

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ZA27/GRAFİT/Al₂O₃ HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Müslim ÇELEBİ

HAZİRAN 2016
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ZA27/GRAFİT/Al₂O₃ HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Metalurji ve Malzeme Müh. Müslim ÇELEBİ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 05 / 2016

Tezin Savunma Tarihi : 10 / 06 / 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Müslim ÇELEBİ tarafından hazırlanan**

ZA27/Grafit/Al₂O₃ Hibrit Nanokompozitlerin Üretilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 05 / 2016 gün ve 1652 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hikmet ALTUN



Üye : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI



Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında nano parçacık takviyeli hibrit nanokompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmesi ve nano parçacık takviyesinin kompozitlerin içyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Öncelikle tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulunduran, tez çalışmam esnasında ve akademik hayatımda hiç bir fedakarlıktan kaçınmadan değerli fikir ve tecrübeleriyle bana ışık tutan ve beni yönlendiren; hakkını hiçbir şekilde ödeyemeyeceğim çok saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez olarak hazırlamış olduğum bu çalışmamın her aşamasında göstermiş oldukları çok değerli öneri ve tecrübelerinden faydalandığım başta saygıdeğer hocam Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI olmak üzere, değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Fatih ERDEMİR ve Yrd. Doç. Dr. Temel VAROL'a sonsuz teşekkür eder, hürmet ile saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım çok sevgili asistan arkadaşlarım Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA ve Arş. Gör. Hüseyin İPEK'e teşekkür ederim.

Gerek deneyisel çalışmam gerekse tezimin yazımı esnasında benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, her karşılaştığım zorlukta bana destek olan, moral veren ve çalışmamın hayata geçirilmesinde büyük pay sahibi olan çok sevdiğim arkadaşlarım sayın Arş. Gör. Onur GÜLER ve Arş. Gör. Ramazan DALMIŞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Metalurji ve Malzeme Mühendisi arkadaşlarım Ömer Faruk YALÇIN ve A.Hasan KARABACAK'a teşekkür ederim. Son olarak hayatımın her anında maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan saygıdeğer aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma 213M276 kod no'lu TÜBİTAK 1001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Müslim ÇELEBİ

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “ZA27/Grafit/Al₂O₃ Hibrit Nanokompozitlerin Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI’ nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/06/2016

Müslim ÇELEBİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çinko - Alüminyum Alaşımları	3
1.2.1. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Tarihçesi	3
1.2.2. Çinko - Alüminyum Faz Diyagramı	4
1.2.3. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	6
1.2.3.1. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri	6
1.2.3.2. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.....	7
1.2.3.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özellikleri.....	10
1.2.3.4. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Uygulama Alanları	10
1.3. Kompozit Malzemeler	11
1.3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı.....	13
1.3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	14
1.4. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	15
1.4.1. Matris Malzemeleri.....	16
1.4.2. Takviye Elemanları.....	16
1.4.2.1. Alümina (Al_2O_3)	17
1.4.2.2. Grafit.....	18
1.5. Nanoteknoloji	19
1.5.1. Nanokompozitler	21
1.5.2. Metal Matrisli Nanokompozitler (MMNK).....	22
1.5.2.1. Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	23
1.6. Toz Metalurjisi (TM)	24
1.6.1. Metal Tozların Üretimi	25

1.6.2.	Tozların Presleme İşlemi	27
1.6.3.	Sinterleme İşlemi	28
1.6.4.	Sıcak Presleme (SP) İşlemi.....	30
1.7.	Mekanik Alaşımlama.....	31
1.7.1.	Mekanik Alaşımlama Mekanizması	33
1.7.2.	Mekanik Öğütme ve Alaşımlama Sistemleri.....	35
1.7.2.1.	Sünek – Sünek Sistem	35
1.7.2.2.	Sünek – Gevrek Sistem.....	35
1.7.2.3.	Gevrek – Gevrek Sistem	36
1.8.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	36
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
2.1.	Malzeme	41
2.1.1.	ZA27 Alaşımının Dökümü ve Toz Üretimi.....	41
2.1.2.	Takviye Malzemeleri	43
2.2.	Mekanik Alaşımlama (MA) İşlemleri	43
2.3.	Parçacık Boyutu.....	44
2.4.	Metalografi Çalışmaları	44
2.5.	İçyapı İncelemeleri	45
2.6.	Yoğunluk Ölçümleri	46
2.7.	Mekanik Deneyler	46
2.7.1.	Sertlik Deneyi	46
2.7.2.	Çekme Deneyi	47
2.8.	Sıcak Presleme.....	48
3.	BULGULAR.....	49
3.1.	ZA27 Alaşımının Döküm Yapısı.....	49
3.2.	Matris ve Takviye Tozlarının Morfolojileri	50
3.3.	Grafit Takviyeli Nanokompozitler (GTNK).....	51
3.3.1.	GTNK Numunelerin Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi	51
3.3.1.1.	Toz Morfolojisi.....	51
3.3.1.2.	İçyapı Analizi.....	52
3.3.1.3.	Yoğunluk ve Porozite	54
3.3.1.4.	Sertlik.....	56
3.3.1.5.	Çekme Mukavemeti.....	56

3.3.2.	GTNK Numunelerin MA Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi.....	57
3.3.2.1.	Toz Boyutu ve Morfolojisi	57
3.3.2.2.	İçyapı Analizi.....	60
3.3.2.3.	Yoğunluk ve Porozite	61
3.3.2.4.	Sertlik.....	63
3.3.2.5.	Çekme Mukavemeti.....	64
3.4.	Alümina (Al ₂ O ₃) Takviyeli Nanokompozitler (ATNK)	65
3.4.1.	ATNK Numunelerin Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi	65
3.4.1.1.	Toz Morfolojisi	65
3.4.1.2.	İçyapı Analizi.....	66
3.4.1.3.	Yoğunluk ve Porozite	68
3.4.1.4.	Sertlik.....	70
3.4.1.5.	Çekme Mukavemeti.....	70
3.4.2.	ATNK Numunelerin MA Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi.....	71
3.4.2.1.	Yoğunluk ve Porozite	71
3.4.2.2.	Sertlik.....	73
3.4.2.3.	Çekme Mukavemeti.....	73
3.5.	Hibrit Nanokompozitler (HNK).....	74
3.5.1.	HNK Numunelerin MA Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi	75
3.5.1.1.	Toz Boyutu ve Morfolojisi	75
3.5.1.2.	İçyapı Analizi.....	79
3.5.1.3.	Yoğunluk ve Porozite	83
3.5.1.4.	Sertlik.....	84
3.5.1.5.	Çekme Mukavemeti.....	85
3.5.1.5.1.	Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	87
4.	İRDELEME	90
5.	SONUÇLAR.....	94
6.	ÖNERİLER.....	96
7.	KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

ZA27/GRAFİT/Al₂O₃ HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Müslim ÇELEBİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2016, 103 Sayfa

Bu çalışmada, döküm yöntemi ile elde edilen ZA27 alaşımı gaz atomizasyonu yöntemi ile toz haline getirilmiştir. Matris malzemesi olarak ZA27 tozları (d_{50} : 40,2 μ m), takviye malzemesi olarak, nano grafit ve alümina (d_{50} :100 nm) tozları kullanılmıştır. ZA27/Grafit ve ZA27/Al₂O₃ nanokompozitleri geleneksel toz metalürjisi ve mekanik alaşımla yöntemleriyle üretilmiştir. Takviye miktarının ve öğütme süresinin nanokompozitlere olan etkisi araştırılmıştır. Nano-grafit ve alümina tozları ile ZA27 tozları gezegen tipi bilyeli öğütücüde (Retsch PM 100) tungsten karbür hazne kullanılarak 8 saat öğütülmüş ve yapı içerisindeki topaklanmaların dağıtılması sağlanmıştır. Öğütülen tozlar, bir kalıp içerisinde 300 MPa basınç altında 2 dakika bekletilerek soğuk preslenmiştir. 2.5 saat boyunca 435 °C sıcaklıkta sinterlendikten sonra 600 MPa basınç altında sıcak preslenmiştir. Elde edilen hibrit nanokompozitlerin içyapı, yoğunluk-porozite, sertlik ve çekme mukavemeti gibi özellikleri incelenmiştir. Üretilen hibrit nanokompozitler içerisinde en yüksek sertlik değeri grafit oranının hacimce %1, alümina oranının hacimce %4 olduğu numunede elde edilmiştir. Grafitin mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği, alüminanın ise mekanik özellikleri iyileştirici bir etki yaptığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ZA27 Alaşımı, Hibrit Nanokompozit, Mekanik Alaşımlama, Sıcak Presleme

Master Thesis

SUMMARY

THE PRODUCTION AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ZA27/GRAPHITE/Al₂O₃ HYBRID NANOCOMPOSITE

Müslim ÇELEBİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Aykut ÇANAKÇI
2016, 103 Pages

In this study, ZA27 alloy obtained by casting technique was atomized by gas atomization method. ZA27 powder used as a matrix material (d_{50} : 40,2 μ m) was reinforced with nano graphite and alumina (d_{50} : 100 nm) powders. ZA27 / Graphite and ZA27 / Al₂O₃ nanocomposites were produced by the traditional powder metallurgy and mechanical alloying method. The effect of reinforced content and milling time was investigated on the mechanical properties of nanocomposites. ZA27 matrix powders with nano graphite and alumina particles were milled in a planetary ball-mill (Retsch PM 100) at room temperature using a tungsten carbide bowl for 8 h in order to break up the hard agglomerates. The milled powders were uni-axially cold pressed in a die up to 300 MPa for 2 min. The samples in the die were hot pressed at 435 °C and 600 MPa for 2,5 h. The microstructures, density, hardness and tensile strength of these nanocomposites were investigated. It has been shown that ZA27/1vol.% graphite - 4 vol.% Al₂O₃ composite has higher hardness value. The graphite has adversely effected on mechanical properties of nanocomposites, but alumina improved to mechanical properties of ones.

Key Words: ZA27 Alloy, Hybrid Nanocomposite, Mechanical Alloying, Hot Pressing,

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Çinko-alüminyum faz diyagramı..... 5
Şekil 1.2.	Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve arafazlar a) Doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu..... 14
Şekil 1.3.	Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması 15
Şekil 1.4.	Örneklendirilmiş nano boyut skalası..... 20
Şekil 1.5.	Nanokompozitlerin mikro yapılarına göre sınıflandırılması; (a)tanelerarası, (b) tane içi, (c) hibrit, (d) nano/nano kompozitler 22
Şekil 1.6.	Toz metalurjisi işleminin şematik gösterimi 25
Şekil 1.7.	a) Su atomizasyonu yöntemi b) Gaz atomizasyonu yöntemi 26
Şekil 1.8.	TM’de presleme kademeleri, (a) kalıbın besleyici tarafından tozla doldurulması, (b) alt ve üst zimbaların presleme esnasındaki hareketi, (c) sıkıştırmayla son şeklin verilmesi, (d) parçanın kalıptan çıkarılması 28
Şekil 1.9.	Sinterlemede nokta teması ile başlayıp parçacıklar arası bağ gelişimiyle devam eden iki küre sinterleme modelinin şematik gösterimi 29
Şekil 1.10.	(a) Mikroskopik ölçekte sinterleme: (1) parçacık bağları, temas noktalarında başlar; (2) temas noktaları “boyun” halinde büyür; (3) parçacıklar arasındaki gözenekler, boyut olarak küçülür ve boyun oluşan bölgelerde tane sınırları oluşur. (b)Sinterlemede gözenek yapısındaki değişimi 30
Şekil 1.11.	Tek eksenli sıcak presleme işleminin kesit olarak gösterilişi..... 31
Şekil 1.12.	Mekanik alaşımlama boyunca bilye-toz-bilye çarpışması ile tozların karıştırılması ve yassılaştıran tozlar 33
Şekil 1.13.	Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi 36
Şekil 2.1.	Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması..... 41
Şekil 2.2.	Döküm yönteminde kullanılan ekipman; (a) sıcaklık kontrollü elektrikli pota fırını, (b) döküm potası 42
Şekil 2.3.	Öğütme işleminde kullanılan (a) bilyalı öğütücü (b) hazne ve bilye 44
Şekil 2.4.	Partikül boyutu ölçüm cihazı..... 44
Şekil 2.5.	a) Otomatik zımpara-parlatma cihazı b) Bakalit cihazı..... 45
Şekil 2.6.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) 45
Şekil 2.7.	Brinell sertlik ölçüm cihazı 47
Şekil 2.8.	Çekme cihazı 47

Şekil 2.9.	Sıcak preslemede kullanılan ekipman	48
Şekil 3.1.	ZA27 alaşımının dökümü sonrası gözlemlenen iç yapı	49
Şekil 3.2.	ZA27 tozlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri; (a) 500X, (b)1000X ve (c) 2000X.....	50
Şekil 3.3.	(a) Nano boyuttaki grafit ve (b) alüminanın SEM görüntüsü	51
Şekil 3.4.	(a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) % 4 GTNK tozların 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri	52
Şekil 3.5.	Hacimce (a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) %4 nano grafit takviyeli kompozit numunelerin sinterleme sonrası 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri	53
Şekil 3.6.	Hacimce %4 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları.....	54
Şekil 3.7.	Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin yoğunluk değişimi.....	55
Şekil 3.8.	Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin porozite değişimi.....	55
Şekil 3.9.	Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin sertlik değerlerinin değişimi	56
Şekil 3.10.	Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin değişimi.....	57
Şekil 3.11.	GTNK tozların boyutlarına öğütme süresinin etkisi	58
Şekil 3.12.	GTNK tozlarının (a) 0, (b) 6, (c) 10, (d) 14 ve (e) 18 saatlik mekanik aşınma süreleri sonundaki 200X büyüklükteki SEM görüntüleri.....	59
Şekil 3.13.	Üretilen GTNK numunelerin (a) 6, (b) 10, (c) 14 ve (d) 18 saatlik mekanik aşınma süreleri sonundaki SEM görüntüleri.....	60
Şekil 3.14.	Hacimce %1 nano grafit takviyeli 18 saat öğütülmüş kompozit tozlarla üretilen numunenin EDS sonuçları	61
Şekil 3.15.	Üretilen GTNK numunelerin yoğunluğuna öğütme süresinin etkisi	62
Şekil 3.16.	Üretilen GTNK numunelerin porozite değerlerine öğütme süresinin etkisi ..	63
Şekil 3.17.	Üretilen GTNK numunelerin sertliğine öğütme süresinin etkisi	64
Şekil 3.18.	Üretilen GTNK numunelerin çekme mukavemetine öğütme süresinin etkisi	65
Şekil 3.19.	(a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) % 4 ATNK tozların 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri	66
Şekil 3.20.	Hacimce (a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) %4 nano alümina takviyeli kompozit numunelerin sinterleme sonrası 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri.....	67
Şekil 3.21.	Hacimce %4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları.....	68

Şekil 3.22.	Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin yoğunluk değerlerinin değişimi	69
Şekil 3.23.	Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin porozite değerlerinin değişimi	69
Şekil 3.24.	Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin sertlik değerlerinin değişimi	70
Şekil 3.25.	Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin değişimi.....	71
Şekil 3.26.	Üretilen ATNK numunelerin yoğunluğuna öğütme süresinin etkisi	72
Şekil 3.27.	Üretilen ATNK numunelerin porozite değerlerine öğütme süresinin etkisi .	72
Şekil 3.28.	Üretilen ATNK numunelerin sertliğine öğütme süresinin etkisi	73
Şekil 3.29.	Üretilen ATNK numunelerin çekme mukavemetine öğütme süresinin etkisi	74
Şekil 3.30.	MA sonrası üretilen HNK tozların boyutlarının,nano alümina ve grafit oranıyla değişimi.....	76
Şekil 3.31.	Üretilen hibrit tozlarının 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri: (a) ZA-1-1, (b) ZA-1-2, (c) ZA-1-3, (d) ZA-1-4, (e) ZA-2-1, (f) ZA-2-2, (g) ZA-2-3, (h) ZA-2-4, (i) ZA-3-1, (j) ZA-3-2, (k) ZA-3-3, (l) ZA-3-4, (m) ZA-4-1, (n) ZA-4-2, (p)ZA-4-3, (r) ZA-4-4.....	77
Şekil 3.32.	Üretilen hibrit numunelerin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri: (a) ZA-1-1, (b) ZA-1-2, (c) ZA-1-3, (d) ZA-1-4, (e) ZA-2-1, (f) ZA-2-2, (g) ZA-2-3, (h) ZA-2-4, (i) ZA-3-1, (j) ZA-3-2, (k) ZA-3-3, (l) ZA-3-4, (m) ZA-4-1, (n) ZA-4-2, (p) ZA-4-3, (r) ZA-4-4	80
Şekil 3.33.	ZA-3-3 hibrit numunesine ait SEM resmi ve EDS- analizi.....	82
Şekil 3.34.	Üretilen HNK malzemelerinin yoğunluğuna takviye cinsinin ve miktarının etkisi	83
Şekil 3.35.	Üretilen HNK malzemelerinin porozite değerlerine takviye cinsinin ve miktarının etkisi	84
Şekil 3.36.	Üretilen HNK malzemelerinin sertliğine takviye cinsinin ve miktarının etkisi	85
Şekil 3.37.	Üretilen HNK malzemelerinin çekme mukavemetine takviye cinsinin ve miktarının etkisi	86
Şekil 3.38.	Üretilen hibrit numunelerin 1000x büyütmedeki kırılma yüzeyi görüntüleri:(a) ZA-1-1, (b) ZA-1-2, (c) ZA-1-3, (d) ZA-1-4, (e) ZA-2-1, (f) ZA-2-2, (g) ZA-2-3, (h) ZA-2-4, (i) ZA-3-1, (j) ZA-3-2, (k) ZA-3-3, (l) ZA-3-4, (m) ZA-4-1, (n) ZA-4-2, (p) ZA-4-3, (r) ZA-4-4.....	87

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler.....	6
Tablo 1.2. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri ...	7
Tablo 1.3. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri	9
Tablo 2.1. ZA27 alaşımının kimyasal bileşimi (%ağırlık)	42
Tablo 3.1. Üretilen hibrit numunelerin takviye oranları ve kodlanması	75



SEMBOLLER DİZİNİ

Al:	Alüminyum
BSD:	Brinell sertlik değeri
GTNK:	Grafit takviyeli nanokompozit
ATNK:	Alüminyum takviyeli nanokompozit
HNK:	Hibrit nanokompozit
MA:	Mekanik alaşımlama
MMK:	Metal matrisli kompozit
MMNK:	Metal matrisli nanokompozit
MPa:	Mega paskal
nm:	Nanometre
SEM:	Taramalı elektron mikroskobu
SP:	Sıcak presleme
TM:	Toz metalurjisi
ZA-1-1:	Hacimce %1 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-1-2:	Hacimce %1 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-1-3:	Hacimce %1 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-1-4:	Hacimce %1 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-1:	Hacimce %2 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-2:	Hacimce %2 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-3:	Hacimce %2 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-2-4:	Hacimce %2 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-1:	Hacimce %3 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-2:	Hacimce %3 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-3:	Hacimce %3 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-3-4:	Hacimce %3 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-1:	Hacimce %4 grafit ve %1 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-2:	Hacimce %4 grafit ve %2 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-3:	Hacimce %4 grafit ve %3 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit
ZA-4-4:	Hacimce %4 grafit ve %4 alümina içeren ZA27 matrisli hibrit nanokompozit

Zn: Çinko
µm: Mikrometre
ZA: Çinko - Alüminyum



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda, teknolojinin hızla gelişmesinin bir sonucu olarak malzeme bilimi alanındaki araştırmalar büyük ivme kazanmış, çağın yenilikleriyle aynı çizgide günün ihtiyaçlarını karşılayabilecek, mevcut malzemelerden hem ekonomik yönden hem de teknik yönden daha kullanışlı malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Araştırmacılar özellikle otomotiv, denizcilik, havacılık, tıp, uzay ve spor gibi endüstriyel alanlardaki gelişmeler neticesinde ortaya çıkan malzeme ihtiyacını karşılamak için çalışmalarını yürütmektedirler (Mortensen vd., 1988).

Metal matrisli kompozitler (MMK), seramik parçacıkların bir metal matris içerisine mümkün olduğu kadar homojen bir şekilde takviye edilmesiyle üretilen malzemelerdir. Metal matrisli kompozitlerin düşük yoğunluğa karşı sergiledikleri mükemmel dayanım özellikleri, farklı birleşim ve geometrilerde üretilebilmeleri, yorulma, tokluk, yüksek sıcaklık, oksitlenme ve aşınma dayanımlarının yüksek olması nedeniyle bu malzemelerin kullanımı otomotiv sanayiinden uzay sanayiine kadar birçok endüstri alanını kapsamaktadır (İbrahim vd.,1991; Sinclair ve Gregson, 1997; Goni vd, 2000). Özellikle uzay ve savunma sanayii gibi alanlarda daha iyi performansla ulaşmak için yeni mühendislik malzemelerine ihtiyaç duyulmuş ve bu talep MMK'ların geliştirilmesine neden olmuştur. Kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların nano boyutlu matris ve/veya takviye fazlarını içeren kompozitler oluşturmaktadır (Alizadeh ve Taheri-Nassaj, 2012).

Çoğu araştırmacılar, alüminyum metal matrisli seramik parçacık takviyeli kompozitler üzerine çalışma yapmaktadırlar. Ancak, son zamanlarda Çinko matrisli seramik takviyeli kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi birçok araştırmacı tarafından ilgi duyulan bir çalışma alanı olmuştur. Çinko esaslı alaşımlar ergime sıcaklıklarının düşük olması ve ucuz olmaları nedeniyle matris malzemesi olarak oldukça kullanışlıdır (Smith, 1993).

Çinko – alüminyum (ZA) alaşımlarının yüzeyinde alüminyum oksit (alümina) ve çinko oksit gibi fazların kolaylıkla oluşabilmesi nedeniyle bu alaşımlar üstün tribolojik özelliklere sahiptir. Alüminanın sert bir faz olması aşınma direncinin yüksek olmasını sağlarken, çinko oksitin yumuşak bir faz olması bünnyeye yağlayıcılık özelliği kazandırır

(Babic vd, 2010). Sahip olduğu üstün özelliklere karşı, ZA alaşımlarının 100⁰C üzeri sıcaklıklarda, üstün mekanik özelliklerinin düşüş göstermesi uygulamalardaki en büyük problemlerden biridir. Bu problemin önüne geçmek amacıyla; SiC, Al₂O₃, TiC ve B₄C gibi seramik faz katkısı yapılarak yüksek sıcaklık uygulamaları iyileştirilebilir (Božić vd., 2011).

Matris malzemesi olarak kullanılan ZA alaşımları arasında, ZA27 alaşımı diğer ticari alaşımlardan (ZA8, ZA12) daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilemesi nedeniyle oldukça popülerdir. ZA27 alaşımı yüksek yatak performansı ve düşük maliyetli olduğu için yatak ve fırça uygulamalarında bronz yerine kullanılır (Smith, 1993). Bununla birlikte, dökme alüminyum alaşımlarından daha yüksek bir çekme mukavemetine sahip olmasından dolayı ZA27 alaşımları yüksek mukavemetli alaşımlar olarak sınıflandırılır (Gervais vd., 1985; Seah vd, 1995)

Ortak bir metal matris içerisinde iki veya daha fazla türde takviye içeren kompozit malzemeler hibrit MMK malzemeler olarak adlandırılırlar. Hibrit MMK üretimde kullanılacak olan her bir malzemenin özelliklerinin iyi bilinmesi ve kullanım öncesinde optimize edilmesi gerekmektedir. Örneğin yüksek sıcaklık uygulamasında kullanılacak bir malzemenin, hem yüksek sıcaklıkta yük taşıyabilme kabiliyetinin iyi olması hem de kullanım süresinin uzun olması gerekir. Bunu amaç edinerek, önce malzemenin yüksek mukavemet kazanması gerekir daha sonra da bu mukavemetini koruması istenir. Bu durumun elde edilebilmesi için malzemenin mikroyapısı iki fonksiyonlu olarak üretilmelidir. Dolayısıyla hibrit MMK malzemeler iki fonksiyonlu kompozitler olarak da adlandırılabilir.

Farklı malzemelerin herhangi bir kombinasyonu aslında bir hibrit olarak düşünülebilir. Hibrit kompozitlerin üretilmesinin amacı, amaçlanan tasarıma uygun olarak malzemenin özelliklerini iyileştirmek için bir bileşenin olumsuz etkisini farklı bir bileşenin takviyesiyle dengelemektir. Örneğin, bir yatak malzemesi üretilmek isteniyorsa, malzemenin yüzey ısınmasını ve buna paralel olarak oksitlenmesini ve yük taşıma kabiliyetinin kaybolmasını engellemek gerekir. Bunun için en ideal yöntemlerden biri metal içerisine hem sürtünmeyi azaltacak bir bileşen ilavesi hem de yük taşıma kabiliyetini artırıcı bir takviye fazı ilave etmektir. Bu özellikler dikkate alındığında, bir alüminyum alaşımına grafit ve SiC parçacıklarının takviyesiyle istenilen tasarıma uygun bir malzeme ortaya çıkacaktır (Azaklı vd., 2003).

MMK'lerin üretiminde birçok farklı yöntem kullanılmasına rağmen bu yöntemlerin hepsi esasen katı ve sıvı faz yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntemin kendine has üstünlükleri olmasıyla birlikte takviye elemanının matris içerisinde homojen bir

şekilde dağılmasını sağlayan mekanik alaşımlama (MA) yöntemi MMK'lerin üretiminde katı faz yöntemini bir adım öne çıkarmıştır (Dalmış, 2014). Mekanik alaşımlama çarpışan bilyelerin arasında kalan toz parçacıklarının katmanlaşması, parçalanması, yeniden deforme olması, soğuk kaynaması ve parçacıkların kısa mesafelere difüzyonu gibi işlemlerin tekrarlanarak gerçekleştiği bir katı faz toz üretim metodudur. Bu yöntemle takviye malzemelerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması sağlanabilir. Ayrıca klasik alaşımlama işlemlerinde meydana gelen problemler MA ile ortadan kaldırılabilir. Tane boyutunun küçültülmesi, katı çözünürlüğünün artırılması, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına imkan sağlaması MA yönteminin en önemli üstünlüklerindendir (Özkaya, 2014).

Bu çalışmada ZA27 matrisli grafit ve alümina nano-parçacık takviyeli hibrit nanokompozitler mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmiştir. Farklı öğütme sürelerinin ve takviye oranlarının mekanik alaşımlama işlemi, toz özellikleri ve kompozit malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Toz özellikleri olarak; toz morfolojisi ve toz boyutu incelenmiş olup, kompozit özellikleri olarak ise mikro-yapı özelliklerine, yoğunluk, sertlik ve çekme mukavemeti özellikleri incelenmiştir.

1.2. Çinko - Alüminyum Alaşımları

1.2.1. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Tarihçesi

ZA alaşımları, İkinci Dünya Savaşı sırasında bakır ve kalayın zor bulunmaları ve maliyetlerinin yüksek olmaları nedenleriyle, Alman araştırmacılar tarafından bronzun yerine kullanmak amacıyla geliştirildi (Marczak ve Ciach,1973). Bu alaşımlar üzerine yapılan yoğun araştırmalar neticesinde, Almanya'da 1939-1943 yılları arasında ZA alaşımlarının kullanımı 7 kat artarak, yıllık 7.800 tondan 49.000 tona yükseldi (Apelian vd.,1981). Bu yıllarda, %10-30 oranında alüminyum içeren bir grup ZA alaşımı, bronzların yerine kaymalı yatak malzemesi olarak kullanıldı ve piyasada bu alaşımlar beyaz bronz olarak adlandırıldı (Mihaichuk ve Bess, 1987).

1960'lı yıllarda ticari piyasadaki daralma ve çinko endüstrisindeki gelişmeler Uluslararası Kurşun Çinko Araştırma Birliği'nde yeni bir araştırma programının doğmasına neden olmuştur. ILZRO (International Lead Zinc Organization) adı altında kurulan bu organizasyon tarafından desteklenen bir araştırma programı sonucunda, yüksek oranda alüminyum içeren iki yeni çinko alaşımı, basınçsız döküm yöntemiyle üretilerek geliştirdi.

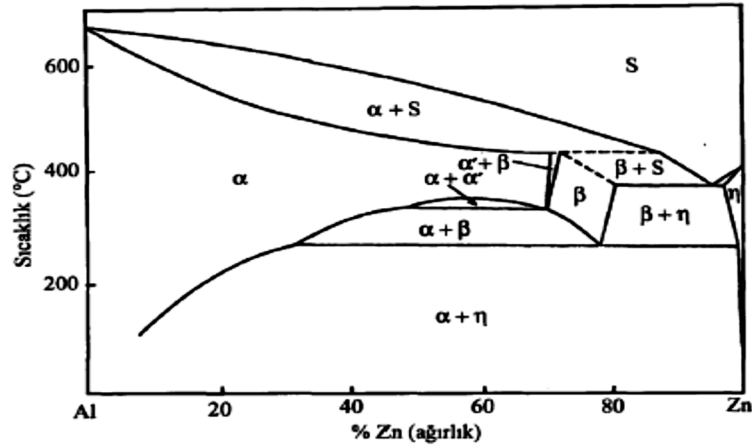
Bu alaşımlar ILZRO-12 ve ILZRO-16 olarak adlandırıldı. Bu alaşımlar içerisinde ILZRO 16'nın pahalı olması ve sıcak kamara yöntemiyle dökülebilir olmaması, bu alaşımın kullanım alanını daraltmıştır. Bunun yanında ILZRO-12 alaşımının üstün mekanik özelliklere sahip olması, ZA-12 adı altında bu alaşımın doğmasına neden olmuştur (Uğur, 2009).

Bunu izleyen yıllarda, Noranda araştırma merkezi ve St.Joe Minerals Corporaion firmaları tarafından gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda, iki yeni döküm alaşımı ZA-8 ve ZA-27 'i geliştirmiştir. Aynı yıllarda, Voest Alpine AG of Linz adlı firma tarafından Alzen olarak adlandırılan Zn-Al-Cu alaşımları geliştirildi (Lyon, 1985).

Günümüzde; Alzen, Kayem, Main Metal ve Zamak adları altında üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımlar Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaktadır (Mihaichuk, 1981).

1.2.2. Çinko - Alüminyum Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum alaşımlarının katılaşma aralıkları ve ergime sıcaklıkları bünyesindeki alüminyum oranına bağlıdır. Çinko-alüminyum faz diyagramı, Şekil 1.1'de verilmiştir. Çinko ve alüminyum esaslı alaşımlar α ve η fazlarından oluşan ötektik bir matris içerisinde çinko ya da alüminyumca zengin dentritler yer almaktadır. Bu diyagramda, η ; çinkoca zengin faz bölgesini, α ise alüminyumca zengin faz bölgesini belirtilmektedir (Mykura vd., 1986). Alüminyumca zengin katı eriyik α , α^1 ve β fazlarından oluşmaktadır. Alüminyumca zengin katı eriyiklerin kafes parametreleri farklı olduğundan α ve α^1 olarak adlandırılmaktadır. Yavaş soğutma sonrasında bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazına dönüşmektedir (Zhu vd., 1994).



Şekil 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı (Houghton ve Murray, 1984)

Yukardaki faz diyagramında, 382 °C sıcaklıkta ve %95 Zn bileşim oranında ötektik nokta yer almaktadır. Ötektik dönüşüm sonucunda, yüzey merkezli kübik yapılı β ile birlikte sıkı düzenli hegzagonal yapılı η fazlarından oluşan bir yapı meydana gelmektedir. Alüminyumun η fazı içerisindeki katı çözünürlüğü, ötektik sıcaklık çizgisinde %5 dir. Bu değer sıcaklık düştükçe azalmakta ve 20 °C sıcaklıkta %0,05 Al oranına kadar azalmaktadır. β fazının alüminyumca zengin α ile çinkoca zengin η fazlarına dönüşmesi, 275 °C den daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu diyagramda yer alan β fazı ise 276 °C sıcaklıkta %22 Al oranında meydana gelen ötektoid reaksiyon sonucunda α ve η fazlarına dönüşmektedir (Houghton ve Murray, 1984). Çinko-alüminyum faz diyagramında meydana gelen önemli faz dönüşümleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler (Houghton ve Murray, 1984)

Dönüşüm	Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik $S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid $\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$ $\alpha/\alpha^1 \rightleftharpoons \alpha + \beta$	78 52	276 340
Peritektik $\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	71.6	443

1.2.3. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

1.2.3.1. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri

ZA esaslı alaşımların ısı genleşme, elektriksel iletkenlik ve ısı iletkenlik katsayıları alüminyum alaşımları hariç geleneksel yatak alaşımlarının sözü edilen katsayılarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu belirtilmekte ve bu değerler artan alüminyum oranı ile artmaktadır (Savaşkan ve Pürçek, 2000). 5 gr/cm³ 'lük yoğunluğa sahip olan ZA27 alaşımı; bakırdan %65, dökme demirden %45, Zamak alaşımından %25, ZA8 den % 21 ve ZA12 den %17 daha hafif iken alüminyumdan % 85 daha ağırdır (Aslan, 2004). Bu alaşımların yoğunlukları alüminyum oranı arttıkça azalmakta, bu da söz konusu alaşımların birim maliyetini düşürmektedir (Prasad, 1996).

Çinko-Alüminyum ikili denge diyagramından görüleceği gibi alaşımların ergime noktaları ve katılaşma aralığı alüminyum miktarı ile değişmektedir. Alüminyum oranı arttıkça, alaşımların ergime noktası yükselmekte, katılaşma aralığı ise daralmaktadır (Zhu ve Goodwin, 1993; Lyon, 1984).

Tablo 1.2. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri
(Güler, 2015)

ALAŞIMLAR						
Fiziksel Özellikler	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
Yoğunluk (gr/cm³)	6,30	6,03	5,0	8,50	8,83	6,94
Katılaşma Büzülmesi (%)	1,0	1,2	1,3	-----	-----	1,0
Katılaşma Sıcaklık Aralığı (°C)	404-375	430-380	490-380	1010-855	975-855	1232
Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m°K)	23,2	24,1	26,0	18,0	18,0	11,9
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m°K)	115	116	126	72	59	45
Elektrik İletkenlik Katsayısı (%IACS)	28	28	30	15	12	6

1.2.3.2. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

ZA alaşımları endüstriyel kullanımlarda oldukça dikkat çekmektedir. Bu durum, sahip oldukları üstün akışkanlık, dökülebilirlik ve iyi mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Ancak ZA alaşımlarının sertlik, mukavemet, korozyon ve aşınma dirençlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda ZA alaşımlarının özelliklerini arttırmak amacıyla uygulanacak en uygun yöntemin alaşım elementi ilavesi katma olduğu görülmüştür. Düşük orandaki bakır, magnezyum ve silisyum katkıları bu alaşımların mukavemet değerlerini önemli ölçüde arttırmaktadır. Söz konusu alaşımların mekanik ve korozyon özelliklerini iyileştirmede en etkin alaşım elementinin bakır olduğunu göstermiştir (Aydın, 2001).

Tablo 1.3'e bakıldığında, ZA27 alaşımının yüksek çekme ve akma dayanımı özellikleri ile üstün olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, alüminyum; bakır ve dökme demir gibi döküm alaşımlarıyla sürekli bir rekabet halindedir (Lo vd., 1992).



Tablo 1.3. ZA esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri (Güler, 2015)

ALAŞIMLAR						
Mekanik Özellikler	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
Çekme Dayanımı (MPa)	221-255	310-345	414-441	255	240	214
Akma Dayanımı (MPa)	200-210	207-268	372-393	114	124	124
Kopma Uzaması (%)	1-2	1,5-2,5	2-3	30	20	-----
Brinell Sertlik Değeri (BSD)	85-90	85-95	110-120	60	65	210
Darbe Dayanımı (J)	13-18	17-22	25-40	15	8	-----
Yorulma Dayanımı (MPa)	103	103	172	-----	-----	-----
Kayma Mukavemeti (MPa)	241	255	270	-----	-----	-----

ZA alaşımlarının ergime sıcaklığının düşük olması, döküm maliyetini düşürmesine karşın, bu alaşımların mekanik özelliklerini sıcaklığa duyarlı hale getirmektedir. Bir başka ifadeyle sıcaklıkla birlikte söz konusu alaşımların sünekliği artmakta, sertlik ve mukavemeti ise düşmektedir (Lyon, 1986). Düşük ergime sıcaklıkları göz önüne alındığında, özelliklerin

olumsuz etkilendiği bu sıcaklık değeri yaklaşık olarak $0,26 T_m$ değerine karşılık gelmektedir (Lo vd., 1992).

1.2.3.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özellikleri

ZA alaşımları, sahip olduğu üstün tribolojik özellikleri nedeniyle, endüstride yatak malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımları, bronz yataklar ve dökme demirler ile rekabet halinde olan alternatif malzemelerdir. Genellikle yatak uygulamaları için ZA12 ve ZA27 alaşımları diğer alaşımlara göre özellikle kuru ve yağlı aşınma ortamlarında çok üstün performans gösterirler. Bu alaşımlar daha düşük sürtünme katsayısına, daha iyi yük taşıma kapasitesine, daha düşük çalışma sıcaklıklarına ve daha geniş hidrodinamik yağlama oranına sahiptir.

ZA alaşımları içerdikleri alüminyum, silisyum ve bakır nedeniyle yağlayıcı ortamda düşük sürtünme katsayısı ile yüksek aşınma direnci göstermektedir. Özellikle %2 bakır içeren ZA alaşımlarının çok iyi aşınma özelliklerine sahip olduğu ve bunun nedeninin boyutsal kararsızlıkların kaldırılması için uygulanan ısıtma işlem sonucu meydana gelen çok fazlı yapı ile yatak yüzeyinde oluşan çinko oksit ve alümina oksitten kaynaklandığı söylenmektedir. Alüminyum oksit sert yapıda olmasından dolayı aşınma direncini arttırdığını, çinko oksitin yumuşak yapısının ise mil yatak arasında yağlayıcılık işlevi gördüğü düşünülmektedir (Goodwin ve Ponikvar, 1989).

1.2.3.4. Çinko - Alüminyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

1920'li yıllardan başlayıp günümüze kadar gelen ve ticari önemi gittikçe artan ZA alaşımları ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları, yoğun bir biçimde devam etmektedir. Çok geniş bir kullanım ve uygulama alanına sahip olan ZA alaşımları özellikle ulaşım, otomotiv, endüstriyel makina parçaları, yeni nesil ev gereçleri ve daha birçok alanlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Son yıllarda hızla gelişen otomotiv sektöründe birçok alanda kullanılan ZA alaşımları özellikle mekanik parçalarda, otomotiv kol ve kilitlerinde, otomotiv aktarma organlarında, süspansiyon parçalarında ve benzeri birçok alanda seri olarak kullanılmaktadır.

