

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE AA7075-
KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
KOMPOZİT ÜRETİMİ KARAKTERİZASYONU VE
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2016
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Musa YILDIRIM

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE AA7075-KARBON NANOTÜP
TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ
KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Musa YILDIRIM

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Mayıs 2016

Musa YILDIRIM tarafından hazırlanan “MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE AA7075-KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Tez Danışmanı, Gazi Üniversitesi



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 27/05/2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Recep ÇALIN (KKÜ)



Üye : Prof. Dr. Selhan KARAGÖZ (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Bülent BOSTAN (GÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)



..../..../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Musa YILDIRIM

ÖZET

Doktora Tezi

MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE AA7075-KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Musa YILDIRIM

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Mayıs 2016, 116 sayfa

Bu çalışmada, mekanik alaşımlama/mekanik öğütme yöntemi ile AA7075-Karbon nanotüp (KNT) takviyeli metal matrisli kompozitlerin (MMK) üretimi, karakterizasyonu ve aşınma davranışları incelenmiştir. Çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada matris malzemesi olarak kullanılan gaz atomize AA7075 alaşım tozları ön şekillendirilip sinterlendikten sonra, sertlik ve aşınma dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra bu alaşıma farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma ısıl işlemleri sonucu mikro yapıda meydana gelen ikinci faz çökeltilerin (boyutlarının) alaşımların sertlik ve aşınma davranışları üzerine etkisi belirlenmiştir. İkinci aşamada ise matris malzemesi olan AA7075 alaşımına % 1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp ilave edilerek, altı farklı sürede (20, 40, 60, 80, 100 ve 120 dak.) mekanik öğütme yapılmıştır. Öğütme

süresinin toz boyutu, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi incelenerek optimum öğütme süresi belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise, bir önceki aşamada belirlenen optimum mekanik öğütme süresinde (120 dak) öğütülen kompozit tozlar farklı sürelerde (1, 2 ve 3 saat) sinterlenerek ideal sinterleme süresi belirlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise matris malzemesine farklı miktarlarda (% 0,5, % 1, % 2, % 3 % 4 KNT) takviye fazı ilave edilen ve önceki aşamalarda belirlenen ideal mekanik öğütme (120 dakika) ve ideal sinterleme süresi (1 saat) kullanılarak üretilen kompozitlerde takviye fazı miktarının mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda AA7075 alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin yapıda oluşan ikinci faz çökeltilerin boyutlarında etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan sertlik ve aşınma testlerinde en yüksek sertlik değeri ve en düşük ağırlık kaybı 120 °C'de 24 saat yaşlandırılan alaşımda elde edilmiştir. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek, farklı sürelerde mekanik öğütülen kompozit tozların öğütme süresi arttıkça, toz boyutlarının arttığı, 120 dakika öğütülen tozlarda ise toz boyutunun azaldığı gözlenmiştir. Sertlik ve aşınma testlerinde ise en yüksek sertlik değeri ve en düşük ağırlık kaybı, 120 dakika öğütülerek üretilen kompozitlerde elde edilmiştir. Farklı sürelerde sinterleme sonrası yapılan mikro yapı incelemelerinde, sinterleme süresi arttıkça tane sınırlarında biriken KNT'lerin şeklinin değiştiği daha kısa ve kalın yapıda olduğu görülmüştür. Yine sertlik ve aşınma testlerinde en yüksek sertlik değeri 1 saat sinterlenen numunelerde ölçülürken en düşük ağırlık kaybı 3 saat sinterlenen numunelerde ölçülmüştür. Farklı oranlarda KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin mikro yapı incelemeleri sonucunda KNT miktarının artışı ile tane sınırlarında aglomere olduğu görülmüştür. Sertlik ve aşınma testleri sonunda en yüksek sertlik değeri ve en düşük ağırlık kaybı % 1 KNT ilave edilen AA7075-KNT kompozitlerde elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : AA7075, karbon nanotüp, mekanik alaşımlama, metal matrisli kompozit, aşınma davranışları.

Bilim Kodu : 915.1.193

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

AN INVESTIGATION ON PRODUCTION, CHARACTERIZATION AND WEAR BEHAVIOUR OF AA7075 METAL MATRIX COMPOSITES REINFORCED BY CARBON NANOTUBE BY MECHANICAL ALLOY METHOD

Musa YILDIRIM

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

May 2016, 116 pages

In this study, production, characterization and wear behaviours of AA7075-CNT reinforced metal matrix composites by mechanical milling method were investigated. The study was performed in four stages. In the first stage, after pre-shaped and sintered of gas atomised AA7075 alloy powder, which is used as matrix, hardness and wear strenght were determined. Then, aging heat treatments were applied to this alloy at different temperature and different period. The effects of second phase precipitates (sizes) which were occurred by aging heat treaments on hardness and wear behaviours of alloy were determined. In second stage, 1 % multiwall carbon nanotubes were added to the matrix material AA7075 alloy and mechanical milled for six different periods (20-120 min.). The optimum milling time was

determined with examining milling time effects on powder sizes, hardness and wear behaviours. In the third stage, composite powders mechanically milled for 120 min. determined in previous stage were sintered at different duration (1, 2 and 3 hours) to determine optimum sintering time. In the last stage of the study, composites were produced by the addition of reinforcement phase (0,5 % , 1%, 2%, 3% 4% CNT) after mechanically milling (120 min.) and sintering (1h.) which were determined previous stage. The effects of reinforcement phase were determined on microstructure, hardness and wear behaviours. The results indicated that applied aging treatments at different temperature and time to AA7075 alloy are effective on the size of second precipitates occurred in the its microstructure. In the hardness and wear tests, the highest hardness values and the lowest weight loss were obtained for the samples aged at 120 °C for 24 hours. It was observed that powder size of AA7075 alloy with 1 % CNT increased with increasing milling time, but the powder size decreased after milling for 120 min. In the hardness and wear tests, the highest hardness values and the lowest weight loss were obtained for composite milled for 120 min. In the microstructure examining of sintered samples for different time, the CNTs shapes were changed and been shorter and thicker in the grain boundry with increasing sintering time. In the hardness and wear tests, the highest hardness values were measured in sintered composites for 1 hour. The lowest weight loss was obtained in sintered composites for 3 hours. In the microstructure examination of produced composites with adding different amount CNT, it was observed that CNTs were agglomerated with increasing the amount of CNT. In the hardness and wear tests, the highest hardness and lowest weight loss were obtained with adding 1% CNT reinforced AA7075-CNT composites.

Key Word : AA7075, carbon nanotube, mekanik alloying, metal matrix composites, wear behaviour.

Science Code : 915.1.193

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Metin GÜRÜ, Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Recep Çalın ve Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY'a teşekkür ederim. Ayrıca, deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Yrd.Doç. Dr. Yakup Kaya'ya teşekkür ederim.

Bu Doktora Tez Çalışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından KBÜ-BAP-15/1-DR-003 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Sevgili aileme, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemedi her zaman yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim. Son olarak çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu anlayış ve hoşgörüden dolayı eşim Tuğba Aydın YILDIRIM ve biricik oğlum Kerem YILDIRIM' a sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
7XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	6
2.1. AA7075 ALAŞIMI.....	7
2.2. AA7075 ALAŞIMINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	7
2.2.1. Yaşlandırma Isıl İşlemi (Çökelti Sertleştirme)	7
2.2.1.1. Solüsyona Alma	8
2.2.1.2. Su Verme.....	9
2.2.1.3. Yaşlandırma.....	10
2.2.2. Yeniden Çözeltiye Alma Ve Yeniden Yaşlandırma Isıl İşlemi (RRA) ..	12
2.2.3. HTPP (High Temperature Pre-Precipitation) Isıl İşlemi	13
BÖLÜM 3	14
KOMPOZİTLER	14
3.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	14
3.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler.....	15
3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler	15

Sayfa

3.1.3. Metal Matrisli Kompozitler	15
3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE MATRİS MALZEMELERİ	16
3.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE TAKVİYE ELEMANLARI	16
3.4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	17
3.4.1. Sıvı Hal İşlemleri	17
3.4.2. Katı Hal İşlemleri	18
3.4.3. İn-situ İşlemler.....	18
3.5. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	18
3.5.1. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları....	19
3.6. NANO KOMPOZİTLER	22
3.6.1. Nano Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemesi Ve Takviye Elemanları.....	24
3.7. NANO KOMPOZİTLERDE MUKAVEMETLENME MEKANİZMALARI.....	25
3.7.1. Yük Transfer Etkisi.....	25
3.7.2. Hall-Petch (Tane Boyutu) Mukavemetlenme Mekanizması	25
3.7.3. Orowan Mukavemetlenme Mekanizması	26
3.7.4. Termal Genleşme Katsayı Uyumsuzluğu	27
BÖLÜM 4	28
KARBON NANOTÜPLER	28
4.1. KARBON NANOTÜPLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	29
4.1.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler	29
4.1.2. Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler	30
4.2. KARBON NANOTÜPLERİN SENTEZLENME YÖNTEMLERİ.....	31
4.2.1. Katı Halde Karbondan Sentezleme.....	31
4.2.2. Gaz Halde Karbondan Sentezleme	31
4.3. KARBON NANOTÜPLERİN KULLANIM ALANLARI.....	32
4.4. KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	32
BÖLÜM 5	39
MEKANİK ALAŞIMLAMA/ MEKANİK ÖĞÜTME (MA/MÖ) YÖNTEMİ	39

5.1. MEKANİK ALAŞIMLAMA MEKANİK ÖĞÜTME MEKANİZMASI.....	39
5.2. MEKANİK ALAŞIMLAMADA ETKİLİ OLAN PARAMETRELER	41
5.3. DEĞİRMEN ÇEŞİTLERİ	43
BÖLÜM 6	45
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
6.1. GİRİŞ	45
6.2. TOZLARIN HAZIRLANMASI	47
6.3. MA/MÖ İŞLEMLERİ.....	47
6.4. TOZ BOYUTU ÖLÇÜMLERİ.....	48
6.5. SOĞUK PRESLEME	48
6.6. SICAK PRESLEME	50
6.7. SİNERLEME İŞLEMLERİ.....	50
6.8. T6 ISIL İŞLEMİ	51
6.9. METALOGRAFİK İŞLEMLER	52
6.10. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ.....	52
6.11. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	52
6.12. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM+EDS) İNCELEMESİ.....	53
6.13. X-İŞİNİ KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ.....	53
6.14. AŞINMA TESTLERİ	53
BÖLÜM 7	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	55
7.1. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	55
7.1.1. Matris Malzemesinin Mikro Yapı İncelemeleri.....	55
7.1.2. Öğütme Süresinin Mikro Yapıya Etkisi	63
7.1.3. Sinterleme Süresinin Mikroyapıya Etkisi.....	69
7.1.4. Karbon Nanotüp Miktarının Mikro Yapıya Etkisi.....	72
7.2. XRD İNCELEMELERİ.....	75
7.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	77
7.3.1. Matris Malzemesin Yoğunluk Sonuçları	77

	<u>Sayfa</u>
7.3.2. Öğütme Süresinin Yoğunluk Üzerine Etkisi	77
7.3.3. Sinterleme Süresinin Yoğunluk Üzerine Etkisi.....	78
7.3.4. Karbon Nanotüp Miktarının Yoğunluk Üzerine Etkisi	79
7.4. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	80
7.4.1. Matris Malzemesin Sertlik Sonuçları	80
7.4.2. Öğütme Süresin Sertlik Üzerine Etkisi.....	81
7.4.3. Sinterleme Süresinin Sertlik Üzerine Etkisi	82
7.4.3. Karbon Nanotüp Miktarının Sertlik Üzerine Etkisi.....	83
7.5. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	85
7.5.1. Matris Malzemesinin Aşınma Davranışları	85
7.5.2. Öğütme Süresinin Aşınma Davranışlarına Etkisi	87
7.5.3. Sinterleme Süresinin Aşınma Davranışlarına Etkisi.....	89
7.5.4. Karbon Nanotüp Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkisini	91
7.6. AŞINMA YÜZEYİ SEM GÖRÜNTÜLERİNİN İNCELENMESİ	94
7.6.1. Matris Malzemesinin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	94
7.6.2. Farklı Öğütme Sürelerinde Üretilen Kompozitlerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi	95
7.6.3. Farklı Sürelerde Sinterlenen AMK'lerin Aşınma Yüzeyi İncelemeleri .	98
7.6.4. Farklı Miktarlarda KNT Takviye Edilen AMK'lerin Aşınma Yüzey İncelemeleri	99
BÖLÜM 8	102
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	102
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yaşlandırma ısı işlem kademeleri.....	8
Şekil 4.1. Grafit yapısının şematik görüntüsü.....	28
Şekil 4.2. Tek duvarlı karbon nanotüpün şematik görüntüsü.....	30
Şekil 4.3. Çok duvarlı karbon nanotüpün şematik görüntüsü.....	30
Şekil 4.4. Katlanma şekillerine göre karbon nanotüplerin şematik görüntüsü.....	31
Şekil 4.5. 1997-2007 yılları arasında KNT takviyeli kompozitler hakkında yapılan çalışmalar.....	33
Şekil 4.6. KNT takviyeli MMK çalışmaları.....	34
Şekil 4.7. KNT takviyeli MMK üretim yöntemleri.....	35
Şekil 5.1. Mekanik alaşımlama sırasında bilye-toz-bilye çarpışması.....	40
Şekil 5.2. Mekanik alaşımlama sırasında başlangıç tozlarında meydana gelen deformasyon.....	40
Şekil 6.1. Mekanik alaşımlama/öğütme cihazının görüntüsü.....	48
Şekil 6.2. Soğuk presleme işlemlerinde kullanılan metal kalıp görüntüsü.....	49
Şekil 6.3. Soğuk presleme işlemlerinde kullanılan hidrolik pres görüntüsü.....	49
Şekil 6.4. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısı işlem fırınının görüntüsü.....	50
Şekil 6.5. Yaşlandırma ısı işlemlerinin yapıldığı fırın görüntüsü.....	51
Şekil 6.6. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazının görüntüsü.....	53
Şekil 6.7. Standart pin-on-disk tipi aşınma cihazının şematik görüntüsü.....	54
Şekil 7.1. AA7075 alaşımı tozların SEM görüntüsü ve EDS sonuçları.....	56
Şekil 7.2. AA7075 alaşımının T6 ısı işlem öncesi SEM görüntüsü.....	57
Şekil 7.3. Farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapı SEM görüntüleri.....	58
Şekil 7.4. Üç farklı sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapı SEM görüntüleri.....	59
Şekil 7.5. Farklı sıcaklıklarda 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında ortalama çökelti boyutları.....	61
Şekil 7.6. 130 °C’de 24 saat yaşlandırılan AA7075 mikro yapısında meydana gelen çökeltilerin EDS sonucu.....	62

Şekil 7.7. 130 °C’de 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının XRD sonucu.....	63
Şekil 7.8. Farklı sürelerde öğütülen AA7075-% 1 KNT kompozit tozların SEM görüntüleri.....	65
Şekil 7.9. AA7075- % 1 KNT ilave edilerek 20 dak. mekanik öğütülen tozların SEM görüntüsü ve EDS (mapping) sonuçları	66
Şekil 7.10. AA7075- % 1 KNT ilave edilerek 120 dak. öğütülen ve 1 saat sinterlenen AMK’lerin SEM görüntüsü ve EDS (mapping) sonuçları. ...	67
Şekil 7.11. AA7075- %1 KNT ilave edilerek 120 dakika öğütülen ve 1 saat sinterlenen AMK’lerin yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri.	68
Şekil 7.12. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek farklı sürelerde sinterlenen kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS (mapping) analizi sonuçları.	69
Şekil 7.13. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek farklı sürelerde sinterlenen kompozitlerin yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri.	71
Şekil 7.14. Farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen AA7075-KNT AMK’lerin SEM görüntüleri.....	73
Şekil 7.15. % 0,5 KNT ve % 4 KNT ilave edilen kompozitlerin EDS (mapping) sonuçları.	74
Şekil 7.16. AA7075+% 1 KNT takviyeli kompozitin XRD sonucu.	75
Şekil 7.17. Takviye fazı olarak kullanılan KNT’lerin XRD sonucu.....	76
Şekil 7.18. AA7075 alaşımına% 1 KNT ilave edilerek farklı sürelerde mekanik öğütülerek üretilenAMK’lerin yoğunluk sonuçları.....	77
Şekil 7.19. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek 580 °C’de farklı sürelerde sinterlenen AMK’lerin yoğunluk değişimleri.	78
Şekil 7.20. AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin yoğunluk değişimleri.	79
Şekil 7.21. Farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan T6 ısıl işlem sonrası sertlik değişimleri.....	80
Şekil 7.22. Mekanik öğütme süresine bağlı olarak AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK’lerin sertlik değişimleri.....	82
Şekil 7.23. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek üç farklı sürede sinterlenen AMK’lerin sertlik değişimleri.....	82
Şekil 7.24. Farklı miktarlarda ilave edilerek üretilen AA7075- KNT kompozitlerin sertlik değişimleri.....	84
Şekil 7.25. Yaşlandırma ısıl işlemi öncesi yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.....	85
Şekil 7.26. Farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan yaşlandırma sonucu oluşan ağırlık kayıpları ve aşınma oranları	86

Şekil 7.27. Farklı sürelerde mekanik öğütülen AA7075- % 1 KNT takviyeli AMK'lerin ağırlık kayıpları, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları. ...	88
Şekil 7.28. Farklı sürelerde sinterlenen AA7075- % 1 KNT takviyeli AMK'lerin ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sonuçları.....	90
Şekil 7.29. AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayı sonuçları	92
Şekil 7.30. Yaşlandırılmayan ve farklı sıcaklıklarda(110, 120 ve 130 °C) yaşlandırılan AA7075 alaşımının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	94
Şekil 7.31. Farklı sürelerde mekanik öğütülerek üretilen AA7075- % 1 KNT takviyeli AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	96
Şekil 7.32. 120 dk. mekanik öğütülen AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonucu.	97
Şekil 7.33. Üç farklı sürede sinterlenen % 1 KNT takviyeli AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	98
Şekil 7.34. Farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen AMK'lerin 2500 metre kayma mesafesi sonrası aşınma yüzey SEM görüntüleri.....	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi	6
Çizelge 2.2. AA7075-0 alaşımının genel özellikleri	7
Çizelge 2.3. T6 ısıt işlemleri uygulanan AA7075 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri	11
Çizelge 3.1. AMK'lerde kullanılan takviye elemanları ve fiziksel özellikleri	19
Çizelge 3.2. Nano kompozitler ve üretilme yöntemlerini gösteren bazı çalışmalar ..	24
Çizelge 6.1. Çalışmada uygulanan deneysel aşamalar ve amaçları	46
Çizelge 6.2. Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi	47
Çizelge 7.1. Farklı sürelerde öğütülen AA7075-KNT kompozit tozların toz boyut analiz sonuçları.	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al : Alüminyum
Zn : Çinko
Mg : Magnezyum
Cu : Bakır
MPa : Mega Paskal

KISALTMALAR

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi)
XRD : X-Ray Diffraction (X-Işını Difraksiyonu)
KNT : Karbon Nanotüp
HNV : Hardness Micro Vickers (Mikro Vickers Sertlik)
ASTM : American Society for Testing and Materials
AMK : Alüminyum Matrisli Kompozit
ÇDKNT : Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
GA : Gaz Atomize

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde, teknolojik gelişmeler ve insan ihtiyaçlarının artması ile geleneksel malzemelerin yanı sıra, daha üstün özelliklere sahip malzeme arayışı her geçen gün artmaktadır. Bu amaç doğrultusunda araştırmacılar tarafından üretilen kompozitler, iki veya daha fazla farklı malzemenin en iyi özelliklerinin yeni ve tek bir malzemede toplanarak makro düzeyde birleştirilmesi ile üretilen malzemelerdir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde daha hafif malzemelerin tercih edilmesi (yakıt ekonomisinin sağlanması amacıyla), kompozit malzemelere olan ilgiyi her geçen gün arttırmaktadır (Moghadam vd., 2015; Savaşkan, 2009; Şahin 2000).

Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesine, takviye fazının şekline ve cinsine göre sınıflandırılmaktadır. Matris malzemesine göre polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli olmak üzere üç grupta incelenirken, takviye fazının şekline göre ise, parçacık, fiber, filament ve laminant takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır (Çalın, 2006; Şahin, 2000).

Metal matrisli kompozitler (MMK) matrisi (ana yapıyı) metalin, takviye fazını ise seramiklerin oluşturduğu malzeme grubudur. MMK'ler yüksek dayanım, rijitlik, yüksek aşınma dayanımı ve elastikiyet modülü gibi birçok üstün özelliğinden dolayı, başta otomotiv sektörü olmak üzere havacılık ve uzay sektörün ve elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. MMK'ler matris olan metalin ve takviye elemanı olarak kullanılan seramiğin en iyi özelliklerinin birleştirilmesi ile monolitik alaşımlarından daha yüksek dayanım ve aşınma dayanımı sergilemektedir (Tjong, 2013; Baradeswaran ve Perumal, 2013; Veeresh-Kumar vd., 2011).

MMK'lerin üretiminde matris malzemesi olarak genellikle Al, Mg, Ti, Cu ve alaşımları tercih edilmektedir. Al ve alaşımları, yoğunluğunun düşük olması, düşük ergime sıcaklığı, yüksek dayanım, elektrik ve termal iletkenliğinin ve korozyon direncinin yüksek olması gibi üstün özelliklerinden dolayı, ön plana çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, saf alüminyumun yanında Al-Si, Al-Si-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Veeresh-Kumar vd., 2011; Mobasherpour vd., 2013; Al-Qutub vd., 2013; Lindoros and Talvitie, 1995).

MMK'lerin üretiminde takviye elemanı olarak fiberler, viskerler ve parçacıklar kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler, şekillendirilebilme ve daha düşük maliyet ile üretilebilmeleri gibi özelliklerinden dolayı, diğer kompozitlere göre daha ön plana çıkmaktadır. Bu kompozitlerin üretiminde kullanılan parçacık takviye elemanları, sert ve yüksek sıcaklıklara dayanım gibi özelliklerinden dolayı, kompozitlerin yüksek dayanım (mekanik özellikler açısından) ve yüksek sıcaklıklarda çalışma gibi özelliklerini de iyileştirmektedir (Veeresh-Kumar vd., 2011; Dasgupta ve Meenai, 2005; Ibrahim vd., 1991).

Alüminyum matrisli kompozitlerde (AMK) takviye fazı olarak SiC, B₄C, Al₂O₃, Si₃N₄, TiC, MgO, TiB₂, ve in-situ TiAl₃, gibi karbürler, oksitler ve nitritler kullanılmaktadır (Özyürek vd, 2012; İzçiler ve Muratoglu, 2003; Sharma vd., 2015; Baradeswaran ve Perumal, 2013; Ramesh vd., 2010). Ayrıca, son yıllarda nano malzemelerin geliştirilmesiyle nano SiC, nano Al₂O₃, nano TiB₂, nano Y₂O₃, ve karbon nanotüp takviyeli nano kompozitler üretilmektedir (Casati ve Vedani, 2014).

Karbon nanotüpler (KNT), grafenin bal peteğini andıran atom düzleminin, nanometrik çapa ve mikrometrik yüksekliğe sahip silindirik şeklinde sarılmış bir formu olarak düşünülebilir. KNT'ler çaplarına ve boylarına bağlı olarak, yüksek elastikiyet modülü ve yüksek çekme dayanımına sahip malzemelerdir. KNT'lerin bu üstün özelliklerinden dolayı kompozit üretiminde takviye elemanı olarak kullanılan birçok çalışma yapılmıştır (Deng vd., 2007; Bakshi, ve Agarwal, 2011; Wu ve Kim, 2011; Esawi ve Morsi, 2007). 1990'lı yıllardan bugüne kadar yapılan çalışmalarda, KNT'ler polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitlerde takviye

elemanı olarak kullanılmaktadır (Bradbury vd, 2014; Bal ve Samal, 2007; Thostenson vd., 2001; Zhou vd., 2016; Bastwros vd., 2013). Kullanılma oranlarına bakıldığında, en fazla polimer matrisli kompozitlerin üzerine yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bununla beraber, son yıllarda metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan çalışmalar da yapılmaktadır (Tjong, 2013; Deng vd., 2007; Bal ve Samal, 2007). Ancak yapılan bu çalışmalarda, karbon nanotüplerin yapıda homojen olarak dağıtılmasının, matris malzemesi ile takviye fazı arasındaki boyut farkından dolayı (aglomerasyonun olması nedeniyle), matris ile takviye fazı arasındaki ara bağ oluşumunda problemlerin olduğu belirtilmektedir (Tjong, 2013; Deng vd., 2007, Bakshi ve Agarwal, 2011; Zhou vd., 2016).

MMK'lerin üretiminde döküm yöntemi, infiltrasyon, toz metalürjisi yöntemi, termal sprey, elektrokimyasal kaplama gibi yöntemler kullanılmaktadır. Islatılabilirliğinin ve metal matris ile ara bağ oluşumunun zayıf olmasından dolayı, KNT takviyeli metal matrisli kompozitlerin geleneksel döküm yöntemi ile üretilmesi oldukça sınırlıdır. Ayrıca, sıvı ile karbon nanotüpler arasında sıcaklığa bağlı olarak istenmeyen reaksiyonların oluşması sonucu, mekanik dayanım azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda çalışılması ve istenmeyen reaksiyonların oluşmamasından dolayı (diğer üretim metotlarına göre) toz metalürjisi, en çok kullanılan üretim yöntemidir (Esawi vd., 2009; Zhou vd., 2016, Thostenson vd., 2011; Thirumaran vd., 2013).

Toz metalürjisi (T/M) tozların karıştırılması, karıştırılan tozların sıkıştırılması ve sinterlemesini içeren bir üretim yöntemidir. T/M yöntemiyle yüksek kalitede karmaşık şekilli parçaların üretilmesi mümkündür. Ayrıca üretilen parçaların boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesinin yüksek olması, parça üretiminden sonra ek işlemlere (talaş kaldırma gibi) ihtiyaç duyulmaması gibi üstün özelliklere sahip olması, bu yöntemi cazip kılmaktadır. T/M yöntemi ile kompozit üretiminde, ergime sıcaklığı yüksek metal ve alaşımları kullanıldığında meydana gelen segregasyon, gaz absorpsiyonu, oksidasyon gibi döküm yönteminde görülen sorunlar söz konusu değildir. Bu özelliklerinden dolayı T/M, diğer üretim tekniklerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır (German, 2007).

T/M yöntemi ile kompozit üretiminde mekanik alaşımlama/mekanik öğütme yöntemi (MA/MÖ) öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, matris malzemesi olan alaşım tozu ile takviye fazı (yüksek devirlerde), bilyeler ile öğütülmektedir (Tjong, 2013; Suryanarayana, 2001). MA/MÖ işlemi sırasında, öğütme haznesi içerisinde bulunan aşındırıcı (öğütücü) bilyeler ile tozlar, yüksek enerjili öğütme sırasında sürekli olarak ezilme, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma ile bir döngü halinde karıştırılmakta/alaşımlandırılmaktadır. MA/MÖ yöntemi, istenen boyutta ve homojenlikteki tozların elde edilebildiği bir katı hal yöntemidir. MA/MÖ işleminde istenen özelliklerde malzeme üretiminin yapılmasında etkili olan birçok parametre vardır. Bunlar; öğütme tipi (değirmen çeşidi), öğütme kabı, öğütme hızı, öğütme süresi, öğütücü malzeme ve tipi, bilye toz oranı, kabın doluluk oranı, öğütme atmosferi, öğütme sıcaklığı ve işlem kontrol kimyasallarıdır. Bu parametreler içerisinde en önemli olanı ise, öğütme süresidir (Suryanarayana, 2001).

KNT takviyeli MMK üretiminde, en çok tercih edilen yöntem MA/MÖ yöntemidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, MA/MÖ yöntemiyle saf Al içerisine ilave edilen KNT'lerin yapıda homojen olarak dağıtıldığı (aglomerasyonun kısmen engellendiği), takviye elemanı ilave edilerek üretilen parçaların mekanik özelliklerinin geliştirilebildiği anlaşılmaktadır (Liu vd., 2012; Esawi and Morsi 2007). Ancak, otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılan AA7075 alaşımına ilave edilen KNT'lerin mikro yapı ve aşınma performanslarını inceleyen çalışmalar, oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmada, bir toz metalürjisi yöntemi olan MA/MÖ ile matris malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşımına, farklı miktarlarda KNT ilave edilerek, üretilen AMK'lerin mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışları incelenmiştir.

Bu çalışma, dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, matris malzemesi olarak kullanılan gaz atomize AA7075 alaşım tozları ön şekillendirilip sinterlendikten sonra, sertlik ve aşınma dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra bu alaşıma farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak, mikro yapıda meydana gelen ikinci faz çökeltilerin alaşımın sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada, matris malzemesi olan AA7075 alaşımına % 1 oranında karbon nanotüp (KNT) ilave edilerek ve farklı sürelerde mekanik öğütmeler yapılarak, öğütme süresinin toz boyutu, sertlik, yoğunluk ve aşınma davranışlarına

etkisi (optimum öğütme süresi) belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise, ikinci aşamada belirlenen ideal öğütme süresi kullanılarak mekanik öğütülen kompozit tozlar farklı sürelerde (1, 2 ve 3 saat) sinterlenerek ideal sinterleme süresi belirlenmiştir. Çalışmanın dördüncü ve son aşamasında, matris malzemesine farklı miktarlarda (% ağ.) takviye fazı (KNT) ilave edilerek, önceki aşamalarda belirlenen ideal mekanik öğütme ve ideal sinterleme süresinde kompozitler üretilerek, takviye fazı miktarının mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi belirlenmiştir.



BÖLÜM 2

7XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

7XXX serisi alüminyum alaşımları, diğer alüminyum alaşımlarına göre en yüksek dayanıma sahip alüminyum alaşımlarıdır. Bu yüzden, özellikle havacılık sektöründe uçakların gövde ve kanat yapılarında kullanılmaktadır. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşiminde % 4-8 Zn, % 1-3 Mg ve % 2 Cu bulunmaktadır. Zn ve Mg alüminyumda yüksek oranda katı çözünebilirliğe sahip olmasından dolayı, bu alaşımların dayanımı çökelti sertleştirilmesi ile arttırılmaktadır (Dursun ve Soutis, 2014; Özyürek vd, 2012; Clark vd., 2005). Bu alaşım grubu içerisinde en yaygın kullanılan alaşımlar ve kimyasal bileşimleri, Çizelge 2. 1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi (Dursun ve Soutis, 2014).

7000 serisi	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Al
7050	6,2	2,25	2,3	-	≤15	≤12	Kalan
7055	7,6-8,4	1,8-2,3	2-2,6	0,005	0,15	0,1	Kalan
7075	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	0,3	0,5	0,4	Kalan
7150	5,9-6,9	2,2,7	1,9-2,5	0,1	0,15	0,12	Kalan
7475	5,2-6,2	1,9-2,6	1,2-1,9	0,06	0,12	0,10	Kalan

Havacılık sektöründe, uçak gövde ve kanat yapımında kullanılan bu alaşımların dayanımları, yaşlandırma (çökelti sertleştirilmesi) ısıl işlemleri ile arttırılmaktadır. 7XXX serisi alüminyum alaşımları içerisinde ise, AA7075 alaşımı öne çıkmaktadır (Dursun ve Soutis, 2014; Li vd., 2008; Mahathaninwong vd., 2012).

2.1. AA7075 ALAŞIMI

AA7075 alaşımı yoğunluğunun düşük olması, yüksek dayanım ve yorulma direncinin yüksek olması gibi üstün özelliklerinden dolayı, özellikle havacılık sektöründe yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşım, %5-6 Zn, % 2- 2,9 Mg ve %2 Cu içermektedir (Özyürek vd., 2012). AA7075 alaşımının (ısıtıl işlem uygulanmayan) fiziksel ve mekanik özellikleri, Çizelge 2.2' de verilmektedir.

Çizelge 2.2. AA7075-0 alaşımının genel özellikleri (internet; matweb).

AA7075 alaşımı	Özellikler
Yoğunluk	2,81g/cm ³
Sertlik (Vickers)	68
Akma dayanımı	96,5 MPa
Çekme dayanımı	221 MPa
% uzama	9-10
Elastik modülü	71.7 GPa
Solüsyona alma sıcaklığı	466-482 °C

2.2. AA7075 ALAŞIMINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

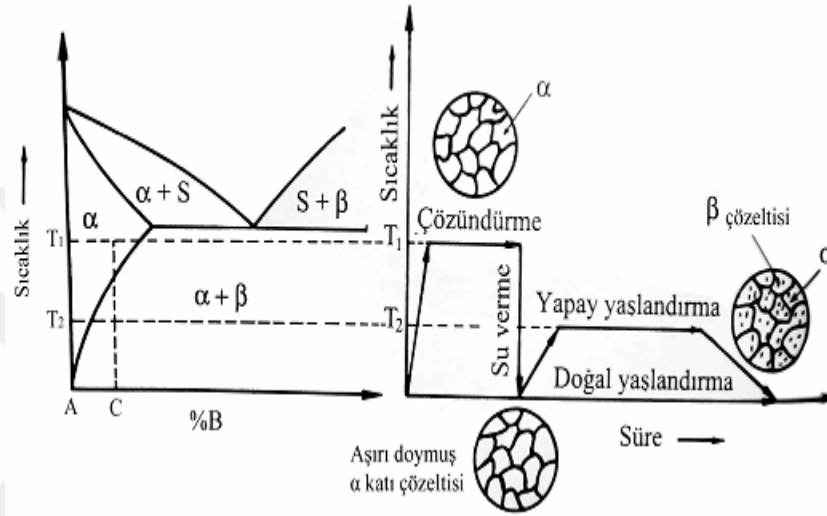
Otomotiv ve havacılık sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşımının dayanımı, farklı yaşlandırma ısıl işlemleri ile (T6, RRA, HTTP gibi) arttırılmaktadır.

2.2.1. Yaşlandırma Isıl İşlemi (Çökelti Sertleştirme)

Çökeltme sertleşmesi, denge diyagramında solvüs eğrisi içeren alaşım sistemlerine uygulanabilir. Aşırı doymuş bir katı fazdan, zaman ve sıcaklığın etkisi ile yeni bir fazın üretilmesi, yaşlandırma olarak adlandırılmaktadır. Yaşlandırma ile yapıda oluşturulan ikili faz (üçlü ve daha fazla olabilir), α fazı (matris) içerisinde oluşmaktadır. Yaşlandırma işlemi, bir katı-hal reaksiyonudur. Yaşlandırma ısıl işlemi

ile AA7075 alaşımının mukavemeti, oldukça arttırılmaktadır (Savaşkan, 2007; Isadarea vd., 2013).

Yaşlandırma ısıl işlemi, solüsyona alma (katı eriğe alma veya çözüdürme), su verme ve yaşlandırma olarak üç aşamada gerçekteştirilmektedir. Şekil 2.1'de yaşlandırma ısıl işlem kademeleri verilmektedir.



Şekil 2.1. Yaşlandırma ısıl işlem kademeleri (Savaşkan, 2007).

2.2.1.1. Solüsyona Alma

Solüsyona alma işleminin amacı, tek fazlı katı çözeltili elde etmektir. İlk sıcaklıkta, β ve α fazı denge halinde değildir. Alaşım, solvüs eğrisinin üzerindeki sıcaklığa çıkarılarak bu sıcaklıkta β fazı, α fazı içerisinde tamamen çözüncüye kadar bekletilmektedir. Yapı tamamen α fazına dönüştükten sonra, alaşım hızlı soğutulmaktadır. Çözeltiye alma sıcaklığı, alaşımın ergimesine sebep olmayacak şekilde (genellikle ötektik sıcaklığın 50 °C altına kadar) seçilmelidir (Yıldırım, 2012; Askeland, 1998).

AA7075 alaşımında çözeltiye alma işlemi (Cu, Mg, ve Zn gibi sertleştirmeyi sağlayan), çözünen element atomlarının katı çözeltili içindeki konsantrasyonunu arttırmak için yapılmaktadır. Bu nedenle, daha sonra yapılan çökelme (yaşlandırma) işlemine bir zemin hazırlanmaktadır. Bu elementlerin çözünebilirlikleri, sıcaklık

arttikça artmaktadır. Ayrıca difüzyon hızı arttığı için, çözünme hızı da sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Bu sebeple, en yüksek oranda çözünmenin olduğu sıcaklık, ergime sıcaklığına çok yakındır (fakat ergitme sıcaklığının altında olmalıdır). Çözeltiye alma sıcaklığı normalden düşük olduğunda, ikincil faz parçacıkları yapı içerisinde tamamen çözünmezler. Bunun sonucunda, istenen mekanik değerler elde edilemezler. Çökelti sertleştirme işleminde, çözündürme (solüsyona alınarak) sıcaklığında beklenmesi gereken süre alaşım türüne, kesit kalınlığına, parçanın şekline ve üretilme yöntemlerine göre değişmektedir (Fakıoğlu, 2012). Daha önce yapılan bazı çalışmalarda, AA7075 alaşımı için solüsyona alma sıcaklığı 466-490 °C aralığında yapılması gerektiği vurgulanmaktadır (internet; matweb; Li vd., 2008 Mahathaninwong vd., 2012).

2.2.1.2. Su Verme

Su verme işleminin amacı, çözeltiye alınarak katı eriyik içerisinde tamamen çözündürülen fazların, aşırı doymuş yapıda kalmasıdır. Diğer bir ifade ile, çözeltiye alma sırasında oluşan mikro yapının, oda sıcaklığına taşınmasıdır. Bu nedenle, yapıda ikinci faz çökeltilerin oluşturulabilmesi için, alaşımın (çözünen elementlerin difüze olmasına fırsat vermeden) hızlı bir şekilde soğutulması gerekir. Eğer alaşım kendiliğinden (yavaş soğuma) soğumaya bırakılırsa yapıda β fazı çekirdeklenerek, denge halinde bir $\alpha+\beta$ fazı oluşturmak için heterojen olarak çökeler. Hızlı soğutma ile α içerisindeki β fazı çökmesi gerçekleşmez ve bu nedenle de α fazı artık denge halinde değil, aşırı doymuş haldedir (Yıldırım, 2012).

