % 10 oranında katılmıştır.

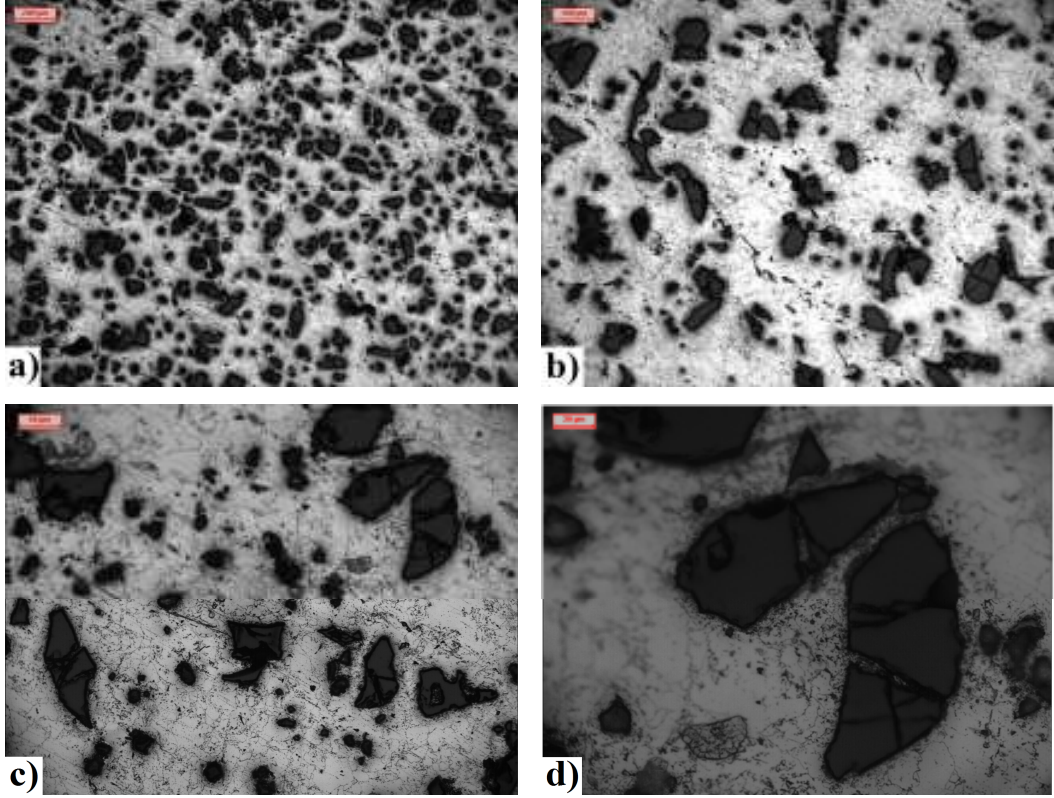
Şekil 6.8, 6.9, 6.10'da 10, 32 ve 59 µm partikül boyutuna sahip B₄C takviyeli AMK numunelerinin mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, takviye elemanının matris fazı içerisinde homojen bir şekilde karışmış olduğu, fakat şekil 6.8 d'de matris içerisinde kısmi B₄C topaklanmalarının olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8 10 μm partikül boyutuna sahip B_4C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500



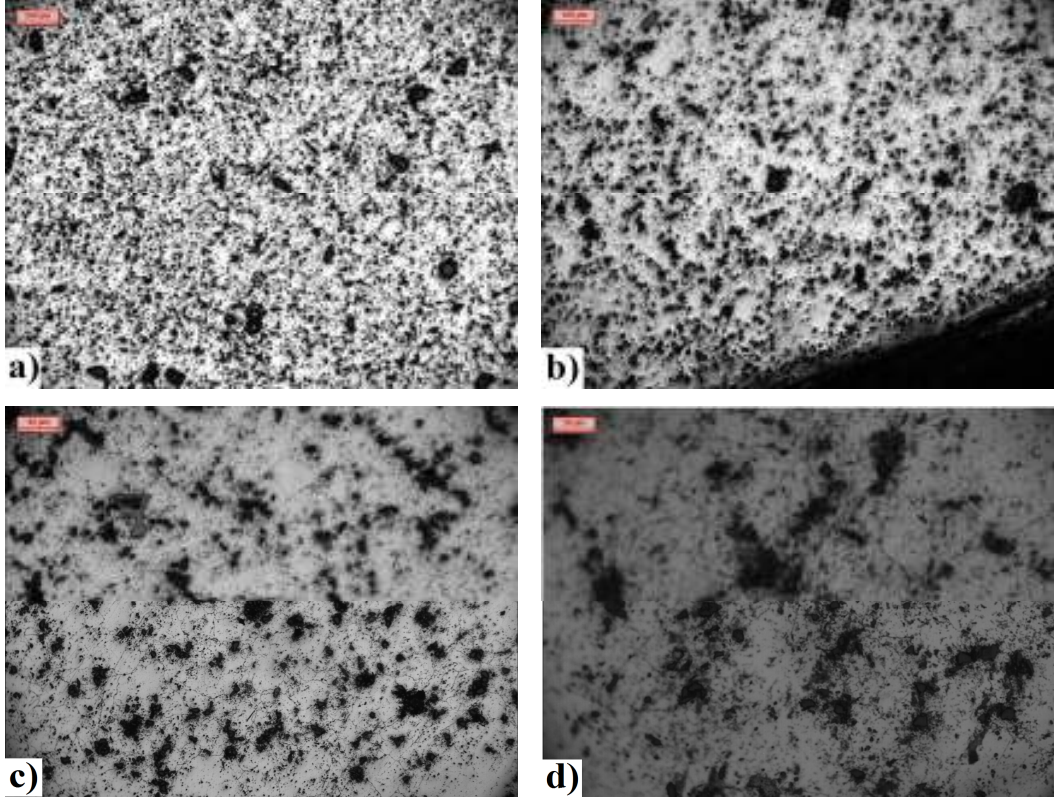
Şekil 6.9 32 μm partikül boyutuna sahip B_4C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500



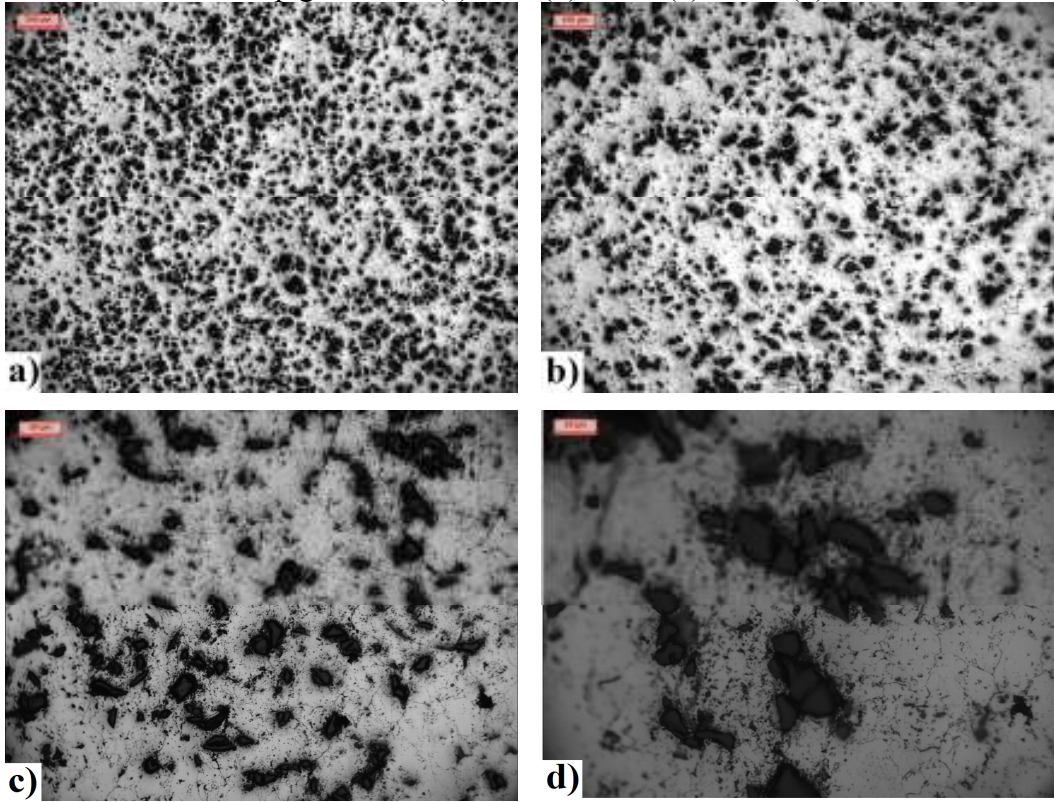
Şekil 6.10 59 μm partikül boyutuna sahip B_4C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500

Literatür incelendiğinde, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerde en iyi özellikleri elde etmek için, takviye elemanının matris fazı içerisinde homojen şekilde dağıtılması gerektiği belirtilmiştir. Takviye elemanının kümelenmesi, malzeme üzerinde meydana gelen gerilimlerin transfer edilmesini engellemekte ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde düşüşlere neden olmaktadır. Takviye elemanının homojenizasyonunu mümkün kılmak için, matris-takviye elemanı partikül boyutu oranının (PSR) olabildiğince küçük olması gerekir (Slipenyuk vd., 2004; Slipenyuk vd., 2006). Çalışmada kullanılan B_4C tozlarının partikül boyutları karşılaştırıldığında, sırasıyla 10, 32, 59 μm olup, PSR değerleri 5,4, 1,6875 ve 0,9153 olmaktadır. PSR değerleri literatürdeki çalışmaları doğrulayacak nitelikte 10 μm partikül boyutuna sahip B_4C 'de daha yüksek çıkmış ve B_4C tanelerinin kısmi kümelenmeleri açıklanmıştır.

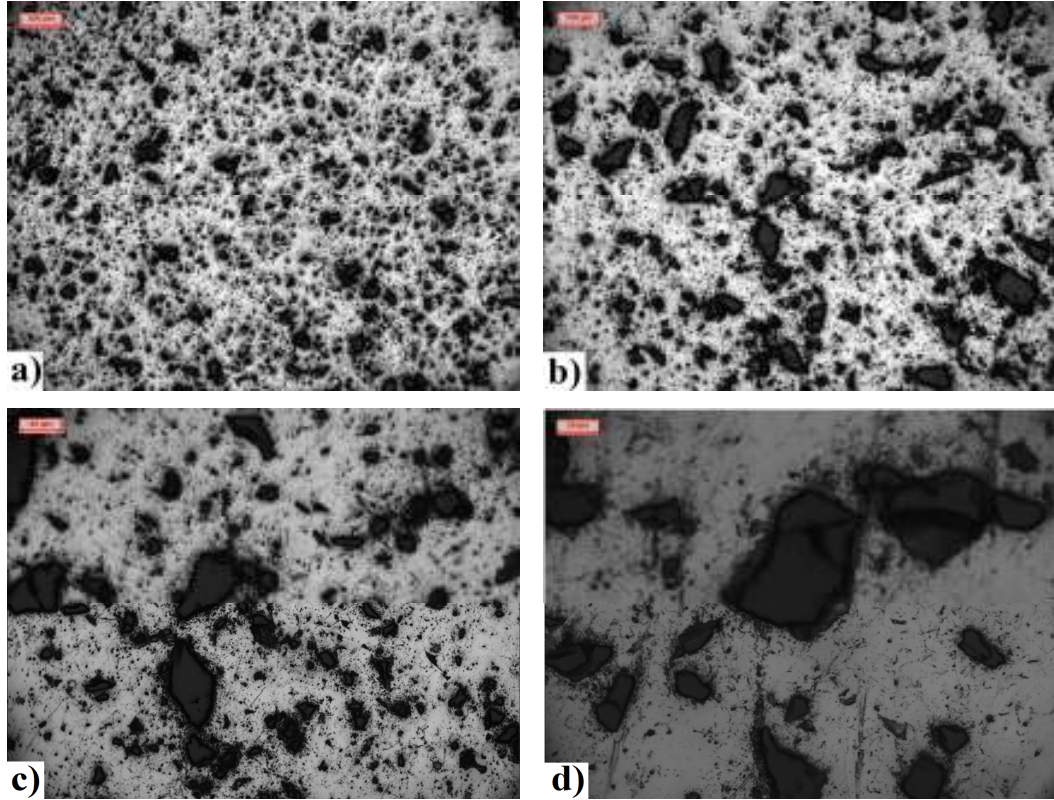
Şekil 6.11, 6.12, 6.13'de, 10, 32 ve 59 μm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B_4C takviyeli AMK malzemelerin mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere, B_4C takviye elemanı alüminyum matris fazı içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmıştır.



Şekil 6.11 10 μm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B_4C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500

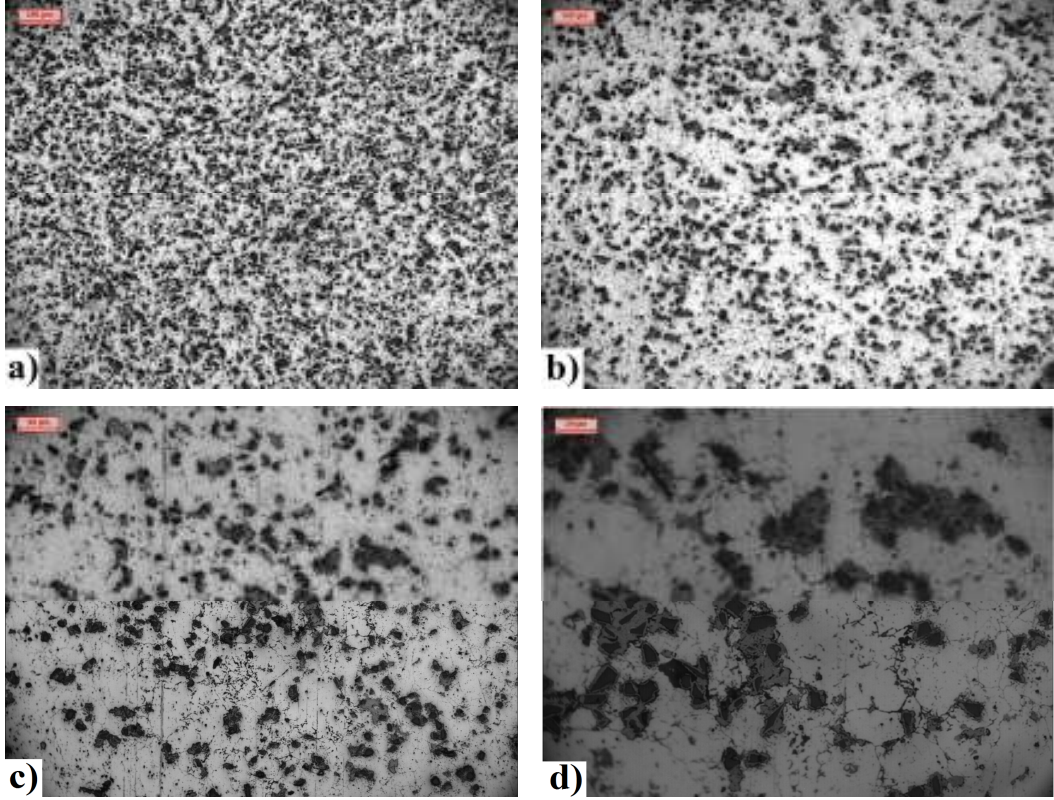


Şekil 6.12 32 μm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B_4C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500

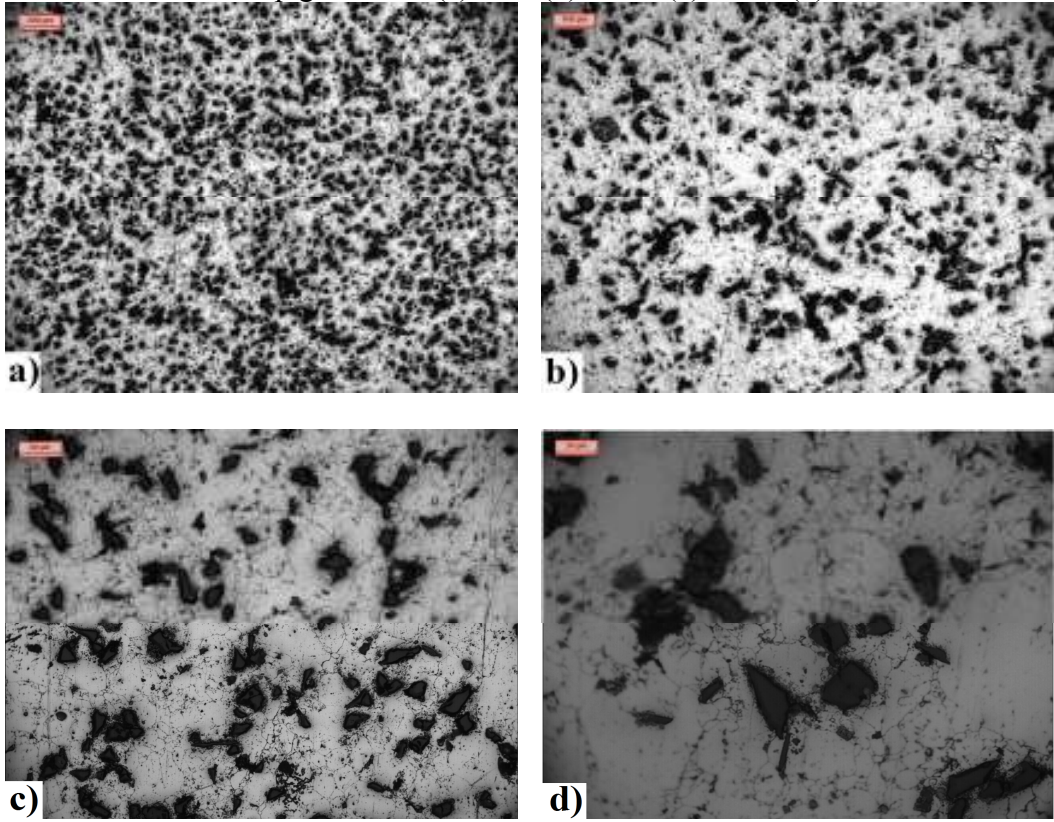


Şekil 6.13 59 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B₄C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500

