

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA2024 MATRİSLİ KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Metalurji ve Malz. Müh. Hayrunnisa ÖZER

Haziran 2019
Trabzon



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA2024 MATRİSLİ KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hayrunnisa ÖZER

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİS"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21/05/2019
Tezin Savunma Tarihi : 10/06/2019

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Temel VAROL

Trabzon 2019

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Hayrunnisa ÖZER Tarafından Hazırlanan**

**AA2024 MATRİSLİ KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28/05/2019 gün ve 1806 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Temel VAROL

Üye : Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Üye : Doç. Dr. Fatih YILDIZ

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

İnsanoğlunun ihtiyaçları doğrultusunda daha üstün özelliklere sahip malzeme arayışı her geçen zaman artmaktadır. Maliyet ve kalitenin birbirine bağlı olduğu düşünüldüğünde, maliyet açısından düşük, kalite bakımından daha iyi malzeme elde etmek, mühendislik araştırmalarının önemle üzerinden çalıştığı bir noktadır. Kompozit malzemeler, diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında, yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, hafiflik ve yüksek termal özelliklerinden dolayı araştırmacıların ilgisi her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışma, birkaç aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, takviye malzemesi olarak kullanılan KNT tozları, dört farklı zaman diliminde yapılan dört farklı dağılım metodlarına tabi tutulmuştur. Yapılan dağılım metodlarının SEM görüntüleri incelenip, en uygun olarak ultrasonik dağıtma metodu seçilmiştir. Ultrasonik dağıtma işleminden geçirilen KNT tozları ile AA2024 alaşım tozlarına mekanik alaşımlama işlemi uygulanmıştır. Elde edilen kompozit tozları için tane boyutu analizi ve SEM analizi yapılmıştır. Her bir kompozit tozundan, toz metalürjisi yöntemi ile sıcak pres ve sinterleme ile kompozit malzemeler üretilmiştir. Farklı takviye oranlarının, farklı öğütme sürelerinin ve sinterlemenin üretilen kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, sertliği, yoğunluğu ve elektrik iletkenliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Temel VAROL'a çok teşekkür ederim. Bununla birlikte, deneylerimde ve çalışmalarımnda bana her daim yardımcı olan Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI, Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI, Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA, Arş. Gör. Abdullah Hasan KARABACAK, Arş. Gör. Onur GÜLER, Arş. Gör. Müslim ÇELEBİ, Öğr. Gör. Özlem CANPOLAT'a teşekkür ederim.

Son olarak bana maddi manevi hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve hep yanımda bulunan aileme ve eşime teşekkür ederim.

Hayrunnisa ÖZER

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AA2024 Matrisli Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Temel VAROL’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda 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. 10/06/2019

Hayrunnisa ÖZER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLOLAR DİZİNİ.....	XIX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kompozit Malzemeler	4
1.2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	5
1.2.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler.....	5
1.2.1.2. Takviye Elemanının Şekline Göre Kompozitler.....	5
1.2.2. Metal Matrisli Kompozitler.....	6
1.2.2.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Matris Malzemeleri.....	7
1.2.2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Takviye Malzemeleri.....	8
1.2.2.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	8
1.3. Toz Metalurjisi.....	9
1.3.1. Mekanik Alaşımlama/Mekanik Öğütme.....	10
1.3.1.1. Mekanik Alaşımlama Mekanizması.....	11
1.3.1.1.1. Öğütme Sistemi.....	13
1.3.1.1.1.1. Sünek-Sünek Sistem.....	13
1.3.1.1.1.2. Sünek-Gevrek Sistem.....	14
1.3.1.1.1.3. Gevrek-Gevrek Sistem.....	15
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	16
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	20
2.1. Malzeme.....	22

2.2.	Mekanik Alaşım	24
2.3.	Morfoloji İncelemeleri	25
2.4.	Parçacık Boyutu İncelemeleri	25
2.5.	X Işımları Analizi	26
2.6.	Yoğunlaştırma	27
2.7.	Metalografik İşlemler	27
2.8.	Fiziksel ve Mekanik Özellikler İçin Uygulanan Testler	28
2.8.1.	Yoğunluk	28
2.8.2.	Elektrik İletkenlik Ölçümleri	29
2.8.3.	Çekme Mukavemeti Ölçümleri	29
2.8.4.	Sertlik Ölçüm Testi	30
3.	ARAŞTIRMA BULGULARI	32
3.1.	Toz Karakterizasyonu	32
3.1.1.	Toz Morfolojisi	32
3.1.1.1.	Öğütme Zamanı ile Toz Morfolojisinin Değişimi	39
3.1.2.	Toz Boyutu	51
3.1.3.	Tozların XRD İncelemeleri	54
3.1.4.	Mikro Yapı İncelemeleri	59
3.1.4.1.	Sıcak Presleme ile Yoğunlaştırılarak Üretilmiş Kompozitlerin İç Yapı İncelemeleri	59
3.1.4.2.	Sıcak Preslenmiş Numunelerin Sinterleme İşleminin İç Yapı İncelemeleri	62
3.1.5.	Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	75
3.1.5.1.	Al2024 Numunesinin Kırılma Yüzeyi	75
3.1.5.2.	AA2024/KNT Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri	75
3.1.6.	Yoğunluk Sonuçlarının İncelemesi	90
3.1.7.	Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi	95
3.1.8.	Çekme Mukavemeti Sonuçlarının İncelenmesi	100
3.1.9.	Elektrik İletkenliği Sonuçlarının İncelenmesi	106
4.	TARTIŞMA	109

5.	SONUÇLAR.....	114
6.	ÖNERİLER.....	117
7.	KAYNAKLAR.....	118

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AA2024 MATRİSLİ KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hayrunnisa ÖZER

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Temel VAROL

2019, 124 Sayfa,

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile AA2024 matrisli KNT takviyeli nano kompozit malzemeleri üretildi. KNT tozları dört farklı zaman diliminde (15, 30, 45 ve 60 dakika) dört farklı dağılım metodundan (geleneksel, manyetik, ultrasonik ve mekanik) geçirilmiştir. Dağılım metodlarından geçirilen KNT'lerin SEM görüntüleri incelenerek en iyi sonucu veren ultrasonik dağılım metodu olarak belirlenmiştir. Ultrasonik dağılım metodu uygulanan KNT miktarı olarak ağırlıkça %0.125, %0.25, %0.5 ve %1.0 seçilmiştir. Öğütme işlemi 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 saat olmak üzere altı farklı zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tozların tane boyutu ölçülmüş, toz morfolojisi incelenmiştir. Kompozit tozlarından sıcak presleme ile kompozit malzemeler üretildi. Üretilen bu numunelerin yoğunluk, sertlik, elektrik iletkenliği, çekme mukavemeti değerleri ölçülmüş ve içyapıları incelenmiştir. Sıcak presleme ile üretilen bu numuneler daha sonra sinterleme işleminden geçirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda, sıcak preslenmiş numunelerin sertlik değerleri, öğütme süresi ile beraber artış göstermiştir. Yoğunluk değerlerinde ise KNT miktarına göre düşüş gözlemlenmiştir. Sinterlenen malzemelerin sertlik, yoğunluk değerlerinde azalma görülürken elektrik iletkenliği değerlerinde ise artış gözlemlenmiştir. Çekme mukavemet değerlerinde ise KNT miktarı arttıkça azalma meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal Matrisli Kompozitler, Ultrasonik Dağıtma, Toz Metalurjisi, Nano Kompozit, Mekanik Alaşımlama, Karbon Nanotüp

Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF PROPERTIES OF AA2024 MATRIX
CARBON NANOTUBE REINFORCED METAL MATRIX NANOCOMPOSITES BY
POWDER METALLURGY

Hayrunnisa ÖZER

Karadeniz Technical University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Associate Professor Temel VAROL

2019, 124 Pages

In this study, AA2024 matrix CNT reinforced metal matrix composites (MMCs) were produced by powder metallurgy method. CNT powders were passed through four different dispersion methods (conventional, magnetic, ultrasonic and mechanical) in four different time periods (15, 30, 45 and 60 minutes). SEM analyzes were performed by taking samples from the CNTs in which each dispersion methods were performed. The best results obtained dispersion method was determined as ultrasonic dispersion by examination of SEM images. CNT amounts were determined as weight percentage of 0.125, 0.25, 0.5 and 1.0. The milling process was performed in six different time periods, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 hours. The particle size of the obtained powders were measured and powder morphology was examined by SEM. Composite materials were produced from composite powders by hot pressing method. The density, hardness, electrical conductivity, tensile strength values of these samples were measured and their microstructures were examined by SEM. These samples which were produced by hot pressing were then sintered. At the end of the studies, hardness values of hot pressed samples increased with grinding time. Density values decreased compared to the amount of CNT. While the hardness and density values of the sintered materials decreased, the electrical conductivity values increased. Tensile strength values decreased as the amount of CNT increased.

Keywords: Metal Matrix Composites, Ultrasonic Dispersion, Powder Metallurgy, Nano Composites, Mechanical Alloying, Carbon Nanotube

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kompozit malzemeleri oluşturan elemanlar.....	1
Şekil 2. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp kristal yapıları.....	3
Şekil 3. Kompozit malzemelerde takviye elemanı şekilleri.....	5
Şekil 4. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin şemas.....	9
Şekil 5. Toz metalürjisi yöntemi ile üretimin işlem basamakları.....	10
Şekil 6. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü.....	11
Şekil 7. Mekanik alaşımlama sırasında bilye-toz-bilye çarpışması	12
Şekil 8. Mekanik alaşımlamanın başlangıç tozlarında meydana gelen deformasyon	12
Şekil 9. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama aşamalarının gelişimi.....	13
Şekil 10. Mekanik alaşımlama esnasında bilye-toz-bilye çarpışması.....	14
Şekil 11. Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi.....	15
Şekil 12. Deneysel çalışmanın iş akış şeması.....	21
Şekil 13. AA2024 alaşım ve KNT tozlarının başlangıç morfolojileri a) AA2024 b)KNT	22
Şekil 14. Mekanik öğütme cihazı ve cihaz elemanları.....	25
Şekil 15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	25
Şekil 16. Parçacık boyutu ölçüm cihazı	26
Şekil 17. X ışınları Analiz cihazı.....	26
Şekil 18. Soğuk ve sıcak presleme için kullanılan hidrolik pres cihazı.....	27
Şekil 19. Metalografi işlemleri için kullanılan cihazlar.....	28
Şekil 20. Elektrik iletkenlik ölçümün için kullanılan cihaz.....	29
Şekil 21. Çekme mukavemeti ölçüm cihazı.....	30
Şekil 22. Sertlik ölçüm cihazı ve ölçüm aşamaları.....	31
Şekil 23. AA2024 alaşım tozlarının farklı büyütmelerdeki morfolojisi, a) 100 X b) 20.00 K X.....	32
Şekil 24. KNT tozlarına ait farklı büyütmelerdeki morfolojisi, a) 15.00 K X b) 30.00 K X.....	33
Şekil 25. Geleneksel dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	33

Şekil 26. Geleneksel dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	34
Şekil 27. Geleneksel dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	34
Şekil 28. Geleneksel dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	34
Şekil 29. Bilyeli dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	35
Şekil 30. Bilyeli dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	35
Şekil 31. Bilyeli dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	35
Şekil 32. Bilyeli dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	36
Şekil 33. Manyetik dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	36
Şekil 34. Manyetik dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	36
Şekil 35. Manyetik dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	37
Şekil 36. Manyetik dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	37
Şekil 37. Ultrasonik dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	37
Şekil 38. Ultrasonik dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	38
Şekil 39. Ultrasonik dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	38
Şekil 40. Ultrasonik dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X.....	38
Şekil 41. Ultrasonik dağıtma (15) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	40
Şekil 42. Ultrasonik dağıtma (15) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	41
Şekil 43. Ultrasonik dağıtma (15) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	42
Şekil 44. Ultrasonik dağıtma (30) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	43
Şekil 45. Ultrasonik dağıtma (30) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	44
Şekil 46. Ultrasonik dağıtma (30) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	45
Şekil 47. Ultrasonik dağıtma (45) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	46

Şekil 48. Ultrasonik dağıtma (45) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	47
Şekil 49. Ultrasonik dağıtma (45) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	48
Şekil 50. Ultrasonik dağıtma (60) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	49
Şekil 51. Ultrasonik dağıtma (60) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	50
Şekil 52. Ultrasonik dağıtma (60) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ. % 1.0.....	51
Şekil 53. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek Üretilen kompozit malzeme tozlarında farklı öğütme sürelerini göre parçacık boyutu değişimi; a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30) c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....	52
Şekil 54. Ağırlıkça ağ. %1.0 KNT (Ultrasonik dağıtma (15)) içeren nanokompozit malzemenin (2.5 saat mekanik öğütme) sıcak preslenmiş ve sinterlenmiş numunelere ait XRD analizleri.....	55
Şekil 55. Ağırlıkça a%1.0 KNT içeren (Ultrasonik dağıtma (30)) nanokompozit malzemenin (2.5 saat mekanik öğütme) sıcak preslenmiş ve sinterlenmiş numunelere ait analizleri.....	56
Şekil 56. KNT tozlarına ait XRD analizi	58
Şekil 57. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü.....	59
Şekil 58. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 1.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü.....	59
Şekil 59. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü.....	60
Şekil 60. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 2.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü.....	60
Şekil 61. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 2.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin	

SEM görüntüsü.....	61
Şekil 62. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü.....	61
Şekil 63. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	63
Şekil 64. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	64
Şekil 65. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	65
Şekil 66. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	66
Şekil 67. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	67
Şekil 68. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	68
Şekil 69. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	69
Şekil 70. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	70
Şekil 71. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.% 1.0.....	71
Şekil 72. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	72
Şekil 73. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	73
Şekil 74. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	74

Şekil 75. AA2024 alaşım tozu ile üretilen numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Sıcak preslenmiş numune b) Sıcak presleme sonrası sinterlenmiş numune.....	75
Şekil 76. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	76
Şekil 77. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	77
Şekil 78. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	78
Şekil 79. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	79
Şekil 80. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	80
Şekil 81. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	81
Şekil 82. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	82
Şekil 83. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	83
Şekil 84. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	84
Şekil 85. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin	

	kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri	
	a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	85
Şekil 86.	Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri	
	a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	86
Şekil 87.	Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri	
	a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0.....	87
Şekil 88.	Ultrasonik dağıtma(15) uygulanmış KNT içeren 1.5 saat ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.25 KNT b) Ağ. % 0.125 KNT.....	88
Şekil 89.	Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren 1.0 saat ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.5 KNT b) Ağ.% 1.0 KNT.....	88
Şekil 90.	Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren 0.5 saat ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.5 KNT b) Ağ.% 0.25 KNT.....	89
Şekil 91.	Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren 0.5 saat ve 2.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.5 KNT b) Ağ. % 1.0 KNT.....	89
Şekil 92.	AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak preslenerek üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre yoğunluk değişimi;	
	a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30); c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....	90
Şekil 93.	AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrasında sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre yoğunluk değişimi;	
	a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30); c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....	93
Şekil 94.	AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak preslenerek üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre elektrik iletkenliği değişimi;	
	a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30); c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....	95

- Şekil 95. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerine göre elektrik iletkenliği değişimi;
a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....98
- Şekil 96. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre sertlik değişimi;
a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....100
- Şekil 97. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre sertlik değişimi;
a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....103
- Şekil 98. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerine göre çekme mukavemeti değişimi
a) Ultrasonik dağıtma (15), b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60).....106

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. AA2024 tozlarının ağırlıkça bileşimi (%).....	22
Tablo 2. AA2024 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	23
Tablo 3. Uygulanan dağıtma yöntemleri ve işlem parametreleri.....	24



SEMBOLLER DİZİNİ

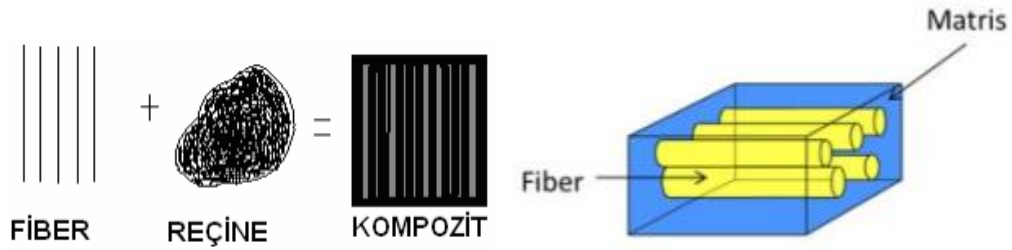
MA	: Mekanik alaşımlama
TM	: Toz metalurjisi
KNT	: Karbon Nanotüp
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
XRD	: X-ışınları difraktometresi
HB	: Brinell sertlik
μm	: Mikrometre
MPa	: Mega paskal
ICAS	: Entegre idare ve kontrol sistemi
MÖ	: Mekanik öğütme
Al	: Alüminyum
PBA	: Destekli polyester bağlayıcı
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
RTEM	: Yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde, teknolojik gelişmeler ve farklı gereksinimlerin ortaya çıkması nedeniyle geleneksel malzemelerin yanı sıra, daha üstün özelliklere sahip malzeme geliştirme ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bu amaç doğrultusunda araştırmacılar tarafından üretilen kompozitler, iki veya daha fazla farklı malzemenin en iyi özelliklerinin yeni ve tek bir malzemede toplanması amacıyla bu malzemelerin makro düzeyde birleştirilmesi ile üretilen malzemelerdir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde ihtiyaç duyulan hafif malzeme gereksinimi, kompozit malzemelere olan ilgiyi her geçen gün arttırmaktadır (Moghadam vd., 2015; Savaşkan, 2007; Şahin 2000).

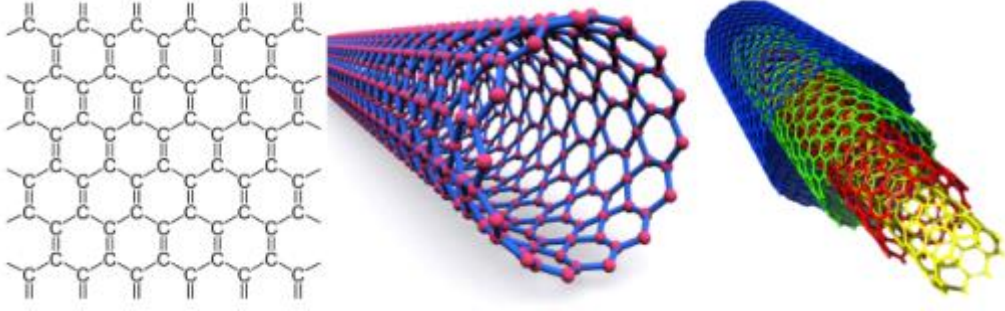
Kompozit malzemeler; matris malzemesi (ana faz), takviye malzemesi ve ara yüzey bağından oluşmaktadır (Şekil 1). Matris fazı kompozit yapının tokluğunu artırır, bütünlüğünü sağlar ve malzemenin maruz kaldığı kuvvetleri takviye elemanına iletir. Takviye elemanları ise, matris malzemesinin maruz kaldığı yükü değişen oranlarda paylaşır ve böylece kompozit malzeme yapısını güçlendirir (Yunus K., 2017).



Şekil 1. Kompozit malzemeleri oluşturan elemanlar

Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesine, takviye fazının şekline ve cinsine göre sınıflandırılmaktadır. Kompozitler, matris malzemesine göre polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli olmak üzere üç grupta incelenirken, takviye fazının şekline göre ise, parçacık, fiber, pulsu ve laminant takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadırlar (Çalın, 2006; Şahin, 2000). Metal matrisli kompozitler (MMK) matrisi (ana yapıyı) metalin, takviye fazını ise seramiklerin oluşturduğu malzeme grubudur. MMK'ler yüksek dayanım, rijitlik, yüksek aşınma dayanımı ve elastikiyet modülü gibi birçok üstün özelliğinden dolayı, başta otomotiv sektörü olmak üzere havacılık ve uzay sektörünün ve elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tjong, 2013; Baradeswaran and Perumal, 2013; Veeresh-Kumar vd., 2011). MMK'lerin üretiminde matris malzemesi olarak genellikle Al, Mg, Ti, Cu ve alaşımları tercih edilmektedir. Al ve alaşımları, düşük yoğunluk ve ergime sıcaklığı, yüksek dayanım, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik ve korozyon direncinin yüksek olması gibi üstün özelliklerinden dolayı, ön plana çıkmaktadır (Veeresh-Kumar vd., 2011; Mobasherpour vd., 2013; Al-Qutub vd., 2013; Lindoros and Talvitie, 1995).

MMK'lerin üretiminde takviye malzemesi olarak fiber, visker ve parçacık gibi farklı şekillere sahip takviye elemanları kullanılmaktadır. Parçacık takviye elemanları, endüstriyel uygulama alanlarında en yaygın kullanıma sahip olan takviye türleridir. Bunun sebebi, parçacık takviye elemanlarının üretiminin ve kullanımının uzun fiberlere göre daha kolay olması ve üretilen kompozitin özelliklerinin yöne bağlı değişiklik göstermemesidir. Aynı zamanda, bu parçacık takviye malzemeleri, sert ve yüksek sıcaklıklara karşı olan dayanım gibi özellikler nedeniyle kompozit malzemenin mekanik özelliklerinden biri olan yüksek dayanım ve yüksek sıcaklıklarda çalışma özelliklerini de daha elverişli hale getirmektedir ((Veeresh-Kumar vd., 2011; Dasgupta and Meenai, 2005; Ibrahim vd., 1991), (Özyürek vd, 2012; Izciler ve Muratoglu, 2003; Sharma vd., 2015; Baradeswaran and Perumal, 2013; Ramesh vd., 2010)). Üretilen kompozit malzemedeki istenilen özelliklere bağlı olarak kullanılacak olan fiber, visker veya parçacık gibi farklı şekillerde silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si₃N₄), titanyum nitrür (TiN), bor karbür (B₄C), titanyum diborür (TiB₂), alüminyum nitrür (AlN), bor (B), grafit, alüminyum oksit (Al₂O₃), wolfram (W) ve molibden (Mo) gibi değişik takviye malzemeleri kullanılmaktadır (Casati ve Vedani, 2014). Karbon nanotüpler çaplarına ve boylarına göre yüksek çekme çalışmada kullanılmıştır (Deng vd., 2007; Bakshi, and Agarwal, 2011; Wu and Kim, 2011; Esawi and Morsi, 2007), (Tjong, 2013; Deng vd., 2007; Bal and Samal, 2007).



Şekil 2. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp kristal yapıları

MMK'lerin üretim yöntemleri kompozit malzemede istenilen özellikler dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu yöntemler arasında en sık kullanılanları sıkıştırılmalı döküm, kompo-döküm, infiltrasyon, toz metalürjisi, elektrokimyasal kaplama, termal sprej ve difüzyonlu birleştirme yöntemleridir. Metal matrisli kompozitler takviye elemanı olarak kullanılan KNT'lerin tek duvarlı ve çok duvarlı çeşitlerinin kristal yapısı verilmiştir (Şekil 2). KNT takviyeli metal matrisli kompozit üretiminde, metal matrisle ile ara bağ oluşumunun yeterli olmaması ve ıslatabilirliğinin zayıf olmasından dolayı geleneksel döküm yöntemi kullanımı oldukça sınırlıdır. Bunun sebebi yüksek sıcaklıktan dolayı sıvı faz ile karbon nanotüp arasında arzu edilmeyen reaksiyonların oluşması sonucu mekanik dayanımın düşmesi ve KNT'lerin matris yapısı içinde homojen bir şekilde dağıtılamamasıdır. Bu tür problemleri ortadan kaldırması sebebiyle toz metalürjisi yöntemi metal matrisli kompozit üretimi için en çok tercih edilen yöntemdir (Esawi vd., 2009; Zhou vd., 2016, Thostenson vd., 2011; Thirumaran vd., 2013).

Toz metalürjisi yönteminin amacı, özel mühendislik uygulamaları için istenen özellikte, kaliteli ve daha ekonomik bir şekilde malzeme üretebilmektir. Bu yöntemde, metalik tozlar yüksek sıcaklıkta ergitme işlemi uygulanmaksızın uygun basınç ve sıcaklık koşullarında birleştirilerek mühendislik malzemesi üretimi gerçekleştirilmektedir (Şahin, 2006). Ergime sıcaklığı yüksek olan metal ve alaşımlar kullanıldığında, döküm yönteminde meydana gelen segregasyon, gaz absorpsiyonu, oksidasyon gibi hatalar, toz metalürjisi yönteminde görülmemektedir (German, 2007).

Mekanik alaşımlama/mekanik öğütme, toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretiminde öne çıkan yöntemdir. Üretilen malzeme için istenilen boyutta ve homojenlikte tozların meydana getirilebildiği katıl hal metodu olan mekanik alaşımlama

yönteminde matris malzemesi olan alaşım tozu ile takviye malzemesi, bilyeler ile değirmen kabı içerisinde yüksek devirde öğütülmektedir. (Tjong, 2013; Suryanarayana, 2001). MA/MÖ işlemi uygulanırken, öğütme kabı içerisinde bulunan öğütücü bilyeler ile toz halindeki malzemeler, yüksek devirli öğütme aşamasında devamlı olarak ezilme, deformasyon sertleşmesi, soğuk kaynaklanma ve kırılma ile belirlenen zaman içerisinde sürekli bir çevrim halinde alaşımlandırılmaktadır. Bu yöntemle, matris elemanı olan alaşım tozu ile takviye malzemesi yüksek devirlerde bilyeler yardımı ile öğütülerek homojen kompozit toz karışımları üretilebilmektedir. Bu işlem esnasında, öğütme kabındaki öğütücü bilyeler ile kompozit malzeme üretimi için kullanılacak olan tozlar, yüksek enerjili öğütme esnasında devamlı olarak ezilme, deformasyon sertleşmesi ve soğuk kaynaklanma ve kırılma ile bir çevrim halinde karıştırılmaktadır. Mekanik öğütme yöntemi kompozit malzeme üretimi için oluşturulan tozların, arzu edilen boyutta ve bağdaşıklıkta elde edilmesini sağlayan bir katı hal yöntemidir. İstenilen malzemenin bu yöntemle üretilebilmesi için etkili olan birçok parametre mevcuttur. Bu parametreleri şu şekilde sıralayabiliriz: Öğütme hızı ve süresi, öğütücü değirmen çeşidi, öğütücü malzeme tipi, bilye ve toz ağırlık oranı, haznenin doluluk oranı, öğütme haznesi doluluk oranı, öğütme atmosferi ve sıcaklığı ve işlem kontrol katkısı miktarı. (Suryanarayana, 2001).

1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, makro düzeyde birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesi ile meydana getirilen ve kendisini oluşturan malzemelerden farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olan mühendislik malzemesidir. İstenilen özelliklere uygun bir kompozit malzeme üretebilmek için, bileşimi oluşturan bileşenlerin olumsuz özelliklerinden ziyade elverişli olan ideal özellikleri ortaya çıkarılabilmelidir (Şahin, Y., 2000; Russell vd., 2005).

1.2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

1.2.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

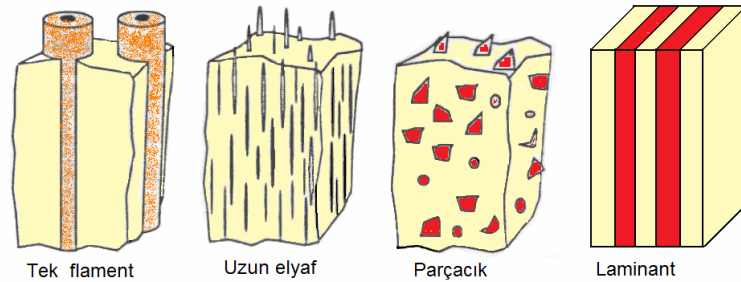
Kompozit malzemeler, kendisini oluşturan malzemelerin matris elemanlarına göre üç grup olarak sınıflandırılmaktadır:

- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

1.2.1.2. Takviye Elemanının Şekline Göre Kompozitler

Takviye fazı olarak, genellikle oksit, karbür ve nitrür bileşimleri tercih edilmektedir (Çalın, R., 2006). Kompozitler, takviye malzemelerinin şekline göre dört gruba ayrılabilirler (Şekil 3):

- Tek filament
- Uzun ve kısa elyaf (fiber)
- Parçacık
- Laminant (katmanlı)



Şekil 3. Kompozit malzemelerde takviye elemanı şekilleri

Kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen en önemli faktör uygun matris/takviye malzemesinin seçimidir. Bu seçimin bu denli önemli olmasının sebebi, matrisler tarafından malzemeye iletilen yükün takviye fazına iletilmesinde matris ile takviye

malzemesi arasındaki ara yüzey bağının fonksiyonudur. Ara yüzey bağının kuvvetli olması için bileşenlerin uyumuna ve matris elemanının ıslatılabilirlik özelliğinin iyi olması gerekmektedir. Diğer bir etken ise, takviye fazının matris içerisinde homojen olarak dağılması, matris ve takviye malzemelerinin uygun seçilmesidir. Bu nedenle, en uygun matris ve takviye malzemesi seçilmelidir (Ma, Q. S. vd., 2005).

1.2.2. Metal Matrisli Kompozitler

MMK'ler, ana yapının metal tarafından oluşturduğu takviye elemanı olarak ise seramik veya refrakter bir malzemenin kullanıldığı kompozit türüdür. Son 50 yıldır, MMK'ler ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır ve bu çalışmalar neticesinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Berghezan A., 1978). Bununla birlikte MMK'lerin mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olmaları gereklidir (Lilholt, H., 1978; Miracle, D.B., 2001):

- Yüksek dayanım
- Yüksek elastiki modülü
- Yüksek tokluk
- Yüksek darbe direnci
- Yüksek termal ve elektrik iletkenliği
- İyi yüzey dayanımı
- Yüzeyde oluşacak çatlaklara karşı düşük hassasiyet
- İyi sürünme direnci
- Sıcaklıklarda oluşan değişikliklere karşılık düşük hassasiyet
- Malzemeyi biçimlendirme, seçilen malzemelerin birleştirilmesi, tasarım oluşturma ve son işleme bakımından olağanüstü teknolojik birikim

MMK'lerin yüksek özgül dayanıma sahip olmaları ve hafif olmaları sayesinde yakıt tüketiminde azalma ve buna bağlı olarak çevreye daha az emisyon salınımı otomotiv sektöründe tercih edilmeleri için oldukça önemli bir avantajdır. MMK'lerin yüksek sıcaklık dayanımları, düşük ısıl iletkenlik katsayıları, yüksek mekanik özelliklerin ve iyi

düzyeyde yorulma direncine sahip olmaları, otomotiv sektöründe motor elemanı olarak kullanılabilirliklerini artırmıştır. Piston alaşımı olarak bilinen Al-Si alaşım matrisli, parçacık takviyeli kompozit malzemeler bu tür uygulamalar için önemli bir örnektir. Otomotiv sektörünün yanı sıra havacılık ve uzay sanayisinde de MMK'ler kullanılmaktadır. Jet motoru rotorları, vanalar, kompresör diskleri, pervaneler gibi malzemelerde de MMK'lerin tercih edildiği görölmektedir. Özellikle titanyum alaşımları yüksek sıcaklık dirençleri sayesinde uçak motorlarında, özellikle kompresör pervanelerinin ve disklerinin üretiminde tercih edilmektedir. Metal ve seramik esaslı kompozit malzemelerin jet motorları ve uçak çerçevelerinin üretilmesinde şu anda kullanılan geleneksel malzemelerin yerini alacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, spor ve eğlence alanlarında, tenis raketleri ve golf sopalarının yapılmasında Al-SiCp kompozit malzemeleri kullanılmaktadır (Hyo, S.L. vd., 2001).

1.2.2.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Matris Malzemeleri

Metal matrisli kompozit malzemesi, takviye fazının etrafını sararak malzeme içerisinde belirli bir düzende yerleşmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, matris malzemesi uygulanan yükleri takviye fazına iletmektedir. Hemen hemen bütün metal ve alaşımları, matris elemanı olarak kullanılabilir (Miracle, 2005; Şahin, 2000). Bununla birlikte matris malzemesi seçerken yüksek özgül dayanım sağlayacak düşük yoğunluğa sahip metal ve alaşımları daha çok tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, en çok Al ve alaşımları tercih edilmekle beraber Ti, Cu, Mg ve alaşımları matris malzemesi olarak tercih edilmektedir (Tjong, 2013; Miracle, 2005; Deaquino-Lara vd., 2016). Al ve alaşımlarının daha çok tercih edilmesinin sebepleri arasında işlenebilirliğinin kolay olması, korozyon direncinin yüksek ve düşük yoğunluğa sahip olması olarak gösterilebilir. Bunun yanı sıra ergime sıcaklığının düşük olması nedeniyle, yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanımı sınırlıdır.

1.2.2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Takviye Malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerde takviye malzemesinin görevi, matris elemanının ilettiği yükü taşıyarak kompozit malzemenin dayanımı artırmaktadır. Takviye elemanı olarak fiberler, viskerler ve parçacıklar kullanılmaktadır. En çok tercih edilen takviye elemanı ise parçacıklardır. Bunun nedeni olarak, kolay şekillendirilebilmeleri, daha düşük maliyete sahip olmalarıdır. Aynı zamanda parçacık takviye elemanları, sert ve yüksek sıcaklıklara dayanım gibi özelliklere de sahiptir (Mobasherpour vd., 2013; Uygur ve Saruhan, 2004). Böylece kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklarda çalışılabilme ve aşınma dayanımı gibi özellikleride iyileştirilebilmektedir. MMK'lerde takviye malzemesi olarak SiC, B₄C, Al₂O₃, AlN, Si₃N, TiB₂, TiC, MgO, BN gibi karbürler, oksitler ve nitrürler tercih edilmektedir (Veeresh-Kumar vd., 2011; Miracle 2005, Lindroos and Talvitie, 1995, Kok, 2005).

1.2.2.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozitlerin yaygınlaşmasının önünde en büyük etken, karmaşık üretim gereksinimleri ve son ürünün maliyetinin yüksek olmasıdır. Bununla birlikte kompozit üretim tekniklerinde meydana gelen gelişmeler sayesinde MMK'lerin endüstriyel uygulamalardaki kullanımı sürekli olarak artmaktadır (Koczak and Premkumar, 1989; German, 2005). MMK'lerin üretim yöntemleri şematik olarak gösterilmiş ve aşağıda sıralanmıştır (Şekil 4):

1-Katı faz üretim yöntemleri

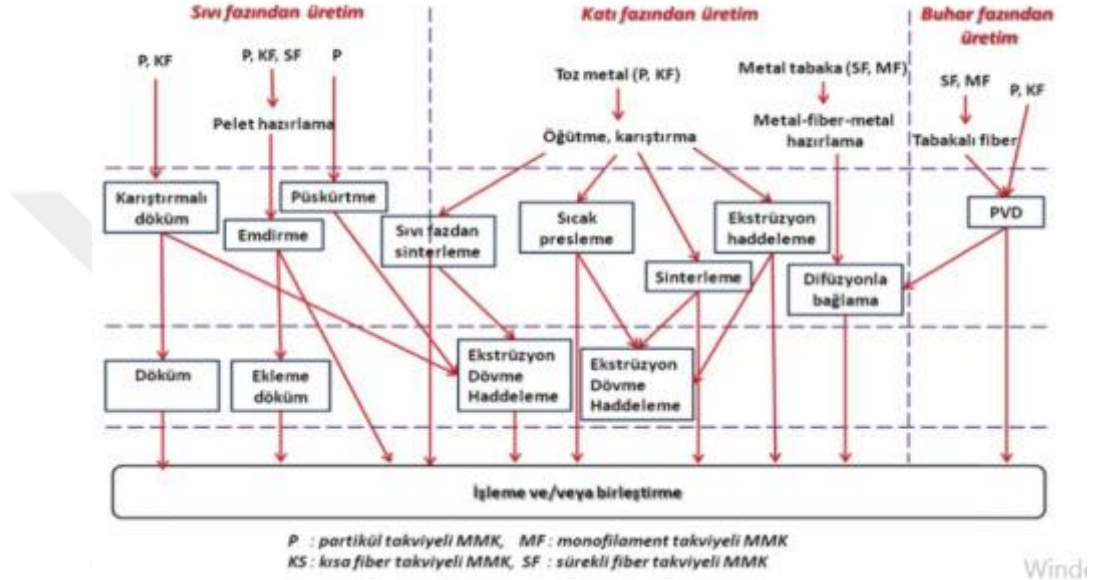
- Difüzyonla bağlama
- Toz metalurjisi (TM)

2-Sıvı faz üretim yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
- Basınçlı İnfiltrasyon
- Basınçsız İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm
- Karıştırmalı Döküm (Stir Casting)
- Plazma Püskürtme

3-Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve Compocasting Döküm Yöntemleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- İç Oksidasyon Yöntemi (In-Situ Tekniği)
- XD Tekniği

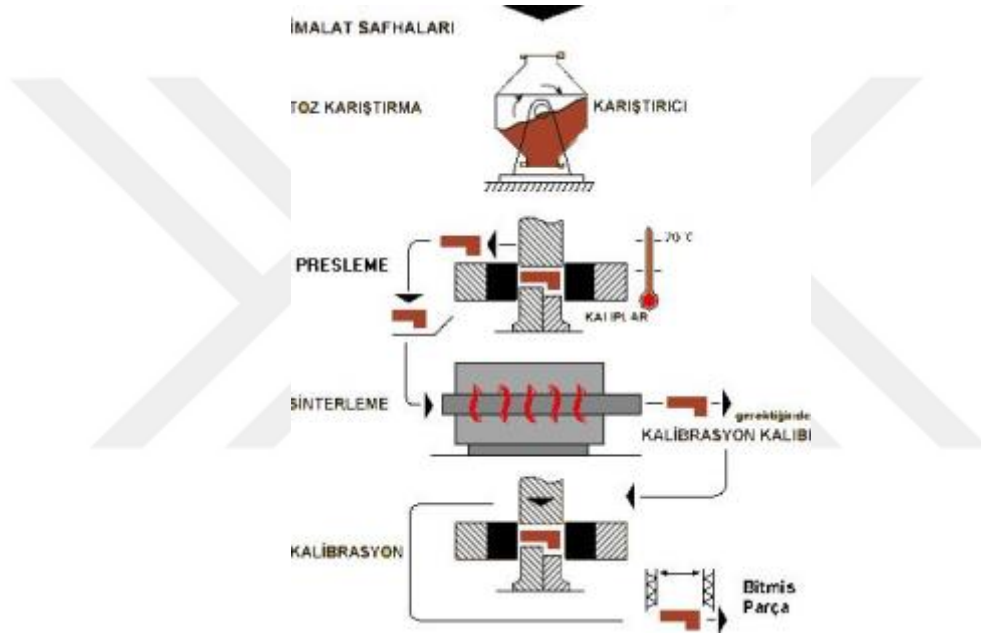


Şekil 4. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin şeması

1.3. Toz Metalurjisi

Toz metalürjisi (TM) yöntemi, başlangıç tozlarının karıştırılması, belirli bir basınç altında preslenmesi ve sonrasında preslenmiş malzemenin sinterlemesi aşamalarından oluşmaktadır (Koczak vd.,1989). Üretime ait işlem basamakları şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 5). Kullanılan tozların en önemli özelliği, yüzey alanının hacimce oranının yüksek olması ve buna bağlı olarak kalıplama işlemi için gerekli basınç değerinin de yüksek olmasıdır. Bunu indirmek için bir bağlayıcı eklenir ve bu şekilde çoğu toz daha kolay şekillendirilir. (German, 2005). Başlangıç tozlarının karıştırılması işleminden sonra kalıpta yoğunlaştırma aşaması gerçekleştirilir ve son aşamada ise sinterleme ısıl işlemi uygulanır. Sünek metalik tozlar tam yoğunluğa ulaşacak şekilde preslenebilirken, sert metalik veya

seramik tozlar uygulanan basma kuvvetine direnç gösterdiklerinden dolayı yoğunlaştırılmaları için daha fazla basma kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. (Turan, 2003). Toz teknolojilerinin araştırmacılar için pratik bir seçenek olmasının nedenleri, kalıplama özellikleri ve aynı zamanda farklı tasarım seçeneklerine bağlı olarak farklı ürünlere de uyarlanabilmesidir. Genellikle toz metalürjisi tekniği, döküm yöntemine benzer olarak net sekillendirme oluşturabilmek için birçok avantaja sahiptir ve neredeyse tüm malzemelere uygulanabilir (Kwon and Ark., 2010; Sattler,1994).

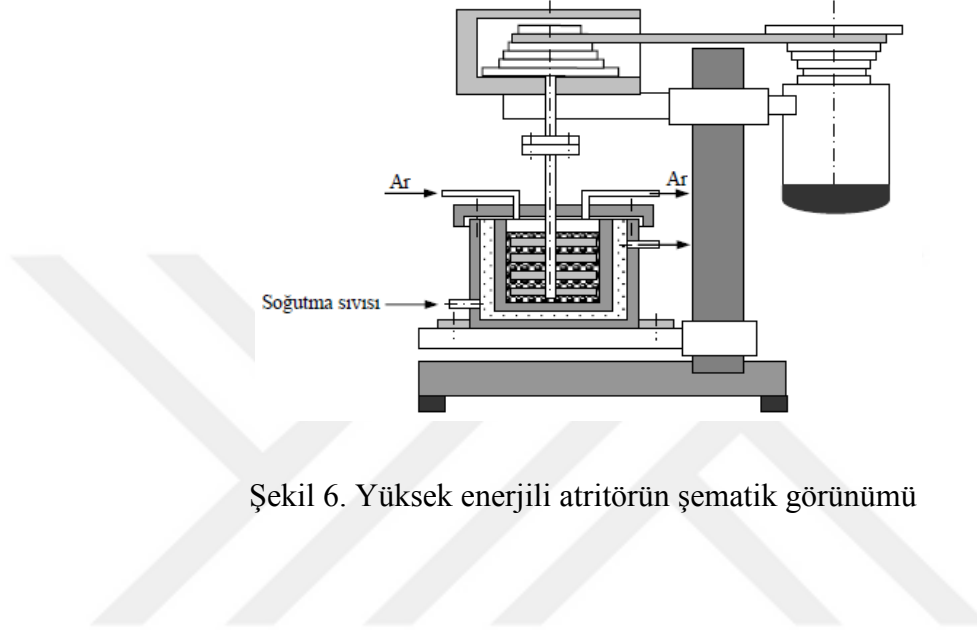


Şekil 5. Toz metalürjisi yöntemi ile üretimin işlem basamakları

1.3.1. Mekanik Alaşımlama/Mekanik ğtme

Mekanik alaşımlama işlemi, genelde yüksek enerjili öğütücüler kullanılarak homojen dağılımlı oksit veya karbür içeren kompozit metal tozu üretim tekniğidir. retimi istenen toz bileŐimini oluŐturacak tozlar, yüksek enerjili atritör içerisine bilyelerle birlikte konur (Şekil 6). Kompozit toz üretimi için bu tozlardan en az bir tanesi matris (bağlayıcı) olması bakımından sünek olmalı diğeri ise gevrek metal veya metal dıŐı tozlar olmalıdır. Sert ve kırılğan tozlar matris içerisinde takviye elemanı olarak bulunmaktadır. Takviye elemanları elementel veya doğrudan oksit olarak katılır (rneğin; Fe, Cr, Al, Ti, Al₂O₃, Y₂O₃). Mekanik

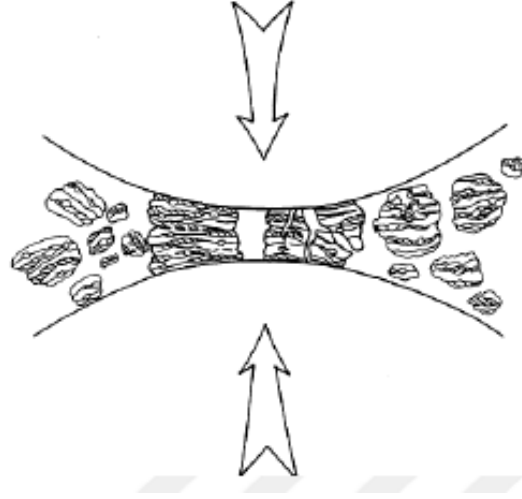
alaşımama işleminde kullanılan öğütme kabı veya değirmenler genelde hava veya su soğutmalıdır ve öğütme sırasında meydana gelecek oksitlenmeyi önlemek için, alaşımama Ar, He, H₂ veya N₂ gazı ortamında kullanılır (Çıtak, R., 1998; Asthana, R., 1998; Şahin, Y., 2000; Mabuchi, M. and Higashi, K., 2001).



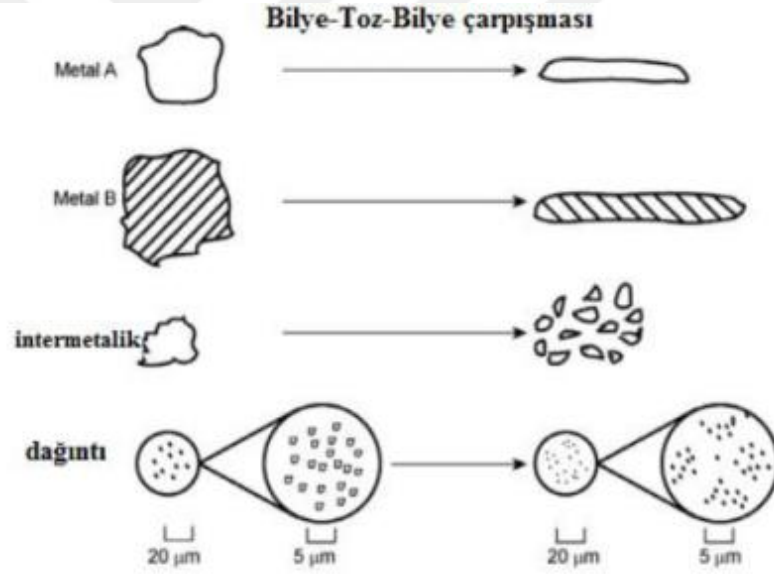
Şekil 6. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü

1.3.1.1. Mekanik Alaşımama Mekanizması

Mekanik alaşımama işlemi esnasında toz parçacıklarında sürekli olarak ezilme, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi, kırılma ve yeniden kaynaklanma meydana gelmektedir. İki bilyenin çarpışması sırasında arada kalan tozların ezilerek başlangıç boyutlarına göre daha da büyümesi, şematik olarak gösterilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Mekanik alaşımlama sırasında bilye-toz-bilye çarpışması (Suryayana, 2001).



Şekil 8. Mekanik alaşımlamanın başlangıç tozlarında meydana gelen deformasyon (Suryana and Al-aqeli, 2013).

Mekanik alaşımlama/mekanik öğütme işlemi esnasında öğütme kabı içerisindeki bilye-toz-bilye ve bilye-toz-öğütücü hazne duvarı arasında meydana gelen çarpışmaların etkisiyle, toz parçacıklarında plastik deformasyon (deformasyon sertleşmesi ve kırılma) meydana gelmektedir (Şekil 8). Mekanik öğütülen tozlarda deformasyonun devam etmesiyle, tozlar kırılarak küçülürler. Bu aşamada kırılma eğilimi, soğuk kaynaklanma eğiliminden daha yüksektir. Bilyelerin darbe etkisiyle tozlar incelmektedir (küçülmektedir).