Zamak 3 ve Zamak 5 alaşımları özellikle ev aletlerinde, ss eşyalarında, otomotiv parçalarında, bilgisayar ekipmanlarında ve bilumum aydınlatma malzemelerinde kolaylıkla kullanılmaktadır.

ZA 8 ve ZA 12 alaşımları ise genelde madeni eşyalar, iş makinaları, otomotiv sanayi, ev, bahçe aletleri gibi fazla dayanım isteyen yerlerde kullanılmaktadır. ZA 12 alaşımları, düşük hız-yüksek yük uygulamalarında yatak malzemesi olarak kullanılmaktadırlar ve burç parçaları olarak iyi performans göstermektedirler.

ZA 27 alaşımı, Zamak alaşımları içeresinde özellikle yüksek dayanım isteyen alanlarda kullanılmaktadır. Otomotiv motor bloklarında, lokomotif parçalarında, ağır yük uygulamalarında kullanılan ev aletlerinde ZA 27 alaşımı yatak ve vites kutusu aktarma organlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Uğur, 2009).

1.3. Kompozit Malzemeler

Teknolojik gelişmelerin temelinde malzeme alanındaki ilerlemeler ve yeni buluşları yatmaktadır. Günümüzde malzeme bilimi tek bir mühendislik dalı olmaktan ıkımış, alt branşları olan metaller, ametaller, kimyasallar, organikler, inorganikler, polimerler vb. gibi kollara ayrılmıştır. Kompozit malzemeler ise bu gruplar içerinde en önemlilerinden biri olarak çok geniş bir uygulama sahası bulmuştur. Havacılık, otomotiv, tekstil gibi önemli endüstri kolları kompozit malzemelerin önemini benimsemiş ve sürekli gelişmelerden kendilerine düşen payı almışlardır.

Kompozit malzeme, çeşitli ve birbirinden ayrı malzeme özelliklerini birleştirilerek tek bir yapıda toplamak ve/ve ya bu malzemelerin birleşimi ile yeni bir malzeme özelliği elde etmek için, iki veya daha fazla malzemenin makro veya mikro boyutlarda birleştirilmesi ile üretilen malzeme grubudur. Bu malzemelerin bir araya getirilmesindeki amaç, farklı bileşenlerden her birinin arzu edilen en iyi özelliklerini sisteme kazandırılarak, malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesidir. Örneğin, mukavemet, elektrik ve ısıl iletkenlik, yorulma ömrü, aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek sıcaklık özellikleri kompozit malzeme sistemleri kullanılarak geliştirilebilecek özelliklerdir (Arıcasoy, 2006).

Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin sahip olduğu özelliklerin geliştirilmesiyle üstün özellikler göstermesine ek olarak değişik faydalar da sağlamaktadırlar.

- Mukavemet/Ağırlık oranı birçok malzemedenden yüksektir.
- Aynı malzemenin farklı kısımlarında farklı özelliklere sahip malzeme elde etmek, alternatiflerine göre daha kolay ve daha ucuzdur.
- Tasarım ve şekillendirme kolaylığı sağlarlar.
- Sünek yapıya sahip olmalarından dolayı, ani şokları daha kolay karşılar ve titreşimleri sönmüleyebilirler. Çatlak ilerlemesi daha az ve yavaş olur.
- Kullanıldıkları yere göre iletken ya da yalıtkan özellik sergileyebilirler.
- Üretimleri esnasında renk pigmentleri katılarak kalıcı renklendirilebilirler. Bunun için ilave boya masrafına ve zamana ihtiyaç duyulmaz.

Bu özelliklerin hepsi bir anda aynı malzemede sağlanamamasına rağmen uygulanacak yere ve gerekli özelliğe göre bir veya birkaç özellik bir malzemede sağlanabilir. İstenen özelliğin elde edilebilmesi için uygun matris ve takviye elemanı, optimizasyonu, bileşenlerin özellikleri ve uygun üretim tekniği gibi etkenlerin karar verilmesinde dikkat edilmelidir.

Yukarıda bahsedilen avantajların yanı sıra kompozitlerin dezavantajlarından da söz etmek mümkündür. Bunların bir kısmını şöyle sıralayabiliriz;

- Kompozit malzemelerin üretimi oldukça güç ve maliyetleri yüksektir.
- Geri dönüşümü olmayan malzemelerdir.
- Üretimleri esnasında, kompozit içerisinde hava zerrecikleri oluşabilmekte buda malzemenin yorulma ve diğer mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.
- Kompozit malzemelerde değişik yönlerde farklı mekanik özellikler göstermesi söz konusu olabilir.
- İşlenmesi zor olmakta ve gereken yüzey kalitesi tamamıyla elde edilememektedir.

Yukarıda görüldüğü gibi, kompozit malzemelerin avantajlarının, dezavantajlarına göre daha çok ve kayda değer olması, bu malzemelerin kullanımının hızla artmasında etkili olmuştur (Aktaş, 2015).

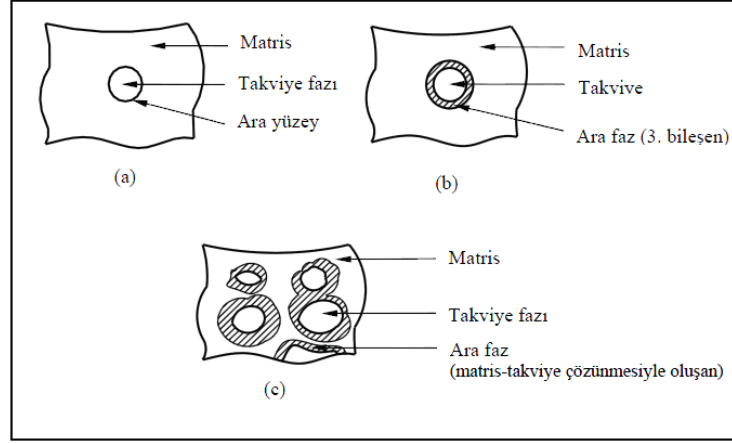
1.3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Bir malzemedan aynı anda birden çok özellik istenebilir. Genel malzeme gruplarından sayılan metaller, seramikler ya da polimerlerin tek başına kullanılması ile istenilen her özelliğin elde edilmesi güçtür. Böyle durumlarda belirli özellikleri ön plana çıkan her bir malzeme seçilir. Bu malzemeler bir araya getirilir ve her biri kompozitin bir fazını oluşturur. Her bir fazın kompozitteki görevi farklıdır (Arıcasoy, 2006).

Bir kompozit malzeme, genellikle sünek, hafif ve daha düşük dayanıma sahip olan matris fazı ile bunun içine dağılmış rijit, yüksek dayanım ve sertliğe sahip olan takviye fazı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Matris malzemesinin kompozit sisteminde kompozit malzemeye gelen yükleri takviye malzemelerine iletmek, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kırılan elyaflardan çatlağın yayılmasını önlemek, kompozit malzemenin mukavemetine katkıda bulunmak, takviye elemanlarını bir arada tutmak ve takviye malzemelerini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak gibi görevleri vardır. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde kompoziti oluşturan matris ve takviye malzemelerinin özellikleri, matris ve takviye malzemelerinin hacim oranları, matris takviye arasındaki bağın özellikleri, takviye malzemesinin şekli, yapısı ve kompozit içerisindeki yönelmesi etkili olmaktadır (Varol, 2012).

Malzemede mekanik ve fiziksel özelliklerin daha iyi olmasını sağlamak için, ana yapı içerisinde takviye elemanlarının düzenli dağılmış olması gerekir. Bunun sağlanamadığı durumlarda, yapı içerisinde zayıf bölgeler oluşur veya ayrışmalar meydana gelebilir. Kompozit malzemelerde istenmeyen bir başka durum ise yapıda istenmeyen süreksizliklerin oluşmasıdır. Çünkü bu durumda malzemenin özellikleri olumsuz yönde etkilenecektir (Aycan, 2010).

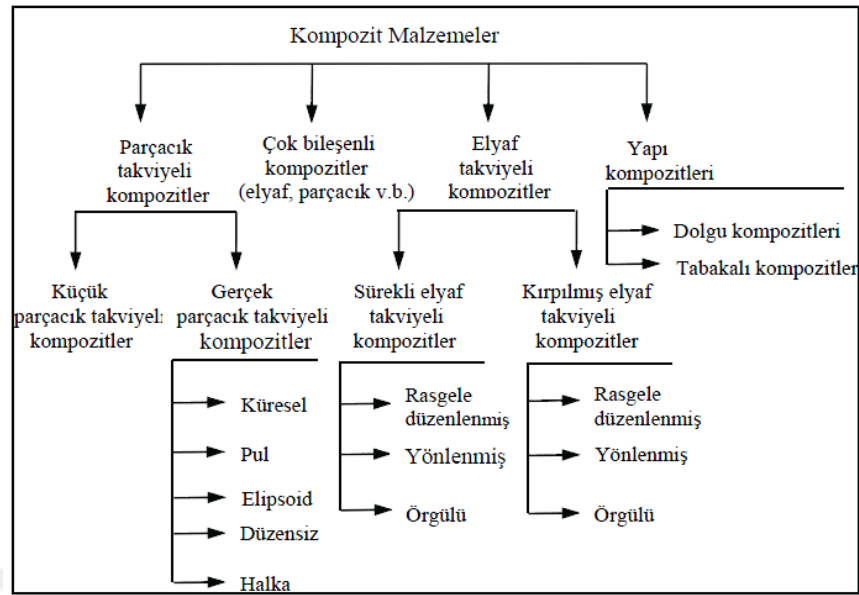
Kompozitin tarifine göre matris ve takviye fazı birbiri içinde çözünmemelidir. Ancak çok az miktarda çözünürlük matris-takviye arasında güçlü bir bağın oluşumunu olumlu yönde etkiler (Şekil 1.2 c) (Çanakçı, 2006).



Şekil 1.2. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve arafazlar a) Doğrudan (ara fajsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu (Çanakçı, 2006)

1.3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler değişik kriterler esas alınarak sınıflandırılabilir. Kompozitin ana dokusunu oluşturan matris malzemesine göre; metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer matris kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Ancak uygulamada en yaygın olarak kullanılan sınıflandırma kompozite mukavemet kazandıran takviye malzemesine göre yapılır (Şekil 1.3) (Çanakçı, 2006).



Şekil 1.3. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması (Çanakçı, 2006)

1.4. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matris kompozit malzemeler (MMK), kompozit malzemelerin bir grubunu temsil eder. MMK malzemeler, tüm kompozitler gibi kimyasal ve fiziksel olarak farklı olan en az iki fazı içerir. Bu kompozit elde edilebilir tek fazlı malzemelerde olmayan özellikleri ortaya çıkarmayı amaçlar. Genellikle fiber yada partikül fazı olmak üzere iki faz kullanılmaktadır. Genellikle takviye fazları metalik matris içinde dağıtılarak metal matris kompozit oluşturulur. Metalik matrise seramik takviye edilmiş metal matris kompozitler mükemmel mekanik performans sergilerler. Takviye elemanları kompozitte sürekli veya süreksiz fazlar olmak üzere iki şekilde yer alır (Grover, 2007).

MMK malzemeler yüksek elastik modüle, yüksek çekme-basma ve kayma mukavemetine, yüksek servis sıcaklığına sahip olmaları ayrıca, metallerin süneklik ve tokluğunu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modül özelliklerini birleştirmelerinden dolayı son derece önemli bir mühendislik malzemeleri olmuşlardır. Bu üstünlüklerinin yanında tekrar üretilebilir mikroyapı, mekanik özellikler ve düşük yoğunluk değerleri vermeleri açısından daha da önem kazanmışlardır.

MMK malzemeler yüksek sıcaklık uygulamalarında bazı dezavantajlarına rağmen seramik esaslı kompozitler yerine tercih edilmektedir. Seramik malzemeler termal şok direnci ve toklukları oldukça düşük malzemelerdir. Bu yüzden MMK malzemelerin

otomotiv ve uzay araçlarının motor kısımlarında kullanımı seramik esaslı kompozit malzemelere göre daha yaygındır (Aydın, 2008).

MMK malzemeler uçak ve uzay sanayi ürünlerinin dışında mermi, uydu, yatak malzemesi kompresör kanatları gibi geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Bu kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan kompozit malzemelerin kullanımını kısıtlayan en temel faktör üretim maliyetleri olmaktadır (Campbell, 2010).

1.4.1. Matris Malzemeleri

MMK’lerde matris elemanının görevi, takviye elemanlarının malzeme içerisinde belirli bir düzende tutunmasını sağlamak ve malzemeye uygulanan yükleri (mekanik, ısı, vb) takviye elemanına iletmektir. Matris elemanının bir diğer görevi de takviye elemanının MMK malzemedeki neden olduğu düşük sünellik gibi olumsuz özelliklere engel olmaktır.

Matris ile takviye elemanı arasında fiziksel ve kimyasal bir uyumluluğun olması, MMK’lerde bulunması gereken en önemli özelliklerin başında gelir. Bunu sağlamak için, matris malzemeleri genellikle alaşım esaslı metallerden seçilmektedir. Böylece ıslatmanın artacağı ve güçlü bir ara yüzey bağ kuvvetinin elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca özellikleri takviye elemanı ile daha da geliştirilerek yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, termal kararlılık, kolay üretilebilirlik özelliklerinin artırılması söz konusudur (Kumdalı, 2008).

MMK’lerde matris malzemesi olarak metal ve metal alaşımları kullanılmaktadır. Saf metallerin dayanımlarının yetersiz olmasından dolayı MMK’lerde, çoğunlukla metal alaşımları kullanılmaktadır. En çok kullanılan matris malzemesi alüminyum olup sırasıyla demir, titanyum ve nikel de MMK’lerde yüksek sayılabilecek bir oranda tercih edilen malzemelerdir.

1.4.2. Takviye Elemanları

MMK malzemelerin üretiminde matris malzemesi kadar takviye elemanı da önemli bir yere sahiptir. Takviye elemanı, kompoziti oluşturan en önemli elemanlardan biri olup, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır. Takviye elemanı seçimini etkileyen başlıca faktörler, kompozitten beklenen özellikler, üretim yöntemi ve maliyettir.

Kompozitten beklenen nihai özellikler dikkate alınarak uygun yoğunluğa, yüksek dayanım değerine ya da uygun ısı genleşme ve iletkenlik özelliğine sahip bir takviye elemanı seçilmelidir. Takviye malzemesi matris ile uyumlu olmalı ve matris tarafından kolay ıslatılabilme özelliğine sahip olmalıdır. Üretim yönteminde sıcaklık ve matris alaşımı ile takviye elemanının etkileşim süresi göz önüne alınarak, istenmeyen reaksiyonların yaşanmayacağı bir takviye elemanı seçmek gerekir (Deniz, 2000).

Genellikle MMK malzemelerde takviye malzemesi olarak SiC, Al₂O₃, B₄C, TiB₂, ve grafit gibi seramik malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit içerisinde yer alacak takviye elemanları, sürekli lif, kırık lif, kedi bıyığı (whiskers), plaka veya düzensiz şekilli olabilir. Takviye elemanın, yapı içerisindeki dağılımı sistemin homojenliğini tayin eder. Bu homojenlik, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemede önemli bir faktördür (Uygur, 2004).

1.4.2.1. Alümina (Al₂O₃)

Günümüzde alümina kimyasalları birçok bilimsel, teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmakta ve üzerine yapılan araştırmalar günden güne artmaktadır. Alümina, ileri seramikler arasında en yaygın kullanılan ve ekonomik açıdan en uygun olan yapısal mühendislik malzemesidir. Alüminanın bilimsel keşfi geçen yüzyıl içindedir fakat ticari olarak kullanımı, 1907 yılında yüksek alümina seramik üretimine ait bir patentle başlamıştır (Önel, 1995).

Alümina, kristalografik olarak oksijen iyonlarının alüminyum iyonları tarafından sıkı hegzogonal olarak sarılması ile ifade edilebilir. Dış görünüş olarak beyaz bir tozdur (Ekinci, 2007) Oksit yapıdaki seramik çeşitlerinden biri olan alümina, endüstride genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Kimyasal olarak oldukça kararlı bir yapıda bulunan alüminanın, diğer malzemelerle tepkimeye girme eğilimi düşüktür (Miracle ve Donaldson, 2001). Alüminanın ilk ticari kullanım alanı buji ve laboratuvar malzemeleridir (Önel, 1995).

Ergime noktası 2000±30°C olan alüminyum oksit düşük sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı en dayanıklı malzemelerden birisidir. Alümina, suda ya da iyi kalsine edilmişse hem mineral asitlerinde hem de bazlarda çözünmez. Sodyum karbonat, kostik soda ve sodyum peroksit, saf alümina potalarda çok az tahribatla eritilebilir.

1700–1800°C gibi yüksek sıcaklıklarda, flor gazı dışında bütün gazlara karşı direnç gösterir. Alümina, oksitleyici ve indirgeyici atmosferde 1900°C'ye kadar kullanılabilir.

Doğal alümina, korundum halinde fakat feldspat ve killerde olduğu gibi genellikle silikatlarla birlikte bulunur. Alümina aynı zamanda, boksit, diaspor, kriyolit, sillimanit, kyanit, nefelit ve diğer birçok mineralin bileşiminde yer almaktadır. Saf alümina, düşük sıcaklıkta birkaç formda bulunur. Fakat bütün bu formlar zaman, kristal boyutu ve atmosfere bağlı olarak, 750–1200 °C arasında α -alüminaya dönüşür. 1600°C' nin üzerinde yapılan ısıtma bu dönüşümü hızlandırır (Değerli, 2002).

Alümina yapısal seramik endüstrisinin en çok tercih edilen malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Düşük maliyetli ve kolay temin edilebilir bir seramik olan alümina, oksitler arasında en yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direncine sahip olması sebebiyle öğütücü değirmenlerin bilyelerinde, tekstil endüstrisinde, aşındırıcı malzemeler, rulmanlar ve kesici takımlarda tercih edilmektedir. Kimyasal açıdan inert olması birçok agresif ortamda kullanımına olanak sağlar. Yüksek elektrik direncine sahip olması elektriksel yalıtıcı ve bileşenlerinde tercih sebebidir (Heimann, 2010). Yüksek biyouyumluluğu ile biyomalzeme olarak eklem, diş protezlerinde ve implantlarda tercih edilmektedir (Öztürk, 2007). Ancak bu üstün özelliklerinin yanında düşük kırılma tokluğu, düşük çekme ve eğme mukavemeti ile düşük ısısal şok direnci gibi dezavantajları bulunması bu malzemelerin özellikle yapısal seramik malzeme olarak kullanılmasında kısıtlanmaya sebep (Heimann, 2010).

1.4.2.2. Grafit

Grafit, yüksek sıcaklıkta mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek buharlaşma sıcaklığı, ıslanmazlık özelliği ve termal şoka karşı dirençli olması gibi üstün özellikleri nedeniyle ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan başlıca malzemelerdendir. Bununla beraber, yapı ve özelliklerindeki heterojenlik, oksidasyona karşı düşük direnç ve gevreklik gibi istenmeyen özelliklere de sahiptir (Sevinçtav, 1993).

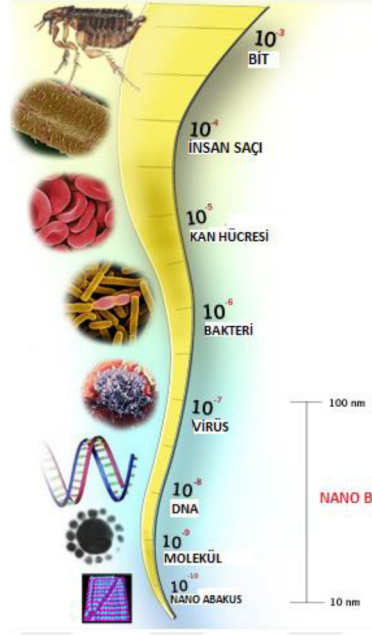
Aynı maddenin farklı kristal biçimlerine allotrop denir. Grafit, karbonun allotroplarından biridir. Elmasın yapısında her bir karbon atomu dört farklı karbon atomuna bağlanır ve üç boyutlu bir yapı meydana gelir. Grafitte ise karbon atomları üst üste yığılmış, geniş, yassı levhalar oluşturacak biçimde, iki boyutlu düzlemde birbirlerine bağlanmıştır. (Karagöz, 2011).

Grafit, tabakalı yapıya sahip olup; tabakalar boyunca yoğunluk oldukça yüksektir ve tabakalara dik doğrultuda yoğunluk düşmektedir. Grafitin yapısında, tabakalardaki karbon atomları birbirleriyle 129^0 'lık açıyla güçlü kovalent bağ oluştururken, tabakalar daha zayıf olan van der Waals kuvvetleri ile bağlanmıştır. Tabakalardaki komşu atomlar birbirlerine tabakalar arası mesafeden daha yakındır. Bu durum kristal yapıda aşırı anizotropiye neden olmaktadır. Dolayısıyla grafitin özellikleri yöne bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, karbon düzlemlerine paralel yönde ısı ve elektrik iletkenliği yüksek iken dik yönde düşüktür. Yoğunluk ise tabakalar boyunca yüksek olup, tabakalara dik doğrultuda daha düşüktür (Geçkinli, 1992).

Yapılan kayma deneylerinde grafitin tabakalar halinde ince bir film oluşturarak yüzeylere yapıştığı ve bu sayede malzemelerin daha düşük sürtünme katsayısı oluşturduğu belirtilmekte ve ortamda bulunan düşük orandaki su, grafitin yağlayıcı bir ortam oluşturmasını sağlamaktadır (Aslan, 2004).

1.5. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji kavramı, etimolojik kökleri açısından, Yunanca “cüce” anlamına gelen “nano” ile “teknoloji” kavramının bileşiminden oluşmaktadır. Nano, kelime olarak fiziksel bir büyüklüğün bir milyarda birini ifade etmek için kullanılmaktadır. Genellikle metre ile birlikte kullanılmaktadır. Nanometre metrenin bir milyarda biri olduğu için kafamızda canlandırmamız zor olabilir. İnsan gözüyle ayırt edebileceğimiz en küçük cisimlerden birisi insanın saç telidir. Ancak onun kalınlığı bile 10.000 nanometre civarındadır. Dolayısıyla daha somut olarak ifade etmek gerekirse; bir nanometre ortalama olarak insan saç telinden yaklaşık 10,000 kez daha küçüktür (Tevfik, 2015).



Şekil 1.4. Örneklendirilmiş nano boyut skalası (URL-1, 2014).

Nanoteknolojinin tam bir tanımı olmamakla birlikte, genel görüşe göre nanoteknoloji; 100 nanometreden küçük boyutlarda maddelerin anlaşılması, kontrol edilmesi, atomik seviyede değiştirilip, işlevsel hale getirilmesi olarak tanımlanabilir. Nanobilim ile ilgili yapılan en yaygın yorum; atom ve moleküler boyutta ölçüm, izleme ve üretim yapabilme ve bu boyutlarda yeni özellikleri işleyebilme olarak ifade edilmektedir (Arnall, 2003). Nanoteknoloji; nano boyutta malzemeleri kontrol eden bilim ve teknolojiyi geniş çaplı tanımlayan kapsamlı bir terimdir (Bergeson, 2004).

Nano parçacıkların özellikleri, boyutlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Nano parçacıkların en önemli özellikleri, hacimlerine bağlı olarak büyük bir yüzey alanına sahip olmalarıdır. Tane boyutlarının çok küçük olmasından dolayı, nano kristaldeki mikro yapıların büyük bir kısmı tane sınırlarındaki ara yüzeylerden oluşmaktadır. Yani atomların büyük bir kısmı tane sınırlarında yer almaktadır. Büyük taneler içeren kristal yapılarla karşılaştırıldığında nano kristalin malzemeler, daha yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek difüzyon hızı sergiler ayrıca toz metalürjisi üretiminde düşük sinterleme süresine olanak sağlar (Suryanarayana, 2004).

Bir malzemenin sahip olduğu özellikler, malzemenin bir ya da daha fazla doğrultudaki büyüklüğü nanometre düzeyinde küçültüldüğünde değişmektedir. Örneğin, kırılkan bir yapıya sahip olan seramik bir malzeme, tane büyüklüğü nanometre seviyesine

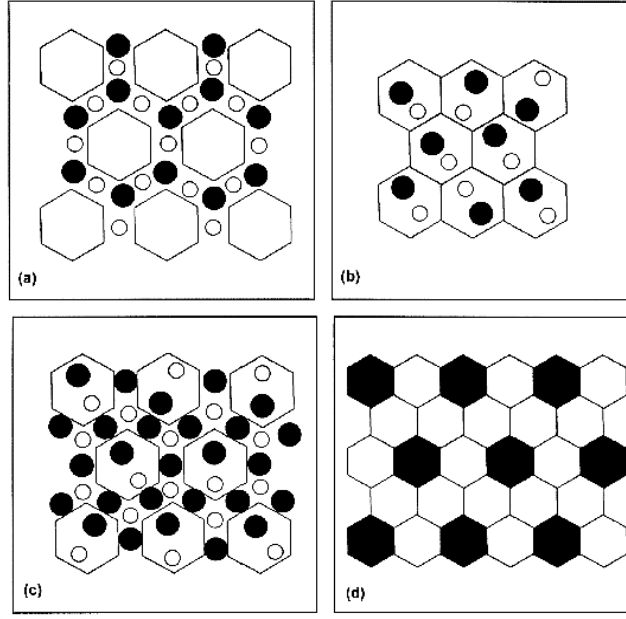
indirildiğinde kolaylıkla deforme olup şekillendirilebilmektedir. Normalde sarı renkli olarak gözüken altının 1 nm büyüklüğündeki tanesi kırmızı renk göstermektedir. Bunun dışında, nano büyüklükteki tozlarla takviyelendirilen kompozit malzemeler çok daha yüksek performans değerlerine ulaşmaktadır. (Balcı, 2006).

Teknolojide önemli bir yere sahip olan nano teknoloji, özellikle sağlık, savunma, tekstil, enerji, elektronik, fotonik ve bilişim teknolojileri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu uygulamaları, bilgisayarların güç ve kapasitelerinin arttırılması, kuantum bilgisayarlar, sensörler, gelişmiş silah sistemleri, kamuflaj, akıllı giysiler, tıkanmayan stentler, kanser ilaçları, kolestrol parçalayan cihazlar, temiz enerji eldesi, tarım ürünlerinde iyileştirme, suyu seven ve iten yüzeyler, nano sensörlü kumaşlar olarak sıralayabiliriz (Arier, 2011).

1.5.1. Nanokompozitler

Nanokompozit malzemeler, kompozit malzemelerin bileşenlerinin nano boyutta olduğu malzeme sınıfıdır ve nanokompoziti oluşturan bileşenlerin en az birinin boyutları 100 nm' den daha azdır. Malzemenin nanoboyuttaki özellikleri, aynı malzemenin makro boyuttaki özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Nanoboyutlu malzemeler işlevsellik, dayanıklılık, az yer kaplama ve hafiflik gibi özellikleri iyileşmektedir (Arier, 2011).

Nanokompozitler matris yapısına göre metal matrisli nanokompozitler(MMNK), seramik matrisli nanokompozitler (SMNK) ve polimer matrisli nanokompozitler (PMNK) olarak sınıflandırılabilirler. Mikro yapıya göre yapılan sınıflandırmada, Niihara' ya (1991) göre nanokompozitler tane içi, taneler arası, hibrit ve nano-nano kompozitler olmak üzere dörde ayrılır (Şekil 1.5). İlk üç sınıfta sadece takviye elemanı nano boyutlarda iken sonuncu sınıfta hem matris hem de katkı elemanı nano boyutlardır. Taneler arası nanokompozitlerde (Şekil 1.5 a), nanometrik ölçülerdeki takviye elemanı, mikron mertebesindeki matris fazında tane sınırları boyunca dağılır. Tane içi nanokompozitlerde (Şekil 1.5 b) ,takviye elemanı kaba matris tanelerinin içinde bulunur, hibrit şeklindeki nanokompozitlerde (Şekil 1.5 c) ise takviye elemanı, hem matris taneleri içinde hem de tane sınırlarında bulunur (Suryanarayana, 2004).



Şekil 1.5. Nanokompozitlerin mikro yapılarına göre sınıflandırılması; (a) tanelerarası, (b) tane içi, (c) hibrit, (d) nano/nano kompozitler (Dalmış, 2014)

Nanokompozitlerin malzemeye sağladığı üstünlükler; elastiklik modülünü arttırması, ısı direncini arttırması, malzemeye gaz sızmasını engellemesi, yanıcılığını azaltması olarak sıralanabilir (URL-2, 2015). Ayrıca, nano ve mikro kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, parçacık boyutunun mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve azalan parçacık boyutu ile birlikte mukavemet, kopma mukavemeti, sıkıştırma mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerin en iyi derecelere geldiği saptanmıştır (Sajjadia vd., 2012). Sağladığı bu üstün özellikler nedeniyle nanokompozitler, uzay araçlarında, jet motorlarında ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve bu malzemelere olan ilgi günden güne artmaktadır.

1.5.2. Metal Matrisli Nanokompozitler (MMNK)

Takviye elemanlarının parçacık boyutu, MMK malzemelerin kırılma yapısı, mukavemet ve sünekliliğinde önemli bir etkiye sahiptir. Malzemenin mukavemet ve sünekliliği artan parçacık boyutuyla azalır. Bu nedenle MMK malzemelerin mekanik özellikleri, parçacıkların mikron boyutundan nano boyutlara düşürülmesiyle daha da

arttırılabilir. Bu şekilde, nano parçacık takviyeli MMK malzemelere metal matrisli nanokompozitler denir.

MMNK'lerin üretiminde karşılaşılan ana sorun, seramik nano parçacıkların ergimiş metal matrisle ıslanabilirliğinin düşük olmasıdır. Bu durum MMNK'lerin geleneksel döküm yöntemleriyle üretilmesine izin vermez. Güçlendirme potansiyelinin en uygun kullanımı için toz parçacıklarının matris içine homojen olarak dağılması gereklidir. Tozlar bu yeteneğini kaybederek kümeleşme eğilimi içine girerler. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla birçok üretim metodu öne sürülmüştür.

Nano kompozitlerde belli istenilen özelliklerin elde edilmesinde birkaç önemli etken vardır. Tane büyüklüğü kritik bir değerin altında olduğunda, dislokasyon yığılmaları oluşmaz ve Hall-Petch ilişkisinde sapma görülür. Bu da negatif Hall-Petch eğrisine sebep olarak, mukavemetin düşmesine ve bünyenin yumuşamasına neden olur. Nanokompozitte arzu edilen mekanik özellikleri elde etmek için, nano takviye elemanları metal matris içerisinde homojen olarak dağıtılmalıdır. Bununla birlikte seramik nano parçacıkların metal içerisinde homojen dağıtılması zordur. Nano parçacıklar sıvı metalürjik işlemler sırasında kaba kümeler halinde aglomere olma eğilimindedir. Bu büyük yüzey alanlı nano parçacıkların zayıf ıslatma kabiliyetine sahip olmasından dolayıdır. Bu durumda, eriyik içindeki nano seramik parçacıklarını homojen dağıtmak için yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar kullanılabilir. Ancak bu işlem hala gelişme aşamasındadır. Bu durumda homojen dağılım elde etmek için en uygun yöntem mekanik alaşımlama yöntemi olarak görülmektedir (Tiong, 2007).

1.5.2.1. Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri

Nanokompozitlerin geniş bir araştırma alanının olması ve nanokompozitlere olan ilginin her geçen gün artmasında dolayı, nanokompozitlerin üretiminde birçok farklı matris ve takviye elemanları kullanılmaktadır. Farklı özelliklerde matris ve takviye malzemelerinin kullanılıyor olması MMNK'lerin üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesine sebep olmuştur ancak genel olarak metal matrisli nanokompozit üretimi ile metal matrisli kompozit üretimi arasında önemli farklılıklar yoktur, en temel fark üretimde kullanılan partiküllerin boyutudur. Üretim sırasında matrisin sıvı, katı veya buhar fazında olmasına göre MMNK'lerin üretim yöntemleri şekilde gösterildiği gibi sınıflandırmak mümkündür;

Katı-Faz Üretim Yöntemleri

- Difüzyonla Bağlama
- Toz Metalurjisi (TM)

Sıvı-Faz Üretim Yöntemleri

- Sıvı-Metal infiltrasyon
- Püskürtme
- Karıştırmalı döküm
- Kompo döküm
- Reaktif (In-situ) yöntemi
- Sıkıştırılmalı döküm

Diğer Yöntemler

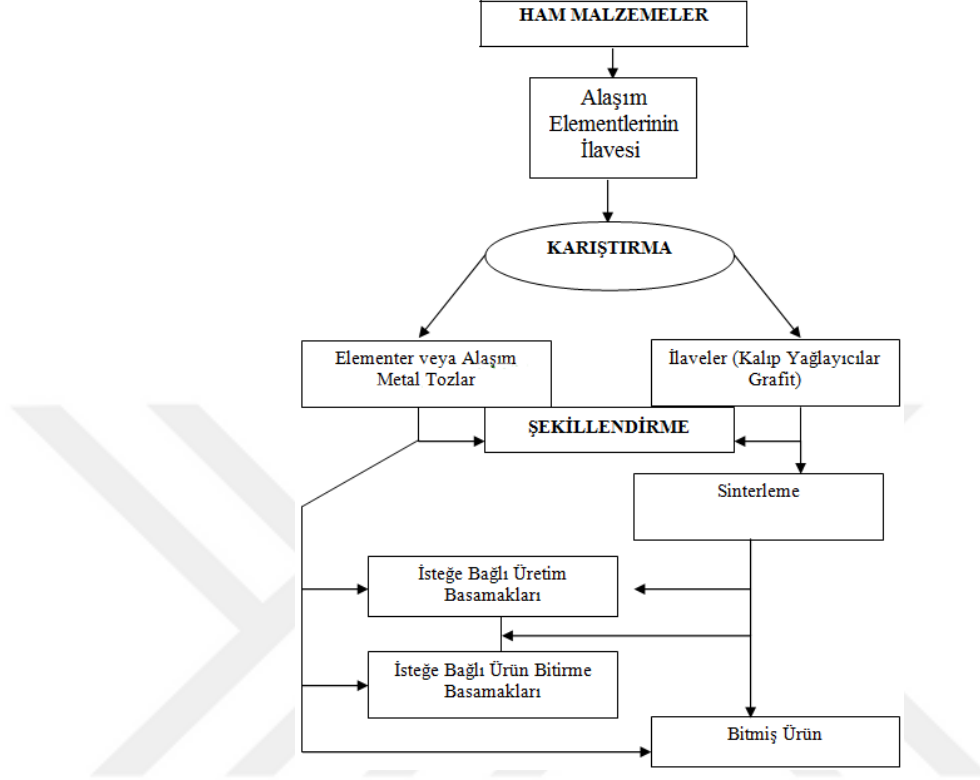
- Rheocasting ve Compocasting Döküm Yöntemleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği

1.6. Toz Metalurjisi (TM)

Toz metalurjisi (T/M)yöntemi, mekanik ve fiziko-kimyasal yöntemlerle metal, seramik ve alaşımların toz haline getirilmesi ve bu tozlardan basınç ve sıcaklık yardımıyla karmaşık şekilli parçaların yüksek kalite ve düşük boyutsal toleransta üretilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Tozların üretimi, özellikleri, şekillendirilmesi ve elde edilen parçanın kullanılabilirlik testleri gibi alt başlıkların tamamı da toz teknolojisi kapsamında incelenmektedir. T/M yöntemiyle; döküm, kaynak, talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi yöntemlerle üretilmesi oldukça zor veya imkânsız olan birçok farklı alaşımlar, seramikler, metaller ve polimer malzemeler yüksek boyut hassasiyetiyle üretilebildiği için diğer yöntemlere göre oldukça avantajlı bir işlemdir. Bu nedenle T/M yöntemi ile üretilen malzemelerin pazar payları hızlı bir şekilde artmakta ve bu malzemeler birçok sektörde kullanım alanı bulmaktadır (Söyler, 2007).

T/M üretim süreçleri genel anlamda düşünüldüğünde, oldukça geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemler (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma, vb.) olmak üzere

belirli aşamalardan oluşur. Şekil 1.6'da toz metalurjisi işlemleri basamaklar halinde gösterilmiştir (Erdoğan, 2011).



Şekil 1.6. Toz metalurjisi işleminin şematik gösterimi (Erdoğan, 2011)

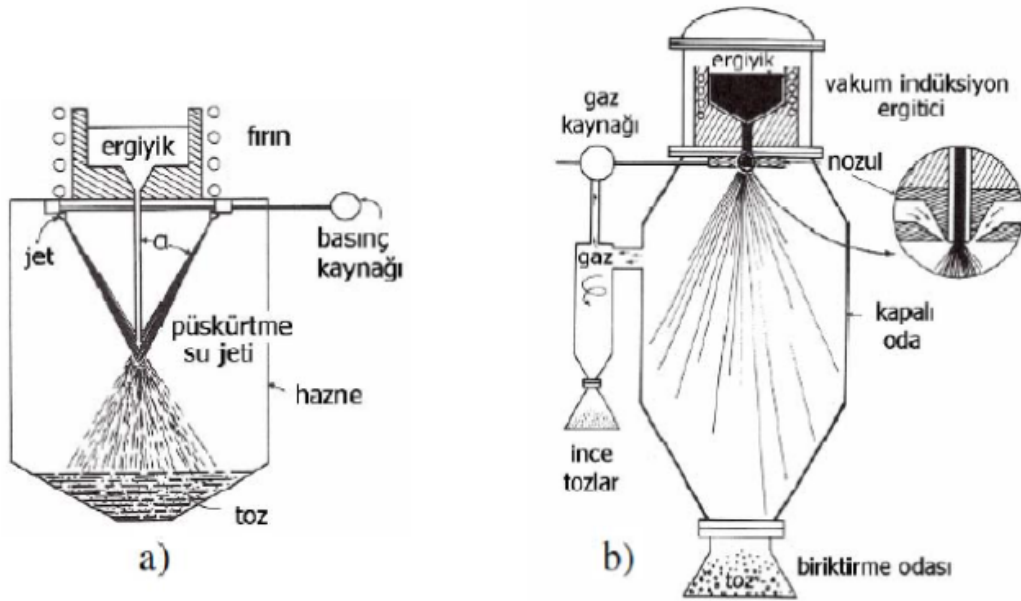
T/M oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Tungsten lamba filamentleri, nükleer güç yakıt elemanları, uçak fren balataları, yüksek sıcaklık filtreleri, dişli çarklar, dişçilik, yağlamasız yataklar, elektrik kontak malzemeleri, ortopedik gereçler, ofis makinaları parçaları, akü elemanları, spor malzemeleri ve jet motor parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır (Mediha, 2007).

1.6.1. Metal Tozların Üretimi

Tüm toz metalurjisi yöntemleri hangi tip parça üretilecek olursa olsun ham madde olarak toz formunda malzemeden başlamaktadır. Dolayısıyla T/M yönteminde başarılı bir

son ürün elde edebilmek için başlangıç malzemeleri olan tozların özellikleri çok önemlidir. Tozların kimyasal bileşimi ve saflığının yanında parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı, parçacık şekli ve tozların yüzey yapısı da dikkat edilmesi gereken konulardır. T/M’de kullanılan metal tozlarının boyutu 0,1-200 μ m arasında değişmektedir ve her geçen yıl gelişen teknolojiyle birlikte toz boyutu daha da küçülmektedir. Geçmişte toz üretiminde kullanılan en yaygın yöntemler mekanik, kimyasal ve elektrolitik yöntemlerdi. Günümüzde ise endüstride kullanılan tozların % 60’ dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir.(Yalçın, 2015)

Atomizasyon, ergimiş metalin spray ile aniden soğutularak toz haline getirilmesi işlemidir. Bunun için farklı teknikler geliştirilmiştir. Birisi ergimiş metal akarken su püskürterek ani soğumayı sağlamaktır. Su atomizasyonu denilen bu yöntemde metal çok hızlı soğuduğundan, düzensiz şekilli parçalar elde edilir. Su aynı zamanda bazı metallerin oksitlenmesine neden olur. Daha uygun bir yöntem olan gaz atomizasyonu yönteminde ergimiş metale inert bir gaz püskürtülür. Bu işlemle gaz daha yavaş soğuduğundan daha yuvarlak şekilli tozlar elde edilebilir ve tozların oksitlenmesi engellenmiş olur (Varol, 2012).



Şekil 1.7. a) Su atomizasyonu yöntemi b) Gaz atomizasyonu yöntemi (Yılmaz, 2013).

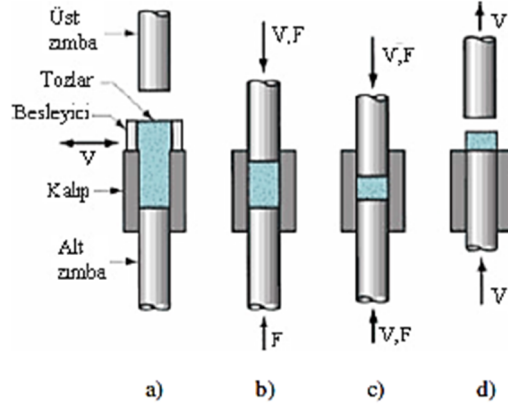
Farklı toz üretim metotlarıyla üretilen tozların şekilleri farklı bir yapı ortaya koyacaktır. Değişik toz üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen toz tane şekilleri; küresel, yüksek gözenekli, karmaşık, dendritik, pul ve iğnesel olabilmektedir. Tozların fiziksel

özelliklerinden olan toz şekli, toz boyutu dağılımı ve spesifik yüzey alanı tozların, görünür yoğunluğuna, sıkıştırma işlemi sırasında kalıba akış davranışlarına, sıkıştırılabilirliğine ve sinterleme sonrası davranışlarına etki etmektedir. Kimyasal bileşim ve saflıkta tozların preslenmesini etkileyen faktörlerdir. (Yalçın, 2015).

1.6.2. Tozların Presleme İşlemi

Tozların sıkıştırılmasında kalıp olarak genellikle kalıp çeliklerinden yapılan düşük hata paylı kalıplar; presleme işlemleri için pres olarak da emniyet ve esnekliklerinden dolayı sıkıştırma işlemlerinde yaygın olarak hidrolik veya mekanik presler kullanılmaktadır. Metal tozlar, özel olarak hazırlanmış kalıp içerisinde basınç etkisiyle kompakt hale getirilir. Sıkıştırmanın temel amacı, toz parçacıklarının istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır. Toz tipi ve özellikleri presleme basıncı üzerinde etkilidir (Güler, 2015).

Presleme esnasında tozlar, kalıba doldurulma sırasında sadece yerçekiminin etkisi altında serbest, düzensiz ve gelişigüzel köprücükler kurarak yığılırlar. Bu sırada toz parçacıkları arasında büyük boşluklar bulunmaktadır. “Paketlenme safhası” olarak adlandırılan ilk aşamada kalıbın titreştirilmesi sonucu tozlar kalıp içerisinde daha yüksek yoğunluklu olarak düzene girerler. Bundan sonra kalıbın ve presin hareketleri sonucunda tozlar sıkışmaya başlarlar. Belirli bir basınçtan sonra toz parçacıkları önce elastik daha sonra plastik şekil değişikliğine uğrarlar. Şekil değiştirme kabiliyeti olmayan metal tozları ise kırılırlar. Toz taneciklerinin yüzeylerindeki kayma deformasyonu sonucu meydana gelen bu şekil değişiklikleri toz parçacıklarına etki eden simetrik ve asimetrik kuvvetler sonucudur. Bu deformasyonlar sonucu toz parçacıkları birbirlerine kenetlenerek kümeler oluştururlar. Bir yandan da oksit tabakaları kırılır. Bu safhaya “elastik ve plastik şekil değiştirme safhası” adı verilir. Mekanik bağlanma olayı esnasında şekil değiştirmiş olan toz parçacıklarının birbirlerine değme alanları yani paketlenme faktörleri de artmıştır. Sıkıştırma sonucu parçacıklar arası adhezyon kuvveti artar ve şekil değiştirme yeteneği kalmayan tozlar soğuk kaynak olur ve sıkıştırma işlemi tamamlanmış olur (Palacı, 2001). Presleme tek etkili ya da çift etkili yapılabilir. Presleme süresince kalıp içerisinde gerçekleştirilen işlemler Şekil 1.8’ de adım adım gösterilmiştir (Groover, 2009).



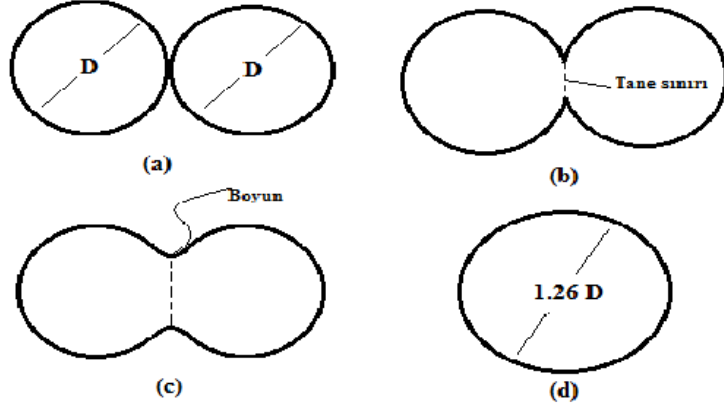
Şekil 1.8. TM'de presleme kademeleri, (a) kalıbın besleyici tarafından tozla doldurulması, (b) alt ve üst zimbaların presleme esnasındaki hareketi, (c) sıkıştırma ile son şeklin verilmesi, (d) parçanın kalıptan çıkarılması

Tozlar bir metal kalıba dolduruldukları zaman belirli bir yoğunluk alırlar. Bu görünür yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmen de kalıp şekline bağlıdır. Basınç arttıkça, malzemenin yoğunluğu da artar veya alternatif olarak gözeneklilik azalır. Sonuç olarak tozlarda, uygulanan yükten dolayı deformasyonla birlikte hem yoğunluk meydana gelir. Ancak bu durumda malzeme uygulamalarda kullanılabilecek durumda değildir, çünkü tozlar arasındaki bağ kuvveti bu haliyle yetersizdir. Tozların birbirine daha iyi bağlanmasını sağlamak, malzemenin mukavemetini ve yoğunluğunu arttırmak için şekillendirilmiş numunenin sinterleme denilen pişirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir (Özkaya, 2014).

1.6.3. Sinterleme İşlemi

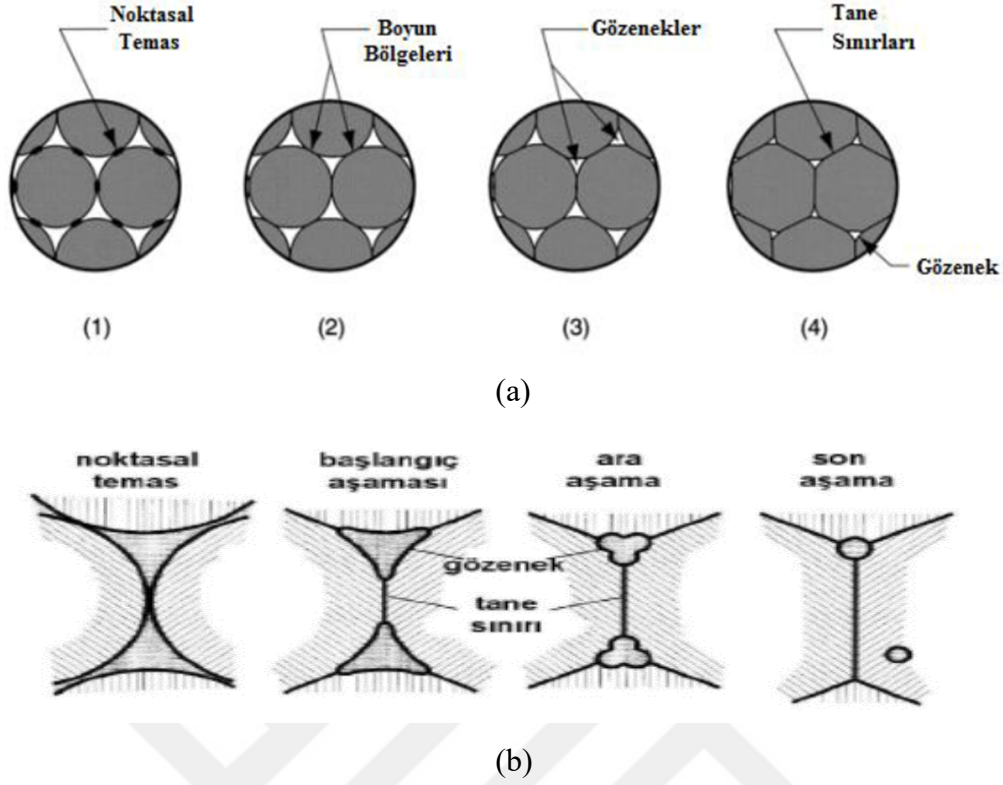
T/M teknolojisinin diğer önemli bir adımı da sinterleme ısı işlemidir. Sinterleme işlemi, gözenekli yapıda bir form kazandırılmış tozların yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Presleme sonrası şekil verilen toz metal ham parçanın, ergime sıcaklığının yarısının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılır ve toz parçacıklarının arasında sıkı bir bağ oluşturularak sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Sinterlemenin başlaması noktasal olarak temas halinde bulunan toz parçacıklarının katı-hal bağına dönüşümü ile olur. Sinterleme işlemi sırasında, nokta teması ile başlayan, ara parçacık bağının gelişmesi ile devam eden

mekanizmaya çift-küre sinterleme modeli denilmektedir (Şekil 1.9). Bu modelde, parçacık temasının sonucunda oluşan boyun büyümesiyle yeni bir tane sınırı oluşur ve iki parçacık tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşir (Biçer, 2015).



Şekil 1.9. Sinterlemede nokta teması ile başlayıp parçacıklar arası bağ gelişimiyle devam eden iki küre sinterleme modelinin şematik gösterimi (German, 2007).

Sıkıştırma öncesinde parçacıklarda küçük noktalar halinde temas başlar. Başlangıçta gözenekler köşeli ve düzensiz şekildedir. Boyun dış bükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir iç bükeyliği göstermektedir. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Gözeneklerin çevresindeki kavis, kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurmasına rağmen sinterlemenin ara kademesinde gözenekler yuvarlaklaşır. Boyunlar birbiri ile etkileşerek örtüşecek hale gelene dek büyümeye devam eder. Gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelirler ancak hala dışa açık durumda bulunurlar. Yani hala akışkanların ham parça içine girip çıkabilmesi söz konusudur. Sinterlemenin devam etmesi ile gözenekler küçülür ve taneler büyür. Sinterlemenin devam etmesiyle gözenekler kapalı ve küresel bir hal alır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. (a) Mikroskopik ölçekte sinterleme: (1) parçacık bağları, temas noktalarında başlar; (2) temas noktaları “boyun” halinde büyür; (3) parçacıklar arasındaki gözenekler, boyut olarak küçülür ve boyun oluşan bölgelerde tane sınırları oluşur. (b) Sinterlemede gözenek yapısındaki değişimi (Varol, 2012)

Sinterleme, malzemenin cinsine, numunenin şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak değişik metotlarla gerçekleştirilebilir. Sinterleme metotları, genel olarak; katı, sıvı ve reaksiyon sinterlemesi olarak üç grupta toplanmıştır. Ayrıca sinterleme sıcaklığı, sinterleme atmosferi, sinterleme süresi gibi sinterleme parametreleri de sinterleme sonucunu etkileyen önemli faktörlerdendir (Özkaya, 2014).

1.6.4. Sıcak Presleme (SP) İşlemi

Sıcak presleme işlemi, ısı ve basıncın bir araya gelerek neredeyse tamamen iç gözeneklilikten arınmış bir ürün elde etme işlemidir. Şekil 1.11’de verildiği gibi, sıcak presleme rijit bir kalıp içerisinde tek eksenli basınç kullanılarak gerçekleştirilir. Sistemin çalışmasında üst koç genellikle hidrolik sistem olarak hareket ederken alt koç sabit olmaktadır. İşlem süresince uygulanan kuvvet her ne kadar eşeksenel ise de kalıp yüzeylerinde meydana gelen sürtünme nedeniyle merkezden yanlara doğru değişen bir

dağılım gösterir. Buna bağlı olarak meydana gelen eksenel ve radyal yönler arasındaki gerilim farkı, toz yüzeylerinin bozulmasına neden olan bir kayma bölgesi oluşturur. Bu durum toz yüzeylerinin bozulmasına sebebiyet verir. İşlem esnasında tane büyümesi ve hacim difüzyonu baskın mekanizmalardır. Sıcaklık kritik rol oynar ve küçük taneler yoğunlaşmayı olumlu etkiler (Cura, 2002).



Şekil 1.11. Tek eksenli sıcak presleme işleminin kesit olarak gösterilişi (German, 2007).

Basıncı, statik veya dinamik olarak ısıtılmış toza bir veya iki yerden zıt yönlerde tek bir eksenle uygulanmaktadır. Oksidasyon veya hava tarafından nitridasyondan sıcak tozları korumak için kontrollü bir atmosfere ihtiyaç vardır. Sıkıştırılmış kutu içinde toz metalin sıcak preslenmesi toz metalin eski sıkıştırma uygulamalarındandır.

SP' nin avantajları olarak; düzgün iç yapı malzemelerin imal edilmesi, maliyetin düşük olması, oksitlenmeyen seramiklerin üretilmesi, fiziksel özelliklerin daha iyi olması ve yüksek yoğunluklu malzeme üretilmesi söylenebilir. SP ile yüksek özellikte ürün elde edilmesine rağmen kalıbın aşınması, zımba yüzleşmelerinde kalıp duvarlarına sıvı metalin kaynaması bundan dolayı da sıkıştırılmış yüzeylerin bozulması, kutu duvarları ve hareketli burçlar arasındaki boşluktur, numune kaybı, alet aşınması gibi dezavantajları vardır (Kaya, 1999).

1.7. Mekanik Alaşımlama

1966 yılında J.S. Benjamin tarafından geliştirilen Mekanik Alaşımlama (MA), oksit ya da karbürlerle güçlendirilmiş alaşımların üretilmesinde kullanılmaktadır. Mekanik

alaşımlama çarpışan bilyelerin arasında kalan toz parçacıklarının birbirleriyle etkileşimi sonucunda parçalanması, yeniden deforme olması, soğuk kaynaması ve parçacıkların kısa mesafelere difüzyonu gibi işlemlerin tekrarlanarak gerçekleştiği karmaşık bir toz üretim metodudur. Bu yöntemle, bilyeli yüksek enerjili değirmenler sayesinde kontrollü, hassas ve homojen dağılımlı kompozit tozlar üretilir.

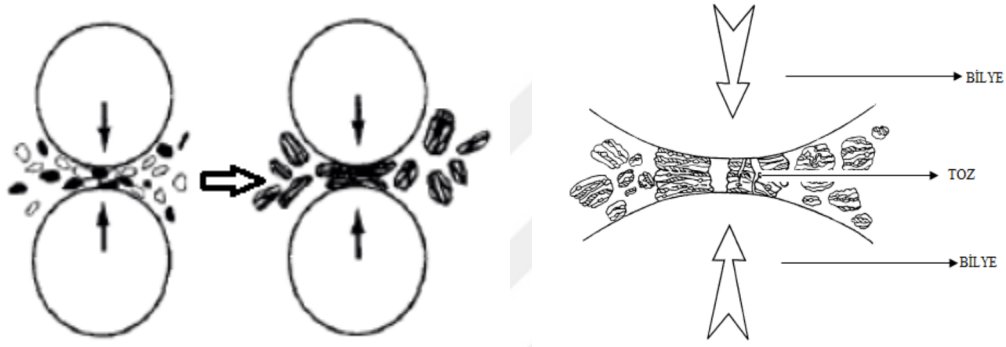
Bilinen döküm ya da diğer alaşımlama işlemleri sırasında karşılaşılan ergime problemleri, heterojenlik, işlemler sırasında meydana gelen istenmeyen reaksiyonlar MA ile ortadan kaldırılabılır. Ayrıca, diğer yöntemlerle üretimi zor ya da imkânsız karmaşık şekilli parçalar ve oksit ya da karbürlerle güçlendirilmiş alaşımlar MA ile rahatlıkla üretilebilir. MA yöntemi ile üretilen Fe esaslı alaşımlar yüksek sıcaklığa (1400 °C'ye kadar) çok uzun süre maruz kalacak ortamlarda kullanılmakta ve çok iyi oksitlenme, sülfürlenme, nitrürlenme ve sürünme dayanımı göstermektedir. Aynı zamanda ekonomik ve uygulama alanının geniş olması büyük avantaj sağlar.

Mekanik alaşımlama alışlagelmiş yöntemlerin aksine tamamen bir katı-hal işlemi olup sert refrakter oksit parçacıkların yumuşak matris içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamakta ve Al, Ti gibi reaktif elementlerin alaşımda bulunmasına müsaade etmektedir. Alaşımlama için değirmene konan metal tozları yüksek hızda çarpışan bilyelerin arasında kalarak birbirine kaynamakta, kırılmakta ve tekrar kaynayarak refrakter oksit partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır. Yapının homojenliği, katılan tozun durumu, öğütme zamanı, koruyucu atmosfer, bilye çapı ve değirmenin dönme hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. Mekanik olarak alaşımlanan tozlar daha sonra birleştirme, sıcak haddeleme ve ikinci yeniden kristalleşme işlemine tabi tutulur ve iri, uzun taneli malzemeler elde edilir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık performansını artırmak için özellikle uzay sanayi ve gaz tribünü uygulamaları için geliştirilmiş olmalarına rağmen oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır (Ekinci, 2007).

Bu metot, ayrıca öğütme sırasında sıvı eriyik içerisinde yerinde (in-situ) reaksiyonlarla nanoparçacıkların oluşmasında etkilidir. Temiz çok ince ve termal olarak kararlı seramik katkılı in-situ nanokompozit oluşturma mükemmel mekanik özellikler kazandırır. In-situ nano parçacıklar ile metal matris arasında kuvvetli bir bağın oluşması, nanokompozitte etkin bir yük transfer mekanizmasının gerçekleşmesi için gereklidir (Suryanarayana, 2011).

1.7.1. Mekanik Alaşımlama Mekanizması

Mekanik alaşımlama (MA) yüksek enerjili bilyeli değirmen içerisinde tozların, bilye-toz-bilye ve bilye-toz-değirmen çarpışmalarına maruz kalarak sürekli olarak kırılması ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanmasını içeren bir katı faz işlemidir (Şekil 1.12). Bu işlem, tane boyutunun küçültülmesine, takviye malzemelerinin matris içerisinde homojen dağıtılmasına, katı çözünürlüğünün artırılmasına, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına imkân sağlar (Çanakçı ve Varol, 2011).



Şekil 1.12. Mekanik alaşımlama boyunca bilye-toz-bilye çarpışması ile tozların karıştırılması ve yassılaştıran tozlar (Nazik, 2013)

MA işlemi üç ayrı aşamada ele alınabilir. Birinci aşamada, öğütme sürecinde oluşan çarpışma (bilye-cidar, bilye-bilye, ve karıştırıcılar-cidar) esnasında arada kalan tozlara darbe enerjisi yüklenir. Bu darbe enerjisi nedeniyle, kırılma sonucu tozlarda oluşan yeni parçalar birbirleriyle kaynaklanır. Böylece, tozların parçacık boyutu alaşımlamanın ilk aşamasında büyür. Bu aşamada parçacık boyutu büyüyerek başlangıçtaki parçacık boyutunun 3 katına kadar çıkabilir. İkinci aşamada, MA süresinin ve deformasyonun artmasıyla tozlardaki deformasyon pekleşmesi ve sertlik artar. Bu aşamada toz parçacıklarında kırılma başlar. Üçüncü aşamada her bir toz parçacığı içerisinde bulunan alaşım tabakalar arasındaki boşluklar azalırken, aynı zamanda bu alaşım tabakalarının sayısı artar. Belli bir süre öğütmenin ardından kararlı hal dengesine ulaşılır. MA'da süre, toz parçacıklarının kararlı hal dengesine ulaşmasında en önemli parametrelerden biridir. Süre, toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklanma kararlı hale gelecek şekilde seçilmelidir (Bostan, 2003).

MA işlemi farklı kombinasyonlardaki metal, oksit ve karbür tozlarının mekanik-kimyasal öğütülmesiyle nanokompozit oluşmasını sağlar. MA işlemi sırasında toz karakterizasyonunu etkileyen iki temel mekanizma vardır. Bunlardan birincisi; ortalama toz boyutunu arttıran soğuk kaynak işlemi diğeri ise tozların küçülmesini sağlayan kırılma işlemidir (Suryanarayana, 2004). Başlangıç tozları sünek-sünek veya sünek-gevrek malzemeler kullanılmışsa parçacıklar kaynaklanarak büyüme eğilimlidir. Bu aşamada parçacıklar başlangıç tozlarının çeşitli kombinasyonlarının katmanlı yapı özelliklerine sahiptir. MA işleminde artan süreyle deformasyon devam eder ve parçacıklar sertleşerek kırılmaya başlar. Kırılan parçacıklar bu mekanizma tarafından üretilir. Eğer sistemde tozlar üzerinde topaklanma etkisi yoksa parçacık boyutunda daha da azalma gözlenir. Sistemde bu aşamada soğuk kaynak üzerinde kırılma eğilimi yüksektir. Bilyelerin çarpışma etkisinin devamıyla parçacıkların boyutunda oldukça fazla incelme olur. Sonuç olarak tabakalar arası boşluk azalır ve bir parçadaki tabaka sayısı artar. Artan MA süresine bağlı olarak lameller arası mesafe küçülür ve nano metre boyutuna iner. Son aşamada her parçacık bütün başlangıç malzemelerini büyük oranda içermektedir. Nano boyutta malzemelerin üretimi için MA yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Suryanarayana, 2003).

Matris ve takviye malzemelerinin tane büyüklüğü uygun öğütme koşulları seçilerek istenilen şekilde kontrol edilebilir. Öğütülen tozların son özelliklerini ve öğütme sistemini etkileyen birçok değişken vardır. Bunların en önemlileri; öğütme hızı, toz-bilye ağırlık oranı, işlem kontrol katkısı oranıdır. Bunlardan başka öğütücü kabın büyüklüğü, bilye çapı, öğütme ortamı sıcaklığı ve öğütme ortamı gibi değişkenler de vardır (Suryanarayana, 2004).

Yüksek enerjili öğütmede soğuk kaynak ve kırılma olaylarının dengede olması işlemin başarılı olmasını sağlar. Birçok malzeme sistemlerinde bu denge kendiliğinden sağlanmaz. Bu nedenle bu tür sistemlere yağlayıcı bir malzeme olan işlem kontrol katkısı (İKK) katılır. İşlem kontrol katkısı hem tozların birbirine aşırı soğuk kaynağını engeller hem de tozların öğütme potası ve bilye yüzeylerine yapışmasını önleyerek öğütme veriminin düşmesini engeller. Alüminyum gibi sünek malzemelerin İKK olmaksızın öğütülmeleri imkânsızdır. Metanol, stearik asit ve etanol en çok kullanılan işlem kontrol katkısı malzemeleridir (Çanakçı ve Varol, 2011).

Herhangi bir sistemde muayyen bir yapı geliştirmek için gerekli özel zaman, başlangıç boyutunun ve içeriklerin (karışımın) karakteristiklerinin ve MA işlemi için özel ekipman ve bu ekipmanın çalışma parametrelerinin bir fonksiyonudur. Fakat, çoğu durumda, iç yapının inceltme hızı (parçacık boyutu, tane boyutu, lameller arası boşluk, vb.) işleme hızıyla kabaca

logaritmik olarak değişir. Bu yüzden başlangıç tozların boyutu nispeten önemsizdir. Birkaç dakikadan bir saate, lamellerarası mesafe çoğunlukla küçülür ve tane boyutu nanometre boyutlarına kadar inceltilebilir. Bu yüzden, MA' nın nanokristal malzeme üretmek için yaygın olarak kullanılmasının sebebi olarak, nano yapılı malzemelerin elde edilebilme kolaylığı gösterilebilir (Suryanarayana, 2004).

1.7.2. Mekanik Öğütme ve Alaşımlama Sistemleri

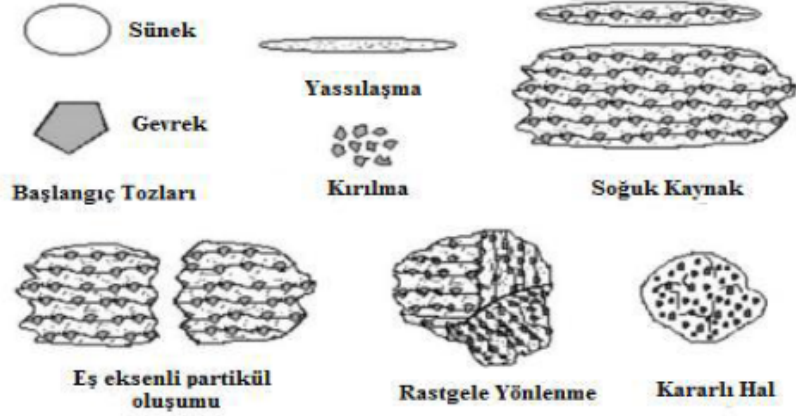
Mekanik alaşımlama sisteminde kullanılan toz özellikleri ve toz kombinasyonuna bağlı olarak üç ana öğütme sistemi mevcuttur; sünek-sünek sistem (Al-Cu), sünek-gevrek sistem (Al-SiC) ve gevrek-gevrek sistem (Mn-Bi).

1.7.2.1. Sünek – Sünek Sistem

Alaşımlama işleminde ilk olarak bilyelerin birbirleriyle çarpışması sırasında bilyelerin merkezleri doğrudan doğruya arada kalan tozlar, darbe etkisiyle plastik deformasyona maruz kalırlar. Bunun sonucunda tozlarda ezilme olur ve toz morfolojisi eş eksenliden yassılaşmaya doğru değişir. Sonraki aşamada kaynaklanma mekanizması eşeksenel parçacık oluşumuna neden olur. Bu aşamada yönlenmiş arayüzey sınırları gözlenmektedir. Daha sonra kaynak ve kırılma mekanizması dengeye ulaşır ve arayüzey sınırlarında ya da kaynaklanma yönünde rast gele yönlenmiş parçacıklar oluşur. Son aşama kararlı hal işleminde olarak adlandırılmaktadır. Bu aşamada mikroyapısal incelik devam eder ama parçacık boyutu aynı kalır (Fagognolo, 2002).

1.7.2.2. Sünek – Gevrek Sistem

Sünek-Gevrek sistemde ilk önce sünek metal tozları bilye-toz-bilye çarpışmaları ile yassılaşmış hale gelirken gevrek tozlar ise kırılırlar. Kırılan gevrek tozlar sünek bileşen içerisinde gömülürler. Gevrek bileşenler katmanlar arası boşluklar boyunca yerleşirler. İlerleyen öğütme süreleri sonucunda tozlar deformasyon sertleşmesine uğrar katmanlar çoğalır ve daha küçük boyutlara inerler. Devam eden öğütme ile tabakalar daha da küçülür tabakalar arası boşluk artar ve gevrek tozlar çözünmezse düzenli olarak sünek matrise içine dağılırlar (Özgün, 2008).



Şekil 1.13. Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi (Çanakçı ve Varol, 2011)

1.7.2.3. Gevrek – Gevrek Sistem

İki veya daha çok gevrek malzemeden oluşan bir sistemde mekanik alaşımlama işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştiremeyebilir. Çünkü sünek bileşenin olmaması kaynak oluşumunu veya tozların birleşmesini engeller ve kaynaklanmanın olmadığı durumda da alaşımlamanın olması beklenmez. Bununla beraber, Si-Ge ve Mn-Bi gibi bazı gevrek-gevrek sistemlerde alaşımlamanın olduğu da belirlenmiştir. Gevrek tozlar, öğütme sırasında parçalanır ve parçacık boyutları sürekli azalır. Bununla beraber çok küçük boyutlardaki toz parçacıkları sünek bir davranış gösterir ve daha sonra boyut azalması mümkün değildir. Buna öğütülebilme sınırı da denir (Cebeci, 2008).

1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Kalay ve bakır kaymalı yatak malzeme üretiminde kullanılan temel alaşım elementleridir. Ancak bu elementlerin pahalı ve az bulunan metaller olması, araştırmacıları kalaysız veya çok az kalay veya bakır içeren yatak malzemeleri geliştirmeye yöneltmiştir. Bu nedenle, günümüzde bronz, beyaz metal ve pirinç gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaları için, hem ekonomik hem de üstün tribolojik ve mekanik özelliklere sahip yeni yatak malzemeleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımları üzerine yapılan çalışmalar, bu alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre pek çok üstünlüklere sahip olduklarını göstermiştir. Bu üstünlüklerin başında alaşımların aşınma dayanımlarının ve özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, alaşım elementlerinin kolaylıkla ve ucuza temin edilebilmesi, değişik ısı işlemlere elverişli olmaları gelmektedir. Söz konusu alaşımlardan imal edilen yataklar, hadde yataklarında, kablolu krenklerde, değişik iş makinelerinde, taş kırma ve maden makinelerinde, hidrolik sistemlerde v.s. yaygın olarak kullanılmaktadır (Çuvalcı, 1996).

MMK malzemeler yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren uygulamalarda geleneksel alaşımlara alternatif olarak geliştirilmişlerdir. Endüstride maliyet çok önemli bir faktördür ancak hafiflik, uzun kullanım ömrü ve geri dönüştürülebilirliği de dikkate almak gereklidir. Bu özellikler dikkate alındığında MMK malzemeler diğer malzemelere göre pahalı sayılabilirler. Basit üretim yöntemleri, yüksek üretim miktarı ve ucuz takviye malzemeleri kullanılarak MMK malzemelerin maliyeti düşürülebilmektedir (Varol, 2012). Parçacık takviyeli kompozitler, genel olarak SiC, Al₂O₃ ve B₄C gibi seramik takviye elemanları ile güçlendirilir (Ekici, 2012; Çanakçı vd., 2007).

Babic ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada kompozit döküm yöntemiyle ZA27 matrisli alümina (220µ) takviyeli MMK'lerin mekanik ve aşınma özelliklerinin değişimini araştırmışlardır. Alümina takviye miktarları ağırlıkça %3, 5 ve 10 olarak belirlenmiştir. Kompozitlerin üretimi işlemi ZA27 alaşımının kimyasallarla temizlenmiş bir kalıp içerisinde cürufun uzaklaştırılması için ergime noktasının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmasıyla başlamıştır. Daha sonra 462°C'ye soğutulan alaşıma alümina takviye edilerek karıştırılmış ve bu işlemten sonra 430°C'ye soğutulan kompozit 300°C sıcaklığındaki çelik kalıba boşaltılarak numuneler üretilmiştir. Yaptıkları deneyler sonucunda alümina takviyesiyle birlikte kompozitlerin sertliğinin doğrusal bir şekilde arttığını, yoğunluk değerlerinin ise doğrusal bir şekilde azaldığını gözlemlemişlerdir. Öyle ki ZA27 alaşımının sertliği 103 HV iken, %3, 5 ve 10 alümina takviyesiyle bu değer sırasıyla 106, 109 ve 113 HV olduğunu belirlemişlerdir.

Ataç ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada, farklı kimyasal bileşimlere sahip Zn-Al alaşımlarından ZA-8, ZA-12, ZA27 alaşımlarını farklı sürelerde mekanik alaşımlama yöntemi ile üretmiştir. Spex tipi değirmende farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üretilen Zn-Al alaşım tozları 320 °C'de sıcak preslenmiş ve yine aynı sıcaklıkta sinterleme yapılmıştır. Bu alaşımların yoğunlukları alüminyum oranının artışıyla azalmıştır. Aşınma

test sonuçlarına göre en az aşınma ZA27 alaşımında olurken, en fazla aşınma ZA-8 alaşımında gerçekleşmiştir.

Mishra ve arkadaşları (2014) matris malzemesi olarak ZA27 alaşımı, takviye malzemesi olarak ise silisyum karbür kullanarak yaptıkları çalışmada ağırlıkça % 3, % 6 ve % 9 SiC kullanımıyla ZA27/SiC kompozitlerini üreterek yoğunluk, mikro-sertlik ve çekme mukavemeti özelliklerini incelemişlerdir. Bu araştırmanın sonuçlarına göre yoğunluk değerleri ağırlıkça % 9 SiC takviyesinde 4,59'a kadar (takviyesiz ZA27'nin yoğunluğu 3,81 gr/cm³), mikro-sertlik değerinin ise 142,6 Hv sertlik değerine kadar (takviyesiz ZA27 alaşımının mikro-sertlik değeri 121,5 Hv) arttığı görülmüştür. Bununla birlikte artan SiC takviyesiyle birlikte kompozitlerin çekme mukavemetinde de önemli iyileşmeler olduğu gözlenmiştir. ZA27 alaşımının çekme mukavemet değeri 412 MPa iken, %9 SiC takviyesiyle birlikte çekme mukavemet değeri %8,5 karatarak 447 MPa değerine ulaşmıştır. Dolayısıyla sert seramik bir faz olan SiC'ün karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilen ZA27/SiC kompozitlerin mekanik özelliklerine pozitif yönde bir etki oluşturduğunu söyleyebiliriz.

Jiang ve arkadaşları (2005) toz metalurjisi ile magnezyum(106 µm) matrisli B₄C(6µm) katkılı MMK üretimini araştırmıştır. %10, %15, %20, %30 oranlarında hazırlanan 6 saat bilyeli değirmende öğütülen toz karışımı 20-25 MPa basınç altında preslenmiştir. Preslenen numuneler, argon gazı atmosferinde 620 °C' de 1 saat sinterlendikten sonra 300 °C' de 5MPa basınç altında 10 dakika tekrar preslenmiştir. Böylece B₄C takviye elemanın magnezyum matris içerisinde homojen olarak dağıldığı, düşük miktarda mikro gözenekli MMK malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen kompozitin dökümle elde edilen magnezyum ile karşılaştırıldığında sertlik, aşınma direnci bakımından dört kat daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

TM üretim tekniği, parçacıkların homojen dağılımın yanı sıra üretilen parçaların yoğunlukları da MMK' lerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme (SIP) ile takviye malzemeleri ilave etmeksizin düşük maliyetle %90'ın üzerindeki yoğunluklarda numuneler üretilabilmektedir (Ekici, 2012).

Nanokompozitlerin kırılma tokluğu, mukavemeti, eğilme mukavemeti, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık özelliklerinin iri taneli yapılardan daha yüksek olması beklenir. Örneğin, Tiong (2007) hacimce %1 Al₂O₃-Al nanokompozitin çekme dayanımının %10 Al₂O₃ (13µm)-Al mikro kompoziti ile benzer olduğu ve nano kompozitin akma dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca alümina takviyeli alüminyum kompozitinin %4 oranına kadar akma ve çekme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu oranın üzerinde

nano parçacıkların aglomerasyonundan dolayı kuvvetlendirme mekanizmasının durduğu düşünülmektedir.

Hibrit kompozitler ise farklı özelliklere sahip birden fazla takviye elemanının matrise katılmasıyla oluşur. Kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için grafit (Gr) seramik takviyeyle birlikte kullanılmaktadır (Ekici, 2012). Suresha ve Sridhara (2010) alüminyum matrise SiC ile grafit katarak elde ettikleri hibrit kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Eşit miktardaki SiC ve Gr, ağırlıkça %2,5-%5-%7,5-%10 oranlarında ilaveleriyle üretilen hibrit kompozitlerde yük, kayma mesafesi ve kayma hızına bağlı kuru aşınma performansı araştırılmıştır. Hibrit kompozit ile karşılaştırmak için bu deneyler SiC katkılı Al matrisli kompozite de uygulanmıştır. Aşınma miktarının %7,5 oranına kadar düştüğü %10 oranında ise arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda hibrit kompozitlerin SiC takviyeli kompozitlere göre daha iyi aşınma karakteri gösterdiği belirlenmiştir. Yük ve kayma mesafesinin artışı ile aşınma miktarının da arttığı tespit edilmiştir. Kayma hızındaki artışın ise aşınma miktarını azalttığı belirtilmiştir.