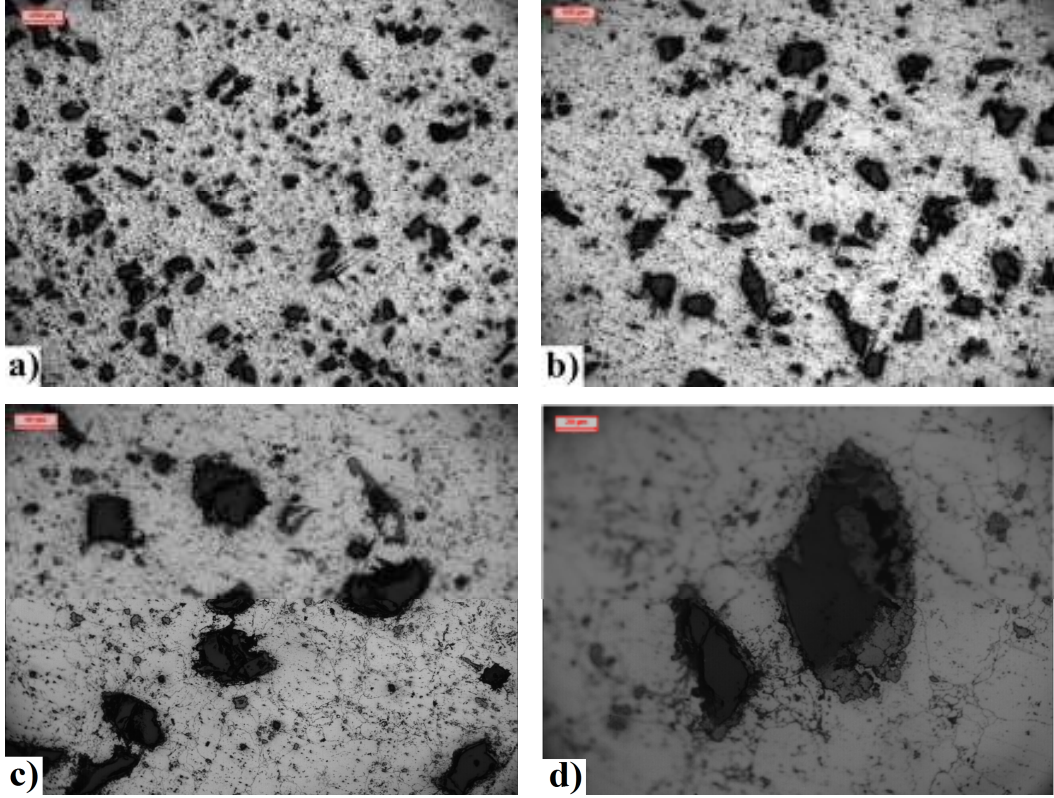
Şekil 6.14, 6.15, 6.16'da, 10, 32 ve 59 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C takviyeli AMK malzemelerin mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde, 32 ve 59 µm partikül boyutuna sahip B₄C takviyeli AMK numunelerde yeterli homojen dağılımın sağlandığı, bunun yanında 10 µm partikül boyutuna sahip B₄C takviyeli AMK numunelerde B₄C tanelerinin Ni kaplama ile bazı bölgelerde aglomere olduğu şekil 6.14 d'de net bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeni yukarıda belirtilmiş olan matris-takviye elemanı partikül boyutu oranının (PSR) büyük olmasıdır. 59 µm partikül boyutuna sahip B₄C takviyeli AMK numunelerde nikelin B₄C tanelerini istenen düzeyde kapladığı görülmektedir.



Şekil 6.14 10 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500



Şekil 6.15 32 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C takviyeli AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500



Şekil 6.16 59 μm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B_4C takviyeli AMK mazlemelerin optik mikroskop görüntüsü (a) X50 (b) X100 (c) X200 (d) X500

6.2.1.2 SEM Görüntüleri

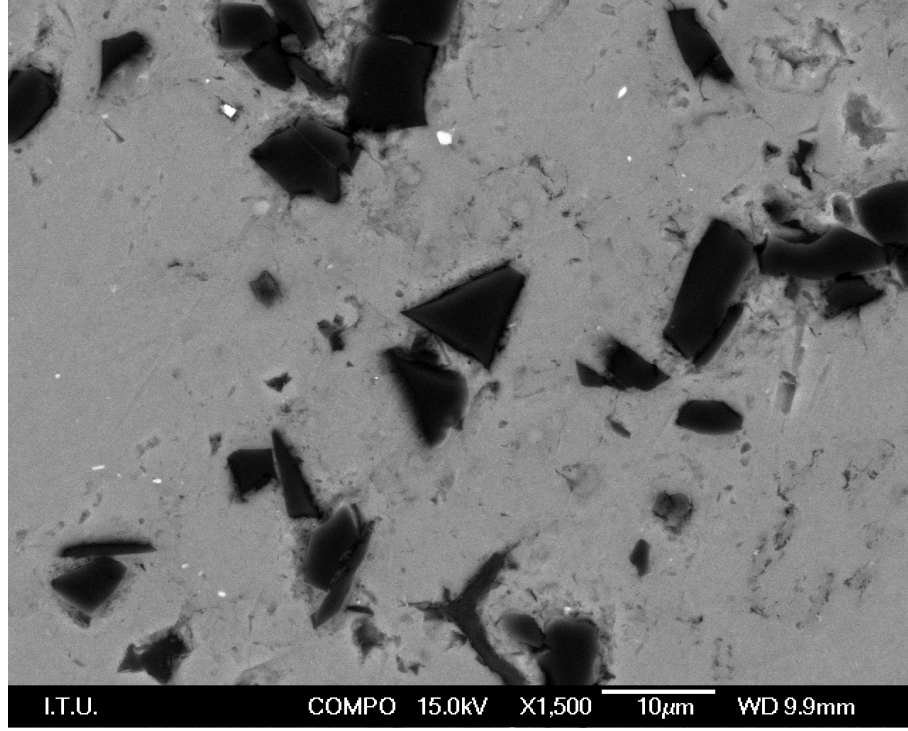
Şekil 6.17–34’de farklı partikül boyutu ve arayüzey özelliklerine sahip B_4C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin SEM görüntüsü ve arayüzey görüntüsü verilmiştir.

Şekil 6.17–22’de gösterilen kaplama uygulanmamış B_4C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, Al- B_4C arayüzeyinin istenen düzeyde gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle 10 μm partikül boyutunda B_4C kullanılan kompozitin Al- B_4C arayüzeyi Şekil 6.18’de görüleceği üzere, oldukça kompaktır.

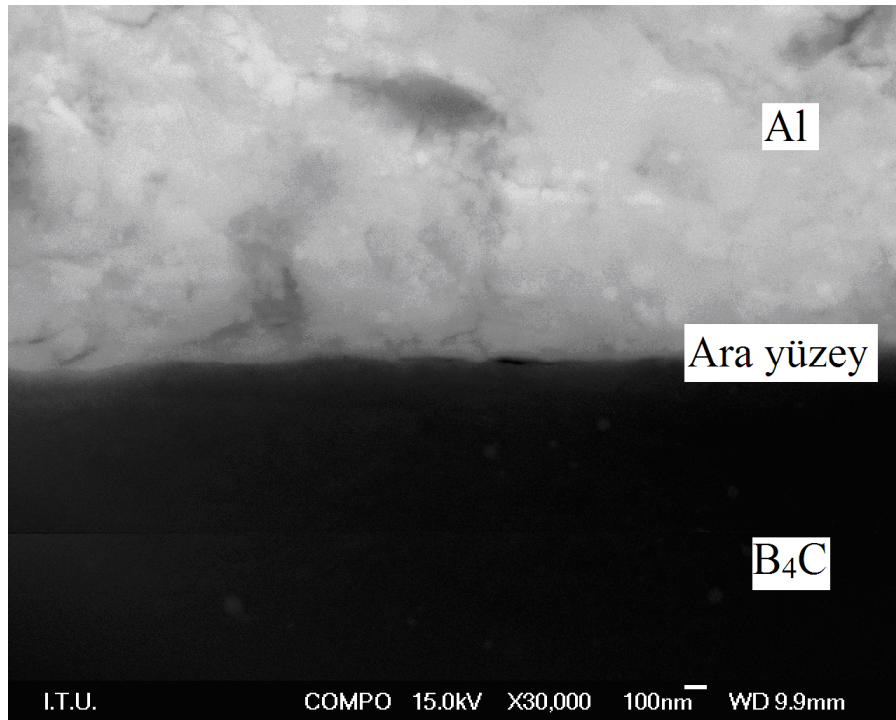
Şekil 6.23-29’de gösterilen oksit kaplı B_4C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin SEM görüntülerinde, ilk göze çarpan matris fazında bazı istenmeyen artık malzemelerin oluşudur. Bu kirliliğin nedeni, kompozitin üretimi esnasında matrise yabancı maddeler bulaşması olarak açıklanabilir. Arayüzey görüntüleri göz önüne alındığında, oksit tabakası net bir şekilde görülememiş, en iyi arayüzey görüntüsünün 10 μm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B_4C takviyeli numunede elde edilmiştir.

Şekil 29–34’de gösterilen, Ni kaplanmış B_4C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerde, bütün takviye elemanı boyutlarında akımsız kaplama yöntemi ile Ni kaplama işleminin başarı ile gerçekleştiği görülmüştür. Fakat B_4C partiküllerindeki Ni’in bir kısmı arayüzeyden

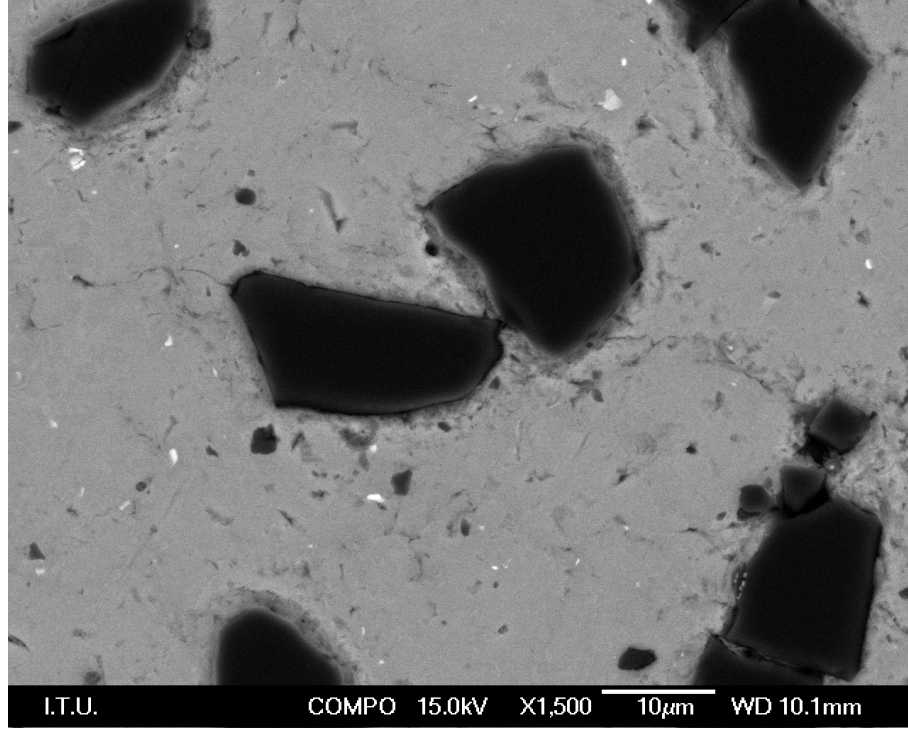
ayrılarak matris fazına geçmiştir. Bunun nedeni, Ni kaplı B_4C partiküllerinin karıştırma işlemi esnasında karıştırma kabı ve Al partikülleri ile kontak kurmaları ve bunun sonucunda meydana gelen aşınmanın Ni'i B_4C partikülleri yüzeyinden koparması olarak açıklanabilir. Ni kaplı B_4C partikülleri kaplanmamış ve oksit kaplı B_4C partikülleri ile karşılaştırıldığında, Ni kaplı B_4C partiküllerinin Al ile daha iyi temas ettiği gözlemlenmiştir. Al- B_4C arayüzeyindeki temasın iyi olması Ni ile Al arasındaki uyumun yani metal-metal bağlanmasının bir sonucudur. Ni kaplı B_4C içeren kompozit numunelerde kaplama kalınlıklarının belirtilen teorik değerlerden daha fazla olduğu ve Ni'in arayüzeyde yekpare bir şekilde değil, patlamış mısırı andıran bir formda bulunduğu görülmektedir. Bunun başlıca üç sebebi vardır. Bunlardan ilki; yapılan teorik hesaplamaların saf Ni'e göre yapılması ve P'un göz ardı edilmesidir. İkinci neden, numunenin kesilmesi sırasında kesim açısı tabakayı daha kalın gösterecek eğimde olabilir. Son ve en önemli neden ise, numune hazırlama sırasında Ni kaplamanın sıvanmasıdır (Zhu vd., 2008). Takviye elemanının homojen dağılımı göz önüne alındığında, 10 μm partikül boyutunda oksit kaplı B_4C partikülleri Ni ile etkileşime girerek kompozitin bazı bölgelerinde topaklanmaya neden olduğu ve takviye elemanının homojen dağılımını etkilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.17 10 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



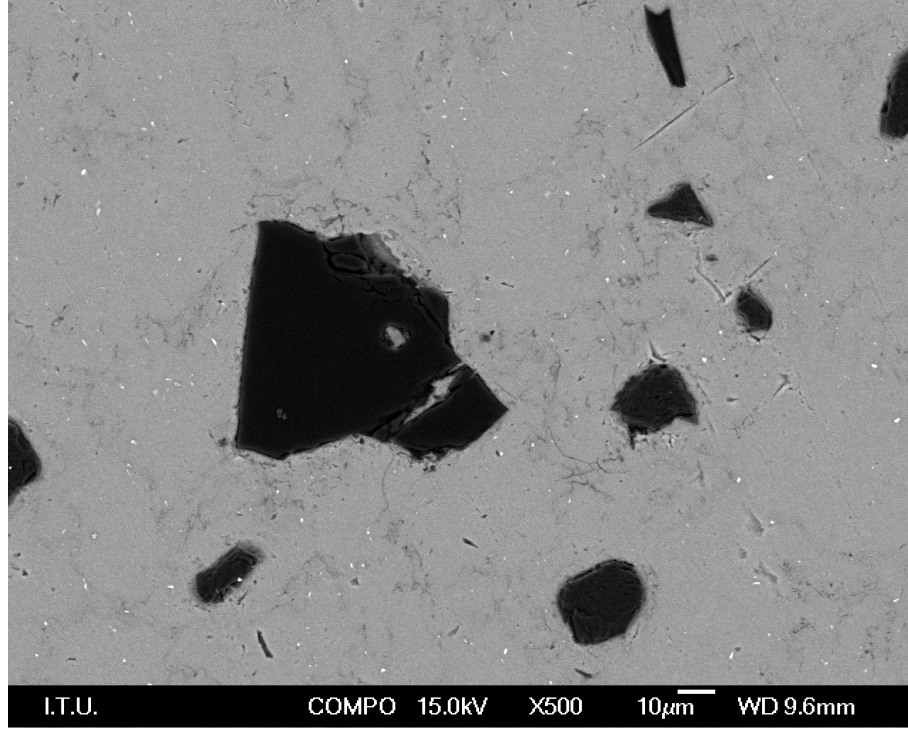
Şekil 6.18 10 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B₄C içeren AMK malzemenin Al- B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