Hızlı soğutma işleminde genellikle su kullanılmaktadır. Ancak suyun yanı sıra (su verme ortamı olarak), glikol-su karışımları, suda çözülebilen polimerik yağlar veya madeni yağlar da tercih edilmektedir. Al alaşımlarının ısıl iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle, aynı parça ince ve kalın kısımlarda soğuma karakteristikleri farklı olduğu için, deformasyonlar (çarpılmalar) oluşabilmektedir. Bundan dolayı, bu tür deformasyonların önlenmesi için, su verme ortamı ve bu ortamın sıcaklığı dikkatle seçilmelidir. Gerekli durumlarda, ya su verme ortamı karıştırılmalı veya parça ortam içerisinde hareket ettirilerek soğutulmalıdır.

Su verme işlemi sırasında meydana gelen diğer bir olay ise, atomlar arası boşlukların konsantrasyonu ile ilgilidir. Alaşımın yapısında bulunan atomik boşluklar, sıcaklığın artışıyla beraber artmaktadır. Buna bağlı olarak, çözeltiliye alma sıcaklığında dengede olan atomik boşluklarının konsantrasyonu, oda sıcaklığındaki konsantrasyon değerinden oldukça yüksektir. Bu durumda, ani soğuma sonucu ile alaşımın yapısında büyük miktarda atom boşluğu oluşmaktadır. Su verilmiş alaşımda oluşan atomik boşluklar, bir sonraki aşama olan yaşlanma aşamasında atomik yayınmayı kolaylaştıran bir faktördür. Böylece, çökelti fazlarının çekirdeklenme ve büyüme hızı artmaktadır (Fakıoğlu, 2012).

2.2.1.3. Yaşlandırma

Aşırı doymuş katı çözeltili içerisinde bulunan çözünmüş ikinci faz parçacıklar, sıcaklık ve zamanın etkisiyle kararlı bir faz olarak çökelmektedir. Bu dönüşüm;

α aşırı doymuş $\rightarrow \alpha + \beta$ çökelti şeklindedir.

Bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için, öncelikle β fazının çekirdeklenmesi ve büyümesi gereklidir. Su verme işleminden sonra alaşım oda sıcaklığında bekletildiğinde, ikinci β fazının oluşması uzun zaman almaktadır. Bu işlem, doğal yaşlandırma olarak adlandırılmaktadır. İkinci fazın çekirdeklenmesi ve büyümesi amacıyla alaşım belirli sıcaklıklarda bekletildiğinde ise, ikinci fazın çekirdeklenmesi ve büyümesi kısa bir sürede gerçekleşmektedir. Bu işlem ise, yapay yaşlandırma işlemi olarak adlandırılmaktadır. Yapay yaşlandırma işleminde çözeltiliye alma ve su verme işleminden sonra, 115–190 °C aralığında belirli süre bekletilerek (5-48 saat) yaşlandırma işlemi tamamlanmaktadır. Alaşımlar, yapay yaşlandırma sonunda genellikle, en yüksek dayanım değerlerine ulaşmaktadır (Fakıoğlu, 2012).

AA7075 alaşımında yaşlandırma ısıl işlemi ile yapıda oluşturulan ikinci faz çökeltilerin, aşırı doymuş katı eriyikte meydana gelen bir dizi ayrışma sonucunda meydana geldiği bilinmektedir. Bu ayrışma;

α – aşırı doymuş katı eriyiği → Guinier-Preston bölgeleri (GP zones) → Yarı kararlı η (MgZn₂) fazı → Kararlı η (MgZn₂) fazı

şeklinde meydana gelmektedir (LaDelpha vd., 2009; Peng vd., 2012; Tang vd., 2012). Aşırı doymuş katı eriyik, solüsyona alma işleminden sonra, oda sıcaklığına hızlı soğutma ile elde edilmektedir. Yaşlandırma ile yapıda GP bölgeleri ve yarı kararlı η (MgZn₂) fazı oluşmaktadır. Yapıda oluşan kararlı η fazı, alaşımın mekanik özellikleri üzerinde çok önemli bir rol oynamaktadır (Fakıoğlu, 2014).

Alaşımın yapısında kararlı η (MgZn₂) fazının dışında, $T(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$, $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$, $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, Mg_2Si fazları da oluşabilmektedir (alaşımın bileşimine bağlı olarak). Ancak, Al-Zn-Mg-Cu alaşım sistemlerinde genellikle, η (MgZn₂) ve $T(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$ fazları oluşmaktadır (Fan vd., 2006).

Yaşlandırma ısı işlemleri sonucunda yapı içerisinde çökelen MgZn₂ fazı, AA7075 alaşımının mukavemet değerlerini oldukça arttırmaktadır. Çizelge 2.3’de yaşlandırma ısı işlemi (T6) uygulanan AA7075 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.3. T6 ısı işlemi uygulanan AA7075 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (internet; matweb).

7075 Al alaşımı	Özellikler
Yoğunluk	2,81g/cm ³
Sertlik (Vickers)	175
Akma dayanımı	503 MPa
Çekme dayanımı	572 MPa
% uzama	9
Elastik modülü	71.7 GPa
Solüsyona alma sıcaklığı	466-482 °C

AA7075 alaşımında uygulanan T6 ısı işleminde solüsyona alma sıcaklığı, bekleme süresi, hızlı soğutma ortamları, yaşlandırma sıcaklığı ve yaşlandırma süresi gibi parametreler, yapıda oluşan çökelti miktarı ve boyutları üzerinde etkilidir. Yapıda

meydana gelen çökeltilerin yoğunluğu ve boyutu, alaşımın mukavemet değerlerini değiştirmektedir (Isadere vd., 2013).

2.2.2. Yeniden Çözeltiye Alma Ve Yeniden Yaşlandırma Isıl İşlemi (RRA)

AA7075 alaşımında en yüksek sertlik ve mukavemet değerleri, yapay yaşlandırma ısıl işlemi (T6) ile elde edilmektedir. Ancak, T6 uygulanan AA7075 alaşımı korozyona karşı hassas hale gelmektedir. Korozyon direncini iyileştirmek için, aşırı yaşlandırma ısıl işlemi olarak bilinen T73 ısıl işlemi uygulanmaktadır. Bununla beraber, T73 ısıl işlemi uygulanan alaşımlarda korozyon direnci iyileştirilirken, mukavemet değerleri yaklaşık % 10-15 azalmaktadır. Bu azalmayı engellemek, mukavemet ve korozyon direncini optimum değerde bir araya getirmek amacıyla, Cina tarafından bulunan retrogresyon ve yeniden yaşlandırma (RRA; retrogression and reageing) işlemi uygulanmaktadır. RRA işlemi, retrogresyon ve yeniden yaşlandırma olmak üzere iki aşamalı bir ısıl işlem süreci olarak tanımlanmaktadır. Sadece, T6 temper durumundaki alaşımlara uygulanmaktadır (Baydoğan vd., 2004).

RRA işleminin, retrogresyon kademesinde, T6 temper durumundaki alaşım, çözeltiye alma ve yaşlandırma sıcaklığı arasında bir sıcaklıkta (genellikle 200-280 °C) kısa süreli (1-100 saniye) bekletilmektedir. Daha sonra, T6 işleminin yaşlandırma sıcaklık ve süresi kullanılarak yeniden yaşlandırılmaktadır. Bu işlemler sırasında alaşım, her bir kademedен sonra hızlı soğutulmaktadır.

Baydoğan vd. yaptığı bir çalışmada, AA7075 alaşımına RRA ısıl işlemi uygulayarak RRA ısıl işleminin sertlik, mukavemet ve darbe direnci gibi mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda, T6 temper durumundaki AA7075 alaşımını 220 °C'de 15 saniye 60 dakika aralığında farklı sürelerde yeniden çözeltiye alarak 120 °C'de 24 saat yaşlandırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonunda, kısa retrogreasyon sürelerinde sertlik artışı olduğunu, retrogreasyon süresi arttıkça sertlikte azalma meydana geldiğini, belirli retrogresyon sürelerinde T6 temper durumu seviyesine eşit veya daha yüksek sertlik ve mukavemet elde edildiğini belirtmişlerdir (Baydoğan vd., 2004).

Özyürek vd. tarafından yapılan bir çalışmada, AA7075-T6 alaşımı farklı sıcaklık (180-260 °C) ve farklı sürelerde (15 -75 dak) yeniden çözeltilmeye alarak, 120 °C'de 24 saat yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonunda, en yüksek çekme dayanımının, 220 °C'de 60 dakika yeniden çözeltilmeye alma sıcaklığı ve süresinde elde edildiğini belirtmişlerdir (Özyürek vd., 2012).

2.2.3. HTPP (Yüksek Sıcakta Ön Çökelek Oluşturma) Isıl İşlemi

HTPP (High Temperature Pre-Precipitation) ısıl işlemi, alüminyum alaşımlarına uygulanan, yüksek sıcaklıklarda ön çökelti oluşturarak malzemelerin dayanımını arttırmak için tercih edilen bir ısıl işlemdir. Genel olarak HTPP ısıl işlemi malzemenin, 485 °C' de 2 saat çözeltilmeye alma, 450 °C' de 30 dakika ön çökelek oluşturma ve 120 °C' de 24 saat fırın ortamında yaşlandırma işlemi ile yapılmaktadır (Fakıoğlu, 2012).

Fakıoğlu vd. yaptığı başka bir çalışmada, AA7075 alaşımına farklı ısıl işlemler uygulayarak, yorulma davranışlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, AA7075 alaşımına O (500 °C'de 2 saat solüsyona alma fırın içerisinde soğutma) T6 ısıl işlemi (500 °C'de 2 saat solüsyona alma, su verme, 120 °C'de 24 saat yapay yaşlandırma), RRA ısıl işlemi (T6 ısıl işlemi ardından 220 °C'de 1 saat yeniden solüsyona alma, 120 °C'de 24 saat yaşlandırma) ve HTPP ısıl işlemi (450 °C'de 30 dk. solüsyona alma 120 °C'de 24 saat yaşlandırma) uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonunda en yüksek yorulma dayanımı, T6 ısıl işlemi uygulanan numunede elde edilirken, en düşük yorulma dayanımının, temperlenen (O) numunelerde elde edildiğini belirtmişlerdir (Fakıoğlu vd., 2013).

BÖLÜM 3

KOMPOZİTLER

Kompozitler, iki veya daha fazla farklı malzemenin en iyi özelliklerinin tek bir malzemede bir araya getirilmesi amacıyla (makro düzeyde birleştirilmesi) oluşturulan malzemelerdir. Kompozit, karışım anlamına gelmektedir. Ancak, alaşımlarda olduğu gibi çözen ve çözünen bileşenlerden oluşmazlar. Atom alışverişi de gerçekleşmemektedir (Şahin, 2000).

Genellikle, farklı bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir malzemede toplayarak üretilen kompozitler yüksek dayanım, rijitlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme gibi avantajlara sahiptir. Buna karşılık, üretim güçlüğü, pahalı oluşu, diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmaması gibi dez avantajları da bulunmaktadır.

Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin birleşiminden (çok olanı matris, az olan ise takviye elemanı) oluşmaktadır. Kompozitler, matris malzemesi içerisinde takviye fazının dağılımıyla meydana gelmektedir (Şahin 2000; Çalın, 2006; Diler, 2012).

3.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine ve takviye elemanına göre sınıflandırılmaktadır.

Matris malzemesine göre;

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

Takviye elemanına göre;

- Elyaf takviyeli kompozitler (fiber)
- Parçacık takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler (laminant)
- Flament takviyeli kompozitlerdir.

3.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler düşük yoğunluk, kolay üretilmeleri ve yalıtkanlıkları gibi özelliklerinden dolayı, endüstriyel amaçlı kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak kullanılan polimerler, termosetler ve termo plastikler olarak bilinen malzemelerdir. Polimer malzemelerde en çok kullanılan takviye malzemeleri cam, bor ve karbon fiberlerdir. Polimer esaslı kompozitlerin ısıl dayanımları düşük olduğundan dolayı, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılamazlar (Şahin, 2000; Fidan, 2011).

3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklarda çalışması gereken parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Gevrek yapılı ve çekme dayanımları oldukça düşük malzemelerdir. Buna karşılık, basma dayanımları oldukça yüksektir. Plastik olarak şekillendirilemeyen seramik matrisli kompozitlerde en fazla ZrO, Al₂O₃ ve SiC gibi matris malzemeleri kullanılmaktadır (Fidan, 2011) .

3.1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK) matrisi (ana yapıyı) metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak seramiklerin kullanıldığı malzemelerdir. MMK'lerde metalin (veya alaşımın) ve takviye elemanının üstün özelliklerinin birleştirilmesi ile düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve yüksek elastikiyet modülü gibi özellikler sağlanmaktadır. Bu malzemeler başta otomotiv sektörü olmak üzere uzay ve havacılık sektörü ve elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. MMK'ler, matris

olan metalin ve takviye elemanı olarak kullanılan seramiğin en iyi özelliklerinin birleştirilmesi ile, monolitik alaşımlarından daha yüksek dayanım ve aşınma dayanımı sergilemektedir. MMK 'lerde matris malzemesi olarak, yoğunluğu düşük olan metaller tercih edilmektedir (Tjong, 2013; Veeresh-Kumar, 2011; Miracle, 2005; Rawal, 2001; Javadi vd., 2013).

3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE MATRİS MALZEMELERİ

MMK'lerde matris malzemesi, takviye malzemesini çevreleyerek yapı içerisinde belirli bir düzende konumlanmasını sağlamaktadır. Bunun yanında matris, kompozit malzemeye uygulanan yükleri takviye fazına iletmektedir (Miracle, 2005; Şahin 2000).

MMK'lerde hemen hemen tüm metal ve alaşımları, matris malzemesi olarak kullanılabilirler. Ancak, genellikle yoğunluğu düşük olan metal ve alaşımları tercih edilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, başta Al olmak üzere Ti, Cu, Mg ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Tjong, 2013; Miracle, 2005; Deaquino-Lara vd., 2014).

MMK'lerde matris malzemesi olarak genellikle yoğunluğunun düşük, korozyon direncinin yüksek ve işlenebilirliğinin kolay olması nedeniyle, Al ve Al alaşımları tercih edilmektedir. Ancak, ergime derecesinin düşük olması, yüksek sıcaklık uygulamalarını sınırlamaktadır (Mobasherpour vd., 2013; Uygur ve Saruhan, 2004).

3.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE TAKVİYE ELEMANLARI

MMK'lerde takviye elemanının görevi, kompozite uygulanan yükü taşıyarak kompozitin dayanımını arttırmaktır. MMK'lerin üretiminde takviye elemanı olarak fiberler, viskerler ve parçacıklar kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler kolay şekillendirilebilme, daha düşük maliyet ve anizotropik olmaları gibi özelliklerinden dolayı, diğer kompozitlere göre ön plana çıkmaktadır. MMK üretiminde kullanılan parçacık takviye elemanları, sert ve yüksek sıcaklıklara dayanım gibi özelliklerine sahiptir. Bundan dolayı, kompozitlerin daha yüksek

dayanım, yüksek sıcaklıklarda çalışma ve aşınma dayanımı gibi özelliklerini de iyileştirmektedir. MMK'lerde takviye fazı olarak genellikle SiC, B₄C, Al₂O₃, AlN, Si₃N, TiB₂, TiC, MgO, TiB₂, BN gibi karbürler, oksitler ve nitrürler kullanılmaktadır (Veeresh-Kumar vd., 2011; Miracle 2005, Lindroos ve Talvitie, 1995, Kok, 2005).

3.4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

MMK'lerde matris ile takviye elemanın birbirine uyumlu olması ve iyi bir bağ oluşturması gereklidir. Bu bağın sağlanabilmesi için, matris malzemesinin ıslatabilirliği çok önemlidir. Matrisin takviye elemanını yeterli derecede ıslatabilmesi ve iyi bir bağ oluşturması, kompozitlerin dayanımını arttırmaktadır (Miracle, 2005).

Kompozitlerde matris ile takviye elemanı arasında oluşan bağın kuvvetli olması, kompozitlerin üretim yöntemine de bağlıdır. Kompozitlerde üretim yöntemleri üç grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

- Sıvı hal işlemleri
- Katı hal işlemleri
- İn-situ işlemler'dir

3.4.1. Sıvı Hal işlemleri

Sıvı hal üretim işlemleri, ergitilmiş matris malzemelerinin takviye elemanları ile aralarında bağ oluşturma işlemleridir. Yaygın olarak kullanılan sıvı hal üretim işlemlerini şu şekilde sıralamak mümkündür;

- İnfiltrasyon (infiltration).
- Sıkıştırılmalı döküm (squeeze casting).
- Karma döküm (compocasting).
- Yarı katı döküm (thixo casting).
- Karıştırılmalı döküm (stir casting).
- Püskürtme çökmesidir (spray deposition).

3.4.2. Katı Hal İşlemleri

Katı hal üretim yöntemleri, matris malzemesinin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta kompozit malzeme üretimidir. Yaygın olarak kullanılan katı hal üretim yöntemleri;

- Toz metalürjisi (T/M)
- Difüzyonla birleştirme
- Sıcak haddeleme'dir.

T/M yöntemi, en yaygın kullanılan kompozit malzeme üretim tekniğidir. Bu yöntemle, toz halindeki matris ve takviye elemanları birlikte karıştırılmakta veya mekanik olarak alaşımlandırılmaktadır. Hazırlanan kompozit tozlar bir kalıp içerisinde şekillendirilmektedir. Şekillendirme işleminden sonra sinterleme yapılarak, kompozitler üretilmektedir (Tjong, 2000; Şahin, 2000; Kaczmar vd., 2000).

3.4.3. İn-situ İşlemler

Bu tür kompozitler malzeme içerisinde farklı fazların oluşturulması ve bu fazlardan birinin veya birkaçının takviye elemanı gibi davranması ile oluşturulan kompozitlerdir. İn-situ kompozitlerin üretiminde farklı birkaç yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

- Ötektiklerin yönlü katılaştırılması
- Tercihli yönlendirilmiş metal oksidasyonu
- Ekzotermik reaksiyon işlemi'dir.

3.5. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Al ve alaşımları yoğunluklarının düşük, korozyon dayanımının yüksek ve işlenebilirliğinin kolay olması gibi özellikleri nedeniyle, MMK'lerde en çok kullanılan matris malzemeleridir. Bu alaşımların yoğunlukları düşük olan diğer

metal ve alaşımlardan (Mg, Ti) daha ekonomik olması, matris malzemesi olarak seçilmesinin diğer önemli bir nedenidir. Matris malzemesi olarak Al alaşımları içerisinde en yaygın olarak kullanılanları, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilen alaşımlar olan 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alaşımlardır (Torralba, 2003; Veeresh-Kumar vd., 2011).

3.5.1. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları

AMK'lerde takviye elemanı olarak fiberler, viskerler ve parçacıklar kullanılmaktadır. Takviye elemanı seçiminde matris malzemesi ile uyumluluğu, üretim yöntemi ve maliyeti gibi özellikler dikkate alınmaktadır. AMK'lerde takviye elemanının görevi, yükü taşıyarak matrisin çekme, basma ve aşınma sırasında matrise gelen yükü karşılamaktır (Veeresh-Kumar vd., 2011). Çizelge 3.1'de AMK'lerde en çok kullanılan takviye elemanları ve fiziksel özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.1. AMK'lerde kullanılan takviye elemanları ve fiziksel özellikleri (İnternet: matweb).

Takviye elemanı	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime derecesi (°C)	Elastik modülü (GPa)
SiC	3,21	2792	410
Al ₂ O ₃	3,96	2054	370
B ₄ C	2,50	2350	190-200
TiB ₂	4,52	3230	550-565
TiC	4,94	3065	448-451

3.5.1.1. Takviye Elemanı Olarak SiC Kullanılması

AMK'lerde en çok kullanılan takviye elemanı SiC'dür. Yoğunluğu 3.21 g/cm³ olan SiC, yaklaşık 1400 °C sıcaklığa kadar ki servis şartlarında kullanılmaktadır. SiC takviyeli MMK'lerin üretimi vorteks (argon gazı altında ergiyik karıştırma) dövme döküm, yarı katı işlem, toz metalürjisi gibi çeşitli yöntemlerde yapılmaktadır (internet: matweb; Kalkanlı ve Yılmaz, 2008; Saberi vd., 2009; Umanath vd., 2013).

Özyürek vd. yaptıkları bir çalışmada, A356 Al alaşımına %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC parçacık ilave ederek 590 °C ve 600 °C de iki farklı sıcaklıkta thixomoulding (tikso kalıplama) yöntemi ile kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir.

Yapılan çalışma sonucunda, Al matriste SiC parçacıkların homojen dağılımının sağladığı ve matris ile takviye elemanı arasında bağın gerçekleştiği belirtilmektedir. SiC oranı arttıkça aşınma kaybının azaldığı ve 590 °C’de üretilen kompozitin sertliğinin ve aşınma direncinin, 600 °C’de üretilen kompozitlerde yüksek olduğu belirtilmektedir (Özyürek vd., 2012).

Bhushan vd. yaptıkları bir çalışmada, AA7075 alaşımına %10 ve % 15 oranında (20-40 µm) SiC ilavesi yaparak karıştırma döküm yöntemiyle (stir casting) kompozitler üretmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, SiC’in matris içerisinde dağılımının iyi olduğu, alaşıma düşük oranda ilave edilen Mg’un takviye fazı olan SiC ile matris arasındaki ıslatabilirliği arttırdığı ve yapı içerisinde mekanik özellikleri azaltan Al₄C₃ fazı gibi istenmeyen reaksiyonların oluşmadığı belirtilmektedir. Bu yüzden, üretilen bu kompozitlerin otomotiv ve havacılık alanında kullanılabilmesi ifade edilmiştir (Bhushan vd., 2013).

3.5.1.2. Takviye Elemanı Olarak Al₂O₃ Kullanılması

AMK’lerde takviye elemanı olarak kullanılan bir diğer takviye elemanı ise, yoğunluğu 3,95 g/cm³ olan Al₂O₃ dır. Alüminanın sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek elastikiyet modülü ve rijitlik, takviye elemanı olarak tercih edilmesinin en önemli nedenidir. Takviye elemanı olarak en yaygın kullanıldığı matris malzemesi ise alüminyum alaşımlarıdır. Al₂O₃ ve SiC karşılaştırıldığında Al₂O₃’nın daha düşük elastikiyet modülü, dayanıma ve daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Fakat Al₂O₃ maliyet açısından, SiC’e göre daha avantajlıdır. Al₂O₃ takviyeli AMK’lerin sertlik ve aşınma dayanımları ise daha yüksektir. Kök tarafından yapılan bir çalışmada, 2024 Al alaşımına %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında vorteks metoduyla Al₂O₃ ilavesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, Al₂O₃ oranı arttıkça, üretilen kompozitin sertlik ve çekme dayanımında bir artış meydana geldiği ve % uzamada ise azalma olduğu belirtilmektedir (Kök, 2005).

3.5.1.3. Takviye Elemanı Olarak B₄C Kullanılması

AMK'lerde kullanılan bir diğerk takviye elemanı da yoğunluğu 2.52 g/cm³ olan B₄C dir. B₄C'ün sertliği SiC ve Al₂O₃ ya göre daha yüksek ayrıca yoğunluğu daha dűşűktür. Ancak maliyetinin yüksek olması, B₄C takviyeli kompozitlerin őrtilmesini sınırlamaktadır. Al ile ıslatabilirliğinin sınırlı olmasından dolayı, sıvı metal iğerisinde karıştırarak őrtilmeleri de zordur. Ancak, ortama ilave edilen K₂TiF₆ gibi flakslar sayesinde, ıslatabilirlik özelliği arttırılabilmektedir. Baradeswaran ve Perumal yaptığı bir ęalıřmada, sıvı AA7075 alaşımına %5 %10 %15 %20 oranında B₄C ve aynı oranlarda K₂TiF₆ ilave ederek karıştırmıştır. İlave edilen flaks TiC ve TiB₂ olarak reaksiyona girdiği ve bunun sonucunda ıslatabilirliğin arttığı ifade edilmektedir. Yapılan ęalıřma sonucunda, ilave edilen B₄C miktarı arttıka kompozitin sertliğinde ve aşınma dayanımında artış olduğunu rapor edilmektedir (Baradeswaran ve Perumal, 2013).

3.5.1.4. Takviye Elemanı Olarak TiC Kullanılması

TiC, yüksek sıcaklık dayanımının yüksek olması nedeniyle, MMK'lerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda iyi sürünme dayanımı sergilemektedir. Ancak yoğunluğunun (4.93 g/cm³) yüksek olması, takviye elemanı olarak kullanımını sınırlamaktadır (internet; matweb).

3.5.1.5. Takviye Elemanı Olarak TiB₂ Kullanılması

AMK'lerde aşınma dayanımını ve sertliğini arttırmak için takviye elemanı olarak kullanılan TiB₂'nin yoğunluğu 4.52 g/cm³ dűr. Bu takviye elemanı Al ile güçlü bađ oluşturması nedeniyle aşınma direncini arttırmaktadır.

Natarajan yaptığı bir ęalıřmada AA6063 alaşımına flakslar (K₂TiF₆ ve KBF₄) ilave ederek in-situ olarak % 0, %5, %10 oranlarında TiB₂ oluşturmuştur. Yapılan bu ęalıřmalar sonucunda yapıda TiB₂ takviye elemanının oluştuğu, TiB₂ oranı arttıka aşınma direncinin ve sertliğin arttığını belirtmektedir (Natarajan vd., 2009).

3.6. NANO KOMPOZİTLER

Son yıllarda nano malzemelerin geliştirilmesiyle bu malzemeler, kompozitlerin üretiminde takviye fazı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Takviye elemanı olarak nano malzemeler kullanılan kompozitler, metal matrisli nano kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Takviye fazı olarak kullanılan malzemelerin boyutlarının küçülmesi (nano), yapı içerisinde olan dislokasyon hareketlerini etkilediğinden dolayı, nano kompozitlerin geleneksel parçacık takviyeli kompozitlere göre dayanımı daha da artmaktadır (Suryanarayana ve Al-Aqeeli, 2013; Tjong, 2013).

Nano Kompozitlerin üretilmesi sırasında karşılaşılan en temel sorunlardan biri, takviye fazının ıslatabilirliğinin az olmasıdır. Diğer önemli bir sorun ise, nano malzemelerin yüzey enerjilerinin yüksek olmasından dolayı aglomerasyonun meydana gelmesi ve takviye fazının yapı içerisinde homojen dağıtılamamasıdır. Bu nedenlerden dolayı, nano takviyeli kompozit malzemelerin geleneksel döküm metoduyla üretilmeleri çok zordur (Zhou vd., 2016).

Nano kompozit üretim yöntemleri, in-situ ve ex-situ olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır. İn-situ olarak üretilen nano kompozitlerde takviye fazı sıvı veya metal tozları içerisine ilave edilmektedir. Üretim sırasında meydana gelen reaksiyonlar ile nano kompozitler üretilebilmektedir. Ex-Situ yönteminde ise, farklı toz metalürjisi yöntemleri kullanılmaktadır. İn-situ ve ex-situ olarak gruplandırılan nano kompozitler sıvı üretim yöntemleri, yarı katı üretim yöntemi, ve katı hal üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir (Zhou vd. 2014; Casati ve Vedani, 2014).

Sıvı üretim yöntemlerinde, ıslatabilirliğinin ve yüzey enerjilerinin çok yüksek olmasından dolayı, geleneksel döküm yöntemiyle nano kompozitlerin üretilmesi çok zordur. Bu yüzden, geleneksel olmayan bazı özel döküm yöntemleri kullanılarak, nano kompozitler üretilebilmektedir (Casati ve Vedani, 2014).

Li vd. tarafından yapılan bir çalışmada, ultrasonik destekli üretim yöntemi ile A356 alaşımına boyutu 30 nm altında nano SiC ilavesi yapılarak, yapıda homojen bir

dağılım elde edildiği, sertlik değerlerinde ise takviyesiz alaşıma göre %20 bir artış elde edildiği belirtilmektedir (Li vd., 2004).

Tu vd. tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, ergitilmiş Cu-Ti alaşımına B₂O₃, C, ve Ti ilavesi yapılarak, yapı içerisinde in situ olarak nano TiB₂ takviyeli kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, akma dayanımında yaklaşık iki kat bir artış meydana geldiği belirtilmektedir (Tu vd., 2002).

Katı hal nano kompozit üretim yöntemleri arasında en yaygın olanı, bir toz metalürjisi yöntemi olan MA/MÖ yöntemidir. Bu yöntemde, yüksek hızda bilyeli öğütücüde matris ile takviye fazı arasında sürekli olarak soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma ile nano takviye fazın matris içerisinde homojen bir dağılımı elde edilebilmektedir. Hazırlanan kompozit tozlar, şekillendirilip sinterlendikten sonra, kompozit parça üretimi tamamlanmaktadır (Casati ve Vedani, 2014).

Mobasherpour vd., tarafından yapılan bir çalışmada, AA7075 alaşım tozlarına % 1, % 3 % 5 oranında nano Al₂O₃ ilave edilerek, 20 saat mekanik öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütülen tozlar 450 °C 'de 30 dakika 300 MPa yük altında sıcak şekillendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda, kompozit içerisinde bulunan nano Al₂O₃ miktarı arttıkça sertlik değerlerinde artış olduğu, çekme dayanımında ise takviye fazı ilave edilmeyen alaşıma oranla % 60,5 oranında bir artış olduğu belirtilmiştir (Mobasherpour vd., 2013).

Saberi vd., tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, takviye fazı boyutunun kafes gerilimine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada, saf alüminyum içerisine (% 99) yaklaşık 5 µm ve 45-50 nm boyutlarında SiC ilave edilerek mekanik öğütülmüştür. Yapılan çalışmalar sonunda, nano takviye fazı ilave edilen kompozitlerde tane boyutu ve kafes geriliminin düştüğü belirtilmektedir (Saberi vd., 2009).

3.6.1. Nano Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemesi Ve Takviye Elemanları

Nano kompozitlerde matris malzemesi olarak saf Al ve alaşımları, Mg, Ti ve Cu gibi alaşımlar kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, parçacık takviyeli MMK malzemelerde olduğu gibi, nano kompozit malzemelerde de Al ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığında, başarılı sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır (Mobasherpour vd., 2013; Suryanarayana ve Al-Aqeeli, 2013).

Nano kompozitlerde nano SiC, nano Al₂O₃, nano TiB₂, nano Y₂O₃ takviye fazları kullanılmaktadır. Bunların dışında, son yıllarda MMK üretiminde KNT'ler de kullanılmaya başlanmıştır (Suryanarayana ve Al-Aqeeli, 2013). Çizelge 3.2'de Al matrisli nano kompozitler ve üretilme yöntemleri hakkında yapılan bazı çalışmalar tablo şeklinde verilmektedir.

Çizelge 3.2. Nano kompozitler ve üretilme yöntemlerini gösteren bazı çalışmalar.

Matris	Takviye Elemanı	Miktarı (%)	Öğütme ortamı	Öğütme süresi	Öğütme devri	Bilye toz oranı	Kaynak
Al-4.5% Cu	SiC	10	Planeter tip değirmen	12 saat	200	16:1	Lu vd., 1998
Al	Al ₂ O ₃	5	Planetary tip değirmen	24 saat	250	10:1	Rezavihesabi vd., 2006
Al	MWCNT	2	Planeter tip değirmen	6 saat	200	10:1	Esawi vd., 2009
7075	SiC	15	Atritör tip	12 saat	360	10:1	Sankar ve Sing 1998
6061	TiO ₂	10	Planetary tip değirmen	40 saat	280	10:1	Sivasankaran vd., 2010
Al	CNT	2-5	Planetary tip değirmen	48 saat	200	10:1	Morsi ve Esawi 2007
Al	MWCNT	10	Spex tipi değirmen	5 saat	1200	10:1	Poirier vd., 2009
6063	Al ₂ O ₃	5-10	Atritör tipi	20dak	400	10:1	Asgharzadeh vd., 2010
6061	SiC	10	Atritör tipi	9	300	10:1	Parvin vd., 2008
7010	SiC	10	Atritör tipi	21	430	5:1	Bhaduri vd., 1993
Al	SiC	2,5ve 5	Planetary tip değirmen	10	200	10:1	Saberi vd., 2009
Al	MgB ₂	15ve50	Spex tipi	64		7:1	Kubota vd., 2008

3.7. NANO KOMPOZİTLERDE MUKAVEMETLENME MEKANİZMALARI

Yük transfer etkisi, hall-petch mekanizması, orowan mekanizması, termal genişleme katsayısı, elastik modül uyumsuzluğu gibi mukavemetlenme mekanizmaları ile nano kompozitlerde yüksek dayanım değerlerine ulaşılabilmektedir.

3.7.1. Yük Transfer Etkisi

Malzemeye uygulanan yükün, sünek matris tarafından sert ve dayanımı yüksek olan takviye fazına iletilmesi ile kompozitlerin dayanımı artmaktadır. Kompozitlerde, yükün matristen takviye elemanına iletilmesi, matris ile takviye fazının uyumluluğuna ve ara yüzey dayanımına bağlıdır. Matris ile takviye fazı arasında meydana gelen ara yüzey bağı kuvvetli ise, uygulanan yükün takviye elemanına iletilmesi daha kolay olmaktadır. Ayrıca, matrise ilave edilen takviye elemanının boyutu da etkili bir faktördür. Takviye elemanının boyutu küçüldükçe yapı içerisinde bulunan takviye elemanının toplam yüzey alanının artmasından dolayı, matrinden takviye elemanına daha fazla yük aktarımının olması, nano kompozitlerde dayanımı arttırmaktadır (Casati ve Vedani, 2014, Dong vd., 2015).

3.7.2. Hall-Petch (Tane Boyutu) Mukavemetlenme Mekanizması

Metallerde tane boyutu, metallerin dayanımını etkilemektedir. Yapı içerisindeki tanelerin boyutu küçük olduğunda, tane sınır alanının artmasından dolayı meydana gelen tane sınırları, dislokasyon hareketlerini zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı da, metalik malzemede mukavemet artışı meydana gelmektedir. MMK'lerde takviye elemanları tanelerin büyümesini engellediğinden dolayı, tane boyutuna bağlı olarak tane sınır alanı artmakta dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak, mukavemet artışı sağlamaktadırlar. Eşitlik 3.1'de Hall-Petch denklemi verilmektedir (Casati ve Vedani, 2014).

$$\Delta\sigma = \frac{ky}{\sqrt{d}} \quad (3.1)$$

Burada;

$\Delta\sigma$ = Akma dayanımı

k_y = Malzeme sabiti

d = Tane boyutu

Kompozitlerde takviye elemanı olarak ilave edilen parçacıklar, dayanım artışında önemli bir rol oynamaktadır. İlave edilen takviye elemanının hacim oranındaki artışla birlikte (v_p) parçacık boyutunun (d_p) azalması, kompozitlerde daha ince (küçük) yapıli tanelerin oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum, Zener tarafından (teorik olarak) Eşitlik 3.2'de verildiği gibi modellenmiştir.

$$d_m = \frac{4\alpha d_p}{3v_p} \quad (3.2)$$

Burada;

d_m = tane boyutu

d_p = takviye elemanı partikül boyutu

v_p = takviye elemanı hacim oranı

α = oransal sabit

3.7.3. Orowan Mukavemetlenme Mekanizması

Matris içerisinde dislokasyonlar hareket ederken, karşılaştıkları ikinci faz çökeltiler veya takviye elemanı parçacıklar, dislokasyonların hareketini zorlaştırmaktadır. Böylece, kompozitin dayanımı da artmaktadır. Burada önemli olan dislokasyonun karşılaştığı parçacık boyutudur. Parçacık boyutu küçük olduğunda dislokasyonlar, parçacık etrafında dislokasyon halkaları bırakarak yoluna devam etmektedir. Parçacık boyutu büyük ise, dislokasyonlar bu parçacıkları kolaylıkla keserek yollarına devam etmektedir. Bu olayın açıklandığı Orowan mekanizması, Eşitlik 3.3'de matematiksel olarak ifade edilmektedir (Casati ve Vedani, 2014; Dong vd., 2015).

$$\Delta\sigma_{or} = \frac{0,13 bG}{d_p \left(\sqrt[3]{\frac{1}{2}v_p} - 1 \right)} \ln\left(\frac{d_p}{2b}\right) \quad (3.3)$$

Burada ;

G = Matrisin kayma modülü

b = burger vektörü

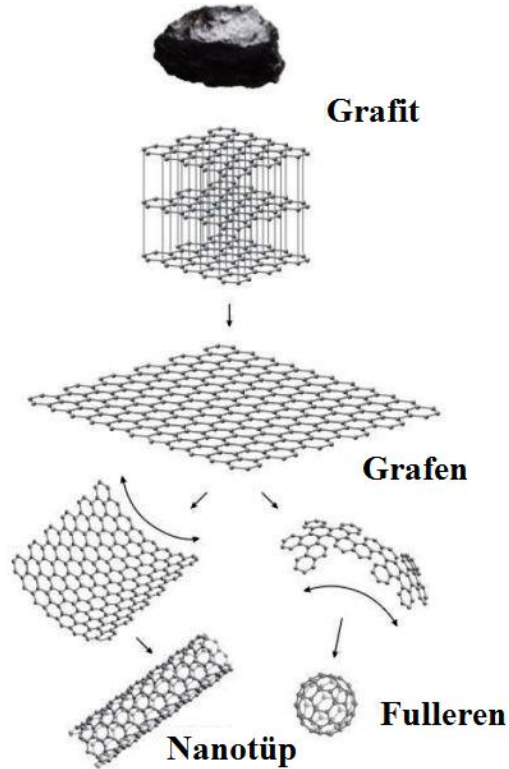
3.7.4. Termal Genleşme Katsayı Uyumsuzluğu

MMK'lerde matris olarak kullanılan metal ile takviye elemanı olarak kullanılan seramik malzemelerin ısı genleşme katsayıları birbirinden farklıdır. Isıtma ve soğutma sırasında meydana gelen ısı genleşme nedeniyle, matris/takviye ara yüzeyine yakın bölgelerdeki dislokasyon yoğunluğundaki artışa paralel olarak mukavemet artmaktadır (Casati ve Vedani, 2014; Dong vd., 2015).