Literatür incelemelerinden anlaşılabacağı gibi genellikle mikro boyutlu takviye ve matris fazları üzerine çalışmalar yapılmış ancak nanokompozitler üzerine henüz yeteri kadar çalışma yapılmamıştır. Ayrıca ZA alaşımlarına yönelik yapılan araştırmalarda çoğunlukla bu alaşımların aşınma davranışları üzerine çalışılmıştır. ZA esaslı hibrit nanokompozit geliştirmesi amaçlanan bu çalışmada ise aşınma özellikleri iyileştirilirken, kompozitlerin içyapı, fiziksel ve mekanik özelliklerini de geliştirmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ilk aşamada nano grafit ve Al_2O_3 katkı oranlarının nanokompozit malzemede, daha sonrada farklı mekanik alaşımlama sürelerinin HNK malzemede fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenecektir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

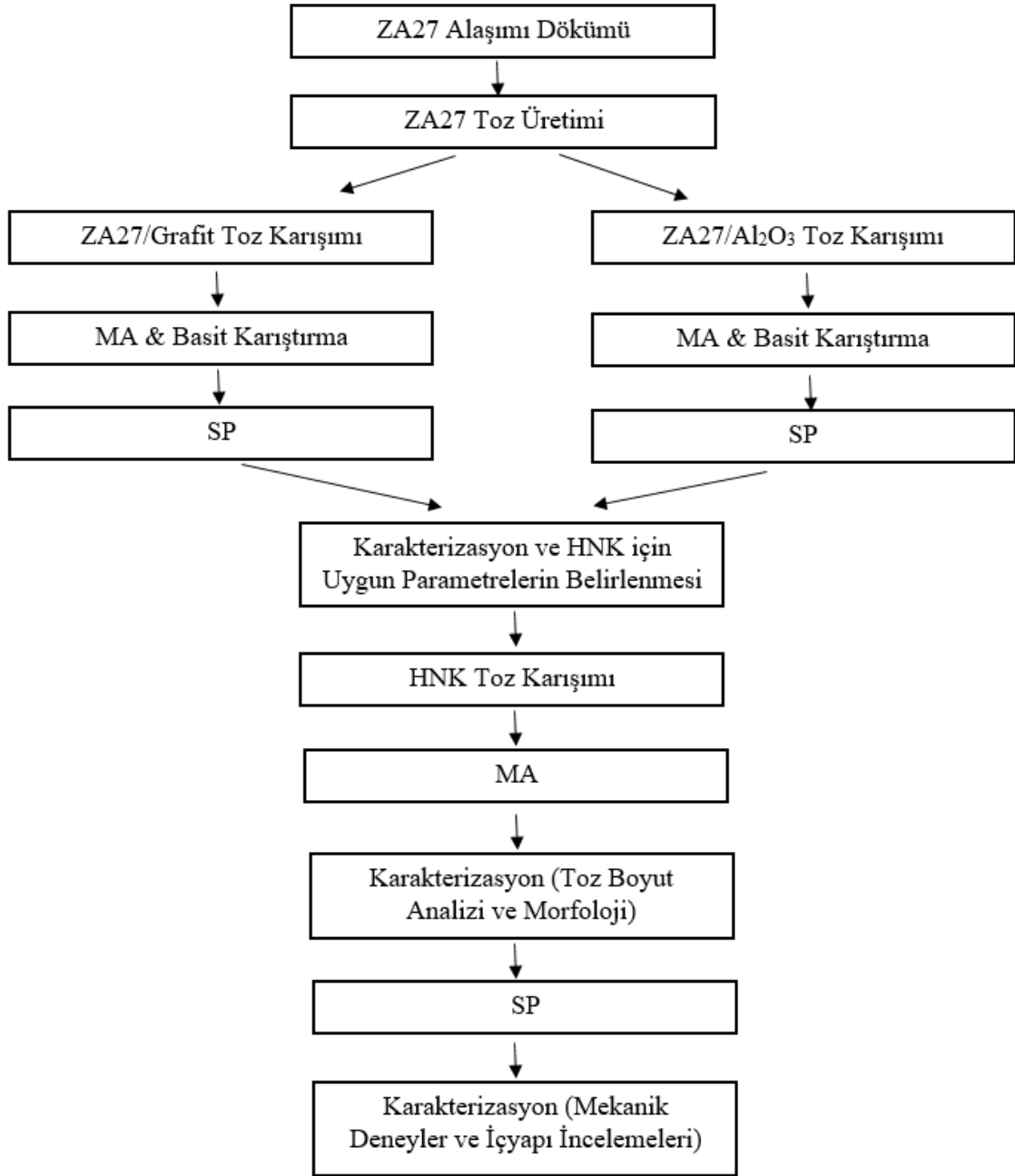
Bu çalışmada, mekanik alaşımlama yöntemi ile nano parçacık takviyeli ZA esaslı HNK malzeme geliştirilmiş ve mekanik alaşımla süresinin ve takviye miktarı ve cinsinin kompozitlerin içyapı, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İlk olarak matris malzemesi ZA27 alaşımı, döküm yöntemiyle elde edildi. Ardından ortalama boyutu 40 µm olan düzensiz haldeki tozlar gaz atomizasyonu yöntemi ile (İKİ-EL METAL TOZLARI A.Ş.' de) elde edildi. Bu tozlara 100nm boyutlarındaki grafit parçacık takviyeleri hacimce % 1-%2-%3-%4 oranlarında; 100nm boyutlarındaki Al₂O₃ parçacık takviyeleri ise hacimce % 1-%2-%3-%4 oranlarında katılarak kompozit toz karışımları hazırlandı.

Hazırlanan bu toz karışımları ilk aşama olarak takviye miktarının ve mekanik alaşımlama işleminin kompozit yapıya etkisini görmek amacıyla karıştırılarak kompozit tozlar hazırlandı. Tozlar önce oda sıcaklığında 300 MPa' da preslendi. Ardından 435 °C' de 2,5 saat bekletildikten sonra 600 MPa' da sıcak presleme (SP) yöntemi ile üretimi tamamlanan bu kompozitlerin, yoğunluk, porozite, makro sertlik, çekme mukavemeti değerleri ve içyapı incelemeleri yapıldı.

Daha sonra ikinci aşama olarak toz karışımlarına bu sefer gezegen tipi yüksek enerjili bilyeli öğütücüde değişen sürelerde MA işlemi yapıldı. MA yöntemiyle hazırlanan kompozit tozlar yukardaki belirtilen şartlarda preslenerek kompozit numuneler üretildi. Üretilen kompozitlere yoğunluk, porozite, makro sertlik, çekme mukavemeti değerleri ve içyapı incelemeleri yapılarak mekanik alaşımlamanın ZA27/Grafit ve ZA27/Al₂O₃ kompozitlerine etkisi araştırıldı.

İlk iki aşama sonrasında elde edilen veriler ışığında HNK üretimi için en uygun MA süresinin 8 saat olduğuna karar verildi ve hacimce % 1-%2-%3-%4 nano grafit ve Al₂O₃ 'nın değişik kombinasyonlarını içeren 16 adet HNK numune üretildi. Üretim prosesi diğer aşamalardaki gibi gerçekleştirildi ve bu numunelere de yoğunluk, porozite, makro sertlik, çekme mukavemeti deneyleri ve içyapı incelemeleri yapıldı.

Çalışmalar kapsamında numunelerin karıştırılmaması için numuneler nano grafit takviyeli kompozit GTNK olarak, nano Al₂O₃ takviyeli kompozit ATNK olarak ve her iki takviye elemanından oluşan hibrit nano kompozit de HNK olarak kodlanmıştır.



Şekil 2.1. Deneysel ıalışmalardaki iş akış şeması

2.1. Malzeme

2.1.1. ZA27 Alaşımının Dökümü ve Toz Üretimi

Yapılan ıalışmalarda başlangııta, matris malzemesi olarak belirlenen ZA27 alaşımının kokil döküm yöntemiyle üretimi yapıldı. Ergitme işlemini düşük sıcaklıklarda yapabilmek

için öncelikle intermetalik bakır-alüminyum alaşımı (AlCu50) döküldü. Bölümümüzün alaşım geliştirme laboratuvarında gerçekleştirilen döküm işlemlerinde %99,99 saflıkta çinko, ticari saflıkta (%99,7) alüminyum, bakır ilavesi için intermetalik bakır-alüminyum ön alaşımı (AlCu50) ve ticari saflıkta Mg aşağıdaki oranlarda hazırlanmıştır.

Tablo 2.1. ZA27 alaşımının kimyasal bileşimi (%ağırlık)

Alaşım	Zn	Al	Cu	Mg
ZA27	70,8	27,2	2,01	0,02

Ergitme işlemini düşük sıcaklıklarda yapabilmek için öncelikle intermetalik bakır-alüminyum alaşımı (AlCu50) döküldü. Dökülen intermetalik bileşiği toz haline getirildi. Daha sonra ergitme işlemi, kimyasal bileşimi tabloda verilen oranlar doğrultusunda, sıcaklığı kontrol edilebilen elektrikli bir pota fırınında gerçekleştirildi. Bu aşamada toz halindeki intermetalik AlCu50 bileşiği eriyik haldeki karışıma katıldı. Ergitilen ZA27 bileşimi 700 °C’de kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı.



(a)



(b)

Şekil 2.2. Döküm yönteminde kullanılan ekipman; (a) sıcaklık kontrollü elektrikli pota fırını, (b) döküm potası

Elde edilen alaşım İKİ-EL METAL TOZLARI A.ř.' de gaz atomizasyon yöntemiyle toz haline getirildi. Sonrasında bu tozlar 'Retsch' marka elek ile 63 µm elek altına elenerek ortalama tane boyutu (d_{50}) 40,2 µm olan matris tozları elde edilmiştir.

2.1.2. Takviye Malzemeleri

Bu çalışmada, takviye malzemesi olarak nano boyutta grafit ve Al_2O_3 tozları seçilmiştir. Grafitin yapıya yağlayıcı özellik sağlaması ancak mekanik özellikleri olumsuz etkilemesinden dolayı mekanik özellikleri iyileştirici bir takviyeye ihtiyaç vardır. Bu amaçla Al_2O_3 tozları kullanılmıştır. Al_2O_3 tozları %99,94 saflıkta ve ortalama 100 nm boyutunda, grafit tozları ise %99,9 saflıkta ve 100 nm boyutundadır. Her iki malzeme de 'Grafen Chemical Industries Co.' şirketinden temin edilmiştir.

2.2. Mekanik Alaşımlama (MA) İşlemleri

Mekanik alaşımlama işlemleri gezegen tip bilyeli öğütücüde (Retsch PM 100) 300 dev/dak öğütme hızında gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemi tungsten karbür hazne ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütücü kap hacmi 250 ml ve bilye boyutu ise 10 mm' dir. Bilye- toz ağırlık oranı 5:1 olarak seçilmiştir. Bir defada öğütücü kaba 120 gr toz konulurken her işlemde sonra kap ve bilyelerin temizlenmesine özen gösterilmiştir. GTNK için mekanik alaşımlama süreleri 6, 10, 14 ve 18 saat, ATNK için 1, 2, 4,6 ve 8 saat olarak belirlenmiştir. HNK numuneler için optimum mekanik alaşımlama süresini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda en uygun mekanik alaşımlama süresinin 8 saat olduğu belirlenmiştir. Ortam sıcaklığına ve diğer faktörlere de bağılı olarak, mekanik alaşımlama sırasında (bilye-toz ve bilye-toz-bilye çarpışması nedeniyle) artan noktasal sıcaklıklar nedeniyle oluşan soğuk kaynak ve çillenme sonucunda hazne duvarlarında ve bilye üzerinde yapışmalar gözlenmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için değirmen haznelere mekanik alaşımlama işlemi öncesi %0,5 oranında metanol işlem kontrol katkısı yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2.3. Öğütme işleminde kullanılan(a) bilyalı öğütücü (b) hazne ve bilye

2.3. Parçacık Boyutu

Başlangıç tozları ve mekanik alaşımlanmış tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri Malvern InstrumentsTM marka Mastersizer 2000e model lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemleri saf su ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Partikül boyutu ölçüm cihazı

2.4. Metalografi Çalışmaları

MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların ve kompozitlerin sertlik ölçümleri ve kompozitlerin içyapı incelemeleri için gerekli metalografik işlemler yarı otomatik (Şekil 2.5) ve tam otomatik zımparalama ve parlatma cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ihtiyaç duyulan numuneler için bakalite alma işlemi de yapılmıştır.



(a)

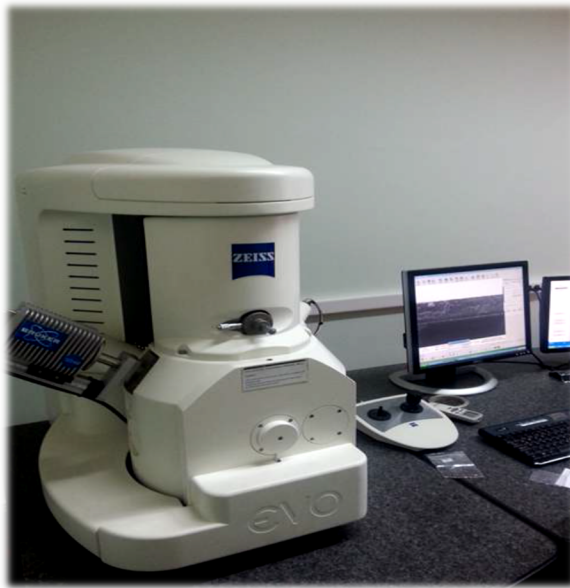


(b)

Şekil 2. 5. a) Otomatik zımpara-parlatma cihazı b) Bakalit cihazı

2.5. İçyapı İncelemeleri

Başlangıç tozlarının ve MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların morfolojileri ve üretilen kompozitlerin içyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelendi. Kompozitlerin içyapılarında bulunan fazların kimyasal bileşimleri ise enerji dispersif spektrometresi (EDS) ile belirlendi.



Şekil 2.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.6. Yoğunluk Ölçümleri

Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralına göre bulunmuştur. Deneysel yoğunlukları ise numuneler talaşlı işlem ile hazırlanarak boyutları $\pm 0,01$ mm hassasiyetindeki kumpas ile ölçüldükten sonra $\pm 0,01$ mg'lık hassasiyete sahip bir terazide ölçülerek belirlenmiştir. Bulunan deneysel yoğunluk değerleri teorik yoğunluğa bölünerek bağıl yoğunluk bulunmuştur.

2.7. Mekanik Deneyler

2.7.1. Sertlik Deneyi

Kompozit sertlikleri aşağıda şekli verilen Brinell sertlik ölçüm cihazı yardımıyla ölçülmüştür. Brinell sertlik deneyinde 31,25 kg'lık yük uygulanmış ve 2,5 mm çapındaki batma ucu kullanılmıştır. Cihazdan alınan iz çapları Brinell sertlik ölçüm formülünde yerine konarak kompozit sertlikleri bulunmuştur.

$$BSD = \frac{2P}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Burada;

BSD: Brinell Sertlik Değeri (kg/mm^2)

P: Uygulanan Kuvvet (kgf)

d: İz çapı (mm)

D: Bilye çapı (mm)

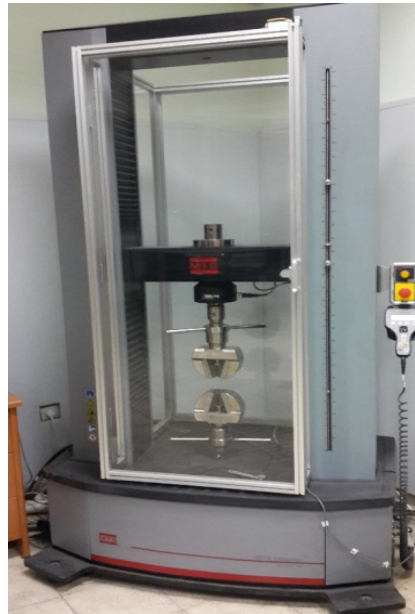
Her bir deney için numune yüzeyinde farklı noktalarda 6 ölçüm alınmış ve sertlik değeri bu 6 değer in ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.7. Brinell sertlik ölçüm cihazı

2.7.2. Çekme Deneyi

Çekme deneyi için numuneler 80mm x 10mm x 4mm boyutlarında üretilmişlerdir. Çekme deneyleri MTS Criterion Universal Çekme-Basma Test cihazında ASTM A370 standartlarına uygun olarak 5 mm/s' lik sabit çekme hızında yapılarak kompozitlerin çekme dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 2. 8. Çekme cihazı

2.8. Sıcak Presleme

Üretilen kompozit tozlara ilk olarak oda sıcaklığındaki MTS marka sıcak pres ünitesinde (Şekil 2.9) ön şekil verme işlemi uygulanmıştır. Ön şekil verme basıncı 300 MPa'dır. Ön şekli verilen numuneler 435 °C sıcaklıkta 2,5 saat bekletildikten sonra 600 MPa basınç altında 100 ton kapasiteli tek eksenli preste (Şekil 2.9) preslenerek numuneler üretilmiştir. Presleme esnasında kalıp yüzeylerine yağlayıcı olarak grafit ve çinko stearat sürülmüştür.

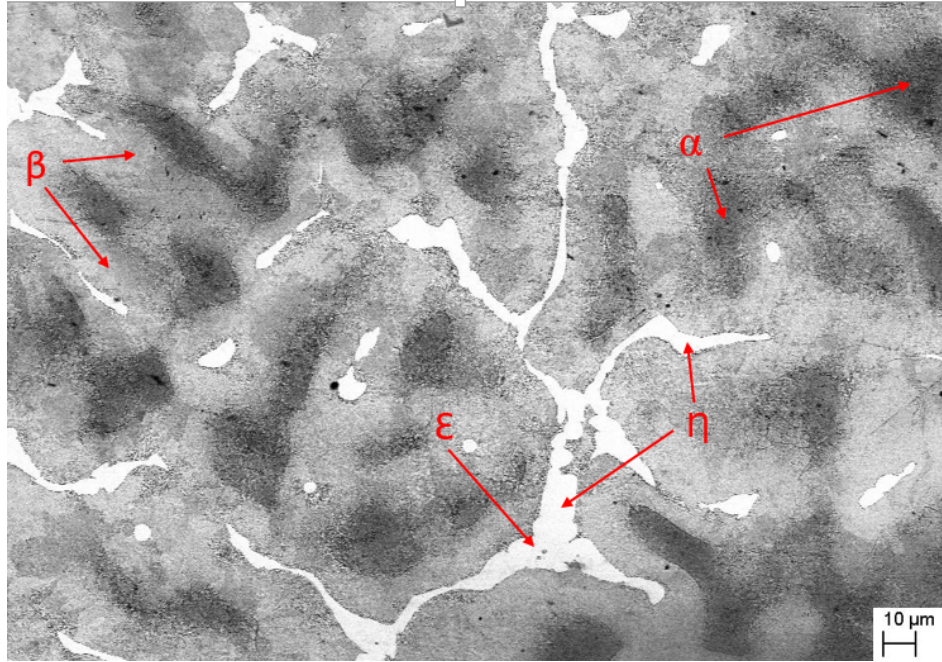


Şekil 2. 9. Sıcak preslemede kullanılan ekipman

3. BULGULAR

3.1. ZA27 Alaşımının Döküm Yapısı

Gerçekleştirilen döküm sonucu elde edilen ZA27 alaşımının iç yapısı Şekil 3.1' de gösterilmektedir. Şekilde, taneler arasında beyaz olarak görülen bölgeler çinko bakımından zengin η fazıdır ve bu faz içinde çok ince ϵ fazları bulunmaktadır. Ayrıca; bu alaşımda peritektik, ötektik ve ötektoid reaksiyonlar birlikte meydana gelmektedir. Katılaşma başlarken önce sıvı içinde alüminyumca zengin α fazı oluşur. Bu α dentritleri sıvıyla peritektik reaksiyon oluştururken; sıvı faz çinkoca zenginleşir ve dendritler çevresinde çinkoca zengin β fazı oluşur. Katılaşma, geriye kalan çinkoca zengin fazın ötektik reaksiyonu ile tamamlanır. Ötektik reaksiyon sonucunda ise, çinkoca zengin η fazı, alüminyumca zengin α fazı ve intermetalik ϵ fazları meydana gelir. 275 °C altında kararsız olan alüminyum bakımından zengin β fazı ötektoid reaksiyon sonucunda α ve η kararlı fazlarını oluşmaktadır Döküm yapısı incelendiğinde; peritektik reaksiyon sonucuna oluşan β fazının ilk oluşan α dentritlerini çevrelediği görülmektedir.

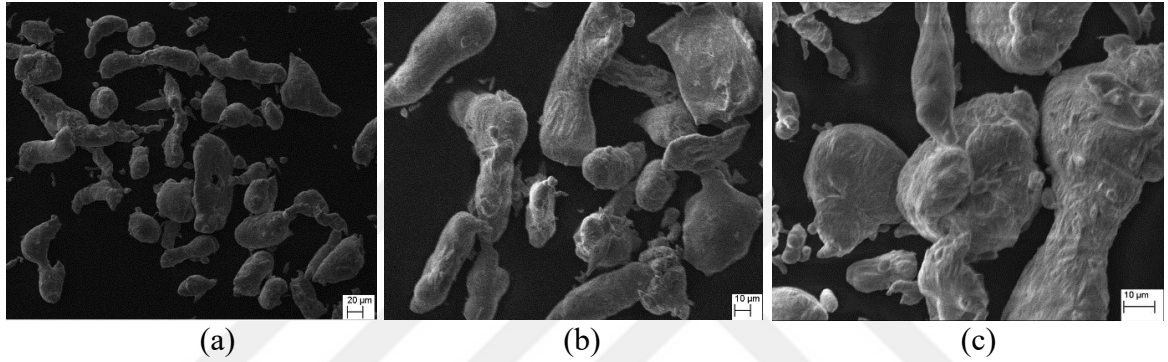


Şekil 3.1. ZA27 alaşımının dökümü sonrası gözlemlenen iç yapı

Döküm sonrası yapılan mekanik deneyler sonucunda ZA27 alaşımının çekme mukavemeti 314 MPa, sertlik değeri ise 132 BSD olarak belirlenmiştir.

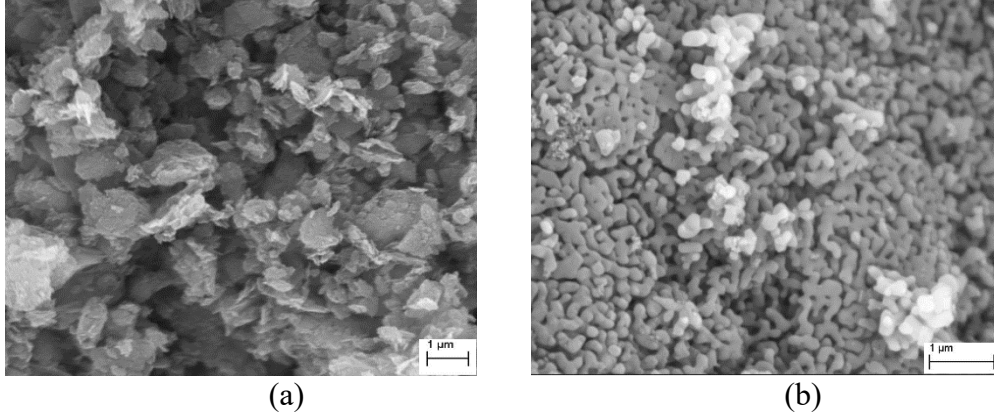
3.2. Matris ve Takviye Tozlarının Morfolojileri

ZA27 alaşımının dökümünden sonra elde edilen ZA27 (matris) tozlarının morfolojileri Şekil 3.2’de verilmiştir. Üretilen tozların düzensiz ve ligamental şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. ZA27 tozlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri; (a) 500X, (b)1000X ve (c) 2000X

Takviye olarak kullanılan nano grafit ve Al_2O_3 ’nın taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri de Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekilden nano grafit parçacıklarının pulsu ve ince plakalar halinde nano alümina parçacıklarının ise daha düzgün şekilli ve nispeten küresel olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. (a) Nano boyuttaki grafit ve (b) alüminanın SEM görüntüsü

3.3. Grafit Takviyeli Nanokompozitler (GTNK)

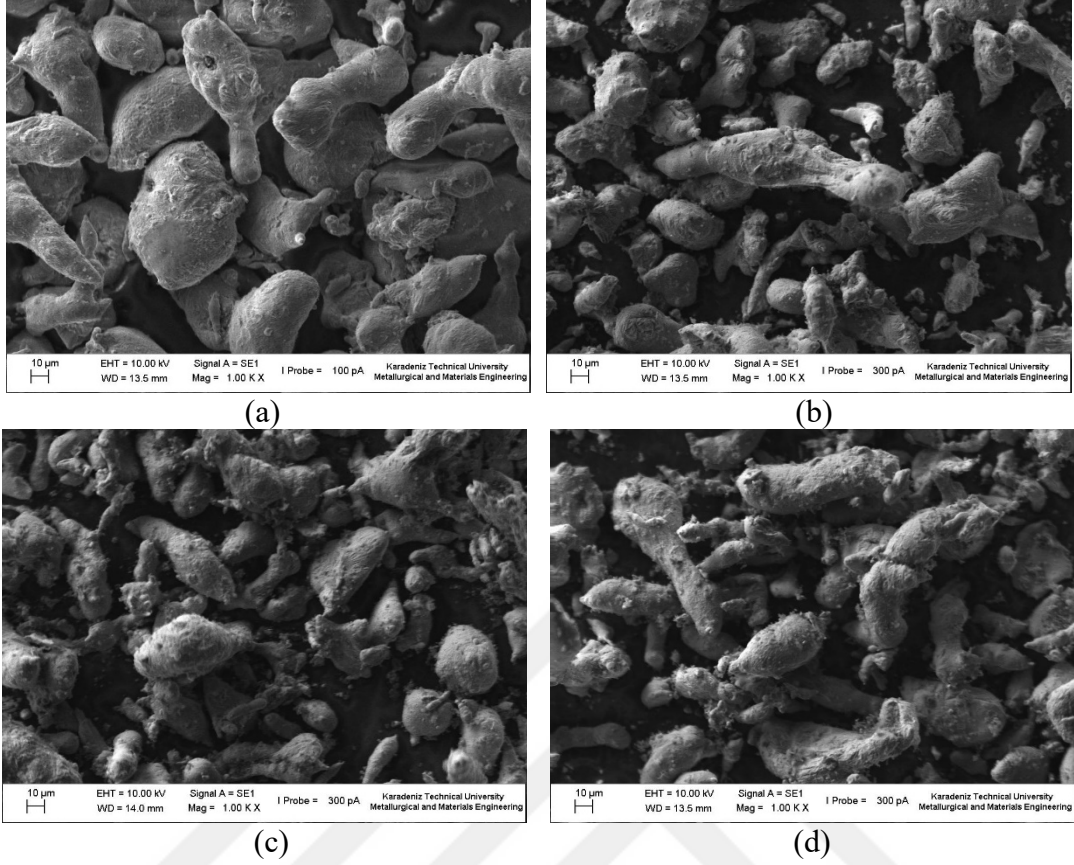
Bu bölümde farklı oranlarda nano grafit tozu kullanılarak MA ve geleneksel toz metalürjisi yöntemleriyle üretilen GTNK malzemelerin mekanik ve içyapı özellikleri incelenmiştir. Takviye oranının ve mekanik alaşımlamanın kompozitlere olan etkisi araştırılmıştır.

3.3.1. GTNK Numunelerin Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada ZA27 matrisli hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano grafit takviyeli kompozit numuneler geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilerek takviye miktarının kompozit yapıya olan etkisi araştırılmıştır.

3.3.1.1. Toz Morfolojisi

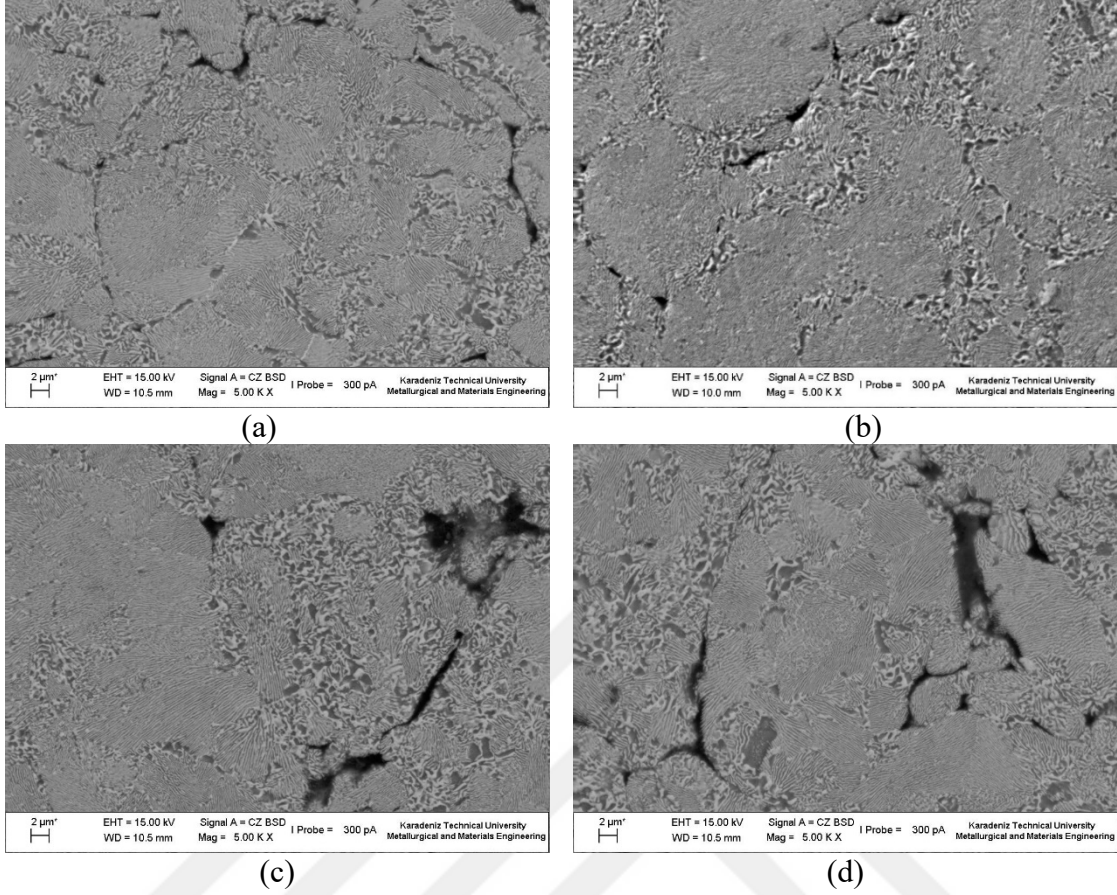
ZA27 matris tozları ve nano grafit tozlar mekanik olarak karıştırılarak kompozit tozlar üretilmiştir. Tozların SEM görüntüleri Şekil 3.4 'te gösterilmiştir. Mekanik alaşımla işlemi uygulanmadığından dolayı matris tozlarının morfolojisinde bir değişme olmamaktadır. Şekiller incelendiğinde matris tozları üzerinde nano grafit parçacıklarının (koyu noktalar) varlığı ve bunların nano grafit oranı ile birlikte arttığı gözlenmektedir.



Şekil 3.4. (a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) % 4 GTNK tozların 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri

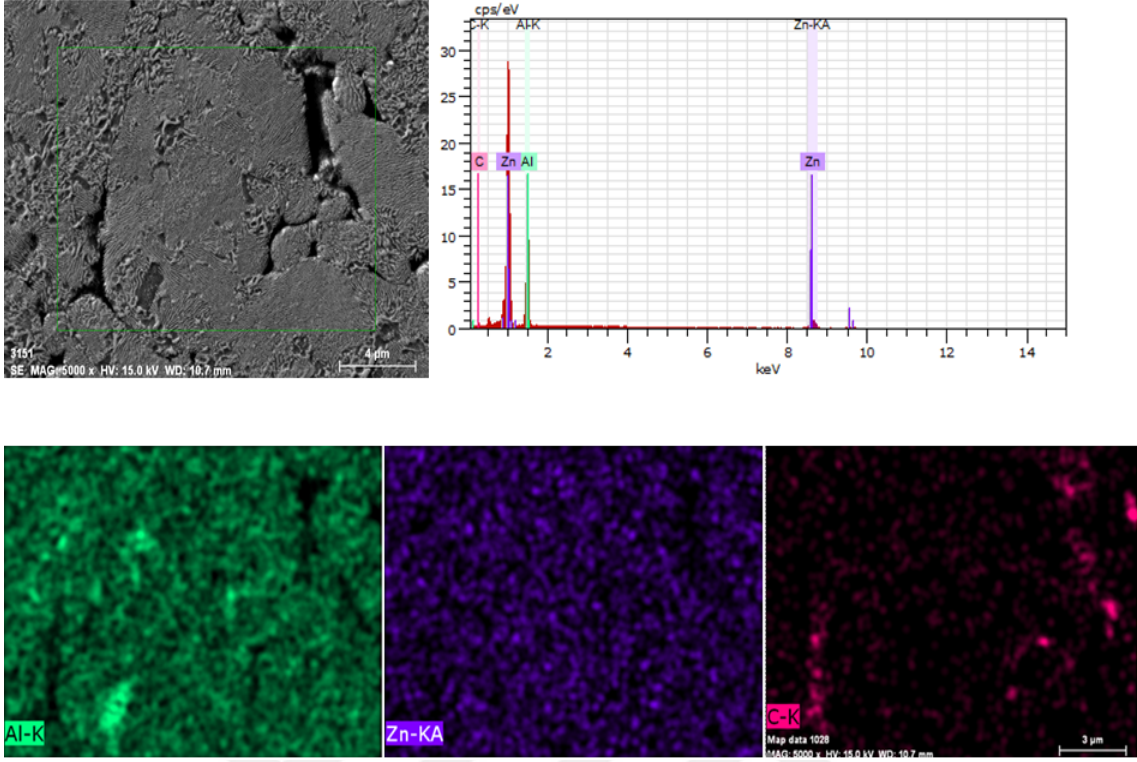
3.3.1.2. İçyapı Analizi

Geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilen hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunelere yapılan içyapı analizleri sonucunda elde edilen SEM görüntüleri Şekil 3.5’ te gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde nano grafitin yapı içerisinde daha çok tane sınırlarında biriktiği ve artan takviyeyle birlikte tane sınırlarında daha fazla nano grafit parçacığının yer aldığı görülmektedir.



Şekil 3.5. Hacimce (a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) %4 nano grafit takviyeli kompozit numunelerin sinterleme sonrası 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri

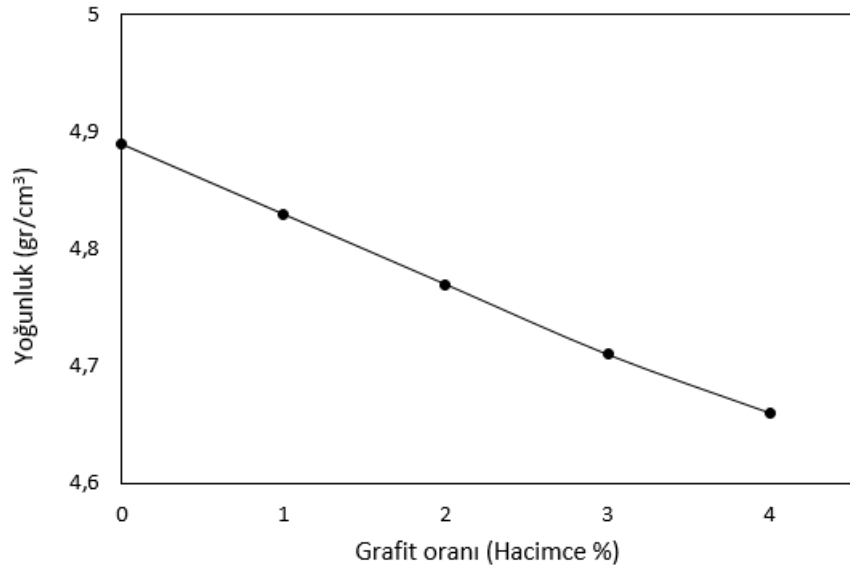
Hacimce %4 oranında nano grafit içeren kompozitin EDS analizi ise Şekil 3.6’da verilmektedir. Analiz sonucunda 2 adet Zn, Al ve C piklerinin varlığı açıkça görülmektedir. Ayrıca yapılan element haritası analizinde Al ve Zn’nun yapıda homojen bir şekilde dağıldığı nano grafitin ise bazı bölgelerde ve özellikle de tane sınırlarında daha yoğun olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.6. Hacimce %4 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları

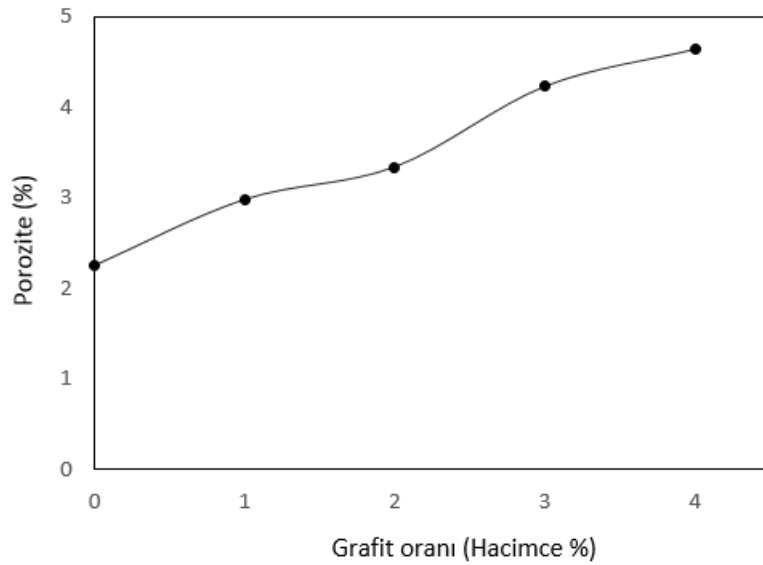
3.3.1.3. Yoğunluk ve Porozite

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi sonucunda yoğunluk değerlerinin nano grafit oranına göre değişimi grafiği Şekil 3.7 'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde artan nano grafit oranı ile birlikte numunelerin yoğunluk değerlerinin düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum nano grafitin yoğunluğunun (2.2 gr/cm^3) ZA27 matris malzemesinin yoğunluğundan (5 gr/cm^3) düşük olmasından ve artan takviye ile birlikte nanokompozitlerin porozite değerlerinin artmasından (Şekil 3.8) kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.7. Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin yoğunluk değişimi

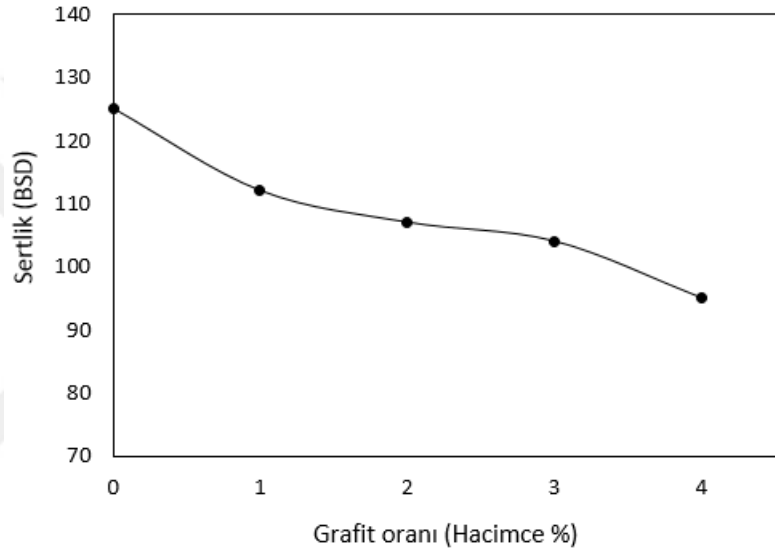
Şekil 3.8’de nano grafit takviyeli kompozitlerde nano grafit oranının porozite değerlerine olan etkisi gösterilmiştir. Şekilden nano grafit oranının artışı ile birlikte porozite değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu durum presleme ve sinterleme işleminde söz konusu takviye malzemelerinin bu işlemleri olumsuz etkilemesinden kaynaklanmıştır.



Şekil 3.8. Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin porozite değişimi

3.3.1.4. Sertlik

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi sonucunda sertlik değerlerinin nano grafit oranına göre değişimi grafiği Şekil 3.9 'da verilmektedir. Nano grafit oranı arttıkça kompozitlerin sertliğinin azaldığı görülmektedir. Nano grafit içermeyen ZA27 alaşımının sertliği 125 BSD iken %4 grafit takviyeli kompozitte bu değer 95 BSD'ye düşmektedir. Bu durum nano grafitin sertliğinin düşük ve yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır.

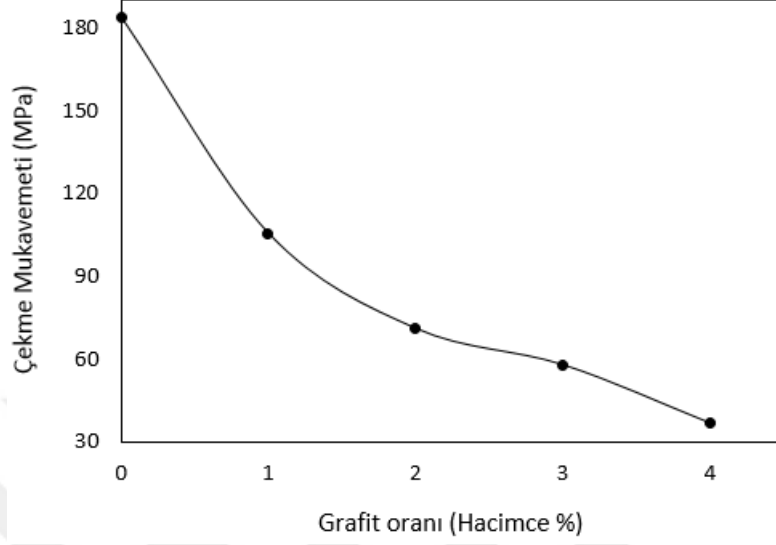


Şekil 3.9. Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin sertlik değerlerinin değişimi

3.3.1.5. Çekme Mukavemeti

Hacimce %1,2,3 ve 4 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi sonucunda çekme mukavemeti değerlerinin nano grafit oranına göre değişimi grafiği Şekil 3.10 'da verilmektedir. Şekil incelendiğine nano grafit takviye miktarı arttıkça malzemenin çekme mukavemetinde büyük bir düşüş meydana geldiği gözlenmiştir. Nitekim nano grafit katılmayan ZA27 alaşımının çekme mukavemeti 184 MPa iken %4 oranında nano grafit katıldığında bu değer yaklaşık 5 kat azalarak 36 MPa' a kadar düşmektedir. Bu duruma neden olan en büyük etkenin nano boyuttaki grafit tozlarının yüksek enerjili tane sınırlarında konumlanması olduğunu söyleyebiliriz. Artan

nano grafit miktarı ile tane sınırlarının hacimsel olarak büyümesinin sinterlemeyi zorlaştırdığı düşünülmektedir.



Şekil 3.10. Artan nano grafit oranıyla birlikte kompozit numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin değişimi

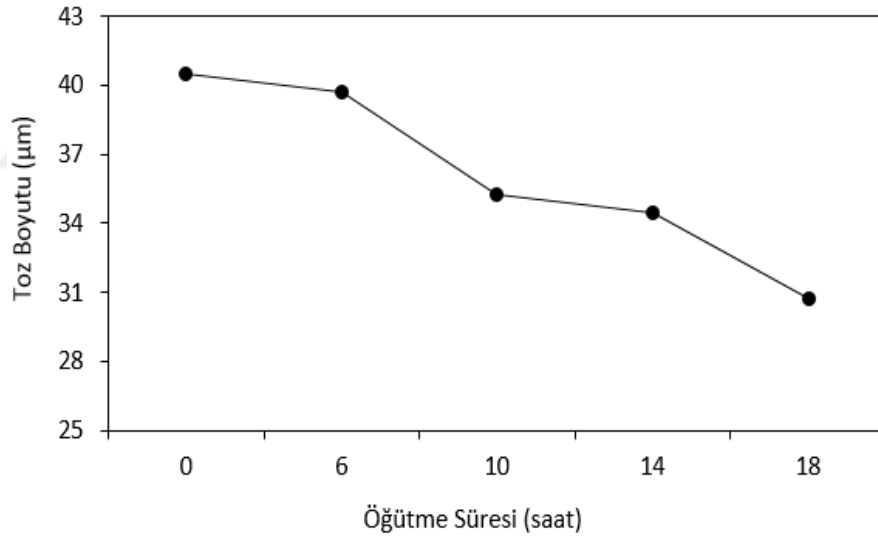
3.3.2. GTNK Numunelerin MA Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada ZA27 matrisli hacimce %1 nano grafit takviyeli kompozit tozlar mekanik alaşımlama yöntemiyle 6, 10, 14 ve 18 saatlik sürelerde öğütülerek mekanik alaşımlama süresinin kompozit yapıya olan etkisi araştırılmıştır.

3.3.2.1. Toz Boyutu ve Morfolojisi

MA işleminde yüksek enerjili bilyalı değirmenler kullanılarak öğütme işlemine maruz kalan toz parçacıkları bilye-toz-bilye, bilye-toz-değirmen yüzeyi arasında meydana gelen yüksek enerjili çarpışmalar sonucunda hem morfolojik hem de boyutsal anlamda değişim gösterirler. MA ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan genel görüş öğütmenin ilk aşamalarında toz boyutunun soğuk kaynak sonucunda arttığı ilerleyen öğütme sürelerinde ise azalarak kararlı hale ulaştığıdır. Bununla birlikte bu oluşum başlangıç boyutu, başlangıç tozlarının morfolojisi, işlem kontrol katkısının miktarı ve uygulanma biçimi gibi faktörlere de bağlıdır. Öğütülen tozların boyutundaki değişimler incelendiğinde 6 saatlik öğütme

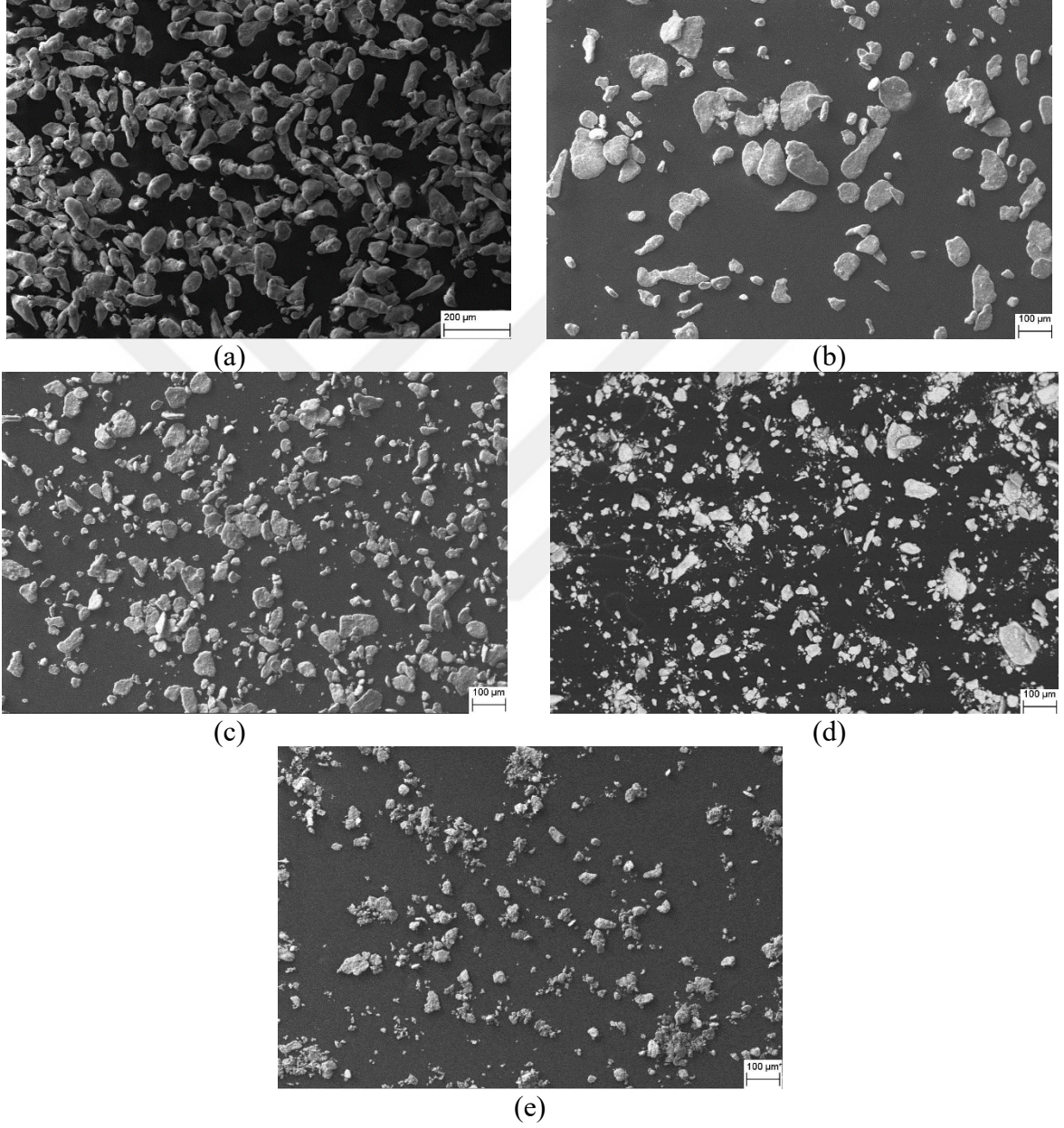
süresinde toz boyutunda düşük miktarda bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni başlangıç tozlarının düzensiz ve çubuksu morfolojiye sahip olmaları gösterilebilir. Bu tozlar bilya-toz-bilya çarpışmaları sonucunda ince bölgelerinden koparak öğütmenin başlangıcında toz boyutunun azda olsa düşmesine neden olmaktadır. Öğütme işleminin 6 saatinden 18 saat sonuna kadar toz boyutunda sürekli bir azalma hali görülmüştür, ancak şunu da belirtmek gerekir ki yaptığımız ön çalışmada öğütme işlemi 24 saate kadar devam ettirilerek 24 saat sonrasında toz boyutu ve morfolojisi incelenmiştir. 18 saatten sonra toz boyutunda önemli bir değişim olmadığı ve 24 saatlik öğütme süresinin maliyeti arttırmasına karşılık toz özelliklerine önemli bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Dolayısıyla öğütülen GTNK tozlarda 18 saatlik öğütme süresinde kararlı hale ulaşıldığı ve toz boyutunun da minimum değerlerine ulaştığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan başlangıç tozlarının ortalama tane boyutu $\sim 40\text{-}41\text{ }\mu\text{m}$ olmasına rağmen 18 saatlik öğütme sonrasında kompozit tozlarında toz boyutu $30\text{ }\mu\text{m}$ 'ye kadar azalmıştır. Bu durum Şekil 3.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. GTNK tozların boyutlarına öğütme süresinin etkisi

Nano grafit parçacıklarının ZA27 matris içerisindeki üniform dağılımı son ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Farklı sürelerde öğütülen GTNK tozların morfolojileri Şekil 3.12 'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, tozlar başlangıçta çubuksu yapıya sahip iken öğütme işleminin ilk 6 saati sonrasında pulsa yapıya döndükleri görülmektedir (Şekil 3.12 b). Bunun nedeni nano grafitin, yağlayıcı etkiye sahip olmasının sonucu olarak, kırılma ve soğuk kaynak olaylarını azaltmasıdır. Dolayısıyla 6 saatlik öğütme süresi sonrasında toz boyutu $40,52\text{ }\mu\text{m}$ 'den $39,74\text{ }\mu\text{m}$ 'ye düşmüş yani toz

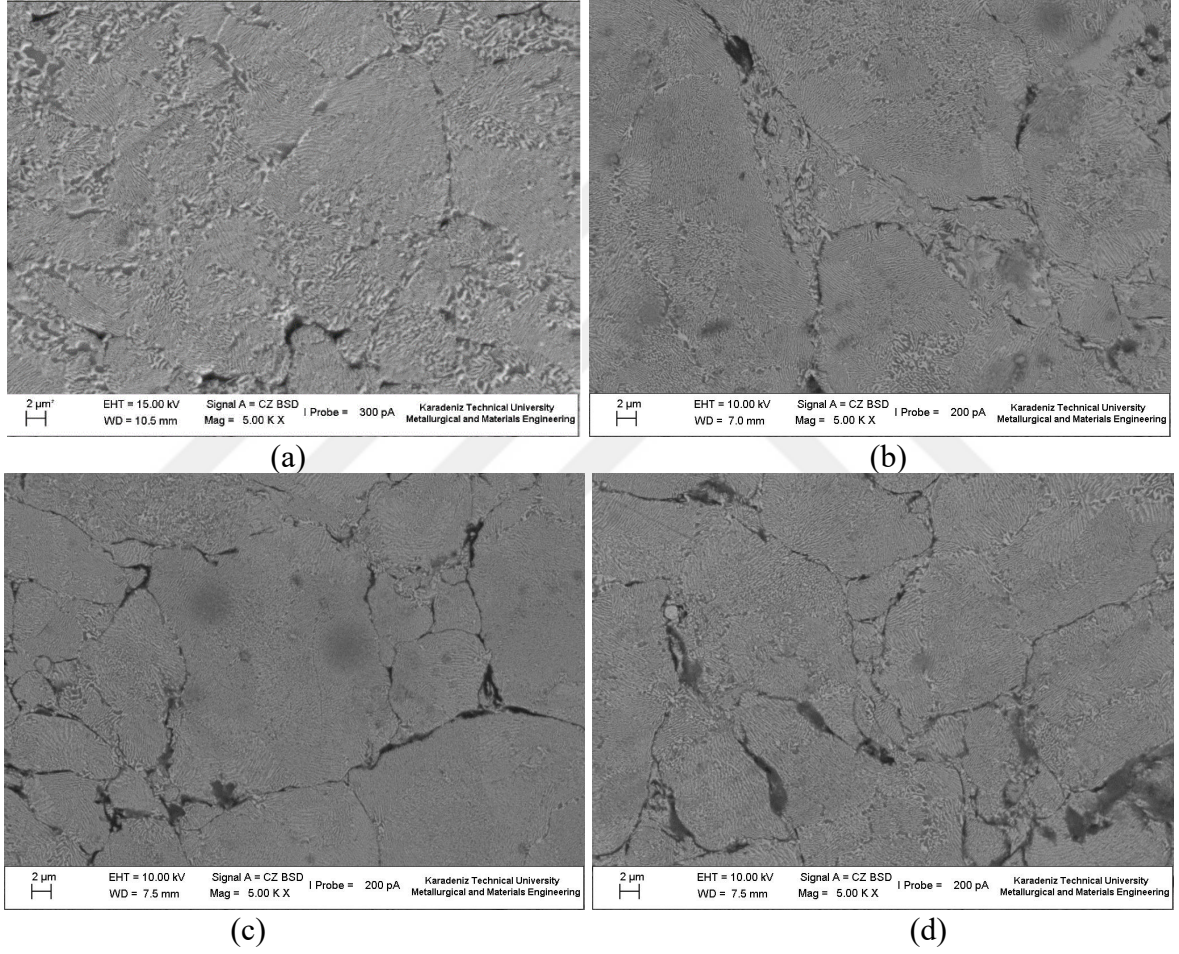
boyutunda önemli bir değişiklik olmamıştır. Öğütme işleminin devam etmesiyle toz morfolojisi pulsu yapısını korumuş ancak toz boyutunda azalmalar meydana gelmiştir. 18 saatlik öğütme sonrasında tozların nispeten eş eksenli bir yapıya sahiptir ve toz boyutunda da önemli bir düşüş meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.12. GTNK tozlarının (a) 0, (b) 6, (c) 10, (d) 14 ve (e) 18 saatlik mekanik alaşımla süreleri sonundaki 200X büyüklükteki SEM görüntüleri

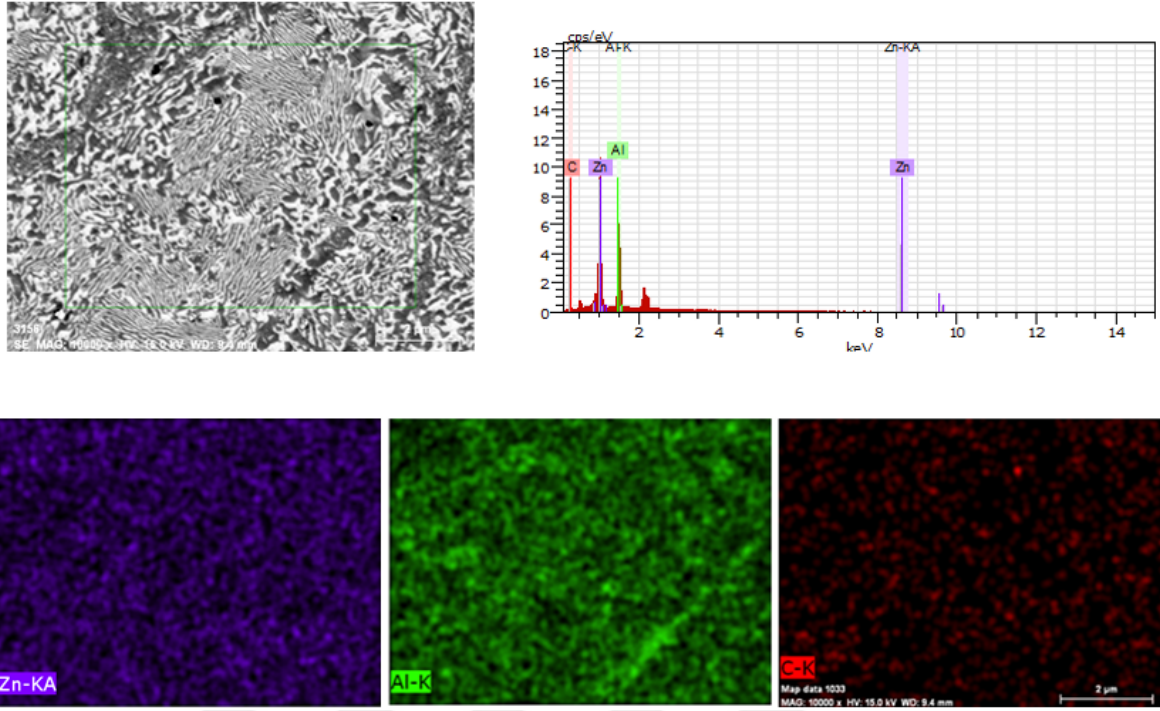
3.3.2.2. İçyapı Analizi

Mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen hacimce %1 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunelere yapılan içyapı analizleri sonucunda elde edilen SEM görüntüleri Şekil 3.13’ te gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde mekanik alaşımlamanın ilerlemesiyle tane sınırlarının sayısının arttığı ve takviye malzemesi olan nano grafitin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görölmektedir.



Şekil 3.13. Üretilen GTNK numunelerin (a) 6, (b) 10, (c) 14 ve (d) 18 saatlik mekanik alaşımla süreleri sonundaki SEM görüntüleri

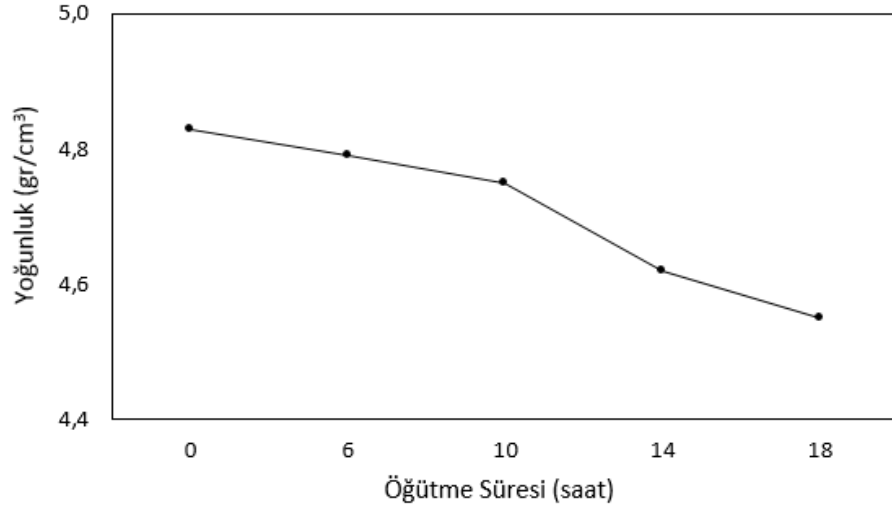
Şekil 3.14’ de 18 saat öğütölmüş GTNK tozlar ile üretilen numunenin EDS analizi verilmiştir. Karbon element haritası incelendiğinde nano grafitin homojen olarak dağıldığı (kırmızı noktalar) açıkça görölmektedir.



Şekil 3.14. Hacimce %1 nano grafit takviyeli 18 saat öğütülmüş kompozit tozlarla üretilen numunenin EDS sonuçları

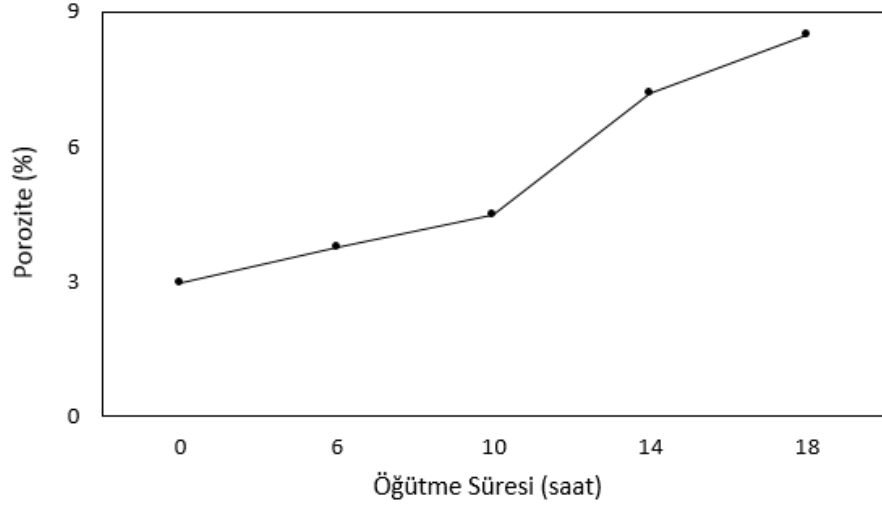
3.3.2.3. Yoğunluk ve Porozite

Hacimce %1 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli tozlara 6, 10, 14, ve 18 saat sürelerinde mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra üretilen numunelerden yoğunluk değerlerinin öğütme süresine göre değişimi Şekil 3.15 'de gösterilmiştir. Şekilden artan öğütme süresiyle birlikte numunelerin yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.15. Üretilen GTNK numunelerin yoğunluğuna öğütme süresinin etkisi

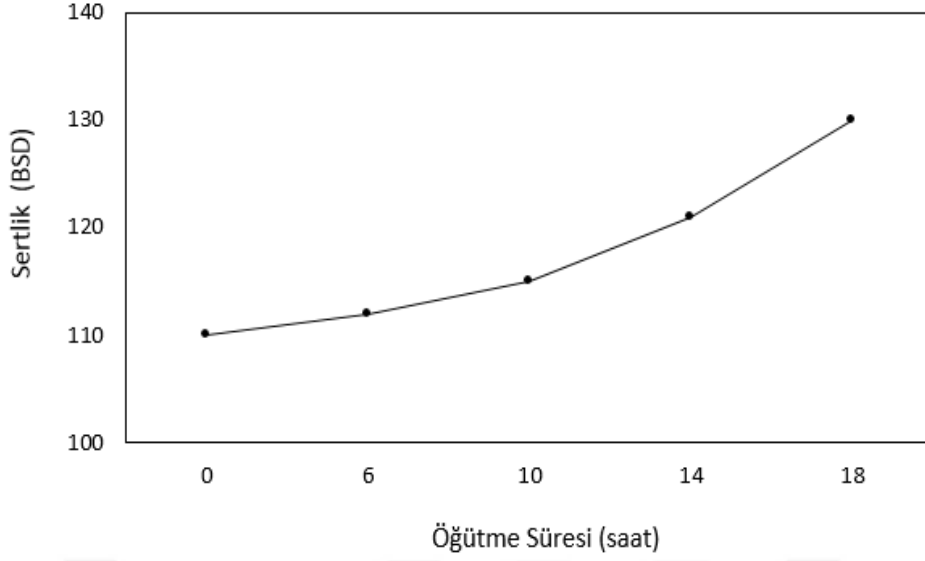
Tozların preslenmesi işleminde meydana gelen sıkıştırma mekanizması kısaca şöyledir: Sıkıştırmanın ilk aşamasında toz parçacıkları birbiri içerisinde yer değiştirirler. Bu durumda tozun paketlenmesini etkileyen faktörlerin başında toz morfolojisi, parçacık boyutu ve parçacıklar arası sürtünme gelmektedir. Tozların sıkıştırılmasında ikinci aşamada ise elastik ve plastik deformasyon mekanizmaları etkindir. Bu aşamada toz parçacıkları arası mekanik bağ oluşmaktadır. Sıkıştırma işleminin son aşamasında ise tozların kırılması ve plastik deformasyon neticesinde poroziteler azalmakta ve toz parçacıkları basıncın ve sıcaklığın etkisiyle birbirine soğuk kaynak olmaktadır. Artan öğütme süresi ile deformasyon sertleşmesine maruz kalan toz parçacıklarının paketlenmesi zorlaşır. Buna bağlı olarak da Şekil 3.15'te görüldüğü gibi yoğunluk değeri artan öğütme süresi ile azalmaktadır. Üretilen kompozitlerin porozite değişimi Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Üretilen GTNK numunelerin porozite değerlerine öğütme süresinin etkisi

3.3.2.4. Sertlik

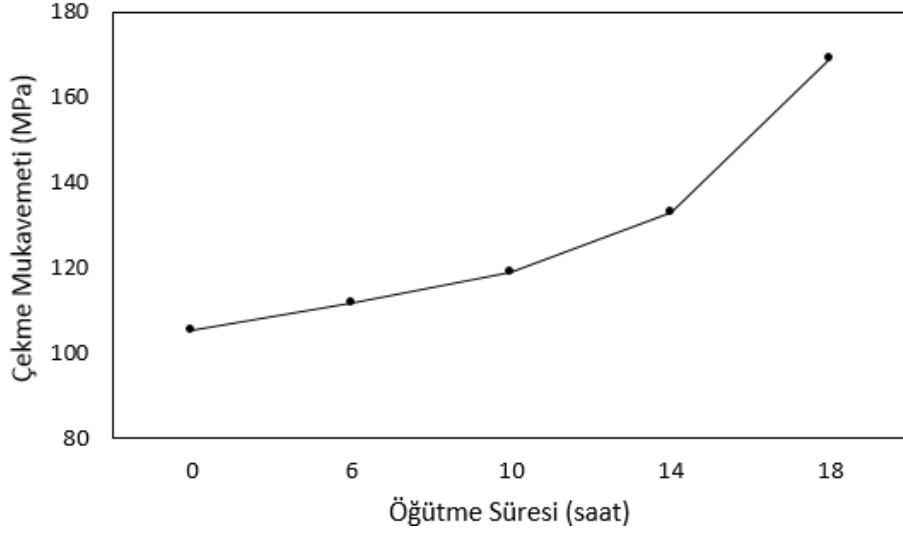
Hacimce %1 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli tozlara 6, 10, 14, ve 18 saat sürelerinde mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra üretilen numunelerden sertlik değerlerinin öğütme süresine göre değişimi Şekil 3.17 'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, artan öğütme süresi ile birlikte sertlik değerlerinde belirgin bir şekilde artış görülmüştür. Öyle ki mekanik alaşımla uygulanmamış numunenin sertliği 110 BSD iken 18 saatlik öğütme sonrasında bu değer yaklaşık 21 BSD artarak 131 BSD olmuştur. Bunun nedeni deformasyon sertleşmesi ile toz sertliğinin artmış olması yani bulk numune üretiminde kullanılan hammaddenin sertliğinin artmış olmasıdır.



Şekil 3.17. Üretilen GTNK numunelerin sertliğine öğütme süresinin etkisi

3.3.2.5. Çekme Mukavemeti

Hacimce %1 nano grafit takviyeli ZA27 matrisli tozlara 6, 10, 14, ve 18 saat sürelerinde mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra üretilen numunelerden çekme mukavemet değerlerinin öğütme süresine göre değişimi Şekil 3.18 'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, öğütülmemiş tozlarla üretilen numunenin çekme mukavemetinin yaklaşık 105 MPa olduğu ve artan öğütme süresiyle birlikte bu değer kademeli olarak yükseldiği görülmektedir. MA işlemiyle toz boyutunda meydana gelen küçülme ve tozların ilerleyen öğütme sürelerinde küresele yakın bir morfolojiye sahip olması çekme mukavemetinin artmasını sağlamıştır. En yüksek çekme mukavemet değeri 18 saatlik öğütme süresi sonunda yaklaşık 170 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.18. Üretilen GTNK numunelerin çekme mukavemetine öğütme süresinin etkisi

3.4. Alümina (Al_2O_3) Takviyeli Nanokompozitler (ATNK)

Bu bölümde farklı oranlarda nano alümina tozu kullanılarak mekanik alaşımlama ve geleneksel toz metalürjisi yöntemleriyle üretilen ATNK malzemelerin mekanik ve içyapı özellikleri incelenmiştir. Takviye oranının ve mekanik alaşımlamanın kompozitlere olan etkisi araştırılmıştır.

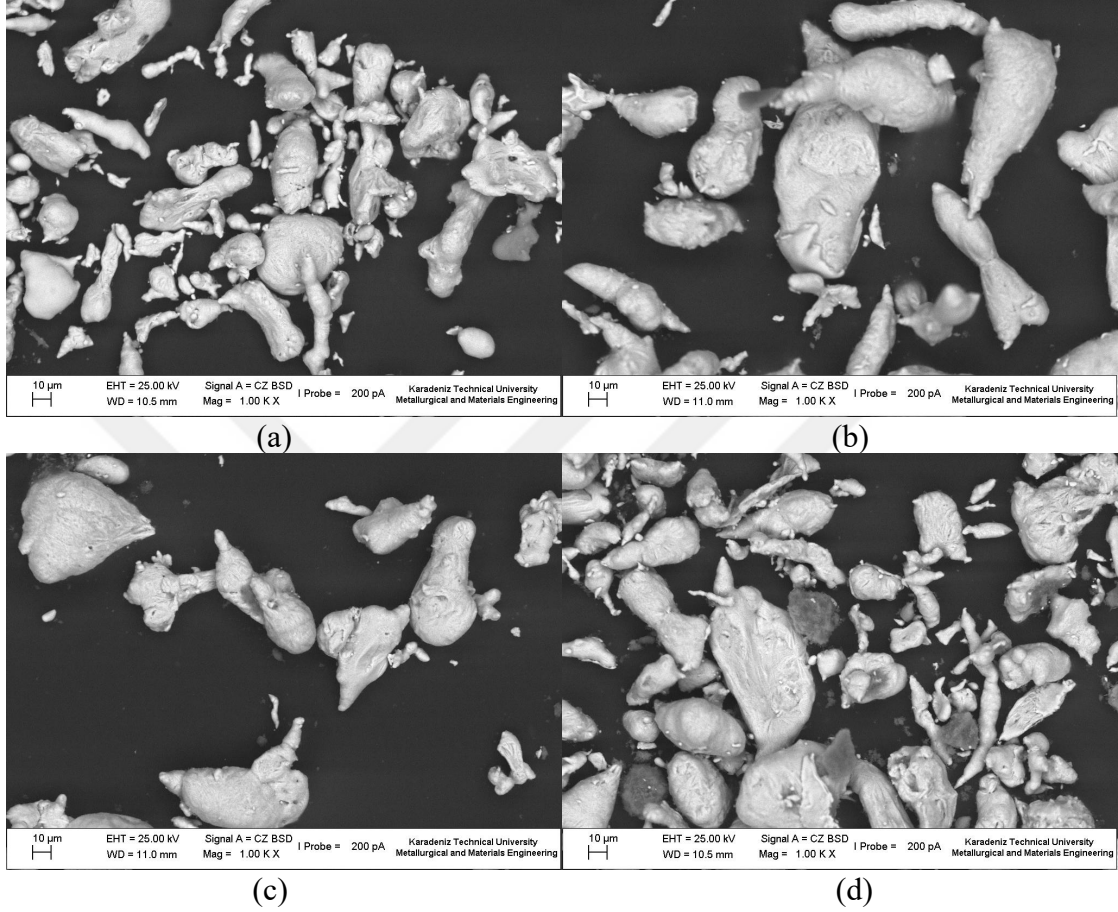
3.4.1. ATNK Numunelerin Geleneksel Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada ZA27 matrisli hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli kompozit numuneler geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilerek takviye miktarının kompozit yapıya olan etkisi araştırılmıştır.

3.4.1.1. Toz Morfolojisi

ZA27 matris tozları ve nano alümina tozlar mekanik olarak karıştırılarak kompozit tozlar üretilmiştir. Tozların SEM görüntüleri Şekil 3.19 'te gösterilmiştir. Mekanik alaşımlama işlemi uygulanmadığından dolayı matris tozlarının morfolojisinde bir değişme

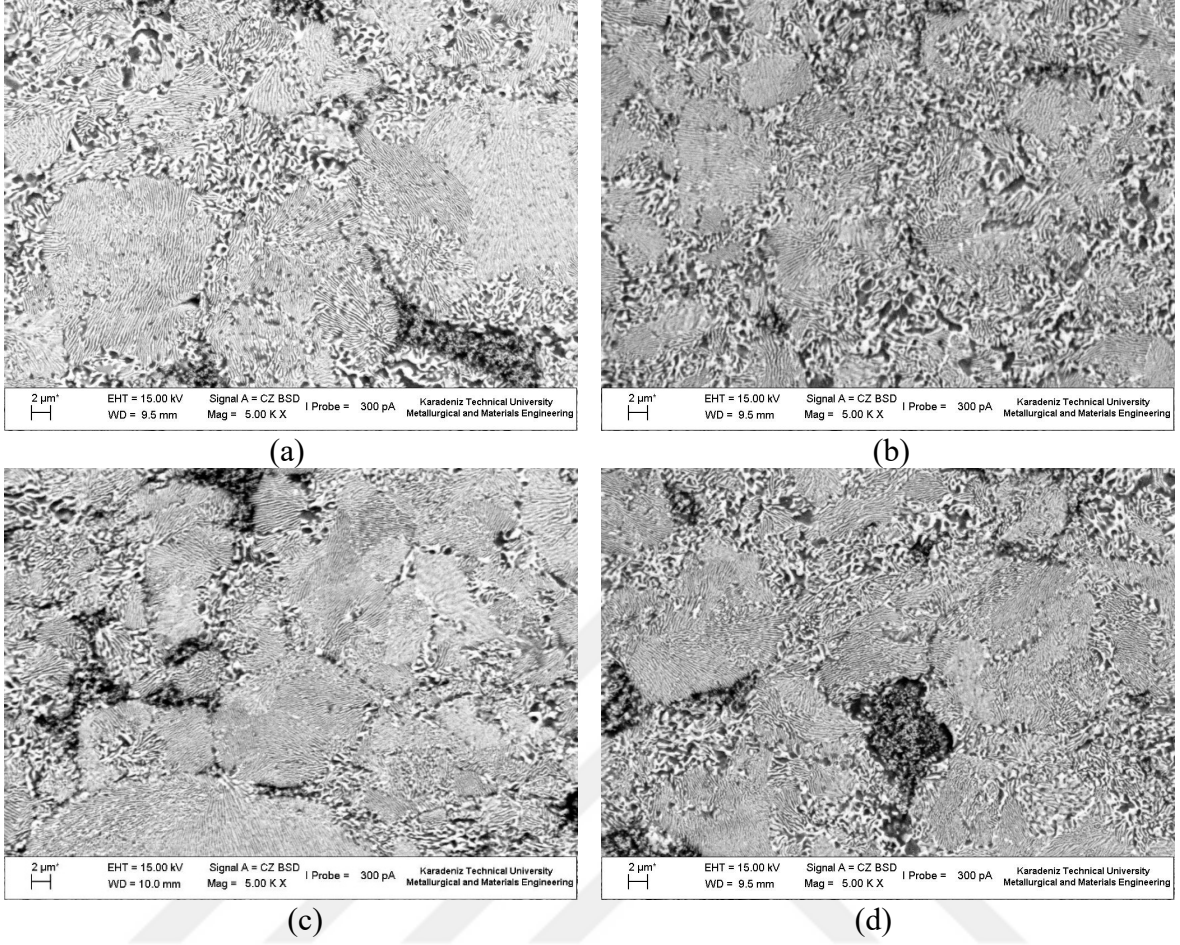
olmamaktadır. Şekiller incelendiğinde matris tozları üzerinde nano alümina parçacıklarının (parlak küçük parçacıklar) varlığı ve bunların alümina oranı ile birlikte arttığı gözlenmektedir.



Şekil 3.19. (a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) % 4 ATNK tozların 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri

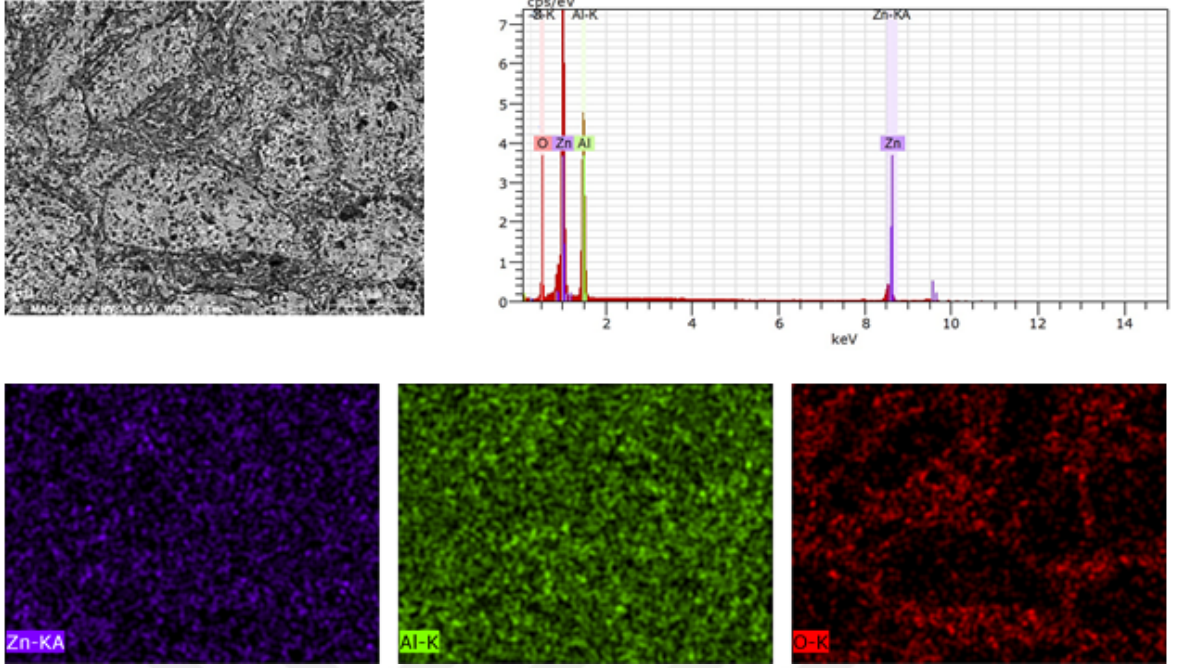
3.4.1.2. İçyapı Analizi

Geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilen hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunelere yapılan içyapı analizleri sonucunda elde edilen SEM görüntüleri Şekil 3.20’ de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde nano alüminanın yapı içerisinde daha çok tane sınırlarında biriktiği ve artan takviyeyle birlikte tane sınırlarında daha fazla nano alümina parçacığının yer aldığı görülmektedir. Bu bölgeler şekilde küçük siyah noktalar olarak görülmektedir.



Şekil 3.20. Hacimce (a) %1, (b) %2, (c) %3 ve (d) %4 nano alümina takviyeli kompozit numunelerin sinterleme sonrası 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri

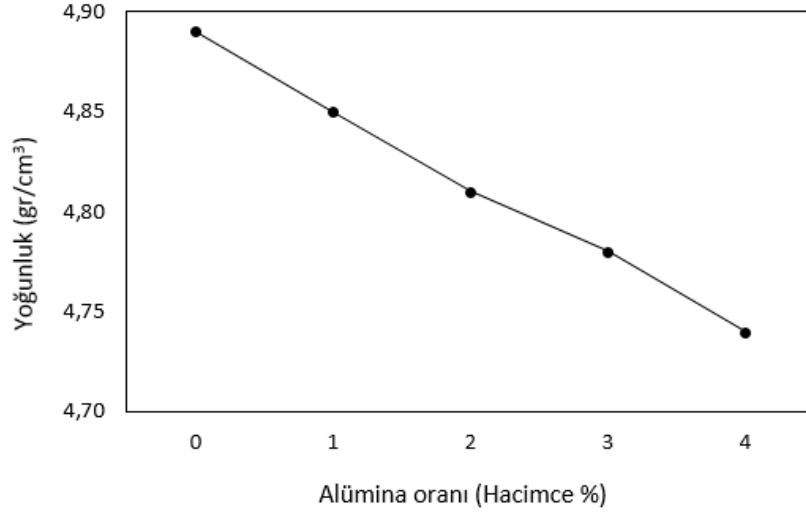
Hacimce %4 oranında nano alümina içeren kompozitin EDS analizi ise Şekil 3.21’da verilmektedir. Analiz sonucunda 2 adet çinko (Zn), alüminyum (Al) ve oksijen (O) piklerinin varlığı açıkça görülmektedir. Şekilde Al ve O elementlerinin birlikte yoğun olarak görüldüğü noktaların nano alümina olduğu düşünülmektedir. Bu noktalar dikkate alındığında nano alümina parçacıklarının kompozit yapı içerisinde daha çok tane sınırlarında veya tane sınırlarına yakın bölgelerde yoğunlaştığını söyleyenebilir.



Şekil 3.21. Hacimce %4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları

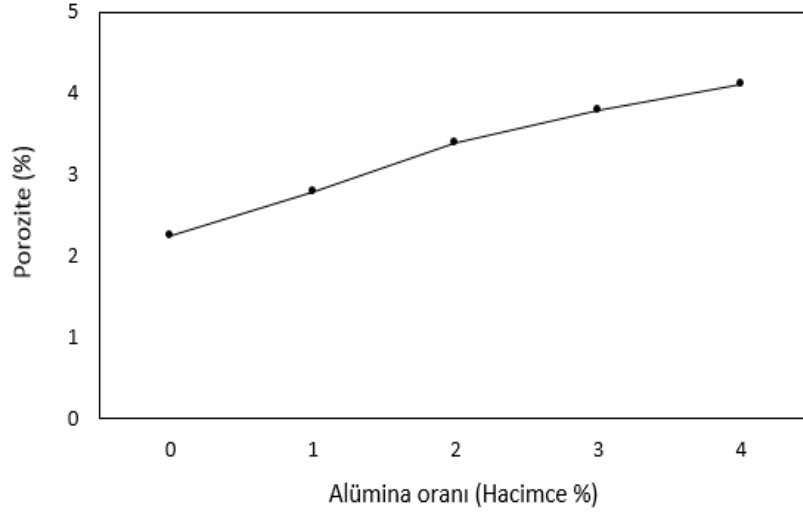
3.4.1.3. Yoğunluk ve Porozite

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi sonucunda yoğunluk değerlerinin nano alümina oranına göre değişimi grafiği Şekil 3.22 'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde artan nano alümina oranı ile birlikte numunelerin yoğunluk değerlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Takviye fazı olan nano alüminanın yoğunluğunun matris fazı olan ZA27 alaşımından düşük olması yoğunluğun artan takviyeyle azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.22. Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin yoğunluk değerlerinin değişimi

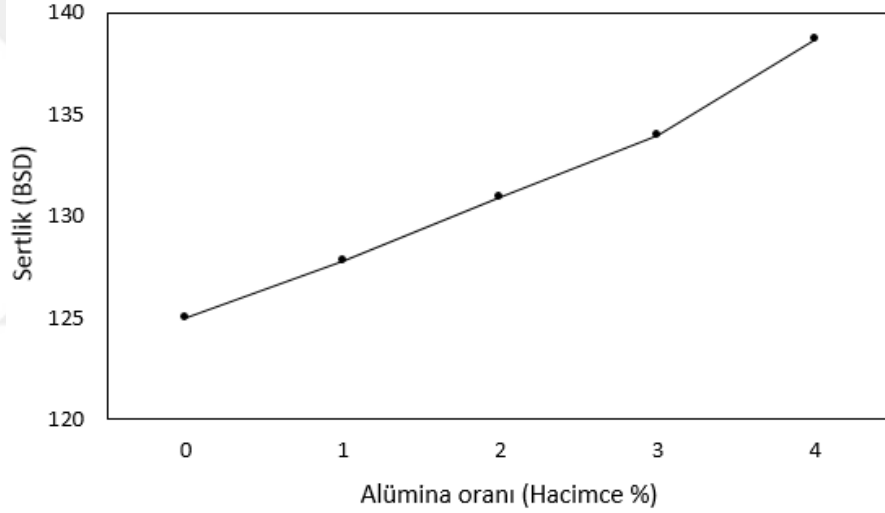
Şekil 3.23’de ATNK numunelerde nano alümina oranının porozite değerlerine olan etkisi gösterilmiştir. Şekilden nano alümina oranının artışı ile birlikte porozite değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu durum presleme ve sinterleme işleminde söz konusu takviye malzemelerinin bu işlemleri olumsuz etkilemesinden kaynaklanmıştır.



Şekil 3.23. Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin porozite değerlerinin değişimi

3.4.1.4. Sertlik

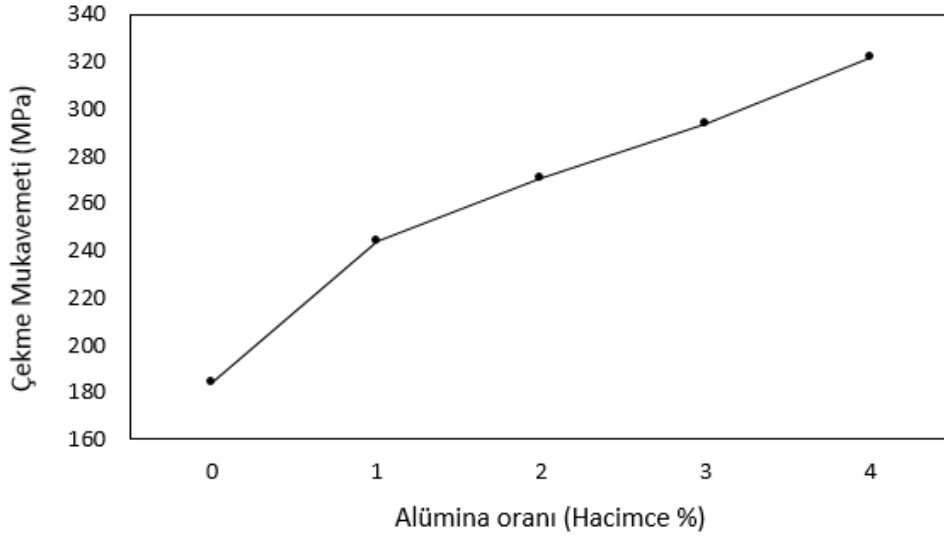
Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi sonucunda sertlik değerlerinin nano alümina oranına göre değişimi grafiği Şekil 3.24 'da verilmektedir. Şekil incelendiğinde nano alümina takviye miktarı arttıkça kompozitlerin sertliğinin kademeli olarak arttığı görülmektedir. Nano alüminanın sert seramik bir faz olması üretilen kompozitlerin sertliğinin artmasına neden olmuştur. Öyle ki nano grafit içermeyen ZA27 alaşımının sertliği 125 BSD iken %4 nano alümina takviyeli kompozitte bu değer yaklaşık 13 BSD artarak 138 BSD'ye yükselmiştir.



Şekil 3.24. Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin sertlik değerlerinin değişimi

3.4.1.5. Çekme Mukavemeti

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi sonucunda çekme mukavemeti değerlerinin nano alümina oranına göre değişimi grafiği Şekil 3.25 'da verilmektedir. Şekil incelendiğine nano alümina takviye miktarı arttıkça malzemenin çekme mukavemetinde büyük bir artış meydana geldiği gözlenmiştir. Nitekim nano alümina katılmayan ZA27 alaşımının çekme mukavemeti 184 MPa iken %4 oranında nano alümina katıldığında bu değer hemen hemen 2 kat artarak 325 MPa olmuştur.



Şekil 3.25. Artan nano alümina oranıyla birlikte ATNK numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin değişimi

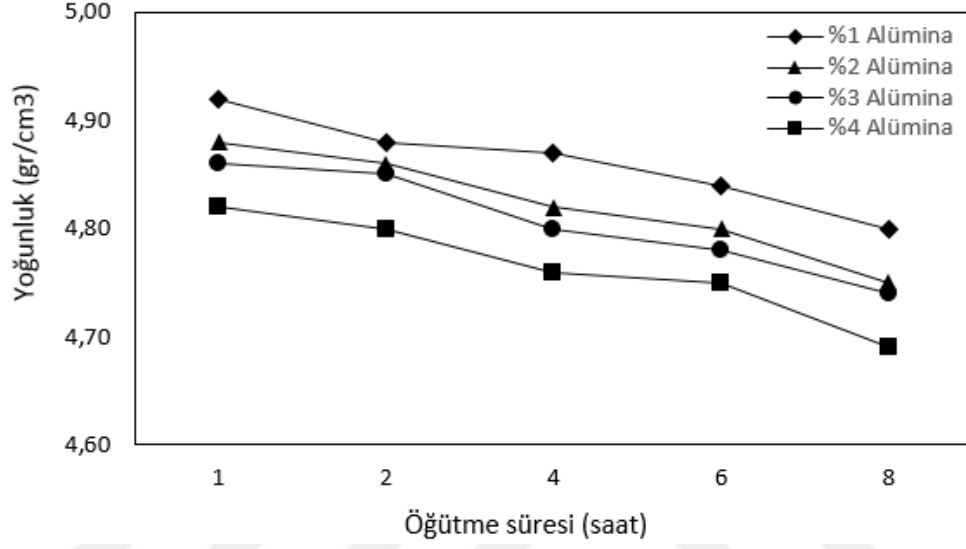
3.4.2. ATNK Numunelerin MA Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada ZA27 matrisli hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli kompozit tozlar mekanik alaşımlama yöntemiyle 1, 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde öğütülerek MA süresinin kompozit yapıya olan etkisi araştırılmıştır.

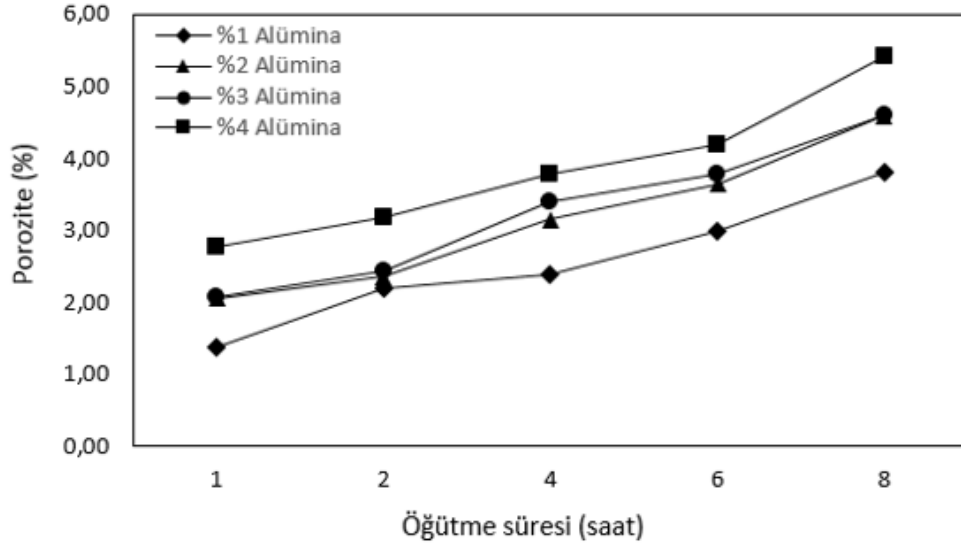
3.4.2.1. Yoğunluk ve Porozite

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 alümina takviyeli ZA-27 matrisli kompozitlerin mekanik alaşımla yöntemiyle üretilmesi sonucunda yoğunluk ve porozite değerlerinin alümina oranı ve mekanik alaşımla süresine göre değişimi Şekil 3.26'da verilmektedir. Şekil incelendiğinde, nano alümina oranı arttıkça kompozitlerin yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Bu durum takviye olarak katılan nano alüminanın yoğunluk değerinin (3.95 gr/cm^3) matris malzemesinin yoğunluk değerinden (5 gr/cm^3) düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca aynı nano alümina takviyesine sahip kompozitlerde artan mekanik alaşımlama süresiyle de kompozitin yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum toz morfolojisinin mekanik alaşımla işlemi esnasında değişiminden ve toz boyutunun küçülmesinden kaynaklanmış olabilir. Bununla birlikte mekanik alaşımla işlemi esnasında tozların aşırı miktarda plastik deformasyona maruz

kalması toz sertliklerinin artışına neden olur. Dolayısıyla kompozit tozlarının paketlenme yeteneği azalır ve bu durum porozitenin artışına ve yoğunluğun azalmasına neden olur. Nano alümina katkısının da kompozitlerde porozite değerlerini arttırdığı gözlenmiştir (Şekil 3.27). Bu durum presleme ve sinterleme işleminde söz konusu takviye malzemesinin bu işlemleri olumsuz etkilemesinden kaynaklanmıştır.



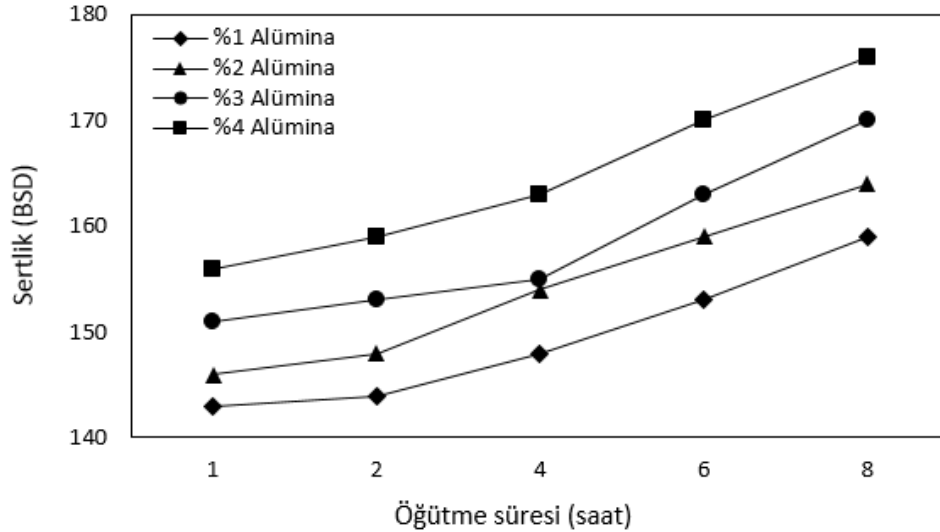
Şekil 3.26. Üretilen ATNK numunelerin yoğunluğuna öğütme süresinin etkisi



Şekil 3.27. Üretilen ATNK numunelerin porozite değerlerine öğütme süresinin etkisi

3.4.2.2. Sertlik

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin mekanik alaşımla yöntemiyle üretilmesi sonucunda sertlik değerlerinin nano alümina oranı ve mekanik alaşımla süresine göre değişimi grafiği Şekil 3.28’ de verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere artan öğütme süresiyle birlikte deformasyon sertleşmesine bağlı olarak toz sertliğinde artış görülmüştür. Öğütme işleminin başlangıcında, parçacık dağılımı homojen değildir. Ancak öğütme işlemi devam ettikçe Al_2O_3 parçacıkları ZA27 matris tozları üzerine çakılmaya ve gömülmeye başlarlar. Bu nedenle sertlikte bir artış meydana gelir. Toz sertliğini etkileyen diğer bir parametrede Al_2O_3 takviye miktarıdır. Artan Al_2O_3 miktarıyla birlikte toz sertliğinde artış meydana gelmiştir. Bu artışın iki sebebi vardır, birincisi yapıda bulunan sert parçacıkların doğrudan toz sertliğini arttırmasıdır. İkinci sebep ise, Al_2O_3 parçacıklarının alaşım tozlarının daha fazla deforme olmasına dolayısıyla daha fazla deformasyon sertleşmesine maruz kalmasına neden olmasıdır. En yüksek sertlik değeri 8 saat öğütülmüş %4 Al_2O_3 takviye edilmiş kompozit numunede elde edilmiştir.

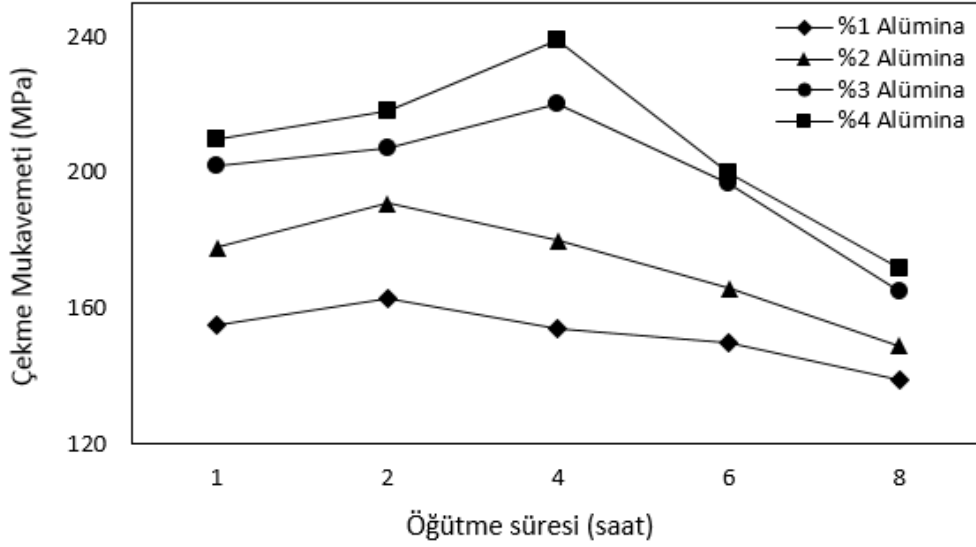


Şekil 3.28. Üretilen ATNK numunelerin sertliğine öğütme süresinin etkisi

3.4.2.3. Çekme Mukavemeti

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 alümina takviyeli ZA27 matrisli kompozitlerin mekanik alaşımla yöntemiyle üretilmesi sonucunda çekme mukavemet değerlerinin alümina oranı ve

mekanik alaşımlama süresine bağlı değişimi grafiği Şekil 3.29’ da verilmektedir. %1 ve %2 Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinde ani bir artış 2 saatlik öğütme süresinde gözlenirken, %3 ve %4 Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinde bu artış 4 saatlik öğütme süresi sonrasında gözlemlenmiştir. Bu artışın nedeni düşük takviye oranlarında tozlar 2 saatte homojen olarak dağılım gösterirken %2’den sonraki takviyelerde ise artan takviye miktarı sistemin 2 saatte dengeye ulaşmasına engel olmaktadır. Artan takviye miktarıyla tozların matris içeresine homojen dağılımı için gereken sürenin de arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla %3 ve %4 Al_2O_3 takviyeli kompozitler, 4 saatlik mekanik alaşımla sonucunda dengeye ulaşırlar. Denge durumu sağlandıktan sonra yapılan mekanik alaşımla işlemi tozların yüksek oranda plastik deformasyona uğramasına neden olur. Ve bu durum tozların preslenmesi esnasında daha fazla enerji gereksinimi ihtiyacı doğurmaktadır. Bu yüzden presleme sonrasında çekme dayanımını negatif etkileyen porozite artmaktadır.



Şekil 3.29. Üretilen ATNK numunelerin çekme mukavemetine öğütme süresinin etkisi

3.5. Hibrit Nanokompozitler (HNK)

Bu bölümde farklı oranlarda nano grafit ve nano alümina tozları kullanılarak mekanik alaşımlama yöntemleriyle üretilen HNK malzemelerin mekanik ve içyapı özellikleri incelenmiştir.

3.5.1. HNK Numunelerin MA Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada ZA27 matrisli hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano grafit ve nano alümina takviyeli kompozit numuneler MA yöntemiyle üretilerek takviye miktarının kompozit yapıya olan etkisi araştırılmıştır. MA yöntemiyle üretilen HNK numuneler ve kodları Tablo 3.1’de verilmiştir. Önceki yapılan deneyler ışığında HNK numuneler için en uygun MA süresi 8 saat olarak belirlenmiş ve tüm HNK numunelere 8 saatlik MA işlemi uygulanmıştır.

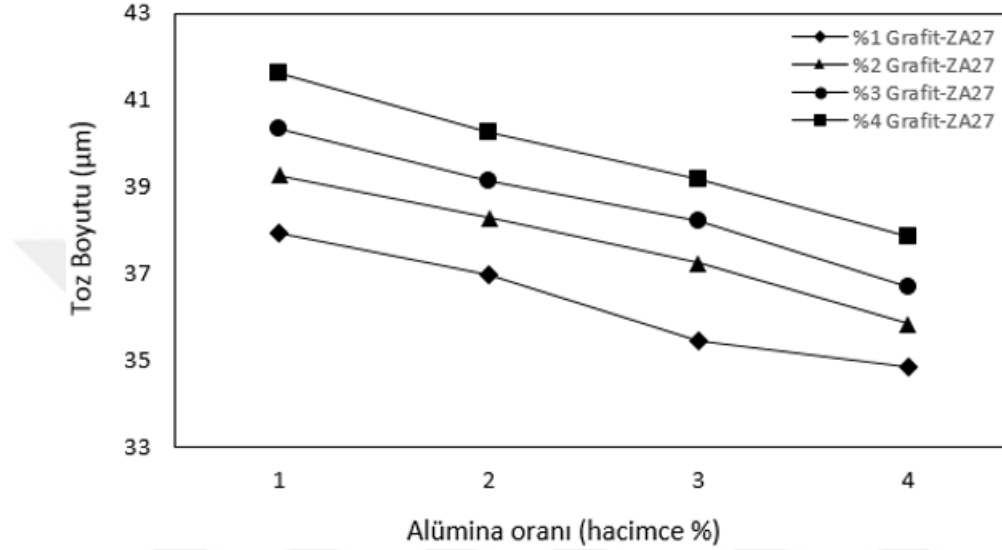
Tablo 3.1. Üretilen hibrit numunelerin takviye oranları ve kodlanması

1.Grup		2.Grup	
Üretilecek numune	Numune kodu	Üretilecek numune	Numune kodu
%1 grafit - %1 Al ₂ O ₃	ZA-1-1	%2 grafit -%1 Al ₂ O ₃	ZA-2-1
%1 grafit- %2 Al ₂ O ₃	ZA-1-2	%2 grafit -%2 Al ₂ O ₃	ZA-2-2
%1 grafit- %3 Al ₂ O ₃	ZA-1-3	%2 grafit -%3 Al ₂ O ₃	ZA-2-3
%1 grafit- %4 Al ₂ O ₃	ZA-1-4	%2 grafit -%4 Al ₂ O ₃	ZA-2-4
3.Grup		4.Grup	
Üretilecek numune	Numune kodu	Üretilecek numune	Numune kodu
%3 grafit - %1 Al ₂ O ₃	ZA-3-1	%4 grafit - %1 Al ₂ O ₃	ZA-4-1
%3 grafit - %2 Al ₂ O ₃	ZA-3-2	%4 grafit - %2 Al ₂ O ₃	ZA-4-2
%3 grafit - %3 Al ₂ O ₃	ZA-3-3	%4 grafit - %3 Al ₂ O ₃	ZA-4-3
%3 grafit - %4 Al ₂ O ₃	ZA-3-4	%4 grafit - %4 Al ₂ O ₃	ZA-4-4

3.5.1.1. Toz Boyutu ve Morfolojisi

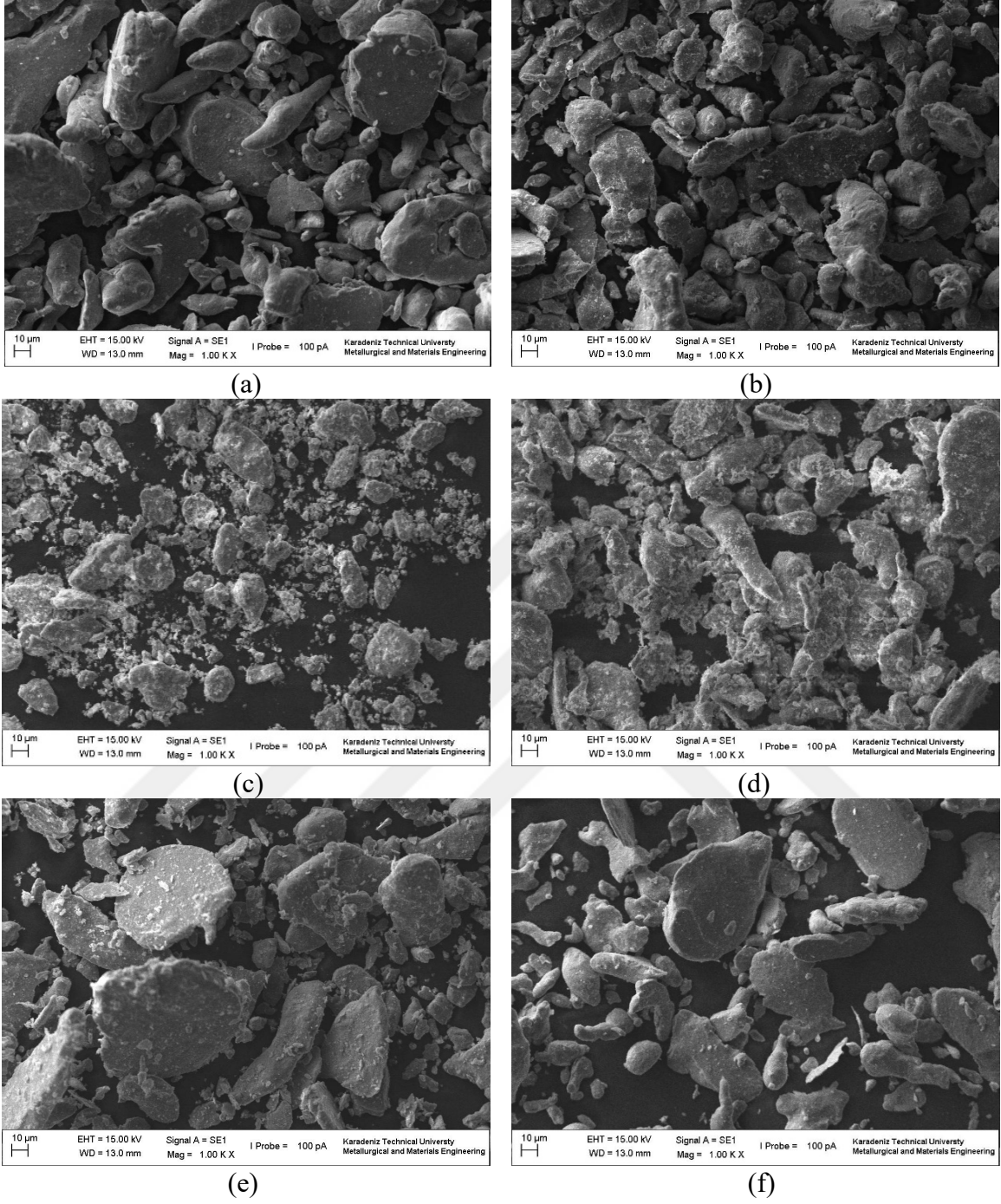
Farklı oranlarda nano grafit içeren HNK numunelerde nano alümina ve nano grafit oranının toz boyutu üzerindeki etkisi Şekil 3.30’daki grafikte verilmektedir. Şekil incelendiğinde nano alümina takviye miktarı arttıkça toz tane boyutunun azaldığı görülmektedir. Mekanik alaşımlamanın ilk evrelerinde toz-bilya-toz etkileşimleri sonucu olarak alümina tozları ZA27 matris içerisine gömülürler. Devam eden MA işlemi sonrasında matris içine gömülen alüminanın yapı içerisindeki kesme etkisiyle tozların kırılmasıyla HNK tozların boyutlarında bir azalma meydana gelir. Bunun yanında aynı nano alümina oranına sahip HNK tozlarda nano grafit oranı arttıkça tozların tane boyutlarının arttığı gözlenmiştir. Grafitin yağlayıcı özelliğe sahip olmasından dolayı MA işlemi esnasında toz-bilye-toz etkileşimini olumsuz yönde etkileyerek tozların pulsu bir yapıya bürünmesine neden olur ve dolayısıyla toz boyutunda bir artış meydana gelir. Örneğin; hacimce %1 grafit

ve %1 alümina oranına sahip HNK tozların boyutu 37,94 μm olurken; hacimce %1 grafit ve %4 alümina oranına sahip HNK tozların boyutu 34,86 μm boyutuna düşmüştür. Ancak; grafit oranının artışıyla meydana gelen toz boyutu değişikliğine bakıldığında; %1 grafit ve %1 alümina oranına sahip HNK tozlarda boyut 37,94 μm olarak belirlenirken, %4 grafit ve %1 alümina oranına sahip HNK tozlarda boyut 41,64 μm olarak belirlenmiştir.



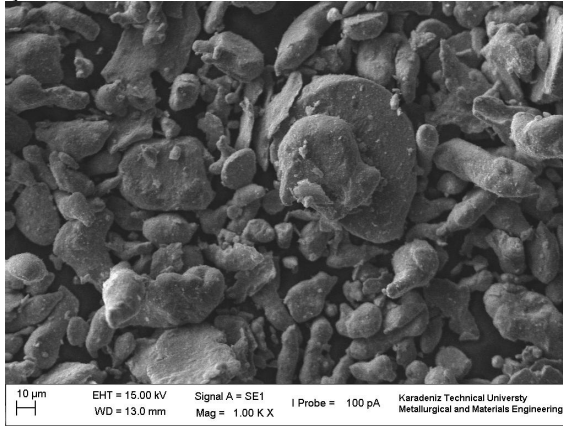
Şekil 3.30. MA sonrası üretilen HNK tozların boyutlarının, nano alümina ve grafit oranıyla değişimi

Üretilen ZA27 matrisli nano alümina ve nano grafit takviyeli HNK tozların mekanik alaşımlama sonrası SEM görüntüleri Şekil 3.31’de verilmektedir. Başlangıç (takviyesiz ZA27) toz boyutu 40,2 μm ve toz şekli nispeten küresel ve çubuksudur. Şekillerde verilen toz morfolojileri incelendiğinde, %1 ‘den %4’e kadar olan nano grafit takviyelerinde (ZA-1-1, ZA-2-1, ZA-3-1, ZA-4-1) tozların çubuksu halden pulsu hale geldikleri görülmüştür (Şekil 3.31 a, e, i, m). Grafit yağlayıcı bir özelliğe sahip olduğundan dolayı tozlar arasındaki etkileşimi olumsuz etkileyerek kırılma olaylarını azaltmıştır. Tozlar birbirlerine yüksek hızlarda çarparak çubuksu şeklini kaybetmiş ve kırılarak pulşulaşmıştır. %4 nano grafit takviyesinde (ZA-4-1) ise yüksek grafit oranının etkisiyle tozların birbirleriyle etkileşimi oldukça azalır. Bunun yanında nano alümina oranının artmasıyla (ZA-1-4) tozların MA işlemiyle kırılarak çubuksu hale döndüğü anlaşılmıştır. Dolayısıyla 8 saat MA işlemi sonunda başlangıç toz şekline yakın bir morfoloji elde edilmiştir.

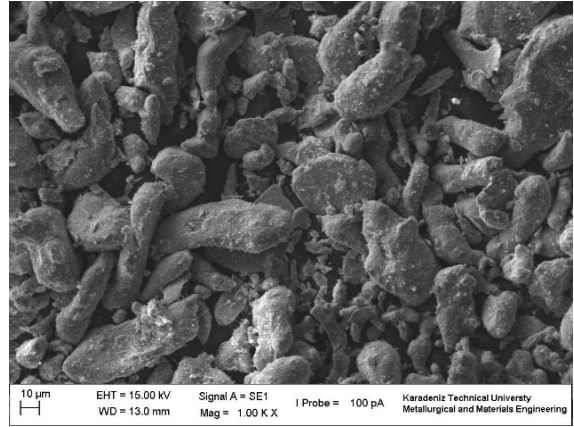


Şekil 3.31. Üretilen hibrit tozlarının 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri: (a) ZA-1-1, (b) ZA-1-2, (c) ZA-1-3, (d) ZA-1-4, (e) ZA-2-1, (f) ZA-2-2, (g) ZA-2-3, (h) ZA-2-4, (i) ZA-3-1, (j) ZA-3-2, (k) ZA-3-3, (l) ZA-3-4, (m) ZA-4-1, (n) ZA-4-2, (p) ZA-4-3, (r) ZA-4-4

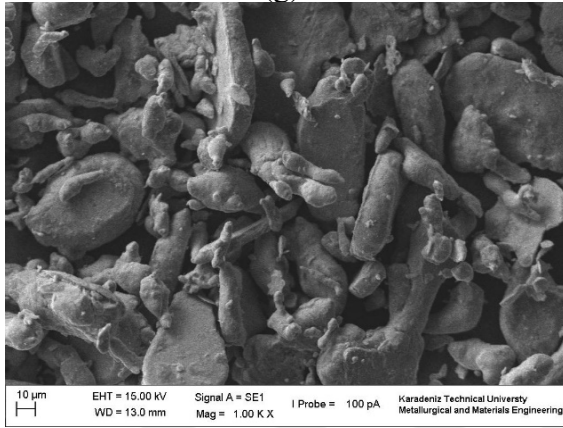
Şekil 3.31' in devamı



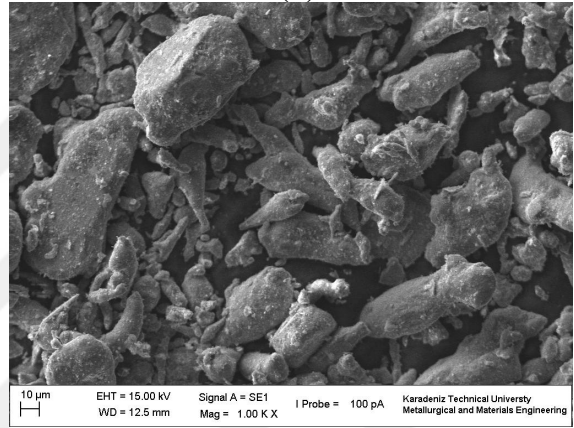
(g)



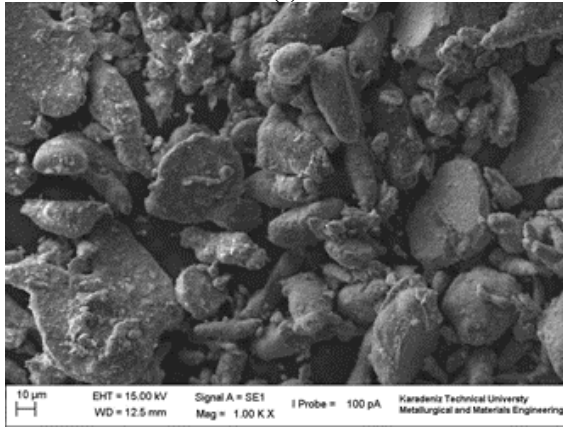
(h)



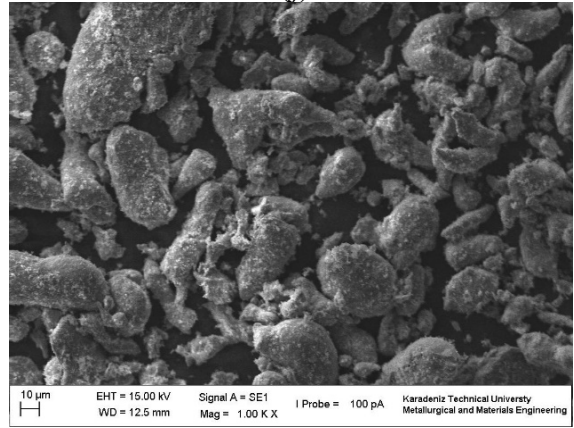
(i)



(j)

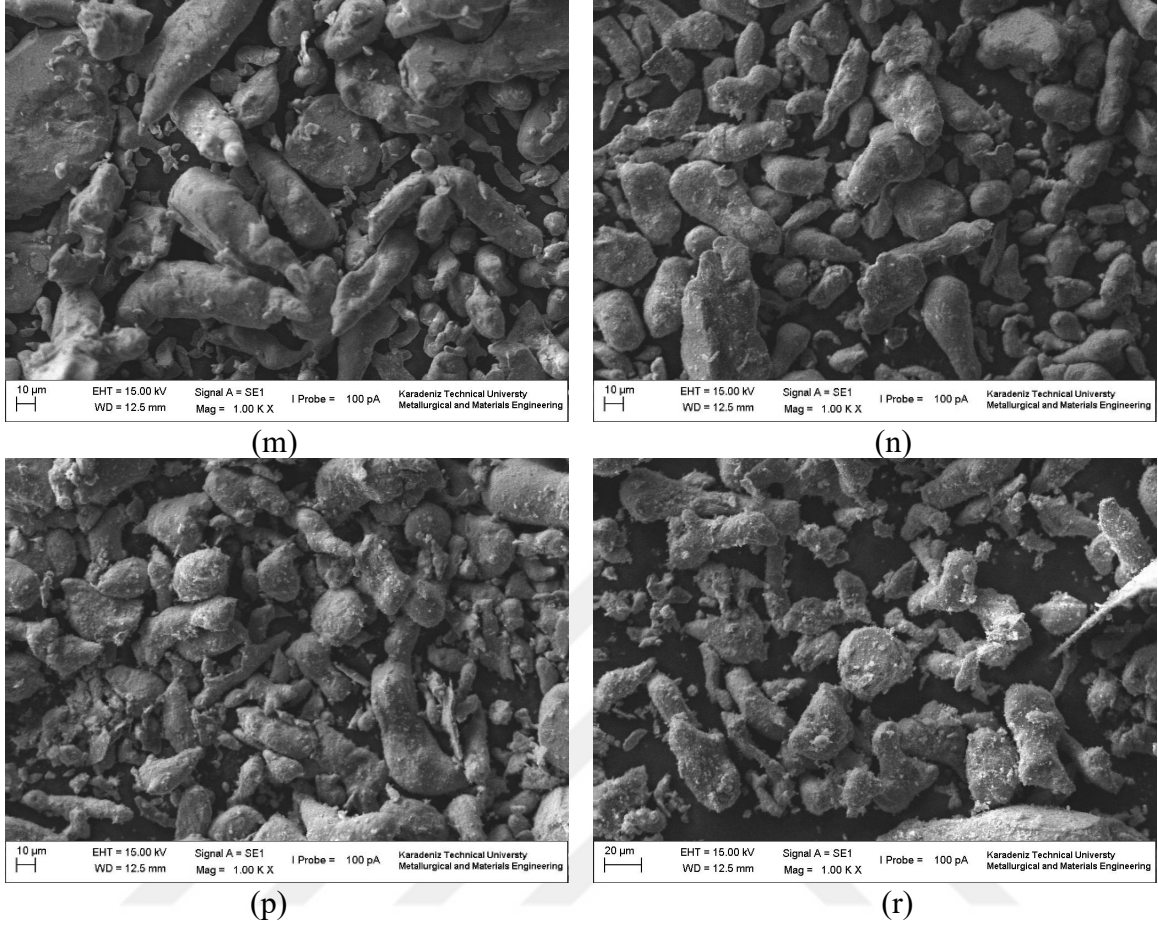


(k)



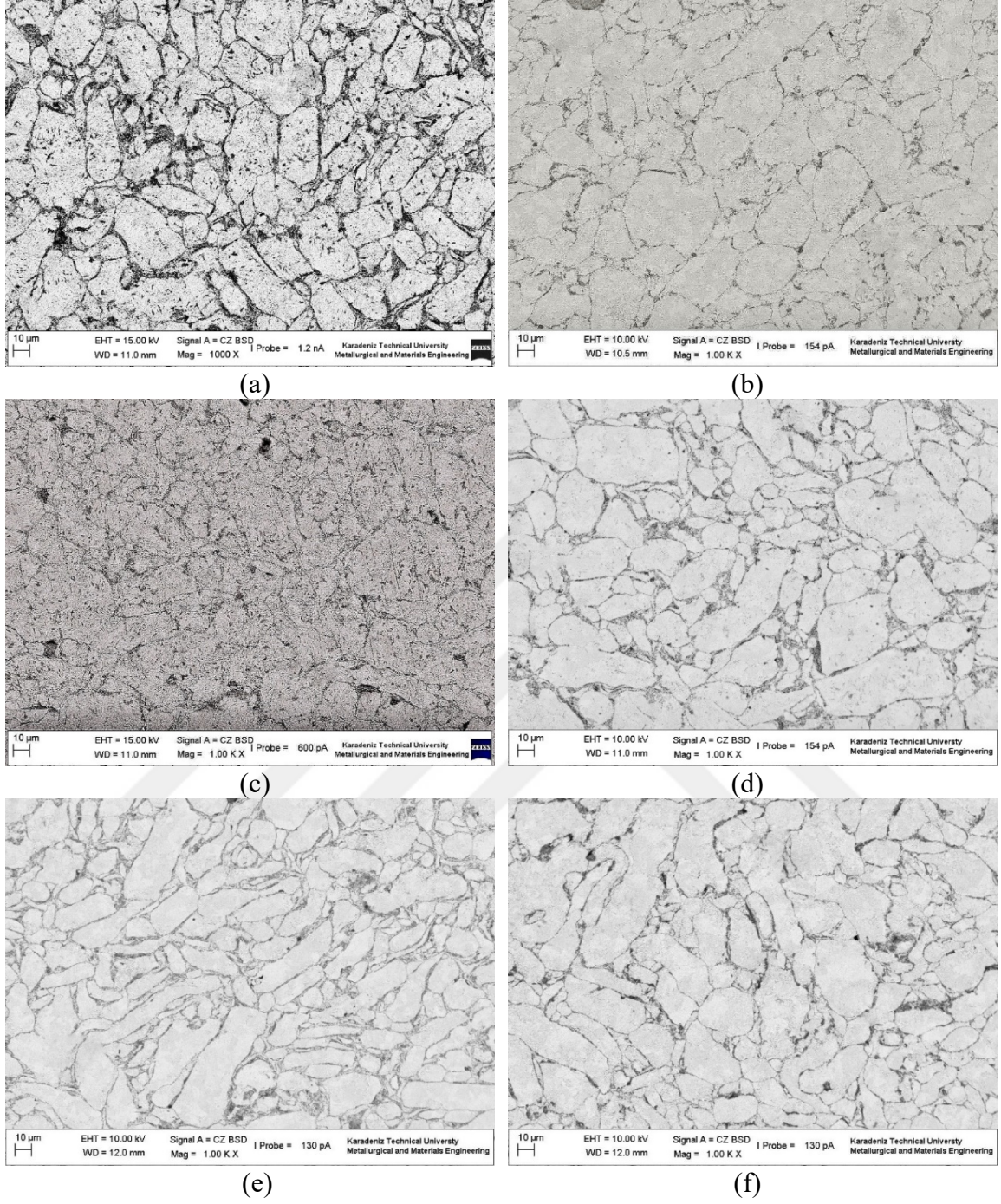
(l)

Şekil 3.31' in devamı



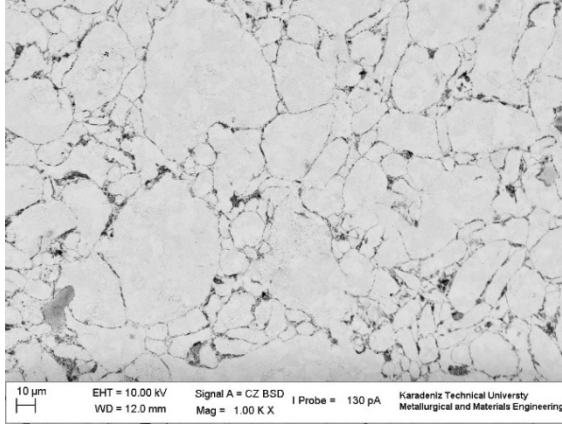
3.5.1.2. İçyapı Analizi

Üretilen ZA27 matrisli nano alümina ve nano grafit takviyeli HNK numunelerin SEM görüntüleri Şekil 3.32’de verilmektedir. Şekillerde görülen nispeten büyük açık-siyah renkli noktaların yapı içerisinde yer alan gözenekler olduğu tespit edilmiştir. Özellikle açık-siyah renkli küçük gözeneklerin tane sınırlarında yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Artan takviye miktarıyla tane sınırlarındaki gözeneklerin sayısının arttığı ve büyüdüğü gözlenmiştir. Artan grafit takviye miktarıyla tozların presleme esnasında daha fazla plastik deformasyona uğradığı gözlenmiştir. (Şekil 3.32 e).

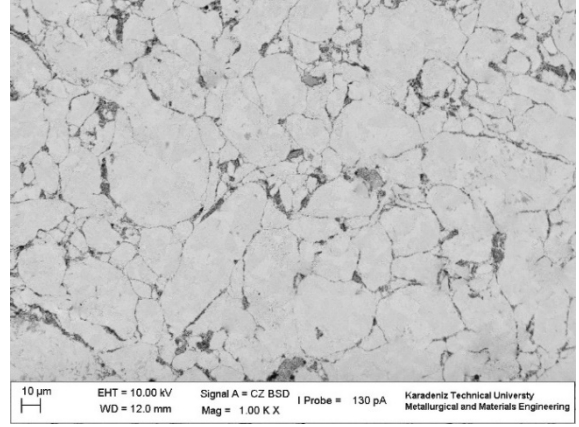


Şekil 3.32. Üretilen hibrit numunelerin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri: (a) ZA-1-1, (b) ZA-1-2, (c) ZA-1-3, (d) ZA-1-4, (e) ZA-2-1, (f) ZA-2-2, (g) ZA-2-3, (h) ZA-2-4, (i) ZA-3-1, (j) ZA-3-2, (k) ZA-3-3, (l) ZA-3-4, (m) ZA-4-1, (n) ZA-4-2, (p) ZA-4-3, (r) ZA-4-4

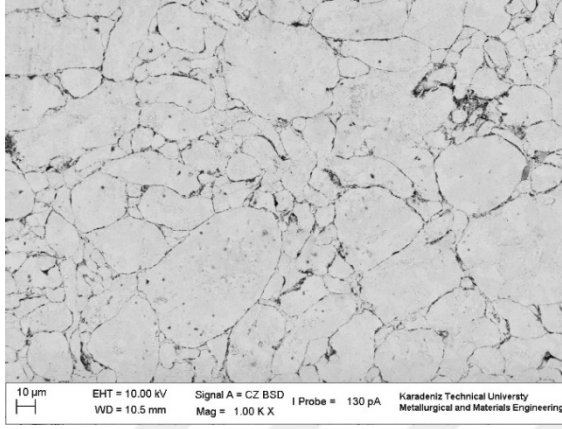
Şekil 3.32'nin devamı



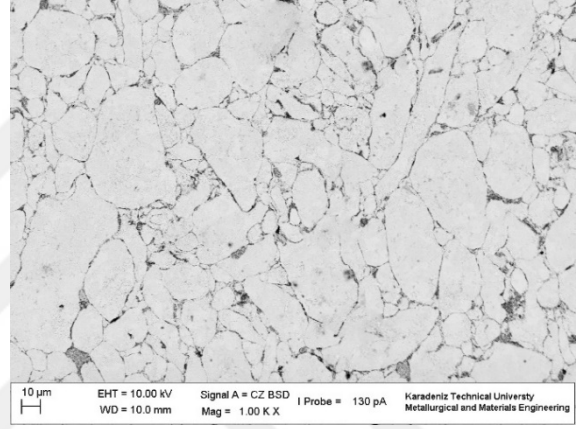
(g)



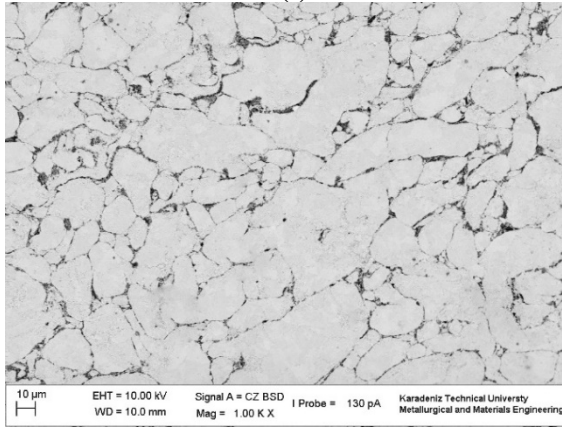
(h)



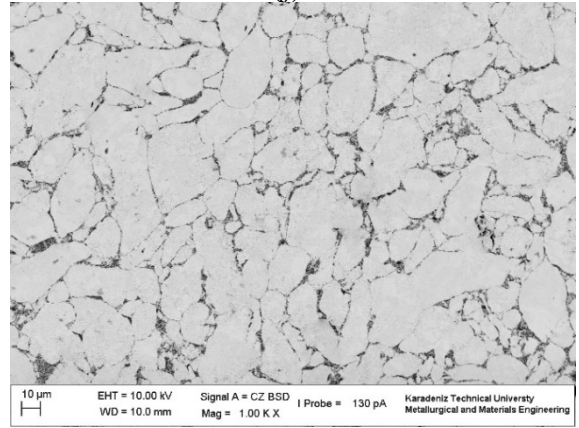
(i)



(j)

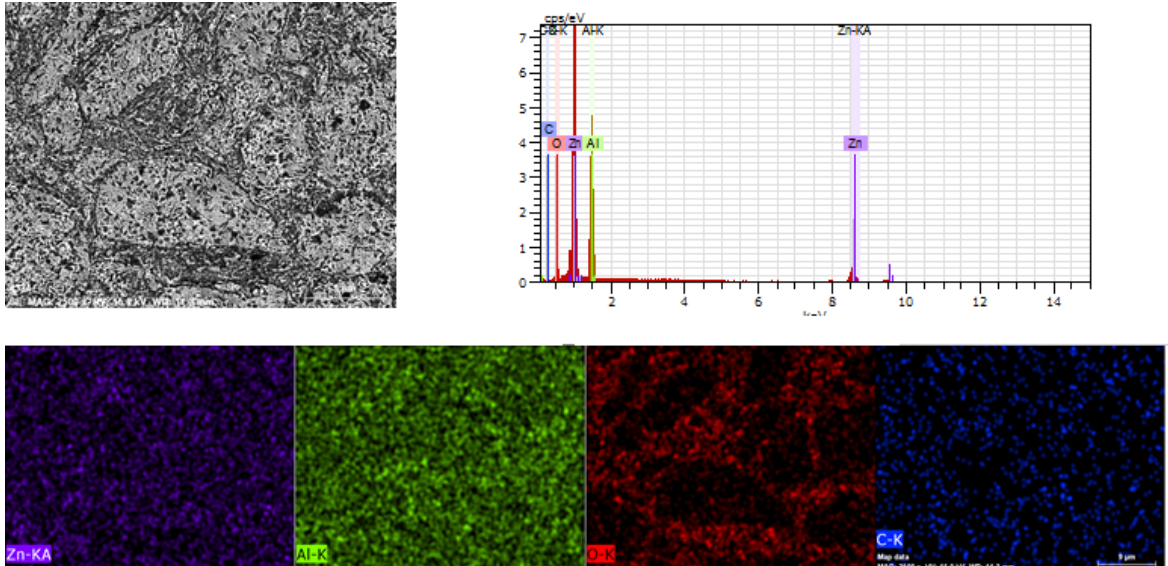
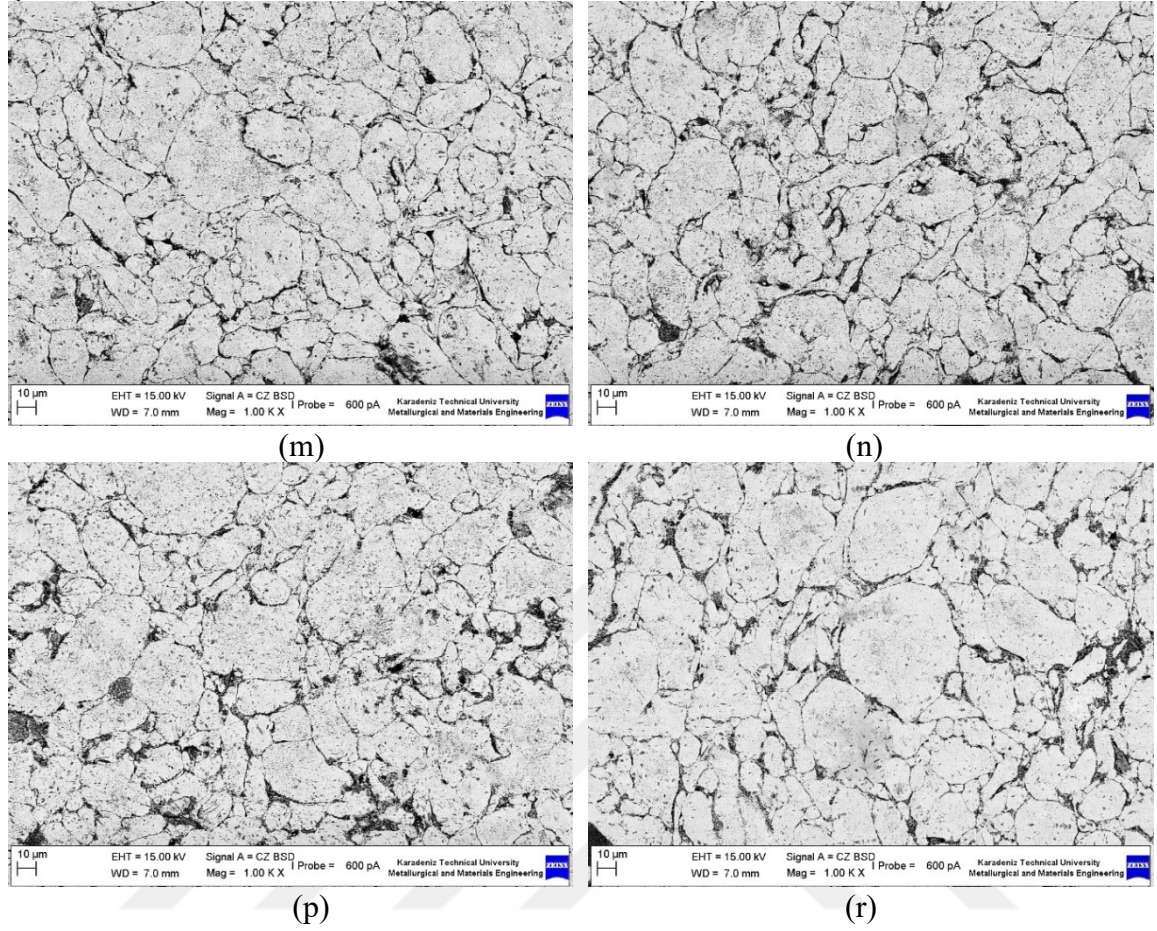


(k)



(l)

Şekil 3.32'nin devamı



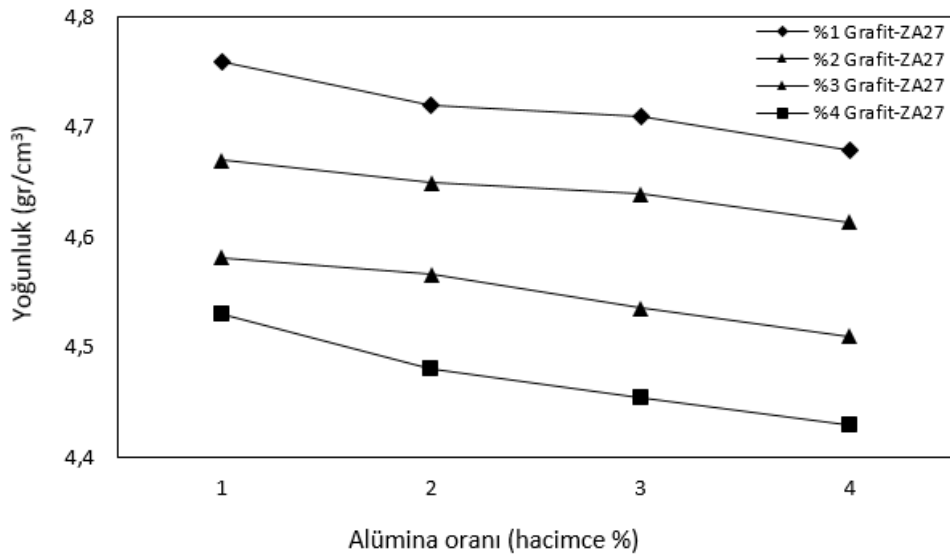
Şekil 3.33. ZA-1-4 hibrit numunesine ait SEM resmi ve EDS- analizi

ZA-1-4 numunesine ait SEM-haritalama mikro yapı resmi ve EDS analizi sonuçları Şekil 3.33' de verilmiştir. SEM haritalama mikro yapı resimlerinde mor, yeşil, turuncu ve

mavi bölgeler sırasıyla çinko, alüminyum, oksijen ve grafitte ait bölgeleri temsil etmektedir. Alüminyum ve oksijenin birlikte yoğunlaştığı bölgeler alümina takviyesinin numune içindeki dağılımını gösterirken bu noktaların tane sınırları boyunca yerleştiği tespit edilmiştir. 8 saatlik mekanik alaşımla işlemi sonucunda nano grafitin ve nano alüminanın kompozit malzemenin iç yapısında homojene yakın biçimde dağıldığı ve bazı bölgelerde küçük miktarda topaklanmaların da olduğu açıkça görülmektedir.

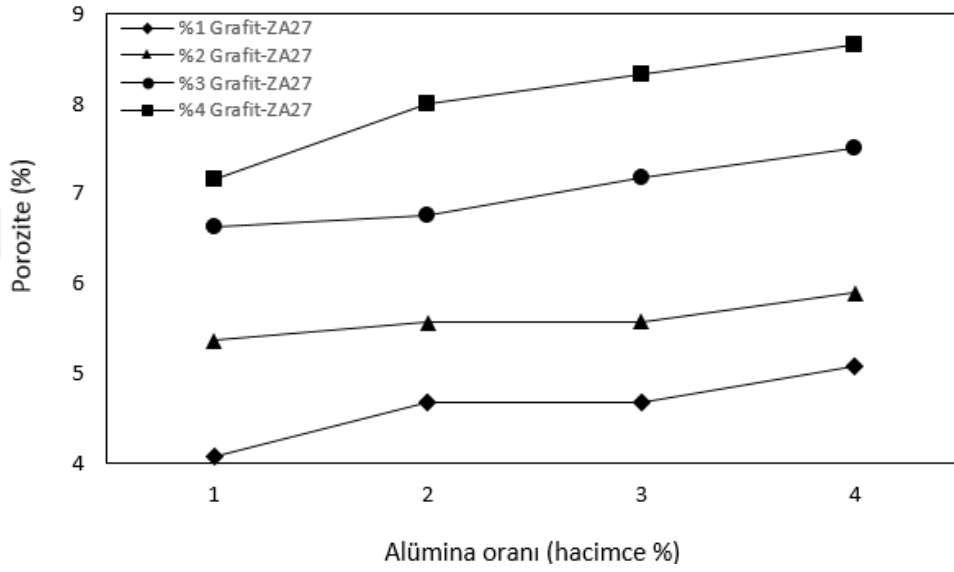
3.5.1.3. Yoğunluk ve Porozite

Hacimce %1, 2, 3 ve 4 nano alümina ve nano grafit takviyeli ZA27 matrisli HNK malzemelerin MA yöntemiyle üretilmesi sonucunda yoğunluk değerlerinin takviye oranlarına göre değişimi grafiği Şekil 3.34 'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde takviye oranının artmasıyla birlikte HNK numunelerin yoğunluklarının azaldığı görülmektedir. Yoğunluktaki azalmanın nedeni takviye olarak katılan grafit ve alüminanın, ZA27 esaslı matris alaşımdan daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca MA süresince takviye ve ZA27 matris tozlarının boyutlarındaki düşüş ve değirmen içerisinde maruz kaldığı çarpışma etkisinden dolayı tozlarda soğuk deformasyon oluşması tozların sıkıştırılabilme özelliğini kötü yönde etkileyerek yoğunluğunun azalmasına neden olur (Şekil 3.35).



Şekil 3.34. Üretilen HNK malzemelerinin yoğunluğuna takviye cinsinin ve miktarının etkisi

Üretilen HNK numunelerin porozite değerlerinin takviye oranlarına göre değişimi grafiği Şekil 3.35 'te verilmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi MA işlemiyle birlikte toz parçacıkları deformasyon sertleşmesine maruz kalırlar ve dolayısıyla tozların sertliklerinde artış meydana gelir. Tozların sertliğinin artması presleme esnasında toz parçacıklarının paketlenmesine olumsuz etki eder ve buna bağlı olarak porozitenin artmasına neden olur.



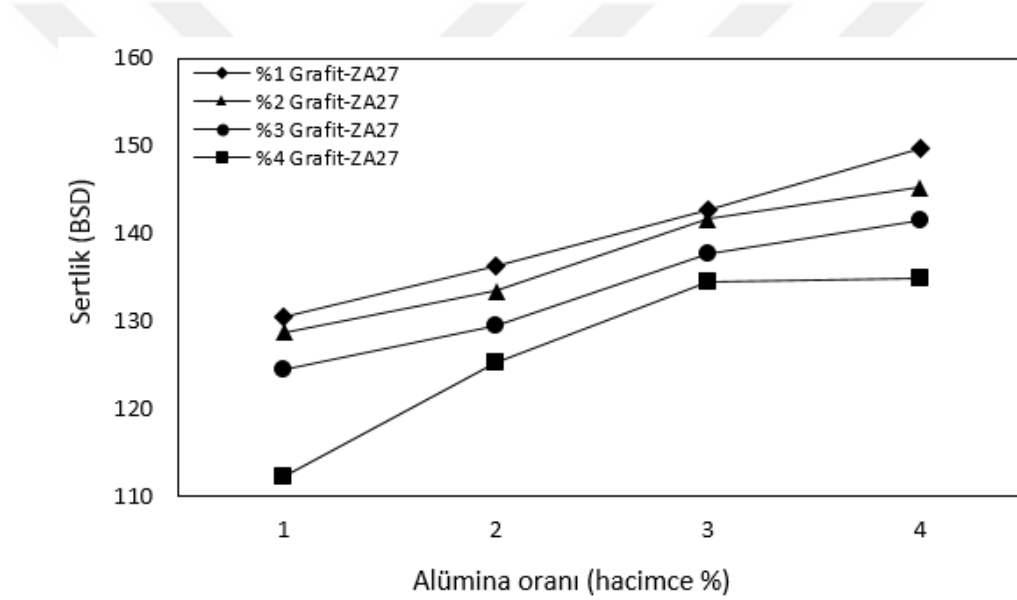
Şekil 3.35. Üretilen HNK malzemelerinin porozite değerlerine takviye cinsinin ve miktarının etkisi

3.5.1.4. Sertlik

Üretilen HNK numunelerin sertlik değerlerinin takviye cinsine ve miktarına göre değişimini gösteren grafik Şekil 3.36' da verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, en yüksek sertlik değeri ZA-1-4 kodlu numunede, en düşük sertlik değeri ise ZA-4-1 kodlu numunede belirlenmiştir. Takviye edilen alümina oranı arttıkça bütün HNK numunelerde sertlik değerleri artış göstermiş, artan grafit oranıyla birlikte ise bütün HNK numunelerin sertlik değerleri düşüş göstermiştir. Örneğin; hacimce %1 grafit ve %1 alümina oranına sahip numunelerde sertlik değeri yaklaşık 131 BSD olarak belirlenirken; bu değer aynı grafit oranında alümina oranının hacimce %4'e çıkması durumunda yaklaşık 150 BSD olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, hacimce %1 alümina ve %1 grafit oranına sahip numunelerde sertlik değeri 131 BSD olarak ölçülürken; bu değer, aynı alümina oranına sahip ancak grafit

oranının %4'e çıktığı numunede yaklaşık 112 BSD'ye kadar gerilemiştir. Alümina sert bir faz olduğu için kompozitin sertliğine doğrudan önemli bir katkı sağlar. Ayrıca Al_2O_3 parçacıkları alaşım tozlarının daha fazla deforme olmasına dolayısıyla daha fazla deformasyon sertleşmesine maruz kalmasına neden olur. Bu da kompozitin sertliğini artırır. Grafit ise yağlayıcı bir özelliğe sahip olduğundan dolayı tozlar arasındaki etkileşimi olumsuz etkileyerek kırılma olaylarını azaltır ve bu da tozların sertleşmesine olumsuz etki eder.

Nano grafit ve nano alümina parçacık takviye edilmesinin amacı başta belirtildiği gibi, grafitin katı yağlayıcı etkisinden yararlanmak, alüminanın da mekanik özellikleri iyileştirme özelliğinden faydalanmaktır. HNK numunelerde sertlik değerlerindeki değişimler bu amaca yönelik yapılmış olan çalışmaları desteklemektedir.



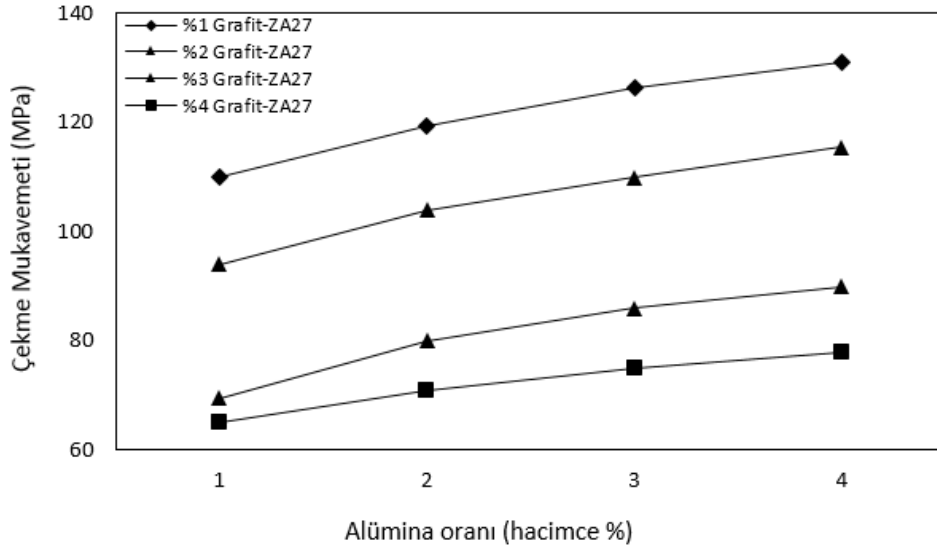
Şekil 3.36. Üretilen HNK malzemelerinin sertliğine takviye cinsinin ve miktarının etkisi

3.5.1.5. Çekme Mukavemeti

Şekil 3.37' de alümina oranının hibrit kompozitlerin çekme mukavemetine etkisi verilmiştir. Şekilden alümina katkısı ile birlikte hibrit kompozitlerin çekme mukavemetinin arttığı görülmektedir. Sertlik eğrilerine benzer olarak maksimum çekme mukavemeti (132 MPa), en düşük oranda grafit (% 1) ve en yüksek oranda alümina (% 4) içeren ZA-1-4 kodlu hibrit kompozitte meydana geldiği belirlenmiştir. Buna benzer olarak en düşük çekme

mukavemetinin (67 MPa) en yüksek oranda grafit (% 4) ve en düşük oranda alümina (% 1) içeren ZA-4-1 kodlu hibrit kompozitte meydana geldiği belirlenmiştir.

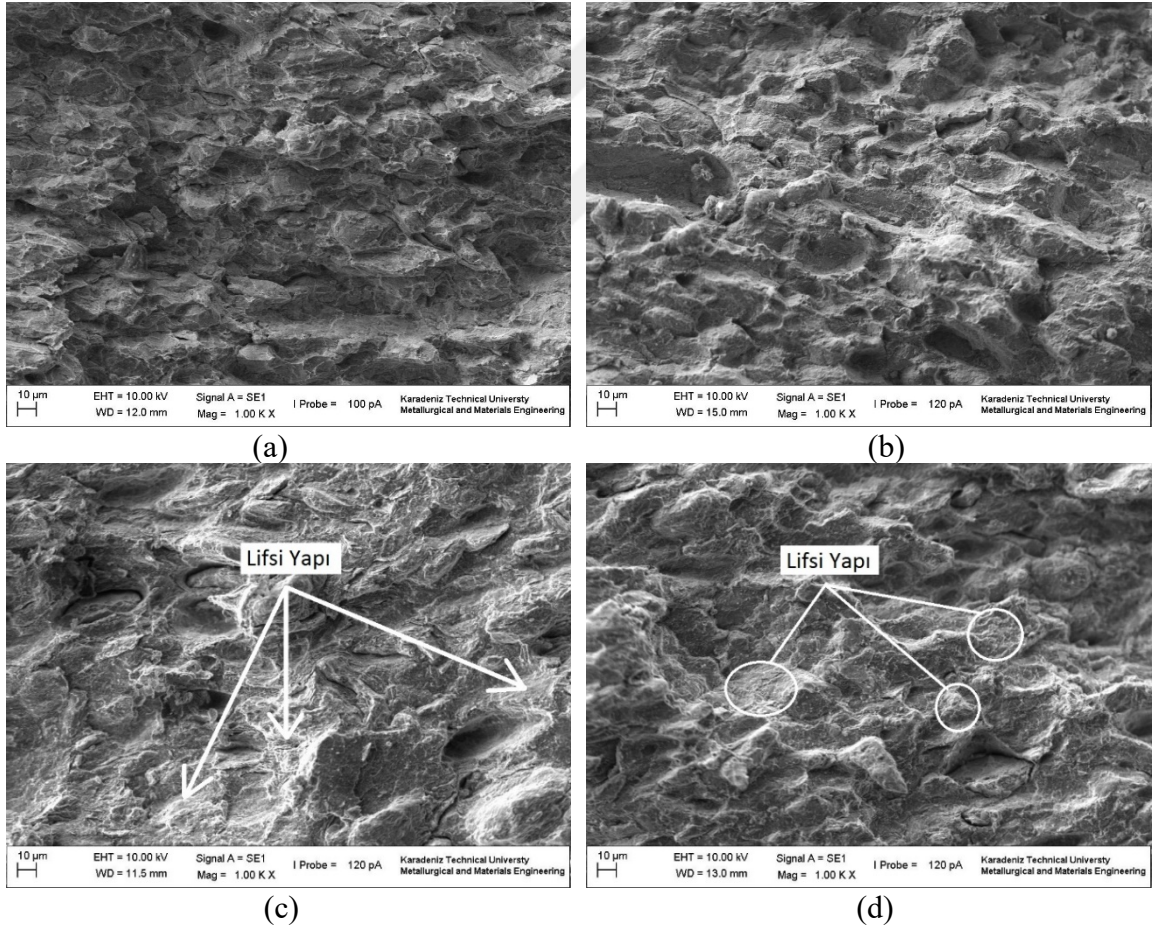
Elde edilen veriler ışığında, grafitin mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği, alüminanın ise mekanik özellikleri iyileştirici bir etki yaptığı görülmektedir. Alüminanın grafit içermeyen kompozitlerde mekanik özelliklerde yaptığı etkinin grafit içeren hibrit kompozitlerde azaldığı gözlenmiştir. Nitekim % 1 grafit içeren kompozite %4 oranında alümina takviyesi çekme mukavemetini 110 MPa'dan ancak 131 MPa'ya çıkarabilmektedir (Şekil 3.37). Halbuki grafit içermeyen ZA 27 toz alaşımının çekme mukavemeti 184 MPa iken %4 alümina takviye oranında bu değer 322,5 MPa'ya yükselmektedir (Şekil 3.25). Burada grafitin mekanik özellikleri azaltıcı etkisi ile alüminanın artırıcı etkisi arasında bir etkileşim mevcuttur. Bunun yanında artan grafit katkısı ile birlikte alüminanın mekanik özelliklerdeki etkisi daha da azalmaktadır. Nitekim % 4 oranında grafit içeren kompozite yine %4 oranında alümina katıldığında çekme mukavemeti 65 MPa'dan ancak 79 MPa'ya çıkabilmektedir (Şekil 3.37). Bu durumda yüksek grafit oranında mekanik özellikler üzerinde alümina katkısının çok fazla etkin olmadığını ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3.37. Üretilen HNK malzemelerinin çekme mukavemetine takviye cinsinin ve miktarının etkisi

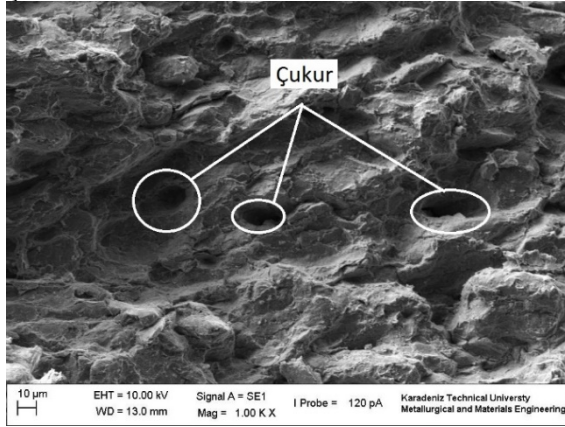
3.5.1.5.1. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

Farklı takviye oranlarına sahip numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri Şekil 3.38’de gösterilmektedir. Artan grafit miktarıyla birlikte kompozitlerin porozite miktarları artarken çekme mukavemeti değerlerinde azalmalar olmuştur. %1 Grafit-%1 alümina içeren ZA-1-1 kodlu kompozitin çekme dayanımı 110 MPa olurken %4 Grafit - %1 alümina içeren ZA-4-1 kodlu kompozitte bu değer 65 MPa’a düşmüştür. En yüksek çekme mukavemet değerleri elde edilen ZA-1-4 kodlu hibrit kompozitin kırılma yüzeylerinde lifsi bir kırılma yüzeyine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.38 d). Hibrit kompozitler içerisinde en düşük çekme mukavemeti değeri ZA-4-1 kodlu numuneden elde edilmiştir (Şekil 3.38 m). Bu düşük değerın sebebi, artan grafit miktarı ile matris tozları arasında yeterli bağ oluşumu sağlanamamasından dolayıdır.

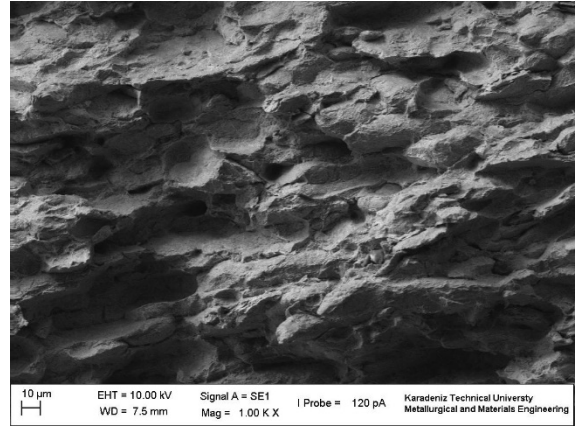


Şekil 3.38. Üretilen hibrit numunelerin 1000x büyütmedeki kırılma yüzeyi görüntüleri:(a) ZA-1-1, (b) ZA-1-2, (c) ZA-1-3, (d) ZA-1-4, (e) ZA-2-1, (f) ZA-2-2, (g) ZA-2-3, (h) ZA-2-4, (i) ZA-3-1, (j) ZA-3-2, (k) ZA-3-3, (l) ZA-3-4, (m) ZA-4-1, (n) ZA-4-2, (p) ZA-4-3, (r) ZA-4-4

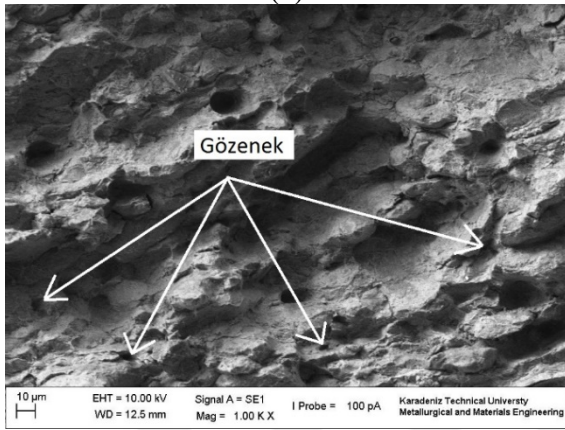
Şekil 3.38'in devamı



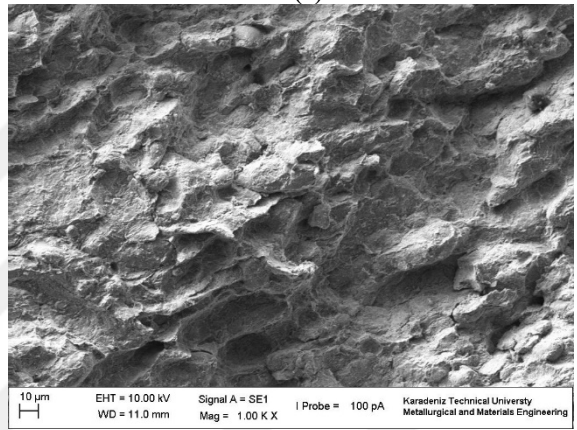
(e)



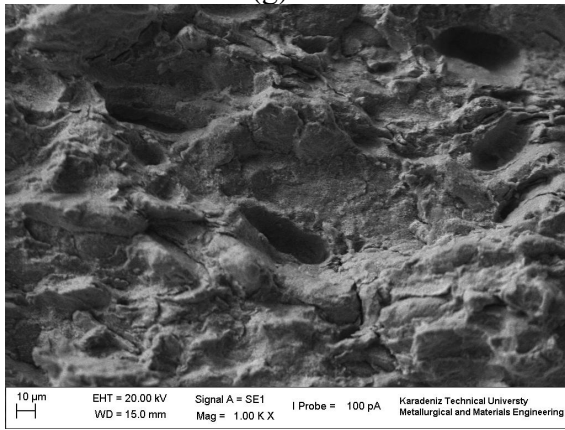
(f)



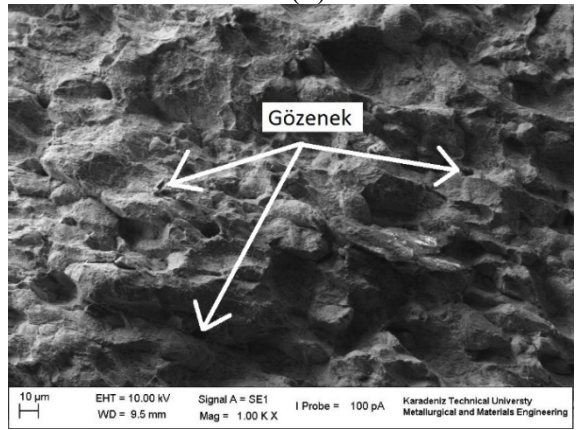
(g)



(h)

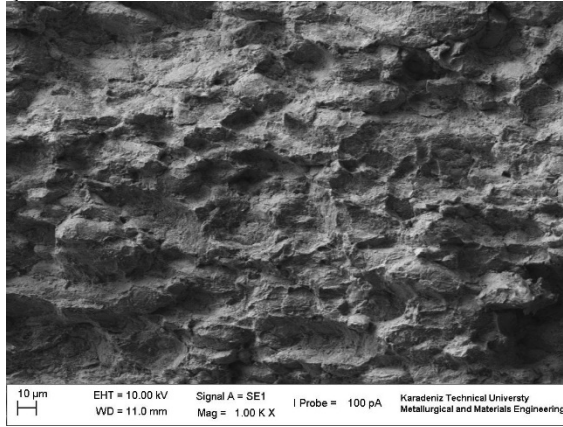


(i)

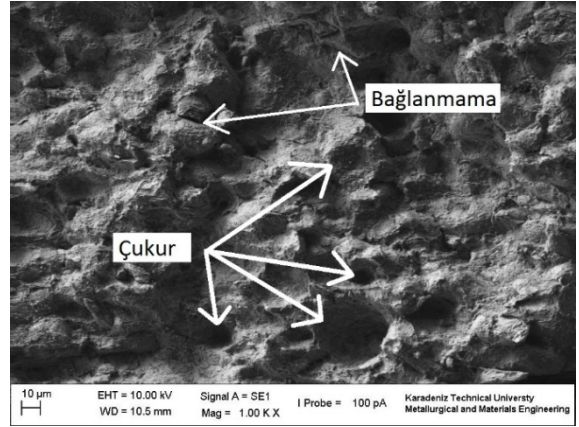


(j)

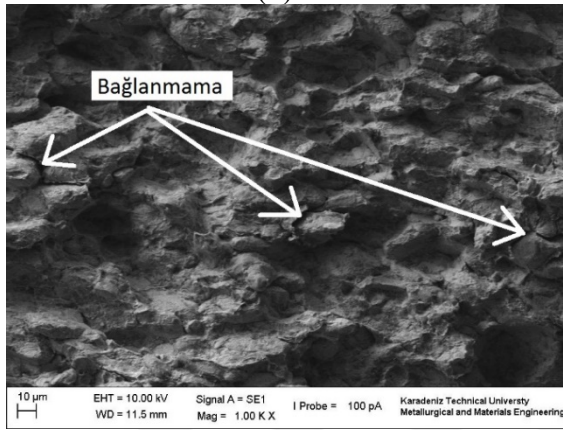
Şekil 3.38'in devamı



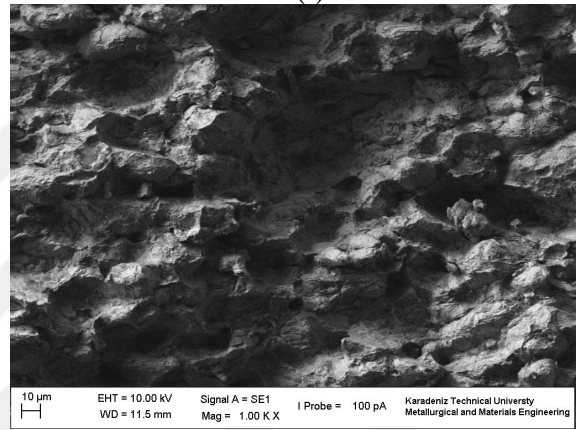
(k)



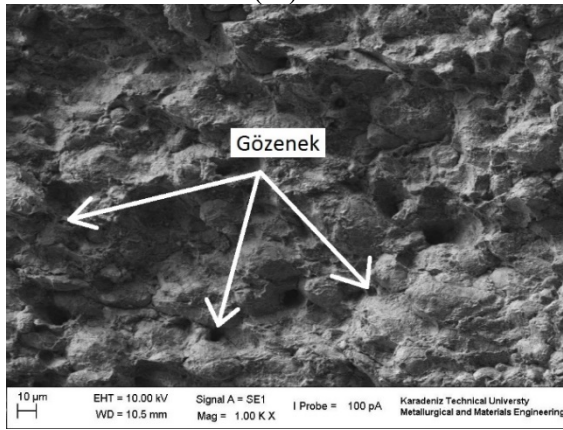
(l)



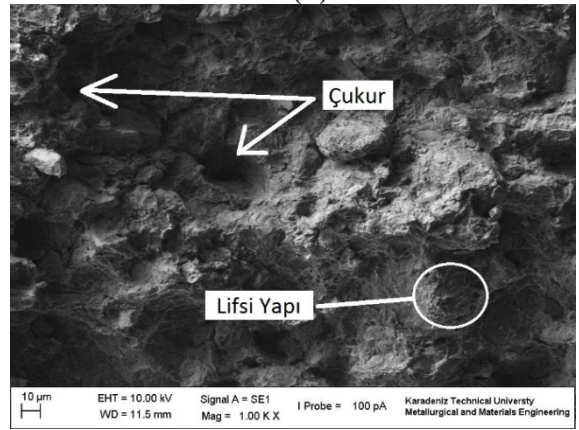
(m)



(n)



(p)



(r)

4. İRDELEME

Bu çalışmada MA yöntemi ile üretilen nano grafit ve nano alümina takviyeli ZA27 matrisli HNK malzemelerin içyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, başlangıçta GTNK ve ATNK malzemeler MA yöntemi ve geleneksel toz metalürjisi yöntemleriyle üretilerek MA işleminin ve takviye miktarı ve cinsinin kompozit yapıya olan etkisi araştırılmış ve HNK malzemelerin üretimi için optimum şartlar belirlenmiştir.

Nanokompozitlerin SEM incelemeleri sonucunda elde edilen içyapı görüntülerinde nano boyuttaki takviye elemanlarının tane sınırlarında yerleştikleri gözlemlenmiştir. Bunun nedeni makro boyuttan nano boyuta gidildikçe yüzey alanının artması ile nano tozların yüksek enerjili tane sınırına yerleşme eğilimlerinin artmasıdır. Takviye elemanlarının oranı arttıkça tane sınırlarında topaklanmaların olduğu görülmüştür. Ayrıca tane sınırlarının büyümesi tanelerin temasını zorlaştırdığı için sinterlemeyi zorlaştırdığı düşünülmektedir.

Genel olarak yüksek yoğunluklu kompozit malzeme üretiminde, sıcak presleme yönteminin etkili bir yöntem olduğu elde edilen % 90 üzeri yoğunluklar ile kanıtlanmıştır. GTNK ve ATNK malzemelerin yoğunluklarının artan takviye malzemesi oranı ve öğütme süresiyle azaldığı görülmüştür. Bu duruma, yine tane sınırlarında biriken topaklanmaların buralarda porozite oluşumuna neden olmasının ve takviye elemanlarının yoğunluklarının düşük olmasının sebep olduğu söylenebilir.

Geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilen GTNK numunelerde, artan grafit miktarıyla malzemenin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Nitekim takviyesiz ZA27 alaşımının sertliği 125 BSD iken %4 grafit takviyeli kompozitte bu değer 95 BSD'ye düşmektedir(Şekil 3.9). Bu durum grafitin sertliğinin düşük ve yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Çekme mukavemeti değerlerinde de benzer durum söz konusudur. Artan grafit takviyesi kompozitin çekme mukavemeti değerlerini olumsuz etkilemiştir. Öyle ki takviyesiz ZA27 alaşımının çekme mukavemeti 184 MPa iken, %4 grafit takviyesinde bu değer 36 MPa' a kadar düşmüştür(Şekil 3.10). Bu duruma neden olan en büyük etkenin nano boyuttaki grafit tozlarının yüksek enerjili tane sınırlarında konumlanmasıdır. Artan grafit miktarı ile tane sınırlarının hacimsel olarak büyümesi sinterlemeyi zorlaştırır ve çekme mukavemetini olumsuz etkileyen poroziteyi artırır.

MA yöntemiyle üretilen GTNK tozların morfolojileri incelendiğinde elde edilen toz morfolojilerinin mekanik alaşımlama sistemindeki sünek-gevrek bileşimin karakteristiği ile aynı olduğu görülmektedir. Öğütmenin ilk saatlerinde ulaşılan pulsu yapı devam eden öğütme süresince soğuk kaynak ve kırılma mekanizmaları etkisiyle 18 saatlik öğütme sonunda hemen hemen kararlı yapı elde edilmiştir. Öğütme süresinin toz boyutunu etkilediği tespit edilmiştir. GTNK numunelere yapılan içyapı analizlerinde, geleneksel toz metalürjisi yönteminde tane sınırlarında biriken takviye parçacıkları, MA işlemiyle içyapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür (Şekil 3.14). Ayrıca geleneksel toz metalürjisi yönteminde tane sınırlarında meydana gelen topaklanmalar artan öğütme süresiyle giderildiği kanıtlanmıştır. MA yöntemiyle üretilen GTNK numunelerin sertlik ve mukavemet değerleri artan öğütme süresiyle birlikte artmıştır. Öyle ki 18 saatlik öğütme süresi sonrasında numunenin sertliği yaklaşık 21 BSD artmıştır (Şekil 3.17). Öğütme süresiyle birlikte artan deformasyon sertleşmesi toz sertliğinin artmasına neden olmuş dolayısıyla artan toz sertliği bulk numunenin de sertliğinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca artan öğütme süresiyle birlikte grafit parçacıklarının kademeli olarak matris içerisine gömülmesi çekme mukavemeti değerinin de artmasını sağlamıştır.

Geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilen ATNK numunelerde, artan alümina miktarıyla birlikte kompozitlerin sertlik ve çekme mukavemeti değerleri artmıştır. Alüminanın sert bir seramik faz olması üretilen kompozitlerin sertliğinin artmasına neden olmuştur. Ancak alüminanın yapı içerisinde homojen olarak dağılmaması ve tane sınırlarında yoğunlaşması sertlik değerlerinde önemli bir artışın meydana gelmesini engellemiştir. Öyle ki alümina içermeyen ZA27 alaşımlarının sertliği 125 BSD iken, en yüksek alümina takviye miktarında (%4) bu değer sadece 13 BSD artarak 138 BSD'ye yükselmiştir (Şekil 3.24). ATNK numunelerin çekme mukavemeti değerlerinde alümina miktarıyla birlikte önemli bir artışın olduğu görülmüştür (Şekil 3.25).

MA yöntemiyle üretilen ATNK numunelerinde GTNK numuneler ile benzer eğilim göstermiştir. Artan öğütme süresiyle takviye parçacıklarının homojen dağılımı sağlanmış ve numunelerin sertlik değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. ATNK numunelerin çekme mukavemeti değerleri %1-2'lik alümina takviyelerinde 2 saatlik, %3-4'lük alümina takviyelerinde ise 4 saatlik öğütme sürelerinde maksimum değerine ulaşmış, devam eden öğütme süreleriyle çekme mukavemeti değerleri azalmıştır (Şekil 3.29). ATNK numunelerde en yüksek çekme mukavemeti değeri %4 alümina takviyesinde 4 saat MA uygulanmış numunede 239 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 3.29). Ancak geleneksel toz metalürjisi

yöntemiyle üretilen yani MA uygulanmamış numunenin (%4 alümina takviyeli) göstermiş olduğu çekme mukavemeti değeri 322,5 MPa'dır(Şekil 3.25). Dolayısıyla ATNK malzemelerde en yüksek çekme mukavemeti değerine MA uygulanmamış numunede ulaşılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ışığında HNK numuneler için en uygun MA süresinin 8 saat olduğuna karar verilmiş ve tüm HNK numunelere 8 saatlik MA işlemi uygulanmıştır. Üretilen HNK tozlarının boyutları incelendiğinde, yapıdaki nano grafit oranı sabitken, nano alümina oranı arttıkça toz boyutunun düştüğü görülmüştür. Bu bakımdan, alüminanın sert bir seramik faz olması ve öğütmeyle birlikte ZA27 matris içine gömülerek ve kırılmaya uğrayarak toz boyutunu düşürdüğü belirlenmiştir. Diğer yandan, nano alümina oranının sabit tutularak artan nano grafit oranına göre bakıldığında toz boyutunun giderek arttığı belirlenmiştir (Şekil 3.30). Buradan da, grafitin tabakalı yapıda olmasından dolayı öğütme sırasında bu tabakaların sürekli birbiri üzerinde kayması ve topaklanması nedeniyle toz boyutunu arttırdığı belirlenmiştir. HNK tozlarda öğütmenin ilk saatlerde, pulsu yapı görülmüştür (Şekil 3.31). Devam eden öğütme süreleri sonunda tozlar soğuk kaynak olayına maruz kalmış ve 8 saat öğütme sonucunda soğuk kaynak olayından kırılma mekanizmasına geçilerek hemen hemen kararlı bir yapı elde edilmiştir. Kısaca, 8 saatlik öğütme süresi sonunda, mekanik alaşımlama sistemi olarak, sünek-gevrek yapıda bir davranış belirlenmiş ve nano parçacıkların yumuşak ZA27 matris içerisine gömüldüğü görülmüştür.

HNK'lerin iç yapı incelemeleri sonucu, nano parçacıkların yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak takviye elemanları olarak kullanılan nano parçacıklar matris elemanı içerisinde hem tanelerin içinde hem de tane sınırlarında konumlanmıştır.

HNK'lerin sertlik değerleri araştırıldığında, nano grafit oranı sabit tutulurken nano alümina oranının arttığı numunelerde sertlik sürekli bir artış gösterirken, nano alümina oranı sabit tutulurken, nano-grafit oranının arttırıldığı numunelerde ise sürekli bir azalma göstermiştir (Şekil 3.36). Üretilen HNK numunelerde en yüksek sertlik değeri nano grafit oranının hacimce %1, nano alümina oranının hacimce %4 olduğu ZA-1-4 kodlu numunede elde edilmiştir. Sert bir seramik faz olan alümina katkısı yapıda sertlik ve mukavemet artışına neden olmuş ve MA işleminin de takviye malzemeleri olan nano parçacıkların yapı içerisinde homojen olarak dağılımını sağlaması ve daha kararlı bir içyapı oluşturması malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirici etki yapmıştır.

HNK numunelerin çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde, sertlik değerlerine benzer olarak, artan nano grafit oranı ile çekme mukavemetinin düştüğü, artan nano alümina oranıyla birlikte ise çekme mukavemeti değerlerinin arttığı görülmüştür (Şekil 3.37).

Elde edilen veriler ışığında, grafitin mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği, alüminanın ise mekanik özellikleri iyileştirici bir etki yaptığı görülmektedir. Alüminanın grafit içermeyen kompozitlerde mekanik özelliklerde yaptığı etkinin, grafit içeren HNK numunelerde azaldığı gözlenmiştir. Nitekim % 1 grafit içeren kompozitte %4 oranında alümina takviyesi ve 8 saatlik MA işlemiyle çekme mukavemetini 110 MPa'dan ancak 131 MPa'ya çıkarabilmektedir (Şekil 3.37). Hâlbuki grafit içermeyen ve geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilen ZA27 alaşımının çekme mukavemeti 184 MPa iken %4 alümina takviye oranında (MA yok) bu değer 322,5 MPa'a yükselmektedir (Şekil 3.25). Burada grafitin mekanik özellikleri azaltıcı etkisi ile alüminanın arttırıcı etkisi arasında bir etkileşim mevcuttur. Bunun yanında artan grafit katkısı ile birlikte alüminanın mekanik özelliklerdeki etkisi daha da azalmaktadır. Nitekim % 4 oranında grafit içeren kompozite yine %4 oranında alümina katıldığında ve 8 saatlik MA işlemi uygulandığında çekme mukavemeti 65 MPa'dan ancak 79 MPa'a çıkabilmektedir (Şekil 3.37). Bu durumda yüksek grafit oranında mekanik özellikler üzerinde alümina katkısının çok fazla etkin olmadığını ortaya çıkarmaktadır.

5. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. ZA27 matrisli grafit ve alümina takviyeli HNK malzemeler mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yöntemiyle üretilebilir.
2. Geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerde takviye elemanları çoğunlukla tane sınırlarında birikmiştir. MA ile nano parçacıklar hem tane sınırlarında hem de taneler içinde konumlanmıştır.
3. Geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle dağıtılması mümkün olmayan topaklanmalar MA işlemi ile kolaylıkla dağıtılabilir.
4. GTNK'lerde artan grafit oranıyla birlikte yoğunluk, sertlik ve çekme mukavemeti değerlerinde azalma meydana gelmiştir.
5. MA yöntemiyle üretilen GTNK'lerde artan öğütme süresiyle birlikte sertlik ve çekme mukavemeti değerleri de artmıştır.
6. ATNK'lerde artan grafit oranıyla birlikte yoğunluk azalırken, sertlik ve çekme mukavemeti değerleri genellikle artmıştır.
7. ATNK'lerde en yüksek çekme mukavemeti değeri geleneksel toz metalürji yöntemiyle üretilen hacimce %4 alümina takviyeli kompozitte 322 MPa olarak elde edilmiştir. Oysa aynı takviye miktarında (%4) MA yöntemi (öğütme süresi 4 saat) uygulanarak elde edilen en yüksek çekme mukavemeti değeri 239 MPa'dır.
8. Artan alümina oranı ile HNK malzemelerin sertliği artış gösterirken, artan grafit oranı ile sertlik düşmüştür. HNK numunelerde elde edilen en yüksek sertlik değeri en düşük grafit (%1) ve en yüksek alümina (%4) takviyesine sahip ZA-1-4 kodlu numunede 149,75 BSD olarak elde edilmiştir.
9. Sertlik değerlerine benzer olarak, artan alümina oranı ile HNK malzemelerin çekme mukavemeti değerleri artış gösterirken, artan grafit oranı çekme mukavemeti değerleri azalmıştır. HNK numunelerde elde edilen en yüksek çekme mukavemeti değeri ZA-1-4 kodlu numunede 131 MPa olarak elde edilmiştir.
10. Alüminanın grafit içermeyen kompozitlerde mekanik özelliklerde yaptığı etkinin, grafit içeren HNK numunelerde azaldığı gözlenmiştir. Artan grafit katkısı ile birlikte alüminanın mekanik özelliklerdeki etkisi de azalmaktadır.

11. Alümina, ZA27 esaslı HNK malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilir.
12. ZA27 esaslı nano-grafit ve nano-alümina takviyeli çoğu HNK malzemenin, katkısız ZA27 malzemedan daha üstün sertlik değerlerine sahip olduğu anlaşılmıştır.
13. Üretilen tüm HNK numunelerin çekme mukavemeti değerleri (en yüksek 131 MPa) katkısız ZA27 toz alaşımından (184 MPa) daha düşüktür.



6. ÖNERİLER

1. MA işlemi argon gazı altında yürütülerek oksitlenme olayının önüne geçilebilir.
2. GKNK ve ATNK üretiminde kullanılan tozların öğütme süreleri üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılabilir.
3. HNK tozlarının üretiminde değişen sürelerde öğütme süreleri uygulanarak MA işleminin HNK kompozitlerin özelliklerine olan etkisi daha kapsamlı bir şekilde araştırılabilir.
4. HNK numuneler geleneksel toz metalürjisi yöntemiyle üretilerek MA işleminin HNK'lerin özelliklerine olan etkisi araştırılabilir.
5. Sinterleme işlemleri ve sıcak presleme işlemi için optimizasyon çalışmaları üzerinde daha kapsamlı çalışmalar yapılarak özelliklerde iyileştirmeler sağlanabilir.
6. Katkı malzemesi olarak kullanılan grafitin tabakalı içyapısı gereği yapıda tabakalaşmaya yol açarak mekanik özellikleri düşürmesi sebebiyle, katkı malzemelerinin her ikisi daha düşük oranlarda tutularak mekanik özellikler incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

- Aktaş, O., 2015. Hibrit Kompozitlerin Titreşim Davranışlarının İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alizadeh, A. ve Taheri-Nassaj, E., 2012. Mechanical Properties And Wear Behavior Of Al–2 Wt.% Cu Alloy Composites Reinforced By B4C Nanoparticles And Fabricated By Mechanical Milling And Hot Extrusion, Materials characterization 67, 119-128.
- Apelian D., Paliwal M., ve Herrschaft D.C., 1981. Cating with Zinc Alloys, Journal of Metals, 33, 11, 12-19.
- Arıcasoy, O., 2006. Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret.
- Arıer, Ü. Ö. A., 2011. Nano Brukit TiO₂ Ve TiO₂ Nano Kompozit Filmlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arnall, A.H., 2003. Future Technologies, Today's Choices Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging Technologies.
- Aslan, S., 2004. SiC ve Grafit Takfiyeli Çinko Alüminyum Hibrit Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ataç, M. A., ve Güral, A., 2013. Çinko-Alüminyum (ZA) Alaşımlarının Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilirliği Üzerine Bir Çalışma, Politeknik Dergisi (Journal of Polytechnic), 147-154.
- Aycan, M. F., 2010. Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aydın, M., 2001. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aydın, Y., 2008. Çinko-Alüminyum Esaslı ZA–12 Alaşımına Cr İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Azaklı, M. A., Aslan, S., Akbulut, H. ve Bindal, C., 2003. Etial 171-SiC-Grafit Hibrit Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapısı, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 2.

- Babic, M., Mitrovic, S. ve Jeremic, B., 2010. The Influence of Heat Treatment on the Sliding Wear Behavior of A ZA27 Alloy, Tribology International, 43, 16–21.
- Babic, M., Mitrovic, S. ve Zivic, F., 2011. Effects of Al_2O_3 particle reinforcement on the lubricated sliding wear behavior of ZA-27 alloy composites, Journal of Materials Science, 46, 21, 6964-6974.
- Balcı, H., 2006. Akıllı (Fonksiyonel) Tekstiller, Seçilmiş Kumaşlarda Antibakteriyel Apre ve Performans Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Bergeson, L.L., 2004. “The Regulatory Implications of Nanotechnology”, Environmental Quality Management, Basım: Wiley interScience <www.interscience.wiley.com> EBSCOHost 14812726.
- Biçer, A., 2015. Toz Metalurjisi ile Üretilen Ni_3Al Partikülleriyle Pekiştirilmiş Metal Matrisli Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Bostan, B., 2003. Alüminyum Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama Ve Sonrası İşlemlerle Al_4C_3 Sentezlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Božić, D., Stašić, J. ve Rajković, V., 2011. Microstructures and Mechanical Properties of ZA27- Al_2O_3 Composites Obtained by Powder Metallurgy Process, Science of Sintering, 43, 63-70.
- Campbell, F. C., 2010. Structural Composite Materials, ASM International, November, 20-36.
- Cebeci, H.A., 2008. “Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretilen SiC Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Cura, M.E., 2002. Sıcak preslenmiş WC-Co/ B_4C kompozitlerinin mekanik, manyetik ve mikroyapısal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çanakçı A., 2006. AA2024 matrisli B_4C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Vortex Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çanakçı, A., Arslan, F. ve Yasar, I., 2007. Pre-treatment process of B_4C particles to improve incorporation into molten AA2014 alloy, Journal of Materials Science, 442, 9536-9542.
- Çanakçı, A. ve Varol, T., 2011. Aşamalı İşlem Kontrol Katkısı Tekniğinin Yüksek Enerjili Öğütme İşlemi Üzerine Etkisi, 1. Ulusal Nanoteknoloji Kongresi, Haziran, İstanbul Bildiriler Kitabı, 8-16.

- Çanakçı, A. ve Varol, T., 2011. The Effect of Gradual Process Control Agent Technique on the Morphology of Al Powders Fabricated by High Energy Ball Milling, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ekim, Ankara, Bildiriler Kitabı, 701-710.
- Çanakçı, 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, Bildiriler Kitabı, 122-129.
- Çuvalcı, H., 1996. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Dalmış, R., 2014. Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Nano-Parçacık Takviyeli Zn-Al Esaslı Nano-Kompozit Malzemelerin Üretilmesi, İyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Değerli, S., 2002. Bayer Prosesinin Ara Atık Ürünü Olan Alüminyum Hidroksit Kabuğundan Aktif Alümina Eldesi, Y. Lisans Tezi, YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Deniz, S., 2000. Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İle Mikroyapı Karakterizasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ekici, E., 2012. Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ekinci, V. Ş., 2007. Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erdoğan M., 2011. Toprak İşleme Endüstrisinde Kullanılan Çizici Kalemelerin Mikrodalga Toz Sinterleme Tekniği ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Fogagnolo, J.B., Velasco, F., Robert, M.H., ve Torralba, J.M., 2002. Effect of Mechanical Alloying on the Aluminium Matrix Composite Powders, Spain and Brazil, Vol. 342, 131-143.
- Geçkinli, A.E., 1992. İleri Teknoloji Malzemeleri, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası.
- German, R.M., 2007. Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., MPIF, New Jersey, 4-272.
- Gervais, E., Barnhurst, R.J. ve Loong, C.A. 1985. An analysis of selected properties of ZA alloys, Journal of Metals, 37, 11, 43-47.

- Goni, J., Mitxelena, I. ve Coletto, J., 2007. Development of low cost metal matrix composites for commercial applications. Mater. Sci. Technol., 16, 43–746.
- Goodwin, E. F., ve Ponikvar, A. L., 1989. Engineering Properties of Zinc Alloys, Third Edition – Revised.
- Groover M.P., 2009. Fundamentals of modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems 4 th Edition. U.S.A.
- Groveer, M. P., 2007. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.3rd Ed., ISBN: 978-0-471-74485-6.
- Güler, O., 2015. Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile, ZA27 Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Heimann R. B., 2010. Classic and Advanced Ceramics from Fundamentals to Applications, 1st Edition, Wiley-VCH.
- Houghton, M.E., ve Murray, M.T., 1984. An Introduction to Zinc Alloys , Metals Forum, 6, 211-225.
- Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., Lavernia, E.J., 1991. Metal matrix composites—a review, J. Mater. Sci. 26, 1137–1157.
- Jiang, Q.C., Wang, H.Y., Ma, B.X., Wang, Y. and Zhao, F., 2005. Fabrication of B₄C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy, Journal of Alloys and Compounds, 386, 177–181.
- Karagöz, A., 2011. Grafit katkılı Kurşun Kalemli Dozimetrik Özelliklerinin Ve Lüminesans Hassasiyetlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya, G., 1999. Mechanical Properties of PM Al-SiC Composites Produced By Conventional Hot Pressing Method, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kumdalı, F., 2008. Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lo, S. H. J., Dionne, S., Sahoo, M. ve Hawthorne, H. M., 1992. Mechanical and Tribological Properties of Zinc Aluminum Metal-Matrix Composites, Journal of Materials Science, 27, 5681-5691.
- Lyon, R, 1984. New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, Proc. Conference on Materials Engineering, University of Leeds, 87-96.

- Lyon, R., 1985. Engineering Applications of ZA Alloys, Proc. Second Conference on Material Engineering, London, 221-227.
- Lyon, R., 1986. New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, The Institute of British Foundryman, 83rd Annual Conference, Buxton, 87-97.
- Marczak R.J., ve Ciach R., 1973. Tribological Properties of Concentrated Al-Zn Alloys, Proc. 1st Europe Tribology Congress, London, 223-227.
- Mediha S., 2007. Toz Metalurjisi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Mihaichuk, W., ve Bess, M.L., 1987. The ZA Die Casting Alloys, Society of Automotive Engineers, paper no 860556, 3560-3568.
- Mihaichuk, W., 1981. Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28,133-137.
- Miracle D. B. Ve Donaldson S. L., 2001. ASM Composite Handbook, Project Editor: Henry S. D., 21, Material Park, Ohio.
- Mishra, S. K., Biswas, S. and Satapathy, A., 2014. A study on processing, characterization and erosion wear behavior of silicon carbide particle filled ZA-27 metal matrix composites, Materials and Design, 55, 958–965.
- Mortensen, A., Cornie, J.A. ve Flemings, M., C., 1988. Solidification processing of metal matrix composites, Journal of Metals, 40, 2, 12-19.
- Mykura, N., Zhu, Y., ve Murphy, S., 1986. Solid-State Reactions in Zn-Al Based Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 151-159.
- Nazik, C., 2013. Alüminyum Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, Konya.
- Niihara, K. J. 1991. Ceram. Soc. Jpn. 99, 974–982.
- Önel, K., 1995. Süreksiz Sic Katkılı Alüminyum Matrisli Kompozitler (1bölüm), Ankara, Metalurji Dergisi, 46-53.
- Özgün, E.C., 2008. Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Sentezlenen Al-TiC ve Al-Ti-C Toz ve Sinter Kompozitlerin Mikroyapısal ve Fiziksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özkaya, S., 2014. Alüminyum- B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretimi , İç Yapı, Fiziksel, Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Öztürk M., 2007. SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Palacı Y., 2001. Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Prasad, B. K., 1996. Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-based Alloy, Zeitschrift Fur Metallkunde , 87, 226-232.
- Sajjadia, S.A., Ezatpoura, H.R. ve Torabi Parizib, M., 2012. Comparison Of Microstructure And Mechanical Properties Of A356 Aluminum Alloy/ Al_2O_3 Composites Fabricated By Stir And Compo-Casting Processes, Materials & Design, 34, 106–111.
- Savaşkan, T., ve Pürçek, G., 2000. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Aşınma Özellikleri, Türk Mühendis ve Çevre Bilimleri Dergisi (Tr. J. Engin. Sci.), 24, 25-34.
- Seah, K.H.W., Shatma S.C. and Girish, B.M., 1995. Mechanical Properties Of Cast ZA-27/Graphite Particulate Composites, Materials and Design, 163 No. 5, 271-275.
- Sevinçtav, T. S., 1993. Sol-Jel Yöntemi ile Alümina Jel ve Toz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sinclair, I. ve Gregson, P.J., 1997. Structure Performance Of Discontinuous Metal Matrix Composites. Mater. Sci. Technol. 13, 709–715.
- Smith, W. 1993. Structures and Properties of Engineering Alloys, 2nd edition, McGraw-Hill, New York.
- Söyler, M., 2007. Toz metalurjisi ve Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Suresha S. And Sridhara B.K., 2010. Effect Of Addition Of Graphite Particulates On The Wear Behaviour İn Aluminium–Silicon Carbide–Graphite Composites, Materials and Design, 31, 1804–1812.
- Suryanarayana, C., 2003. Mechanical Alloying And Milling, Marcel Dekker, 33- 82, ABD.
- Suryanarayana, C., 2004. Mechanical Alloying and Milling, Marcel Dekker Press, ABD.
- Tevfik, H., 2005. Pamuk Prenses ve Katrilyonlarca Cüce, Can Matbaacılık, Kasım, İstanbul.
- Tjong S.,C., 2007. Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties, Advanced Engineering Materials, No. 8.
- Uğur, A., 2009. Basınçlı Döküm Yöntemi İle Üretilen Zn-Al Esaslı Alaşımlarının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

URL-1, <http://nanogenc.org/index.php/nanoteknoloji-nedir>, 15 Nisan 2014.

URL-2,
<http://www.polymer.hacettepe.edu.tr/webim/msen/undergraduate/NNT602/nanocomposites2.pdf>, 01 2015.

Uygur, İ. ve Saruhan, H., 2004. Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, SAU, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

Varol, T., 2012. AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yalçın, Ö. F., 2015. Toz Metalurjisi Üretim Parametrelerinin Gözeneklilik, Mikrosertlik Ve Isıl Genleşme Katsayısına Üretim Parametrelerinin Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Yılmaz, T., A., 2013. AA 2014/Al₂O₃ Metal Matrisli Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretimi Ve Yaşlandırılabilme Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Zhu, Y. H., ve Goodwin, F. E., 1993. Influence of Rare Earth Element Additions on Phase Transformations in the Zn-27% Al Alloy, J. Mater. Res., 8, 3043-3049.

Zhu, Y., Villasenor, G.T., ve Pina, C., 1994. Complex Microstructural Changes in As- Cast Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Materials Science, 29, 1549- 1552.

ÖZGEÇMİŞ

Müslim ÇELEBİ, 1990 yılında Trabzon'un Çaykara ilçesinde doğdu. 2007 yılında Affan Kitapçıoğlu Lisesi'ni bitirdi. 2008 yılında, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı. 2012 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak aynı yıl içinde K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Şubat 2015' te Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup görevine devam etmektedir. 2015 yılı içerisinde sunulmuş olan 5 adet bildirisi bulunmaktadır. Orta derecede ingilizce bilmektedir.