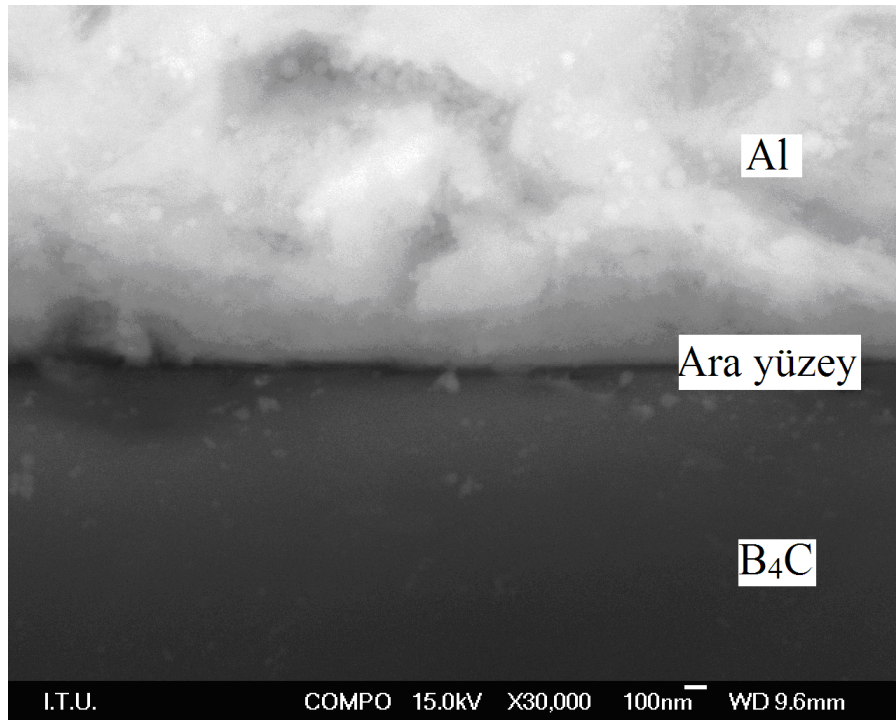
Şekil 6.19 32 μm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



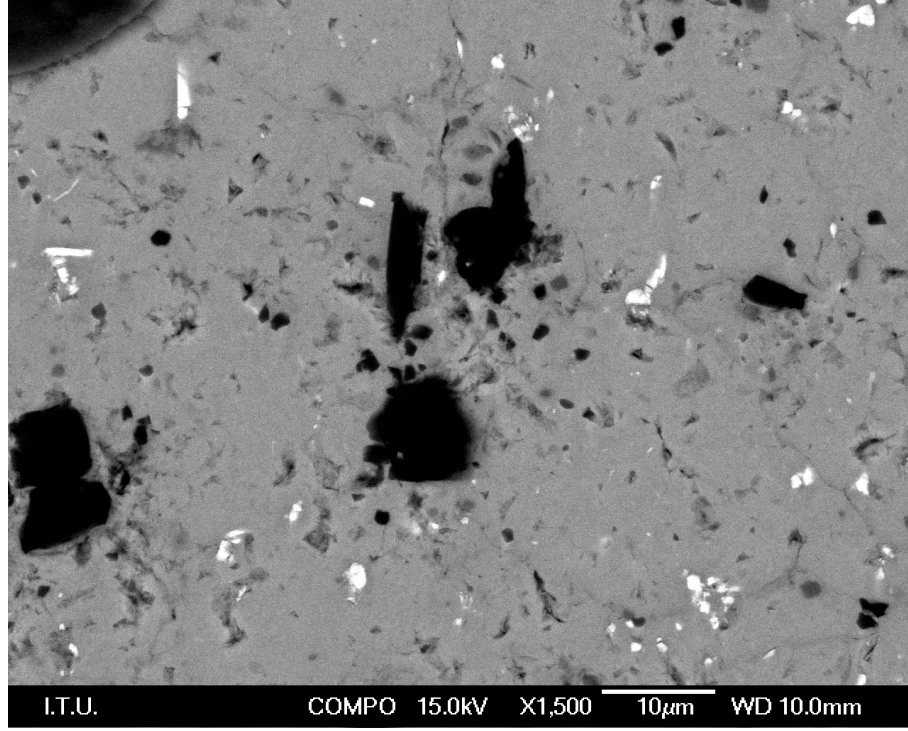
Şekil 6.20 32 μm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B₄C içeren AMK malzemenin Al- B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



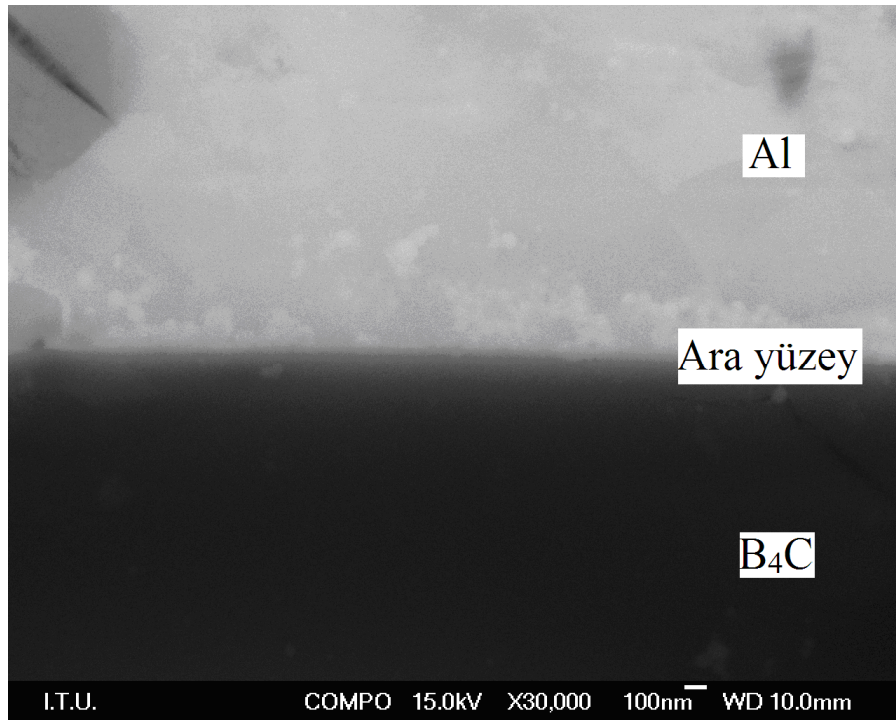
Şekil 6.21 59 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



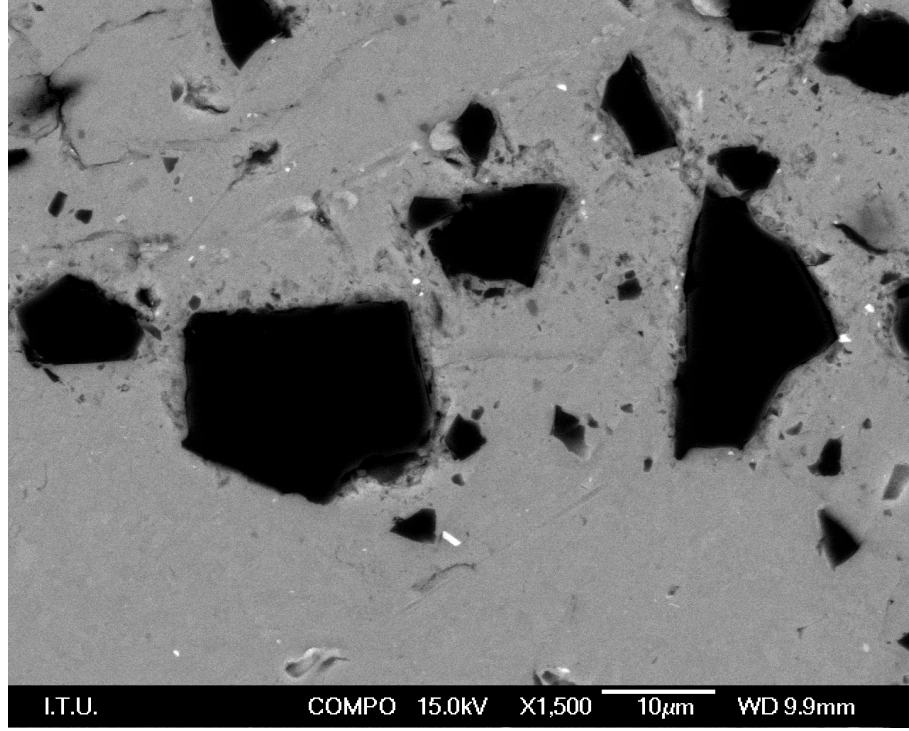
Şekil 6.22 59 µm partikül boyutuna sahip kaplanmamış (as-received) B₄C içeren AMK malzemenin Al- B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



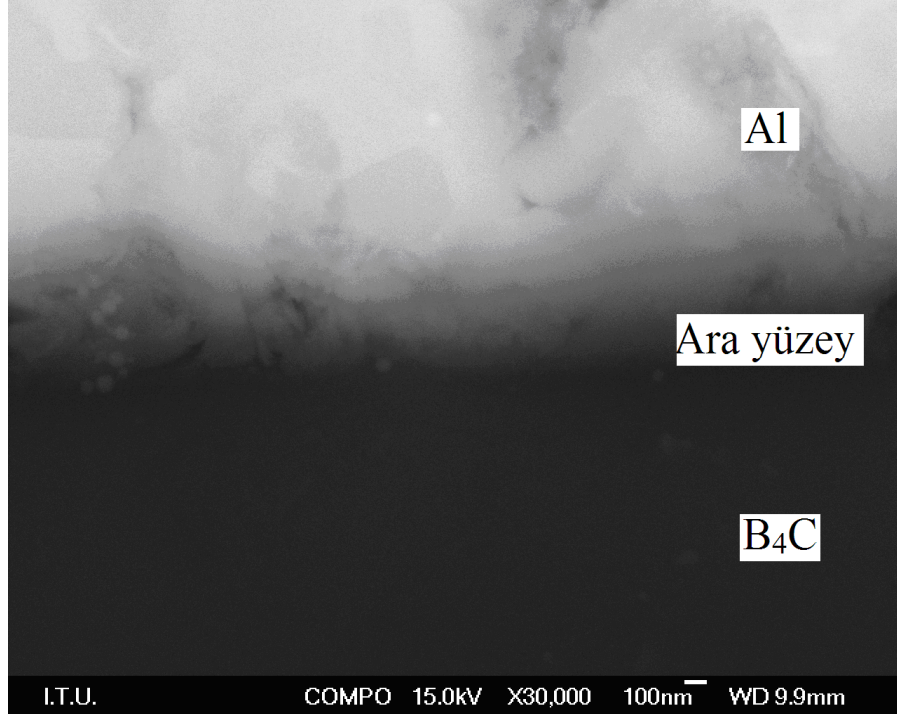
Şekil 6.23 10 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



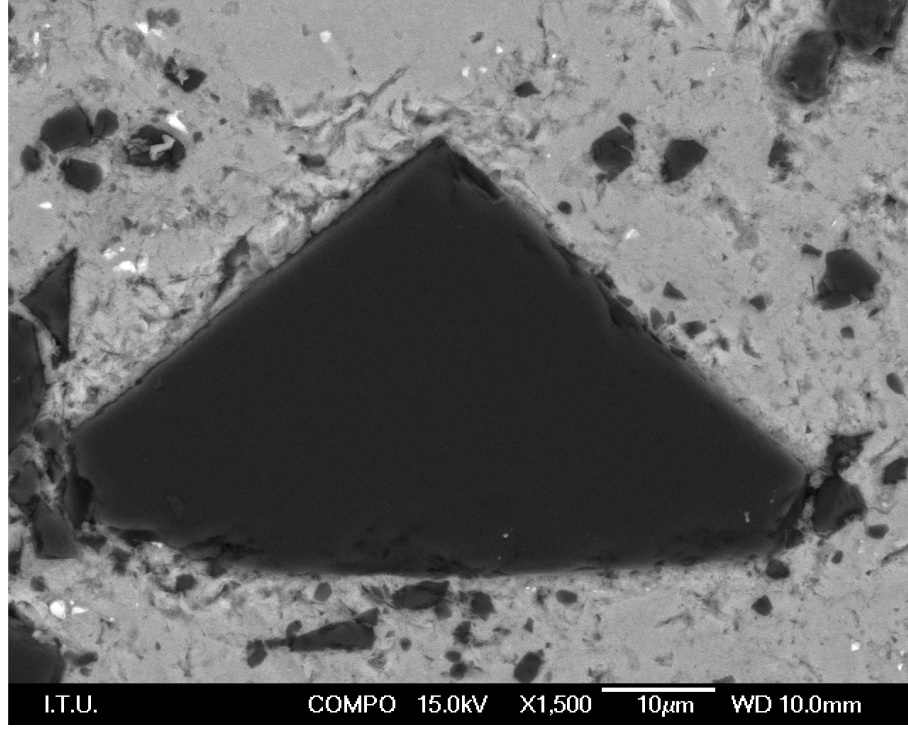
Şekil 6.24 10 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B₄C içeren AMK malzemenin Al-B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



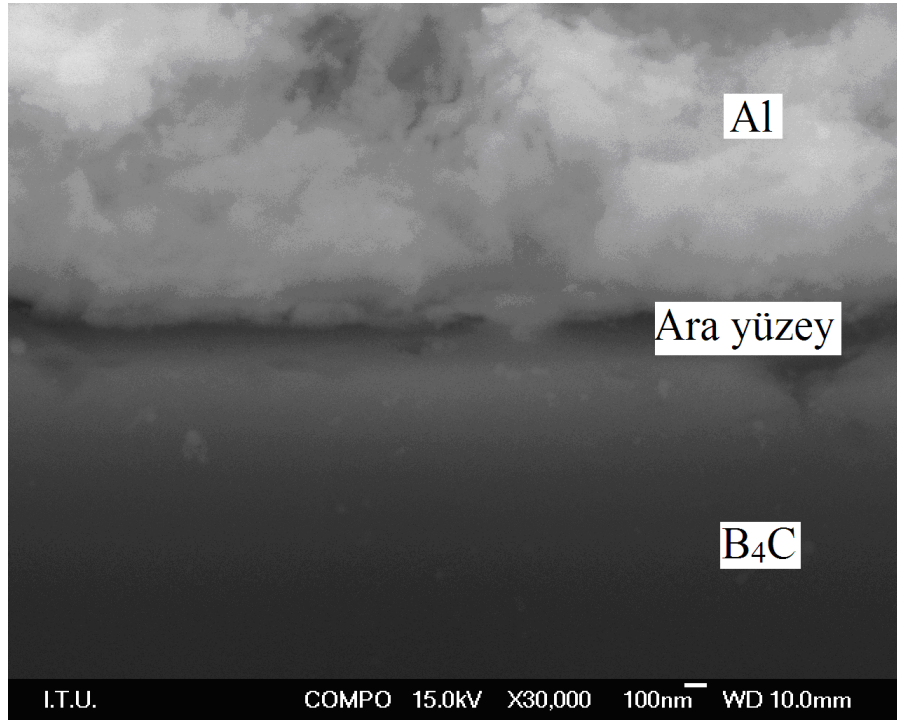
Şekil 6.25 32 μm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B_4C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



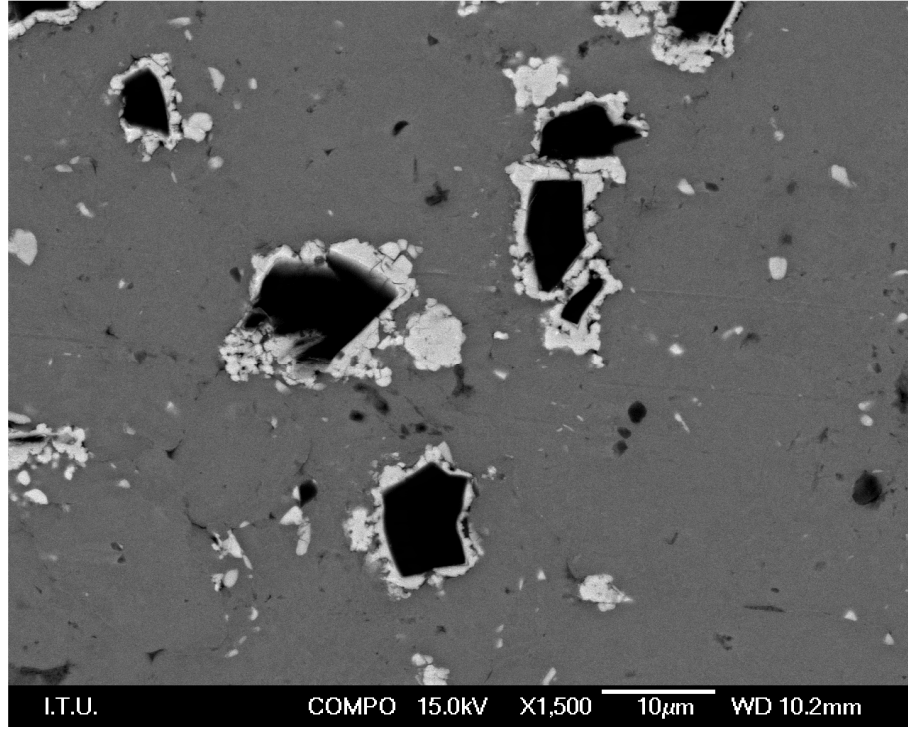
Şekil 6.26 32 μm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B_4C içeren AMK malzemenin Al- B_4C arayüzeyi SEM görüntüsü