BÖLÜM 4

KARBON NANOTÜPLER

Karbondan oluşan malzemeler (karbon atomlarının kendi aralarındaki bağlanma geometrisine göre), çok farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalarının yanı sıra, sınırsız sayıda farklı yapılanmalar da göstermektedirler. Elmas, karbon fiberler, karbin, karbolitler ve grafit, karbon esaslı malzemelere örnek olarak gösterilebilir. Grafitin tek katmanlı yapısı olarak adlandırılan grafen, karbon atomlarının oluşturduğu altıgen yapıların bir bal peteği şeklinde düzenlenmiş halidir. Karbon nanotüpler, grafenin bal peteğini andıran atom düzleminin, nanometrik çapa ve mikrometrik yüksekliğe sahip, silindir şeklinde sarılmış bir formu olarak düşünülebilir (Thostenson vd., 2001; Chu vd.,2013; Deng vd., 2007). Şekil 4.1'de grafit, grafen, nanotüp ve fulleren görüntüleri, şematik olarak verilmektedir.



Şekil 4.1. Grafit yapısının şematik görüntüsü (İnternet: sciencedaily.com).

1991 yılında, Lijma tarafından ark buharlaştırma yöntemi ile keşfedilen KNT'lerin teorik ve deneysel çalışmalar sonucu elastikiyet modülü 600-1100 GPa, çekme dayanımı 35-110 GPa arasında değişmektedir Ayrıca, aynı ağırlıktaki çelikten 10-100 kat daha fazla dayanıma sahiptir. Mekanik özelliklerinin yanı sıra termal iletkenliği elmasın iki katı ve elektrik akım taşıma kapasitesi, bakır kablolarına göre 1000 kat daha fazladır (Bakshi vd., 2010; Thostenson vd., 2001, Liu vd., 2013).

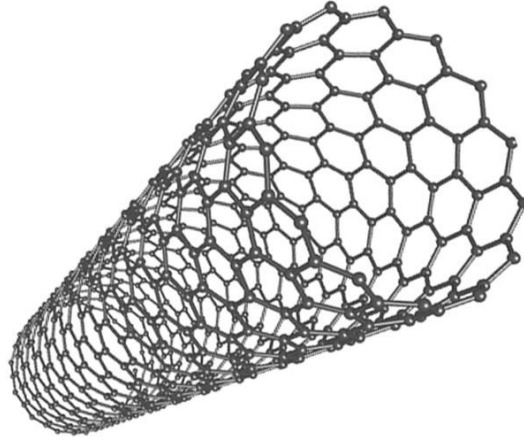
Yüksek elastikiyet modülü, yüksek dayanım, üstün termal ve elektriksel özelliklerinden dolayı, son yıllarda değişik bilim dallarından birçok araştırmacı, karbon nanotüpler ve uygulamaları hakkında çalışma yapmaktadır (Baykasoğlu ve Mugan, 2011; Wang vd., 2009).

4.1. KARBON NANOTÜPLERİN SINIFLANDIRILMASI

Karbonun bir allotropu olan karbon nanotüpler (KNT), grafenin kıvrılarak tüp şeklinde getirilmiş halidir. Uçları açık veya kapalı şekilde bulunabilir. KNT'ler tek duvarlı ve çok duvarlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Küçükıldırım ve Eker 2012).

4.1.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler

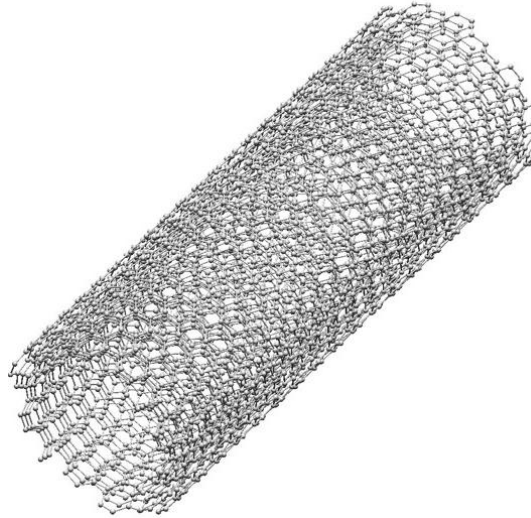
Tek duvarlı karbon nanotüpler tek katmanlı grafenin kıvrılması ile elde edilmektedir. Tek duvarlı karbon nanotüplerin uçları genellikle kapalıdır. Çapları yaklaşık 1-2 nm, boyları ise 5-30 µm arasında değişmektedir. Şekil 4.2'de tek duvarlı karbon nanotüp görüntüsü, şematik olarak verilmektedir.



Şekil 4.2. Tek duvarlı karbon nanotüpün şematik görüntüsü (İnternet: carbonallotropes.com).

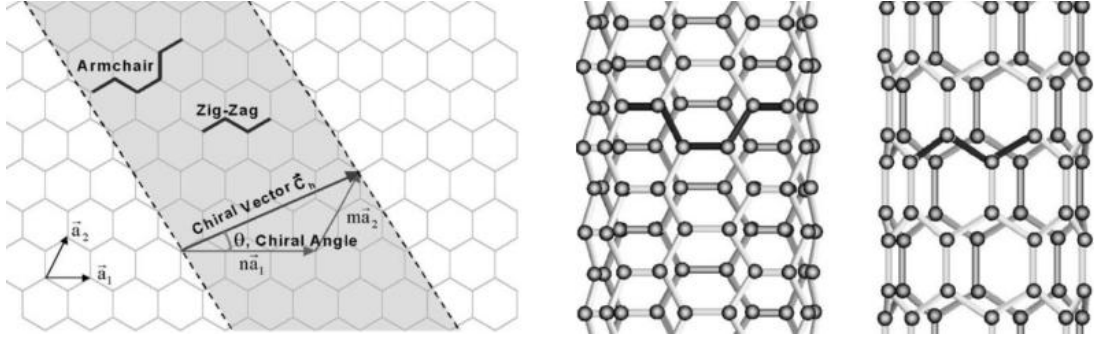
4.1.2. Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler

Çok katmanlı grafenlerin üstü üste konularak katlanması ile elde edilen KNT'lerdir. Dış çapları 100 nm, boyları 5-30 μm ye kadar ulaşabilmektedir. Şekil 4.3'de çok duvarlı karbon nanotüp görüntüsü şematik olarak verilmektedir.



Şekil 4.3. Çok duvarlı karbon nanotüpün şematik görüntüsü. (İnternet: carbonallotropes.com).

Ayrıca KNT'ler katlanış şekillerine göre koltuk tipi (armchair), zikzak tipi ve chiral tip olmak üzere üç şekilde sınıflandırılmaktadır. Şekil 4.4'de katlanma şekillerine göre karbon nanotüpler şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Katlanma şekillerine göre karbon nanotüplerin şematik görüntüsü (Thostenson vd., 2001; Chu vd.,2013; Deng vd., 2007).

4.2. KARBON NANOTÜPLERİN SENTEZLENME YÖNTEMLERİ

KNT'lerin sentezlenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin sınıflandırılması, katı haldeki karbondan sentezleme ve gaz halde karbondan sentezleme olmak üzere iki alt başlıkta yapılmaktadır (Küçükıldırım ve Eker 2012).

4.2.1. Katı Halde Karbondan Sentezleme

Katı halde karbondan sentezleme yöntemlerinde karbon kaynağı olarak, grafit çubuklar kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde KNT üretimi sırasında yüksek sıcaklıklar ve yüksek basınçlar oluşmaktadır. Katı halde karbondan sentezleme yöntemlerinde lazerle aşındırma yöntemi, ark boşaltma yöntemi ve solar fırın yöntemi olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır.

4.2.2. Gaz Halde Karbondan Sentezleme

Bu yöntemlerde, karbon kaynağı olarak çeşitli konvansiyonel gazlar kullanılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan gaz halde karbondan sentezleme yöntemleri;

- Kimyasal buhar çökeltme

- Isıl kimyasal buhar çökeltme
- Plazmayla güçlendirilmiş buhar çökeltme
- Mikrodalga plazmayla buhar çökeltme'dir

Ayrıca hidrotermal ve elektroliz yöntemleri ile de KNT sentezlemesi yapılabilmektedir. Bu yöntemler henüz çok kullanılmamakla birlikte, deneysel aşamalarla geliştirilmeye çalışılmaktadır (Küçükyıldırım ve Eker 2012).

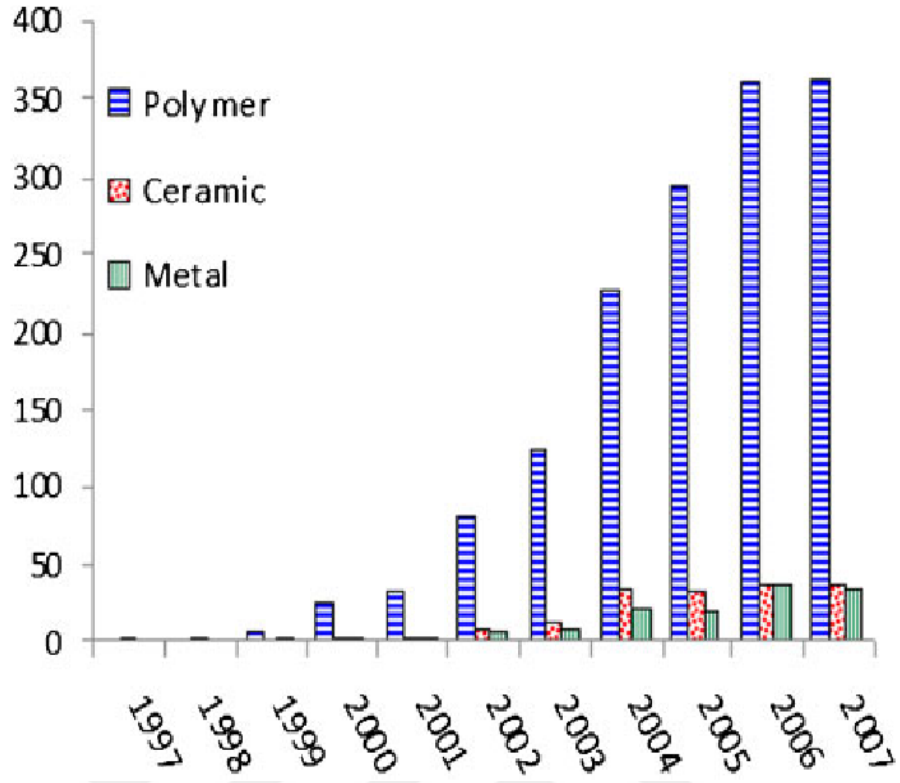
4.3. KARBON NANOTÜPLERİN KULLANIM ALANLARI

Mekanik dayanımının yüksek olması, termal ve elektriksel özellikleri gibi üstün özelliklerinden dolayı, KNT'ler, birçok sektörde kullanılmaya aday malzemelerdir. KNT'ler yeni bir malzeme olmasına rağmen, bilim dünyasında karbon nanotüpler hakkında gün geçtikçe çalışmalar artmakta ve bazı alanlarda ticari uygulamalarda da kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, önümüzdeki yıllarda başta malzeme bilimi olmak üzere, kimya sektörü, elektronik ve haberleşme alanı, tıp, havacılık, uzay ve askeri uygulamalarda kullanımının yaygınlaşması öngörülmektedir (Köhler vd., 2008; Arı vd., 2012).

Malzeme biliminde yapılan çalışmalar da KNT'lerin elastikiyet modülü ve çekme dayanımının yüksek olmasından dolayı, kompozitlerde takviye fazı olarak kullanılmasının arttığı görülebilmektedir (Thostenson vd., 2001; Chu vd., 2013; Deng vd., 2007).

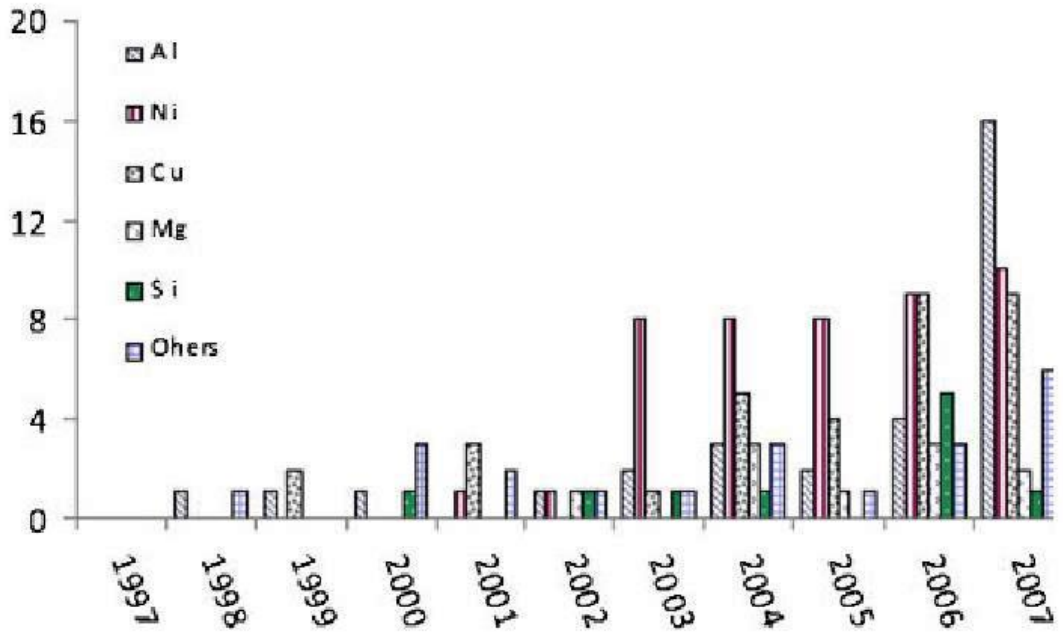
4.4. KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

1990'lı yıllardan günümüze kadar yapılan çalışmalarda, KNT'ler polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler de takviye elemanı olarak kullanıldığı görülmektedir (Perez-Bustamanete vd. 2008; Bakshi vd., 2010, Esawi vd., 2011). Şekil 4.5'de 1997 ve 2007 yılları arasında karbon nanotüp takviyeli kompozitler hakkında yapılan çalışmalar gösterilmektedir.



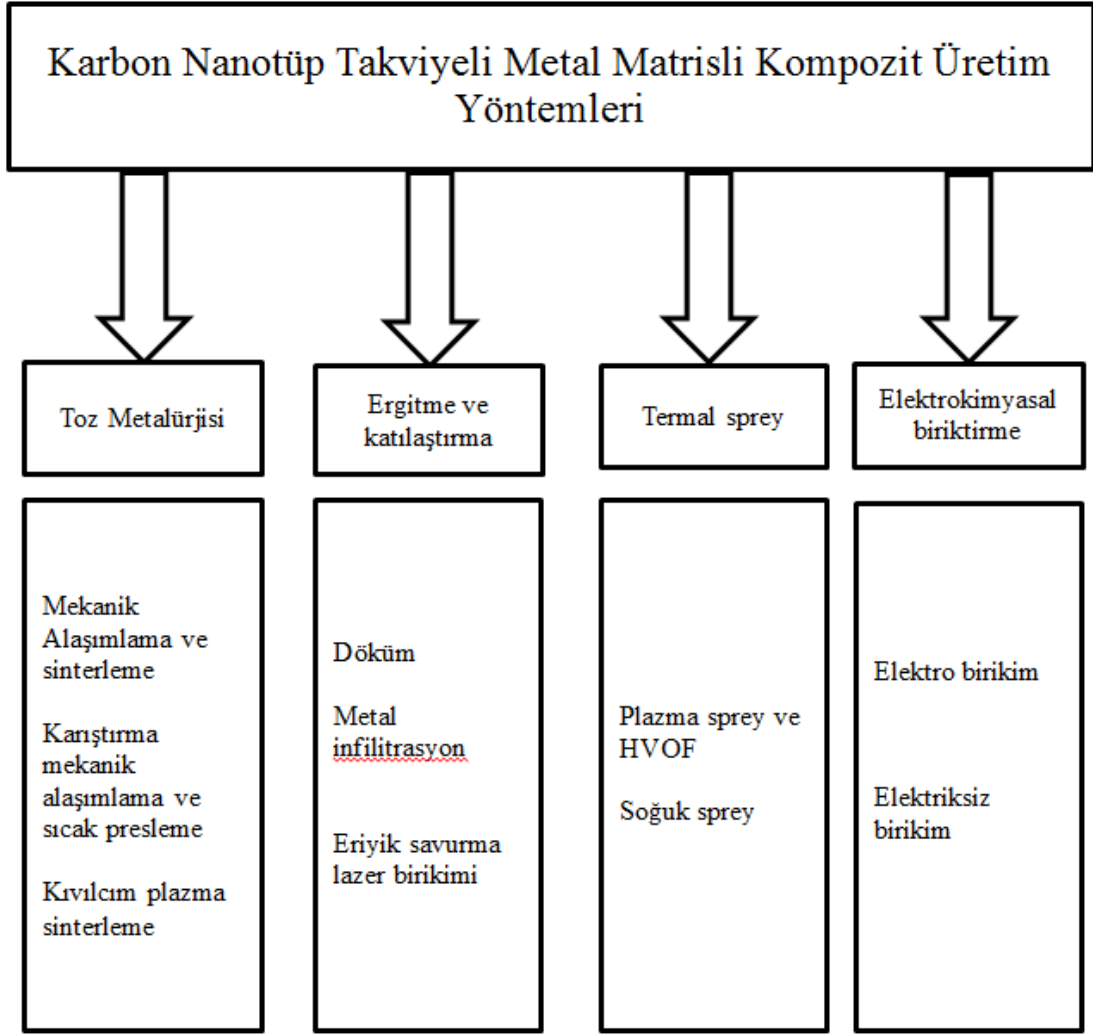
Şekil 4.5. 1997-2007 yılları arasında KNT takviyeli kompozitler hakkında yapılan çalışmalar (Bakshi vd., 2010).

Şekil 4.5’de, 10 yıllık bir süreçte KNT takviyeli kompozitler ile ilgili çalışmaların hızla arttığı görülmektedir. Bu artış en fazla polimer matrisli kompozitler de görülürken, seramik matrisli kompozitler de ve metal matrisli kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalarda da bir artış olduğu görülmektedir. Şekil 4.6’da 1997-2007 yılları arasında KNT takviyeli MMK ile ilgili hakkında yapılan çalışmalar görülmektedir.



Şekil 4.6. KNT takviyeli MMK çalışmaları (Bakshi vd., 2010).

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi MMK ile ilgili yapılan çalışmalarda, yoğunluğunun düşük olması, korozyon direnci, işlenebilirliğinin kolay olması gibi özelliklerinden dolayı, matris malzemesi olarak Al ve alaşımları tercih edilmektedir. Şekil 4.7’de KNT takviyeli MMK’lerin üretim metotları verilmektedir.



Şekil 4.7. KNT takviyeli MMK üretim yöntemleri (Bakshi vd., 2010).

KNT'lerin ıslatabilirliğinin düşük olması ve aglomerasyon nedeniyle, matris içerisinde homojen bir dağılım sağlanamamaktadır. Bundan dolayı, geleneksel döküm yöntemleri ile üretilebilmeleri zordur. Ayrıca sıvı üretim yöntemlerinde sıcaklığa bağlı olarak istenmeyen reaksiyonların oluşması (Al_4C_3), mekanik dayanımı düşürmektedir (Thostenson vd., 2001; Esawi vd., 2011).

Yapılan literatür incelemelerinde, KNT takviyeli MMK üretimi sırasında karşılaşılan en büyük problem, takviye elemanı olan KNT'lerin matris içerisinde homojen bir dağılımının sağlanamaması ve matris ile takviye elemanı arasındaki ara bağ oluşumunun zayıf olduğu belirtilmektedir (Bakshi vd 2010, Tjong, 2013). Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda, MA/MÖ yöntemi ile KNT'lerin yapı içerisinde

dağıtılabildiği ve bu sayede mekanik dayanımın arttırılabildiği belirtilmektedir (Zhou vd., 2016).

KNT takviyeli MMK üretiminde en çok tercih edilen yöntem, bir toz metalürjisi yöntemi olan MA/MÖ yöntemidir. Bu yöntem, bir katı hal üretim yöntemidir ve matris malzemesi olan metal tozu ile takviye elemanının yüksek enerjili bir değirmende karıştırılması ile gerçekleştirilmektedir. MA/MÖ işleminden sonra üretilen kompozit tozlar, ön şekillendirmenin ardından sinterlenerek, kompozit parça üretimi tamamlanmaktadır.

MA/MÖ yöntemi kullanılarak KNT takviyeli MMK üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, aglomerasyon ve homojen dağılım sağlamak amacıyla öğütme öncesinde ve sırasında ortama işlem kontrol kimyasalları (etanol, metanol toluen, nitrik asit) ilave edildiği görülmektedir. Çeşitli sinterleme ve ekstrüzyon yöntemleri ile KNT'lerin homojen dağılımı sağlanmakta ve bağ oluşturma problemleri giderilebilmektedir (Bakshi vd 2010, Tjong, 2013).

Esawi vd., tarafından yapılan bir çalışmada, % 99.7 saflıkta alüminyuma % 95 saflıkta 30-50 nm çapında ve 10-20 µm uzunluğunda ÇDKNT'ler (çok duvarlı karbon nanotüp) 10:1 bilye toz oranı 400 rpm öğütme hızı ve 30 dakika planeter tipi değirmende öğütülmüştür. % 0.5, 1, 2, 5 oranlarında KNT ilave edilen ve dört farklı kimyasal bileşime sahip AMK tozlar üretilmiştir. MÖ işlemi sırasında aglomerasyonun önlenmesi için işlem kontrol kimyasalı (İKK) olarak metanol kullanmıştır. Üretilen kompozit tozlar 20 mm çapında bir kalıpta 475 MPa basınçta 500 °C'de 4:1 oranında ekstrüze edilerek kompozit parçalar üretilmiştir. Üretilen bu kompozitlerin çekme testleri yapılarak, ilave edilen KNT'ün kompozitin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, alüminyuma ilave edilen KNT (% 2 oranında ilave edilen) çekme dayanımını yaklaşık % 50 arttırdığı, % 5 ilave edilen KNT'lerin yapıda homojen dağıtılamadığı ve aglomere olduğu belirtilmektedir (Esawi vd., 2010).

Deng vd., tarafından yapılan bir çalışmada ise, gaz atomize (GA) edilen 2024 alaşım tozu (Al-Cu-Mg) % 95 saflıkta farklı oranlarda (% 0.5, 1, 1.5 ,2) KNT ilave

edilerek, 300 MPa basınç altında 10 dakika soğuk izostatik presleme (CIP) yapılmıştır. Daha sonra 460 °C’de, 25:1 oranında ekstrüze edilmiştir. Yapılan çalışmalar, en yüksek sertlik ve çekme dayanımının % 1 karbon nanotüp içeren bileşimde elde edildiğini ve çekme dayanımında % 35.7 oranında bir artış sağlandığını göstermiştir (Deng vd., 2007).

Wang vd., tarafından yapılan başka bir çalışmada, % 99,9 saflıkta ve ortalama toz boyutu 30 µm olan saf alüminyum tozlarına % 2 oranında tek duvarlı (% 95 saflıkta), çift duvarlı (% 95 saflıkta) ve çok duvarlı (% 90 saflıkta) KNT ilave edilmiştir. MÖ işleminde 10:1 bilye toz oranı 200 rpm öğütme hızı 12, 24, 36 ve 48 saat öğütme süresi kullanılmıştır. Üretilen kompozit tozlar 500 °C’de 300 MPa basınç altında 120 saniye plazma aktiveli sinterleme yapılarak numuneler üretilmiştir. MA/MÖ sonucunda saf alüminyumda öğütme süresi arttıkça tane boyutunda artış meydana gelirken, tek duvarlı, çift duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ilave edilen kompozit tozlarda öğütme süresi arttıkça, ortalama tane boyutunda en fazla azalmanın ÇDKNT takviyeli kompozit tozlarda meydana geldiği belirlenmiştir. ÇDKNT takviyeli tozlarda öğütme süresi arttıkça, dağılımın daha homojen olduğu görülmüştür. MÖ süresi arttıkça üretilen kompozitlerin sertliğinin de arttığı ifade edilmiştir (Wang vd., 2009).

Liu vd. yaptıkları bir çalışmada bilye ve öğütme süresinin KNT takviyeli AMK’lerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. % 99.5 saflıkta Al tozuna % 0.5 oranında ÇDKNT takviye edilerek, 8:1 bilye toz oranı 300 rpm öğütme hızı ve 2-12 saat mekanik öğütülerek kompozitler üretilmiştir. MÖ öncesi % 1.8 oranında İKK (stearik asit) ilave edilmiştir. MÖ tozların SEM, raman spektroskopisi incelemeleri yapılmıştır. Üretilen kompozit tozlar bir kap içerisinde 560 °C de sıcak preslenerek (HIP) 40 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiştir. Üretilen silindir numuneler 450 °C de, sıcak dövme yapılarak, 7.5 mm kalınlığında plakalar elde edilmiştir. Bu plakalardan çekme numuneleri hazırlanarak, çekme testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, bilyeli öğütme işleminin matrisde KNT’lerin homojen dağılımının sağlandığı ve çekme testleri sonucunda dayanımın arttığı belirlenmiştir. Ancak uzun öğütme sürelerinin (8-12 saat) KNT’lerde aşırı deformasyona neden olduğu da bildirilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda, 6

saatlik MÖ süresinde KNT'ler ve matris arasında iyi bir bağ oluştuğu ve bunun sonucunda kompozitlerin akma dayanımında % 42 bir artış meydana geldiği belirtilmiştir (Liu vd., 2012).

Al-Aqeeli vd yaptıkları bir çalışmada ise, ortalama tane boyutu 40 μm olan Al-7Si 0.3Mg ve Al-12Si0.3Mg içeren alaşımlara, % 95 saflıkta 20-40 nm çapında % 0.5 % 1, % 1.5 ve % 2 oranında KNT ilave edilmiştir. KNT'ler, alüminyum alaşımı tozlara ilave edilmeden önce etil alkol içerisinde 15 dakika karıştırılmıştır. MÖ işlemi 10:1 bilye toz oranı 200 rpm öğütme hızı 1, 3 ve 5 saat öğütme süresinde yapılmıştır. Yapılan alışmalar sonucunda, etil alkol içerisinde karıştırma işleminin aglomerasyonu azalttığı ve yapıda KNT'lerin homojen bir dağılım sergilediğini belirtmiştir (Al aqeli vd, 2013).

BÖLÜM 5

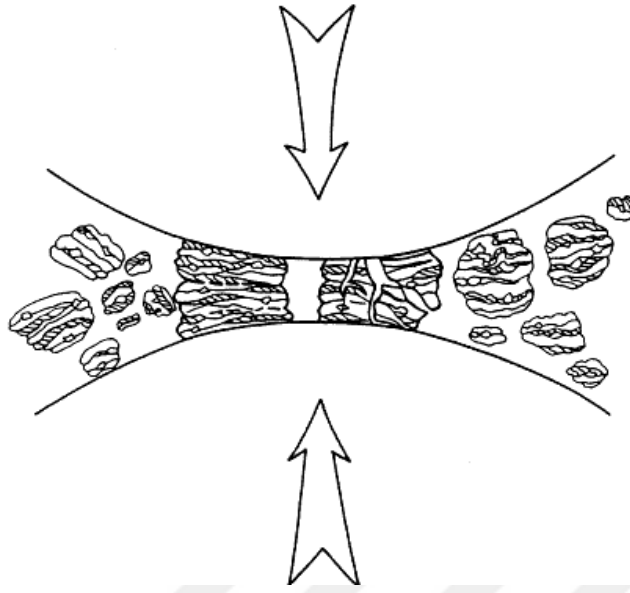
MEKANİK ALAŞIMLAMA/ MEKANİK ÖĞÜTME (MA/MÖ) YÖNTEMİ

MA/MÖ işlemleri bir katı hal üretim tekniğidir ve tozların yüksek enerjili öğütme ile tekrarlı soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma aşamalarını içermektedir. Aynı zamanda MÖ işlemleri ile, tozlarda ince mikro yapı elde edilmesi sağlanarak, kompozit malzeme üretimi yapılmaktadır (Özyürek, 2002; Suryayana 2001). 1966 yılında INCO (uluslararası nikel şirketi) laboratuvarlarında Benjamin tarafından keşfedilen bu yöntemde, birbiri içerisinde normal olarak çözünemeyen elementlerin alaşımlanabilmesi, bu yöntemin en büyük avantajlarından biridir.

MA/MÖ işleminde öğütücü bilyeler ve elementel tozlar, öğütme haznesinde yüksek devirlerde karıştırılmaktadır. Karıştırma sırasında tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma işlemleri ile istenilen karışım veya alaşımlama sağlanmaktadır.

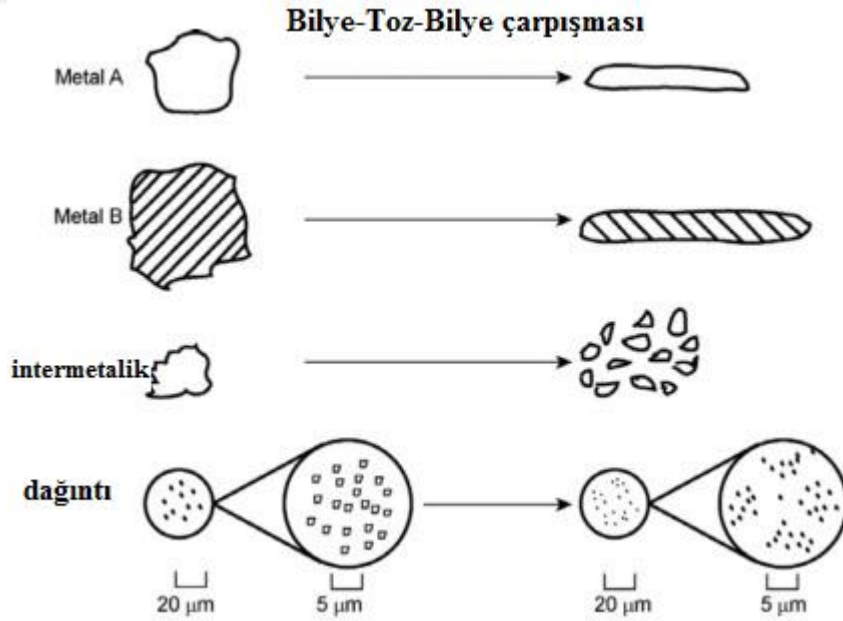
5.1. MEKANİK ALAŞIMLAMA MEKANİK ÖĞÜTME MEKANİZMASI

Toz parçacıklarında yüksek enerjili öğütme sırasında sürekli olarak ezilme, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi, kırılma ve yeniden kaynaklanma meydana gelmektedir. Şekil 5.1’ de iki bilyenin çarpışması sırasında arada kalan tozların ezilerek başlangıç boyutlarına göre daha da büyümesi, şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Mekanik alaşımlama sırasında bilye-toz-bilye çarpışması (Suryayana, 2001).

Şekil 5.2’de mekanik alaşımlama/öğütme sırasında başlangıç tozların uğradıkları deformasyon şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Mekanik alaşımlama sırasında başlangıç tozlarında meydana gelen deformasyon (Suryayana ve Al- aqeli, 2013).

Yüksek enerjili öğütme sırasında öğütme hücresi içerisindeki bilye-toz-bilye ve bilye-toz-kap duvarı arasında meydana gelen çarpışmaların etkisiyle, toz parçacıklarında plastik deformasyon (deformasyon sertleşmesi ve kırılma şeklinde) meydana gelmektedir. Mekanik öğütülen tozlarda deformasyonun devam etmesiyle, tozlar kırılarak küçülürler. Bu aşamada kırılma eğilimi, soğuk kaynaklanma eğiliminden daha yüksektir. Bilyelerin darbe etkisiyle tozlar incelmektedir (küçülmektedir). Buna rağmen, parçacıkların boyutu fazla değişmez. MÖ işleminde ilerleyen süreçte, tabakalar arası boşluklar azalmakta ve parçacık tabakaları ise artmaktadır. Belirli bir öğütme süresi sonrasında ortalama parçacık boyutlarının artması için, kaynaklanma ile parçacık boyutlarını düşürmek için kırılma arasında bir denge oluşmaktadır. Bu aşamada, her bir parçacık karışımı oluşturan malzemelerin tümünü içermektedir. MA/MÖ işlemi sırasında meydana gelen deformasyon etkisiyle, tane şekillerindeki değişimi dislokasyon boşlukları gibi kristal etkiler oluşturmaktadır. Oluşan bu etkiler, matriste çözünen elementlerin difüzyonunda arttırmaktadır. MÖ işlemi sırasında sıcaklığın artması, bu difüzyonunu da daha da kolaylaştırmaktadır. Böylece, elementler arasında bir mekanik alaşımlama meydana gelmektedir (Suryayana ve Al- aqeli, 2013).

5.2. MEKANİK ALAŞIMLAMADA ETKİLİ OLAN PARAMETRELER

MA/MÖ işlemi, karmaşık bir işlemdir. Bu nedenle, bu yöntemde üretilecek son ürünün bileşimi ve mikro yapısında etkili olan pek çok parametre söz konusudur. Bu parametreler birbiri ile ilişkilidir ve birbirinden bağımsız değildir. Bunlar;

- Öğütme tipi (değirmen çeşidi)
- Öğütme kabı
- Öğütme hızı
- Öğütme süresi
- Öğütücü malzeme ve tipi
- Bilye toz oranı
- Kabın doluluk oranı
- Öğütme atmosferi
- Öğütme sıcaklığı

- İşlem kontrol kimyasalları'dır.

Öğütme işlemi için kullanılan öğütme hücreleri önemlidir. Öğütme sırasında öğütücü malzemelerin kabın duvarına çarpması sonucu, çatlaklar ve kırılmalar meydana gelebilmektedir. Kırılan ve kopan bu parçalar kap içerisinde bulunan toza karışarak, üretilmek istenen alaşımın/kompozitin kimyasal bileşimini değiştirmekte ve kirlenmelere yol açmaktadır. Bu nedenle, öğütme yapılacak kapların dayanıklı malzemelerden yapılmış olması gerekmektedir (Özyürek, 2002).

MA/MÖ işlemlerinde bilye toz oranı 1:1-1:220 aralığındadır. Bilye-toz oranı (BTO) öğütme sırasında tozların istenen boyuta gelmesi için gereken zamana önemli bir etki etmektedir. BTO arttıkça, homojen bir yapı üretmek için gereken süre de azalmaktadır. Shafiee vd. yaptıkları bir çalışmada, Mo_2Si ve Mo_5Si_3 nano kompozit sentezlemesinde BTO ve öğütme süresinin mikro yapı ve faz dönüşümü üzerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, BTO ve öğütme süresinin, faz dönüşümü ve kristal boyutu gibi parametreler üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, 35:1 toz bilye toz oranının ve 48 saat öğütme süresinde en ince parçacık boyutuna ulaşıldığı ifade edilmiştir (Shafie vd., 2012).

Öğütme kabında, toz ve bilyelerin rahat hareket edebilmesi için, kabın doluluk oranı önemlidir. Bilyelerin ve tozun daha rahat hareket edebilmesi ve öğütmenin gerçekleşebilmesi için genellikle kabın doluluk oranı % 50 yi geçmemelidir.

Mekanik alaşımlama yönteminde, öğütme atmosferi diğer önemli bir değişkendir. Korozyon ve oksitlenme gibi problemlerin önlenmesi amacıyla, MA/MÖ işlemi vakumlu veya argon gibi inert gaz ortamlarında yapılmaktadır.

Mekanik alaşımlamada etkili başka bir değişken de, öğütme süresidir. Çoğu durumda, parçacık boyutu, kristal boyutu, lameller yerleşimi inceltme oranı işlem süresi ile logaritmik olarak artmaktadır.

Mekanik alaşımlama sırasında tozların plastik deformasyonu sebebiyle, toz parçacıkları arasında soğuk kaynaklanma meydana gelmektedir. Ortama ilave edilen işlem kontrol

kimyasalları (İKK), tozların kutuplaşarak aglomerasyonunu (topaklanma) önlemektedir (Suryayana. 2001, Özyürek 2002).

5.3. DEĞİRMEN ÇEŞİTLERİ

MA/MÖ işleminde çeşitli değirmen tipleri kullanılmaktadır. Bu değirmenler farklı toz kapasiteleri, öğütme etkileri, ısıtma ve soğutma gibi ayarlanabilir ünitelere sahiptir.

Bunlar;

- Speks tipi değirmenler

Laboratuvar çalışmalarında kullanılan bu tip değirmenlerde, 10-20 g arasında toz öğütülmektedir. İçine öğütücü bilyeler ve toz konan bir öğütme hücresinin (çelik, alümina, tungsten karbür vb.) kelepçe muhafazalı bir sistem içerisine yerleştirilerek dakikada binlerce kere ileri geri sağa sola hareket etmesi sonucu, kap içerisinde bilye ve tozlar birbirine çarparak tozlar karıştırılarak işlem tamamlanmaktadır.

- Planeter (düzlemsel) tipi değirmenler

MA çalışmalarına öncülük eden bir başka popüler değirmen tipi de, bir seferde yüzlerce gram tozu öğütme kapasitesine sahip Planeter bilyeli değirmenlerdir. Bu değirmenler, kendi eksenleri etrafında hareket eden döner destek disklerine ve özel dönme mekanizmalarına sahiptir. Merkezkaç kuvveti, kabın kendi eksenleri etrafında dönmesiyle ve kapta dönen destek diskleriyle üretilmektedir. Çünkü kaplar ve birbirine ters yönde dönen destek diskleriyle, aksi istikametteki merkezkaç kuvvetler birbirlerine etki ederler. Bu olay, öğütme bilyelerini kabın iç duvarları içinde aşağı doğru hareket ettirerek darbe etkisi sağlamaktadır. Öğütme bilyelerinin kabın içinde serbestçe hareketlerine ve kap duvarlarını etkilemeleri de çarpma etkisi olarak tanımlanmaktadır.

- Artritör değirmenler

Klasik bir bilyeli değirmen olan atritör tipi değirmenler, küçük bilyelerle yarıya kadar doldurulmuş ve iç içe geçmiş iki ve bir seri karıştırma kolları monte edilen bir şafttan oluşmaktadır. Düzenek, birbirlerine dik açılarda sürekli dönen şaftın üzerinde bulunan kolların bilyeleri hızla hareket ettiği bir sistemdir. Üzerinde kollar bulunan şaft hızla dönerken, iç kaptaki bulunan bilye ve tozlar hareket etmektedir. Bilyelerin hızla hareket etmesi sırasında meydana gelen bilye-toz-bilye, bilye-toz-kap duvarı arasında kalan tozlar, öğütme süresine bağlı olarak öğütülmektedir. Bu değirmenler 0.5-40 kg kapasitelidir (Özyürek 2002).



BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. GİRİŞ

Bu çalışma, dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, matris malzemesi olarak kullanılan gaz atomize AA7075 alaşım tozları ön şekillendirilip sinterlendikten sonra, sertlik ve aşınma davranışları belirlenmiştir. Daha sonra farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak, mikro yapıda meydana gelen ikinci faz çökeltilerin (boyutlarının) alaşımın sertlik ve aşınma davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada ise, matris malzemesi olan AA7075 alaşımına % 1 (% ağırlık) karbon nanotüp (KNT) ilave edilerek, farklı sürelerde mekanik öğütülmüştür. Böylece, öğütme süresinin toz boyutu, sertlik ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenerek deneysel çalışmalarda kullanılan optimum öğütme süresi belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise, bir önceki aşamada belirlenen ideal öğütme süresi kullanılarak mekanik öğütülen kompozit tozlar farklı sürelerde (1, 2, 3 saat) sinterlenerek, ideal sinterleme süresi belirlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise matris malzemesine farklı miktarlarda takviye fazı (KNT) ilave edilerek (önceki aşamalarda belirlenen ideal mekanik öğütme ve sinterleme süresi kullanılarak), kompozitler üretilmiştir. Takviye fazı miktarının mikro yapı sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi belirlenmiştir. Çalışmada uygulanan deneysel aşamalar ve amaçları Çizelge 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Çalışmada uygulanan deneysel aşamalar ve amaçları.

YAPILAN ÇALIŞMA	AMAÇ
<p style="text-align: center;">I. AŞAMA</p> <p>Matris malzemesi olan AA7075 alaşım tozları ön şekillendirilip sinterlendikten sonra sertlik ölçümleri ve aşınma testlerinin yapılması.</p> <p>Matris malzemesine farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma işlemlerinin uygulanması sertlik, yoğunluk ölçümleri ve aşınma testlerinin yapılması.</p>	<p>Takviye fazı ilave edilmeden önce matris malzemesinin sertlik ve aşınma dayanımlarının belirlenmesi</p> <p>Farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonunda oluşan ikinci faz çökeltilerin (boyutlarının) mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisinin belirlenmesi</p>
<p style="text-align: center;">II. AŞAMA</p> <p>AA7075 alaşımına % 1 (% ağırlık) KNT ilave edilerek farklı sürelerde mekanik öğütülmesi, öğütülen kompozit tozların ön şekillendirilmesi ve sinterlenmesi, sertlik, yoğunluk ölçümleri ve aşınma testlerinin yapılması</p>	<p>Öğütme süresinin toz boyutu, mikro yapı sertlik değerleri ve aşınma dayanımına etkisinin belirlenmesi, bir sonraki aşamada kullanılacak optimum öğütme süresinin belirlenmesi</p>
<p style="text-align: center;">III. AŞAMA</p> <p>AA7075 alaşımına % 1 (% ağırlık) KNT ilave edilerek bir önceki aşamada belirlenen ideal öğütme süresi kullanılarak üretilen kompozit tozların ön şekillendirilmesi, farklı sürelerde sinterlenmesi, sertlik, yoğunluk ölçümleri ve aşınma testlerinin yapılması</p>	<p>Sinterleme süresinin mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisinin ve bir sonraki aşamada kullanılacak ideal sinterleme süresinin belirlenmesi</p>
<p style="text-align: center;">IV. AŞAMA</p> <p>AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek önceki aşamada belirlenen ideal sürede mekanik öğütülerek üretilen kompozit tozların ön şekillendirilmesi, önceki aşamada belirlenen ideal sinterleme süresinde sinterlenmesi, sertlik ve yoğunluk ölçümleri ve aşınma testlerinin yapılması</p>	<p>Matris malzemesine farklı miktarlarda KNT ilave edilen kompozitlerde, KNT miktarının mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisinin belirlenmesi.</p>

6.2. TOZLARIN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan gaz atomize (GA) AA7075 alaşım tozunun (dv 0,5 124 µm) kimyasal bileşimi, Çizelge 6.2’de verilmektedir. Takviye fazı olarak Nanografi firmasından temin edilen % 90 saflıkta 9,5 nm çapında 1,5 µm uzunluğunda çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) kullanılmıştır.

Çizelge 6.2. Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi.

Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Mn	Cr	Al
5,48	2,596	1,568	0,549	0,403	0,03	0,014	0,0125	Kalan

Matris malzemesi ve takviye fazı (% ag.) toz tartımları 1/10000 g hassasiyetindeki hassas terazi kullanılarak hazırlanmıştır.

6.3. MA/MÖ İŞLEMLERİ

MA/MÖ işlemleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan ve görüntüsü Şekil 6.1’de verilen Fritch marka Pulverisite 6 cihazında yapılmıştır. MÖ işlemlerinde, 225 ml kapasiteli paslanmaz çelik öğütme hücresi, 10:1 bilye/toz oranı, 400 rpm öğütme hızı kullanılmıştır. İşlem sırasında tozların ısınmasını engellemek amacıyla, her 20 dakikalık öğütme sonrası cihaz 10 dakika durdurulmuştur. Matris malzemesine ÇDKNT’ler ilave edilmeden önce, yüzey enerjilerini düşürmek ve topaklanmayı engellemek amacıyla ÇDKNT takviye malzemesine etil alkol katılarak (0,1 ml) 5 dakika süre ile mekanik öğütülmüştür. MÖ işleminde İKK olarak %1 sterik asit kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Mekanik alaşımlama/öğütme cihazının görüntüsü.

Mekanik öğütme süresinin toz boyutu sertlik ve aşınma davranışlarına etkisini belirlemek için matris malzemesine % 1 (% ağırlık) takviye malzemesi ilave edilerek altı farklı sürede (20, 40, 60, 80, 100, 120 dak.) mekanik öğütme yapılmıştır.

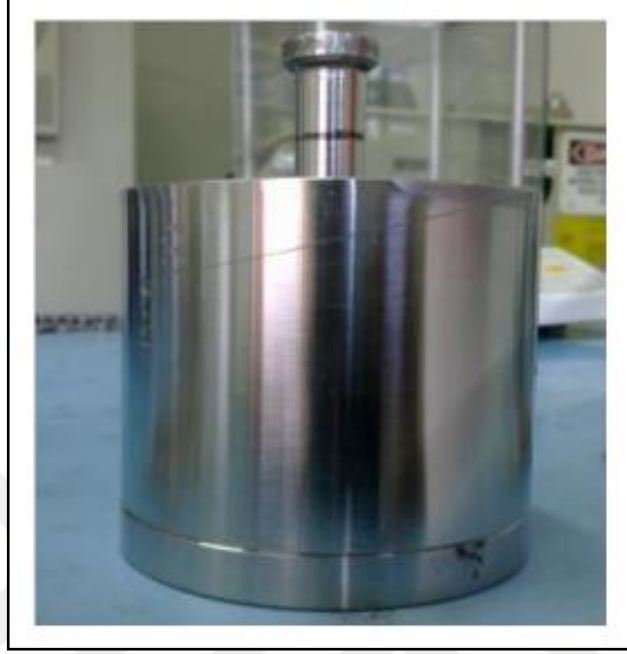
6.4. TOZ BOYUTU ÖLÇÜMLERİ

Farklı sürelerde mekanik öğütülen tozların boyutları, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Malvern instrument marka lazer toz boyut ölçüm cihazında yapılmıştır.

6.5. SOĞUK PRESLEME

Mekanik öğütülen tozlar (Şekil 6.2'de görüntüsü verilen kalıpta), Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan tek eksenli 50 ton yük kapasiteli "HİDROLİK SAN" marka preste şekillendirilmiştir. Soğuk presleme işlemlerinde 520 MPa yük uygulanarak, Ø12x7 mm boyutlarında silindirik

parçalar üretilmiştir. Şekil 6.3’de soğuk presleme işlemlerinde kullanılan presin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 6.2. Soğuk presleme işlemlerinde kullanılan metal kalıp görüntüsü.



Şekil 6.3 Soğuk presleme işlemlerinde kullanılan hidrolik pres görüntüsü.

6.6. SICAK PRESLEME

Soğuk presleme sonrası kalıp içerisinde bulunan toz tanelerinin birbirine daha iyi difüze etmesi için, 300 °C’de 1 saat 2 MPa basınç altında sıcak presleme yapılmıştır.

6.7. SİNERLEME İŞLEMLERİ

Soğuk ve sıcak preslenerek ön şekillendirilen kompozitler, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan vakumlu fırında 10^{-6} milibar vakum altında ve 580 °C’de sinterlenmiştir. Mekanik öğütme süresinin toz boyutu sertlik ve aşınma davranışlarına etkisini belirlemek için (II. Aşama) sinterleme süresi 1 saat iken, sinterleme süresinin sertlik ve aşınma davranışlarına etkisini belirlemek amacıyla (III. Aşama) üç farklı sürede (1, 2, 3 saat) sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtıl işlem fırınının görüntüsü, Şekil 6.4’de verilmektedir.



Şekil 6.4. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtıl işlem fırınının görüntüsü.

6.8. T6 ISIL İŞLEMİ

Farklı yaşlandırma süresi ve sıcaklığının matris AA7075 alaşımının mikro yapı, yoğunluk, sertlik ve aşınma dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. T6 işleminde optimum yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin belirlenmesi amacıyla, 485 °C’de 2 saat solüsyona alınan numuneler, oda sıcaklığına hızlı soğutulmuştur. Yaşlandırma işlemleri üç farklı sıcaklıkta (110, 120 ve 130 °C) ve dört farklı sürede (16, 20, 24, 28 saat) yapılmıştır. Yaşlandırma ısı işlemleri sonrası yapıda meydana gelen ikinci faz çökeltilerin ve boyutlarının, alaşımın sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi incelenmiştir. Yaşlandırma ısı işlemleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan Protherm marka PLF120/27 model ısı işlem fırınında yapılmıştır. Yaşlandırma işlemlerinin yapıldığı fırının görüntüsü, Şekil 6.5’de verilmektedir.



Şekil 6.5. Yaşlandırma ısı işlemlerinin yapıldığı fırın görüntüsü.

6.9. METALOGRAFİK İŞLEMLER

Sinterlenen numuneler mikro yapı incelemeleri için standart metalografik işlemler uygulanmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRESI marka MECAPOL P 262 model polisaj cihazında yapılmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler 3 µm elmas pasta ile parlatılarak hazırlanan 95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1 ml HF (Keller's) dağlayıcı ile 15-20 saniye dağlanmıştır.

6.10. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Yoğunluk ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRECISA XB200 h marka maksimum 220 g ağırlık ölçebilen 1/10000 g hassasiyetli yoğunluk ölçüm cihazında, Arşimet prensibine göre yapılmıştır.

6.11. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Sertlik ölçümleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 6.6'da verilen Shimadzu marka mikro sertlik ölçüm cihazında, 0.2 N yük altında yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde her bir parametreden üçer adet numunenin 10 farklı bölgesinden ölçümler yapılarak, bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.



Şekil 6.6. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazının görüntüsü.

6.12. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM+EDS) İNCELEMESİ

Üretilen numunelerin mikro yapı ve EDS incelemeleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü AR-GE Laboratuar'ında bulunan Zeiss marka Ultra/Plus (FEG) model tarama elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır.

6.13. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

Yapıda oluşan fazların belirlenmesi amacıyla, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü AR-GE Laboratuar'ında bulunan Rigaku marka XRD cihazında X-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri yapılmıştır.

6.14. AŞINMA TESTLERİ

Aşınma testleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuarında bulunan ve şematik görüntüsü Şekil 6.7'de verilen standart pin-on disk tipi aşınma cihazında yapılmıştır. Aşınma testlerinde 1 ms^{-1} kayma hızı, 30 N yük ve beş farklı kayma mesafesi (500, 100, 1500, 2000 ve 2500 m) kullanılmıştır. Aşınma testlerinde, sonuçlarının güvenilirliğinin artırılması için tüm parametrelerde

üçer numune test edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarının belirlenmesinde, 1/10000 g hassasiyetindeki hassas terazi kullanılmıştır. Aşınma testlerinde, test öncesinde aşındırıcı disk ve numune yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir. Aşınma testlerinde karşılık malzemesi olarak, Ø230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde AISI 4140 çelik disk kullanılmıştır. Aşınma testleri, ASTM-G99-05 standardına göre yapılmıştır. Aşınma oranlarının hesaplanmasında, Eşitlik 6.1’de verilen denklem kullanılmıştır.

$$W_a = \frac{\Delta G (g)}{d.P.S. \left(\frac{g}{cm^3} \cdot N.m \right)} \quad (6.1)$$

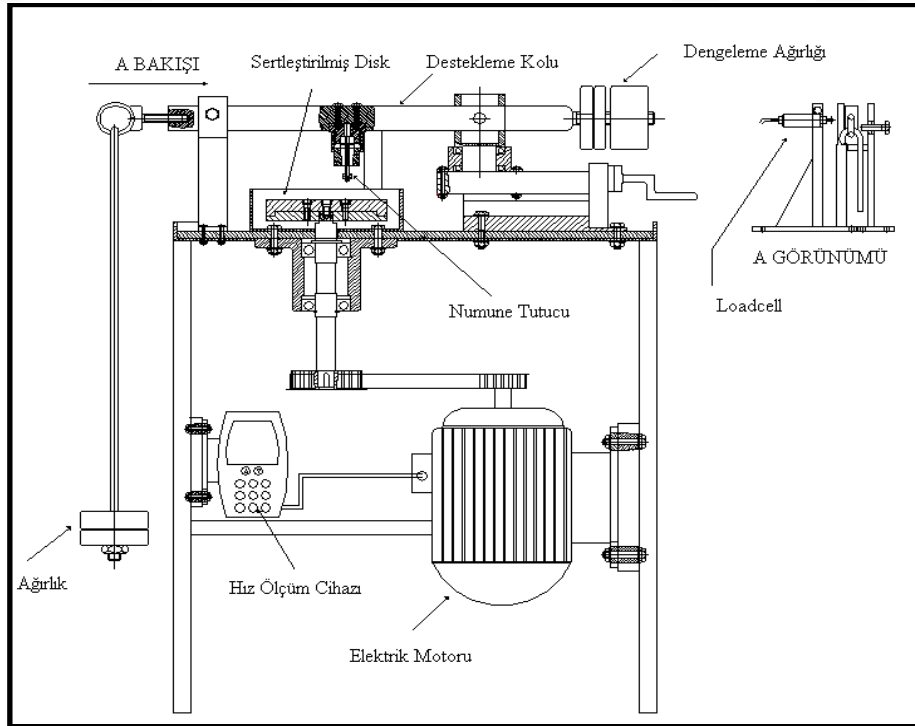
Wa: Aşınma oranı (mm³/Nm)

ΔG: Ağırlık kaybı (g)

P : Yükleme ağırlığı (N)

S : Kayma yolu (m)

d : Yoğunluk (g/cm³) olarak verilmiştir.



Şekil 6.7. Standart pin-on-disk tipi aşınma cihazının şematik görüntüsü.

BÖLÜM 7

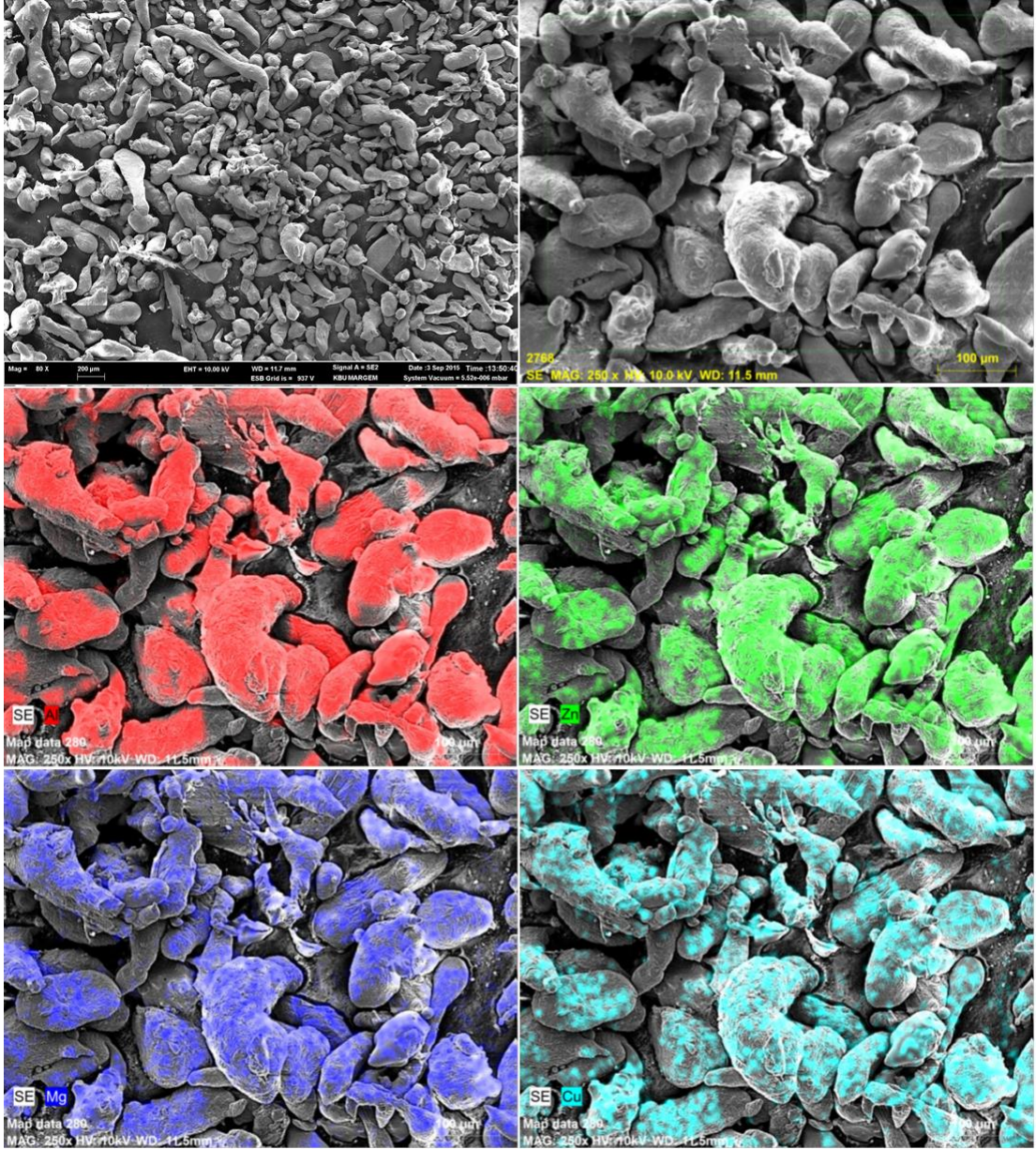
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Mekanik alaşımlama yöntemi ile AA7075-Karbon nanotüp takviyeli metal matrisli kompozit üretimi, karakterizasyonu ve aşınma davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular; mikro yapı incelemeleri, XRD incelemeleri, yoğunluk ölçümlerinin değerlendirilmesi, sertlik sonuçlarının değerlendirilmesi, aşınma test sonuçları ve değerlendirilmesi ve aşınma yüzeyi SEM görüntülerinin incelenmesi, başlıkları altında verilmiştir.

7.1. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

7.1.1. Matris Malzemesinin Mikro Yapı İncelemeleri

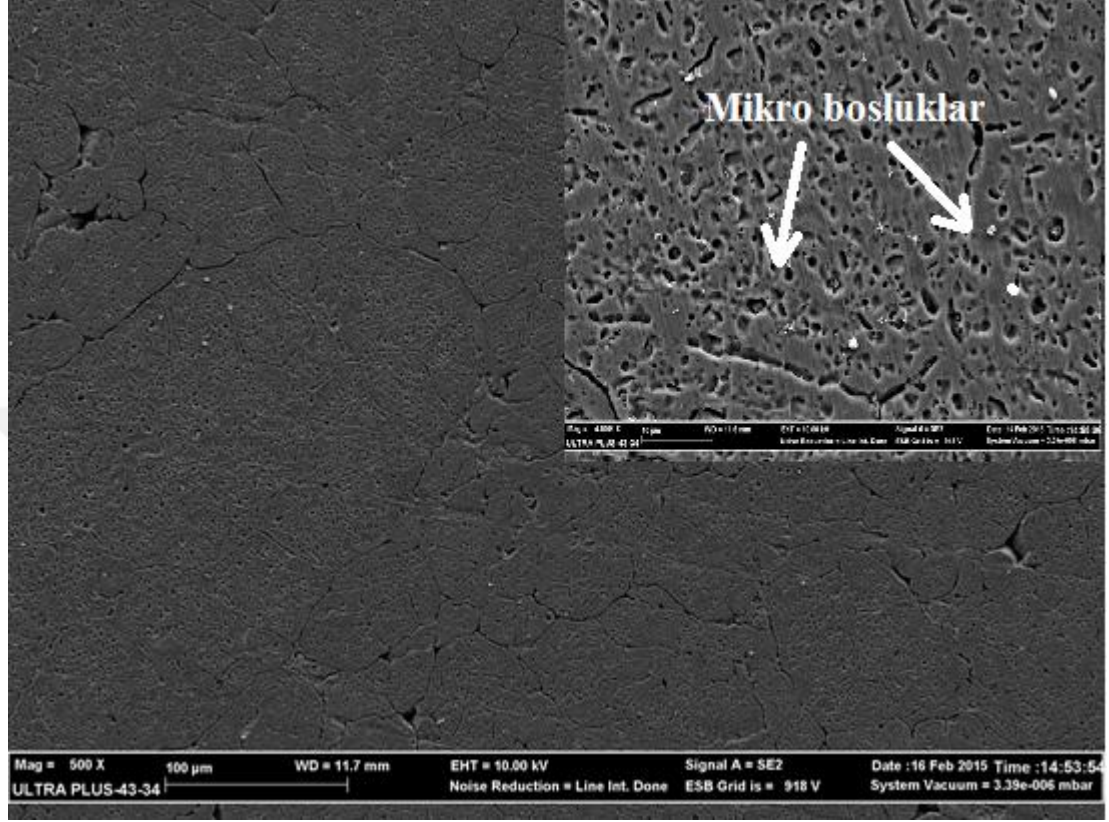
Şekil 7.1’de Matris malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşımı tozlarının SEM görüntüsü ve EDS sonuçları verilmektedir.



Şekil 7.1. AA7075 alaşımı tozların SEM görüntüsü ve EDS sonuçları.

Şekil 7.1’de verilen SEM görüntüsünde, Al toz tanelerinin küresel yapılı toz taneleri yanı sıra, pulcuk ve lamel şekilli tozlarında olduğu görülmektedir. Alaşımın kimyasal bileşiminde bulunan Zn, Mg ve Cu elementlerinin yapıda homojen bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. AA7075 alaşımı (başlangıç malzemesi) tozların boyutu 124 µm (dv 0,5) olarak ölçülmüştür.

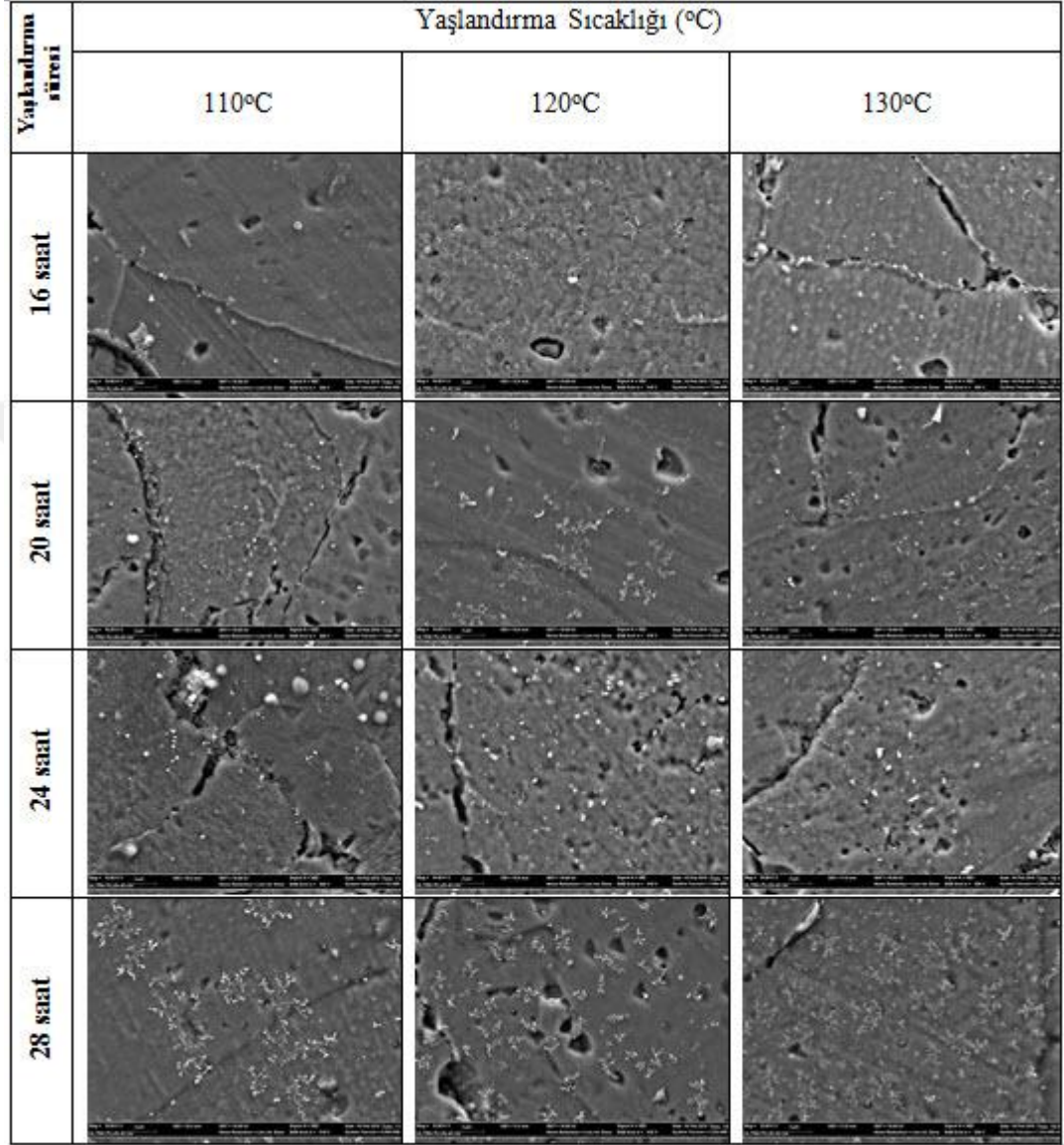
Şekil 7.2’de ön şekillendirme sonrası sinterlenen numunelerin T6 ısıl işlemi öncesi SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 7.2. AA7075 alaşımının T6 ısıl işlem öncesi SEM görüntüsü.

Şekil 7.2’de verilen mikroyapı SEM görüntüsü incelendiğinde, sinterleme işlemi sonrası oluşan tane sınırları net olarak görülebilmektedir. Ayrıca, toz metalurjisi ile üretilen parçaların yapısında oluşması beklenen (özellikle tane sınırlarında) büyük gözeneklerin yapıda olmadığı da anlaşılmaktadır. Katı hal sinterleme işleminde itici güç, yüzey enerjisinin azaltılmasıdır. Özellikle küçük boyutlu tozlar kullanılarak üretilen ön şekillendirilmiş parçaların sinterlenmesi, yüzey enerjisinin azaltılması açısından önemlidir. Sinterleme sırasında sıcaklığın artmaya başlaması ile meydana gelen rastgele atom hareketliliği ile mikro yapıdaki boşluklar doldurulmaktadır. Yüzey taşınım ve hacim taşınım mekanizmaları sinterlenen parçanın mikro yapısındaki gözenekliliğin azaltılmasındaki önemli etkenlerdir. Bu nedenle Şekil 7.2’deki SEM görüntüsünden, AA7075 alaşımının sinterleme sıcaklığının ve süresinin yeterli olduğu net olarak anlaşılmaktadır.

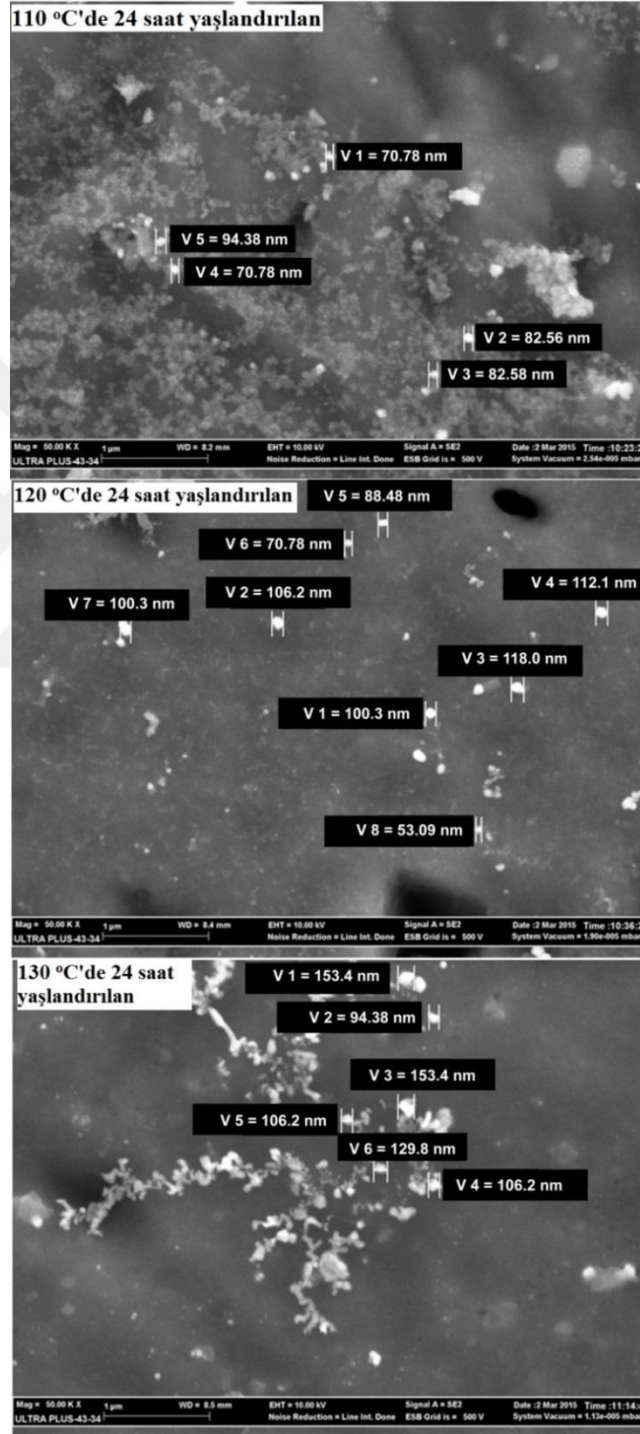
Şekil 7.3' de farklı sürelerde ve sıcaklıklarda yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapı SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 7.3. Farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapı SEM görüntüleri.

Şekil 7.3'de verilen mikro yapı SEM görüntülerinde, yaşlandırma sonucu yapıda oluşturulan çöktürler net olarak görülebilmektedir (beyaz noktalar). Ayrıca, yaşlandırma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak çöktürlerin boyutlarında bir değişim olduğu ve çöktürlerin hem tane sınırlarında hem de tane içlerinde olduğu da gözlenmektedir. Abolhasani vd., yaptıkları bir çalışmada, farklı sıcaklıklarda haddelenen AA7075 alaşımında, farklı intermetaliklerin hem tane içlerinde hem de

tane sınırlarında oluştuğunu belirtmektedir (Abolhasani, vd., 2012) Yaşlandırma ile yapıda oluşturulan çökeltilerin boyutlarındaki değişimin daha iyi anlaşılabilmesi için, üç farklı sıcaklıkta (110, 120 ve 130 °C) 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapı SEM görüntüleri Şekil 7.4'de verilmektedir.

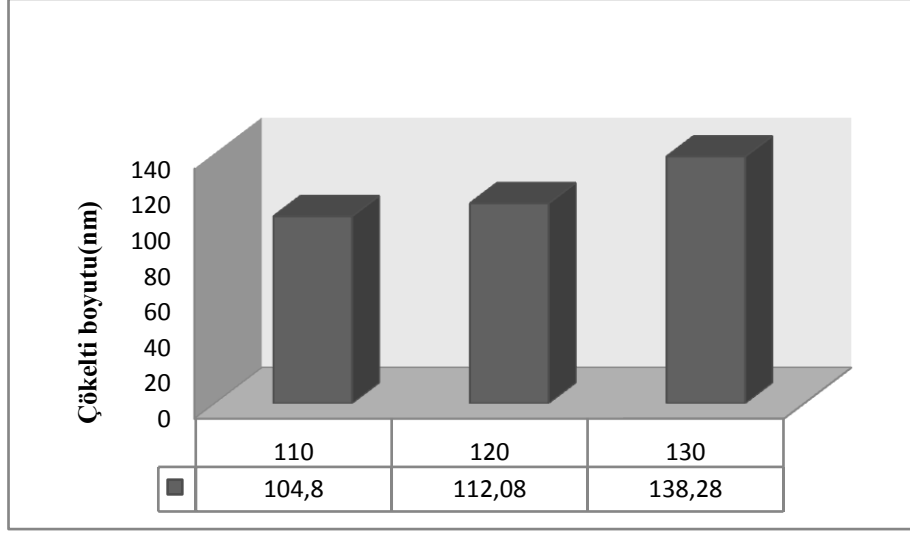


Şekil 7.4. Üç farklı sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapı SEM görüntüleri.

Şekil 7.4’de verilen SEM görüntülerinde üç farklı sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapısında oluşan ikinci faz çökeltilerin, yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak boyutsal değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. 110 °C de yaşlandırılan numunelerde çökelti boyutu küçükken (104,8 µm), sıcaklıktaki artışa bağlı olarak çökelti boyutları artmaktadır (138,28 µm) . Yaşlandırma ısı işlemi ile yapıda oluşturulan ikinci faz çökeltilerin, aşırı doymuş katı eriyikte meydana gelen bir dizi ayrışma sonucunda meydana geldiği bilinmektedir (LaDelpha vd., 2009; Peng vd., 2012; Tang vd., 2012; Viana vd., 1999; Campbell vd., 2006)

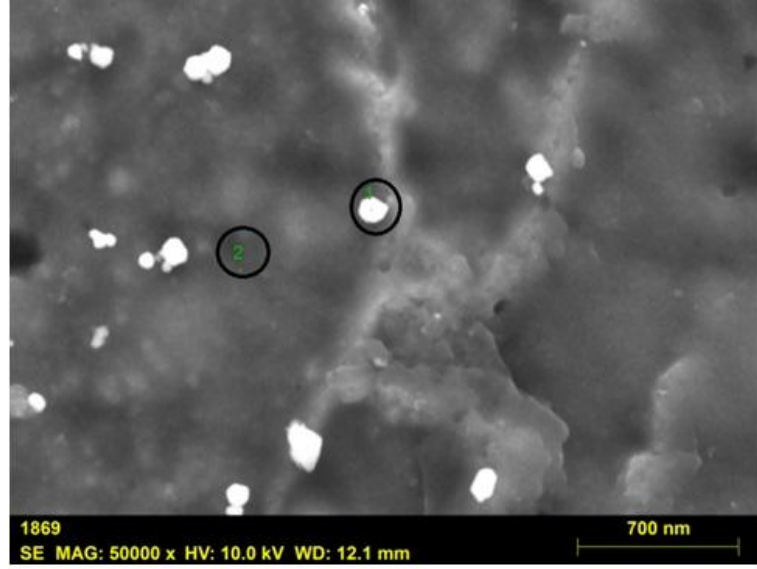
α – aşırı doymuş katı eriyiği → Guinier-Preston bölgeleri(GP zones) → Yarı kararlı η (MgZn₂) fazı → Kararlı η (MgZn₂) fazı

Aşırı doymuş katı eriyik, solüsyona alma işleminden sonra oda sıcaklığına hızlı soğutma ile elde edilmektedir. Yaşlandırma ile yapıda GP bölgeleri (GP1 ve GP2) ve yarı kararlı η (MgZn₂) fazı oluşmaktadır. Yapıda oluşan η fazının, alaşımın mekanik özellikleri üzerinde çok önemli bir rol oynadığı iyi bilinmektedir (Fakıoğlu ve Özyürek, 2014). Endüstriyel alaşımlarda ihtiyaç duyulan yüksek performansın geliştirilmesinin önemi, alaşımın mekanik özellikleri (özellikle aşınma dayanımı) ve uygulanan işlem arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 7.5’de, üç farklı sıcaklıkta (110, 120 ve 130 °C) 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının mikro yapısında oluşan ikinci faz çökelti boyutları verilmektedir.