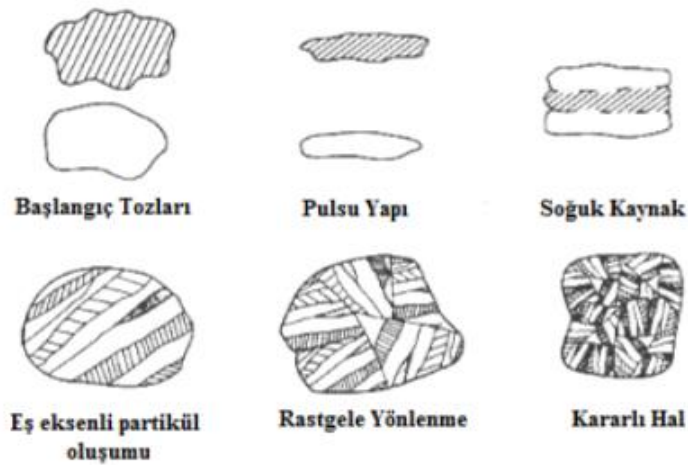
Buna rağmen, parçacıkların boyutu fazla değişmez. Mekanik öğütme (MÖ) işleminde ilerleyen süreçte, tabakalar arası boşluklar azalmakta ve parçacık tabakaları ise artmaktadır. Belirli bir öğütme süresi sonrasında ortalama parçacık boyutlarının artması için soğuk kaynak, parçacık boyutlarının düşmesi için ise kırılma meydana gelmelidir. MA/MÖ işlemi sırasında meydana gelen deformasyon etkisiyle, tane şekillerindeki değişimi dislokasyon boşlukları gibi kristal etkiler oluşturmaktadır. Oluşan bu etkiler, matriste çözünen elementlerin difüzyonunu da arttırmaktadır. MÖ işlemi sırasında sıcaklığın artması, bu difüzyonunu da daha da kolaylaşmaktadır. Böylece, elementler arasında bir mekanik alaşımlama meydana gelmektedir (Suryayana and Al- aqeli, 2013).

1.3.1.1.1. Öğütme Sistemi

Mekanik alaşımlama işleminde üç tür öğütme sistemi mevcuttur.

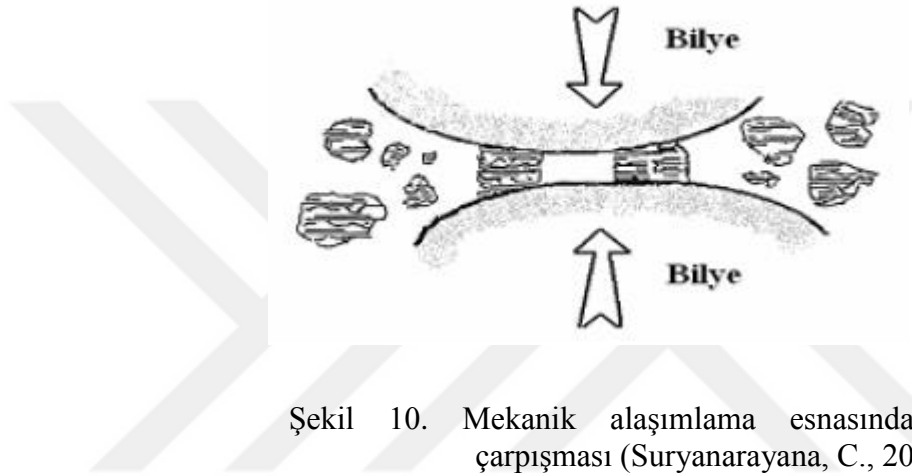
1.3.1.1.1.1. Sünek-Sünek Sistem

Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan tozlardan en az bir tanesi soğuk kaynağı kolaylaştırmak amacıyla sünek olmalıdır. Mekanik alaşımlama işlemi boyunca başlangıç tozlarının morfolojik değişimi gösterilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama aşamalarının gelişimi (Adamiak, M., 2008).

Öğütme işlemi sırasında bilyelerin birbirleriyle çarpışması sırasında bilyelerin merkezleri doğrultusunda arada kalan tozlar, darbe etkisiyle plastik deformasyona maruz kalırlar. Bunun sonucunda tozlarda ezilme olur ve tozlar pulsulaşır. Bu durum görselde verilmiştir (Şekil 10). Bu çarpışmalar esnasında arada kalan tozlara bir miktar darbe enerjisi yüklenir. Yüklenen darbe enerjisi sebebiyle toz parçacıkları pulsulaşır ve soğuk kaynakla birleşir, kırılır ve tekrar soğuk kaynak olurlar. Sürekli olarak uygulanan darbe kuvveti toz parçacıklarını deformasyona uğratarak sertleşmelerine ve kırılmalarına sebep olur.



Şekil 10. Mekanik alaşımlama esnasında bilye-toz-bilye çarpışması (Suryanarayana, C., 2001).

1.3.1.1.2. Sünek-Gevrek Sistem

Alaşımlamanın ilk safhalarında, sünek metal parçacıkları bilye-toz-bilye çarpışmalarıyla pulsu şekle dönüşürken kırılğan oksit ya da metaller arası bileşik parçacıklar kırılır. Artan öğütme süresiyle gevrek parçacıklar sünek toz içersine gömülür. Pulsu tozlar arasındaki boşluklara gevrek parçacıklar sıkıca yerleşir. İlerleyen süreçte sünek toz parçacıklar deformasyon sertleşmesinin etkisinde kalır, pulsu tozlar iyice kıvrımlaşır ve inceler. Her bir parçacığın bileşimi başlangıç toz karışımının bileşimine ulaşır. Eğer kırılğan parçacıklar çözünebilir değil ise, mesela bir ODS (oksit dispersiyon sertleştirilmesi) alaşımında olduğu gibi (Şekil 11), devam edilen öğütmeyle pulsu tozlar arası boşluk azalır ve sert parçacıklar sünek matris içerisinde düzgün bir şekilde dağılır. Eğer kırılğan faz çözünebilir ise kırılğan ve sünek elamanlar arasında kimyasal homojenlikte, alaşımlama da gerçekleşir. Alaşımlamanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği sünek-kırılğan bir mekanizmada, kırılğan elamanın sünek matris içerisinde çözünebilirliğine bağlıdır. İhmal edilebilir katı çözünebilirliğine sahip ise alaşımlamanın gerçekleşmesi olası değildir, örneğin

demir içindeki bor. Bundan dolayı, mekanik alaşımlama sırasında sünek-kırılgan elemanların alaşımlaması, kısa mesafeli difüzyona imkân vermesi için tek başına kırılgan parçacıkların parçalanmasını gerektirmez, aynı zamanda sünek matris elemanı içerisinde katı çözünebilirliği de gerektirir (Davis RM. and Koch CC, 1987; Lee PY. and Koch CC, 1987; Harris CC, 1967; Davis RM. Vd., 1988).



1.3.1.1.1.3. Gevrek -Gevrek Sistem

Alaşımlamanın gerçekleşmesi iki ya da daha fazla kırılgan bileşenlerden meydana gelen bir mekanizmada sezgisel bir açıdan bakacak olursak pekte ihtimal dahilinde olmayabilir. Sünek bileşenin olmaması olası bir kaynaklanmaya engel olur ve bunun bulunmadığı vaziyette de alaşımlamanın gerçekleşmesi mümkün olmaz. Mn-Bi ve Si-Ge gibi kırılgan-kırılgan bileşen mekanizmalarında alaşımlamanın olduğu gözlemlenmiştir (Davis RM. and Koch CC., 1987). Metaller arası kırılgan bileşiklerin karışımlarının öğütülmesi de amorf fazlar meydana getirmiştir (Lee PY. and Koch CC., 1987).

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Son yıllarda, kompozit malzemeler için takviye elemanı olarak KNT seçilmektedir. Özellikle KNT ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlere ilgi büyüktür. Özellikle hafif, yüksek sertlik ve mukavemet ile bir araya getirilen malzemelerin tercih edildiği ve istendiği havacılık, otomotiv ve spor endüstrisinde, KNT ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitler büyük etkiye sahiptir. Silindirik yapıları nedeniyle yüksek kimyasal stabilite özelliğine sahip olması, alüminyum matrisindeki takviye elemanı olarak ideal bir aday haline getirmiştir (Singla vd., 2015). Bunun nedeni, alüminyumun düşük yoğunluğundan dolayı bazı benzersiz özellikler göstermesidir. Örneğin, alaşım elementlerinden (yani, Cu, Mg ve Zn) oluşan fazların ısıtılma işlemleriyle çöktürülmesiyle güçlendirilebilir. Ek olarak, toz teknolojisine dayalı öğütme işlemleriyle parçacık boyutunu küçülterek alüminyum alaşımlarının mekanik davranışını arttırmak mümkündür (R. Pérez-Bustamante vd., 2011).

Karbon nanotüpler hem çaplarına hemde boylarına göre, yüksek elastik modülü ve yüksek çekme mukavemetine sahip malzemelerdir. Bu üstün özelliklerinden dolayı kompozit malzeme üretiminde değişik oranlarda kullanılarak birçok çalışma görmek mümkündür. (Deng vd., 2007; Bakshi, and Agarwal, 2011; Wu and Kim, 2011; Esawi and Morsi, 2007). KNT'ler takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak polimer, seramik ve metal malzemeler seçilebilmektedir (Bradbury vd., 2014; Bal and Samal, 2007; Thostenson vd., 2001; Zhou vd., 2016; Bastwros vd., 2013). En çok polimer matrisli kompozit malzemeler ile ilgili çalışma yapılmış olduğu görülse de son zamanlarda metal matrisli kompozit malzemeler içinde takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (Tjong, 2013; Deng vd., 2007; Bal and Samal, 2007). Ancak yapılan bu çalışmalarda, matris ve takviye malzemesinin parçacık boyutu arasında farkın çok fazla olduğundan dolayı karbon nanotüplerin yapı içerisinde homojen olarak dağıtılmasının çok zor olduğunu ve bununla birlikte matris ve takviye fazı arasındaki arayüz bağının iyi derece de oluşmasında da problemler yaşandığına yer verilmiştir (Tjong, 2013; Deng vd., 2007, Bakshi and Agarwal, 2011; Zhou vd., 2016).

KNT takviyeli MMK üretilmesinde, en çok tercih edilen yöntemlerden biri toz metalürjisi yöntemidir. Yapılan çalışmalara bakıldığında, toz metalürjisi yöntemi ile takviye elemanı ilave edilerek üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirildiği anlaşılmaktadır (Liu vd., 2012; Esawi and Morsi, 2007). Toz metalürjisi aşama olarak, tozların karıştırılıp sıkıştırılması ve ardından sinterlenmesini şeklinde sırasıyla bahsetmek

mümkündür. TM yöntemi, daha kaliteli ve aynı zamanda daha karmaşık şekilli malzemeler üretme imkanı vermektedir. Ayrıca üretilen malzemelerin boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesinin de çok iyi olması, üretim aşamalarından sonra ek işlemlere gerek duyulmaması gibi birçok üstün özellikleri içermesi, bu yöntemi daha ön plana çıkarmıştır. TM yöntemi yüksek ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerin kullanıldığında görülen segregasyon, gas absorpsiyonu ve oksidasyon gibi sorunların görülmediği TM yöntemi, diğer üretim tekniklerine göre çeşitli avantajlar barındırmaktadır (German, 2007).

Jinzhı Lıao yaptığı bir çalışmada, Al tozundaki KNT dağılımını farklı karıştırma teknikleriyle, yani (i) yüksek enerjili bilyalı öğütme, (ii) düşük enerjili bilyalı öğütme ve (iii) polyester bağlayıcı destekli (PBA) bir yaklaşım araştırılmıştır. Yüksek enerjili bilyalı öğütülmüş KNT'ler, yoğunluk farkından dolayı Al tozu içinde yeterince dağılım göstermemesine rağmen, iyi dağılım görülmüştür. Topak şeklinde olan KNT'ler dağılım göstermiştir. Al tozunun yüzeyine PBA-KNT'ler kaplanmıştır. PBA yönteminin en büyük avantajı, KNT yapısının ve morfolojisinin orijinal biçiminin korunması durumudur. Karşılaştırma yapıldığında, düşük enerjili bilyalı öğütülmüş Al-KNT'ler, hasar bakımından, orta seviyedeydi. Mekanik özelliklerin sonuçları ise toz karışımının başarılı olduğunu göstermiştir. Küçük KNT'lerin eklenmesi (ağırlıkça% 0.5), saf matriks ile karşılaştırıldığında kompozitin kuvvetini ve sertliğini belirgin bir şekilde arttırabildiği görülmüştür. PBA ve yüksek enerjili bilyalı öğütülmüş numunelerdeki bir gelişme, düşük enerjili bilyalı öğütülmüş olandan daha üstün olduğuda çıkan neticeler arasındadır (Lıao, J. and Tan, M.J., 2010).

A.M.K. Esawi ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, bilyalı öğütme işleminin ardından sıcak ekstrüzyonla sıcak olarak konsolide edilmiş alüminyum tozlarda iki farklı morfolojinin (sert ve düz, bükülmüş ve dolaşmış) ve çaplarının (çok büyük çap ve 3.5 kat daha küçük çaplı) çok duvarlı karbon nanotüplerin dağılımı için kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonu, KNT morfolojisinin dağılımını etkilemede önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Daha küçük çaplı bükülmüş ve dolaşmış KNT'lerin, daha büyük çaplı sert ve düz olanlara karşılaştırıldığında KNT içeriğindeki artışla dağılmasının daha zor olduğu; bu da kompozitlerin gerilme özelliklerini ve sertliğini etkilediğinin görüldüğü sonucuna varılmıştır. Ayrıca, öğütülmüş tozların soğuk kaynak işleminin yanı sıra son bileşikte karbür oluşumu KNT çapına bağlı olarak bulunmuştur. Daha küçük bir çapa sahip KNT'lerin - belirli bir KNT için daha büyük olanlara kıyasla alüminyum matris ile

daha büyük etkili bir ara yüzey temas alanına sahip - öğütme sırasında partikül kaynağını azalttığı ve karbür oluşumundan daha fazla etkilendiği bulunmuştur (Esawi vd., 2010).

Xudong Yang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise, KNT ile takviye edilmiş Al kompozitlerinin hem iyi mukavemet hem de süneklik ile hazırlanmasında yeni bir yaklaşım daha sunulmuştur. KNT / Al kompozitlerinin sentezlenmesi için in situ kimyasal buhar biriktirme (CVD) bilyeli öğütme ile kısa bir süre birleştirilmiştir. KNT'lerin Al tozunun yüzeyindeki dağılımı, CVD yöntemi kullanılarak elde edilmiş, daha sonra bilyeli öğütme işleminin kısa bir süre için yürütülmesi ile KNT'lerin dağılımı daha da iyileştirilmiş ve bununla birlikte Al matrisi arasında bağ kuran güçlü bir arayüz oluşturan matris parçacıkların derinliklerine KNT'ler implante edilebilmiştir. Sonuç olarak, ağırlık olarak % 2.5 CNT içeren KNT / Al kompozitleri, takviye elemanı içermeyen Al'a göre 1.7 kat daha yüksek olan 334 MPa'nın gerilme mukavemeti ve başarısızlığa karşı uzamanın % 18'inin iyi bir süneklik sergilediği görülmüştür. Böylece, KNT ile güçlendirilmiş Al kompozitlerde iyi dengelenmiş güç ve süneklik elde edilmiştir. Diğer karıştırma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, işlemin önemli özelliği, KNT'lerin ön işlemine gerek duyulmaması ve orijinal yapılarının iyi saklı kalmamasıdır (Yang vd., 2013).

Hansang Kwon ve arkadaşlarının yaptığı bir başka çalışmada, sıcak ekstrüzyon işlemlerinin ardından kıvılcım plazma sinterleme birleşimi ile Al - KNT kompozitinin uzamasını tehlikeye atmadan gerilme mukavemetini arttırdığı sonucu elde edilmiştir. Önemli ölçüde, Al-KNT kompozit, saf Al'inkine kıyasla yüksek oranda gerilme mukavemetine rağmen uzamada bir azalma göstermemiştir. Sınır tabakasındaki KNT'lerin varlığının, ekstrüzyon yönünde iyi hizalanmış KNT'lerin yanı sıra Al matrisi ve KNT'ler arasında alüminyum karbür oluşumu sebebiyle etkili gerilme aktarımına yol açan mekanik özellikleri etkilediğine inanılmaktadır. Ağırlıkça % 1 KNT ile takviye edilmiş AA2024 matris kompozit, soğuk izostatik presleme ile üretilmiş, ardından sıcak ekstrüzyon teknikleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, KNT'lerin kompozit içinde homojen bir şekilde dağıldığını ve Al-KNT'lerin ara yüzlerinin iyi bir şekilde bağlandığını göstermiştir. Matrisin tane büyüklüğü, 200 nm kadar ince idi ve az miktarda KNT ilavesiyle, elastik modül ve gerilme mukavemeti, aynı işlem altında üretilen AA2024 matrisinin üzerinde belirgin bir şekilde arttırılmıştır. Artışların nedenleri, KNT'lerin olağanüstü mekanik özelliklerinden, KNT'lerin Al matris bileşiğindeki köprüleme ve ayrılma rolünden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmüştür (Kwon vd., 2009).

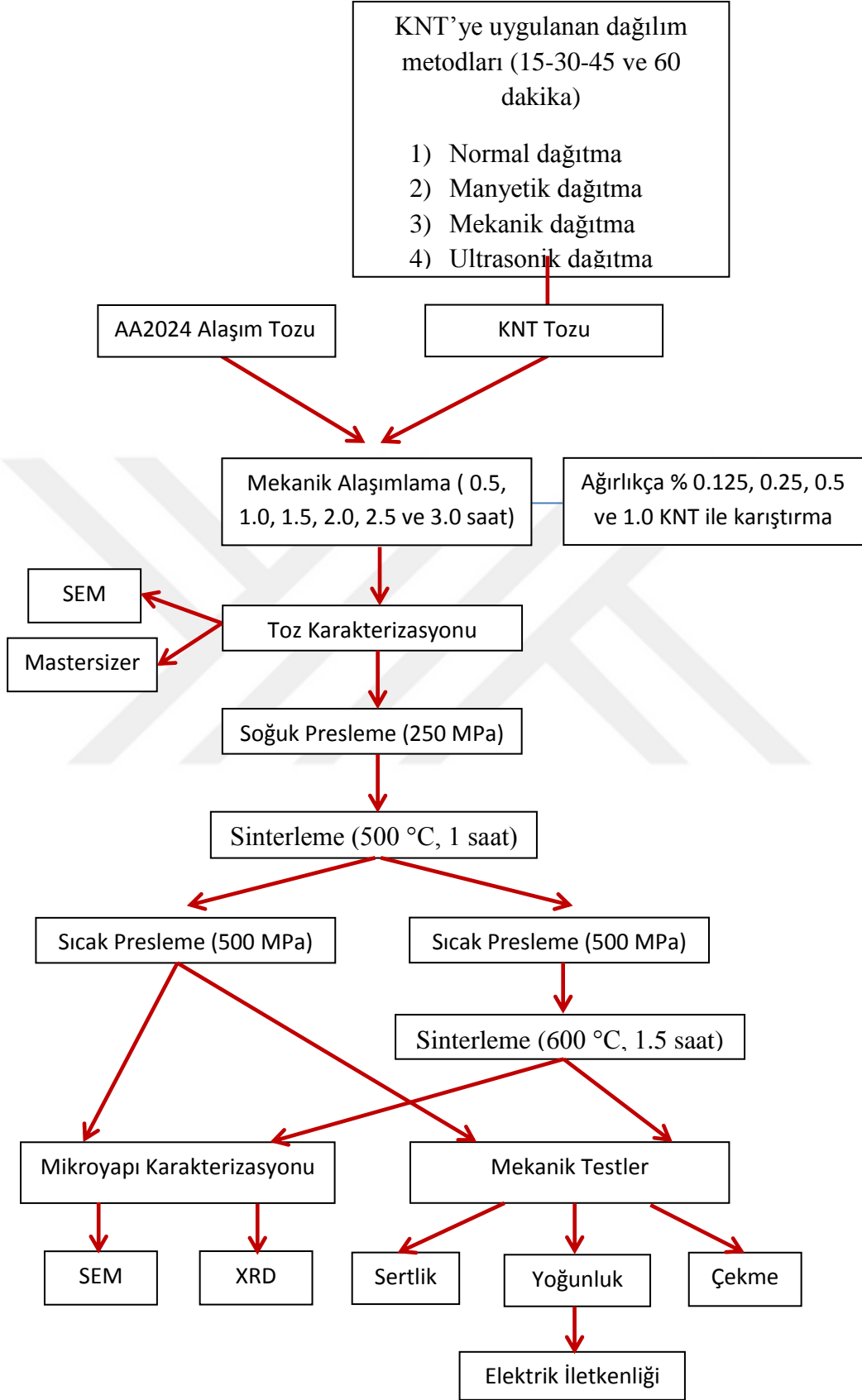
KNT'lerin Al matrisindeki düzgün dağılması, gelişmiş özelliklerin araştırılmasında kritik öneme sahiptir. Mekanik bir dağılım tekniği olarak bilyalı öğütme, potansiyelini kanıtlamıştır. Bir Al matrisinde ağırlıkça % 5 KNT dağıtmak için bilyalı öğütme kullanılmıştır. KNT içeriğinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bilyalı öğütülmüş Al-KNT karışımlarını birleştirmek için soğuk sıkıştırma ve sıcak ekstrüzyon kullanılmıştır. Çekme mukavemetinde % 50'ye kadar ve saf alüminyuma kıyasla % 23 sertlikte artışlar görülmüştür. Ağırlıkça% 5 KNT içeren kompozitte bir miktar karbür oluşumu gözlenmiştir. Gözlemlenen genel güçlendirme etkisine rağmen, kullanılan KNT'lerin büyük boy oranının ağırlıkça % 2'den daha büyük olan KNT'de dağılması zor olmuştur ve bu nedenle KNT ağırlık içeriğindeki artış ile mekanik özelliklerde beklenen gelişmeler tam olarak gerçekleştirilememiştir (Esawi vd., 2010).

Chun-hong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sinterlenmiş KNT/Al-Cu kompozitlerinin deformasyon davranışları, bir termal simülatör sistemi ile 300–550 ° C sıcaklık aralığında izotermal sıkıştırma testleri ve 0.001–10 s⁻¹ gerilme hızı aralığı ile incelenmiştir. Dinamik malzeme modeline (DMM) dayalı işlem haritaları 0.1 ± 6.6 gerilmelerde oluşturulmuş ve sıcak deformasyon öncesi ve sonrasında mikro yapılar taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) ve yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (RTEM) ile karakterize edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarında, gerilmenin işleme haritaları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Optimum işleme alanları, gerilme 0.6 olduğunda, 0.4–10 s⁻¹ gerginlik oranlarına sahip 375-425 °C sıcaklıkta ve gerilme 0.6 olduğunda, 525-550 °C sıcaklıkta 0.02–10 s⁻¹ değerlerindedir. Büyük partiküllerin homojen olmayan bir dağılımının yanı sıra ykarişik dislokasyonların yüksek yoğunluğu, dislokasyon duvarları ve bazı alt tanecikler kararsızlık alanına karşılık gelen düşük deformasyon sıcaklıklarında ve gerilme oranlarında ortaya çıkar. İnce parçacıkların homojen bir dağılımı ve dinamik yeniden kristalleşme, kompozitler stabilite alanlarına tekabül eden 10 s⁻¹ gerilme hızı altında 400 ve 550 °C'de deforme olduğu zaman meydana gelir (LI vd., 2017).

Bu çalışmada, daha küçük oranlarda farklı takviye miktarlarının, takviye malzemesi-ine uygulanan farklı dağıtım metodlarının ve farklı üretim parametrelerinin mekanik alaşımlama işlemi, toz özellikleri ve kompozit malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Toz özellikleri olarak toz morfolojisi ve toz boyutu araştırılmıştır. Kompozit özellikleri olarak ise mikro yapı, kırılma yüzeyleri, yoğunluk, elektrik iletkenliği, sertlik ve çekme mukavemeti değerleri araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

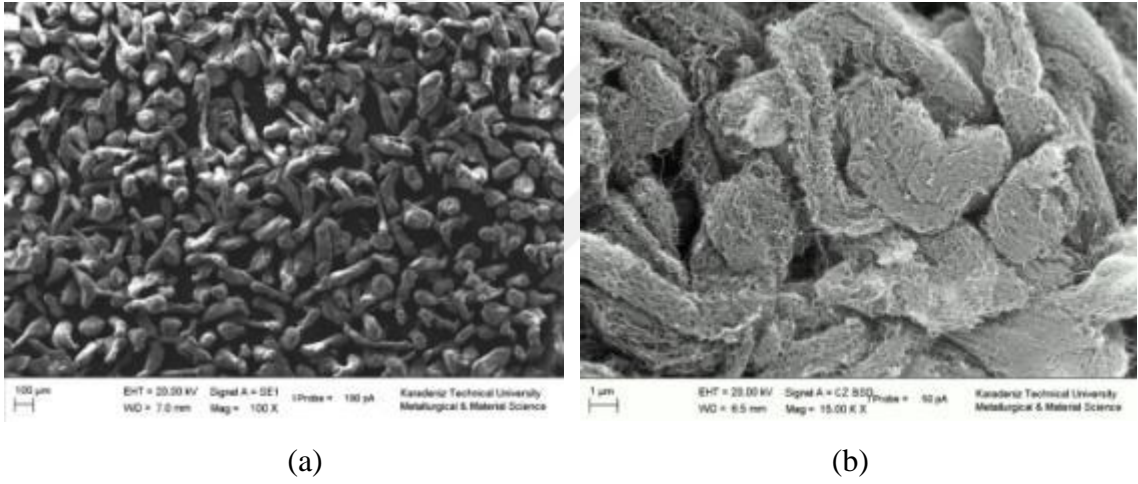
Bu çalışmada mekanik alaşımlama yöntemi ile KNT takviyeli Al matrisli nanokompozit malzemeler üretilmiştir. İlk olarak, KNT tozları, manyetik, ultrasonik, geleneksel dağıtma ve bilyeli dağıtma işlemleri olmak üzere dört farklı dağıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bütün dağıtma işlemleri için 15, 30, 45 ve 60 dakika olmak üzere dört farklı dağıtma zamanı uygulanmıştır. Kurutma işlemi ise 100 °C de gerçekleştirilmiştir. KNT takviyeli Al matrisli nanokompozit tozlar, mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiş ve bu tozların toz karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Takviye oranı olarak ağırlıkça % 0.125, % 0.25, % 0.5 ve % 1.0 olmak üzere dört farklı oran seçilmiştir. Bununla birlikte, diğer bir değişken olarak 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 olmak üzere altı farklı öğütme zamanı kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin karakterizasyon çalışmalarında, SEM, X-ışınları difraktometresi (XRD), lazer parçacık boyutu analiz cihazı (Mastersizer 2000e, Malvern Instruments) ve Instron mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Toz karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kompozit tozlar soğuk presleme için 250 MPa değerinde basınçta preslenmiş ve daha sonrada 500°C de bir saat sıcak presleme yapıp soğutulduktan sonra sıcak presleme sonrası sinterlemenin etkisini görmek amacıyla 600°C de 1,5 saat sinterleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen bu kompozitlerin, yoğunluk, porozite, makro sertlik değerleri ve iç yapı incelemeleri yapılarak en uygun üretim parametreleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma boyunca uygulanan işlem akış şeması verilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Deneysel çalışmanın iş akış şeması

2.1. Malzeme

Matris malzemesi olarak AA2024 alaşım tozları kullanılmıştır. Bu tozlar Gündoğdu Exoterm Sanayinden (GES) temin edilmiştir. AA2024 (2.72 g/cm^3) tozlarının spektral analizi (Tablo 1), fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir (Tablo 2). Takviye malzemesi olarak KNT tozları kullanılmıştır. İlk olarak, Al2024 tozları için 90-125 μm aralığında eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ortalama tane boyutu D50 değeri 115 μm olarak belirlenmiştir. Takviye malzemesi olan KNT, ağırlıkça yüzde 0.125, 0.25, 0.5, ve 1.0 olmak üzere dört farklı ağırlık oranı seçilerek kompozit tozu oluşturulmuştur. Burada farklı oranlarda KNT kullanılmasındaki amaç, KNT miktarının toz ve kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi incelemektir.



Şekil 13. AA2024 alaşım ve KNT tozlarının başlangıç morfolojileri a) AA2024 (100 X)
b) KNT (15.00 K X)

Tablo 1. AA2024 Tozlarının Ağırlıkça Bileşimi (%)

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

Tablo 2. Al 2024 alaşımının fiziksel ve mekanik zellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	ekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (HB)
2.80	185	75	20	55

Topaklı nano parçacıkların, matris bünyesinde daha iyi takviye özellikleri göstermesini sağlamak amacıyla genellikle sıvı süspansiyonlara dağıtılması ve daha sonra matris bünyesine katılması gereklidir. Bu çalışmanın amaçlarından biri de, KNT tozuna uygulanan dört farklı dağıtma işleminin kompozit malzeme özelliklerine olan etkisini görebilmektir. Yapılan dağıtma işlemleri şu şekildedir: bilyeli dağıtma, ultrasonik dağıtma, manyetik dağıtma ve geleneksel dağıtma. Manyetik, geleneksel ve ultrasonik dağıtma işlemlerinin her biri için 0,5 gram KNT tozu ve 1000 mililitre etil alkol karışımları oluşturulmuştur. Bu oluşturulan karışımlara, 15, 30, 45 ve 60 dakika olmak üzere bahsettiğimiz dağıtma işlemleri uygulanmıştır. Dağıtma işlemlerinden elde edilen KNT, etüvde 100 derecede 16 saat kuruması için bekletilmiştir. Bilyeli dağıtma işlemi de, 1, 2, 4 ve 6 saat olmak üzere dört farklı zaman diliminde, 400 devirde gerçekleştirilmiştir. Her bir öğütme işlemi için 0,5 gram KNT tozu kullanılmıştır. Elde edilen tozlardan yeteri kadar numune alınarak başlangıç morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. KNT dağıtma işlemi için uygulanan dağıtma yöntemi ve işlem parametreleri aşağıdaki tablo da ifade edilmiştir.

Tablo 3. Uygulanan dağıtma yöntemleri ve işlem parametreleri

Ultrasonik Dağıtma	Manyetik Dağıtma	Geleneksel Dağıtma	Bilyeli Dağıtma
15 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	15 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	15 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	1 saat/ 0.5 gram KNT
30 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	30 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	30 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	2 saat/ 0.5 gram KNT
45 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	45 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	45 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	4 saat/ 0.5 gram KNT
60 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	60 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	60 dakika/ 1000 ml etil alkol + 0.5 gram KNT	6 saat/ 0.5 gram KNT

2.2. Mekanik Alaşım

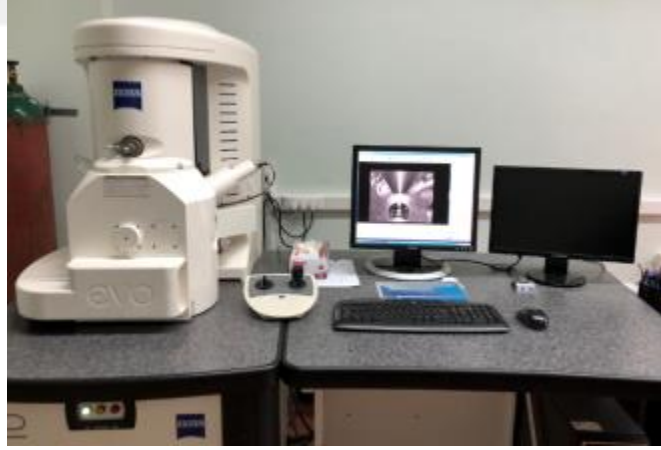
KNT topraklarını dağıtma işlemi uygulandıktan sonra AA2024-KNT toz karışımları, gezegen tipi bilyeli öğütücüde (Retsch PM 200) 400 dv/dak öğütme hızında mekanik alaşım işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 14). Öğütme zamanı olarak 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 saat olmak üzere altı farklı değer seçilmiştir. Öğütme işlemi için tungsten karbür öğütme kabı ve bilyeler tercih edilmiştir. Öğütücü kap hacmi 125 ml ve bilye boyutu 10 mm dir. Her bir öğütücü kaba yerleştirilen toz miktarı 20 gr ve bilye toz ağırlık oranı 10:1 seçilmiştir. Ağırlıkça %2 oranında yağlayıcı olarak metanol kullanılmıştır. Öğütme cihazı, öğütücü kap ve bilye resimleri şekilde gösterilmiştir.



Şekil 14. Mekanik öğütme cihazı ve cihaz elemanları

2.3. Morfoloji İncelemeleri

AA2024 ve KNT başlangıç tozları ile MA yöntemiyle üretilen kompozit tozlarının morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (ZEISS EVO LS 10) kullanılarak incelenmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.4. Parçacık Boyutu İncelemeleri

Başlangıç tozları ve kompozit tozların parçacık boyutu dağılımı incelemeleri Malvern Instruments™ marka Mastersizer 2000e (Şekil 16) model lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile araştırılmıştır.



Şekil 16. Parçacık boyutu ölçüm cihazı

2.5. X Işınları Analizi

Kompozit tozlarının kristal yapısı X ışınları analizi ile araştırılmıştır. X ışınları kırınım yöntemiyle farklı öğütme sürelerinin, ağırlıkça yüzde KNT oranlarının ve dağıtma sürelerinin, kompozit tozların kristal yapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. X ışınları kırınım yöntemi ile yapılan incelemeler için PANalytical marka X'Pert³ Powder XRD cihazı kullanılmış olup işlemler 45 kV ve 40 mA koşullarında, $\text{CuK}\alpha$ (1,54059 Å) yapılmıştır (Şekil 17).



Şekil 17. X ışınları Analiz cihazı

2.6. Yoğunlaştırma

AA2024-KNT kompozit tozlarına ilk aşamada ön şekil vermek amacıyla soğuk presleme işlemi uygulanmıştır. Soğuk presleme basıncı 100 MPa olarak uygulanmıştır. Ön presleme işlemine tabi tutulduktan sonra 250 MPa basınç altında 500 °C de 1 saat süreyle sıcak presleme yapılmıştır. Sıcak preslenmiş numunelere, soğutulduktan sonra 600 °C de 1.5 saat boyunca sinterleme işlemi uygulanmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Soğuk ve sıcak presleme için kullanılan hidrolik pres cihazı

2.7. Metalografik İşlemler

Kompozit içyapısı incelemeleri ve mekanik testlerde kullanılacak numuneler ilk önce 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 1500 mesh boyutundaki zımparalar kullanılarak zımparalanmış bu işlemi takiben de alümina solüsyon kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır (Şekil19).



Şekil 19. Metalografi işlemleri için kullanılan cihazlar

2.8. Fiziksel ve Mekanik Özellikler İçin Uygulanan Testler

2.8.1. Yoğunluk

Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları, karışımlar kuralına göre hesaplanmıştır. Deneysel yoğunluklar ise numunenin geometrik şekli ile birlikte piknometre ile ölçülmüştür. Elde edilen yoğunluk değerleri teorik yoğunluğa bölünerek bağıl yoğunluk bulunmuştur.

$$\rho_c = \sum w_i \cdot \rho_i = [(\%w)_1 \cdot \rho_1] + [(\%w)_2 \cdot \rho_2] + \dots + [(\%w)_n \cdot \rho_n]$$

Burada;

ρ_c : Kompozitin yoğunluğu

ρ_1 ve ρ_2 : Kompoziti oluşturan takviye elemanlarının yoğunlukları

ρ_n : Her bir takviyenin yoğunluğu

w_1 , w_2 ve w_n : Her bir elemanın ağırlıkça oranı

$$\text{Bağıl yoğunluk} = [(\rho_c - \rho_d) / \rho_c] \times 100$$

Burada;

ρ_d : deneysel yoğunluk

2.8.2. Elektrik İletkenlik Ölçümleri

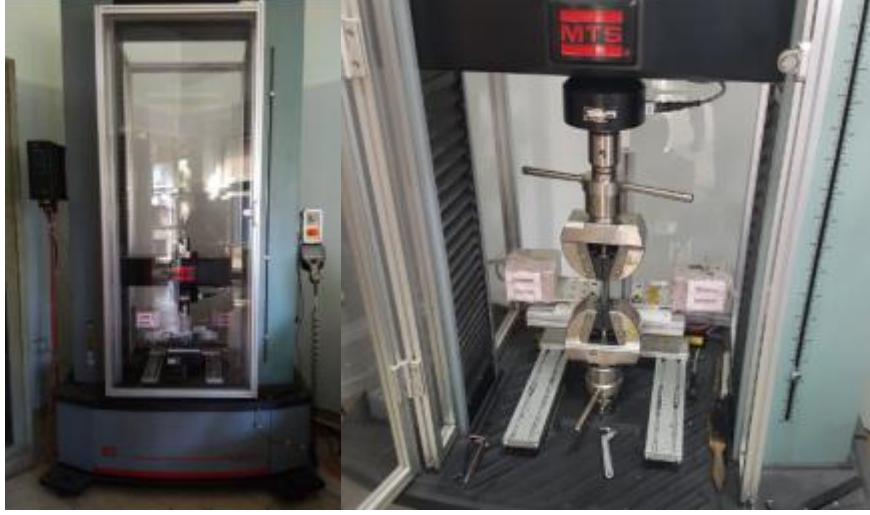
Elektrik iletkenliği ölçümleri, girdap akımları prensibiyle çalışan Hocking AutoSigma 3000 DL model bir ölçüm cihazıyla 500 kHz frekansta ve 8 mm'lik prob kullanılarak yapılmış ve %IACS (Uluslararası Tavlı Bakır Standardı) birimi ile ifade edilmiştir (Şekil 20). Dört ölçümün ortalaması alınarak iletkenlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 20. Elektrik iletkenlik ölçümün için kullanılan cihaz

2.8.3. Çekme Mukavemeti Ölçümleri

Çekme testleri MTS 45 (Şekil 21) model test cihazında, 0.3 mm/sn çekme hızında test gerçekleştirilmiştir. Her bir gruptaki numuneler için üçer kez çekme deneyi yapıp, üç değerın ortalaması kullanılmıştır.



Şekil 21. Çekme mukavemeti ölçüm cihazı

2.8.4. Sertlik Ölçüm Testi

Kompozit numunelerin sertlik ölçümleri Innovatest Nemesis 9000 sertlik cihazında Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 22). Brinell sertlik ölçümü 2.5 mm çapında batıcı uç, 31.25 kgf yük ve 10 s bekleme süresi şartları altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler, her bir numune için beşer defa gerçekleştirilmiş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.



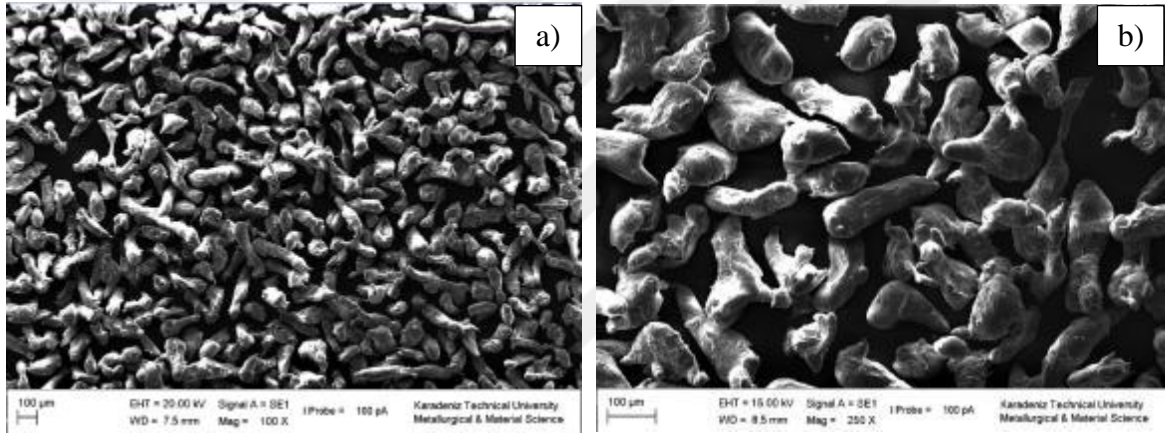
Şekil 22. Sertlik ölçüm cihazı ve ölçüm aşamaları

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Toz Karakterizasyonu

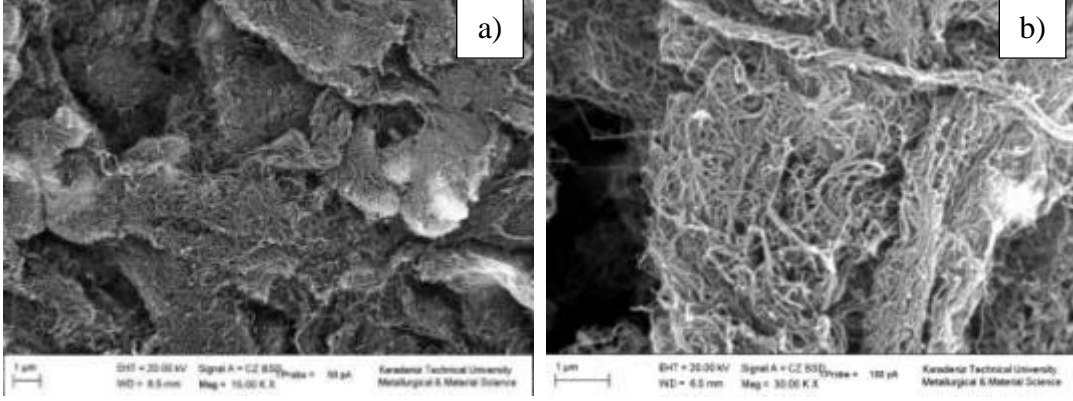
3.1.1. Toz Morfolojisi

Aşağıda verilen SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, 115 µm değerinde ortalama AA2024 alaşım tozları çubuksu bir morfolojiye sahiptir (Şekil 23).



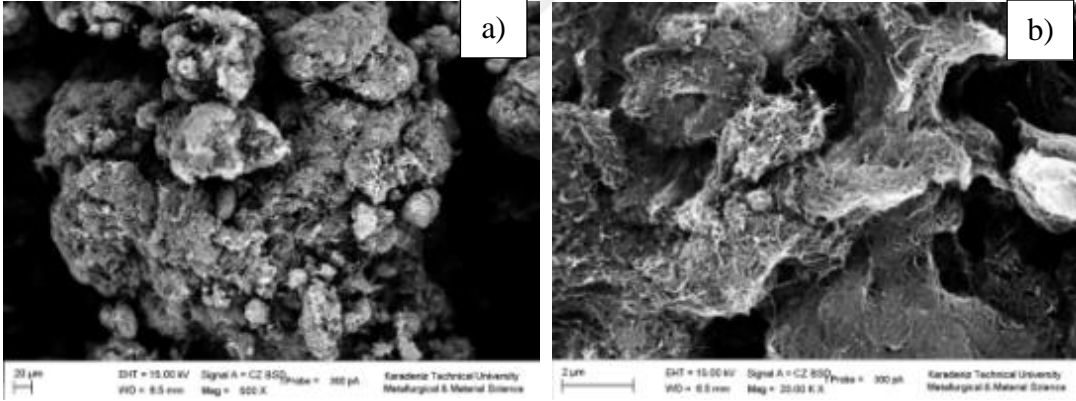
Şekil 23. AA2024 alaşım tozlarının farklı büyütmelere ait morfolojisi, a) 100 X, b) 250 X

Dağıtma işlemine tabi tutulmadan önce, küçük ve büyük büyütmelerde KNT'lere ait SEM görüntüleri verilmektedir (Şekil 24). KNT'lerin ipliksi bir morfolojide olduğu açıkça görülmektedir. Morfolojik resimlerden de görüldüğü gibi KNT'lerdeki topaklanma eğilimi ve topak yoğunluğu önemli oranlarda olup dağıtma işleminin amacı KNT parçacıkları arasındaki mesafenin artırılmasıdır.

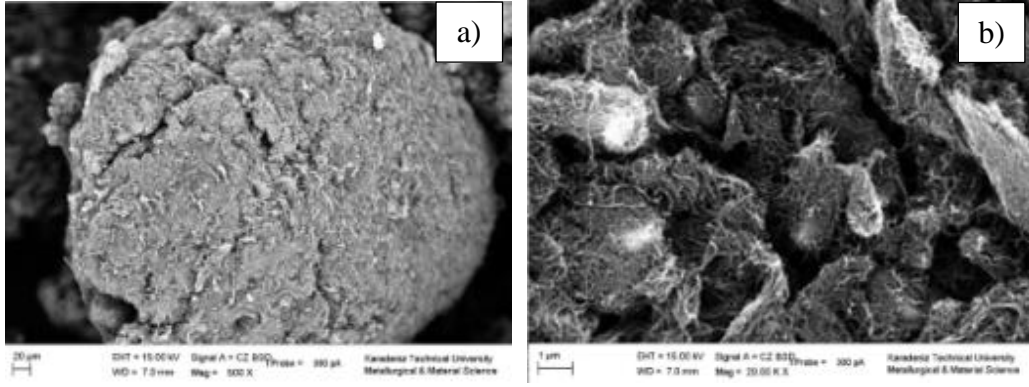


Şekil 24. KNT tozlarının farklı büyütmelere ait morfolojisi, a) 15.00 K X, b) 30.00 K X

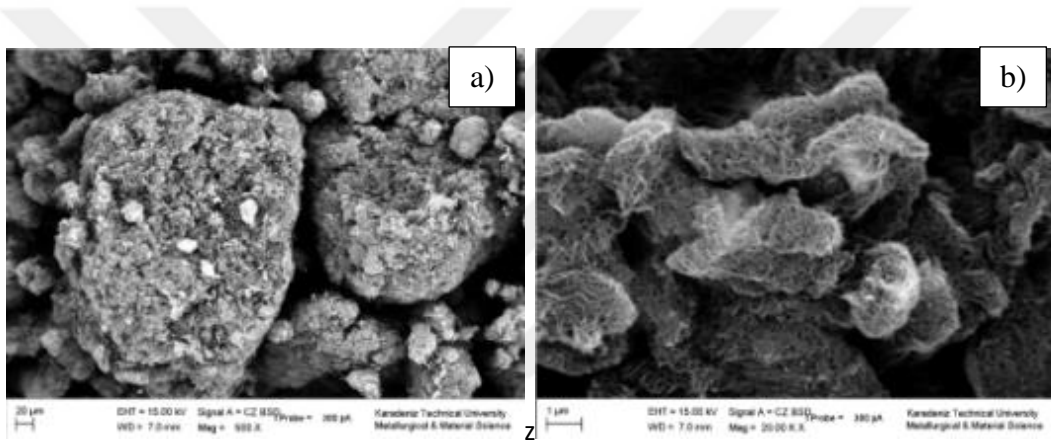
KNT'lerdeki bu denli topaklanmanın sebebi yüksek en boy oranı ve Van der Waals kuvvetleridir (Sinnot and Andrews, 2001). Bu nedenle KNT'lerin dağıtılması oldukça zor bir işlemdir. KNT'lerin dağıtılması için dört farklı yöntem kullanılmıştır ve bu yöntemlerin KNT topaklarının dağıtılmasındaki etkinliğinin anlaşılması için aşağıdaki SEM görüntüleri verilmiştir (Şekil 25-40).