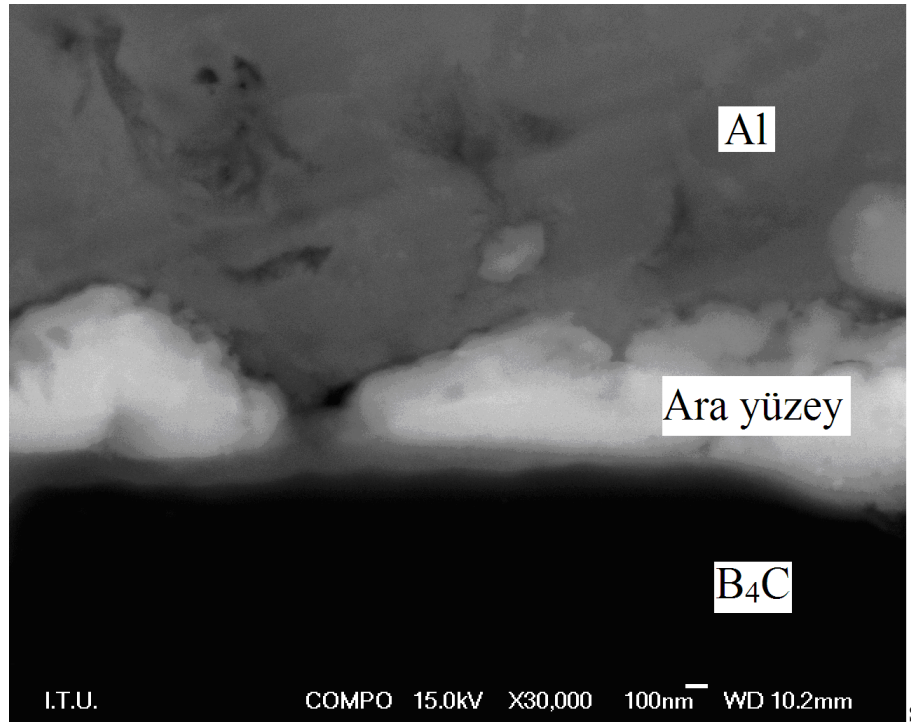
Şekil 6.27 59 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



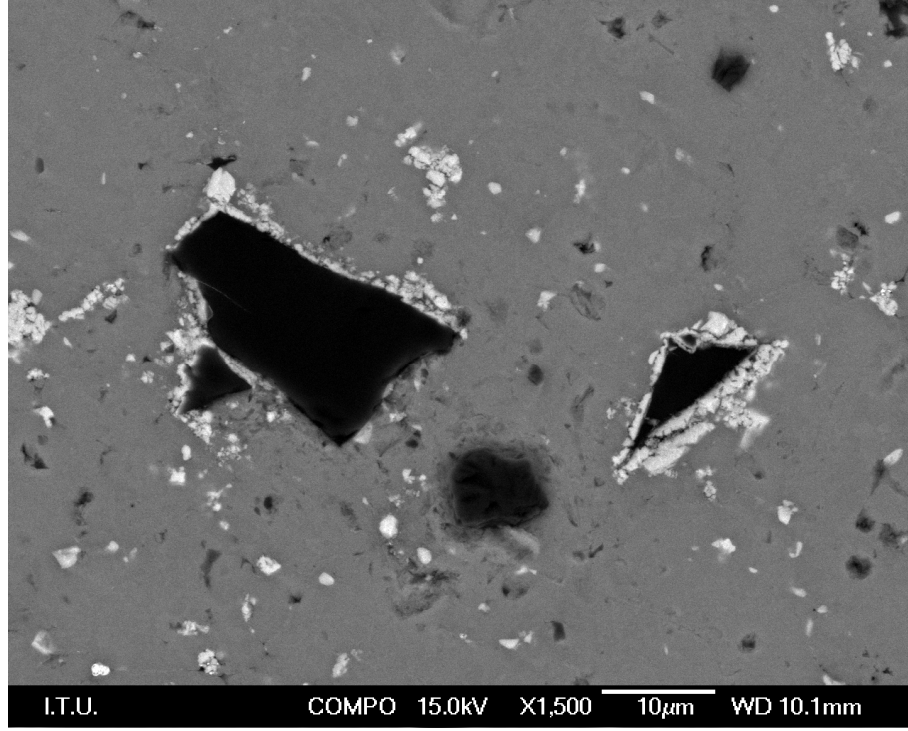
Şekil 6.28 59 µm partikül boyutuna sahip oksit kaplı B₄C içeren AMK malzemenin Al- B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



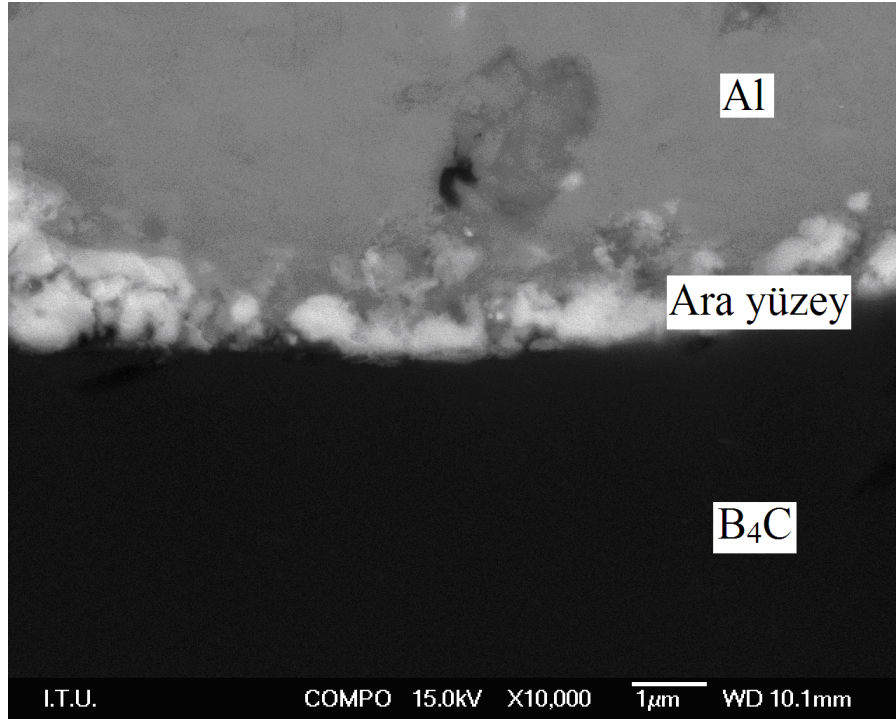
Şekil 6.29 10 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



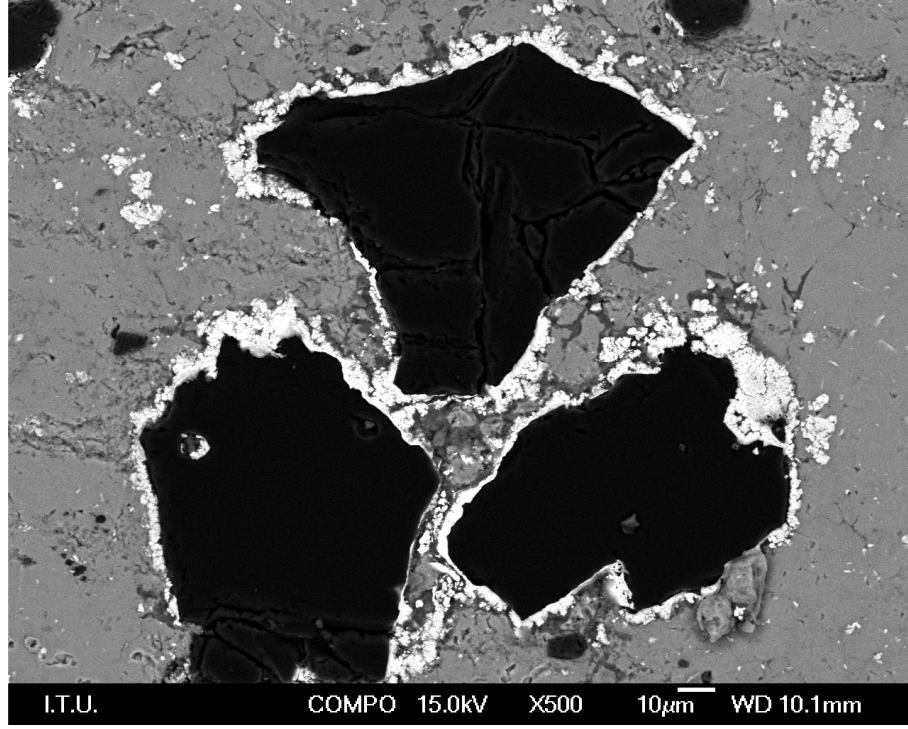
Şekil 6.30 10 µm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C içeren AMK malzemenin Al- B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



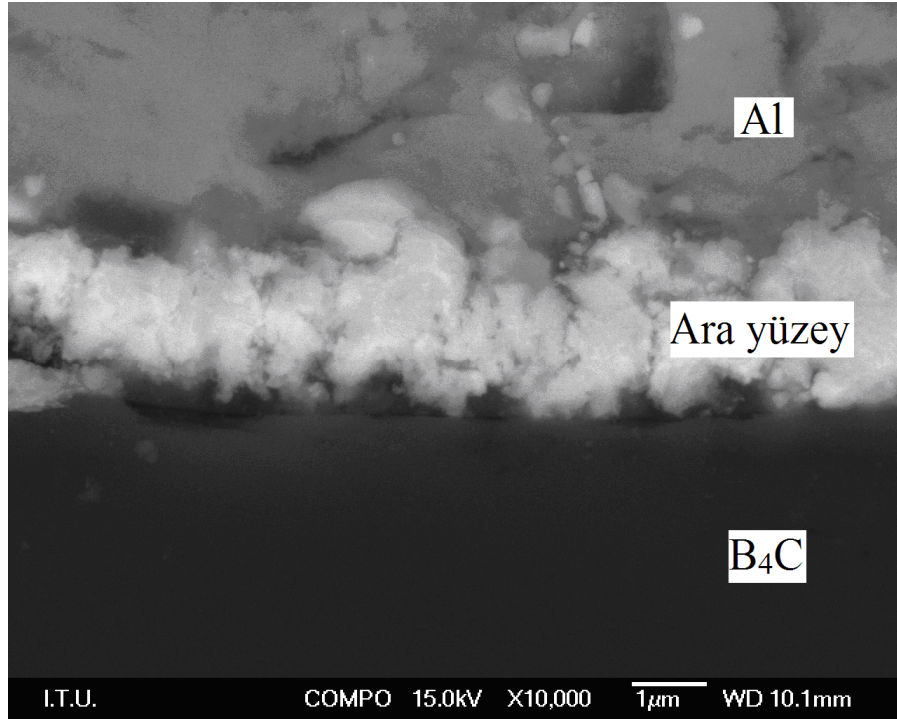
Şekil 6.31 32 μm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



Şekil 6.32 32 μm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B₄C içeren AMK malzemenin Al-B₄C arayüzeyi SEM görüntüsü



Şekil 6.33 59 μm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B_4C içeren AMK malzemenin SEM görüntüsü



Şekil 6.34 59 μm partikül boyutuna sahip nikel kaplı B_4C içeren AMK malzemenin Al- B_4C arayüzeyi SEM görüntüsü

6.2.2 Mekanik Muayene

6.2.2.1 Varyans Analizi (ANOVA)

ANOVA analizi ile takviye elemanı partikül boyutu (A), sinterleme süresi (B), sinterleme sıcaklığı (C), takviye elemanı ön işlemi (D) değişkenlerinin, Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk, porozite, sertlik ve basma mukavemeti değerleri üzerinde ne miktarda etkili olduğu araştırılmıştır. Çizelge 6.3’de Minitab 15 programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ANOVA işleminin doğrusal model yöntemi çıktısı gösterilmiştir. Kompozit numunelerin yoğunluk, porozite, sertlik, basma mukavemeti ANOVA tabloları, doğrusal model çıktısı esas alınarak düzenlenmiştir.

Çizelge 6.3 ANOVA işleminin doğrusal model yöntemi çıktısı

General Linear Model: Sertlik (HV); Basma Mukave; ... versus A; B; ...

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	3	1; 2; 3
B	fixed	3	1; 2; 3
C	fixed	3	1; 2; 3
D	fixed	3	1; 2; 3

Analysis of Variance for Sertlik (HV), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	12,5160	12,5160	6,2580	15,44	0,000
B	2	28,9532	28,9532	14,4766	35,73	0,000
C	2	10,9103	10,9103	5,4552	13,46	0,000
D	2	81,1797	81,1797	40,5898	100,17	0,000
A*B	4	4,4023	4,4023	1,1006	2,72	0,067
A*C	4	20,3392	20,3392	5,0848	12,55	0,000
A*D	4	1,8121	1,8121	0,4530	1,12	0,383
B*C	4	0,3363	0,3363	0,0841	0,21	0,930
B*D	4	8,9104	8,9104	2,2276	5,50	0,006
C*D	4	12,4337	12,4337	3,1084	7,67	0,001
A*B*C	8	11,3093	11,3093	1,4137	3,49	0,016
A*B*D	8	2,9019	2,9019	0,3627	0,90	0,543
A*C*D	8	3,6808	3,6808	0,4601	1,14	0,392
B*C*D	8	11,7255	11,7255	1,4657	3,62	0,014
Error	16	6,4833	6,4833	0,4052		
Total	80	217,8941				

S = 0,636559 R-Sq = 97,02% R-Sq(adj) = 85,12%

General Linear Model: Basma Mukavemeti (MPa) versus A; B; C; D

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	3	1; 2; 3
B	fixed	3	1; 2; 3
C	fixed	3	1; 2; 3
D	fixed	3	1; 2; 3

Analysis of Variance for Basma Mukavemeti (MPa), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	4717,8	4717,8	2358,9	10,01	0,000
B	2	1376,8	1376,8	688,4	2,92	0,068
C	2	1422,0	1422,0	711,0	3,02	0,063
D	2	38585,0	38585,0	19292,5	81,83	0,000
A*B	4	968,4	968,4	242,1	1,03	0,408
A*C	4	2463,8	2463,8	615,9	2,61	0,054
A*D	4	1955,0	1955,0	488,8	2,07	0,108
B*C	4	263,9	263,9	66,0	0,28	0,889
B*D	4	1835,2	1835,2	458,8	1,95	0,127
C*D	4	652,5	652,5	163,1	0,69	0,603
A*B*C	8	2448,2	2448,2	306,0	1,30	0,280
A*B*D	8	1770,1	1770,1	221,3	0,94	0,499
Error	32	7544,0	7544,0	235,8		
Total	80	66002,6				

S = 15,3542 R-Sq = 88,57% R-Sq(adj) = 71,43%

Unusual Observations for Basma Mukavemeti (MPa)

Basma Mukavemeti						
Obs	(MPa)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
32	175,750	197,080	11,942	-21,330	-2,21	R
65	278,750	259,302	11,942	19,448	2,02	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

General Linear Model: Yoğunluk (gr/cm3) versus A; B; C; D

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	3	1; 2; 3
B	fixed	3	1; 2; 3
C	fixed	3	1; 2; 3
D	fixed	3	1; 2; 3

Analysis of Variance for Yoğunluk (gr/cm3), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	0,0047404	0,0047404	0,0023702	18,42	0,000
B	2	0,0002343	0,0002343	0,0001172	0,91	0,412
C	2	0,0004239	0,0004239	0,0002119	1,65	0,209
D	2	0,1127099	0,1127099	0,0563549	438,01	0,000
A*B	4	0,0002395	0,0002395	0,0000599	0,47	0,761
A*C	4	0,0004033	0,0004033	0,0001008	0,78	0,544
A*D	4	0,0074702	0,0074702	0,0018676	14,52	0,000
B*C	4	0,0008215	0,0008215	0,0002054	1,60	0,199
B*D	4	0,0004526	0,0004526	0,0001131	0,88	0,487
C*D	4	0,0053141	0,0053141	0,0013285	10,33	0,000
A*C*D	8	0,0031160	0,0031160	0,0003895	3,03	0,012
B*C*D	8	0,0010928	0,0010928	0,0001366	1,06	0,413
Error	32	0,0041172	0,0041172	0,0001287		
Total	80	0,1411357				

S = 0,0113429 R-Sq = 97,08% R-Sq(adj) = 92,71%

Unusual Observations for Yoğunluk (gr/cm3)

Yoğunluk						
Obs	(gr/cm3)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
7	2,56008	2,57466	0,00882	-0,01458	-2,05	R
56	2,70280	2,68372	0,00882	0,01908	2,68	R
64	2,54524	2,55976	0,00882	-0,01452	-2,04	R
65	2,74770	2,72930	0,00882	0,01840	2,58	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

General Linear Model: Porozite (%) versus A; B; C; D

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	3	1; 2; 3
B	fixed	3	1; 2; 3
C	fixed	3	1; 2; 3
D	fixed	3	1; 2; 3

Analysis of Variance for Porozite (%), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	6,3586	6,3586	3,1793	9,41	0,002
B	2	0,7594	0,7594	0,3797	1,12	0,349
C	2	0,5357	0,5357	0,2678	0,79	0,470
D	2	21,1526	21,1526	10,5763	31,30	0,000
A*B	4	0,7106	0,7106	0,1777	0,53	0,718
A*C	4	0,5552	0,5552	0,1388	0,41	0,798
A*D	4	11,2753	11,2753	2,8188	8,34	0,001
B*C	4	0,4567	0,4567	0,1142	0,34	0,848
B*D	4	0,0781	0,0781	0,0195	0,06	0,993
C*D	4	7,0287	7,0287	1,7572	5,20	0,007
A*B*C	8	1,0901	1,0901	0,1363	0,40	0,902
A*B*D	8	1,1195	1,1195	0,1399	0,41	0,896
A*C*D	8	3,5172	3,5172	0,4397	1,30	0,310
B*C*D	8	1,4202	1,4202	0,1775	0,53	0,821
Error	16	5,4062	5,4062	0,3379		
Total	80	61,4642				

S = 0,581282 R-Sq = 91,20% R-Sq(adj) = 56,02%

Unusual Observations for Porozite (%)

Obs	Porozite (%)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
37	3,33470	2,79192	0,52072	0,54278	2,10 R
46	1,79340	2,46563	0,52072	-0,67223	-2,60 R
65	1,12640	1,79045	0,52072	-0,66405	-2,57 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Çizelge 6.4, 6.5, 6.6 ve 6.7’de Çizelge 6.3’ten alınan verilerle Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk, porozite, sertlik ve basma mukavemetinin ANOVA tabloları sırasıyla gösterilmiştir. Her çizelgenin son sütununda her faktörün toplam varyasyon üzerindeki etki yüzdesi verilerek, sonuç üzerindeki etki derecesi belirlenir. ANOVA tablolarında hatanın etki yüzdesi, yoğunluk için % 1,81, porozite için % 8,80, sertlik için % 2,97, basma mukavemeti için % 11,43 olarak belirlenmiştir. Etki değeri hatanın etki yüzdesinden düşük olan faktörlerin, numunelerin özelliklerini etkilemediği kabul edilmiştir (Davim, 2003) . Her ANOVA tablosunda toplam varyasyon üzerinde etkisi çok az olan faktörler göz önünde bulundurulmamış ve hesaba katılmamıştır.

