KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AA2024-B_4C KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNDE PCA KATKISININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedat Alperen TUNÇ

MAYIS 2024

TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AA2024-B_4C KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNDE PCA KATKISININ İNCELENMESİ

SEDAT ALPEREN TUNÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : **16 / 04 /2024**
Tezin Savunma Tarihi : **06 / 05 /2024**

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI**
ORCID :

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

"Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AA2024-B_4C Kompozitlerinin Özelliklerinde PCA Katkısının İncelenmesi" isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam ve tüm diğer çalışmalarım boyunca benden desteğini, kıymetli bilgi birikimini ve tecrübesini esirgemeden bilimsel anlamda bana yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI 'ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez çalışmalarım boyunca büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serdar ÖZKAYA 'ya, Arş. Gör. Abdullah Hasan KARABACAK 'a ve Arş. Gör. Müslim ÇELEBİ 'ye ve de eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, aldığım her kararda yanımda olup beni her anlamda destekleyen annem Feride TUNÇ ve babam Vedat TUNÇ 'a, kardeşim Nur Elif AYDIN 'a ve çalışmalarım sırasında beni idare edip sabır göstererek beni teşvik eden ve moral veren biricik eşim Eda TOSUN TUNÇ 'a minnetlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalarıma ışık tutmasını temenni ederim.

Sedat Alperen TUNÇ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AA2024-B_4C Kompozitlerinin Özelliklerinde PCA Katkısının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI ’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/05/2024

Sedat Alperen TUNÇ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ……III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....IV
İÇİNDEKİLER..... V
ÖZET……..VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....IX
TABLOLAR DİZİNİ.....XXII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XXIII
1. GENEL BİLGİLER..... 1
1.1. Giriş..... 1
1.2. Kompozit Malzemeler..... 2
1.2.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri 3
1.3. Metal Matrisli Kompozitler..... 4
1.4. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri..... 8
1.5. Toz Metalurjisi 14
1.5.1. Metal Toz Üretimi 15
1.5.2. Tozların Karıştırılması..... 17
1.5.3. Mekanik Alaşımlama..... 19
1.5.4. Proses Kontrol Ajanları (PCA)..... 24
1.5.5. Tozların Preslenmesi 25
1.5.6. Sinterleme..... 26
1.6. Literatür Taraması 27
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... 32
2.1. Matris ve Takviye Malzemesi 32
2.2. AA2024-B_4C Kompozit Malzemelerinin Tasarlanması..... 33
2.3. Mekanik Alaşımlama 35
2.4. Partikül Boyut ve Dağılımı 36
2.5. Toz Sertliği..... 37
2.6. Tozların Görünür Yoğunluklarının Hesaplanması 38

2.7. Presleme 38
2.8. Metalografik İşlemler 38
2.9. SEM-EDS Analizleri 39
2.10. XRD Analizleri 40
2.11. Yoğunluk ve Gözeneklilik Tespiti 41
2.12. Çekme Mukavemeti Testi 41
2.13. Sertlik Testleri 42
3. BULGULAR 43
3.1. Tozların Karakterizasyonu 43
3.1.1. Toz Morfolojisi 43
3.1.2. Kompozit Tozlarında Öğütme ile Partikül Morfolojilerinin Değişimi 45
3.1.3. Kompozit Tozlarının Öğütme Sonrası Partikül Boyutu ve Boyut Dağılımlarının Değişimi 100
3.1.4. AA2024-B_4C Kompozit Tozlarının Toz Sertlik Değerleri 119
3.1.5. AA2024-B_4C Kompozit Tozlarının Görünür Yoğunluk Değerleri 122
3.1.6. AA2024-B_4C Kompozit Tozlarının XRD Analizleri 125
3.2. Üretilen AA2024-B_4C Kompozitlerin Özellikleri 130
3.2.1. Kompozitlerin Yoğunluk ve Gözeneklilik Değerleri 130
3.2.2. AA2024-B_4C Kompozitlerinin Sertlik Değerleri 132
3.2.3. AA2024-B_4C Kompozitlerinin Çekme Dayanımı Değerleri 135
3.2.4. AA2024-B_4C Kompozitlerinin Kırılma Yüzeyi İncelemeleri 138
3.2.5. AA2024-B_4C Kompozitlerinin İçyapı Görüntüleri 142
4. SONUÇLAR 147
5. ÖNERİLER 149
6. KAYNAKLAR 150
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AA2024-B_4C KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNDE PCA KATKISININ İNCELENMESİ

Sedat Alperen TUNÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2024, 156 Sayfa

Bu çalışmada, AA2024 alaşımı matrisli, farklı ağırlıkça yüzde oranlarında B_4C takviyeli metal matrisli kompozitler mekanik alaşımlama yöntemi kullanılarak toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. AA2024 - B_4C kompozit tozlarının, mekanik alaşımlama işlemi gezegen tip bilyalı öğütücüde, Metanol, Etanol, Stearik Asit, Çinko Stearat olmak üzere 4 farklı PCA kullanılarak 3 grup halinde gerçekleştirilmiştir. 1. grup kompozit tozları AA2024 - %1 B_4C olarak belirlenmiş ve PCA katkısı ağ. %2 oranında olacak şekilde öğütme başlangıcında ilave edilmiş, 2. Grup kompozit tozları da AA2024 - %1 B_4C olarak şekilde belirlenerek, PCA katkısı öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2., 4., ve 10. Saatlerinde ağ. %0.5 oranında ilave edilerek toplamda ağ. %3,5 oranında PCA katkısı ile öğütülmüş ve 3. Grup kompozit tozları ise takviye miktarı olarak ağ. %1, %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 olacak şekilde belirlenerek, PCA katkısı öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2., 4., 10. ve 14. Saatlerinde ağ. %0.5 oranında ilave edilerek toplamda ağ. %4 oranında PCA katkısı ile öğütülmüştür. Toz numunelerinin morfolojik ve partikül boyut dağılımı incelemeleri, SEM-EDS ve XRD analizleri, toz sertliği, görünür yoğunluk incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Toz ve kompozit malzemelerde yapılan incelemelerde, 18 saatlik eklemeli Metanol katkılı öğütme olduğu ve eklemeli PCA ilavesinin mekanik alaşımlama yönteminde daha avantajlı olduğunu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Metal Matrisli Kompozitler, Mekanik Alaşımlama, B_4C, PCA

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF PCA ADDITION IN THE PROPERTIES OF AA2024-B_4C COMPOSITES PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD

Sedat Alperen TUNÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2024, 156 Pages

In this study, AA2024- B_4C composites produced by powder metallurgy method. Mechanical alloying method was used to produce AA2024-B_4C composite powders. The mechanical alloying process of AA2024-B_4C composite powders was carried out in 3 groups using 4 different PCAs: Methanol, Ethanol, Stearic Acid, Zinc Stearate in a planetary type of ball mill. In the mechanical alloying method used to produce AA2024-B_4C composite powders, Group 1 composite powders were determined as AA2024-1% B_4C and PCA additive was added at the beginning of milling at the rate of 2 wt. %, 2nd Group composite powders were determined as AA2024-1% B_4C, PCA additive was added at the rate of 2wt.% at the beginning of milling and 0.5 wt.% was added at the 2nd, 4th and 10th hours of milling, giving a total of 3.5 wt.% PCA and Group 3 composite powders were determined to contain different amounts of reinforcement by wt.%(1, 2, 5, 10, 20, 30, 40) and PCA additive was added at the beginning of the milling at the amount of 2 wt. % and at the 2nd, 4th, 10th and 14th hours of the milling at the amount of 0.5%, for a total of 4% PCA additive. Morphological examinations, particle size distributions, SEM-EDS-XRD analysis, powder hardness, apparent density examinations of the powder samples were carried out. As a result of the investigations, it was revealed that the best parameter was with the addition of Methanol at 18 hours of milling.

Keywords: Powder Metallurgy, Metal Matrix Composites, Mechanical Alloying, B_4C, PCA

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Kompozit malzemelerin takviye malzemesi tiplerine göre sınıflandırması 3
Şekil 2. B_4C kristal yapısı 9
Şekil 3. SiC kristal yapısı 10
Şekil 4. Alümina kristal yapısı 11
Şekil 5. Su Atomizasyonu Yönteminin şematik gösterimi 17
Şekil 6. Bilyalı Değirmenin çalışma mekanizmasının şematik görüntüsü 19
Şekil 7. Elek Ünitesi 32
Şekil 8. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi. 35
Şekil 9. Öğütmenin yapıldığı Retsch PM100 gezegen tipi bilyalı değirmen 36
Şekil 10. Malvern Mastersizer 2000 partikül boyut dağılım ölçüm cihazı. 37
Şekil 11. Mikro Vickers sertlik cihazı. 37
Şekil 12. Sıcak Pres cihazı (a), sıcak pres cihazının fırını (b). 38
Şekil 13. Kesme cihazı (a), Bakalit cihazı (b), Otomatik Zımparalama-Parlatma Cihazı. 39
Şekil 14. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 40
Şekil 15. X Işınları Kırınımı Analiz cihazı (XRD) 40
Şekil 16. MTS 45 model üniversal çekme cihazı. 42
Şekil 17. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik ölçüm cihazı 42
Şekil 18. Yapılan çalışmada kullanılan tozların morfolojileri a) AA2024 alaşımı b) B_4C seramik takviye partikülü. 43
Şekil 19. AA2024 alaşımı tozlarının bileşimindeki Al, Mg ve Cu elementlerinin partikül yapısındaki dağılımları. 43
Şekil 20. AA2024 alaşımı başlangıç tozlarının partikül boyut dağılımı. 44
Şekil 21. B_4C takviye partiküllerinin bileşimindeki B elementinin partikül yapısındaki dağılımı 44
Şekil 22. B_4C takviye tozlarının başlangıç partikül boyut dağılımı. 45
Şekil 23. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 46
Şekil 24. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 46

Şekil 25. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 46
Şekil 26. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 47
Şekil 27. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 47
Şekil 28. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum analizi. 48
Şekil 29. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 49
Şekil 30. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 49
Şekil 31. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 49
Şekil 32. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 50
Şekil 33. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 50
Şekil 34. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi. 51
Şekil 35. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 52
Şekil 36. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 52
Şekil 37. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 52
Şekil 38. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 53

Şekil 39. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 53

Şekil 40. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi. 54

Şekil 41. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 55

Şekil 42. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 55

Şekil 43. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 55

Şekil 44. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 56

Şekil 45. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 56

Şekil 46. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi. 57

Şekil 47. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 58

Şekil 48. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 58

Şekil 49. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 59

Şekil 50. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 59

Şekil 51. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi. 60

Şekil 52. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 61

Şekil 53. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 61

Şekil 54. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 61

Şekil 55. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 62

Şekil 56. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi. 63

Şekil 57. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 64

Şekil 58. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 64

Şekil 59. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 64

Şekil 60. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 65

Şekil 61. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi. 66

Şekil 62. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 67

Şekil 63. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 67

Şekil 64. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 67

Şekil 65. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 68

Şekil 66. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 69

Şekil 67. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 70

Şekil 68. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 70

Şekil 69. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 70

Şekil 70. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 71

Şekil 71. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 71

Şekil 72. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 72

Şekil 73. AA2024-%1 B_4C tozlarının 2 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 73

Şekil 74. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 73

Şekil 75. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 73

Şekil 76. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 74

Şekil 77. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 74

Şekil 78. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 75

Şekil 79. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 76

Şekil 80. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri. 76

Şekil 81. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 76

Şekil 82. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 77

Şekil 83. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 77

Şekil 84. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 78

Şekil 85. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 79

Şekil 86. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 79

Şekil 87. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 79

Şekil 88. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 80

Şekil 89. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 80

Şekil 90. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz

morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 81

Şekil 91. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 82

Şekil 92. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 82

Şekil 93. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 83

Şekil 94. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 83

Şekil 95. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 83

Şekil 96. AA2024-%2 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 84

Şekil 97. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 85

Şekil 98. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 85

Şekil 99. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 85

Şekil 100. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 86

Şekil 101. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 86

Şekil 102. AA2024-%5 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 87

Şekil 103. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 88

Şekil 104. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 88

Şekil 105. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 88

Şekil 106. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri. 89

Şekil 107. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri. 89

Şekil 108. AA2024-%10 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 90

Şekil 109. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 91

Şekil 110. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 91

Şekil 111. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 91

Şekil 112. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri. 92

Şekil 113. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri. 92

Şekil 114. AA2024-%20 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 93

Şekil 115. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 94

Şekil 116. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 94

Şekil 117. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b) 1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 94

Şekil 118. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b) 1000X büyütmedeki toz morfolojileri. 95

Şekil 119. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri. 95

Şekil 120. AA2024-%30 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 96

Şekil 121. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri. 97

Şekil 122. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri. 97

Şekil 123. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri. 97

Şekil 124. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri. 98

Şekil 125. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri. 98

Şekil 126. AA2024-%40 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi..... 99

Şekil 127. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Metanol ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 101

Şekil 128. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Etanol ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının

partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 102

Şekil 129. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Stearik Asit ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 103

Şekil 130. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Çinko Stearat ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 104

Şekil 131. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 105

Şekil 132. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Etanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 106

Şekil 133. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Stearik Asit ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 107

Şekil 134. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Çinko Stearat ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 108

Şekil 135. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Çinko Stearat ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği..... 109

Şekil 136. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Stearik Asit ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği..... 110

Şekil 137. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Etanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 111

Şekil 138. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C

kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 112

Şekil 139. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%2 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 113

Şekil 140. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%5 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 114

Şekil 141. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%10 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 115

Şekil 142. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%20 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 116

Şekil 143. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%30 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 117

Şekil 144. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%40 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği. 118

Şekil 145. 1. Grup kompozit tozlarına ait toz sertliği değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi. 120

Şekil 146. 2. Grup kompozit tozlarına ait toz sertliği değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi. 120

Şekil 147. 3. Grup kompozit tozlarına ait toz sertliği değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi. 121

Şekil 148. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası ağ.% 1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren AA2024-B_4C kompozit tozlarının toz sertliği değerleri. 121

Şekil 149. 1. Grup kompozit tozlarına ait görünür toz yoğunluğu değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi. 123

Şekil 150. 2. Grup kompozit tozlarına ait görünür toz yoğunluğu değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi. 123

Şekil 151. 3. Grup kompozit tozlarına ait görünür toz yoğunluğu değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi. 124

Şekil 152. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası ağ.% 1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren AA2024-B_4C kompozit tozlarının görünür yoğunluk değerleri. 124

Şekil 153. 1. Grup kompozit tozlarına ait XRD Analizi. 125

Şekil 154. 2. Grup kompozit tozlarına ait XRD Analizi. 126

Şekil 155. 3. Grup kompozit tozlarına ait XRD Analizi. 126

Şekil 156. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi. 127

Şekil 157. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%2 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi. 127

Şekil 158. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%5 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi. 128

Şekil 159. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%10 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi. 128

Şekil 160. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%20 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi. 129

Şekil 161. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%30 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi. 129

Şekil 162. 1. Grup kompozit numunelerine ait Brinell sertlik değerleri. 133

Şekil 163. 2. Grup kompozit numunelerine ait Brinell sertlik değerleri. 133

Şekil 164. 3. Grup kompozit numunelerine ait Brinell sertlik değerleri. 134
Şekil 165. Grup AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 18 saat boyunca öğütülen ağırlıkça %1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren 3. Grup kompozitlerinin sertlik değerleri. 134
Şekil 166. 1. Grup kompozit numunelerinin çekme diyagramı. 136
Şekil 167. 2. Grup kompozit numunelerinin çekme diyagramı. 136
Şekil 168. 3. Grup kompozit numunelerinin çekme diyagramı. 137
Şekil 169. AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 18 saat boyunca öğütülen ağırlıkça %1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren 2. Grup kompozitlerinin çekme diyagramı. 137
Şekil 170. 1. Grup Kompozitlere ait; a) 5M-1B, b) 5E-1B, c) 5SA-1B ve d) 5CS-1B kırılma yüzeyleri. 139
Şekil 171. 2. Grup Kompozitlere ait; a) 14M-1B, b) 14E-1B, c) 14SA-1B ve d) 14CS-1B kırılma yüzeyleri. 139
Şekil 172. 3. Grup Kompozitlere ait; a) 20M-1B, b) 20E-1B, c) 20SA-1B ve d) 20CS-1B kırılma yüzeyleri. 140
Şekil 173. AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 20 saat boyunca öğütülen ağırlıkça; a) %2, b) %5, c) %10, d) %20, e) %30 ve f) %40 oranlarında B_4C içeren kompozitlerinin kırılma yüzeyleri. 141
Şekil 174. 1. Grup Kompozitlere ait; a) 5M-1B, b) 5E-1B, c) 5SA-1B ve d) 5CS-1B mikroyapılar. 143
Şekil 175. 2. Grup Kompozitlere ait; a) 14M-1B, b) 14E-1B, c) 14SA-1B ve d) 14CS-1B mikroyapılar. 143
Şekil 176. 3. Grup Kompozitlere ait; a) 20M-1B, b) 20E-1B, c) 20SA-1B ve d) 20CS-1B mikroyapılar. 144
Şekil 177. AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 18 saat boyunca öğütülen ağırlıkça; a) %2, b) %5, c) %10, d) %20, e) %30 ve f) %40 oranlarında B_4C içeren kompozitlerin mikroyapıları. 145

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Alüminyum ve alaşımları sınıflandırmaları, temel alaşım elementleri, karakteristik özellikler ve kullanım alanları 7

Tablo 2. Mekanik alaşımlamada en sık kullanılan Proses Kontrol Ajanlarına ait tipik özellikler 25

Tablo 3. AA2024 başlangıç tozlarının kimyasal bileşimi 32

Tablo 4. Üretilen kompozit numunelerine ait bileşimler, parametreler ve kodlamalar. 33

Tablo 5. 1. Grup AA2024-%1 B_4C kompozitlerinin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri. 131

Tablo 6. 2. Grup AA2024-%1 B_4C kompozitlerinin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri. 131

Tablo 7. 3. Grup AA2024-B_4C Kompozitlerinin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri. 131

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MMK	: Metal Matrisli Kompozit
TM	: Toz Metalurjisi
MA	: Mekanik Alaşımlama
PCA	: Proses Kontrol Katkısı
μm	: Mikrometre
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
XRD	: X-ışını kırınımı cihazı
MPa	: Megapaskal
HV	: Vickers Sertlik Değeri
HB	:Brinell Sertlik Değeri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kompozit malzemeler, en az iki bileşenin iyi özelliklerinin bir araya getirilerek elde edilen gelişmiş özelliklere sahip yenilikçi malzemelerdir (Callister Jr vd., 2020). Günümüzde kompozitlerin en çok kullanılmakta olanları ise metal matrisli kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler havacılık ve uzay, savunma sanayii ve otomotiv gibi endüstrilerde sıkça kullanılan malzemelerdir. Savunma sanayii açısından ele alındığında, Alüminyum alaşımlı matrisli kompozitler hafif, düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemete sahip malzemeler olmaları dolayısıyla endüstriyel anlamda tercih sebebi olmaktadır. Son yıllarda Alüminyum esaslı B_4C takviyeli kompozit malzemelerin kullanımında artışlar yaşanmakta, endüstriyel anlamda ve bilimsel araştırmalarda sıvı hal, katı hal ve sıvı-katı hal üretim yöntemleri gibi birçok farklı üretim yöntemi bulunmasına rağmen özellikle Toz Metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozit malzemeler son yıllarda üstün özellikleri ve artan kullanım alanları sayesinde öne çıkmaktadır (Ajay Kumar vd., 2020; Bharat vd., 2022; Krishan K. Chawla, 1998; Dursun vd., 2014; Mondolfo, 2013; Yünlü, 2022).

Toz metalurjisi yönteminde partikül formda bulunan matris ve takviye malzemelerinin mukavemeti yüksek kompozit malzemeyi oluşturabilmesi için birbiri içerisinde homojen bir dağılım göstermeli ve birbiriyle tam anlamıyla iç içe geçmelidir. Bunun için mekanik alaşımlama adı verilen yöntem kullanılmakta ve matris ve takviye partikülleri birbiri içerisinde aynı zamanda hem homojen bir dağılıma sahip olurken hem de kademeli bir şekilde boyut düşürülerek üretilecek olan kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde pozitif etki sağlar. Mekanik alaşımlama işleminde, belirli bir eksen etrafında dönerken aynı zamanda da kendi ekseni etrafında dönen bir hazne içerisindeki bilyalar sayesinde matris ve takviye partikülleri soğuk deformasyona, kırılmaya ve soğuk kaynaklanmaya maruz kalır ve mekanik alaşımlama süresi boyunca bu bir döngü halinde devam ederek boyutun incelmesi ve dağılımın homojen bir hal alması sağlanır. Ancak mekanik alaşımlamada meydana gelen bu döngü, prosesin belirli zamanlarında soğuk kaynaklanma ile boyut artışına, belirli zamanlarında ise kırılma ile boyut incelmesine sebep olur. Boyutun kademeli ve düzgün bir şekilde düzenlenmesi ise bu iki farklı mekanizmanın arasındaki dengeyi sağlayarak gerçekleştirilir. Bu dengeyi kurmak için ise mekanik

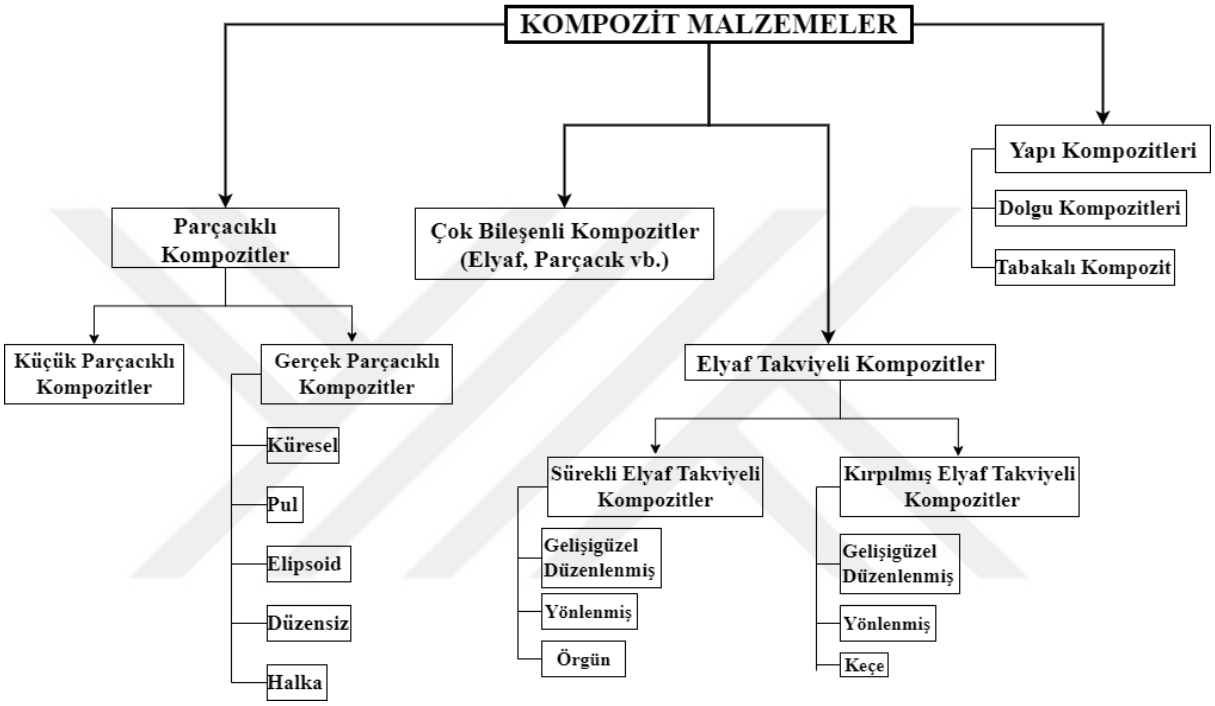
alaşımlama haznesi içerisine farklı katkılar ilave edilir. Proses Kontrol Katkısı(PCA) adı verilen ve katı, sıvı veya gaz halde bulunabilen, birçok farklı bileşim ve yapıdaki bu maddeler, mekanik alaşımlama işlemi esnasında gerçekleşen mekanizmaların dengelenmesine ve prosesin devamlılığını sağlayarak boyutun düşürülüp dağılımın homojenitesinin arttırılmasını sağlamaktadır (Angelo vd., 2022; Neikov vd., 2019; Sankhla vd., 2022; Suryanarayana, 2001; Torralba Castelló vd., 2014).

Bu çalışmada AA2024 alaşımı matrisli, B_4C takviyeli kompozitler, mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmiştir. Farklı tipteki ve oranlardaki PCA katkılarının farklı mekanik alaşımlama sürelerinde ve artan B_4C takviye oranlarında, toz özellikleri, toz morfolojisi ve toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mekanik alaşımlama yöntemiyle farklı sürelerde farklı tip ve oranlarda PCA katkısı ile öğütülerek üretilen kompozit tozlarından öğütme esnasında belirli zaman aralıklarıyla alınan toz numuneleri üzerinden, toz morfolojisi incelemeleri, toz sertliği, görünür yoğunluk, partikül boyut dağılımı incelemeleri ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin ise yoğunluk ve gözeneklilik incelemeleri, sertlik, çekme dayanımı incelemeleri, kırılma yüzeyi incelemeleri ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, tarihi milattan önce 16. Yüzyılda Mısır ve civarında yaşayan halkların yaşam alanlarını oluşturmak için kullandıkları çamur ve saman karışımına, 13. Yüzyılda günümüz Moğolistan topraklarında ahşap ve kemik kombinasyonunun hayvanlardan elde ettikleri doğal yapıştırıcılar ile bir araya getirilip ahşap çubuklara sabitlenmesi ile elde edilen güçlü ve bir o kadar da isabetli savaş aletleri haline getirilip içinde yaşadıkları zaman için Hükümdar Cengiz Han'a savaş alanlarında büyük avantaj sağlamış mızraklara dayanan çok yönlü ve çağın ihtiyaçlarına her zaman cevap vermeyi başarabilmiş malzemelerdir. Teknik anlamda ele alındığında kompozit malzemeler, en az iki bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşan, başka bir tabirle birbirlerinden şekil, boyut, bileşim açısından birbirinden farklı ve birbiri içerisinde çözünmeyen en az iki bileşenin iyi özelliklerinin bir araya getirilerek elde edilen gelişmiş özelliklere sahip yenilikçi malzemelerdir (Callister Jr vd., 2020; Nagavally, 2017; Smith, 2009).

Kompozit malzemeler kendi içlerinde doğal ve yapay olarak en basit şekilde sınıflandırılabilmektedirler. Ayrıca kompozit malzemeyi oluşturan matris malzemesinden yola çıkılarak metal matrisli, polimer matrisli, seramik matrisli kompozit malzemeler olarak sınıflandırmalar da yapılabilmektedir. Bunun dışında kompozit malzemeyi oluşturan matris malzemesine ve takviye malzemesine göre de sınıflandırma yapılabilmektedir (Çanakçi, 2006).



Şekil 1. Kompozit malzemelerin takviye malzemesi tiplerine göre sınıflandırması (Çanakçi, 2006).

1.2.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzemeler, matris fazı ile takviye fazı veya fazlarının kompozit yapısına kazandırdığı gelişmiş özelliklere sahiptirler ancak birbirinden farklı matris yapılarına ve takviyelere sahip kompozitler için genel anlamda kompozit malzemeler üzerinden değil, 3 ana malzeme sınıfının tüm üyelerini bünyelerinde barındıran polimerler, seramikler ve metaller üzerinden bu özelliklerin incelenmesi çok daha anlaşılır olup sınıflandırmayı da efektif hale getirmektedir. Matris malzemelerine dayalı bu genel özelliklere bakılacak olursa;

Polimer matris malzemelerine sahip kompozitler düşük yoğunlukları sayesinde hafif olmaları ve kimyasal dayanımlarının iyi olmasının yanında üretimleri kolay ve çoklu üretime

elverişli olmaları çok önemli bir avantajdır. Bu tür kompozitler genellikle fiber formda seramik takviyeler kullanılarak üretilirler. Güneş ışığı, nem vb. çevresel etkilere karşı dirençleri ortalama seviyelerdedir ancak ısıl dayanımları ve mekanik özellikleri de nispeten kötüdür.

Seramik matris malzemelerinin kullanıldığı seramik matrisli kompozitlerde ise matris malzemelerinin bazıları çok yüksek, bazıları da nispeten düşük yoğunluğa sahip olabilmektedirler. Seramik matrisli kompozitler çoğunlukla seramik, metal, cam veya polimer takviyeler kullanılarak üretilebilmektedir. Termal dayanımları, aşınma, korozyon gibi dayanımları yüksektir. Kimyasal olarak güçlü bağ yapılarına sahip oldukları için rijitlikleri yüksektir ancak yüksek gevrekliğe sahiptirler ve şekillendirilmeleri güçtür.

Metal matrisli kompozitlerde ise matris malzemelerinin yoğunlukları ortalama veya çok yüksek olabilmektedir. Metal matrisli kompozitler, termal özellikleri, gelişmiş mekanik özellikleri ve alaşımlama ya da takviye ilavesiyle arttırılabilen korozyon direnci ile üstün ısıl iletkenlik özellikleri sayesinde dünya çapında geniş kullanım alanlarına sahiptir. Bunlara ek olarak şekillendirilmeleri ve işlenmeleri de kolaydır. Dünya çapında en çok tercih edilen matris malzemelerinin başında Alüminyum gelmektedir. Alüminyumu ise Bakır, Demir, Magnezyum, Nikel ve Titanyum takip etmektedir (Altenbach vd., 2004; Bryan, 1999; Krishan K Chawla, 2013; Sharma vd., 2020; Wang vd., 2011).

1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, kompozit yapısının ana bileşenlerinden biri olan matris fazını bir metalin oluşturduğu, takviye fazının ise genellikle seramik malzemelerin ya da refrakter malzemelerin oluşturduğu kompozitlerdir. Ancak bunların dışında da metalik takviyelere sahip metal matrisli kompozitler de bulunmaktadır(Evans vd., 2003). Metal matrisli kompozitlerde matris içerisine takviye edilen takviye çeşitlerine göre yapısal uygulamalar, otomotiv, savunma sanayii ve havacılık, uzay endüstrisi gibi günümüzde önem kazanmış sektörlerde kullanımları zaman ilerledikçe yaygınlaşmıştır (Ajay Kumar vd., 2020).

Metal matrisli kompozit malzemeleri diğer kompozit malzemelere nazaran öne çıkaran üstün özelliklerinden yüksek sertlik, yüksek elastisite modülü, yüksek tokluk ve darbe dayanımı, yüksek çekme mukavemeti, yüksek sürünme ve yorulma dayanımı gibi özellikler

günümüze gelindiğinde birçok sektörde ilgi çekmektedir (Arpaci, 2019). Metal matrisli kompozitlerde, matris malzemesi olarak genellikle mühendislik alanında kullanılan birçok metal kullanılabilmektedir. Farklı sektörlerde ihtiyaç duyulan farklı özellikler nezdinde matris malzemeleri de değişkenlik gösterebilmektedir. Genellikle düşük yoğunluklu olan metaller bu alanda başlıca tercih edilirler. Genel olarak matris malzemesi olarak tercih edilen metallere baktığımızda bunlar; Alüminyum, Bakır, Magnezyum, Nikel, Molibden, Kobalt, Titanyum metalleri ve bu metallerin alaşımlarıdır (Balasubramanian, 2013; Roeseler vd., 2007).

Bakır elementi, Gümüş ve altınla karşılaştırıldığında her iki malzemeden daha az elektriksel iletkenliğe sahiptir ancak gümüş ve altına nazaran daha ekonomik olması sebebiyle özellikle elektriksel iletiminde çok yaygın kullanılmaktadır. Elektriksel iletim dışında ısıl iletkenlik, korozyon dayanımı özelliklerinin iyi olması ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarından dolayı bakır ve bakır alaşımları elektriksel ve ısıl iletim alanlarında kullanılmaktadır (Ali vd., 2021; Efe vd., 2010).

Bakır matrisli kompozit malzemeler ise genellikle matris malzemesi olarak kullanılan Bakırın seramik veya metal katkılar ile takviye edilerek Bakırın yüksek ısıl iletkenliği, mükemmel elektriksel iletkenliği ve aşınma dayanımı özelliklerinin geliştirilmesi ile ısıl ve elektriksel anlamda birçok sektörde, sayısız cihaz ve elektronik alette kullanım alanlarını arttırmaktadır (Ali vd., 2021; Kaftelen vd., 2011).

Magnezyum, 1.74 g/cm^3 yoğunluğu ile çelikten %77 oranında daha hafif bir malzeme olarak metal matris malzemeleri arasında öne çıkmaktadır. Özellikle biyomedikal uygulamalarda ve yapısal uygulamalarda kullanılan metaller arasında Magnezyum, yoğunluğu en düşük metaldir(Bommala vd., 2019). Ergime sıcaklığının düşük olması, özgül mukavemeti, sönümleme kapasitesinin yüksek olması gibi avantajlara sahip olması bu alanda Magnezyum ve alaşımlarının tercih edilme sebebidir (Ye vd., 2004). Bunların dışında oksijen afinitesinin yüksek olması, elastik modülünün insan kemiğine çok yakın bir değerde ancak diğer metallere kıyasla düşük olması ve sünekliğinin ise zayıf olması kullanım alanlarını sınırlayan faktörlerdendir (Dey vd., 2015; Haghshenas, 2017).

Magnezyum matrisli kompozitler, Magnezyumun düşük sürünme dayanımı ve düşük aşınma dayanımı gibi olumsuz özelliklerini genellikle Al_2O_3, SiC, TiC ya da karbon fiber gibi malzemeler ile takviye ederek düşük olan sürünme dayanımı ve aşınma dayanımını

iyileştirmenin yanında kompozit yapının sertlik, çekme dayanımı, süneklik, gibi birçok önemli özelliğini de iyileştirerek küresel anlamda birçok yapısal uygulamada, otomotiv sektöründe, havacılık ve uzay sektöründe özellikle hafiflikleri ile öne çıkmakta ve enerji tasarrufunun önemli olduğu uygulamalarda sıklıkla tercih edilen kompozitlerdir (Dey vd., 2015; Ye vd., 2004).

Titanyum matrisli kompozitler, günümüzde yaygın olarak tercih edilen kompozit malzemelerdendir. Titanyum, yüzeyinde oluşan TiO_2 tabakasının korozyon direncine pozitif etkisi sayesinde korozyon direncinin yüksek olması ve insan sağlığını tehdit edebilecek toksik özellikleri olmaması sebebiyle özellikle biyomalzeme sektörünün ilgisini çekmektedir. Bunlara ek olarak yüksek özgül mukavemeti ve sertliği dolayısıyla uzay ve havacılık sektörlerinde yapısal uygulamalarda da tercih edilmektedir. Fakat maliyetinin yüksek olması, işlenebilirliğinin zayıf olması ve geleneksel yöntemlerle üretiminin zor olması bu sebeple de üretiminin ekonomik olmaması nedeniyle kullanım alanları sınırlıdır (Hayat vd., 2019; Leyens vd., 2003; Zhang vd., 2016).

Titanyum matrisli kompozit malzemeler, yüksek dayanımları ve yüksek spesifik modüle sahip olması dolayısıyla özellikle havacılık sektöründe uçak motorları ve uçak gövdesinde kullanılan otuz yılı aşkın süredir geliştirilmekte olan malzemelerdir. Biyo-uyumlulukları, yüksek kimyasal kararlılık gibi özellikleri sayesinde biyomedikal sektörü başta olmak üzere, petrokimya, otomotiv, denizcilik sektörlerinde de tercih edilen malzemelerdir. Genellikle SiC, TiC, TiN, TiB_2, B_4C, La_2O_3 gibi seramik partiküller ile takviye edilen Titanyum matrisli kompozitler, bunların dışında Grafen ve Karbon Nanotüp gibi farklı formlardaki takviyeler de kullanılabilmektedir (Hayat vd., 2019).

Alüminyum ve alaşımları ise, düşük yoğunlukları, korozyona karşı direnci, kolay işlenebilir olması, ısıl ve elektriksel iletkenliğinin yüksek olması ve de tedariğinin kolay olması gibi üstünlüklere sahiptir. Bunların dışında; parlatılmış alüminyum yüzeylerinin çok iyi birer yansıtıcı olması sebebiyle bu özelliğinden yola çıkarak ışığı, sıcaklığı hatta elektromanyetik dalgaları geri yansıtması, toksik etkiye sahip olmaması sebebiyle yiyecek ve içeceklerin uzun zaman muhafaza edildiği konserve kutularında kullanılması gibi endüstriyel ve günlük hayatta Alüminyumun kullanıldığı birçok örnek karşımıza çıkmadır. Alüminyum yeryüzünün en yaygın elementlerinden birisi olmakla beraber, 2.7 g/cm^3 yoğunluğu ile 8.93 g/cm^3 yoğunluklu Bakır ve 7.83 g/cm^3 yoğunluklu Çeliğin yoğunluğunun yaklaşık üçte biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Karabacak, 2018; Mondolfo, 2013).

Alüminyumun oksijen afinitesi, yüzeyinde oksit tabakasının oluşmasına ve özellikle de Alüminyumun dökülebilirliğini kötü etkilemektedir. Bu gibi olumsuz yönlerini iyileştirebilmek amacıyla farklı elementler ile alaşımlama yapılarak da elde edilen Alüminyum alaşımları endüstriyel olarak kullanılabilmektedir. Alüminyum alaşımları için işlenmiş ve döküm alaşımları olarak iki farklı kategoride inceleme yapılabilmektedir. İşlenmiş alüminyum ve alaşımları için özellikle dünya çapında bilinen Amerika merkezli Alüminyum Kuruluşu (The Aluminium Association) tarafından belirlenen sınıflandırmalardan faydalanılmaktadır. Bu sınıflandırma hem döküm alaşımlarını hem de işlenmiş alüminyum alaşımlarını bir arada içermekte ancak bunları içeriklerine, karakteristik özelliklerine veya kullanım alanlarına göre ailelere ayırmaktadır. Bu sınıflandırma 4 rakam kullanılarak gerçekleştirilir ve ilk rakam alaşımın içeriğindeki temel alaşım elementini ifade eder. 1'den 9'a kadar olan bu sistematik içerisinde her bir numara farklı elementleri ifade etmektedir (Daridereli, 2010; Davis, 1993; Kaufman, 2000; Mazzolani, 1994). Bu sınıflandırma sistemi, her bir sınıfın karakteristik özellikleri ve bu alaşımların genel kullanım alanları ile ilgili bilgiler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum ve alaşımları sınıflandırmaları, temel alaşım elementleri, karakteristik özellikler ve kullanım alanları (Daridereli, 2010; Davis, 1993; Kaufman, 2000; Starke Jr vd., 1996).

Sınıf	Temel Alaşım Elementi	Karakteristik Özellikler	Kullanım Alanları
1XXX	Saf Al	Pekleşme ile sertleştirilebilir	Elektrik, Kimya sektörü
2XXX	Al-Cu	Al ve Cu katı çözelti oluşturabilir, ısıl işlem uygulanabilir	Havacılık sektöründe uçak komponentlerinde
3XXX	Al-Mn	Isıl işleme cevap vermez, pekleşme ile sertleştirilebilir.	Genel kullanım, mimari uygulamalar
4XXX	Al-Si	İçerdiği Si miktarına göre ve diğer alaşım elementleri miktarına göre ısıl işlem uygulanabilirliği değişkenlik gösterir.	Kaynak çubukları, lehimleme uygulamaları
5XXX	Al-Mg	Isıl işlem uygulanmaz, pekleşme ile sertleştirilebilir.	Denizcilikte yapısal uygulamalar
6XXX	Al-Mg-Si	İki temel alaşım elementi yapıda katı çözelti olarak Mg_2Si şeklinde bulunur, ısıl işlem uygulanabilir.	Otomotiv endüstrisi, mimari uygulamalar
7XXX	Al-Zn	Belirli miktarda Cu ve Mg ilavesi ile ısıl işlem uygulanabilir.	Yüksek dayanım gerektiren yapısal uçak komponentleri
8XXX	Diğer (Fe, Sn vb.)	Temel alaşım elementinin oranına göre özellikleri değişkenlik gösterir.	-
9XXX	Kullanılmıyor	-	-

Alüminyum 2024 alaşımı, 2XXX serisinde yer alan ve 7XXX serisinden sonraki en iyi mekanik özelliklere sahip Alüminyum alaşımıdır. Temel alaşım elementi olan Bakır'a ek olarak Magnezyum ve Mangan içermektedir. Yüksek sertliği, yüksek tokluğu ve dayanımı, elastisite modülü ve darbe dayanımı gibi gelişmiş özelliklerinden dolayı genellikle havacılık ve uzay sanayisinde yakıt depoları, kanatlar gibi komponentlerde ve diğer araçlarda yapısal uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir alaşımdır. Alüminyum 2024 alaşımı diğer Alüminyum alaşımlarına nazaran şekillendirilebilme kabiliyeti yüksektir ve talaşlı imalat özelliği gelişmiştir (Dursun vd., 2014; Kotan, 2014; Lacroix vd., 2012; Seshadri vd., 2013; Wen vd., 2010).

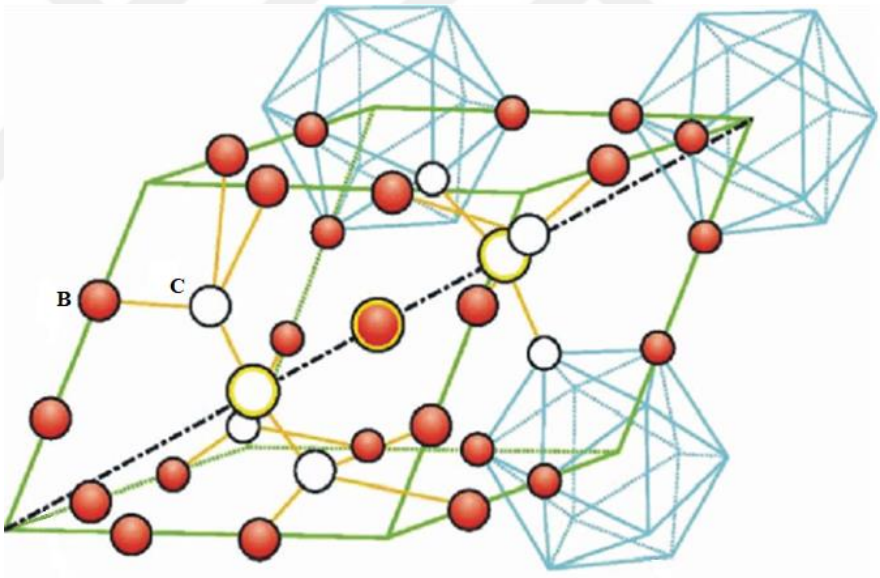
İleri malzemelerden olan alüminyum matrisli kompozit malzemeler, yüksek spesifik mukavemetleri, yüksek toklukları, yüksek aşınma dirençleri, düşük termal genleşme katsayısı gibi mükemmel mekanik ve fiziksel özeliklerine ek olarak düşük yoğunluklarının sağladığı hafiflik avantajı ile uzun yıllardır özellikle yüksek performanslı malzemelerin kullanıldığı otomotiv sektöründe, havacılık ve uzay sektöründe tercih edilen malzemelerden olup, son yıllarda ise savunma sanayiinde de yüksek tokluk ve mukavemet gerektiren zırh uygulamalarında tercih edilmektedirler (Chak vd., 2020). Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin özelliklerinin mükemmel seviyelere çıkarılmasında ise takviye elemanı olarak kompozit yapısına genellikle B_4C, Al_2O_3, SiC vb. seramik malzemeler ilave edilmektedir. Takviye edilen bu seramik partiküllerin yüksek sertlikleri, mükemmel mukavemet ve aşınma özellikleri ile refrakterlik özellikleri sayesinde alüminyum matrisli kompozit malzemeler birçok endüstride aranan özelliklere sahip malzemeler haline gelmektedir (Mavhungu vd., 2017; Ramnath vd., 2014).

1.4. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerde takviye malzemeleri fiber formda, kıl(whisker) formda, kırpık fiber formunda ya da partikül formdaki karbürler, nitrürler, oksitler kullanılabildiği gibi elementel formda da kullanılabilmektedir. Ancak fiber, kırpık fiber ve kıl formdaki takviyelerin kullanıldığı kompozitlerde takviye fazının hasar görmesi, arayüzey oluşumundaki sıkıntılar, takviyelerin mikroyapıda üniform dağılım göstermesindeki zorluklar gibi dezavantajların ortaya çıkması ve bunu engelleyebilecek çözümlerin üretimin ekonomikliği üzerindeki olumsuz etkiler sebebiyle takviye malzemelerinin matris ile uyumluluğu en fazla olan takviye çeşidinin partikül formdaki takviyeler olduğu anlaşılmıştır

(Ibrahim vd., 1991). Bu sebeplerden ötürü, metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak en çok tercih edilen partikül formdaki seramik takviye malzemeleri B_4C, SiC ve Al_2O_3 olarak sıralanabilir (P. Kumar vd., 2021).

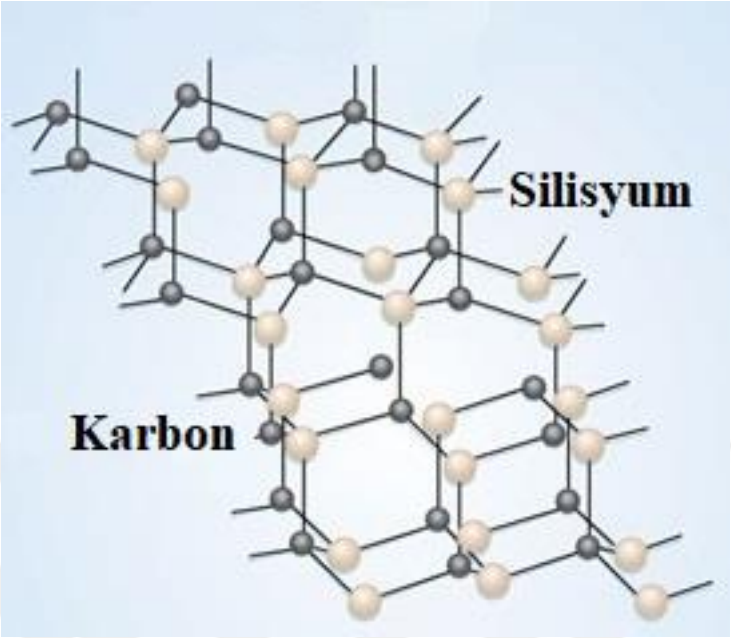
Parlak siyah renkli, katı bir seramik malzeme olan Bor Karbür (B_4C) ile ilgili ilk çalışmalar 1883 ile 1894 yılları arasında başlamış ve günümüzde 1934 yılında ise formülü günümüzde bilinen B_4C halini almıştır. Mohs skalasında 9.3 derece ile Elmas ve Kübik Bor Nitrür(c-BN)'den sonraki en yüksek sertliğe sahip, asitlere karşı inertliği yüksek, düşük yoğunluğu dolayısıyla hafif ve nötron absorbsiyon yeteneği yüksek bir seramik bileşik olan Bor Karbür, bor elementinin en önemli endüstriyel ürünü olarak sayılmaktadır ve dünya çapında en çok üretilen yüksek sertliğe sahip malzemedir (Yünlü, 2022). Metal matrisli kompozitlerde B_4C katkısı ile yüksek sertliğe, üstün mekanik ve termal özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilerek dünya çapında birçok endüstride kullanılmaktadır (Shirvanimoghaddam vd., 2016).



Şekil 2. B_4C kristal yapısı (Kovziridze vd., 2013).

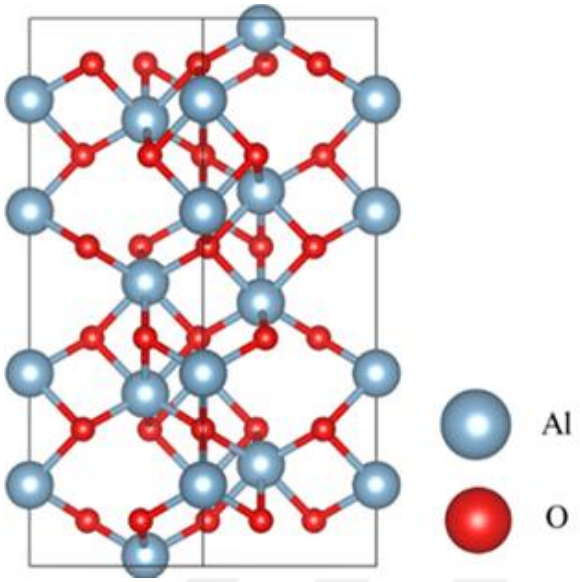
Silisyum Karbür (SiC), kimyasal etkilere karşın stabilitesi yüksek, düşük yoğunluğa sahip, yüksek mukavemet ve ısıl şok direncine sahip ve aynı zamanda yarı iletken özelliğine sahip seramik esaslı bir malzemedir. SiC üzerine ilk çalışmalar yarı iletken olarak kullanımına yönelik yaklaşık olarak 100 yıl önce başlatılmış, devamında ise sahip olduğu gelişmiş özellikleri sayesinde artarak devam etmiş ve tüm dünya geneline yayılmıştır. Metal matrisli kompozit yapılarında ise takviye partikülü olarak kullanıldığında kompozit yapının

yüksek sertlik ve yüksek mukavemet gibi önemli mekanik özelliklerinde artış sağladığı tespit edilmiştir (Aigbodion vd., 2007; Harris, 1995; Rahman vd., 2014).



Şekil 3. SiC kristal yapısı (Madar, 2004).

Alümina olarak da adlandırılan Al_2O_3 bileşiği esasen seramik bazlı olmakla birlikte, yüksek ergime sıcaklığına sahip olması sayesinde yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılığının yüksek ve reaktif olması gibi özellikleri sebebiyle yüksek sıcaklık uygulamalarında, havacılık ve uzay, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarda tercih edilen bir malzemedir. Alümina'nın yüksek sertliği sayesinde kesici takımlarda, yüksek aşınma dayanımı sayesinde abraziv partikül olarak zımparalarda, kimyasal inertliği ve stabilitesi sayesinde alüminyum ve alaşımlarında oksidasyon korumasında ve fiber formdaki alümina takviye edilerek ısıl yalıtım ve alev geciktirici olarak kullanımında, elektriksel olarak yalıtkanlık özelliği sayesinde elektrik devrelerinde ve elektronik elemanlarda elektrik yalıtım malzemesi olarak sıklıkla karşımıza çıkmaktadır ve yüksek transparanlık özelliği sayesinde lazer kaynaklarında ve ateşleyici bujilerde kullanılan çok yönlü bir malzemedir (Doremus, 2008; Kurşun vd., 2016).



Şekil 4. Alümina kristal yapısı (Ramogayana vd., 2021).

Metal matrisli kompozit malzemelerin matris ve takviye fazlarının bir arada uyum içerisinde bulunması ve üstün özelliklere sahip yeni nesil malzemelerin ortaya çıkarılmasında üretim yöntemlerinin etkisi yüksektir. Üretim işlemi esnasında homojeniteyi korumak ve hatasız bir yapının elde edilmesi gibi malzemenin özelliklerinin etkileneceği hususların başarılı bir şekilde sağlanması önemlidir. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan birçok yöntem;

- Sıvı hal üretim teknikleri,
- Katı hal üretim teknikleri

olarak iki farklı şekilde ele alınmaktadır. Sıvı hal üretim teknikleri, genel olarak takviye fazının ergiyik metal ile karıştırılarak katılaştırılması olarak açıklanabilir. Sıvı hal üretim teknikleri içerisinde bulunan üretim yöntemleri;

- Karıştırmalı Döküm (Stir Casting)
- Karma Döküm (Compo Casting)
- Sıkıştırmalı Döküm (Squeeze Casting)
- Püskürtmeli Biçimlendirme (Spray Forming)'dir (Bharat vd., 2022).

Karıştırmalı döküm yöntemi, ergiyik metal matrisin, takviye fazlarını oluşturan malzemeler ile mekanik olarak karıştırılması işlemi olarak özetlenebilir. Karıştırmalı dökümde işlem aşamaları: matris metalinin ergitilmesi, mekanik karıştırıcı yardımıyla

karıştırılması, takviye malzemesinin ergiyik haldeki matris içerisine eklenmesi, matris ve takviye fazının mekanik karıştırıcı ile karıştırılması, matris ve takviye karışımının kalıp içerisinde dökülmesi ve katılaşmadır. Karıştırmalı döküm yöntemi, üretimin kolay olması, esnekliği ve ekonomik bir yöntem olması açısından metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir üretim yöntemidir (Canakci vd., 2014; U. K. A. V. Kumar, 2017).

Karma döküm yöntemi ise karıştırmalı döküm yönteminden farklı olarak, matris fazının yarı katı bir halde tutulduğu ve takviye malzemesinin yarı katı haldeki matris ile karıştırıldığı bir yarı-katı hal üretim yöntemidir. Karma döküm yöntemi karıştırmalı döküm yöntemine göre: döküm sıcaklığının ayarlanabilmesi, hatasız bir nihai ürün elde etmenin kolaylığı, yöntemde kullanılan ekipmanların daha uzun ömürlü olması ve enerji tasarrufu gibi ekonomik avantajlara sahiptir (Sajjadi vd., 2012; Singh vd., 2020).

Sıkıştırmalı döküm yöntemi ise ergiyik matris metali ve içerisine eklenen takviye malzemesinin kalıp boşluğuna yüksek basınç uygulanarak doldurulması ile gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Yöntemin aşamaları; metalin ergitilmesi, ergiyik metalin hazne içerisine doldurulması, hazne içerisindeki ergiyiğin yüksek basınç uygulanarak özel tasarlanan kalıp içerisine doldurulması ve katılaştıktan sonra kalıptan çıkarılması şeklindedir. Sıkıştırmalı döküm yöntemi, ergiyik metalin tasarlanmış kalıp içerisine yüksek basınçla birlikte doldurulması sebebiyle direkt olarak son ürünün çok iyi yüzey kalitesine sahip olması, daha iyi boyutsal tutarlılığa sahip olması gibi avantajları dolayısıyla yüksek kalite malzeme üretiminde ve üst segment malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır (Ghomashchi vd., 2000).

Püskürtmeli biçimlendirme yöntemi ise ergiyik metalin, takviye üzerine püskürtülerek kompozit üretiminin yapıldığı sıvı hal üretim yöntemidir. Hazne içerisinde ergiyik haldeki metal, takviye fazı üzerine püskürtülerek takviye fazı üzerinde biriktirilerek üretim gerçekleştirilir. Özellikle polimer matris malzemelerinin fiber formdaki takviyelerin üzerinde biriktirilmesi için tercih edilen bir üretim yöntemidir. Matris malzemesinin viskozitesinin düşük olması ise bu yöntemin kullanılmasındaki sınırlamalardan en önemlisidir (Kaczmar vd., 2000).

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinde kullanılan katı hal üretim yöntemlerinde ise üretim matris malzemesinin ergime sıcaklığının altına gerçekleştirilmektedir. Katı hal üretim yöntemleri;

- Difüzyonla Bağlanma (Diffusion Bonding)
- Sürtünme Karıştırmalı Üretim (Friction Stir Processing)
- Ultrasonik Destekli Döküm (Ultrasonic-assisted Casting)
- Toz Metalurjisi (Powder Metallurgy)'dir(Bharat vd., 2022).

Difüzyonla bağlanma yöntemi, filament veya fiber takviye edilerek üretilen metal matrisli kompozitlerin üretiminde sıklıkla kullanılan bir üretim yöntemidir. Fiberlerin yönü ve dağılımının kontrol edilebilmesi, birçok metal matris malzemesi ile kullanılabilmesi ve hacim dağılımı kontrolünün mümkün olması bu yöntemin öne çıkan avantajlarındandır. Difüzyonla bağlanma yöntemiyle üretimde, Matris ve takviye malzemesi olarak kullanılan filament, ilk olarak birbirleri ile istiflenerek bir araya getirilir. Daha sonra ise yüksek sıcaklık ve basınç uygulanarak üretim tamamlanır (Bharat vd., 2022).

Sürtünme karıştırmalı üretim yöntemi, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile benzer bir yöntemdir. Bir destek ve pine sahip ergime noktası çok yüksek, çok sert ve dayanıklı bir takım ucuna, aşağı yönlü kuvvet, yüksek hız ve yüksek sürtünme kuvveti sonucu ortaya çıkan sıcaklık işlem gerçekleştirilir. Matris malzemesi içerisindeki boşluklara ya da deliklere istenen takviye malzemesi koyulur ve takım ucunun bu delikte ortaya çıkardığı ısı ile matris içerisindeki boşluklardan takviye partikülleri matris içerisine girerek kompozit malzemeyi oluşturur (Ma, 2008).

Ultrasonik destekli döküm yöntemi ise geleneksel karıştırmalı döküm yöntemi ile büyük oranda benzeşen bir yöntem olmakla beraber tek ve en büyük farkı karıştırmalı dökümdeki mekanik karıştırıcının yerini bu yöntemde ultrasonik bir probun almış olmasıdır. Ultrasonik probun oluşturduğu kabarcıklar yapıda boşluklar oluşturmakta, oluşan bu boşlukların patlamasıyla ise aglomerasyonun önüne geçilerek yapıdaki dağılımın homojen hale getirilmesi sağlanmaktadır. Yöntem, karıştırmalı döküm yöntemine göre daha iyi dağılım sağlamasının yanı sıra daha iyi mekanik özellikler elde edilmesini sağlamaktadır (Idrisi vd., 2019).

Toz metalurjisi yöntemi, bünyesinde bulunan toz üretimi, toz karıştırma, sıkıştırma (presleme) ve sinterleme aşamaları ile toz haldeki matris ve takviye partiküllerinin belirli bir kalıp veya hazne içerisinde sıkıştırılarak istenen formda üretilmesi işlemidir. Karmaşık yapılı malzemelerin üretiminde, boyutsal ve şekilsel özelliklerin önemli olduğu ve

toleransların düşük olduğu malzemelerde özellikle tercih edilen çok yönlü ve ekonomik bir üretim yöntemidir (Bharat vd., 2022; Pickens, 1981).

1.5. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi yöntemi, geçmişi çok eski dönemlere kadar uzanan ve örnekleri günümüze kadar ulaşmış bir üretim yöntemidir. İlk örnekleri günümüzdeki en önemli üretim yöntemlerinden biri olan toz metalurjisi yöntemi ilk keşfedildiği yıllarda çok basit şekilde uygulanmaktayken, özellikle 1900'lü yıllarda geliştirilen atomizasyon ve mekanik alaşımlama gibi benzersiz teknolojiler ve günümüze dek gelişen teknoloji ve artan imkanlar ile havacılık ve uzay sanayi, savunma sanayi, tıp ve enerji gibi birçok önemli sektördeki çok geniş bir ürün çeşitliliğine sahiptir (Angelo vd., 2022; Novák, 2020).

Toz metalurjisi yöntemi (TM), metal tozları kullanılarak yarı mamül halinde veya bitirilmiş halde ürünlerin üretilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Üretim için tek bir çeşit metal tozu veya iki ya da daha fazla metal tozunun metalik olan/olmayan diğer katkılarla veya bu katkılar olmadan karıştırılması ya da mekanik alaşımlanması ile elde edilerek gerçekleştirilmektedir. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin üretim işlemlerinin ilki tozların üretilmesi, elde edilen element veya alaşım tozlarının takviyeler veya yağlayıcılar ile homojen hale getirilmesi için karıştırılması, elde edilen homojen toz karışımının uygun bir kalıp içerisinde kompakt hale getirilerek paketlenmesini sağlayarak ham mamül elde etmek ve son olarak da fırın içerisindeki kontrollü bir atmosfer ve uygun sıcaklık altında sinterlenerek metalurjik olarak bağlanması ve bu sayede yoğunluğu arttırılarak mukavemet kazandırılarak üretilmesi olarak tanımlanmaktadır (Karabacak, 2018; Torralba Castelló vd., 2014).

Toz metalurjisi yöntemi, geleneksel üretim yöntemleriyle kıyaslandığında, hem yarı mamül, hem de son ürün üretiminin gerçekleştirilmesine olanak sağlaması, bazı karmaşık şekilli veya gözenekli malzemelerin üretimini mümkün kılan tek yöntem olması, geleneksel yöntemlere nazaran daha az enerji tüketimine ihtiyaç duyması sebebiyle ve özellikle de toz metalurjisi yöntemiyle üretilen birçok malzemenin bitirme işlemlerine ihtiyaç duymamasından dolayı malzeme kaybını engellemesi sayesinde ekonomik olması ve çevre dostu bir üretim yöntemi olması gibi benzersiz özellikleriyle birçok sektörde kullanılmakta ve kullanım alanları giderek artmaktadır (Pickens, 1981).

Yüksek ergime sıcaklıklarına sahip oldukları için geleneksel yöntemlerde üretimi zor olan Tungsten (W), Molibden (Mo) vb. elementler, yüksek sertliğe sahip gevrek ve kırılgan karbürler, oksitler ve Alüminyum, Bakır ve Nikel gibi elementler ve bunların alaşımlarını içeren kompozitlerin üretimi gerçekleştirilerek, sertliği yüksek, üstün mukavemet özelliklerine sahip, mükemmel fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip malzemeler Toz Metalurjisi yöntemiyle geleneksek üretim yöntemlerine kıyasla daha az enerji, daha az maliyet ve daha yüksek verimlilikle üretilebilmektedir. Bunun dışında Toz Metalurjisi yönteminin ilk yatırım maliyetinin ve üretim için gereken kalıp maliyetinin yüksek olması, üretilebilecek parçaların geometrik şekli ve boyutunun kısıtlı olması bu yöntemin dezavantajıdır (Tan vd., 2020; Upadhyaya, 1997).

1.5.1. Metal Toz Üretimi

Toz metalurjisi ile üretim ilk olarak kullanılan metal tozlarının özellikleri ve karakterizasyonunun belirlenmesi ile başlamaktadır. Metal tozlarının şekli, boyutu, bileşimi ve yapısı, bu tozlardan elde edilecek olan malzemenin tüm özelliklerine direkt etki etmekte ve daha üretim aşamasında iken paketlenme, sinterlenme ve yoğunlaşma gibi parametreler üzerinde etki göstermektedir. Metal tozlarının karakteristik özellikleri de üretim yöntemine ve üretim yönteminin şartlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Üretim yöntemlerine bağlı olarak tozların şekil ve boyutları iğnemsi, dentritik, yassı, köşeli, küresel veya gözenekli yapıda olabilmektedir. Dünya çapında birçok toz üretim yöntemi mevcut olmakla birlikte, bu yöntemler şunlardır;

- Kimyasal Üretim Yöntemleri
  - Kimyasal İndirgeme Yöntemi ile Toz Üretimi
  - Kimyasal Ayrıştırma ile Toz Üretimi Yöntemi
- Fiziksel Üretim Yöntemleri
  - Elektrolitik Toz Üretim Yöntemi
  - Atomizasyon ile Toz Üretimi
- Mekanik Üretim Yöntemleri
  - Mekanik Alaşımlama ile Toz Üretimi
  - Değirmende Öğütme ile Toz Üretimi (Upadhyaya, 1997)

Üretim yöntemlerine bağlı olarak tozların şekil ve boyutları iğnemsi, dentritik, yassı, köşeli, küresel veya gözenekli yapıda olabilmektedir. Bu yöntemler arasında Atomizasyon

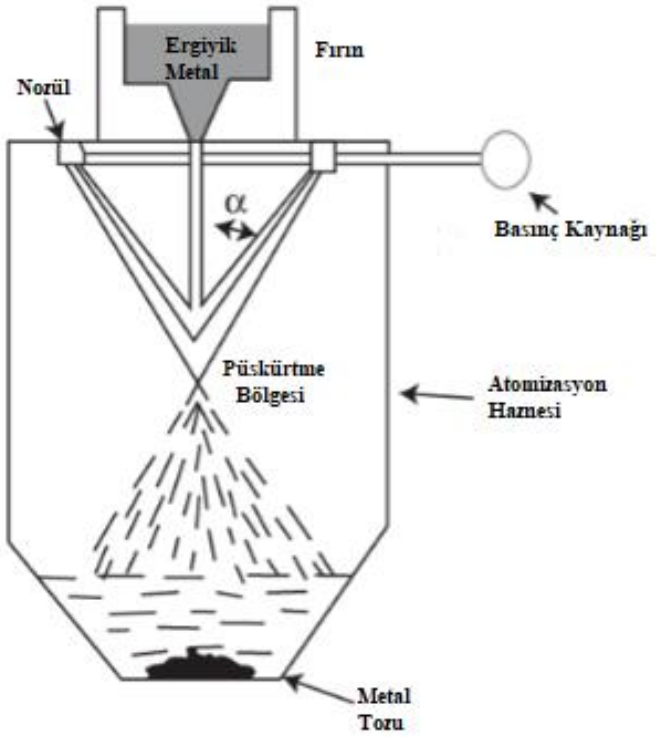
yöntemi gerek yüksek miktardaki üretimler için uygunluğu, gerekse metal veya metal alaşımlarının da tozlarının üretilebildiği için dünya çapında en çok tercih edilen yöntemdir. Atomizasyon yönteminde üretilen tozların özellikleri üzerinde geniş çaplı bir kontrol imkanı sunması da bu yöntemi diğer toz üretim yöntemlerine nazaran öne çıkaran avantajlardan birisidir (Angelo vd., 2022).

Atomizasyon yöntemi ile üretim kendi içerisinde farklı teknikler ve yöntemler barındırmaktadır. Bu atomizasyon yöntemleri aşağıdaki gibidir;

- Gaz Atomizasyonu
- Su Atomizasyonu
- Santrifüj Atomizasyonu
- Plazma Atomizasyonu
- Vakum Atomizasyonu (Dunkley, 2019)

Gaz atomizasyonu yönteminde, atomizasyon işleminde ergiyik metale püskürtülecek gaz olarak Argon veya Azot gazı kullanılmaktadır. Gaz atomizasyon yönteminde üretilecek tozun morfolojik özellikleri üzerinde kontrol sağlayabilmek için birçok değişken kullanılabilmektedir. Yöntemde değiştirilebilir parametreler gaz püskürtme uzaklığı, püskürtme basıncı, nozül geometrisi, metalin ısısı, gazın ve metalin hızı'dır. Yüksek gaz basıncı veya düşük püskürtme uzaklığı ile ince tozlar elde edilebilmektedir. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların yapısı ise genellikle küreseldir (Upadhyaya, 1997).

Su Atomizasyonu tekniğinde ise ergiyik metal akışına yüksek basınçlı su nozül vasıtasıyla püskürtülür ve su damlalarının sıvı metal ile teması ile akış halindeki sıvı metal toz halinde katılaşır. Bu yöntemde gaz atomizasyonundan farklı olarak su kullanıldığı için soğuma çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Büyük çaplı üretimler için su atomizasyonu yöntemi gaz atomizasyonu yöntemine göre daha verimlidir. Buna ek olarak su atomizasyonu yönteminde her bir partikülün bileşimi sabittir, partikül şekli boyutu ve yapısının kontrolü mümkündür, tozların saflığı yüksek, yatırım maliyeti ise diğer yöntemlere kıyasla düşüktür ve birçok metal ve metal alaşımı tozunun üretimi için elverişlidir (Chang vd., 2013; Kuhn, 2012; Upadhyaya, 1997).



Şekil 5. Su Atomizasyonu Yönteminin şematik gösterimi (Aich vd., 2017).

1.5.2. Tozların Karıştırılması

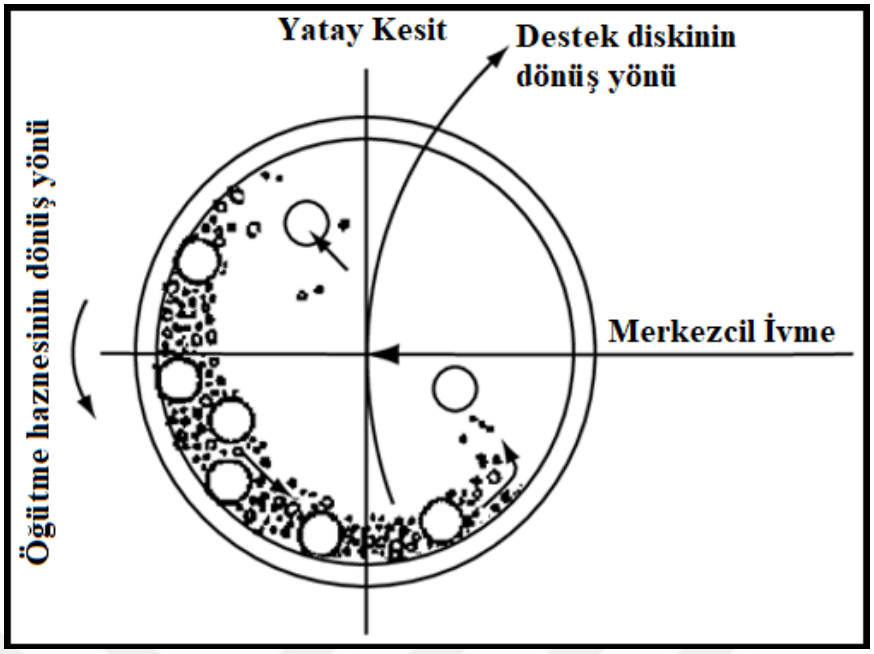
Metal matrisli kompozitlerde, metalik tozlar ile genellikle seramik bazlı bir veya birden fazla takviye partikülü ilave edilerek karıştırılırlar. Karıştırma işlemi genel olarak birden fazla tozun bir yağlayıcı katkısı ile gerçekleştirilmesidir. Bazı durumlarda ise takviye malzemesi de yağlayıcı görevi görebilmektedir. Tozların karıştırılması birçok değişkenin bir arada etkin olduğu bir işlemdir. Bu etkenlerden bazıları şunlardır;

- Karıştırıcı tipi
- Hazne hacmi
- Haznenin iç yüzey alanı
- Tozun karıştırma öncesi ve sonraki hacmi
- Karıştırılan tozların ve tozların bileşenlerinin hacim oranı
- Karıştırıcının hızı

Karıştırma süresi, ortamı ve sıcaklığı(Upadhyaya, 1997)

Karıştırma işlemi matris ve takviye tozlarının ortalama boyutları, birbiri içerisindeki homojen dağılımları, şekil ve boyutları gibi çok önemli parametreler üzerinde büyük etkilere sahiptir. Karıştırma işleminin verimliliğine bağlı olarak Toz Metalurjisi yöntemi ile üretimde preslenerek kompakt hale getirilen ham mamülün porozitesi de değişkenlik göstermektedir. Toz partiküllerinin karıştırılması aşamasında karşılaşılan en genel problem ise tozların aglomerasyonu(topaklanma) ve segregasyonu(ayrışma) olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı hazne içerisindeki biri diğerinden görece daha büyük boyutlu tozun karışım içerisinde tıpkı biri diğerinden daha hafif olan ya da düşük yoğunluğa sahip olan tozun doğası gereği davranacağı gibi karışımın üstüne çıkmasıdır. Farklı karakteristik yapılara sahip olan metal ve takviye tozlarının aynı zamanda farklı akış karakteristikleri de bulunmakta ve bu farklılık segregasyona, karıştırma esnasında tozların yüksek yüzey enerjilerini düşürmek istemeleri sebebiyle birbirlerine tutunmaları da aglomerasyona sebebiyet vermektedir (Liu vd., 1994).

Karıştırma esnasında meydana gelen segregasyon ve aglomerasyon problemlerine yönelik çözüm ise 1960'lı yıllarda geliştirilen Mekanik alaşımlama adı verilen ve kompozit malzemelerin matris ve takviye partiküllerinin hem üniform bir şekilde karıştırılmasında hem de boyut dağılımının homojen bir şekilde elde edilmesinde büyük rol oynamaktadır. Toz metalurjisinde tozların karıştırılmasında genel olarak atritör, turbula mikser ve bilyalı değirmen kullanılmakta, bunlar arasında en çok kullanılan yöntemlerin başında ise haznedeki tozların kullanılan bilyalar arasında ve hazne duvarları ile bilyalar arasında maruz kaldıkları darbe enerjisi ile birlikte yüzeyindeki oksit tabakasının giderilmesi ile matris ve takviye fazı arasında optimum arayüzeyin oluşturulması gibi sonraki işlem basamaklarına olan önemli faydaları dolayısıyla bilyalı değirmende yüksek enerjili öğütme yöntemi gelmektedir (Liao vd., 2011; Sadeghi vd., 2021; Sankhla vd., 2022).



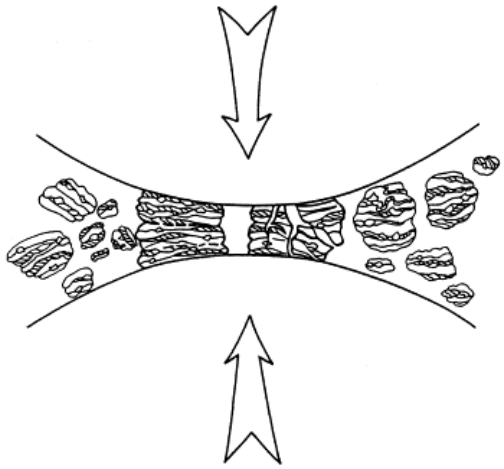
Şekil 6. Bilyalı Değirmenin çalışma mekanizmasının şematik görüntüsü (Baheti vd., 2012).

1.5.3. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama yöntemi, ilk olarak 1966 yılında INCO(International Nickel Company) laboratuvarlarında 1966 yılında gaz türbinlerinde kullanılmak üzere ve diğer ısıl dayanım özellikleri geliştirilmiş malzemelere ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmak için yeni nesil malzemelerin üretimi üzerinde çalışılırken keşfedilen bir yöntemdir. İlk denemeleri dispersiyon ve çökelme sertleşmesi ile üstün özelliklere sahip yeni bir malzeme üretmek için başlamış olan mekanik alaşımlama yöntemi, bu arayış içerisinde geliştirilmiş ve ortaya Inconel MA754 alaşımını çıkarmıştır (Lü vd., 1997). Keşfinden günümüze kadar gelecek vaat eden ve dünya çapında geniş bir yelpazede kullanım alanına yayılmış ve potansiyeli yüksek olan benzersiz bir teknik olan mekanik alaşımlama yöntemi, kompozit malzemeler, nanomalzemeler, intermetalikler vb. sayısız alaşım sistemlerinin karakterizasyonu ve üretiminde kilit rol oynayan bir prosestir (Suryanarayana vd., 2001) (Suryanarayana, 2008).

Öğütme olarak da adlandırılan bu yöntemde, hazne içerisindeki toz karışımı, metal bilyalar ve hazne arasındaki çarpışmalar sonucunda toz partikülleri ortaya çıkan yüksek enerjiye maruz kalmaktadırlar. Bu yüksek enerjili öğütme esnasında toz partikülleri ilk olarak metal bilyalar arasında ezilir, ardından birbirleri ile soğuk kaynaklanmaya uğrarlar ve

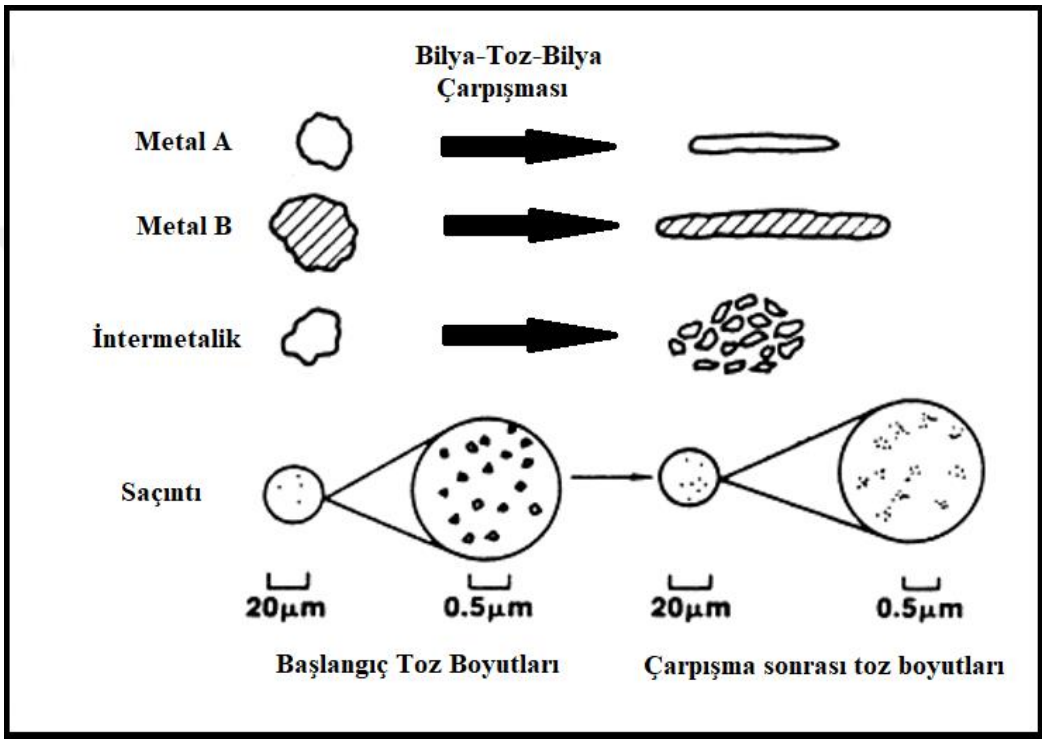
sonrasında deformasyon sertleşmesine uğrayıp gevrekleşen tozlar kırılır ve tekrardan soğuk kaynak oluşumu meydana gelir. Bahse konu ezilme-soğuk kaynak-deformasyon sertleşmesi-kırılma adımları, mekanik alaşımlama işlemi boyunca sürekli olarak tekrarlı bir şekilde devam eder (Karabacak, 2018).



Şekil 8. Mekanik alaşımlama işleminde iki bilya arasındaki tozların deformasyonu (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlama işlemi, tozların belirlenen oran ve miktarlarda hazne içerisine koyulması ve hazneye genellikle çelik veya tungsten karbür bilyaların ilave edilmesi ile başlatılır. İşlem esnasında toz partikülleri bilyaların arasında veya hazne çeperi ile bilya arasında yüksek derecede kuvvete maruz kalarak plastik deformasyona uğrayarak yassılaşırlar. Plastik deformasyona uğrayıp boyutu yassı hale gelen partiküllerde deformasyon sertleşmesine bağlı olarak gerçekleşen sertlik artışı dolayısıyla kırılgan hale gelen partiküller işlemin devamına kırılır. Partiküllerin kırılmasıyla birlikte partiküllerin yeni yüzeyleri ortaya çıkar ve partiküller bu yüzeyler arasında soğuk kaynaklanarak toz boyutunu arttırır. Mekanik alaşımlamanın devam etmesiyle birlikte partiküller sürekli bir döngü halinde yeniden kırılır ve yeniden soğuk kaynaklanırlar. Mekanik alaşımlama işleminin başlatıldığından itibaren geçen ilk zamanlarda partiküllerin kırılma sonrası soğuk kaynaklanarak partikül boyutunu arttırma eğilimi daha yüksektir. Bu yüksek soğuk kaynaklanma eğilimi sayesinde hazne içerisindeki her bir partikül artık diğer partikülü başta belirlenen oranlarda içeren bir yapıya bürünür. Döngü içerisinde partiküllerin deformasyonu devam ettikçe sertleşip kırılan partiküller bir süre sonra soğuk kaynaklanma eğiliminden çıkıp kırılma eğilimine girerler. Bu sayede partikül boyutu bilyaların devamlı tekrar eden etkisiyle partiküllerin içerisinde soğuk kaynaklanma ile oluşan tabakalar arasındaki

boşlukların azaltılarak yeni tabakalar oluşur ve partikül boyutu bir miktar düşer ancak toz boyutunda önemli bir düşüş gerçekleşmez. Öğütme süresinin devam etmesiyle birlikte ise partiküllerin kırılma ve soğuk kaynaklanma eğilimi arasında bir denge durumuna ulaşılır. Bu denge durumunda toz partikülleri kırılmadan ve soğuk kaynaklanmadan küçültülmüş olur. Bu aşamada başlangıçtaki karışım oranına, artık her bir toz partikülü sahip hale gelir. Böylelikle mekanik alaşımlama işlemi de tamamlanmış olur (Suryanarayana, 2001).



Şekil 9. Mekanik alaşımlamada bilya etkisinin gösterimi (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlamada partiküller üzerinde birçok kuvvet ve mekanizma etkili olmakta ve bu sebeple de mekanik alaşımlama işlemi karmaşık bir işlem halini almaktadır. Partiküllerin işlem sonrasındaki kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde birbiriyle ilintili birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler;

- Mekanik alaşımlama yapılan değirmen tipi
- Mekanik alaşımlama haznesi
- Mekanik alaşımlama hızı ve süresi
- Mekanik alaşımlamada kullanılan bilyaların malzemesi ve özellikleri
- Hazne içerisindeki bilya-toz oranı
- Mekanik alaşımlama atmosferi

- Mekanik alaşımlama sıcaklığı
- Mekanik alaşımlama haznesinin doluluk oranı
- Proses kontrol katkıları'dır (Suryanarayana, 2022; Upadhyaya, 1997).

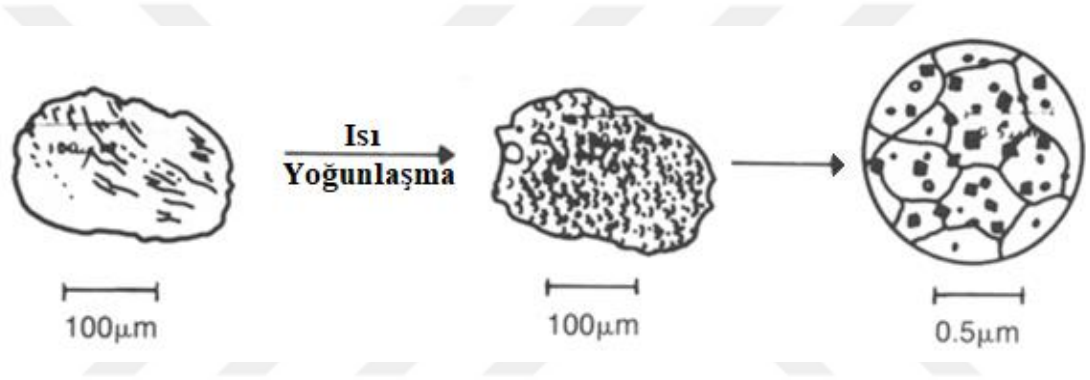
Mekanik alaşımlama işlemi için farklı tipte ve farklı özelliklere sahip değirmenler kullanılabilmektedir. Bu değirmenler Speks tipi değirmenler, atritör tipi değirmenler ve gezegen tipi bilyalı değirmenlerdir. Bu ekipmanlar arasında kapasite ve verim gibi önemli parametrelerde farklılıklar olmakla birlikte Speks tipi değirmenler, tek bir küçük hazneye sahip olan, yaklaşık 1200 rpm öğütme hızlarında çalışan küçük çaplı bir değirmendir. Atritör tipi değirmenler ise Speks tipi değirmenlere göre çok daha büyük çapta üretim yapılabilmesine olanak sağlayan değirmenlerdir. Atritör tipi değirmenlerde tozlar, yaklaşık 200-250 rpm hızlarında bilya-toz, bilya-toz-hazne etkileşimi sayesinde öğütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Gezegen tipi bilyalı değirmenler ise birkaç yüz grama kadar toz üretebilme kapasitesine sahip olan ve öğütme haznesinin takip ettiği yörüngesel hareketinden ismini almış bir değirmen çeşididir. Tozların içinde bulunduğu hazne, işlem esnasında hem kendi ekseni etrafında dönmekte hem de bir merkez noktası etrafında dönüş hareketi yapmaktadır. Bu yörüngesel hareket sayesinde meydana gelen merkezcil ivme sonucunda tozlar bilyalar ve hazne arasında kalarak öğütülürler (Angelo vd., 2022; Lü vd., 1997; Suryanarayana vd., 2001).

Mekanik alaşımlama işlemindeki hazne ve hazne içerisindeki bilyalar da işlem sırasında belirli miktarlarda kuvvet etkisi altında kalmakta ve öğütme işlemi esnasında aşınıp toz partiküllerinin içerisine karışabilmekte ve istenmeyen fazlara ve kimyasal kirliliğe sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeple, mekanik alaşımlamanın gerçekleştirildiği hazne ve bilyalar en uygun malzemeden seçilerek üretilmeli ve işlem esnasında gerekli kuvveti tozlara iletebilecek derecede bir yoğunluğa sahip olmalıdır. Öğütme işlemi sırasında tozların hazne veya bilya malzemesi ile karışarak kirlenmesi dışında öğütme atmosferinin de mekanik alaşımlama işlemindeki etkisi önemlidir. Mekanik alaşımlama vakum altında ya da inert gaz atmosferinde gerçekleştirilmekte ve haznedeki havanın tozlarda oksit ve nitrür gibi partikülleri oluşturmasının önüne geçilmektedir (Moravcik vd., 2020; Suryanarayana, 2001; Suryanarayana vd., 2001).

Bilya-toz oranı ise mekanik alaşımlamada arzu edilen toz boyutuna ulaşmak için gereken süre üzerinde etkisi olan bir parametredir. Bilya toz oranı 1:1 gibi düşük oranlardan 220:1 gibi yüksek oranlarda ayarlanabilmekte olup en genel kullanım oranı 10:1 olacak

şekilde ayarlanmaktadır. Bilya-toz oranı arttıkça öğütmede gereken süre azalmaktadır (Keçeli, 2007).

Mekanik alaşımlama işleminin bir diğer önemli parametresi ise öğütme süresidir. Mekanik alaşımlama esnasında tozlar birkaç dakika ya da saatte morfolojik olarak farklı şekillerde, bileşimlerde ve boyutlarda bulunabilmektedir. Öğütme sistematiğinde zaman, değirmen tipi, bilya-toz oranı, kabın doluluk oranı gibi parametreler ile değişiklik gösterse de genel olarak kırılma ve soğuk kaynak arasındaki denge durumuna ulaşılacak optimum süre olarak seçilmektedir. Bu sebeple aşırı öğütme sürelerinde tozların kirlenmesi sonucu istenmeyen faz ve bileşimlerin önüne geçilmesi için gereken süreden fazla öğütme yapılmamalıdır (Keçeli, 2007; Suryanarayana, 2001).



Şekil 10. Mekanik alaşımlamanın toz partikülleri üzerindeki aşamalı etkileri; başlangıç partikülü, deformasyona uğramış partikül, boyutu düşmüş ve içerisine takviye partikülleri gömülmüş kararlı haldeki partikül (Sundaresan vd., 1987).

Öğütme işlemi esnasında tozların boyutunun küçültülmesinde kırılma ve soğuk kaynak mekanizması devreye girmekte ve mekanik alaşımlama süresi boyunca tozlar kimi zaman kırılmaya, kimi zaman ise soğuk kaynaklanmaya eğilimli hale gelmektedirler. Fakat tozların sürekli olarak soğuk kaynaklanması, mekanik alaşımlama haznesinde, bilyalarda ve özellikle de toz boyutunun düşürülmesinde olumsuz etki yaratacağından, soğuk kaynaklanma eğiliminin ve soğuk kaynaklanma etkisinin azaltılması için mekanik alaşımlama öncesinde veya işlem arasında yağlayıcı veya yüzey katkısı olarak da bilinen işlem kontrol katkısı adı verilen kimyasallar eklenir. İşlem kontrol katkıları öğütme esnasında kırılan partiküllerin kırılma yüzeyleri tarafından absorbe edilerek partiküllerin yüzey gerilimini düşürür ve soğuk kaynaklanmayı engeller (Lü vd., 1997).

1.5.4. Proses Kontrol Ajanları (PCA)

Mekanik alaşımlama işlemini etkileyen faktörlerden biri olan Proses Kontrol Ajanı adı verilen kimyasallar, yüzey aktif ajanlar olarak kırılan tozların yüzeyleri tarafından adsorbe edilerek soğuk kaynaklanmayı ve dolayısıyla da aglomerasyonu engelleyen genellikle organik bileşiklerdir. Mekanik alaşımlama işleminde proses kontrol ajanları deformasyon sertleşmesi sonucu kırılan partiküllerin kırılma yüzeyleri ve yüzeydeki çatlak oluşumları tarafından adsorblanır, böylece kırılma yüzeyi ve çatlak oluşumu bölgelerindeki atomlar arası bağı zayıflatarak çatlakların yayılmasını kolaylaştırarak soğuk kaynaklanmanın engellenmesini sağlar. Rehbinder etkisi olarak adını 1928 yılında keşfi yapan bilim insanı P. Rehbinder'de alan bu etki, katı halde atomlar arası bağın zayıflatılıp kopmasını ve dış atomlar veya moleküller ile yeniden oluşturulmasına yardımcı olan bir etkidir. Mekanik alaşımlamada Rehbinder etkisi yüzey aktif madde olarak davranış sergileyen PCA'ların kırılan toz partikülünün kırılma yüzeyi ve çatlak ağzı olarak da bilinen çatlak başlangıçları tarafından adsorblanarak buradaki atomların veya moleküllerin arasındaki bağı zayıflatır, atomlar arasında zayıflayan bağların koparılması ile çatlak oluşumuna ve yüzey geriliminin düşürülmesine olanak sağlayarak soğuk kaynaklanmayı engeller. Kopan atomlar arası veya moleküller arası bağın, farklı atom ya da moleküllerle yani mekanik alaşımlama haznesindeki takviye partiküllerinin atom ve molekülleri ile yeniden bağ oluşturmasını sağlayarak mekanik alaşımlama işleminin efektif bir şekilde gerçekleşmesinde önemli bir rol oynar (Neikov vd., 2019; Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlama işleminde fiziksel olarak boyut küçültme işleminde PCA'ların bu rolü, mekanik alaşımlama sonucu istenen boyutlara daha kısa sürede ulaşılmasına olanak sağlar. Mekanik alaşımlamada boyutun küçültülmesi için gerekli enerji miktarının hesaplaması aşağıdaki hesaplanabilmektedir:

$$E = \gamma . \Delta S \quad (1)$$

Burada γ, spesifik yüzey enerjisi, ΔS ise yüzey alanındaki değişimdir. Buna göre PCA ilavesi ile yüzey enerjisi düşürüldüğünde partikül boyutunun istenen seviyelere getirilmesi için gereken enerji miktarı azalmakta ve dolayısıyla da daha kısa bir zaman diliminde mekanik alaşımlama işlemi tamamlanabilmektedir (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlamada PCA kullanımı katı, sıvı veya gaz haldeki maddelerin kullanımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Çoğunluğu organik bileşikler olmakla birlikte

sıklıkla Metanol, Etanol, Stearik asit, Çinko Sterat kullanılmaktadır(Suryanarayana, 2001) fakat bunların dışında Alüminyum Oksit, Grafit, Toluen gibi PCA'lar ağırlıkça %0,3 ila %4 arasındaki oranlarda mekanik alaşımlama işlemlerinde kullanılmakta ve düşük kaynama ve ergime noktalarına sahip olmaları sebebiyle karışım içerisinde mekanik alaşımlama işlemi esnasında artan sıcaklık nedeniyle buharlaşır ve ayrışıp partiküller ile etkileşime girerek etki göstermektedirler (Neikov vd., 2019; Soni, 2000). Mekanik alaşımlamada kullanılan PCA'lara ait tipik özellikler tablo 1.2.'de verilmiştir.

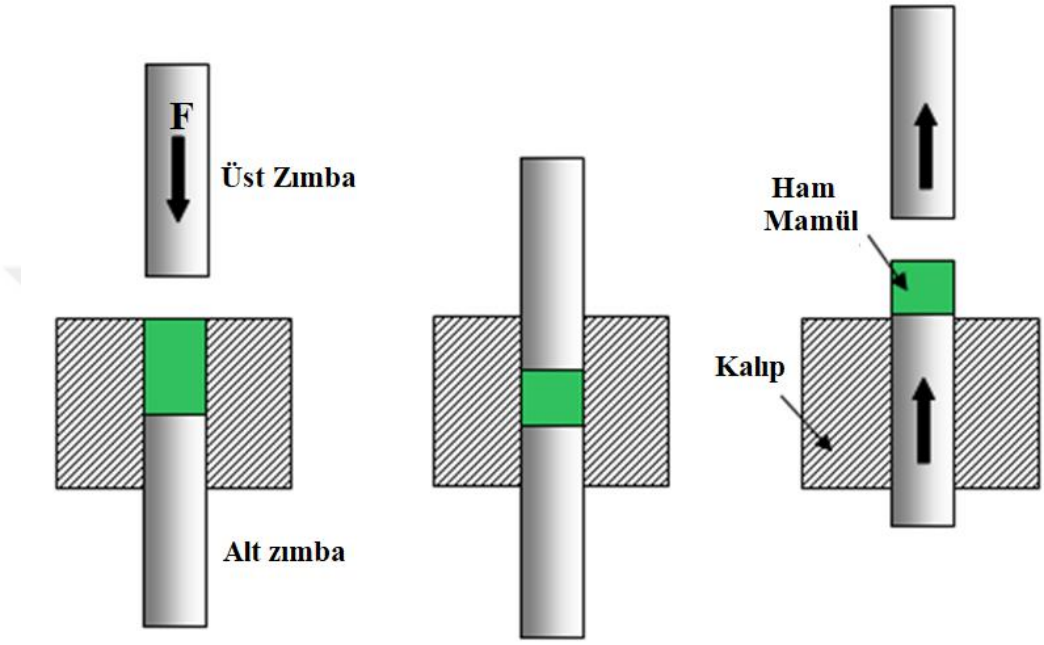
Tablo 2.Mekanik alaşımlamada en sık kullanılan Proses Kontrol Ajanlarına ait tipik özellikler (Lü vd., 1997).

İsim	Kimyasal Formül	Erime Noktası	Kaynama Noktası
Metil Alkol	CH_3OH	-98 ℃	64,6 ℃
Etil Alkol	C_2H_5OH	-130 ℃	78 ℃
Stearik Asit	$CH_3(CH_2)_{16}CO_2H$	67-69 ℃	183-184℃
Çinko Stearat	$Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	128-130 ℃	240 ℃
Polietilen Glikol	$H(OCH_2CH_2)_nOH$	59 ℃	205 ℃
Heksan	C_6H_{12}	-95 ℃	68-69 ℃
Dodekan	$CH_3(CH_2)_{10}CH_3$	-12℃	216,2℃

1.5.5. Tozların Preslenmesi

Toz metalurjik süreçlerin içerisinde, sinterleme öncesi toz partiküllerinden ham mamülün üretimi için uygun basınç altında belirli bir şekle sokulması için ve yeterli yoğunluğa ulaşabilmesi için oda sıcaklığında bir ön presleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Oda sıcaklığında yapıldığından dolayı soğuk presleme adı verilen bu işlemin maksadı, uygun yöntem ile üretilerek birbiri içerisinde üniform dağılıma ve homojen karıştırılmış tozların arasındaki boşluğun ortadan kaldırılarak poroziteyi en aza indirerek elde edilen yapının bir arada kalabileceği şekilde mukavemet kazandırmaktır (Liu vd., 1994). Soğuk presleme sonrası elde edilen henüz sinterlenmemiş ham mamülün (Green Compact) mukavemeti ise, preslenen tozların yüzeyinde oksit tabakasının ortadan kaldırılması, toz boyutlarının küçülmesi sonucu yüzey alanlarının arttırılması gibi mekanik alaşımlama yönteminin sağladığı faydalar ile arttırılabilmekte ve malzemenin sinterlemeden sonraki mukavemetini pekiştirmektedir (Upadhyaya, 1997).

Presleme işlemi soğuk uygulandığı gibi aynı zamanda sıcak da uygulanabilmektedir. Soğuk presleme işlemi ham mukavemet kazandırmanın dışında basit makine parçalarının ve yatak malzemelerinin imalatında da kullanılmakta, sıcak presleme işlemi ise sert metal alaşımlarının, seramik bazlı malzemelerin üretilmesi ve şekillendirilmesi gibi zorlu işlemlerde kullanılmaktadır (Karabacak, 2018).

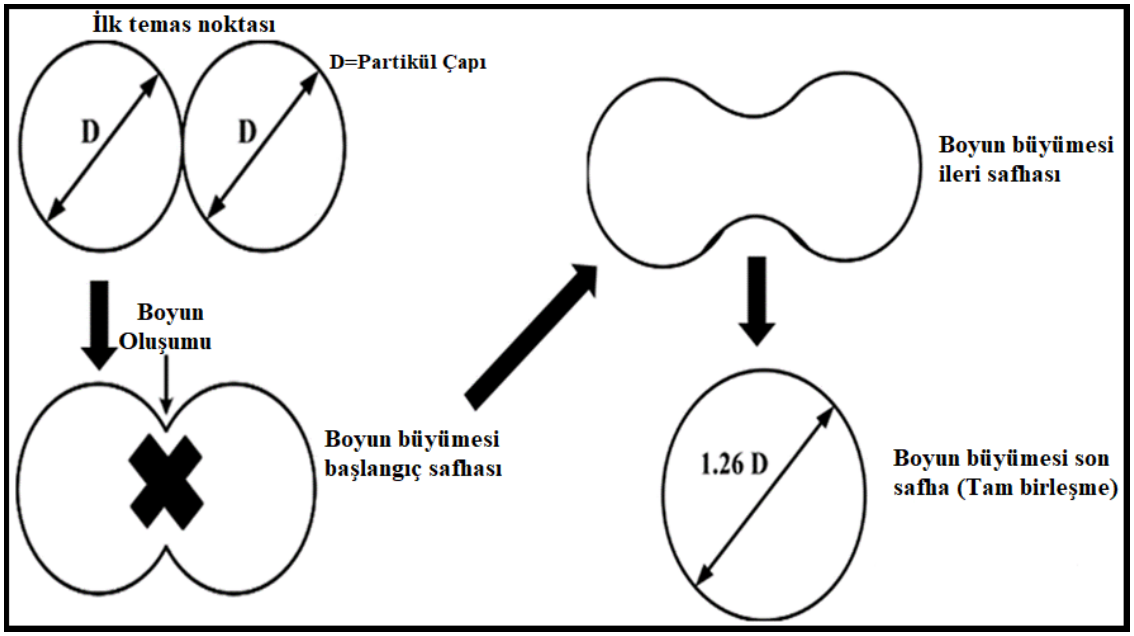


Şekil 10. Tozların preslenmesi işleminin şematik görüntüsü (Bataineh vd., 2021).

1.5.6. Sinterleme

Toz metalurjisi yöntemi ile üretimi yapılan, metal ve seramik partiküllerinden meydana gelen tüm malzemeler yoğunluk, mukavemet, sertlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin mükemmelleştirilmesi için yüksek sıcaklıklarda sinterlenir. Sinterleme işlemi, preslenerek elde edilen ham mamülün belirli bir sıcaklık ve kontrollü bir atmosfer altında belirli bir süre boyunca tutulması sonucu yoğunlaşması ve gerekli mukavemete erişmesi için uygulanan katı hal sinterleme ve sıvı hal sinterleme olarak iki şekilde sınıflandırılan ve birçok farklı teknikle uygulanabilen bir ısıl işlemdir. Sinterleme işlemindeki sıcaklık, kullanılan metalin ergime sıcaklığının yaklaşık %70'i civarındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir, bu sıcaklıkta toz partikülleri arasındaki gözenekler azalarak temas noktaları artış gösterir ve atom arasında difüzyon mekanizması yoluyla fiziksel bir bağ oluşumu gerçekleşerek malzeme bünyesinde yapısal bir bütünlük sağlanır. Sinterleme işleminde sıcaklık, ısıtma oranı, sinterleme süresi ve atmosferi ve soğuma süresi gibi parametreler

gerekli şekillerde düzenlenerek sinterlemeden en yüksek verim alınabilmektedir (Akhtar vd., 2018; Angelo vd., 2022; Chang vd., 2013; German vd., 2009; Narasimhan, 2001). Bunlara ek olarak sinterlenen ham mamülün yapısındaki tozun kimyasal kompozisyonu, tozların şekil ve boyutları sinterleme sonrası elde edilen malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Toz boyutlarının ince olması, sinterleme süresinin ve sıcaklığın optimum değerlerde olması, sinterleme sonrası yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmasını sağlamaktadır (Rahimian vd., 2009). Aşağıda verilen şekilde, sinterleme mekanizmasının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 11. Sinterleme mekanizmasının şematik görüntüsü (Nandy vd., 2019).

1.6. Literatür Taraması

Metal matrisli kompozitlerin, geleneksel alaşımlara nazaran gelişmiş mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde günümüzde havacılık ve uzay, savunma sanayii ve otomotiv gibi küresel anlamda büyük öneme sahip endüstrilerde geniş çaplı kullanım alanları bulunmaktadır. İlk yatırım maliyeti gibi faktörler açısından yüksek maliyetli olduğu bir gerçek olan MMK'ların, üretim yöntemlerinin karmaşık olmaması sayesinde üretimin kolaylıkla yapılabilmesi, üretim hacminin çok yüksek olması dolayısıyla parça başına maliyetin düşük tutulabilmesi gibi avantajları sebebiyle de bu alanda yeni ve üstün özelliklere sahip malzeme arayışına en mantıklı hale gelen malzemelerdir (Arpaci, 2019; Balasubramanian, 2013).

Kompozit malzemeler içerisinde de hem hafifliği hem de gelişmiş mekanik özellikleri sayesinde Alüminyum matrisli kompozitler önemli bir yere sahiptirler. Üretim sürecinde ise takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen bir dağılım göstermesi ve matris içerisine gömülmesi gerekmekte ve bunu sağlamak için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan mekanik alaşımlama yöntemi, verimliliği ve düşük maliyeti sayesinde bu alanda öne çıkan bir tekniktir. Takviye ve matris tozlarının deformasyona uğrayıp kırılarak soğuk kaynaklanması döngüsüyle hem homojen dağılımını sağlayıp takviye partiküllerinin matris içerisine gömülmesini sağlayarak hem de boyutun küçültülmesini sağlayarak üretilen kompozit malzemesinin mukavemetinin arttırılmasına katkı sağlar. Mekanik alaşımlama işleminde meydana gelen soğuk kaynaklanma ve kırılma mekanizmaları arasındaki bu denge ise dışarıdan sisteme ilave edilen Proses Kontrol katkısı(PCA) adı verilen katkılarla sağlanmaktadır (Neikov vd., 2019). Bu PCA'ların içerisinde en yaygın kullanılanları ise Metanol, Etanol, Çinko Stearat ve Stearik Asit olarak karşımıza çıkmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Anas ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen 2000 serisi Alüminyum alaşımının mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki farklı PCA'ların etkisini incelemiştir. PCA olarak metanol, stearik asit ve etilen glikol kullanarak 700 rpm hızda 4 saat boyunca 15:1 bilya toz oranında öğütme yapılarak elde edilen alaşım tozları, vakum altında 500 °C sıcaklık altında 2 saat boyunca tavlanmış ve sıkıştırılarak sıcak ekstrüzyon yöntemiyle çubuk şekilde üretilip 150 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmıştır. Mekanik alaşımlama işlemi süreci boyunca 3 farklı PCA kullanılarak öğütülen tozların tümünde boyut düşüşü gözlenmiş, mekanik alaşımlamanın 3. Saatinde ise partikül boyutlarının hemen hemen aynı boyut aralıklarında kararlı hale geldiği görülmüştür. Üretilen alaşım tozlarından elde edilen bulk malzemedeki yaşlandırma işlemi sonucunda ise Metanol katkısı ile üretilen alaşımın çökelen fazının Etilen glikol ve stearik asit kullanılarak üretilen alaşımlardaki çökelen fazdan daha ince yapılı olduğu ancak yoğunluğun daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna ek olarak Stearik asit ve etilen glikol kullanılarak üretilen alaşımların bulk malzemelerinde mikro çatlakların oluşumu gözlenirken metanol kullanılarak öğütülen alaşımda herhangi bir hata ve süreksizliğe rastlanılmamış, çekme dayanımı testlerinde ise en iyi performansı göstermiştir (Anas vd., 2019).

Gültekin ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışmada ise AA2024-Cu kompozitlerinin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretiminde PCA olarak ağırlıkça %2

oranında metanol ve stearik asit kullanılmış ve bu PCA'ların kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mekanik alaşımlama süresi olarak 2,4,6 ve 8 saat olarak seçilmiş, bulk malzemeler ise 560°C sıcaklıkta 500 MPa sıcak presleme ile üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk, porozite, çekme dayanımı, sertlik ve mikroyapı özellikleri ile kompozit tozlarının toz boyutu, toz sertlikleri ve morfolojileri incelenmiştir. Metanol kullanılarak öğütülen tozların 2. saatten 8. saate gelindiğinde boyutunun 94µm'dan 21µm'a düştüğünü, stearik kullanılarak üretilen tozların boyutunun ise 2. saatten 8. saate gelindiğinde ise 96 µm değerinden 106 µm değerine çıktığı görülmüştür. Toz sertliklerinde ise her iki farklı PCA kullanılan tozun da sertliklerinin mekanik alaşımlama ile birlikte artış gösterdiği ancak metanol kullanılarak öğütülen tozların ve bu tozlardan üretilen kompozitlerin sertliğinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Stearik asit ile öğütülen tozlarla üretilen kompozitlere ait porozite değerlerinin ise en yüksek porozite değeri olan %4.1 civarında olduğu ve metanol ile 8 saat öğütülen tozlardan elde edilen kompozitlerden daha yüksek olduğu, çekme dayanımı değerlerinin ise artan öğütme süresi ile birlikte artış gösterdiği, en yüksek çekme dayanımı değeri olan 295,7 MPa değerinin ise metanol katkısı ile 8 saatlik öğütme sonucu elde edilen tozlardan üretilen kompozit malzemelere ait olduğu belirtilmiştir (Gültekin vd., 2023).

Rahimian ve arkadaşlarının (2009) yaptığı çalışmada ise Al-Al_2O_3 kompozitlerin toz metalurjisi ile üretiminde mekanik alaşımlama yöntemine başvurulmuş ve üretilen kompozitin partikül boyutu, sinterleme sıcaklığı ve zamanının Al-Al_2O_3 kompozit malzemesinin özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mekanik alaşımlama yönteminde PCA olarak etanol kullanılan çalışmanın sonucunda, toz boyutu düşen kompozit numunesinin 600°C sıcaklıkta sinterlenmesiyle %99.95 oranında göreceli yoğunluğa ulaştığı, artan sinterleme süresiyle birlikte tane büyümesinin ortaya çıktığını ve 3 µm ortalama partikül boyutuna sahip kompozit tozlarının 45 dk. sinterlenmesi ile elde edilen kompozit numunesinde en yüksek sertlik olarak 76 HB sertlik değeri ölçülmüştür. Kompozit tozlarındaki boyut düşüşünün kompozit malzemedeki basma dayanımı ve uzama üzerinde olumlu etkileri olduğu ve 3 µm ortalama partikül değerine sahip kompozit tozlarının 600 °C sıcaklıkta 45 dk. sinterlenmesi ile elde edilen kompozit numunesine ait basma dayanımı değerinin 318 MPa olduğu en yine bu numunede %61.8 ile en yüksek uzama değeri ölçülmüştür (Rahimian vd., 2009).

Hao ve arkadaşları (2014), AA2024 metal matris içerisine ağırlıkça %1 oranında Karbon Nanotüplerin takviye edilerek metal matrisli kompozit malzeme üretiminde mekanik alaşımlamanın süresi ve hızı üzerinde çalışmışlardır. Mekanik alaşımlamada PCA olarak metanol ve çinko Stearat kullanılan çalışmada mekanik alaşımlama işlemi 1, 5, 10 ve 15 saatlik sürelerde 10:1 bilya toz oranıyla 150, 200, 250, 300 ve 350 rpm hızlarda gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %1 Karbon Nanotüp katkılı AA2024 matrisli kompozit tozlarının dağılımı, toz boyutu ve morfolojisi üzerinde öğütme süresinin, hızın ve PCA etkisi incelemeleri yapılmıştır. Buna göre kompozit tozlarının dağılımı, toz boyutu ve morfolojisi üzerinde en iyi sonucu homojen bir dağılım gösteren ve ağırlıkça %1 oranındaki Karbon nanotüplerin matris içerisine en efektif şekilde gömüldüğünü gösteren tozların 350 rpm hızda 10 saatlik öğütme ile elde edilen tozlar olduğu belirtilmiştir(Hao vd., 2014).

Gökçe ve Öveçoğlu (2023) Al-%20Si matris tozları içerisine farklı oranlarda TiB_2 takviye ederek ve 1, 2, 4 ve 8 saatlik farklı mekanik alaşımlama sürelerinde 7:1 bilya toz oranı kullanarak öğütme işlemi gerçekleştirerek toz metalurjisi yöntemiyle ürettikleri kompozit malzemeler üzerinde TiB_2 katkısı ile mekanik alaşımlama sürelerinin mikroyapısal, mekanik ve fiziksel özellikleri arasındaki bağlantıyı araştırmıştır. Kompozit tozlarının üretiminde PCA olarak çinko stearat kullanılmış ve artan öğütme süresiyle birlikte Silisyumun Alüminyum içerisindeki çözünürlüğünün arttığı ve 8 saatlik öğütme sütresinde maksimuma ulaştığı, yapıdaki Al9Si intermetalik fazının dağılımının daha homojen hale geldiği rapor edilmiştir. Çinko stearat ilavesi ile öğütülen tozların sertlik değerlerinin mekanik alaşımlama süresindeki artışla birlikte arttığını ve en yüksek toz sertliği değerinin 297 HV, kompozit numunelerde ise en yüksek sertliğin 362,1 HV olarak 8 saatlik maksimum öğütme süresinde elde edildiği aktarılmıştır (Gökçe vd., 2023).

Literatür incelemesinde de görülebileceği üzere, çok geniş alandaki kompozit malzeme ve alaşım üretiminde kullanılan Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat gibi çeşitli PCA'ların toz partikülleri ve toz partiküllerinden elde edilen numuneler üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Genel olarak Al içerisine Cu, TiB_2, Al_2O_3 gibi metal ve seramik takviye partikülleri katılarak kompozit malzemelerin özellikleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir ancak genel anlamda iki farklı PCA dışında üçüncü ve dördüncü PCA kullanımına dair ve bu PCA'lar ile öğütülerek üretilen kompozit malzemelerin özelliklerine dair karşılaştırmaların yapıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sebeplerden dolayı çalışmanın özgün değeri ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında AA2024 matris içerisine

B_4C seramik takviye partikülleri farklı oranlarda takviye edilerek, üç farklı mekanik alaşımlama süresinde ve 4 farklı PCA katkısıyla üretilerek, elde edilen kompozit tozları ve bu tozlardan üretilen kompozitler üzerinde mekanik, fiziksel özellikler ve mikroyapı özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmış, en iyi özelliklere sahip olan toz ve numunelere ait PCA ve öğütme parametreleri kullanılarak ağırlıkça farklı oranlarda B_4C takviyeli AA2024 takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Matris ve Takviye Malzemesi

Yapılan çalışmalarda matris malzemesi olarak düzensiz başlangıç şekillerine sahip, ortalama toz boyut değeri 220 µm olan AA2024 (yoğunluğu 2,72 gm/cm^3) alaşımı tozları (Gündoğdu Exotherm Company) kullanılmıştır. Takviye partikülü olarak ise ortalama toz boyut değeri 63 µm B_4C (yoğunluğu 2,52 g/cm^3) seramik partikülleri (Alfa Aesar). Tablo 3'te matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 alaşımına ait kimyasal bileşim analizi verilmiştir.

Tablo 3. AA2024 başlangıç tozlarının kimyasal bileşimi (Karabacak, 2018).

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
4,85	1,78	0,312	0,374	0,385	0,138	0,042	0,005	92,114

Öncelikle, matris malzemesi olarak kullanılacak olan AA2024 alaşımı tozlarına eleme işlemi yapılarak d50 değeri 220 µm ortalama partikül boyutuna sahip başlangıç tozları elde edilmiştir. Kompozit malzemenin takviye partikülü olan 63 µm ortalama partikül boyut değerine sahip B_4C partikülleri ise kullanıma hazır olarak tedarik edilmiştir. Matris ve takviye malzemesi olarak kullanılacak olan tozlara ait başlangıç morfolojileri Zeiss Evo SEM cihazında incelenmiştir.

Şekil 7. Elek Ünitesi

2.2. AA2024-B_4C Kompozit Malzemelerinin Tasarlanması

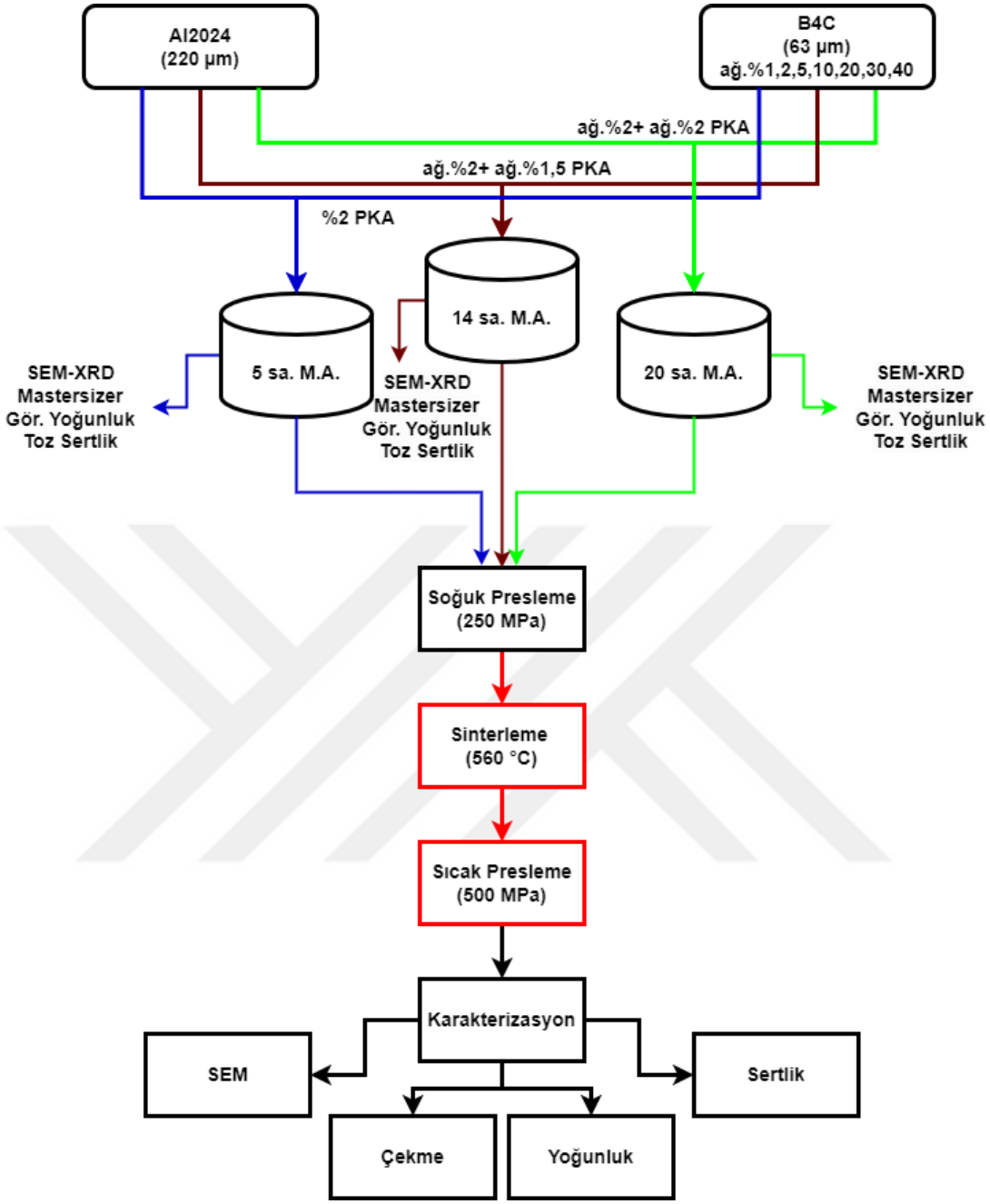
Çalışmada üretilen tüm kompozitlerin bileşimleri, takviye malzemesinin ağırlık yüzdesi ve kompozit malzemelerin isim kodlamaları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 4. Üretilen kompozit numunelerine ait bileşimler, parametreler ve kodlamalar.

	Numune Kodu	**PCA Türü**	**PCA Ekleme Şekli ve Miktarı (ağ.%)**	**M.A. Süresi**
1.Grup	5CS-1B	Çinko Stearat	M.A. başlangıcında ağ. %2 7.5 sa. toplam, 5 sa. net öğütme	7,5 sa. toplam 5 sa. net öğütme
	5SA-1B	Stearik Asit		
	5E-1B	Etanol		
	5M-1B	Metanol		
2. Grup	14CS-1B	Çinko Stearat	M.A. başlangıcında ağ. %2 ve 2, 4, ve 10. saatlerde ağ.%0,5 toplam ağ.%3,5	21 sa. toplam 14 sa. net öğütme
	14SA-1B	Stearik Asit		
	14E-1B	Etanol		
	14M-1B	Metanol		
3.Grup	20CS-1B	Çinko Stearat	M.A. başlangıcında ağ. %2 ve 4,8,12,16. saatlerde ağ.%0,5 toplam ağ.%4	30 sa. toplam, 20 sa. net öğütme
	20SA-1B	Stearik Asit		
	20E-1B	Etanol		
	20M-1B	Metanol		
	20M-2B			
	20M-5B			
	20M-10B			
	20M-20B			
	20M-30B			
	20M-40B			

Çalışmada öncelikle B_4C takviyeli AA2024 kompozitlerin toz kompozisyonları ve malzeme tasarımları planlanmıştır. B_4C takviyeli AA2024 matrisli kompozit malzemeler, öncelikle ağırlıkça % 1 B_4C içerecek şekilde mekanik alaşımlama haznesine beslenecek ve mekanik alaşımlama için Metanol (Merck, Almanya), Etanol (Merck, Almanya), Çinko Stearat (Alfa Aesar, ABD) ve Stearik Asit (Merck, Almanya) olacak şekilde toplamda 4 farklı Proses Kontrol Ajanı içerek şekilde 2 farklı rejimde öğütülmüştür.

İlk mekanik alaşımlama programı, mekanik alaşımlamanın başında hazne içerisine ağırlıkça %2 oranında 4 farklı PCA ilavesi yapılarak ayrı ayrı 4 kez 5 saat öğütülecek şekilde, ikinci mekanik alaşımlama programında ise mekanik alaşımlamanın başında hazne içerisine ağırlıkça %2 oranında, daha sonrasında ise mekanik alaşımlamanın 2., 4., ve 10. Saatlerinde toplam ağırlıkça %3,5 PCA katkısı olacak şekildeve üçüncü mekanik alaşımlama programında ise mekanik alaşımlamanın başında hazne içerisine ağırlıkça %2 oranında, daha sonrasında ise mekanik alaşımlamanın 4., 8., 12. ve 16. Saatlerinde toplam ağırlıkça %4 PCA katkısı olacak şekilde belirlenmiştir. Her iki mekanik alaşımlama programın sonunda kendi aralarında elde edilen kompozit tozlarından üretilen numuneler ve incelenen toz morfolojileri arasında en iyi sonucu veren kompozit tozunun mekanik alaşımlama işlemindeki PCA katkısı ile yüzde olarak 1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C takviyesi içerecek şekilde toplamda 21 adet kompozit malzeme üretilmiş ve kompozit malzemelerin arasında en iyi çekme mukavemeti, en iyi sertlik, en iyi yoğunluk ve gözeneklilik değerleri, kompozitlerin üretildiği tozların ise öğütme sırasında belirli zaman aralıklarıyla ve en sonda alınan toz numuneleri üzerinden SEM, XRD, partikül boyutu, dağılımı ve takviye fazının matris içerisindeki dağılımı ve genel görünüm incelemeleri yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 8. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi.

2.3. Mekanik Alaşımlama

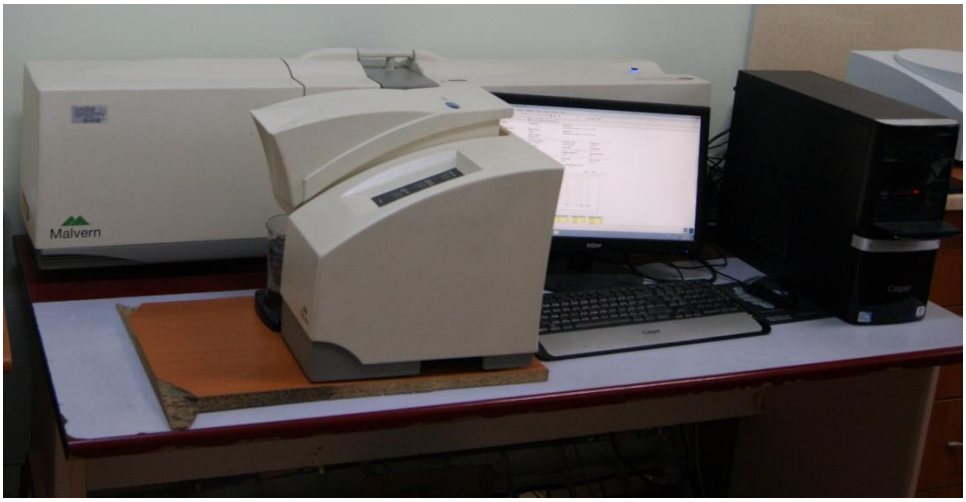
Bu çalışmada kompozit numunelerin üretiminde kullanılacak olan tozların mekanik alaşımlama işlemi, Retsch marka PM100 model gezegen tipi bilyalı öğütücüde, öğütme hızı olarak 400 dev/dak. Hızında, ilk mekanik alaşımlama rejimi için 7,5 saatlik, ikinci mekanik alaşımlama rejimi için 21 saatlik ve üçüncü mekanik alaşımlama rejimi için ise 30 saatlik öğütme süresinde gerçekleştirilmiştir. Öğütme işleminde tungsten karbür bilyalar vasıtasıyla

gerçekleştirilmiş, hazneye beslenen tozun miktarı 60 gr. olarak belirlenirken bilya:toz oranı olarak 5:1 oran belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama işlemi ile B_4C takviye partiküllerinin AA2024 matris fazı içerisinde homojen dağılım göstermesi ve matris fazı içerisine gömülmesi amaçlanmıştır.

Şekil 9. Öğütmenin yapıldığı Retsch PM100 gezegen tipi bilyalı değirmen

2.4. Partikül Boyut ve Dağılımı

Başlangıç tozları ile mekanik alaşımlama işlemi uygulanmış kompozit tozlarının ve mekanik alaşımlama işlemleri sırasında 4 farklı PCA katkısı ile üretilen kompozit tozlarından belirli aralıklarla alınan toz numunelerine ait partikül boyut dağılımları Malvern marka Mastersizer 2000 model partikül boyut dağılımı ölçüm cihazında saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. Malvern Mastersizer 2000 partikül boyut dağılım ölçüm cihazı.

2.5. Toz Sertliği

Öğütülen AA2024-B_4C kompozit tozlarının toz sertliği incelemeleri için belirli miktardaki kompozit tozu, Bulumount Sıcak Bakalit cihazı ile bakalite alınmış ve ardından zımparalanarak yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. Tozların sertlik ölçümü için Innovatest marka 422D model mikro-vickers sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için yük olarak 5 gr. yük uygulanarak 10 saniye batma süresinde sertlik değerleri uygulanmış, numunelerden 5'er kez ölçüm alınmış, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılıp kalan 3 sertlik değerinin ortalaması alınarak sertlik değerleri tespit edilmiştir.

Şekil 11. Mikro Vickers sertlik cihazı.

2.6. Tozların Görünür Yoğunluklarının Hesaplanması

AA2024-B_4C tozlarının görünür yoğunluk hesaplaması için sıkıştırılmamış haldeki belirli miktardaki tozlar, hacmi bilinen bir kap içerisine konik bir huni yardımı ile boşaltılır ve kabı dolduran tozların kap üzerinde birikerek oluşturduğu tepecik, manyetik olmayan bir spatül yardımıyla sıyırılarak, kabın silme dolu duruma gelmesi sağlanır ve kap içerisindeki tozlar dikkatlice tartılır. Tartılan tozların ağırlığı, kabın hacmine bölünerek görünür yoğunluk değeri(g/cm^3) hesaplanır.

2.7. Presleme

Mekanik alaşımlama sonrası elde edilen kompozit tozları, kalıp içerisine alındıktan sonra ilk olarak soğuk şekilde 250 MPa basınç altında ön presleme tabi tutulmuş, ardından yoğunlaşmanın tam anlamıyla gerçekleştirilmesi maksadıyla 560 C'de 500 MPa basınç altında sıcak preslenerek kompozit farklı oranlarda B_4C içeren AA2024 matrisli kompozit malzemeler elde edilmiştir.

(a) (b)

Şekil 12. Sıcak Pres cihazı (a), sıcak pres cihazının fırını (b).

2.8. Metalografik İşlemler

Üretilen AA2024-B_4C kompozitlerinin içyapı incelemeleri için ilk olarak hassas kesim cihazında kompozit numunelerin hassas bir şekilde kesimi gerçekleştirilmiştir. Kesilmiş parçalar bakalite alınarak sırasıyla 400-600-800-1000-1200-1500 ve 2000 numara zımpara kağıtları kullanılarak otomatik zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak

zımparalanmıştır. Daha sonra elmas içeren parlatma çözeltisi ile kaba parlatma ve alümina içeren parlatma çözeltisi ile ince parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

(a) (b) (c)

Şekil 13. Kesme cihazı (a), Bakalit cihazı (b), Otomatik Zımparalama-Parlatma Cihazı.

2.9. SEM-EDS Analizleri

AA2024-B_4C kompozitlerine ait numunelere ve mekanik alaşımlama işlemi esnasında belirli saatlerde alınan toz numunelerine ait morfolojik incelemeler ZEISS-Evo marka LS10 model taramalı elektron mikroskobu(SEM) kullanılarak, matris partiküllerinin ve takviye partiküllerinin morfolojisi, takviye partiküllerinin matris içerisindeki dağılımına ait analizler ve kompozit malzemelerin çekme numunelerine ait kırılma yüzeylerinin incelemeleri gerçekleştirilmiş, EDAX EDS haritalama analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 14. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

2.10. XRD Analizleri

AA2024-B_4C kompozit tozlarına ait numunelerin X ışını analizleri, PANalytical marka X'Pert3 Pro model XRD cihazında 1,54 Å dalga boyuna sahip Cu-Kα X ışını kaynağı kullanılarak 45 kV voltaj ve 30 mA akım ile 10-90° açılarında dakikada 1 derece hızda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 15. X Işınları Kırınımı Analiz cihazı (XRD)

2.11. Yoğunluk ve Gözeneklilik Tespiti

AA2024-B_4C kompozitlerinin yoğunlukları teorik olarak karışımlar kuralına göre hesaplanmış, ampirik yoğunlukları ise hem geometrik şekilleri baz alınarak matematiksel olarak, hem de piknometre ile ölçülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen deneysel veriler, teorik olarak hesaplanan verilere bölünerek bağıl yoğunluk değerleri bulunmuştur.

$$\delta t = [(\%W)1 * \delta 1] + [(\%W)2 * \delta 2] + \ldots + [(\%W)n * \delta n] \quad (2.1)$$

Burada; δt: Kompozitin teorik yoğunluğu (%W)n: Her bir takviyenin karışım içindeki ağırlıkça yüzdesi δn: Her bir takviyeye ait yoğunluktur.

Bağıl yoğunluk = [(δt – δd) / δt]x100

Burada; δd: deneysel yoğunluktur.

%Gözenek = (1 - $Deneysel\ Yoğunluk/Teorik\ Yoğunluk$) x 100

formülü kullanılarak tespit edilmiştir.

2.12. Çekme Mukavemeti Testi

AA2024-B_4C kompozit malzemelerine ait çekme dayanımı testleri MTS 45 model üniversal çekme cihazında, çekme hızı 0.3 mm/sn olacak şekilde ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için üçer defa çekme deneyi yapılmış, elde edilen 3 değerin ortalaması sonuç olarak alınmıştır.

Şekil 16. MTS 45 model üniversal çekme cihazı.

2.13. Sertlik Testleri

Üretilen kompozit malzemeler için sertlik değeri ölçümleri Innovatest marka Nemesis 9000 model sertlik ölçüm cihazında Brinell sertliği cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümünde 2,5 mm çaplı batıcı uç, 31,25 kgf yük 10 saniye boyunca uygulanarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri her bir numune için ayrı ayrı 5 defa gerçekleştirilmiş olup, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılarak kalan üç değerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

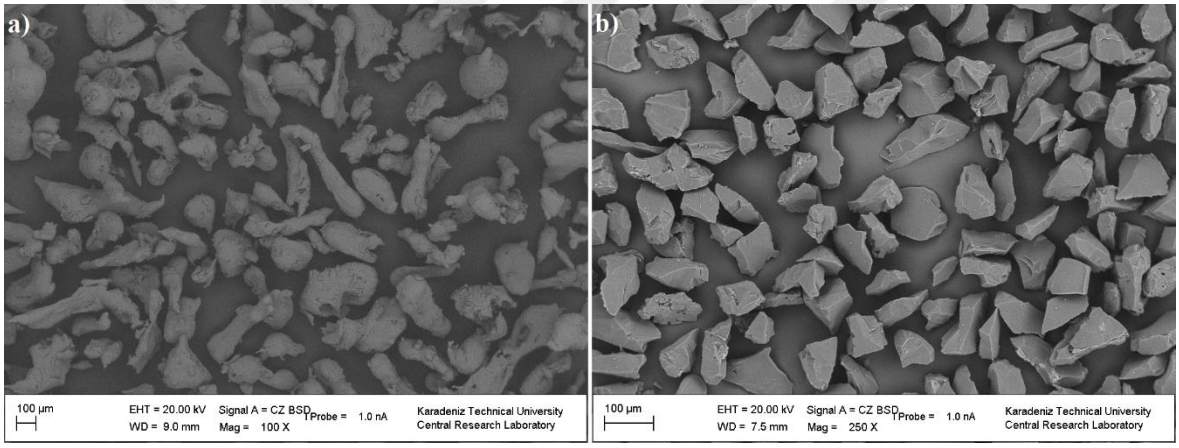
Şekil 17. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik ölçüm cihazı

3. BULGULAR

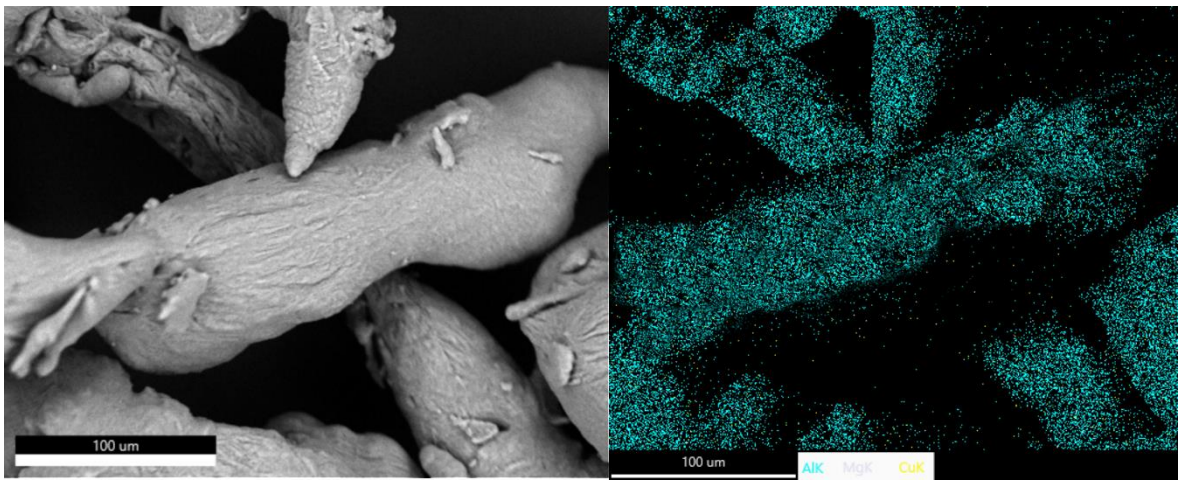
3.1. Tozların Karakterizasyonu

3.1.1. Toz Morfolojisi

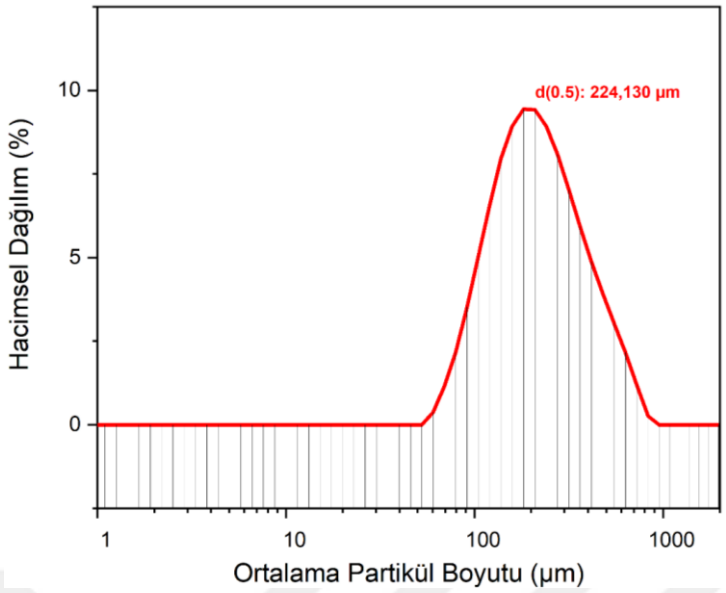
Çalışmada kullanılan AA2024 alaşımı matris tozlarının ve B_4C takviye partiküllerine ait başlangıç morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri Şekil 23'te verilmiştir. Burada görülebileceği üzere AA2024 başlangıç tozlarının düzensiz şekillidir. Şekil 24'te AA2024 alaşımı tozlarının yapısındaki alaşım elementlerini dağılımı ve Şekil 25'te ise B_4C takviye partiküllerinde Bor elementinin dağılımının görüntüsü verilmiştir.



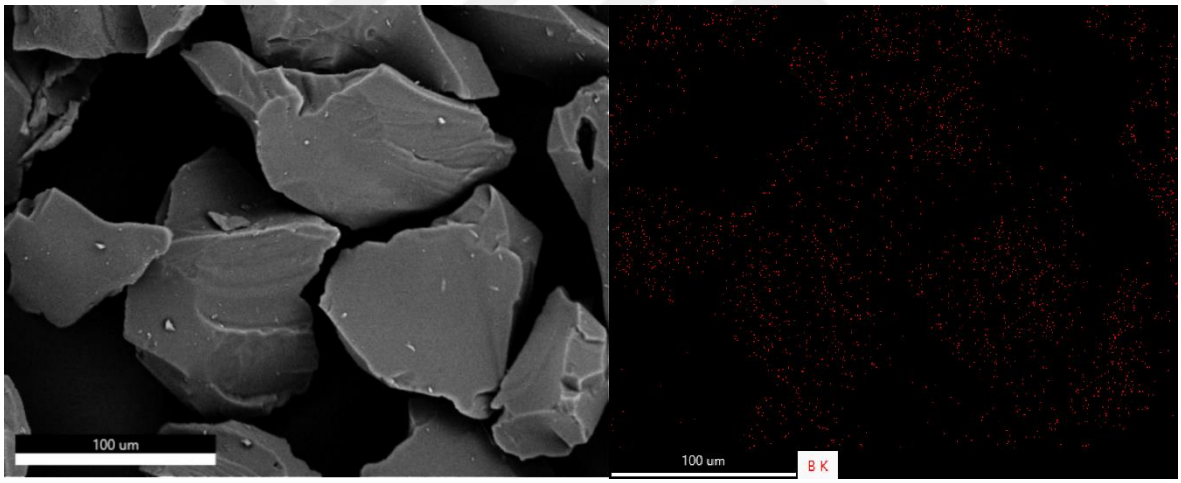
Şekil 18.Yapılan çalışmada kullanılan tozların morfolojileri a) AA2024 alaşımı b) B_4C seramik takviye partikülü.



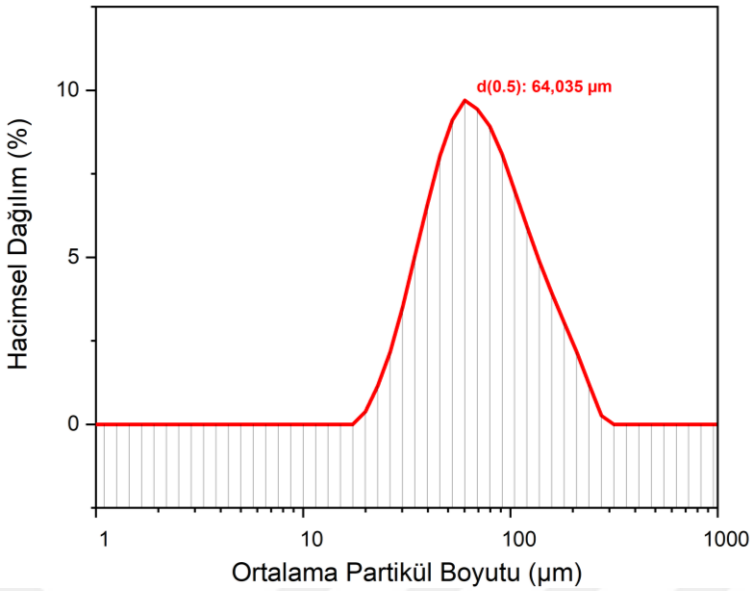
Şekil 19.AA2024 alaşımı tozlarının bileşimindeki Al, Mg ve Cu elementlerinin partikül yapısındaki dağılımları.



Şekil 20. AA2024 alaşımı başlangıç tozlarının partikül boyut dağılımı.



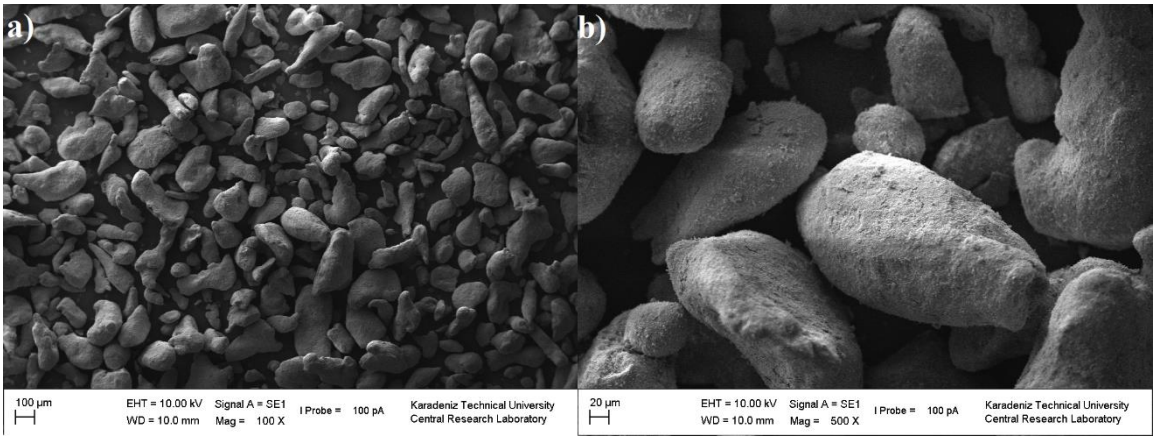
Şekil 21. B_4C takviye partiküllerinin bileşimindeki B elementinin partikül yapısındaki dağılımı.



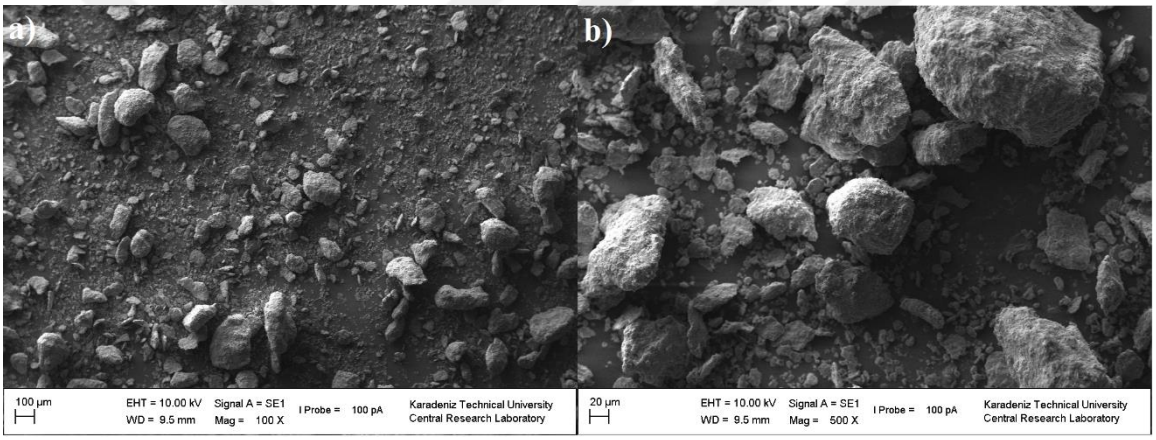
Şekil 22. B_4C takviye tozlarının başlangıç partikül boyut dağılımı.

3.1.2. Kompozit Tozlarında Öğütme ile Partikül Morfolojilerinin Değişimi

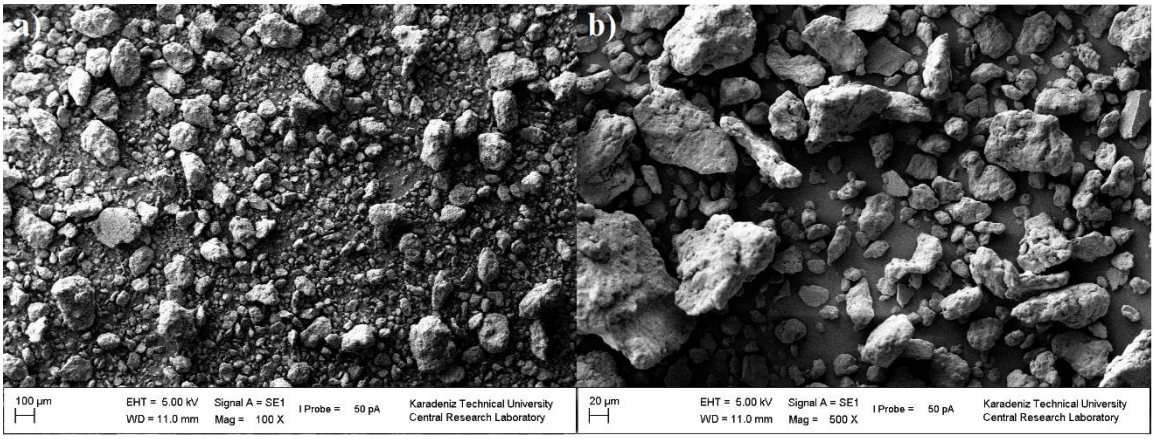
AA2024 matris içerisine takviye edilen seramik B_4C partiküllerinin, yapı içerisine gömülmesi ve homojen bir biçimde dağılımının sağlanması için 4 farklı PCA kullanılarak kompozit tozlarının farklı öğütme süreleri seçilmiştir. Öğütme süreleri ve öğütme esnasında hazneye eklenen PCA miktarlarının değişkenlik gösterdiği 3 farklı gruptan 1. Grup olarak adlandırılan kompozit tozlarının 1, 2, 3, 4 ve 5 saatlik öğütme sürelerinde, 2. Grup olarak adlandırılan kompozit tozlarının 2, 4, 10 ve 14 saatlik öğütme sürelerinde ve 3. Grup olarak adlandırılan kompozit tozlarının ve 3. Grup içerisinde artan B_4C oranlarına sahip kompozit tozlarının 2, 4, 10, 14 ve 18 saatlik öğütme sürelerinde elde edilen partikül morfolojisi görüntüleri ve öğütme sonrası yapılan EDS incelemeleri gösterilmiştir.



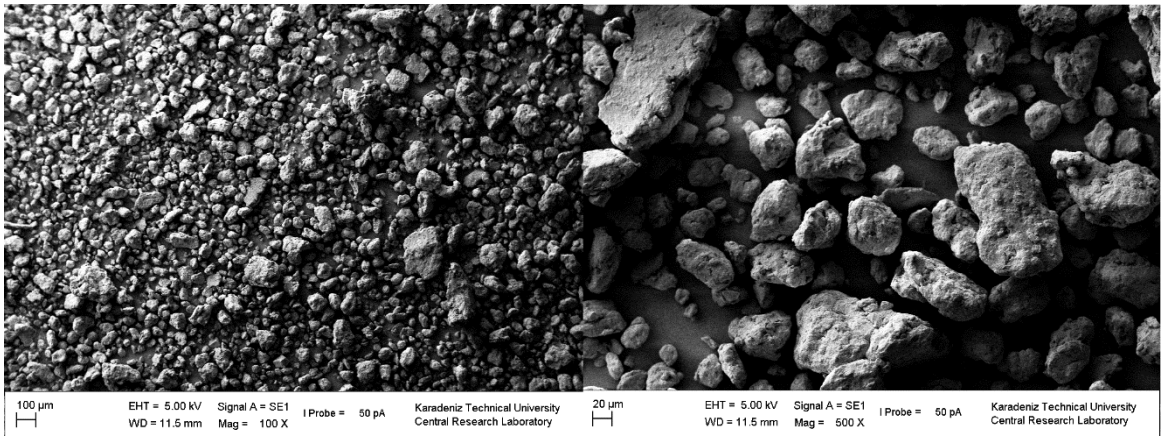
Şekil 23. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



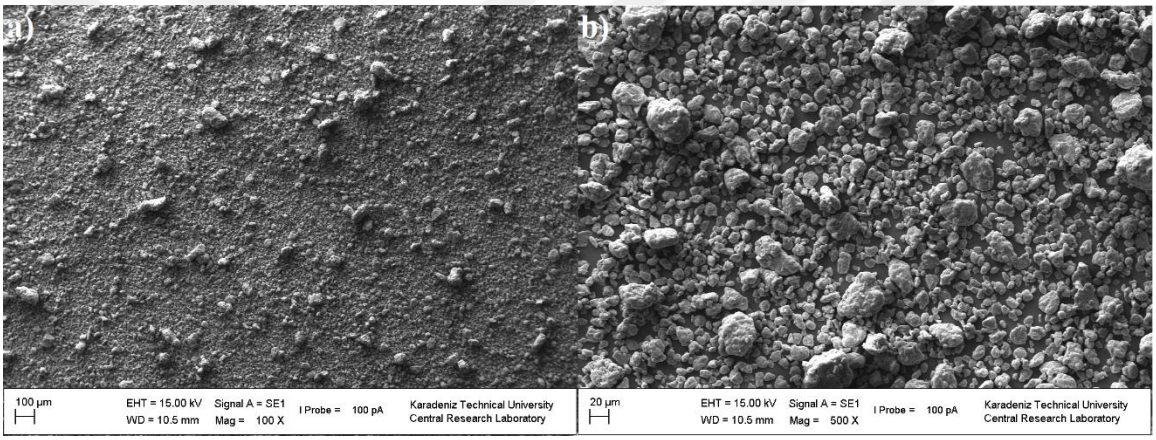
Şekil 24. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



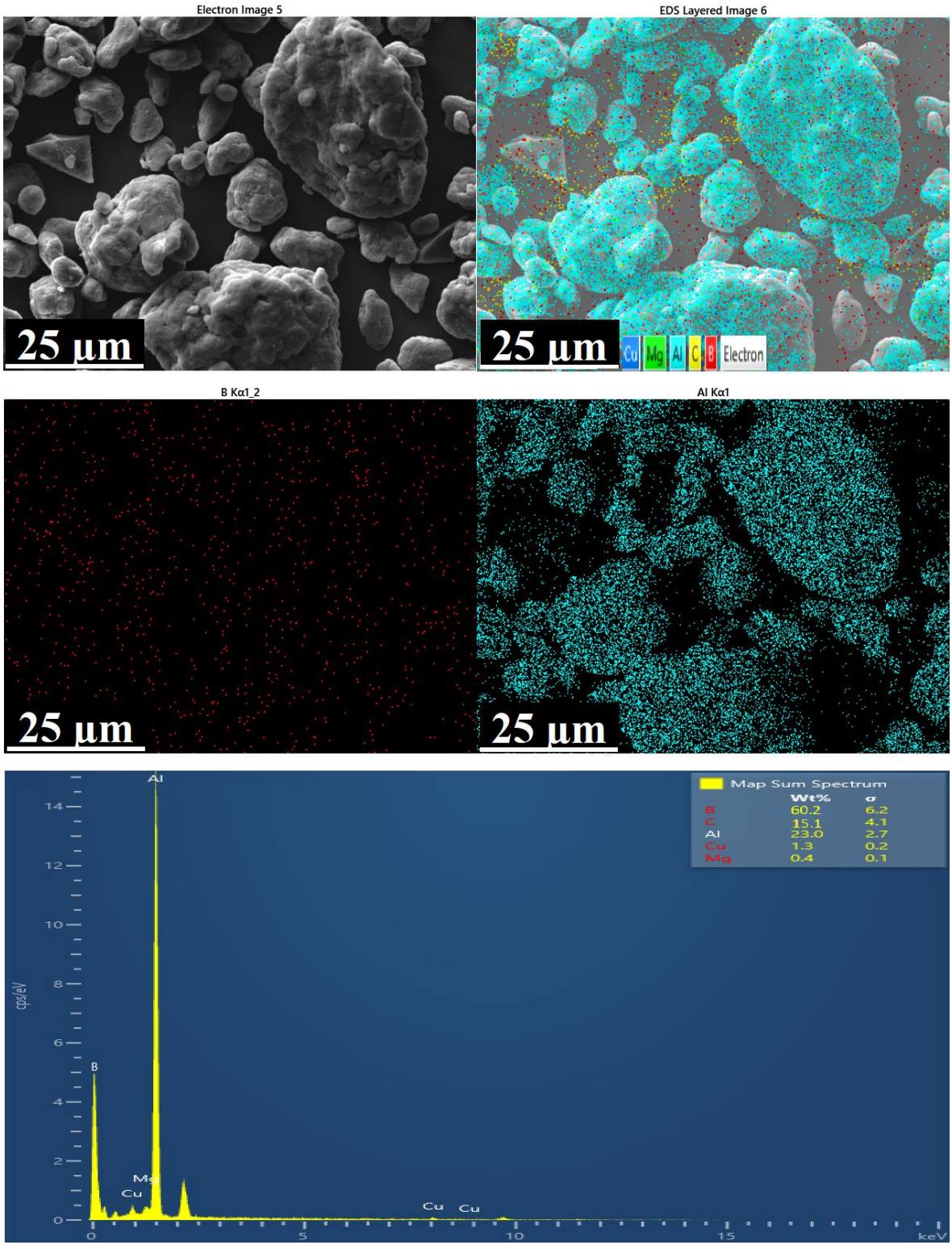
Şekil 25. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



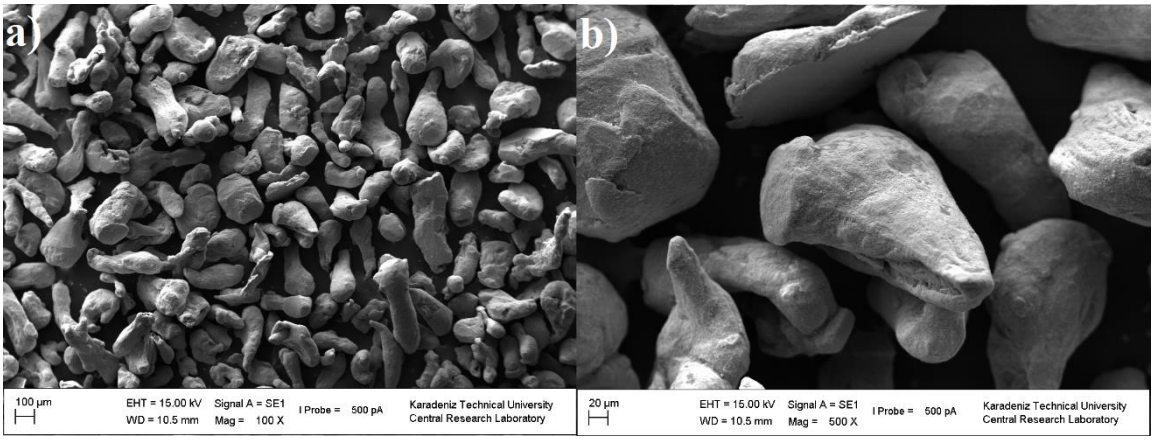
Şekil 26. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



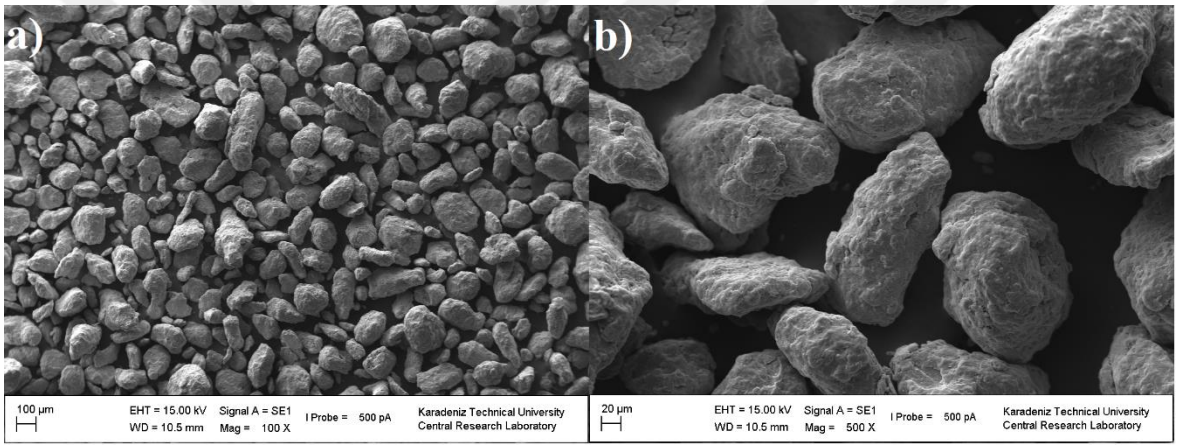
Şekil 27. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



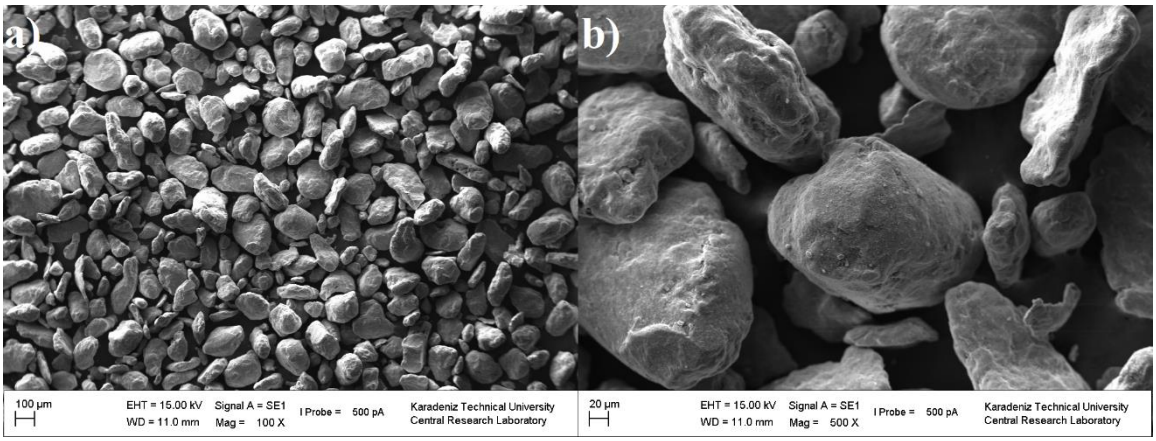
Şekil 28. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Metanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum analizi.



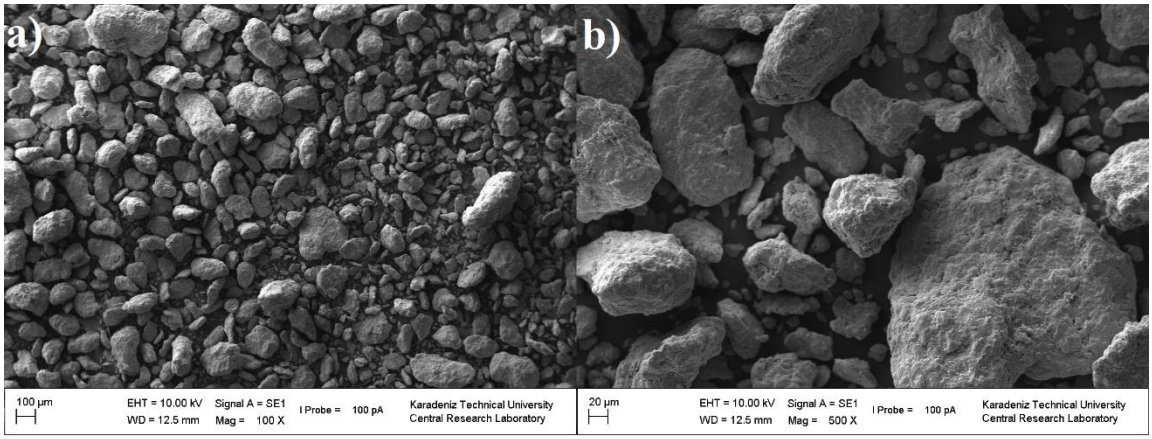
Şekil 29. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



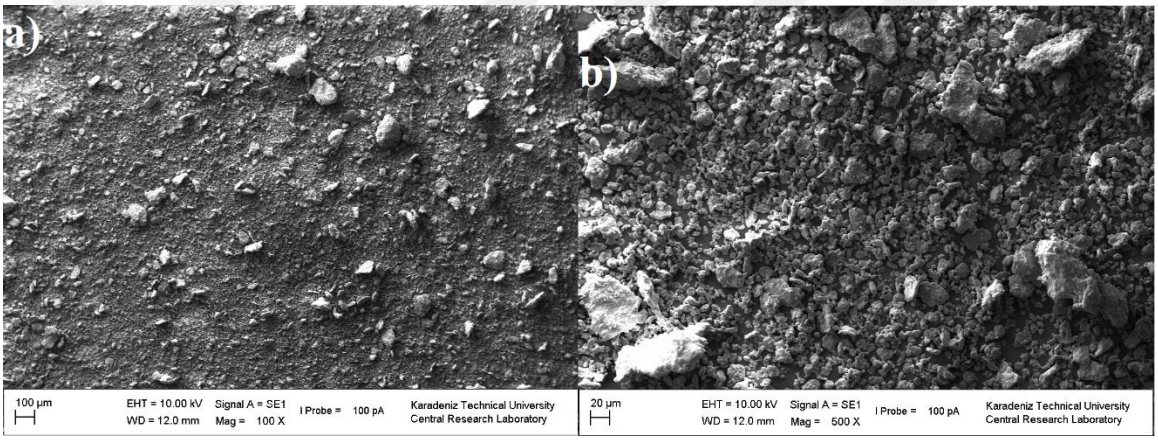
Şekil 30. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



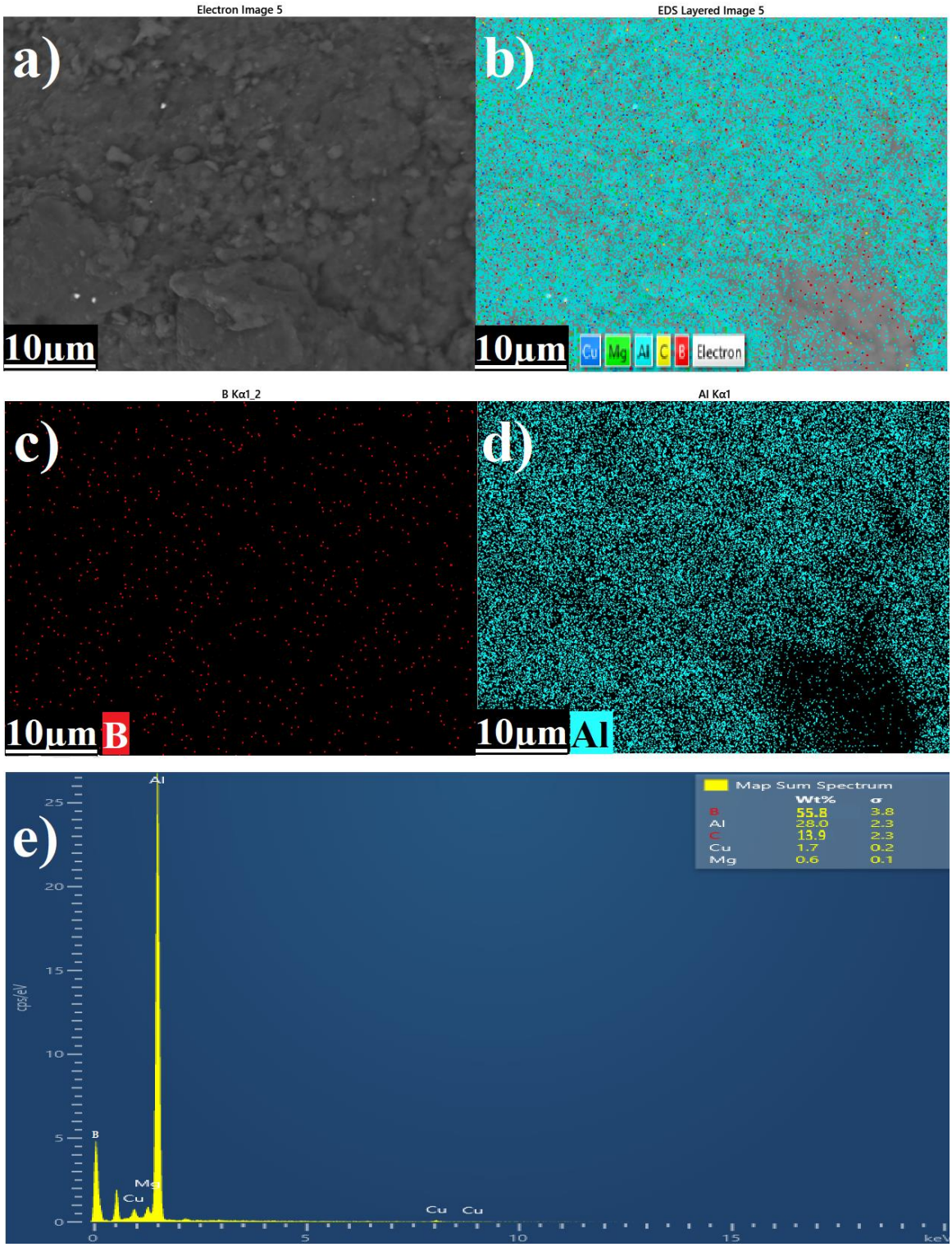
Şekil 31. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



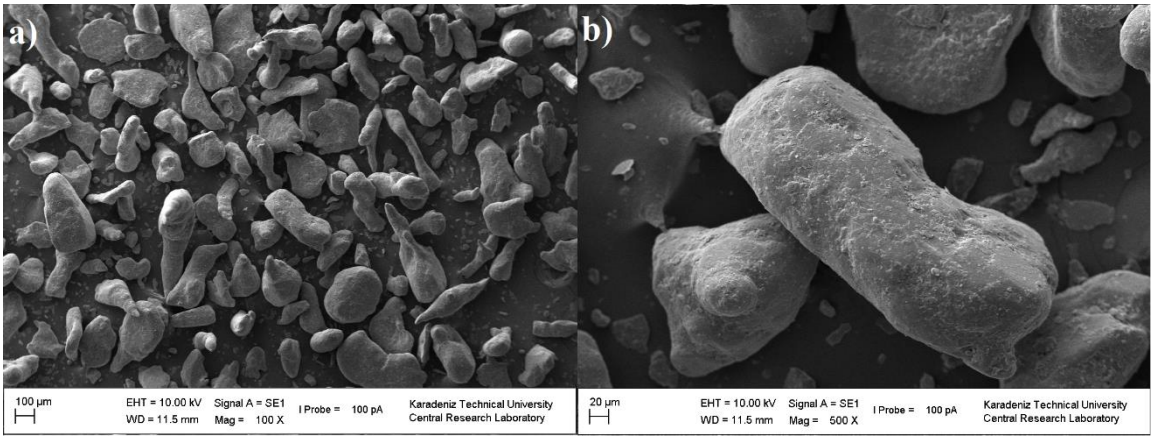
Şekil 32. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



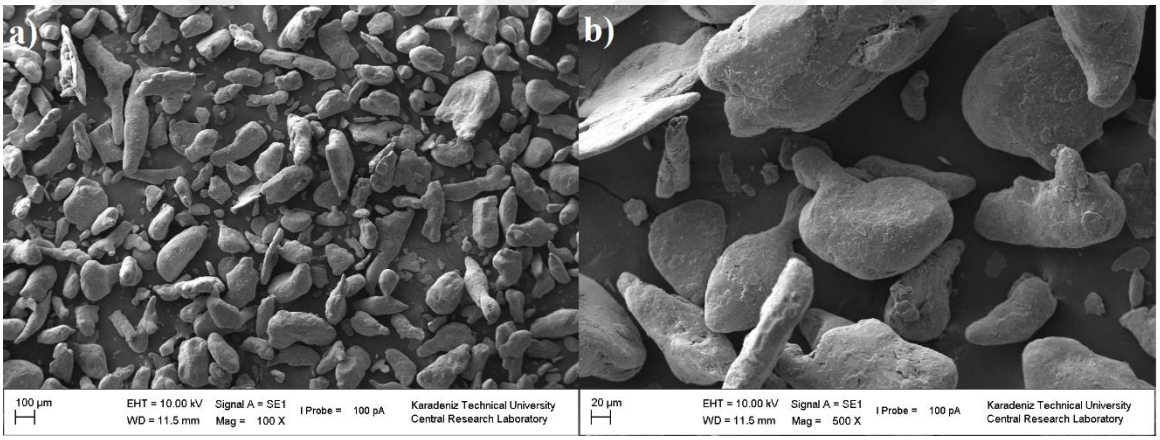
Şekil 33. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



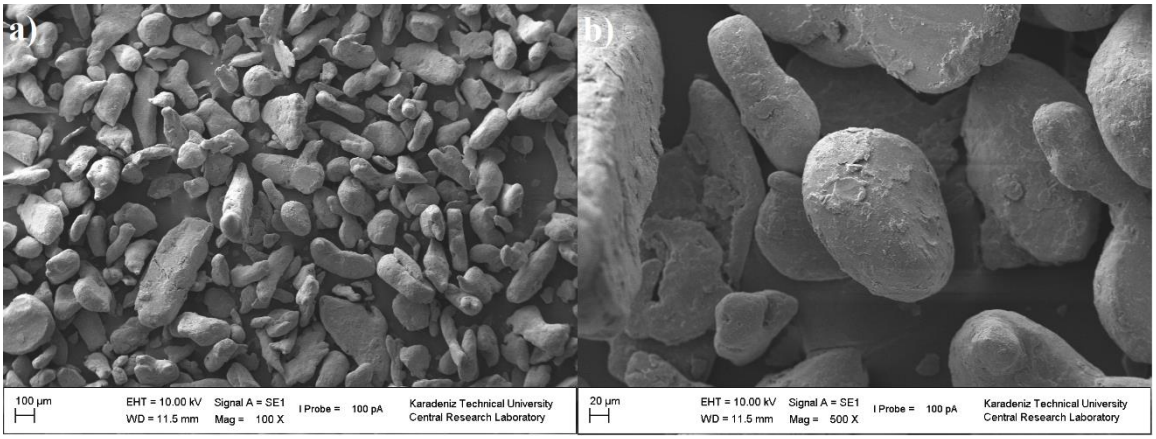
Şekil 34. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Etanol ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



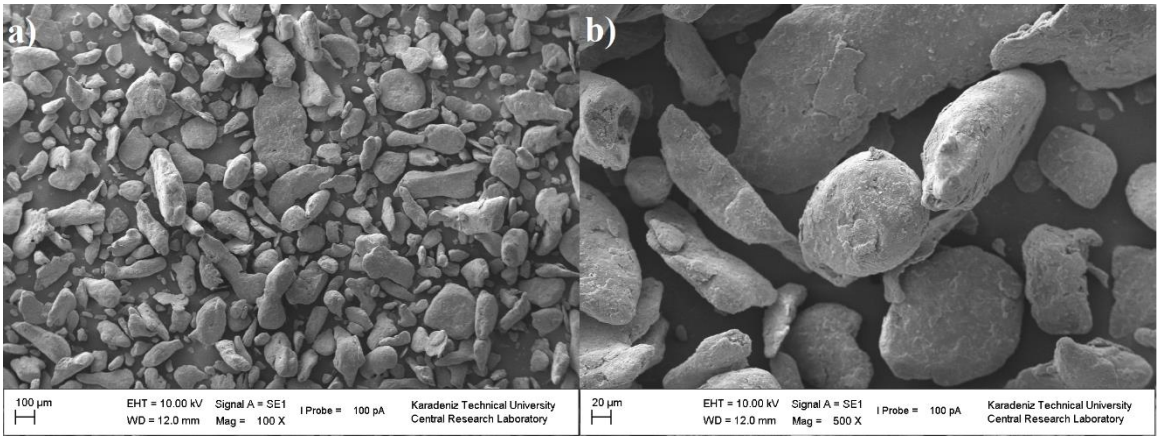
Şekil 35. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



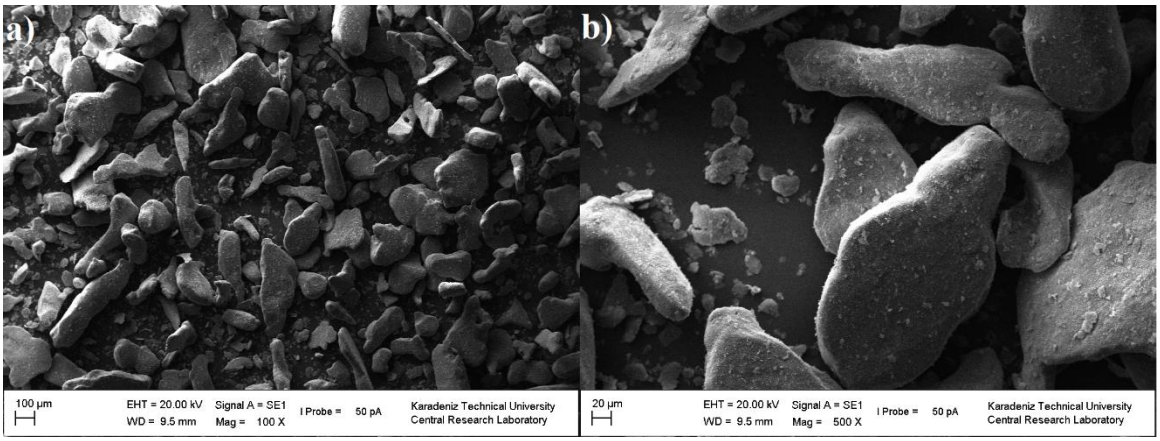
Şekil 36. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



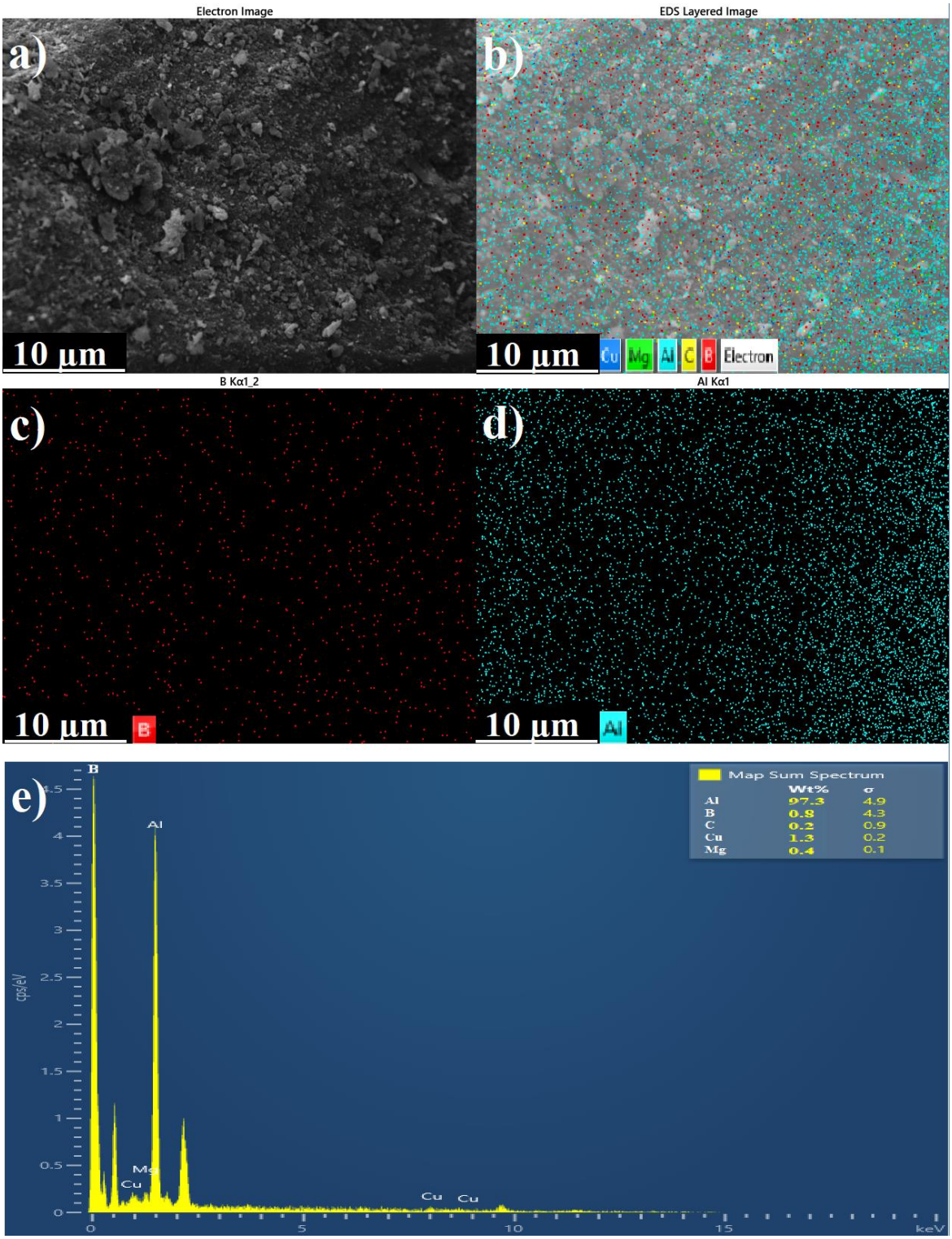
Şekil 37. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



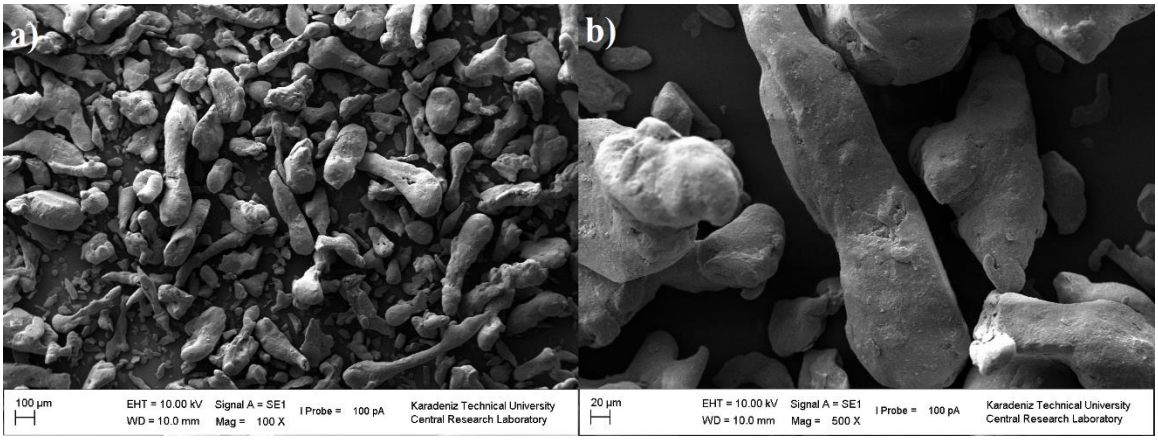
Şekil 38. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



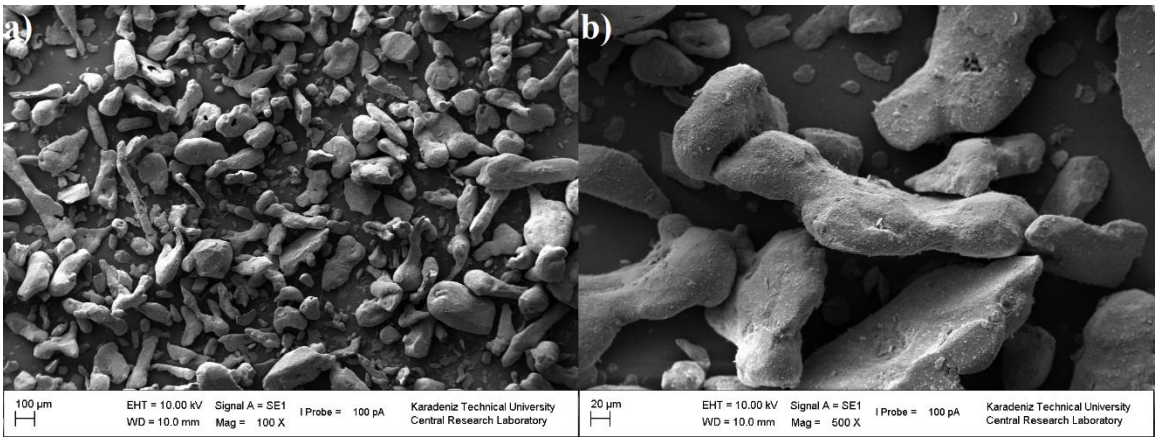
Şekil 39. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



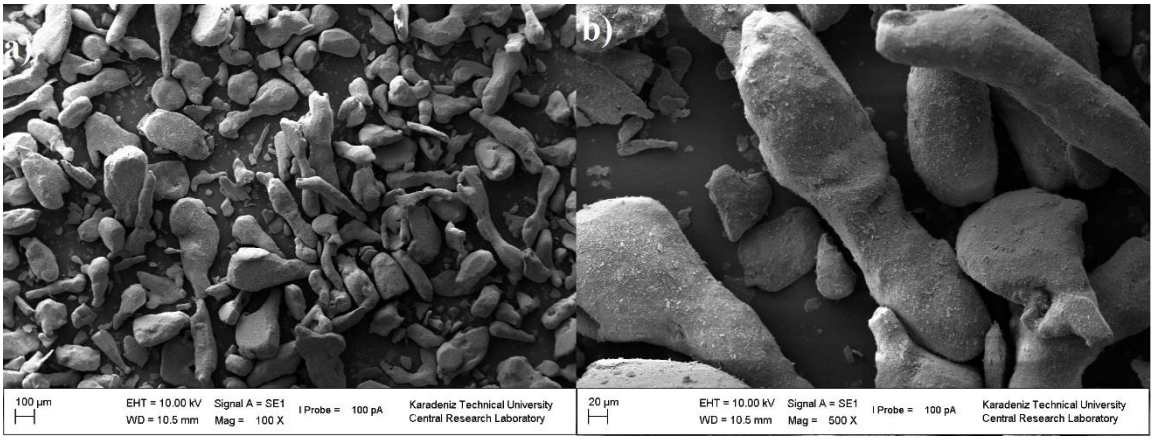
Şekil 40. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Çinko Stearat ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



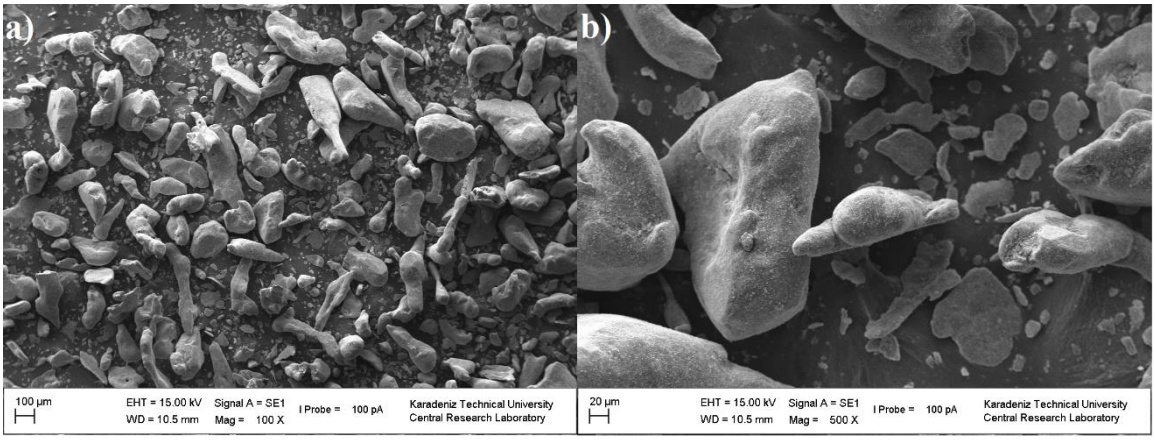
Şekil 41. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 1 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



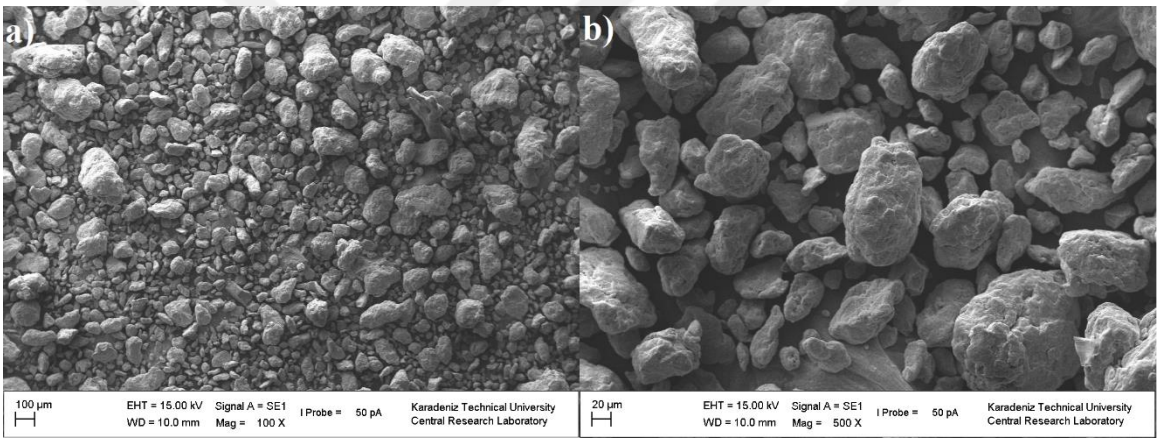
Şekil 42. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



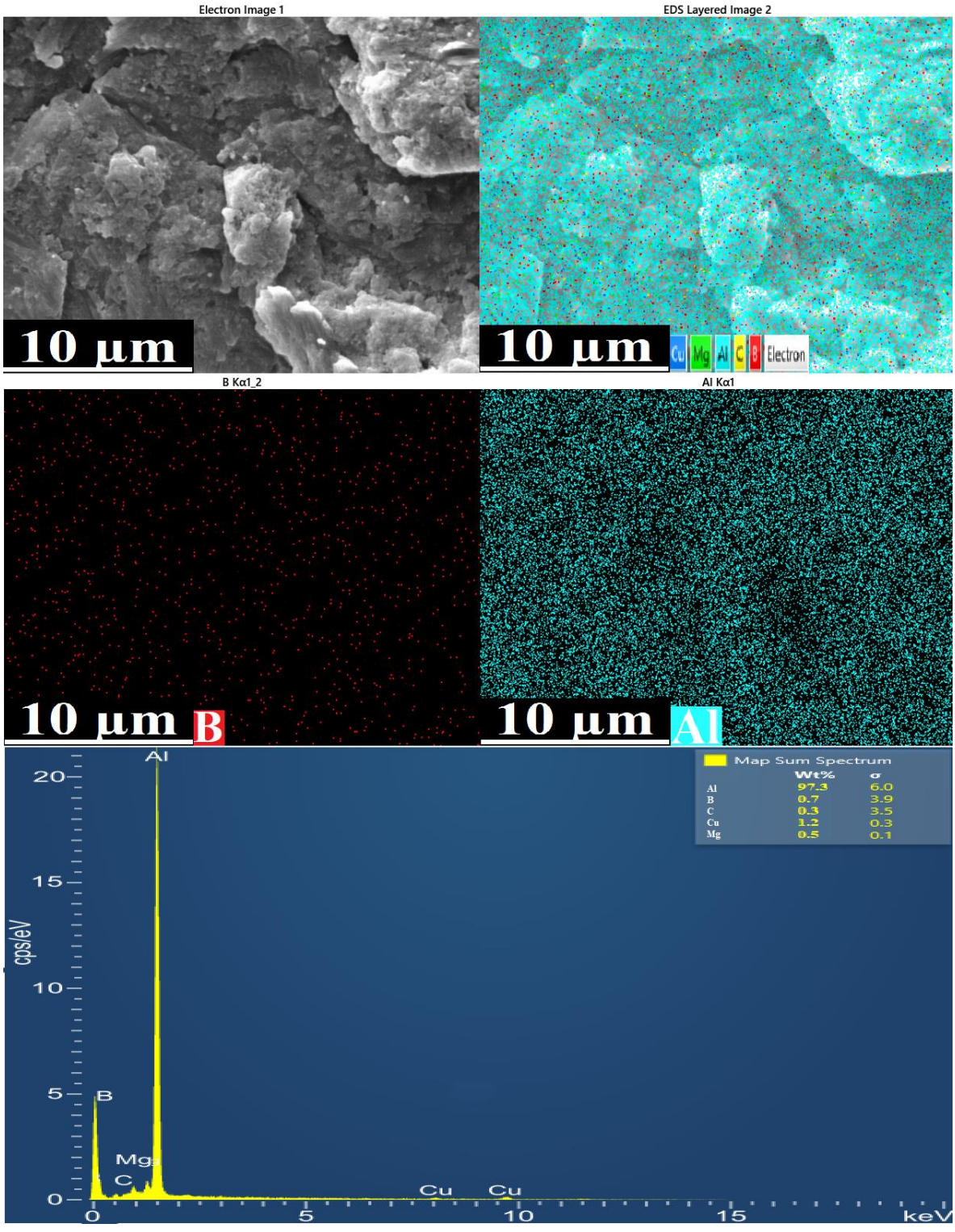
Şekil 43. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 3 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 44. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.

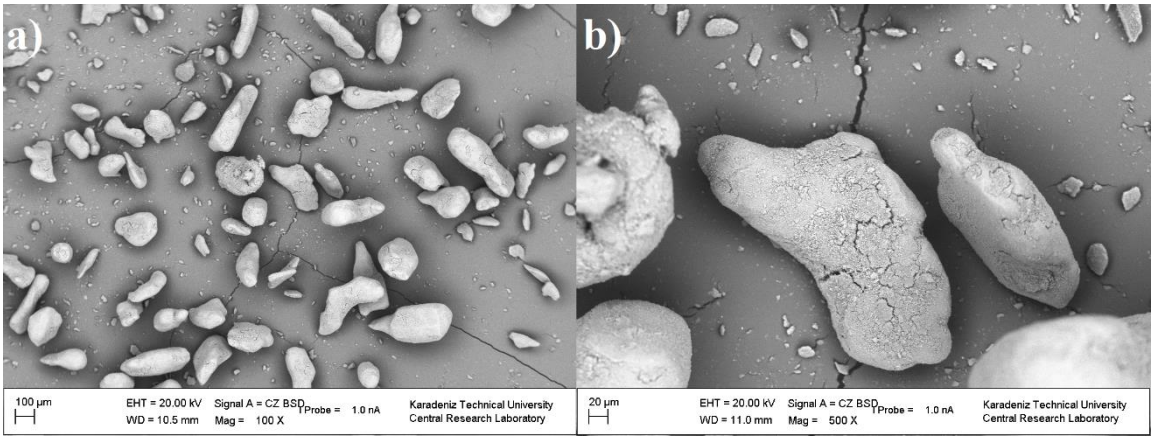


Şekil 45. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.

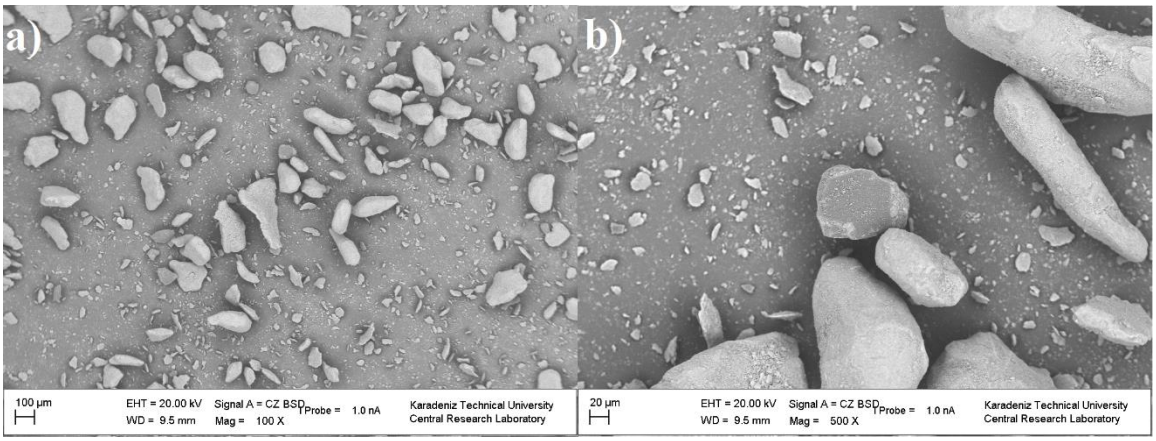


Şekil 46. AA2024-%1 B4C tozlarının ağ.%2 Stearik Asit ilavesi ile 5 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg, Cu ve C dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.

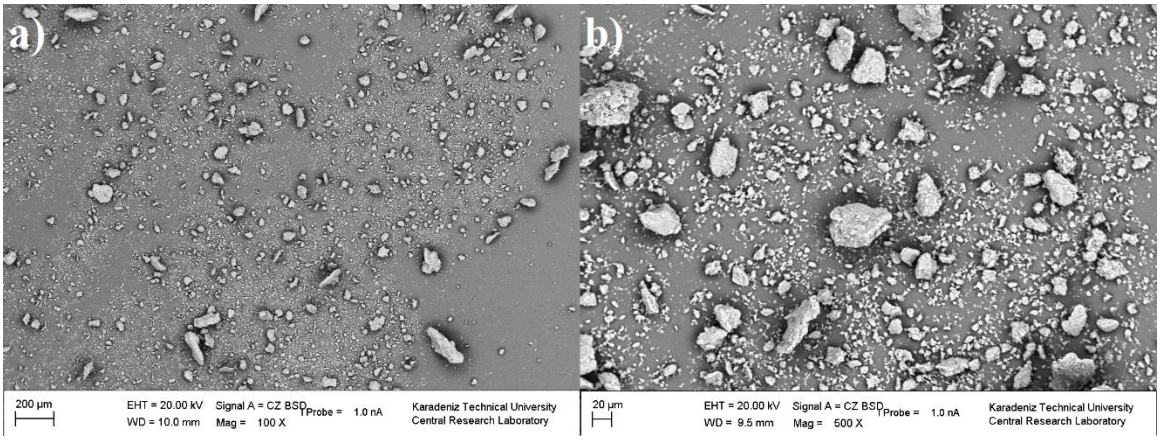
AA2024 matris içerisine takviye edilen seramik B_4C partiküllerinin, yapı içerisine daha iyi gömülmesi ve dağılımının daha homojen bir şekilde sağlanarak boyutun daha efektif bir şekilde düşürülmesi maksadıyla 5 saatlik öğütme rejiminde kullanılan 4 farklı PCA kullanılarak kompozit tozları 14 saat boyunca öğütülmüştür. Toplamda 14 saatlik öğütme süresince kompozit tozlarına öğütme işlemi başlangıcında ağırlıkça %2 oranda ve öğütme işleminin 2. saatinde, 4. Saatinde ve 10. saatinde her biri ağırlıkça %0.5 oranında olmak toplamda ağırlıkça %3.5 oranında PCA eklemeli bir şekilde ilave edilerek öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğütülen tozlardan 2, 4, 10 ve 14 saatte alınan toz numunelerine ait SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



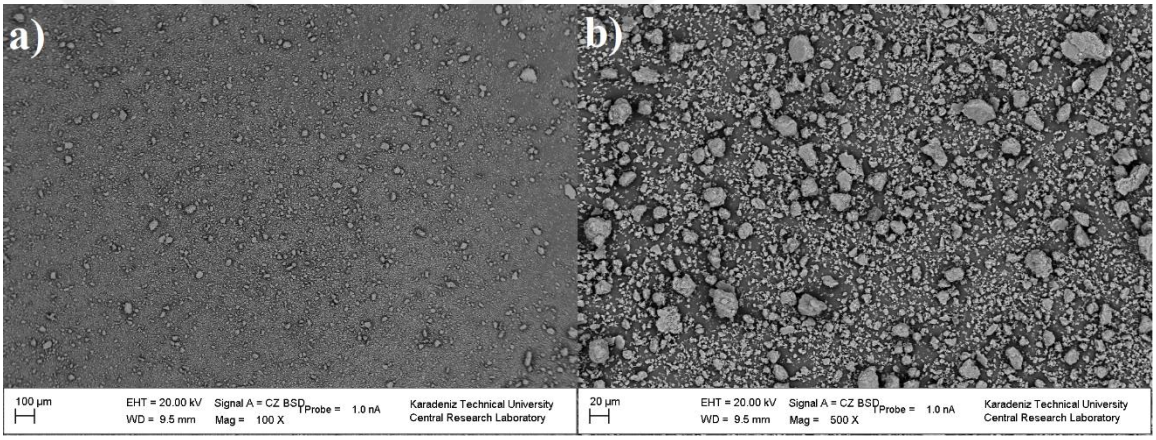
Şekil 47. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



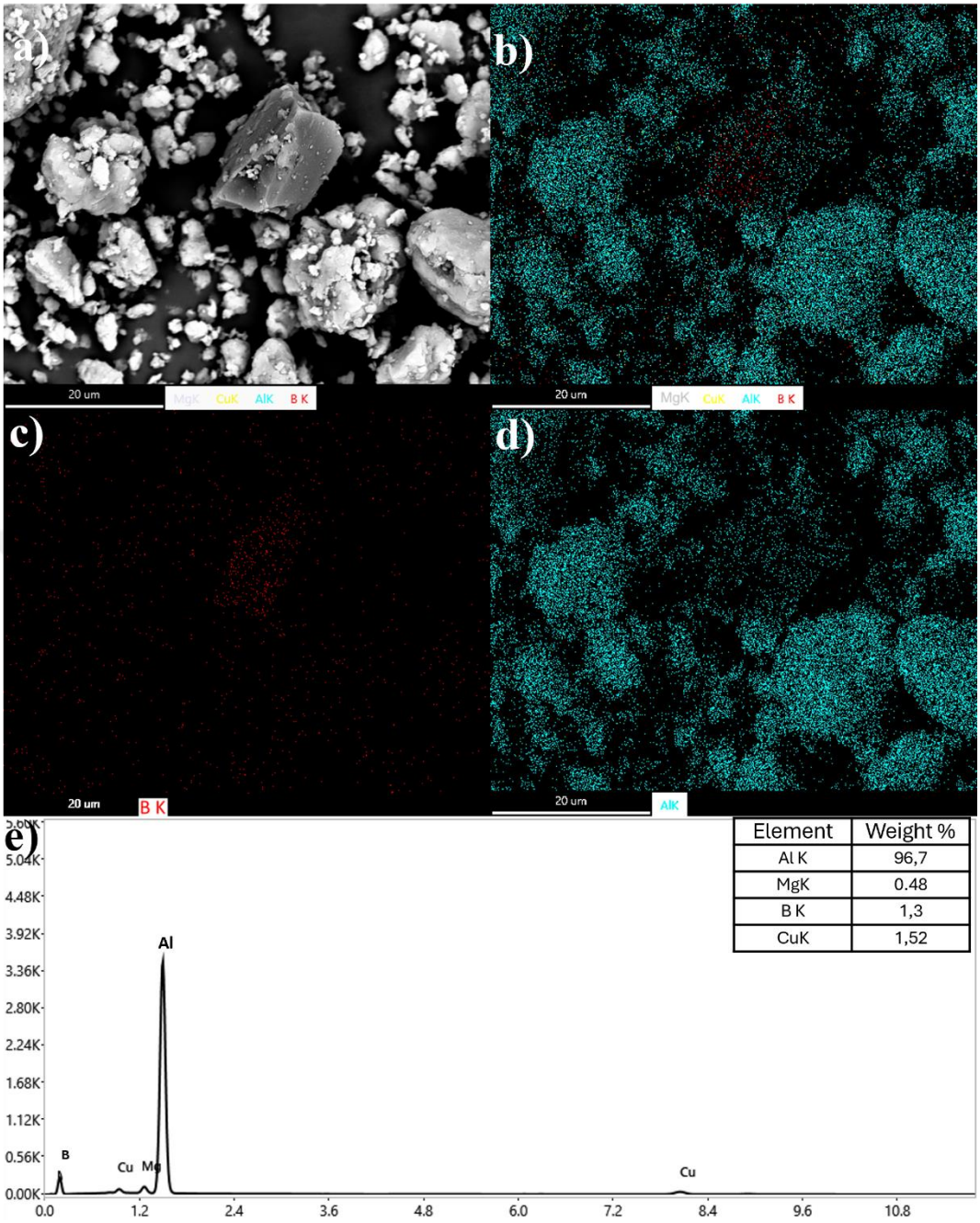
Şekil 48. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



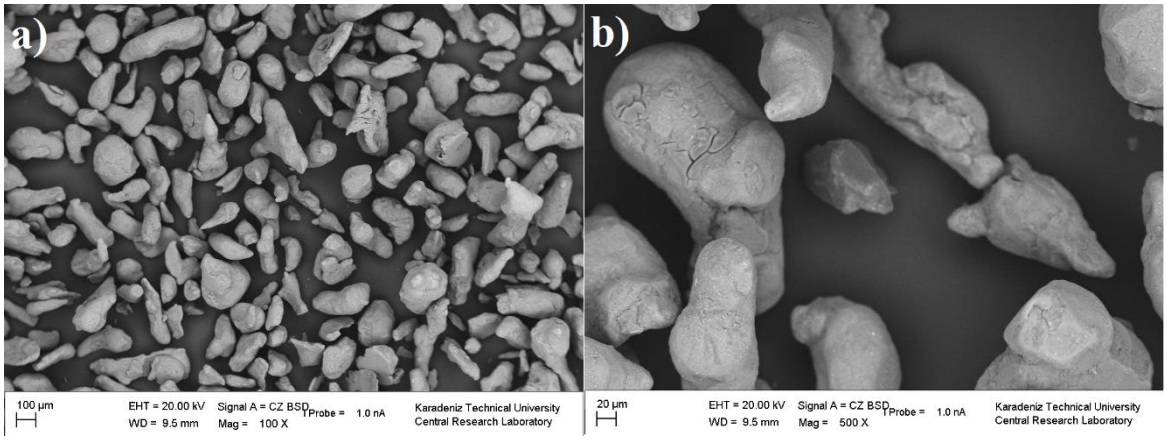
Şekil 49. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



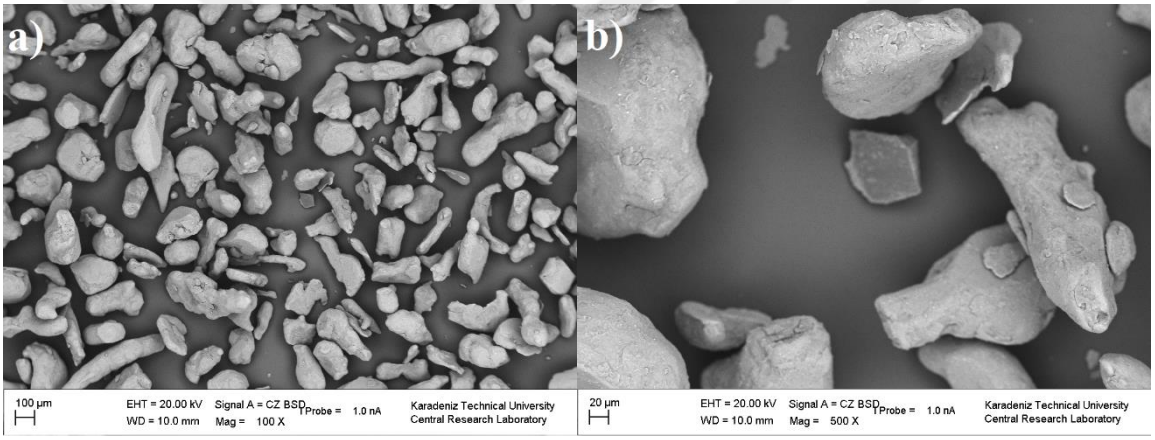
Şekil 50. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



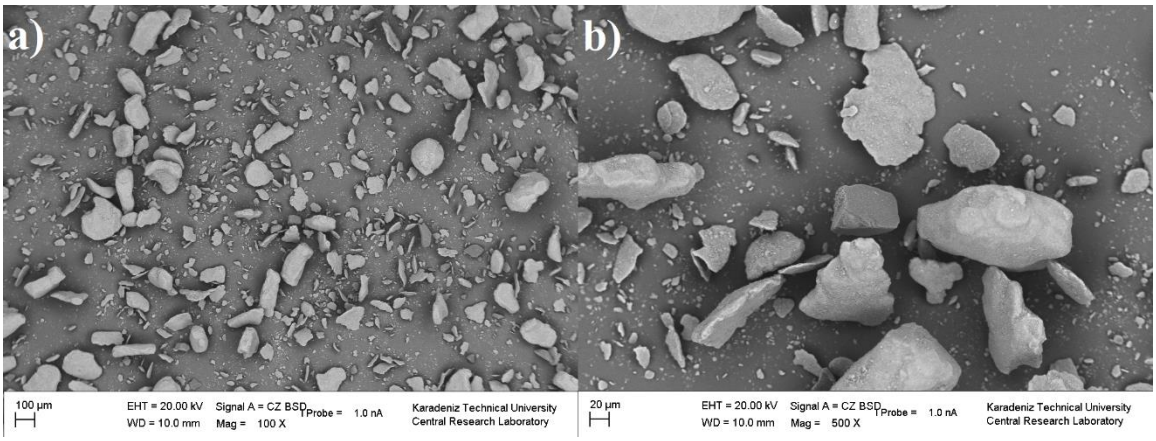
Şekil 51. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



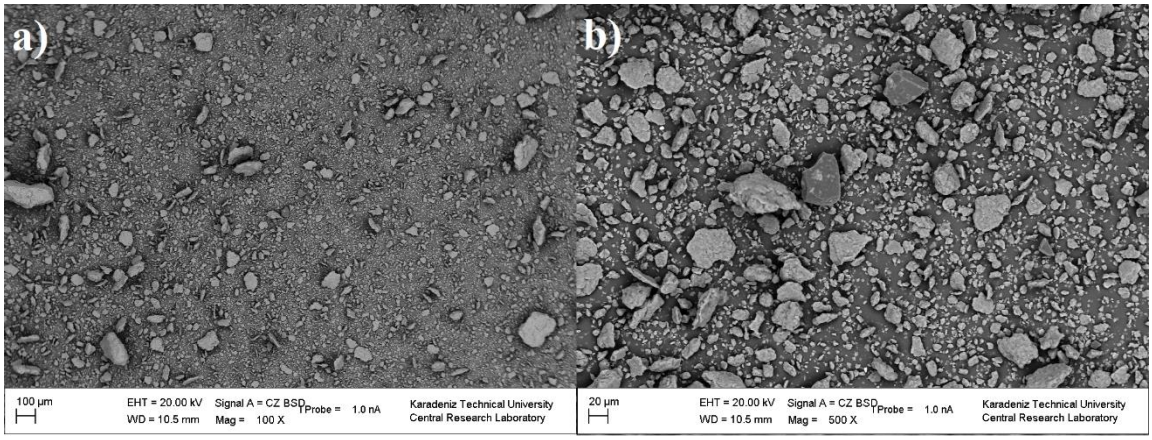
Şekil 52. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



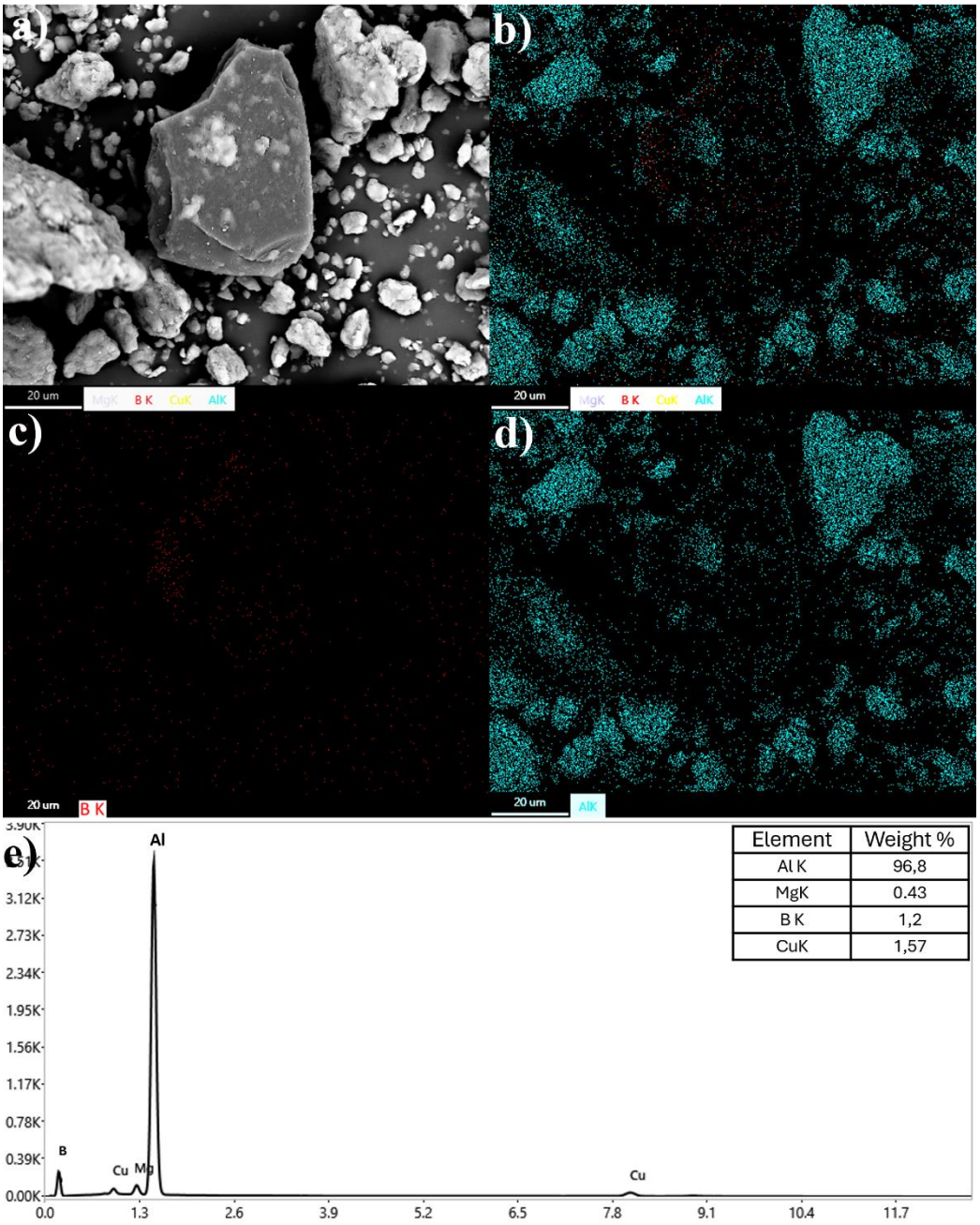
Şekil 53. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



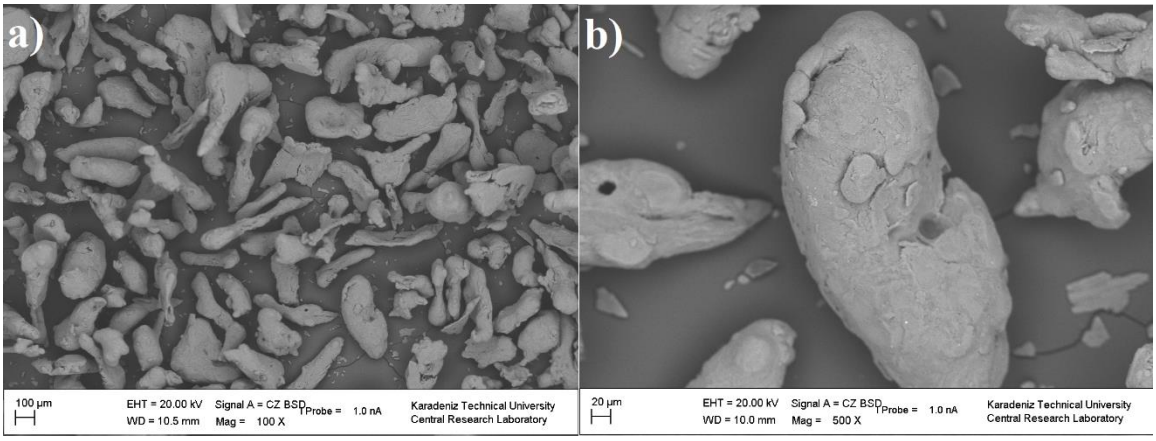
Şekil 54. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



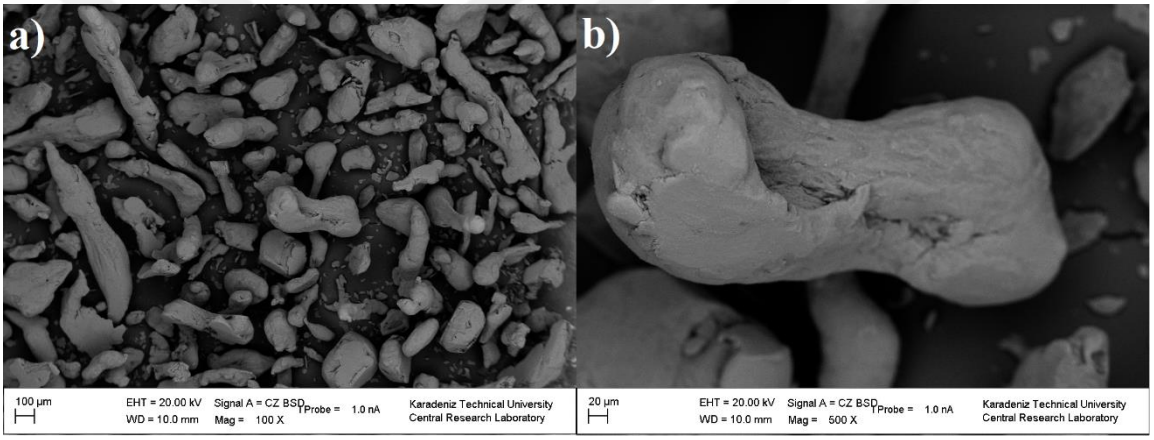
Şekil 55. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



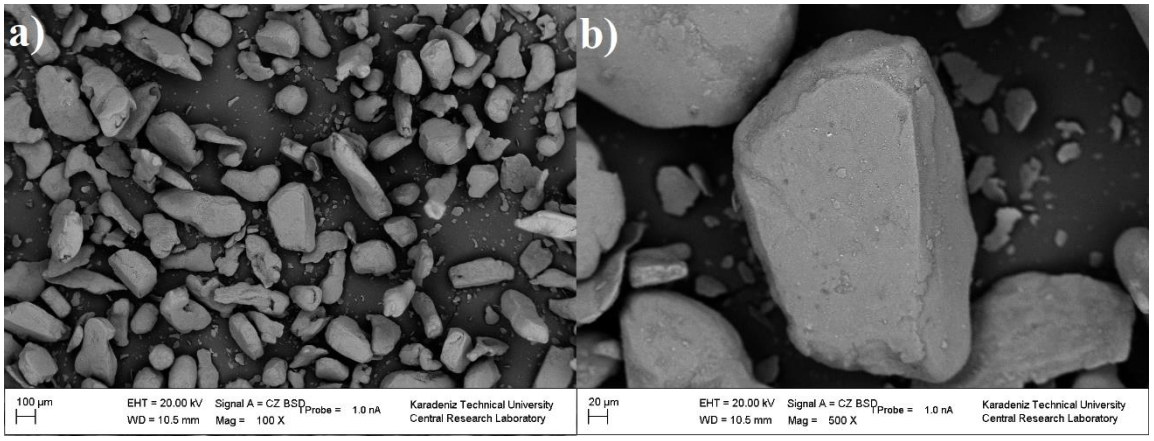
Şekil 56. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Etanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



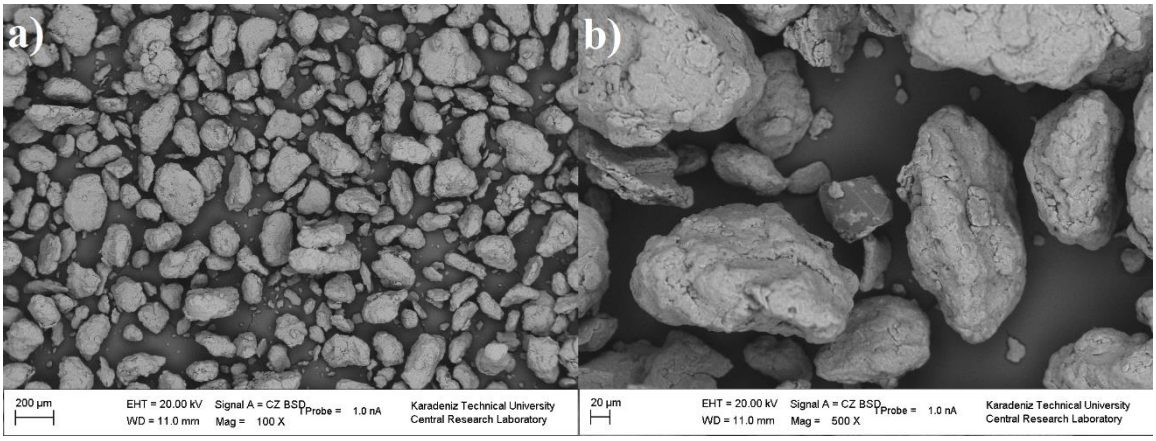
Şekil 57. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



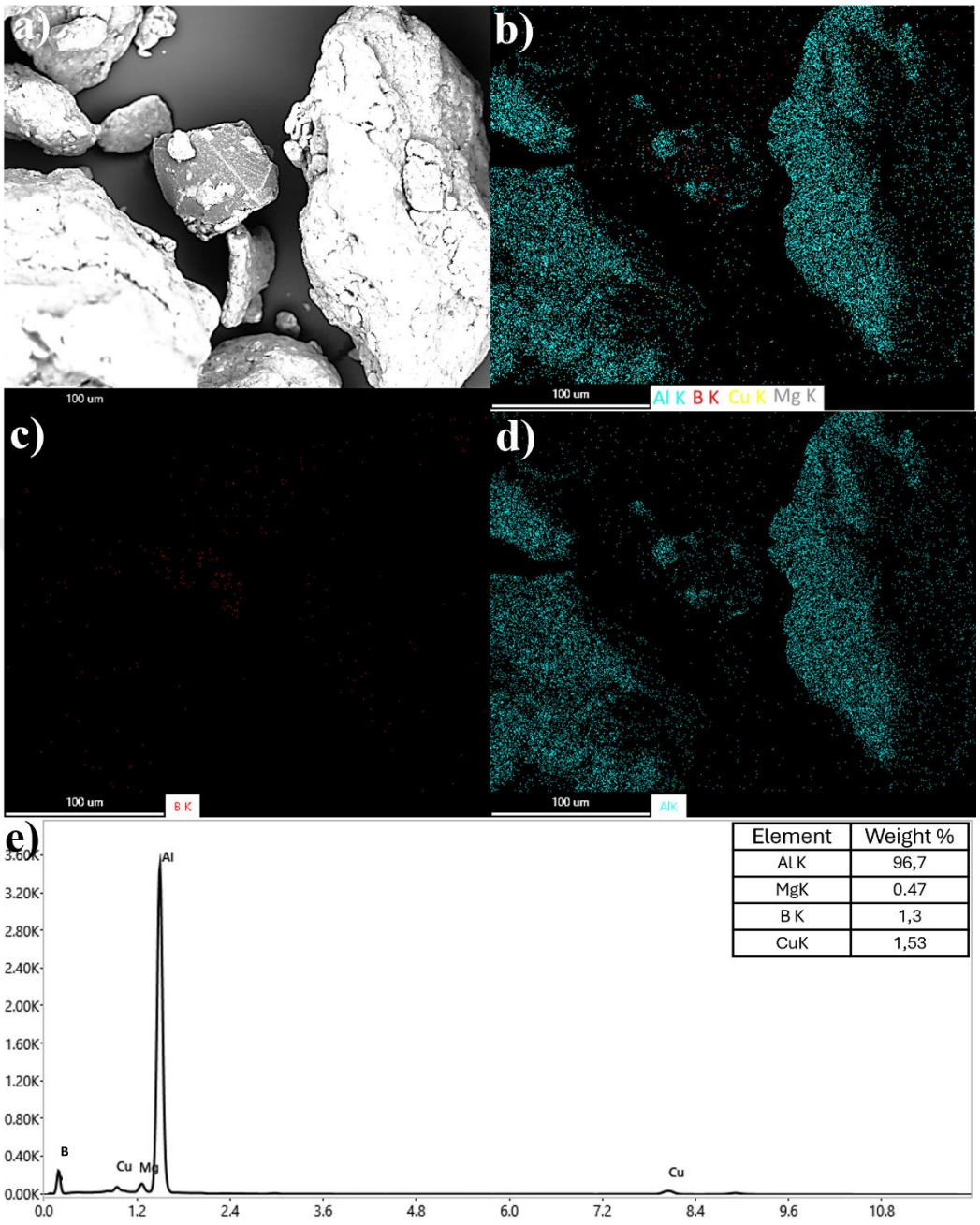
Şekil 58. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



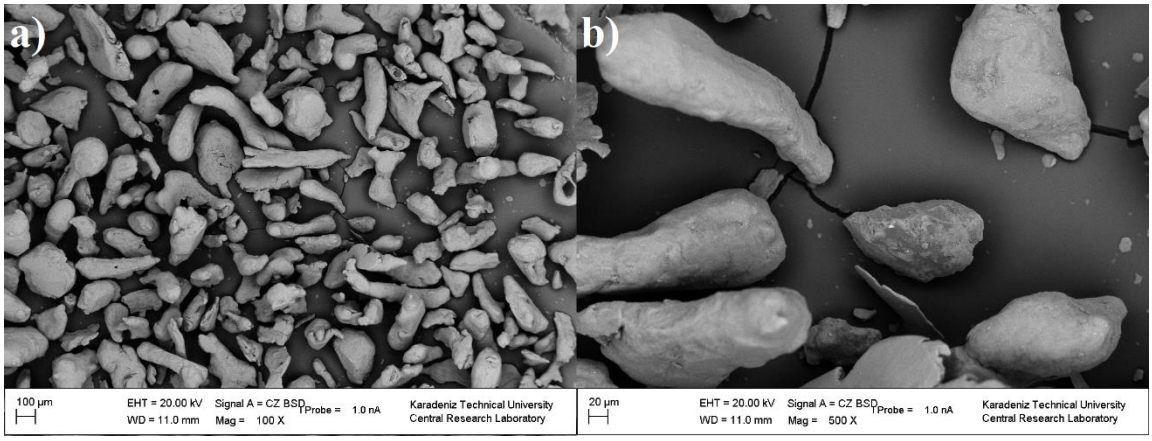
Şekil 59. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



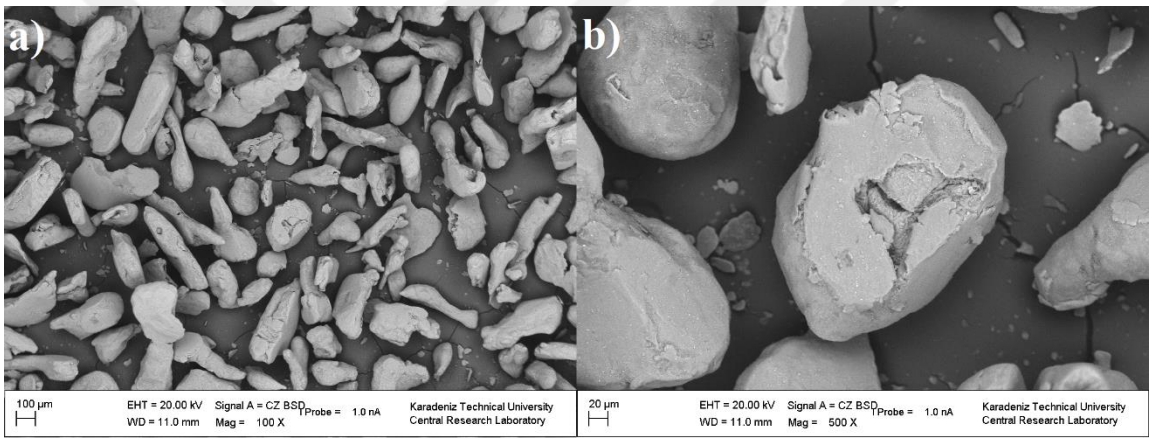
Şekil 60. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



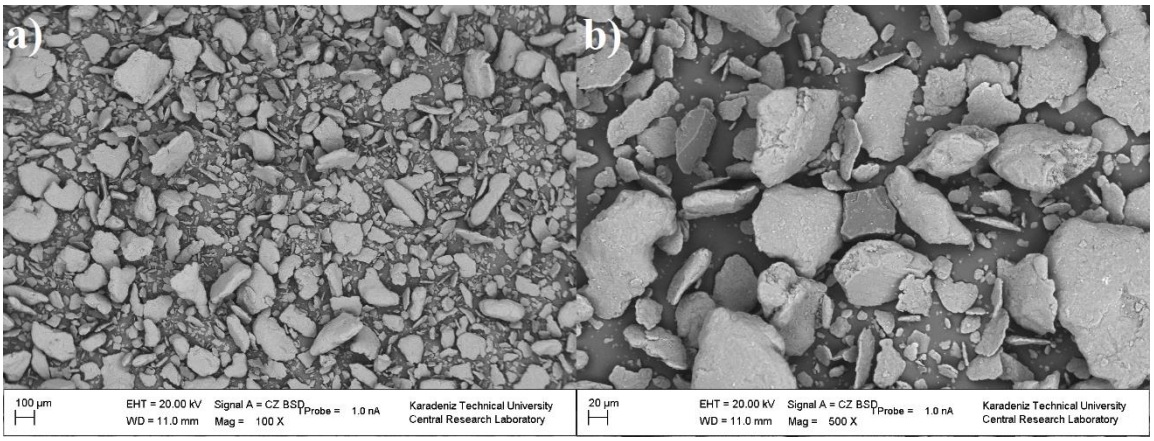
Şekil 61. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



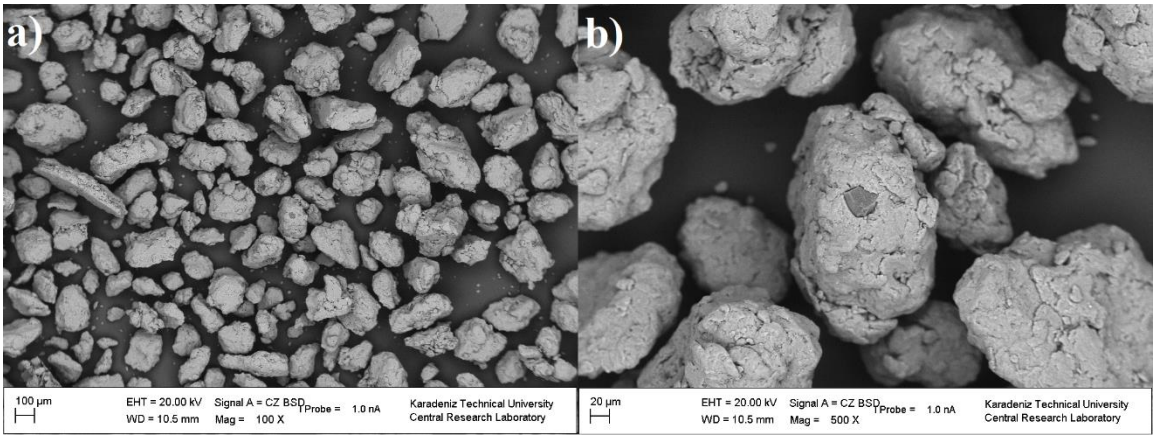
Şekil 62. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



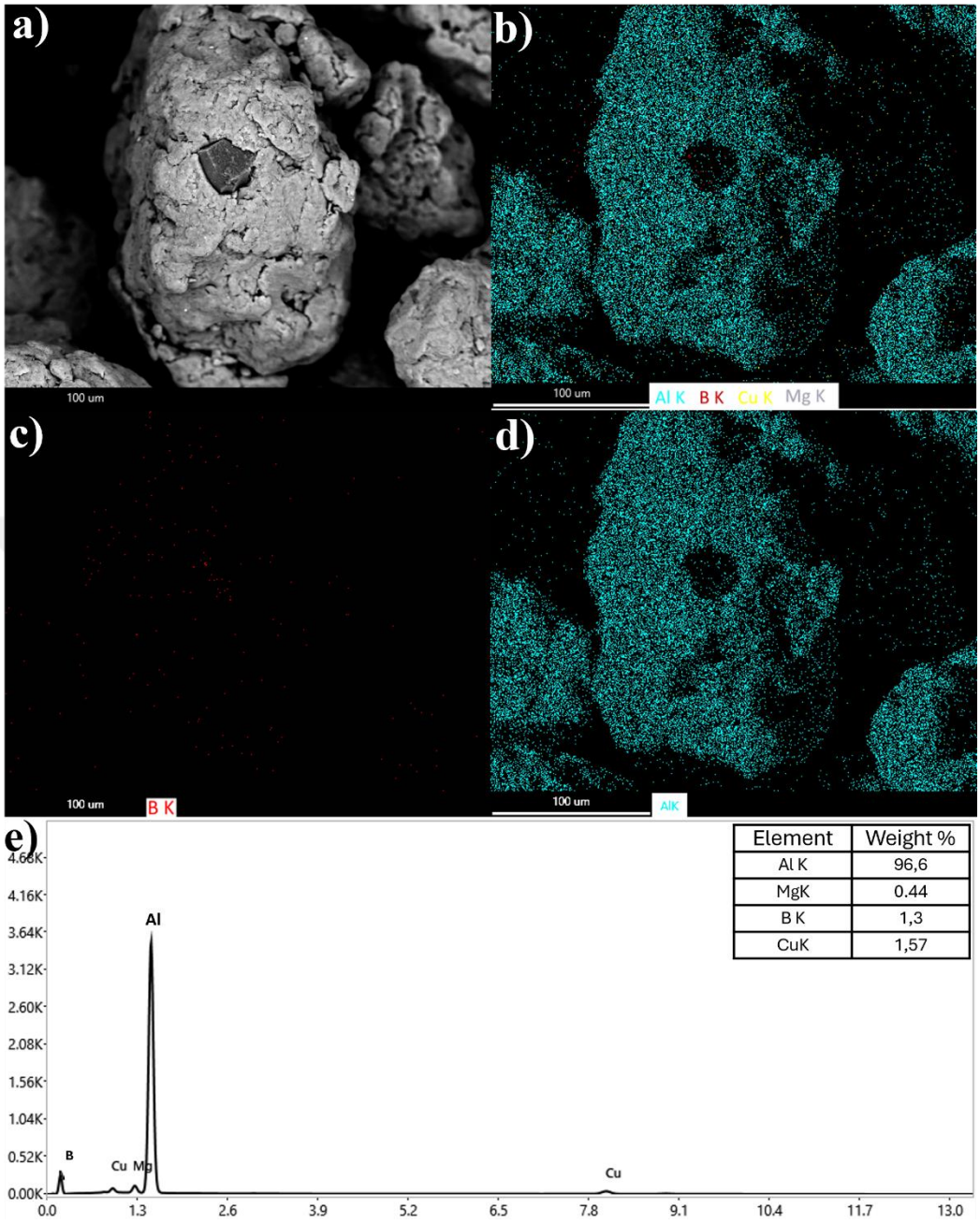
Şekil 63. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



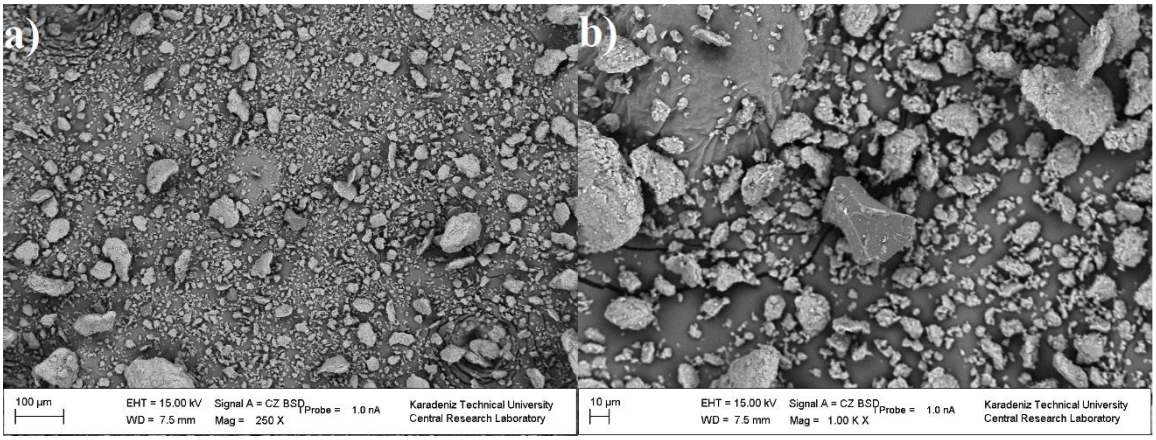
Şekil 64. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



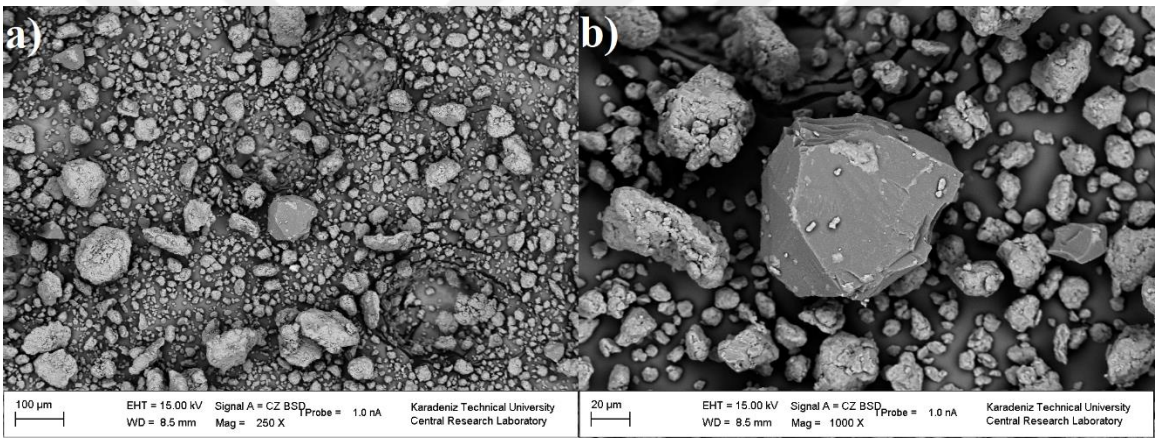
Şekil 65. AA2024-%1 B_4C tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



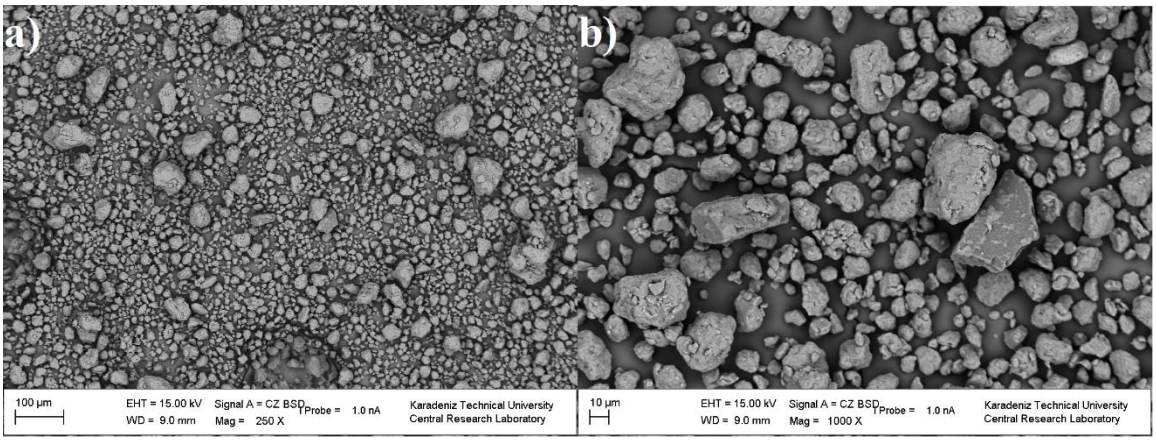
Şekil 66. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 14 saatlik öğütmede toplamda ağ.%3.5 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



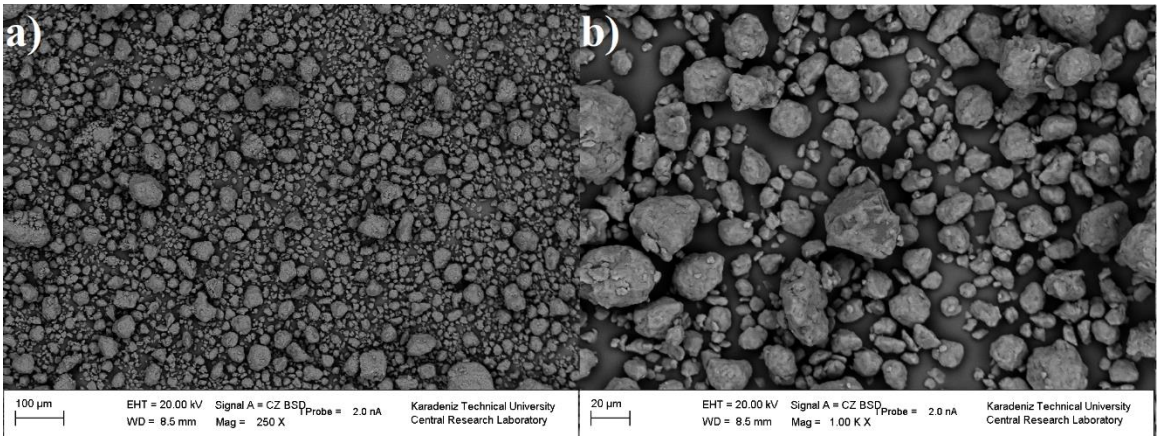
Şekil 67. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



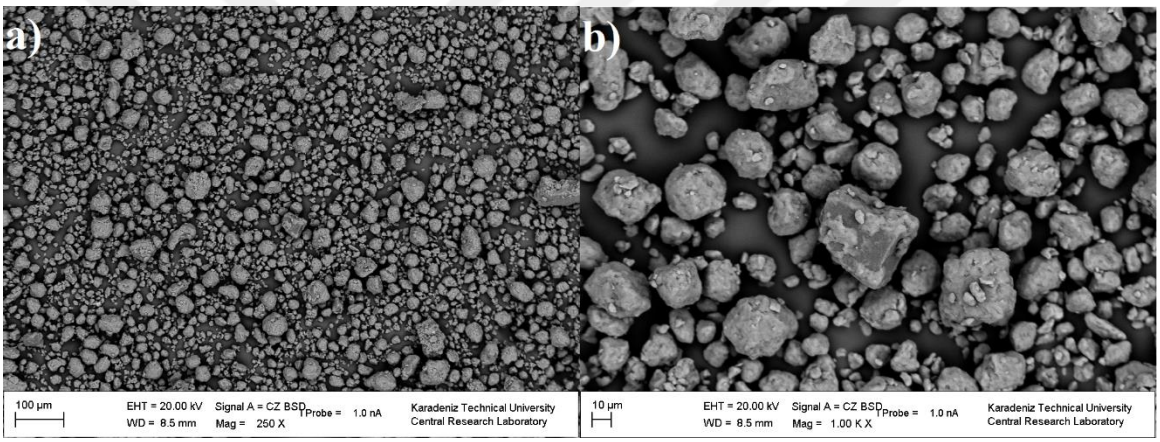
Şekil 68. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



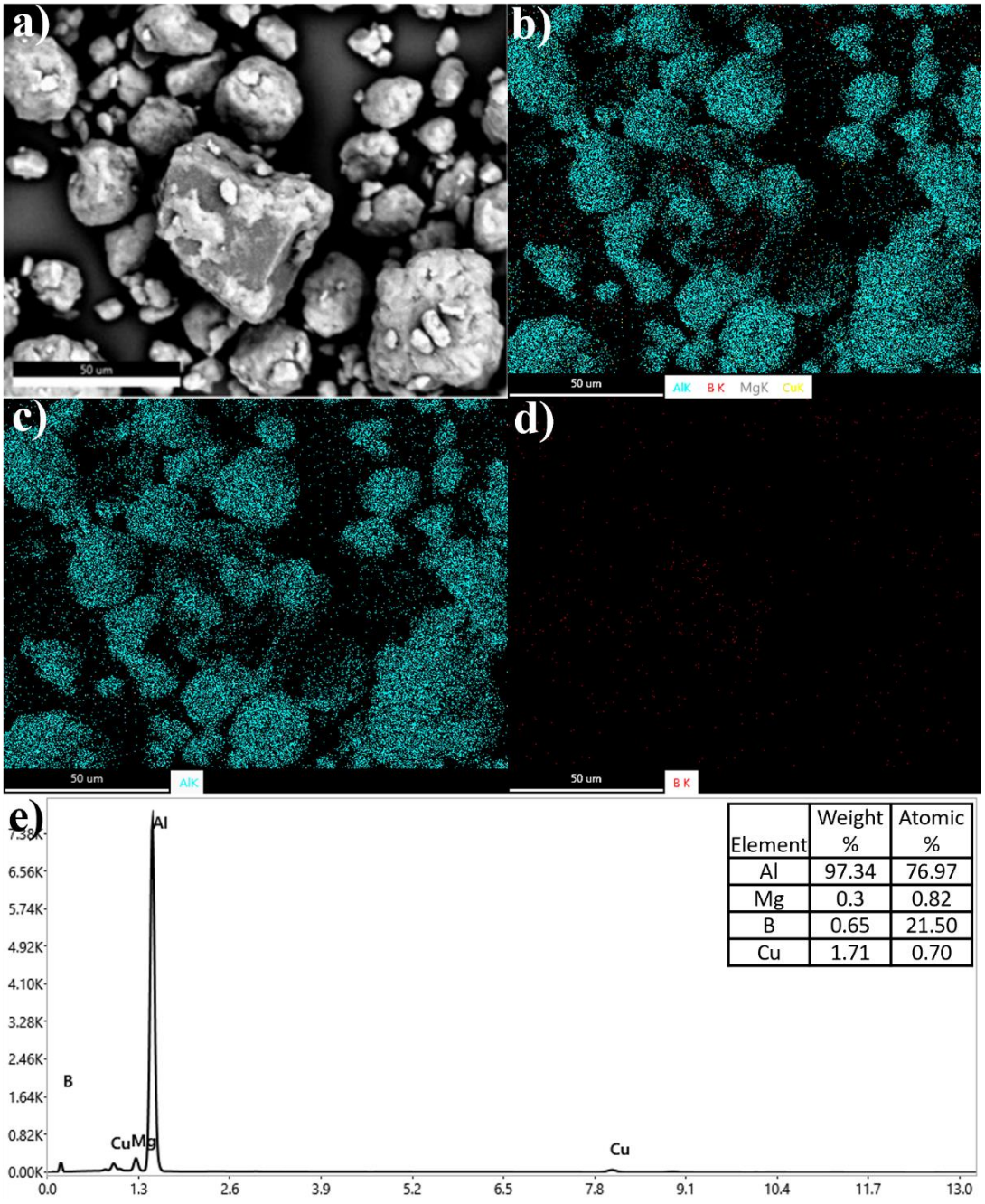
Şekil 69. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 70. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.

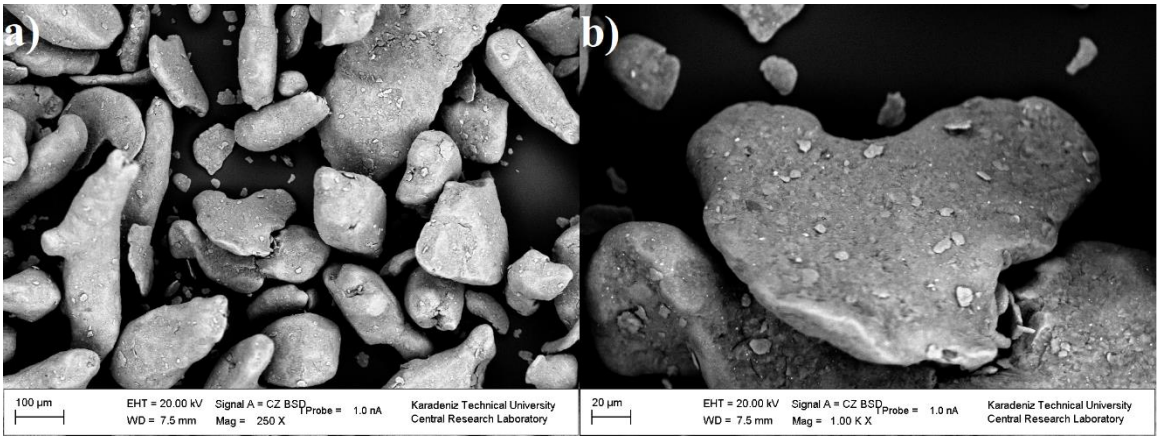


Şekil 71. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.

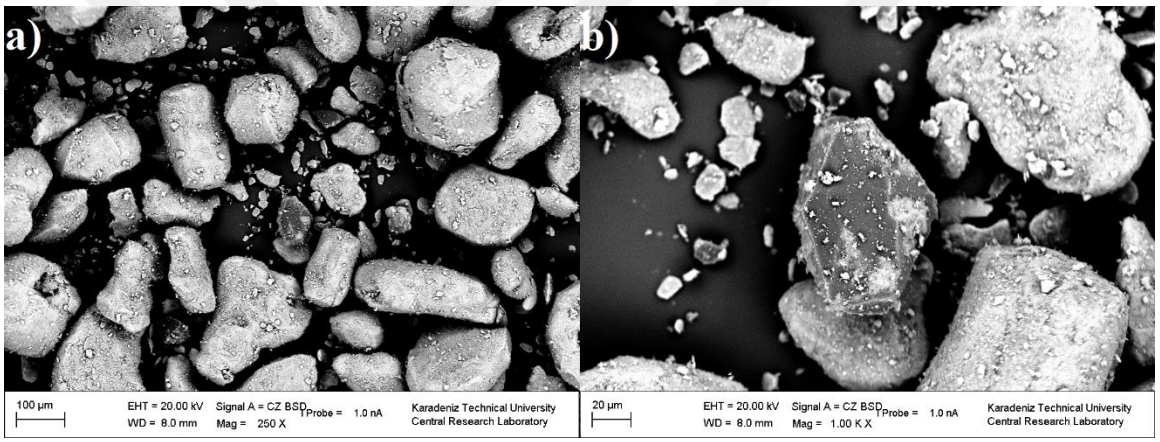


Element	Weight %	Atomic %
Al	97.34	76.97
Mg	0.3	0.82
B	0.65	21.50
Cu	1.71	0.70

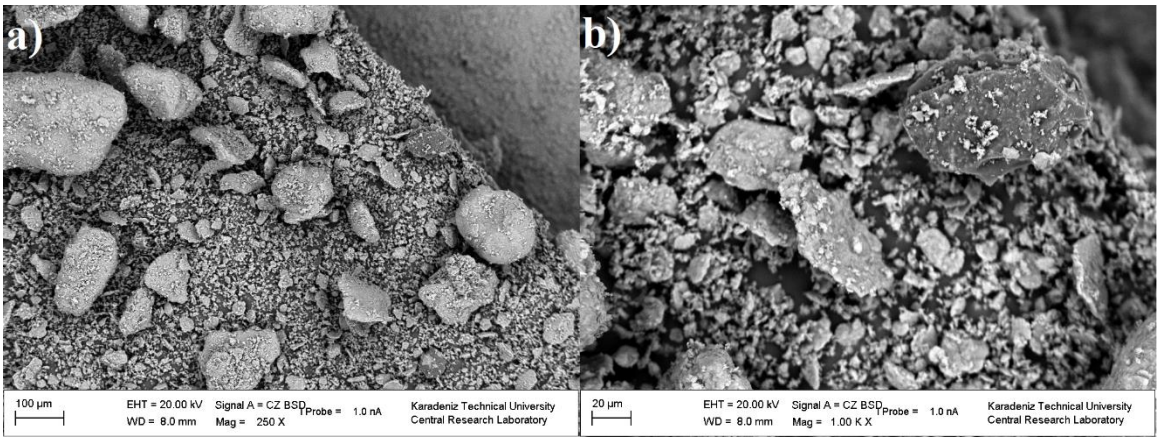
Şekil 72. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



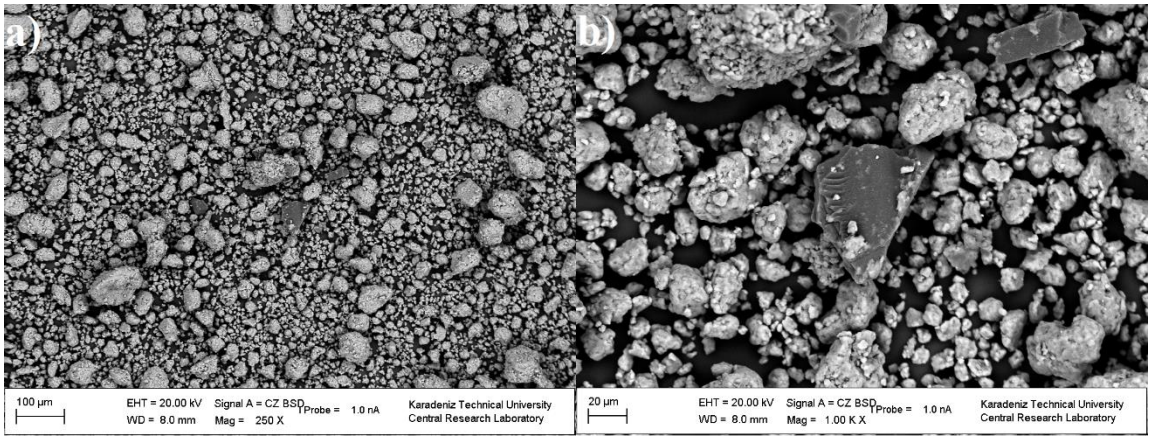
Şekil 73. AA2024-%1 B_4C tozlarının 2 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



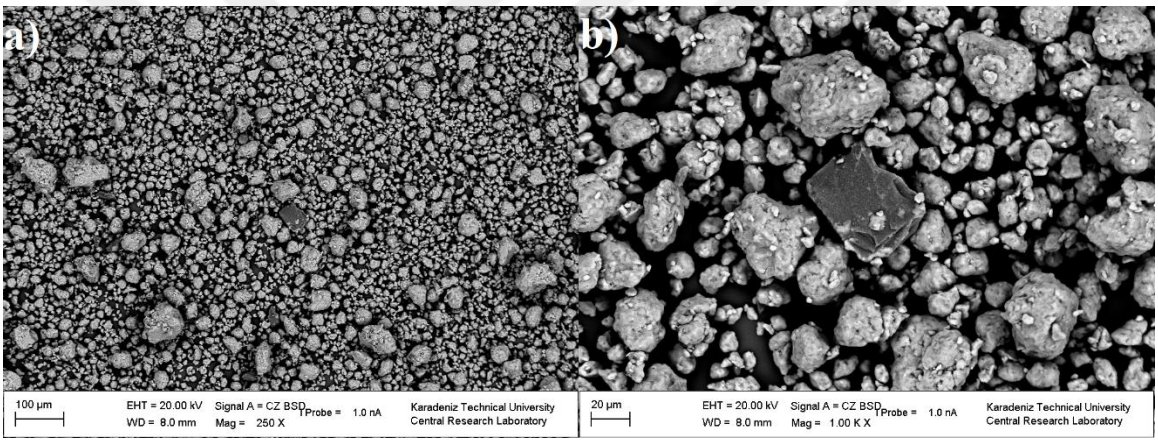
Şekil 74. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



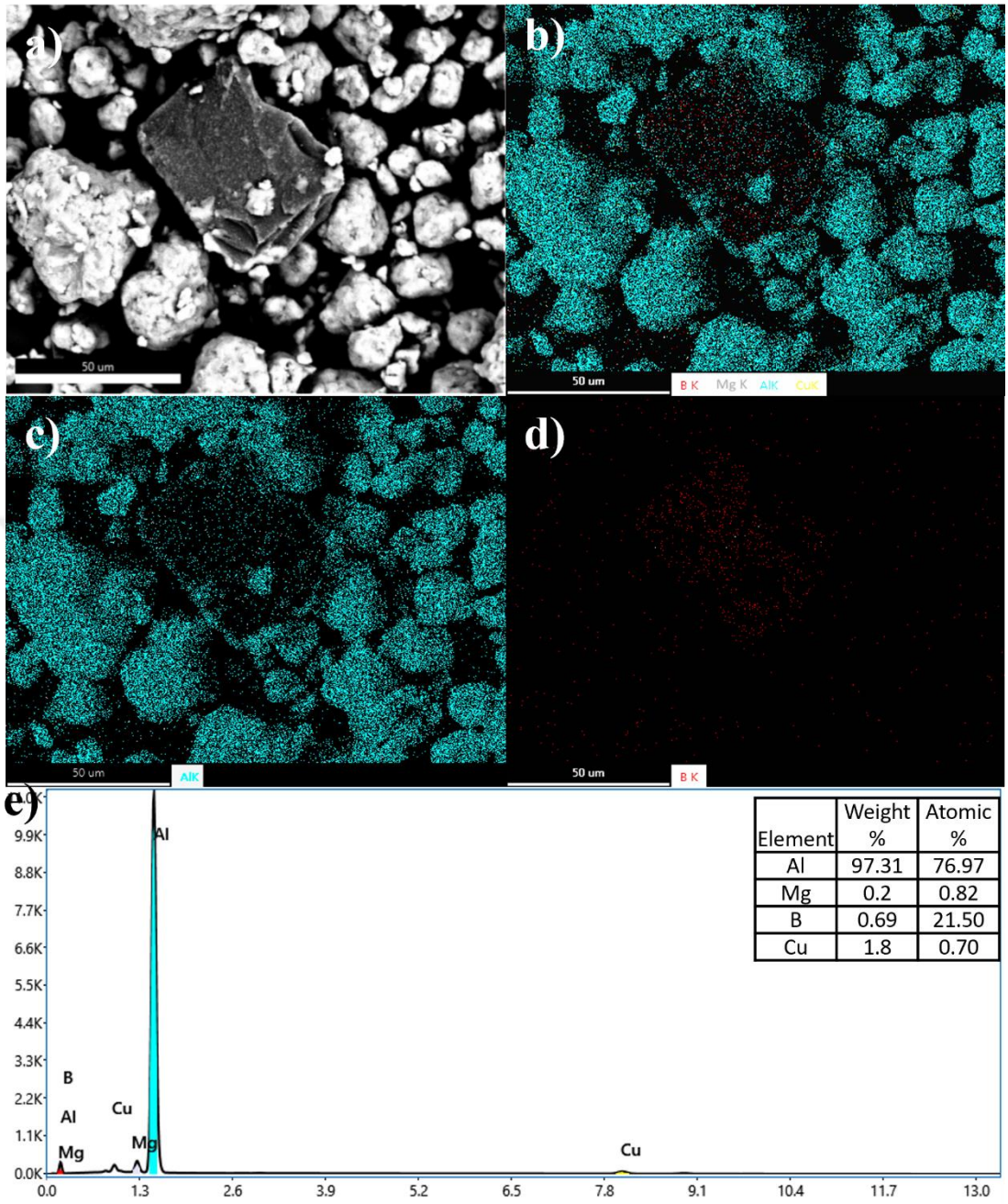
Şekil 75. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



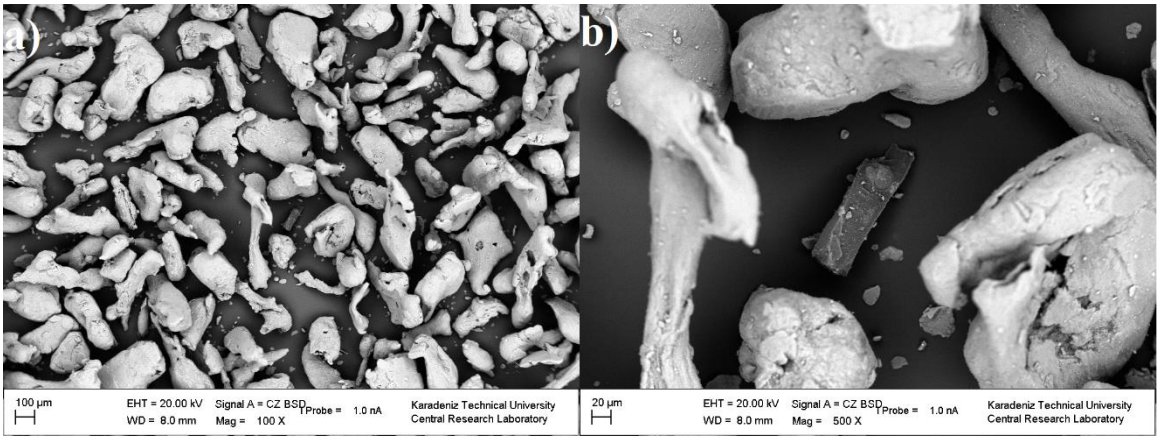
Şekil 76. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



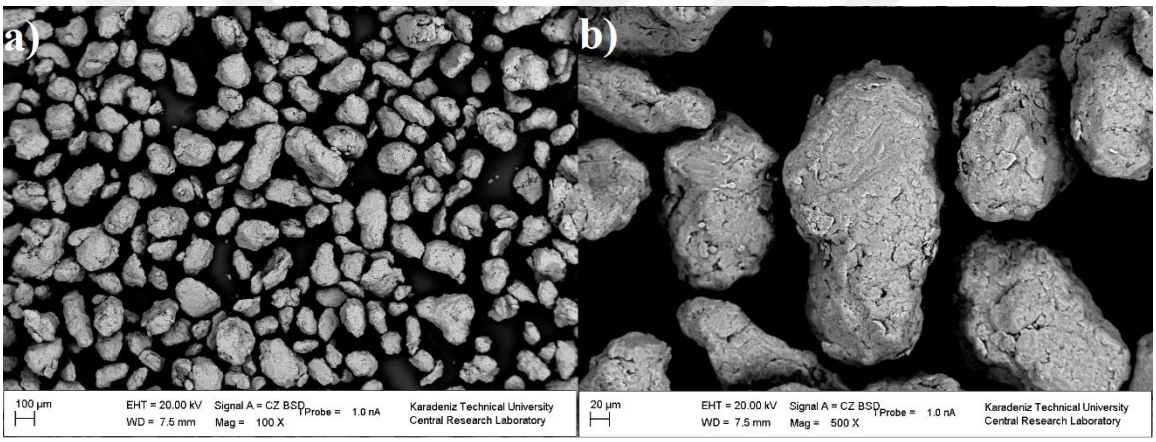
Şekil 77. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



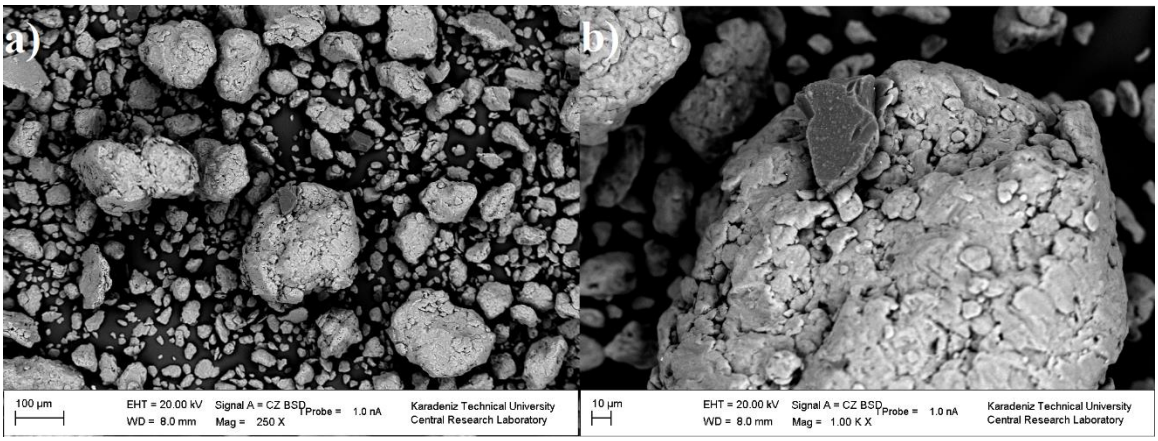
Şekil 78. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Etanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



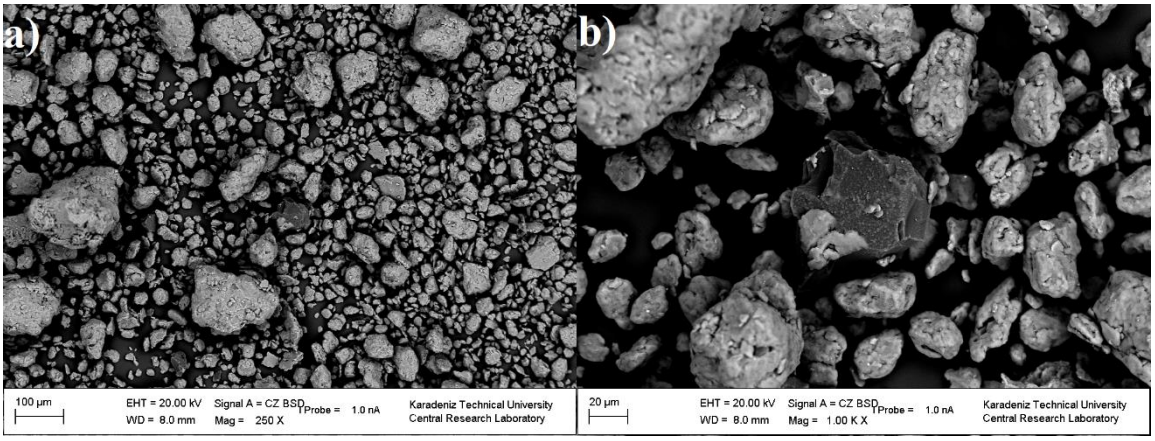
Şekil 79. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



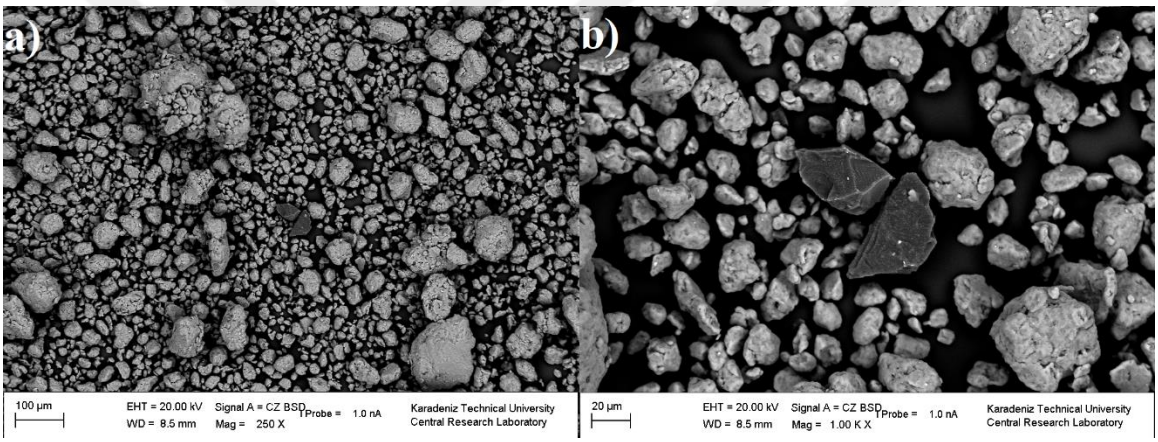
Şekil 80. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 100X büyütmedeki, b)500X büyütmedeki toz morfolojileri.



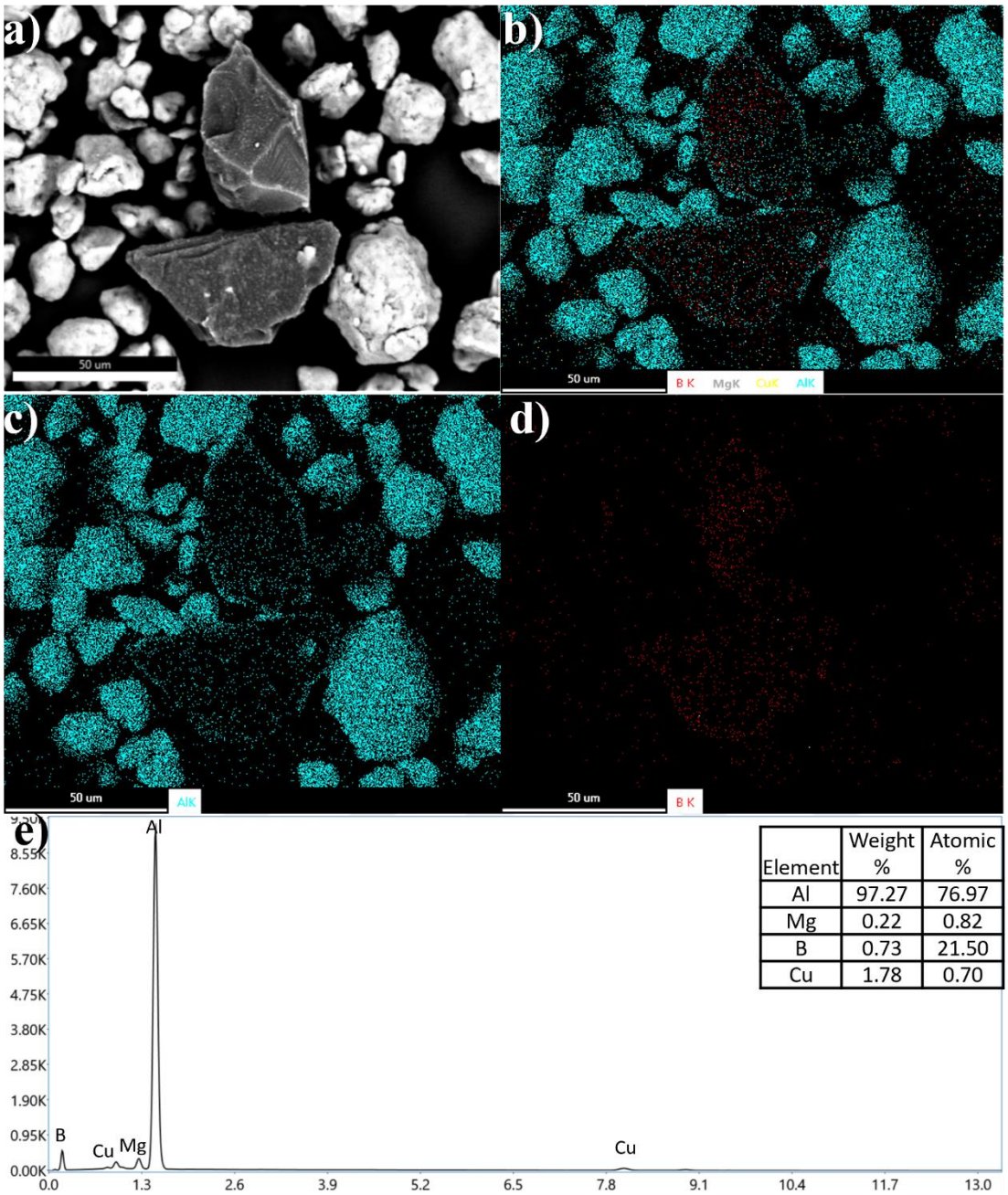
Şekil 81. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 82. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.

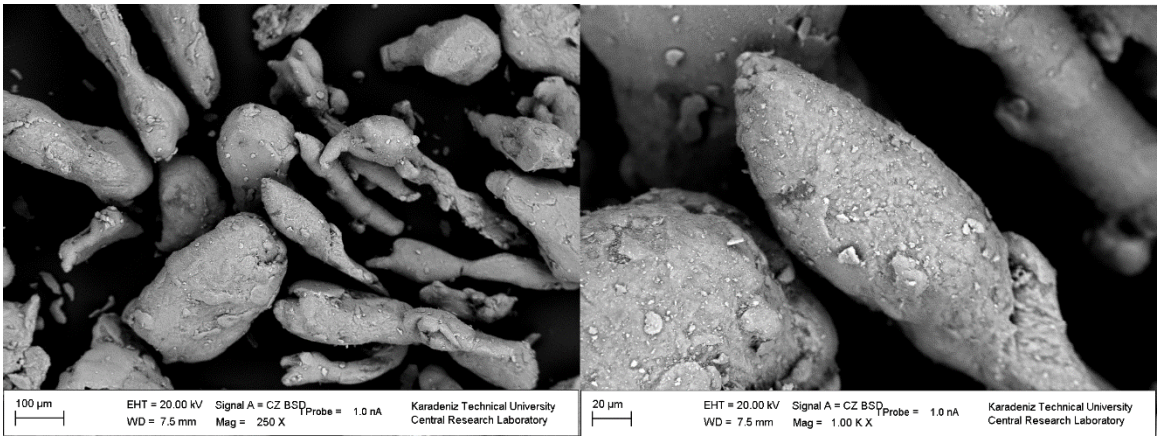


Şekil 83. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.

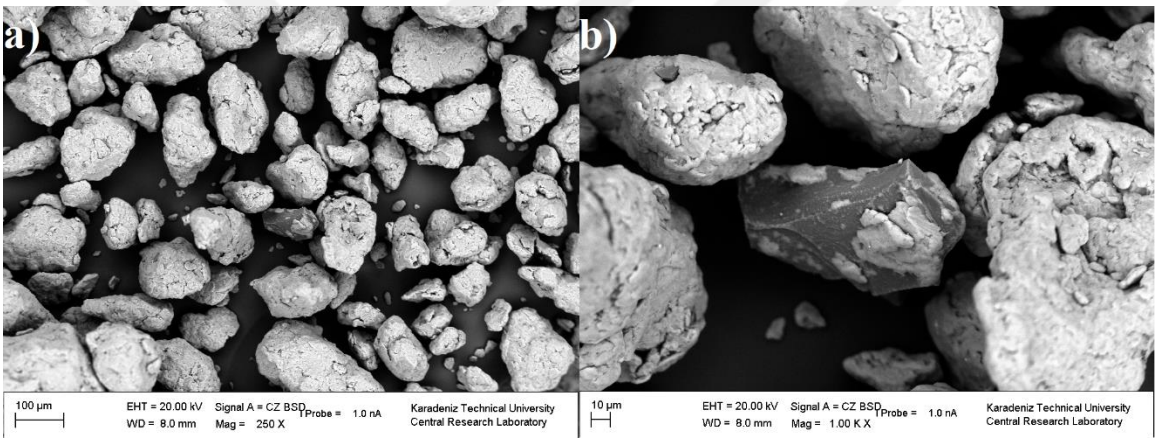


Element	Weight %	Atomic %
Al	97.27	76.97
Mg	0.22	0.82
B	0.73	21.50
Cu	1.78	0.70

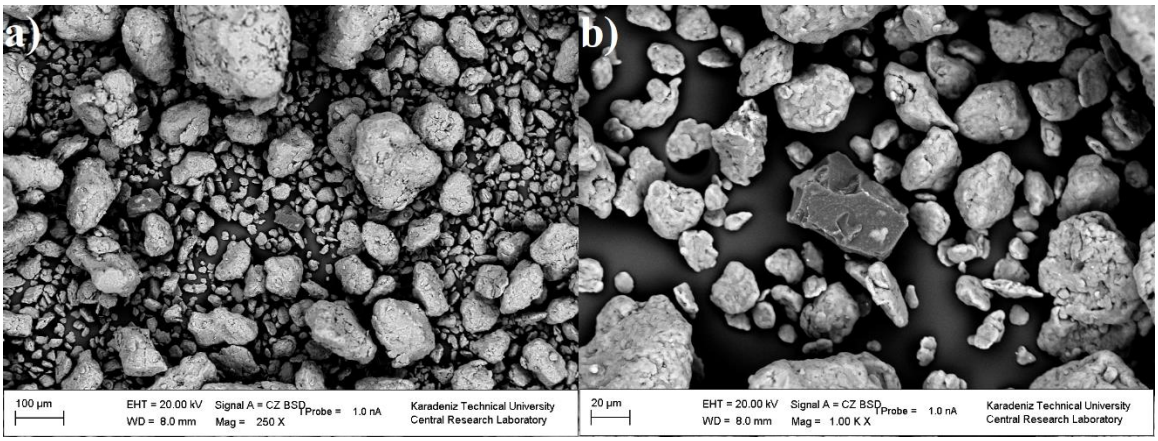
Şekil 84. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Stearik Asit ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



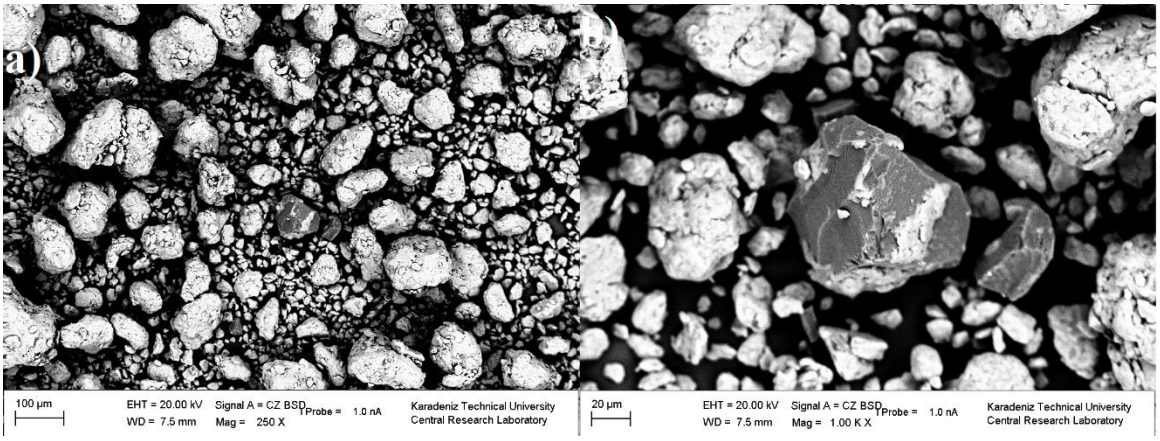
Şekil 85. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



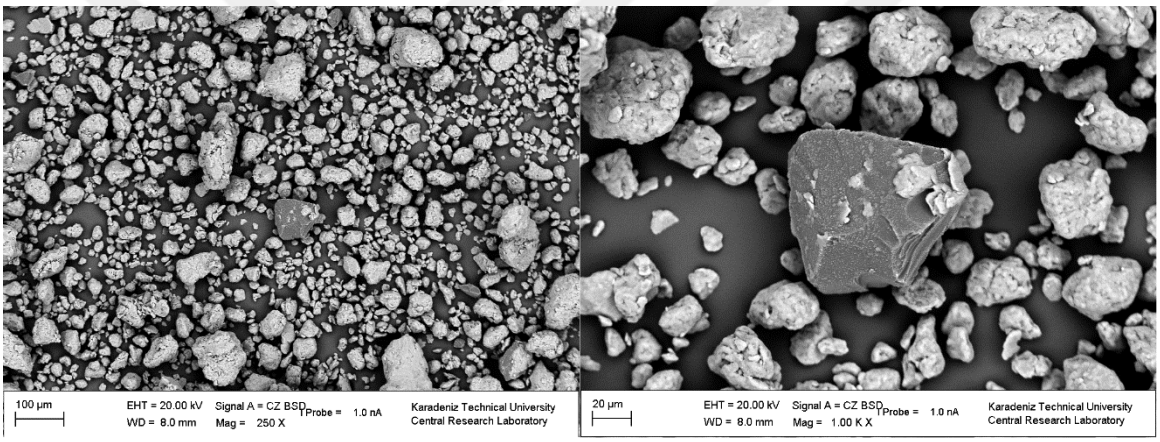
Şekil 86. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



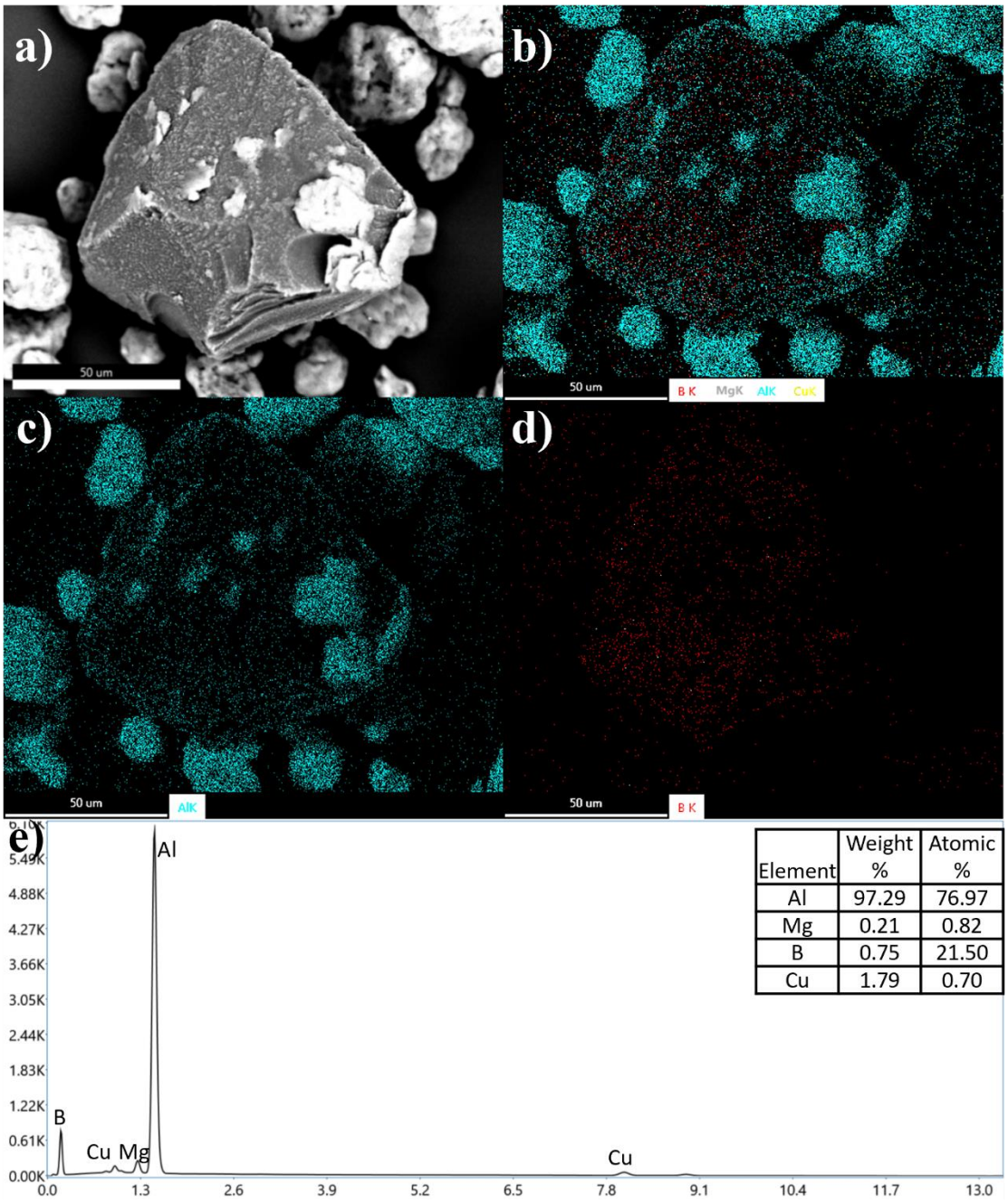
Şekil 87. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 88. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



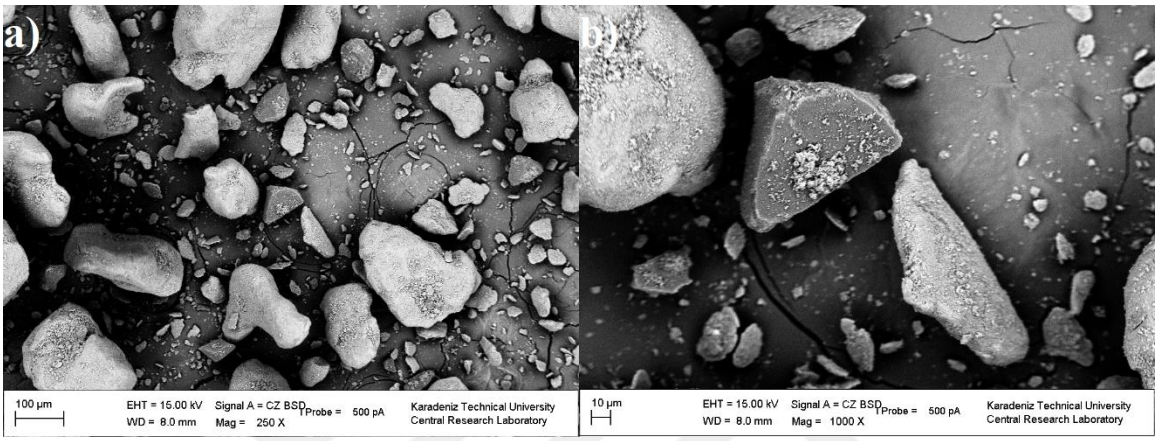
Şekil 89. AA2024-%1 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



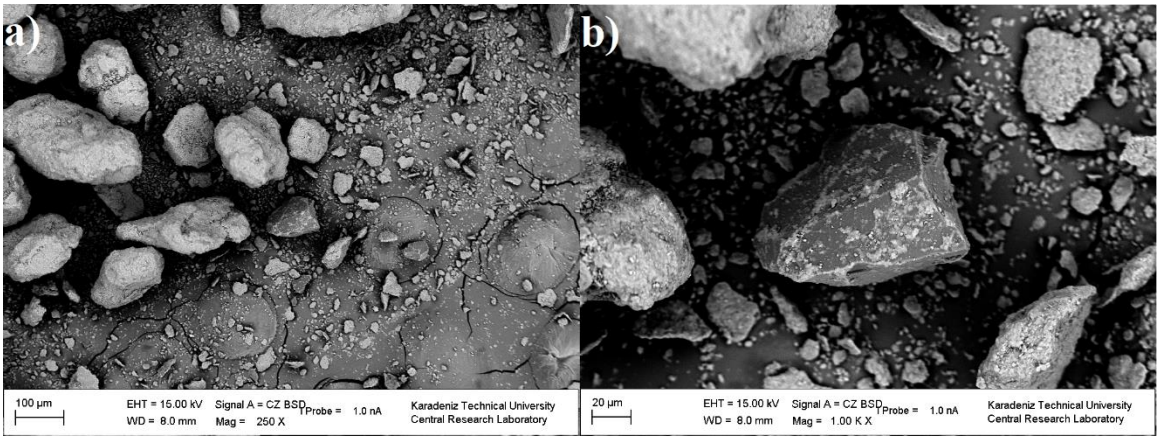
Şekil 90. AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Çinko Stearat ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.

Partikül boyutunun, partikül boyut dağılımının, takviye fazının matris içerisindeki dağılımının homojenliği ve takviye fazının matris içerisine gömülmesinin PCA'nın eklemeli olarak ilave edildiği 20 saatlik rejimde Metanol ilavesi ile öğütülen kompozit tozlarında en iyi olduğundan, bundan dolayı 2. Grup kompozitlerin devamı olarak belirlenen ve sırasıyla ağırlıkça farklı oranlarda B_4C takviyeli AA2024 matrisli kompozit tozları eklemeli şekilde

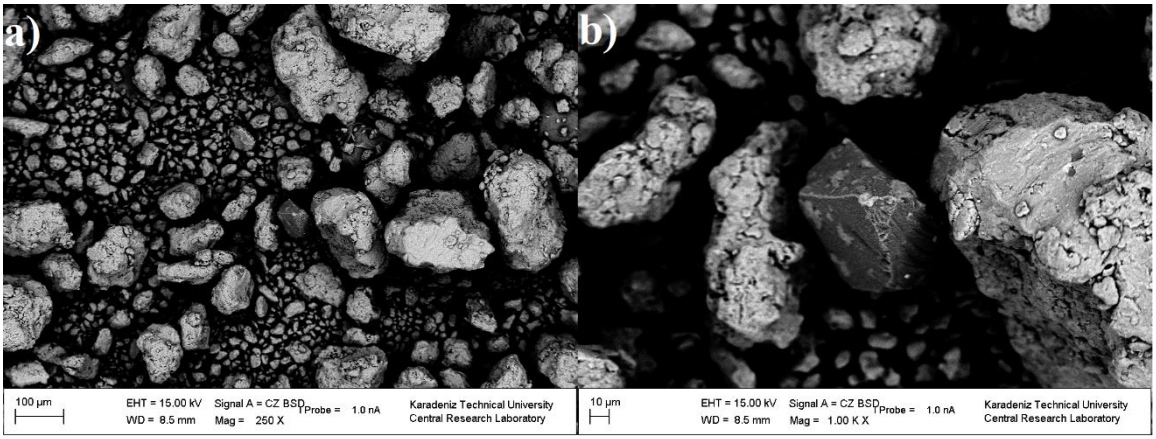
Metanol ilavesi ile 20 saat boyunca öğütülmesiyle üretilmiştir. Ağırlıkça %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 B_4C takviyeli AA2024 alaşımı matrisli kompozit tozlarının öğütme başlangıcında ağ.%2 ve 2. saatte, 4. saatte, 10. saatte ve 14. saatte ağ. %0.5 olacak şekilde toplamda ağ.%4 oranında eklemeli Metanol ilavesiyle 20 saatlik öğütmesi esnasında 2, 4, 10, 14 ve 18. öğütme saatlerinde alınan toz numunelerinin morfolojik incelemelerine ait görüntüler aşağıda verilmiştir.



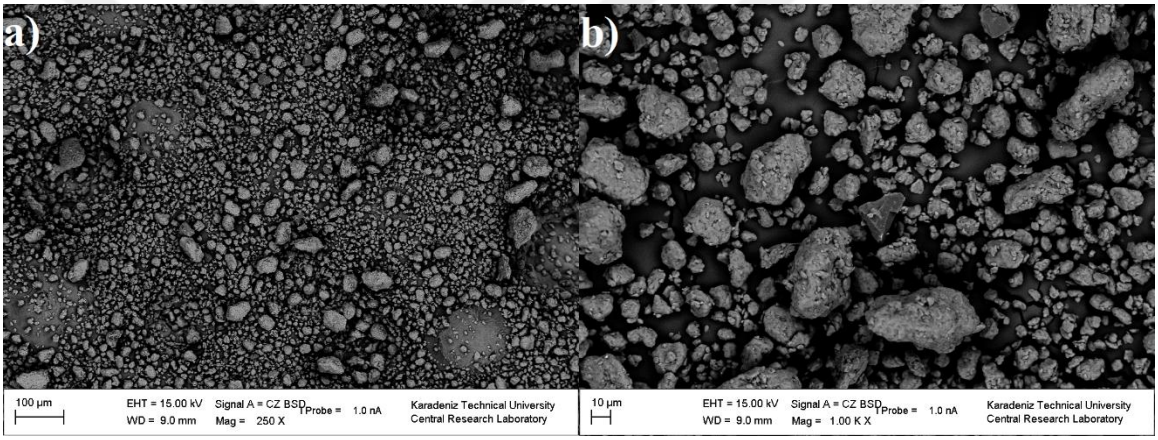
Şekil 91. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



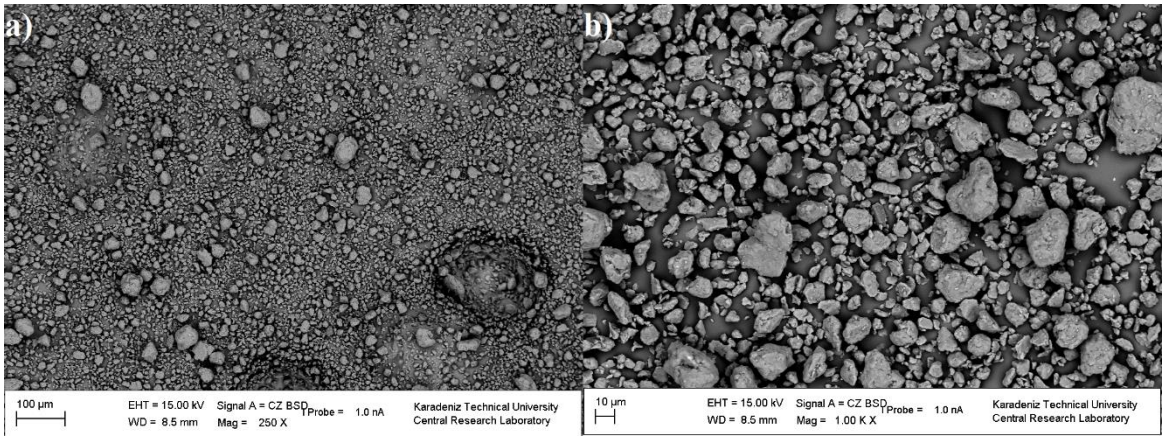
Şekil 92. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



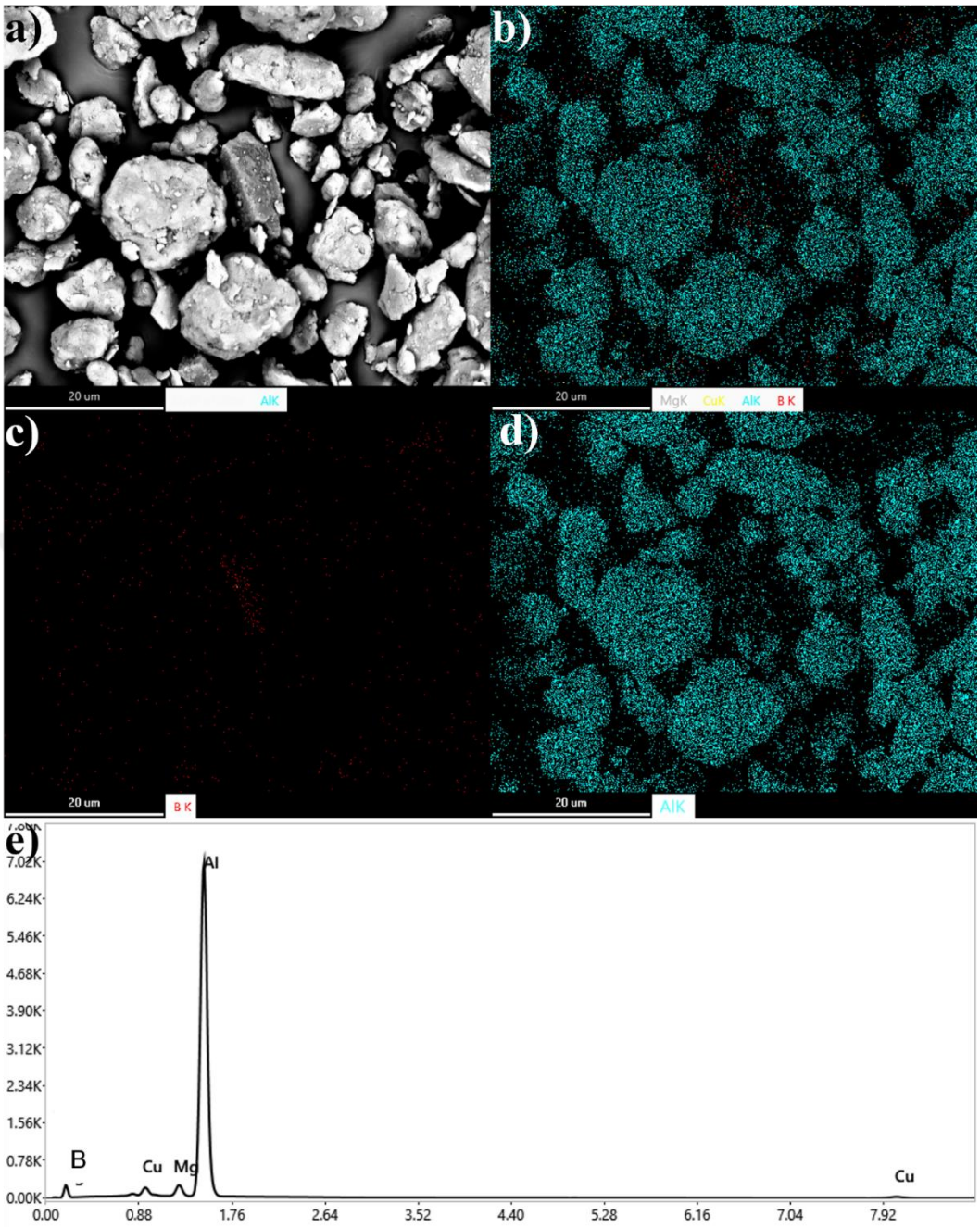
Şekil 93. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



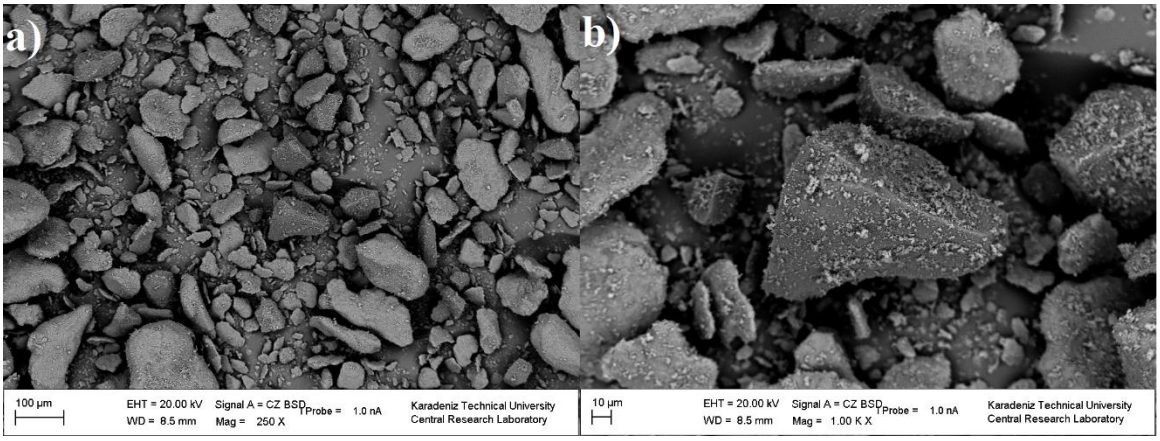
Şekil 94. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



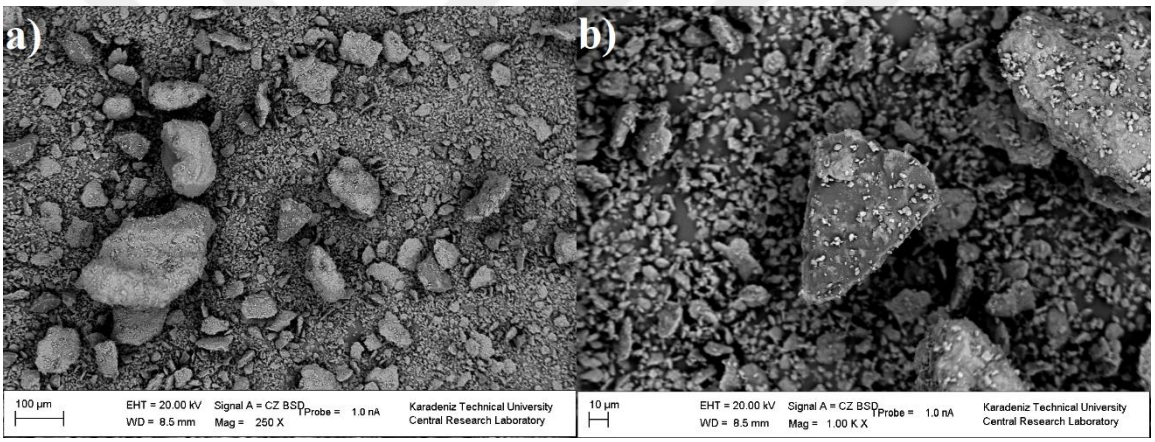
Şekil 95. AA2024-%2 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



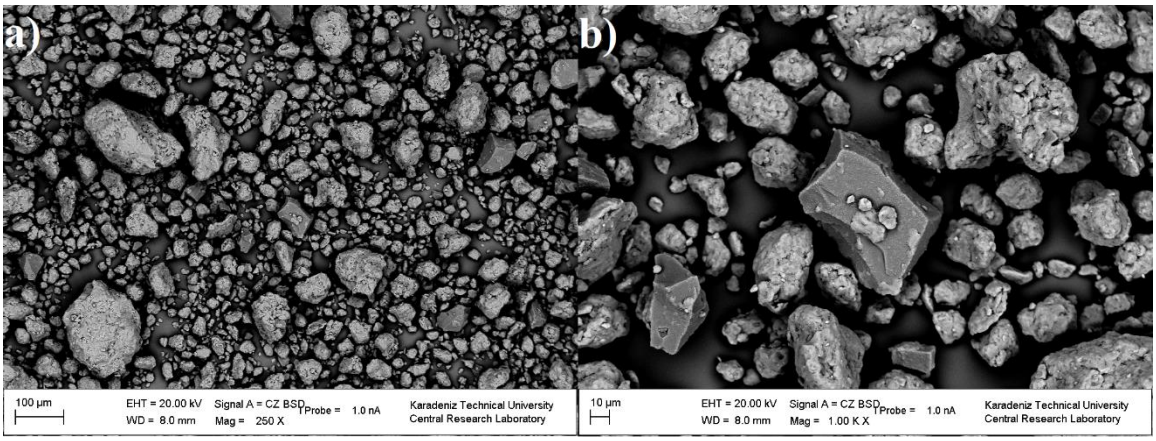
Şekil 96. AA2024-%2 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



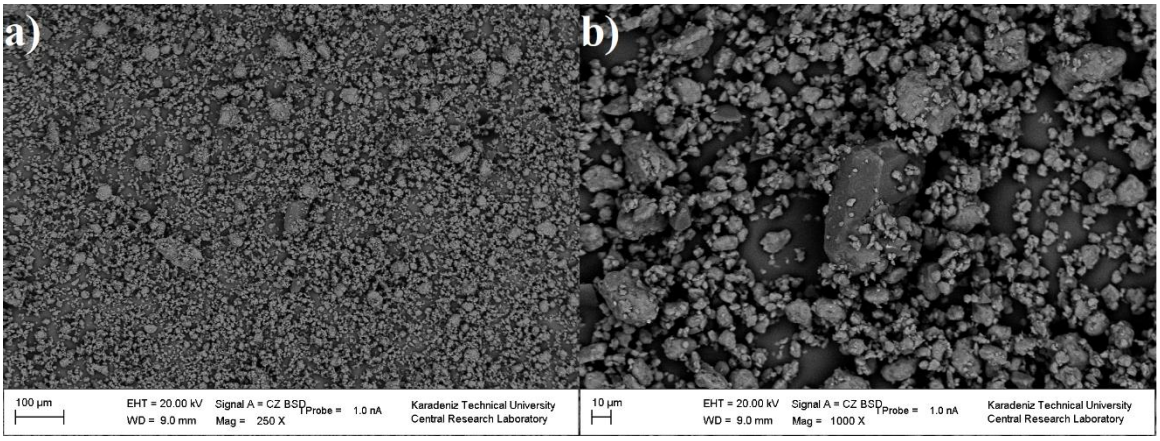
Şekil 97. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



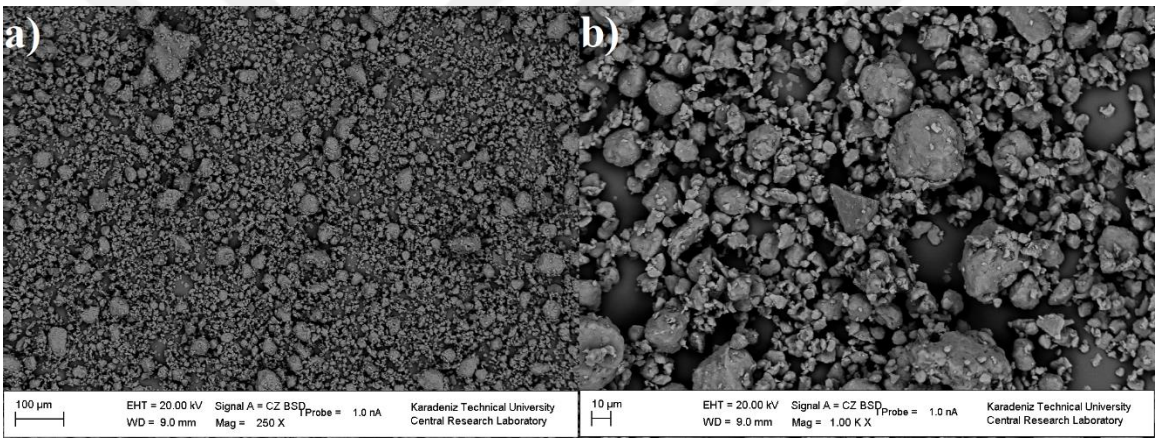
Şekil 98. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



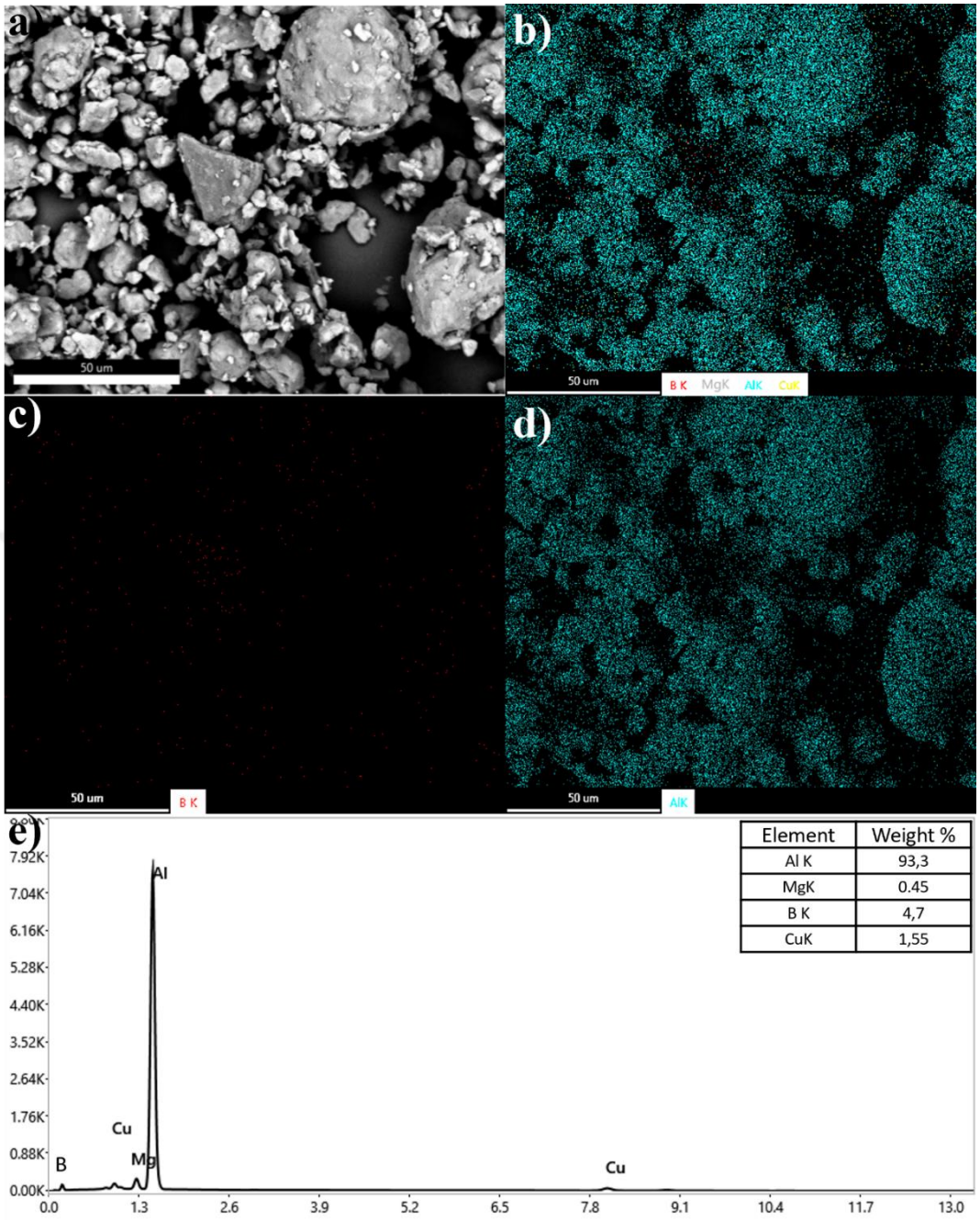
Şekil 99. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



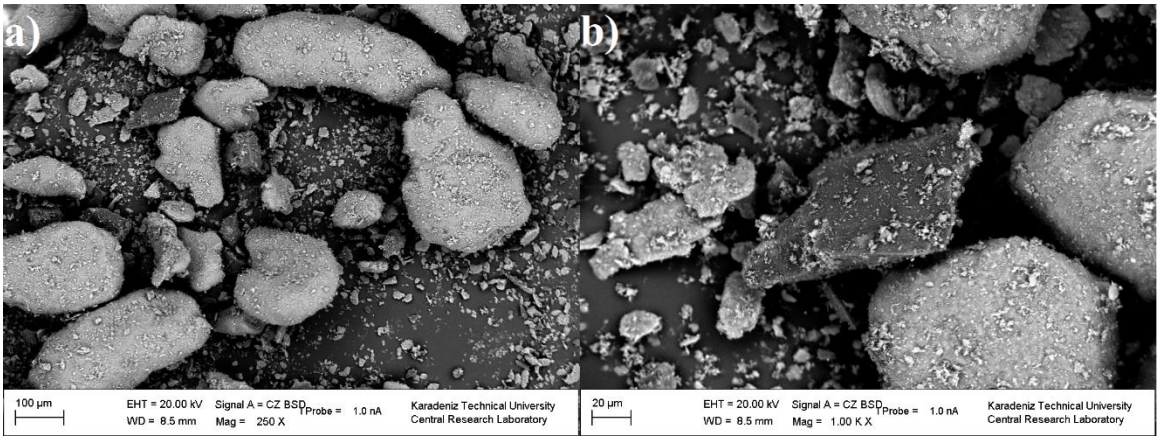
Şekil 100. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



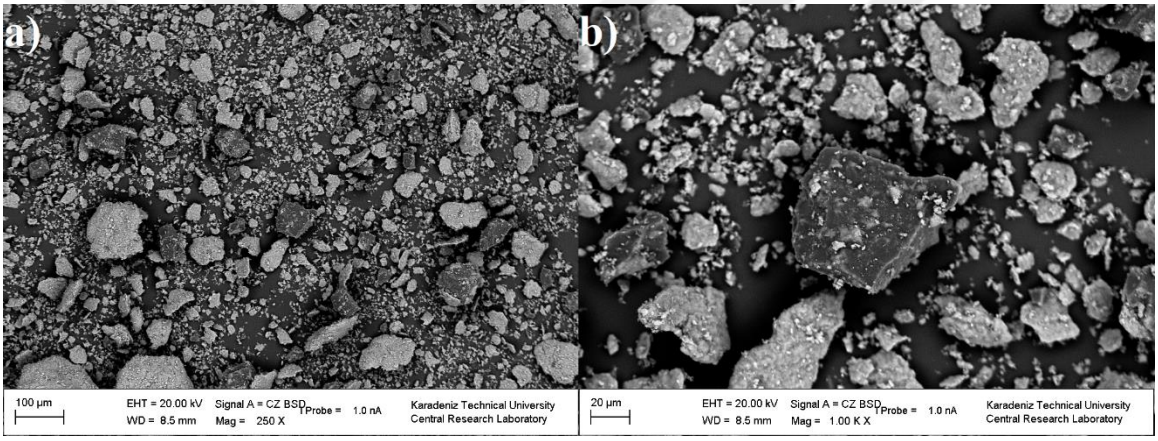
Şekil 101. AA2024-%5 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



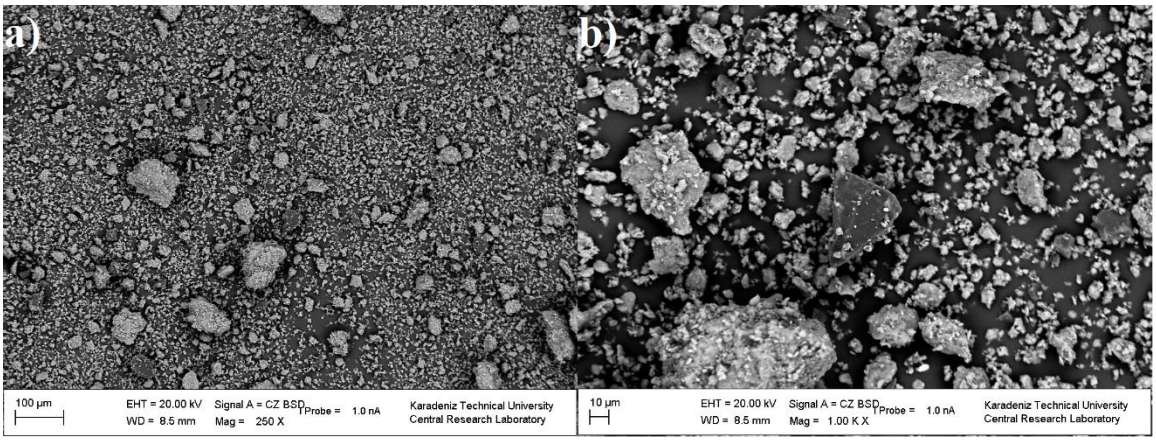
Şekil 102. AA2024-%5 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



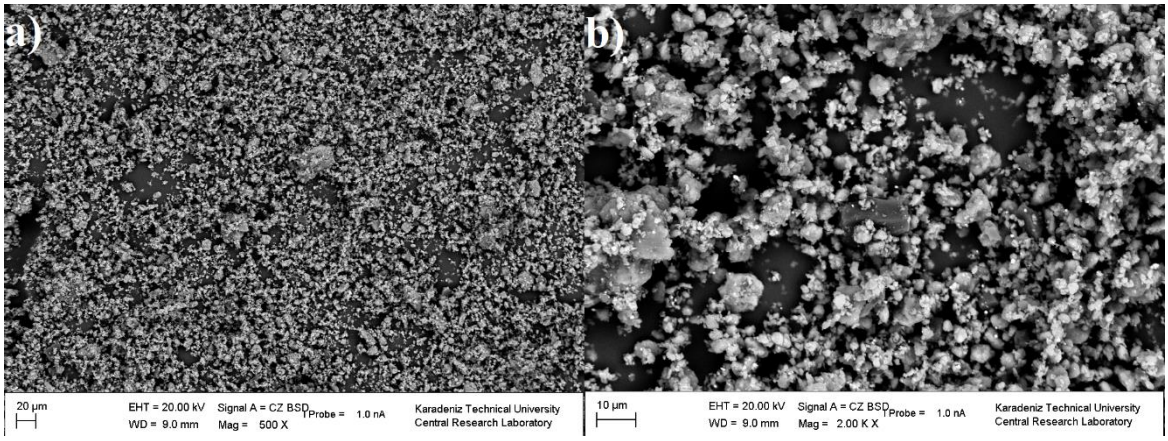
Şekil 103. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



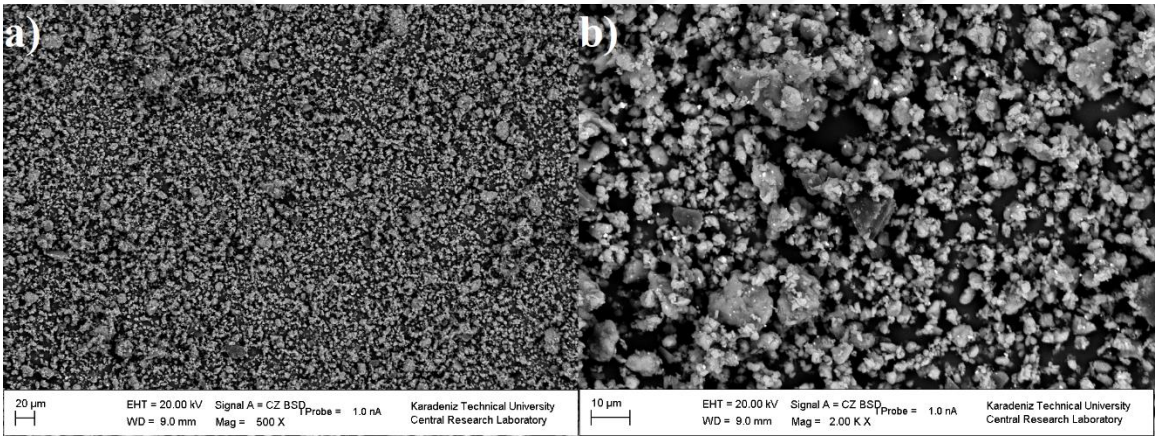
Şekil 104. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



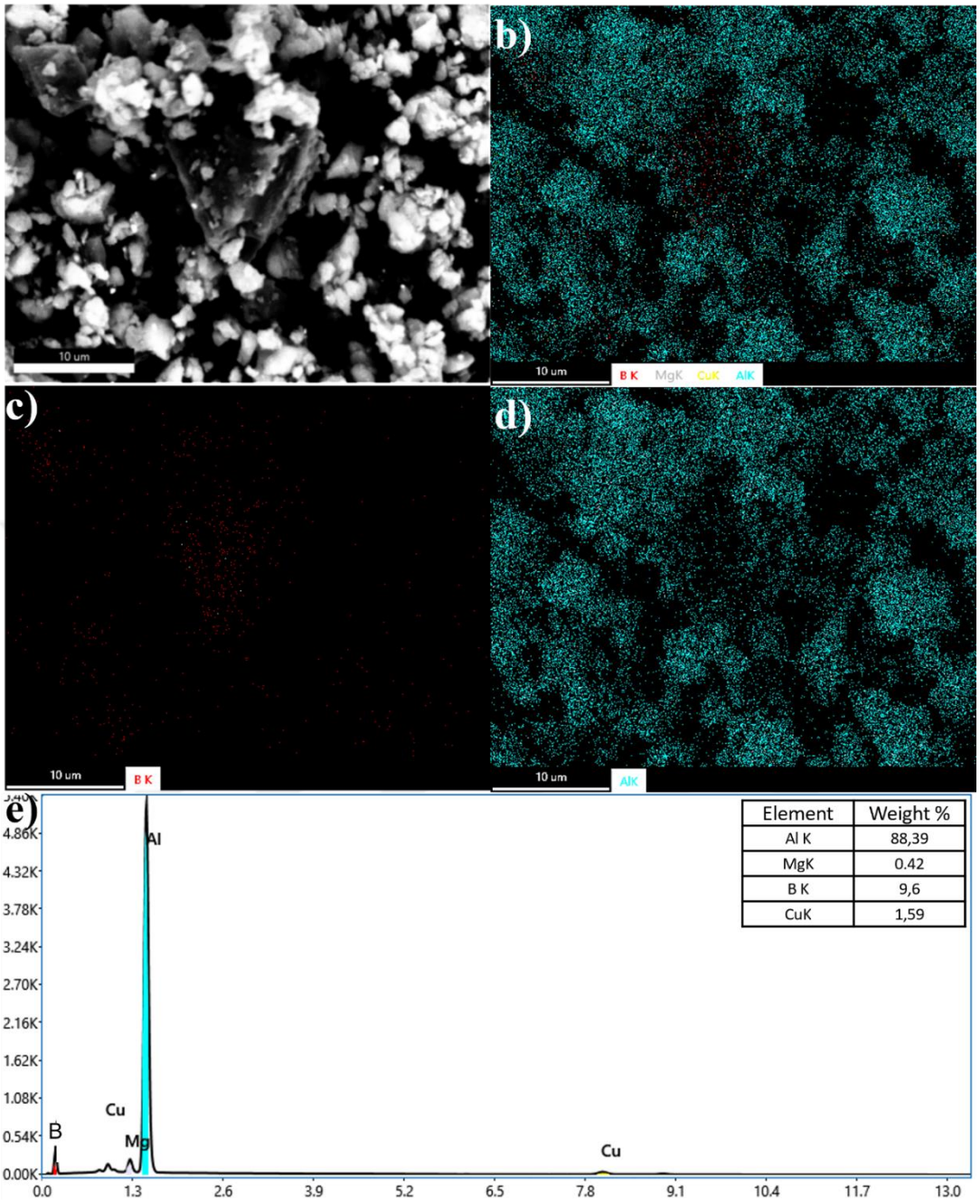
Şekil 105. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



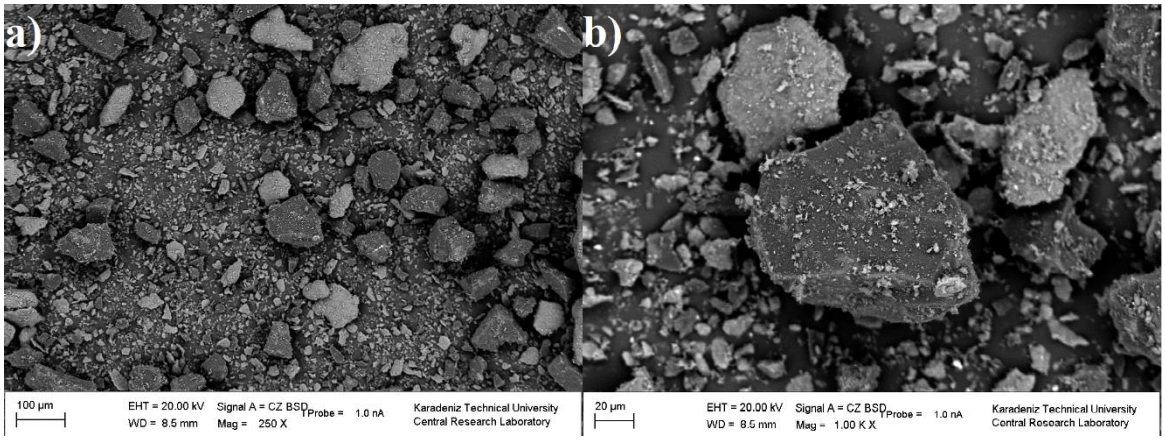
Şekil 106. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri.



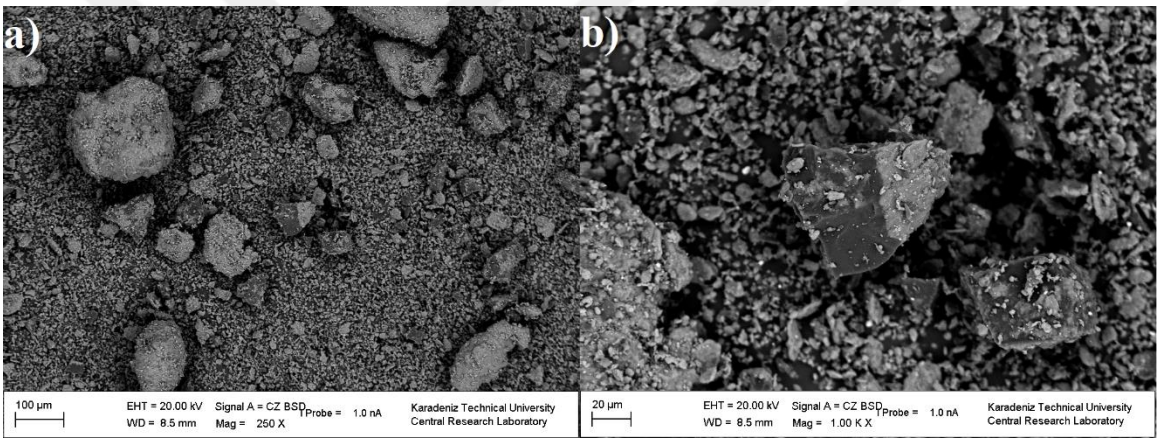
Şekil 107. AA2024-%10 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri.



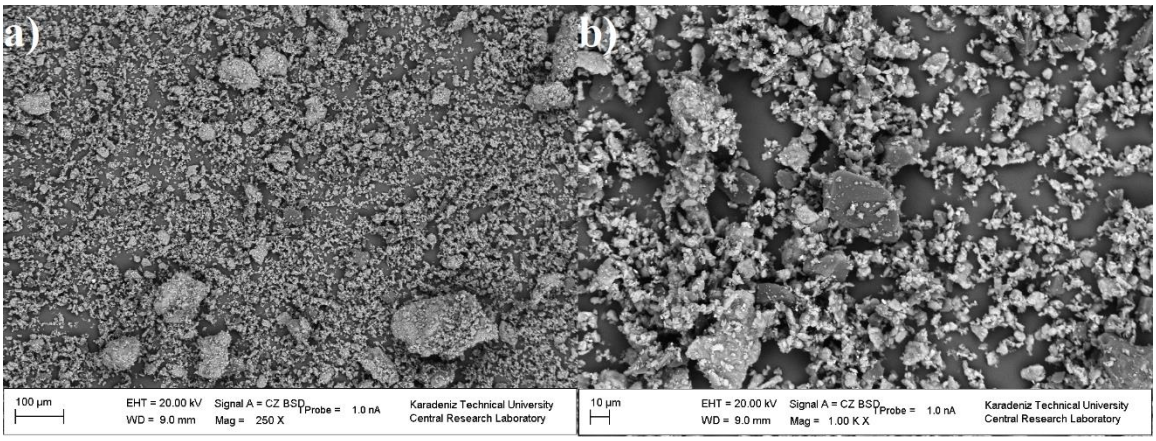
Şekil 108. AA2024-%10 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



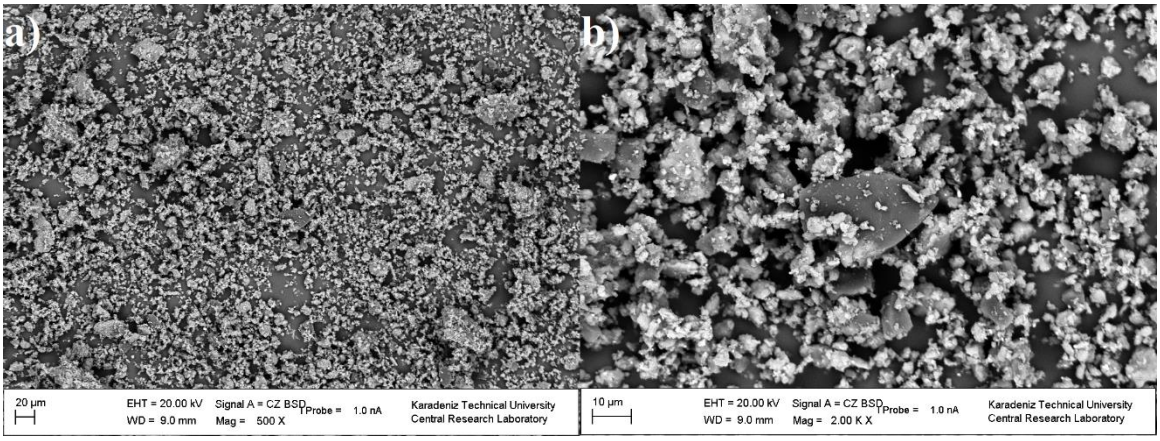
Şekil 109. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



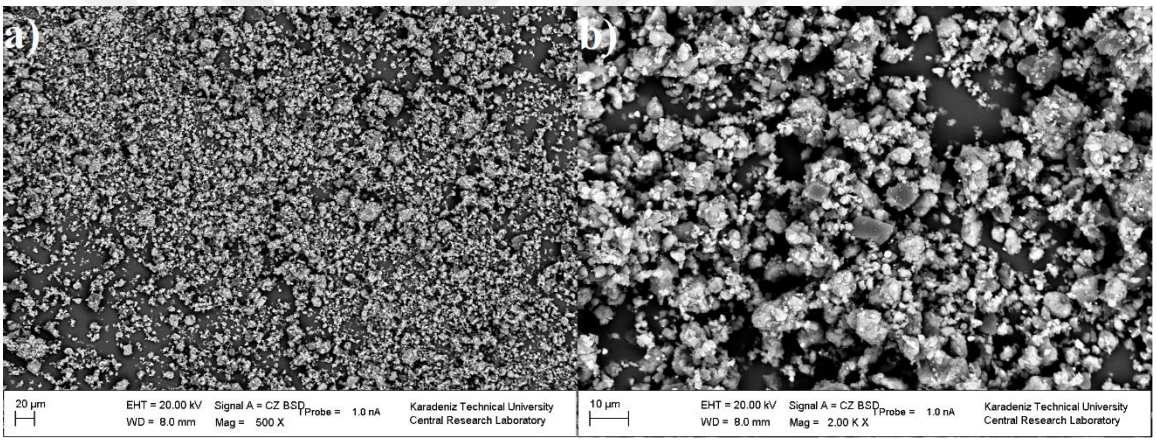
Şekil 110. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



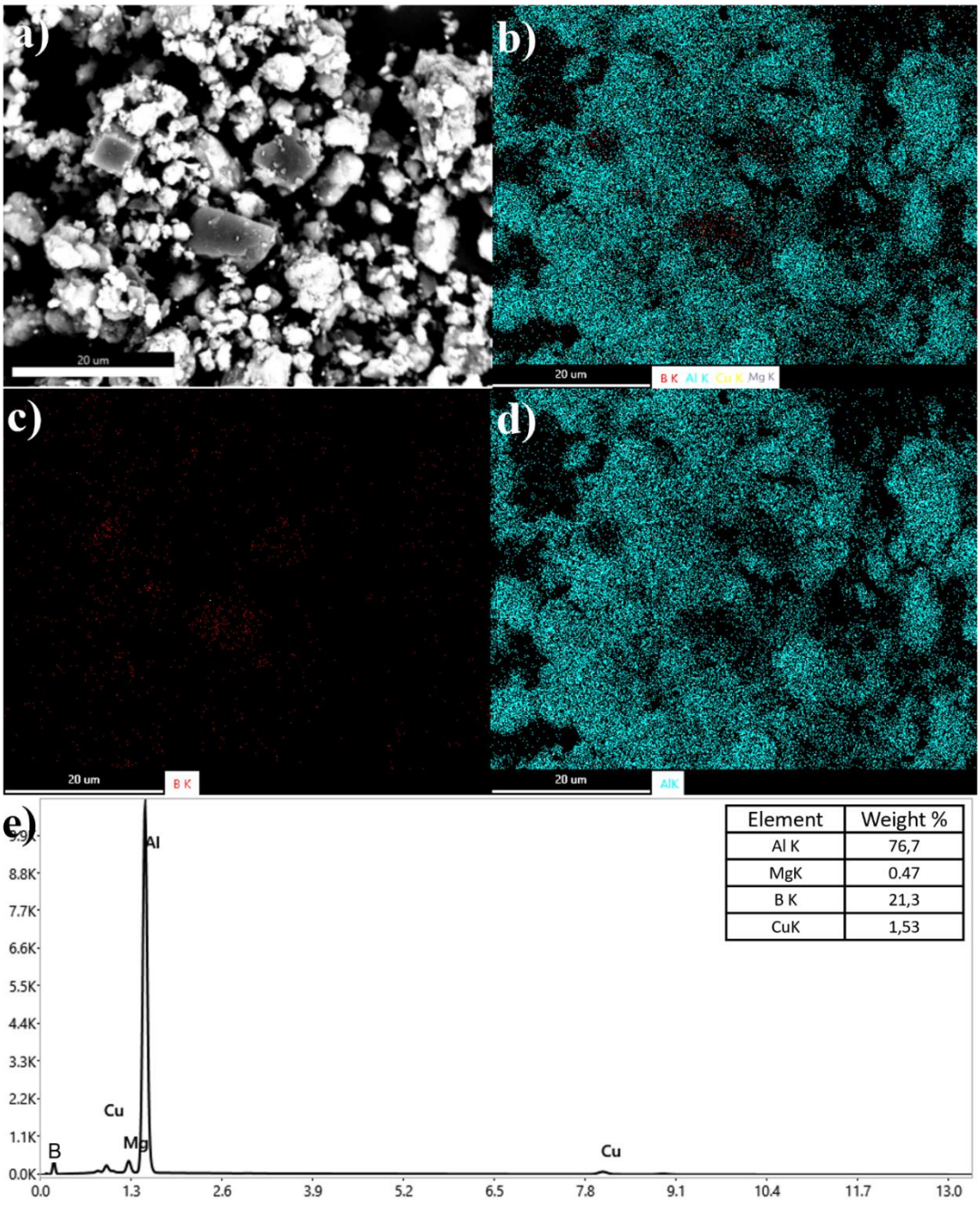
Şekil 111. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



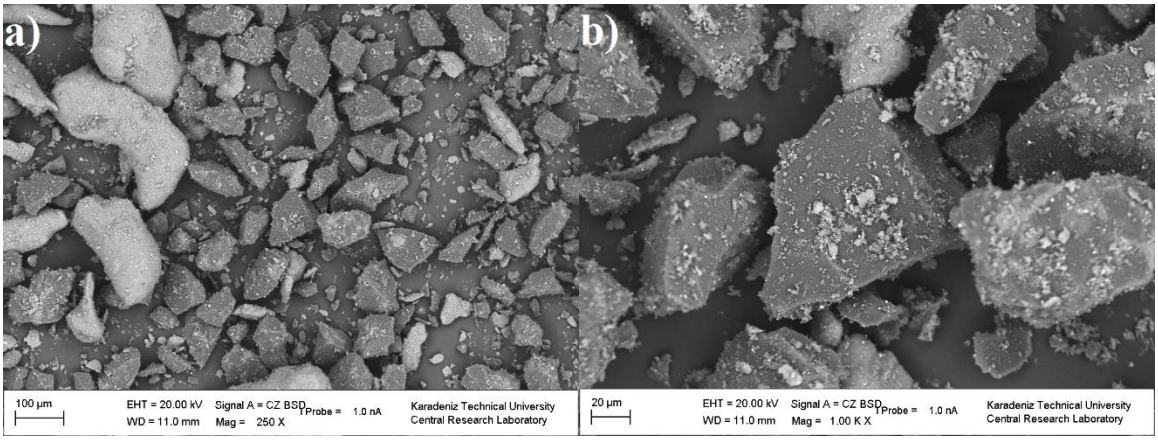
Şekil 112. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri.



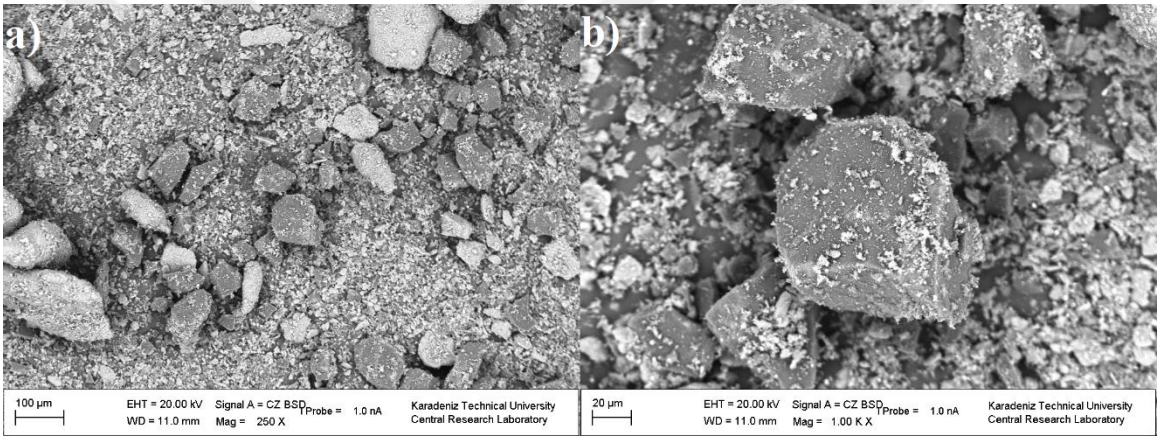
Şekil 113. AA2024-%20 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 500X büyütmedeki, b)2000X büyütmedeki toz morfolojileri.



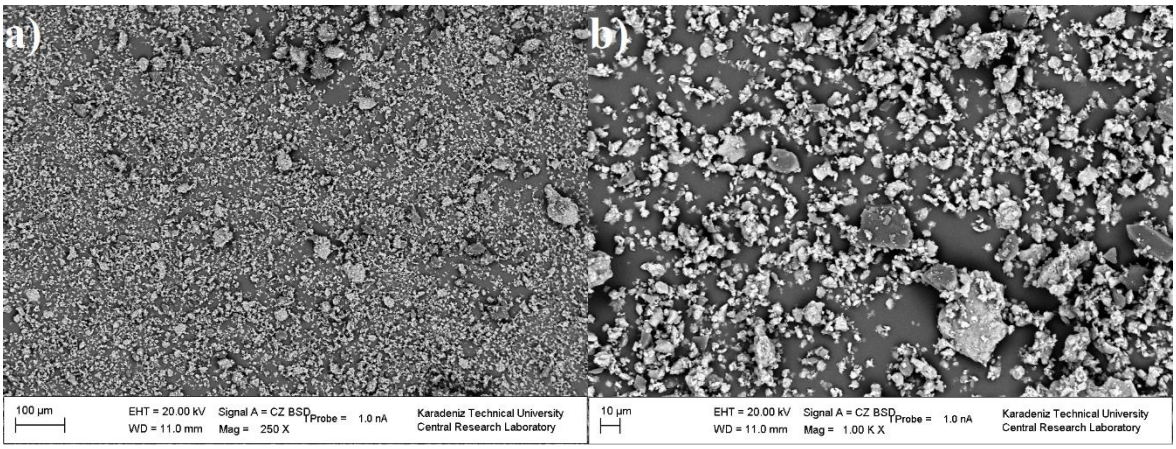
Şekil 114. AA2024-%20 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



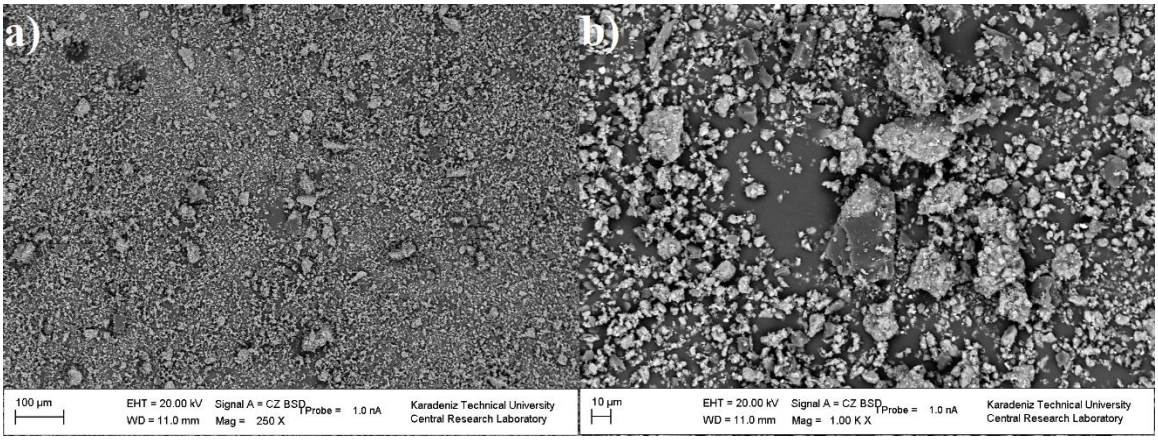
Şekil 115. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



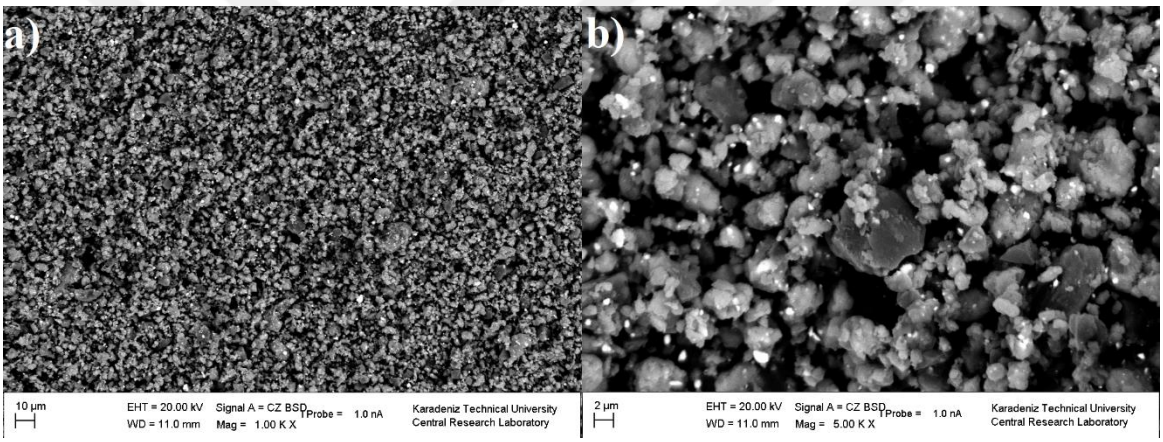
Şekil 116. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b)1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



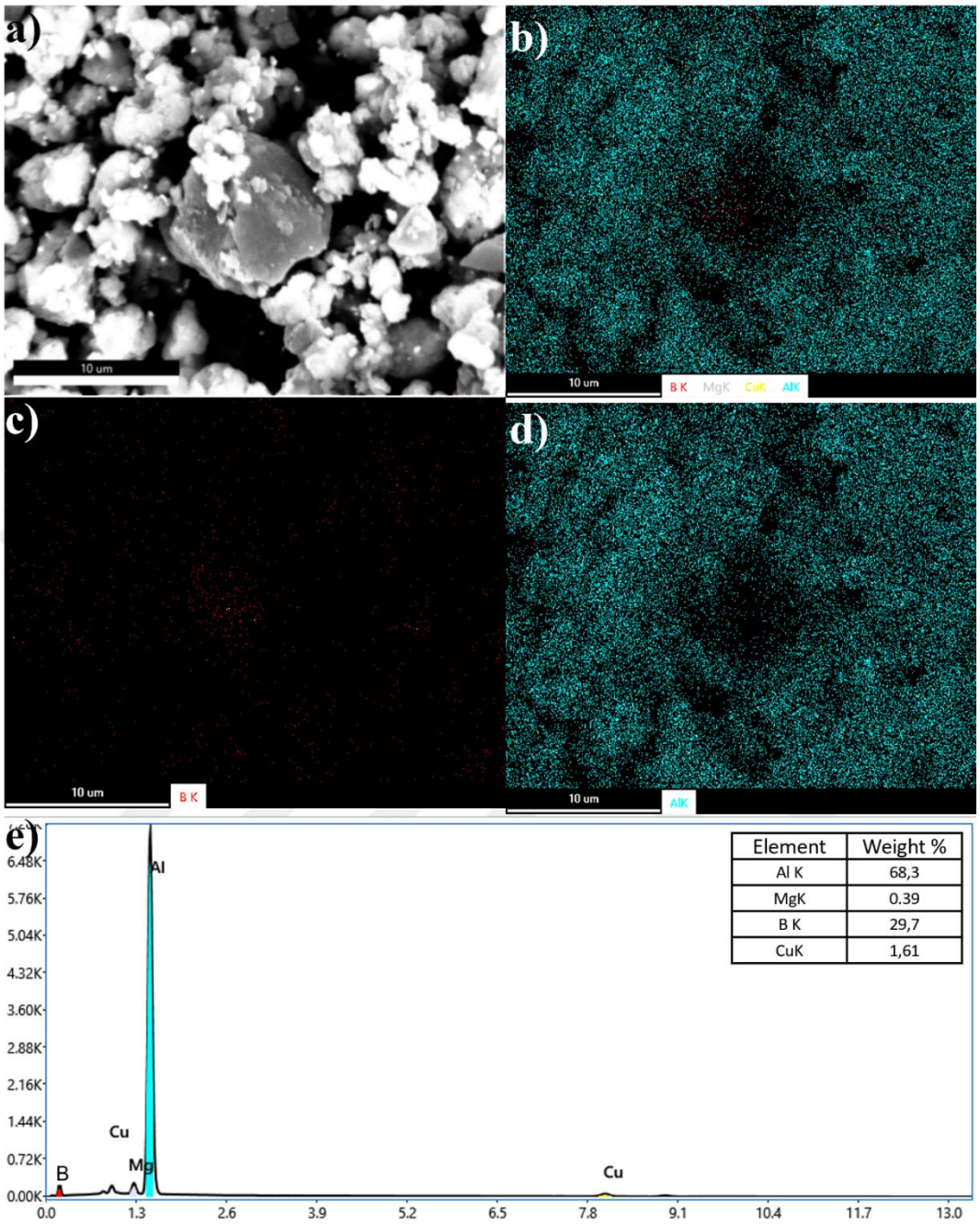
Şekil 117. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b) 1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



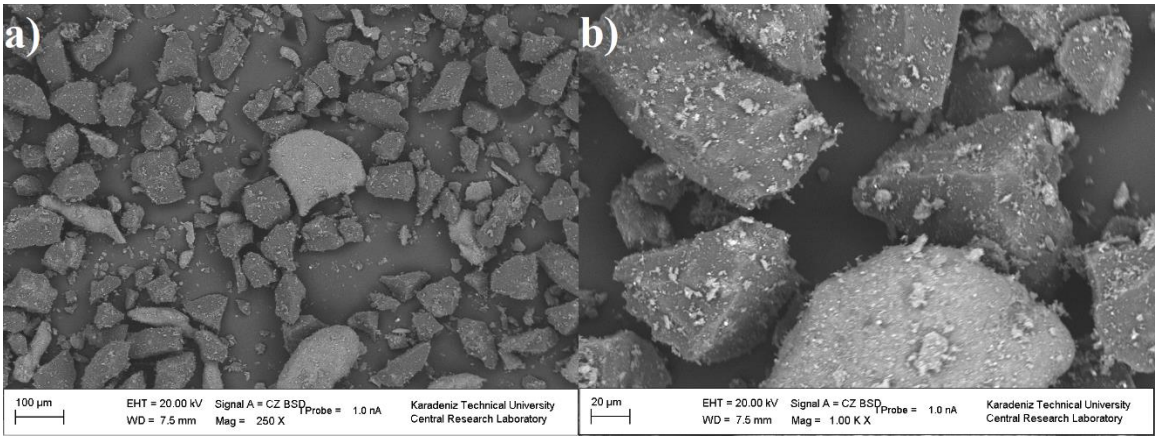
Şekil 118. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 250X büyütmedeki, b) 1000X büyütmedeki toz morfolojileri.



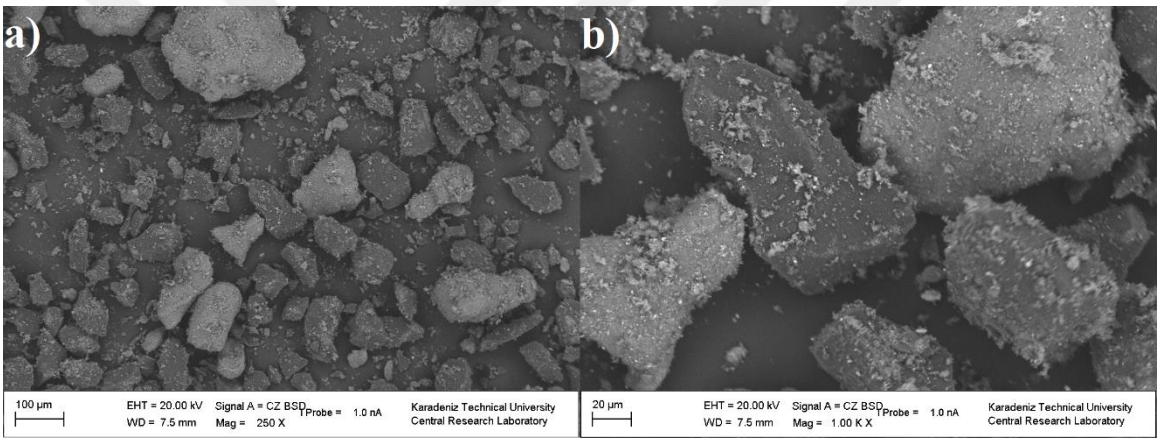
Şekil 119. AA2024-%30 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri.



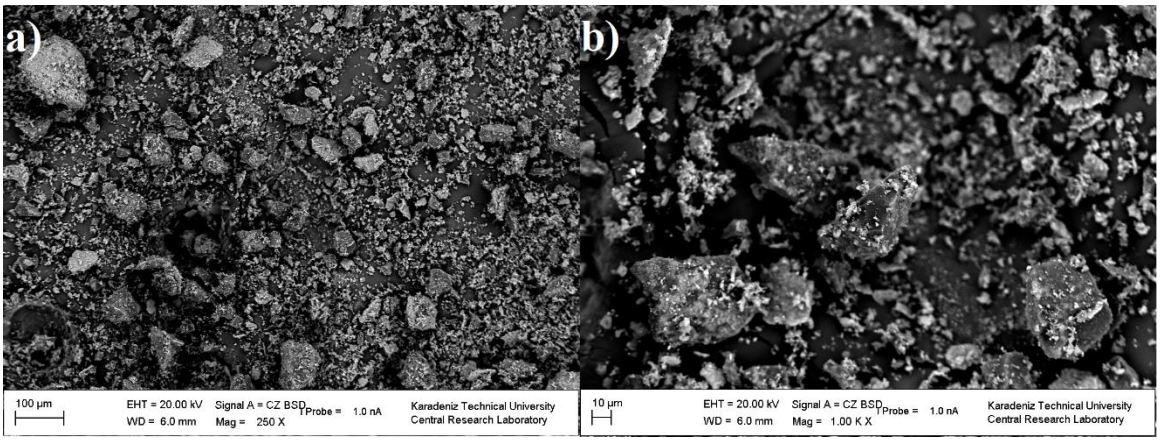
Şekil 120. AA2024-%30 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.



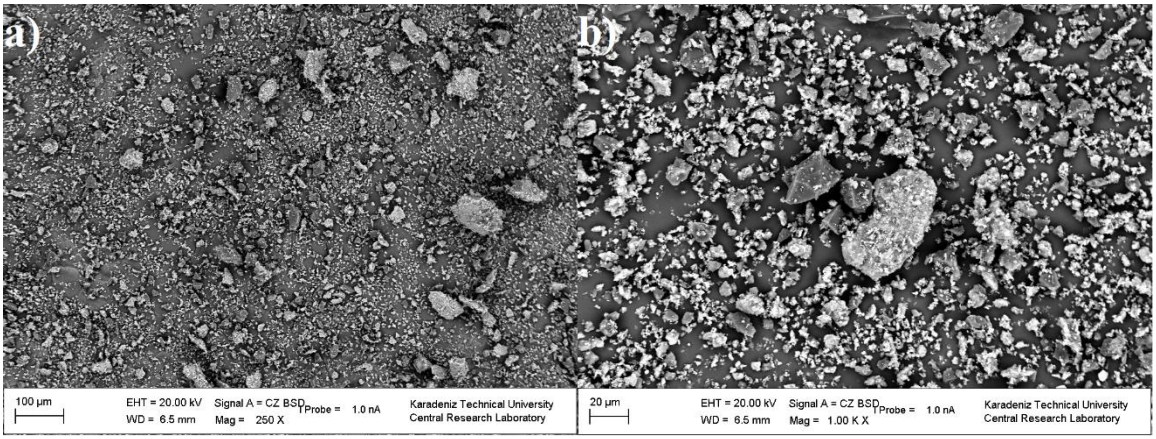
Şekil 121. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 2 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri.



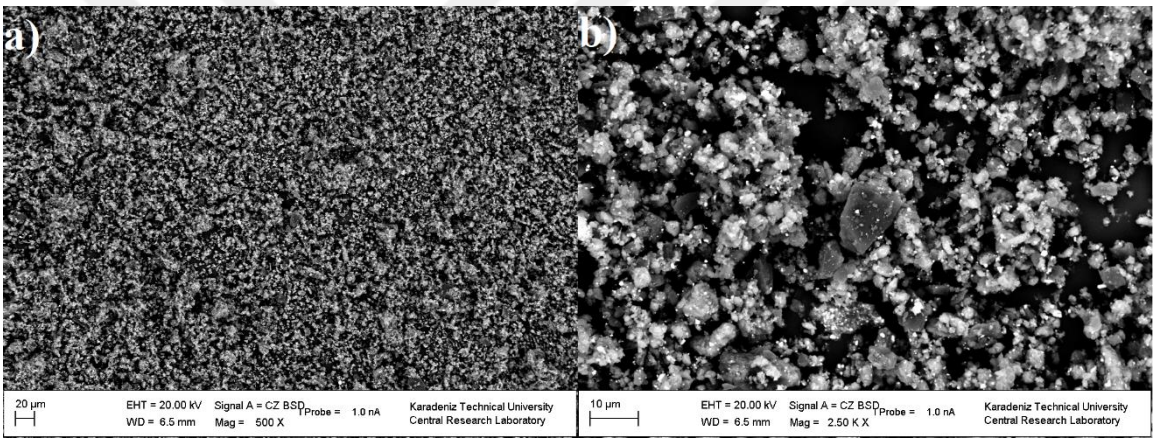
Şekil 122. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 4 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri.



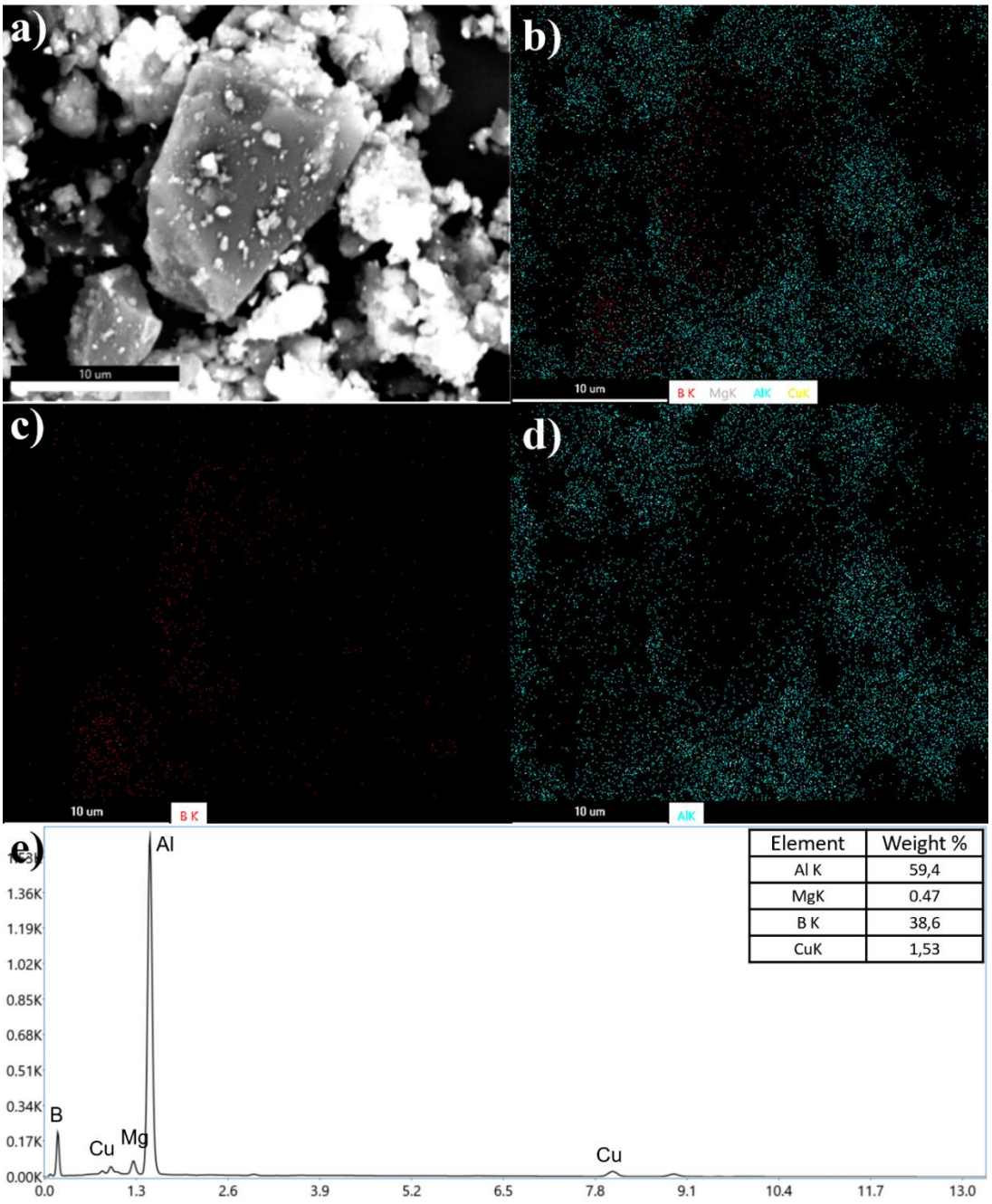
Şekil 123. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 10 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 124. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 14 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 125. AA2024-%40 B_4C tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası; a) 1000X büyütmedeki, b) 5000X büyütmedeki toz morfolojileri.



Şekil 126. AA2024-%40 B_4C kompozit tozlarının 20 saatlik öğütmede toplamda ağ.%4 eklemeli Metanol ilavesi ile 18 saatlik öğütülmesi sonrası kompozit tozlarının elementel dağılımı; a) AA2024-B_4C kompozit toz morfolojisi, b) Al, B, Mg ve Cu dağılımı, c) B_4C dağılımı, d) Al dağılımı, e) Spektrum Analizi.

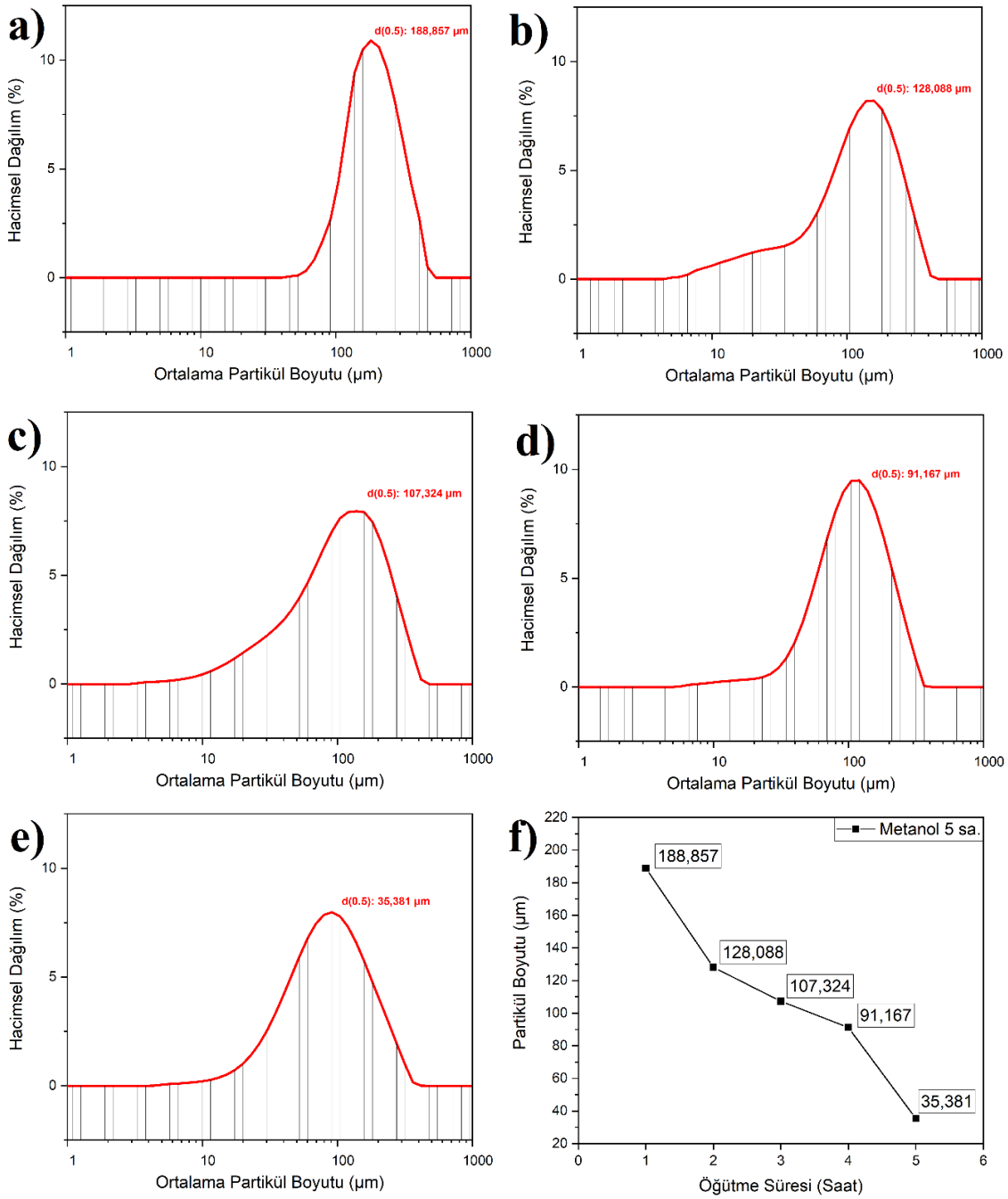
5 saat boyunca geleneksel yöntemle, 14 saat ve 20 saat boyunca geleneksel ve eklemeli yöntemler öğütmede PCA tipinin incelendiği tozların boyut ve morfolojik özellikleri incelendiğinde, en iyi çözümlerin geleneksel ve eklemeli PCA modelinin daha iyi morfoloji ve daha iyi boyuta ulaşmada başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca PCA tipine bakıldığında katı (Stearik asit ve Çinko Stearat) ve sıvı (metanol ve Etanol) PCA

çalışmasının sonucunda en iyi PCA tipinin sıvı PCA uygulamasında olduğu ve yine en iyi sıvı PCA'nın Metanol olduğu ortaya konulmuştur (Tunç vd., 2024).

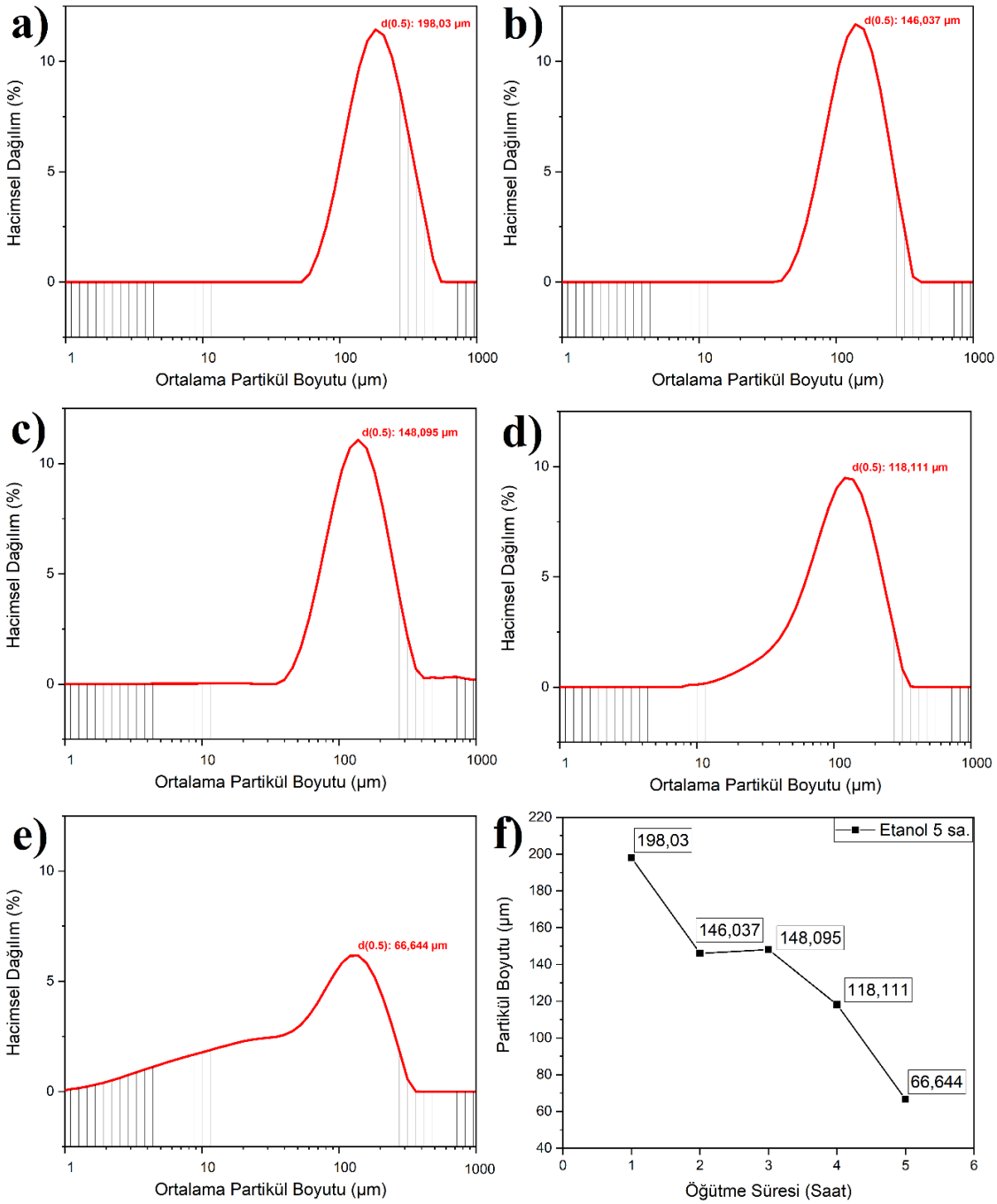
Metanol ile ilgili yapılan çalışmalarda, tane boyutunun küçültülmesinde etkin bir çözüm, eş eksenli tane yapısına geçilmesine katkı sağladığı, soğuk kaynağı azaltarak daha etkin bir öğütme ortaya konulmasını sağlamıştır.

3.1.3. Kompozit Tozlarının Öğütme Sonrası Partikül Boyutu ve Boyut Dağılımlarının Değişimi

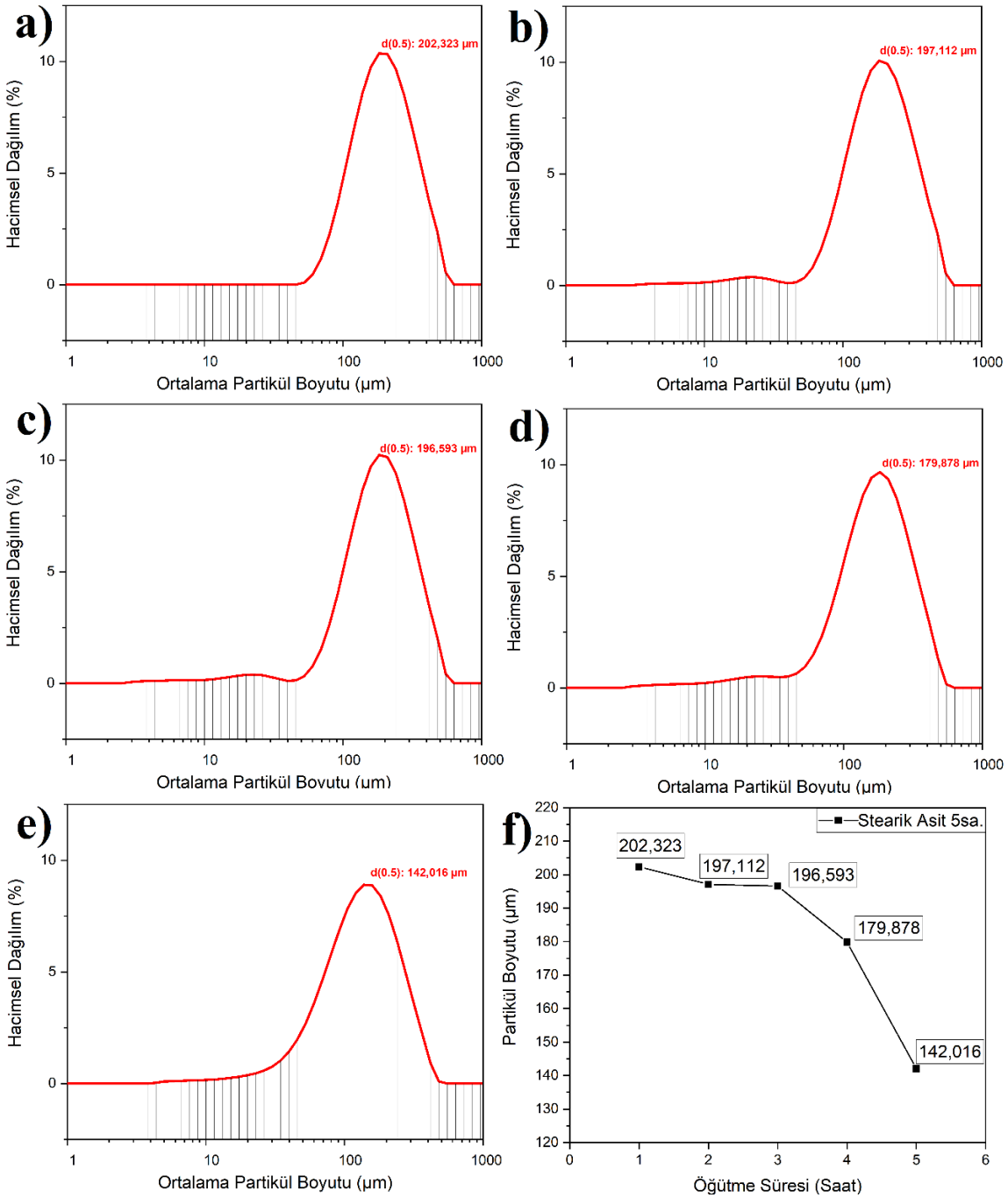
Mekanik alaşımlama işleminde yüksek enerjili öğütme işlemi uygulanan toz partiküllerinin bilya, toz ve öğütme haznesinin duvar yüzeyleri arasında meydana gelen çarpışmalar sonucu hazne içerisinde bulunan takviye ve matris partikülleri morfolojik olarak ve boyutsal olarak değişimler gösterirler. Partiküllerin soğuk kaynaklanması sonucu artan boyutları, ilerleyen öğütme süresiyle birlikte partiküllerin gevrekleşerek kırılmasıyla birlikte küçülür. Gerçekleşen bu mekanizma partiküllerin başlangıç boyutları ve morfolojilerine, proses kontrol ajanının miktarına ve uygulama şekline bağlıdır. Öğütme başlangıcında hazne içerisine ağırlıkça %2 oranında Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ilave edilerek öğütme işlemleri gerçekleştirilen 1. Grup AA2024-B_4C takviyeli kompozit tozlarına, 2. Grup olarak adlandırılan ve öğütme başlangıcında hazne içerisine ağırlıkça %2 oranında ve öğütmenin 2, 4 ve 10. Saatlerinde ağırlıkça %0.5 oranında ayrı ayrı Metanol, Etanol, Çinko Stearik ve Stearik Asit ilave edilerek toplamda ağırlıkça %3.5 oranında PCA eklemesi ile öğütülen kompozit tozlarına ve 3. Grup olarak adlandırılan ve öğütme başlangıcında hazne içerisine ağırlıkça %2 oranında ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağırlıkça %0.5 oranında ayrı ayrı Metanol, Etanol, Çinko Stearik ve Stearik Asit ilave edilerek toplamda ağırlıkça %4 oranında PCA eklemesi ile öğütülen kompozit tozlarına ait boyut dağılımı ve toz boyutu grafikleri verilmiştir.



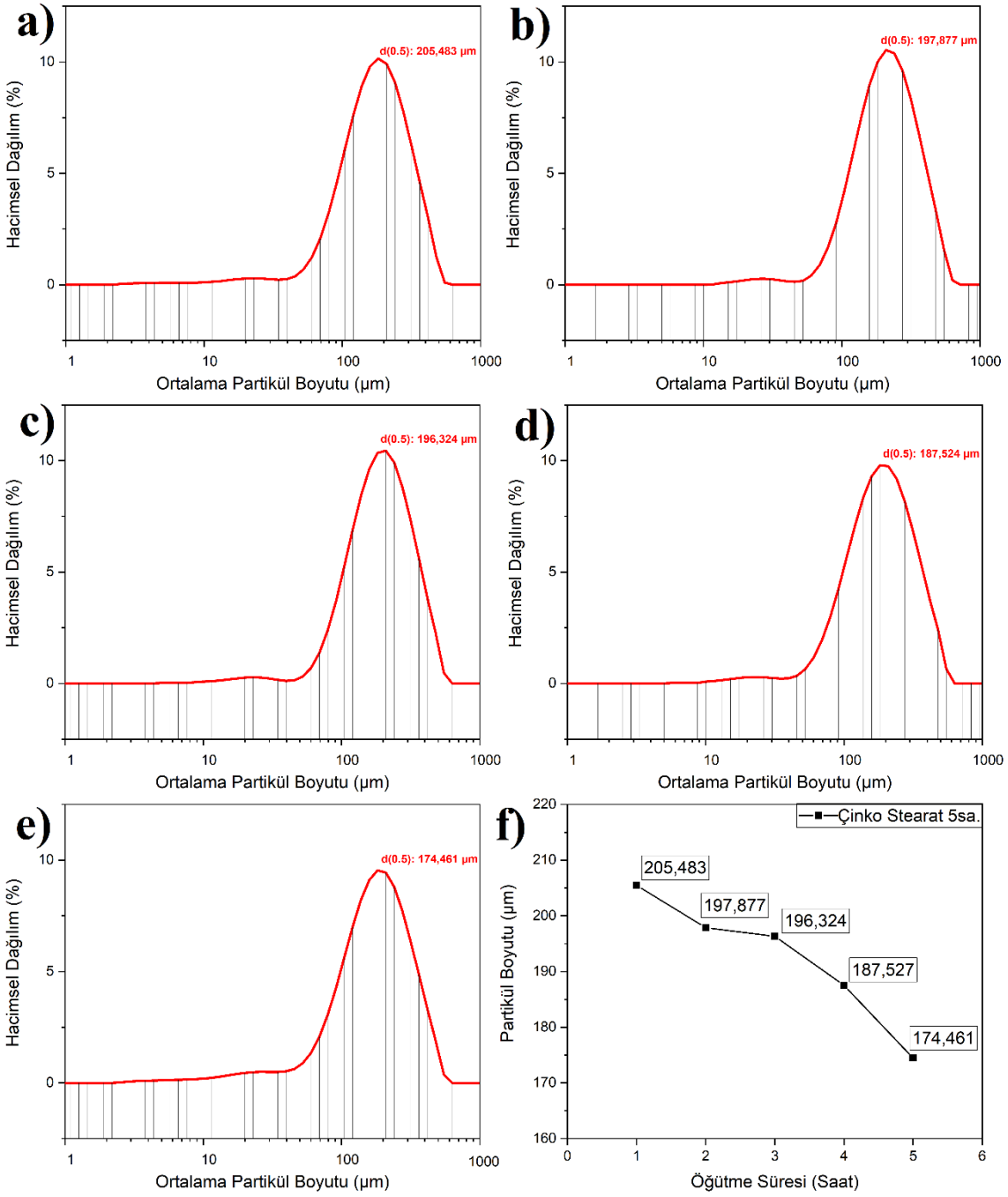
Şekil 127. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Metanol ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



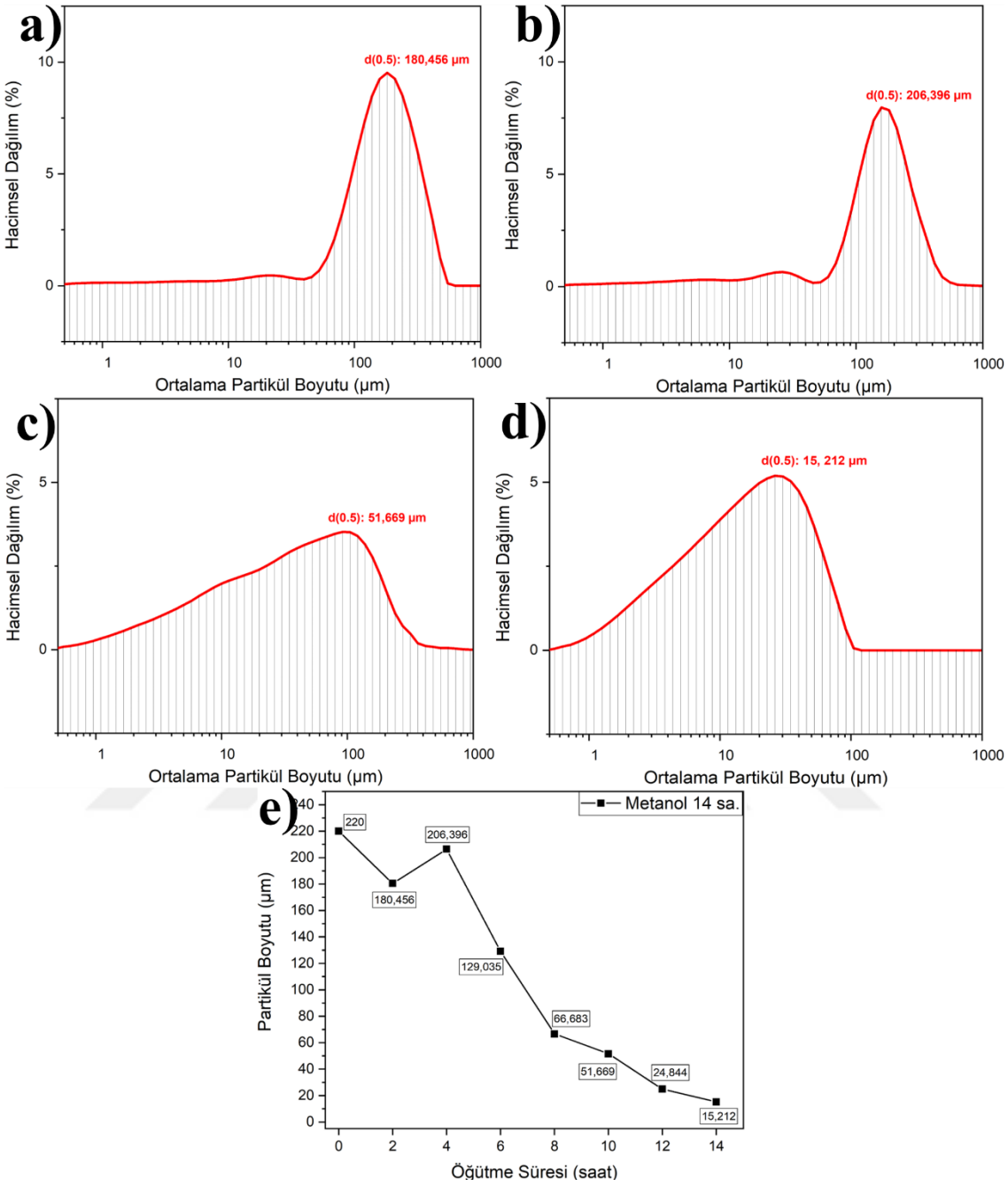
Şekil 128. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Etanol ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



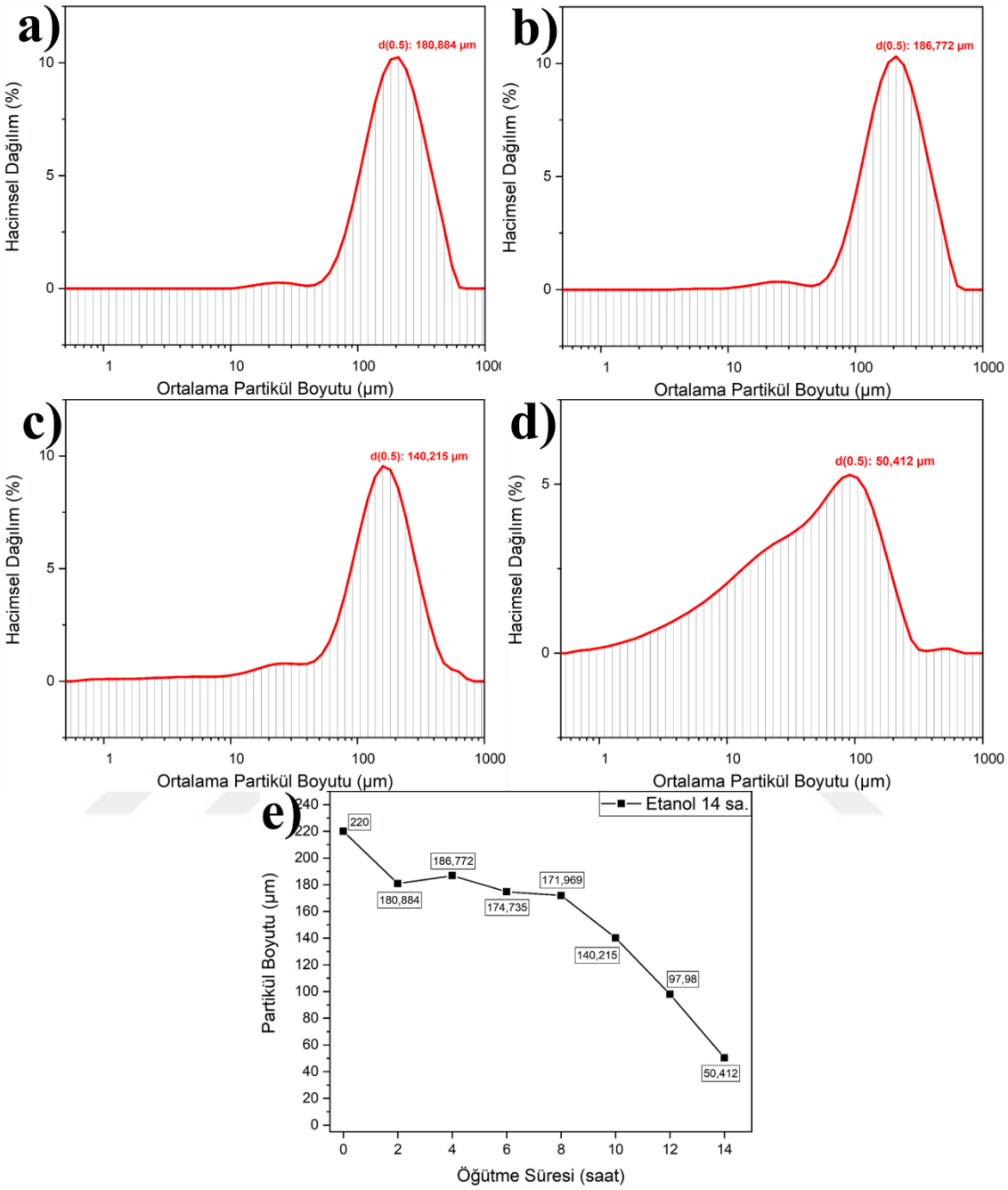
Şekil 129. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Stearik Asit ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



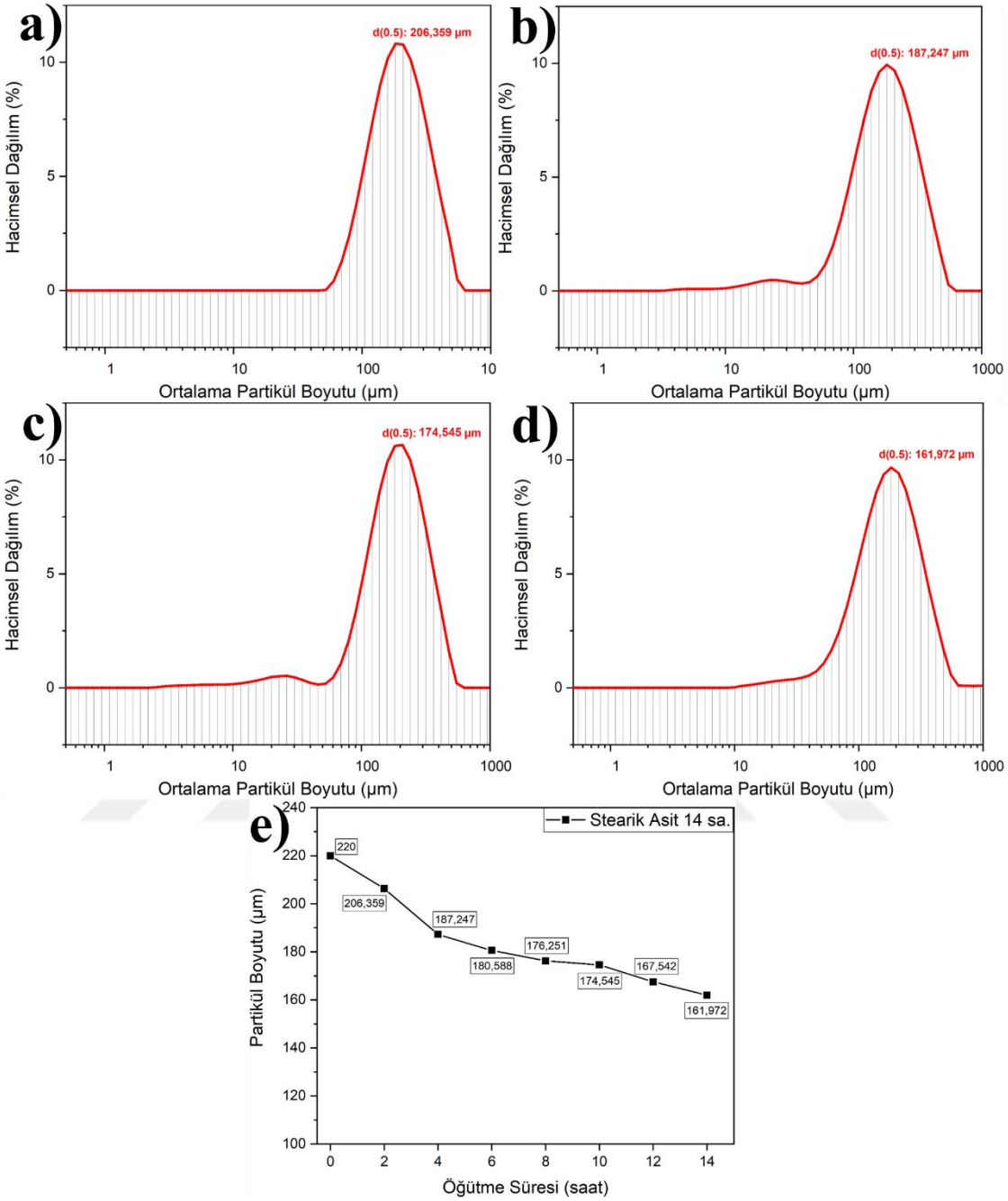
Şekil 130. Öğütme başlangıcında ağ. 2% Çinko Stearat ilavesi ile; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat, e) 5 saat öğütülen AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



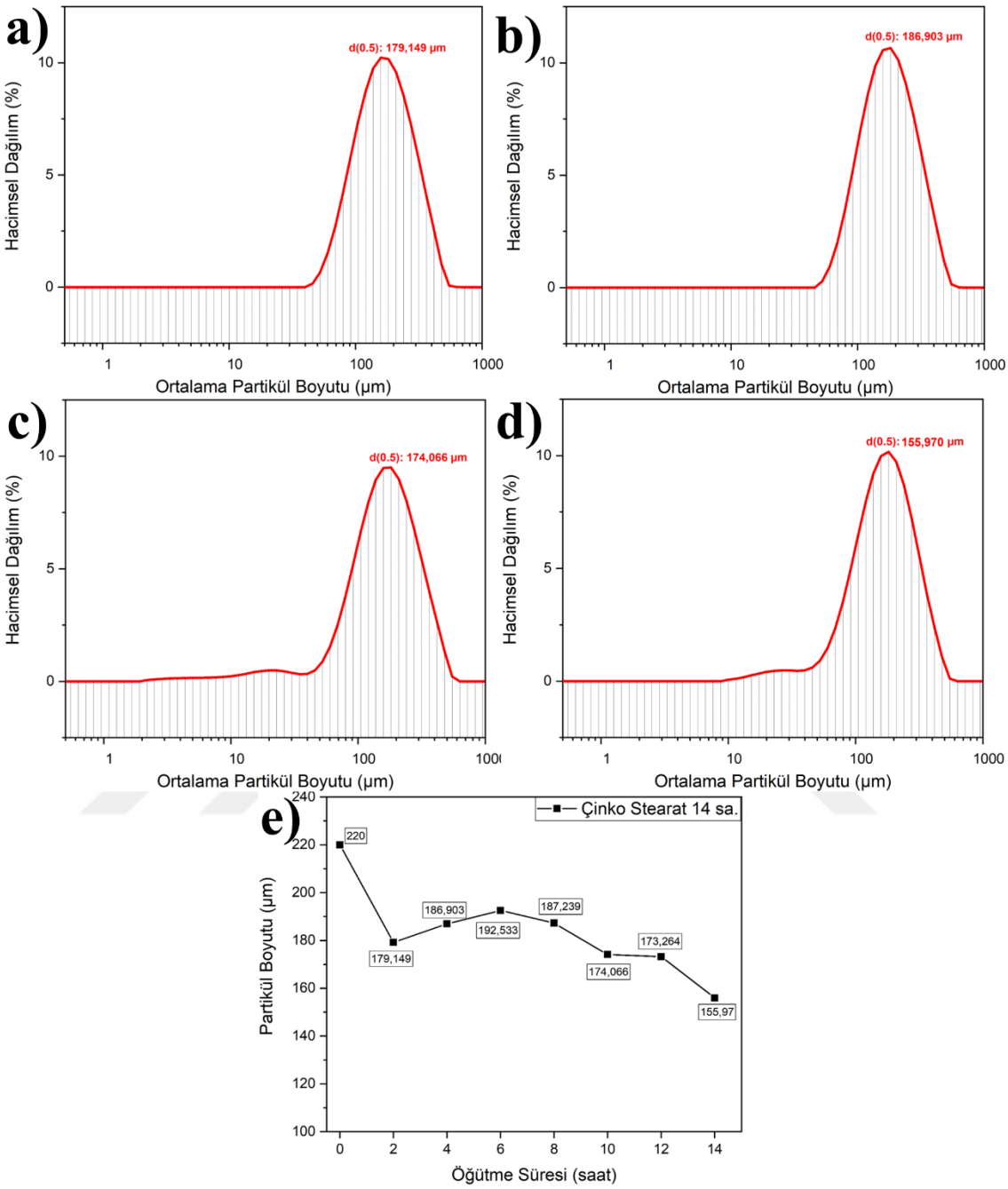
Şekil 131. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



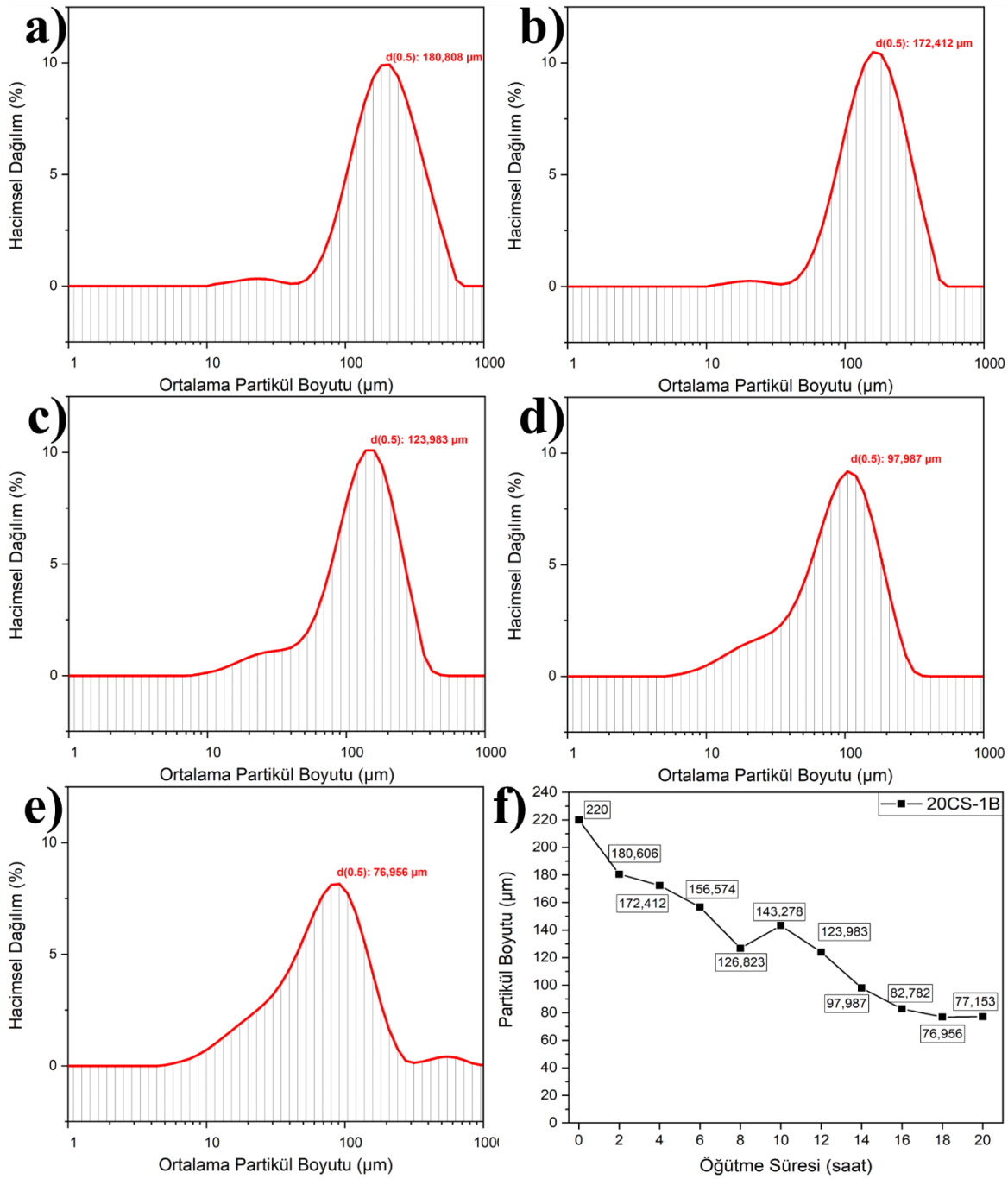
Şekil 132. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Etanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



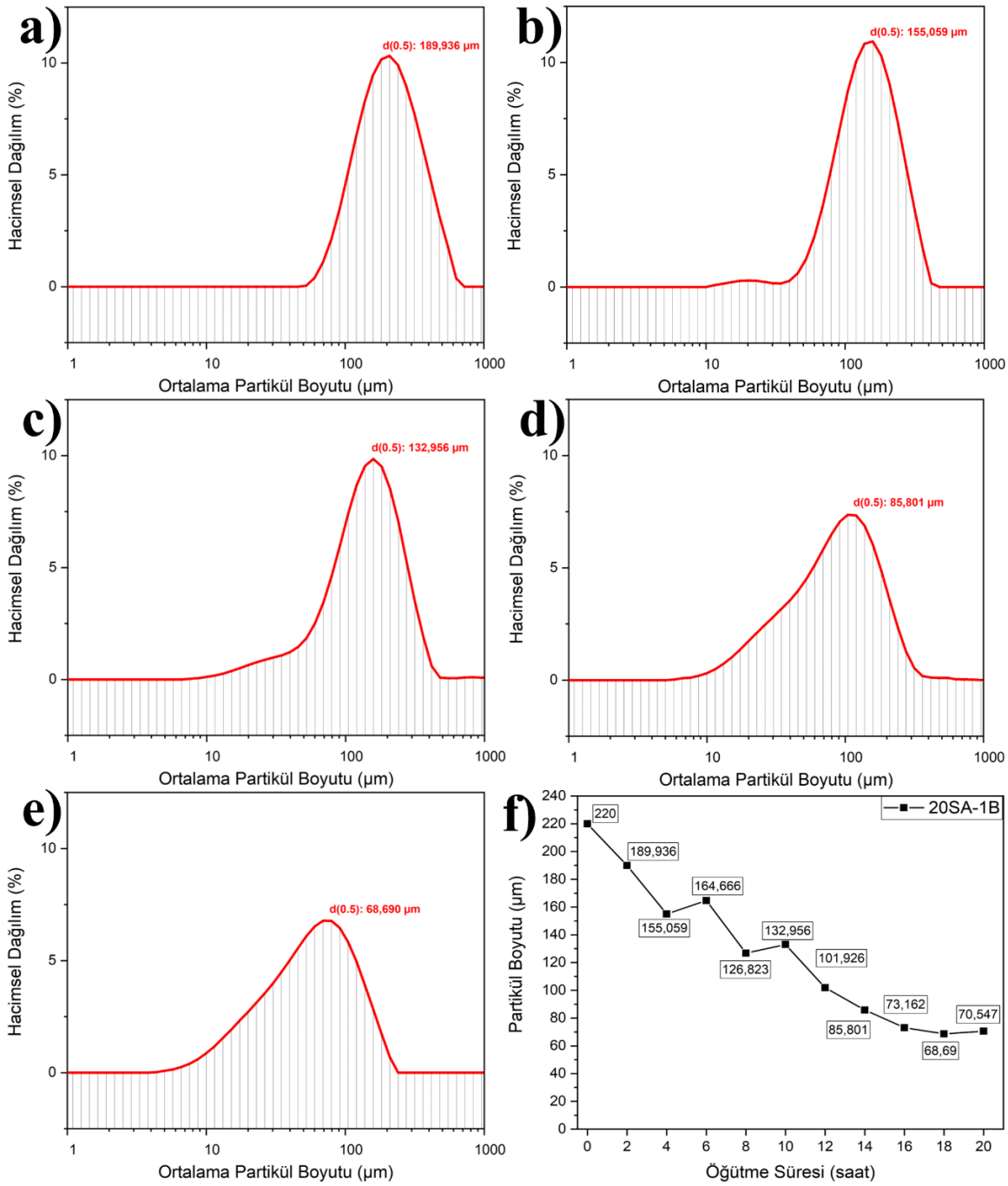
Şekil 133. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Stearik Asit ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



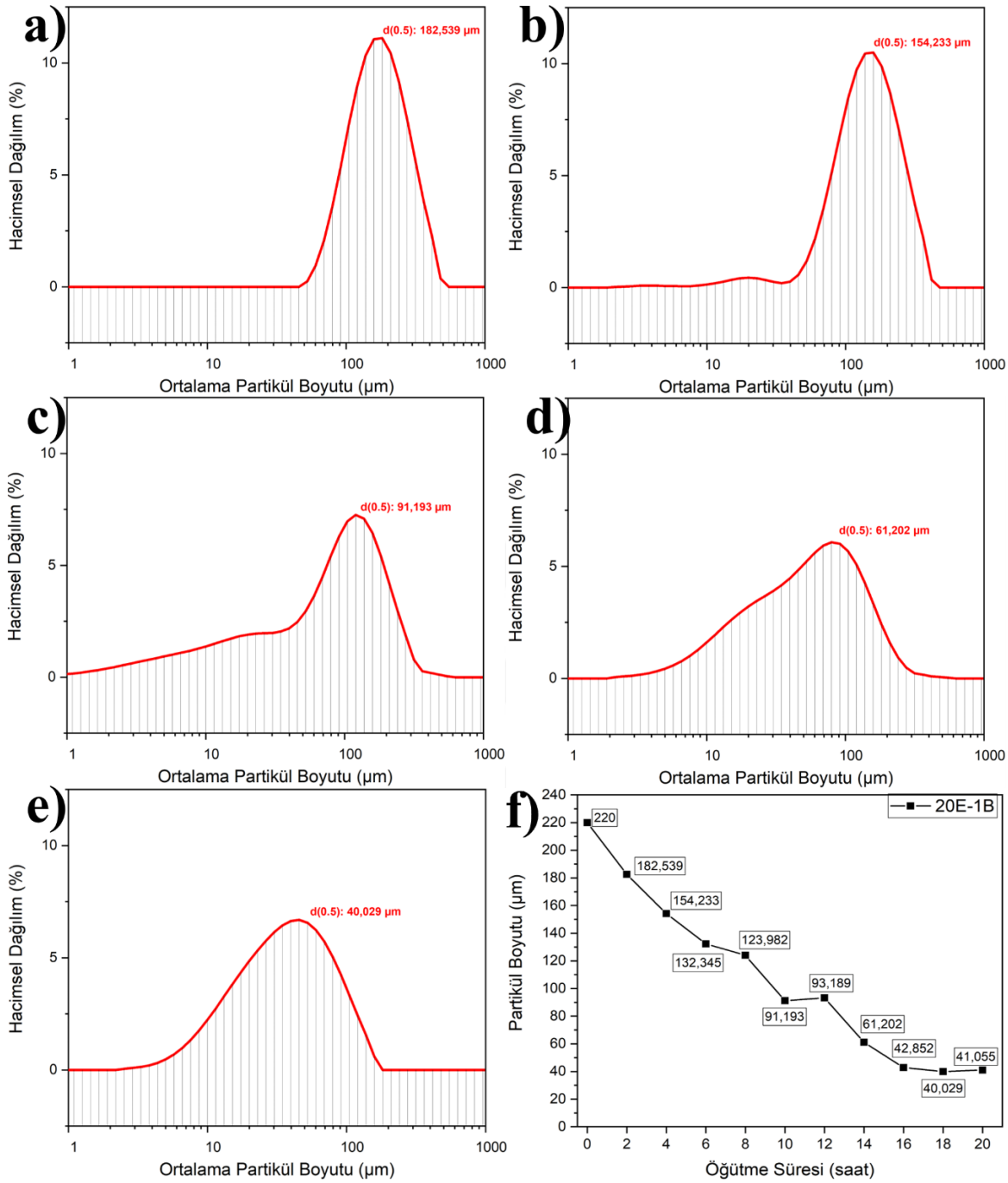
Şekil 134. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, ve 10. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %3.5 Çinko Stearat ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat ve e) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



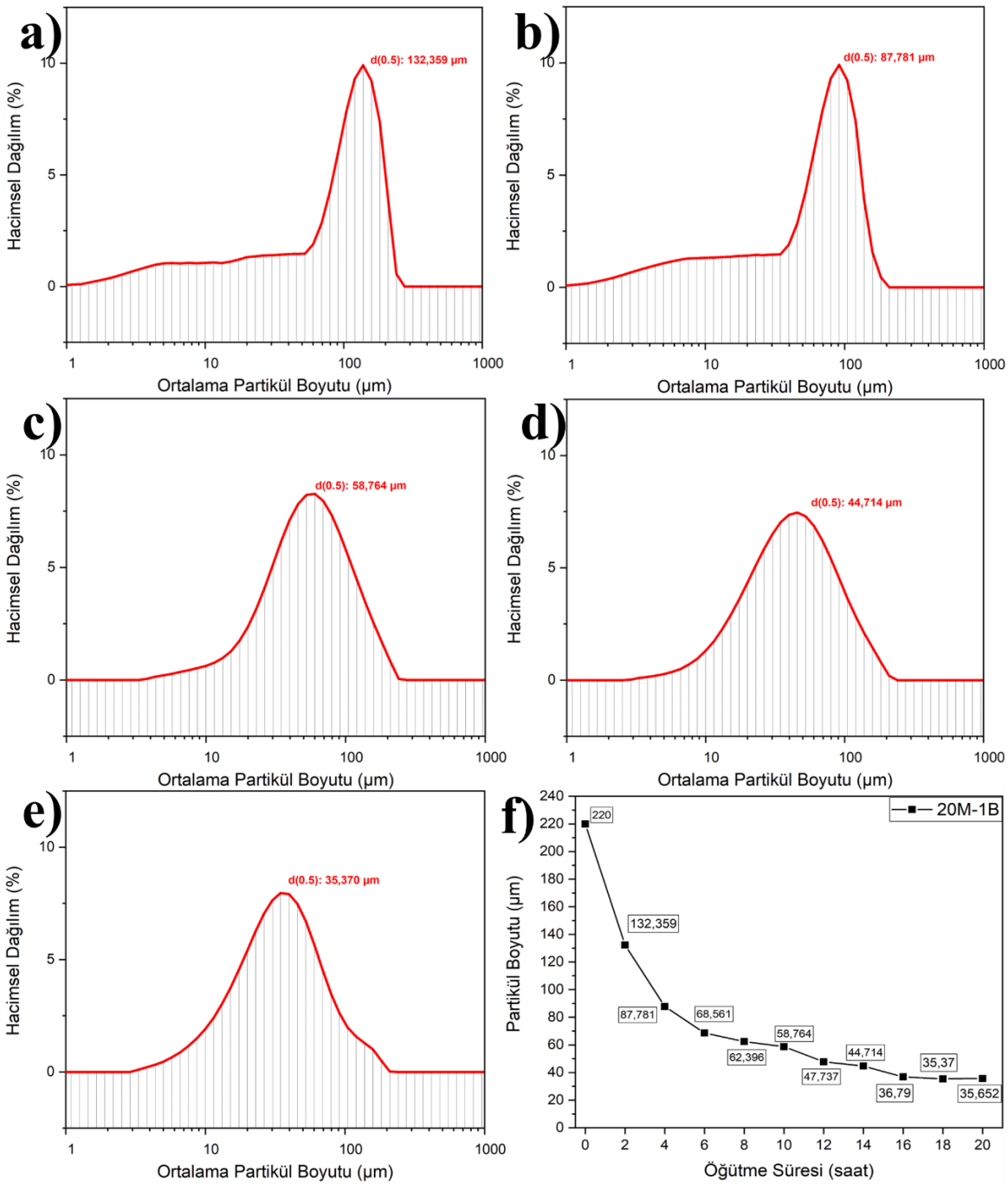
Şekil 135. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Çinko Stearat ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



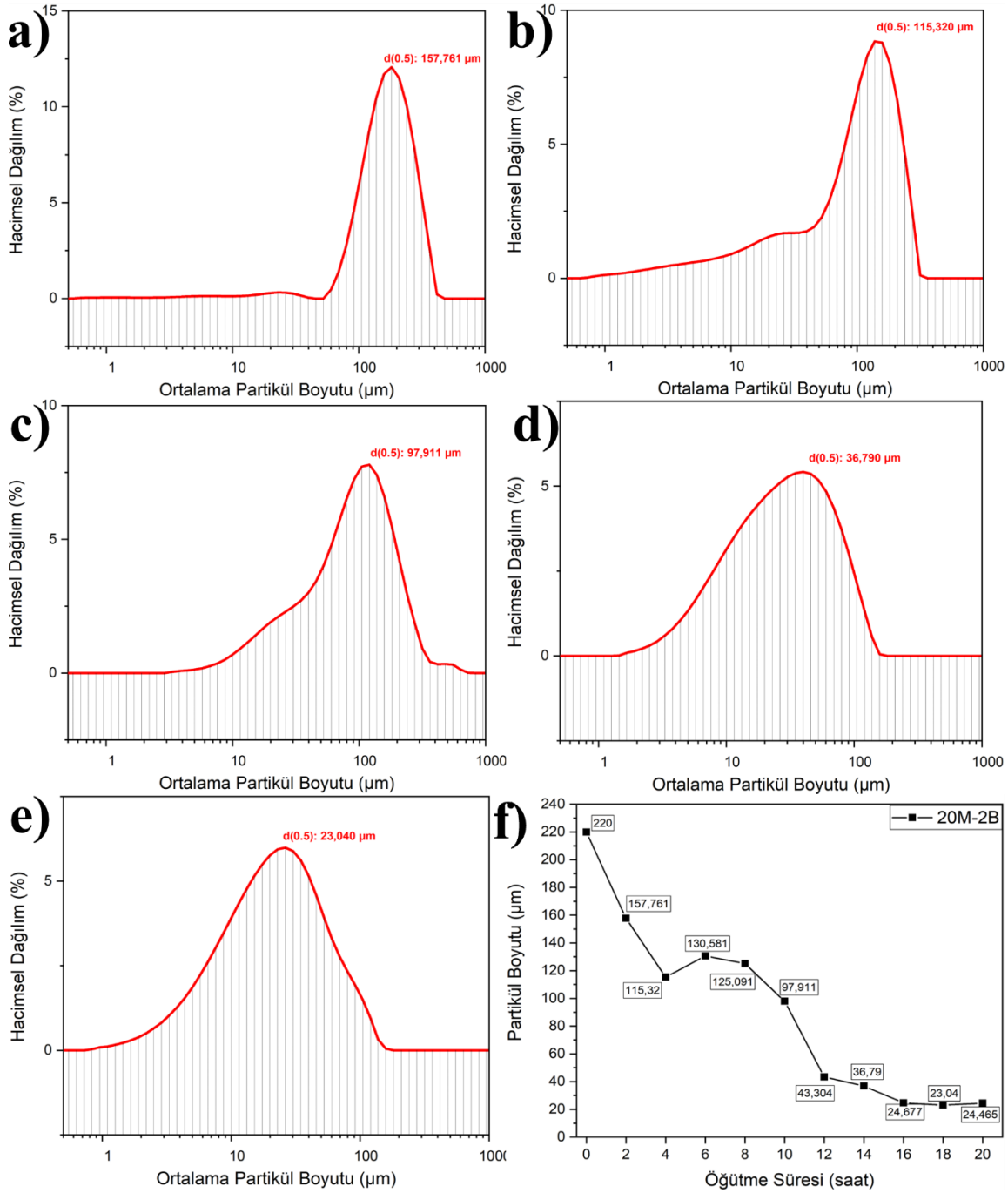
Şekil 136. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Stearik Asit ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



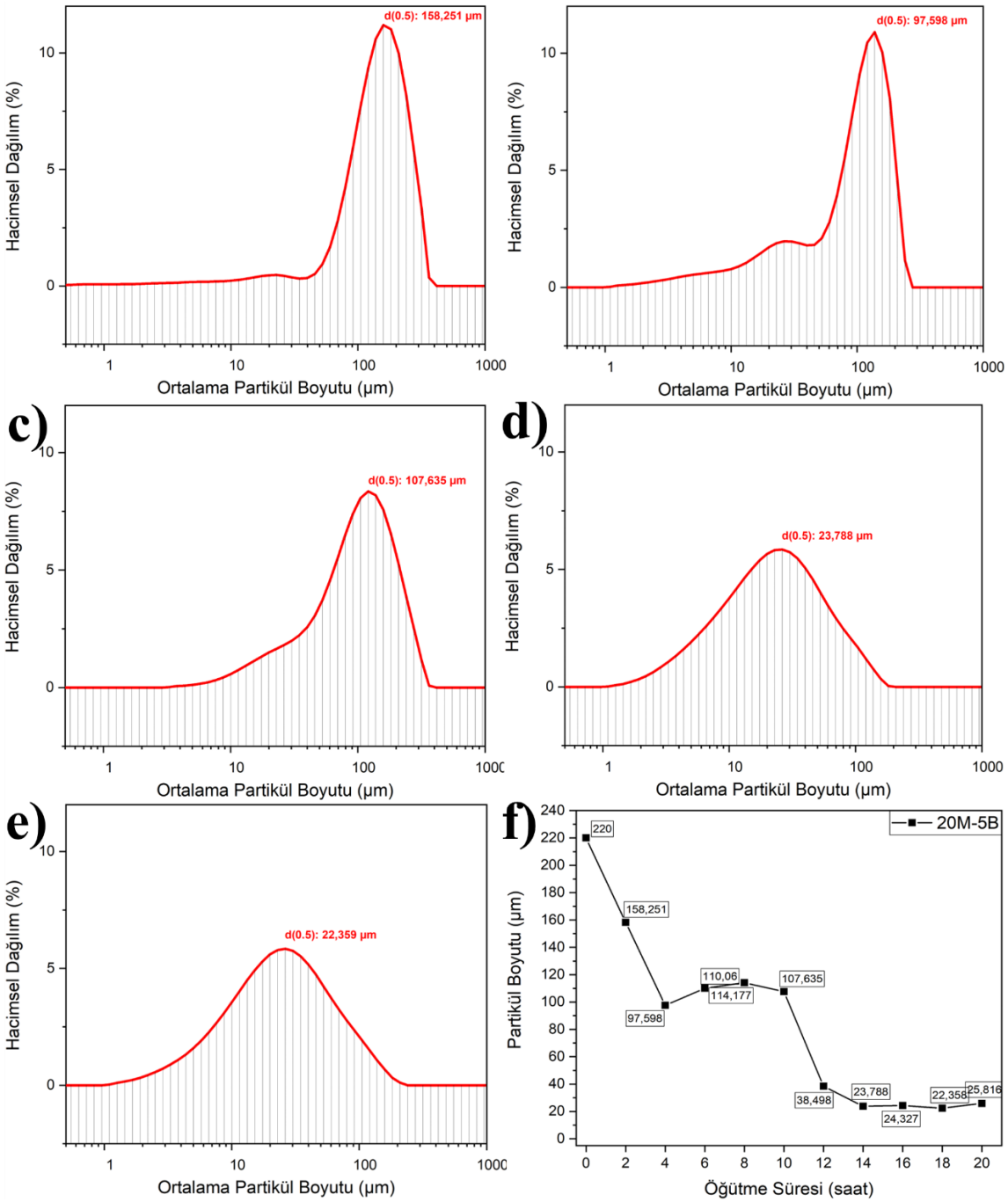
Şekil 137. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Etanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



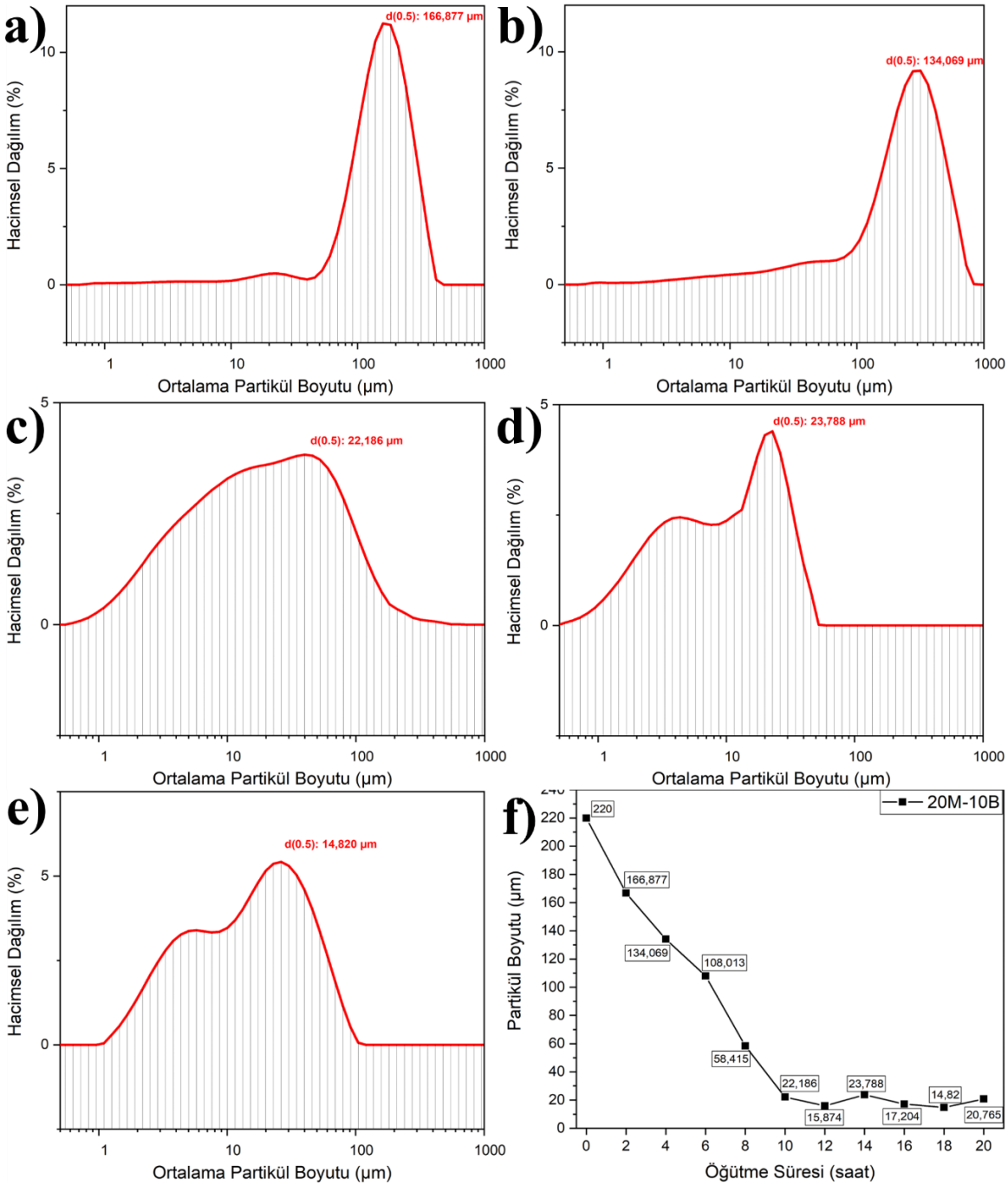
Şekil 138. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



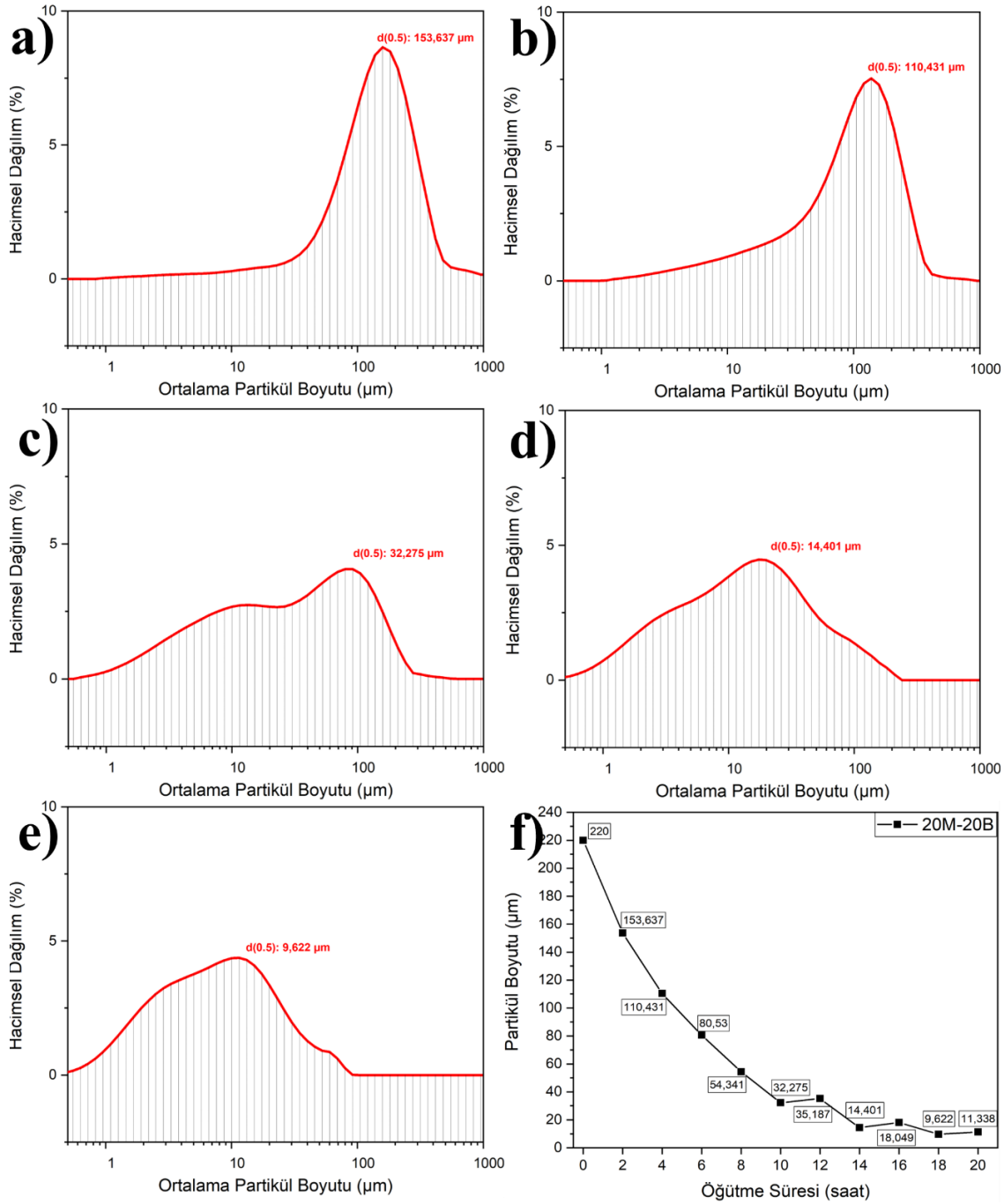
Şekil 139. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%2 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



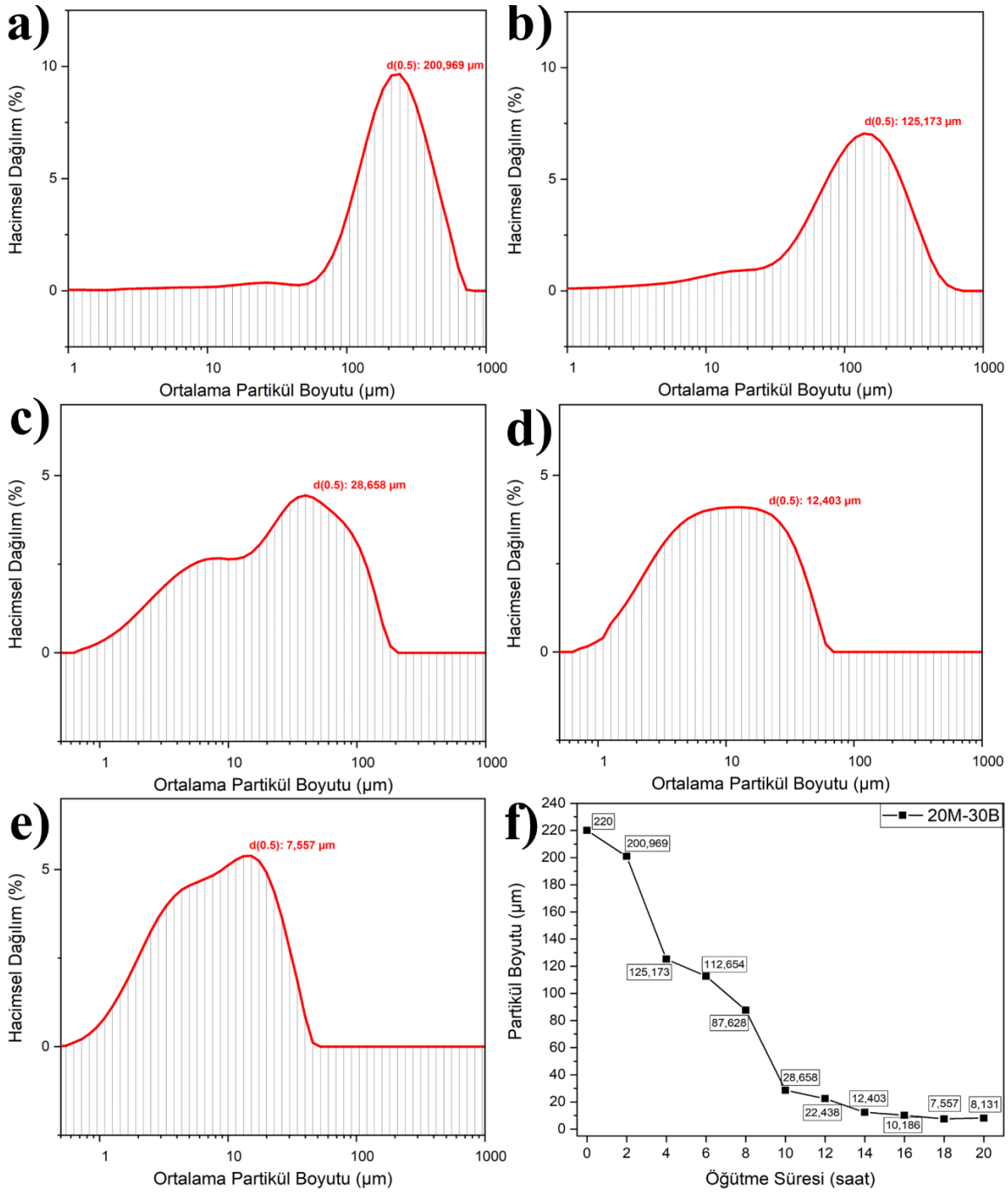
Şekil 140. Öğütme başlangıcında ağ. 2% ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%5 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



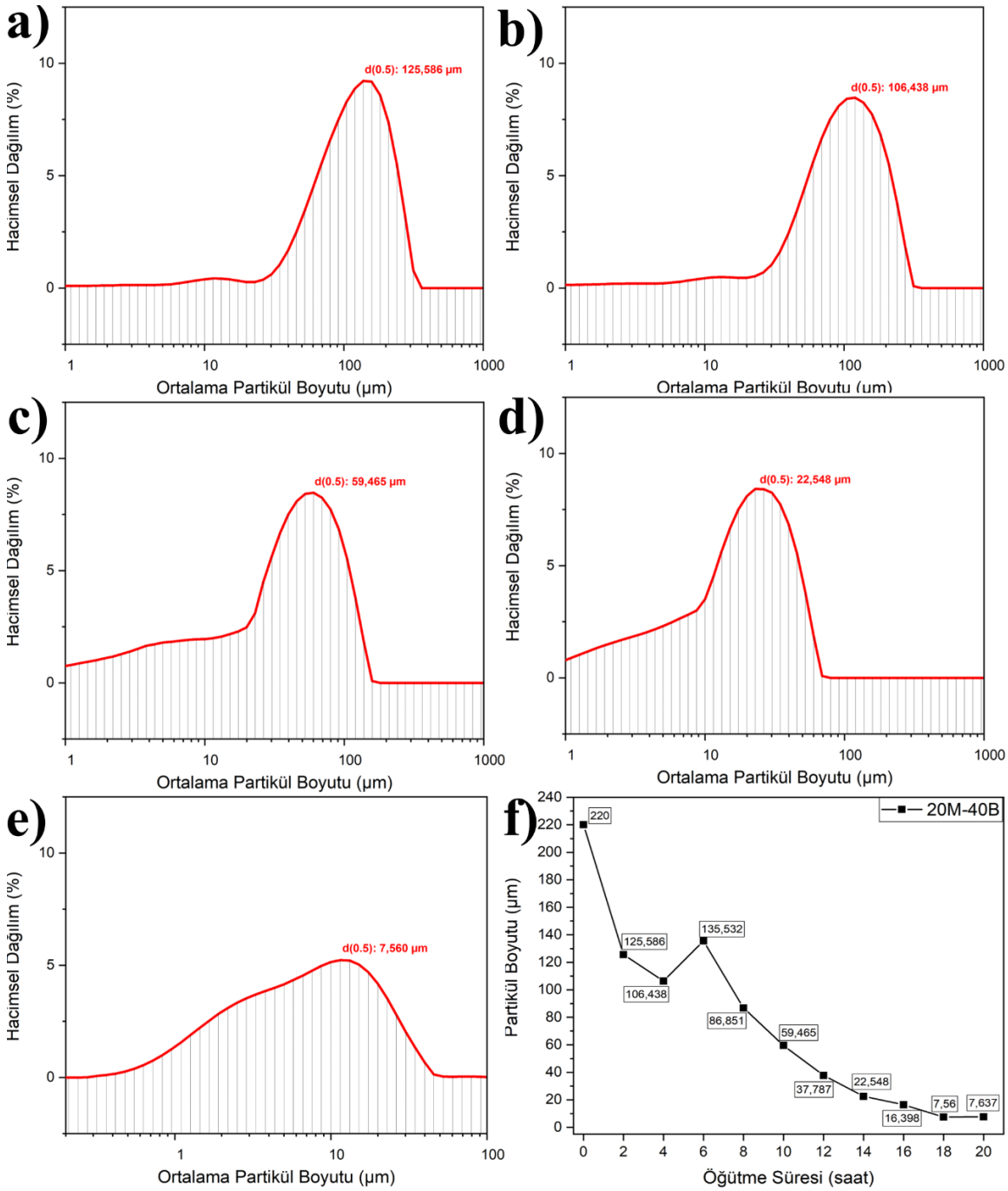
Şekil 141. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%10 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



Şekil 142. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%20 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



Şekil 143. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%30 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.



Şekil 144. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile ; a) 2 saat, b) 4 saat, c) 10 saat, d) 14 saat, e) 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%40 B_4C kompozit tozlarının partikül boyut dağılımı ve f) Öğütme Süresine bağlı ortalama partikül boyut değişimi grafiği.

AA2024-%1 B_4C içeren optimizasyon çalışmaları için yapılan boyut incelemelerinde öğütme süresi arttıkça PCA türüne göre boyut değişimleri de meydana gelmiştir. Burada boyut dağılımının etkisinde yine PCA tipleri ve kendi aralarında boyut değişimi üzerindeki etkileri incelenmiş olup, en iyi çözüm sıvı PCA'nın kullanıldığı Metanol grubunda elde

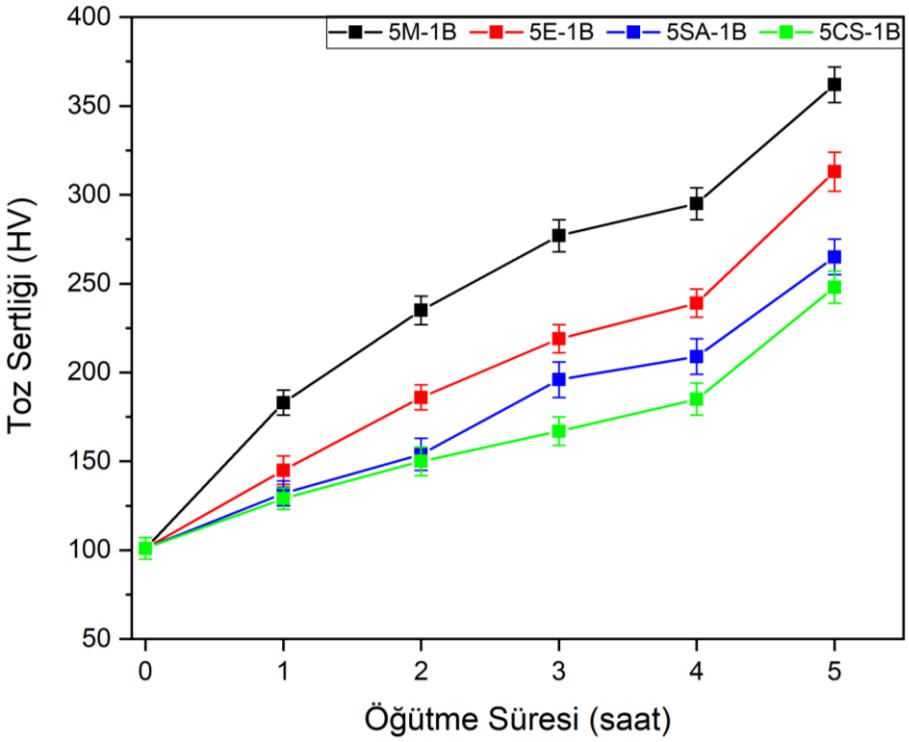
edilmiştir. Buna göre başlangıçta 220 µm matris ve 63 µm takviye partikül boyutlarına sahip kompozit tozlarının 20 saat sonunda toz boyutları Metanol için 38,652 µm, Etanol için 41,055 µm, Çinko Stearat için 77,153 µm ve Stearik asit için 70,547 µm elde edilmiştir. Bu da metanolün boyut küçültmedeki ve homojenleştirmedeki etkinliğini ortaya koymuştur (Gültekin vd., 2023).

İlk tip optimizasyon kompozitlerindeki B_4C miktarı ağırlıkça %1 olarak sabit alındığı için öğütmedeki etkinliği eşit kabul edilmiştir. Ancak diğer kompozitlere bakıldığında B_4C miktarı ağırlıkça %1, %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarına arttırıldığı için öğütme etkinliği ve boyutları farklılık göstermektedir. Burada PCA'nın soğuk kaynak ve yapışma durumunu engellerken takviye miktarındaki artış, öğütme etkinliğini arttırmıştır. Artan takviye oranlarına göre kompozit tozların optimum öğütme süresi olan 18 saat öğütme sonrası boyutları, ağırlıkça %2 B_4C içeren kompozit tozları için 23,04 µm, %5 B_4C içeren kompozit tozları için 22,358 µm, %10 B_4C içeren kompozit tozları için 14,82 µm, %20 B_4C içeren kompozit tozları için 9,622 µm, %30 B_4C içeren kompozit tozları için 7,557 µm ve %40 B_4C içeren kompozit tozları için 7,56 µm bulunmuştur. Burada öğütmenin homojenliği ve boyutun takviye miktarı ile etkinliği görülmektedir.

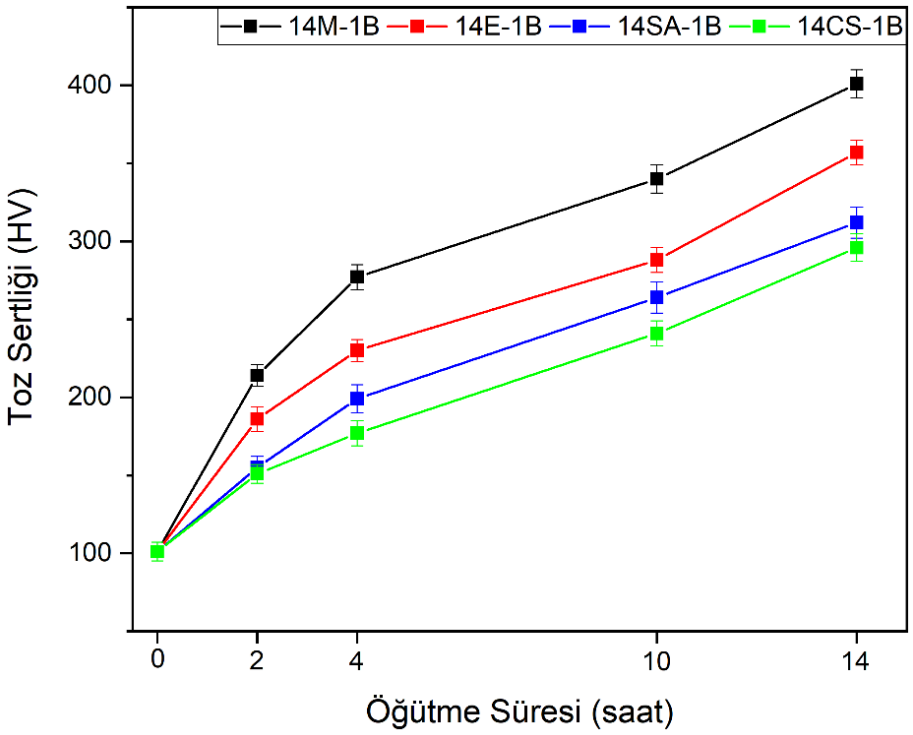
Optimizasyon ve genel kompozit çalışmalarında yapılan incelemelerde 18 saatlik öğütmelerde boyut stabil hale gelerek kararlı hale gelmiştir. Bu da yapılan öğütmede istenen ve beklenen bir durumdur. İstenen bu boyutların daha altına inilebilmesi için parametrelerde değişiklik yapılmalıdır (Bilye: Toz oranı, değirmen tipi, öğütme hızı ve süresi gibi).

3.1.4. AA2024-B_4C Kompozit Tozlarının Toz Sertlik Değerleri

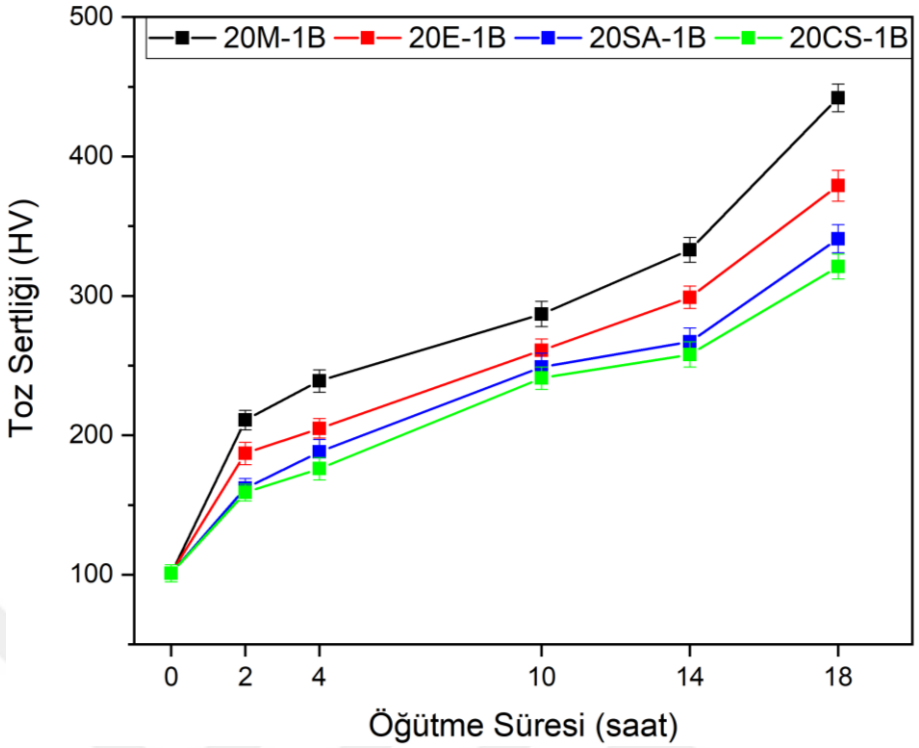
AA2024 matris içerisine takviye edilen seramik B_4C partiküllerinin, yapı içerisine gömülmesi ve homojen bir biçimde dağılımının sağlanması için 4 farklı PCA kullanılarak kompozit tozlarının farklı öğütme sürelerinde deformasyona uğrayarak sertleşmelerine ve artan öğütme süreleri ile genel anlamda toz sertliği değerlerinin artış göstermesine sebep olmaktadır. 1. Grup olarak adlandırılan kompozit tozlarının saatlik öğütme sürelerinde, 2. Grup olarak adlandırılan kompozit tozlarının 2, 4, 10 ve 14 saatlik öğütme sürelerinde ve 3. Grup olarak adlandırılan kompozit tozlarının ve 3. Grup içerisinde artan B_4C oranlarına sahip kompozit tozlarının 2, 4, 10, 14 ve 18 saatlik öğütme sürelerinde elde edilen toz sertliği değerleri aşağıdaki gibidir.



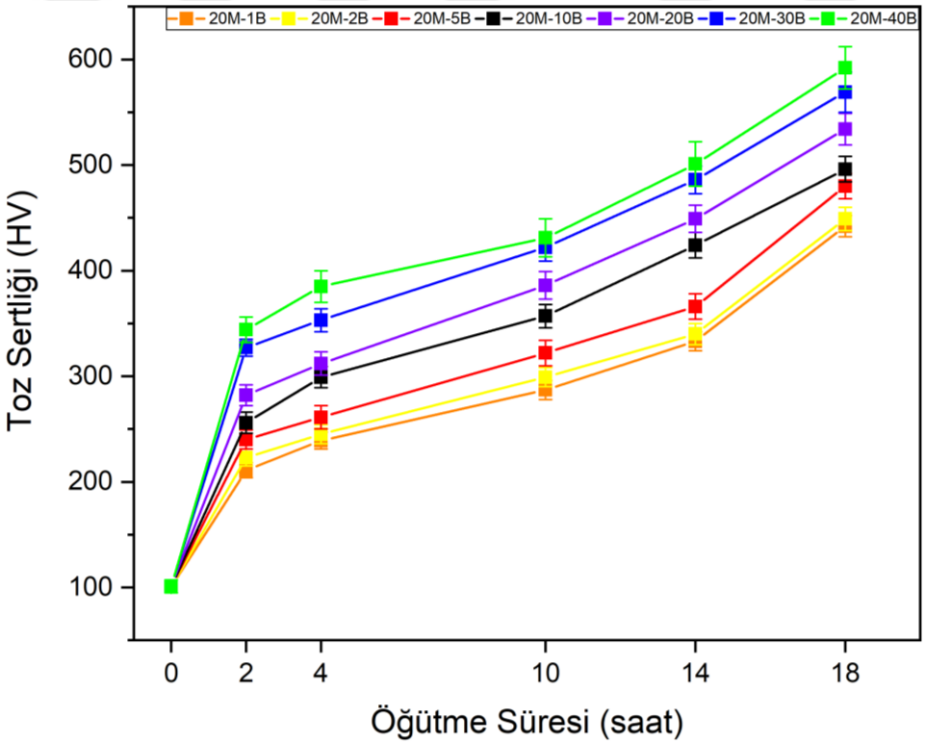
Şekil 145. 1. Grup kompozit tozlarına ait toz sertliği değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi.



Şekil 146. 2. Grup kompozit tozlarına ait toz sertliği değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi.



Şekil 147. 3. Grup kompozit tozlarına ait toz sertliği değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi.

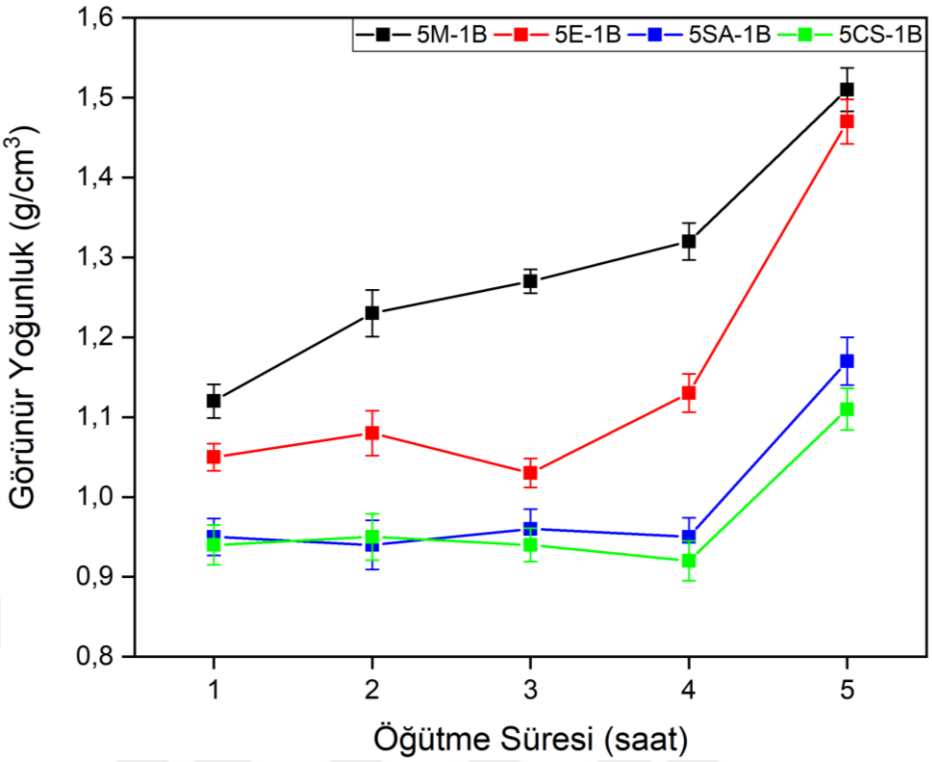


Şekil 148. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası ağ.% 1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren AA2024-B_4C kompozit tozlarının toz sertliği değerleri.

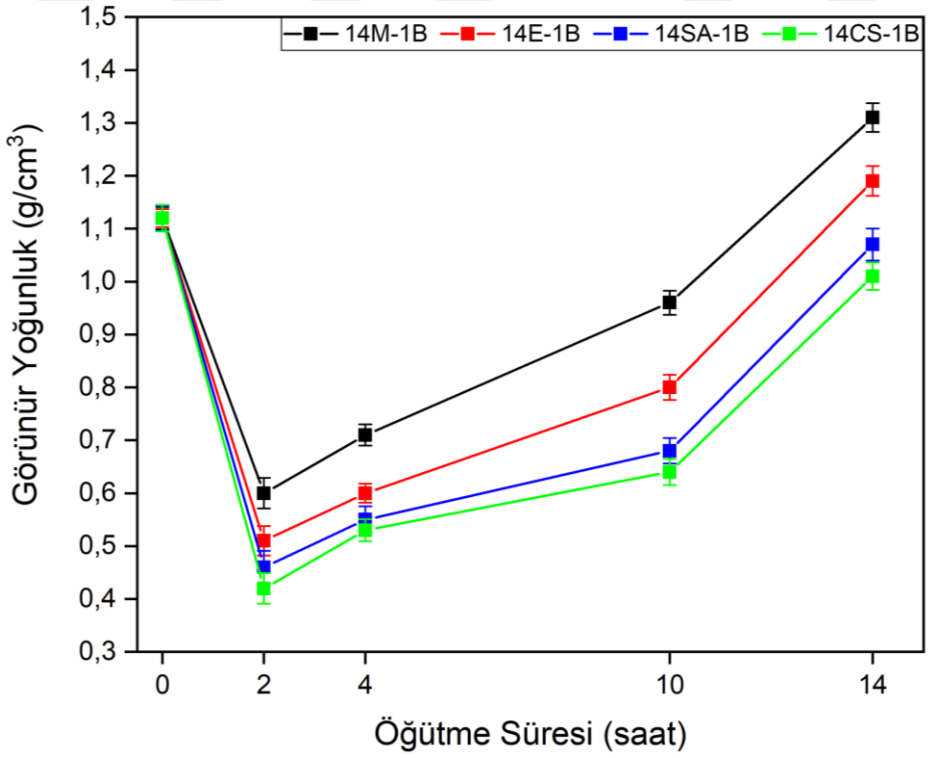
Geleneksel yöntemde üretilen, geleneksel ve eklemeli yöntemler üretilen tozların mikrosertlik değerlerine bakıldığında, öğütme süresinin artışıyla beraber toz sertlikleri de artış göstermektedir. Ancak yapılan incelemelerde geleneksel yöntemdeki mikrosertlik artışları, geleneksel ve eklemeli şekilde öğütülen tozlara göre daha az olmuştur (Şekil 145, Şekil 146 ve Şekil 147). Buna ek olarak artan takviye miktarları ile öğütülen tozların mikrosertlik değerleri de artış göstermekte, bunun sebebi ise toz mikrosertliklerinde deformasyon ve takviye fazının olumlu etki olarak deformasyondaki etkinliğinin toz sertliğini arttırmasıdır (Canakci vd., 2012).

3.1.5. AA2024-B_4C Kompozit Tozlarının Görünür Yoğunluk Değerleri

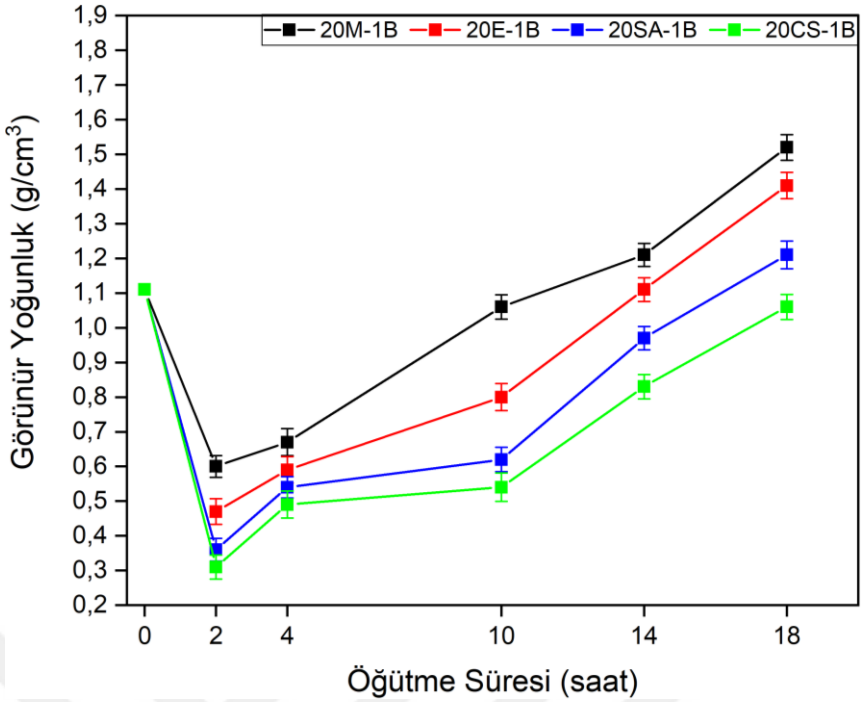
Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ilaveleri ile öğütülen 1., 2. ve 3. grup kompozit tozlarına ait görünür yoğunluk değerlerinin öğütme süresine bağlı değişimi aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Görünür yoğunluk değerleri, öğütme esnasında partiküllerin uğradığı deformasyona ve bu deformasyon sonucu değişen partikül morfolojisine göre değişkenlik göstermekte ve bu morfolojik değişimler partiküllerin değişen PCA oranları ve öğütme süreleriyle değişkenlik gösterdikleri görülmektedir.



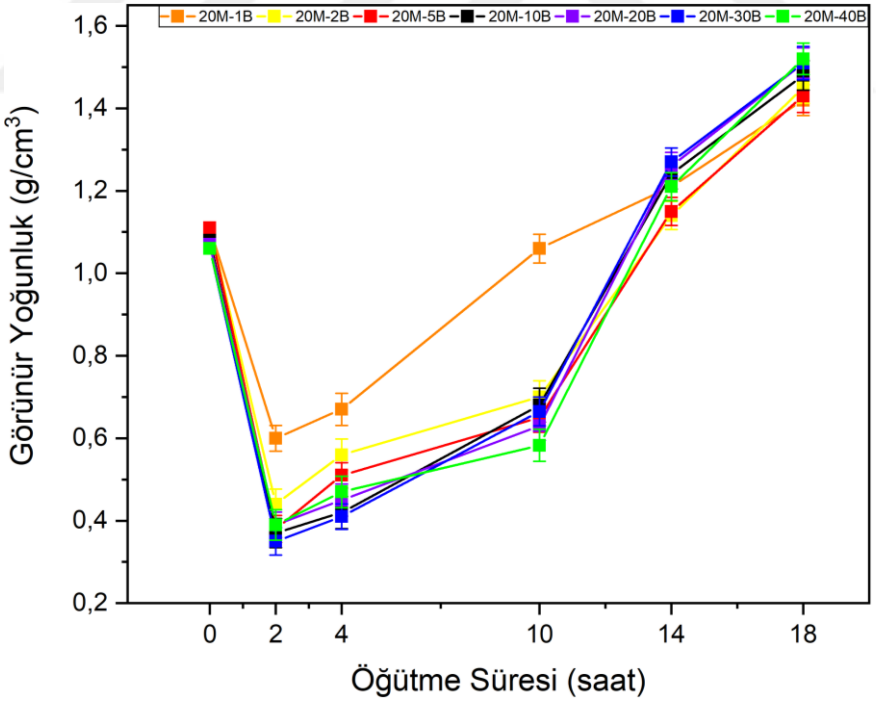
Şekil 149. 1. Grup kompozit tozlarına ait görünür toz yoğunluğu değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi.



Şekil 150. 2. Grup kompozit tozlarına ait görünür toz yoğunluğu değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi.



Şekil 151. 3. Grup kompozit tozlarına ait görünür toz yoğunluğu değerlerinin Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ile öğütülme sürelerine göre değişimi.

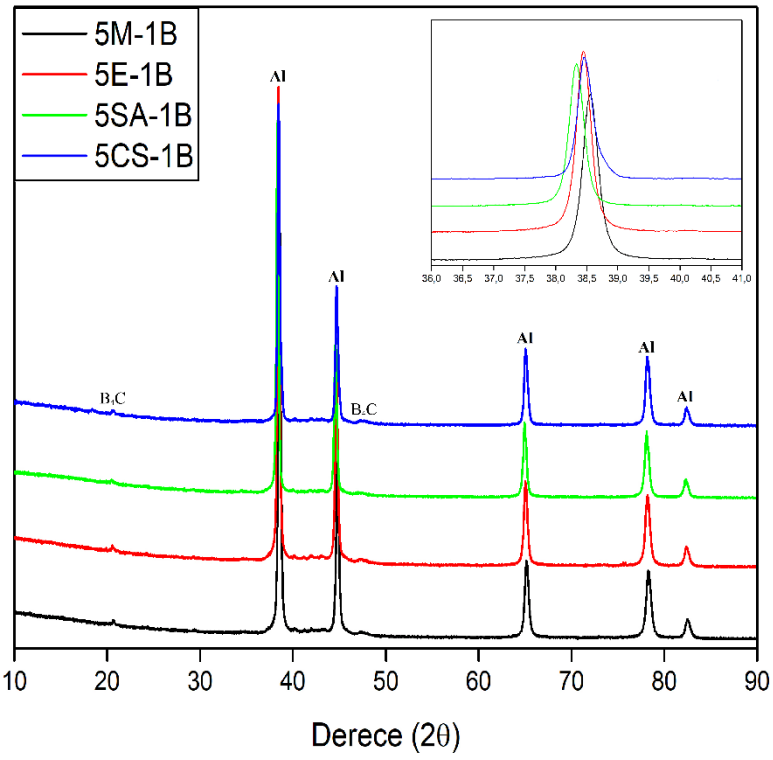


Şekil 152. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası ağ.% 1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren AA2024-B_4C kompozit tozlarının görünür yoğunluk değerleri.

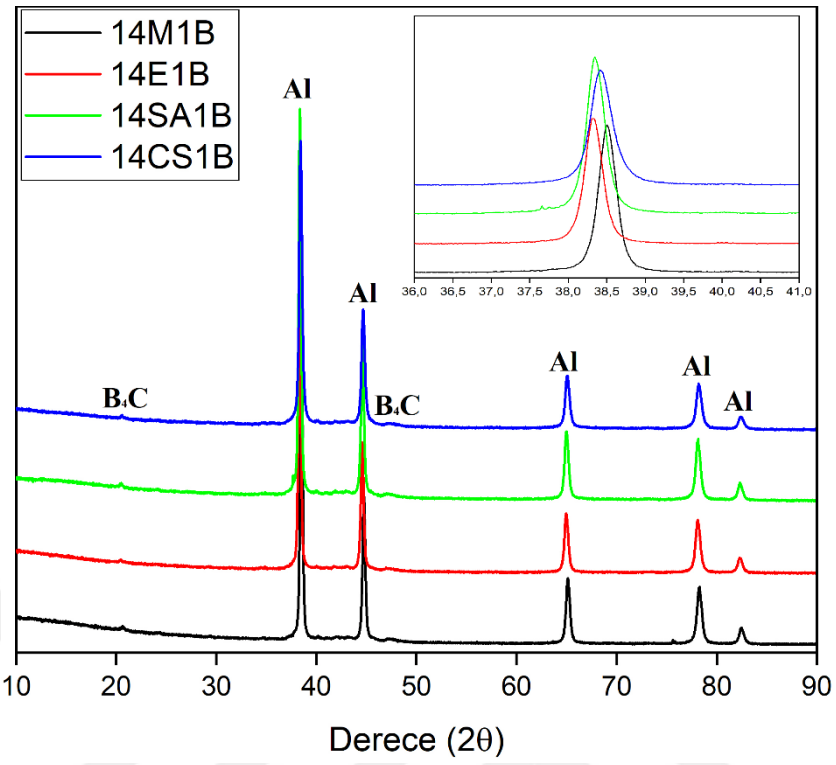
Görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde, optimizasyon çalışmalarındaki kompozit tozları, geleneksel, geleneksel ve eklemeli ve artan takviye oranlarına sahip kompozit tozlarının benzer karakter gösterdiği, artan öğütme süresiyle birlikte görünür yoğunluğun arttığı görülmüştür. Bunun gerekçeleri incelendiğinde, öğütme süresi, PCA türü ve kendi içerisinde yapılan incelemelerde görünür yoğunluğa etki eden parametrelerin akış hızı, kap doldurma kabiliyeti ve benzeri parametreleri değiştirecek morfolojilerin (flake, çubuksu, eş eksenli vb.) etkin oluşuyla açıklanabilmektedir. Burada optimizasyon tozları ve artan takviye oranlarına sahip tozların görünür yoğunluk değerleri arasındaki en optimum sonucu ise eş eksenli ve üniform tozların gerçekleştirdiği, bunların da takviye miktarı arttıkça daha belirgin şekilde ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 152) (Tomiczek vd., 2015).

3.1.6. AA2024-B_4C Kompozit Tozlarının XRD Analizleri

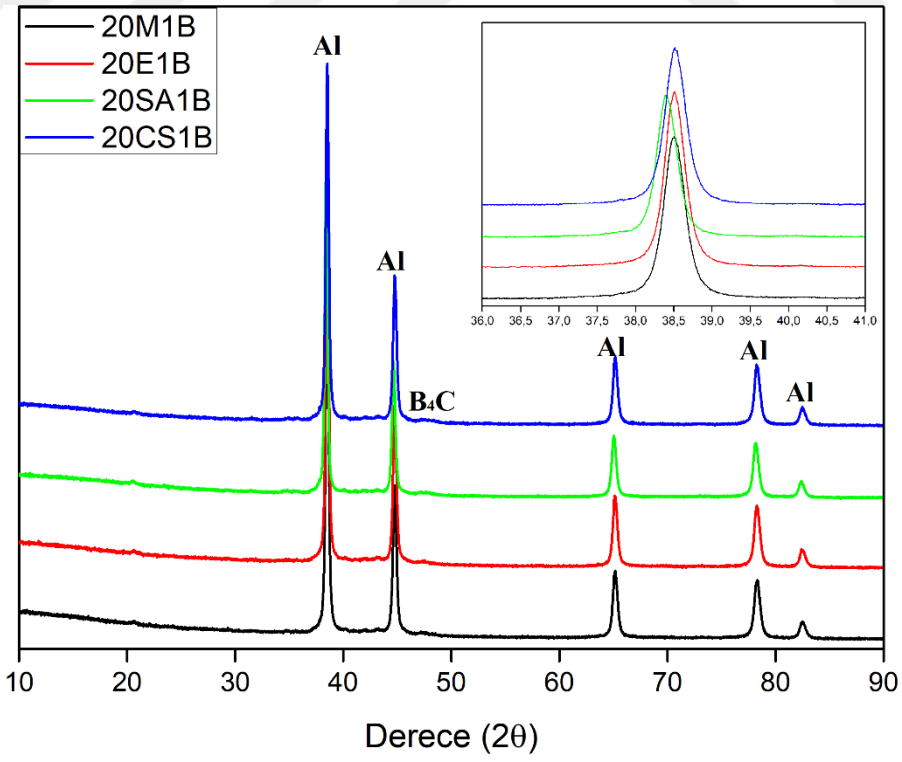
Değişen öğütme süresi ve PCA olarak değişen Metanol, Etanol, Stearik Asit ve Çinko Stearat ilavesiyle 3 farklı grup halinde öğütülen kompozit tozlarına ait XRD analizi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Kompozit tozlarının her birinin XRD spektrumunda Alüminyum ve öğütme sürelerine ve PCA miktarlarına göre değişkenlik gösteren Al_2Cu fazlarına rastlanırken belirgin bir B_4C fazına artan takviye oranlarıyla birlikte rastlanmıştır.



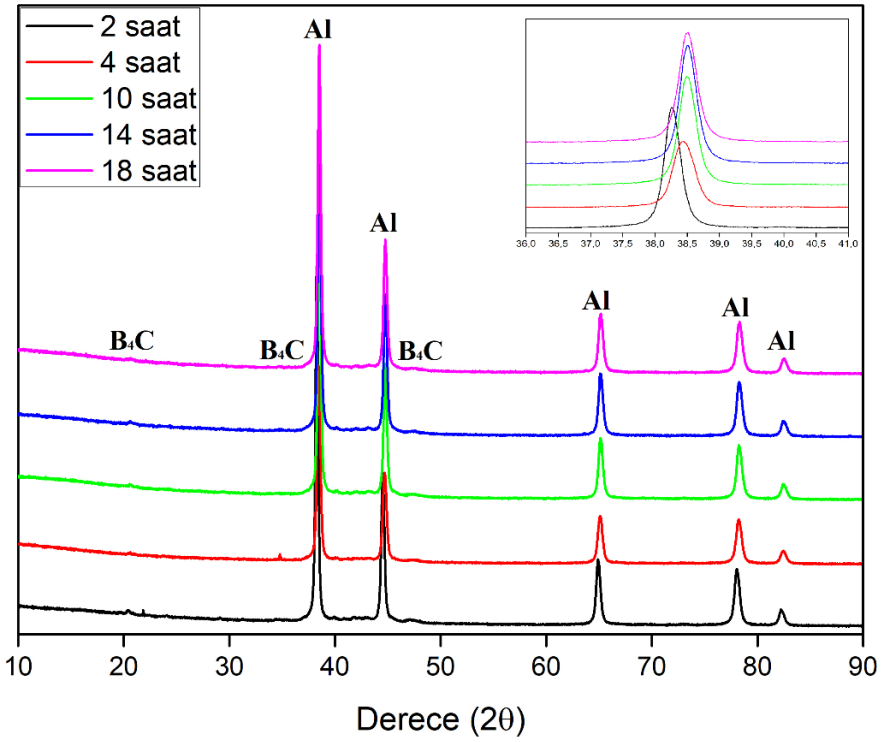
Şekil 153. 1. Grup kompozit tozlarına ait XRD Analizi.



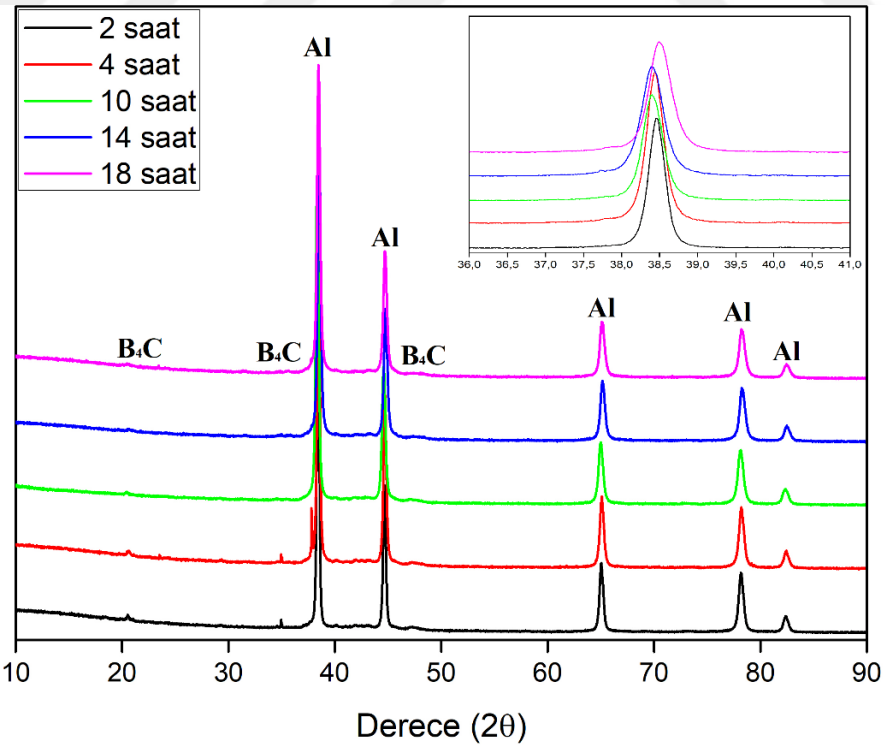
Şekil 154. 2. Grup kompozit tozlarına ait XRD Analizi.



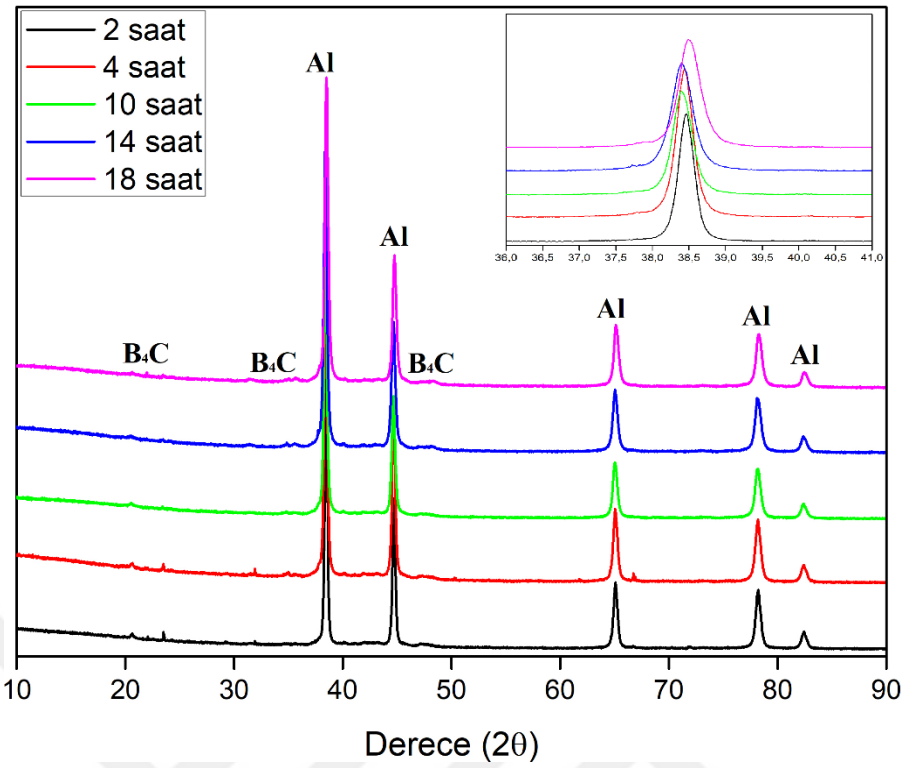
Şekil 155. 3. Grup kompozit tozlarına ait XRD Analizi.



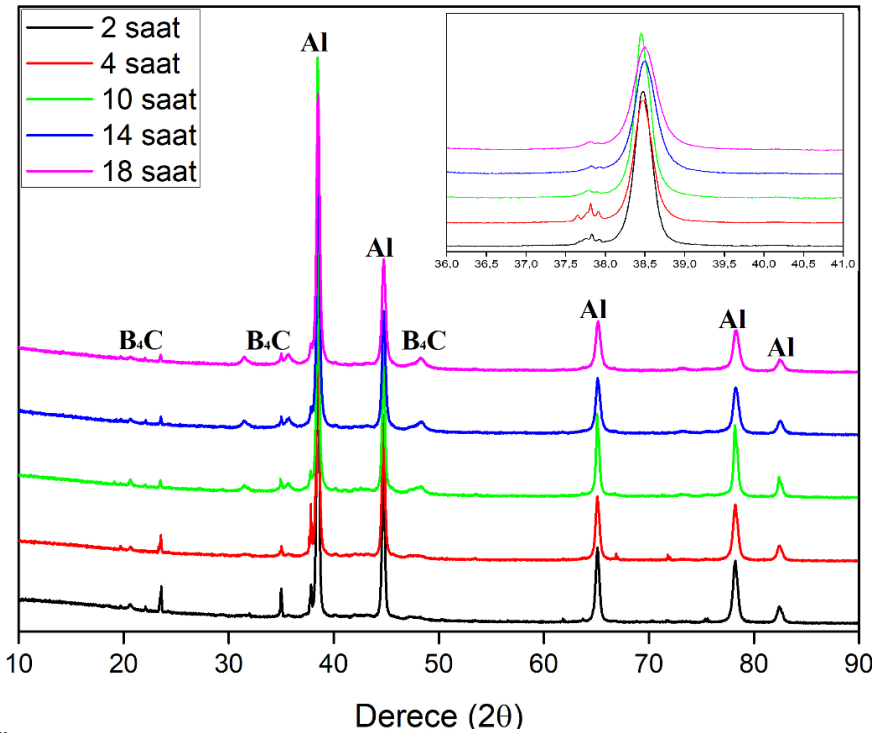
Şekil 156. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%1 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi.



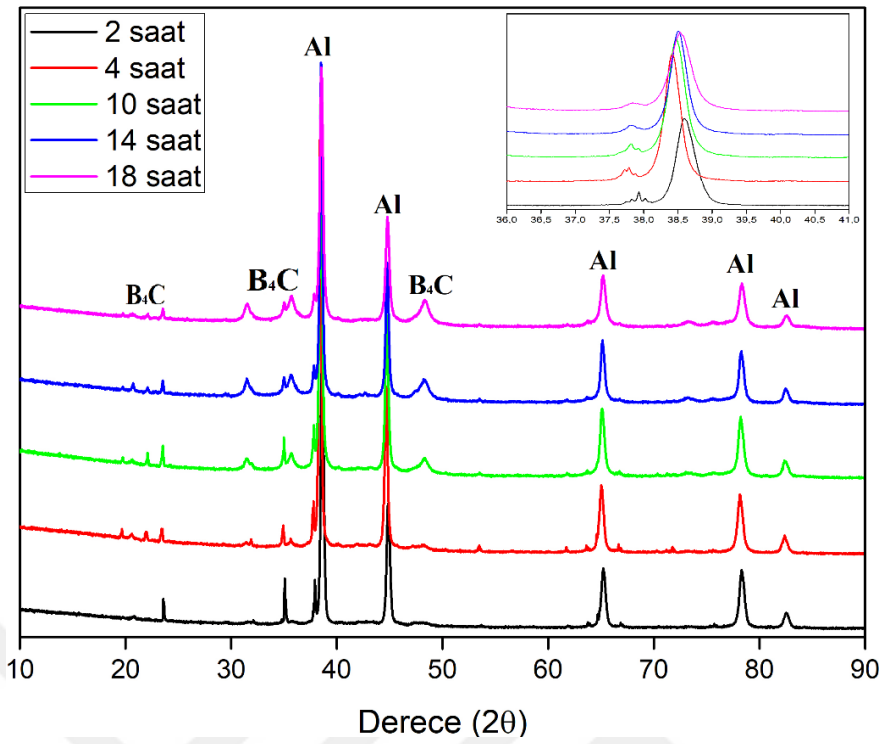
Şekil 157. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%2 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi.



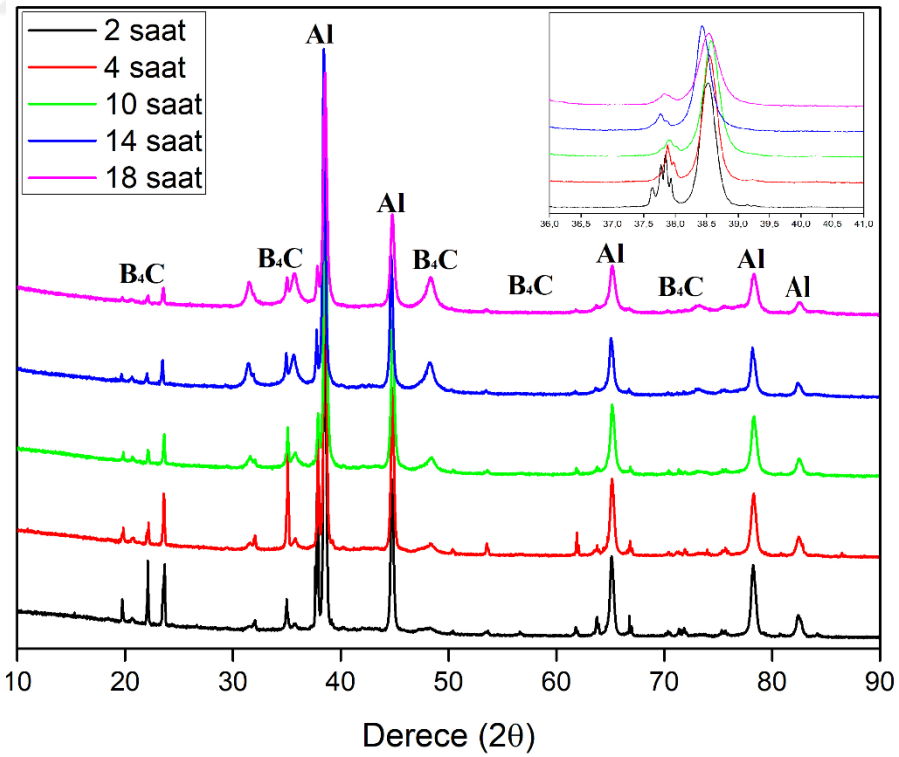
Şekil 158. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%5 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi.



Şekil 159. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%10 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi.



Şekil 160. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%20 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi.



Şekil 161. Öğütme başlangıcında ağ. %2 ve öğütmenin 2, 4, 10 ve 14. saatlerinde ağ. %0.5 ilave ile toplamda ağ. %4 Metanol ilavesi ile 2 saat, 4 saat, 10 saat, 14 saat ve 18 saatlik öğütme sonrası AA2024-%30 B_4C kompozit tozlarının XRD Analizi.

Yapılan XRD analizleri incelendiğinde, geleneksel yöntem ile geleneksel ve eklemeli kompozit ve artan takviyeli kompozit tozlarının incelemelerinde düşük B_4C oranlarındaki incelemelerde karakteristik pikler anlamında genellikle Al ve B_4C piklerinin görüldüğü, ancak şiddetlerinin düşük olduğu görülmüştür.

Takviye miktarı arttıkça Al ve B_4C karakteristik piklerinin şiddetinin artarak belirgin hale geldikleri görülmüştür. Öğütme süresi arttıkça karakteristik piklerin belirin olmasına rağmen piklerin hem şiddetleri düşmekte hem de Bragg açısı ile ilgili konumlarında kaymalar meydana gelmektedir. Bunun sebebi öğütme sistematiğinin ortaya çıkardığı pik ve konum değişiklikleridir (Krasnowski vd., 2006; Moumeni vd., 2005).

Yapılan XRD incelemelerinde, takviye arayüzeylerinde Al- B_4C ile bir reaksiyon meydana gelmediği için Al-B-C türü fazlara rastlanmamıştır. Bunun ortaya çıkmama nedeni genellikle bu tür fazların 700°C üzerinde oluşmasıdır (Canakci vd., 2007; Viala vd., 1997).

3.2. Üretilen AA2024-B_4C Kompozitlerin Özellikleri

3.2.1. Kompozitlerin Yoğunluk ve Gözeneklilik Değerleri

Toz metalurjisi yöntemi ile metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde, tozların sıkıştırılmasında uygulanan presleme işleminde ilk olarak sıkıştırma ile toz partikülleri birbiri üzerinden kayarak hareket eder ve yer değiştirirler. Tozların sıkıştırılarak kompakt hale getirilmesi aşamasında partikül boyutu ve toz morfolojisi tozların paketlenmesini etkileyen en önemli parametrelerdir. Tozların sıkıştırılmasıyla meydana gelen elastik ve plastik deformasyon mekanizmaları ile partiküller arasında mekanik bağ oluşmaktadır. Preslemenin devamında tozlar kırılarak plastik deformasyona uğrar ve böylece sıkıştırılan yapı içerisindeki gözenekler azalmakta, toz partikülleri basınç ve sıcaklığın etkisiyle birbirleri ile soğuk kaynaklanmaktadır. Tozun presleme ve paketlenme kabiliyetini azaltan diğer faktör, yapıda bulunan sert seramik takviye partikülleri ve bu partiküllerin öğütme süresince yapı içerisine gömülememesi sonucunda farklı morfolojileri sebebiyle presleme esnasında partiküller arası boşlukların giderilmesine engel olması ve de artan öğütme süresi ile kompozit tozlarının sertliğinin artmış olmasıdır. Bu da bağıl yoğunlukta azalmaya ve gözeneklilikte artışa sebebiyet vermektedir. 1., 2. Ve 3. Grup kompozit numunelerine ait bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 5. 1. Grup AA2024-%1 B_4C kompozitlerinin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.

Numune Kodu	Teorik Yoğunluk (g/cm^3)	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)
5M-1B	2,718	98,23	1,77
5E-1B		98,12	1,88
5SA-1B		97,87	2,13
5CS-1B		97,81	2,19

Tablo 6. 2. Grup AA2024-%1 B_4C kompozitlerinin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.

Numune Kodu	Teorik Yoğunluk (g/cm^3)	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)
14M-1B	2,718	98,28	1,72
14E-1B		98,17	1,83
14SA-1B		97,99	2,01
14CS-1B		97,91	2,09

Tablo 7. 3. Grup AA2024-B_4C Kompozitlerinin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.

Numune Kodu	Teorik Yoğunluk (g/cm^3)	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)
20E-1B	2,718	98,37	1,63
20SA-1B		98,25	1,75
20CS-1B		98,16	1,84
20M-1B		98,45	1,55
20M-2B	2,716	98,14	1,86
20M-5B	2,71	97,87	2,13
20M-10B	2,7	97,79	2,21
20M-20B	2,68	97,56	2,44
20M-30B	2,66	97,43	2,57
20M-40B	2,64	97,34	2,66

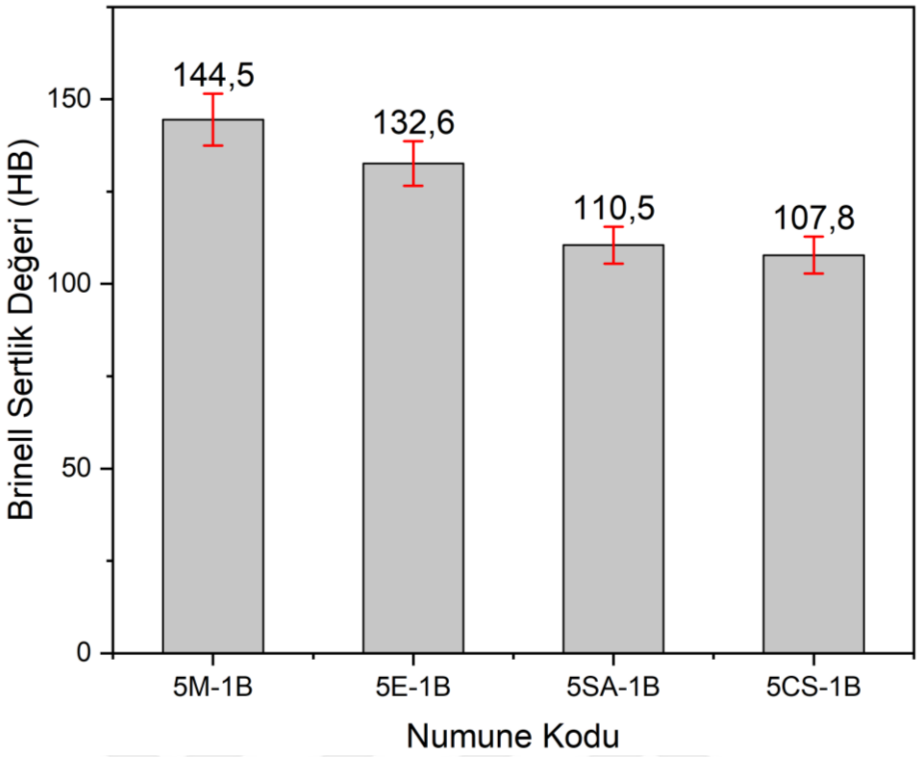
Artan öğütme süresiyle bağıl yoğunluk artış gösterirken, artan B_4C oranıyla beraber yoğunluk oranları düşüş göstermektedir. Öğütme sistematiği parametrelerine bağlı olarak

toz sertliği ve morfolojilerde değişikliğe sebep olmakta beraber, bunlar da tozların paketlenmesi ve sıkıştırılabilme ve şekillendirilmesinde etki etmektedir. Şöyle ki, öğütme süresi arttıkça deformasyon oranı artmakta, bununla birlikte sertlik artmakta ve bu paketleme ve şekillendirmeyi kötü yönde etkilerken toz boyutunun küçülmesi hem sinterlemeye hem de paketlenmeye katkı sağlamaktadır. Yine takviye miktarı artan kompozitlerde ise takviye miktarının artması, toz boyutunun küçülmesine, sertliğin artmasına, sinterlemenin iyileşmesine , partikül miktarının artmasıyla gaz girişinin artması, partikül topaklanmasının oluşturduğu gözenekliliğin artması kompozitlerde yoğunluk ve gözeneklilik miktarını değiştirmektedir (Çanakçı, 2012).

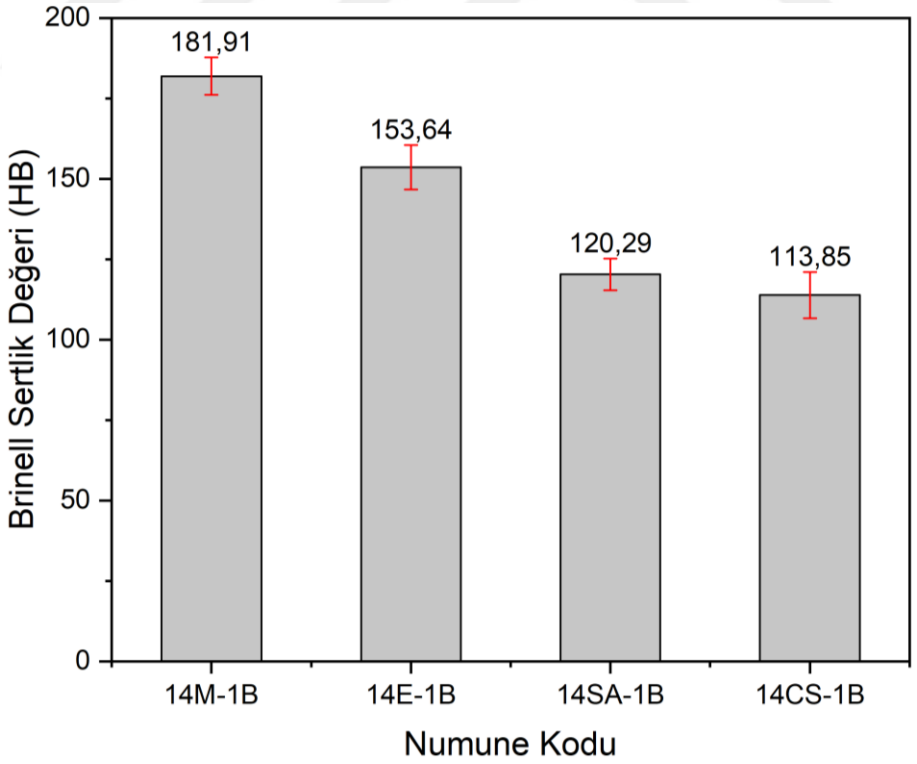
Bu sonuçlardan, öğütme sistematiğini iyileştiren ve homojen toz dağılımı sağlayan Metanol PCA kullanıldığında optimum malzeme için geleneksel ile eklemeli ve takviye miktarları artan kompozitlerde yoğunluk değerleri azalarak gözeneklilik miktarı daha az oranlarda artmıştır. Takviye miktarı arttıkça öğütme etkinliğine bağlı olarak yoğunluk değerleri azalmakta, gözenek miktarı diğer prosesteki numunelere göre daha da artmaktadır. Bunun sebeplerine bakıldığında, sert partiküllerin kendi karakteristik özelliği olarak daha yüksek deformasyon oranının oluşması tozların paketlenmesini zorlaştırmakta, takviye miktarının artmasıyla tozların yapı içerisinde topaklanmasının artması nedeniyle gözenek miktarının artması ve takviye miktarından gelen yabancı maddelerin oluşturduğu gözeneklilik bu farkları ortaya çıkarmaktadır (Luo vd., 2017).

3.2.2. AA2024-B_4C Kompozitlerinin Sertlik Değerleri

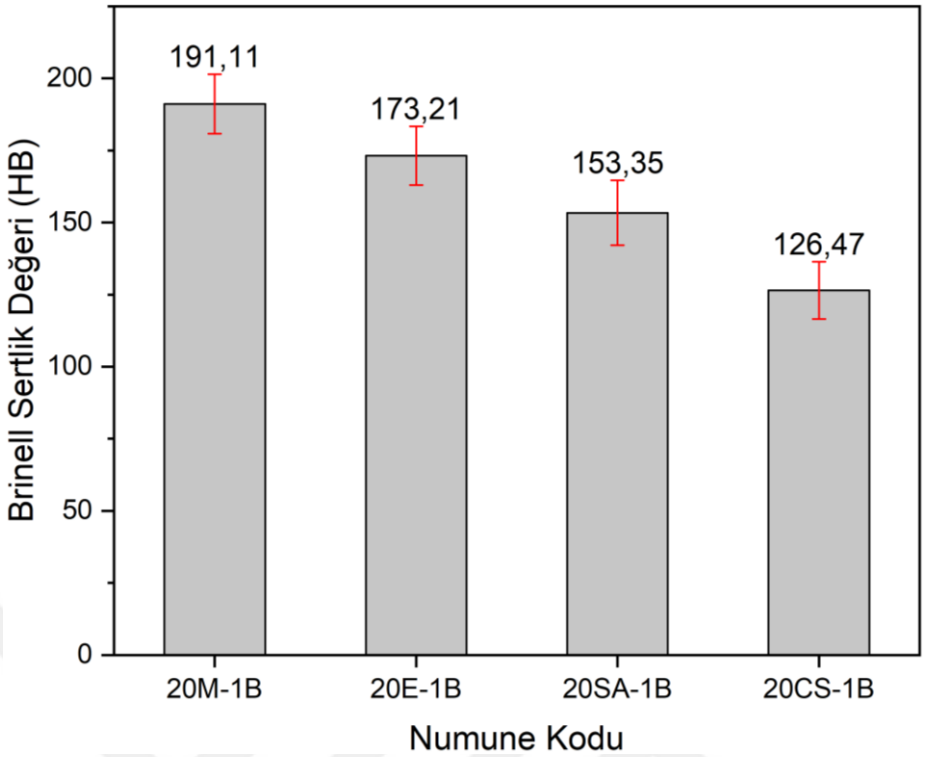
Değişen öğütme süreleri ve değişen PCA oranları ile üretilen 1., 2. ve 3. Grup kompozit numunelerin Brinell Sertlik değerlerine ait grafikler aşağıda verilmiştir. Kompozit numunelerine ait sertlik değerleri incelendiğinde ve kompozit numunelerinin takviye partikülü olan B_4C oranı göz önünde bulundurulduğunda, her bir kompozit malzemenin sertlik değerleri üzerinde sertliği yüksek seramik takviye partikülünün etkisi yaklaşık olarak benzer olmaktadır. Kompozit tozlarının öğütme sürecinde ilave edilen farklı PCA'ların öğütme işleminde meydana gelen soğuk deformasyona bağlı gevrekleşmesi ve kırılmasını takiben meydana gelen soğuk kaynaklanması mekanizması üzerindeki etkinliği, bu tozlardan üretilen kompozit malzemelerin özelliklerini de etkilemektedir.



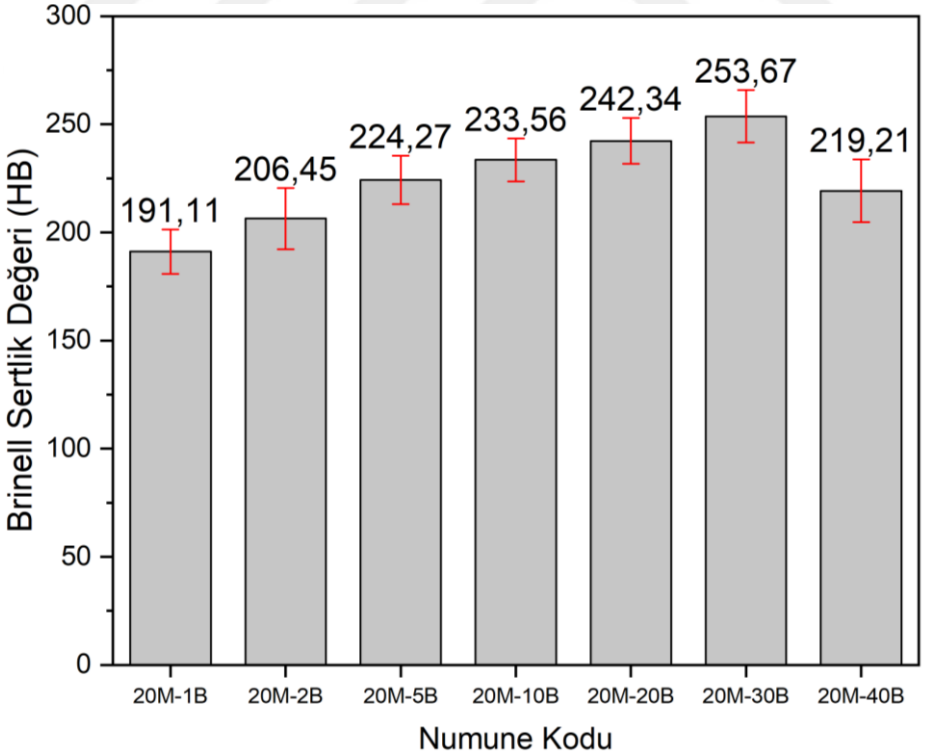
Şekil 162. 1. Grup kompozit numunelerine ait Brinell sertlik değerleri.



Şekil 163. 2. Grup kompozit numunelerine ait Brinell sertlik değerleri.



Şekil 164. 3. Grup kompozit numunelerine ait Brinell sertlik değerleri.



Şekil 165. Grup AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 18 saat boyunca öğütülen ağırlıkça %1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren 3. Grup kompozitlerinin sertlik değerleri.

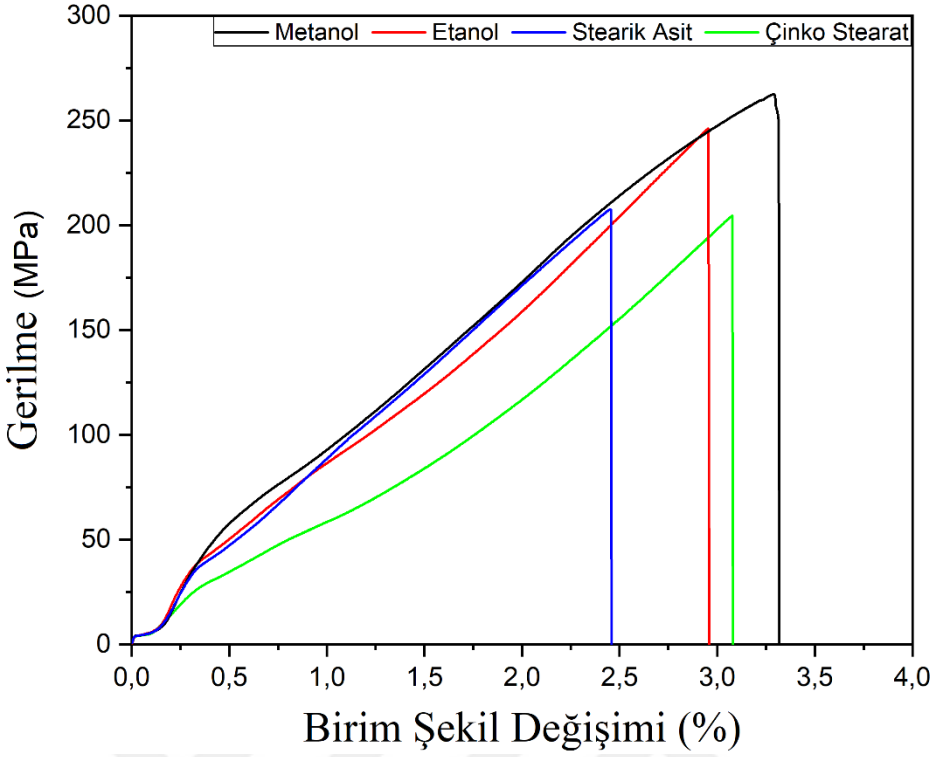
Yapılan sertlik incelemelerinde, geleneksel yöntemle 5 saat boyunca sıvı grubu (Metanol ve Etanol) kullanılarak öğütülen kompozitlerde sertlik değerleri, katı grubuna (Stearik Asit, Çinko Stearat) göre daha yüksektir (Şekil 162). Sıvı ve katı grubu PCA'ların ise kendi içerisinde, Metanol ve Stearik Asit PCA kullanımında sertlik değerleri öne çıkmaktadır. Burada sertliğin belirgin yüksekliğindeki en önemli etken, Metanolün öğütmede en iyi çözümü üreterek soğuk kaynak ve boyut küçültmedeki etkinliğinin iyi olması dolayısıyla soğuk deformasyon etkinliğinin de oluşmasıdır.

Geleneksel ile geleneksel ve eklemeli PCA yöntemiyle üretilen kompozitlerde ise süre arttıkça Brinell sertlik değerleri artmış, bu artışlar PCA tipine ve kendi içlerinde bakıldığında Metanol PCA kullanılan rejimlerde en iyi sonucu vermiştir. Ayrıca geleneksele göre geleneksel ve eklemeli PCA yönteminde uygulanan öğütme sistematiğinde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Artan takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerine bakıldığında ise geleneksele ek olarak eklemeli PCA ilavesinin etkin öğütmeyi sağlaması ve takviye miktarının artmasının da öğütme esnasındaki hem boyut küçültmesine hem de deformasyon sertleşmesine sebep olması, sertlik değerlerinin artmasında rol oynamaktadır.

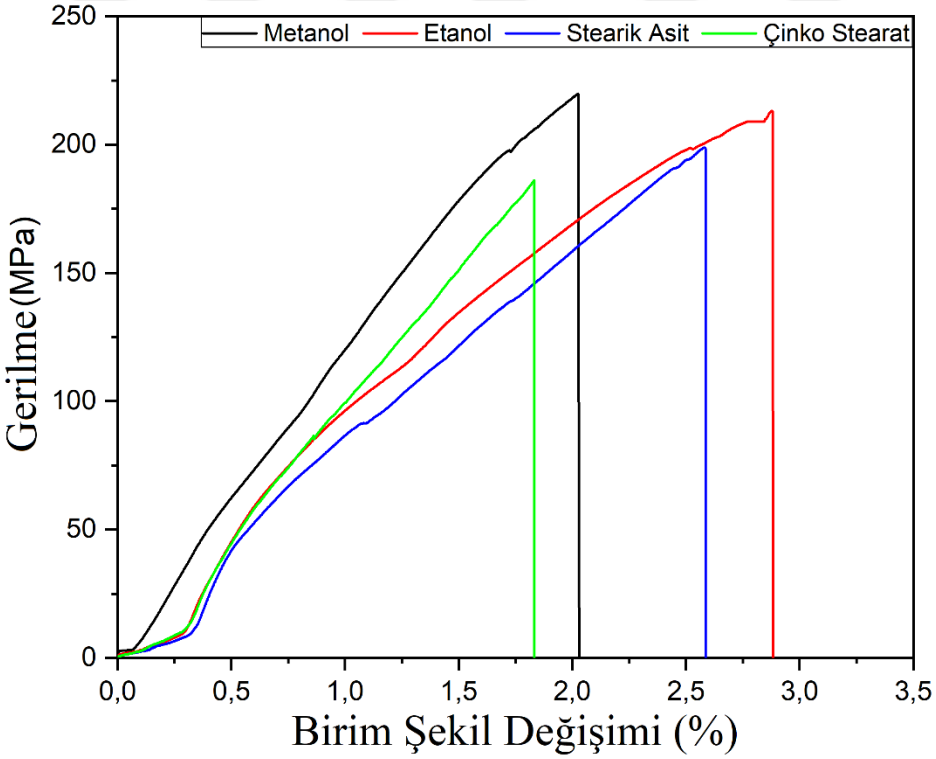
Artan takviye oranlarına sahip kompozitlerin sertliklerinde, sertliğin takviye miktarına bağlı olarak ağırlıkça %30 B_4C içeren kompozit numunesine kadar artış gösterdiği(253,67 HB) (Şekil 165), bunun üzerindeki takviye oranlarında ise bu sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. Yapılan incelemelerde, takviye miktarının %30'u geçtiği durumda ıslatmanın yetersiz olması, topaklanma ve gözenek miktarındaki artış nedeniyle aşırı gözenekli bir yapı oluşumu yapıdaki sertlik değerinin azalmasına sebep olmuştur.

3.2.3. AA2024-B_4C Kompozitlerinin Çekme Dayanımı Değerleri

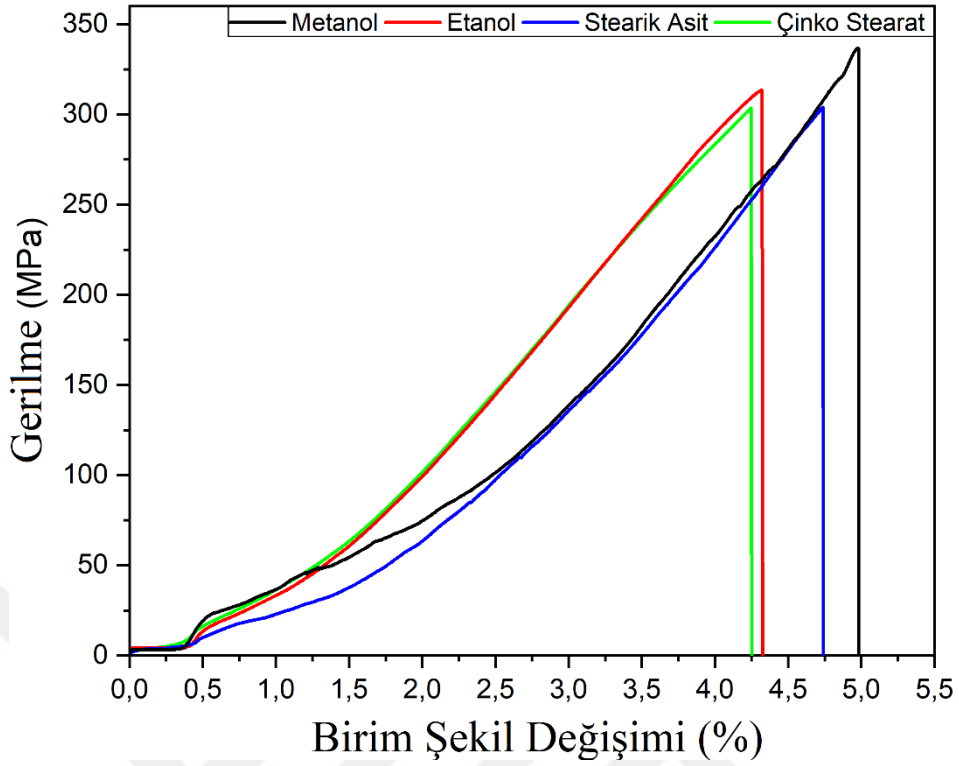
Farklı PCA'lar ilave edilerek farklı sürelerde öğütülen kompozit tozlarından elde edilen numunelere ait çekme dayanımı-gerinim grafiği aşağıda verilmiştir. AA2024- B_4C kompozitlerinin çekme dayanımı üzerinde yapıdaki takviye malzemesinin ve öğütme sonrası matris ve takviye partiküllerinin morfolojisi, Hall-Patch etkisinde bahsedildiği gibi ortalama partikül boyutu ve dağılımının etkisi ve dolayısıyla öğütme işlemi esnasında kullanılan PCA'nın tipi ve verimliliği metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde etkilidir.



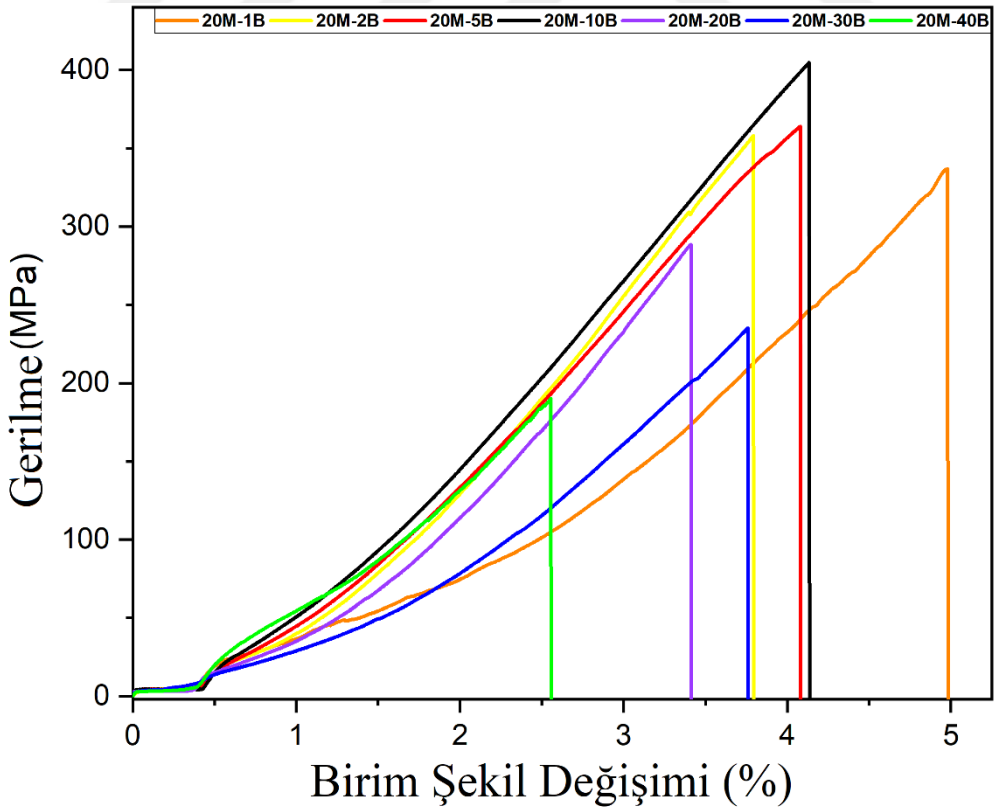
Şekil 166. 1. Grup kompozit numunelerinin çekme diyagramı.



Şekil 167. 2. Grup kompozit numunelerinin çekme diyagramı.



Şekil 168. 3. Grup kompozit numunelerinin çekme diyagramı.



Şekil 169. AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 18 saat boyunca öğütülen ağırlıkça %1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında B_4C içeren 2. Grup kompozitlerinin çekme diyagramı.

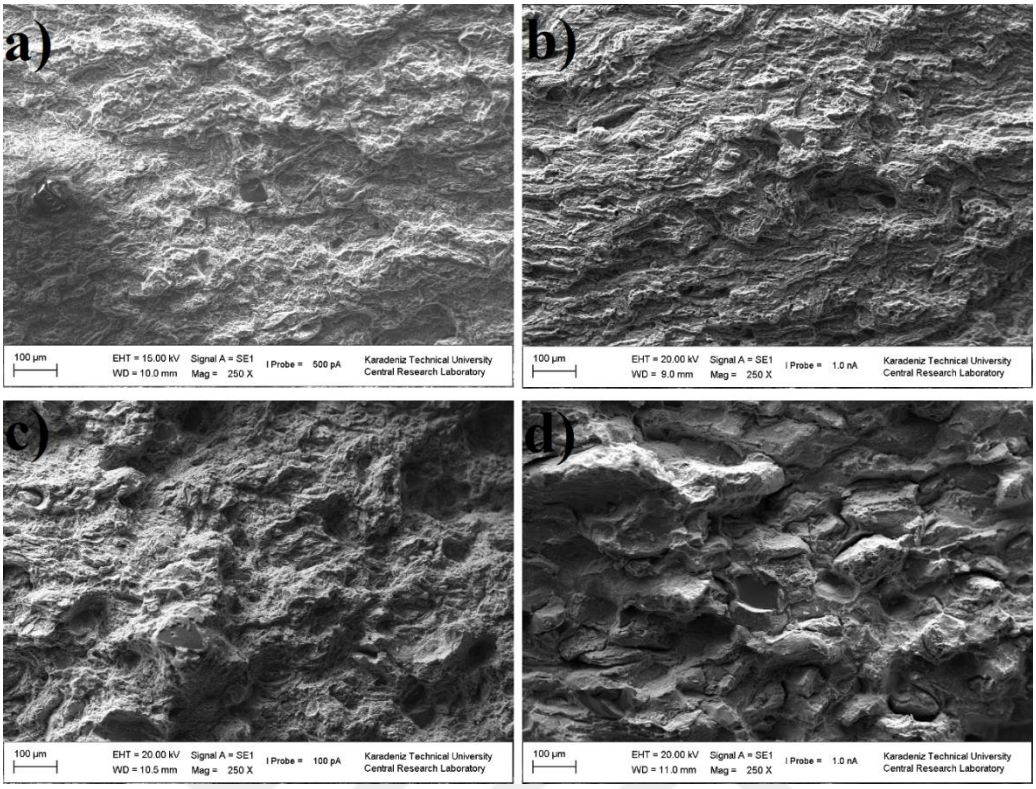
PCA tipine göre yapılan çekme deneyleri sonucunda, en yüksek çekme dayanımı değerinin geleneksel ve eklemeli Metanol ilavesiyle 20 saatlik öğütme ile elde edilen tozlardan üretilen kompozit numunesinden (336,633 MPa), en düşük çekme dayanımı değerinin ise geleneksel yöntemle 5 saat boyunca Çinko Stearat ilavesi ile öğütülerek elde edilen tozlardan üretilen kompozit numunesinden (198,95 MPa) elde edilmiştir. Öğütme rejiminde kullanılan Metanolün, partiküllerdeki arayüzey ve boyut etkisi kompozitlerin özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Boyutun küçük ve homojene yakın olması, paketlenmesinin ve iyi bir sinterlemenin meydana gelmesi, çekme dayanımı değerlerinin artmasını sağlamaktadır (Şekil 166, Şekil 168).

Geleneksel ve geleneksel ile eklemeli PCA sisteminde öğütülerek elde edilen tozlardan üretilen ağırlıkça %1 B_4C içeren kompozit numunelerinde süre artışıyla birlikte çekme dayanımı değerleri artış göstermiştir. Geleneksel ile eklemeli PCA sistematiğinde en iyi çekme dayanımı değerini metanol ile öğütülen kompozitler vermiştir (Şekil 166, Şekil 167, Şekil 168).

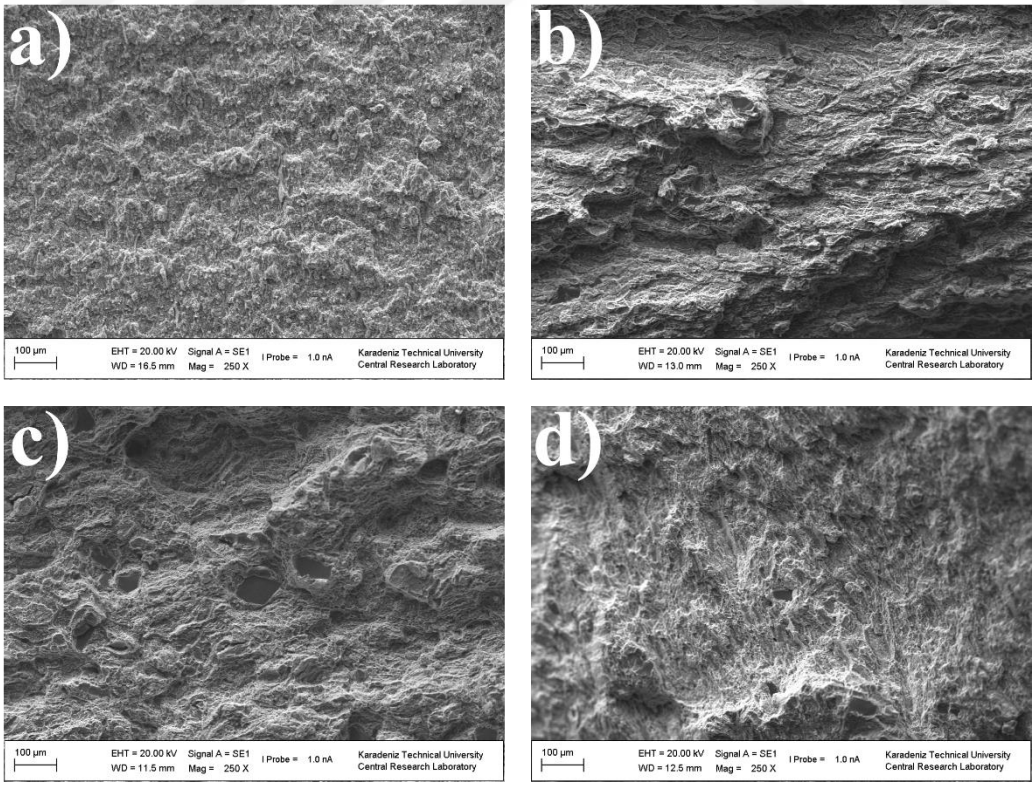
AA2024- B_4C kompozitlerin ağırlıkça %1'den ağırlıkça %40'a kadar artış gösterdiği oranlara sahip kompozitlerde ise, geleneksel ile eklemeli metanol ilavesi ile öğütme sistematiğinde ağırlıkça %10 B_4C içeren kompozit numunesi en iyi çekme değerini (404,766 MPa) vermiş, bu takviye oranı üzerindeki oranlarda ise çekme dayanımı değerleri düşüş göstermiş ve ağırlıkça %40 B_4C içeren kompozit numunesinde en düşük çekme dayanımı (190,093 MPa) değeri tespit edilmiştir (Şekil 169).

3.2.4. AA2024-B_4C Kompozitlerinin Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

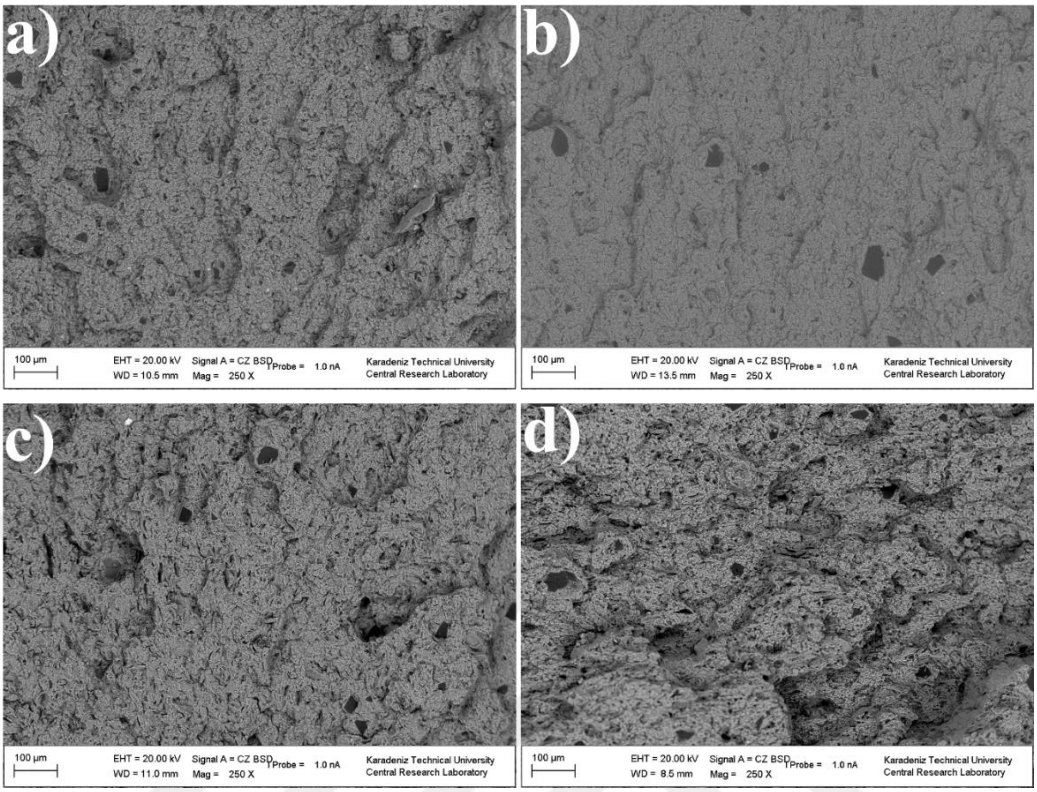
Kompozit malzemelerin kırılma davranışlarının analizinde, kırılma yüzeylerinin karakteristik özellikleri, kırılmanın sünek, gevrek, taneler arası veya taneler içi bir kırılma olup olmadığının belirlenmesi elzemdir. Değişen öğütme süreleri ve değişen PCA oranları ile üretilen 1., 2. ve 3. Grup kompozit numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



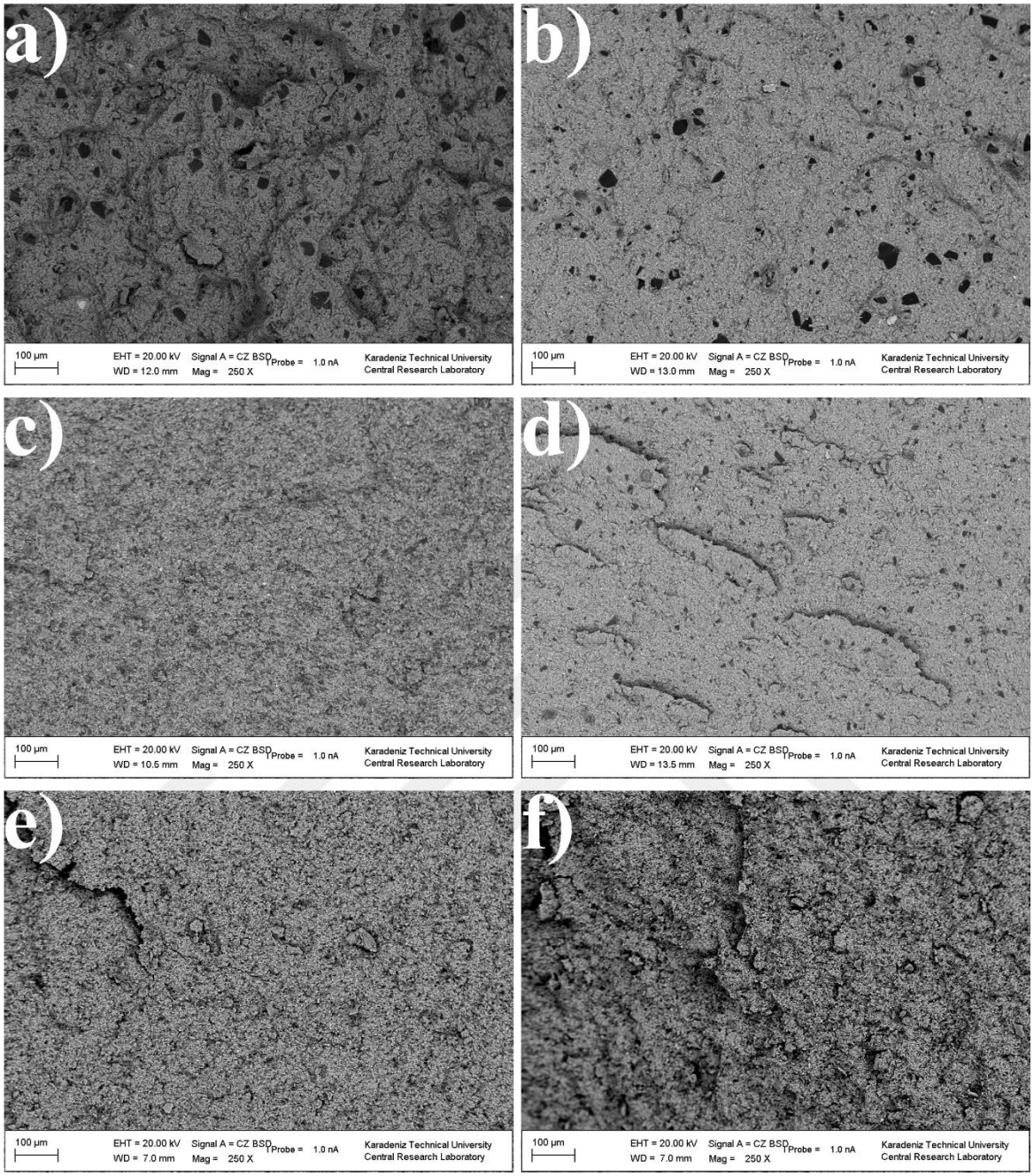
Şekil 170. 1. Grup Kompozitlere ait; a) 5M-1B, b) 5E-1B, c) 5SA-1B ve d) 5CS-1B kırılma yüzeyleri.



Şekil 171. 2. Grup Kompozitlere ait; a) 14M-1B, b) 14E-1B, c) 14SA-1B ve d) 14CS-1B kırılma yüzeyleri.



Şekil 172. 3. Grup Kompozitlere ait; a) 20M-1B, b) 20E-1B, c) 20SA-1B ve d) 20CS-1B kırılma yüzeyleri.



Şekil 173. AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 20 saat boyunca öğütülen ağırlıkça; a) %2, b) %5, c) %10, d) %20, e) %30 ve f) %40 oranlarında B_4C içeren kompozitlerinin kırılma yüzeyleri.

Yapılan kırılma yüzeyi incelemelerine bakıldığında, toz boyutu, paketlenme ve sinterlemenin iyi olmasından dolayı Metanol ile öğütülen yapıların daha lifli olduğu görülmekte, diğer yapılarda ise daha derin oyuklarla birlikte sünek-gevrek bir kırılma yapısı görülmektedir (Şekil 170). Metanol ile öğütülen kompozitlerin kırılma yüzeylerinde takviye dağılımı homojen bir yapıdayken diğer yapılarda ise topaklanmaların bulunduğu ve

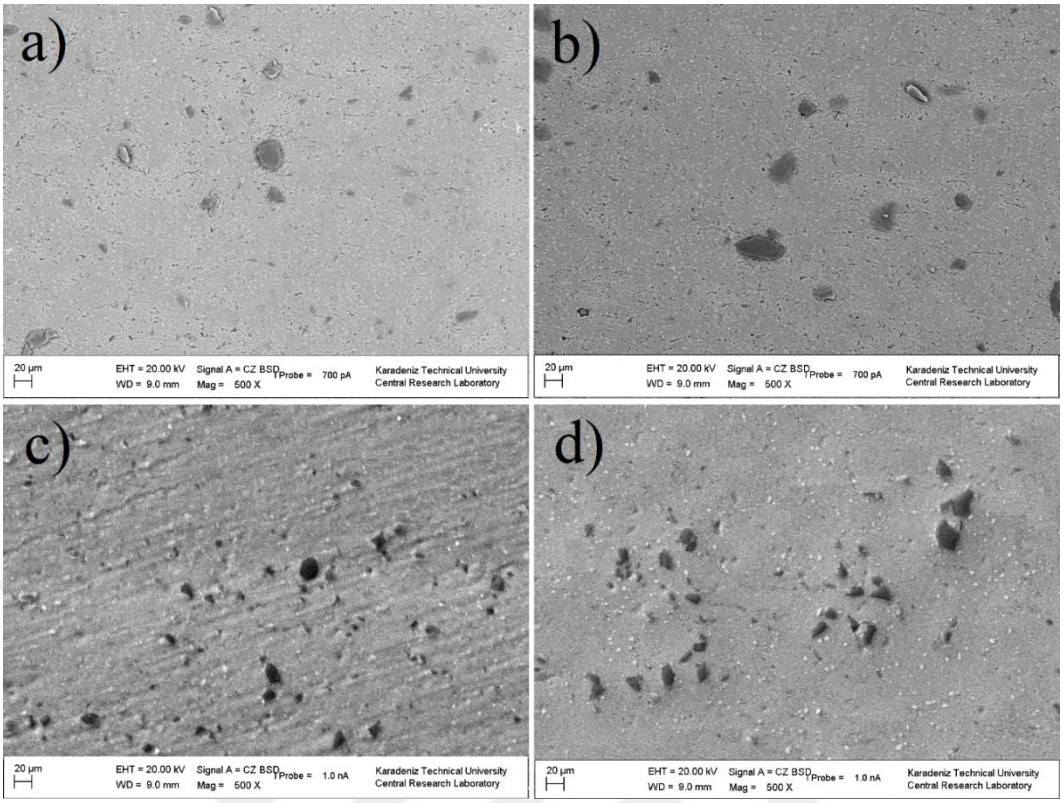
sünekliğin azalmasına sebep olan oyuklanma şeklindeki morfolojiler göze çarpmaktadır. Buradan elde edilen sonuçlar çekme dayanımı değerleri ile uyumlu bir sonuç ortaya koymaktadır.

Artan öğütme süresi ile ilgili değişimlere bakıldığında, ağırlıkça %1 B_4C içeren geleneksel ve eklemeli PCA sistematiğinde üretilen kompozitlerdeki kırılma yüzeylerindeki yapıların genel anlamda birbirine benzer olduğu ancak Metanol kullanılarak öğütülüp üretilen kompozit yapısının morfolojisi incelendiğinde boşlukların, hataların yapıda daha az bulunduğu, B_4C partiküllerinin yapıda daha küçük ve homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Buradaki sonuç da çekme dayanımı değerleriyle uyumludur. Metanolde kırılma yüzeylerinde yüzey morfolojisi lifli ve sünek bir görüntü göze çarpmakta, diğer yapılarda ise partiküllerin aglomere olma eğilimi gösterdiği, derin oyukların bulunduğu ve B_4C boyutlarının daha iri olduğu görülmektedir. Bu durum, yüzeydeki lifli morfolojinin azalmasına ve çekme mukavemetini olumsuz etkileyecek şekilde metanole kıyasla diğer kompozitlerin daha düşük dayanım göstermesini açıklamaktadır (Şekil 170, Şekil 171, Şekil 172).

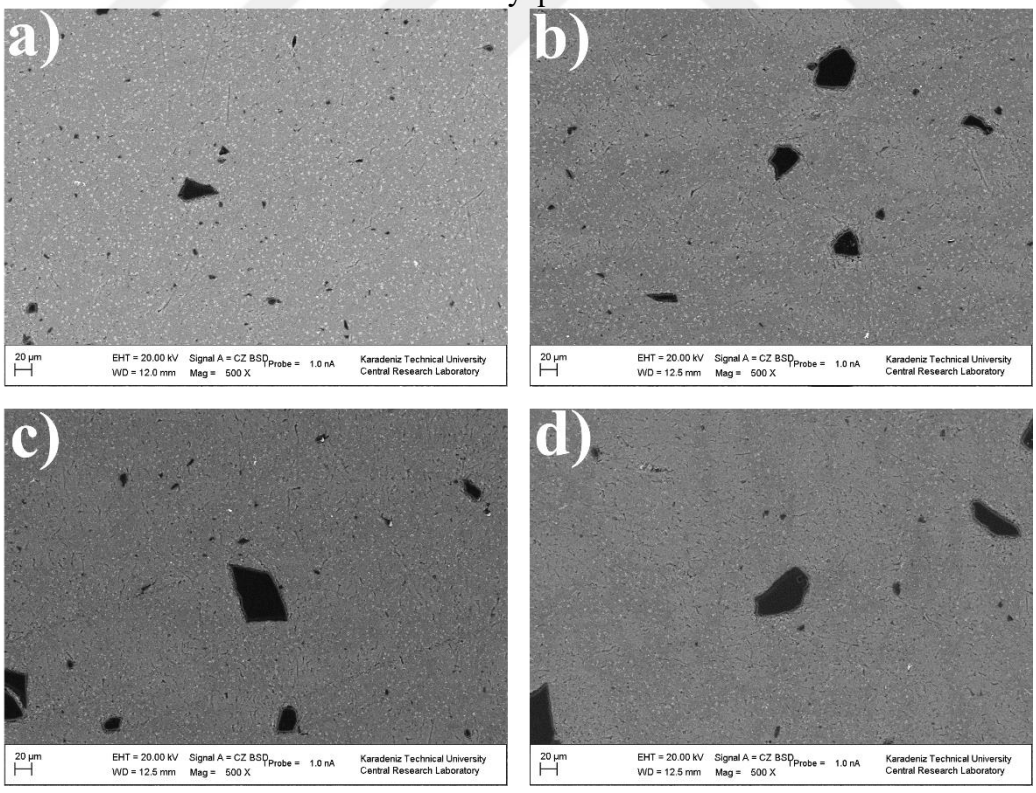
Artan takviyeli kompozitlere bakıldığında ise, 20 saat sonundaki yapılarda düşük takviye oranlarındaki kompozitlerin, özellikle ağırlıkça %10'a kadar B_4C içeren kompozitlerin kırılma yüzeylerinde hem küçük boyutlu hem de homojen dağılım gösteren takviye partikülleri görülmekte ve kırılma yüzeyi morfolojik olarak lifli ve daha az oyuklara sahiptir. Bu da %10 değerine kadar sağlanan kararlılığı göstermekte ve bu sonuç çekme dayanımı değerlerine de yansımaktadır. %10 üzerindeki takviye miktarının ise takviye ile matris arasındaki arayüzey ile ilgili problemleri(topaklanma, gözenek, sinterleme zorluğu gibi) arttırıcı etki göstermesi, üretim esnasında istenmeyen sonuçlar vererek gevrek bir kırılma morfolojisi ortaya koymuştur (Şekil 173).

3.2.5. AA2024-B_4C Kompozitlerinin İçyapı Görüntüleri

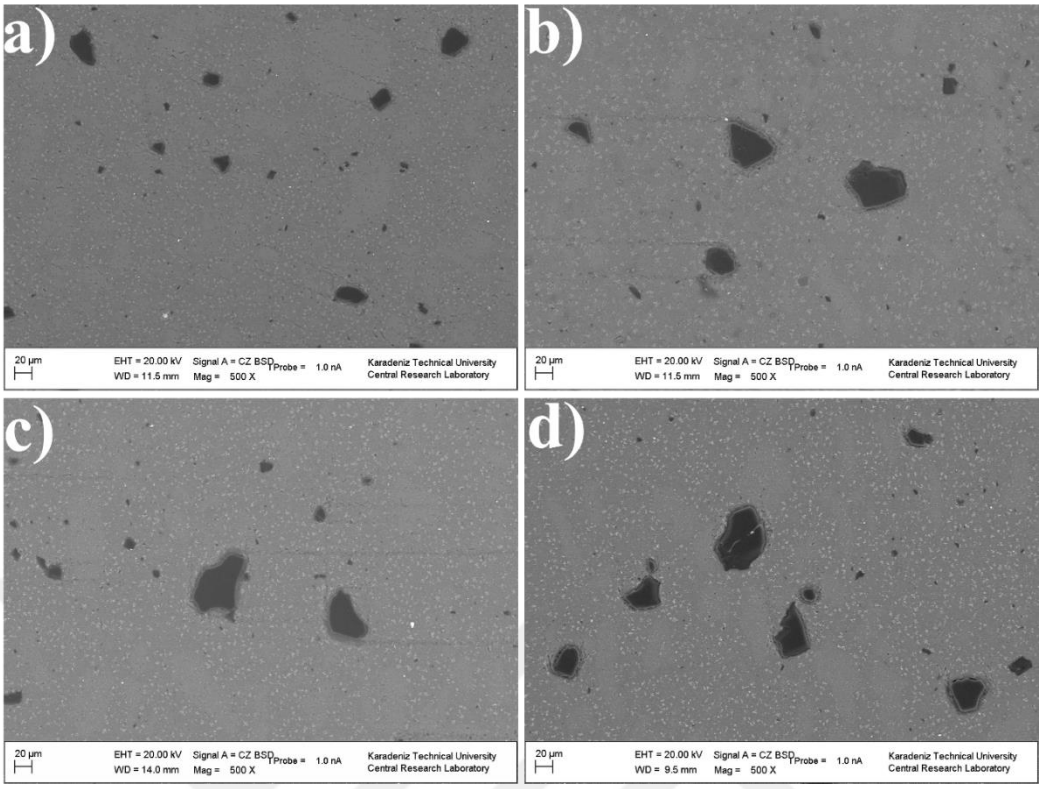
Değişen öğütme süreleri ve PCA miktarları ile öğütülerek elde edilen kompozit tozlarından üretilen 1., 2. ve 3. Grup AA2024-B_4C kompozitlerinin mikroyapı görüntüleri aşağıda verilmiştir.



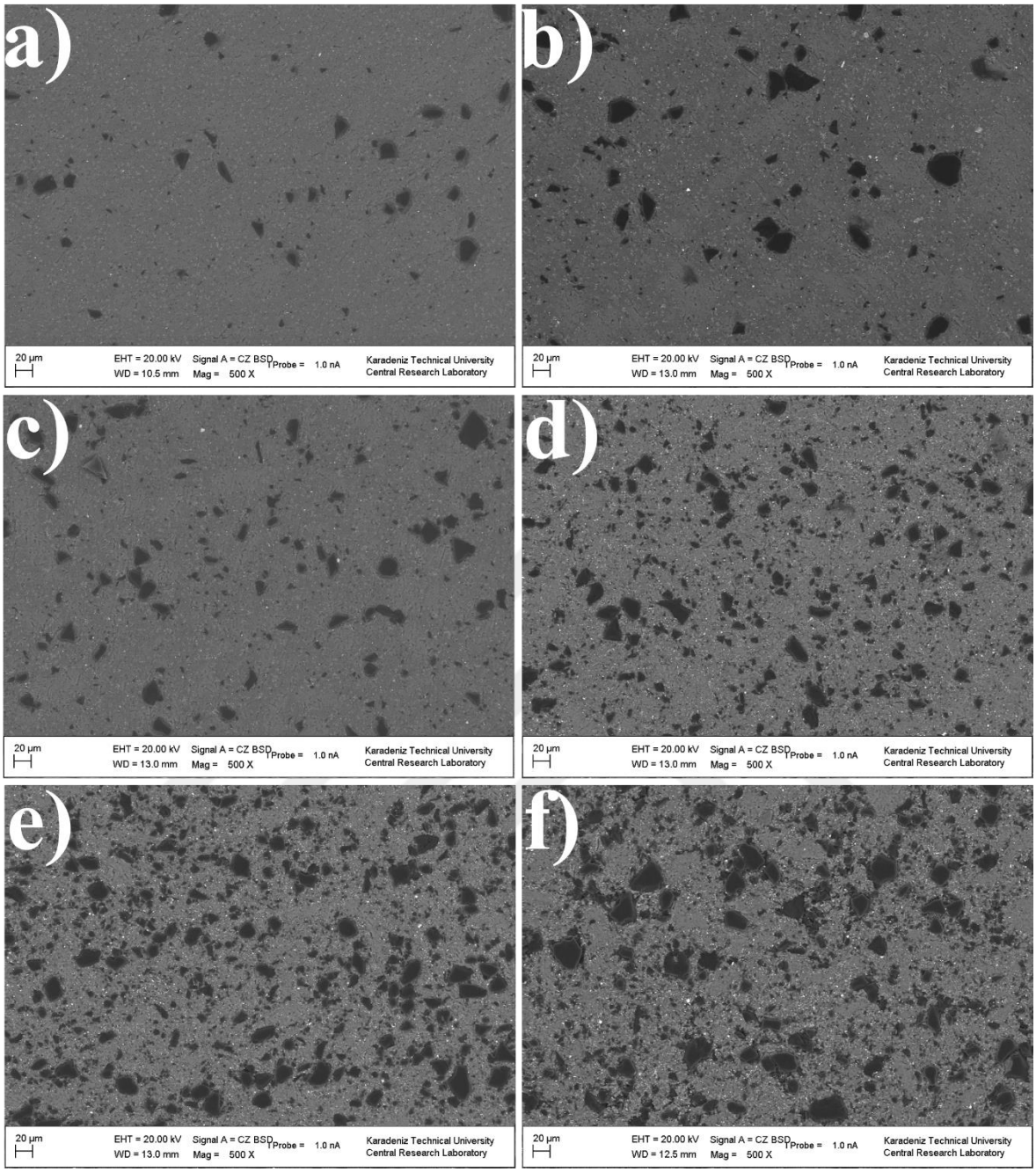
Şekil 174. 1. Grup Kompozitlere ait; a) 5M-1B, b) 5E-1B, c) 5SA-1B ve d) 5CS-1B mikroyapılar.



Şekil 175. 2. Grup Kompozitlere ait; a) 14M-1B, b) 14E-1B, c) 14SA-1B ve d) 14CS-1B mikroyapılar.



Şekil 176. 3. Grup Kompozitlere ait; a) 20M-1B, b) 20E-1B, c) 20SA-1B ve d) 20CS-1B mikroyapılar.



Şekil 177. AA2024-B_4C kompozitlerinin toplamda ağ. %4 Metanol ilavesiyle 18 saat boyunca öğütülen ağırlıkça; a) %2, b) %5, c) %10, d) %20, e) %30 ve f) %40 oranlarında B_4C içeren kompozitlerin mikroyapıları.

Geleneksel PCA uygulanan kompozitlerin ve geleneksel ve eklemeli PCA ile üretilen kompozitlerin içyapı incelemelerine bakıldığında, Metanol ilaveli öğütülen yapılarda öğütmenin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi, B_4C dağılımının homojen ve boyut küçültmesinin etkin olduğu görülmektedir. Diğer yapılarda ise boyutların metanolde olduğu

kadar etkin biçimde küçülmediği ve takviye partiküllerinin homojen dağılımının sağlanması konusunda sıkıntılar olduğu görülmektedir (Şekil 174, Şekil 175, Şekil 176).

Geleneksel ve eklemeli PCA'da artan B_4C takviyeli kompozitlerde ise tozların genel anlamda homojen dağıldığı, topaklanın artan takviye miktarında özellikle ağırlıkça %10 oranından sonraki durumlarda görüldüğü ve homojen dağılımın buradan sonra bozulmaya başladığı görülebilmektedir. Genel itibariyle ise homojen bir içyapı ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 177).

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

1. AA2024-B_4C kompozit tozlarının ve artan B_4C oranlarına sahip kompozit tozlarının morfolojik incelemelerinde Geleneksel ve eklemeli PCA ilavesiyle Metanol kullanılan 18 saatlik öğütme sistematiğinin en iyi öğütme verimine sahip olduğu ve B_4C takviye dağılımının homojen bir dağılıma sahip olduğu ve matris fazı içerisine iyi bir şekilde gömüldüğü anlaşılmıştır.
2. Kompozit tozlarının öğütülmesi sonrası elde edilen en homojen boyut dağılımı ve en iyi boyutsal küçültme özelliği, 18 saatlik eklemeli Metanol ilavesi ile öğütülen tozlarda (35,37 µm) ve ağırlıkça %30 B_4C içeren kompozit tozlarında (7,55 µm) elde edilmiş, öğütmenin 20. Saate kadar devam etmesiyle tüm kompozit tozlarında toz boyutunun artış göstermeye başladığı görülmüştür.
3. Tozların sertlik değerlerinin öğütme süresindeki artışla beraber arttığı, en yüksek toz sertliği değerinin geleneksel ve eklemeli metanol ilavesi ile 18 saat öğütülen kompozit tozlarında (444 HV) ve yine eklemeli metanol ilavesiyle 18 saat öğütülen %40 B_4C takviyeli kompozit tozlarında (593 HV) elde edilmiştir.
4. Kompozit tozlarında öğütme süresinin artışıyla arttığı ve değişen PCA tipine göre görünür yoğunluk değerlerinin farklılıklar gösterdiği görülmüştür. En yüksek görünür yoğunluk değeri geleneksel ve eklemeli metanol ilavesi ile 18 saat öğütülen %1 B_4C takviyeli tozlarda (1,52 g/cm^3) olarak ölçülmüştür.
5. Geleneksel, geleneksel ve eklemeli olarak öğütülen kompozit tozları ve artan takviye oranlarına sahip olan kompozit tozlarının XRD analizlerinde Al ve B_4C fazlarına rastlanmış, bunun dışında yeterli oluşum şartları sağlanmadığı için Al-B-C fazları veya Al_2Cu ve Al_4C_3 fazlarına rastlanmamıştır.
6. Kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri, artan öğütme süresiyle beraber artarken PCA tiplerine göre ve PCA tiplerinin öğütme etkinliğine göre ortaya çıkan morfolojik ve boyutsal farklara bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. En iyi yoğunluk değerleri 20 saatlik eklemeli metanol ilavesi ile öğütülen tozlardan üretilen kompozit

malzemesinde elde edilmiştir. Artan takviye oranıyla birlikte ise sert seramik partiküllerin yapıdaki miktarının artışıyla yoğunluk değerlerinde düşüş yaşanmıştır.

7. Artan öğütme süresinin, soğuk deformasyonun ve boyut küçülmesinin etkisi olarak kompozitlerin sertlik değerleri artan öğütme süresiyle birlikte ve artan takviye oranıyla birlikte artmış, en yüksek sertlik değerleri, optimizasyon kompozitleri içerisinde en etkin öğütme verimini sağlayan metanol katkısıyla öğütülen kompozitlerde elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 18 saatlik eklemeli metanol ilavesiyle öğütülerek üretilen kompozit numunesinden (191,11 HB) ve artan takviye oranıyla birlikte ulaşılan en yüksek sertlik değeri ise %30 B_4C katkılı kompozit numuneden (253,67 HB) elde edilmiştir.

8. Kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri de artan öğütme süresi ve takviye oranları ile birlikte artış göstermiş, değişen PCA tiplerine göre (Yoğunluk ve gözeneklilik değerlerinde olduğu gibi) değişkenlik göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı değeri 3. Grup yani geleneksel ve eklemeli PCA ilavesiyle 18 saat öğütülen tozlardan üretilen kompozit numunelerinden metanol ile öğütülen kompozit numunesinden (336,633 MPa), artan takviye oranlarına göre ise %10 B_4C içeren kompozit numunesinden (404,766 MPa) elde edilmiştir. Takviye oranının bunun üzerine çıkması ise yapıdaki dayanımı olumsuz etkileyerek çekme dayanımı değerlerinde düşüşe sebebiyet vermiştir.

9. AA2024- B_4C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise PCA tiplerinin öğütmedeki etkinliğine göre değişen toz boyutu, partikül dağılımı gibi parametrelerin kırılma yüzeylerini etkilediği, iyi bir boyut küçültme etkisine sahip olan ve matris ile takviye fazının birbirine homojen karıştığı yapılarda lifli ve sünek bir kırılma yüzeyi görülürken, öğütmede etkinliği daha düşük olan PCA tiplerinde ise sünek-gevrek ve gevrek kırılma morfolojileri görülmüştür.

10. Değişen öğütme süresi ve PCA tipleriyle öğütülen tozlardan üretilen kompozit numunelerin mikroyapılarında, sıvı tip PCA(metanol ve etanol)'ların hem boyut hem de dağılım özelliklerinin diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği, mikroyapıların içerisinde en iyi dağılımın eklemeli metanol ile öğütmeyle üretilen kompozit yapısında olduğu görülmüştür. Artan takviye oranıyla birlikte ise yapıda aglomerasyonun başladığı görülmüştür.

5. ÖNERİLER

1. Mekanik alaşımlama ile üretilen kompozit tozların ve üretilen kompozit numunelerin morfolojik ve mikroyapısal incelemelerinde TEM(geçirimli elektron mikroskobu) kullanılarak daha detaylı incelemeler gerçekleştirilebilir.
2. Üretilen kompozitlere ısıl işlemler (yaşlandırma gibi) yapılarak bunun kompozitler üzerindeki etkileri ve üretim parametrelerinin buradaki etkileri incelenebilir.
3. Kompozit malzemelere korozyon testleri yapılarak öğütme süresi, PCA tipleri ve miktarının kompozitin korozyon davranışı üzerindeki etkileri incelenebilir.
4. Öğütme süresinin, öğütmede kullanılan PCA tipinin ve miktarının kompozitlerin aşınma dayanımı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmek üzere aşınma deneyleri yapılabilir.
5. Mekanik alaşımlama işlemi esnasında kompozit tozlarının değişen kafes parametrelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Rietveld analizi gibi detaylı XRD analizleri gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

Aich, S., Satapathy, D., & Shield, J. (2017). 7 Rapidly Solidified Rare-Earth Permanent Magnets. *Advances in magnetic materials: processing, properties, performance*.

Aigbodion, V., & Hassan, S. (2007). Effects of silicon carbide reinforcement on microstructure and properties of cast Al–Si–Fe/SiC particulate composites. *Materials Science Engineering: A, 447*(1-2), 355-360.

Ajay Kumar, P., Rohatgi, P., & Weiss, D. (2020). 50 years of foundry-produced metal matrix composites and future opportunities. *International Journal of Metalcasting, 14*(2), 291-317.

Akhtar, S., Saad, M., Misbah, M. R., & Sati, M. C. (2018). Recent advancements in powder metallurgy: a review. *Materials Today: Proceedings, 5*(9), 18649-18655.

Ali, S., Ahmad, F., Yusoff, P. S. M. M., Muhamad, N., Oñate, E., Raza, M. R., & Malik, K. (2021). A review of graphene reinforced Cu matrix composites for thermal management of smart electronics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 144*, 106357.

Altenbach, H., Altenbach, J., & Kissing, W. (2004). Classification of Composite Materials. In *Mechanics of Composite Structural Elements* (pp. 1-14). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Anas, N., Ramakrishna, M., Dash, R., Rao, T. N., & Vijay, R. (2019). Influence of process control agents on microstructure and mechanical properties of Al alloy produced by mechanical alloying. *Materials Science Engineering: A, 751*, 171-182.

Angelo, P., Subramanian, R., & Ravisankar, B. (2022). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. Delhi, India: PHI Learning Pvt. Ltd.

Arpaci, K. A. (2019). *AA2024/h-BN/B4C hibrit nanokompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Baheti, V., Abbasi, R., & Militky, J. (2012). Ball milling of jute fibre wastes to prepare nanocellulose. *World Journal of Engineering, 9*(1), 45-50.

Balasubramanian, M. (2013). *Composite materials and processing*: CRC press.

Bataineh, O., Al-Dwairi, A. F., Ayoub, Z., & Al-Omosh, M. (2021). DOE-based experimental investigation and optimization of hardness and corrosion rate for Cu-x% Al 2 O 3 as processed by powder metallurgy. *AIMS Materials Science, 8*(3).

Bharat, N., & Bose, P. (2022). An overview of production technologies and its application of metal matrix composites. *Advances in Materials Processing Technologies, 8*(2), 1946-1962.

Bommala, V. K., Krishna, M. G., & Rao, C. T. (2019). Magnesium matrix composites for biomedical applications: A review. *Journal of Magnesium and Alloys, 7*(1), 72-79.

Bryan, H. (1999). *Engineering composite materials* (Vol. 5). London: The Institute of Materials.

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Callister's materials science and engineering*: John Wiley & Sons.

Canakci, A., Arslan, F., & Varol, T. (2014). Physical and mechanical properties of stir-casting processed AA2024/B4Cp composites. *Science Engineering of Composite Materials, 21*(4), 505-515.

Canakci, A., Arslan, F., & Yasar, I. (2007). Pre-treatment process of B 4 C particles to improve incorporation into molten AA2014 alloy. *Journal of Materials Science, 42*, 9536-9542.

Canakci, A., Varol, T., & Nazik, C. (2012). Effects of amount of methanol on characteristics of mechanically alloyed Al–Al2O3 composite powders. *Materials Technology, 27*(4), 320-327.

Chak, V., Chattopadhyay, H., & Dora, T. L. (2020). A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Journal of manufacturing processes, 56*, 1059-1074.

Chang, I., & Zhao, Y. (2013). *Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications*: Elsevier.

Chawla, K. K. (1998). Metal Matrix Composites. In *Composite Materials: Science and Engineering* (pp. 164-211). New York, NY: Springer New York.

Chawla, K. K. (2013). *Ceramic matrix composites*. USA: Springer Science & Business Media.

Çanakçi, A. (2006). *AA2024 matrisli B4C parçacık takviyeli kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi.* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

Çanakçı, A. (2012). Production and microstructure of AA2024–B4C metal matrix composites by mechanical alloying method. *Usak University Journal of material sciences, 1*(1), 15-22.

Daridereli, Y. (2010). *Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve Aşınma Direncine Yaşlanmanın Etkisi.* İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*: ASM international.

Dey, A., & Pandey, K. M. (2015). Magnesium metal matrix composites-a review. *Review on Advanced Materials Science, 42*(1), 58-67.

Doremus, R. H. (2008). Alumina. In *Ceramic and glass materials: Structure, properties and processing* (pp. 1-26). Boston: Springer.

Dunkley, J. J. (2019). Metal powder atomisation methods for modern manufacturing. *Johnson Matthey technology review, 63*(3), 226-232.

Dursun, T., & Soutis, C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials Design, 56*, 862-871.

Efe, G. C., Altinsoy, I., Yener, T., Ipek, M., Zeytin, S., & Bindal, C. (2010). Characterization of cemented Cu matrix composites reinforced with SiC. *Vacuum, 85*(5), 643-647.

Evans, A., San Marchi, C., & Mortensen, A. (2003). Metal Matrix Composites. In *Metal Matrix Composites in Industry: An Introduction and a Survey* (pp. 9-38). Boston, MA: Springer US.

German, R. M., Suri, P., & Park, S. J. (2009). Liquid phase sintering. *Journal of Materials Science, 44*, 1-39.

Ghomashchi, M., & Vikhrov, A. (2000). Squeeze casting: an overview. *Journal of Materials Processing Technology, 101*(1-3), 1-9.

Gökçe, H., & Öveçoğlu, M. L. (2023). Microstructure-property evolution of mechanically alloyed Al-20 wt% Si matrix powders and sintered composites reinforced withTiB2 particulates. *Engineering Science Technology, an International Journal, 39*, 101341.

Gültekin, G. G., Çanakçı, A., & Canpolat, Ö. (2023). Effect of Milling Time and Process Control Agent on Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-2 wt.% Cu Metal–Metal Composites Produced by Mechanical Alloying. *Metallography, Microstructure, Analysis*, 1-11.

Haghshenas, M. (2017). Mechanical characteristics of biodegradable magnesium matrix composites: A review. *Journal of Magnesium and Alloys, 5*(2), 189-201.

Hao, X.-n., Zhang, H.-p., Zheng, R.-x., Zhang, Y.-t., & Ameyama, K. (2014). Effect of mechanical alloying time and rotation speed on evolution of CNTs/Al-2024 composite powders. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24*(7), 2380-2386.

Harris, G. L. (1995). *Properties of silicon carbide*. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers.

Hayat, M. D., Singh, H., He, Z., & Cao, P. (2019). Titanium metal matrix composites: An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 121*, 418-438.

Ibrahim, I., Mohamed, F., & Lavernia, E. (1991). Particulate reinforced metal matrix composites—a review. *Journal of Materials Science, 26*, 1137-1156.

Idrisi, A. H., & Mourad, A.-H. I. (2019). Conventional stir casting versus ultrasonic assisted stir casting process: Mechanical and physical characteristics of AMCs. *Journal of alloys compounds, 805*, 502-508.

Kaczmar, J., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology, 106*(1-3), 58-67.

Kaftelen, H., Ünlü, N., Göller, G., Öveçoğlu, M. L., & Henein, H. (2011). Comparative processing-structure–property studies of Al–Cu matrix composites reinforced with TiC particulates. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing Review, 42*(7), 812-824.

Karabacak, H. (2018). *Al2024/B4C/SiC Nanokompozit ve Hibrit Nanokompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi.* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*: ASM international.

Keçeli, Z. (2007). *Characterization Investigations of Powder and Sintered Al-Sic and Al-B4C Composites Developed via Mechanical Alloying.* Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Master Thesis, Istanbul.

Kotan, G. (2014). *Investigation of Microstructural Homogenity and Thermal Stability of Equal Channel Angular Pressed and Aged 2024 Alloy.* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.

Kovziridze, Z., Mestvirishvili, Z., Tabatadze, G., Nizharadze, N., Mshvildadze, M., & Nikoleishvili, E. (2013). Improvement of Boron Carbide Mechanical Properties in B 4 C-TiB 2 and B 4 C-ZrB 2 Systems. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 3*(2), 43-48.

Krasnowski, M., Grabias, A., & Kulik, T. (2006). Phase transformations during mechanical alloying of Fe–50% Al and subsequent heating of the milling product. *Journal of alloys compounds, 424*(1-2), 119-127.

Kuhn, H. (2012). *Powder metallurgy processing: the techniques and analyses*: Elsevier.

Kumar, P., Kumar, A., Kumar, A., Kumar, Y., & Dwivedi, S. P. (2021). Different reinforcement particles and their effects in the development of composite material by different development techniques: a review. *Materials Today: Proceedings, 47*, 4015-4019.

Kumar, U. K. A. V. (2017). Method of stir casting of aluminum metal matrix composites: a review. *Materials Today: Proceedings, 4*(2), 1140-1146.

Kurşun, A., Bayraktar, E., & Enginsoy, H. M. (2016). Experimental and numerical study of alumina reinforced aluminum matrix composites: Processing, microstructural aspects and properties. *Composites Part B: Engineering, 90*, 302-314.

Lacroix, L., Blanc, C., Pébère, N., Thompson, G., Tribollet, B., & Vivier, V. (2012). Simulating the galvanic coupling between S-Al2CuMg phase particles and the matrix of 2024 aerospace aluminium alloy. *Corrosion Science, 64*, 213-221.

Leyens, C., Hausmann, J., & Kumpfert, J. (2003). Continuous fiber reinforced titanium matrix composites: fabrication, properties, and applications. *Advanced Engineering Materials, 5*(6), 399-410.

Liao, J., & Tan, M.-J. (2011). Mixing of carbon nanotubes (CNTs) and aluminum powder for powder metallurgy use. *Powder technology, 208*(1), 42-48.

Liu, Y., Lim, S., Lu, L., & Lai, M. (1994). Recent development in the fabrication of metal matrix-particulate composites using powder metallurgy techniques. *Journal of Materials Science, 29*, 1999-2007.

Luo, G., Wu, J., Xiong, S., Shen, Q., Wu, C., Zhang, J., & Zhang, L. (2017). Microstructure and mechanical behavior of AA2024/B4C composites with a network reinforcement architecture. *Journal of alloys compounds, 701*, 554-561.

Lü, L., & Lai, M. O. (1997). *Mechanical Alloying*: Springer Science & Business Media.

Ma, Z. (2008). Friction stir processing technology: a review. *Metallurgical Materials Transactions A, 39*, 642-658.

Madar, R. (2004). Silicon carbide in contention. *Nature, 430*(7003), 974-975.

Mavhungu, S., Akinlabi, E., Onitiri, M., & Varachia, F. (2017). Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends. *Procedia Manufacturing, 7*, 178-182.

Mazzolani, F. (1994). *Aluminium alloy structures*: CRC Press.

Mondolfo, L. F. (2013). *Aluminum alloys: structure and properties*: Elsevier.

Moravcik, I., Kubicek, A., Moravcikova-Gouvea, L., Adam, O., Kana, V., Pouchly, V., . . . Dlouhy, I. (2020). The origins of high-entropy alloy contamination induced by mechanical alloying and sintering. *Metals, 10*(9), 1186.

Moumeni, H., Alleg, S., & Greneche, J. (2005). Structural properties of Fe50Co50 nanostructured powder prepared by mechanical alloying. *Journal of alloys compounds, 386*(1-2), 12-19.

Nagavally, R. R. (2017). Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *International Journal of Mechanical and Production Engineering, 5*(9), 82-87.

Nandy, J., Sarangi, H., & Sahoo, S. (2019). A review on direct metal laser sintering: Process features and microstructure modeling. *Lasers in Manufacturing Materials Processing, 6*(3), 280-316.

Narasimhan, K. (2001). Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics, 67*(1-3), 56-65.

Neikov, O., Naboychenko, S., & Yefimov, N. (2019). Mechanical alloying. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 63-79.

Novák, P. (2020). Advanced powder metallurgy technologies. *Materials, 13*(7), 1742.

Pickens, J. (1981). Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications. *Journal of Materials Science, 16*, 1437-1457.

Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., & reza 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.

Rahman, M. H., & Al Rashed, H. M. (2014). Characterization of silicon carbide reinforced aluminum matrix composites. *Procedia Engineering, 90*, 103-109.

Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Annamalai, R., Aravind, S., Atreya, T. S. A., Vignesh, V., & Subramanian, C. (2014). Aluminium metal matrix composites–a review. *Reviews on Advanced Materials Science, 38*(5), 55-60.

Ramogayana, B., Santos-Carballal, D., Maenetja, K. P., De Leeuw, N. H., & Ngoepe, P. E. (2021). Density functional theory study of ethylene carbonate adsorption on the (0001) surface of aluminum oxide α-Al2O3. *ACS omega, 6*(44), 29577-29587.

Roeseler, W. G., Sarh, B., Kismarton, M. U., Quinlivan, J., Sutter, J., & Roberts, D. (2007). *Composite structures: the first 100 years*. Paper presented at the 16th International Conference on Composite Materials, Japan.

Sadeghi, B., & Cavaliere, P. (2021). Progress of flake powder metallurgy research. *Metals, 11*(6), 931.

Sajjadi, S. A., Parizi, M. T., Ezatpour, H., & Sedghi, A. (2012). Fabrication of A356 composite reinforced with micro and nano Al2O3 particles by a developed compocasting method and study of its properties. *Journal of alloys compounds, 511*(1), 226-231.

Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S., & Khanna, N. (2022). Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route. *Journal of Materials Research Technology, 18*, 282-292.

Seshadri, R., Naveen, I., Srinivasan, S., Viswasubrahmanyam, M., VijaySekar, K., & Kumar, M. P. (2013). Finite element simulation of the orthogonal machining process with Al 2024 T351 aerospace alloy. *Procedia Engineering, 64*, 1454-1463.

Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskienė, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings, 21*, 1559-1562.

Shirvanimoghaddam, K., Khayyam, H., Abdizadeh, H., Akbari, M. K., Pakseresht, A., Ghasali, E., & Naebe, M. (2016). Boron carbide reinforced aluminium matrix composite: Physical, mechanical characterization and mathematical modelling. *Materials Science Engineering: A, 658*, 135-149.

Singh, A. K., Soni, S., & Rana, R. S. (2020). A critical review on synthesis of aluminum metallic composites through stir casting: challenges and opportunities. *Advanced Engineering Materials*, *22*(10), 2000322.

Smith, W. F. (2009). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*: Literatür Yayınları.

Soni, P. (2000). *Mechanical alloying: fundamentals and applications*: Cambridge Int Science Publishing.

Starke Jr, E. A., & Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, *32*(2-3), 131-172.

Sundaresan, R., & Froes, F. (1987). Mechanical alloying. *JOM*, *39*, 22-27.

Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, *46*(1-2), 1-184.

Suryanarayana, C. (2008). Recent developments in mechanical alloying. *Rev. Adv. Mater. Sci*, *18*(3), 203-211.

Suryanarayana, C. (2022). Mechanical alloying: A critical review. *Materials Research Letters*, *10*(10), 619-647.

Suryanarayana, C., Ivanov, E., & Boldyrev, V. (2001). The science and technology of mechanical alloying. *Materials Science Engineering: A*, *304*, 151-158.

Tan, Z.-q., Zhang, Q., Guo, X.-y., Zhao, W.-j., Zhou, C.-s., & Liu, Y. (2020). New development of powder metallurgy in automotive industry. *Journal of Central South University*, *27*(6), 1611-1623.

Tomiczek, B., Dobrzański, L. A., Adamiak, M., & Labisz, K. (2015). Effect of milling conditions on microstructure and properties of AA6061/halloysite composites. *Procedia Manufacturing*, *2*, 402-407.

Torralba Castelló, J. M., & Campos Gómez, M. (2014). Toward high performance in Powder Metallurgy. *Revista De Metallurgia*, *50*(2).

Tunç, S. A., Çanakçı, A., Karabacak, A. H., Çelebi, M., & Türkmen, M. (2024). Effect of different PCA types on morphology, physical, thermal and mechanical properties of AA2024-B4C composites. *Powder technology*, *434*, 119373.

Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. England: Cambridge Int Science Publishing.

Viala, J., Bouix, J., Gonzalez, G., & Esnouf, C. (1997). Chemical reactivity of aluminium with boron carbide. *Journal of Materials Science*, *32*, 4559-4573.

Wang, R.-M., Zheng, S.-R., & Zheng, Y.-P. G. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. UK: Elsevier.

Wen, L., Wang, Y., Zhou, Y., Ouyang, J.-H., Guo, L., & Jia, D. (2010). Corrosion evaluation of microarc oxidation coatings formed on 2024 aluminium alloy. *Corrosion Science, 52*(8), 2687-2696.

Ye, H. Z., & Liu, X. Y. (2004). Review of recent studies in magnesium matrix composites. *Journal of Materials Science, 39*, 6153-6171.

Yünlü, K. (2022). *BOR-Bileşikleri, Sentez Yöntemleri, Özellikleri, Uygulamaları* (3rd ed.). Ankara, Türkiye: TENMAK BOREN Bor Araştırma Enstitüsü.

Zhang, L. C., & Attar, H. (2016). Selective laser melting of titanium alloys and titanium matrix composites for biomedical applications: a review. *Advanced Engineering Materials, 18*(4), 463-475.

ÖZGEÇMİŞ

Sedat Alperen TUNÇ, ilköğrenimini Türdü 100. Yıl İlköğretim Okulu‘nda bitirip, lise eğitimini 2015 yılında Muğla Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’ne 2015-2016 eğitim-öğretim yılında başlayıp, 2020 yılında bu bölümden mezun olmuştur. Lisans eğitimini takiben Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2021 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derecede İngilizce ve başlangıç seviyesinde Almanca bilmektedir. Göreve başladığı günden beri, SCI/Expanded indekslerinde taranan yayınlamış 3 adet makalesi ve uluslararası sempozyumlarda sunulmuş 10 adet bildirisi bulunmaktadır.

Tunç, S. A., Çanakçı, A., Karabacak, A. H., Çelebi, M., & Türkmen, M. (2024). Effect of different PCA types on morphology, physical, thermal and mechanical properties of AA2024-B4C composites. *Powder Technology*, *434*, 119373.