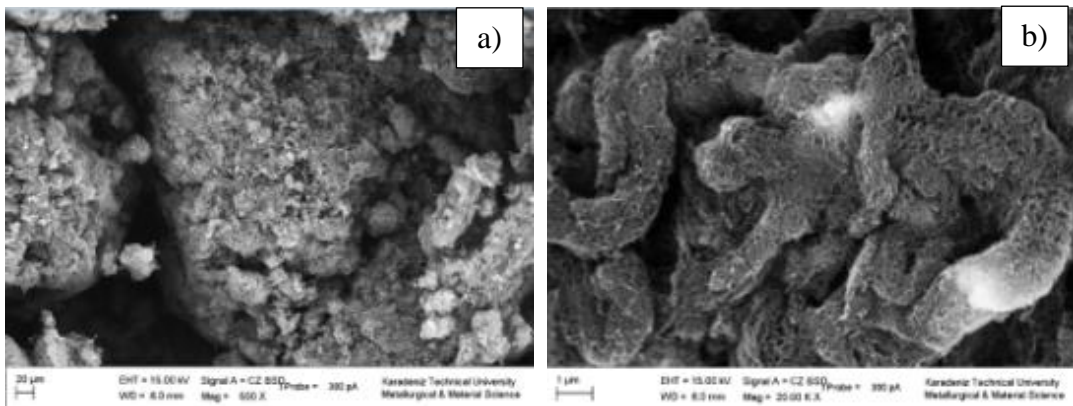
Şekil 25. Geleneksel dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



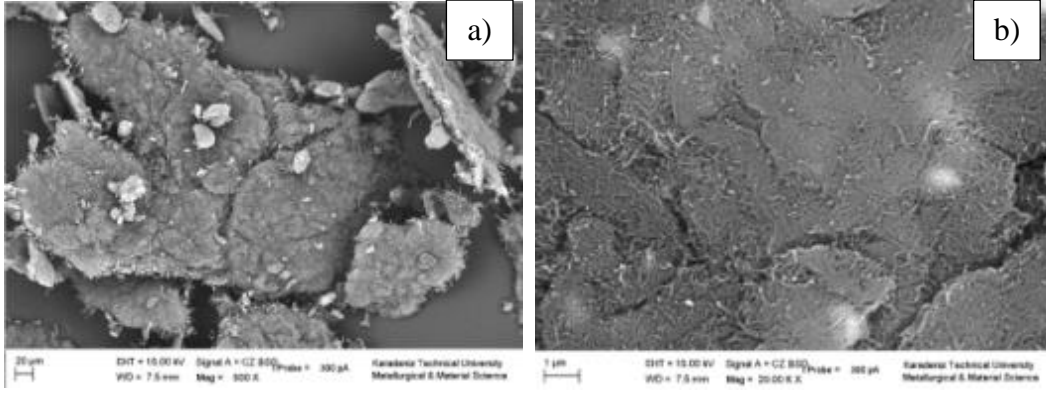
Şekil 26. Geleneksel dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



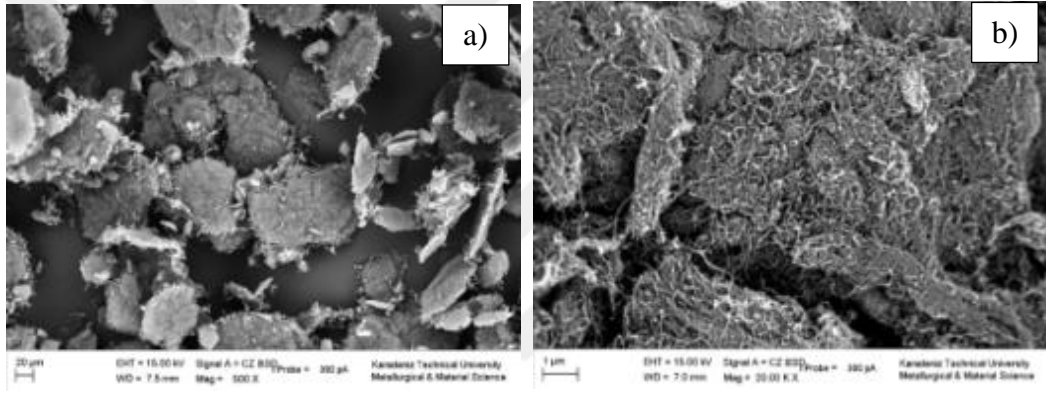
Şekil 27. Geleneksel dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



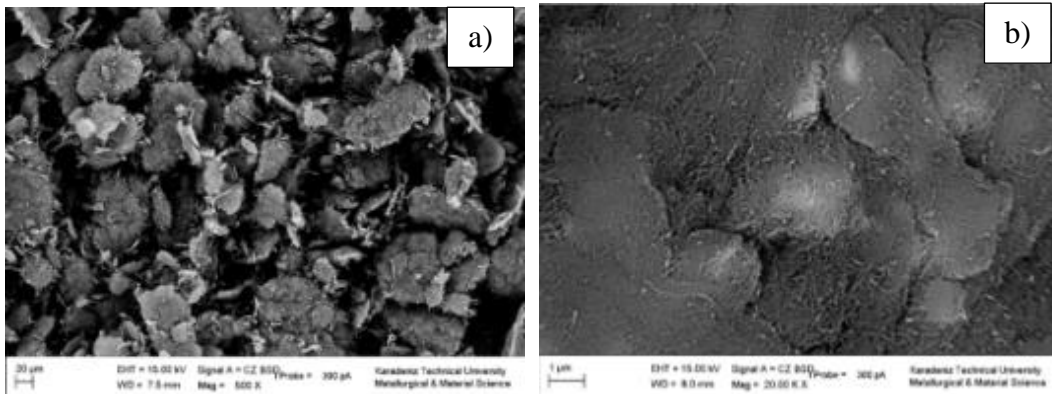
Şekil 28. Geleneksel dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



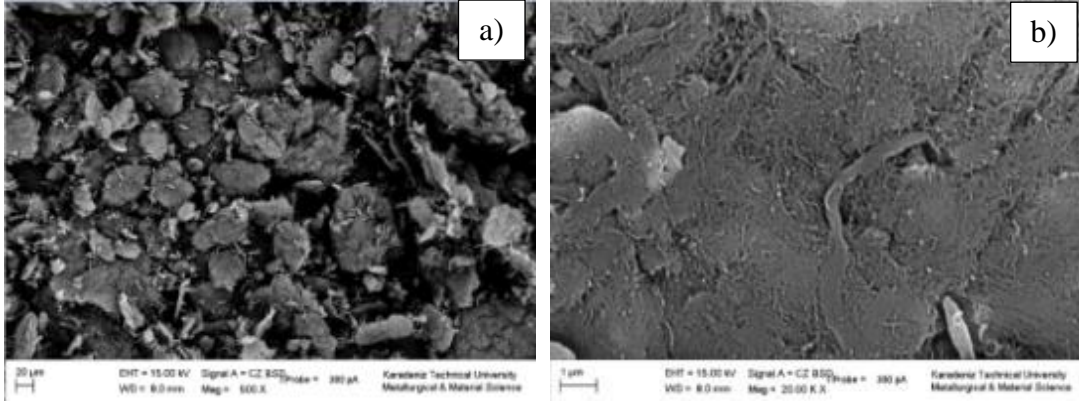
Şekil 29. Bilyeli dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



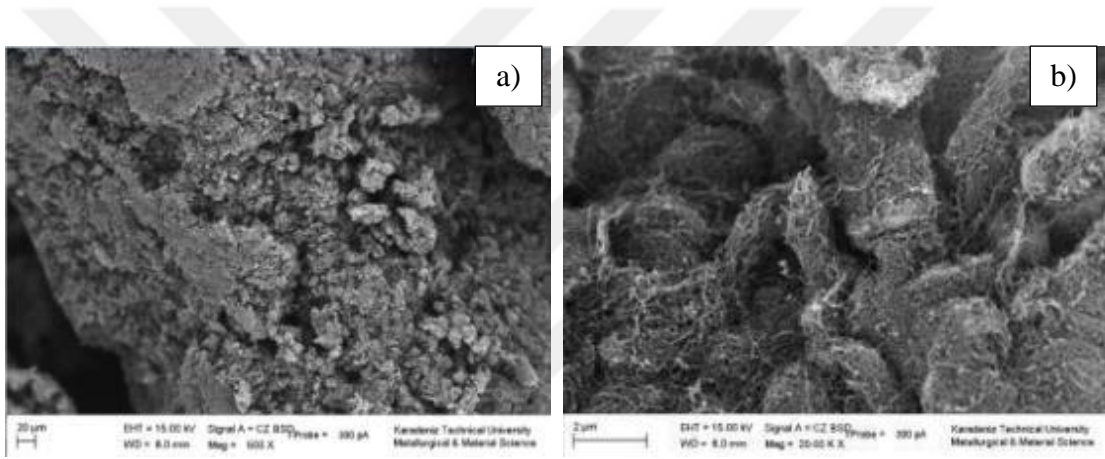
Şekil 30. Bilyeli dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



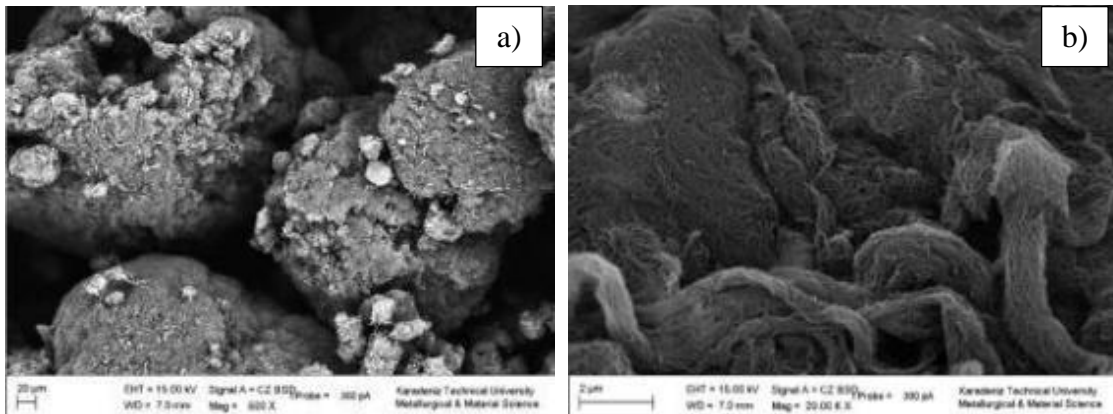
Şekil 31. Bilyeli dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



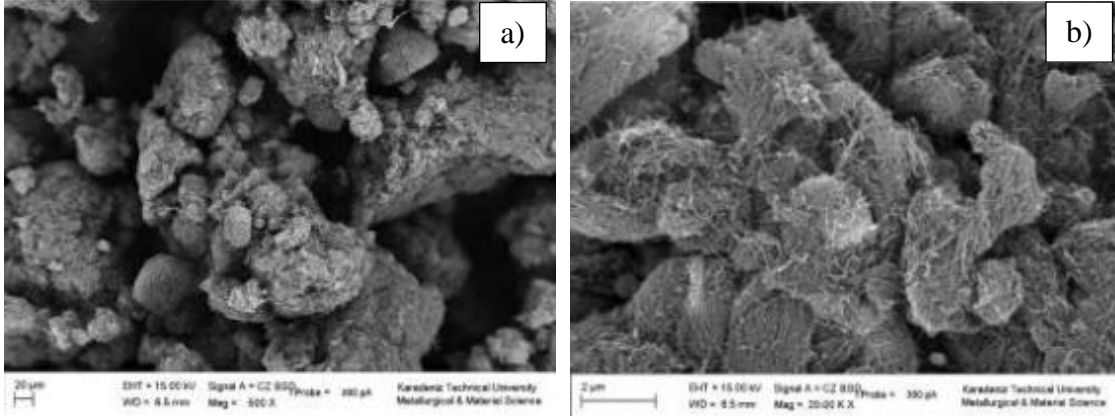
Şekil 32. Bilyeli dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



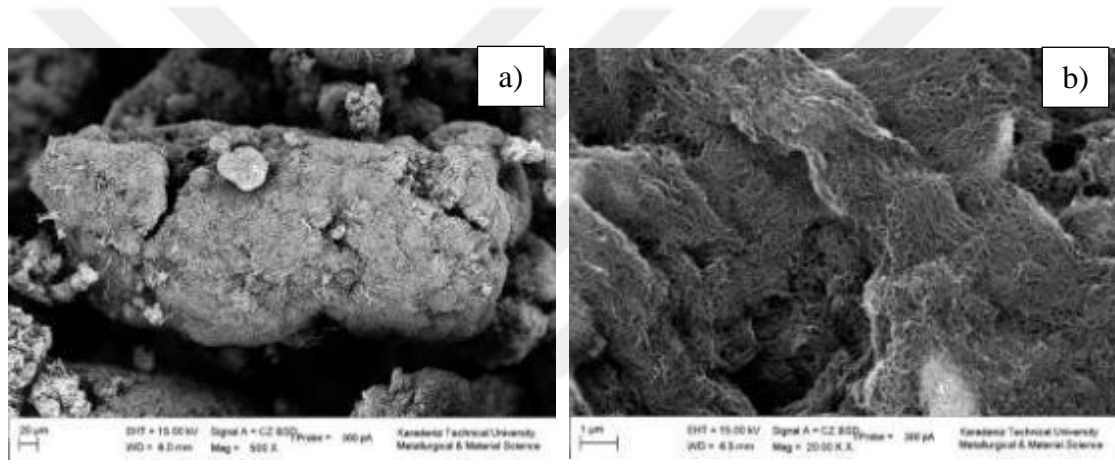
Şekil 33. Manyetik dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



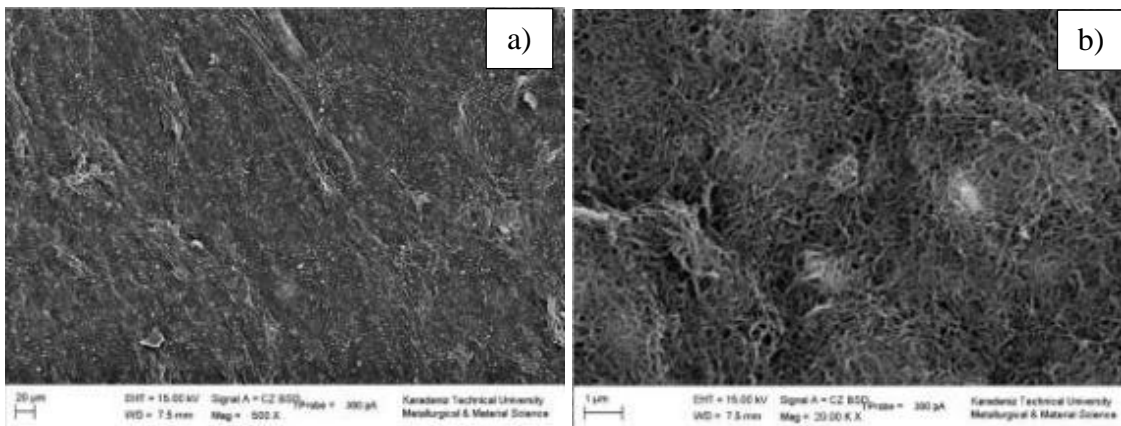
Şekil 34. Manyetik dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



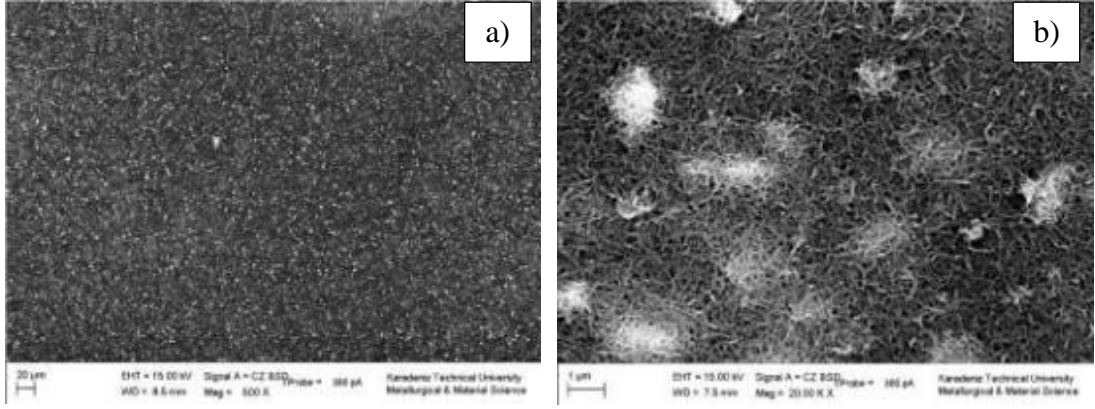
Şekil 35. Manyetik dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



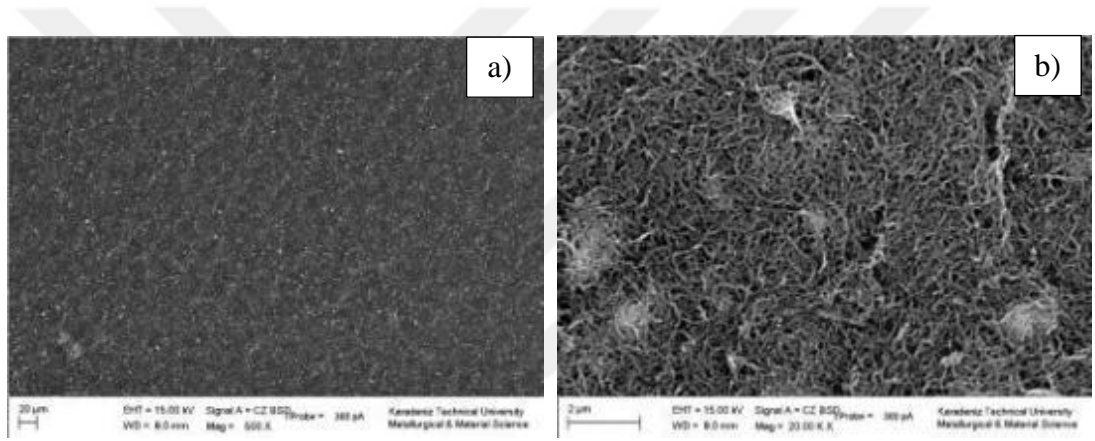
Şekil 36. Manyetik dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



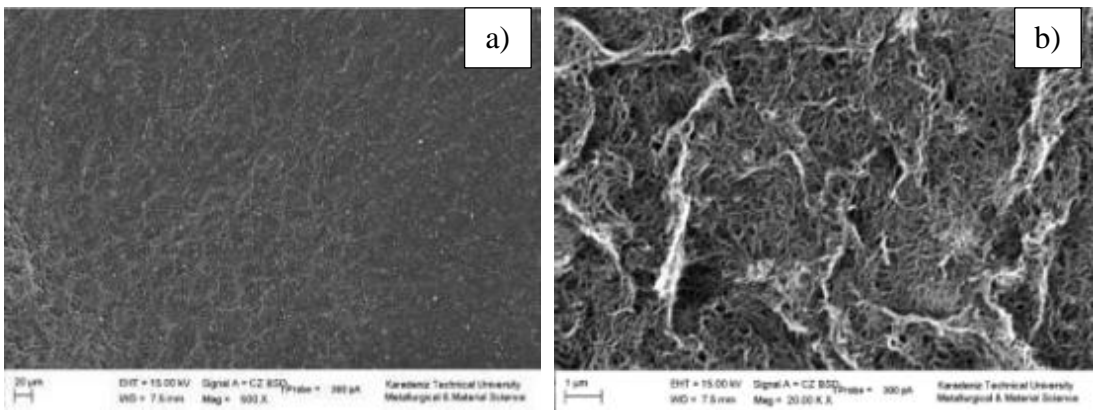
Şekil 37. Ultrasonik dağıtma; 15 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



Şekil 38. Ultrasonik dağıtma; 30 dakika a) 500 X b) 20.00 K X



Şekil 39. Ultrasonik dağıtma; 45 dakika a) 500 X b) 20.00 K X

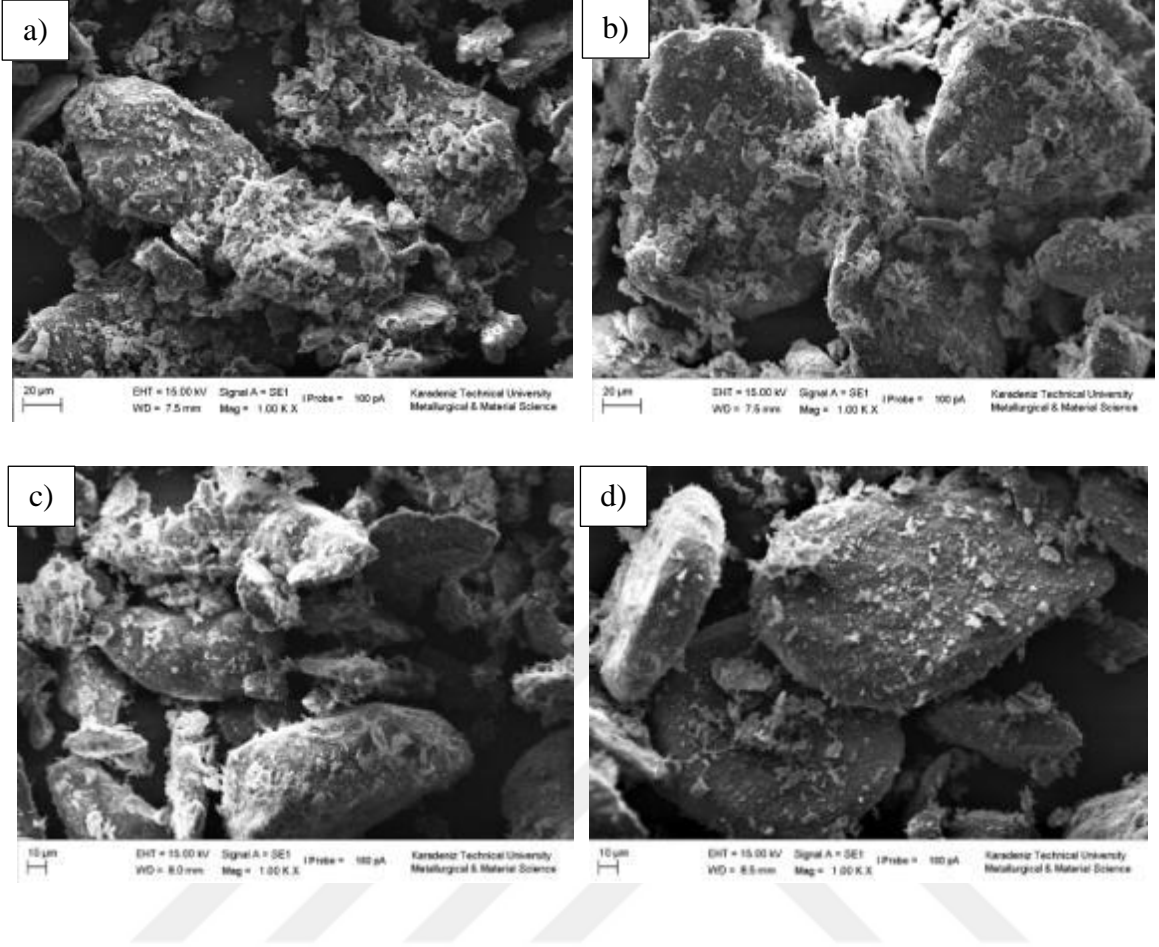


Şekil 40. Ultrasonik dağıtma; 60 dakika a) 500 X b) 20.00 K X

Yukarıda verilen SEM resimleri temelinde dört farklı dağıtma işlemi uygulanmış KNT'lerin son durumları incelendiğinde, her bir yöntem için dağıtma işleminin başlangıcında topakların bir miktar dağıldığı bununla birlikte dağıtma süresi arttıkça KNT'lerin tekrar birbiri ile topak oluşturduğu ve her bir KNT parçacığı (ipliği) arasındaki mesafenin daha da azaldığı gözlemlenmiştir. Dört farklı dağıtma işlemlerini kendi aralarında kıyaslandığında, görüntülerden de anlaşılacağı gibi ultrasonik dağıtmanın KNT dağılımı üzerindeki etkisinin daha iyi olduğu gözlemlenebilir. Ultrasonik dağıtma işleminin uygulandığı dört farklı zamanı kendi arasında karşılaştırıldığında ise 45 dakikadan sonra KNT'lerin bir araya gelerek sarmal topaklar oluşturduğu gözlemlenmiştir.

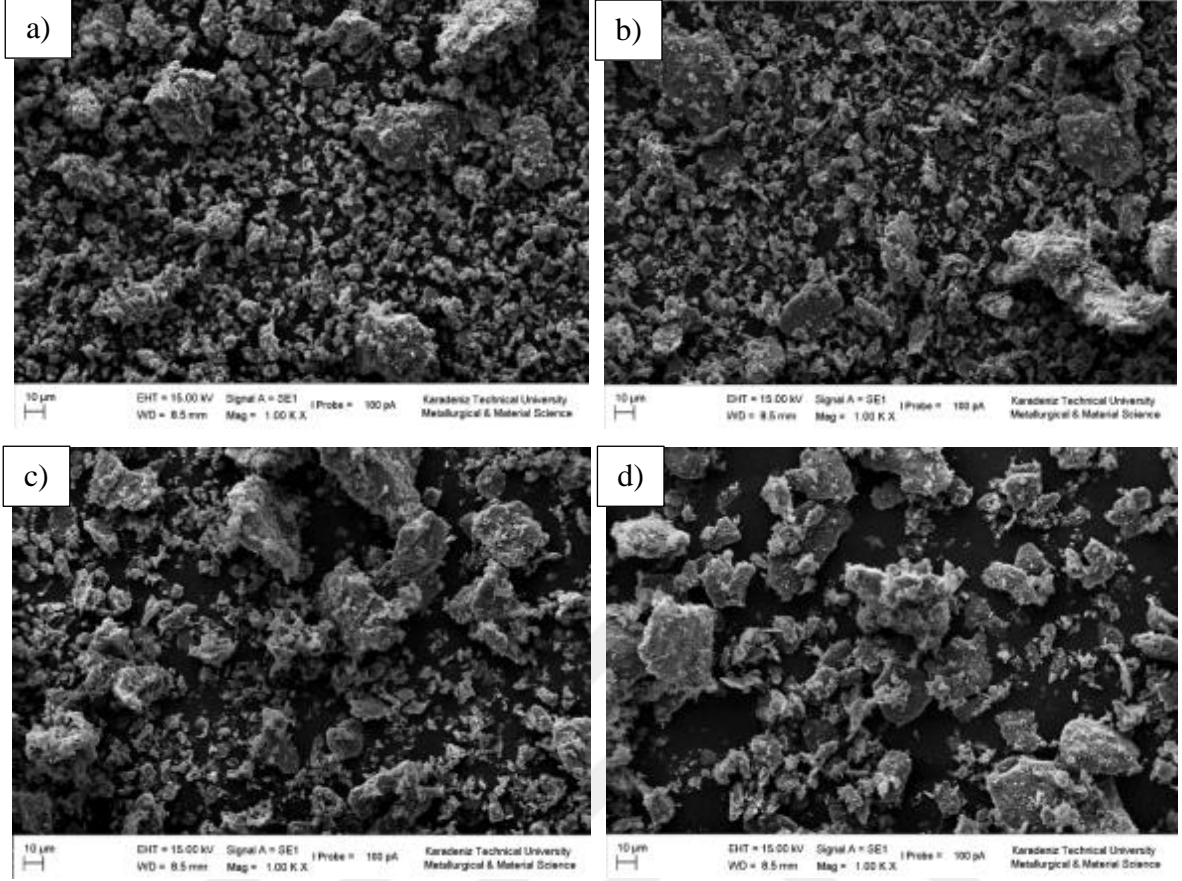
3.1.1.1. Öğütme Zamanı ile Toz Morfolojilerinin Değişimi

KNT takviyeli AA2024 matrisli nanokompozit tozlarına, takviye malzemesinin matris içerisine iyi bir şekilde gömülmesi ve daha homojen dağılım sergilemesi için çeşitli öğütme saatleri uygulanmıştır. Öğütme süreleri olarak 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 saat olmak üzere altı farklı öğütme saati seçilmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 alaşım tozunun küresel morfolojiden ziyade çubuksu ve düzensiz şekilli olmasından dolayı, mekanik alaşımlama aşamasında bilye-toz-bilye etkileşimlerinden dolayı parçacıkların ince oldukları yerlerden kırılması söz konusudur. Bundan dolayı öğütmenin ilk aşamasında kusurlu bölgelerden kırılma bir sonraki adımda pulsu morfoloji görülmektedir. Pulsu yapı oluşumundan sonra ise sünek ve pulsu AA2014 alaşım tozlarının birbirlerine soğuk kaynak oldukları görülmektedir. Son aşamada ise sürekli olarak deformasyon sertleşmesine maruz olan toz parçacıkları sertleşmekte ve kırılmaktadır. Kompozit toz üretimi esnasında öğütme döngüsü bu şekilde tekrarlanmakta ve belirli bir öğütme süresinden sonra değişmemekte diğer bir deyişle kararlı hal şartlarına ulaşmaktadır. 15 dakika ultrasonik dağıtma işlemi uygulanmış farklı oranlardaki KNT takviye tozları ve AA2024 alaşım tozları kullanılarak üretilen toz karışımlarının 0,5 saatlik mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmasından sonra elde edilen kompozit toz morfolojileri aşağıda verilmiştir (Şekil 41-43). AA2024 matris tozlarının deformasyon sonucu pulsu morfolojiye dönüşmeye ve KNT parçacıklarının matris tozları üzerine gömülmeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 41). Büyük boyutlu AA2024 matris tozları arasında gözlemlenen küçük ve pulsu morfolojiye sahip AA2024 matris tozlarının oluşma sebebi öğütme işleminin henüz başlangıcında matris tozlarının boyun bölgelerinden kırılmasıdır.



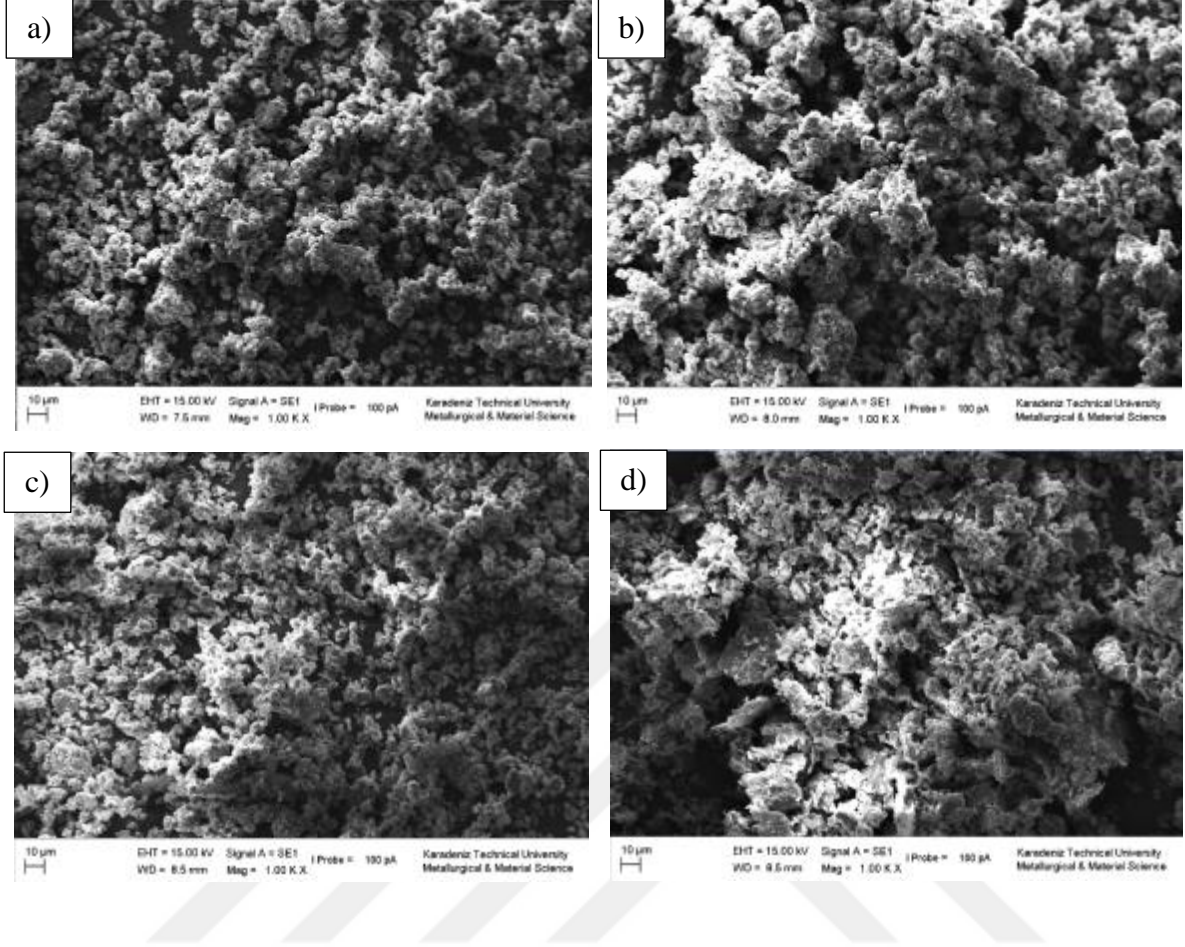
Şekil 41. Ultrasonik dağıtma (15) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0

15 dakika ultrasonik dağıtma işlemi uygulanmış farklı oranlardaki KNT takviye tozları ve AA2024 alaşım tozları kullanılarak üretilen toz karışımlarının 1,5 saatlik mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmasından sonra elde edilen kompozit toz morfolojileri aşağıda verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere toz kütlelerinde tozların önemli bir kısmında kırılma diğerlerinde ise soğuk kaynakla birbirine bağlanmış tozlar bulunmaktadır. Morfolojik incelemelerde dikkat çeken diğer husus ise kırılan tozların büyük boyutlu toz yüzeylerine tutunmasıdır. Bunun sebebi küçük boyutlu yani büyük özgül yüzey alana sahip tozlardaki diğer tozlara tutunma kabiliyetinin artmasıdır.



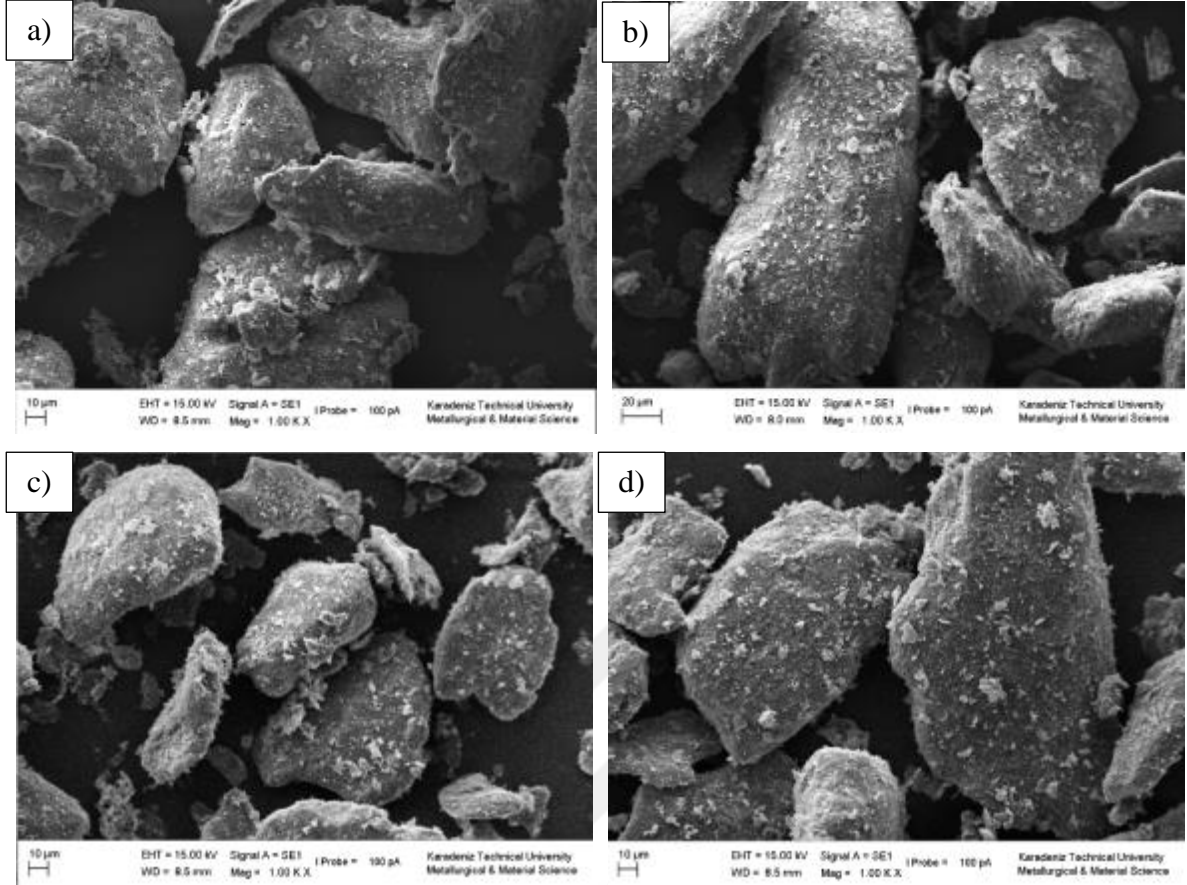
Şekil 42. Ultrasonik dağıtma (15) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0

15 dakika ultrasonik dağıtma işlemi uygulanmış farklı oranlardaki KNT takviye tozları ve AA2024 alaşım tozları kullanılarak üretilen toz karışımlarının 3 saatlik mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmasından sonra elde edilen kompozit toz morfolojileri aşağıda verilmiştir. Morfolojik incelemelerde tozların tamamen kırıldığı ve homojene yakın bir toz boyutuna sahip olduğu görülmektedir. Toz boyutunun oldukça küçülmesi nedeniyle birbirine tutunan toz parçacıkları oluşturduğu topaklanmalar da görülmektedir (Şekil 43).

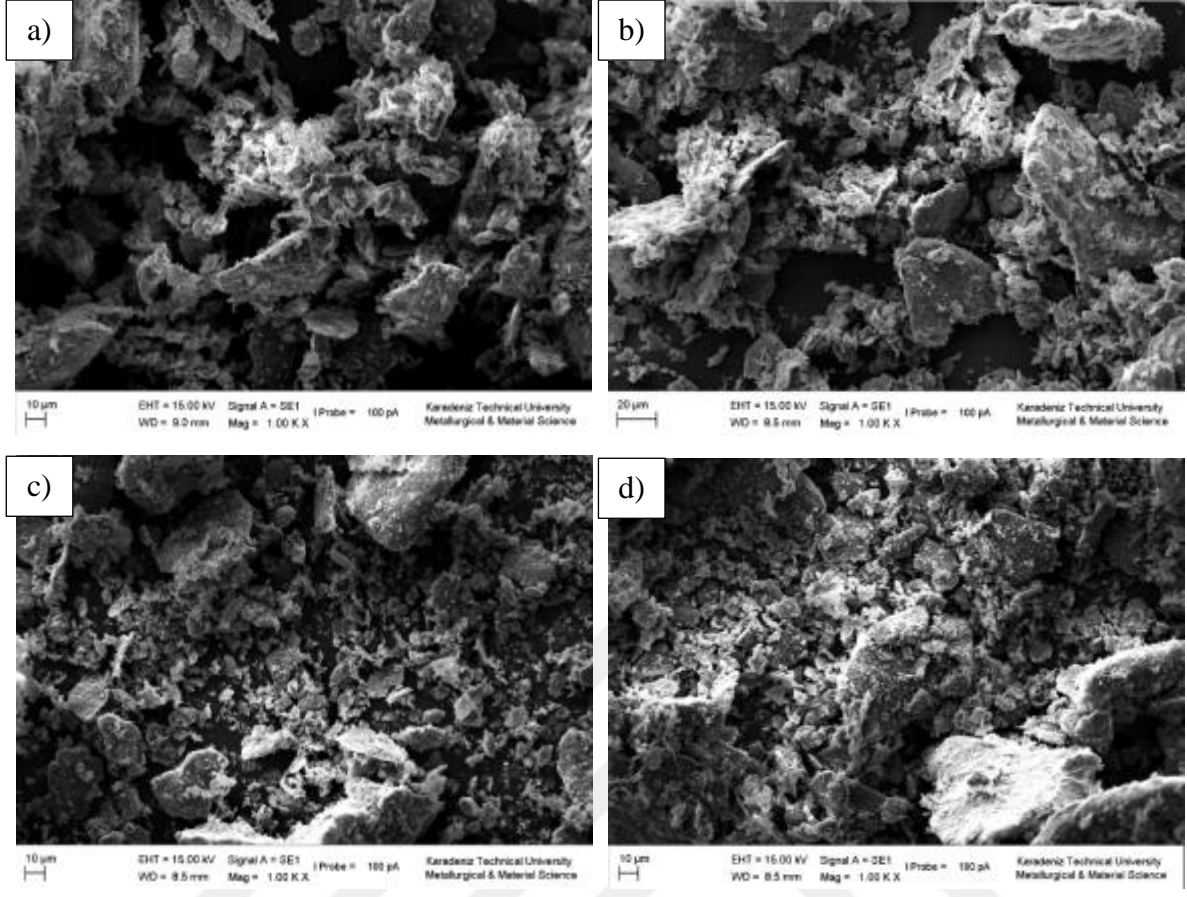


Şekil 43. Ultrasonik dağıtma (15) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0

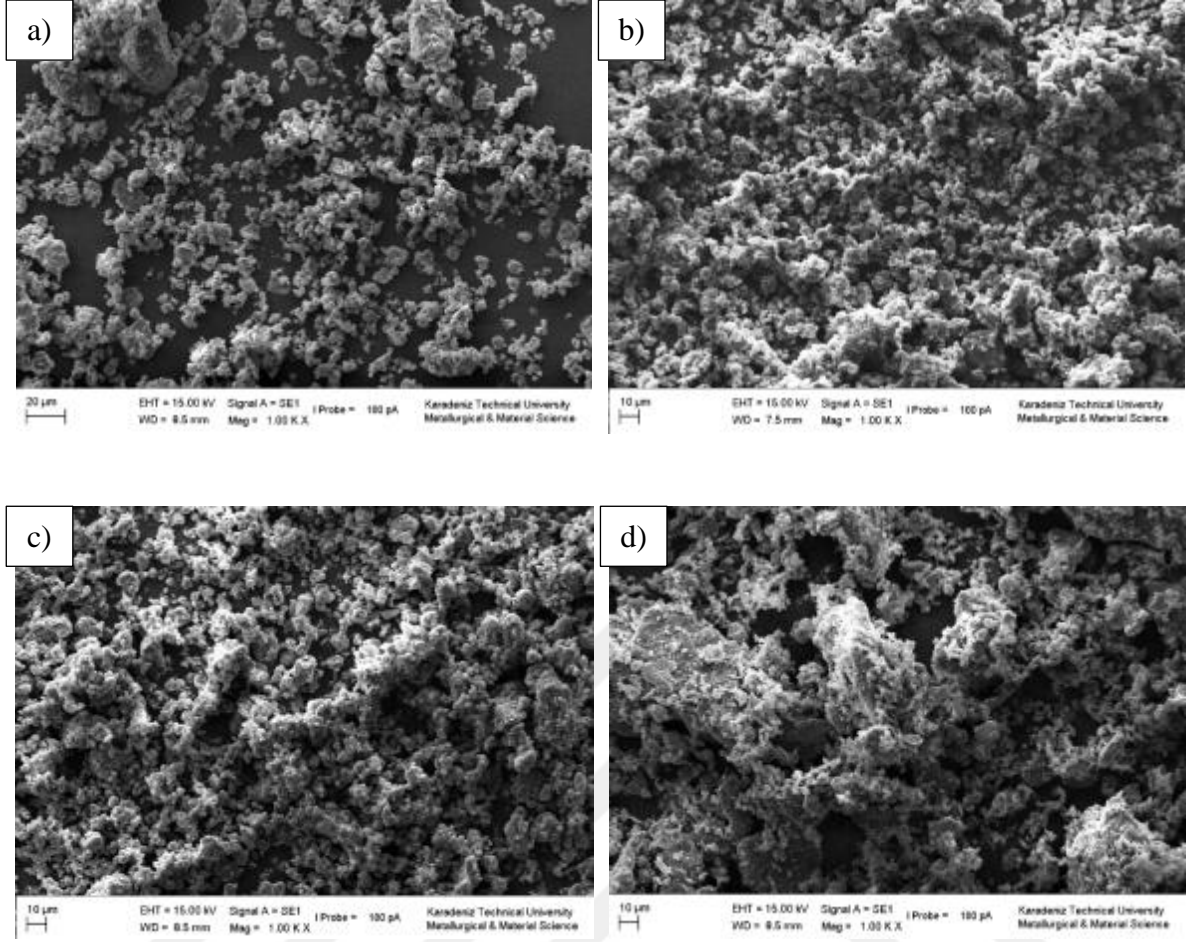
Diğer ultrasonik dağıtma süreleri kullanılarak elde edilen KNT takviye tozları ve AA2024 alaşım tozları ile üretilen toz karışımlarının farklı saatlerde mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmasından sonra elde edilen kompozit toz morfolojileri de aşağıda verilen resimlerden anlaşılacağı üzere benzer morfolojik sonuçlar içermektedir (Şekil 44-52).



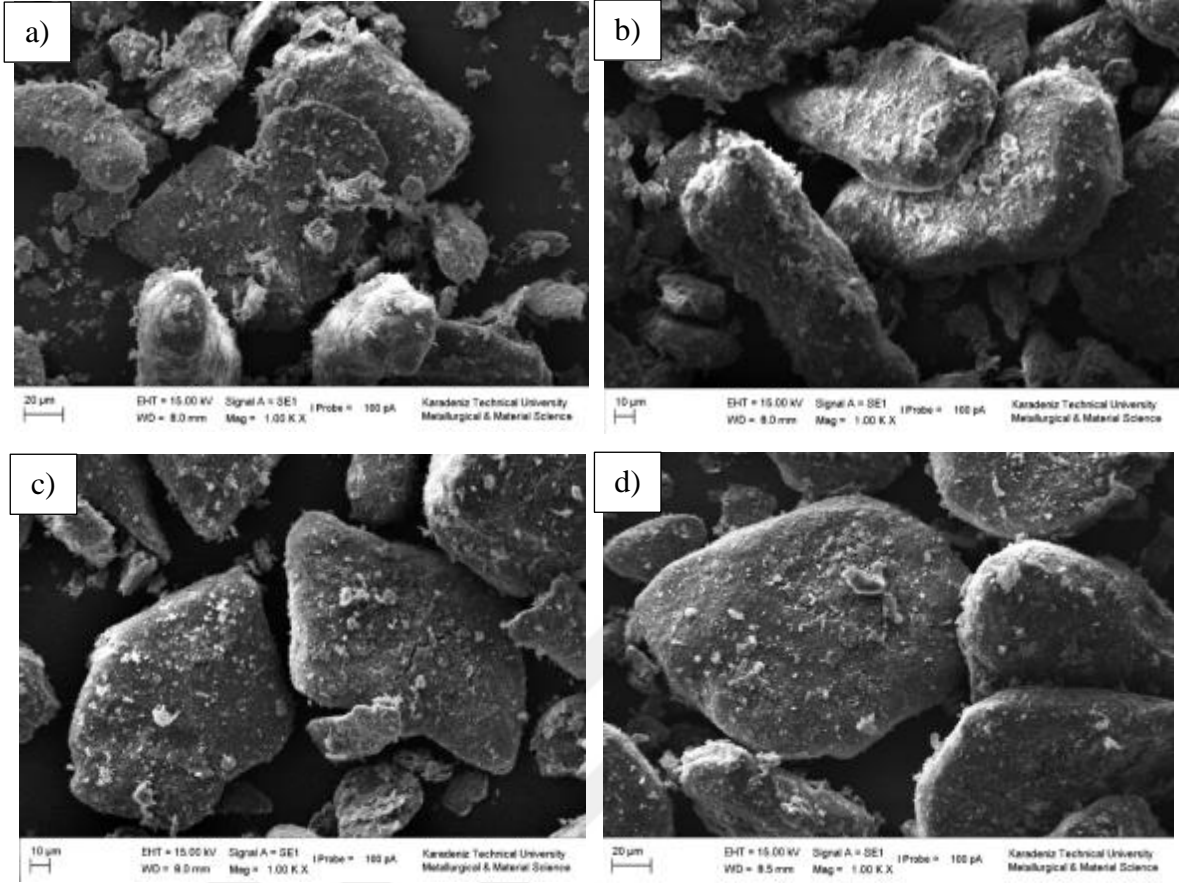
Şekil 44. Ultrasonik dağıtma (30) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0



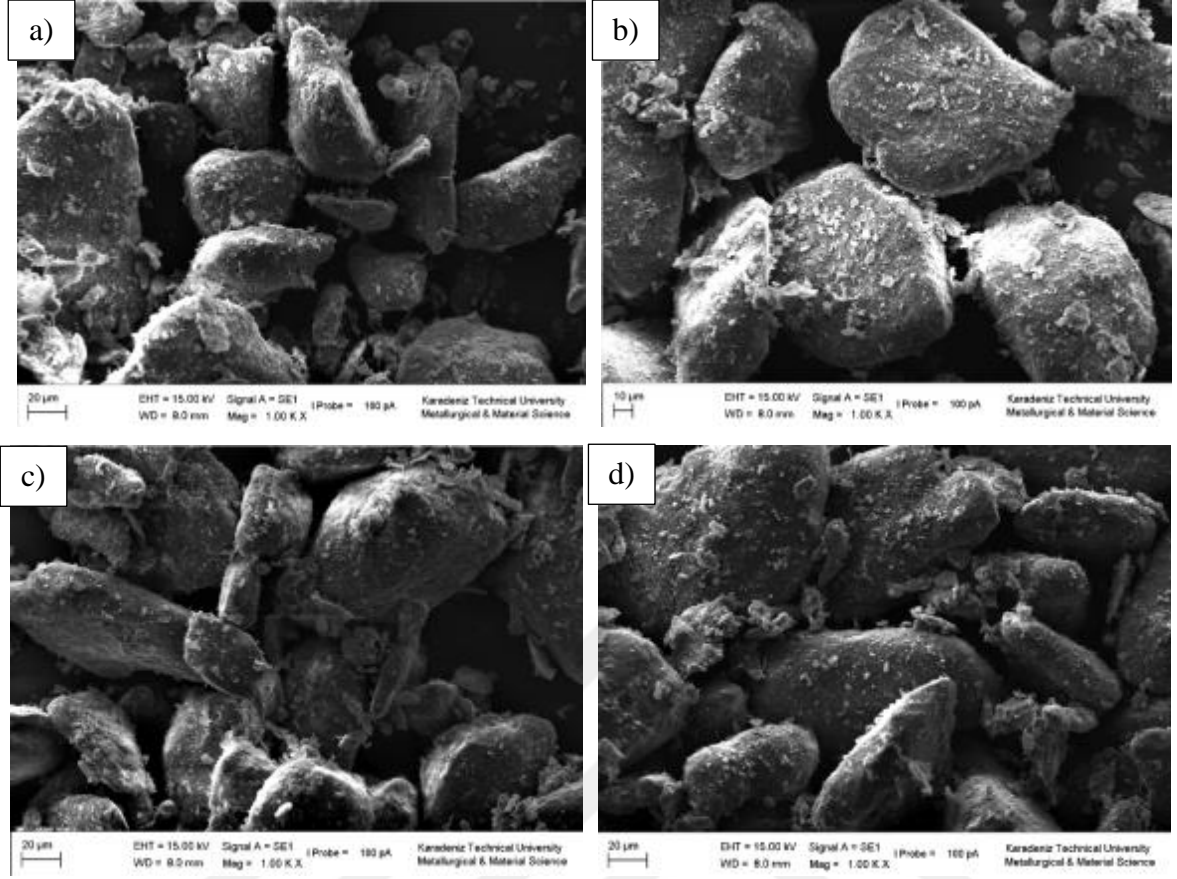
Şekil 45. Ultrasonik dağıtma (30) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0



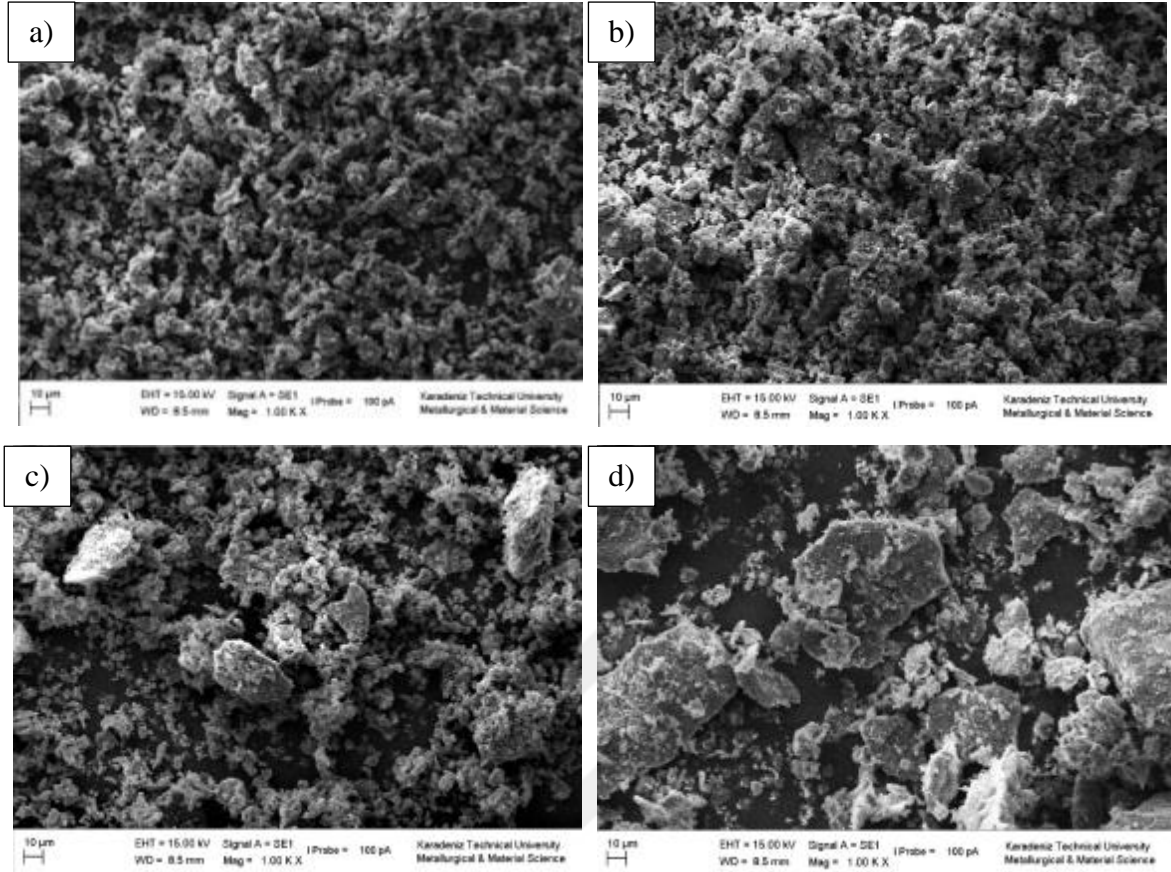
Şekil 46. Ultrasonik dağıtma (30) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0



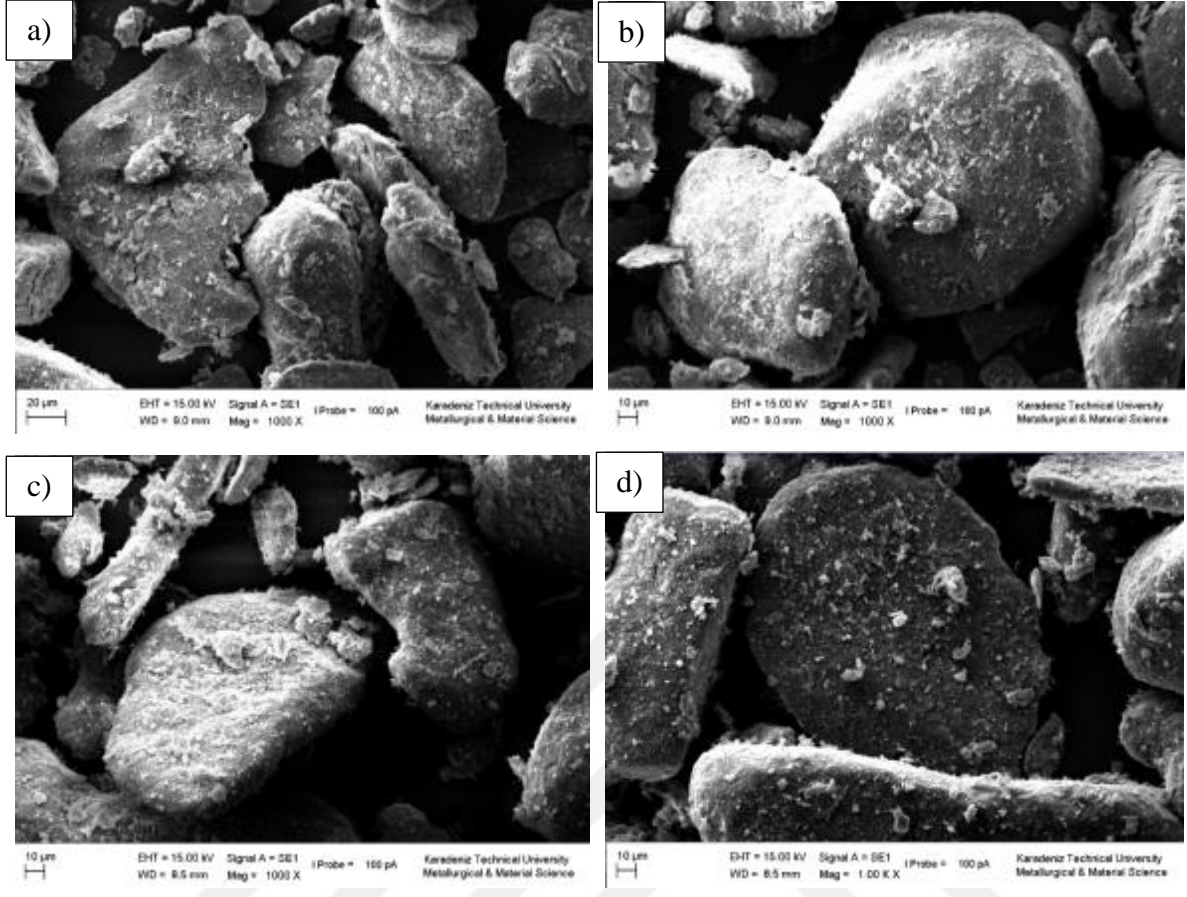
Şekil 47. Ultrasonik dağıtma (45) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0



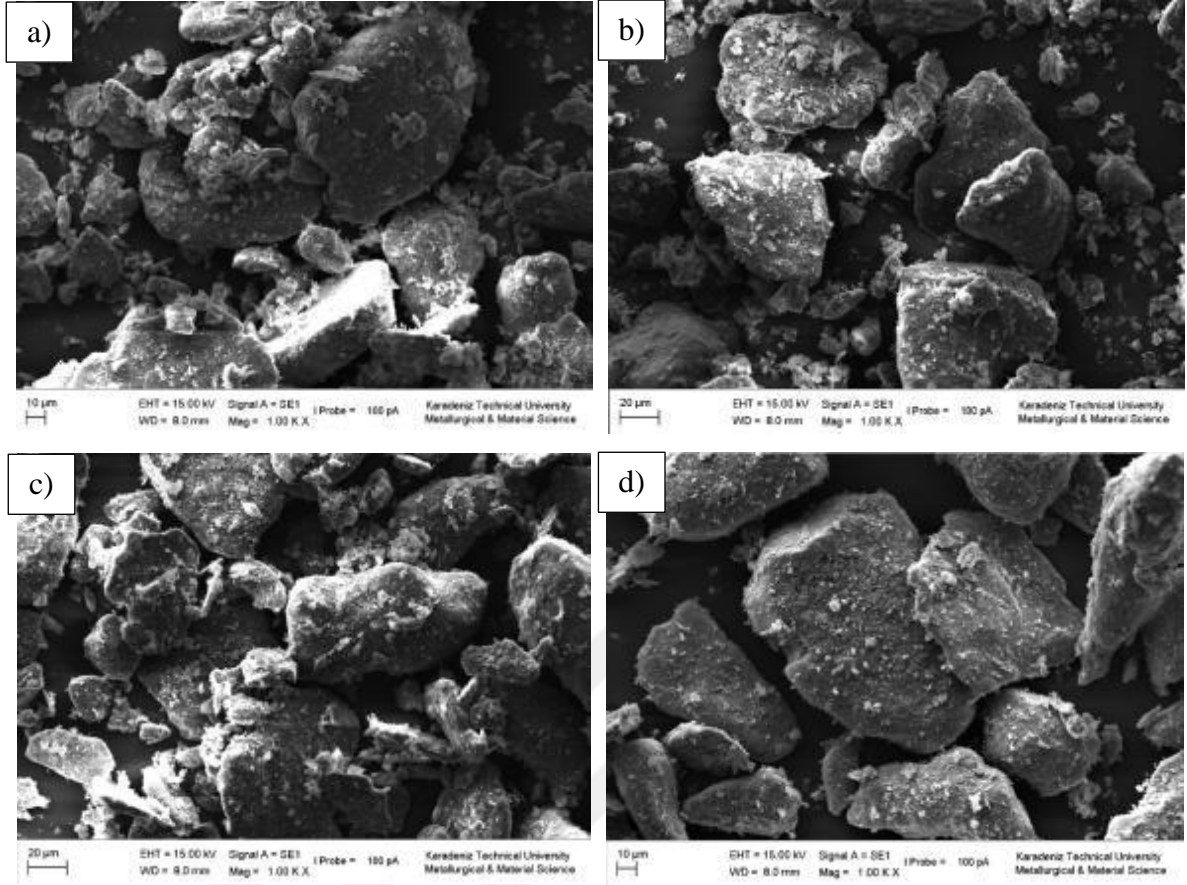
Şekil 48. Ultrasonik dağıtma (45) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.% 1,0



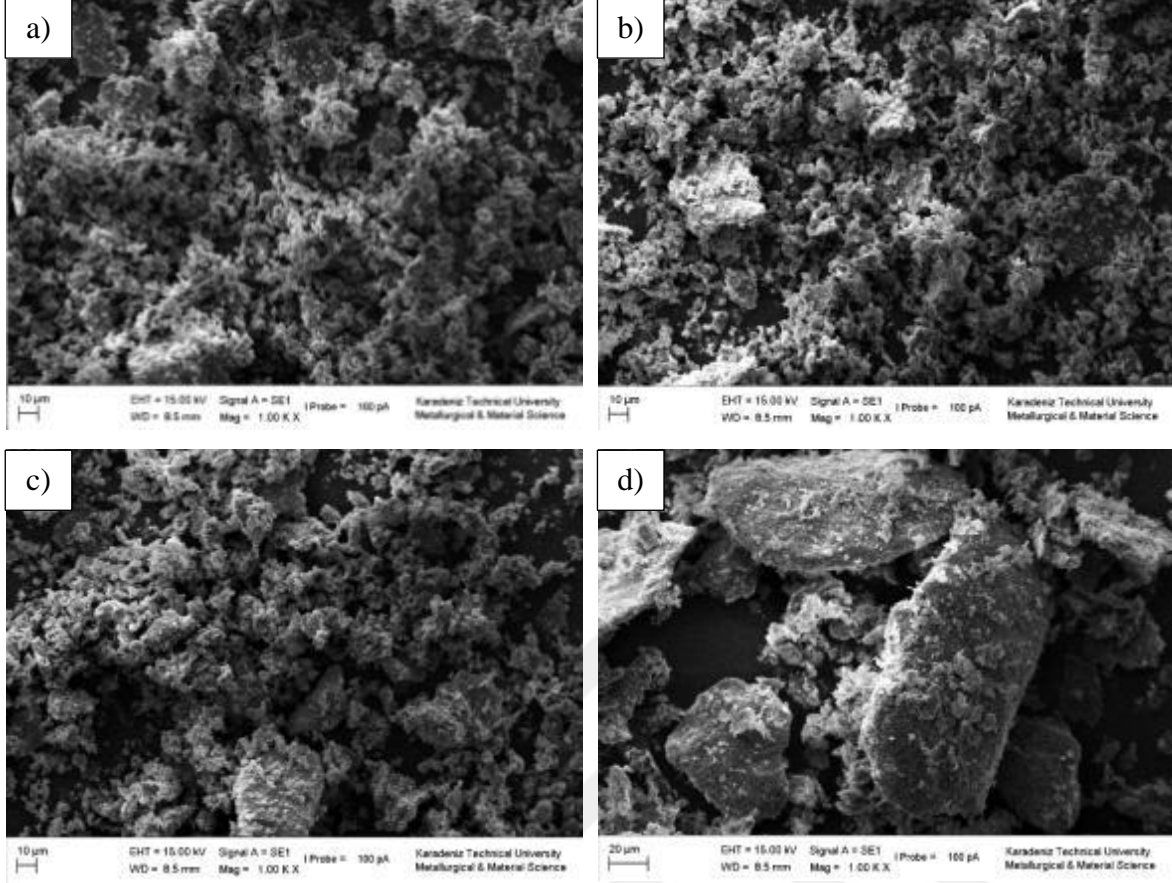
Şekil 49. Ultrasonik dağıtma (45) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0



Şekil 50. Ultrasonik dağıtma (60) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0



Şekil 51. Ultrasonik dağıtma (60) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0

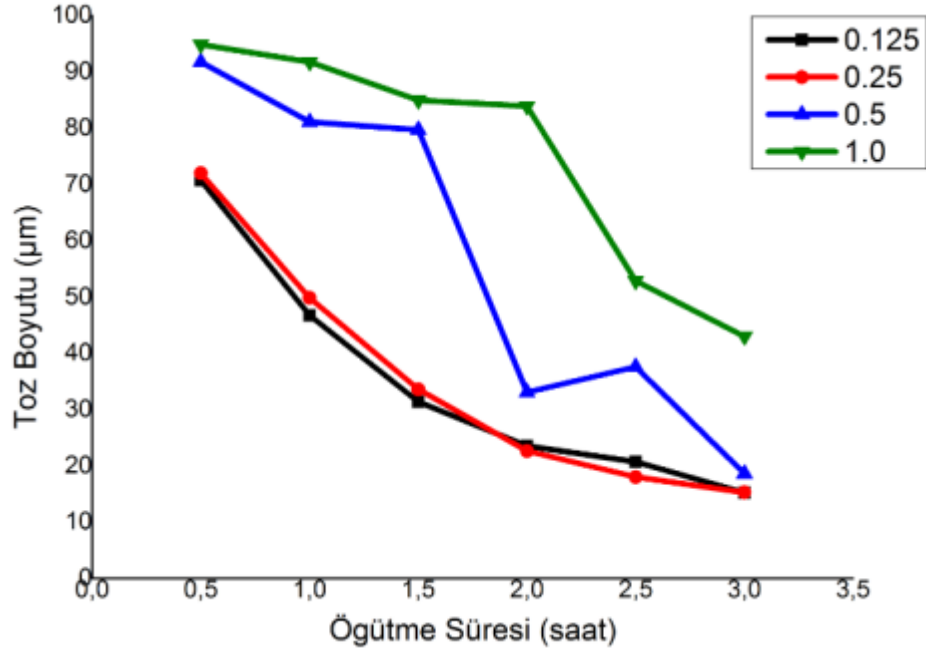


Şekil 52. Ultrasonik dağıtma (60) dağılım metodu uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş kompozit toz morfolojisi a) Ağ.% 0,125 b) Ağ.% 0,25 c) Ağ.% 0,5 d) Ağ.%1.0

3.1.2. Toz Boyutu İncelemeleri

Belirli ultrasonik dağıtma süreleri için öğütme saatlerine bağlı olarak toz boyutunun değişimini göstermektedir (Şekil 53). Grafikler bütün dağıtma süreleri için artan öğütme süresi ile toz boyutunun azaldığını göstermektedir. 1 saate kadar toz boyutu değerlerinde bir miktar azalma görülmekle birlikte toz boyutlarında önemli oranda azalma 1 saatlik öğütme süresi sonrasında uygulanan öğütme sürelerinde toz boyutu değerleri önemli bir düşüş göstermiştir. Öğütmenin ilk adımlarında pulsu yapının oluşumu toz boyutunu artırırken tozların boyun bölgesinden kırılması toz boyutu değerlerini düşürmekte ve pulsu morfolojinin oluşturduğu toz boyutu artışından daha fazla azalış sağlayarak toz boyutu değerlerinin bir miktar düşmesine neden olmaktadır. Genel itibariyle ağ. %0,125 ve ağ. % 0,25 KNT oranları için daha düşük toz boyutu değerlerinin elde edildiği toz boyutu grafiklerinden görülmektedir. Bu durum KNT parçacıklarının seramik B₄C gibi sert parçacıklarda görülen kesme etkisini

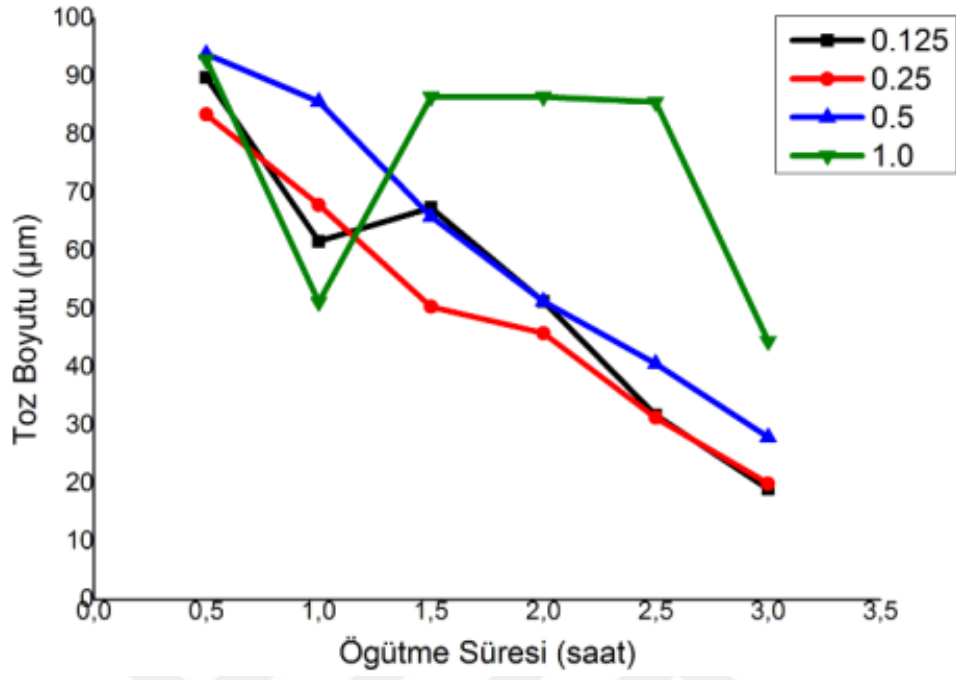
göstermemesine ve artan KNT parçacık oranı ile öğütme etkinliğinin azalması nedeniyledir. Toz boyutu grafiklerinde bazı öğütme süreleri için gözlemlenen toz boyutu artışlarının nedeni ise mekanik öğütme işlemi esnasında görülen düzensiz soğuk kaynak prosesidir. 3 saatlik öğütme işlemi sonucunda kompozit toz boyutu değerlerinin 100 mikron değerinden yaklaşık 20 mikron değerlerine düşmesi mekanik öğütme yönteminin kompozit toz üretimindeki etkinliğini göstermesi bakımından oldukça önemlidir.



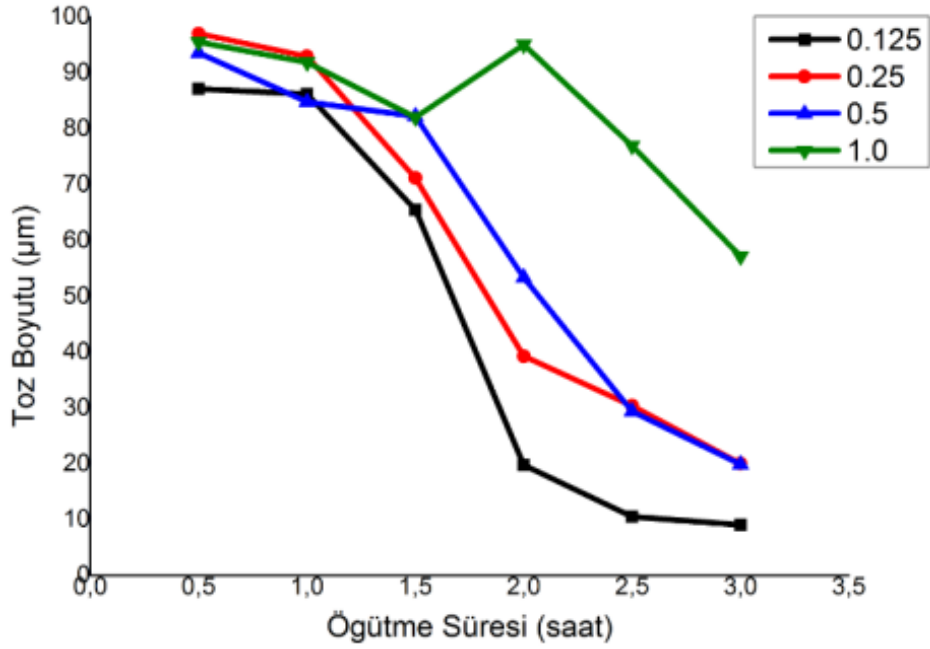
(a)

Şekil 53. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen kompozit malzeme tozlarında farklı öğütme sürelerini göre parçacık boyutu değişimi; a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30); c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 53'ün devamı,

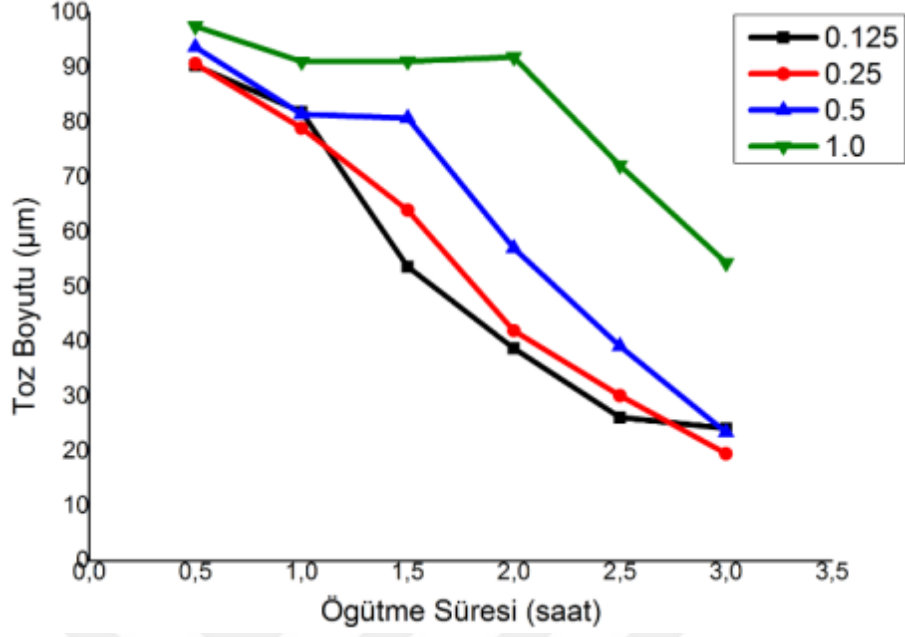


(b)



(c)

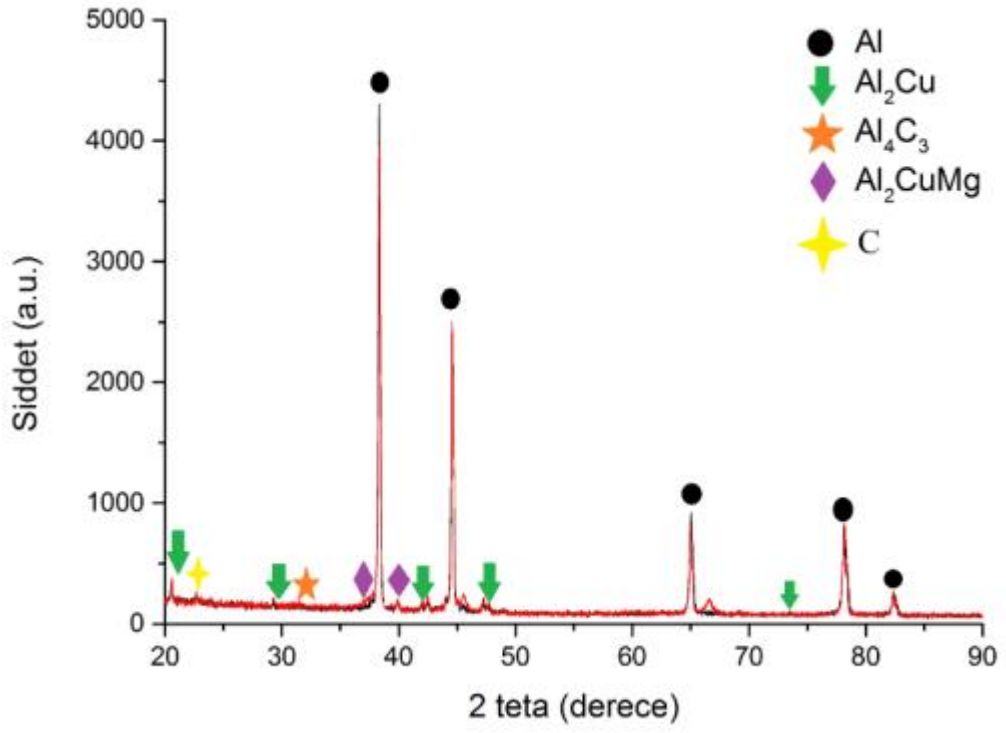
Şekil 53'ün devamı,



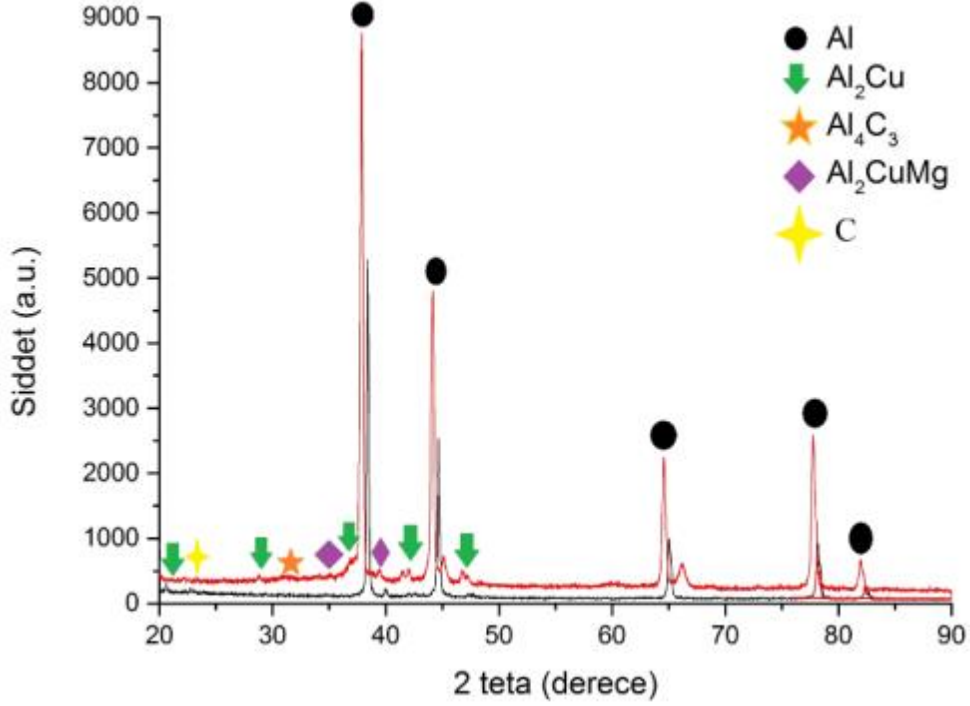
(d)

3.1.3. Tozların XRD İncelemeleri

Farklı öğütme saatleri (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0) uygulanan tozlarda üretilen kompozitlerden seçilerek yapılan XRD paternleri, karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 54). Ultrasonik dağıtma işleminden 15 dakika ve 30 dakika olarak uygulanmış KNT tozlarından, ağırlıkça %1.0 kullanılmış kompozit numunelerden sıcak pres yapılmış ve ek işlem olarak sinterleme işleminden geçirilmiş malzemelerin XRD analizleri gösterilmektedir (Şekil 54-55).



Şekil 54. Ağırlıkça %1.0 KNT (Ultrasonik dağıtma (15)) içeren nanokompozit malzemenin (2.5 saat mekanik öğütme) sıcak preslenmiş ve sinterlenmiş numunelere ait XRD analizleri



Şekil 55. Ağırlıkça %1.0 KNT içeren (Ultrasonik dağıtma (30)) nanokompozit malzemenin (2.5 saat mekanik öğütülmüş) sıcak preslenmiş ve sinterlenmiş numunelere ait XRD analizleri

Grafikler incelendiğinde, birkaç küçük fark görmek mümkündür. 500'den yüksek sıcaklıklarda konsolidasyon, nanoyapılı Al₂0₂₄'teki önemli Al tanecik büyümesinin bütün kompozitin mekanik özelliklerini ciddi şekilde bozan sonuçlarına yol açar. 500'de sıcak presleme, havada Al₂Cu fazının çökeltebildiği homojen bir Al-Cu-Mg katı çözeltisinin oluşumu ile sonuçlanır. CuMgAl₂ fazının eksikliği ve Al₂Cu fazının oluşumu, daha büyük Mg atomlarının Cu atomlarına kıyasla daha düşük yayılmasından kaynaklanabilir (M. Jafari vd., 2009).

Analiz grafiğinde gördüğümüz küçük pik farklılıkları matris ile takviye fazı arasında bir reaksiyon gerçekleştiğini göstermektedir. Analiz incelendiğinde reaksiyon sonucu oluşan bileşiklerin Al₂Cu (yeşil ok), Al₄C₃ (turuncu yıldız), Al₂CuMg (mor eşkenar dörtgen) olduğu saptanmıştır.

Bakır ve alüminyum sünek malzeme olduğu için bakır taneleri alüminyum içinde gömülü değil de daha çok alüminyum tanelerinin temas noktalarında konumlanmıştır. Al/Cu arasında bir ara yüzey tabakası oluşmuştur. Burada Al-Cu yer alan katı çözeltisi şeklinde oluşmaktadır. Al atomlarına Cu atomları katı hal difüzyonu ile hareket ederek Al atomları

yerlerine yerleşmektedirler. Her zaman bu düzen sağlanmaz. Bunun yerine kimyasal formüllerle sembolize edilen ara bileşikler oluşur. Burada ara bileşik olarak Al_2Cu fazının oluşması yüksektir. Eriyikten ayrışan ve en azından ötektik yapı bileşeni niteliğinde olan Al_2Cu ara fazı, malzemenin gevrekleşmesine yol açmaktadır. Ek olarak, sıcak preslenmiş numunelerin XRD grafiklerinde alüminyum karbür (Al_4C_3) XRD pikinin olmaması, Al ve MWCNT'ler arasındaki reaksiyonun, sıcak presleme sırasında meydana gelmediğine işaret eder. Sıcak presleme işleminden sonra sinterlenmiş numunelerin XRD grafiklerinde Al_4C_3 bileşiğinin pikinin az miktarda yükselmesi, Al ve MWCNT arasındaki reaksiyonu doğrular.

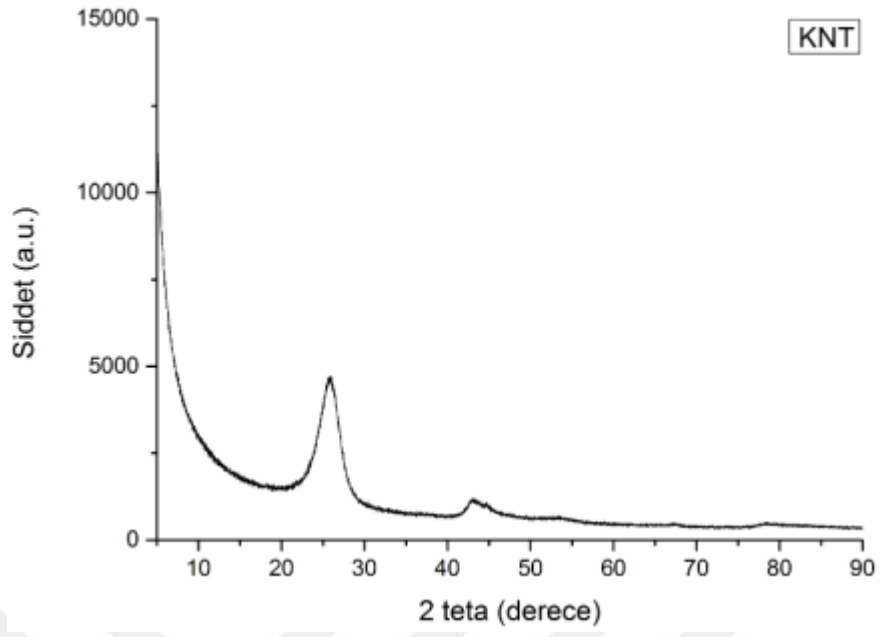
Al_4C_3 'ün varlığı, sinterlenmiş veya sıcak ekstrüde edilmiş malzemelerle ilgili sayısız çalışmada bildirilmiştir ve Al-KNT ara yüzünde optimize edilmiş Al_4C_3 miktarının, arayüzey yapışmasının iyileştirilmesine daha iyi yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır (B. Chen vd., 2014; W. Zhou vd., 2017). Yerinde oluşmuş Al_4C_3 aynı zamanda, bağ rejimini mekanik bağlanmadan kimyasal bağlamaya dönüştürerek CNT'lerin yerine kilitlenmesinde kritik bir rol oynar, bu da yük aktarımını kolaylaştırır. Bununla birlikte, malzemenin tokluğunu artırıcı etki gösterebilir (B. Chen vd., 2017).

Şekil 54 ve 55'de verilen XRD sonucunda Al fazı net bir şekilde görülmektedir. Ancak, alaşıma ilave edilen KNT'ler görülememiştir. Bunun nedeni üç şekilde açıklanabilir.

Şekil 54 ve 55'de gösterilen XRD analiz sonucunda Al fazı net olarak belli olmaktadır. Bunun yanısıra, alaşıma takviye elemanı olarak ilave edilen KNT'ler görülememektedir. Bu durumun sebebi üç nedenle açıklanabilir:

- 1) Takviye malzemesi olarak ilave edilen KNT'lerin amorf yapıya sahip olmasıdır.
- 2) Düşük miktarda ilave edilen KNT oranının XRD cihazının saptama değerinin altında olması söylenebilir.
- 3) Al piklerinin bazı yerlerde çok yüksek olması ve bu sebeple KNT pikleri ile Al piklerinin çakışma ihtimali olabilir (Al Aqelli vd., 2013).

KNT piklerinin daha net olarak belirlenebilmesi için takviye fazı olarak kullanılan karbon nanotüp tozlarının XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 56'da, takviye elemanı olarak kullanılan KNT'lerin XRD sonucu verilmektedir.

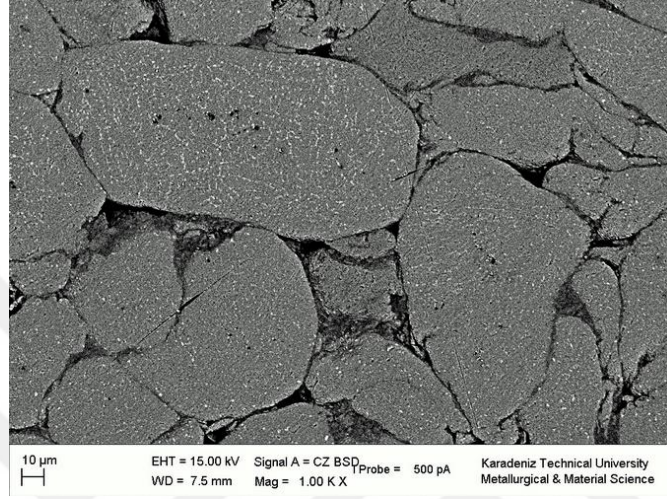


Şekil 56. KNT tozlarına ait XRD analizi

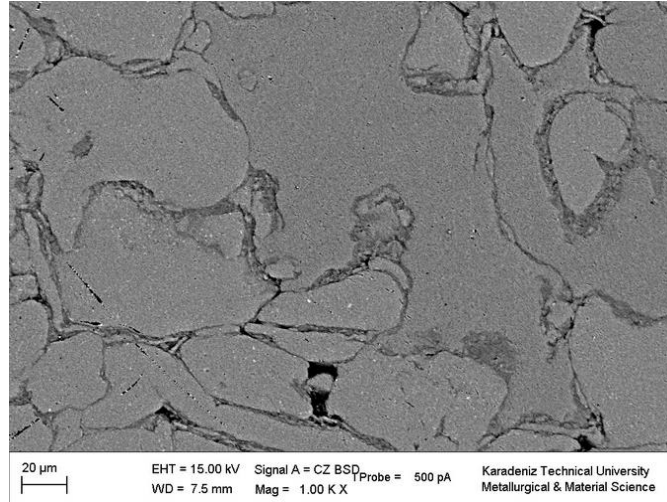
Takviye malzemesi olarak kullanılan KNT'lerin XRD analiz sonucuna bakıldığında karbon nanotüpün amorf yapıda olduğu net bir şekilde görülmektedir (Şekil 56).

3.1.4. Mikro Yapı İncelemeleri

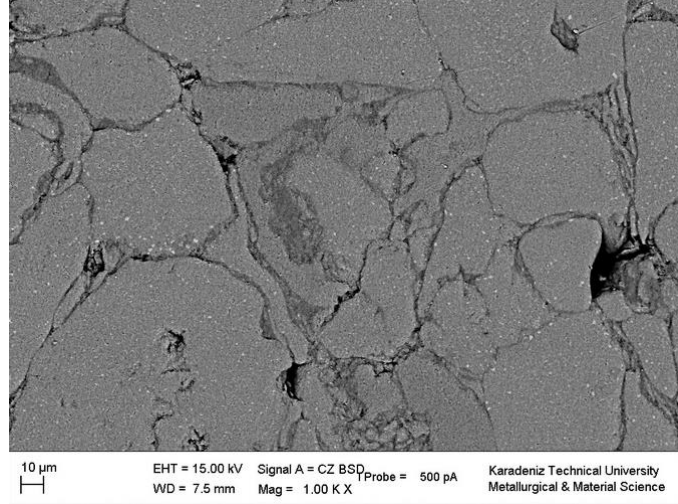
3.1.4.1. Sıcak Presleme ile Yoğunlaştırılarak Üretilmiş Kompozitlerin İç Yapı İncelemeleri



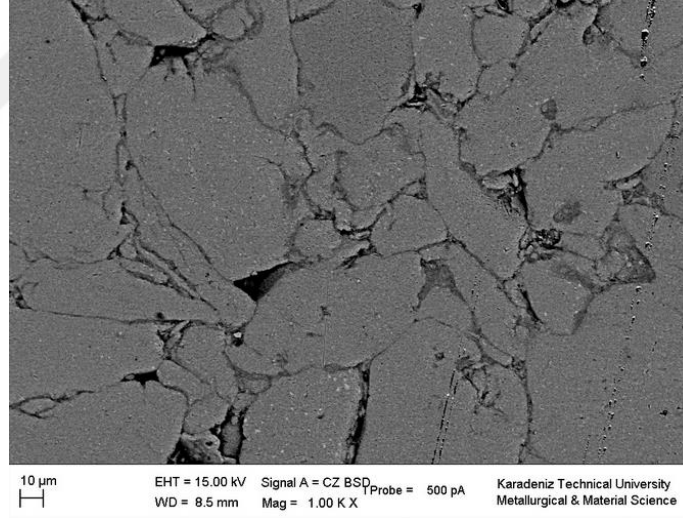
Şekil 57. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağırlık % 1.0 KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü



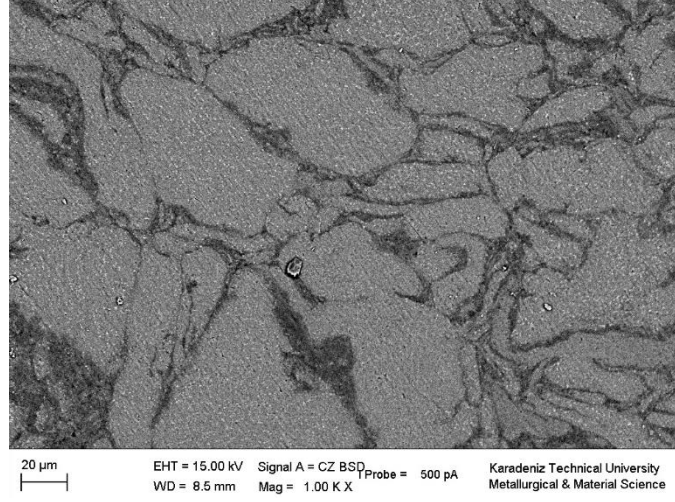
Şekil 58. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağırlık % 1.0 KNT içeren ve 1.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü



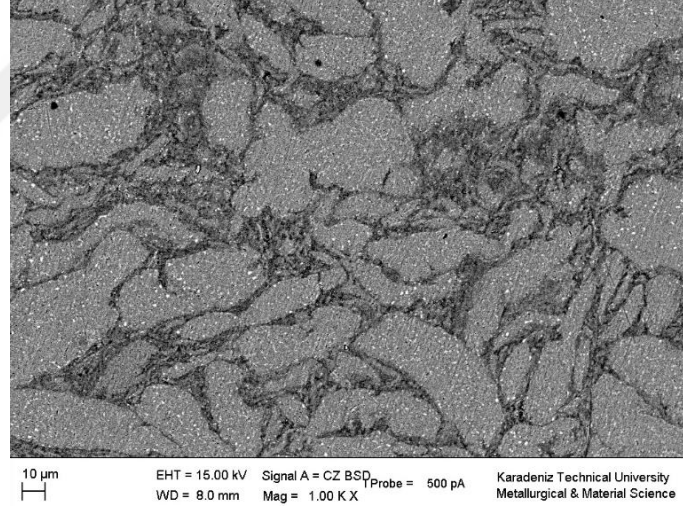
Şekil 59. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ.% 1.0 KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü



Şekil 60. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 2.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü



Şekil 61. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. % 1.0 KNT içeren ve 2.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü

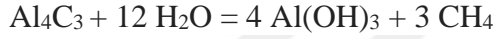


Şekil 62. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış ağ. %1.0 KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitin SEM görüntüsü

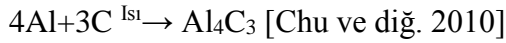
Şekil 57-62, 45 dakika ultrasonik karıştırma işlemine tabi tutulmuş KNT'den ağ. % 1.0 içeren kompozitler için sıcak presleme ile yoğunlaştırma sonrası içyapı resimlerini göstermektedir. Verilen resimler karşılaştırıldığında, tane sınırlarında KNT'lerin biriktiğini görmek mümkündür. Bu durumun, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde KNT miktarının artması ile olumsuz yönde bir değişikliğine sebep olabileceğini söylenebilir.

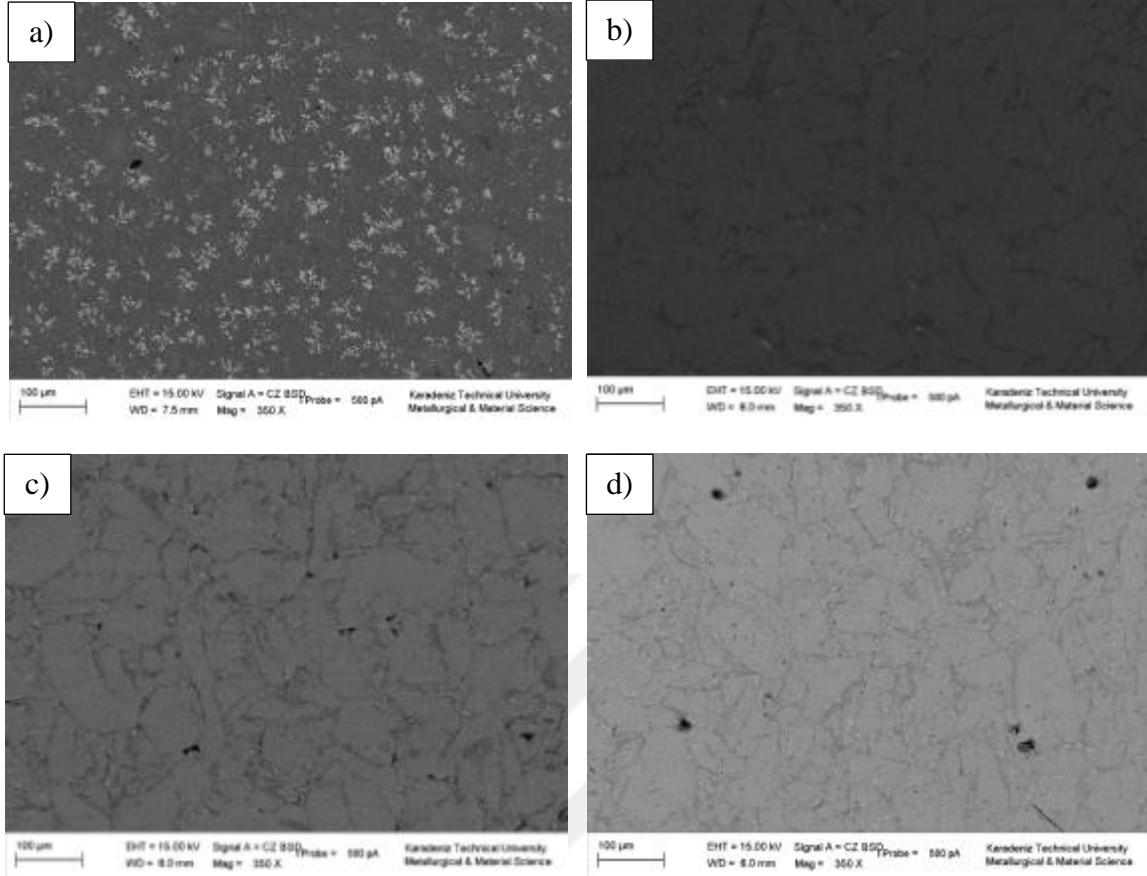
3.1.4.2. Sıcak Preslenmiş Numunelerin Sinterleme İşleminin İçyapı İncelemeleri

AA2024-KNT nanokompozit tozlarının sıcak presleme ile yoğunlaştırılması ile oluşan içyapılar aşağıda verilmiştir (Şekil 63-74). 0,5 saatlik sabit öğütme süresi için artan takviye oranı (KNT oranı) ile içyapı değişimi Şekil 63'de verilmiştir. İçyapı incelemelerinden ortaya çıkan en belirgin özellik matris ve takviye harici yeni bir faz olan Al_4C_3 fazının gözlemlenmesidir. SEM görüntülerine bakıldığında, beyaz renkli kısımlar, Al_4C_3 fazını göstermektedir. Al_4C_3 fazının en belirgin özelliği sert bununla birlikte gevrek yapıda olmasıdır (Hsu-Shen Chu vd., 2000). Gevrek bir faz olmasına rağmen, hidroskobik bir fazdır (Lloyd vd., 1989; Gonzalez vd., 1995; Fan vd., 2005). Bu özelliğinden dolayı nemli ortamda su ile reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkan CH_4 (metan gazı) ve $Al(OH)_3$ bileşikler, kompozit malzemenin özelliklerinde olumsuz sonuçlara neden olmaktadır (Iseki vd., 1984; URL-1, 2015).

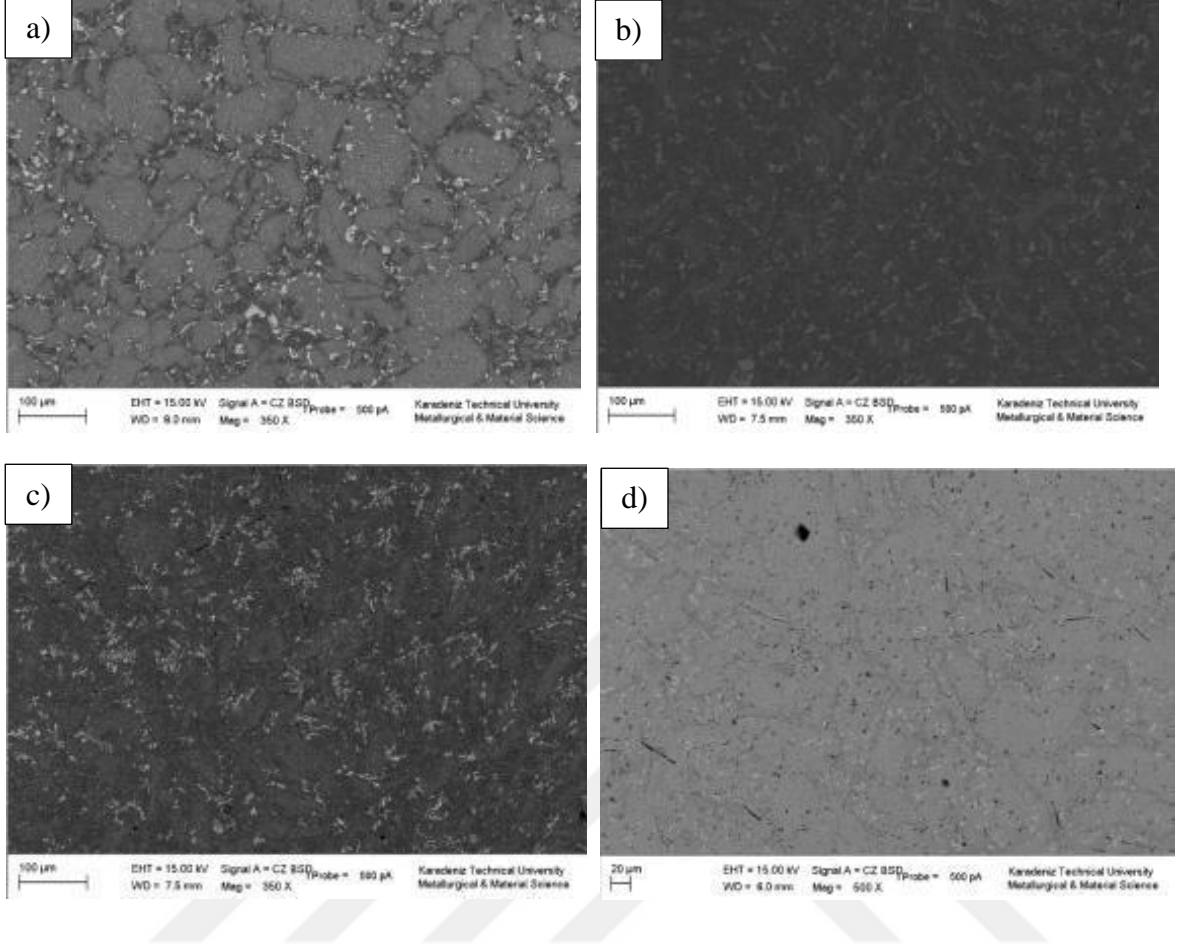


Al_4C_3 fazının beyaz renkte görülmesinin sebebi, $Al(OH)_3$ bileşiğinin oluşmasından kaynaklanmaktadır (URL-2, 2013). Ayrıca KNT parçacıkları genellikle tane sınırında dağılmıştır. Al_4C_3 metaller arası bileşiğinin oluşma reaksiyonu aşağıda verilmiştir.



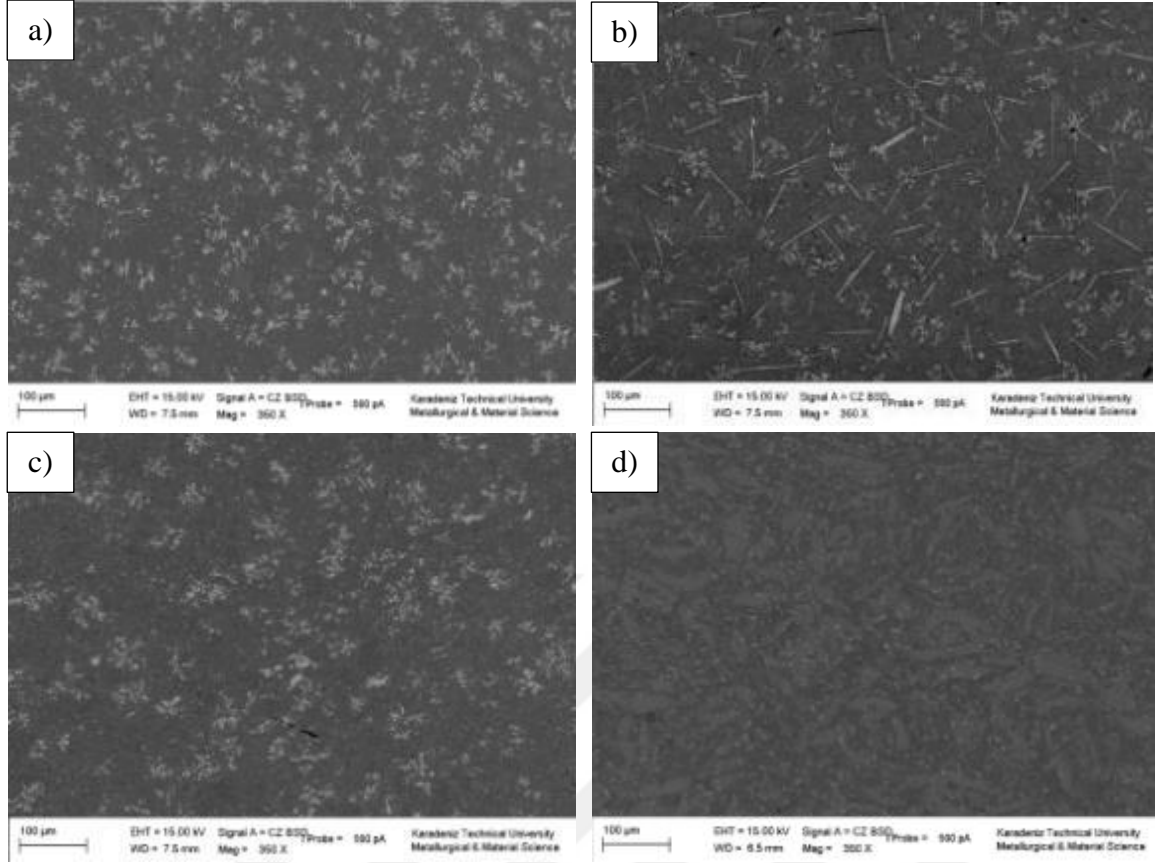


Şekil 63. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0

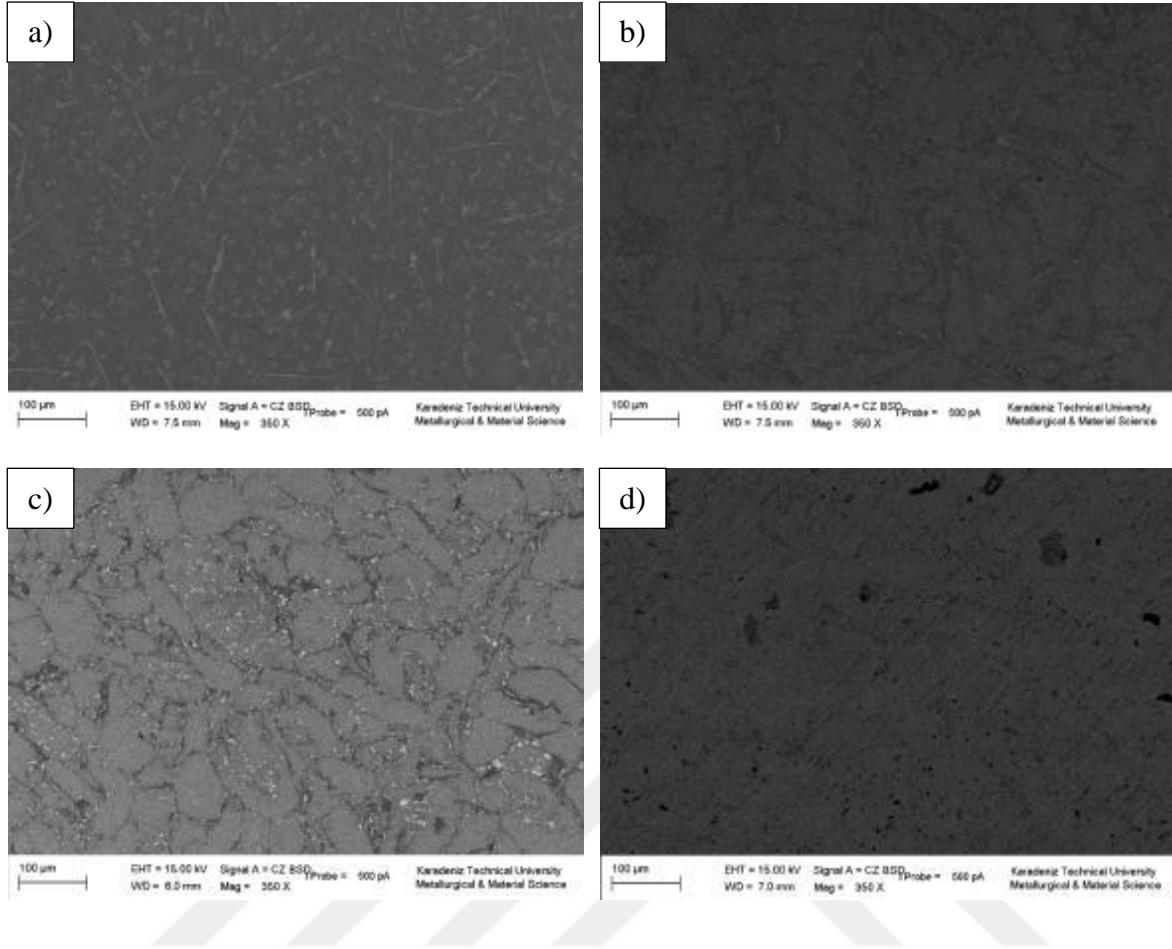


Şekil 64. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0

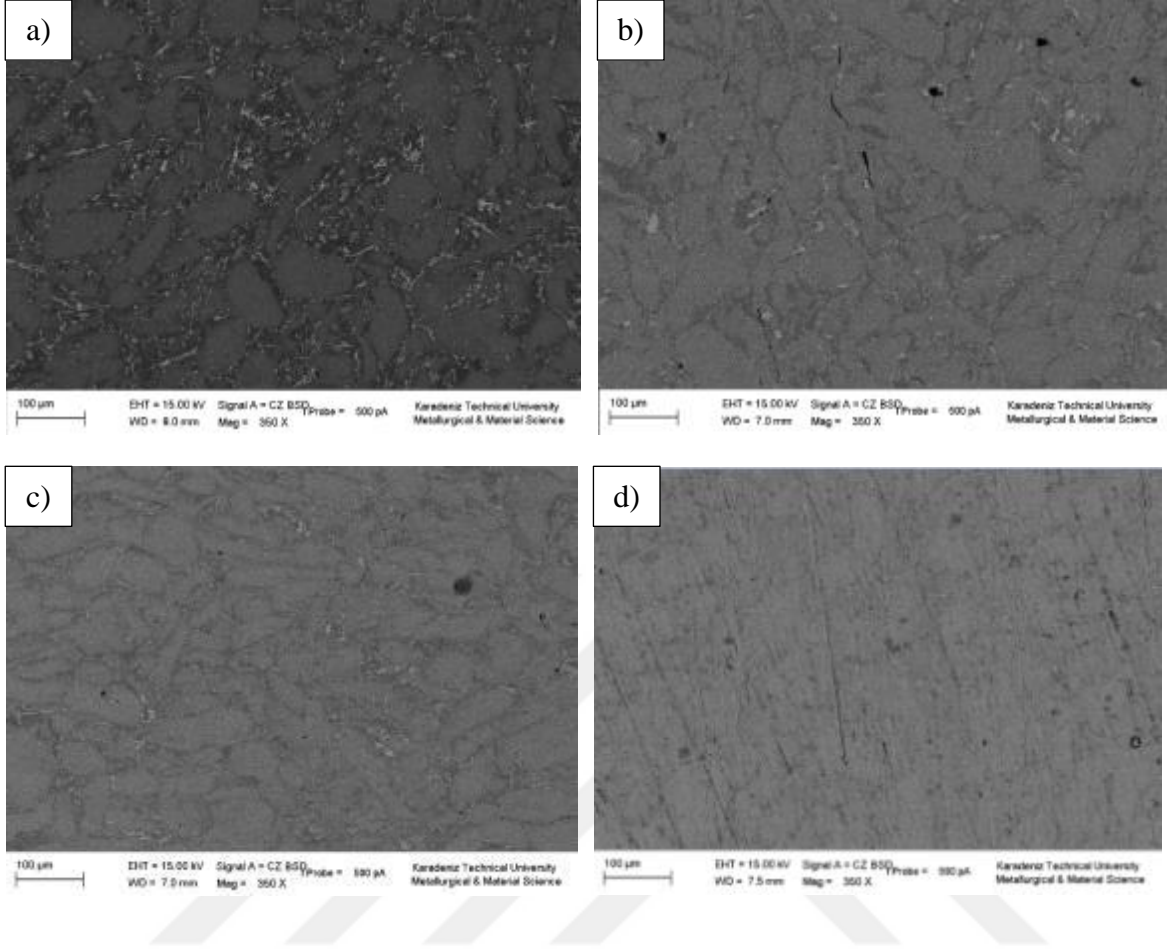
İçyapıda gözlemlenen diğer ilginç sonuç ise bazı KNT parçacıklarının ince çubuklar şeklinde matris yapısı içinde dağılmasıdır. İçyapıda oluşumu gözlemlenen Al_4C_3 fazı ve KNT çubukları, AA2024-KNT nanokompozitlerinin gevrek bir şekilde kırılmasına neden olabilecek yapılar olmasına rağmen, su ile meydana gelen reaksiyon sonucu ortaya çıkan $Al(OH)_3$ bileşiği nedeniyle normalde sarı renkte görünmesine rağmen beyaz olarak görüntülenmesine neden olmuştur (URL-2, 2013). Bununla birlikte, Al_4C_3 fazının, sert bir faz olmasına rağmen, CH_4 gazının meydana getirdiği gaz boşlukları nedeniyle, malzemenin sünek olarak davranış gösterdiğini, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini gösteren sonuçlarda görmek mümkündür (Iseki vd., 1984; URL-1, 2015).



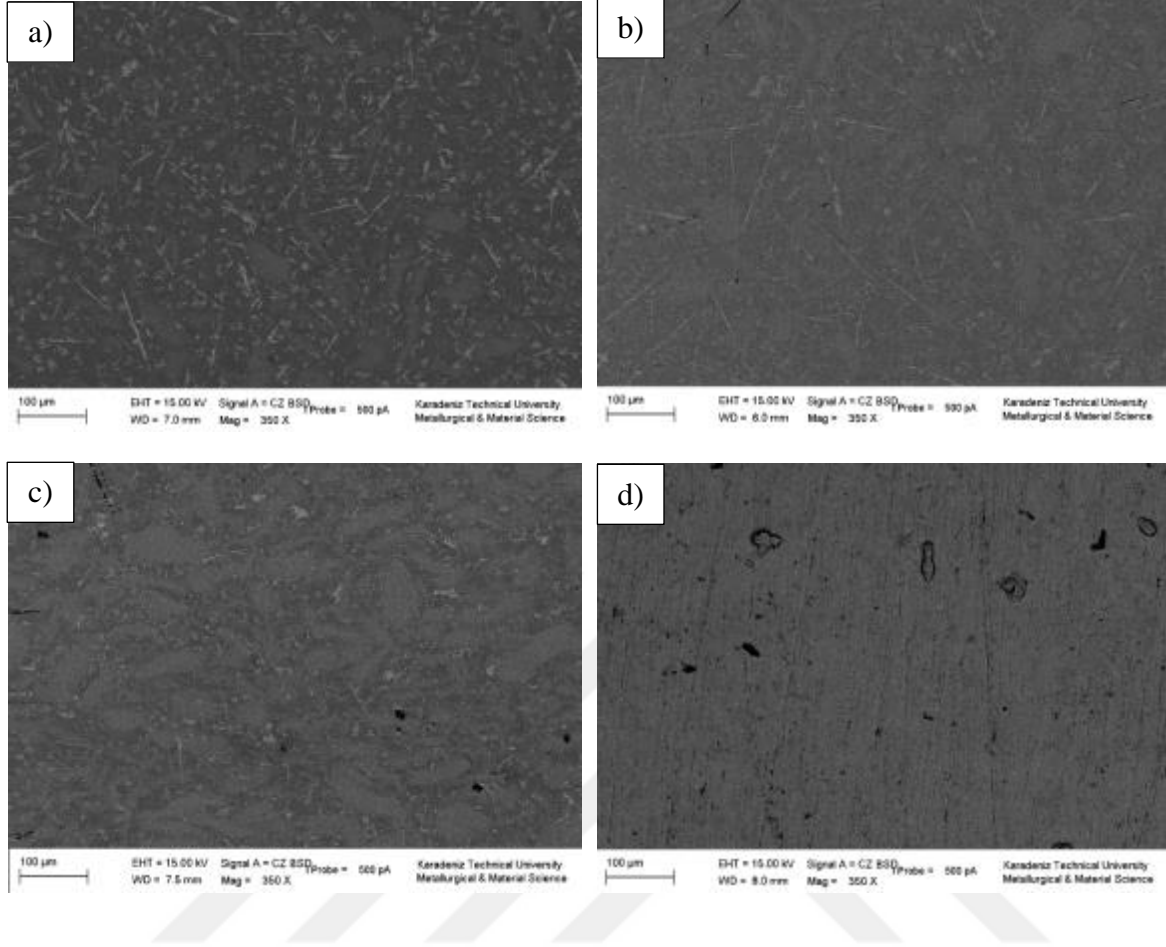
Şekil 65. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



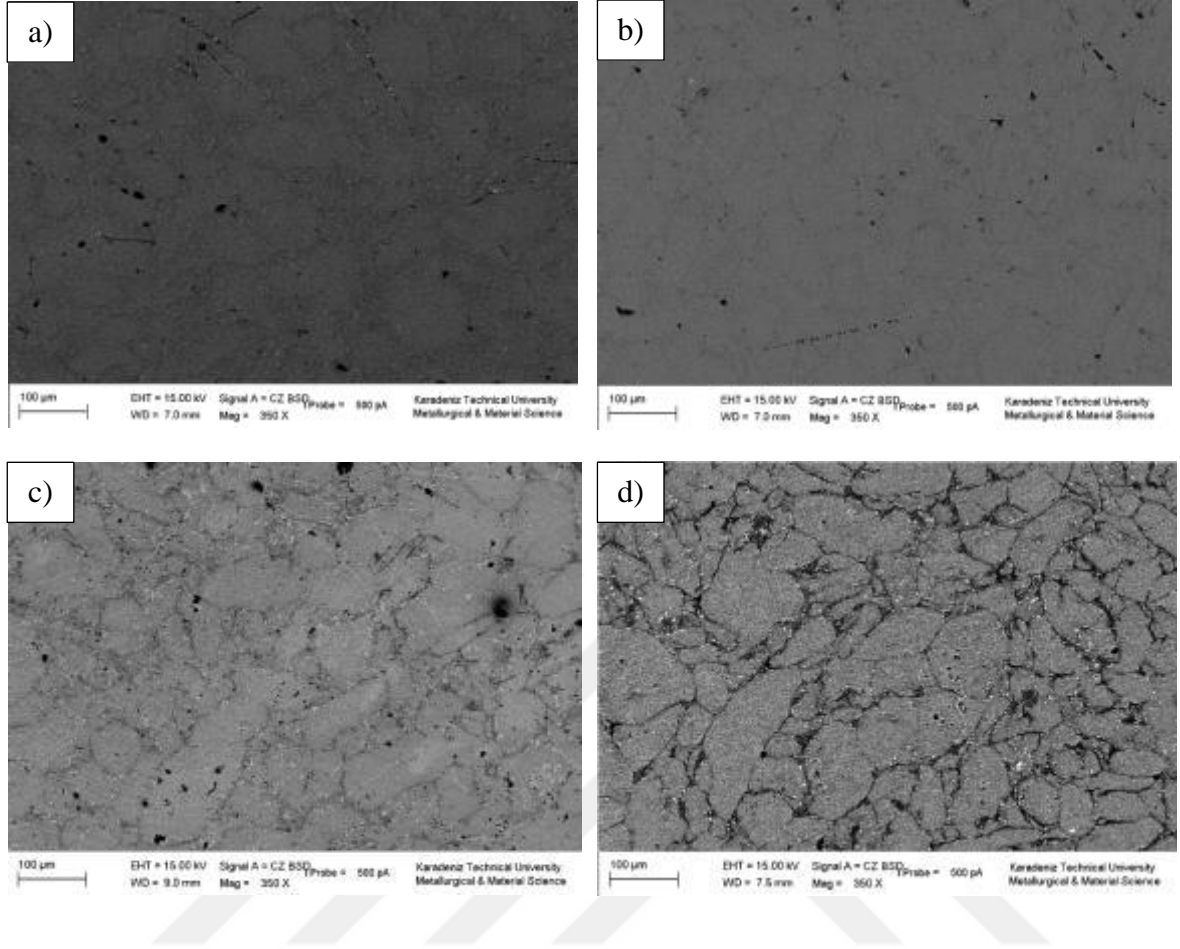
Şekil 66. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



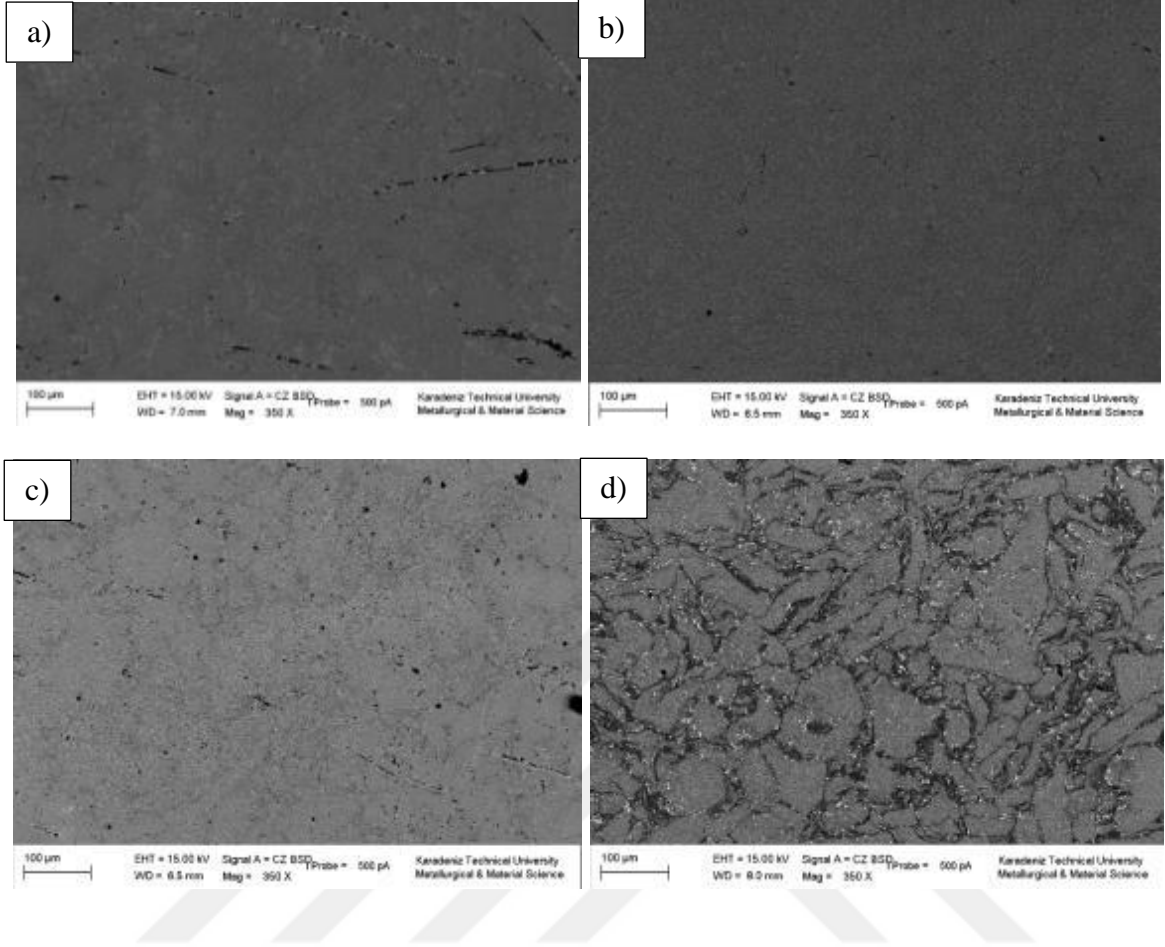
Şekil 67. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



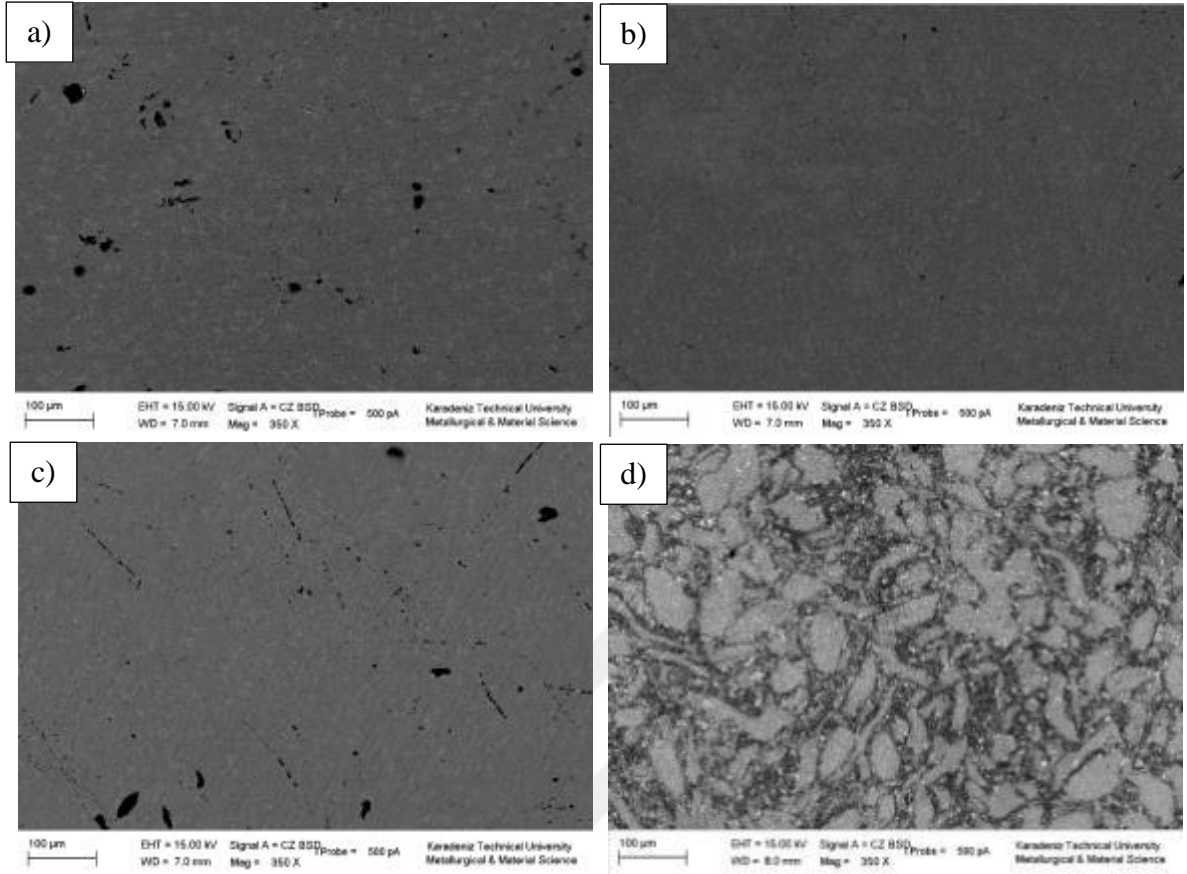
Şekil 68. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



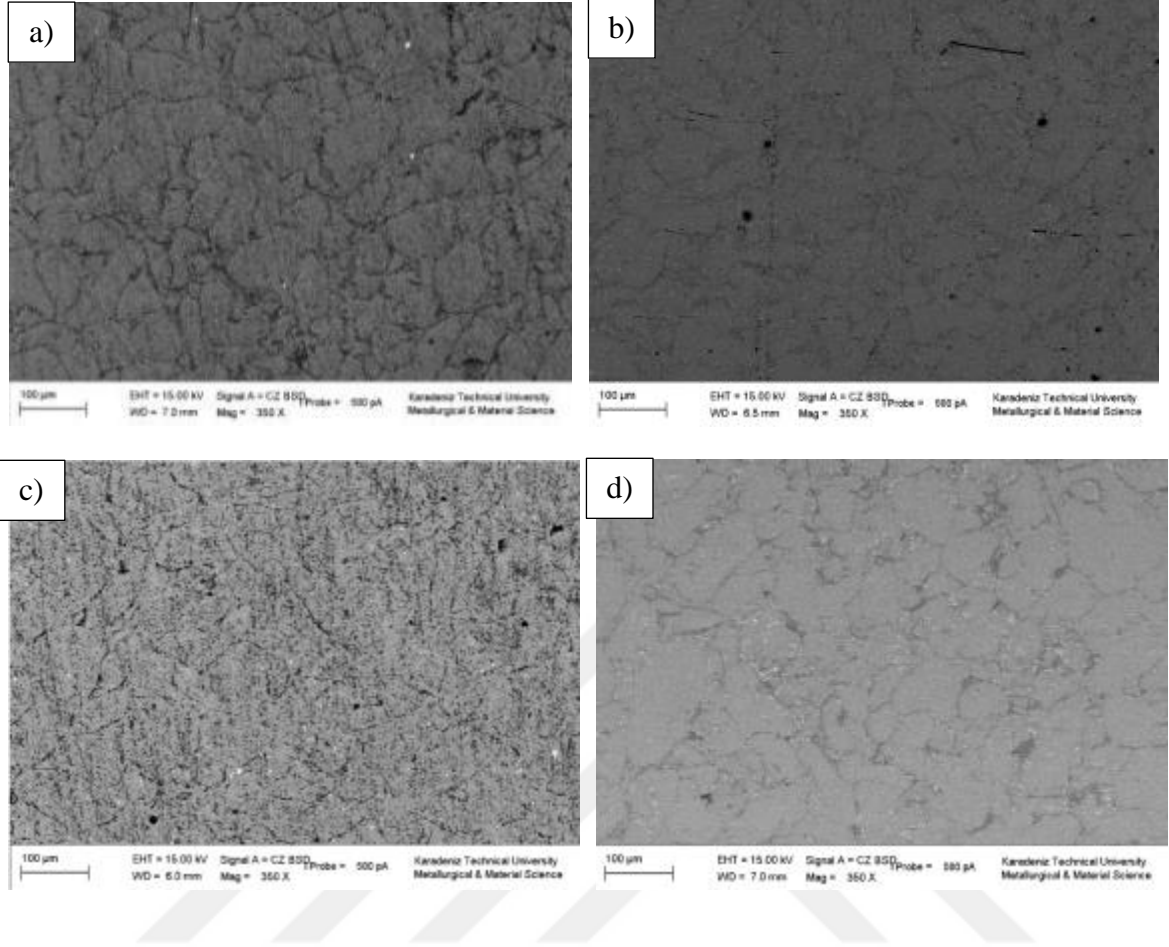
Şekil 69. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



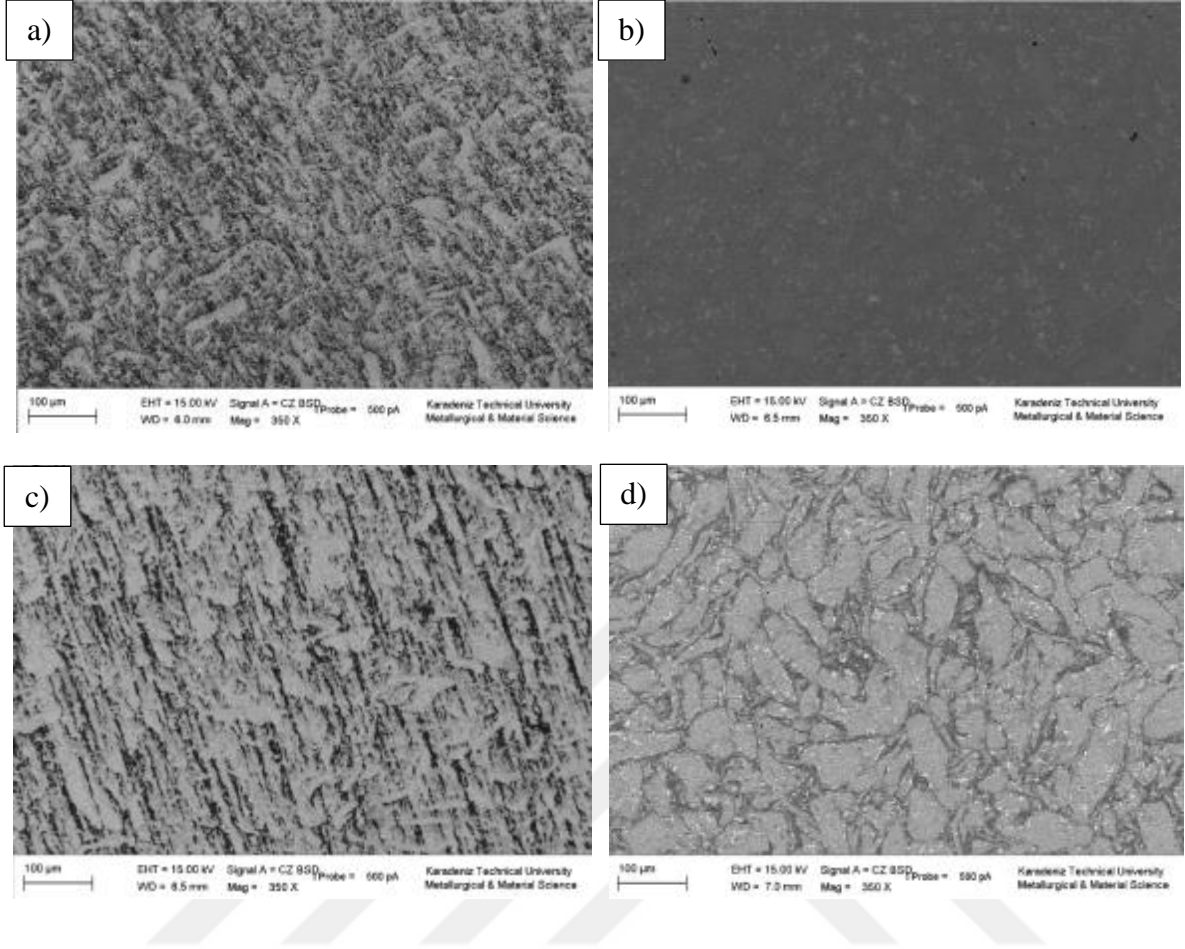
Şekil 70. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



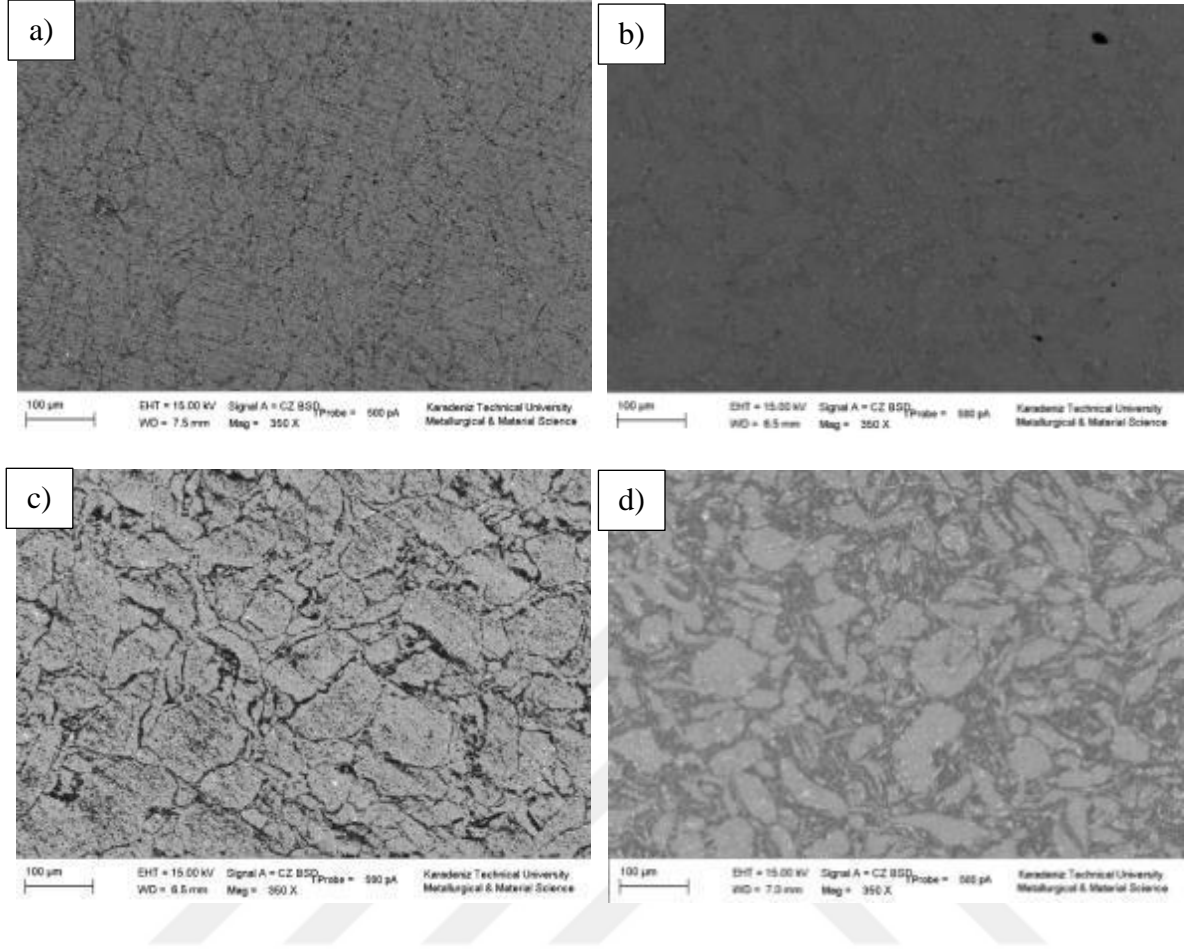
Şekil 71. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



Şekil 72. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



Şekil 73. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0

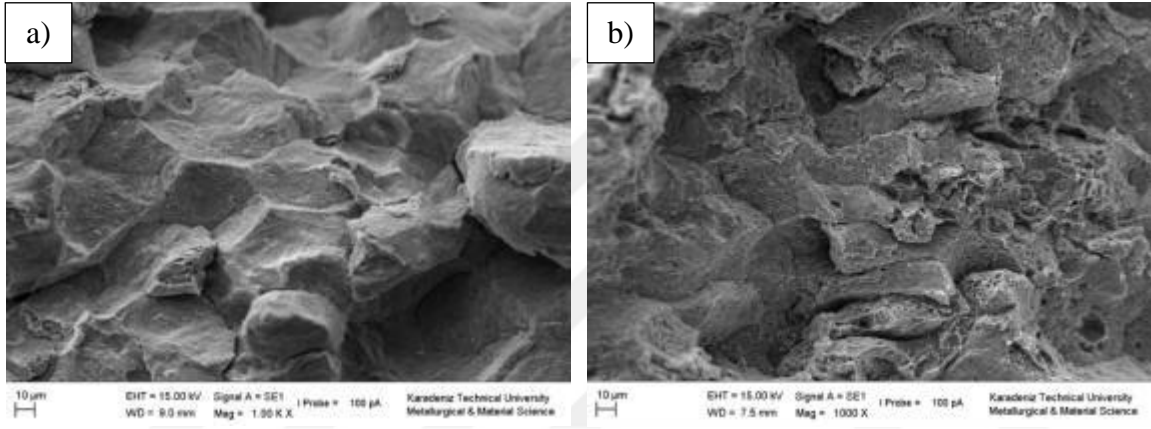


Şekil 74. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitler a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0

3.1.5. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

3.1.5.1. AA2024 Numunesinin Kırılma Yüzeyi

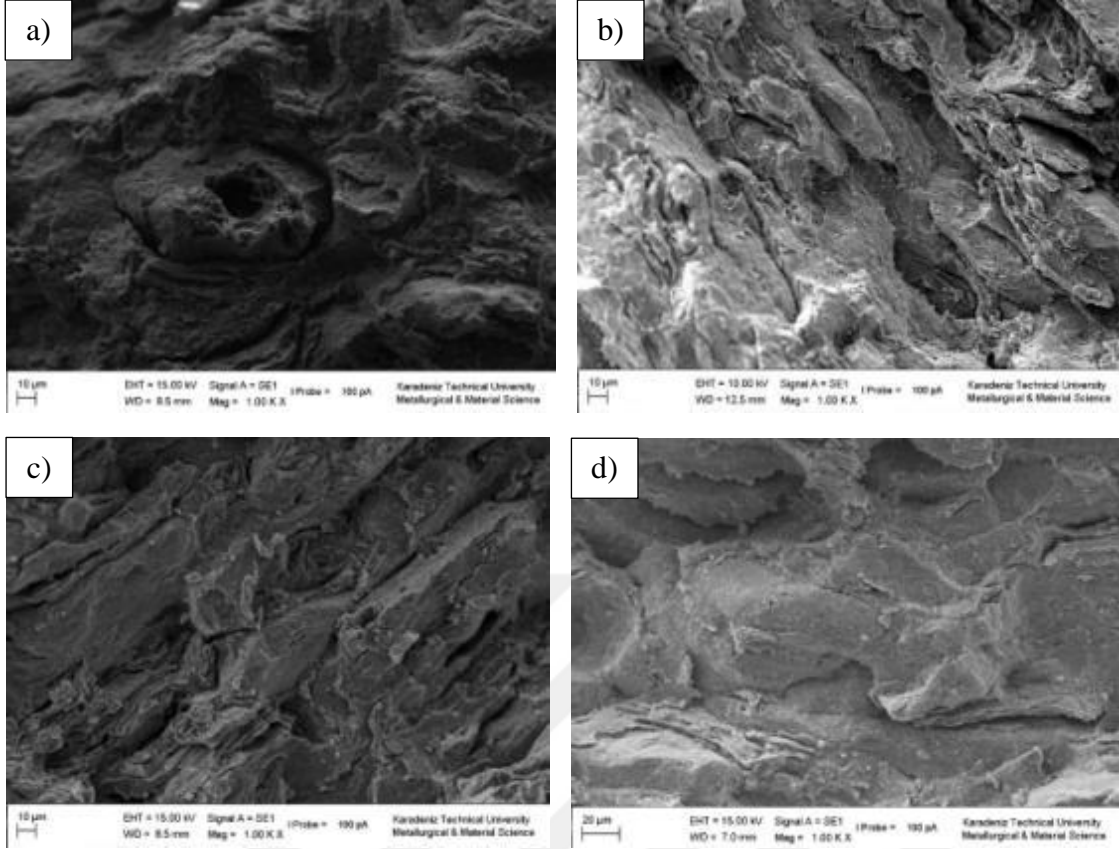
Sadece AA2024 tozlarından oluşan numunenin sıcak preslenmiş ve sıcak presleme sonrası sinterlenmiş numunelerin çekme testine tabi tutulduktan sonra meydana gelen kırılmanın yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmiştir (Şekil 75).



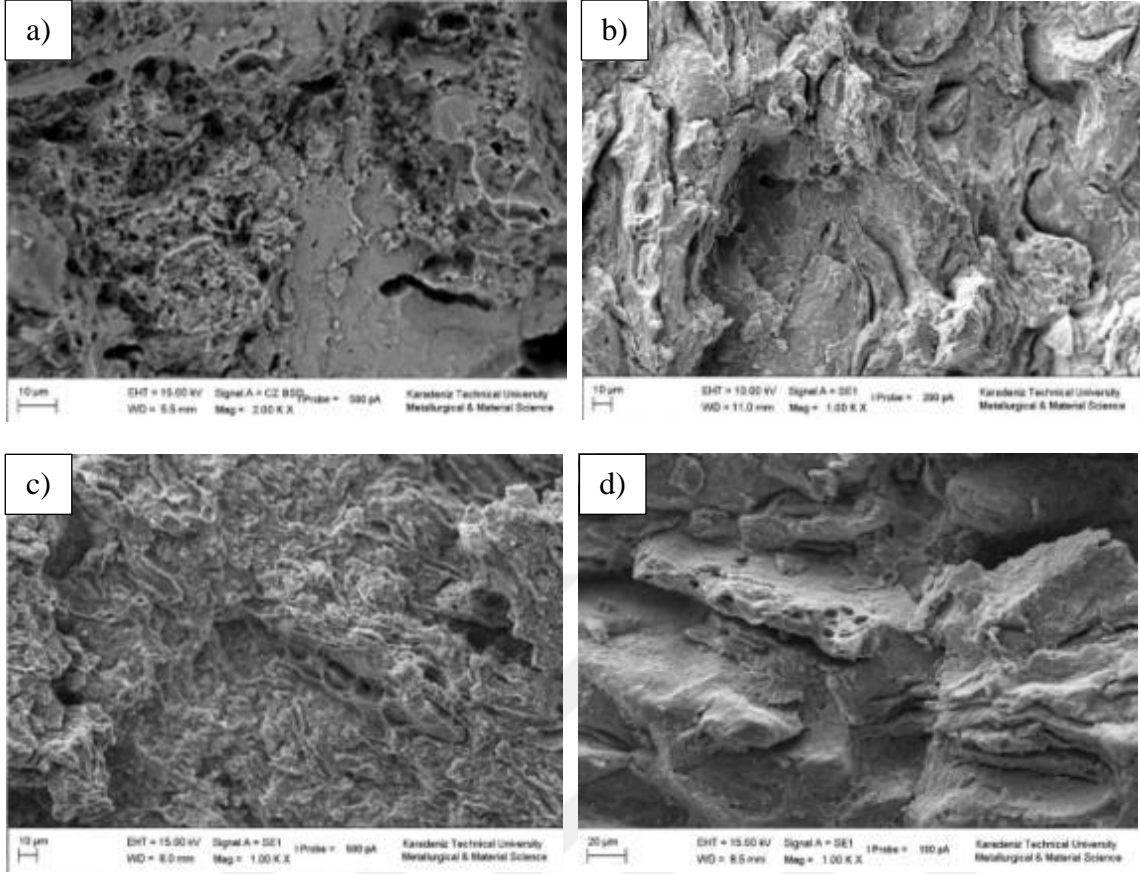
Şekil 75. AA2024 alaşım tozu ile üretilen numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri
a) Sıcak preslenmiş numune b) Sıcak presleme sonrası sinterlenmiş numune

3.1.5.2. AA2024/KNT Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

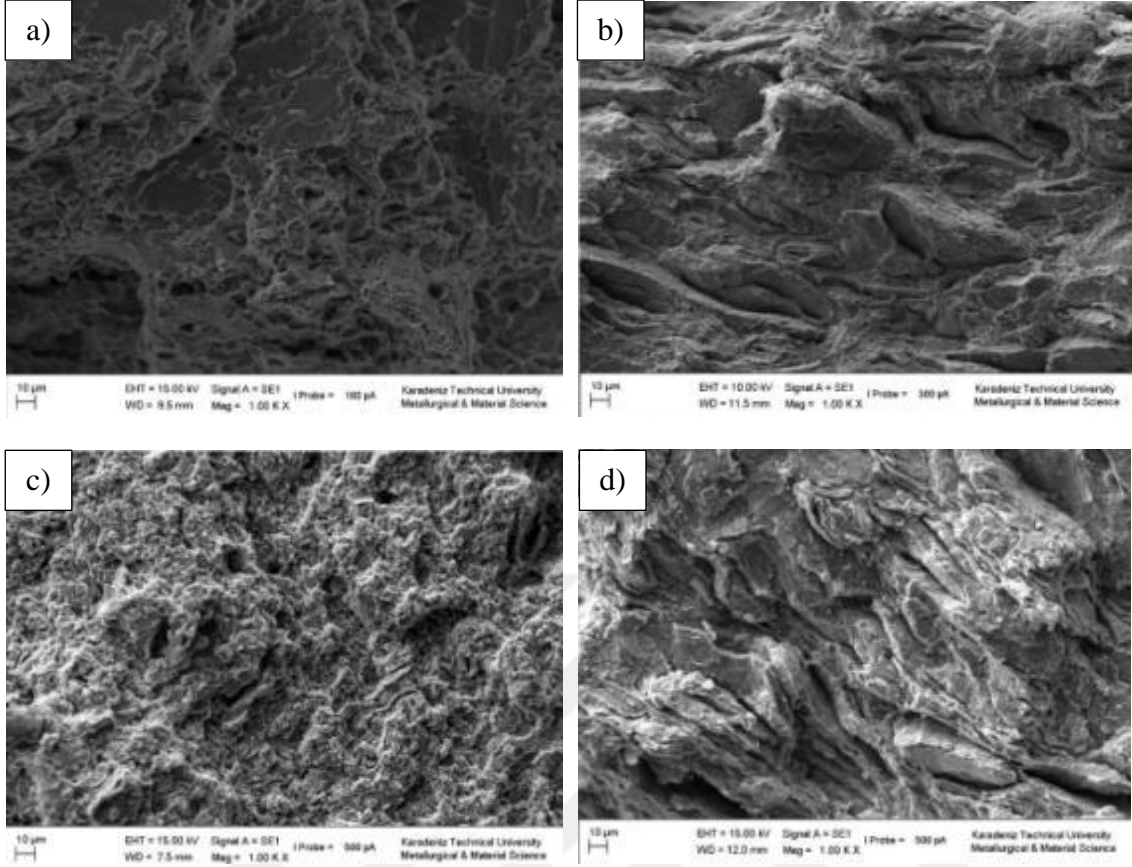
Aşağıda farklı sürelerde öğütülmüş ve ağırlıkça farklı KNT oranı içeren tozlardan üretilmiş kompozitlerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri verilmektedir (Şekil 76-87).



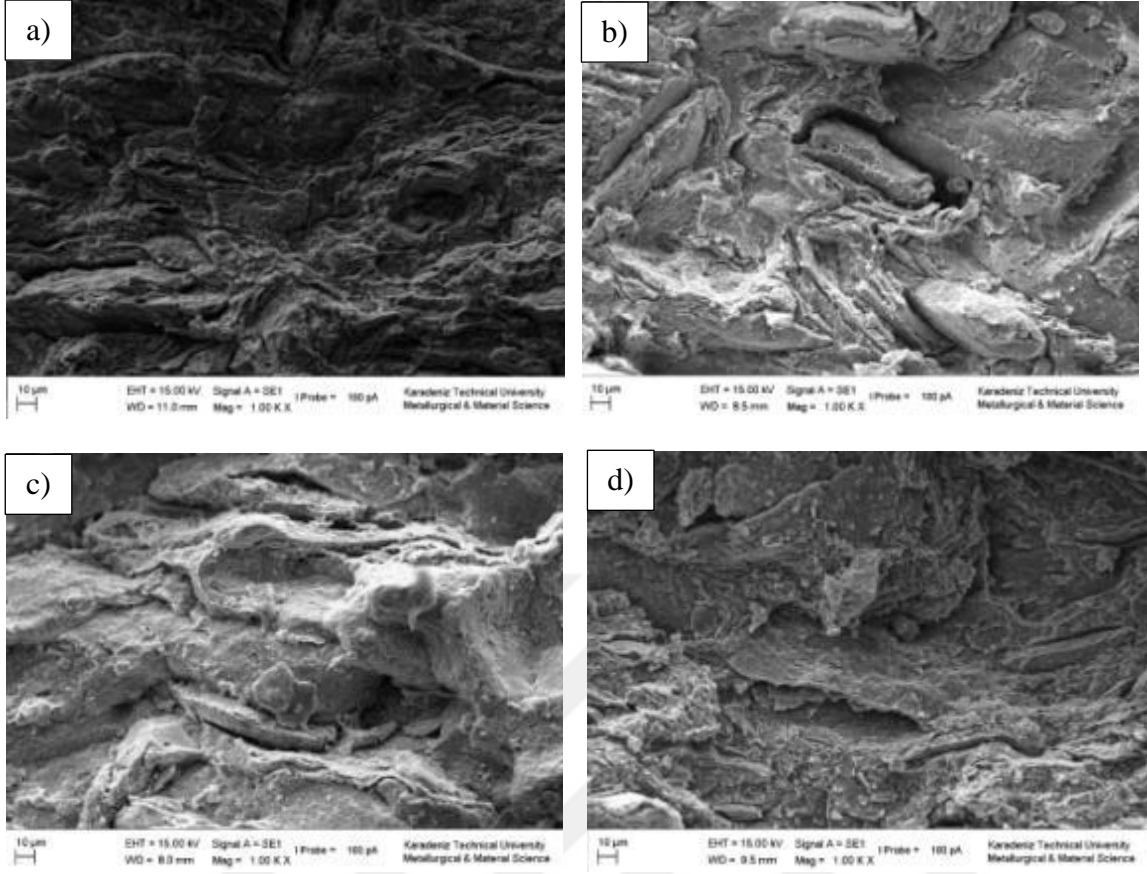
Şekil 76. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



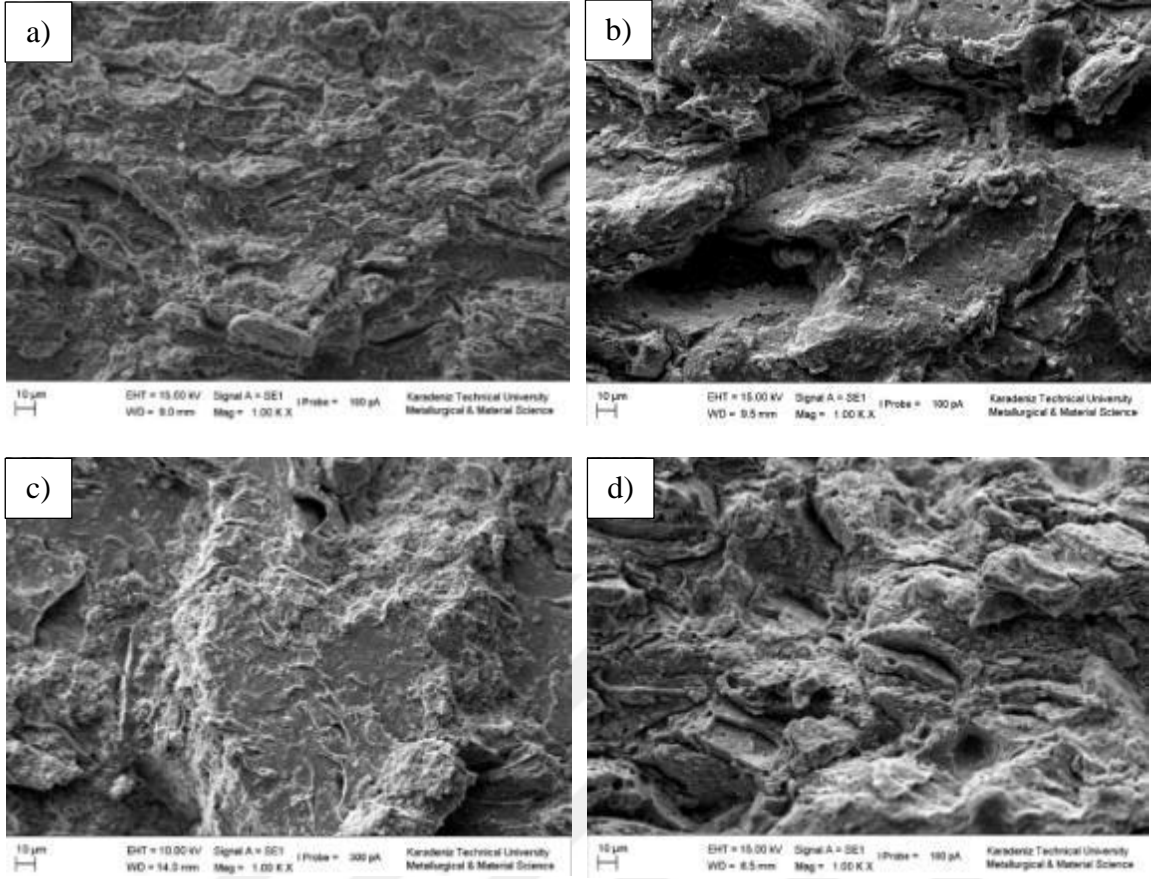
Şekil 77. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzelerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



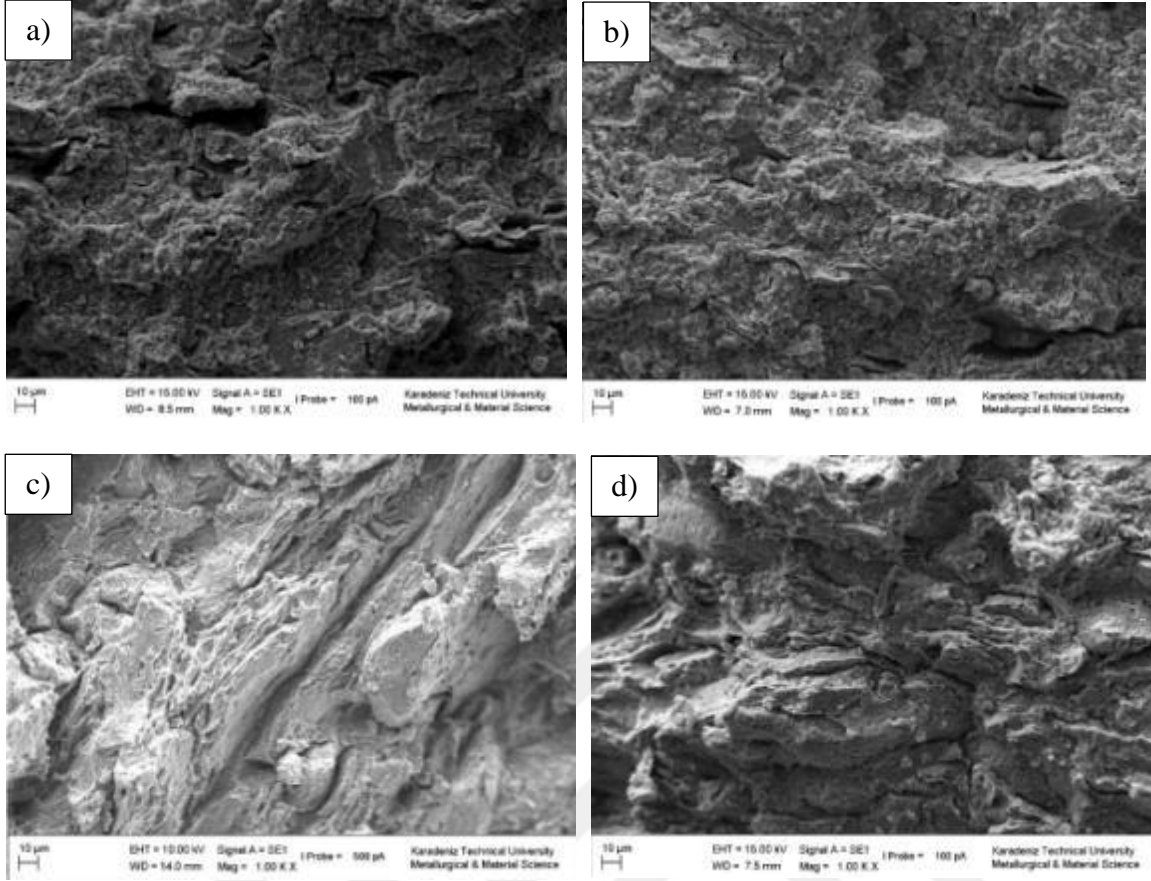
Şekil 78. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



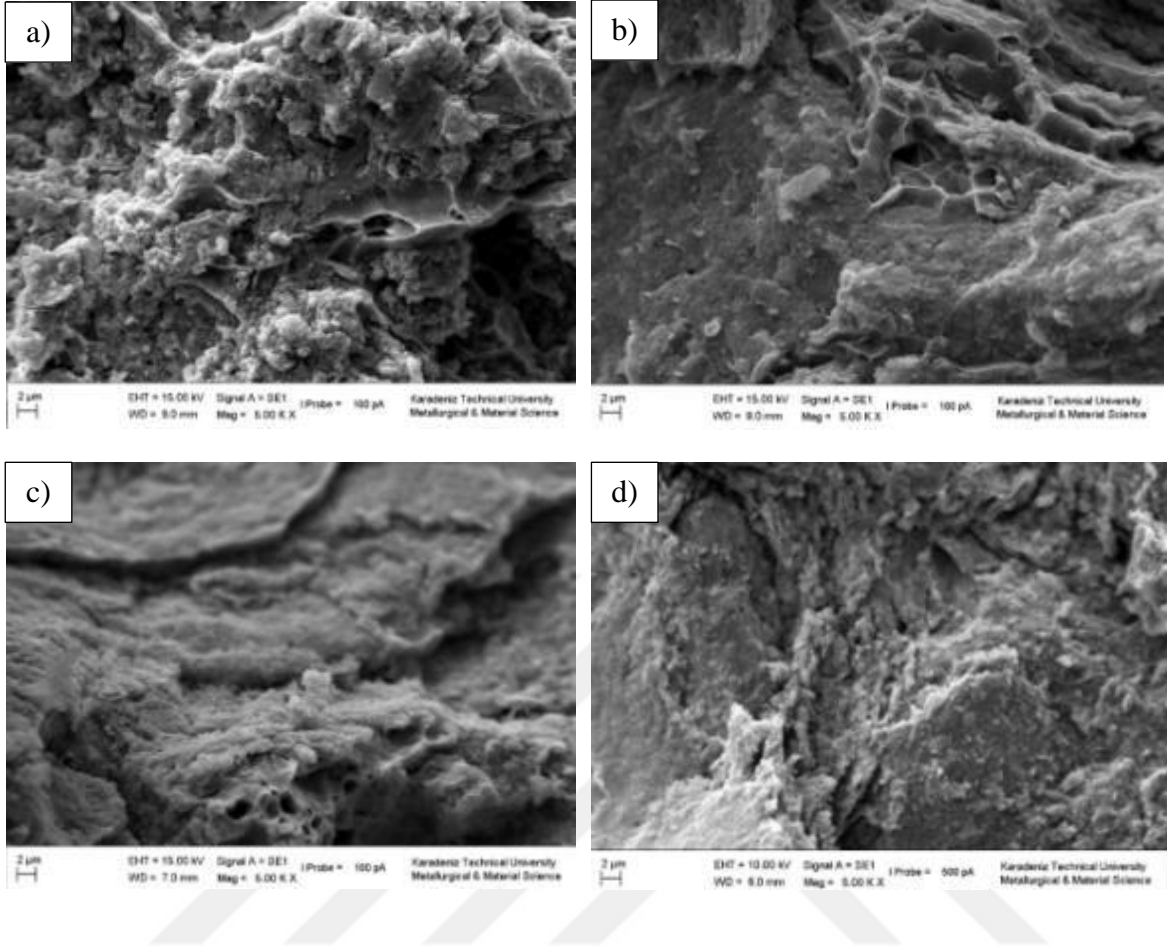
Şekil 79. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



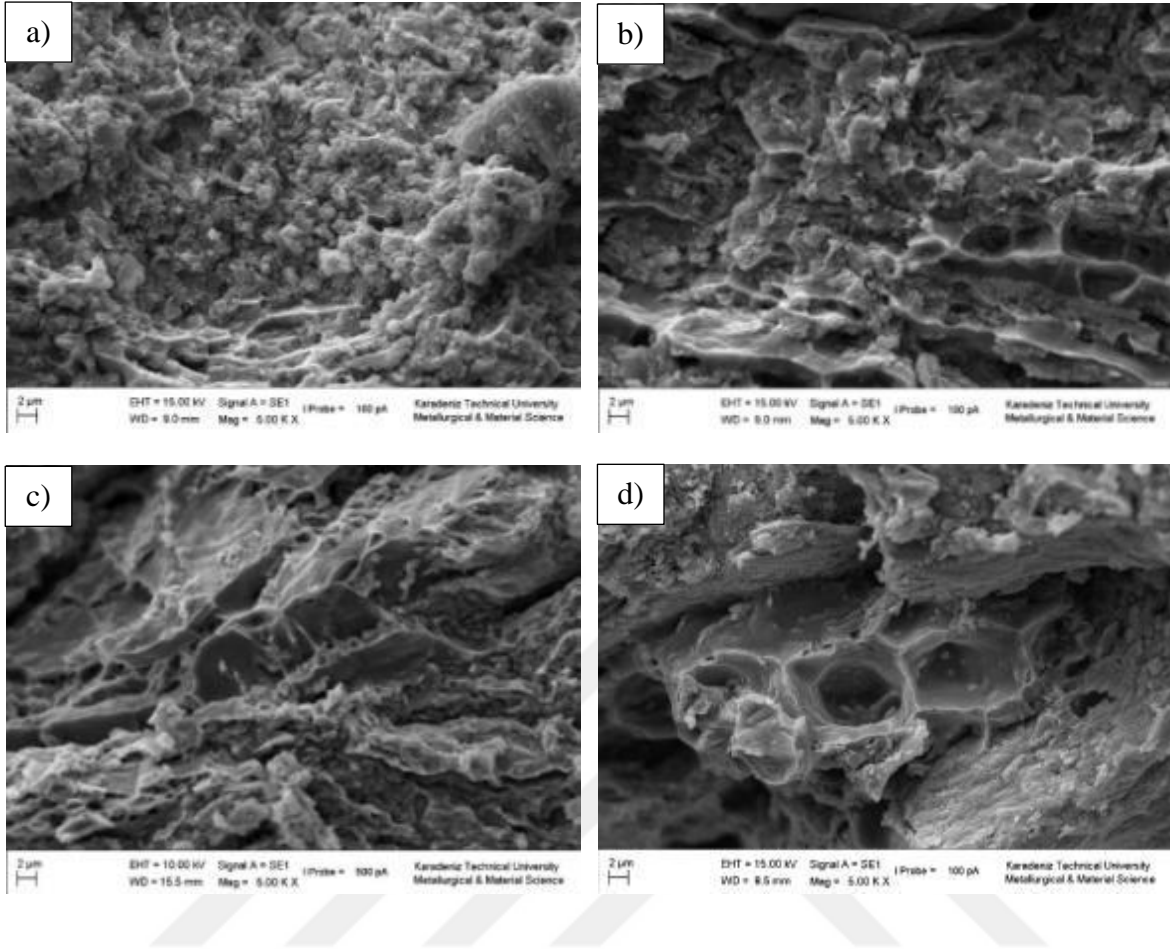
Şekil 80. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



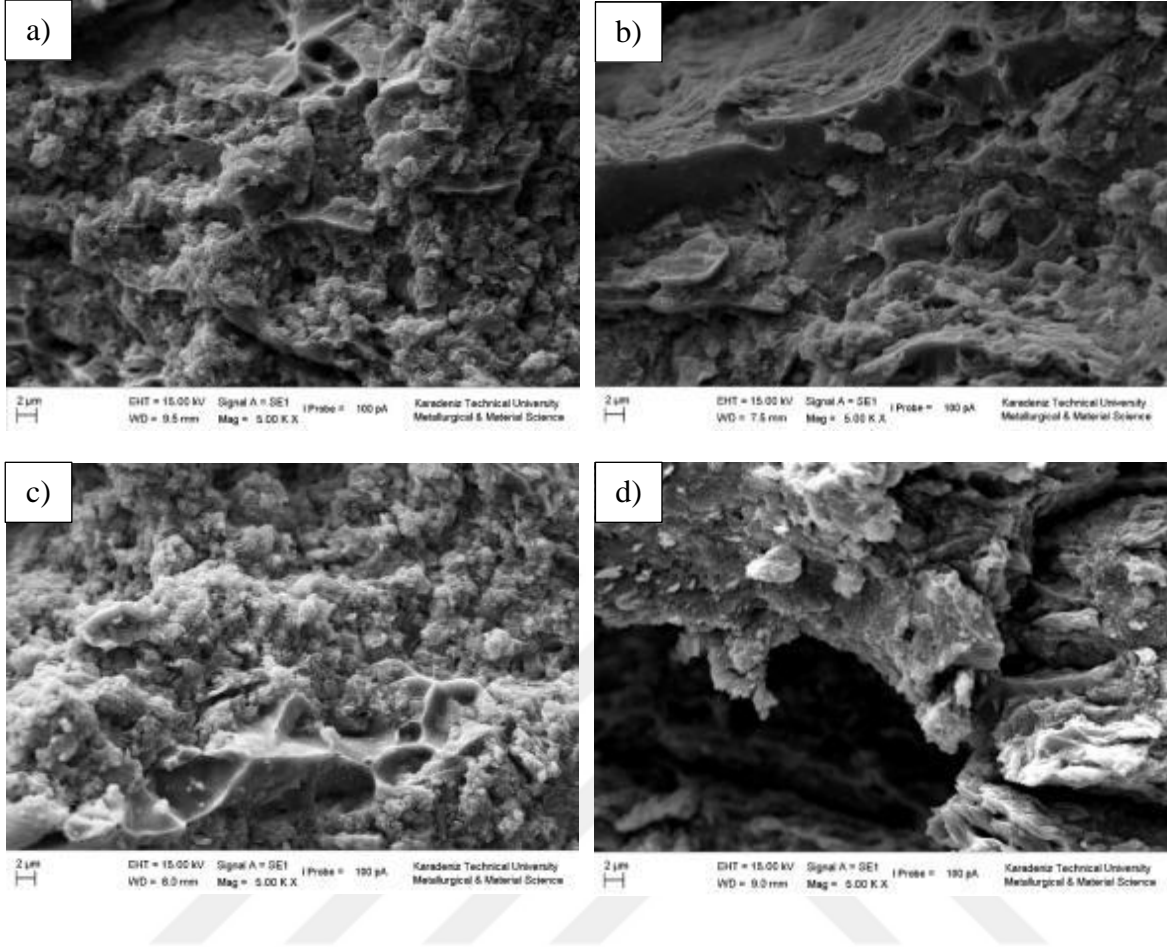
Şekil 81. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



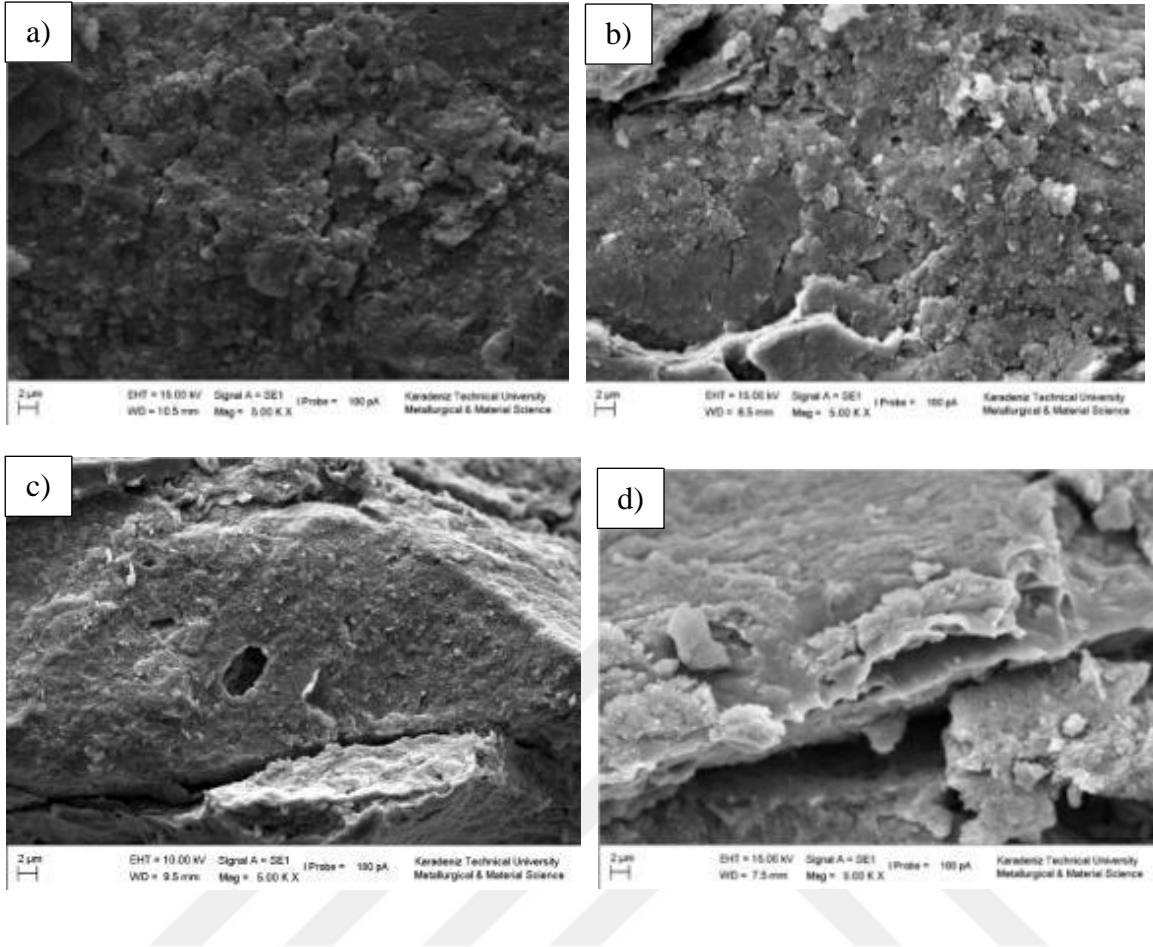
Şekil 82. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



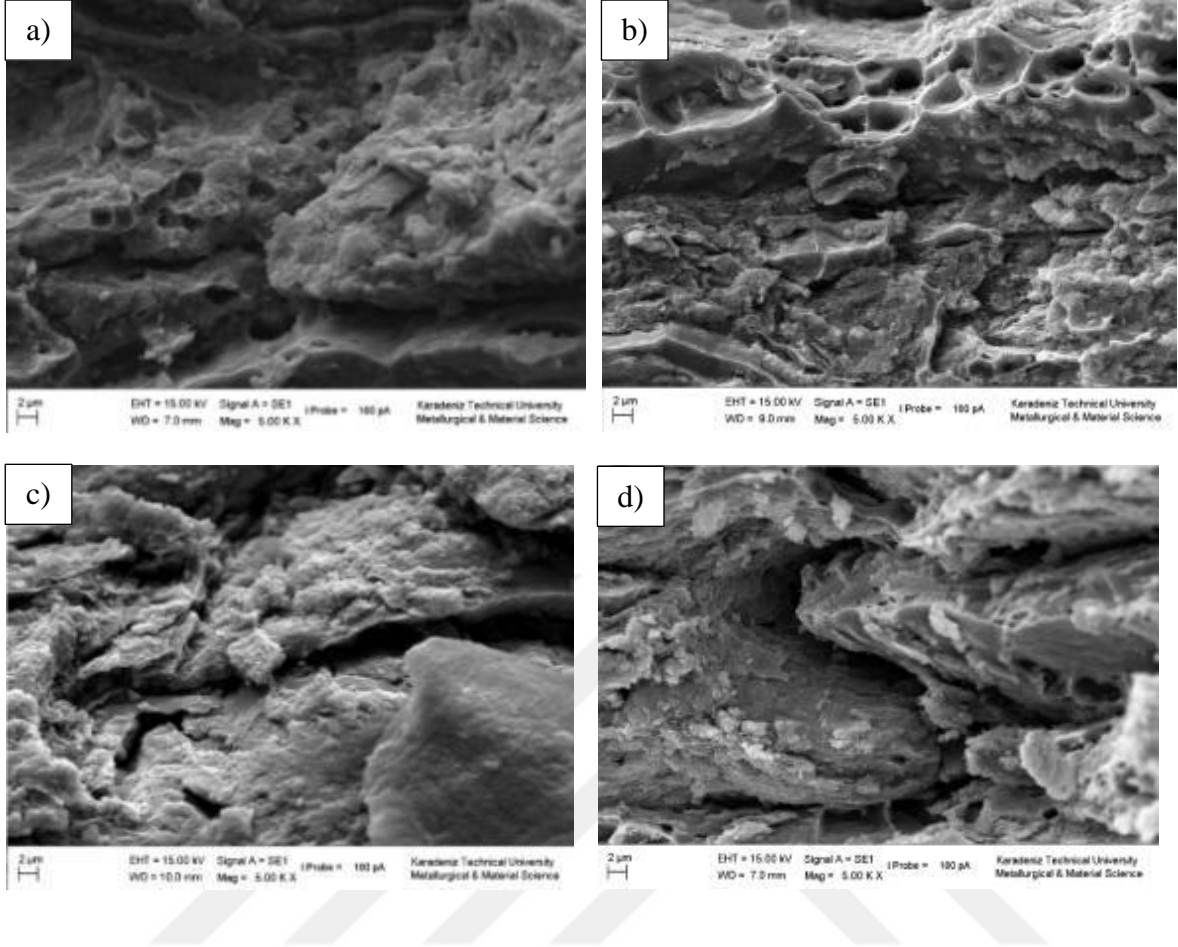
Şekil 83. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



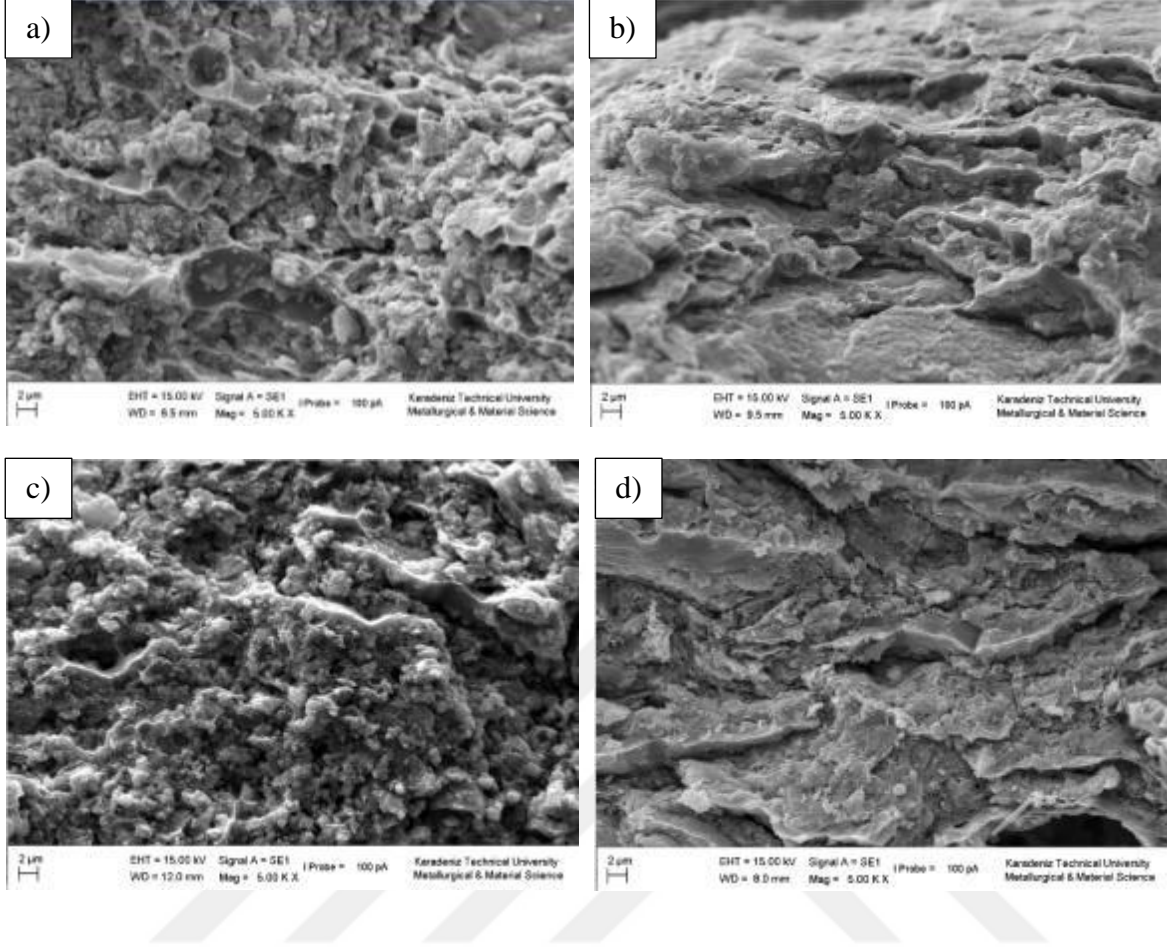
Şekil 84. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzelerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



Şekil 85. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0



Şekil 86. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0

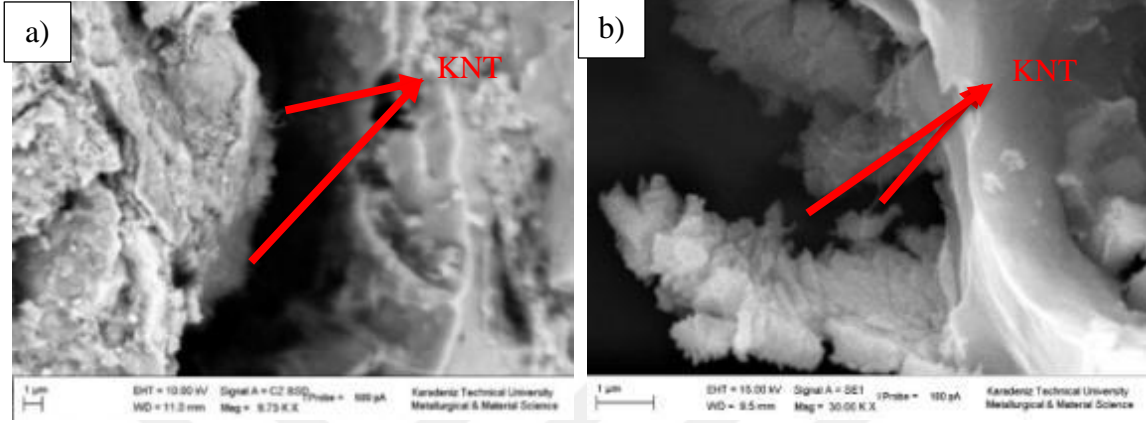


Şekil 87. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.125 b) Ağ. % 0.25 c) Ağ. % 0.5 d) Ağ. % 1.0

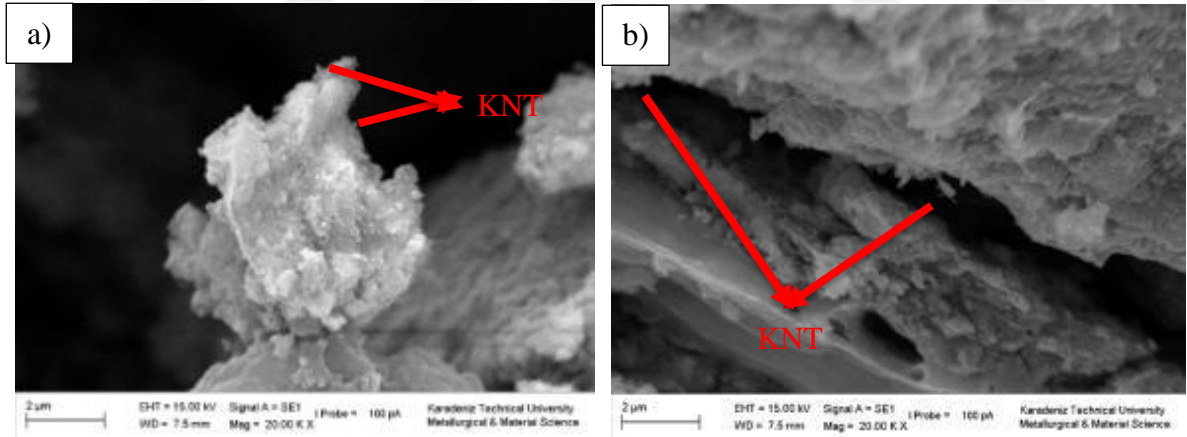
SEM görüntüleri incelendiğinde, düşük oranda KNT içerikli kompozit malzemelerde sünek bir kırılma olduğu gözlemlenebilir. KNT oranı arttıkça malzeme de daha gevrek bir kırılma görmek mümkündür. KNT'lerin çekilmesi nedeniyle oluşan çukurlar, KNT'lerin çoğunun, KNT ile Al matrisi arasında kayma yoluyla gerilme transferini gösteren kırılma yüzeyine neredeyse dik olarak çekildiğini göstermektedir. Bu, karbon nanotüpler ve Al matrisi arasında güçlü bir arayüzey bağı olduğunu gösterir.

Kırılma yüzeyleri incelendiğinde homojen bir kırılma tipinin olmadığı dolayısıyla aynı kırılma yüzeyi üzerinde sünek-kayma kırılmasını ifade eden lifli kırılma (eş eksenli oyuklar-mikro boşluklar) ve gevrek-klivaj kırılmayı belirten kristalin kırılmaları görülmüştür. Sinterleme sonrası oluşmaya başlayan Al_4C_3 fazının su reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkan CH_4 gazının meydana getirdiği boşlukları kırılma yüzeylerinde görmek mümkündür. Kırılma yüzeylerinde görülen bu mikro boşluklar, sünek kırılmanın sebebidir. KNT oranı

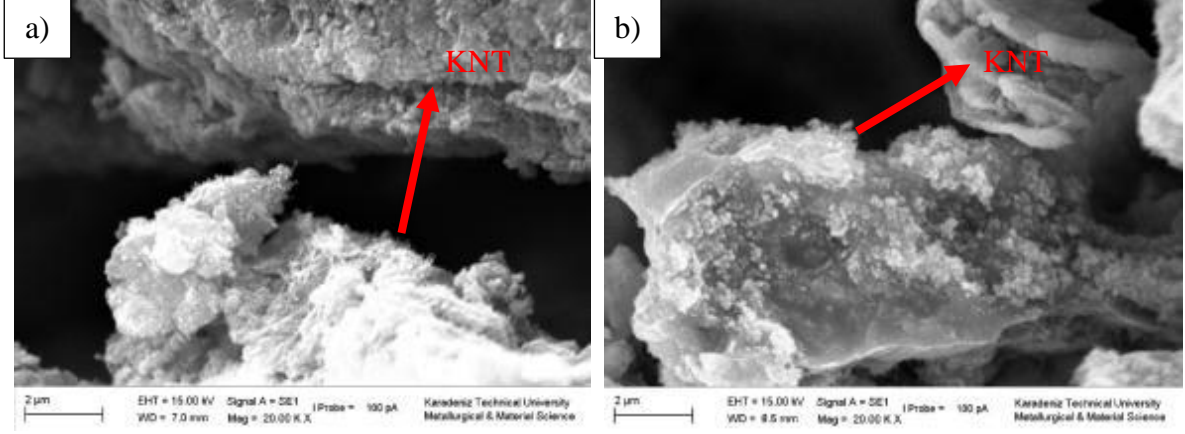
arttıkça meydana gelen gevrek kırılma nedeni olarak ise, iğnemsî KNT parçacık bölgelerinde oluşan gerilme yığılmalarıdır. Sinterleme işlemi sonrası kırılma yüzeylerindeki mikro boşlukların oluşması çekme dayanımı değerleri elde edilebilmiştir.



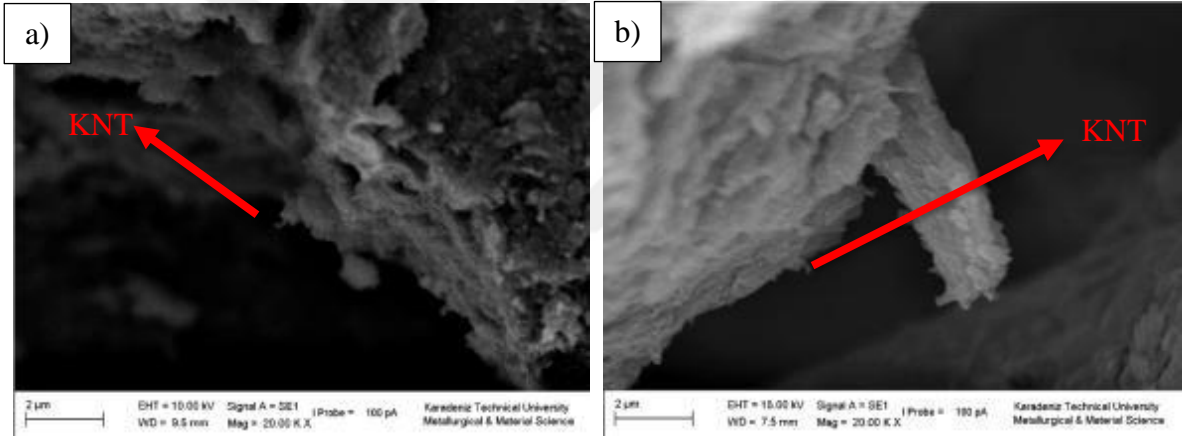
Şekil 88. Ultrasonik dağıtma (15) uygulanmış KNT içeren 1.5 saat ve 0.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.25 b) Ağ. % 0.125



Şekil 89. Ultrasonik dağıtma (30) uygulanmış KNT içeren 1.0 saat ve 3.0 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.5 b) Ağ. % 1.0



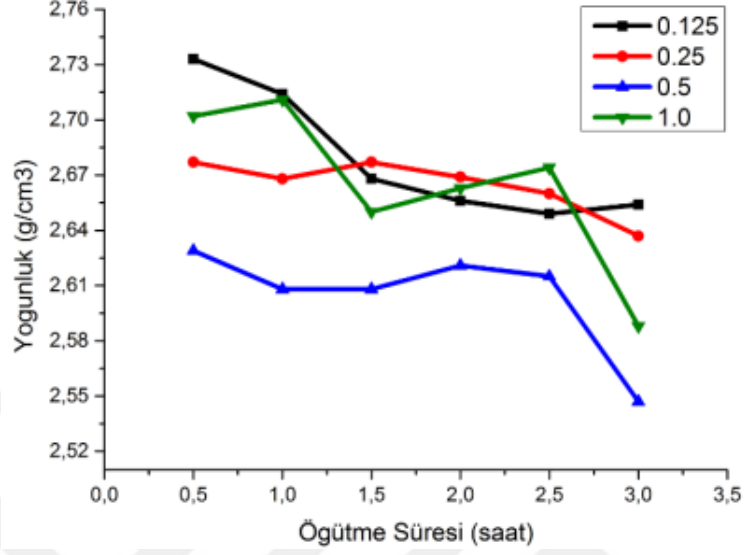
Şekil 90. Ultrasonik dağıtma (45) uygulanmış KNT içeren 0.5 saat ve 1.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.5 b) Ağ. % 0.25



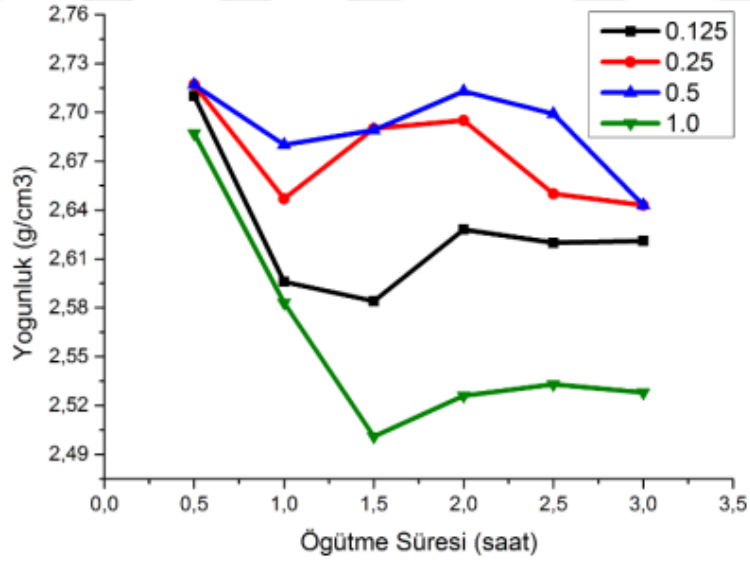
Şekil 91. Ultrasonik dağıtma (60) uygulanmış KNT içeren 0.5 saat ve 2.5 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozitlerin kırılma yüzeylerinden elde edilen KNT'nin SEM görüntüleri a) Ağ. % 0.5 b) Ağ. % 1.0

Yüksek büyütme sonrası, kompozit malzeme içerisindeki KNT görüntüleri verilmiştir (Şekil 88-91). Şekil 88 (b)'de bir karbon nanotüpün Al matrisine “köprüleme” şeklinde bağlandığını, Al-KNT arayüz kuvvetini ve kompozitlerin kırılma enerjisini arttırdığını göstermektedir. Açıkça boru biçiminde bir yapıya sahip bazı KNT'ler gözlemlenebilir, bu da KNT'lerin Al matrisine gömüldüğünü gösterir.

3.1.6. Yoğunluk Sonuçlarının İncelemesi



a)



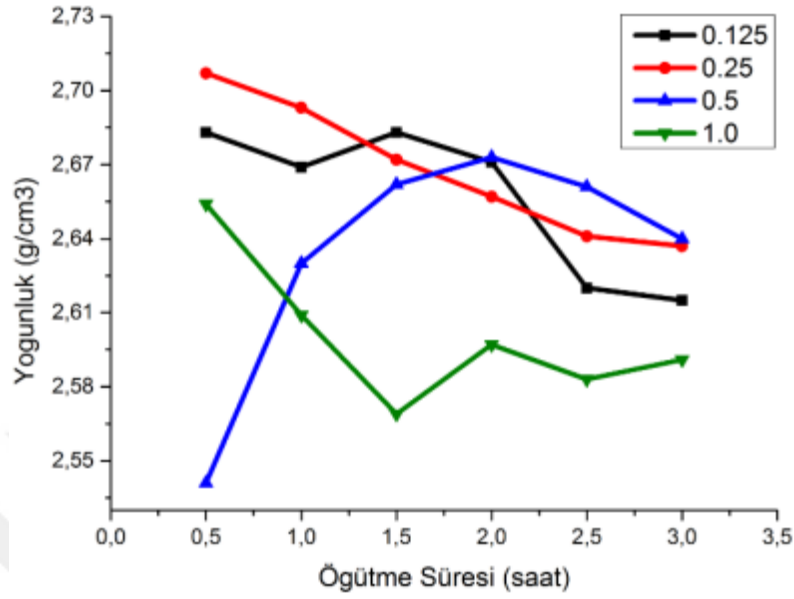
b)

Şekil 92. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak preslenerek üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre yoğunluk değişimi;

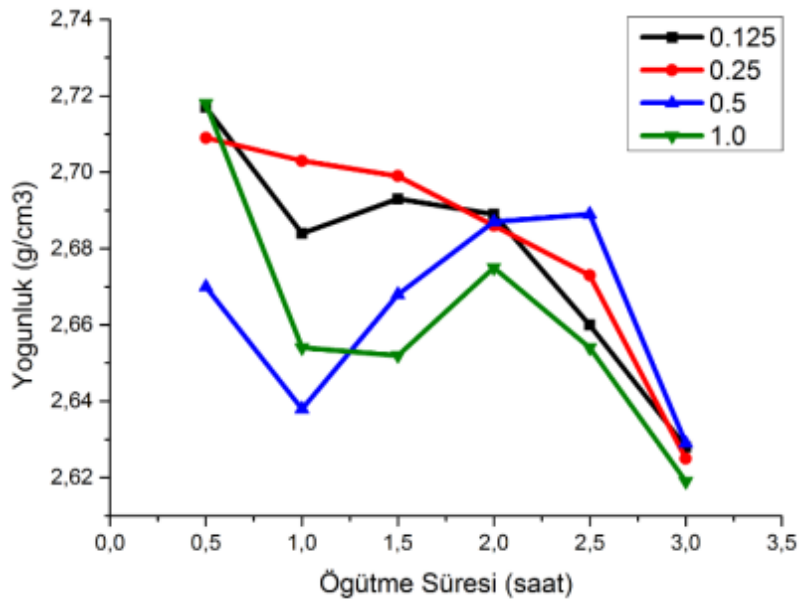
a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30);

c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 92'in devamı,



c)

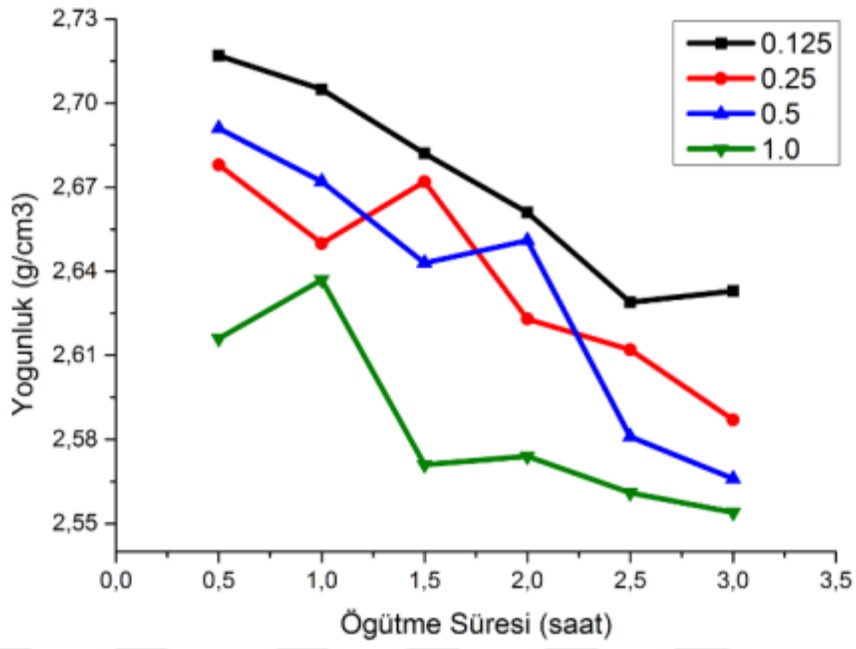


d)

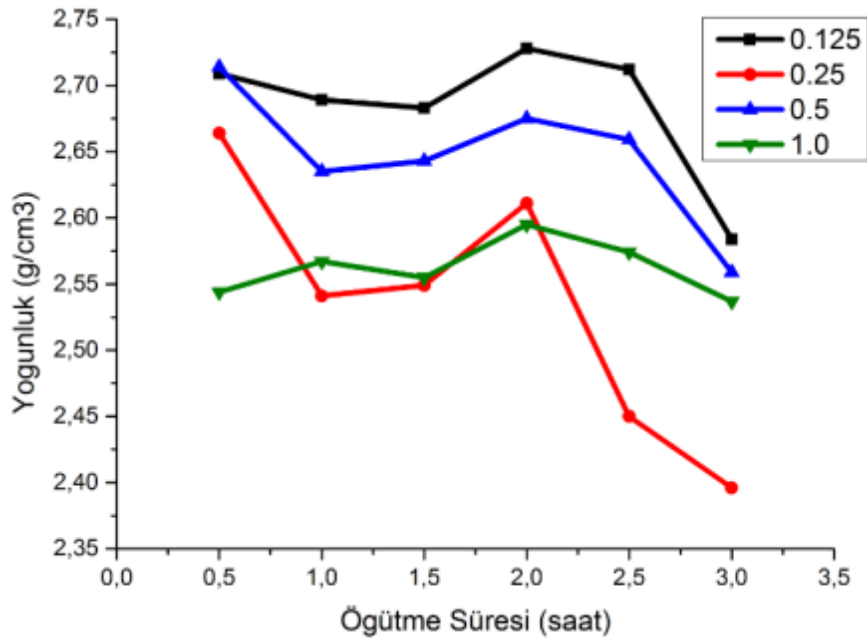
Dört farklı ultrasonik dağıtma işlemi için AA2024-KNT nanokompozitlerinin yoğunluk değerlerinin mekanik öğütme süresi ile değişimi grafiklerden görülmektedir (Şekil 92). Mekanik öğütme yöntemiyle metal matrisli kompozit üretiminde öğütülen tozlar sürekli

olarak deforme edilmekte ve sertleşmektedirler. Bundan dolayı artan öğütme süresi ile tozların yoğunlaşma kabiliyeti azalmakta ve yoğunlukta bir düşüş görülmektedir. (Şekil 92 ve 93). Bununla birlikte KNT parçacıklarının etkisi ve mekanik öğütme esnasında gerçekleşen soğuk kaynak ve kırılma olayları, grafiklerde görüldüğü gibi yoğunluk değerlerinin doğrusal bir şekilde değişimini engellemektedir. Şekil 92 ve 93, 1 saatlik mekanik öğütme işlemi sonucunda görülen yoğunluk artışının sebebi, matris malzemesi olan AA2024 alaşım tozlarının pulsu morfolojiye sahip olmasıdır. Bu artış, ultrasonik dağıtma süresi 15 dakika olan kompozitlerin yoğunluklarına ait olan Şekil 92’de kısmi olarak gözlemelenirken, ultrasonik dağıtma süresi 30 dakika olan kompozitlerin yoğunluklarına ait olan Şekil 93’de 2 saatlik öğütme süresi sonunda gözlemlenmiştir. 3 saatlik mekanik öğütme işlemi sonucunda ölçülen yoğunluk değerlerine göre en düşük yoğunluk değerleri ağırlık % 1 oranına sahip AA2024-KNT nanokompozitleridir ve şekillerden de anlaşılacağı gibi artan KNT takviye oranı ile kompozit yoğunlukları genel olarak azalmaktadır. Bunun sebeplerinden biri KNT’lerin matris malzemesine göre oldukça sert olması ve artan ağırlık % oranları sebebiyle kompozit yapısını sertleştirmeleri ve preslenebilirliği azaltmalarındadır. Diğer sebebi ise Al_4C_3 fazının oluşmaya başlaması ve su ile tepkimeye girmesinden dolayı ortaya çıkan CH_4 gazının malzeme içerisinde bırakmış olduğu boşluklardır (Iseki vd., 1984; URL-1, 2015). Bu fazın gevrek olmasına rağmen kararlı olarak kalmasının zor olmasından ve nemli ortamda tepkimeye girmesinden dolayı, kompozitlerin yoğunlaşma kabiliyetini azaltarak yoğunlukların azalmasına ve düzensizlik göstermesine sebep olmaktadır.

Takviye elemanı içermeden sadece AA2024 alaşım tozları kullanılarak sıcak presleme ile üretilen numunenin yoğunluğu da 2.717 g/cm^3 olarak bulunmuştur. Bu değer teorik yoğunluğa yakın bir değerdir. Sadece sıcak preslenerek AA2024 alaşım tozundan üretilen numune sinterleme aşamasından geçirildikten sonra tekrar yoğunluğu ölçülmüş ve 2.643 g/cm^3 olarak bulunmuştur.



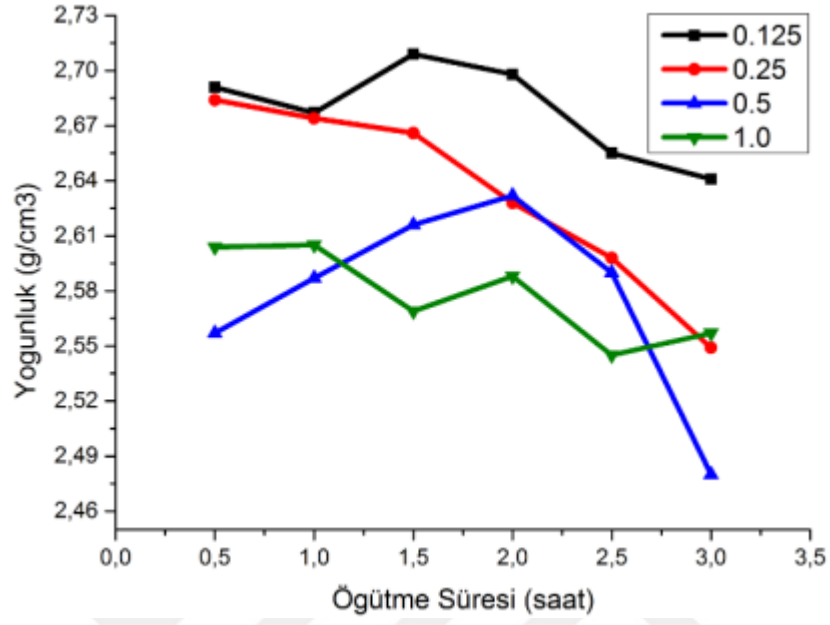
a)



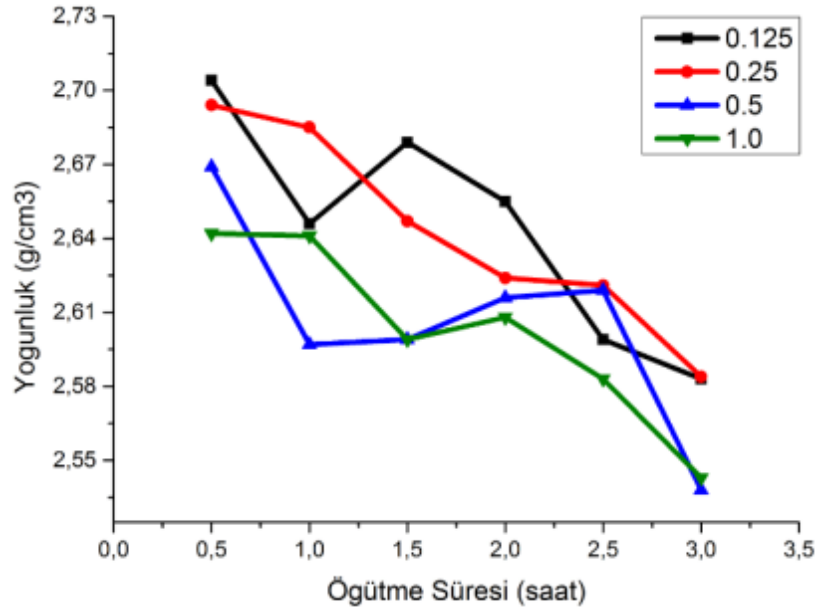
b)

Şekil 93. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrasında sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre yoğunluk değişimi; a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30); c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 93'nin devamı,

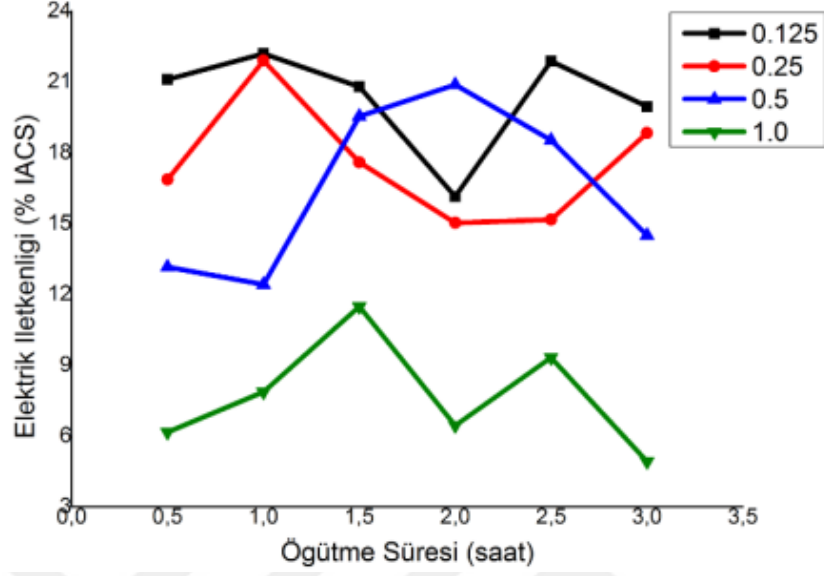


c)

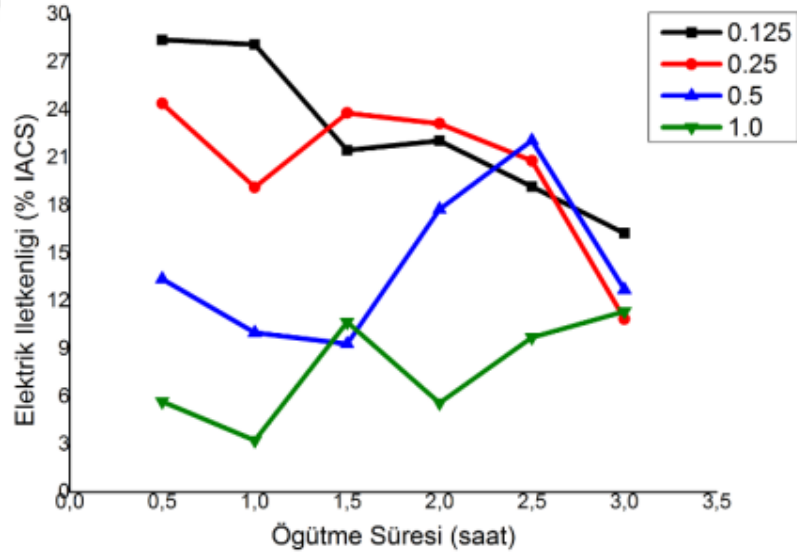


d)

3.1.7. Elektrik İletkenliği Sonuçlarının İncelenmesi



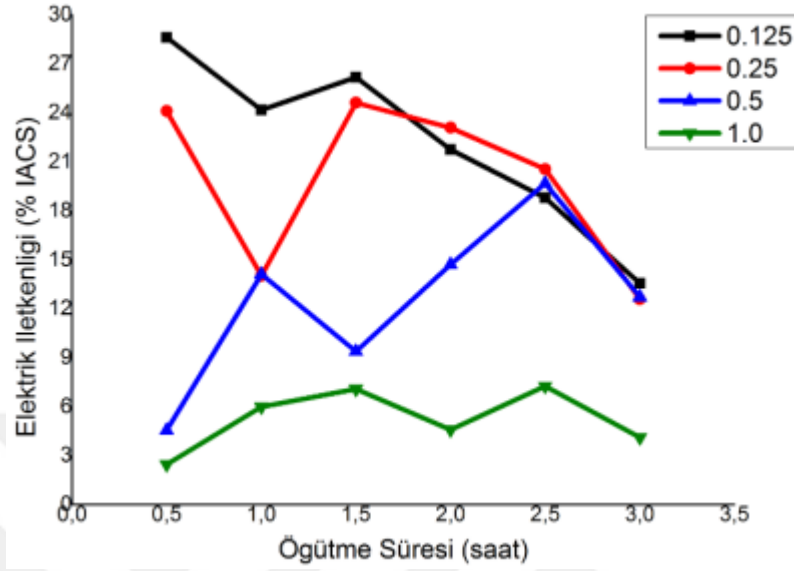
a)



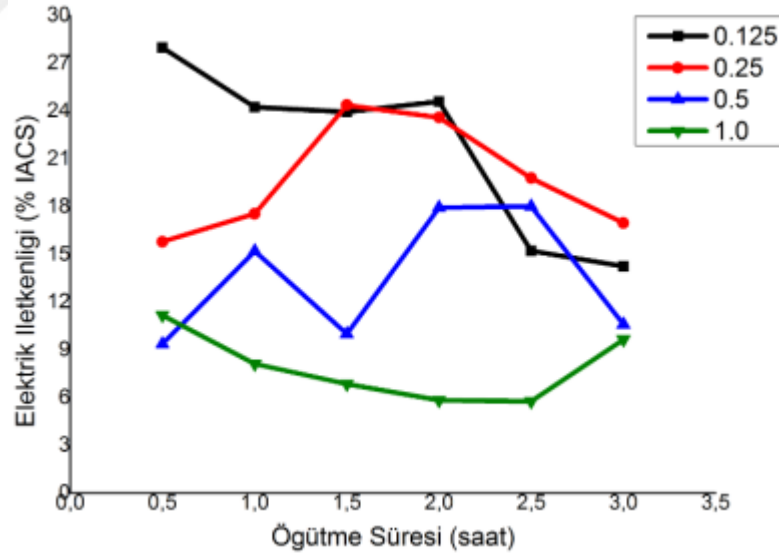
b)

Şekil 94. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak preslenerek üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre elektrik iletkenliği değişimi;
a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 94'ün devamı,



c)

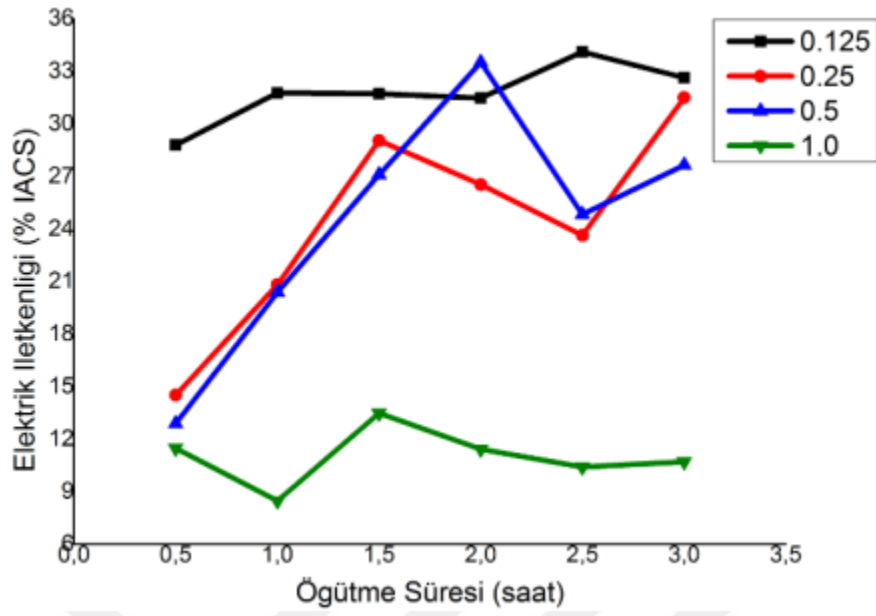


d)

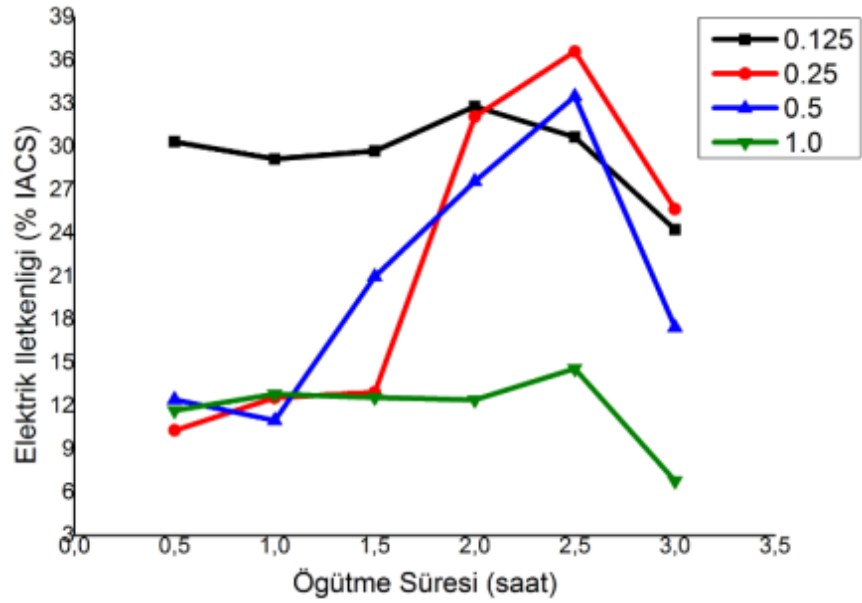
Dört farklı ultrasonik dağıtma işlemi için sıcak presleme ve sıcak presleme sonrası uygulanan sinterleme işlemi ile üretilen AA2024-KNT nanokompozitlerinin iletkenlik değerleri üzerine mekanik öğütme süresinin etkisi grafiklerde görülmektedir (Şekil 94 ve 95).

En düşük iletkenlik değeri hem sıcak preslenmiş hem de sinterleme işlemi uygulanmış numuneler için ağ.% 1 KNT takviyeli nanokompozitlerde elde edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle optimum KNT değerinin 0.5 olduğu söylenebilir. Sıcak presleme sonrası elde edilen elektriksel iletkenlik değerleri 0-29 IACs değerleri arasında değişirken, sinterleme sonrası 3-39 IACs değerleri arasına yükselmiştir. En yüksek iletkenlik değerleri ağ.% 0,125 ve 0,25 KNT değerleri için elde edilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere iletkenlik değerlerinin değişimi lineer olmayıp bu durum mekanik öğütme esnasında meydana gelen morfolojik değişimler sebebiyledir. Saf Alüminyumun iletkenlik değeri 61 IACs ve AA2024 alaşımının iletkenlik değerinin en yüksek 50 IACs olduğu dikkate alındığında ağ.% 0,125 ve 0,25 KNT içeren nanokompozitlerin iletkenlik değerlerinin kullanılabilir seviyede olduğu anlaşılmaktadır (URL-3, 2002).

Sadece AA2024 alaşım tozundan sıcak preslenerek üretilen numunenin ise elektrik iletkenlik değeri 30.7 IACs olarak ölçülmüştür. KNT'nin takviye elemanı olarak kullanılan kompozit malzemelere göre alaşım numunenin değeri daha yüksektir. Grafikler incelendiğinde görülebileceği gibi, KNT ilavesi elektrik iletkenliği üzerinde azalma etkisi göstermiştir. AA2024 alaşım tozundan sıcak preslenerek üretilen numunenin sinterleme aşamasından geçirildikten sonra ölçülen elektrik iletkenlik değeri 33.8 IACs olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte sinterleme işlemi, saf alaşım numunesinde olduğu gibi kompozit malzemelerin de elektrik iletkenlik değerleri üzerinde artan bir etki göstermiştir.



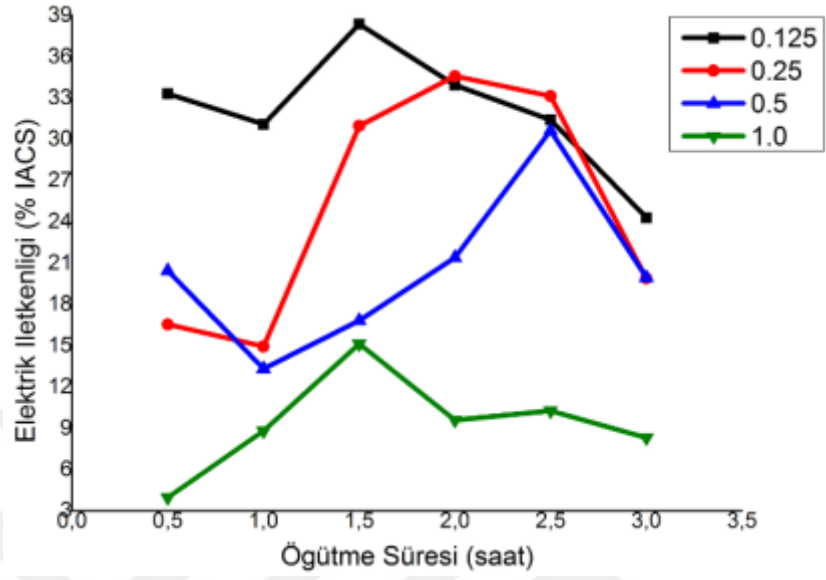
a)



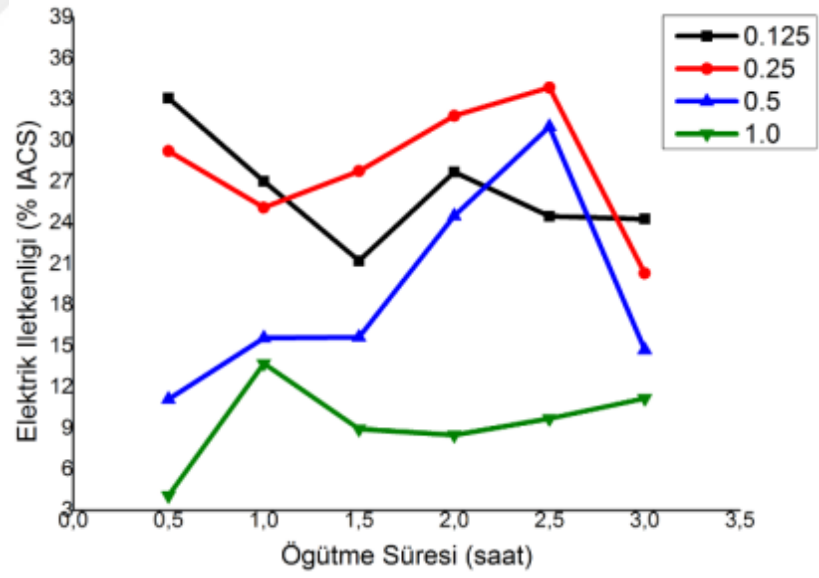
b)

Şekil 95. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre elektrik iletkenliği değişimi;
a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 95'in devamı,

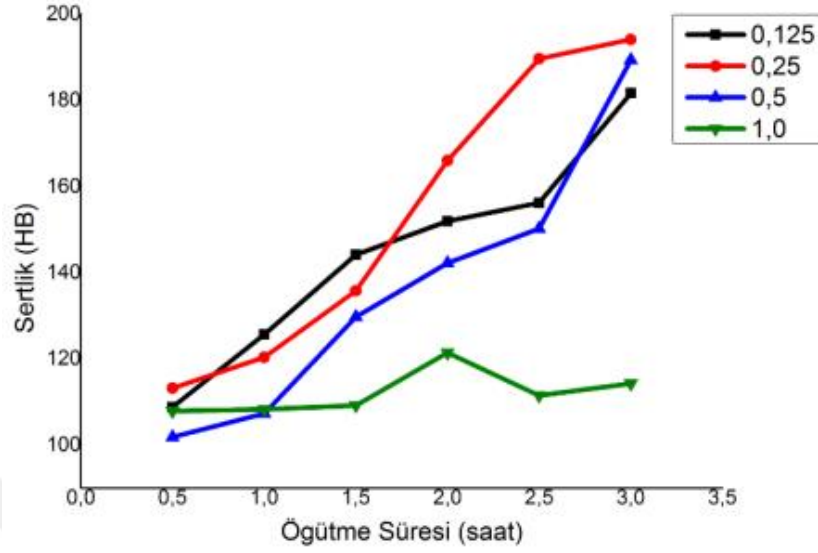


c)

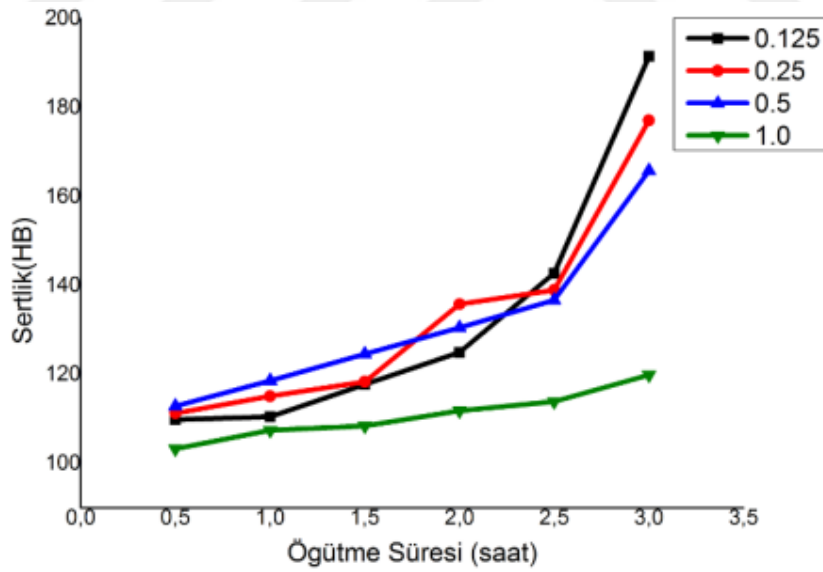


d)

3.1.8. Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi



a)

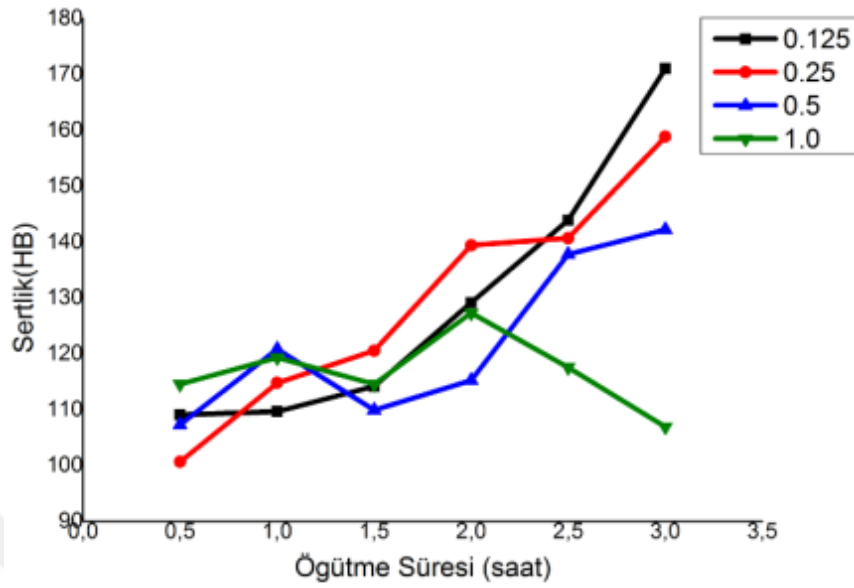


b)

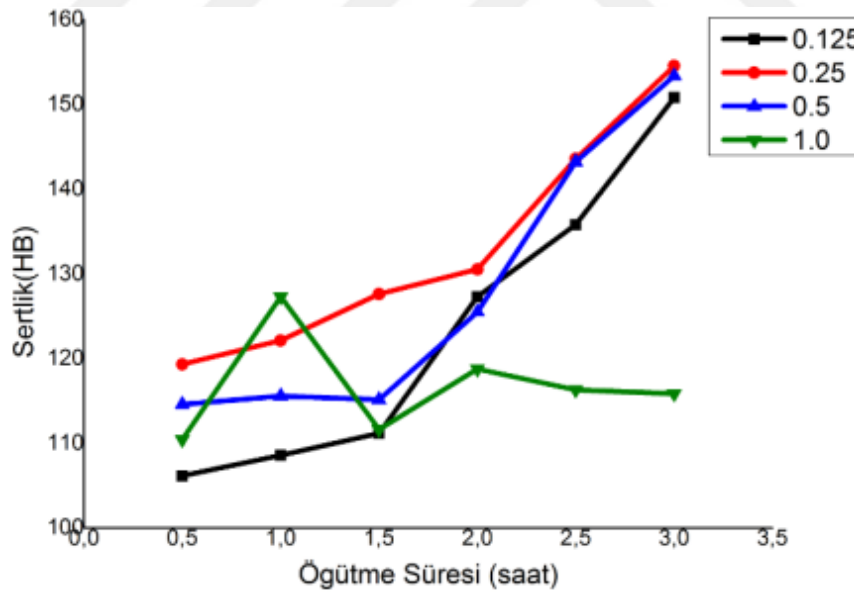
Şekil 96. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre sertlik değişimi;

- a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 96'ın devamı,



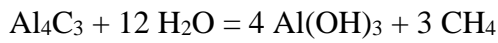
c)



d)

Sıcak presleme ve sıcak preslemeyi takiben uygulanan sinterleme işlemi sonucunda üretilen AA2024-KNT nanokompozitlerinin sertlik değerlerinin mekanik öğütme süresi ve KNT oranı ile değişimi gösterilmiştir (Şekil 96 ve 97). Grafiklerden de anlaşılacağı üzere,

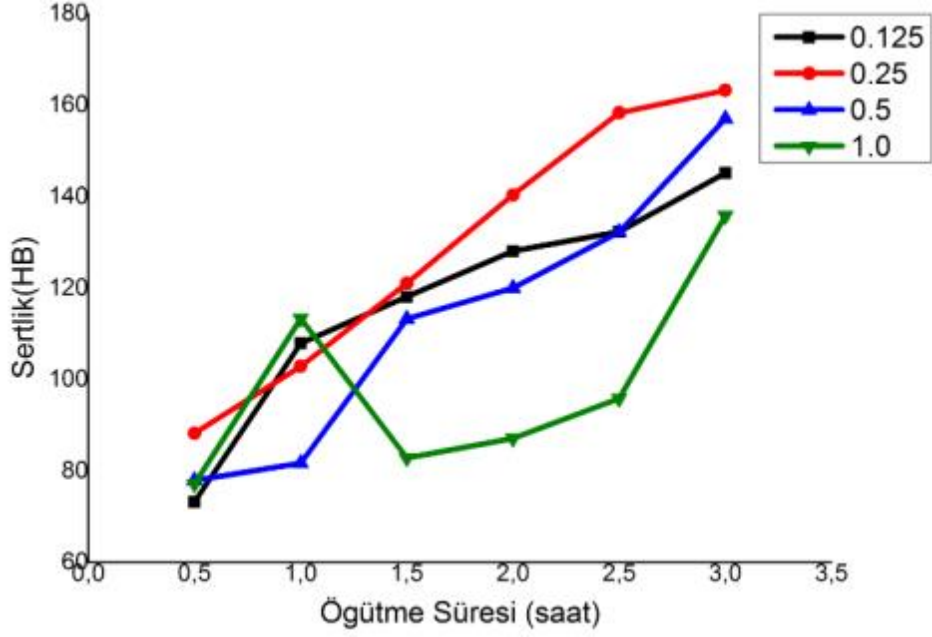
hem sıcak presleme sonrası hem de sinterleme sonrası elde edilen sertlik değerleri artan öğütme süresi ile artmıştır. Bunun sebebi mekanik öğütme sonrası matris tozlarının sertleşmesi, KNT dağılımıdır. Kompozit sertliği üzerine KNT oranının etkisi irdelendiğinde ağ.% 0,125 ve 0,25 KNT içeren nanokompozitlerde yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı bununla birlikte en yüksek KNT oranı olan ağ.% 1 KNT değeri için en düşük sertlik değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi KNT topaklarının mekanik öğütme işlemini engelleyerek hem matris tozu deformasyonunu hem de homojen matris-takviye dağılımını engellemesidir. Literatür çalışmalarında da vurgulandığı gibi KNT takviyeli alüminyum matrisli nanokompozitlerin mekanik özellikleri büyük ölçüde KNT miktarına ve matris içindeki dağılımına bağlıdır. Nitekim, KNT topaklarının varlığı, mekanik performans bakımından büyük bir sorundur. Karbon nanotüplerin boyutu ile metal tozların boyutu arasındaki büyük farktan ve aralarındaki van der Waals etkileşimlerinden dolayı bunu engellemek oldukça zordur. Diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda KNT parçacıklarının Al matriste homojen dağılmayıp yapıda topaklanması durumunda düşük sertlik ve yüksek porozite elde edileceği ifade edilmiştir (Stein vd., 2012). Mekanik özelliklere ilişkin ve yapıda KNT topakları olduğu için, dağıtma ve öğütme işlemini optimize ederek bunları daha da geliştirmek mümkündür. Üretilen kompozitlerin sinterleme aşamasından geçtikten sonra tekrar sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sıcak presleme ve sinterleme sonrası sertlik sonuçları incelendiğinde, sinterleme sonrası sıcak pres yapılarak üretilmiş numunelere göre sertlik değerlerinde azalma görülmüştür. Sertlik değerlerinde görülen bu azalma durumu, matris fazındaki deformasyon sertleşmesinin azalması olarak söylenebilir. Ayrıca, sinterleme sonrası meydana gelen Al_4C_3 'ün hidroskobik (suyu seven ve su ile reaksiyona giren) bir faz olmasındandır (Lloyd vd., 1989; Gonzalez vd., 1995; Fan vd., 2005).



Al_4C_3 fazı, açık havada malzeme içinde olsa dahi havadaki nem ile reaksiyona girerek $Al(OH)_3$ (beyaz toz) ve CH_4 metan gazı açığa çıkar (Iseki vd., 1984; URL-1, 2015). $Al(OH)_3$ malzemenizde oluştuğunda bu faz; bir takviye edici veya sertlik artırıcı bir faz değildir. Bundan dolayı, $Al(OH)_3$ fazı, belirli bir zaman sonra gaz fazına geçerek ortamdaki uzaklaşır ve mikroyapı içerisinde gaz boşlukları meydana getirir. Bu durum, malzemenin sertlik özelliğini olumsuz bir şekilde etkiler. Sıcak presleme sonrası sinterleme yapılan numunelerimizde sertlik değerlerinde görülen azalmanın nedeni olarak gösterilebilir.

Sadece AA2024 alaşım tozundan sıcak preslenerek üretilen numunenin ise sertlik değeri 95.62 HB olarak ölçülmüştür. KNT ilavesi ile üretilen numuneler ile kıyaslandığında en düşük

değere göre bile karşılaştırma yapılacak olursa artış olduğunu görmek mümkündür. Bununla birlikte, AA2024 alaşım tozundan sıcak preslenerek üretilen numunenin sinterleme işleminden geçirildikten sonra ölçülen sertlik değeri ise 62.39 HB olarak ölçülmüştür. Kompozit numunelerin sertliğindeki azalma olarak görülen değişimi bu numunede de görmek mümkündür.

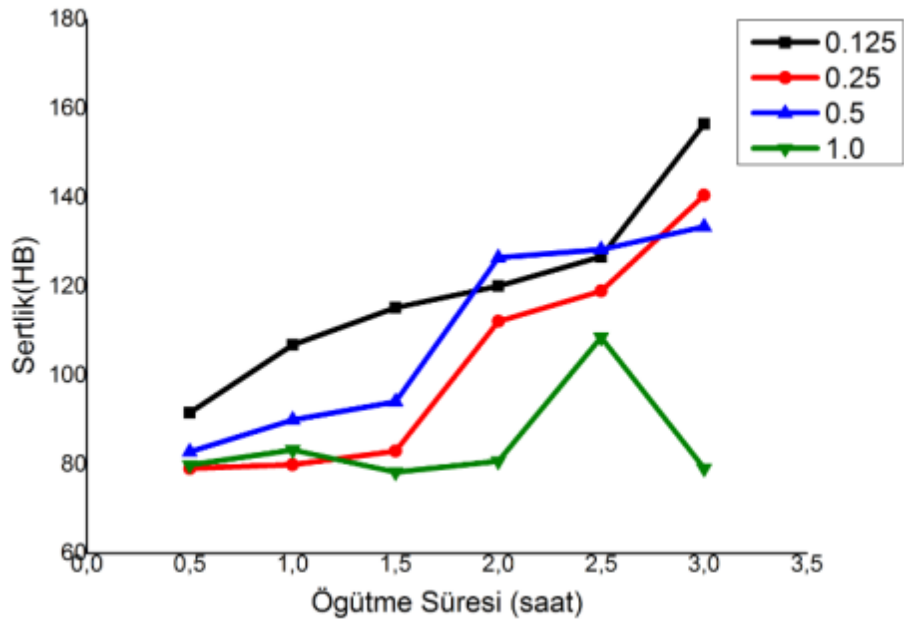


a)

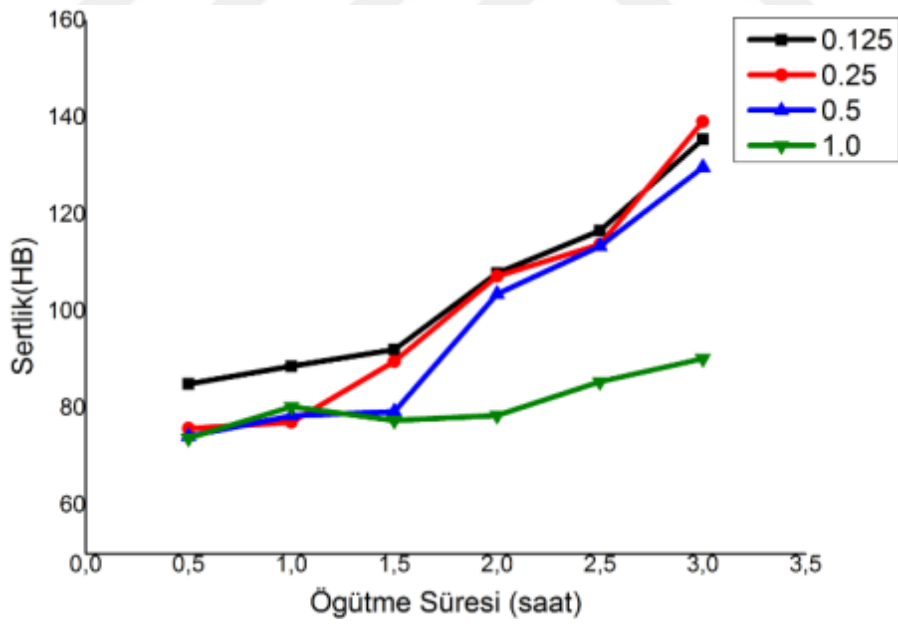
Şekil 97. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre sertlik değişimi;

- a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 97'nin devamı,

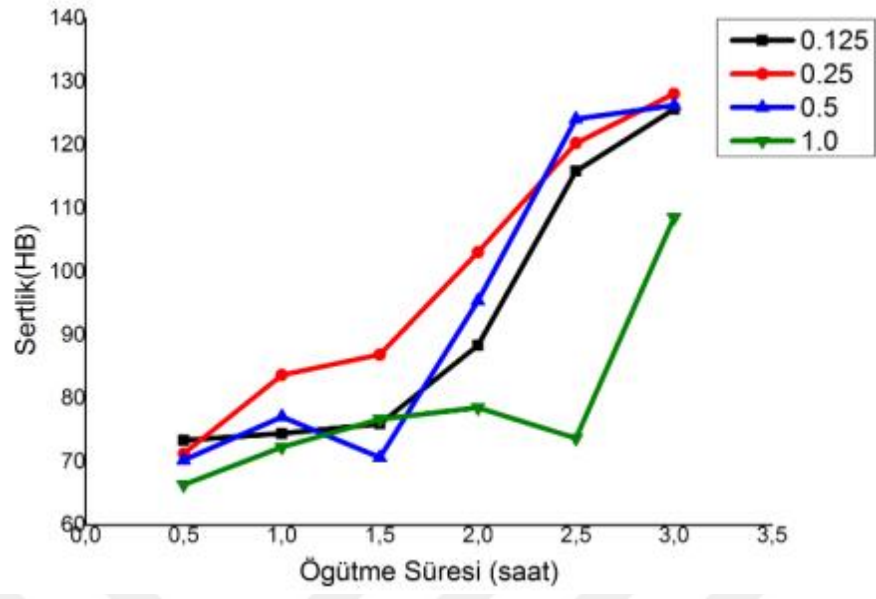


b)



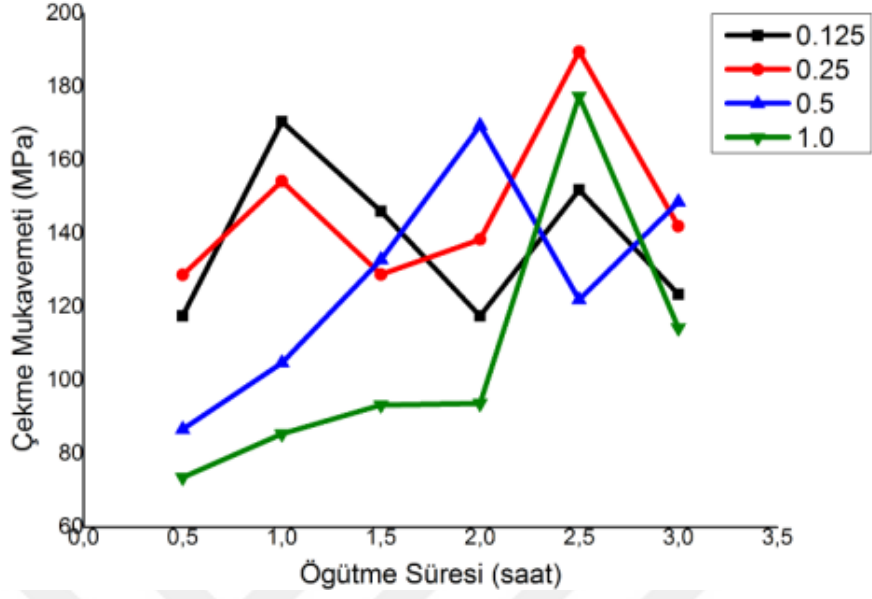
c)

Şekil 97'nin devamı,

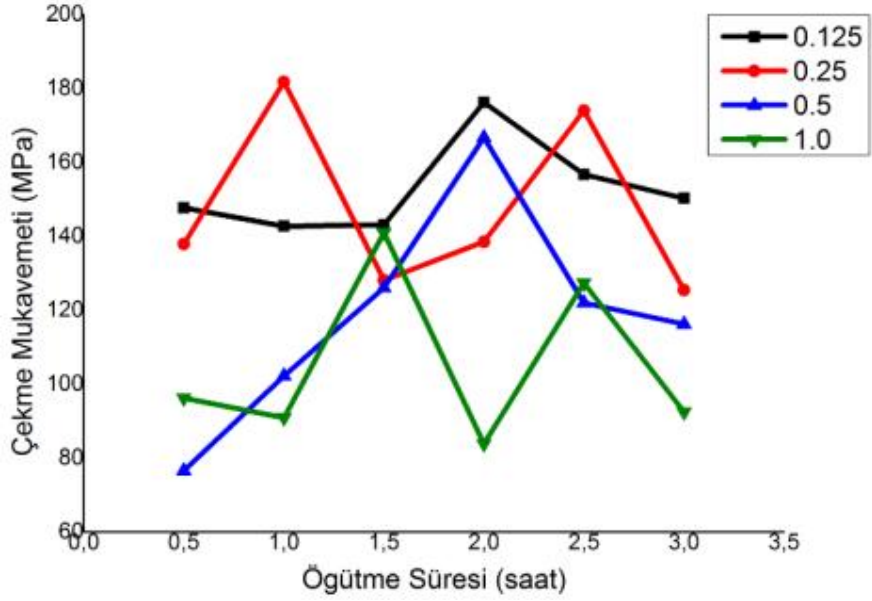


d)

3.1.9. Çekme Mukavemeti Sonuçlarının İncelenmesi



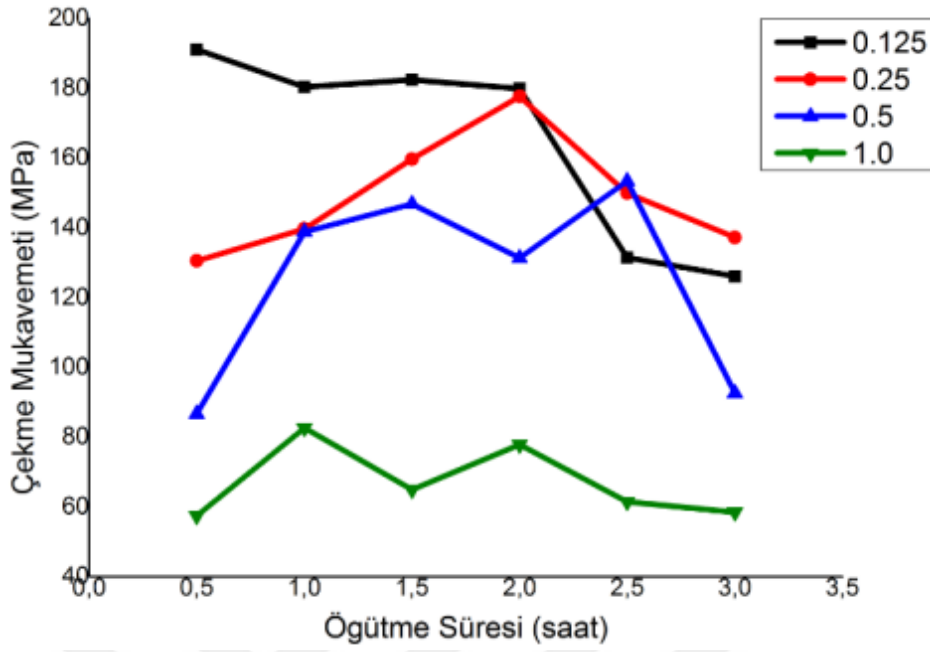
a)



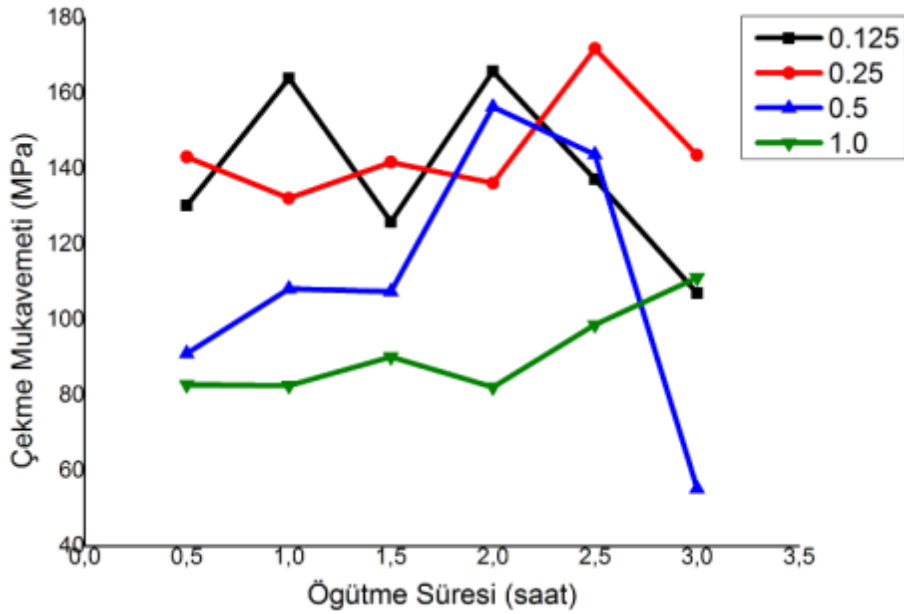
b)

Şekil 98. AA2024 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilip sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde farklı öğütme sürelerini göre çekme mukavemeti değişimi;
a) Ultrasonik dağıtma (15); b) Ultrasonik dağıtma (30);
c) Ultrasonik dağıtma (45); d) Ultrasonik dağıtma (60)

Şekil 98'in devamı,



c)



d)

Sıcak Presleme sonrası içyapıda oluşan gevrek faz (Al_2Cu) sebebiyle, numuneler gevrek karakter göstermiş ve oldukça düşük süneklığe sahip olduklarından çekme değeri alınamamıştır. Bununla birlikte sinterleme sonrası AA2024-KNT nanokompozitlerinin süneklığı artmış ve çekme değerleri alınabilmiştir. Sıcak presleme ve sıcak preslemeyi takiben

uygulanan sinterleme işlemi sonucunda üretilen AA2024-KNT nanokompozitlerinin çekme dayanımı değerlerinin mekanik öğütme süresi ve KNT oranı ile değişimi gösterilmiştir (Şekil 98). Sertlik değerlerinde de görüldüğü gibi en düşük çekme mukavemeti değerleri ağırlık % 1 KNT oranları için elde edilmiştir. Bunun sebebi artan KNT miktarıyla azalan yoğunlaşma kabiliyeti ve artan gözenek değerleridir. Grafiklerden de görüleceği gibi AA2024-KNT nanokompozitlerinin çekme dayanımı değerleri 50 ile 200 MPa değerleri arasında değişmektedir. Öğütme süresi ile çekme dayanımı ilişkisinde görülen düzensiz değişimlerin sebebi iç yapıdan tam olarak giderilemeyen gevrek faz ve KNT topak bölgeleridir. Sadece AA2024 alaşım tozundan sıcak preslerek üretilen numune tekrar sinterlenerek ölçülmüş çekme değeri ise 125.629 MPa olarak ölçülmüştür. Takviye malzemesi içermeyen alaşım numunesi içinde sinterleme işleminin çekme değerinde olumlu olarak etki gösterdiğini görmek mümkündür.

4. TARTIŞMA

- AA2024 matrisli KNT takviyeli metal matrisli nanokompozit malzemeyi oluşturan 6 farklı öğütme süresinden (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 saat) geçirilerek mekanik öğütülen kompozit tozların toz boyut ölçüm sonuçlarına göre, öğütme zamanı arttıkça toz boyutunda azalma olmuştur. Toz boyutundaki azalmayı (Şekil 53) grafiklerden açıkça görmek mümkündür. Bu azalmanın sebebi olarak, başlangıçtaki kullanılmak üzere hazırlanan matris tozlarının yapısının küresellikten ziyade çubuksu yapıda olduğunu toz morfolojisi için elde edilen SEM görüntülerinde gözlemlenmektedir. Mekanik öğütme sırasında matris tozlarının ince oldukları yerlerden kopması sebebiyle toz boyutunda azalma görmek mümkündür.
- KNT takviyeli MMK'lerin üretiminde öngörülen en temel problem, takviye fazının yapı içerisinde homojen olarak dağılım göstermemesidir. Bu durumun sebebi olarak, matris malzemesi olarak kullanılan metalik toz boyutunun (μm) takviye fazı olarak seçilen KNT'lerin boyutundan (nm) daha fazla olmasıdır. Düşük KNT içeriğinde daha homojen bir dağılım görülmektedir. Ancak, KNT içeriği arttıkça tane sınırlarında daha fazla topaklanma oluştuğunu kompozit malzemenin iç yapı incelemeleri için elde edilen SEM görüntülerinde görmek mümkündür. Bu durum daha önce yapılmış çalışmalarda da belirtilmektedir (Deng vd., 2007; Esawi vd., 2007; Liu vd., 2012).
- Yoğunluk grafikleri (Şekil 92) incelendiğinde, öğütme süresi arttıkça yoğunluk değerleri genel olarak azalma göstermiştir. Bu elde edilen sonuç, toz boyutu ile tersi bir olay söz konusudur. Azalmanın nedeni olarak, kısmi yoğunluk artışı ile ilgili olduğu söylenebilir. Kısmi yoğunluk ile ölçülen yoğunluk, ters orantılı olarak değişmektedir. Kısmi yoğunluk artışıdaki temel belirleyici faktör, tozların yüzey pürüzlülüğündeki artıştır. MA/MÖ sırasındaki artışla birlikte, tozların şekli ve yüzey şartları değişmektedir. Bununla birlikte, bu durumun bir diğer nedeni olarak, çok duvarlı karbon nanotüplerin bir işlem kontrol ajanı olarak hareket etmeleri, soğuk kaynağın etkisini en aza indirmesi ve partikül kırma işleminin lehine olması olarak gösterilebilir. Öğütme süresi arttıkça tozların yüzey pürüzlülüğü artarken, ölçülen gerçek yoğunluk azalmaktadır. Şekillendirilen tozlarda kısmi yoğunluktaki

artışın engellenmesinde, iki etkin yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, tozların şekillendirilmesi sırasında birbiri üzerinden kolay kayması için yağlayıcıların kullanılması, ikincisinde, uygulanan presleme kuvvetinin artırılmasıdır.

- Sıcak presleme sonrası sinterlenmiş kompozit malzemelerin yoğunluklarının, öğütme süresinin artması ile birlikte genel olarak azaldığını görmek mümkündür (Şekil 93). Sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş numunelerin tekrar sinterleme aşamasından geçirilmesi ile birlikte az miktarda karbon nanotüp ilavesi ile kompozitlerin yoğunluğunun, artan karbon nanotüp içeriği ile artarken, büyük miktarda karbon nanotüpler, kompozitlerin yoğunluğunu azalttığını bazı değerlerde görmek mümkündür. Bu, az miktarda karbon nanotüp ilavesinin, AA2024-KNT nanokompozitlerin yoğunluğunun artmasına neden olan mikro boşlukları doldurabilmesi nedeniyle olabilir. Bununla birlikte, büyük miktarlarda karbon nanotüplerin AA2024-KNT tozların ve karbon nanotüplerin harmanlanmış tozlarında birbirine karışmasına meyillidir. Karbon nanotüpler topaklanması sadece numunelerin yoğunlaşmasını engellemekle kalmaz, aynı zamanda kusur kaynağı olur. Dolayısıyla, kompozitlerin yoğunluğunda azalma görmek mümkündür. Bununla birlikte, bazı numunelerde sinterleme sonrasında meydana gelen yoğunluk değerlerindeki düşüşün nedeni olarak, çok duvarlı karbon nanotüplerin belirli bir sıcaklık derecesinden sonra oksitlenmeye başladığını bazı çalışmalarda görmek mümkündür (Recibido: 5 de Julio de 2015; Aceptado: 18 de Noviembre de 2015). Oksitlenmeden dolayı karbon nano tüplerin gözlemlenemediği ve bundan dolayı, kompozit malzeme içerisinde oluşabilecek boşluklarında yoğunluk değerlerinde düşüşe neden olabileceği söylemek mümkündür.
- KNT takviyeli alüminyum nanokompozitlerin mekanik özellikleri büyük ölçüde kompozitte KNT içeriğine ve ayrıca matristeki dispersiyona bağlıdır. Nitekim, karbon nanotüplerin topaklanmalarının varlığı, mekanik performans açısından büyük bir sorundur. Bu durumun, karbon nanotüplerin boyutu ile metal tozları arasındaki büyük farktan ve çekici van der Waals etkileşimlerinden dolayı üstesinden gelmek zordur. KNT partiküllerin Al matriste üniform dağılmayıp yapıda topaklanması durumunda daha düşük sertlik ve daha yüksek porozite elde edileceği ifade edilmiştir (Stein vd., 2012). Mekanik özelliklere ilişkin ve yapıda KNT topaklanmaları olduğu için, dağıtma işlemini optimize ederek bunları daha da geliştirmek mümkündür.

- Sıcak presleme ile yoğunlaştırılarak üretilmiş kompozit malzemelerin sertlik değerlerinde, öğütme süresinin artması ile birlikte artış meydana geldiği görülmektedir (Şekil 96). En yüksek sertlik değerleri, en düşük KNT oranlarını içeren kompozit malzemelerde görülmektedir. KNT oranının artması ile birlikte, sertlik değerlerinde yükselme beklenirken düşme olmasının sebebi olarak, KNT takviye malzemesinin AA2024 matrisinin içerisinde homojen olarak dağılmaması ve tane sınırlarında birikmiş olmasıdır. KNT takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, KNT oranı ve KNT'nin matris içerisindeki homojen olarak dağılım gösterip göstermemesinden önemli ölçüde etkilenmektedir.
- Sıcak presleme sonrası sinterleme işlemi gerçekleştirilmiş kompozit malzemelerin sertlik değerlerinde görülen azalmayı sertlik değerlerinin grafiklerinde görülmektedir (Şekil 97). Sertlik değerlerindeki azalmanın nedeni, sinterleme sonrası meydana gelen Al_4C_3 fazının su ile tepkimeye girmesidir. Tepkime sonrası ortaya CH_4 (metan gazı) ve $Al(OH)_3$ açığa çıkar (Iseki vd., 1984; URL-1, 2015). Normal şartlarda Al_4C_3 fazı sarı renkte oluşur ama su veya havadaki nemle reaksiyon sonucu çökelen fazın renginin beyaz olması $Al(OH)_3$ ten kaynaklanmaktadır (URL-2, 2013). $Al(OH)_3$ malzemenizde oluştuğunda bu faz; bir takviye edici veya sertlik artırıcı bir faz değildir. Bundan dolayı bu faz mikroyapıda nemli bir ortamda uzun süre kalmaz. Gaz fazına geçtiği için malzeme içerisinde gaz boşlukları meydana getirir ve bu durumda malzemenin sertlik değerinde düşmeye neden olabilir. Al_4C_3 , normalde sert bir fazdır. Her ne kadar bir takviye edici, mekanik özellikleri artırıcı bir faz ve bir karbür olarak gözükse de aslında mikro yapıda kararlı kalması zordur.
- Sertlik değerlerinde meydana gelen azalmanın bir diğer nedeni ise, iç yapılara ait SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi, tane sınırlarında topaklanan KNT'lerin, sinterleme süresindeki artmanın sebebiyle birbirlerine kaynaklandığı ve kendi aralarında daha kuvvetli bağ meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır (daha kalın yapılar meydana gelmesinden dolayı). Bununla birlikte, sertlik değerleri ile yoğunluk değerlerinin birbiri ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Sinterleme zamanındaki artış ile birlikte, takviye fazının boyutunda da artış görmek mümkündür. Tane sınırlarında daha yoğun bir şekilde yerleşen KNT'lerin boyutundaki artış, sertlik değerlerini olumsuz yönde etkilenmektedir. KNT'lerin boyutundaki artıştan dolayı, dislokasyonların bu parçacıkları daha kolay kesebilmesine sebep olmaktadır. Matris fazına uygulanan kuvvetin takviye fazına tam olarak iletilmemesi nedeniyle, sertlik

değerinde bir düşüş oluştuğunu söylemek mümkündür. Takviye fazının boyutundaki artış, matris ile takviye fazı arasındaki temas alanının daha fazla olmasını sonucunu gösterir. Fakat sertlik değerlerinde düşme, temas alanının artmasına rağmen, KNT'ler ile matris fazı arasında meydana gelen ara yüzey bağlarının zayıf olmasından dolayıdır.

- Kompozit malzemenin çekme mukavemetinin iyi olması için, iyi bir yük aktarımı sağlamak gerekir. Bunun içinde iyi şekilde ara yüzey bağlanması oluşmalıdır. İyi bir ara yüzey bağı kompozit malzemenin matristen takviye fazına yeterli yük transferini sağlar. Buda çekme mukavemeti açısından önemlidir.
- Daha fazla miktarda karbon nanotüp, yoğunlaşma sürecini engeller, bileşiklerin nispi yoğunluğunun azalmasına neden olur, ayrıca, kümelenme içindeki karbon nanotüpleri arasındaki bağ çok zayıftır ve mekanik özelliklerde bozulmaya neden olur. Bu çalışma, karbon nanotüp miktarının mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyebileceğini doğrulayan diğer çalışmalarla uyumludur. Mekanik özelliklere gelince ve hala KNT topaklanmaları olduğu için, dağıtma işlemini optimize ederek bunları daha da geliştirmek mümkündür.
- KNT'ler rastgele matriste düzenlendiğinden, elektronlar KNT eksenine yönünde etkili bir şekilde taşınmamış olabilir. KNT-Al ara yüzlerinde elektron saçılması bu durumu daha da ciddileştirmektedir. Sonuç olarak, KNT / Al kompozitinin elektrik iletkenliği, KNT birleşmesi nedeniyle biraz azalmaktadır. KNT miktarının artmasıyla topaklanmanın artmasından dolayı saçılımın daha fazla olabileceği beklenmektedir. Bu durumda, elektrik iletkenliğini daha kötü etkilemektedir. Genelde alüminyuma nazaran nanotübün daha düşük elektrik iletkenliğine sahip olduğu bilinir (Srivasta vd., 2008). SEM mikro yapı görüntülerinde gözlemlendiği gibi, nanotüpler tane yüzeylerinde topaklanarak taneler arasında farklı bir faz gibi davranır. Bu durumda iki tane arasında yük taşıyıcıların saçılımını artırarak iletkenliğin azalmasına yol açar. Farklı KNT oranlarında üretilen kompozitlerin elektriksel iletkenliği artan KNT içeriği ile sürekli olarak azalmıştır (Şekil 94). Genel eğilim olarak KNT ilavesi ile yoğunluktaki azalma kompozit yapısındaki porozitelerin mevcudiyeti ile açıklanabilir. Bahsi geçen bu olumsuzluklar elektron hareketi için dezavantaj oluşturmaktadır.
- Sıcaklık değişimi ile birlikte elektrik iletkenliği değerlerimizde de artan seviye de değişim gözlemlenmiştir (Şekil 95). Sıcaklık arttıkça, elektriksel iletkenlik için rol

oynayan şarj taşıyıcıların sayısında bir artış görülür. Yapılan bazı çalışmalarda KNT oranının artması ile elektrik iletkenliğinin arttığını gözlemlemişlerdir (Omer Guler, 2015). Nedeni olarak, KNT nanokompozitte ek iletken yollar sağlar ve sırayla iletkenlik değerlerinin arttığı gösterilmiştir. Bu çalışmada, KNT'lerin içeriğinin artmasıyla elektrik iletkenliği değerlerimizde düşme meydana gelmiştir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi KNT miktarındaki artış ile birlikte topaklanma daha fazla olduğundan bu yüzeylerde elektron saçılmasının daha çok oluşabileceği söylenebilir. Bu durumun sonucu olarak da KNT miktarının artmasıyla elektrik iletkenliği değerlerimizde düşme meydana gelebilir.

- Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin sadece matris ve takviye fazı tarafından değil, bununla birlikte aralarındaki bağlanma durumunun da etkisinin olduğu kabul edilmektedir. Bu iki malzeme arasındaki yük transferini anlamak için malzemenin kırılma davranışının da incelenmesi gerekir. Kompozit malzemenin kuvvetindeki olumlu veya olumsuz gelişmeler, büyük oranda, matris ile KNT arasındaki ara yüz yardımıyla yeterli yük aktarımına bağlıdır. İyi bir yük aktarımı olabilmesi için, ara yüzey bağlamasının orta yüzeylerde olması gerekir. KNT'leri gösteren SEM fotoları incelendiğinde, boru şeklinde bir yapıya sahip KNT'ler gözlemlemek mümkündür (Şekil 88-91). Bu durumdan, KNT'lerin Al matrisinde homojen şekilde dağıldığı çıkarılır. KNT'lerin çekme mukavemetine uğraması ile oluşan çukurlar, o malzemedeki KNT'lerin birçoğunun, takviye ile matris fazı arasında kayma nedeniyle meydana gelen gerilme aktarımını gösteren kırılma yüzeyine hemen hemen dik biçimde çekilme olduğunu göstermektedir. Bu durumda, KNT'ler ve Al matris arasında yüksek bir bağlanma kuvvetinin elde edilebildiğini göster.

5. SONUÇLAR

Toz Metalürjisi Yöntemi ile AA2024 Matrisli Karbon Nanotüp Takviyeli Metali Matrisli Nanokompozit Üretimi Karakterizasyonu ve Sinterlemenin Sıcak Pres Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi başlıklı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- AA2024 alaşımının içerisine ağırlıkça dört farklı oranda (% 0.125, % 0.25, % 0.5 ve % 1.0) KNT ilave edilerek 6 farklı öğütme süresinden (05, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 saat) geçirilerek mekanik öğütülen nanokompozit tozların toz boyut ölçüm sonuçlarının gösterdiği değerlere göre, öğütme zamanı arttıkça toz boyutunda azalma olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 53).
- Kompozit malzeme tozlarının elde edilen toz boyutu değerlerinde, en yüksek değer 97.448 μm , en düşük değer ise 9.042 μm olarak ölçülmüştür.
- Yapılan ölçümler, öğütme süresi arttıkça yoğunluk genel olarak azalmaktadır. Bu sonuçta toz boyutu ile tersi bir olay söz konusudur. Bu durumun nedeni, kısmi yoğunluk artışı ile ilgilidir. Ağırlıkça dört farklı oranda (ağ. % 0.125, ağ. % 0.25, ağ. % 0.5 ve ağ. % 1.0) takviye malzemesi olarak KNT içeren kompozit malzemelere ait teorik yoğunluk değerleri sırasıyla, 2.779, 2.777, 2.775 ve 2.771 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır.
- Kompozit malzemelerin yoğunluk ölçümlerinde, sıcak presleme ile yoğunlaştırarak üretilen numuneler için elde edilen en yüksek değer 2.717 g/cm^3 (ağ.%0.5 KNT), en düşük değer ise 2.501 g/cm^3 (ağ.%1.0 KNT) dür. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait yoğunluk değeri, 2.707 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır.
- Sıcak presleme sonrası sinterleme işleminden geçirilerek üretilen numunelere ait yoğunluk ölçümlerinde, en yüksek değer 2.733 g/cm^3 (ağ.%0.5 KNT), en düşük değer ise 2.541 g/cm^3 (ağ.%1.0 KNT) dür. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait yoğunluk değeri, 2.643 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır.
- Sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş numunelerin tekrar sinterleme aşamasından geçirilmesi ile birlikte az miktarda karbon nanotüp ilavesi ile kompozitlerin yoğunluğunun, artan karbon nanotüp içeriği ile artarken, büyük miktarda karbon nanotüpler, kompozitlerin yoğunluğunu azalttığını bazı değerlerde görmek mümkündür (Şekil 93).

- Sertlik değerlerinde, sıcak presleme ile yoğunlaştırılarak üretilmiş kompozit malzemelerin, öğütme zamanının artmasıyla birlikte artış olduğu görülmektedir (Şekil 96). Bununla birlikte sıcak presleme sonrası sinterleme işlemine tabi tutulan numunelerin sertlik değerlerinde sıcak presleme ile üretilen numuneler ile karşılaştırıldığında, azalma görülmektedir (Şekil 97). Ancak, KNT içeriğinin artmasıyla, sertlik değerlerinde, öğütme zamanı ile meydana gelen olumlu değişim görülmemektedir. Bu sonuç, hem sıcak presleme ile hem de sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemeler içinde geçerlidir (Şekil 96 ve 97).
- Sıcak presleme ile yoğunlaştırılarak üretilmiş kompozit malzemelerin sertlik ölçümlerinde, en yüksek değer olarak 194.11 HB (ağ.% 0.25 KNT) elde edilmiştir. En düşük değer ise 103.26 HB (ağ.%1.0 KNT) elde edilmiştir. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait sertlik değeri, 95.62 HB olarak ölçülmüştür.
- Sıcak presleme sonrası sinterleme yapılmış kompozit malzemelerin sertlik ölçümlerinde elde edilen değerlerden ise, en yüksek 163.23 HB (ağ.%0.25 KNT) iken en düşük değer 66.35 HB (ağ.%1.0 KNT) olarak bulunmuştur. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait sertlik değeri, 62.39 HB olarak ölçülmüştür.
- Uzama davranışında gözlemlenen azalma, sertlik davranışı ile ilişkilidir. Çekme mukavemeti değerlerinde, tıpkı sertlik değerlerinde olduğu gibi KNT içeriği ile azalma görülmektedir (Şekil 98). Kompozitin gerilme altında daha erken kırılmasına yol açan bazı mikro boşluklar görmek mümkündür. Bu gibi etkenler kompozit malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.
- Sıcak presleme sonrası sinterleme ile üretilen kompozit malzemelerde en yüksek çekme mukavemeti değeri, 191.083 MPa'dır. Bu değer ağ.%0.125 KNT takviye elemanı içeren numuneye aittir. En düşük değer ise 57.370 MPa'dır. Elde edilen bu değer de ağ.%1.0 KNT içeren numunede ölçülmüştür. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait çekme mukavemeti değeri, 125.629 MPa olarak ölçülmüştür.
- Elde edilen elektrik iletkenlik değerlerinde ise, sıcak presleme ile yoğunlaştırılarak üretilmiş kompozit malzemelere ait en yüksek değer 28.6 IACs, en düşük değer ise 2.46 IACs olarak ölçülmüştür. En yüksek değer, ağ. % 0.125 KNT, en düşük değer de ağ. % 1.0 KNT takviye elemanı içeren numunelere aittir. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait elektrik iletkenlik değeri, 30.7 IACs olarak ölçülmüştür.
- Sıcak presleme sonrası sinterlenmiş kompozit malzemelerden elde edilen elektrik iletkenlik değerleri, en yüksek 38.36 IACs (ağ. % 0.125 KNT), en düşük değer 3.97

IACs (ağ. % 1.0 KNT) olarak ölçülmüştür. Saf AA2024 tozundan üretilen malzemeye ait elektrik iletkenlik değeri, 33.8 IACs olarak ölçülmüştür.

- Bu çalışmada, KNT'lerin içeriğinin artmasıyla elektrik iletkenliği değerlerimizde düşme meydana gelmiştir (Şekil 94). KNT miktarındaki artış ile birlikte topaklanma daha fazla olduğundan bu yüzeylerde elektron saçılmasının daha çok oluşabileceği söylenebilir. Bu durumun sonucu olarak da KNT miktarının artmasıyla elektrik iletkenliği değerlerimizde düşme meydana gelebilir. Sıcaklık değişimi ile birlikte elektrik iletkenliği değerlerimizde de artan seviye de değişim gözlemlenmiştir (Şekil 95).



6. ÖNERİLER

- Takviye malzemesi olarak kullanılan KNT'lerin matris içerisinde daha homojen dağılım göstermesi için farklı yöntemler denenebilir.
- Mekanik alaşımla aşamasında kullanılan bilye-toz oranı için farklı değerler kullanılarak, kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi incelenebilir.
- Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler ile çalışılarak, KNT'lerin duvar çeşidinin kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi araştırılabilir.
- Mekanik alaşımlama işleminde işlem kontrol kimyasalları eklenerek, KNT'lerin topaklanmasına olan etkisi araştırılabilir.
- Mekanik alaşımlama işlemi için farklı yağlayıcılar kullanılarak KNT'lerin dağılımına ve kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi incelenebilir.
- Sinterleme sonrası sıcak presleme uygulamasında, sinterleme süresi ve sıcaklığı değiştirilerek kompozit malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılabilir.
- Presleme işleminden sonraki aşama olan sinterleme de sinterleme süresi özellikle soğuk pres yöntemi ile üretilen numunelerde bir saatten fazla uygulanabilir.
- Toz yöntemi üretim aşamasında tek yönlü pres yerine yoğunluk farkı olmaması ve yüksek yoğunluk için çift yönlü pres yapılabilir.
- Farklı sıcak presleme basınçları ile numunenin yoğunlaştırılmasına ve malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi incelenebilir.
- Tek eksenli presleme yerine çift eksenli presleme yöntemi ile malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılabilir.
- Mekanik alaşımla işlemi için farklı devirlerde ve farklı sürelerde kompozit malzeme tozu üretimi yapılarak, kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

- Adamiak, M., 2008. Mechanical Alloying for Fabrication of Aluminium Matrix Composite Powders with Ti-Al Intermetallics Reinforcement, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 31, 191-196.
- Al-Qutub, A. M., Khalil, A., Saheb, N. and Hakeem., 2013. Wear and Friction Behavior of Al6061 Alloy Reinforced with Carbon Nanotubes, A. S., *Wear*, 297, 752-761.
- Asthana, R., 1998. Processing Effect on The Engineering Properties of Cast Metal Matrix Composites, *Advanced Performance Materials*, 213-255.
- Bakshi, S. R. and Agarwal, A., 2011. An Analysis of The Factors Affecting Strengthening in Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composites, *Carbon*, 49, 533-544.
- Bal, S. and Samal, S., 2007. Carbon Nanotube Reinforced Polymer Composites-A state of the Art., *Bulletin of Materials Science*, 30, 379-386.
- Baradeswaran, A. and Perumal, A. E., 2013. Influence of B₄C on the Tribological and Mechanical Properties of Al 7075 – B₄C composites, *Composites Part B*, 54, 146-152.
- Bastwros, M. M. H., Esawi, A. M. K. and Wifi, A., 2013. Friction and Wear Behavior of Al-CNT Composites, *Wear*, 307, 164-173.
- Berghezan, A., 1978. Basic Design Concepts and Specific Methods for The Fabrication of Metal Matrix Composites Materials, *Advance in Composite Materials*, ed., G. Piatti, 5-17.
- Bradbury, C. R., Gomon, J. K., Kollo, L., Kwon, H. and Leparoux, M., 2014. Hardness of Multi Wall Carbon Nanotubes Reinforced Aluminium Matrix Composites, Journal of Alloys and Compounds, 585, 362-367.
- Canakci, A., Varol, T. ve Nazik, C., 2011. The Effect of Amount of Methanol on the Properties of Al-Al₂O₃ Composite Powders, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ekim, Ankara 2011, *Bildiriler Kitabı*, 122-129.
- Casati, R. and Vedani, M., 2014. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles-A Review, *Metals*, 4, 65-83.
- Chen, B., Jia, L., Li, S., Imai, H., Takahashi, M. and Kondoh, K., 2014. In situ Synthesized Al₄C₃ Nanorods with Excellent Strengthening Effect in Aluminum Matrix Composites, *Adv. Eng. Mater.* 16, 972-975.
- Chen, B., Shen, J., Ye, X., Imai, H., Umeda, J., Takahashi, M. and Kondoh, K., 2017. Solid State Interfacial Reaction and Load Transfer Efficiency in Carbon Nanotubes (CNTs) Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Carbon* 114, 198-208.

- Contreras-Navarrete, J. J., Granados-Martínez, F. G., Domratcheva-Lvova, L., Flores-Ramírez, N., Cisneros-Magaña, M. R., García-González L., Zamora-Peredo, L. and Mondragón-Sánchez, M. L., 2015. MWCNTs Oxidation by Thermal Treatment with Air Conditions, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Gral. Francisco J. Múgica S/N, Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, México 58030; Universidad Veracruzana Calzada Ruiz Cortines, 455, Costa Verde, Boca del Rio, Veracruz, México 94294; Posgrado en Metalurgia, Instituto Tecnológico de Morelia Av. Tecnológico 1500. Lomas de Santiaguito, Morelia, Michoacán, México, 58120.
- Çalın, R., 2006. Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-14.
- Çıtak, R., 1998. Metalik Baryum-Alüminyum Başlangıç Tozlarının Düşük Sıcaklıkta Oksidasyonu ile Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara , 4-26.
- Dasgupta, R. and Meenai, H., 2005. SiC Particulate Dispersed Composites of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy: Property Comparison with Parent Alloy, *Materials Characterization*, 54, 438-445.
- Davis, RM, Koch CC., 1987. *Scripta Metali*, 21, 305-10.
- Davis, RM, Mcdermott B and Koch CC., 1988. *Metali Trans*, A19:2867-74.
- Deaquino Lara, R., Gutierrez-Castaneda, E., Estrade-Guel, I., Hinojosa-Ruiz, G., Garcia-Sanchez, E., Herrera-Ramirez, J. M., Perez-Bustamante, R. and Martinez-Sanchez, R., 2014. Structural Characterization of Aluminium Alloy 7075-Graphite Composites Fabricated by Mechanical Alloying and Hot extrusion, *Materials and Design*, 53, 1104-1111.
- Deng, C. F., Wang, D. Z., Zhang, X. X. and Li, A. B., 2007. Processing and Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum Composites, *Materials Science and Engineering: A*, 444, 138-145.
- Esawi, A. and Morsi, K., 2007. Dispersion of Carbon Nanotubes (CNTs) in Aluminum Powder, *Composites Part A*, 38, 646-650.
- Esawi A. M. K., Morsi K., Sayed A., Abdel Gawad A. and Borah P., 2009. Fabrication and Properties of Dispersed Carbon Nanotube-Aluminum Composites, *Material Science Engineering A*, 508, 167-173.
- Esawi, A.M.K., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M. and Lanka, S., 2010. Effect of Carbon Nanotube (CNT) Content on the Mechanical Properties of CNT-Reinforced Aluminium Composites, Department of Mechanical Engineering and the Yousef Jameel Science and Technology Research Center, The American University in Cairo (AUC), AUC Avenue, P.O. Box 74, New Cairo 11835, Egypt; Department of Mechanical Engineering, San Diego State University, 5500 Campanile Drive, San Diego, CA 92182, USA.

- Fan, T., Yang, G. and Zhang, D., 2005. Prediction of Chemical Stability in SiCp/Al Composites with Alloying Element Addition using Wilson Equation and An Extended Miedema model, *Materials Science and Engineering A*, 394, 327- 338.
- Fogagnolo, J.B., Velasco, F, Robert, M.H. and Torralba, J.M., 2003. Effect of Mechanical Alloying on the Morphology, Microstructure and Properties of Aluminium Matrix Composite Powders, *Materials Science and Engineering A*, 342 , 131-143.
- German, R.M., 2005. *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*, Princeton, 221.
- German, R. M., 2007. *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing 1st ed.*, Çeviri Editörleri, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara, 20-40.
- Gonzalez, G., Salvo, L., Suery, M. and Esperance, G.L, 1995. Interfacial Reactions in Al-Mg Metal Matrix Composites Reinforced with (Sn/Sb) Oxide Coated SiC Particles, *Scripta Metallurgica*, 33, 1669-1975.
- Guler, O., Guler, S.H., Yo, F., Aydin, H., Aydin, C., El-Tantawy, F., El-Shazly, M.D. and El-Shazly, A.N.F., 2015. Electrical and Optical Properties of Carbon Nanotube Hybrid Zinc Oxide Nanocomposites Prepared by Ball Mill Technique, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 23:10, 865-869, Department of Metallurgical and Materials Science, Engineering Faculty, Firat University, Elazig 23119; Department of Physics, Faculty of Science, Suez Canal University, Ismailia, Egypt
- Harris CC., 1967. *Trans Soc Min Engrs*, 238:17.
- Hyo, S.L., Jae, S.Y., Soon, H.H., Duk, J.Y. and Kyung, H.N., 2001. The Fabrication Process and Mechanical Properties of SiCp/Al-Si Metal Matix Composites for Automobile Air-Conditioner Compressor Pistons, *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 202-208.
- Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A. and Lavernia, E. J., 1991. Particulate Reinforced Metal Matrix Composites - A Review, *Journal of Materials Science*, 26, 1137-1156.
- Iseki, T., Kameda, T. and Maruyama, T., 1984. Interfacial Reactions Between SiC and Aluminum during Joining, *Journal of Materials Science*, 19, 1962-1998.
- Izciler, M. ve Muratoglu, M., 2003. Wear Behaviour of SiC Reinforced 2124Al Alloy Composite in RWAT System, *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 67-72.
- Jafari, M., Enayati, M.H., Abbasi, M.H. and Karimzadeh, F., 2009. Thermal Stability and Structural Changes during Heat Treatment of Nanostructured Al2024 Alloy, *J. Alloy Compd.* 478, 260–264.
- Kaya, Y., 2017. Alüminyum (Al1070) Matrisli Silisyum Karbür (SiC) ve Bor Karbür (B₄C) Takviyeli Hibrit Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

- Kok, M., 2005. Production and Mechanical Properties of Al₂O₃ Particle-Reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites, Journal of Materials Processing Technology, 161, 381-387.
- Koczak, M. and Premkumar, M.K., 1989. High Performance Powder Metallurgy Aluminum Alloys an Overview. Philadelphia, 121.
- Kwon, H., Park, D.H., Silvian, J.F. and Kawasaki, A., 2009. Investigation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials, Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB) du CNRS, 87 Avenue du Dr. Albert Schweitzer, Pessac 33608, France; Department of Materials Processing Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan.
- Kwon H., Park D.H., Silvian J.F. and Kawasaki A., 2010. Investigation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials. Journal of Composite Science Technology, 70, 546–550.
- Lee, P.Y. and Koch C., 1987. *Appl Phys Lett*, 50,1578-80.
- Li, C.H., Qiu, R.S., Luan, B.F., He, W.J. and Li, Z.Q., 2017. Hot Deformation and Processing Maps of As-Sintered CNT/Al–Cu composites Fabricated by Flake Powder Metallurgy , College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; College of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China.
- Liao, J. and Tan, M.J., 2010. Mixing of Carbon Nanotubes (CNTs) and Aluminum Powder for Powder Metallurgy Use, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, Singapore 639798, Singapore.
- Lilholt, H., 1978. Mechanical Behavior of Composites, *Advance in Composites Materials*, 209.
- Lindroos, V. K. and Talvitie, M. J., 1995. Recent Advances in Metal Matrix Composites, Journal of Materials Processing Technology, 53, 273-284.
- Lloyd, D.J., Lagace, H, McLeod, A. and Morris, P.L., 1989. Microstructural Aspects of Aluminum-Silicon Carbide Particulate Composites Produced by a Casting Method, *Materials Science and Engineering A*, 107, 73-80.
- Ma, Q. S., Chen, Z. H., Zheng, W. and Hu, H., 2005. Processing and Characterization of Particles Si-O-C Composites Via Pyrolysis of Polysiloxane SiC or/and Al Fillers, *Ceramics International*, Elsevier, 31, 8 , 1045-1051.
- Mabuchi, M. and Higashi, K., 2001. An Experimental Investigation of A Superplastic Constitutive Equation in Al-Mg-Si Alloy Composites Reinforced with Si₃N₄ Whisker, International Journal of Plasticity, Japan, 17, 399-407.
- Miracle, D.B., 2001. *ASM Handbook*, Hardbound, 21, 1043-1049.

- Miracle, D. B., 2005. Metal Matrix Composites From Science to Technological Significance, *Composites Science and Technology*, 65, 2526-2540.
- Mobasherpour, I., Tofigh, A. A. and Ebrahimi, M., 2013. Effect of Nano-size Al₂O₃ Reinforcement on the Mechanical Behavior of Synthesis 7075 Aluminum Alloy Composites by Mechanical Alloying, *Materials Chemistry and Physics*, 138, 535-541.
- Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L. and Rohatgi, P. K., 2015. Mechanical and Tribological Properties of Self-Lubricating Metal Matrix Nanocomposites Reinforced by Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene-A review, *Composites Part B: Engineering*, 77, 402-420.
- Özyürek, D., Yıldırım M. ve Çiftçi Ş., 2012. The Tribological Properties of A356-SiCp Metal- Matrix Composites Fabricated by Thixomoulding Technique, *Science and Engineering of Composite Materials*, 19, 351-356.
- Pérez-Bustamante, R., Pérez-Bustamante, R., Estrada-Guel, I., Santillán-Rodríguez, C.R., Matutes-Aqui, J.A., Herrera-Ramírez, J.M., Miki-Yoshida, M. and Martínez-Sánchez, R., 2011. Characterization of Al₂O₃-CNTs Composites Produced by Mechanical Alloying, Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Miguel de Cervantes No. 120, C.P. 31109, Chihuahua, Chih., Mexico.
- Ramesh, C. S., Ahamed, A., Channabasappa, B. H. and Keshavamurthy, R., 2010. Development of Al 6063 – TiB₂ in situ Composites, *Materials and Design*, 31, 2230-2236.
- Russell, A.M. and Lee K.L., 2005. Structure Property Relations in Nonferrous Metal, John Wiley and Sons, New York, 499.
- Savaşkan, T., 2007. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitabevi, Trabzon, 134-136.
- Sharma, P., Sharma, S. and Khanduja, D., 2015. Production and Some Properties of Si₃N₄ Reinforced Aluminium Alloy Composites, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3, 352-359.
- Singla, D., Amulya, K. and Murtaza, Q., 2015. CNT Reinforced Aluminium Matrix Composite-A review, Delhi Technological University, Shahbad Daultapur, Bawana Road, Delhi-110042, India; Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), Facultad de Ingeniería, Circuito No. 1 Nuevo Campus Universitario, C.P. 31125, Chihuahua, Chih., Mexico.
- Srivasta, A.K., Xu, C.L., Wei, B.Q., Kishore, R. and Sood, K.N., 2008. Microstructure Features and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum-Based Metal Matrix Composites, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 15, 247-255.
- Stein, J., Lenczowski, B., Frety, N. and Anglaret, E., 2012. Mechanical reinforcement of a high-performance aluminium alloy AA5083 with homogeneously dispersed multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 50, 2264–2272.

- Suryanarayana, C., 2001. Mechanical Alloying and Milling, *Progress in Materials Science*, 46, 1-184.
- Suryanarayana, C. and Al-aqeeli, N., 2013. Mechanically Alloyed Nanocomposites, *Progress in Materials Science*, 58, 383-502.
- Şahin, Y., 2000. *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara, 1-99.
- Şahin, Y., 2006. *Kompozit Malzemelere Giriş*, Ankara, 113-131.
- Thirumaran, B., Natarajan, S. and Kumaresh S. P., 2013. Corrosion Behaviour of CNT Reinforced AA 7075 Nanocomposites, *Advances in Materials*, 2, 1-5.
- Thostenson, E. T., Ren, Z. and Chou, T. W., 2001. Advances in the Science and Technology of Carbon Nanotubes and Their Composites: A review, *Composites Science and Technology*, 61, 1899-1912.
- Tjong, S. C., 2013. Recent Progress in the Development and Properties of novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74, 281-350.
- Turan, E., 2003. Bor -Karbür Silisyum- Karbür Kompozitlerinin Sıcak Presleme ile Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maslak, İstanbul, Türkiye.
- URL-1, www.chemiday.com/en/reaction/3-1-0-521, Nisan, 2015.
- URL-2, www.pl-desskimya.com.tr/urundetay.asp?UrunID=12&GrupID=0, Mart, 2013.
- URL-3, www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Al.pdf, March, 2002.
- Uygur, Ş. ve Saruhan, H., 2004. Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8, 167-174.
- Veeresh-Kumar, G. B., Rao, C. S. P. and Selvaraj, N., 2011. Mechanical and Tribological Behavior of Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites – A review, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10, 59-91.
- Wu, Y. and Kim, G. Y., 2011. —Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite Fabricated by Semi-solid Powder Processing, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1341-1347.
- Yang, X., Liu, E., Shi, C., He, C., Li, J., Zhao, N. and Kondoh, K., 2013. Fabrication of Carbon Nanotube Reinforced Al Composites with Well-Balanced Strength and Ductility, State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; School of Materials Science and Engineering, and Tianjin Key Laboratory of Composite and Functional Materials, Tianjin University, Tianjin 300072, China; Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China Tianjin 300300, China; Joining

and Welding Research Institution, Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan.

Zhou, W., Bang, S., Kurita, H., Miyazaki, T., Fan, Y. and Kawasaki, A., 2016. Interface and Interfacial Reactions in Multi Walled Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Carbon*, 96, 919-928.

Zhou, W., Yamaguchi, T., Kikuchi, K., Nomura, N. and Kawasaki, A., 2017. Effectively Enhanced Load Transfer by Interfacial Reactions in Multi Walled Carbon Nanotube Reinforced Al Matrix Composites, *Acta Mater.* 125, 369–376



ÖZGEÇMİŞ

Hayrunnisa ÖZER, 1989 yılında Denizli’de doğdu. İlkokul ve ortaokul öğrenimini sırasıyla Cengiz Topel İlkokulu ve Altı Eylül İlköğretim okulunda tamamladıktan sonra Demirci Anadolu Öğretmen Lisesinde lise öğrenimini bitirdi. 2013 yılında Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden üçüncülük derecesi ile mezun oldu. Bitirme tezi olarak, TÜBİTAK - 2209 - Üniversite Öğrencileri Yurt İçi Araştırma Projeleri Destek P. Kapsamında, ‘‘Kalsia ve Silika Oran Artışının Biyocam Özelliklerine olan Etkisinin Araştırılması’’ başlıklı projeyi gerçekleştirdi. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Çok iyi derecede İngilizce ve orta derece de Almanca dillerini bilmektedir.