Çizelge 6.4'de Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk değerleri için ANOVA tablosu verilmiştir. Takviye elemanı ön işlemi (E= % 79,86) istatistiki bakımdan yoğunluk değerleri üzerinde en yüksek etkiye sahiptir. Takviye elemanı partikül boyutu (E= % 3,36), takviye elemanı partikül boyutu - takviye elemanı ön işlemi etkileşimi (E = % 5,29), sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi etkileşimi (E = % 3,76), takviye elemanı partikül boyutu - sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi etkileşimi (E = % 2,21) ise kompozit numunelerin yoğunluk değerleri üzerinde marjinal sayılacak etki sağlamaktadır. ABC (takviye elemanı partikül boyutu - sinterleme süresi - sinterleme sıcaklığı) ve ABD (takviye elemanı partikül boyutu - sinterleme süresi - takviye elemanı ön işlemi) etkileşimlerinin P değerlerinin yüksek olması nedeniyle ANOVA tablosundan çıkarılmıştır. Çizelge 6.2'de yoğunluk ölçümlerinde 7, 56, 64 ve 65 nolu numunelerde standart sapmanın beklenenden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.4 Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk değerleri için ANOVA tablosu

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi (v)	Kareler Toplamı (SS)	Varyans (V)	F Değeri	P Değeri	Etki Yüzdesi (E)
A	2	0,0047404	0,0023702	18,42	0,000	3,36
B	2	0,0002343	0,0001172	0,91	0,412	0,17
C	2	0,0004239	0,0002119	1,65	0,209	0,30
D	2	0,1127099	0,0563549	438,01	0,000	79,86
AB	4	0,0002395	0,0000599	0,47	0,761	0,17
AC	4	0,0004033	0,0001008	0,78	0,544	0,29
AD	4	0,0074702	0,0018676	14,52	0,000	5,29
BC	4	0,0008215	0,0002054	1,60	0,199	0,58
BD	4	0,0004526	0,0001131	0,88	0,487	0,32
CD	4	0,0053141	0,0013285	10,33	0,000	3,76
ACD	8	0,0031160	0,0003895	3,03	0,012	2,21
BCD	8	0,0010928	0,0001366	1,06	0,413	0,77
Hata	16	0,0041172	0,0001287			1,81
Toplam	80	0,1411357				100

*A : Takviye elemanı partikül boyutu, B: Sinterleme süresi, C: Sinterleme sıcaklığı, D: Takviye elemanı ön işlemi

Çizelge 6.5'de Al/B₄C kompozit numunelerin porozite değerleri için ANOVA tablosu verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, takviye elemanı ön işlemi (E = % 34,41), takviye elemanı partikül boyutu - takviye elemanı ön işlemi etkileşimi (E = % 18,34), takviye elemanı partikül boyutu (E = % 10,35) ve sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi etkileşiminin (E = % 11,44) kompozit numunelerin porozite değerleri üzerinde etkiye neden olduğu görülmektedir. Çizelge 6.2'de porozite ölçümlerinde 37, 46 ve 65 nolu numunelerde standart sapmanın beklenenden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.5 Al/B₄C kompozit numunelerin porozite değerleri için ANOVA tablosu

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi (v)	Kareler Toplamı (SS)	Varyans (V)	F Değeri	P Değeri	Etki Yüzdesi
A	2	6,3586	3,1793	9,41	0,002	10,35
B	2	0,7594	0,3797	1,12	0,349	1,24
C	2	0,5357	0,2678	0,79	0,470	0,87
D	2	21,1526	10,5763	31,30	0,000	34,41
AB	4	0,7106	0,1777	0,53	0,718	1,16
AC	4	0,5552	0,1388	0,41	0,798	0,90
AD	4	11,2753	2,8188	8,34	0,001	18,34
BC	4	0,4567	0,1142	0,34	0,848	0,74
BD	4	0,0781	0,0195	0,06	0,993	0,13
CD	4	7,0287	1,7572	5,20	0,007	11,44
ABC	8	1,0901	0,1363	0,40	0,902	1,77
ABD	8	1,1195	0,1399	0,41	0,896	1,82
ACD	8	3,5172	0,4397	1,30	0,310	5,72
BCD	8	1,4202	0,1775	0,53	0,821	2,31
Hata	16	5,4062	0,3379			8,80
Toplam	80	61,4642				100

*A : Takviye elemanı partikül boyutu, B: Sinterleme süresi, C: Sinterleme süresi, D: Takviye elemanı ön işlemi

Al/B₄C kompozit numunelerin sertlik değerleri için Çizelge 6.6’da verilen ANOVA tablosu incelediğinde, takviye elemanı ön işlemi (E = % 37,26), sinterleme süresi (E = % 13,29) ve takviye elemanı partikül boyutu – sinterleme süresi etkileşiminin (E = % 9,33) sertlik değerleri üzerinde önemli ölçüde etki ettiği belirlenmiştir. takviye elemanı partikül boyutu (E = % 5,74), sinterleme sıcaklığı (E = % 5,01), sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi (E = % 5,71), takviye elemanı partikül boyutu – sinterleme süresi – sinterleme sıcaklığı etkileşimi (E = % 5,19), sinterleme süresi – sinterleme sıcaklığı- takviye elemanı ön işlemi etkileşiminin (E = % 5,38) ve sinterleme süresi - takviye elemanı ön işlemi etkileşiminin (E = % 4,09) önceki faktörlere nazaran numunelerin sertliği üzerinde daha az etki yaratmıştır. Sertlik ölçümlerinde standart sapma değeri beklenenden yüksek olan numune olmadığı Çizelge 6.2’de görülmektedir.

Çizelge 6.6 Al/B₄C kompozit numunelerin sertlik değerleri için ANOVA tablosu

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi (v)	Kareler Toplamı (SS)	Varyans (V)	F Değeri	P Değeri	Etki Yüzdesi
A	2	12,5160	6,2580	15,44	0,000	5,74
B	2	28,9532	14,4766	35,73	0,000	13,29
C	2	10,9103	5,4552	13,46	0,000	5,01
D	2	81,1797	40,5898	100,17	0,000	37,26
AB	4	4,4023	1,1006	2,72	0,067	2,02
AC	4	20,3392	5,0848	12,55	0,000	9,33
AD	4	1,8121	0,4530	1,12	0,383	0,83
BC	4	0,3363	0,0841	0,21	0,930	0,15
BD	4	8,9104	2,2276	5,50	0,006	4,09
CD	4	12,4337	3,1084	7,67	0,001	5,71
ABC	8	11,3093	1,4137	3,49	0,016	5,19
ABD	8	2,9019	0,3627	0,90	0,543	1,33
ACD	8	3,6808	0,4601	1,14	0,392	1,69
BCD	8	11,7255	1,4657	3,63	0,014	5,38
Hata	16	6,4833	0,4052			2,97
Toplam	80	217,8941				100

*A : Takviye elemanı partikül boyutu, B: Sinterleme süresi, C: Sinterleme sıcaklığı, D: Takviye elemanı ön işlemi

Çizelge 6.7’de Al/B₄C kompozit numunelerin basma mukavemeti değerleri için ANOVA tablosu verilmiştir. ANOVA tablosu incelendiğinde, numunelerin basma mukavemetini etkileyen önemli faktörün takviye elemanı ön işlemi (E = % 58,46) olduğu net bir şekilde görülmüştür. ACD (takviye elemanı partikül boyutu - sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi) ve BCD (sinterleme süresi - sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi) etkileşimlerinin P değerlerinin yüksek olması nedeniyle ANOVA tablosundan çıkarılmıştır. Basma mukavemeti ölçümleri sonucunda 32 ve 65 nolu numunelerin basma mukavemeti değerlerinde standart sapmanın beklenenden yüksek olduğu Çizelge 6.2’de belirlenmiştir.

Çizelge 6.7 Al/B₄C kompozit numunelerin basma mukavemeti değerleri için ANOVA tablosu

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi (v)	Kareler Toplamı (SS)	Varyans (V)	F Değeri	P Değeri	Etki Yüzdesi
A	2	4717,8	2358,9	10,01	0,000	7,15
B	2	1376,8	688,4	2,92	0,068	2,09
C	2	1422,0	711,0	3,02	0,063	2,15
D	2	38585,0	19292,5	81,83	0,000	58,46
AB	4	968,4	242,1	1,03	0,408	1,47
AC	4	2463,8	615,9	2,61	0,054	3,73
AD	4	1955,0	488,8	2,07	0,108	2,96
BC	4	263,9	66,0	0,28	0,889	0,40
BD	4	1835,2	458,8	1,95	0,127	2,78
CD	4	652,5	163,1	0,69	0,603	0,99
ABC	8	2448,2	306,0	1,30	0,280	3,71
ABD	8	1770,1	221,3	0,94	0,499	2,68
Hata	16	7544,0	235,8			11,43
Toplam	80	66002,6				100

*A : Takviye elemanı partikül boyutu, B: Sinterleme süresi, C: Sinterleme süresi, D: Takviye elemanı ön işlemi

Genel olarak, ANOVA tabloları Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk, porozite, sertlik ve basma mukavemeti özelliklerini etkileyen en önemli faktörün takviye elemanı ön işlemi olduğunu net bir şekilde göstermektedir. B₄C partiküllerine uygulanan kaplama işlemi, kompozit numunelerin özellikle yoğunluk ve basma mukavemeti değerleri üzerinde diğer faktörlere nazaran daha fazla tesir etmektedir.

Takviye elemanı partikül boyutu, takviye elemanı ön işlemi faktörüne göre daha az olmakla beraber, yoğunluk, porozite, sertlik ve basma mukavemeti özellikleri üzerinde belirleyici bir etkinlik gösterdiği belirlenmiştir.

Sinterleme süresi ve sıcaklığının Al/B₄C kompozit numunelerin yoğunluk, porozite ve basma mukavemeti özelliklerinde etkisiz olduğu, bu iki parametrenin sadece sertlik üzerinde etki sağladığı gözlemlenmektedir.

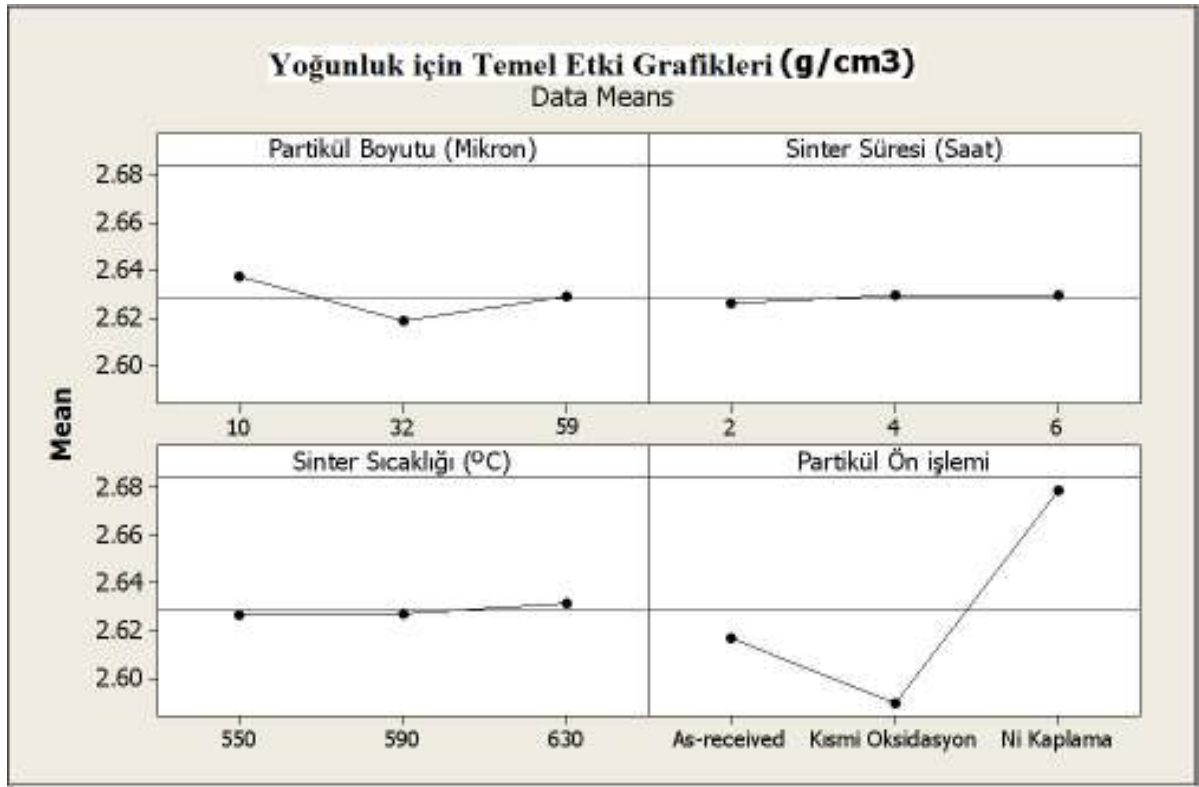
Ayrıca, faktörlerin Al/B₄C kompozit numunelerin özelliklerini etkilemesi dışında, faktörler arasındaki etkileşimlerin de Al/B₄C kompozit numunelerin özelliklerini etkilediği görülmüştür.

6.2.2.2 Yoğunluk ve Porozite Değerleri

Çalışmada takviye elemanı boyutunun yoğunluğa etkisinin lineer bir şekilde olmadığı, partikül boyutu küçüldükçe, yoğunluk değeri azaldığı, porozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat en küçük B₄C partikül boyutunda (10 µm) en yüksek yoğunluk değerine, 59 µm partikül boyutuna sahip B₄C en düşük poroziteye ulaşılmıştır. Literatür incelendiğinde, bir bölüm çalışmada partikül boyutunun azalması ile yoğunluk değerlerinin de azalacağı (Özkan, 2007;

Ghosh vd., 2010); birçok araştırmada ise tam tersi artacağını ifade etmiştir (Ahmad vd., 2005; Kılıç, 2007; Rahimian vd., 2009). Bu çalışmada, B₄C partikül boyutu küçüldükçe, yoğunluk değeri azalması ve porozitenin artmasının nedeni, B₄C partiküllerinin boyutunun azalması ile kümelenmenin arttırması olarak düşünülmektedir. 10 µm partikül boyutundaki yoğunluk artışı, küçük partiküllerin preslenebilirlik özelliklerinin büyük olanlara nazaran daha iyi olması ile izah edilebilir. Çizelge 6.8’de takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde yoğunluğa etkisi verilmiştir.