Şekil 7.5. Farklı sıcaklıklarda 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında ortalama çökelti boyutları.

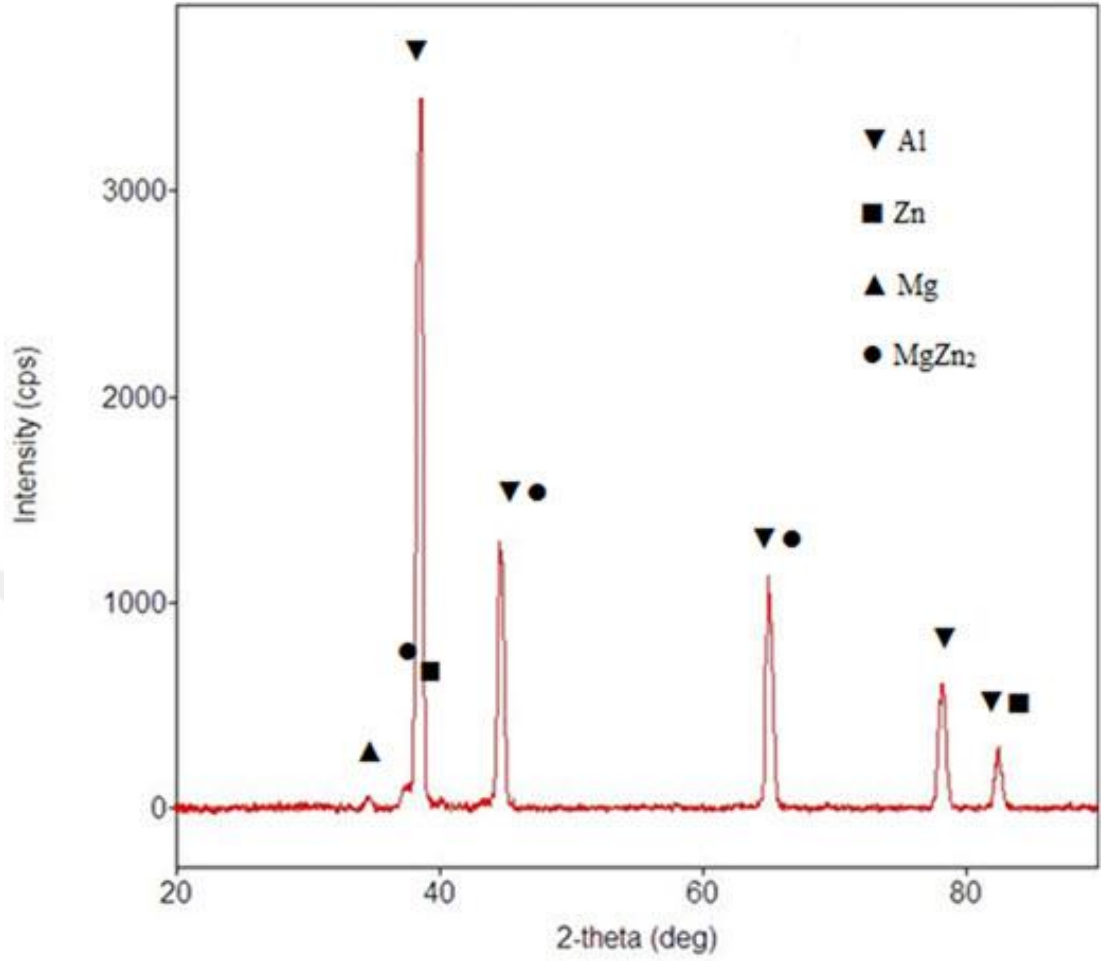
Mikro yapı SEM görüntüleri üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, en büyük çökelti boyutu 130 °C'de 24 saat yaşlandırılan numunelerde ölçülürken (138,28 µm), bunu sırasıyla 120 °C'de 24 saat (112,08 µm) ve 110 °C'de 24 saat yaşlandırılan numuneler takip etmektedir. 130 °C'de 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında, çökeltilerin boyutlarının arttığı ve bölgesel olarak yoğunlaştıkları gözlenmektedir. Mikro yapıda oluşan bu çökeltilerin daha net tanımlanabilmesi için çökeltilerden elde edilen EDS analizi sonucu, Şekil 7.6'da verilmektedir.



Atomic percent (%) spectrum	Al	Cu	Mg	Zn
1	54.84	37.18	4.17	3.82
2	92,36	1.73	2.85	3.06

Şekil 7.6. 130 °C’de 24 saat yaşlandırılan AA7075 mikro yapısında meydana gelen çökeltilerin EDS sonucu.

Şekil 7.6’da verilen mikro yapı SEM görüntüsünde, mikro yapıda oluşan çökeltinin (1) Al, Cu, Zn, ve Mg elementinden oluştuğu anlaşılmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, yapıda oluşan $MgZn_2$ çökeltileri $Mg(ZnCuAl)_2$ olarak tanımlanmaktadır (Reda vd., 2008). Matristen elde edilen EDS (2) sonucunda ise ana fazın Al olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 7.7’ de 130 °C’de 24 saat yaşlandırılan numunenin XRD sonucu verilmektedir. Yapılan EDS ve XRD incelemeleri sonrasında yapı içerisinde Al, Zn, Mg, Cu elementlerine ait piklerin yanı sıra yapıda yaşlandırma işlemleri sonucunda $MgZn_2$ çökeltilerinin oluştuğu net olarak görülebilmektedir.



Şekil 7.7. 130 °C’de 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımının XRD sonucu

7.1.2. Öğütme Süresinin Mikro Yapıya Etkisi

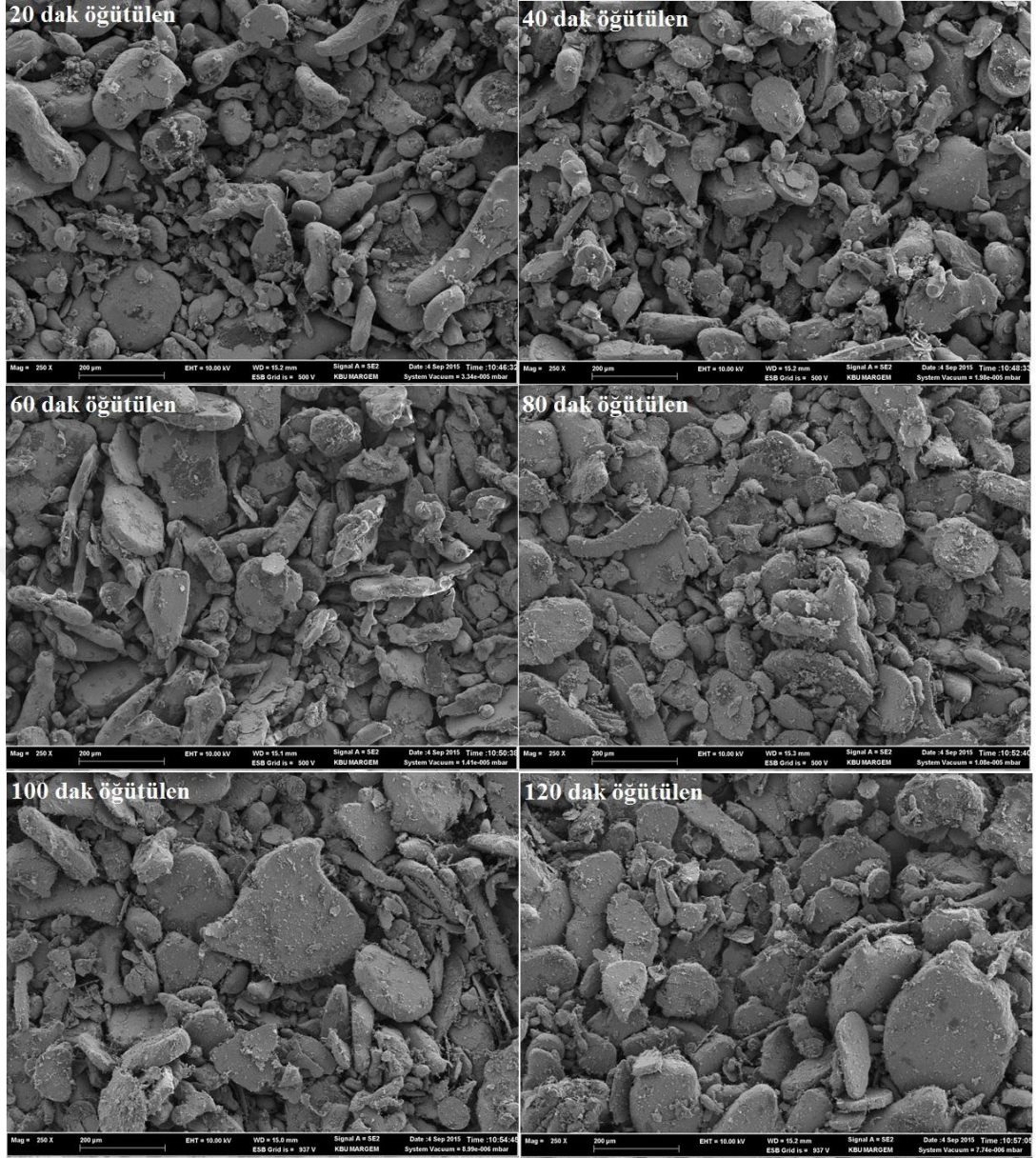
Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alaşımına KNT (% 1) ilave edilerek, 6 farklı öğütme süresi sonrası üretilen kompozit tozların toz boyutundaki değişim, Çizelge 7.1’ de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Farklı sürelerde öğütülen AA7075-KNT kompozit tozların toz boyut analiz sonuçları.

	20 dak.	40 dak.	60 dak.	80 dak.	100 dak.	120 dak.
d (v 0.5)µm	141	147,81	157,29	159,67	161,90	155,84

Çizelge 7.1’ de verilen toz boyutu ölçüm sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, başlangıç boyutu 124 µm olan alaşım tozlarının boyutu, öğütme süresindeki artışla (20-100

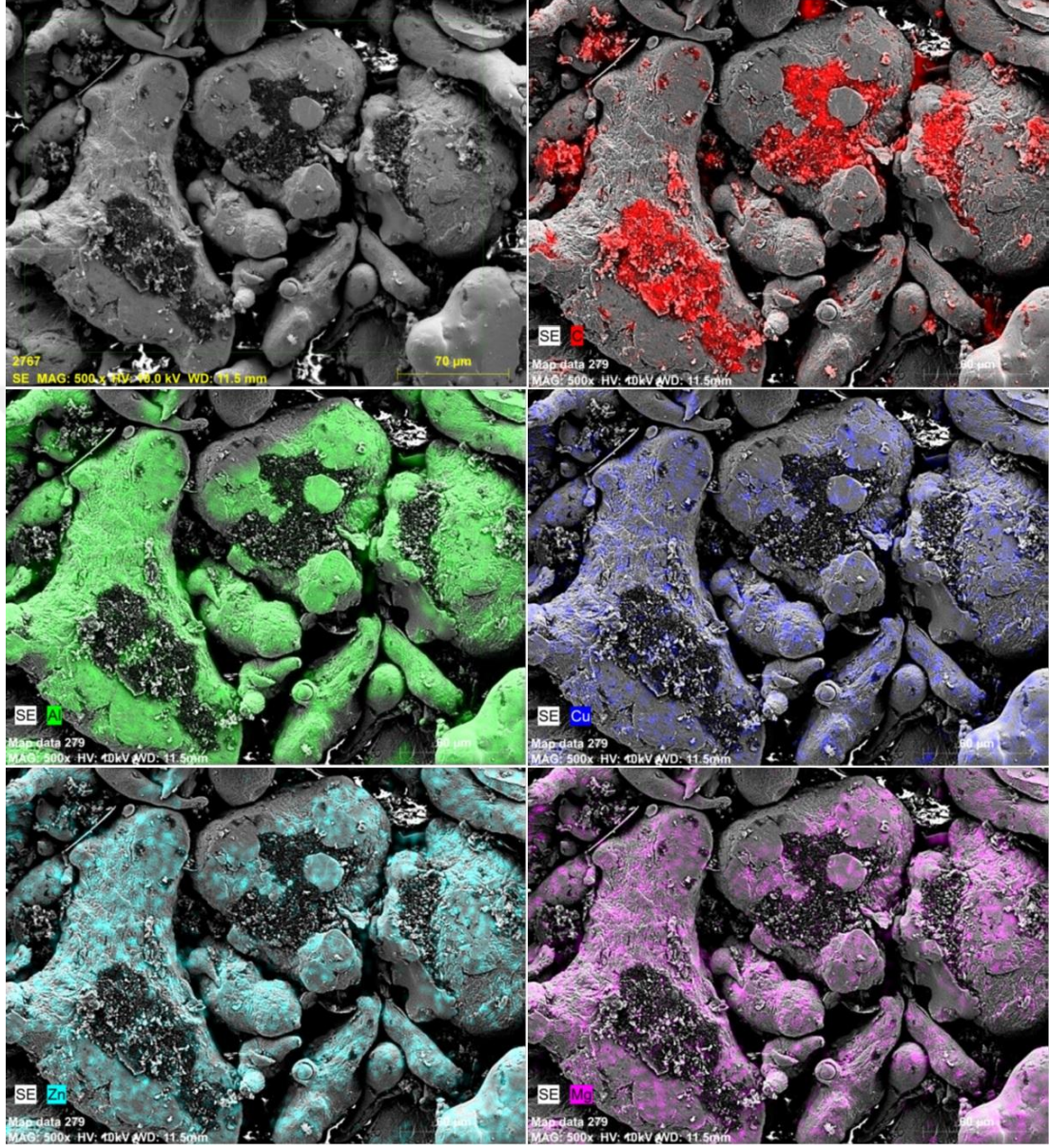
dakika) birlikte artmaktadır. 120 dakika öğütme süresi sonunda ise boyutunun azalmaya başladığı görülmektedir. Şekil 7.8’de verilen kompozit tozların SEM görüntüleri incelendiğinde de, toz boyutu artışı görülebilmektedir. MA/MÖ işlemi sırasında öğütme haznesi içerisinde bulunan aşındırıcı (öğütücü) bilyeler ile tozlar yüksek enerjili öğütme sırasında sürekli olarak ezilme, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi kırılma ve yeniden soğuk kaynaklanma meydana gelmektedir. Toz malzemeler, öğütücü bilyeler ve kap arasında, yüksek enerjili öğütme etkisi ile sürekli deformasyona uğramaktadır. MA/MÖ işleminin ilk aşamasında, şiddetli plastik deformasyonla parçacıkların yüzey hacim oranları artarak, başlangıçta küresel olan toz taneleri yassılaşıma öğütme etkisi ile sürekli temiz yüzeyler oluşmaktadır. İşlemin ikinci aşamasında, soğuk kaynaklanma meydana gelerek toz boyutunda bir artış meydana gelmektedir. Sürekli deformasyon etkisi ile deformasyon sertleşmesine maruz kalan tozlar, işlemin devam etmesi ile kırılarak küçülmektedir (Suryayana, 2001). Çizelge 7.1 de verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi, 100 dakika öğütme ile maksimum toz boyutuna ulaşıldıktan sonra, işlemin devam etmesi ile (120 dakika) deformasyon sertleşmesine maruz kalarak kırılmaktadır. Şekil 7.8’ de farklı sürelerde mekanik öğütülen AA7075-%1 KNT kompozit tozların SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.8. Farklı sürelerde öğütülen AA7075-% 1 KNT kompozit tozların SEM görüntüleri.

Şekil 7.8 de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, küresel başlangıç tozlarının MÖ işlemi sırasında bilye-toz-bilye ve bilye-toz-kap duvarı çarpışması sonucunda yassılaştığı (flake) görülmektedir. MÖ süresindeki artış nedeniyle şiddeti artan deformasyon, tozlarda soğuk kaynaklanma ve deformasyon sertleşmesi meydana gelmektedir. Sünek-gevrek alaşımlama mekanizmasında, sünek bileşenlerin öğütmenin ilk aşamasında yassılaşıyor ve soğuk kaynaklanarak toz boyutunda artışa sebep olurken, tozlar kritik bir büyüklüğe ulaştığında kırılmanın gerçekleştiği ve toz boyutunda azalma meydana geldiği, daha önce yapılan bir çalışmada belirtilmektedir.

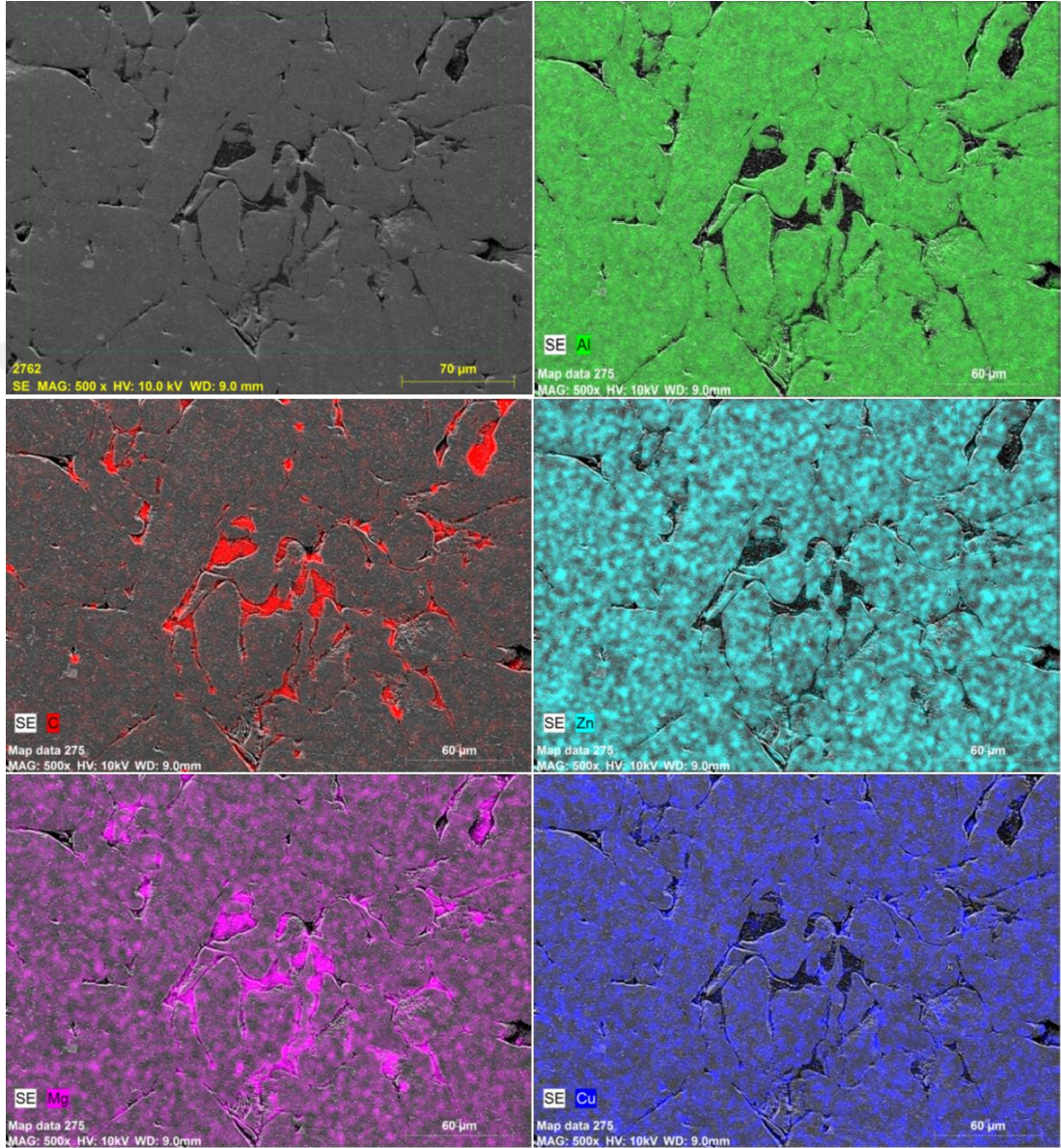
(Suryayana, 2001). Şekil 7.9’da AA7075- % 1 KNT ilave edilerek 20 dakika mekanik öğütülen kompozit tozların EDS (mapping) sonuçları verilmektedir.



Şekil 7.9. AA7075-% 1 KNT ilave edilerek 20 dak. mekanik öğütülen tozların SEM görüntüsü ve EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 7.9’da verilen EDS sonuçlarında, kompozit tozlarda matris yapı içerisinde bulunan Zn, Mg ve Cu gibi elementlerin yapıda homojen olarak bulunduğu ve takviye fazı olarak alaşıma ilave edilen KNT toz parçacıklarının matris toz üzerine saplandığı (bazı bölgelerde aglomere olduğu) görülmektedir. EDS sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, KNT aglomere olması engellenememiştir. Bu durum daha önce

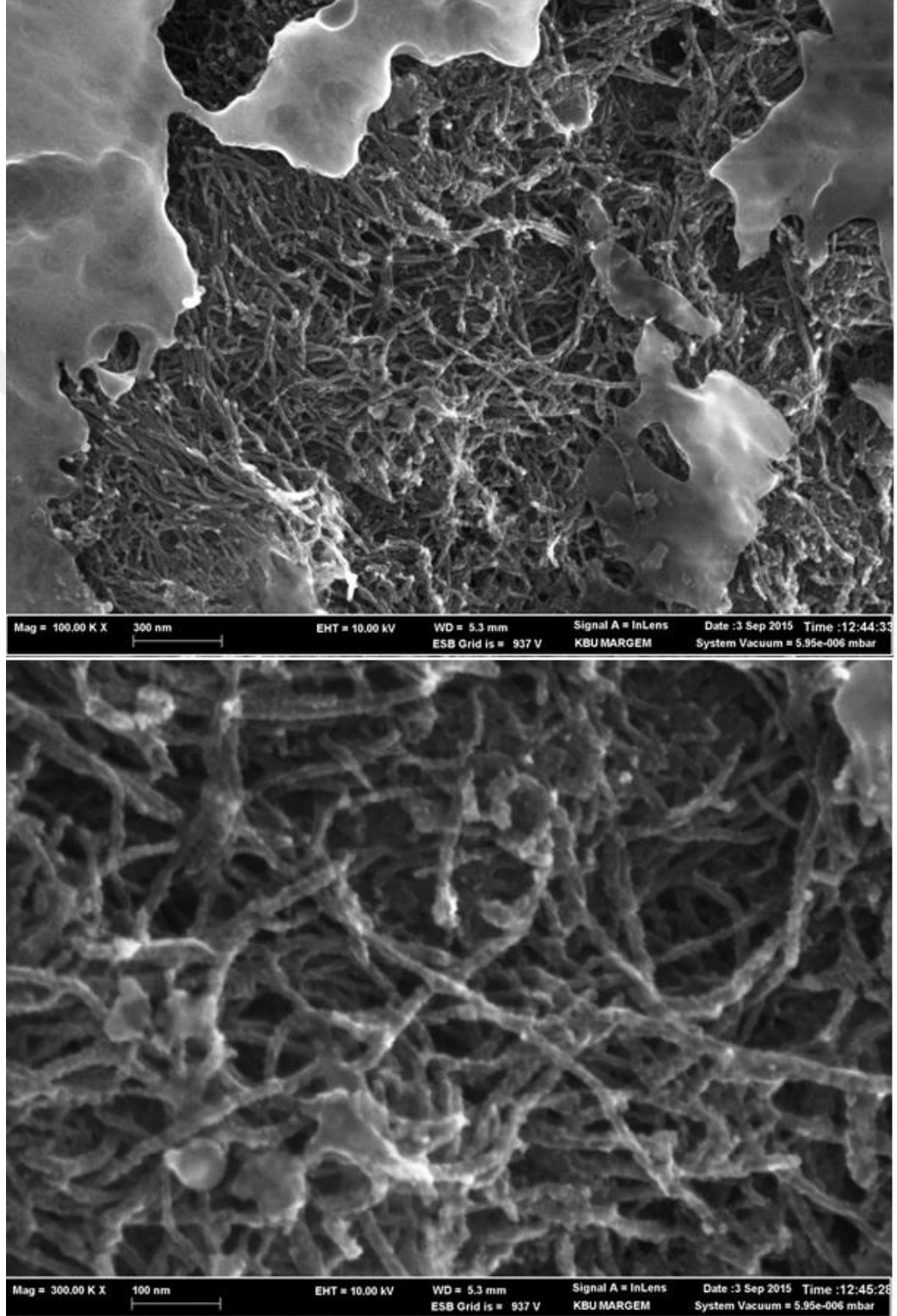
yapılan bazı çalışmalarda da rapor edilmektedir (Choi vd., 2013; Estrade-Guel vd., 2013). Şekil 7.10'da 120 dak mekanik öğütülen ve sinterlenen kompozitlerin SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu verilmektedir.



Şekil 7.10. AA7075- % 1 KNT ilave edilerek 120 dak. öğütülen ve 1 saat sinterlenen AMK'lerin SEM görüntüsü ve EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 7.10 da verilen EDS sonuçlarında, KNT'lerin yapıda uniform bir dağılım sergilemekle birlikte, özellikle tane sınırlarında yoğunlaştıkları da görülebilmektedir. Tane sınırlarında yoğunlaşan KNT'lerin daha net görülebilmesi için, 120 dakika

mekanik öğütülen kompozit numuneden elde edilen yüksek büyütmeledeki SEM görüntüleri, Şekil 7.11’de verilmektedir.

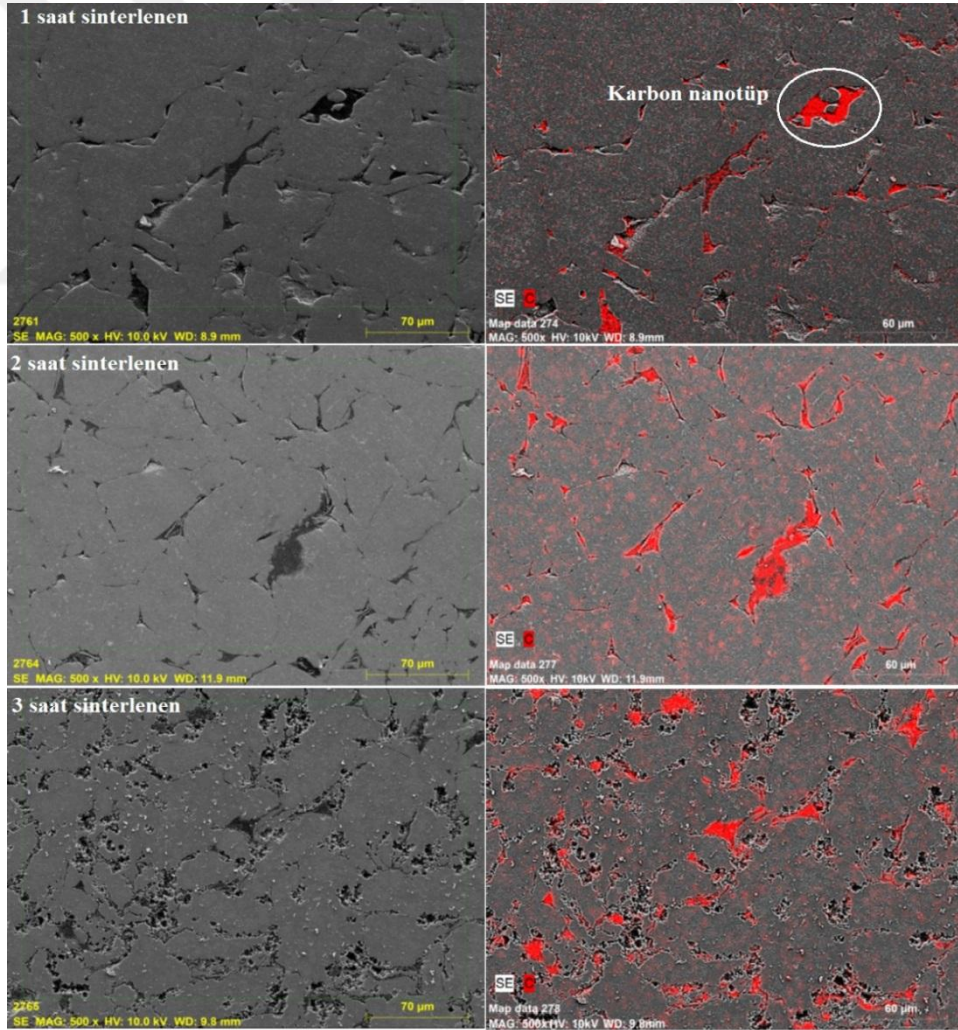


Şekil 7.11. AA7075- %1 KNT ilave edilerek 120 dakika öğütülen ve 1 saat sinterlenen AMK’lerin yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri.

Şekil 7.11’de verilen yüksek büyütmelelerdeki görüntülerinden de anlaşıldığı gibi tane sınırları arasında tipik (saç teli şeklinde) KNT olduğu ve bu bölgelerde takviye fazının aglomere olduğu görülmektedir.

7.1.3. Sinterleme Süresinin Mikroyapıya Etkisi

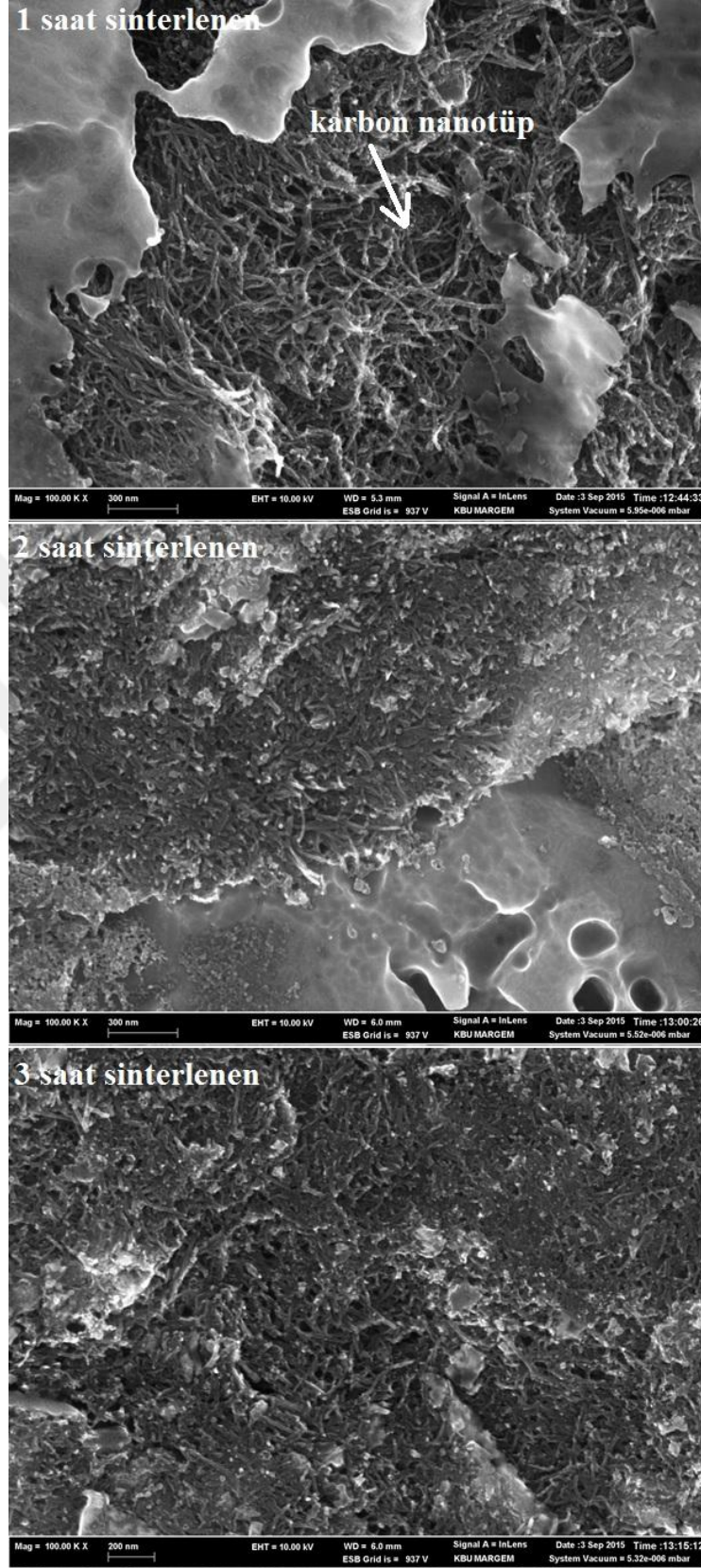
AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek yapılarak bir önceki aşamada belirlenen ideal öğütme süresi kullanılarak (120 dak.) mekanik öğütülen tozlar, ön şekillendirme sonrası ideal sinterleme süresinin belirlenmesi için, 580 °C’de 3 farklı sürede (1, 2 ve 3 saat) sinterlenmiştir. Şekil 7.12’de farklı sürelerde sinterlenen numunelerin SEM görüntüleri ve EDS (mapping) sonuçları verilmektedir.



Şekil 7.12. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek farklı sürelerde sinterlenen kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS (mapping) analizi sonuçları.

Şekil 7.12’de verilen mikro yapı SEM görüntülerinde 1 saat sinterlenen numunelerde KNT’lerin yapıda uniform dağılım sergilediği, bununla birlikte özellikle tane sınırlarında yoğunlaşma olduğu görülmektedir. 2 saat ve 3 saat sinterlenen numunelerde ise hem tane içlerinde hem tane sınırlarında biriken karbon nanotüplerin şeklinin değiştiği daha kalın ve kısa yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca sinterleme süresi arttıkça Al tanelerin küçüldüğü görülmektedir. Farklı sürelerde sinterlenen numunelerde KNT’lerin daha net görülebilmesi için yüksek büyütme elde edilen SEM görüntüleri Şekil 7.13’de verilmektedir.



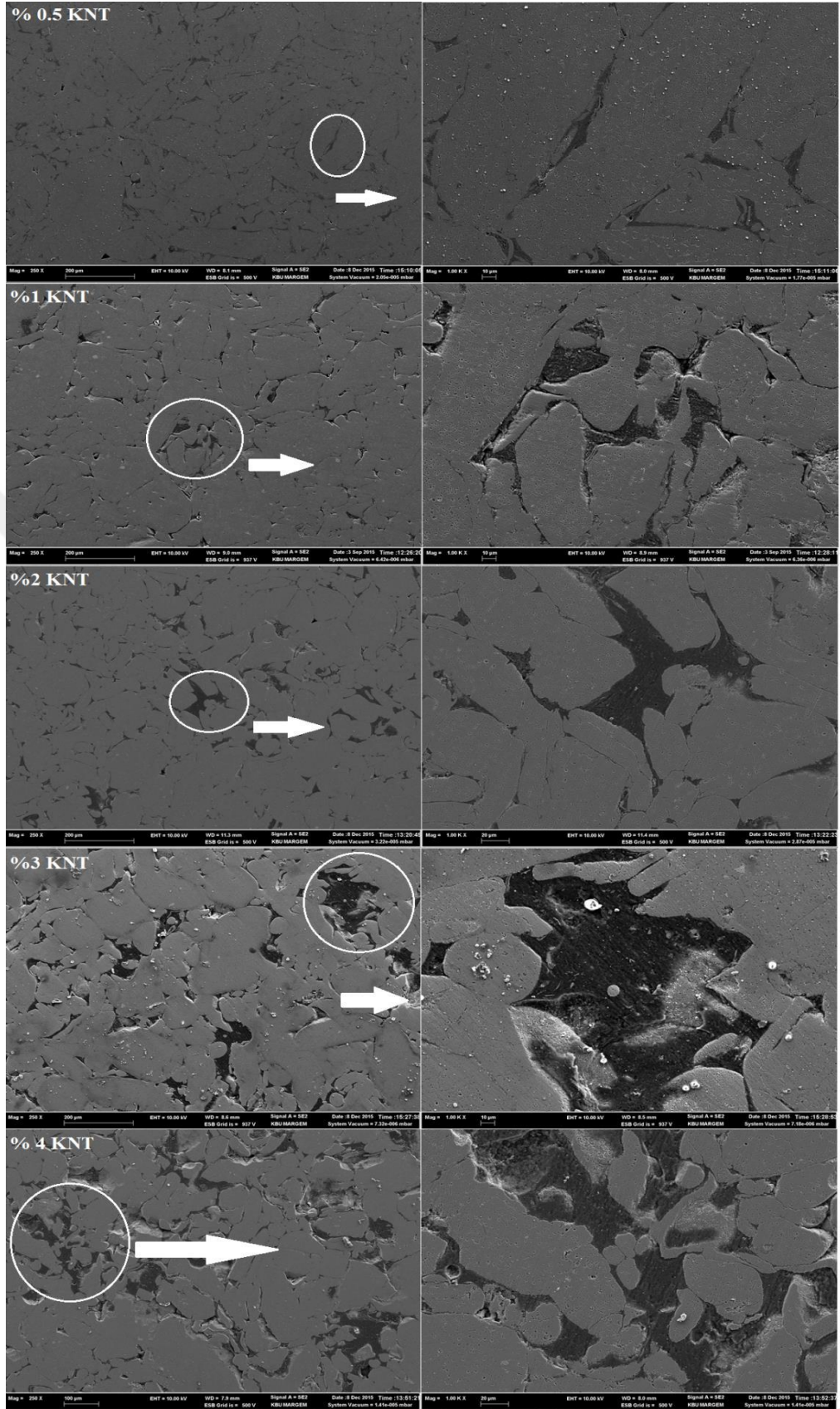


Şekil 7.13. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek farklı sürelerde sinterlenen kompozitlerin yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri.

Şekil 7.13’de verilen yüksek büyütmelelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde, 1 saat sinterlenen numunelerde KNT’lerin ağ şeklinde olduğu görülürken, sinterleme süresi arttıkça tane sınırlarında yoğunlaşan KNT’lerin şeklinin daha kalın, kısa olduğu görülmektedir. Bu durum, sinterleme süresindeki artışla birlikte KNT’lerin arasında birbiri ile daha kuvvetli bağın oluşması (birbirine kaynaması) olarak açıklanabilir. Ayrıca sinterleme süresi arttıkça kendi aralarında daha kuvvetli bir bağ oluşan KNT’ler α -Al tanelerinin büyümesini engellediği ve bu nedenle 3 saat sinterlenen kompozitlerde α -Al tanelerinin daha küçük olduğu ifade edilebilir.

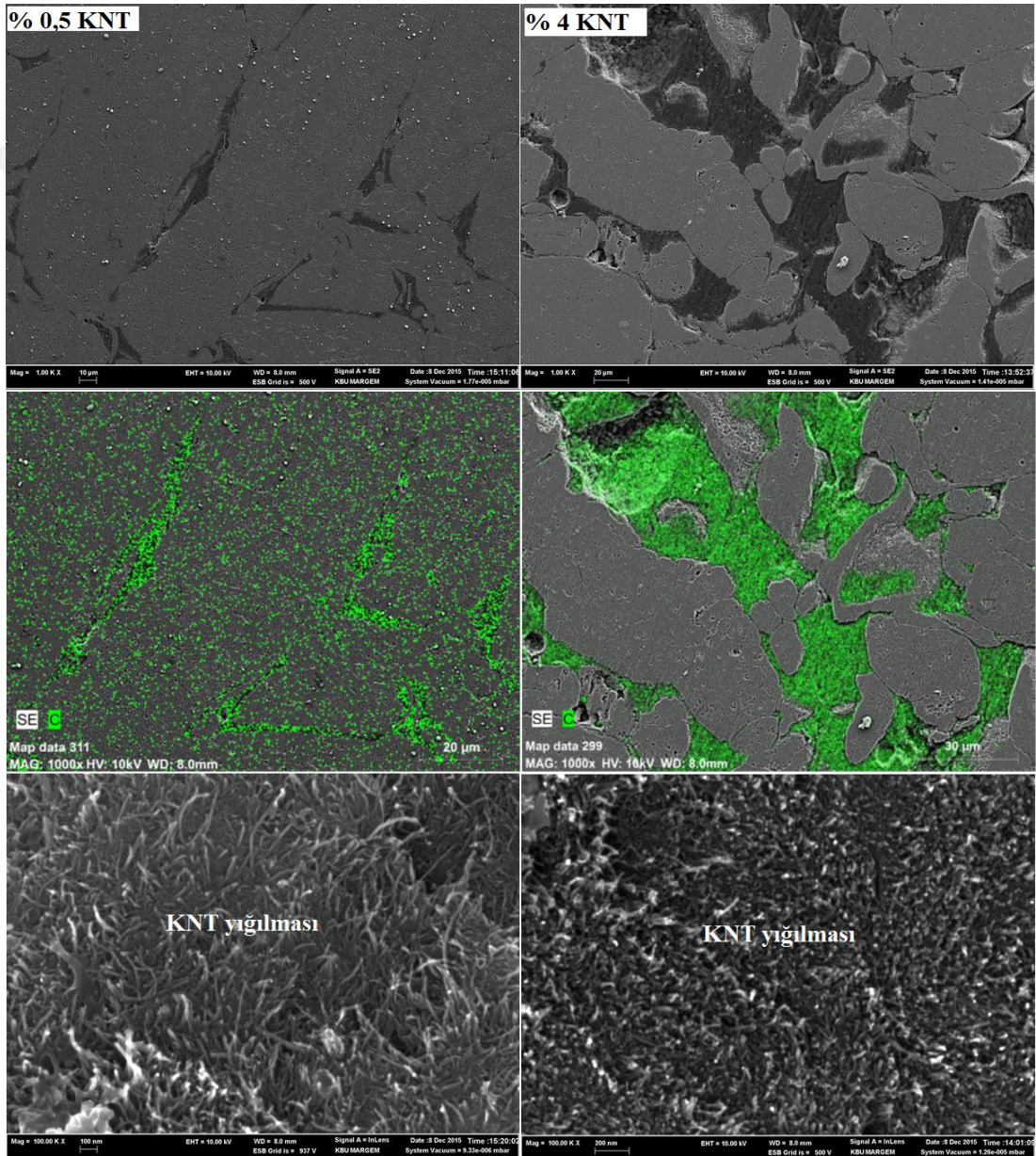
7.1.4. Karbon Nanotüp Miktarının Mikro Yapıya Etkisi

AA7075 alaşımına 5 farklı oranda karbon nanotüp ilave edilerek 120 dak mekanik öğütülmüştür (önceki aşamada ideal olarak belirlenen öğütme süresi). Ön şekillendirme işleminden sonra kompozitler 580 °C’de 10^{-6} milibar vakum altında 1 saat sinterlenmiştir (önceki aşamada ideal olarak belirlenen sinterleme süresi). Şekil 7.14 ve Şekil 7.15’de üretilen KNT takviyeli AMK’lerin SEM görüntüleri ve EDS sonuçları verilmektedir.



Şekil 7.14. Farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen AA7075-KNT AMK'lerin SEM görüntüleri.

Şekil 7.14’de verilen mikro yapı SEM görüntüleri incelendiğinde, % 0,5 KNT ilave edilen kompozitlerde KNT’lerin matris içerisinde homojen bir dağılım sergilediği bununla birlikte, tane sınırlarında bir yoğunlaşma olduğu görülmektedir. Ancak, yapı içerisinde KNT miktarı arttıkça kompozitlerin yapısındaki KNT’lerin homojen dağılımı yerini heterojen dağılıma bırakmaktadır. AA7075 alaşımına ilave edilen takviye elemanının dağılımının net görülebilmesi için % 0,5 ve % 4 CNTs ilave edilmiş kompozitlerin SEM+EDS (mapping) sonuçları, Şekil 7.15’de verilmektedir.

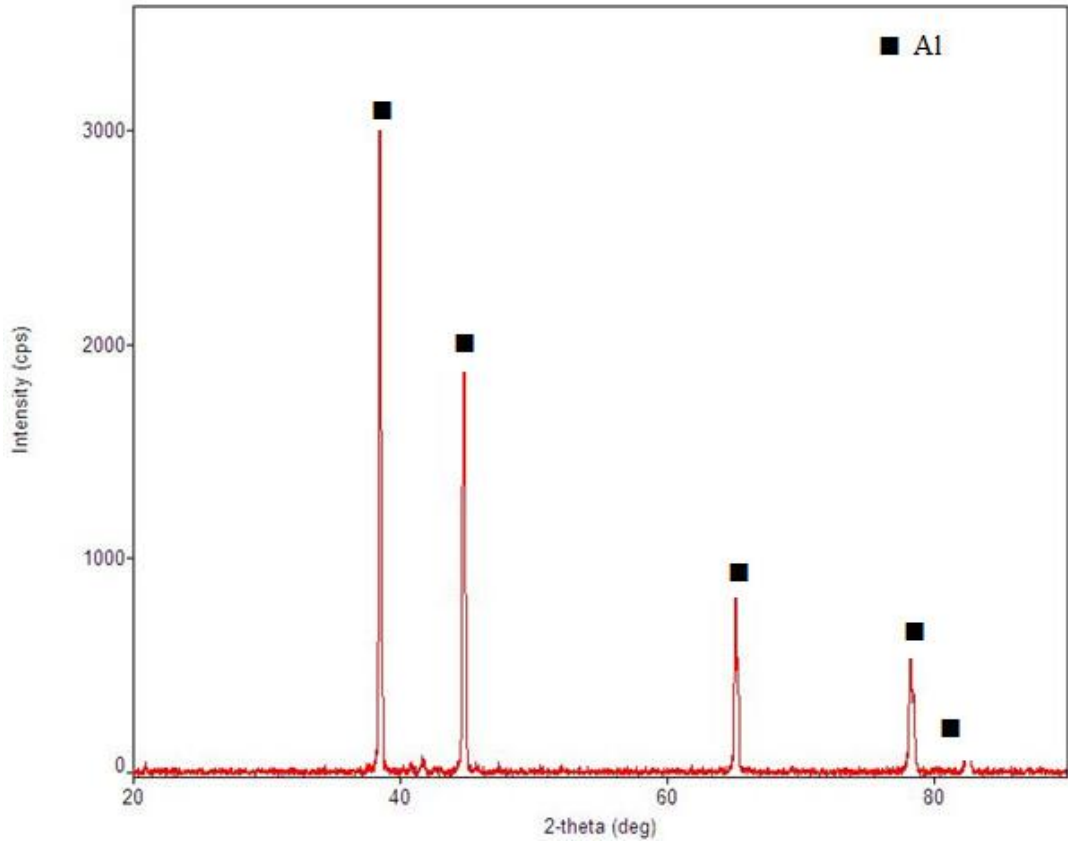


Şekil 7.15. % 0,5 KNT ve % 4 KNT ilave edilen kompozitlerin SEM görüntüsü ve EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 7.15’de verilen (% 4 KNT) EDS (mapping) sonuçlarında KNT’lerin tane sınırlarındaki yoğunlaşması net olarak görülmektedir. KNT takviyeli MMK’lerin üretiminde oluşması muhtemel en temel problem, takviye elemanının yapıda üniform olarak dağıtılamamasıdır. Bunun nedeni, matris malzemesi olarak kullanılan metalik toz boyutunun (μm) takviye fazı olarak kullanılan KNT’lerin boyutundan (nm) daha büyük olmasıdır. Bu durum daha önce yapılan bazı çalışmalarda da vurgulanmaktadır (Deng vd., 2007; Esawi vd., 2007; Liu vd., 2012).

7.2. XRD İNCELEMELERİ

AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek 120 dak. mekanik öğütülen ve 580 °C’de 1 saat sinterlenen kompozitlerin XRD sonuçları, Şekil 7.16’da verilmektedir.

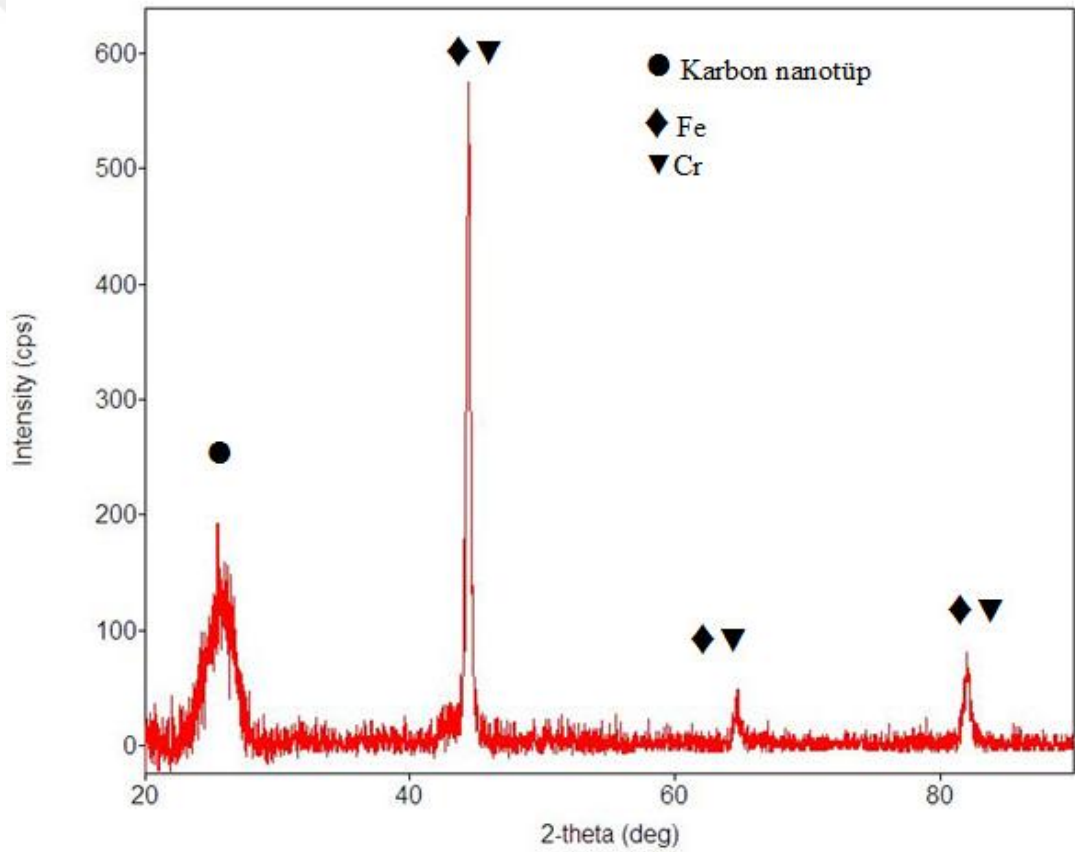


Şekil 7.16. AA7075+% 1 KNT takviyeli kompozitin XRD sonucu.

Şekil 7.16’da verilen XRD sonucunda Al fazı net bir şekilde görülmektedir. Ancak, alaşıma ilave edilen KNT’ler görülememiştir. Bunun nedeni üç şekilde açıklanabilir.

Birincisi, takviye elemanı olarak kullanılan KNT'lerin amorf yapılı olmasıdır. İkincisi, düşük miktarda ilave edilen KNT miktarının XRD'de saptama değerinin altında olmasıdır. Üçüncü nedeni ise, Al piklerinin çok yüksek olması ve KNT piklerinin Al pikleri ile çakışma ihtimalidir. Bu durum, Nasser Al Aqelli vd. yaptığı bir çalışmada vurgulanmaktadır (Al-Aqelli vd., 2013).

KNT piklerinin daha net olarak belirlenebilmesi için takviye fazı olan karbon nanotüplerin (% 90 saflıkta çok duvarlı karbon nanotüp) XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 7.17'de, takviye elemanı olarak kullanılan KNT'lerin XRD sonucu verilmektedir.



Şekil 7.17. Takviye fazı olarak kullanılan KNT'lerin XRD sonucu.

Şekil 7.17'de takviye fazı olarak kullanılan KNT'lerin (% 90 saflıkta) XRD sonucu incelendiğinde karbon nanotüpün amorf yapılı olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır. Yapı içerisinde Fe ve Cr (%10 luk kalan kısım) elementlerinin varlığı net bir şekilde görülmektedir.

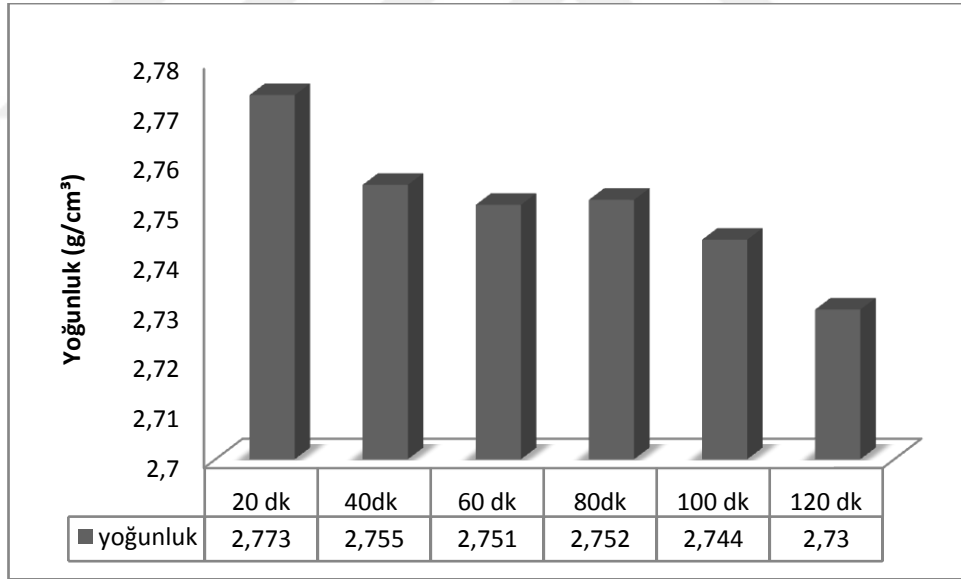
7.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

7.3.1. Matris Malzemesin Yoğunluk Sonuçları

T/M yöntemiyle üretilen AA7075 alaşımının (matris malzemesi) yoğunluk ölçümü sonucu (ortalama) yoğunluğu $2,563 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Şekil 7.2’de verilen mikro yapı görüntülerinden anlaşıldığı gibi, yapı içerisinde oluşan makro ve mikro boşluklar yoğunluğun azalmasına sebep olmaktadır.

7.3.2. Öğütme Süresinin Yoğunluk Üzerine Etkisi

Şekil 7.18’de T/M yöntemi ile üretilen AA7075 alaşımına KNT (% 1) ilave edilerek, 6 farklı mekanik öğütme süresi sonrasında üretilen kompozitlerin yoğunluk ölçüm sonuçları verilmektedir.



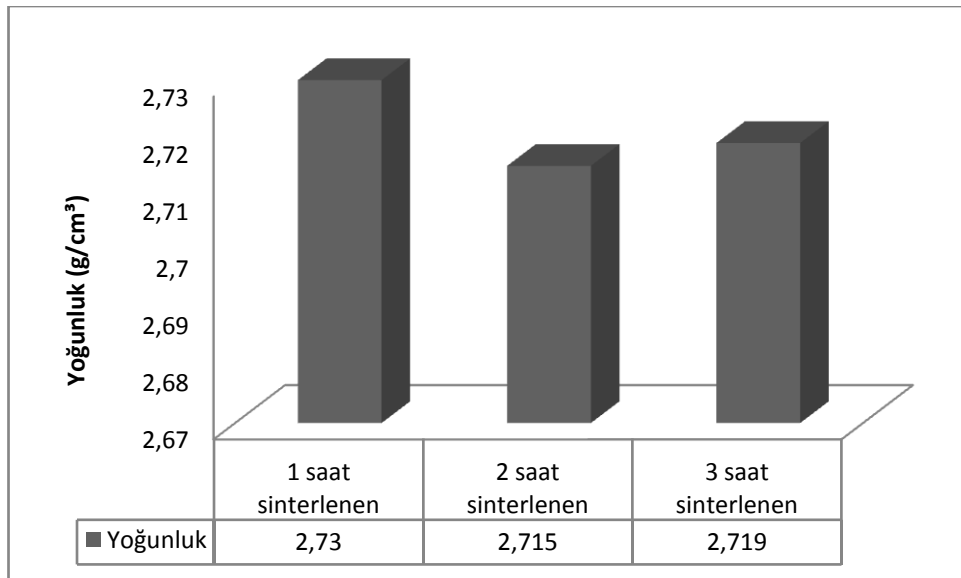
Şekil 7.18. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek farklı sürelerde mekanik öğütülerek üretilen AMK’lerin yoğunluk sonuçları.

Yapılan ölçümler sonucu en yüksek yoğunluk değeri 20 dak. mekanik öğütülen numunelerde ölçülürken, öğütme süresi arttıkça yoğunluk azalmaktadır. Çizelge 7.1’de verilen toz boyutları incelendiğinde, MÖ süresi arttıkça (20-100 dak. arasında) toz boyutunun arttığı 120 dak. MÖ kompozit toz boyutunda azalma olduğu

görülmektedir. (Bölüm 7.1.2.) Bu nedenle (toz boyutundaki artışa bağlı olarak), yoğunluğun azalması beklenen bir sonuçtur. Bununla beraber, 120 dak. mekanik öğütülen tozlardan üretilen kompozitlerin yoğunluğundaki azalma da devam etmektedir (Şekil 7.8). Başka bir ifadeyle, bu sonuçta toz boyutu ile tersi bir olay söz konusudur. Bu olayın nedeni, kısmi yoğunluk artışı ile ilgilidir. Kısmi yoğunluk ile ölçülen yoğunluk, ters orantılı olarak değişmektedir. Kısmi yoğunluk artışıdaki temel belirleyici faktör, tozların yüzey pürüzlülüğündeki artıştır. MA/MÖ sırasındaki artışla birlikte, tozların şekli ve yüzey şartları değişmektedir. Öğütme süresi arttıkça tozların yüzey pürüzlülüğü artarken, ölçülen gerçek yoğunluk azalmaktadır. Şekillendirilen tozlarda kısmi yoğunluktaki artışın engellenmesinde, iki etkin yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, tozların şekillendirilmesi sırasında birbiri üzerinden kolay kayması için yağlayıcıların kullanılması, ikincisi de, uygulanan presleme kuvvetinin artırılmasıdır.

7.3.3. Sinterleme Süresinin Yoğunluk Üzerine Etkisi

Şekil 7.19 da, AA7075 alaşımına %1 (% ağırlık) KNT ilave edilerek 120 dak. mekanik öğütülen ve farklı sürelerde sinterlenen AMK'lerin yoğunluk değişimleri verilmektedir.

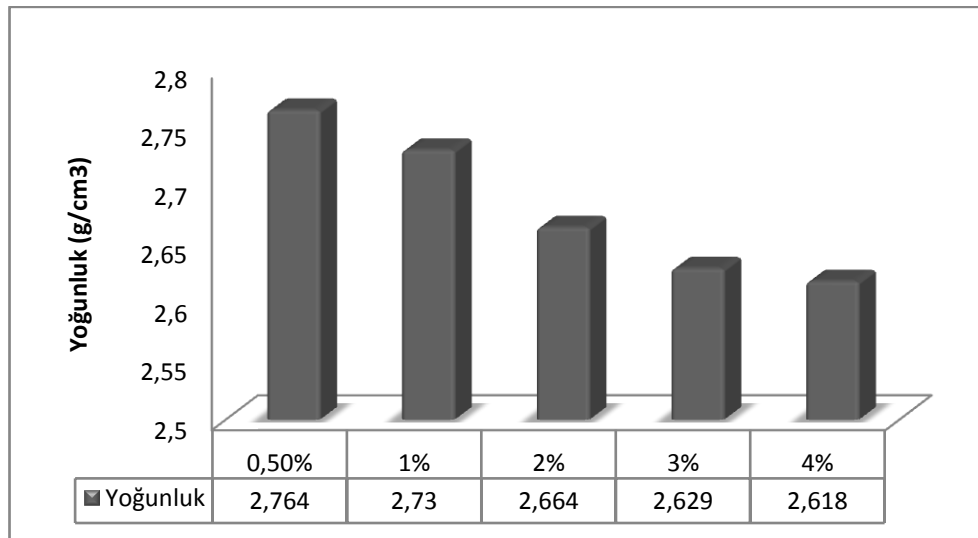


Şekil 7.19. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek 580 °C'de farklı sürelerde sinterlenen AMK'lerin yoğunluk değişimleri.

Yapılan yoğunluk ölçümleri sonucu en yüksek yoğunluk değeri 1 saat sinterlenen kompozitlerde ölçülürken, sinterleme süresi arttıkça yoğunluk sonuçları azalmaktadır. Bu aşamada beklenen, sinterleme süresindeki artışla beraber, kompozitlerin yoğunluklarının da artmasıydı. Fakat elde edilen yoğunluk ölçüm sonuçlarının, bu teoriyi desteklemediği anlaşılmaktadır. Küçük boyutlu parçalardan üretilen T/M kompozit parçaların sinterlenmesi sırasında gerçekleşmesi beklenen difüzyon, tane sınırlarında yoğunlaşan KNT (takviye fazları) nedeniyle engellenmektedir. Bölüm 7.1.1’de belirtildiği gibi sinterleme işleminde itici güç, yüzey ve hacim taşınımı mekanizmalarıdır. Hacim taşınım mekanizması, gerçekleşmesi zor ve uzun süre isteyen bir olaydır. Hacim taşınımı mekanizması ile sinterlenen parçalarda boyutsal (ölçümsel) farklılıklar da meydana gelmektedir. Diğer bir ifade ile, sinterleme süresi arttırılmasına rağmen, KNT takviyeli AMK’lerin sinterlenmesi sırasında hacim taşınım mekanizması, tane sınırlarında yoğunlaşan KNT nedeniyle gerçekleşmemektedir. Bu nedenle yoğunluk ölçümlerinde beklenen hedefe ulaşamadığı düşünülmektedir.

7.3.4. Karbon Nanotüp Miktarının Yoğunluk Üzerine Etkisi

Şekil 7.20’de, AA7075 alaşımına 5 farklı miktarda KNT ilave edilerek 120 dak. mekanik öğütülüp 1 saat sinterenerek üretilen alüminyum kompozitlerin yoğunluk değişimleri verilmektedir.



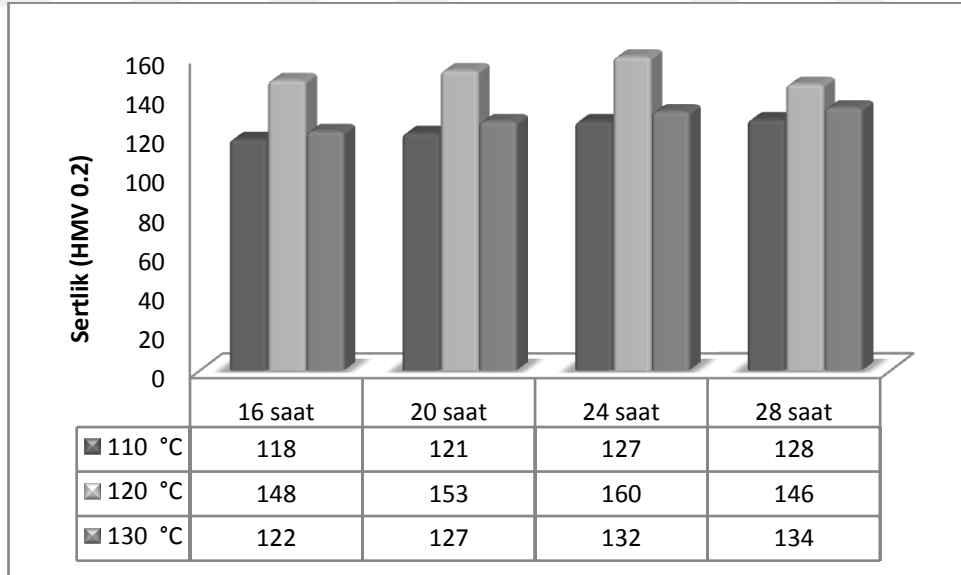
Şekil 7.20. AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin yoğunluk değişimleri.

Yapılan yoğunluk ölçümler sonucunda, AA7075 alaşımına ilave edilen KNT miktarı arttıkça yoğunluk değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalma, AA7075 alaşımına ilave edilen KNT'lerin yoğunluğunun (1,8-2.1 g/cm³ olarak literatürde verilmektedir) (Esawi vd., 2010; Srinivasa vd., 2011) AA7075 alaşımından düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

7.4. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

7.4.1. Matris Malzemesin Sertlik Sonuçları

AA7075 alaşımının sertlik ve aşınma davranışı, alaşımın yaşlandırma şartlarına bağlıdır (Chen vd., 2000). Yaşlandırma ile yapıda oluşturulan çökelti boyutları, alaşımın mekanik özelliklerini belirleyen bir faktördür. Yaşlandırma ısıl işlemi öncesi yapılan sertlik ölçümlerinde, sertlik değeri 54 HMV olarak ölçülmüştür. Şekil 7.21'de, farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırılan alaşımın sertlik değişimleri verilmektedir.



Şekil 7.21. Farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan T6 ısıl işlem sonrası sertlik değişimleri.

Şekil 7.21'den de görüldüğü gibi, sertlik değerleri 118-160 HMV arasında değişmektedir. En yüksek sertlik değeri, 120 °C sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılan (160

HMV) numunelerde elde edilirken, en düşük sertlik değeri ise 110 °C 16 saat yaşlandırılan (118 HMV) numunelerde elde edilmiştir. Yaşlandırma işlemi sonrası elde edilen sertlik değerleri ile yaşlandırılmamış (54 HMV) numunelerden elde edilen sertlik değerleri karşılaştırıldığında, aradaki farkın yaklaşık 2,5-3 kat (yaşlandırma sıcaklığı ve süresine göre değişmektedir) olduğu anlaşılmaktadır. Yaşlandırma işlemi sonucu sertlik değerlerinde meydana gelen bu artışın nedeni, yaşlandırma ısıl işlemleri sonucu malzemenin yapısında oluşan MgZn₂ çökeltileridir. Alüminyum matrisin sertliğinde meydana gelen bu artış Orowan mekanizması ile açıklanabilir.

$$\Delta\tau = kf^{1/2}R^{-1} \quad (7.2)$$

Burada;

$\Delta\tau$ = Kayma gerilmesindeki artış

k= malzeme sabiti

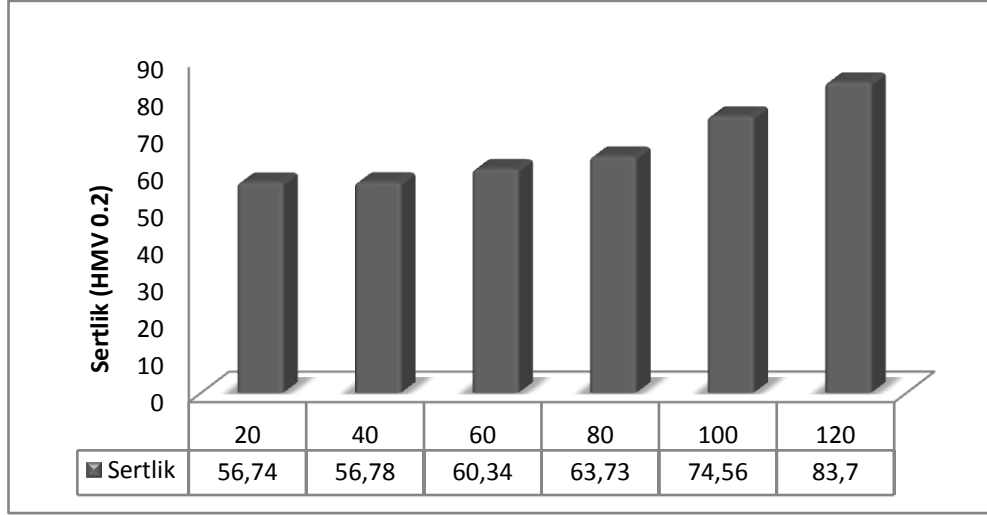
f=Çökeltilerin hacim oranı

R=Çökeltilerin çapı

Küçük boyutlu çökeltilerin hacim oran arttıkça, yaşlandırılan alaşımın dayanımı artmakta ve daha yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir (Özyürek vd., 2012; Yılmaz vd., 2012; Kaya vd, 2012). Ayrıca bu durum, yapıda yaşlandırma ile oluşturulan çökeltilerin homojen dağılımının, dislokasyon hareketini zorlaştırmasıyla da açıklanabilir. Bu çalışmada elde edilen sertlik sonuçları incelendiğinde, yaşlandırma sıcaklığı 130 °C'a arttırıldığında, sertlikte belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Sertlik değerlerindeki bu azalma, yapı içerisinde oluşturulan çökelti boyutlarının artmasından (aşırı yaşlanma) kaynaklanmaktadır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda, bu çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir (Özyürek vd., 2012; Yılmaz vd., 2012; Reda vd., 2008).

7.4.2. Öğütme Süresin Sertlik Üzerine Etkisi

Şekil 7.22'de, AA7075 alaşımına % 1 (% ağı.) KNT ilave edilerek 6 farklı öğütme süresi sonrası üretilen kompozitlerin sertlik değişimleri verilmektedir.

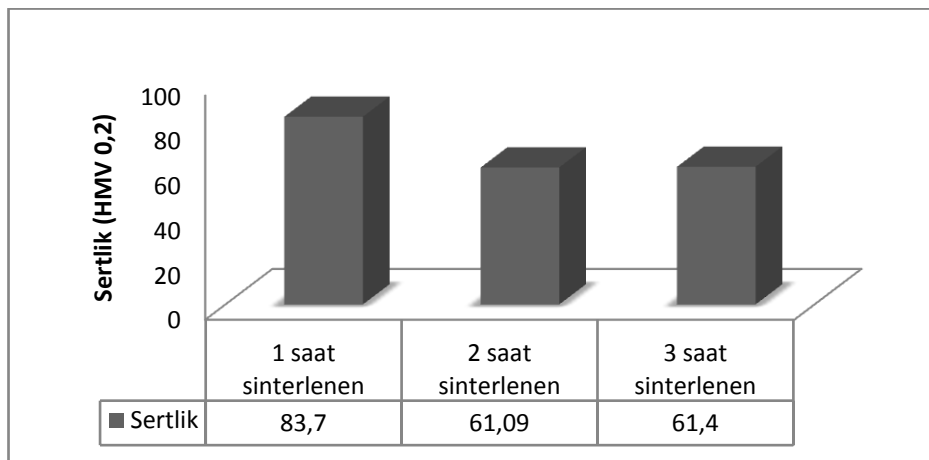


Şekil 7.22. Mekanik öğütme süresine bağlı olarak AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK'lerin sertlik değişimleri.

Şekil 7.22'de verilen sertlik ölçümleri sonucunda en düşük sertlik değeri 20 dak. öğütülen numunelerde elde edilirken, öğütme süresi arttıkça sertlik değerlerinde artış olmaktadır. Bu artışın, matrise ilave edilen KNT'lerin dağılım mukavemetlenmesinin yanı sıra, uygulanan yükün takviye fazına aktarılması sonucu olduğu ifade edilebilir.

7.4.3. Sinterleme Süresinin Sertlik Üzerine Etkisi

Şekil 7.23'de AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek 120 dak. mekanik öğütülen ve üç farklı sürelerde sinterlenen numunelerin sertlik değişimleri verilmektedir.

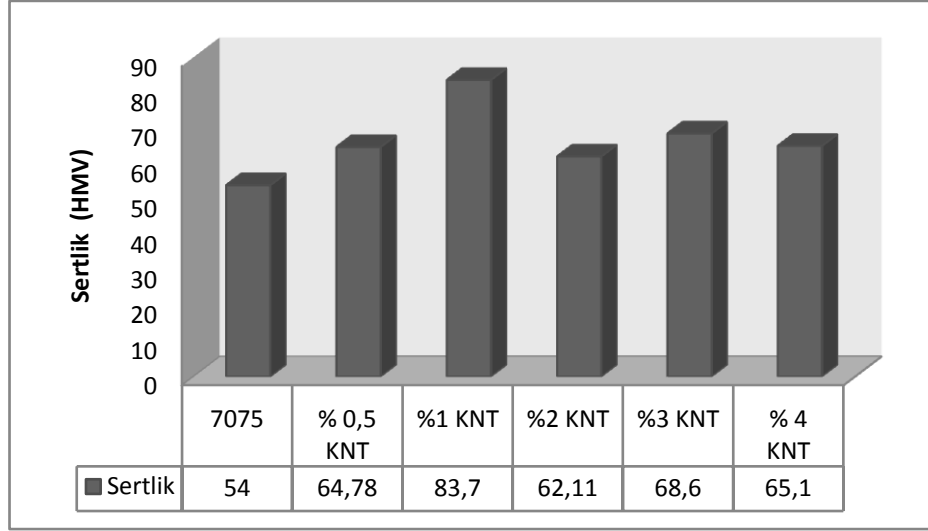


Şekil 7.23. AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek üç farklı sürede sinterlenen AMK'lerin sertlik değişimleri.

Şekil 7.23’de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, en yüksek sertlik 1 saat sinterlenen numunelerde ölçülürken, sinterleme süresi arttıkça sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sertlikte meydana gelen bu azalma, Şekil 7.12 ve Şekil 7.13’de verilen mikro yapı SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi, tane sınırlarında aglomere olan KNT’lerin, sinterleme süresindeki artışın etkisiyle birbirlerine kaynaklandığı ve kendi aralarında daha kuvvetli bağ oluşmasından kaynaklanmaktadır (daha kalın yapılar oluştuğundan dolayı). Ayrıca sertlik sonuçları ile yoğunlukların da ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Sinterleme süresindeki artışla birlikte, takviye fazının boyutuda artmaktadır. Tane sınırlarında yoğunlaşan KNT’lerin boyutundaki bu artış, sertlik sonuçlarına olumsuz yansımaktadır. KNT’lerin boyutunun artmasından dolayı, dislokasyonların bu büyük parçacıkları daha kolay kesebilmesine neden olmaktadır. Matrise uygulanan kuvvetin takviye fazına tam iletilmemesinden dolayı, sertlikte bir düşüşün meydana geldiği söylenebilir. Bu durum, takviye fazı boyutundaki artışın sonucu olarak o bölge için matris ile takviye fazı arasındaki temas alanını artmasına rağmen, KNT’ler ile matris (Al) arasında oluşan ara yüzey bağlarının zayıf olmasından kaynaklanmaktadır.

7.4.4. Karbon Nanotüp Miktarının Sertlik Üzerine Etkisi

Şekil 7.24’de farklı miktarlarda KNT yapılarak üretilen kompozitlerin sertlik değişimleri verilmektedir.



Şekil 7.24. Farklı miktarlarda ilave edilerek üretilen AA7075- KNT kompozitlerin sertlik değişimleri.

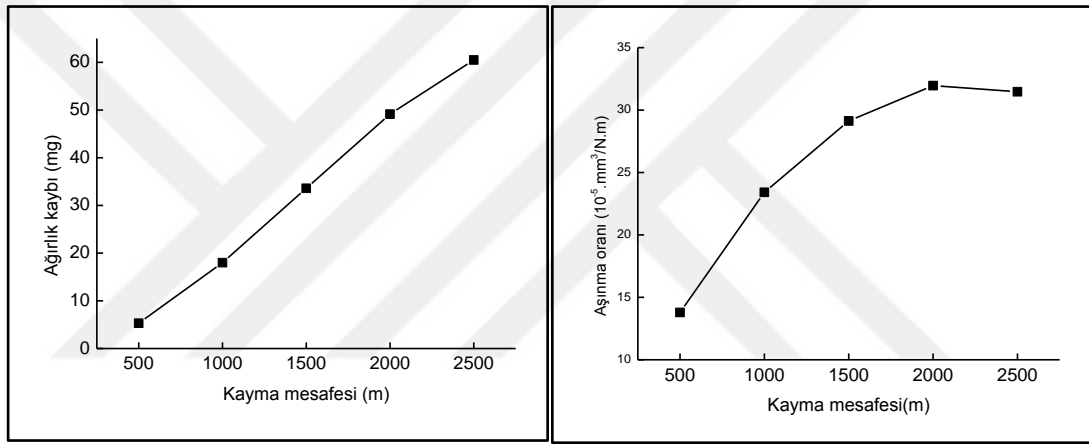
Şekil 7.24’de verilen KNT takviyeli kompozitte sertlik değişimleri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerinin % 1 KNT ilave edilen kompozitlerde elde edildiği (83,7 HMV) anlaşılmaktadır. Takviyesiz AA7075 alaşımının sertliği 54 HMV iken, % 0.5 KNT ilave edilen kompozitin sertliğinin 64,78 HMV olarak ölçülmüştür. % 2 % 3 ve % 4 KNT ilave edilen kompozitlerin sertliklerinde ise azalma olduğu anlaşılmaktadır. Sertlik değerlerindeki bu azalma, daha önce (mikro yapı incelemelerinde) belirtildiği gibi, ilave edilen KNT miktarının artmasıyla, takviye elemanının yapıda heterojen bir dağılım sergilemesi ve tane sınırlarında yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır. Düşük miktarlarda ilave edilen KNT’ler, yapıda mevcut olan gözenekleri (özellikle tane sınırlarındaki) doldurmaktadır. KNT miktarındaki artışa bağlı olarak kompozitin sertliğinde, birbiri ile ters bağlantılı iki farklı mekanizma etkili olmaktadır. Al taneleri üzerinde konumlanan KNT parçacıklar (matris/arayüzey bağı oluşturarak) sertlikte artış sağlarken, tane sınırlarında konumlanan KNT’lerin arasında bir bağ oluşmadığı için (aglomerasyon sebebiyle), kompozitlerin sertlikleri azalmaktadır. Bu durum daha önce yapılan bir çalışmada da rapor edilmektedir (Deng vd., 2007). Matris ile takviye elemanı ara yüzeyi, MMK’in dayanımını da etkilemektedir. Matrise uygulanan yükün takviye fazına iletilmesi, bu ara yüzeyler yardımıyla gerçekleşmektedir. Bu nedenle, uygulanan yükün transferi için matris ile takviye fazı arasında meydana gelen ara yüzey bağları güçlü olmalıdır. Ancak Al tane sınırlarında kümeleşen (yoğunlaşan)

KNT'ler arasında bir bağ oluşmaması ve/veya zayıf olması, mekanik dayanımı azaltmaktadır (Liu vd., 2012).

7.5. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

7.5.1. Matris Malzemesinin Aşınma Davranışları

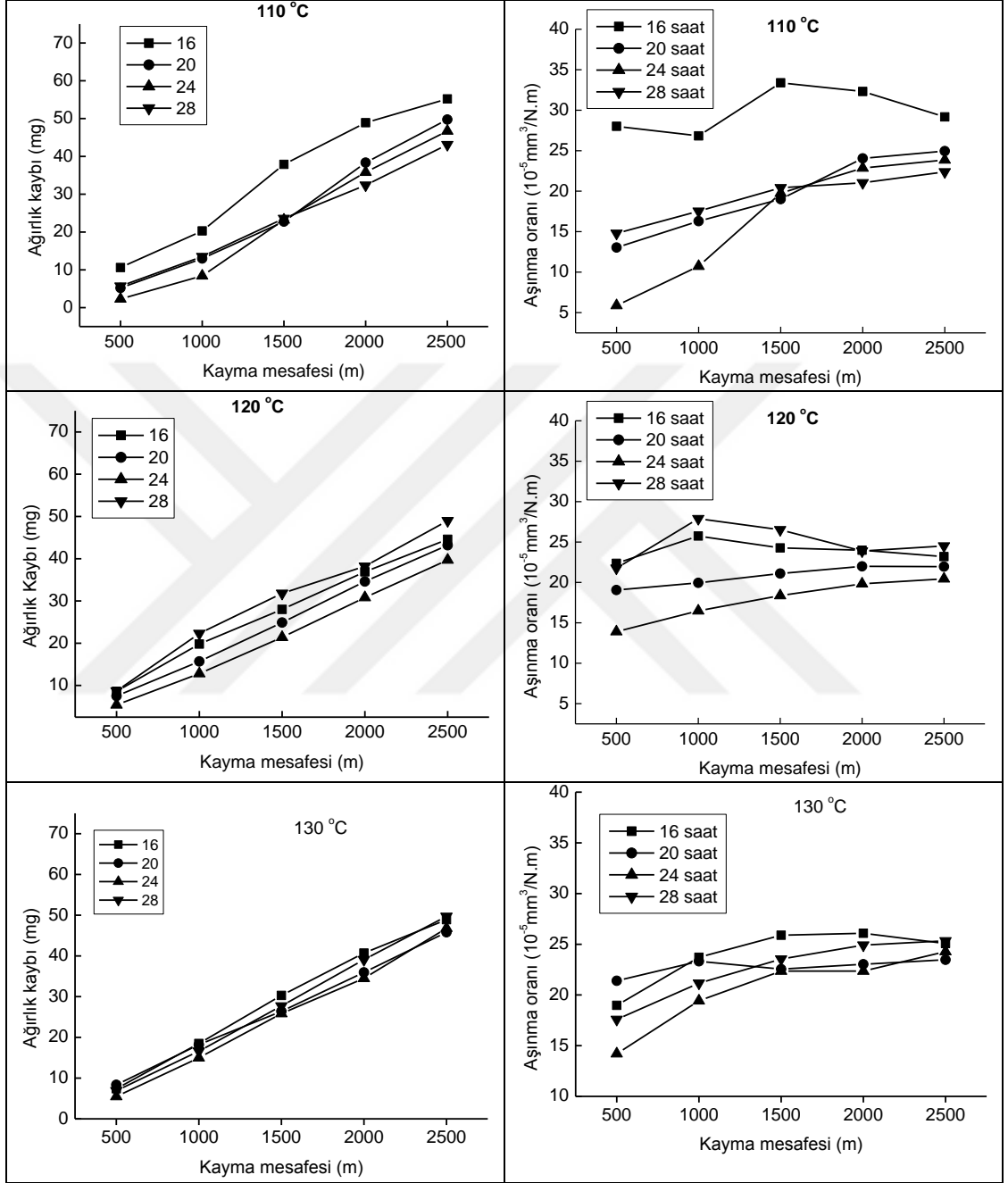
Şekil 7.25'de yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmayan numuneler kullanılarak yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları ve hesaplanan aşınma oranları verilmektedir.



Şekil 7.25. Yaşlandırma ısıl işlemi öncesi yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.

Aşınma testleri sonucunda, ağırlık kaybı kayma mesafesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Aşınma oranı da kayma mesafesi arttıkça artmaktadır. Ancak 2500 m kayma mesafesinde yapılan aşınma testinde az miktarda da bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, ağırlık kaybı grafiğine bakıldığında 2000-2500 metre kayma mesafesi aralığında meydana gelen ağırlık kaybı miktarının, diğer mesafelere göre daha az olduğu (grafığın eğiminde azalma), görülebilmektedir. Bu durumun kayma mesafesi arttıkça aşındırıcı disk ve numune arasında meydana gelen sürtünme ve temas yüzeylerinde oluşan ısının etkisiyle, numune yüzeyinden kopan parçacıkların yüzeye tekrar yapışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 7.26'da farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin

aşınma testleri sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları ve aşınma oranları verilmektedir.



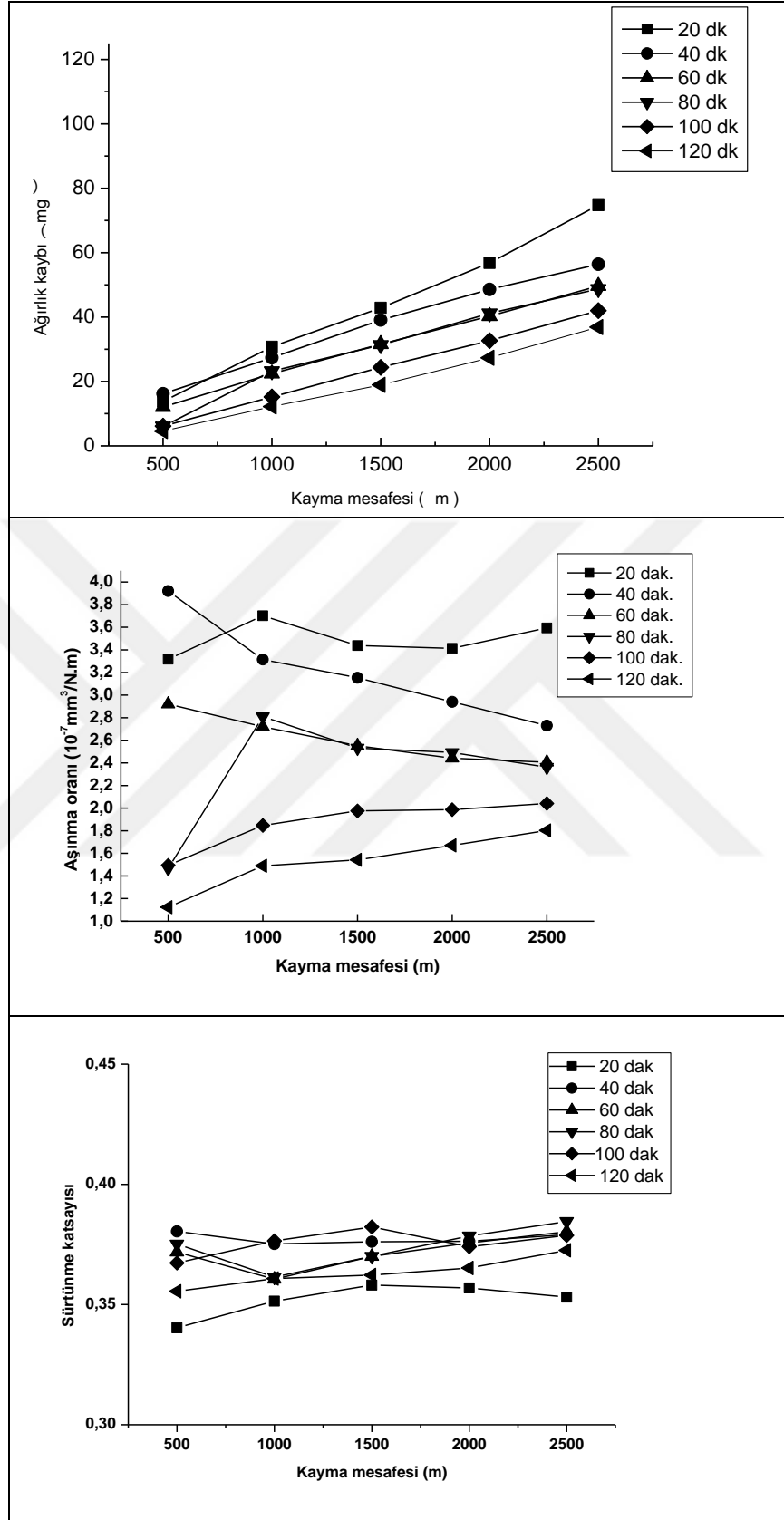
Şekil 7.26. Farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan yaşlandırma sonucu oluşan ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.

Şekil 7.26'da farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırılan numunelerin ağırlık kaybı ve aşınma oranları karşılaştırıldığında, en yüksek ağırlık kaybı ve aşınma oranlarının sırasıyla, 110 °C de yaşlandırılan, 130 °C de yaşlandırılan ve 120 °C de yaşlandırılan

numunelerde elde edildiği görülmektedir. Aşınma testleri sonucunda en düşük ağırlık kaybı ve aşınma oranı ise 120 °C de 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında elde edilmiştir. İlaveten, aşınma testleri sonucunda ağırlık kayıpları ve aşınma oranları, kayma mesafesindeki artışa bağlı olarak artmaktadır. Şekil 7.21’de verilen sertlik sonuçları ile ağırlık kaybı ve aşınma oranı sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbirini desteklediği anlaşılmaktadır. En yüksek sertlik değeri 120 °C de 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında elde edilirken, en düşük ağırlık kaybının yine aynı şartlarda yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri llen 110 °C de 16 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında ise, en yüksek ağırlık kaybının meydana geldiği belirlenmiştir

7.5.2. Öğütme Süresinin Aşınma Davranışlarına Etkisi

Şekil 7.27 ‘de AA7075 alaşımına % 1 (% ağ.) KNT ilavesi edilerek (6 farklı öğütme süresi sonrası) retilen kompozitlerin aşınma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları verilmektedir.

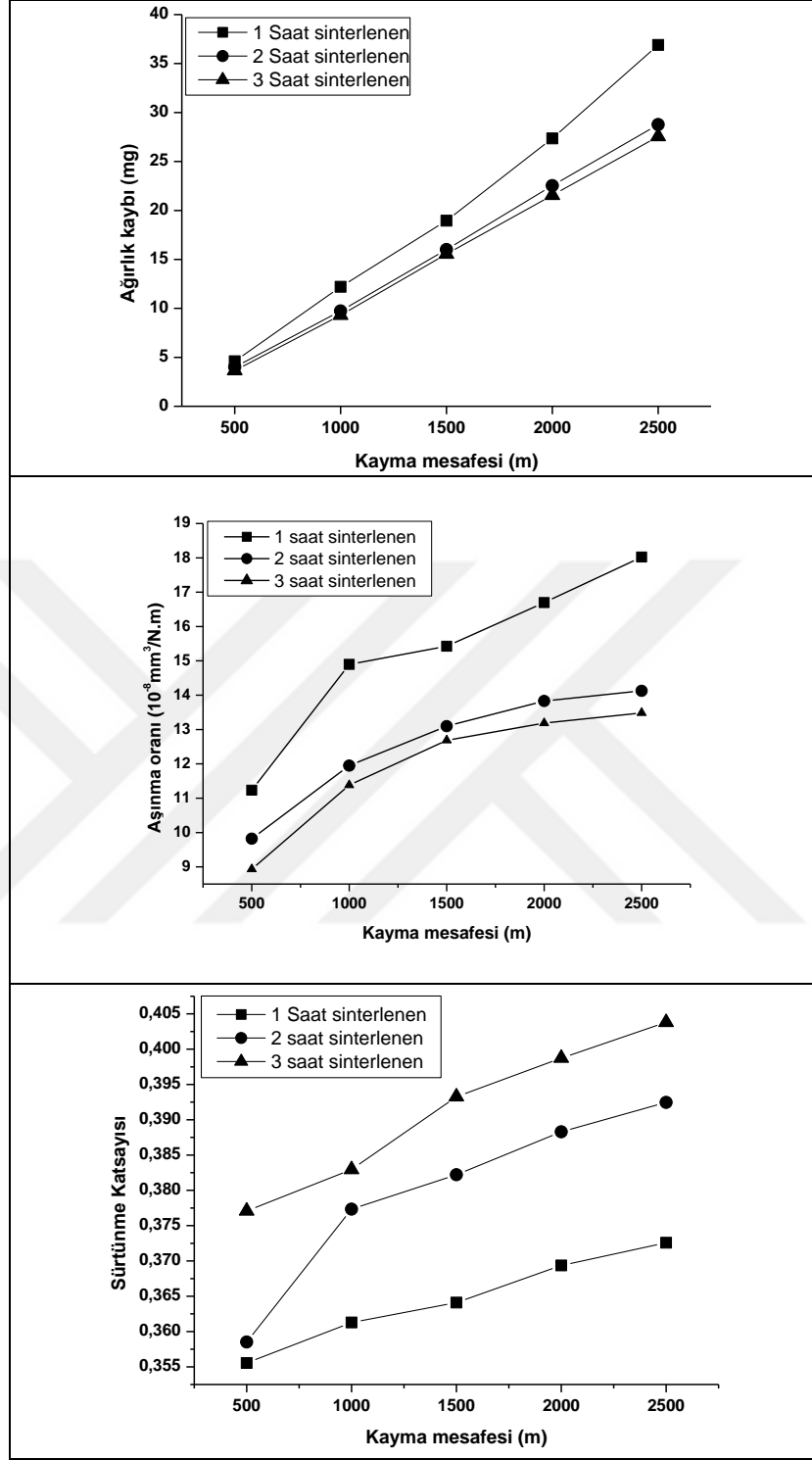


Şekil 7.27. Farklı sürelerde mekanik öğütülen AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK'lerin ağırlık kayıpları, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları.

KNT takviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma testleri sonunda en yüksek ağırlık kaybı, 20 dak. öğütülen kompozitlerde, mekanik öğütme süresi arttıkça ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir. En düşük ağırlık kaybı, 120 dak. mekanik öğütülen kompozitlerde elde edilmiştir. Sertlik ölçümleri sonucu elde edilen sertlik değerleri de bunu desteklemekte ve ağırlık kayıpları ile uyumludur

7.5.3. Sinterleme Süresinin Aşınma Davranışlarına Etkisi

Şekil 7.28’de AA7075 alaşımına % 1 (ağ.) oranında KNT ilave edilerek üretilen ve 580 °C’de üç farklı sürede sinterlenen kompozitlerin aşınma testleri sonunda elde edilen ağırlık kayıpları, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları verilmektedir.



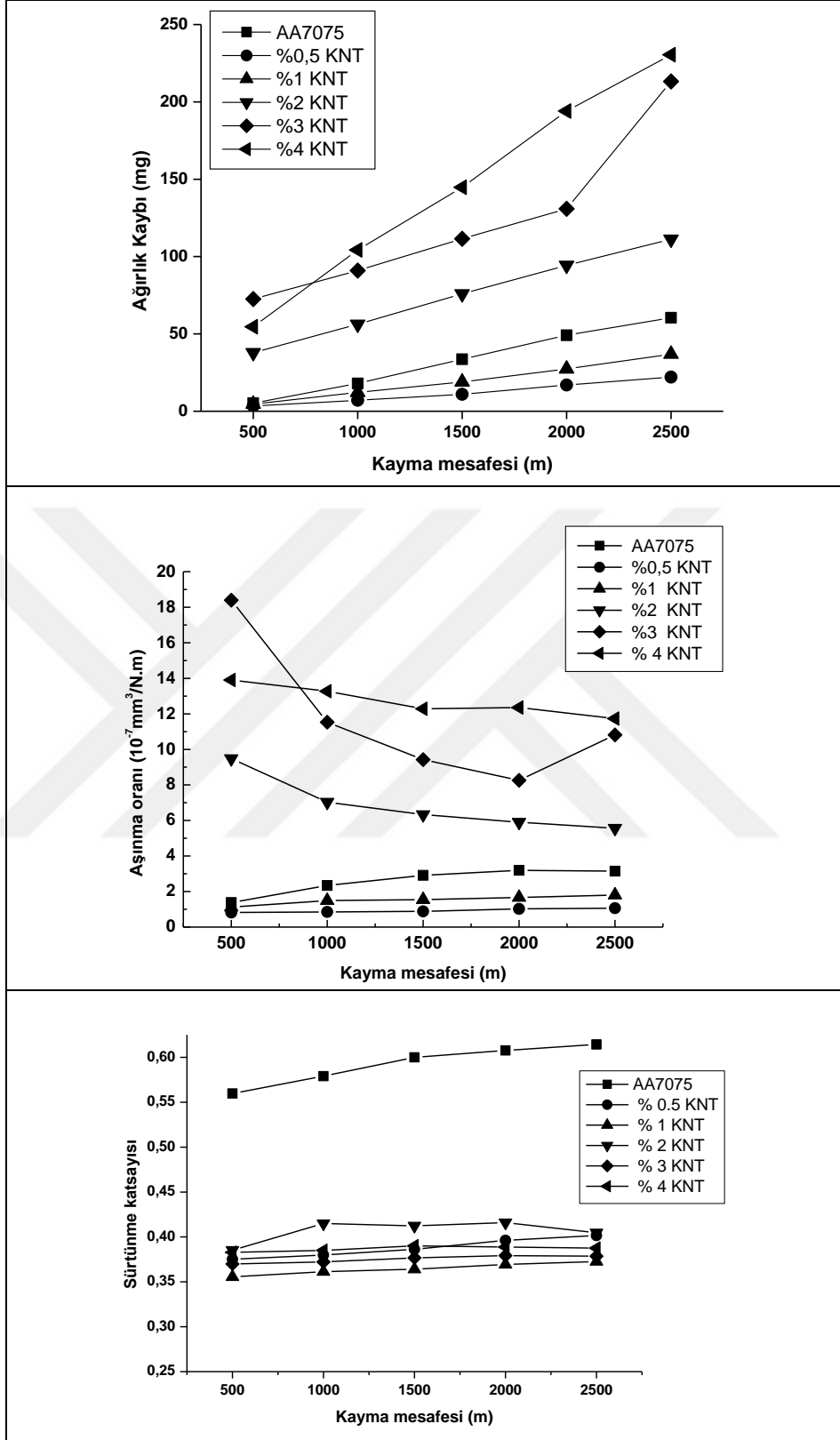
Şekil 7.28. Farklı sürelerde sinterlenen AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK'lerin ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sonuçları.

Şekil 7.28'de verilen grafiklerden de anlaşıldığı gibi, aşınma testleri sonunda en yüksek ağırlık kaybı 1 saat sinterlenen numunelerde elde edilirken, bunu sırasıyla 2 saat ve 3 saat sinterlenen numuneler takip etmektedir. Ayrıca aşınma oranları

incelendiğinde elde edilen sonuçların ağırlık kaybı sonuçları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Şekil 7.23’de verilen sertlik sonuçları ile aşınma testleri sonunda elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma oranları arasında bir uyumsuzluk olduğu da görülebilmektedir. Aşınma testleri sonucunda en düşük sertlik değerine sahip numunenin en fazla aşınması beklenirken, en düşük ağırlık kaybı bu numunelerde elde edilmiştir. Bu durumun daha net açıklanabilmesi için aşındırılan numunelerin yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Yapılan SEM incelemeleri sonrası (Şekil 7.32) 2 saat ve üç saat sinterlenen numunelerde aşınma testleri sırasında sürtünmenin etkisiyle numunelerden kopan parçacıkların (sertliklerin düşük olmasından dolayı) tekrar yüzeye yapıştığı, bu nedenle aşınma testleri sonrası ağırlık kayıplarının daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

7.5.4. Karbon Nanotüp Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkisi

Şekil 7.29’da AA7075 alaşımına farklı oranlarda KNT ilave edilerek üretilen alüminyum kompozitlerin aşınma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları, aşınma oranı ve sürtünme katsayıları verilmektedir.



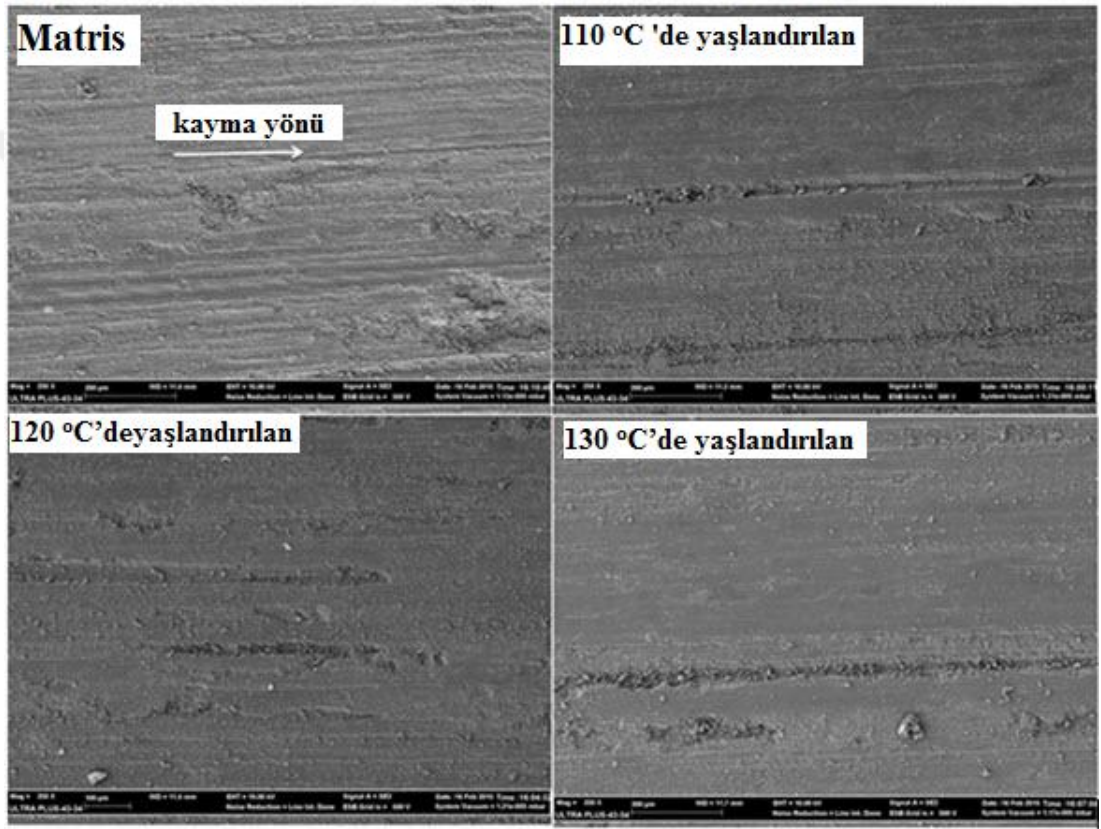
Şekil 7.29. AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sonuçları.

Şekil 7.29 'da verilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, en yüksek ağırlık kayıplarının sırasıyla %4, % 3 ve % 2 KNT takviyeli AMK'lerde elde edildiği anlaşılmaktadır. En düşük ağırlık kaybı, % 0,5 KNT takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. Aşınma testleri sonunda elde edilen aşınma oranları incelendiğinde, elde edilen sonuçların ağırlık kaybı sonuçlarını teyit ettiği görülebilmektedir. KNT takviyeli kompozitlerde sürtünme katsayılarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Fakat verilen sürtünme katsayıları elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma oranı birbirlerini desteklememektedir. Bu nedenle, Şekil 7.24'de verilen sertlik sonuçları ile sürtünme katsayılarının karşılaştırılması gerekir. Sertlik sonuçlarına göre en düşük sertlik, matris alaşımında elde edilirken, sürtünme katsayısında da en yüksek değer aynı numunede elde edilmiştir. Daha sonra, üretilen KNT takviyeli AMK'lerde sertlikleri sırasıyla % 2 KNT % 4 KNT, % 0,5 KNT, % 3 KNT ve % 1 KNT takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. Sürtünme katsayıları ve Şekil 7.24 de verilen sertlik değişimleri karşılaştırıldığında, bu sonuçların birebir örtüştüğü görülmektedir. Bu sonuçlara göre, KNT takviyeli AMK'lerin sertlikleriyle sürtünme katsayıları birbirine paraleldir. Daha önce yapılan çalışmalarda takviye fazı miktarındaki artışa bağlı olarak AMK'lerin sertliklerinin arttığı, ağırlık kaybı ve aşınma oranının da azaldığı belirtilmektedir (Baradeswaran ve perumal 2013; Özyürek vd., 2012, Rao vd., 2011). Bu çalışmada elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları ile ağırlık kaybı ve aşınma oranları arasındaki ilişki açısından, geleneksel parçacık takviyeli AMK'ler de elde edilen sonuçları desteklemediği açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, nano AMK'lerin üretimi ile geleneksel parçacık takviyeli kompozitlerde tercih edilen takviye fazı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Geleneksel parçacık takviyeli kompozitler ile nano-AMK'ler arasında görülen en belirgin farklılık, nano-AMK'lerde kritik bir oranın üzerine çıktığında, sertlik ve aşınma davranışı gibi bazı mekanik özelliklerinin azalmasıdır. Nano-AMK'lerde bu davranışın dört önemli sebebi vardır. Birincisi parçacık boyutu, ikincisi parçacık şekli, üçüncüsü matris/takviye fazı arasındaki oluşan ara yüzey ve dördüncüsü ise aglomerasyondur.

7.6. AŞINMA YÜZEYİ SEM GÖRÜNTÜLERİNİN İNCELENMESİ

7.6.1. Matris Malzemesinin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Şekil 7.30'da, ısıtılmış işlem uygulanmayan ve farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırılan AA7075 alaşımının, aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmektedir.



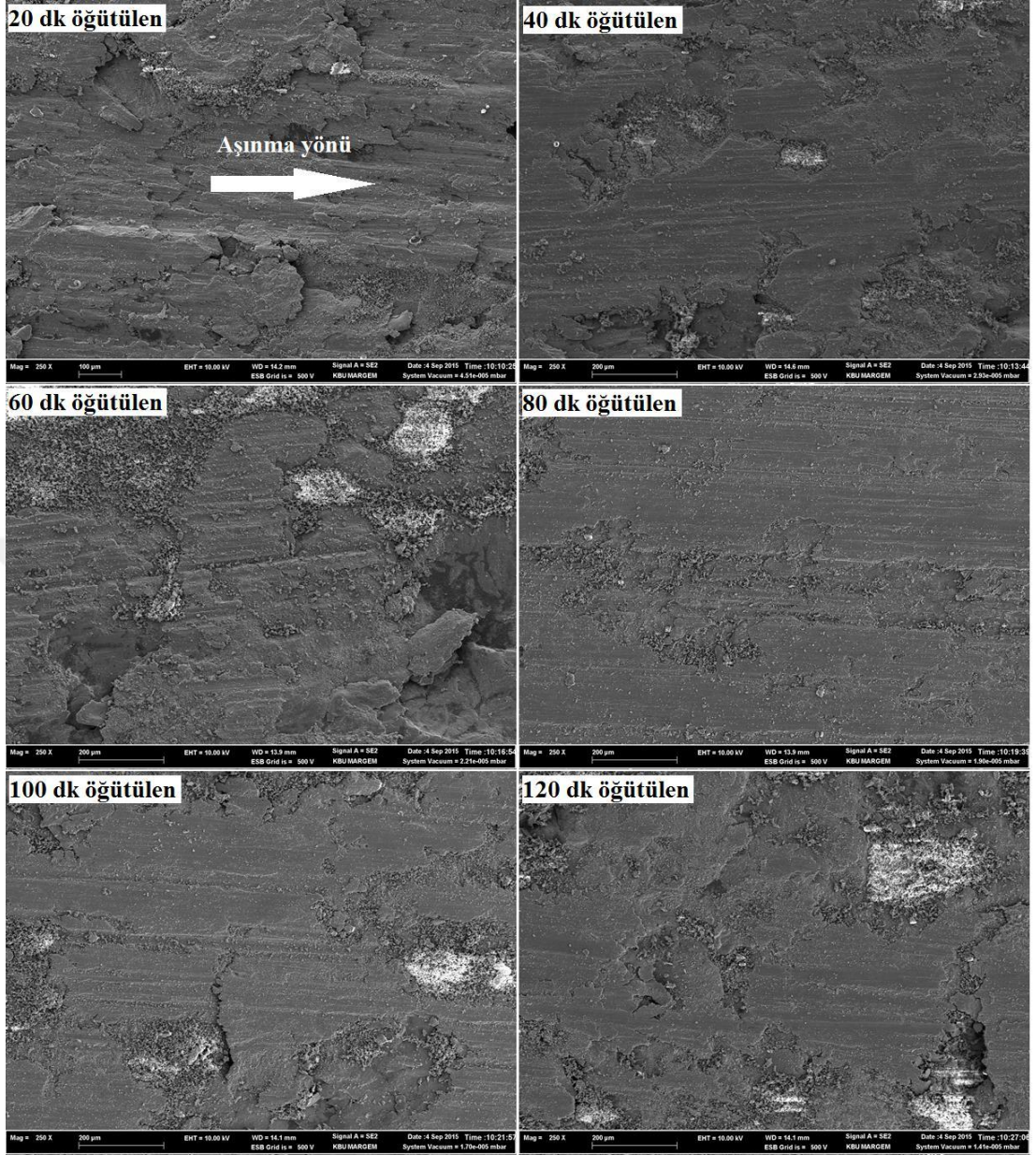
Şekil 7.30. Yaşlandırılmayan ve farklı sıcaklıklarda(110, 120 ve 130 °C) yaşlandırılan AA7075 alaşımının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 7.30'da verilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kayma yönüne paralel çizikler olduğu gözlenmektedir. Bu özellikler, aşınma testi sırasında numune ve/veya disk yüzeylerinden kopan sert parçacıklardan kaynaklanan bir abrasiv aşınma karakteristiğidir. Aşınma yüzeyinde oluşan bu abrasiv kazıma modu, özellikle aşınmanın başlangıç aşamasında hem disk hem de numune yüzeylerinden kopan parçacıkların, sürtünme oranını artırmasıyla gerçekleşmektedir. Aynı anda yüke maruz kalan birleşme yüzeyleri nedeniyle, mikro kesme meydana gelmektedir.

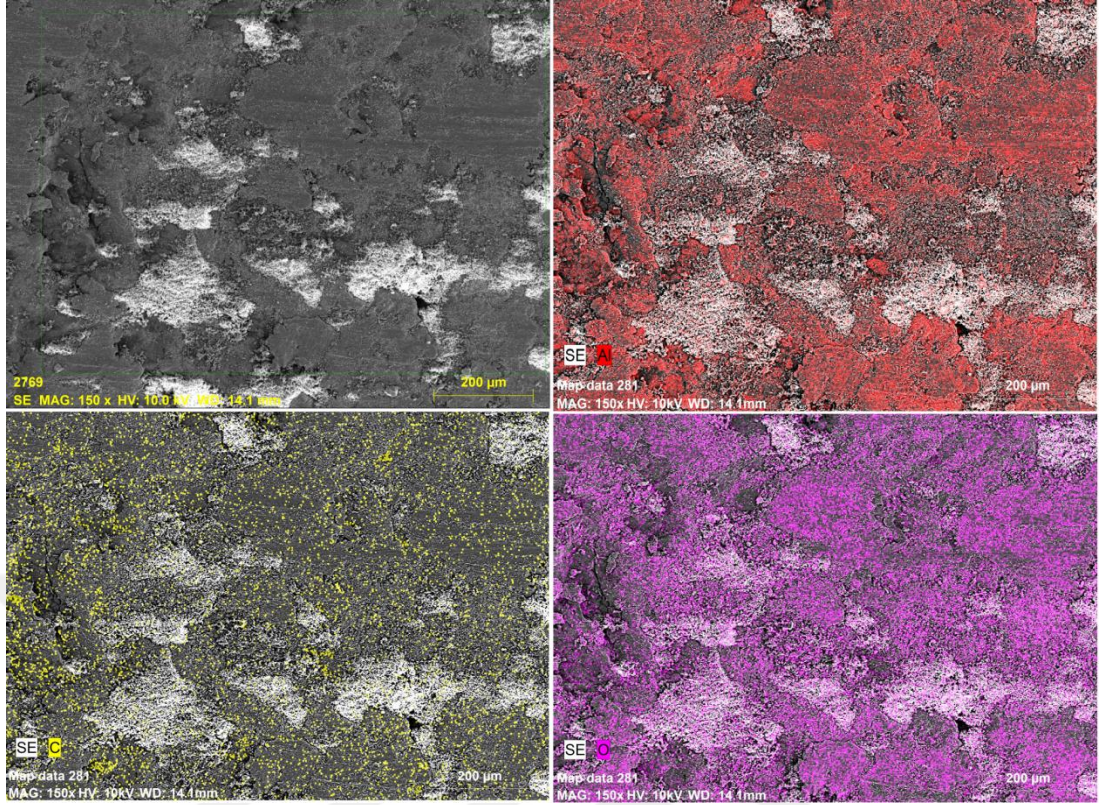
Sürtünme etkisi ile numune yüzeyinde meydana gelen ve plastik akıştan kaynaklanan plastik deformasyon, kayma mesafesindeki artışla beraber numune/disk ara yüzeyinde biriken parçacıklar etkisiyle olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada, Şekil 7.30'da verilen aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde gözlenen yüzey hasarı, hem abrasiv hem de adhesiv aşınma mekanizmalarının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Kayma mesafesindeki artışa bağlı olarak numune/disk ara yüzeyinde sıcaklık artışı da meydana gelmektedir. Sıcaklık artışı ile numune yüzeyinde oluşan oksit film tabakasının katı yağlayıcı etkisi gösterdiği, daha önce yapılan bazı çalışmalarda ifade edilmektedir (Sağlam vd., 2011). Kayma sırasında bu oksit tabakasında kırılan sert oksit parçacıkları, numune yüzeyinde plastik deformasyona neden olmaktadır.

7.6.2. Farklı Öğütme Sürelerinde Üretilen Kompozitlerin Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Şekil 7.31'de, farklı sürelerde öğütülen AA7075- %1 KNT takviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma testleri sonucu aşınma yüzeyi SEM görüntüleri ve Şekil 7.32'de 120 dak. mekanik öğütülen alüminyum kompozitin aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonucu verilmektedir.



Şekil 7.31. Farklı sürelerde mekanik öğütülerek üretilen AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

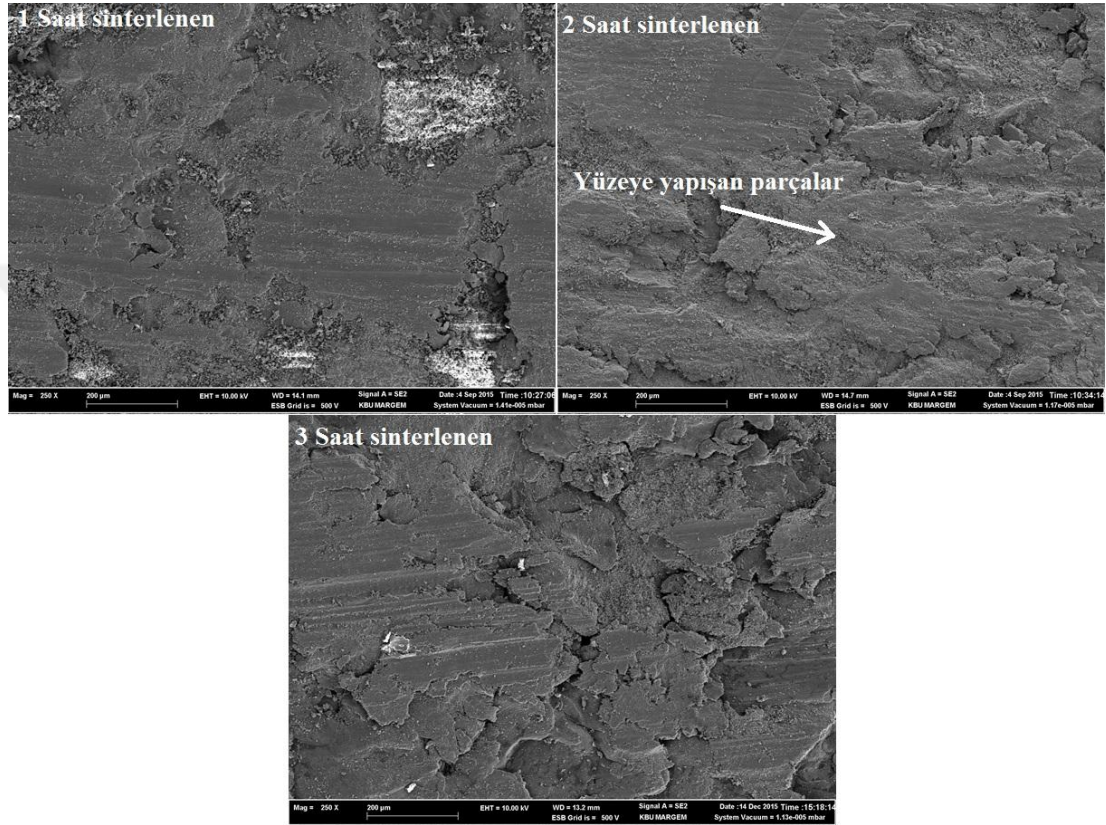


Şekil 7.32. 120 dk. mekanik öğütülen AA7075-% 1 KNT takviyeli AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonucu.

Şekil 7.31 verilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kayma yönü belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca aşınmış numune yüzeylerinde çukurcukların ve tepeliklerin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Aşınma testleri sırasında meydana gelen ısı ve disk/numune arasındaki sürtünme etkisiyle, yüzeyde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Kayma mesafesi arttıkça, numune disk arasında biriken parçacıkların tekrar numuneye yapışması ile yüzeylerde abrasif aşınma mekanizmasının yanında adhesif aşınma mekanizmasının da oluştuğunun bir göstergesidir. Ayrıca kayma mesafesindeki artışa bağlı olarak numune/disk ara yüzeyinde sıcaklık artışı ile numune yüzeyinde oluşan oksit film tabakası katı yağlayıcı etkisi göstermektedir.

7.6.3. Farklı Sürelerde Sinterlenen AMK'lerin Aşınma Yüzeyi İncelemeleri

Şekil 7.33' de AA7075 alaşımına % 1 (% ağırlık) KNT ilave edilerek üretilen ve 580 °C'de üç farklı sürede sinterlenen kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 7.33. Üç farklı sürede sinterlenen % 1 KNT takviyeli AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

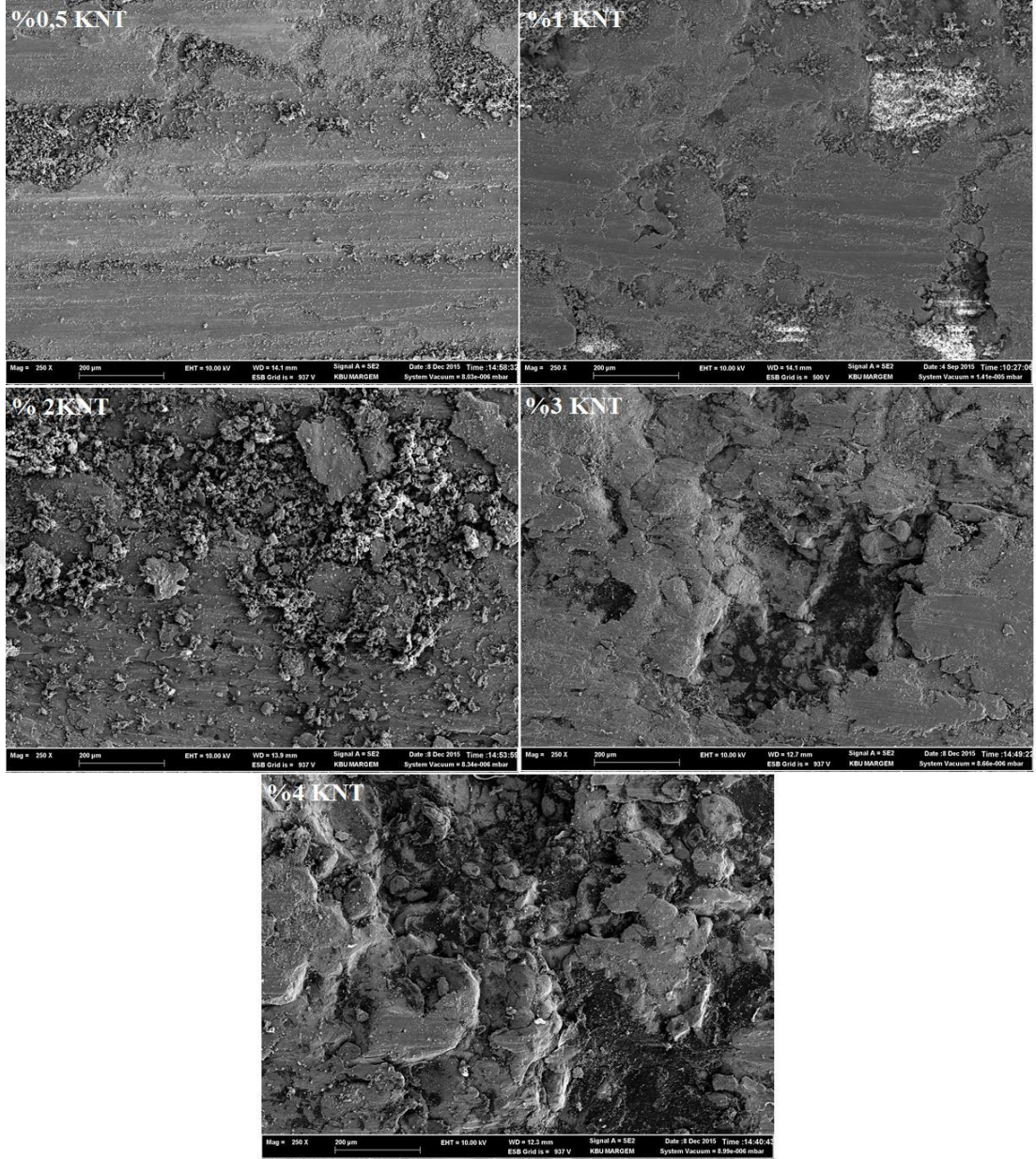
Şekil 7.33'de verilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, 1 saat sinterlenen numunelerin yüzeyinde bazı parçacıkların koptuğu ve yüzeyde lokal oksidasyonların oluştuğu görülmektedir. Ayrıca aşınma yüzeyinde, disk/numune yüzey temas yüzeylerinin sürtünmesi sırasında kesme kuvveti etkisi ile meydana gelen aşırı plastik deformasyonda gözlenmektedir. 2 ve 3 saat sinterlenen kompozitlerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde ise, bu kompozitlerin aşınma yüzeylerinde (Şekil 7.23'de görüldüğü gibi sertliklerinin daha düşük olmasından dolayı), aşınma sırasında sürtünmenin etkisiyle numunelerden kırılan parçacıkların tekrar yüzeye yapıştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, aktif aşınma mekanizmasının adhesif

aşınma mekanizması olduğu da ifade edilebilir. Bu nedenle, aşınma testlerinde 2 ve 3 saat sinterlenen kompozitlerin ağırlık kaybının 1 saat sinterlenen kompozitlerden daha düşük olduğu düşünülmektedir.

7.6.4.Farklı Miktarlarda KNT Takviye Edilen AMK'lerin Aşınma Yüzey İncelemeleri

Şekil 7.34'de, AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen AMK'lerin 2500 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmektedir.





Şekil 7.34. Farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen AMK'lerin 2500 metre kayma mesafesi sonrası aşınma yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 7.34' de verilen SEM görüntüleri, aynı yük, kayma hızı ve kayma mesafesi ile farklı miktarlarda KNT içeren nano-AMK'lerde de elde edilmiştir. Aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde özellikle % 2, % 3 ve % 4 KNTs takviyeli nano-AMK'lerin yüzeyinde ciddi plastik deformasyon bölgeleri olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, bu kompozitlerin aşınma yüzeylerinde lokal döküntülerin olduğu da anlaşılmaktadır. KNT miktarı arttıkça bu döküntü miktarı da artmaktadır. Bu durum, nano-AMK'lerin in üretimi sırasında KNT'lerin aglomere olduğunun da bir göstergesidir. Şekil 7.14

ve Şekil 7.15’de verilen mikro yapı SEM görüntülerinde de bu aglomerasyon net olarak görülebilmektedir. Ayrıca bu olay, aglomere olmuş KNT kümeciklerinin, sinterleme işlemleri aşamasında aralarında zayıf bağların oluşması sebebiyle, kayma sırasında kolayca buldukları yerden kırılarak dökülmektedir.



BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile AA7075-Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Üretimi Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Matris malzemesi olan AA7075 alaşımı (dv 0,5 124 μm) gaz atomizasyonu ile üretilerek mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca matris malzemesi olan AA7075 alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucu yapıda oluşan ikinci faz çökeltilerin (MgZn_2) boyutları, taramalı elektron mikroskopuyla ölçülerek, farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan T6 ısıl işleminin ikinci faz çökeltilerin boyutlarına etkisi belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucu, en düşük çökelti boyutu 110 °C’da 104,8 nm ölçülürken, 120 °C’da 112,08 nm 130 °C’da 138,28 nm olarak ölçülmüştür.
- AA7075 alaşımı içerisine % 1 (% ağı.) KNT ilave edilerek 6 farklı öğütme süresi kullanılarak mekanik öğütülen kompozit tozların toz boyutu ölçüm sonuçlarına göre, öğütme süresi arttıkça toz boyutunda artış olduğu en yüksek toz boyutu 100 dak. mekanik öğütülen kompozit tozlarda ölçülürken (161,90 μm), 120 dak. öğütülen kompozit tozların boyutunda azalma meydana gelmiştir (155,84 μm).
- AA7075 alaşımı içerisine % 1 KNT ilave edilerek 120 dak. mekanik öğütülerek üretilen kompozit tozlar 580 °C’da üç farklı sürede sinterlenmiştir. Farklı sürelerde sinterleme sonrası yapılan mikro yapı incelemelerinde,

sinterleme süresi arttıkça, tane sınırları arasında yoğunlaşan KNT'lerin şeklinin daha kalın, kısa ve iğnemsî yapıda olduğu, sinterleme süresi arttıkça α -Al tanelerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Bu durumun sinterleme süresi arttıkça KNT'ler arasında daha kuvvetli bir bağ oluşumunun α -Al tanelerinin büyümesini engellediği düşünülmektedir.

- AA7075 alaşımına farklı oranlarda (% 0,5 ,% 1, % 2, % 3 ve % 4) ilave edilerek 120 dakika öğütülen ve 580 °C'da 1 saat sinterlenen numunelerin mikro yapı incelemeleri sonucu, KNT miktarının artışı ile yapıda KNT'lerin tane sınırlarında aglomere olduğu görülmüştür.
- T/M yöntemiyle üretilen matris malzemesi AA7075 alaşımının yoğunluğu 2,563g/cm³ olarak bulunmuştur.
- AA7075 alaşımı içerisine % 1 KNT ilave edilerek 6 farklı sürede mekanik öğütülerek üretilen AMK'lerin yoğunluk ölçümleri sonucu, en yüksek yoğunluk değeri 20 dak. mekanik öğütülerek üretilen kompozitte ölçülürken (2,773 g/cm³), öğütme süresi arttıkça yoğunluk değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. En düşük yoğunluk değeri 120 dak. mekanik öğütülerek üretilen AMK'de ölçülmüştür.
- AA7075 alaşımına % 1 KNT ilave edilerek (120 dak. mekanik öğütülüp), üç farklı sürede sinterlenerek üretilen AMK'lerin yoğunluk ölçümleri sonucu, en yüksek yoğunluk 2.773 g/cm³ olarak 1 saat sinterlenen numunelerde ölçülürken, 2 saat sinterlenen numunelerde 2,715 g/cm³, 3 saat sinterlenen numunelerde ise 2,719 g/cm³ olarak ölçülmüştür.
- AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT (% 0,5 ,% 1, % 2, % 3 ve % 4) ilave edilerek üretilen AMK kompozitlerde yapılan yoğunluk ölçüm sonuçlarına göre, en yüksek yoğunluk değeri % 0,5 KNT ilave edilen AMK'de ölçülürken (2,764 g/cm³), en düşük yoğunluk değeri % 4 KNT ilave edilen AMK'lerde (2,618 g/cm³) ölçülmüştür. KNT miktarı arttıkça yoğunluk azalmaktadır.

- Matris malzemesi olan AA7075 alaşımı toz metalürjisi yöntemiyle üretilerek sertlik, aşınma davranışları belirlenmiştir. Daha sonra üretilen matris malzemesi farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işlemlerinin sertlik aşınma davranışları incelenerek, yaşlandırma ısıl işlemi sonucu yapıda oluşan çökelti boyutlarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi belirlenmiştir. Yapılan sertlik ölçüm sonuçlarına göre en düşük sertlik sonucu yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmayan alaşımda ölçülürken (54 HMV), farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işlemleri sonucu sertlik değerleri 118-160 HMV aralığında değişmektedir. En yüksek sertlik değeri (160 HMV) 120 °C’de 24 saat yaşlandırılan numunelerde ölçülmüştür.
- AA7075 alaşımına % 1 (% ağırlık) KNT ilave edilerek (6 farklı sürede öğütülerek) üretilen kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçlarına göre, en düşük sertlik değeri 20 dakika öğütülen numunelerde ölçülmüştür (56,74 HMV). Öğütme süresinin artmasıyla sertlikte artış olduğu belirlenmiştir. En yüksek sertlik değerinin 120 dak. mekanik öğütülerek üretilen kompozitlerde (83,7 HMV) ölçülmüştür.
- AA7075 Al alaşımına % 1 KNT ilave edilerek 120 dak. öğütülerek üç farklı sürede sinterlenen kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçları incelendiğinde en yüksek sertliğin 1 saat sinterlenen AMK’lerde elde edildiği anlaşılmaktadır (83,7 HMV).
- AA7075 alaşımına farklı miktarlarda (% 0,5 ,% 1, % 2, % 3 ve % 4) KNT ilave edilerek 120 dak. öğütülen ve 580 °C’de 1 saat sinterlenen numunelerin sertlikleri incelendiğinde, en yüksek sertlik % 1 KNT ilave edilen kompozitlerde ölçülürken, KNT miktarı arttıkça, (tane sınırlarında aglomerasyonun daha fazla olmasından dolayı) sertliğin azaldığı görülmüştür.
- Matris malzemesi olan AA7075 alaşımının yaşlandırma ısıl işlem öncesi ve sonrası yapılan aşınma testleri sonucu en yüksek ağırlık kaybı yaşlandırma ısıl işlem uygulanmayan numunelerde ölçülmüştür. Farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işlemleri kıyaslandığında, en yüksek

ağırlık kaybı ve aşınma oranlarının sırasıyla, 110 °C de yaşlandırılan, 130 °C de yaşlandırılan ve 120 °C de yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda, en düşük ağırlık kaybı ve aşınma oranı ise 120 °C’ da 24 saat yaşlandırılan AA7075 alaşımında elde edilmiştir.

- AA7075 alaşımına % 1 (% ağ.) KNT ilavesi edilerek (6 farklı öğütme süresi sonrası) üretilen numunelerin aşınma testleri sonucu en yüksek ağırlık kaybı 20 dak. mekanik öğütülerek üretilen kompozitlerde ölçülürken, öğütme süresi arttıkça ağırlık kaybı azalmaktadır. En düşük ağırlık kaybı, 120 dak. mekanik öğütülerek üretilen kompozitlerde elde edilmiştir.
- AA7075 alaşımına % 1 (% ağ.) oranında KNT ilave edilerek üretilen ve 580 °C’de üç farklı sürede sinterlenen kompozitlerin aşınma testleri sonunda, en düşük ağırlık kaybı 3 saat sinterlenen numunelerde ölçülürken, en fazla ağırlık kaybı 1 saat sinterlenen kompozitlerde ölçülmüştür.
- AA7075 alaşımına farklı miktarlarda KNT ilave edilerek üretilen alüminyum kompozitlerin aşınma testleri sonucu, en düşük ağırlık kaybı ve aşınma oranı % 0,5 KNT ilave edilen kompozitlerde ölçülürken, en yüksek ağırlık kaybı % 4 KNT ilave edilen kompozitlerde ölçülmüştür. % KNT miktarı arttıkça ağırlık kaybı ve aşınma oranı artmaktadır.

Dört aşamada gerçekleştirilen bu çalışma sonunda kullanılan parametreler içerisinde ideal mekanik öğütme süresi 120 dakika, ideal sinterleme süresi 1 saat ve ideal takviye fazı miktarı % 1 KNT olarak belirlenmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- Tek duvarlı çift duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler kullanılarak üretilen kompozitlerin mekanik dayanımları kıyaslanarak KNT'lerde bulunan duvar sayısının etkisi incelenebilir.
- Takviye fazı olarak kullanılan KNT'lerin ve miktarının elektrik iletkenliği ve korozyon dayanımına etkisi incelenebilir.
- MA/MÖ işleminde kullanılan bilye toz oranı (BTO), değiştirilerek BTO oranının mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.
- MA/MÖ işlemi sırasında kullanılan farklı işlem kontrol kimyasalları kullanılarak aglomerasyona etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abolhasani, A., Hanzaki, A. Z., Abedi, H. R. and Rokni, M. R., “The room temperature mechanical properties of hot rolled 7075 aluminum alloy”, *Material and Design*, 34: 631-636 (2012).

Al-Aqeeli, N., Abdullahi, K., Suryanarayana, C., Laoui, T. and Nouari, S., “Structure of mechanically milled CNT-reinforced Al-alloy nanocomposites”, *Materials and Manufacturing Processes*, 28: 984-990 (2013).

Al-Qutub, A. M., Khalil, A., Saheb, N. and Hakeem, A. S., “Wear and friction behavior of Al6061 alloy reinforced with carbon nanotubes”, *Wear*, 297: 752-761 (2013).

Arı, O., Görgün A. R., Kaya, A., Çoşkun, Ö. ve Kaya, İ., “Karbon nanotüp malzeme ile tasarlanan heliks antenlerin performans parametrelerinin incelenmesi” *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 2 (4): 1-7 (2012).

Asgharzadeh, H., Simchi, A. and Kim, H. S., “In situ synthesis of nanocrystalline Al6063 matrix nanocomposite powder via reactive mechanical alloying”, *Material Science Engineering A*, 527: 4897–4905 (2010).

Askeland, R.D., “The Science and Engineering Of Materials, 3rd. ed.” Çeviri Editörü, Erdoğan, M., Nobel Yayınları, 238-245 (1998).

Bakshi, S. R., Lahiri, D. and Agarwal, A., “Carbon nanotube reinforced metal matrix composites - a review”, *International Materials Reviews*, 55: 41-64 (2010).

Bakshi, S. R. and Agarwal, A., “An analysis of the factors affecting strengthening in carbon nanotube reinforced aluminum composites”, *Carbon*, 49: 533-544 (2011).

Bakshi, S. R., Keshri, A. K. and Agarwal, A., “A comparison of mechanical and wear properties of plasma sprayed carbon nanotube reinforced aluminum composites at nano and macro scale”, *Materials Science and Engineering: A*, 528: 3375-3384 (2011).

Bal, S. and Samal, S., “Carbon nanotube reinforced polymer composites—A state of the art.”, *Bulletin of Materials Science*, 30: 379-386 (2007).

Baradeswaran, A. and Perumal, A. E., “Influence of B₄C on the tribological and mechanical properties of Al 7075 – B₄C composites”, *Composites Part B*, 54: 146-152 (2013).

Bastwros, M. M. H., Esawi, A. M. K. and Wifi, A., “Friction and wear behavior of Al-CNT composites”, *Wear*, 307: 164-173 (2013).

Baydoğan, M., Çimenoglu, H. ve Kayalı, E. S., “RRA işleminin 7075 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 3 (6): 108-116 (2004).

Bhaduri, A., Gopinathan, V., Ramakrishnan, P., Ede, G. and Miodownik, A. P., “Microstructural evolution during mechanical alloying of Al (7010)–SiCp composites”, *Scripta Metallurgica Materialle*, 28: 907-912 (1993).

Bhushan, R. K., Kumar, S. and Das, S., “Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65: 611-624 (2013).

Bradbury, C. R., Gomon, J. K., Kollo, L., Kwon, H. and Leparoux, M., “Hardness of multi wall carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites”, *Journal of Alloys and Compounds*, 585: 362-367 (2014).

Campbell, C. E., Bendersky, L. A., Boettinger, W. J., and Ivester, R., “Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by-high-speed machining”, *Materials Science and Engineering: A*, 430: 15-26 (2006).

Casati, R. and Vedani, M., “Metal matrix composites reinforced by nano-particles-a review”, *Metals*, 4: 65-83 (2014).

Choi, H., Wang, L., Cheon, D. and Lee, W., “Preparation by mechanical alloying of Al powders with single-, double-, and multi-walled carbon nanotubes for carbon/metal nanocomposites”, *Composites Science and Technology*, 74: 91-98 (2013).

Chu, K., Jia, C., Jiang, L. and Li, W., “Improvement of interface and mechanical properties in carbon nanotube reinforced Cu-Cr matrix composites”, *Materials & Design*, 45: 407-411 (2013).

Clark, R., Coughran, B., Traina, I., Hernandez, A., Scheck, T., Etuk, C., Peters, J., Lee, E. W., Ogren, J. and Es-Said, O. S., “On the correlation of mechanical and physical properties of 7075-T6 Al alloy”, *Engineering Failure Analysis*, 12: 520-526 (2005).

Çalın, R., “Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-14 (2006).

Dasgupta, R., Meenai, H., “SiC particulate dispersed composites of an Al - Zn - Mg - Cu alloy: Property comparison with parent alloy”, *Materials Characterization*, 54: 438-445 (2005).

Deaquino-Lara, R., Gutierrez-Castaneda, E., Estrade-Guel, I., Hinojosa-Ruiz, G., Garcia-Sanchez, E., Herrera-Ramirez, J. M., Perez-Bustamante, R. and Martinez-Sanchez, R., “Structural characterization of aluminium alloy 7075-graphite

composites fabricated by mechanical alloying and hot extrusion”, *Materials and Design*, 53: 1104-1111 (2014).

Deng, C. F., Wang, D. Z., Zhang, X. X. and Li, A. B., “Processing and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum composites”, *Materials Science and Engineering: A*, 444: 138-145 (2007).

Diler, E.A., “Toz metalürjisiyle üretilen Al-SiCp metal matrisli kompozitlerde faktör etkileşimlerinin partikül dağılımı, eğme dayanımı ve aşınma özelliklerine etkileri”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 3-15 (2012).

Dong, S., Zhou, J., Hui, D., Wang, Y. and Zhang, S., “Size dependent strengthening mechanisms in carbon nanotube reinforced metal matrix composites”, *Composites Part A*, 68: 356-364 (2015).

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

Esawi, A. and Morsi, K., “Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum powder”, *Composites Part A*, 38: 646-650 (2007).

Esawi A. M. K., Morsi K., Sayed A., Abdel Gawad A. and Borah P. “Fabrication and properties of dispersed carbon nanotube-aluminum composites”, *Material Science Engineering A*, 508: 167-173 (2009).

Esawi, A. M. K., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M. and Lanka, S., “Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites”, *Composites Science and Technology*, 70: 2237-2241 (2010).

Estrada-Guel, I., Carreno-Gallardo, C., Leyva-Porras, C. and Martinez-Sanchez, R., “Effect of process parameters on micro and macro-properties of an Al-based nanocomposite prepared by means of mechanical milling”, *Journal of Alloys and Compounds*, 586: 85-89 (2014).

Fakioğlu, A., “Yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-15 (2012).

Fakioglu, A., Özyürek, D. and Yilmaz, R., “Effects of different heat treatment conditions on fatigue behavior of AA7075 alloy”, *High Temperature Material Processing*, 32 (4): 345-351 (2012).

Fakioglu, A. and Özyürek, D., “Effects of re-aging on the fatigue properties of aluminium alloy AA7075”, *Material Testing*, 56 (7-8): 575-582 (2014).

Fan, X. G., Jiang, D. M., Meng, Q. C., Zhang, B. Y. and Wang, T., “Evolution of eutectic structures in Al-Zn-Mg-Cu alloys during heat treatment”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 16: 577-581 (2006).

Fidan, S., “Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşun hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi”, *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 10-20, (2011).

German, R. M., “Powder metallurgy & Particulate Materials Processing 1st ed.” Çeviri Editörleri, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 20-40 (2007).

Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A. and Lavernia, E. J., “Particulate reinforced metal matrix composites - a review”, *Journal of Materials Science*, 26: 1137-1156 (1991).

İnternet: Material Property Data, “Online Materials Information”, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da98aea5e9de44138a7d28782f60a836> (2016).

İnternet: Material Property Data, “Online Materials Information”, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d> (2016).

İnternet: Material Property Data, “Online Materials Information”, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dd2598e783ba4457845586b58c8ea9fb> (2016).

İnternet: Material Property Data, “Online Materials Information”, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c8c56ad547ae4cfbad15977bfb537f1> (2016).

İnternet: Science Daily, “Your Source For The Latest Research News” <https://www.sciencedaily.com/releases/2010/10/101005085507.htm>. (2016).

İnternet: “Carbon Allotropes” <http://www.carbonallotropes.com/carbon-nanotubes/39-single-wall-carbon-nanotubes.html> (2016).

Isadare, A. D., Aremo, B., Adeoye, M. O., Olawale, O. J. and Shittu, M. D., “Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy”, *Materials Research*, 16: 190-194 (2013).

İzçiler, M. ve Muratoglu, M., “Wear behaviour of SiC reinforced 2124 Al alloy composite in RWAT system”, *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 67-72 (2003).

Javadi, A., Mirdamadi, S., Faghihisani, M., Shakhesi, S. and Soltani, R., “Well-dispersion of multi-walled carbon nanotubes in aluminum matrix composites by controlling the mixing process”, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 21: 436-447 (2013).

Kaczmar, J. W., Pietrzak, K. and Wlosinski, W., “The production and application of metal matrix composite materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 106: 58-67 (2000).

Kalkanlı, A. ve Yılmaz, S., “Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates”, *Materials and Design*, 29: 775-780 (2008).

Kaya, H., Uçar, M., Cengiz, A., Özyürek, D., Çalışkan, A. and Ergül, R. E., “The effect of aging on the machinability of AA7075 aluminium alloy”, *Science Research Essay*, 7 (27): 2424-2430 (2012).

Kok, M., “Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 161: 381-387 (2005).

Kubota, M. and Cizek, P., “Synthesis of Al₃BC from mechanically milled and spark plasma sintered Al-MgB₂ composite materials”, *Journal of Alloys and Compound*, 457: 209-215 (2008).

Küçükyıldırım, B. O., ve Eker, A. A., “Karbon nanotüplerin sentezlenme yöntemleri ve kullanım alanları” *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53 (630): 34-44 (2012).

LaDelpha, A. D. P., Neubing, H. and Bishop, D. P., “Metallurgical assessment of an emerging Al-Zn-Mg-Cu P/M alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 520: 105-113 (2009).

Li, J., Peng, Z., Li, C., Jia, Z., Chen, W. and Zheng, Z., “Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 18: 755-762 (2008).

Li, X., Yang, Y. and Cheng, X., “Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites”, *Journal of Materials Science*, 39: 3211-3212 (2004).

Lindroos, V. K. and Talvitie, M. J., “Recent advances in metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 53: 273-284 (1995).

Liu, Q., Ke, L., Liu, F., Huang, C. and Xing, L., “Microstructure and mechanical property of multi-walled carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing”, *Materials and Design*, 45: 343-348 (2013).

Liu, Z. Y., Xiao, B. L., Wang, W. G. and Ma, Z. Y., “Singly dispersed carbon nanotube/aluminum composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing”, *Carbon*, 50: 1843-1852 (2012).

Liu, Z. Y., Xu, S. J., Xiao, B. L., Xue, P., Wang, W. G. and Ma, Z. Y., “Effect of ball-milling time on mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites”, *Composites Part A*, 43: 2161-2168 (2012).

Mahathaninwong, N., Plookphol, T., Wannasin, J. and Wisutmethangoon, S., "T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy", *Materials Science and Engineering A*, 532: 91-99 (2012).

Miracle, D. B., "Metal matrix composites - From science to technological significance", *Composites Science and Technology*, 65: 2526-2540 (2005).

Mobasherpour, I., Tofigh, A. A. and Ebrahimi, M., "Effect of nano-size Al₂O₃ reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying", *Materials Chemistry and Physics*, 138: 535-541 (2013).

Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L. and Rohatgi, P. K., "Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene - A review", *Composites Part B: Engineering*, 77: 402-420 (2015).

Morsi K. and Esawi A., "Effect of mechanical alloying time and carbon nanotube (CNT) content on the evolution of aluminum (Al)-CNT composite powders", *Journal of Material Science*, 42: 4954-4959 (2007).

Natarajan, S., Narayanasamy R., Babu Kumares, S. P., Dinnesh, G., Anil-Kumar, B. and Sivaprasad, K., "Sliding wear behaviour of Al 6063/TiB₂ in situ composites at elevated temperatures", *Materials and Design*, 30: 2521-2531 (2009).

Özyürek D., Yıldırım M., Çiftçi İ., "The tribological properties of A356-SiCp metal-matrix composites fabricated by thixomoulding technique", *Science and Engineering of Composite Materials*, 19 (4): 351-356 (2012).

Özyürek, D., "Mekanik alaşımlama yöntemi ile titanyum bazlı metal matris kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 20-40 (2002).

Parvin, N., Assadifard, R., Safarzadeh, P., Sheibani, S. and Marashi, P., "Preparation and mechanical properties of SiC-reinforced Al6061 composite by mechanical alloying", *Material Science Engineering A*; 492: 134-140 (2008).

Peng, G. S., Chen, K. H., Chen, S. Y. and Fang, H. C., "Influence of dual retrogression and re-aging temper on microstructure, strength and exfoliation corrosion behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22: 803-809 (2012).

Perez-Bustamante R., Estrada-Guel I., Antunez-Flores W., Miki-Yoshida M., Ferreira P. J. and Martinez-Sanchez R., "Novel Al-matrix nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes", *Journal of Alloys and Compound*, 450: 323-326 (2008).

- Poirier, D., Gauvin, R. and Drew, R.A.L., "Structural characterization of a mechanically milled carbon nanotube/aluminum mixture", *Composites A*, 40: 1482-1489 (2009).
- Ramesh, C. S., Ahamed, A., Channabasappa, B. H. and Keshavamurthy, R., "Development of Al 6063 – TiB₂ in situ composites", *Materials and Design*, 31: 2230-2236 (2010).
- Rao, R. N. and Das, S., "Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites", *Materials and Design*, 32: 1066-1071 (2011).
- Rawal, S., "Metal matrix composites for space applications", *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 53: 3-7 (2001).
- Razavi-Hesabi Z., Simchi A., and Seyed-Reihani S. M., "Structural evolution during mechanical milling of nanometric and micrometric Al₂O₃ reinforced Al matrix composites", *Material Science Engineering A*, 428 (1): 59-68 (2006).
- Reda, Y., Karim, R.A., and Elmahallawi, I., "Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al-alloy 7075 via retrogression and reaging", *Materials Science and Engineering A*, 485: 468-475 (2008).
- Saberi, Y., Zebbarjad, S. M. and Akbari, G. H., "On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite", *Journal of Alloys and Compounds*, 484: 637-640 (2009).
- Sankar, R. and Singh, P., "Synthesis of 7075 Al/SiC particulate composite powders by mechanical alloying", *Material Letters*, 36: 201-205 (1998).
- Savaşkan, T., "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", *Derya Kitabevi*, Trabzon, 134-136 (2007).
- Shafiee, M. R. M., Zamani, S., Rad, H.R.B. "Effect of mechanical alloying time and ball-powder weight ratio on synthesis of MoSi₂–Mo₅Si₃ nanocomposite", *Advanced Science Letters*, 13: 616-619 (2012).
- Sharma, P., Sharma, S. and Khanduja, D., "Production and some properties of Si₃N₄ reinforced aluminium alloy composites", *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3: 352-359 (2015).
- Sivasankaran, S., Sivaprasad, K., Narayanasamy, R., and Iyer, V. K., "Effect of strengthening mechanisms on cold workability and instantaneous strain hardening behavior during grain refinement of AA 6061–10 wt.% TiO₂ composite prepared by mechanical alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, 507: 236-244 (2010).
- Suryanarayana, C., "Mechanical alloying and milling", *Progress in Materials Science*, 46: 1-184 (2001).

Suryanarayana, C. and Al-aeeli, N., “Mechanically alloyed nanocomposites”, *Progress in Materials Science*, 58: 383-502 (2013).

Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 1-99 (2000).

Tang, J. G., Chen, H., Zhang, X. M., Liu, S. D., Liu, W. J., Ouyang, H., and Li, H. P., “Influence of quench-induced precipitation on ageing behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22: 1255-1263 (2012).

Thirumaran, B., Natarajan, S. and Kumares S. P., “Corrosion Behaviour of CNT Reinforced AA 7075 Nanocomposites”, *Advances in Materials*, 2 (1): 1-5 (2013).

Thostenson, E. T., Ren, Z. and Chou, T. W. “Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review”, *Composites Science and Technology*, 61: 1899-1912 (2001).

Tjong, S., “Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 29: 49-113 (2000).

Tjong, S. C., “Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74: 281-350 (2013).

Torralba, J. M., Da Costa, C. E. and Velasco, F., “P/M aluminum matrix composites: An overview”, *Journal of Materials Processing Technology*, 133: 203-206 (2003).

Umanath, K., Palanikumar, K. and Selvamani, S. T., “Analysis of dry sliding wear behaviour of Al6061 / SiC / Al₂O₃ hybrid metal matrix composites”, *Composites Part B*, 53: 159-168 (2013).

Uygur, İ. ve Saruhan, H., “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8: 167-174 (2004).

Veeresh-Kumar, G. B., Rao, C. S. P. and Selvaraj, N., “Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites – a review”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10: 59-91 (2011).

Viana, F., Pinto, A. M. P., Santos, H. M. C. and Lopes, A. B., “Retrogression and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization”, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93: 54-59 (1999).

Wu, Y. and Kim, G. Y., “Carbon nanotube reinforced aluminum composite fabricated by semi-solid powder processing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 211: 1341-1347 (2011).

Yıldırım, M., “Al-Si-Mg alaşımlarında Mg oranının malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-15 (2012).

Yılmaz, R., Özyürek, D. ve Kibar, E., “The effect of retrogression parameters on hardness and wear behaviours of 7075 aluminium alloys”, *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 27 (2): 429-438 (2012).

Zhou, D., Qiu, F., Wang, H. and Jiang, Q., “Manufacture of nano-sized particle-reinforced metal matrix composites: A review”, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27: 798-805 (2014).

Zhou, W., Bang, S., Kurita, H., Miyazaki, T., Fan, Y. and Kawasaki, A., “Interface and interfacial reactions in multi-walled carbon nanotube-reinforced aluminum matrix composites”, *Carbon*, 96: 919-928 (2016).



ÖZGEÇMİŞ

Musa YILDIRIM 1984 yılında Kayseri’de doğdu; ilkokulu ve ortaokul öğrenimini sırasıyla Karakuyu Köyü ilköğretim okulunda ve Pınarbaşı İmam Hatip lisesinde tamamladı. Ortaöğrenimini Kayseri Anadolu Meslek Lisesi’nde tamamladı. 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliği bölümünde öğrenime başlayarak 2008 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim dalında başladığı doktora eğitimine halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi 100. Yıl / Karabük

Tel : (507) 7766954

E-posta : my.musayildirim@gmail.com