Çizelge 6.8 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde yoğunluğa etkisi

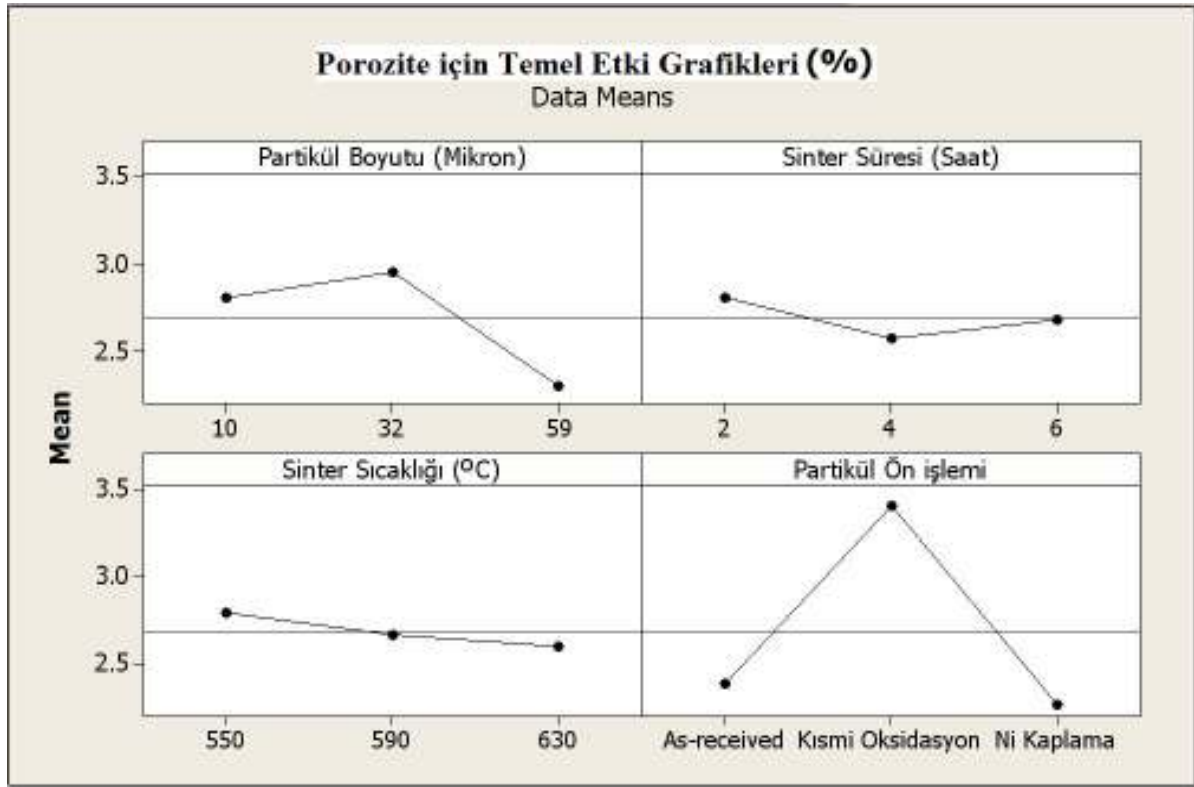


Çalışmada sinterleme sıcaklığının ve süresi artışının, yoğunluk değerinde çok ufakda olsa bir artış sağladığı belirlenmiştir. Literatür incelenmesinde sinterleme sıcaklığı ve süresinin artışının yoğunluğu arttırdığı (Min vd., 2005; Zhang vd., 2008; Topçu vd., 2009) belirtilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artışı kompozitin bünyesindeki gözeneklerin birbiri ile olan bağlantılarının kesilmesine, geometrilerinin değişmesine ve daha yoğun bir yapının oluşmasını sağlar (Arockiasamy vd., 2010).

Takviye elemanı yüzey modifikasyonu açısından sonuçlar irdelendiğinde, Ni kaplı B₄C içeren numunelerde en yüksek yoğunluk ve en düşük porozite değerlerine ulaşılmıştır. Literatürde

elde edilen neticelerde bunu doğrulayacak niteliktedir (Vukcevic vd., 2001; Moustafa vd., 2002; Zhan ve Zhang, 2003; Gan vd., 2007; Ruiz-Navas vd., 2009). Ni kaplı B₄C içeren numunelerde yüksek yoğunluk değerleri, B₄C'ün yüzeyinde bulunan Ni'in takviye elemanının elastik ve plastik deformasyonunu arttırması ve kompozit malzemenin kaplanmamış ve oksit kaplı B₄C içeren kompozit malzemelere nazaran daha iyi preslenmesini sağlamıştır. Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde poroziteye etkisi Çizelge 6.9'da verilmiştir.

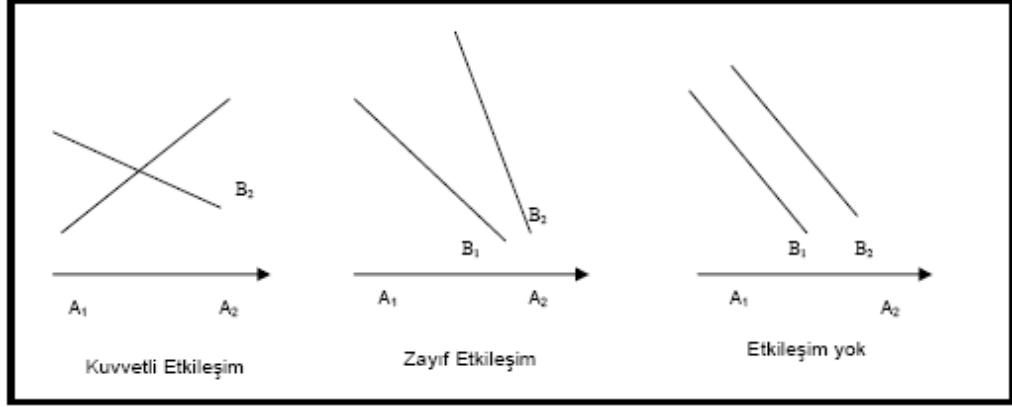
Çizelge 6.9 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde poroziteye etkisi



Harmanlama işlemi farklı boyutlarda toz malzeme karıştırılarak, partiküller arasında oluşan boşlukların kapatılması ve daha yoğun bir yapı elde edilmesi amacıyla yapılmaktadır. Partiküller arasındaki gözeneklerin kapanması, sinterleme işleminin de daha başarılı gerçekleşmesini sağlar. Bu çalışmada harmanlamanın Al-B₄C kompozitlerinin yoğunluğuna etkisi incelemek için, birinci ve ikinci aşama deneylerde aynı parametrelerde üretilmiş kompozit numuneler gözönüne alınmıştır. 600 MPa presleme basıncında preslenmiş, 550 °C'de sinterleme sıcaklığında sinterlenmiş numuneler incelendiğinde, 2 saat sinterleme süresinde harmanlamamış numunenin yoğunluğu fazla iken, 4 saat sinterleme süresinde ise

harmanlanmış numunenin yoğunluğu fazla çıkmıştır.

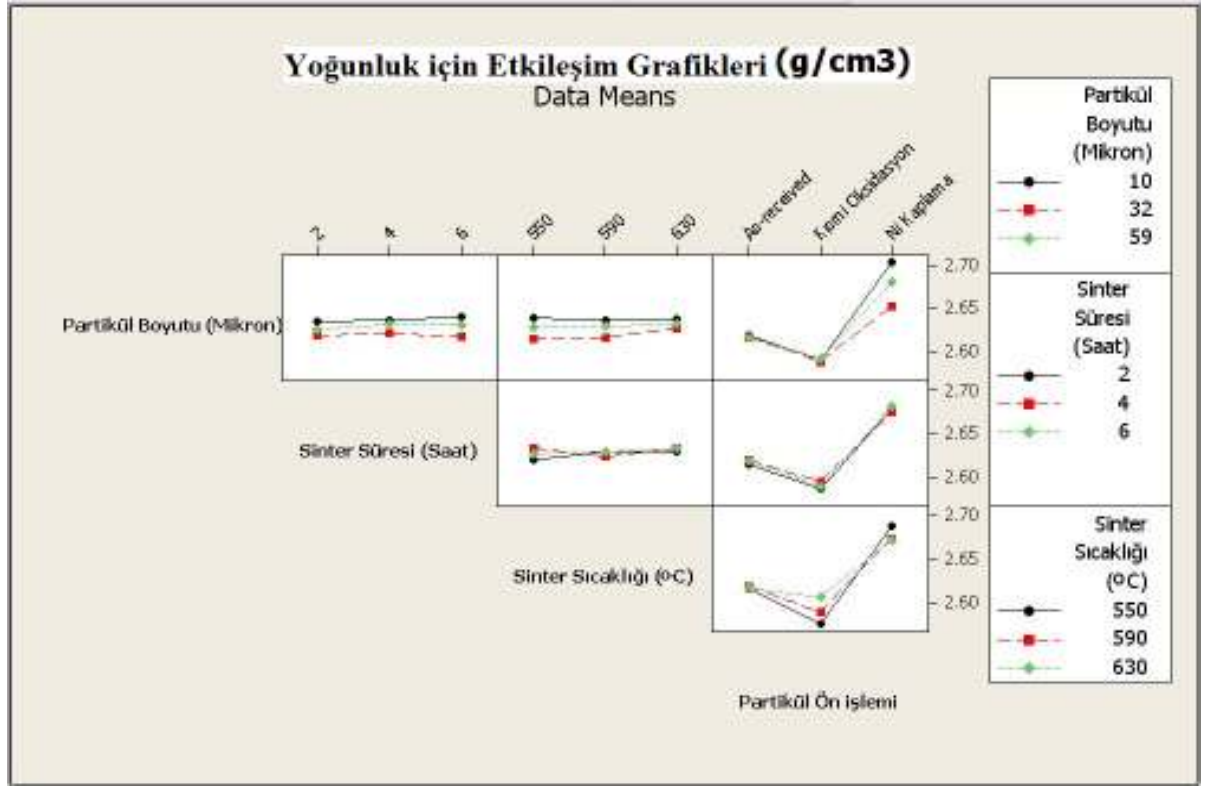
Bir faktörün kompozit malzemenin özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmanın yanında, iki faktörün birbirleri ile etkileşimi de incelenebilir. İki faktörün birbiri ile etkileşime geçtiğini anlamak için, bu çizgilerin birbirlerini olan hareketi incelenir. Şekil 6.35’de iki faktörün birbirleri olan etkileşimi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 6.35 İki faktörün birbirleri olan etkileşimi

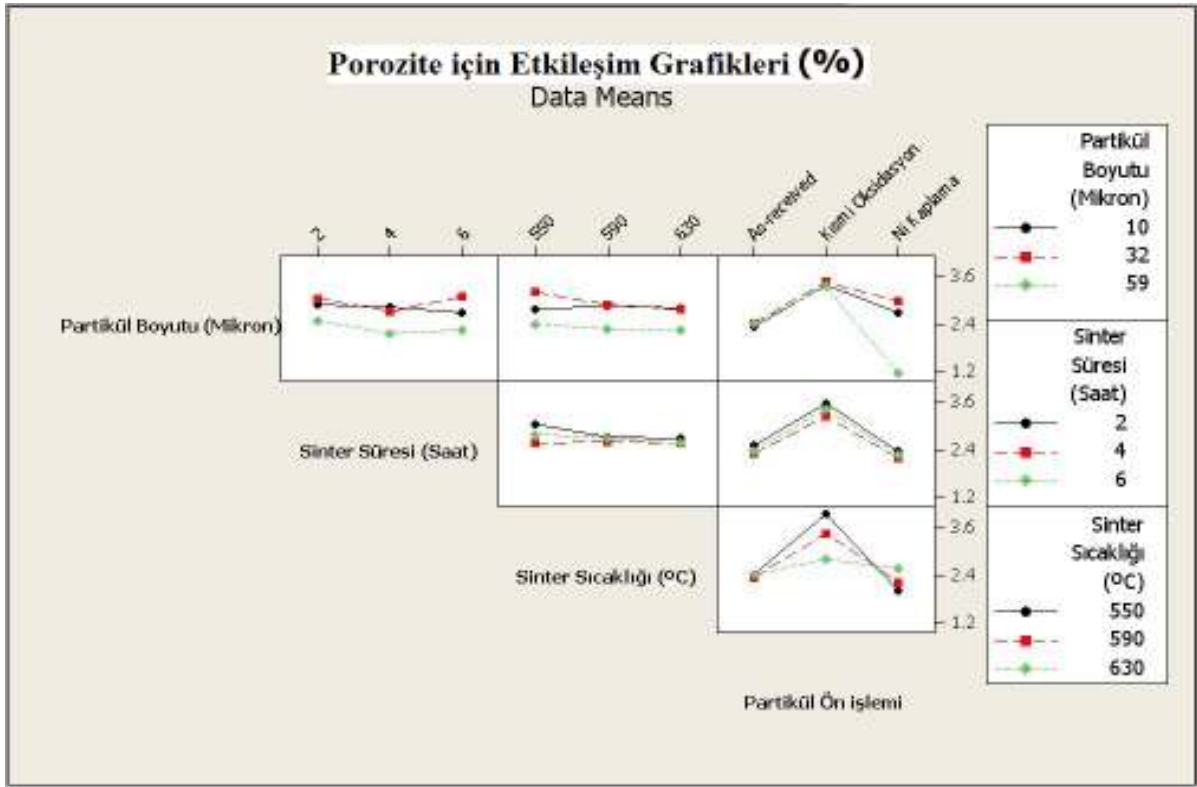
Çizelge 6.10’da takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin yoğunluk değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği verilmiştir. Genel olarak, faktörler birbirleri ile uyumlu görülmektedir. Ancak, sinterleme süresi – sinterleme sıcaklığı ve sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemi faktörleri arasında nispeten kuvvetli etkileşim olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 6.10 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemleri faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin yoğunluk değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği



Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemleri faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin yoğunluk değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği Çizelge 6.11’de verilmiştir. Porozite değerlerinde, yoğunluk değerlerine nazaran daha fazla etkileşim gerçekleşmiştir. Takviye elemanı partikül boyutu – sinterleme süresi, takviye elemanı partikül boyutu – sinterleme sıcaklığı ve sinterleme sıcaklığı - takviye elemanı ön işlemleri faktörleri arasında nispeten kuvvetli etkileşim olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.11 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin porozite değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği

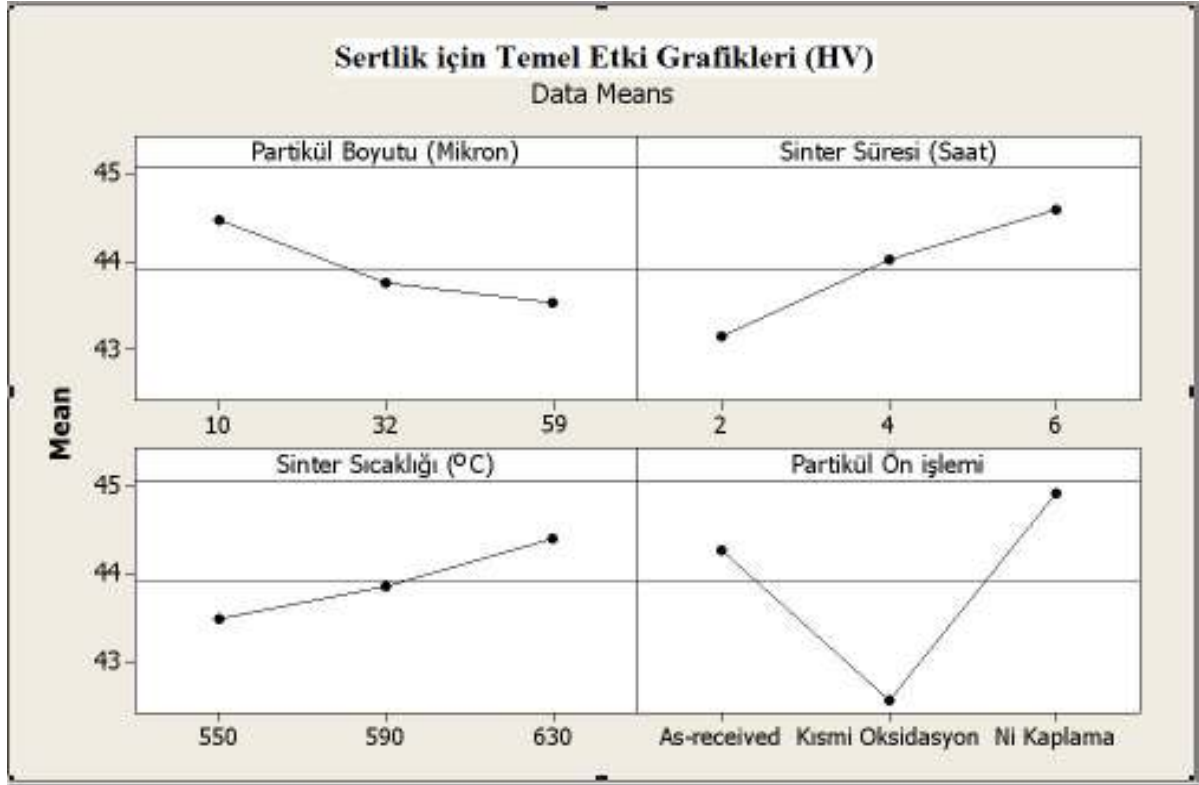


6.2.2.3 Sertlik Değerleri

Partikül takviye elemanının boyutu küçüldükçe, kompozit numunelerin sertlik değerleri artmıştır. Partikül boyutunun sertliğe etkisini inceleyen çalışmalarda tam bir mutabakat bulunmamakta, bazı çalışmalarda partikül boyutu azalması ile sertlik artarken (Ahmad vd., 2005; Corrochano vd., 2009; Kumar ve Balasubramanian, 2009; Rahimian vd., 2009; Ghosh vd., 2010), bazılarında ise azalmaktadır (Meydanoğlu vd., 2006; Kılıç, 2007; Özkan, 2007). Partikül boyutu küçüldükçe sertliğin artma nedeni, küçük B₄C partiküllerinin küçük matris tane boyutunu oluşturmalarıdır. Böylece, yapı içerisinde çok sayıda tane oluşmakta ve bu durum çok sayıda tane sınırının meydana gelmesiyle sonuçlanmaktadır. Tane sınırları yapı içerisinde bulunan dislokasyonların hareketlerini engellemektedir. Çok sayıda tane sınırı sertlik ölçümünde uygulanan mikro deformasyon esnasında dislokasyonların hareketleri için gerekli kuvvetin artmasını ve kompozit malzemenin sertlik değerinin yüksek çıkmasını sağlamıştır (Ghosh vd., 2010). Bunun yanında küçük B₄C partiküllerinin Al partikülleri ile büyük partiküllere nazaran daha büyük temas alanına sahip oluşu, sinterleme işlemi esnasında difüzyon prosesinin daha sağlıklı gelişmesine olanak sağlamaktadır (Ahmad vd., 2005).

Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işleme faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde sertliğe etkisi Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işleme faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde sertliğe etkisi

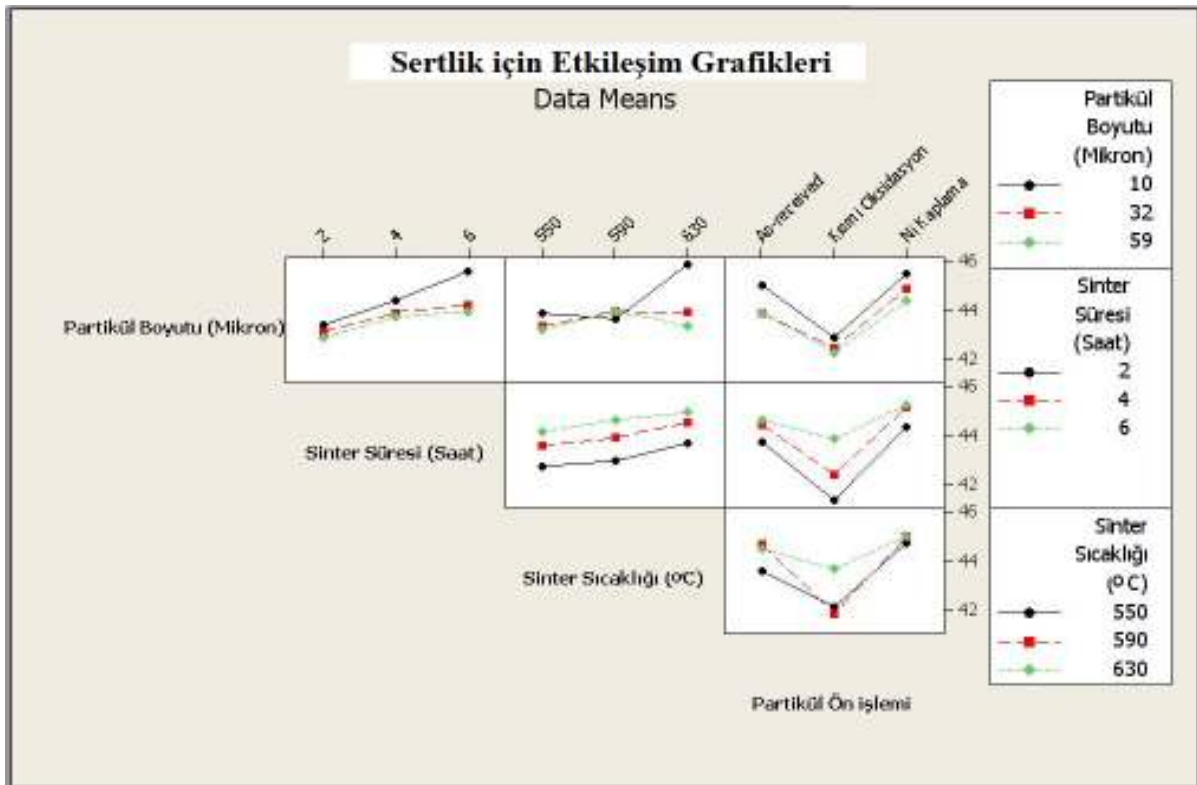


Sinterleme sıcaklığı ve süresinin artması ile birlikte B₄C-Al kompozit malzemelerin sertliği de belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Literatür incelendiğinde, genel olarak sinterleme sıcaklığı ve süresi artışının sertliğe etkisi olumlu bulunmuştur (Topçu vd., 2009). Sinterleme sıcaklığı yükselmesi matris-takviye elemanı arayüzeyinde atomik hareketliliği artırarak daha fazla ve kolay malzeme taşınımı sağlamaktadır (Rahimian vd., 2009). Bunun sonucunda sinterleme sıcaklığı artışı, kompozitin yoğunluğunun artmasını ve porozitenin azalmasını sağlamıştır.

Partikül ön işleme göz önüne alındığında en yüksek sertlik değeri, Ni kaplanmış B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Literatürde genel olarak takviye elemanının kaplanması sertliğe pozitif etkisi olduğu (Vukcevic vd., 2001; Zhan ve Zhang, 2003; Kretz vd., 2004; Ruis-Navas vd., 2009) belirtilmiştir. Ni kaplama Al-B₄C arayüzeyi yakınındaki mikrogözeneklerin azalmasına neden olmuş ve bağlanma kuvvetinin artmasını sağlamıştır (Zhan ve Zhang, 2003). Böylece, kompozit malzeme sertlik ölçümünde daha etkili

dayanıklılık sergilemiştir. Çizelge 6.13’de takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işleme faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin sertlik değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, faktörler arası etkileşimin, takviye elemanı partikül boyutu – sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işleme - sinterleme sıcaklığı arasında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

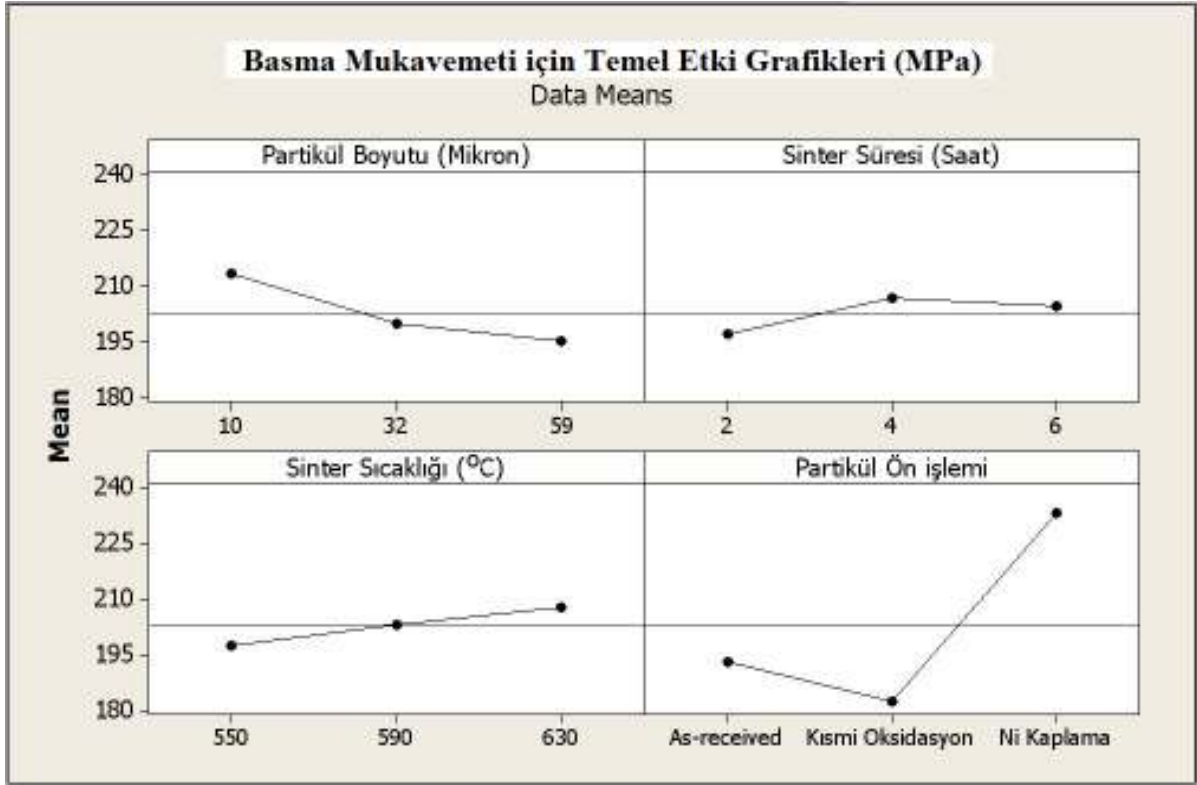
Çizelge 6.13 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işleme faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin sertlik değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği



6.2.2.4 Basma Mukavemeti Değerleri

Partikül takviye elemanının boyutu küçüldükçe, kompozit numunelerin basma mukavemeti değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Partikül boyutunun azalması, takviye partikülleri arasındaki mesafeyi azaltmakta ve daha küçük boyutlarda tane boyutu oluşmasını sağlamaktadır. Malzemenin plastik deformasyonu esnasında tane sınırları dislokasyonların hareketlerine karşı engel olarak davranmaktadır. Partikül boyutunun küçülmesi ile tane sınır miktarının artması, dislokasyonların hareket etmesi için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyması sonucunu yaratır (Rahimian vd., 2009). Böylece, partikül boyutunun azalması, kompozit numunelerin basma mukavemeti değerlerinde gelişme sağlamaktadır.

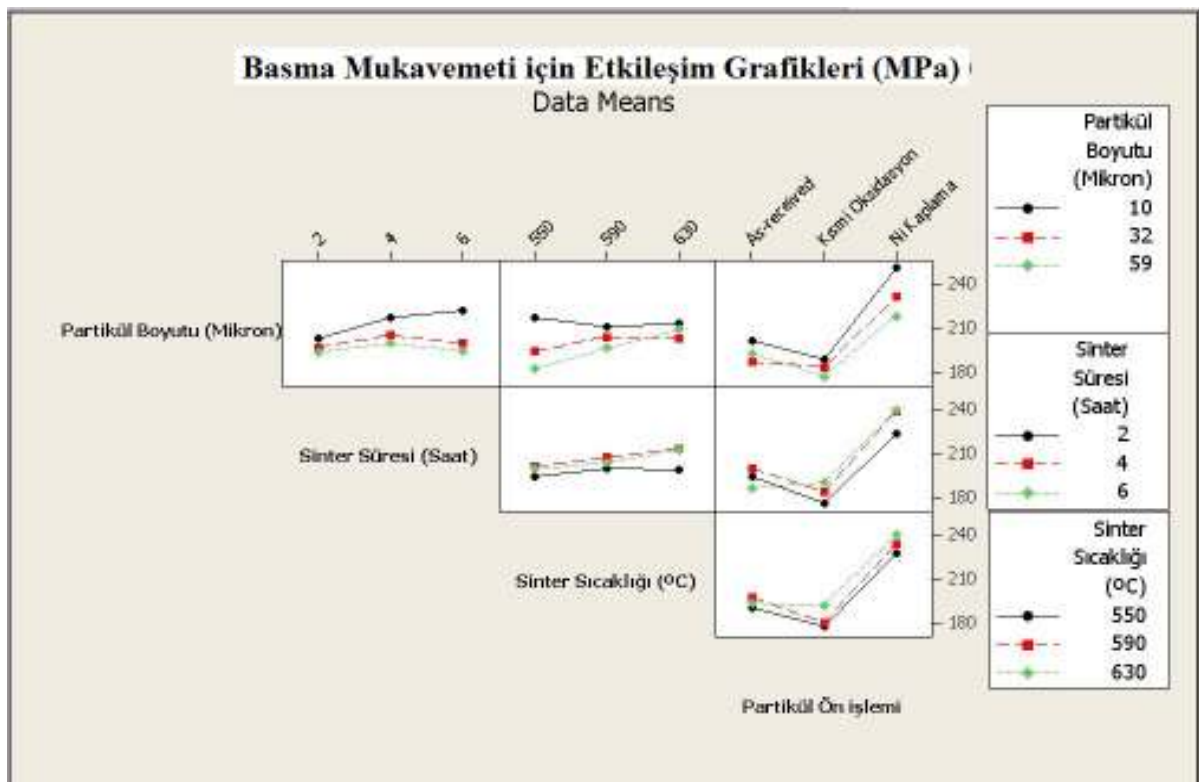
Çizelge 6.14 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemleri faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemelerde basma mukavemetine etkisi



Sinterleme sıcaklığının artışı, toz metalurji yöntemi ile üretilen numunelerin basma mukavemeti değerlerinde artış sağlamıştır. Sıcaklık artışı B₄C ve Al partikülleri arasında bağ kuvvetinin artışı desteklemektedir. Bu konu hakkında yapılan çalışmalar da (Saiz vd., 2003; Rahimian vd., 2009), bu sonucu doğrular niteliktedir. Saiz, Tomsia ve Suganuma Al-Al₂O₃ kompozitleri hakkında yaptıkları çalışmada, 550°C sinterleme sıcaklığında düşük bağ kuvveti, sıcaklık 650°C yi bulduğunda, bağlanma kuvveti artmaktadır (Saiz vd., 2003).

Basma mukavemeti sonuçları incelendiğinde, en yüksek değerlere akımsız kaplama yöntemi ile Ni kaplanmış B₄C takviyeli kompozit malzemelerde ulaşılmıştır. Bu konu hakkında yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Vukcevic vd., 2001; Moustafa vd., 2002; Zhan ve Zhang, 2003). Al ve B₄C fazlarının bağ yapıları arasında önemli farklılıklar bulunur. Alüminyum metalik bağlara, B₄C ise iyonik/kovalent bağlara sahiptir. Bu nüans Al ve B₄C arasında istenen ölçüde bir bağ oluşumunu engeller ve kompozit malzemede mekanik özelliklerin gelişimini güçleştirir. B₄C takviye elemanının Ni ile kaplanması, arayüzeyde Al ile Ni'in etkileşimini sağlayarak ıslatılabilirliği arttırmakta ve istenen bağ yapısının oluşmasını teşvik etmektedir. Matris-takviye elemanı arayüzeyinin kuvvetlenmesi, matris

Çizelge 6.15 Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemi faktörlerinin Al/B₄C kompozit malzemenin basma mukavemeti değerlerinde birbirleri ile olan etkileşim grafiği



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalar iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşama deneylerde, farklı takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme sıcaklığı ve süresinin Al/B₄C kompozit malzemelerin preslenmiş ve sinterlenmiş yoğunluk, sertlik değerlerine ve kompozit malzemenin kırılma yüzeyine etkisi incelenmiştir. İkinci aşama deneylerde, farklı takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işleminin B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin yoğunluk, porozite, sertlik ve basma mukavemeti değerlerine etkisi incelenmiştir ve aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

1) Birinci aşama deneylerde presleme basıncı Al/B₄C kompozit malzemelerin yoğunluk ve sertlik değerlerini etkileyen en önemli değişken olmuştur. Presleme basıncı artışı, kompozit malzemelerde daha yüksek yoğunluk ve sertlik değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Bunun yanında, 800 MPa presleme basıncında meydana gelen aşırı plastik deformasyon ile preslenmiş numunelerin sinterlenmiş yoğunluk ve sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu nedenle 600 MPa presleme basıncı optimum üretim parametresi olarak belirlenmiştir.

2) Farklı sinterleme sıcaklığının B₄C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerin kırılma yüzeylerine etkisi incelendiğinde, sıcaklık artışıyla sinterleme işleminin daha başarılı gerçekleştiği, ancak B₄C partiküllerinin büyük boşluklar bırakacak şekilde yapıdan ayrılmaları nedeniyle istenen arayüzey kuvvetine erişilemediği görülmüştür. Kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, B₄C partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağıldığı, ancak bazı bölgelerde kısmi aglomerasyon olduğu gözlemlenmiştir.

3) İkinci aşama deneylerde Al tozunun harmanlanması, partiküller arası boşlukların doldurulmasını sağlayarak kompozit malzemelerin yoğunluk değerlerinin artmasını ve yapıdaki porozitenin azalmasını sağlamıştır.

4) B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin yoğunluk ve porozite değerleri üzerinde B₄C partikül boyutunun ve takviye elemanı ön işleminin etkili olduğu gözlemlenmiştir. 59 µm B₄C partikül boyutu ile Ni kaplama işlemi uygulanmış B₄C partikülleri kullanılan kompozit numunelerde en iyi yoğunluk ve porozite değerleri elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve süresi değişkenlerinin artışı yoğunluk değeri üzerinde önemli bir değişikliğe yol açmazken, porozite değerlerinin azalmasını sağlamıştır.

5) B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerden istenen mekanik özellikleri elde etmek için, B₄C partikül boyutunun küçük seçilmesi ve B₄C partiküllerinin Ni ile kaplanarak matris - takviye elemanı arayüzeyinin iyileştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Özellikle Ni kaplanmanın daha etkin bağlama yaptığı düşünülmektedir. B₄C partiküllerinin kısmi oksidasyonu ise, beklenenin aksine kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde negatif etkiye neden olmuştur.

6) B₄C partiküllerini akımsız kaplama yöntemi ile Ni kaplama işleminin başarılı olduğu SEM görüntüleri ile belirlenmiştir. Ancak, kaplama kalınlığının belirtilenden (500 nm) daha kalın görülmesinin başlıca sebebi, numune hazırlama esnasında Ni kaplamanın sıvanmasıdır.

7) Sinterleme sıcaklığı ve süresi artışının B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde artış sağladığı gözlemlenmiştir.

8) Takviye elemanı partikül boyutu, sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve takviye elemanı ön işlemleri faktörlerinin, B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin özellikleri üzerinde ne miktarda etkili olduğu incelendiğinde, en etkin faktörün takviye elemanı ön işlemi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, B₄C partiküllerinin Ni ile kaplanması işlemidir.

9) Sinterlenmiş ağırlıkça % 10 B₄C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, B₄C takviye malzemesinin yapı içerisinde homojen dağıldığı görülmüş, karıştırma süresinin yeterli olduğu belirlenmiştir. Ancak 10 µm partikül boyutuna sahip B₄C içeren kompozit malzemelerde, bazı bölgelerde B₄C partiküllerin aglomere olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular çerçevesinde aşağıdaki noktaların önerildiği çalışmaların yapılması uygun olacaktır.

1) Al/B₄C kompozit malzemelerin üretiminde 600 MPa presleme basıncı optimum presleme parametresi olarak kullanılabilir.

2) Al/B₄C kompozit malzemelerden istenen mekanik özelliklere ulaşabilmek için, takviye elemanını metal malzeme ile kaplanarak arayüzey özellikleri geliştirilmeli ve küçük partikül boyutunda takviye elemanı seçilebilir. Fakat küçük partikül boyutunda takviye elemanı

seçiminde aglomerasyonun önüne geçmek için partikülün yapı içerisinde dağılımı kontrol edilmelidir.

3) Sinterleme sıcaklığı ve süresi artışının Al/B₄C kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde artış sağladığı gözlemlenmiştir

4) Al/B₄C kompozit malzemelerin presleme ile sinterleme işleminin daha başarılı gerçekleşmesini için harmanlama yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abejonar, J., Velasco, F. ve Martinez, M.A. (2007), "Optimization of Processing Parameters for the Al+ 10% B₄C System Obtained by Mechanical Alloying", *Journal of Materials Processing Technology* 184(1-3):441–446.
- Ahlatçı, H. (2003), Alüminyum-Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ahmad, K.R., Jamaludin, S.B., Hussain, L.B. ve Ahmad, Z.A. (2005), "The Influence of Alumina Particle Size on Sintered Density and Hardness of Discontinuous Reinforced Aluminum Metal Matrix Composite", *Jurnal Teknologi*, 42(A):49–57.
- Ahmad, Z. (2001), "Mechanical Behavior and Fabrication Characteristics of Aluminum Metal Matrix Composite Alloys", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(11):921-944.
- Akın, G. (2006), Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arockiasamy, A., German, R.M., Wang, P., Horstemeyer, M.F., Morgan, W. ve Park S.J. (2010), "Sintering Behaviour of Al-6061 Powder Produced by Rapid Solidification Process", *Powder Metallurgy*. Basımda
- Arslan, G. (2001), Bor Karbür-Alüminyum Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Anadolu Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bakkaloğlu, A. (2004), Y.T.Ü. Toz Metalurjisi Ders Notları.
- Basavarajappa, S., Chandramohan, G. , Narasimha Rao, K. V., Radhakrishanan, R., ve Krishnaraj, V. (2006), "Turning of Particulate Metal Matrix Composites – Review and Discussion", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:J. Engineering Manufacture*, 220 (7):1189-1204.
- Cambronero, L.E.G., Sanchez, E., Ruiz-Roman, J.M. ve Ruiz-Prieto, J.M. (2003), "Mechanical Characterisation of AA7015 Aluminium Alloy Reinforced with Ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144:378–383.
- Canakcı, A., Arslan, F. ve Yaşar, İ. (2007), "Pre-treatment Process of B₄C Particles to Improve Incorporation into Molten AA2014 Alloy", *Journal of Materials Science*, 42(23):9536-9542.
- Chawla, N. ve Chawla, K. K. (2006), *Metal Matrix Composites*, Springer, New York.
- Corrochano, J., Lieblich, M., ve Ibanez, J. (2009), "On the Role of Matrix Grain Size and Particulate Reinforcement on the Hardness of Powder Metallurgy Al–Mg–Si/MoSi₂ Composites", *Composites Science and Technology*, 69(11-12):1818–1824.
- Çalışkan, F., Soy, U., Altınkök, N. ve Demir A. (2006), " Alümina Partikül Takviyeli TM Alüminyum Matris Kompozitlerin Yoğunlaşma ve Mekanik Özellikleri", 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 19-21 Nisan 2006, Denizli.

Davim, J.P. (2003), "Design of Optimisation of Cutting Parameters for Turning Metal Matrix Composites Based on the Orthogonal Arrays", *Journal of Materials Processing Technology*, 132:340-344.

Eker, A.A. (2008), Y.T.Ü. İmalatta Kompozit Malzemeler Ders Notları.

Ekinci, V. Ş. (2007), Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Evans, A., San Marchi, C. ve Mortensen, A. (2003), *Metal Matrix Composites in Industry An Introduction and a Survey*, Springer, USA.

Froyen, L. ve Verlinden, B. (1994), *Aluminium Matrix Composites Materials*, TALAT Lecture 1402, European Aluminium Association.

Gan, K.K., Chen, N., Wang, Y. ve Gu, M.Y. (2007), "SiC/Cu Composites with Tungsten Coating Prepared by Powder Metallurgy", *Materials Science and Technology*, 23 (1):119-122.

Ghosh, S.K., Saha, P ve Kishore, S. (2010), "Influence of Size and Volume Fraction of SiC Particulates on Properties of ex situ Reinforced Al-4.5Cu-3Mg Metal Matrix Composite Prepared by Direct Metal Laser Sintering Process", *Materials Science and Engineering, A* 527 (18-19):4694-4701.

Gotoh, K., Masuda, H., vd., (1997), *Powder Technolgy Handbook*, Second Edition, Marcel Dekker, New York.

Gökçe, A. ve Fındık, F. (2008), "Mechanical and Physical Properties of Sintered Aluminum Powders", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 30(2):157-164.

Gökçe, B. ve Taşgetiren, S., (2009), "Kalite İçin Deney Tasarımı", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1):71-83.

Güneş, F. (2006), "Alüminyum Kompozitlerin Üretimi, Karakteristik Özellikleri ve Endüstriyel Uygulamaları", *Mühendis ve Makina*, 47(554):28-35.

Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M. S. J. (1999), "Metal Matrix Composites: Production by the Stir Casting Method", *Journal of Materials Processing Technology* 92-93:1-7.

Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M. S. J. (2001), "The Wettability of SiC Particles by Molten Aluminium Alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1-3):324-328.

Hiçyılmaz, N. (1999), *Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerinin Aşınma Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Hsiaang, W. (1993), "On the Sphere Packing Problem and the Proof of Kepler's Conjecture", *Proceedings of Kaist Mathematics Workshop*.

Hunt, W. H. ve Herling, D. R. (2004), “Aluminum Metal Matrix Composites”, *Advanced Materials & Processes*, 162(2):39-44.

Kainer, K. U. (2006), *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, Wiley-VCH, Weinheim.

Kang, S.L., (2005), *Sintering Densification, Grain Growth, and Microstructure*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.

Kılıç, E.F. (2007), *Alüminyum Alaşımlı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kok, M. (2005), “Production and Mechanical Properties of Al₂O₃ Particle-reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 161:381–387.

Köksal, N. S., Şahin, S. ve Akgün, S. (2008), “Al Esaslı Al₂O₃ Takviyeli TM Malzemelerin Mekanik özellikleri ve Kırılma Davranışının İncelenmesi”, 12. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 15-17 Kasım 2008, Denizli.

Kretz, F., Gacsi, Z., Kovacs, J ve Pieczonka, T. (2004), “The Electroless Deposition of Nickel on SiC Particles for Aluminum Matrix Composites”, *Surface and Coatings Technology*, 180 – 181:575–579.

Kumar, S. ve Balasubramanian, V. (2009), “Effect of Reinforcement Size and Volume Fraction on the Abrasive Wear Behaviour of AA7075Al/SiCp P/M Composites-A Statistical Analysis”, *Tribology International*, 43(1-2):414–422.

Lillo, T. M. (2005), “Enhancing Ductility of Al6061 + 10 wt.% B₄C Through Equal-channel Angular Extrusion Processing”, *Materials Science and Engineering A* 410-411:443-446.

Meydanoğlu, O., Mindivan, H., Kayalı, E. ve Çimenoglu, H., (2006), “Sıcak Presle Üretilen B₄C Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 19-21 Nisan, 2006, Denizli.

Min, K.H., Kang, S.P., Kim, D. ve Kim, Y. (2005), “Sintering Characteristic of Al₂O₃-Reinforced 2xxx Series Al Composite Powders”, *Journal of Alloys and Compounds*, 400(1-2):150–153.

Miracle, D.B. ve Donaldson, S.L. (2001), *ASM Handbook Volume 21, Composites*, ASM International.

Miracle, D.B. (2005), “Metal Matrix Composites-From Science to Technological Significance”, *Composites Science and Technology*, 65(15-16):2526-2540.

Mortensen, A., San Marchi, C. ve Degischer, H.P., (2000), *Glossary of Terms Specific to Metal Matrix Composites, Topic 1: Processing, MMC Assess Thematic Network*.

Moustafa, S.F., Abdel-Hamid, Z. ve Abd-Elhay, A.M. (2002), “Copper Matrix SiC and Al₂O₃ Particulate Composites by Powder Metallurgy Technique”, *Materials Letters* 53(4-5): 244-249.

Onoro, J., Salvador, M.D., Cambronero, L.E.G. (2009), "High-temperature Mechanical Properties of Aluminium Alloys Reinforced with Boron Carbide Particles", *Materials Science and Engineering A*, 499(1-2):421–426.

Özkan, S. (2007), "Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Aşınma Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Pinson, D., Zou, R.P, Yu, A.B., Zulli, P. ve McCarthy, M.J. (1998), "Coordination Number of Binary Mixtures of Spheres", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31:457–462.

Pinto, Z. H. M. (2006), *Fabrication and Characterization of Functionally Graded Al/AlB₂ Matrix Composites for High Wear Aerospace Applications Using Centrifugal Casting*, Master Thesis, University of Puerto Rico.

Prasada, S.V. ve Asthana, R., (2004), "Aluminum Metal–Matrix Composites for Automotive Applications: Tribological Considerations", *Tribology Letters*, 17(3):445-453.

Qin, Q, D, Zhao, Y.G, Zhao, Y., Cong, P.J. ve Zhao, Y.K. (2008), "Preparation of AlFeSiV Compounds Local Reinforced Al Matrix Composite by Pressureless Reactive Infiltration Technique", *Materials Science and Engineering A* 487(1-2):352–359.

Rahamian, M., Ehsani, N., Parvin, N. ve Baharvandi, H. (2009), "The Effect of Particle Size, Sintering Temperature and Sintering Time on the Properties of Al–Al₂O₃ Composites, Made by Powder Metallurgy", *Journal of Materials Processing Technology*, 209(14):5387–5393.

Rahamian, M., Parvin, N. ve Ehsani, N. (2010), "Investigation of Particle Size and Amount of Alumina on Microstructure and Mechanical Properties of Al Matrix Composite Made by Powder Metallurgy", *Materials Science and Engineering*, 527(4-5):1031-1038.

Rajan, T. P. D., Pillai, R. M. ve Pai, B. C., (1998), "Review Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites", *Journal of Materials Science*, 33(14):3491-3503.

Ralph, B., Yuen, H. C. ve Lee, W. B., (1997), "The Processing Of Metal Matrix Composites – an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, 63 (1-3):339-353.

Rawal, S. (2001), "Metal-Matrix Composites for Space Applications", *JOM*, 53(4):14-17.

Rosso, M. (2006), "Ceramic ve Metal Matrix Composites:Routes and Properties", *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3):364-375.

Ruis-Navas, E.M., Delgado, M.L., ve Trindade, B. (2009), "Improvement of the Bonding Interface of a Sintered Al 2014–(Ti₅Si₃)_p Composite by the Copper Coating of the Reinforcement", *Composites: Part A* 40(8):1283–1290.

Saiz, E.,Tomsia, A.P. ve Suganuma, K., (2003), "Wetting and Strength Issues at Al/a–alumina Interfaces", *Journal of the European Ceramic Society*, 23(15):2787–2796.

- Slipenyuk, A., Kuprin, V., Milman, Yu., Goncharuk, V. ve Eckert, J., (2006), "Properties of P/M Processed Particle Reinforced Metal Matrix Composites Specified by Reinforcement Concentration and Matrix-to-Reinforcement Particle Size Ratio", *Acta Materialia*, 54(1):157–166.
- Slipenyuk, A., Kuprin, V., Milman, Yu., Spowart, J.E. ve Miracle, D.B. (2004), "The Effect of Matrix to Reinforcement Particle Size Ratio (PSR) on the Microstructure and Mechanical Properties of a P/M Processed AlCuMn/SiCp MMC", *Materials Science and Engineering A*, 381(1-2):165–170.
- Smith, W. F. (2001), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, (Kınıkoğlu, N.), Literatür Yayınları, İstanbul.
- Strong, A. B. (2007), *Fundamental Of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, Michigan.
- Surappa M K. (2003), *Aluminium Matrix Composites: Challenges And Opportunities*, *Sadhana*, 28(1-2):319–334.
- Suresh, S., Mortensen, A. ve Needleman, A. (1993), *Fundamentals of Metal-Matrix Composites*, Butterworth-Heinemann, Stoneham.
- Şahin, Y. (2010), "Abrasive Wear Behaviour of SiC/2014 Aluminium Composite", *Tribology International*, 43(5-6):939–943.
- Taylan, D. (2009), *Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Topçu, I., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N. ve Güllüoğlu, A.N. (2009), "Processing and Mechanical Properties of B₄C Reinforced Al Matrix Composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1-2):516-521.
- Toptan, F., Kumdalı, F. ve Kerti, I. (2006), "Al-B₄C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış", *Metalurji*, (145):11-18.
- Torralba, J.M., de Costa, C.E. ve Velasco, F. (2003), "P/M Aluminum Matrix Composites: an Overwiev", *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2):203-206.
- Totten, G. E. Ve MacKenzie D. S., (2003), *Handbook of Aluminum Volume 1 Physical Metallurgy and Processes*, Marcel Dekker, New york – Basel.
- Upadhyaya, G. S. (1996), *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge International Science Publishing, Cambridge.
- Ünlü, B. S., Kurgan, N. ve Yılmaz, S. S. (2009), "Toz Metal Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri", *Mühendis ve Makina*, 50(588):11-19.
- Verlinden, B., ve Froyen, L., (1994), *Aluminium Powder Metallurgy*, EAA - European Aluminium Association, TALAT.

Vukcevic, M., Delijic, K., ve Vuksanovic, D. (2001), “The Correlation Between the Properties and the Type of Reinforcement in Al-Matrix Powder-Metallurgy Composites”, *Materiali in Tehnologije*, 35(3-4):3-4.

Waters, F. (1996), *Fundamentals of Manufacturing for Engineers*, CRC Press, USA.

Yu, A.B. ve Standish, N. (1991), “Estimation of the Porosity of Particle Mixtures by a Linear Mixture Packing Model”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30:1372-1385.

Zhan, Y. ve Zhang, G. (2003), “The Effect of Interfacial Modifying on the Mechanical and Wear Properties of SiCp/Cu Composites”, *Materials Letters*, 57(29):4583– 4591.

Zhang, J., Liu, L., Zhai, P., Fu, Z. ve Zhang, Q. (2008), “Effect of Fabrication Process on the Microstructure and Dynamic Compressive Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering”, *Materials Letters*, 62(3):443–446.

Zhu, X., Dong, H. ve Lu, K. (2008), “Coating Different Thickness Nickel–boron Nanolayers onto Boron Carbide Particles”, *Surface & Coatings Technology*, 202(13):2927–2934.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] www.mpif.org

[2] <http://www.turktoz.gazi.edu.tr/> Türk toz derneği

[3] www.epma.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	17.09.1984	
Doğum Yeri	Çorlu	
Lise	1999 – 2002	Mimar Sinan Yabancı Dil Ağırlıklı Lise
Lisans	2002 – 2007	Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fak. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007 – 2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı