

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ A356 MATRİSLİ
KOMPOZİTİN MEKANİK VE MORFOLOJİK
ÖZELLİKLERİNE KARBON NANOTÜP
ORANININ ETKİSİ**

**2016
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ**

Eyyüb AKÇAER

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ A356 MATRİSLİ KOMPOZİTİN
MEKANİK VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNE KARBON NANOTÜP
ORANININ ETKİSİ**

Eyyüb AKÇAER

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2016

Eyyüb AKÇAER tarafından hazırlanan “KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ A356 MATRİSLİ KOMPOZİTİN MEKANİK VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNE KARBON NANOTÜP ORANININ ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hatice EVLEN



Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/ 06/ 2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ (GÜ)



Üye : Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Hatice EVLEN (KBÜ)



24/ 06/ 2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans 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.”

Eyyüb AKÇAER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ A356 MATRİSLİ KOMPOZİTİN MEKANİK VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNE KARBON NANOTÜP ORANININ ETKİSİ

Eyyüb AKÇAER

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Hatice EVLEN

Haziran 2016, 52 sayfa

Bu çalışmanın amacı; A356 alüminyum alaşımına karbon nanotüp (KNT) ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerin mekanik ve morfolojik özelliklerinin incelenmesidir. Bu kapsamda, A356 matris malzemesi farklı oranlarda (%0,5, 1, 1,5 ve 2) KNT ile takviye edilerek KNT-A356 kompozitleri üretilmiş ve bu kompozitlerin sertlik, aşınma ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Kompozit numune üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Toz halde temin edilen A356 ve KNT'ler bilyeli öğütme ile karıştırılmış ve toz sıkıştırma kalıbında 694 MPa basınç uygulanarak soğuk preslenmiştir. Ardından kalıp, işlevsel bir fırın içerisine alınmış ve kalıp üzerine 32 kg ağırlık konularak 1 saat süreyle 200 °C'de sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılan toz kütleleri 550 °C'de vakumlu ortamda 1 saat sinterlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerinin sertlik ölçümleri, aşınma testleri, SEM, MAPPING ve EDX analizleri yapılmıştır.

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda, KNT takviyeli A356 matrisli kompozitlerin sertlik değerlerinde, KNT takviyesiz A356 (%0 KNT-A356) numunesine oranla %19,24 (%2 KNT-A356) ila %38,75 (%1 KNT-A356) aralığında artış gözlemlenmiştir. Aşınma testleri sonucunda, KNT içeriğinin artmasıyla aşınma miktarında artış, dolayısıyla aşınma dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Aşınmaya bağlı en düşük ağırlık kaybı, %0 KNT-A356 numunesinde gerçekleşmiştir (22,9 mg). Numunelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla yapılan SEM, MAPPING ve EDX analizleri sonucu, KNT'lerin A356 matris malzemesinin tane sınırları arasındaki boşluklarda yerleştiği ve böylece, artan KNT içeriğiyle, kompozitlerde aşınmayı hızlandıran daha boşluklu bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Karbon, nanotüp, alüminyum, A356, toz metalürjisi, metal matrisli kompozit.

Bilim Kodu : 914.1.193

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECTS OF CNT RATE ON MECHANICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF CNT REINFORCED A356 MATRIX COMPOSITE

Eyyüb AKÇAER

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Design Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Hatice EVLEN

June 2016, 52 pages

The purpose of this study is to investigate the mechanical and morphological properties of composites made by adding carbon nanotubes to A356 aluminium alloy. In this context, CNT-A356 composites were produced by reinforcing various rates (%0,5, 1, 1,5 and 2) of CNTs to A356 matrix material, and hardness, wear and microstructure properties of this composites were investigated. Powder metallurgy method was used to produce composites. A356 and CNTs provided as powders were mixed with ball milling, and were cold pressed at 694 MPa in the compaction die. After that, die was put in a functional furnace, and hot pressing was carried out at 200 °C for 1 hour by placing 32 kg mass over the die. Pressed bulk powders were sintered in 550 °C for 1 hour under vacuum atmosphere. Hardness measurements, wear tests, SEM, MAPPING and EDX analyses of produced samples were carried out.

In results of hardness measurements, enhancements in hardness values of CNT reinforced A356 matrix composites were observed in the range of 19,24% (2% CNT-A356) to 38,75% (1% CNT-A356) in comparison with matrix. As a result of wear tests, an increase of the wear amount, and so, decrease of wear strength occurred by increasing of CNT rate. Minimum weight loss based on wear was occurred in 0% CNT-A356 sample (22,9 mg). In results of SEM, MAPPING and EDX analyses made for investigating of sample microstructures, it's observed that, CNTs located at gaps in matrix grain boundaries and so, a more porous structure that accelerated wear was formed into composites by increasing of CNT content.

Key Words : Carbon, nanotube, aluminium, A356, powder metallurgy, metal matrix composite.

Science Code : 914.1.193

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Hatice EVLEN'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde KBÜ-BAP-14/2-YL-024 no.lu proje kapsamında maddi destek sağlayan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Ofisi'ne teşekkür ederim.

Toz metalürjisi ve metalografik işlemler ile sertlik ölçümleri ve aşınma testlerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü hocalarından Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK, Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY ve Arş. Gör. Dr. Musa YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca kalıp imalatı ve fırın yenileme çalışmalarında yardımcı olan Mustafa SELALMAZ ve Ersin YILMAZER'e çok teşekkür ederim.

Maddi ve manevi her konuda, yardımlarını esirgemedен yanımda oldukları için sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER	4
2.1. KARBON NANOTÜPLER	5
2.1.1. Temel Sentezleme/Üretim Yöntemleri	6
2.1.1.1. Ark Boşaltma (Arc Discharge) Yöntemi	6
2.1.1.2. Lazerle Buharlaştırma (Laser Ablation) Yöntemi	7
2.1.1.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi.....	7
2.1.1.4. Diğer Sentezleme Yöntemleri.....	7
2.1.2. Kullanım Alanları Ve Uygulamalar.....	7
2.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....	8
2.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları	8
2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları	9
2.2.2.1. Döküm Al-Si-Mg Alaşımları	10
2.2.2.2. A356 Alaşımı	10
2.3. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ	11
2.3.1. Karıştırma/Harmanlama	12

	<u>Sayfa</u>
2.3.2. Tozları Presleme Ve Şekillendirme	12
2.3.3. Sinterleme	12
BÖLÜM 3	13
LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	13
BÖLÜM 4	18
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	18
4.1. TOZ SIKIŞTIRMA KALIBI TASARIMI VE İMALATI	18
4.2. İŞLEVSEL FIRIN TASARIMI VE İMALATI.....	19
4.3. TOZ METALÜRJİSİ İŞLEMLERİ.....	21
4.3.1. Toz Karışımların Hazırlanması.....	21
4.3.2. Hazırlanan Toz Karışımların Basılması.....	24
4.3.3. Numunelerin Sinterlenmesi, Parlatılması Ve Dağlanması	26
4.3.4. Ölçüm, Test Ve Analizlerin Numunelere Uygulanması.....	28
BÖLÜM 5	30
DENEYSEL SONUÇLAR	30
5.1. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ SONUÇLARI	30
5.2. AŞINMA TESTLERİ SONUÇLARI.....	31
5.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ SONUÇLARI.....	34
BÖLÜM 6	40
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	40
KAYNAKLAR	41
EK AÇIKLAMALAR A. TOZ SIKIŞTIRMA KALIBI TEKNİK RESİMLERİ.....	46
EK AÇIKLAMALAR B. HİDROLİK PRES TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	50
ÖZGEÇMİŞ	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. 1991 yılında Sumio Iijima tarafından gözlemlenen nanotüpler.....	6
Şekil 2.2. TM yöntemi işlem basamakları.....	11
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan toz sıkıştırma kalıbı elemanları	19
Şekil 4.2. Pres basıncına dayanım için fırın içerisine yerleştirilen parçalar.....	19
Şekil 4.3. Kalıbın oturacağı parça yüzeyinin fırın içerisindeki görünümü	20
Şekil 4.4. Fırın tabanına kaynak edilen 2. sac plaka	20
Şekil 4.5. Fırın tavanına açılan kapak	20
Şekil 4.6. İşlevsel fırının son hali	21
Şekil 4.7. Fritsch Pulverisette 6, tek hücreli bilyeli öğütme cihazı	22
Şekil 4.8. Karıştırma işleminde öğütücü hazne içinde konulan malzemeler.....	23
Şekil 4.9. Karıştırma işleminde kullanılan tozlar ve toz karışım	23
Şekil 4.10. Çalışmada kullanılan 160 ton kapasiteli hidrolik pres.....	24
Şekil 4.11. Kalıp içerisindeki tozların pres altında basılması	25
Şekil 4.12. İşlevsel fırın içerisindeki kalıbın ve kalıp üzerindeki ağırlıkların yerleşimi.....	25
Şekil 4.13. Kütle haline getirilen toz karışım.....	26
Şekil 4.14. Çalışmada kullanılan sinterleme fırını	26
Şekil 4.15. Sinterleme işleminde zamana göre sıcaklık grafiği	27
Şekil 4.16. Presi Mecapol P262 zımparalama ve parlatma cihazı.	27
Şekil 4.17. Dağlanmış numune yüzeyi.....	28
Şekil 4.18. Shimadzu HVM-2 mikro-sertlik ölçüm cihazı	28
Şekil 4.19. Çalışmada kullanılan pin-on-disk tipi aşınma cihazı.....	29
Şekil 4.20. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM cihazı.....	29
Şekil 5.1. KNT oranına göre, ölçülen sertlik değerleri	31
Şekil 5.2. Aşınma testlerinde ölçülen toplam ortalama ağırlık kayıpları	32
Şekil 5.3. Uygulanan yük ve kayma mesafelerine göre ağırlık kayıpları.....	33
Şekil 5.4. KNT oranına göre, aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri	34
Şekil 5.5. %1 KNT-A356 kompozitin içyapısındaki KNT yığınları.....	35

Sayfa

Şekil 5.6. %0,5 KNT-A356 kompozitinin tane sınırlarında, yüzeye yakın bir katmanda tek olarak görüntülenen KNT'ler.	36
Şekil 5.7. KNT'lerin taneler arası boşluklarda yerleştiğini gösteren Karbon haritaları	37
Şekil 5.8. KNT içeriğinin bulunduğu düşünülen noktaların analizleri.	38
Şekil 5.9. Numunelerdeki taneler arası boşlukları gösteren SEM görüntüleri.....	39
Şekil Ek A.1. Toz sıkıştırma kalıbı gövdesi.....	47
Şekil Ek A.2. Toz sıkıştırma kalıbı alt plakası.....	48
Şekil Ek A.3. Toz sıkıştırma kalıbı montaj resmi	49
Şekil Ek B.1. Hidroliksan 160 ton kapasiteli hidrolik pres.....	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması	9
Çizelge 2.2. Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması	10
Çizelge 4.1. A356 alaşımı kimyasal içeriği (% Ağ.).....	22
Çizelge 4.2. KNT oranına göre, tartılan malzeme miktarları.....	22
Çizelge 5.1. Bir numune için kullanılan aşınma mesafeleri ve yükler.....	31



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ag	: gümüş
Al	: alüminyum
Al ₄ C ₃	: alüminyum karbit
B	: bor
Co	: kobalt
Cu	: bakır
Fe	: demir
HCl	: hidroklorik asit
HF	: hidroflorik asit
HNO ₃	: nitrik asit
Li	: lityum
Mg	: magnezyum
Mn	: mangan
Ni	: nikel
Si	: silisyum
SiC	: silisyum karbür
Sn	: kalay
Ti	: titanyum
Zn	: çinko

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme İşlemi)
ÇDKNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
EDX	: Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X Işını Spektroskopisi)
FESEM	: Field Emission Scanning Electron Microscopy (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu)
FSP	: Friction Stir Process (Sürtünme Karıştırma İşlemi)
HIP	: Hot Isostatic Pressing (Sıcak İzostatik Presleme)
HP	: Hot Pressing (Sıcak Presleme)
HRC	: C Ölçeğinde Rockwell Sertliği
HSS	: High-Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
HV	: Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
KNT	: Karbon Nanotüp
MA	: Mekanik Alaşımlama
MAPPING	: Elementel Haritalama Analizi
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PCA	: Process Control Agent (İşlem Kontrol Elemanı)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPS	: Spark Plazma Sintering (Kıvılcımlı Plazma Sinterleme)
TDKNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TEM	: Transmission Electron Microscopy (Geçirmeli Elektron Mikroskobu)
TM	: Toz Metalürjisi
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Kırılım Cihazı)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

“Nano” kelimesi bilimsel olarak metrenin milyarda biri anlamına gelen ölçü birimidir. Bu bağlamda nanoteknoloji, nanometre ölçeğinde en az bir boyuta sahip malzeme ve cihazların tasarımı, incelenmesi, karakterize edilmesi ve uygulanmasıyla ilgili mühendislik ve bilim dalı şeklinde tanımlanmaktadır [1]. Nano boyuta küçültülen malzemelerin yeni ve üstün özelliklerinin ortaya çıkması ve dolayısıyla daha dayanıklı, daha küçük ve daha hafif hale gelmeleri nanoteknolojiye olan ilgiyi artırmıştır [2].

Nano-parçacıklar, nanoteller, grafenler, ince filmler ve nanotüpler gibi formlarda elde edilen nano malzemeler, dikkat çeken fiziksel özellikleri ve nano seviyedeki boyutları nedeniyle teknolojide çok geniş bir kullanım alanı sunmaktadırlar. Nanoteknolojinin en önemli konularından biri karbon nanotüpleridir [3].

Karbon nanotüpler (KNT), 1991 yılında Japon bilim adamı Sumio Iijima tarafından resmi olarak adlandırılmış olan, önemli elektronik ve mekanik özelliklere sahip nano yapılarıdır. Nanotüpler, bal peteği örgüsündeki bir veya daha fazla katmanlı grafenin silindirik şeklinde yuvarlatılmış, uçları açık veya kapalı dikişsiz tüp şeklindeki halidir. KNT’lerin çapları nanometre ölçeğinde, uzunlukları ise genellikle mikrometre ölçeğindedir [3,4].

Ülkemizde nanoteknoloji üzerine yapılan çalışmalarla birlikte nanotüpler üzerine yoğunlaşan enstitüler ve kurumlar bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar günümüzde daha çok nanotüp üretimi ve araştırmaları üzerine odaklanmıştır. Bazı üniversitelerde yapılan çalışmaların amaçları arasında nanotüplerin metal matrisi içinde düzgün bir şekilde dağılıp kompozit malzeme üretilmesi, mekanik, ısıl ve elektriksel özelliklerin geliştirilmesi ve şekillendirme çalışmalarının yapılması bulunmaktadır [5].

Kompozitler; metal, polimer gibi aynı veya farklı gruplarda olan iki ya da daha fazla malzemenin en iyi özelliklerini, yeni bir malzemede toplamak amacıyla oluşturulan malzemelerdir. Bir kompozit malzeme genelde düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metal matris ile bunun içinde dağılmış az oranda kullanılan takviye elemanından oluşmaktadır. Kompozit malzemeler, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzeme içerisinde toplanması ile önemli bir avantaja sahiptir [6].

Matris ve takviye malzemesi olarak iki ana parçadan oluşan kompozitler, matris malzemesinin cinsine (metal, polimer vb.) göre adlandırılırlar.

Endüstride, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca binaen, birçok farklı metal alaşımı mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla grafit, silikon karbür ve alümina gibi yüksek dayanımlı seramik fazlarla takviye edilerek metal matrisli kompozitler (MMK) üretilmektedir. MMK'ler, geliştirilmiş mekanik özelliklerin yeni üretim teknikleriyle daha düşük maliyetlerle sağlanmasına ve takviye oranlarındaki değişim ile metal matris malzemesinin fiziksel özelliklerinde istenilen değişimin elde edilebilmesine imkân tanınması sebebiyle ön plana çıkmaktadır [7].

Elastikiyet modülü, dayanım, ısıl ve yorulma dayanımları ve aşınma direnci gibi özelliklerinin yüksek olması MMK'lere olan ilgiyi ve bu konuda yapılan araştırmaları arttırmıştır. Son şekle yakın üretime imkan sağlayan toz metalürjisi (TM) yöntemi, düşük malzeme sarfiyatı ve otomasyona uygunluk gibi avantajlarıyla MMK üretiminde öne çıkmaktadır [8].

MMK'ler için genellikle hafif metal matris malzemeleri tercih edilmektedir. Alüminyum (Al) ve alaşımları, düşük yoğunluk ve ergime sıcaklığına sahip olmaları ve birçok seramik takviye elemanını kolay ıslatabilmeleri ayrıca diğer düşük yoğunluklu metallere göre düşük maliyetli olmalarından dolayı hem araştırmalarda hem endüstride en çok kullanılan MMK matris malzemesi olarak ilk sırayı almaktadırlar [8,9].

Alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra tabiatta en çok bulunan üçüncü elementtir. Doğada bileşikler halinde bulunan alüminyum oksit halindeki bileşiğinden ayrılması ve elde edilmesi ilk defa 1807 yılında gerçekleştirilmiştir. 1886'da elektroliz yönteminin kullanılmaya başlanmasıyla, alüminyumun endüstriyel çapta üretimi sağlanmıştır. Aynı yıl dinamonun keşfedilmesi ve 1892'de boksitten alümina elde edilmesini sağlayan Bayer prosesinin bulunması alüminyumun endüstriyel çapta üretimini çok kolaylaştırmış ve böylece demir-çelikten sonra en çok kullanılan ikinci metal olmuştur [10].

Alüminyum, endüstrinin pek çok kolunda kullanılan ve demir-çelikten sonra üretimi en çok yapılan önemli bir demir dışı metaldir. Alüminyum, korozyon direnci, hafifliği, alaşımına göre mukavemeti, kolay şekil verilebilmesi, elektrik ve ısı iletkenliği, darbe dayanımı ve geri dönüştürülebilme gibi özelliklerinden dolayı ulaşım, taşıma, ambalaj, inşaat, makine, elektrik nakil hatları ve diğer mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir metaldir. Daha hafif, sağlam, verimli, uzun ömürlü ve ekonomik ürünler için alüminyum tercih edilmektedir [11].

Döküm Al alaşımları, döküm kabiliyetlerinin iyi olması ve dayanım/ağırlık oranlarının ve korozyon dirençlerinin yüksek olmasından dolayı özellikle otomotiv ve havacılık sanayiinde kullanılmaktadır [12]. Bu grupta bulunan A356 alaşımının özgül çekme dayanımı ve rijitliği diğer Al alaşımlarından daha üstündür. Bu özellikleri, daha düşük araç ve uçak ağırlığı ve daha iyi yakıt tasarrufu sağlamaktadır [13].

Bu çalışmada, farklı oranlarda KNT ilave edilerek A356 matrisli KNT takviyeli (KNT- A356) kompozitler üretilmiştir. Bu kompozitlerin mekanik ve morfolojik özelliklerindeki değişimler, KNT oranına göre incelenmiştir. Bu kapsamda, %0,5, 1, 1,5 ve 2 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) takviyesi ile elde edilen KNT-A356 kompozitlerinin sertlik ölçümleri ve aşınma testleri yapılmış, SEM, EDX ve MAPPING analizleri gerçekleştirilerek tane yapıları ile matris ve takviye malzemelerinin kompozit içerisindeki dağılımları incelenmiştir.

BÖLÜM 2

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Karbon nanotüplerin; uzay, enerji, otomobil, ilaç ve kimya endüstrisi gibi değişik alanlarda, gaz emiciler, katalizör desteği, ölçme propları, kimyasal sensörler, nano-borular, nano-reaktörler, kompozit takviyeleri vb. olarak kullanılabildikleri geniş çapta uygulamaları vardır.

KNT'lerin keşfedilmesinden ve eşsiz mekanik, ısı ve elektriksel özelliklerinin fark edilmesinden bu yana birçok araştırmacı, bu özelliklerinin bir veya birkaçını ortaya koyan KNT kompozitleri üretmeye çalışmıştır [14]. KNT'lerin ilk ticari kullanımı, polimer matrisli kompozitlerde elektrik iletim malzemesi olarak gerçekleştirilmiştir. KNT'ler, tüm yeni kompozitlerde kullanabilmektedir. Yapılan çalışmalarda KNT takviyeli birçok kompozit başarıyla üretilmiştir. KNT takviyeli kompozitler üzerine yapılan deneylerde mekanik özelliklerin önemli ölçüde arttığı ispat edilmiştir [15].

Metal matrisli KNT takviyeli kompozitler, kendine özgü yüksek dayanımı, yüksek ısı iletkenlik ve düşük ısı genişleme katsayısı nedeniyle yük taşıma uygulamaları ve elektronik paketleme alanlarında büyük bir potansiyele sahiptirler. Bu özellikler, enerjinin korunmasını sağlayan düşük ağırlık faktörünün ihtiyaç duyulduğu uzay araçları ve otomotiv yapı elemanları gibi gelişmiş uygulamalarda avantajlar sağlamaktadır. Son yıllarda birçok araştırma, KNT takviyeli Al matrisli kompozit geliştirme üzerine odaklanmıştır. Çünkü Al matrisli kompozitlerin havacılık, uzay seyahatleri ve otomobil endüstrilerinde geniş uygulama beklentileri bulunmaktadır. Ayrıca KNT'lerin 1 TPa Young modülüne sahip olması, bunları kompozit malzemeler için ideal takviye elemanı yapmaktadır [16].

TM yöntemi, MMK üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerdendir. Bu yöntemle genellikle, parçacık şeklindeki matris ile toz haldeki metal malzeme kullanılarak kompozit oluşturulur [17].

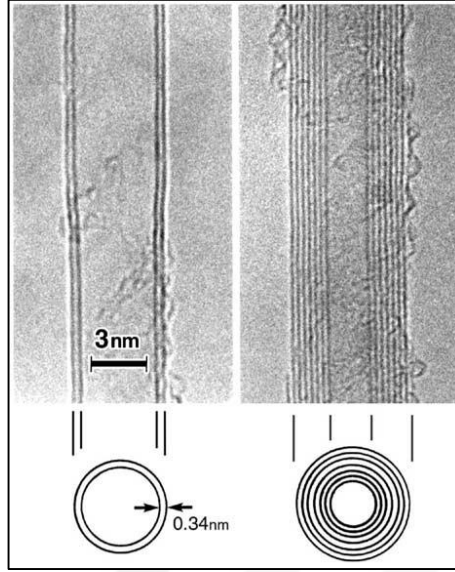
TM ile kompozit üretiminde en önemli noktalardan biri ıslanabilirlik veya arayüzey bağı oluşturabilme, diğeri ise matrisle takviye malzemesinin birbiri içinde homojen dağılımıdır. Tozların karıştırılmasından sinterleme işlemine kadar olan TM işlem yolunda, bu noktalar göz önüne alınarak farklı işlemler de uygulanmaktadır. Sinterleme aşaması için, tozların içinden DC akım geçirilerek yapılan kıvılcımlı plazma sinterleme (SPS), toz sıkıştırma ve sinterlemenin aynı anda yapıldığı sıcak presleme (HP) gibi işlemler de kullanılmaktadır [18].

Kompozit üretiminde uzun zamandır kullanılmakta olan TM yöntemi ile Mg, Ni, Ti, Ti bazlı alaşımlar, Ag ve Sn alaşımları gibi metal matris malzemelerinin KNT takviye edilerek üretilmesinde faydalanılmaktadır. TM yöntemi yaygın olarak Al-KNT ve geniş oranda Cu-KNT kompozitlerinin üretiminde kullanılmaktadır. KNT dağılımını kolaylaştırması, TM yöntemini önemli hale getirmektedir [19].

2.1. KARBON NANOTÜPLER

Karbon malzemeler; grafit, elmas, karbon fiber, fulleren ve karbon nanotüp olmak üzere birçok formda bulunabilirler. KNT'ler, 4~30 nm dış çapı ve 1 mm'ye varan uzunlukları olan, bal peteği örgüsünde, bir veya iki ucu kapalı, dikişsiz tüp şekline sahip karbon yapılarıdır. Tek duvarlı, iki duvarlı, çok duvarlı gibi çeşitleri vardır. Bu duvarlar iç içe geçmiş ve eş merkezli olarak yerleşmiştir. 1991 yılında gözlemlenen KNT'lerin SEM görüntüleri Şekil 2.1.'de verilmiştir [20,21].

KNT'ler, önemli elektronik ve mekanik özellikleri olan eşsiz nano-yapılardır. 1991'de keşfedilmesinden bu yana birçok çalışmada, genellikle geliştirici yapı olarak kullanılmıştır. İlk başlarda dikkat çeken elektronik yapılarıyla araştırma konusu olarak büyük bir ilgi uyandırmıştır. Sonrasında, alışılmamış mekanik özellikleri gibi şaşırtıcı özelliklerinin keşfedilmesiyle, nano boyutlu elektronik uygulamalar ve farklı uygulamalar için potansiyellerine olan ilgi artmıştır [22].



Şekil 2.1. 1991 yılında Sumio Iijima tarafından gözlemlenen nanotüpler [4].

Yapılan çalışmalarda KNT'lerin; paslanmaz çelikten yaklaşık 100 kat daha dayanıklı (150 GPa) ve 6 kat hafif, elmas kadar da sert olduğu ölçülmüştür. Ayrıca bakırdan 1000 kat yüksek akım taşıma kapasitesine ($4 \cdot 10^9$ A/cm²) ve 10 kat yüksek ısı iletkenliğe (3500 W/m.K), ayrıca 3727 °C'ye kadar ısı kararlılığına sahip olduğu gözlemlenmiştir [23].

2.1.1. Temel Sentezleme/Üretim Yöntemleri

KNT'lerin sentezlenmesi veya üretilmesi için farklı uygulama ve kullanım istekleri doğrultusunda, uzun çalışmalar sonucunda belirli yöntemler ortaya çıkartılmıştır. KNT'ler, değişik yöntemler kullanılarak çok fazla miktarda üretilebilmektedir. Bu yöntemlerin bazı üstünlük ve dezavantajları bulunmaktadır [24].

2.1.1.1. Ark Boşaltma (Arc Discharge) Yöntemi

KNT sentezlenmesinde ilk olarak kullanılan bu yöntemde, anot ve katot grafitler arasında, doğru akım kullanılarak ark oluşturulup KNT sentezlenmektedir. Bu işlem, helyum gazı verilen ark reaktörü içerisinde, en az 600 milibar basınçta, anot ve katot arasında 20-40 V gerilim ve 50-150 A akım oluşturularak gerçekleştirilmektedir [25].

2.1.1.2. Lazerle Buharlaştırma (Laser Ablation) Yöntemi

1995 yılında keşfedilen bu yöntemde, 5.10^{-4} MPa basınç altında, 1200 °C'de fırın içerisinde lazer ile buharlaştırılan grafitten karbon yığınları çıkararak, helyum veya argon içeren ortamda su soğutmalı bakır bir toplayıcı üzerinde biriktirilirler. Bu işlem sonucunda çok duvarlı KNT (ÇDKNT) elde edilirken, farklı katalizör içeren grafit kullanarak tek duvarlı KNT (TDKNT) de elde edilebilmektedir. Ark boşaltma yöntemine göre akma dayanımı daha yüksek, daha kaliteli TDKNT üretmeye uygun olmasına rağmen çok maliyetli ve üretim kapasitesi düşük bir yöntem olduğundan pek tercih edilmemektedir [26].

2.1.1.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi

Genel olarak katalizörlü kimyasal buhar çökeltme (CCVD) olarak bilinen bu yöntem, karbon içeren kaynak parçanın küçük metalik parçalar veya öbekler üzerinde ayrışması prensibine dayanmaktadır. İşlem tepkimeleri için Fe, Co ve Ni gibi metaller kullanılır. Bu yöntemle üretilen KNT'ler, ark boşaltma yöntemine göre daha düşük kalitede fakat daha uzun boylara sahiptirler. Bu yöntemin, ısı CVD, plazmayla güçlendirilmiş CVD ve mikrodalga plazmayla CVD gibi çeşitleri bulunmaktadır [27].

2.1.1.4. Diğer Sentezleme Yöntemleri

KNT'lerin diğer sentezleme yöntemleri arasında, metal katalizör kullanılarak gerçekleştirilen buhar fazında büyüme, yüksek basınçta bir sulu çözeltiden maddelerin kristalleştirildiği hidrotermal sentezleme ve ergiyik lityum klorürün grafit hücre ile elektrolizi bulunmaktadır [5].

2.1.2. Kullanım Alanları Ve Uygulamalar

Günümüzdeki nanotüp uygulamaları kısıtlı oranlarda olup, geniş kitlelerce kullanılır bir hâlde bulunmamaktadır. Yine de teorideki özelliklerinin kullanılabilir hâle geçebildiği ispatlanmasından dolayı büyük önem taşımaktadırlar. Bükülebilirlik,

akım taşıma kapasiteleri, elektronik bağlanabilirlik gibi özellikleriyle KNT'ler, çeşitli mikro elektronik uygulamalarında kullanılmaktadır. Diğer yandan KNT'ler, bükülebilir TFT filmlerde ve elektron yayılımındaki verimlerinden dolayı TV ve bilgisayar ekranlarında kullanılabilir. Ayrıca lityum-ion bataryalarda ve güneş pillerinde kullanımı bulunmaktadır.

Yarı iletken TDKNT kullanılarak, oda sıcaklığında çalışabilen, boyut ve hassasiyet açısından normal sensörlere göre önemli farklara sahip kimyasal sensörler üretilebilmektedir. KNT'lerin morfolojik yapıları, boyutları ve en-boy oranlarından dolayı katalizör desteği malzemeler olarak ta kullanımı vardır [5].

2.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum, demir dışı metaller sınıfında yer alan, yumuşak, hafif, kolay işlenebilen, ısı ve elektrik iletkenliği yüksek ve korozyon dayanımı iyi bir metaldir. Ayrıca çelikten sonra en yaygın kullanıma sahip bir mühendislik malzemesidir. Yoğunluğu çeliğin üçte biri kadar olmasına rağmen ($2,7\text{g/cm}^3$) özgül dayanımı iyidir ve bu sebeple çeliğe oranla aynı yük altında daha hafif malzeme kullanılmasını sağlar. Elastikiyet modülü 70 GPa'dır. Sertliği ve aşınma dayanımı ise düşüktür [28,29].

Saf Al, dayanımı düşük ve yumuşak bir malzeme olduğu için alaşımlama ile mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Mg, Si, Cu ve Zn gibi metallerle alaşımlandırılarak dayanımı büyük oranda artırılabilir ve ısıl işlemlere uygun hale getirilmektedir. Al alaşımları dövme ve döküm olarak iki gruba ayrılır.

2.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme Al alaşımları, döküm, soğuk veya sıcak çekme ve haddeleme ile elde edilmektedir. Bu alaşımların mekanik özellikleri uygulanan dövme, çekme, haddeleme ve ısıl işlemlerden dolayı döküm Al alaşımlarından daha yüksektir. Bu alaşımların sınıflandırılması, içerikleri ve ısıl işlem durumları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Dövme Al alaşımlarından %3,5~4,9 Cu, %0,2~1,9 Mg, %0,3~1,1 Mn içeren alaşım, otomat tezgâhları için uygun bir malzemedir. Özellikle optik ve hassas aletlerde kullanılan %06~7,2 Mg, %0~0,6 Mn ve %0~0,3 Cr içeren alaşım dönen parçaların talaşlı işlemlerine uygundur [30].

Çizelge 2.1. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması [30].

Dövme Alaşımlar		
<i>Alaşım Kodu</i>	<i>Temel Alaşım İçeriği</i>	<i>Isıl İşlem Durumu</i>
1xx,x	%99 ve üstü saflıkta Al	Yaşlandırma yapılamaz
2xx,x	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xx,x	Al-Mn	Yaşlandırma yapılamaz
4xx,x	Al-Si ve Al-Mg-Si	Mg varsa yaşlandırılabilir
5xx,x	Al-Mg	Yaşlandırma yapılamaz
6xx,x	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xx,x	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xx,x	Al-Li, Sn, Zn veya B	Yaşlandırılabilir

2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar kum veya madeni kalıp kullanılarak döküm yöntemiyle elde edilmektedir. Genel kullanım amacıyla üretilen Al döküm parçalarında alaşım seçimi işlenebilirlik, korozyon direnci, sertlik ve mekanik değerler gibi özelliklere göre yapılmaktadır. Bu alaşımların sınıflandırılması, içerikleri ve ısıl işlem durumları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Döküm Al alaşımlarından %11~13,5 Si ve %0~0,5 Mg içeren alaşım çok iyi döküm özelliği ve yüksek korozyon direnci göstermekle birlikte talaşlı imalat için iyi bir yapı sergiler. %9~11 Si, %0,2~0,4 Mg ve %0~0,5 Mn içeren alaşım yüksek zorlanma altında, yavaş ve titreşimli çalışacak parçaların üretimine uygundur. Korozyona dirençli ve kaynak edilebilir özelliktedir. %11 Si içeren alaşım da aşınma direnci yüksek bir malzemedir [30,31].

Çizelge 2.2. Alüminyum döküm alaşımların sınıflandırılması [31].

Döküm Alaşımlar		
<i>Alaşım Kodu</i>	<i>Temel Alaşım İçeriği</i>	<i>Isıl İşlem Durumu</i>
1xx,x	%99 ve üstü saflıkta Al	Yaşlandırma yapılamaz
2xx,x	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xx,x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları yaşlandırılabilir
4xx,x	Al-Si	Yaşlandırma yapılamaz
5xx,x	Al-Mg	Yaşlandırma yapılamaz
6xx,x	Kullanılmayan seri	-
7xx,x	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xx,x	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

2.2.2.1. Döküm Al-Si-Mg Alaşımları

Hafiflik, yüksek dayanım ve ısı iletkenliği, düşük ısıl genleşme gibi özellikleriyle Al-Si alaşımları, otomotiv sanayiinde döküm parçaların imalatında kullanılmaktadır. Si ile alaşımlama sonucu Al'nin döküm karakteristiği, dayanım, kolay işlenebilirlik ve korozyon dayanımı gibi özellikleri geliştirilmektedir. Al-Si alaşım yapısı düşük oranlarda Cu, Mg veya Ni eklenerek güçlendirilmektedir. Mg ilavesi alaşımın akma ve kopma dayanımlarını önemli ölçüde etkilemektedir [31].

Döküm Al-Si-Mg alaşımları kompozit üretiminde, matris malzemesi olarak özel bir grup oluşturmaktadır. Bu gruptaki A356 ve A357 alaşımları, yüksek saflığından dolayı yüksek sünekliğe sahiptirler [32].

2.2.2.2. A356 Alaşımı

A356 alaşımı genel olarak, yüksek uzama ve gerilme değerleri ve iyi işlenebilirliğe sahiptir. Yüksek gerilme değerlerine ihtiyaç duyulan yapısal parçalarda, otomotiv ve uçak sanayiinde, transmisyon kutusu, manifold, silindir başlığı, jant vb. parçaların üretiminde kullanılmaktadır [12,33]. Literatürde A356 alaşımının, KNT takviye edilerek farklı yöntemlerle MMK üretiminde kullanıldığı görülmektedir [34-36].

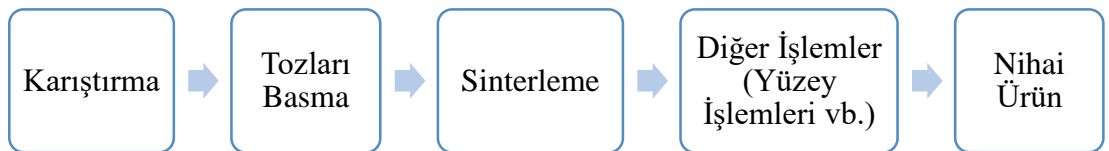
2.3. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ

Toz metalürjisi (TM), toz haldeki metal malzemelerin karıştırılması, sıkıştırılması ve sinterlenmesi aşamalarından oluşan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, döküm ve talaşlı imalat gibi üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiş geleneksel olmayan bir üretim tekniğidir. Bu yöntemle yüksek mukavemete sahip, diğer yöntemlerle üretimi zor veya mümkün olmayan küçük ve işlevsel parçalar üretilmektedir.

TM yöntemi ilk olarak demir, demir dışı hafif metaller ve refrakter gibi malzemelerin imalatında tercih edilen bir yöntemken, günümüzde ileri teknoloji seramiklerin ve kompozitlerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

TM yöntemini uygulamadan önce ilk işlem istenilen özelliğe sahip tozların temin veya elde edilmesidir. Bu yöntemde kullanılacak tozlar; atomizasyon ve öğütme gibi mekanik yöntemler, hidrojen ve karbon indirgemesi gibi kimyasal yöntemler ve elektroliz gibi elektro-kimyasal yöntemler kullanılarak üretilmektedir [37,38].

TM yönteminde ilk aşama, tozların birbiri içinde homojen dağılımı sağlamak amacıyla yapılan karıştırma işlemidir. Bu işlem büyük oranda bilyeli öğütücülerde yapılmaktadır. Bu işlemin ardından, üretimi istenen parça şekline sahip bir sıkıştırma kalıbında, yeterli mukavemet ve yoğunluk değerlerinde tozların sıkıştırılması sağlanır. Tozların kütle haline getirildiği bu aşamadan sonra numuneler, mukavemetin artırılması ve parça bütünlüğünün sağlanması için sinterleme işlemine tabi tutulur [39]. TM yöntemi işlem basamakları Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. TM yöntemi işlem basamakları.

2.3.1. Karıştırma/Harmanlama

İstenilen özelliğe sahip tozların, alaşım veya kompozit bileşeni toz malzemelerle, çinko stearat gibi yağlayıcı/bağlayıcı katkı maddeleri kullanılarak karıştırılması işlemidir. Bu işlemde özel karıştırıcılar (bilyeli öğütücüler vb.) kullanılır ve farklı boyutlardaki toz malzemelerle homojen bir toz karışımı elde edilecek sürede işlem devam eder [40].

2.3.2. Tozları Presleme Ve Şekillendirme

Karıştırılan tozların kütle haline ve istenilen şekle getirilmesi işlemidir. Toz presleme işleminde amaç, şekil vermenin yanı sıra sinterleme öncesi belirli bir yoğunluk ve mukavemet elde edilmesidir. Bu işlem sıkıştırma kalıplarında, genellikle 0~800 MPa sıkıştırma basıncı altında yapılmaktadır. Toz presleme işlemi, sıcak ve soğuk olarak, pres altında veya sıvı basıncı ile (izostatik) gerçekleştirilebilmektedir [41].

2.3.3. Sinterleme

Sıkıştırılmış toz kütlelerin içerisindeki tanelerin birbirleriyle atomsal bağ kurması ve temas yüzeylerini artırması yoluyla malzeme dayanımında artış meydana getirmek amacıyla yapılan işlemdir. Atmosfer kontrollü bir ortamda, ana madde veya matris malzemesinin ergime sıcaklığının 1/3'ü kadar altında bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Basıncılı veya basınçsız olarak uygulanmaktadır. Bu işlem ile gözenekli yapıdaki ve düşük mukavemetteki toz kütlenin dayanım ve şekil bütünlüğü büyük oranda artmaktadır [42].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Polimerler, seramikler ve metaller için KNT'lerin takviye elemanı olarak kullanımı son yıllarda gittikçe artmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğu KNT takviyeli polimer tabanlı kompozitler üzerine olmasına rağmen, 2003 yılından itibaren KNT takviyesinin MMK üretiminde kullanımı da artış göstermiştir. 2007 yılından itibaren ise MMK'lerde matris malzemesi olarak Al kullanımının büyük oranda arttığı gözlemlenmektedir [43].

Farklı üretim yöntemlerinin kullanıldığı KNT takviyeli Al matrisli kompozitler ile ilgili çalışmalarda özellikle, KNT'lerin matris malzemesine olan mekanik katkıları incelenmiştir. Büyük oranda TM yoluyla elde edilen bu kompozitlerde, mekanik gelişimin sağlanması konusunda üzerinde en çok durulan noktanın, KNT'lerin Al matris içerisinde homojen dağılımı olduğu görülmektedir. Beklenen gelişimin sağlanmasında yalnızca kullanılan dağılım yöntemleri ve şartları değil aynı zamanda KNT takviye oranının da önemli bir etken olduğu ve sonuçları etkilediği yapılan çalışmalarda açıkça görülmektedir.

Bu çerçevede Esawi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, %0,5, 1, 2 ve 5 oranlarında KNT ilavelerinin Al matris içerisinde dağılımı için bilyeli öğütme kullanarak KNT içeriğinin, kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Al-KNT toz karışımını 475 MPa basınçta soğuk preslemiş, ardından 500 °C'de sıcak ekstrüzyona tabi tutmuşlardır. Ürettikleri numunelerde Al matrise kıyasla, çekme dayanımında %50'ye, sertlikte %23'e varan artış gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları KNT'lerin takviye etkisini ve geniş en-boy oranını tümüyle gözlemlenmelerine rağmen, %2'den fazla KNT içeriğinde dağılımın zor olduğunu ve bu sebeple, KNT miktarının artmasıyla mekanik özelliklerde beklenen artışların tümüyle gerçekleşmediğini de gözlemlemişlerdir [44].

Esawi ve Morsi yaptıkları çalışmada, %2 oranında KNT'nin Al tozları içerisinde homojen dağılımını sağlayabilmek için mekanik alaşımlama (MA) kullanmışlardır. Yarım saat ila 48 saat arasında değişen öğütme sürelerinin KNT'nin dağılımı ve tozların morfolojik gelişimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Öğütücü bilyelerin etkisi altındaki hasardan nanotüpleri korumada ve yumuşak Al içerisinde nanotüplerin dağılımında MA'nın etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda bu tekniğin, KNT-MMK geliştirmedeki kilit sorunlardan biri olan nanotüp yığılmasının üstesinden gelmede umut vadeden bir teknik olduğunu göstermişlerdir [45].

Abdullahi vd. yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda (%1, 1,5, 2, 2,5) ÇDKNT kullanarak TM yöntemiyle KNT-Al nanokompozitleri üretmiş ve bu kompozitlerin aşınma davranışını incelemişlerdir. Aşınma testlerini AISI 52100 çelik diske sahip pin-on-disk cihazı kullanarak, 0,5, 0,65, 0,79 m/s kayma hızları ve 5,5, 7,2, 10 N normal yükler altında gerçekleştirmişlerdir. Planet tipi bilyeli öğütme cihazı kullanarak, 300 d/d dönme hızında, 1, 2 ve 3 saatlik öğütme sürelerinde, argon gazı verilen haznelerde tozları öğütmüşler ve 48 MPa basınçta tek yönlü olarak soğuk preslemişlerdir. Kütle haline getirilen tozları ekstrüde ettikten sonra sıcak izostatik presleme (HIP) makinesi kullanarak 500 °C'de sinterlemiş, işlem ortamını kontrol için de 17 MPa basınçta 1 saat argon gazı vermişlerdir. Deneyler sonucunda KNT'nin matris içerisindeki homojenliğinin, KNT-Al nanokompozitin aşınma direncinde gelişme sağladığını ve bu kompozitin saf alüminyuma göre daha düşük aşınma oranı gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, KNT içeriğinin %0'dan %1,5'e artmasıyla aşınma oranının düştüğünü, %1,5'ten %2'ye çıkmasıyla yavaşça arttığını, bu orandan sonra da hızlıca arttığını gözlemlemişlerdir [46].

Jeyasimman vd. çalışmalarında, farklı oranlarda (%0, 0,5, 1,0, 1,5 ve 2) ÇDKNT takviyeli Al 6061 nanokristal matrisli kompozitleri MA yöntemiyle üretmiş ve bu kompozitlerin mekanik ve morfolojik incelemişlerdir. Öncelikle, mikro-kristal Al 6061 tozları üretmek için gereken saf tozları planet tipi iki hazneli bilyeli öğütücüde, 2 saat, 280 d/d dönme hızında, bilyesiz harmanlamışlardır. Ardından bu tozları, bilyeli öğütücüde 10/1 bilye/toz oranında bilye kullanarak 28 saat, 280 d/d dönme hızında öğütmüş ve bu süre sonunda %0,5, 1, 1,5 ve 2 oranlarında KNT ekleyerek

toplam öğütme süresine (30 saat) kadar öğütmüşlerdir. Öğütülen tozları çift etkili toz basma kalıbında, 500 MPa basınçta, 40 tonluk pres kullanarak tek eksenli soğuk preslemiş, 350 °C’de 1 saat sürede gazlardan arındırmış ve 450, 525 ve 600 °C sıcaklıklarda 2 saat sinterlemişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin Al 6061’in sertliğinden yaklaşık üç kat daha yüksek (76 HV-818 MPa) Vickers sertliği sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bu yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesinin, ÇDKNT’ün öğütmenin son iki saatinde eklenmesiyle olduğunu ortaya koymuşlardır [47].

Kim vd. çalışmalarında, dağılım şartı, üretim yöntemi ve KNT oranına (%0, 1, 3, 5) göre KNT-Al kompozitlerin sürtünme ve aşınma karakteristiklerini ölçmüşlerdir. KNT’nin matriste dağılımı için üç farklı dağılım şartı seçmişlerdir. Yaptıkları deneylerde en iyi dağılım şartının; “asitle muamele yapma, Al tozları karıştırma ve daha sonra 20 dk ultrasonikasyon yapma” olduğunu belirlemiş ve bu şartı kullanarak numunelerini sıcak presleme (HP) ve kıvılcımlı plazma sinterleme (SPS) yöntemleriyle üretmişlerdir. HP işleminde, Al ve KNT tozlarını 600 °C sinterleme sıcaklığına 10 °C/dk hızla ısıtıp bu sıcaklıkta 30 dk bekletmişlerdir. SPS işleminde ise Al ve KNT tozlarını 600 °C sıcaklığa 50 °C/dk hızla ısıtıp bu sıcaklıkta 10 dk bekletmişlerdir. Her iki işlemi de vakum ortamında 50 MPa basınçta gerçekleştirmiş ve numuneleri fırında soğutmuşlardır. Aşınma miktarını azaltma ve kararlı sürtünme gerçekleştirmede SPS yönteminin HP yönteminden daha etkili olduğunu gözlemlemiş ve SPS kullanarak dört farklı oranda (%0, 1, 3, 5) KNT içeren numuneler üretmişlerdir. Bunların arasında en düşük sürtünme ve aşınmaya sahip numunenin %1 KNT içeriğine sahip numune olduğunu ortaya koymuşlardır [48].

Qiang Liu vd. yaptıkları çalışmada, farklı ÇDKNT içeriğiyle (%0, 1,6, 2,5, 4,4, 5,3, 6) takviye edilen Al matrisli kompozitleri, sürtünme karıştırma işlemi (FSP) yoluyla üretmişlerdir. Al matris ile ÇDKNT arasındaki arayüzeyi ve nanokompozitlerin mikroyapısını, optik mikroskop ve geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) kullanarak incelemiş ve bu kompozitlerin çekme dayanımı ve mikro-sertlik değerlerini ölçmüşlerdir. FSP süresince ÇDKNT’ün Al matris içerisinde çok iyi yayıldığını, ayrıca ÇDKNT içeriğinin artması ile ÇDKNT-Al kompozitlerinin çekme dayanımı ve mikro-sertlik değerlerinin kademeli olarak arttığını, buna karşın uzamanın

azaldığını gözlemlemişlerdir. Bunlara ilaveten, çekme dayanımının en yüksek değerinin %6 ÇDKNT oranlı kompozitte olduğunu (190,2 MPa) ve ÇDKNT oranının artmasıyla kompozitin gittikçe kırılğanlaştığını ortaya koymuşlardır [49].

Xiao-ning Hao vd. çalışmalarında, %1 KNT takviyeli Al 2024 matrisli kompozitleri, çeşitli bilyeli öğütme şartlarında MA yaparak ve sonrasında sıcak ekstrüzyon uygulayarak üretmişlerdir. KNT'lerin yoğunlaşması, öğütme süresi ve işlem kontrol elemanının (PCA) KNT-Al 2024 kompozitleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Öğütülen tozlar ve sinterlenen numunelerin mikroyapı ölçümünü ve mekanik özelliklerini XRD, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve mekanik test yoluyla incelemişlerdir. MA işlemlerini, planet tipi bilyeli öğütücü kullanılarak, argon gazı verilen haznede 150, 200, 250, 300, 350 d/d dönme hızlarında ve 1, 5, 10 ve 15 saat öğütme sürelerinde gerçekleştirmişlerdir. Kompozit tozlarını, indüksiyonla ısıtarak sinterleme işlemiyle, vakum altında, 525 °C'de, 400 MPa basınçta, 30 dk sinterlemişlerdir. Ardından 500 °C'de, 10/1 oranında ekstrüde etmişlerdir. KNT miktarı sabit iken öğütme süresi ve dönüş hızındaki artışın, metal matris tozlarının tanecik boyutunun düşmesine neden olduğunu, ayrıca az miktarda KNT ilavesiyle kompozitin çekme dayanımında artış olduğunu gözlemlemişlerdir [50].

Perez-Bustamante vd. yaptıkları çalışmada, Al 2024 alaşımının ve %1, 3, 5 oranlarında KNT takviyeli kompozitlerin aşınma davranışını pin-on-disk tipi aşınma cihazı ile ölçerek incelemişlerdir. Nanotüplerin Al matriste dağılımını, bilyeli öğütücü ile argon gazı dolu öğütme haznesinde 5 saat öğütme yapıp, PCA olarak ta metanol kullanıp gerçekleştirmişlerdir. Öğütülen tozları ~1500 MPa basınçta soğuk basıp 500 °C'de, argon atmosferi altında, basınçsız olarak 2 saat sinterlemişlerdir. Al alaşımı ve kompozitlerini, pin-on-disk sisteminde, su kullanarak, 220, 320, 400 gritlik SiC aşındırıcılarla, 2 m/s kayma hızında ve 0,5 ve 1 N yük uygulayarak aşınmaya maruz bırakmışlardır. Yaptıkları aşınma davranışı ölçümleri sonucunda, daha yüksek nanotüp oranlı (%5) kompozitlerin, çalışmada ölçülen tüm durumlarda gelişmiş aşınma direnci gösterdiğini gözlemlemişlerdir [51].

Al-Qutub vd. çalışmalarında, bilyeli öğütme ve kıvılcımlı plazma sinterleme (SPS) yoluyla hazırladıkları Al 6061 alaşımın ve %1 KNT takviyeli Al 6061 kompozitin

sürtünme ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Etanol kullanarak, KNT tozlarına 30 dk sonikasyon uygulamış, ardından Al 6061 tozlarını ekleyerek işlemi 15 dk daha sürdürmüşlerdir. Sonikasyon uyguladıkları toz karışımlarını, Argon gazı dolu haznelerde, 1 saat sürede ve 200 d/d dönme hızında, ıslak olarak bilyeli öğütmüş, daha sonra tozları kurutmuş ve yığılmaları kırmak amacıyla 10 dk kuru öğütmüşlerdir. SPS kullanarak, 35 MPa basınç altında, vakumlu ortamda, 400, 450, 500 °C’de ayrı ayrı 20 dk sinterlemişlerdir. 400 °C’den 450 °C’ye çıkan sinterleme sıcaklığının sertlik ve bağıl yoğunlukta artış sağladığını gözlemledikleri için aşınma ve sürtünme testlerinde bu kompoziti seçmişlerdir. Aşınma testlerini, 24 HRC sertliğinde AISI 4140 çelik diske sahip pin-on-disk sisteminde, 600 gritlik aşındırıcı üzerinde, 0,5 m/s kayma hızında ve 5~30 N arası yükleri uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. 5~15 N arası yüklerde kompozitin matris alaşımına kıyasla daha düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sergilediğini, bununla birlikte, 20~30 N arası yüklerde kompozitin, matris alaşımına göre daha yüksek aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sergilediğini gözlemlemişlerdir [52].

Perez-Bustamante vd. çalışmalarında, KNT takviyeli Al 2024 matrisli kompozitin üretimini TM yöntemiyle gerçekleştirmiş, öğütme süresi ve KNT yoğunluğunun bu kompozitin sertliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Al 2024 tozlarını ve farklı oranlarda (% 0,5, 1, 2, 3, 4, 5) KNT’leri bilyeli öğütücüde, argon gazı dolu haznelerde, PCA olarak metanol kullanıp, 5, 10, 20 ve 30 saatlik öğütme sürelerinde öğütmüş ve ~1500 MPa basınçta Ø5x1 mm ebadında diskler halinde basmışlardır. Ardından, 500 °C’de, 2 saat sürede, argon atmosferi altında basınçsız olarak sinterlemişlerdir. Al matris içerisinde KNT’lerin homojen dağılımını FESEM ile incelemiş, ayrıca yüksek çözünürlüklü TEM kullanarak, Al matris içerisinde iyi dağılmış KNT’leri, aynı zamanda iğneye benzer Al karbit (Al_4C_3) oluşumlarını tespit etmişlerdir. Al_4C_3 ’ün oluşumunun; MA sırasında, KNT’lerin dış çeperi ve Al matris arasındaki etkileşim olduğu öne sürmüşlerdir. Yaptıkları mikro-sertlik ölçümlerinde aynı sürede öğütülen takviyesiz alaşım ile kıyas edildiğinde sertlik değerindeki en yüksek artışın (%285) %5 KNT içerikli, 20 saat öğütülen KNT-Al 2024 kompozitte olduğunu bulmuşlardır (290,9 HV). Sonuç olarak, Al alaşım matriste KNT’nin homojen dağılımı ve matristeki Al_4C_3 varlığının sertlik değerlerinde önemli bir gelişmeye neden olduğunu ortaya koymuşlardır [53].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

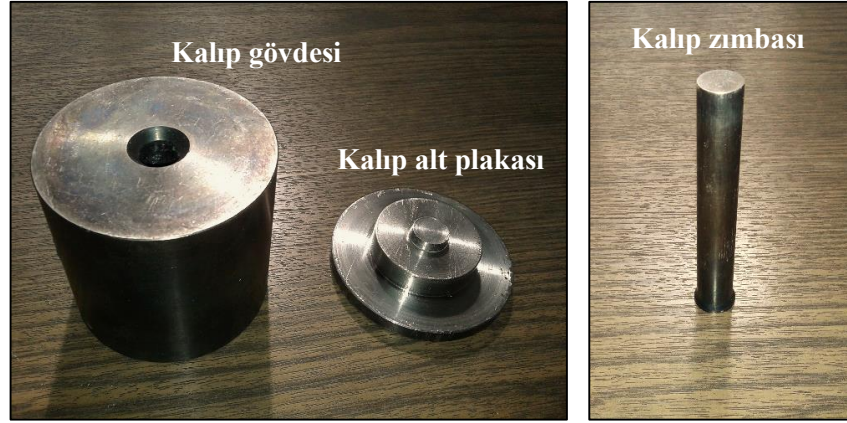
Bu çalışmada, A356 matrisli KNT takviyeli kompozitin elde edilmesinde TM yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak Ø12x10 mm ebadında numuneler üretilmiştir. Tozları karıştırma, soğuk ve sıcak presleme, sinterleme ve parlatma aşamalarından oluşan işlem dizisi sonunda elde edilen numunelerin sertlik ölçümleri ve aşınma testleri ile SEM, EDX ve MAPPING analizleri yapılmıştır.

Toz karıştırma işlemi, sertlik ölçümleri ve aşınma testleri ile metalografi işlemleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği'ne ait laboratuvarlarda, SEM, EDX ve MAPPING analizleri ise aynı üniversiteye ait Demir Çelik Enstitüsü SEM Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılmak üzere, toz basma işlemi için bir sıkıştırma kalıbı ve bu kalıbın sıcak ortamda çalışması için işlevsel bir fırın tasarımı ve imalatı yapılmıştır.

4.1. TOZ SIKIŞTIRMA KALIBI TASARIMI VE İMALATI

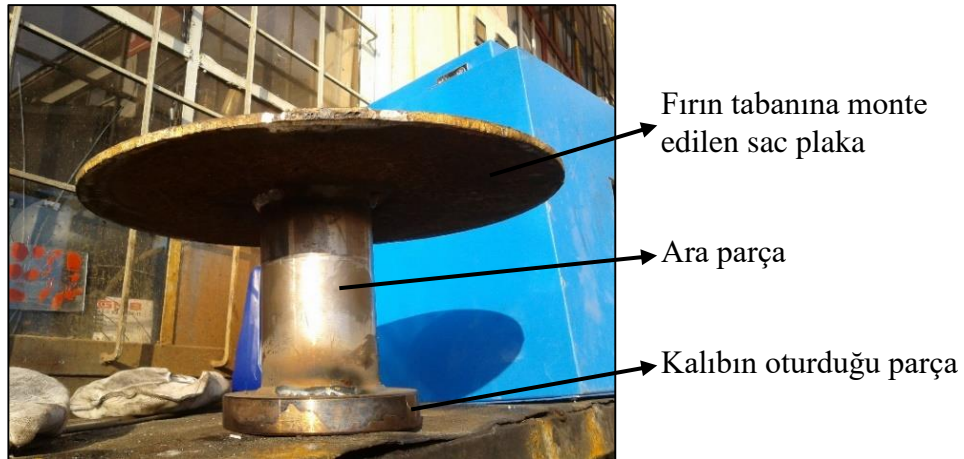
Bu çalışmada toz basma işlemi için kullanılan toz sıkıştırma kalıbı; kalıp gövdesi, kalıp alt plakası ve kalıp zımbası olmak üzere 3 parçadan oluşmaktadır. Kalıp parçaları Şekil 4.1.'de verilmiştir. Kalıp gövdesi ve alt plakası 2379 kalite, ısıl işlem görmüş çelikten üretilmiştir. Kalıp zımbası, 64 HRC ± 2 sertliğe sahip HSS sertleştirilmiş paslanmaz çelikten üretilen havşa başlı kalıp zımbasıdır. Kalıp gövdesi tasarımı, üretilen numune çapı (12 mm) ve sıkıştırılacak toz malzeme miktarını karşılayacak yükseklik hesaba katılarak yapılmıştır. Gövde ve alt plakanın üretimi Simge Kalıp (Bolu) firmasında gerçekleştirilmiştir. Kalıp zımbası Güvenal firmasından temin edilmiştir. Kalıbın teknik resimleri EK AÇIKLAMALAR A'da verilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan toz sıkıştırma kalıbı elemanları.

4.2. İŞLEVSEL FIRIN TASARIMI VE İMALATI

Çalışmada sıcak presleme işlemi için kullanılan işlevsel fırın, Aca Isıtel firmasına yaptırılmıştır. 0~600 °C sıcaklık aralığında çalışma kapasitesine sahiptir. Endüstride tavlama fırını olarak adlandırılan bu fırının içerisinde kalıp çalışmasına uygun şekilde değişiklikler yapılmıştır. İlk olarak, fırın tabanının toz basma sırasında uygulanan basınca dayanması için, 3 parçanın kaynak edilmesiyle oluşan bir tasarım yapılmıştır. Tasarım, Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Daha sonra, bu parçalar fırın içerisine oturtularak fırın tabanına monte edilmiştir. Parçaların fırın içerisindeki yerleşimi Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Basınç altında yapılan toz basma denemesinde tabana monte edilen sac plaka eğildiği için fırın tabanından kesilerek sökülmüş, yerine Şekil 4.4’te gösterildiği üzere daha mukavim bir plaka kaynak edilmiştir.

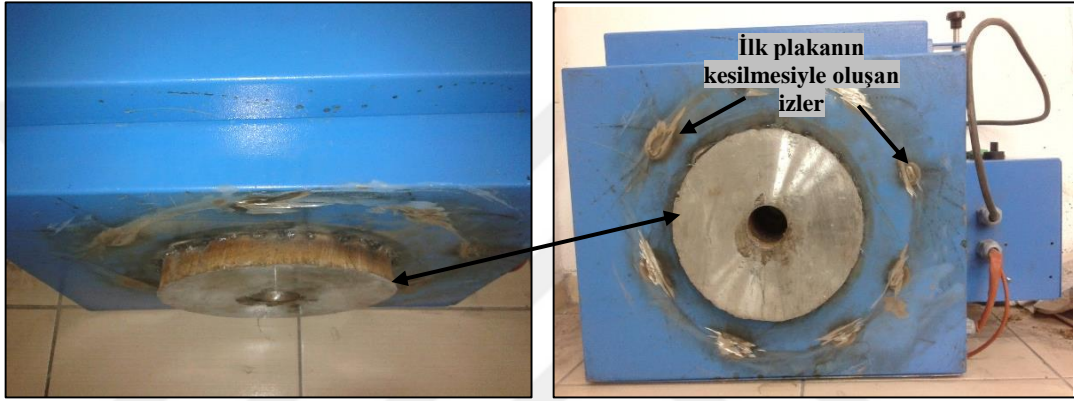


Şekil 4.2. Pres basıncına dayanım için fırın içerisine yerleştirilen parçalar.



Kalıbın oturduğu parça

Şekil 4.3. Kalıbın oturacağı parça yüzeyinin fırın içerisindeki görünümü.



Şekil 4.4. Fırın tabanına kaynak edilen 2. sac plaka.

Fırın içerisindeki kalıp üzerine ağırlık konulması ve gereken durumlarda kalıbın fırın tavanından çıkarılabilmesi amacıyla fırının üst kısmına bir kapak açılmıştır. Böylece fırına son şekli verilmiştir. Fırın tavanına açılan kapak Şekil 4.5'te, fırının son hali Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Fırın tavanına açılan kapak.



Şekil 4.6. İşlevsel fırının son hali.

4.3. TOZ METALÜRJİSİ İŞLEMLERİ

Bu çalışmada kullanılan TM yönteminde ilk olarak, A356 ve belirli oranlardaki KNT tozlarının biyeli öğütücü ile karıştırılması, toz karışımın sıkıştırma kalıbında pres ile soğuk preslenmesi ve kalıbın fırın içerisine alınarak içerisindeki tozların sıcak ortamda, ağırlık altında bekletilmesi gerçekleştirilmiştir. Ardından, tek parça halinde elde edilen sıkıştırılmış toz kütleleri sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak, sinterlenen numune yüzeyleri parlatılarak yapılacak ölçüm, test ve analiz işlemleri için uygun hale getirilmiştir.

4.3.1. Toz Karışımların Hazırlanması

Bu çalışmada, Ø12x10 mm ebadında numuneler üretilmiştir. A356'nın yoğunluk değeri ($2,68 \text{ gr/cm}^3$) esas alınarak bu ebatta bir numunenin ağırlığı 3 gr olarak belirlenmiştir. Her numunenin KNT oranlarına bağlı malzeme miktarları bu ağırlık değerine göre hesaplanmıştır.

Çalışmada, %90 saflıkta ÇDKNT ve atomize edilmiş, toz A356 alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan nanotüpler Nanografi firmasından temin edilmiştir. A356 malzemesinin kimyasal bileşenleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. A356 alaşımı kimyasal içeriği (% Ağ.) [54].

A356 Alaşımı	Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Cu	Zn	Al
	7,34	0,319	0,14	0,11	0,031	0,01	0,009	Kalanı

Bu çalışmada, A356 matris malzemesine %0,5, 1, 1,5, 2 oranlarında KNT takviyesi yapılmıştır. Yapılacak testlere göre, her orandan 10 adet numune üretilmesi kararlaştırılmıştır. Dolayısıyla, her bir KNT oranı için 30 gr malzeme hazırlanmıştır. Hassas terazide tartılan A356 ve ÇDKNT miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. KNT oranına göre, tartılan malzeme miktarları.

KNT Oranı (%)	A356 (gr)	ÇDKNT (gr)	TOPLAM (gr)
0,5	29,85	0,15	30
1	29,7	0,3	30
1,5	29,55	0,45	30
2	29,4	0,6	30

Toz malzemelerin homojen dağılımını sağlamak amacıyla, çelik karıştırma haznesine sahip planet tipi, tek hücreli Fritsch Pulverisette 6 mekanik alaşımlama cihazında bilyeli öğütme gerçekleştirilmiştir. Cihazın resimleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Öğütme işlemi için, 8 mm çapta, 10/1 (bilye/toz malzeme) oranında toplam 300 gr bilye, 400 d/d dönme hızı ve 1 saat öğütme süresi kullanılmıştır. İşlem kontrol elemanı (PCA) olarak stearik asit (%1) ve 5 damla etil alkol kullanılmıştır. Her KNT oranı için aynı işlem basamakları uygulanmıştır.



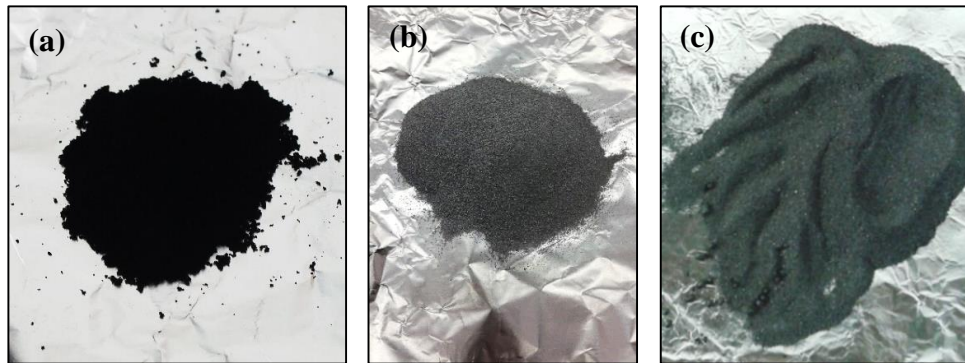
Şekil 4.7. Fritsch Pulverisette 6, tek hücreli bilyeli öğütme cihazı [55].

İlk olarak, 30 gr malzeme için 10/1 oranında (300 gr) bilye tartılarak öğütme kabına konulmuştur. Ardından, istenen orandaki KNT ve 5 damla etil alkol kaba boşaltılarak 5 dk, 400 d/d dönme hızında, cihazda karıştırılmıştır. Karıştırmadan sonra 5 dk beklenecek KNT tozlarının kap tabanına çökmesi sağlanmıştır. Tozların, öğütücü kap çeperine ve bilyelere yapışması ve birbirleriyle kaynak olmasını önlemek amacıyla toplam kütle için %1'i oranında (0,3 gr) stearik asit kaba eklenmiştir. A356 tozları da kaba eklenerek 30 dk karıştırma yapılmıştır. Bu aşamada eklenen malzemeler Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Karıştırma işleminde öğütücü hazne içinde konulan malzemeler.

30 dk karıştırma sonrası öğütme cihazının soğuması için 15 dk beklenip ardından 30 dk daha karıştırma yapılmıştır. Toplam 1 saat karıştırma sonunda elde edilen 30 gr toz karışım, hassas terazi kullanılarak 3 gr'lık 10 parçaya bölünmüştür. Kullanılan KNT, A356 ve KNT-A356 karışımı tozları Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Karıştırma işleminde kullanılan tozlar ve toz karışımı. a) KNT, b) A356 tozu, c) A356-KNT karışımı.

4.3.2. Hazırlanan Toz Karışımların Preslenmesi

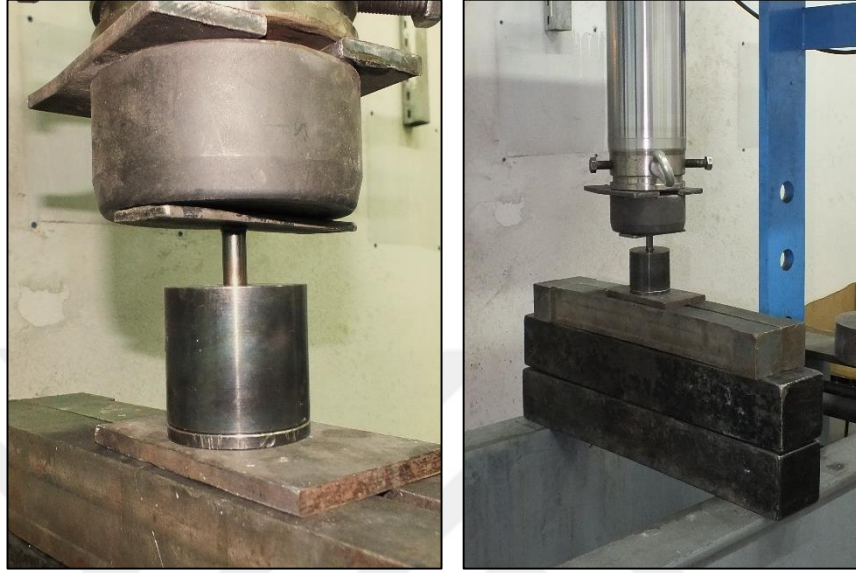
Presleme işlemleri için 12 mm delik çapına sahip toz sıkıştırma kalıbı ve Şekil 4.10'da gösterilen 160 ton kapasiteli Hidroliksan marka hidrolik pres kullanılmıştır. Presin teknik özellikleri EK AÇIKLAMALAR B'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Çalışmada kullanılan 160 ton kapasiteli hidrolik pres.

Presleme işlemine başlamadan önce, zımbanın kalıp boşluğunda rahat hareket etmesi ve sıkıştırılan toz kütesinin kalıptan kolay çıkarılmasını sağlamak için kalıp boşluğu ve kalıp zımbası çinko stearat ile kaplanmıştır. Sonra, 3 gr A356 - KNT toz karışımı kalıba dökülmüş ve kalıp zımbası yerleştirilmiştir. İlk olarak, kalıp içerisindeki toz karışım pres altında, 694 MPa basınçta soğuk preslenmiştir. Ardından kalıp, sıcak presleme işlemi için işlevsel fırın içerisine alınmıştır. Sıcak presleme işlemi, fırın içerisindeki kalıbın zımbası üzerine 32 kg ağırlık konulup, 200 °C sıcaklıkta, 1 saat beklenerek gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen soğuk presleme işlemi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Sıcak presleme sırasında kalıbın fırın içerisindeki yerleşimi ve kalıp zımbası üzerine konulan ağırlıklar Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kalıp içerisindeki tozların pres altında basılması.



Şekil 4.12. İşlevsel fırın içerisindeki kalıbın ve kalıp üzerindeki ağırlıkların yerleşimi.

1 saat sıcak presleme sonunda, kütle haline gelen sıkıştırılmış toz karışım kalıbın içerisinden çıkartılmıştır. Kalıptan çıkarılan numune Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Kütle haline getirilen toz karışım.

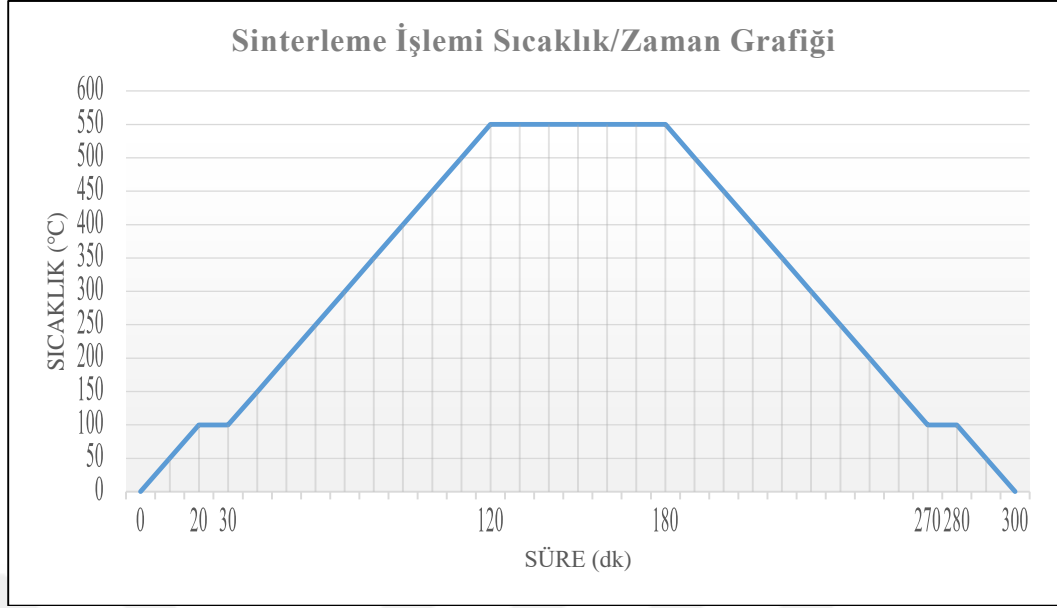
4.3.3. Numunelerin Sinterlenmesi, Parlatılması Ve Dağlanması

Sıkıştırma kalıbından çıkarılan numuneler, Thermal Technology Şirketi'nin N serisi sinter fırınında, 1 saat sürede, 550 °C'de sinterlenmiştir. Kullanılan sinter fırını Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Çalışmada kullanılan sinterleme fırını.

Sinterleme işleminin ilk safhasında, fırın içerisine 5 dk boyunca Argon gazı verilerek ortamdaki oksijenin giderilmesi sağlanmıştır. Ardından Argon gazı fırın içerisinden uzaklaştırılarak vakumlu ortamda sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 100 °C'de 10 dk ön ısıtmadan sonra 550 °C'de 1 saat sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sonrası soğutma işlemi fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleminde kullanılan zamana göre sıcaklık değişimi planı Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Sinterleme işleminde zamana göre sıcaklık grafiği.

Sinterleme işlemi uygulanan numunelerin yüzeyleri, Şekil 4.16’da gösterilen Presi Mecapol P262 marka zımparalama ve parlatma cihazı ile 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımpara kağıtları kullanılarak, 300 d/d dönme hızında, su verilerek zımparalanmıştır. Ardından, elmas pasta dökülen keçe üzerinde mikroyapı görüntüsü alınacak seviyede parlatılmıştır.



Şekil 4.16. Presi Mecapol P262 zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatılan numuneler Keller reaktifi ile 40 s dağlanmış ve mikroyapılarına bakılmıştır. Kullanılan Keller reaktifi, 23,75 ml saf su, 0,125 ml hidroflorik asit (HF), 0,375 ml hidroklorik asit (HCl) ve 0,625 ml nitrik asitten (HNO₃) oluşmaktadır. Dağlanmış numune yüzeyi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Dağlanmış numune yüzeyi.

4.3.4. Ölçüm, Test Ve Analizlerin Numunelere Uygulanması

Numunelerin sertlik ölçümleri, Şekil 4.18’de gösterilen Shimadzu HMV-2 marka Vickers mikro-sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, 4,9 Newton yük ve 10 s yük uygulama süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü için her KNT oranından 3 numune alınmıştır. Her numunenin yüzeyinden 5 adet ölçüm değeri alınarak ortalama sertlik değerleri hesaplanıp karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.18. Shimadzu HMV-2 mikro-sertlik ölçüm cihazı [56].

Aşınma testleri, Ø12x10 mm boyutunda numuneler kullanılarak, paslanmaz çelik diske sahip pin-on-disk tipi aşınma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın resmi Şekil 4.19’da verilmiştir.

Aşınma testi uygulanacak her bir numune, 10, 20 ve 30 N'luk yükler altında, 300 m artış ile 300, 600, 900 ve 1200 m mesafelerde kuru aşınmaya maruz bırakılmıştır. Numunenin disk üzerinde kayma hızı 1 m/s olarak seçilmiştir.



Şekil 4.19. Çalışmada kullanılan pin-on-disk tipi aşınma cihazı.

Numunelerin mikroyapılarını ve aşınma testleri yapılmış numunelerin aşınan yüzeylerini görüntülemek için SEM, MAPPING ve EDX analizleri yapılmıştır. Analizler, Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka yüksek çözünürlüklü FESEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz, Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM cihazı.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

KNT'lerin Al matrise takviyesiyle elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerinde, matris malzemesine kıyasla gelişmeler olduğu yapılan birçok çalışmada ortaya konulmuştur [44-53]. Bu çalışmada gerçekleştirilen sertlik ölçümleri ve aşınma testleri sonuçlarında da KNT takviyeli A356 matrisli kompozitin mekanik özelliklerinde, matris malzemesine oranla gelişmeler olduğu gözlemlenmiştir.

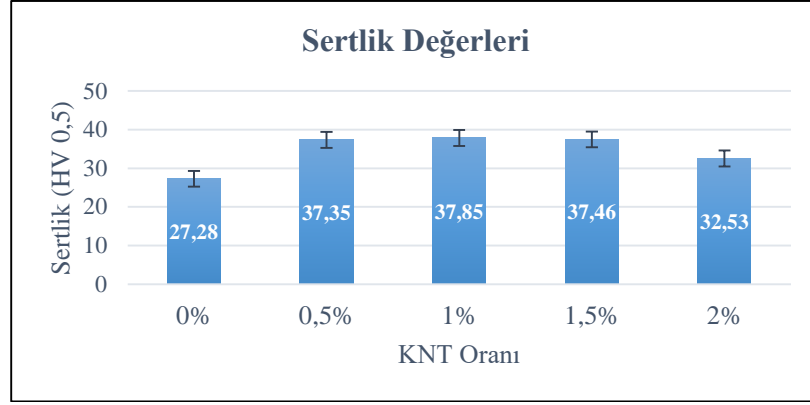
Mikroyapı analizleri sonuçları, A356 matriste KNT dağılımını ve yerleşimini ortaya koymaktadır. KNT dağılımını ve yerleşimini gösteren SEM, MAPPING ve EDX analizleri sonuçları birbirini desteklemektedir. Analiz sonuçlarından ayrıca, matrisin tane yapıları ve KNT içeriği artışının tane yapılarına etkileri de gözlemlenmiştir.

5.1. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ SONUÇLARI

Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilen %0,5, 1, 1,5, 2 KNT içeren kompozitlerin ve KNT içermeyen A356 numunesinin (%0 KNT-A356) mikro-sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sertlik değerleri kaydedilerek karşılaştırılmıştır.

%0 KNT-A356 numunesinin sertlik değeri 27,28 HV olarak ölçülmüştür. Bu numuneye kıyasla, %0,5 KNT-A356 kompozitinin sertliğinde %37 artış olduğu (37,35 HV) gözlemlenmiştir. Ayrıca %0,5, 1 ve 1,5 KNT içeren kompozitlerin sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu değerler %0,5, 1 ve 1,5 KNT oranları için sırasıyla 37,35, 37,85 ve 37,46 HV'dir.

%2 KNT-A356 kompozitinin sertliğinde, %1,5 KNT-A356 kompozitine kıyasla %13 düşüş olduğu (32,53 HV) ve bu değer %0 KNT-A356 numunesinin sertliğine oranla %19 daha yüksek olduğu Şekil 5.1'de verilen sonuçlarından anlaşılmaktadır.



Şekil 5.1. KNT oranına göre, ölçülen sertlik değerleri.

Sertlik ölçümleri genel olarak değerlendirildiğinde %0,5~1,5 KNT oranlarında, matris malzemesine kıyasla sertlik değerlerinin arttığı, bu orandan sonra sertlik değerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik değerindeki düşüşün karıştırma işleminin de etkisiyle, büyük miktardaki KNT'lerin düğüm olmaya meyilli yapısından kaynaklandığı yapılan bazı çalışmalarda belirtilmiştir [57,58].

5.2. AŞINMA TESTLERİ SONUÇLARI

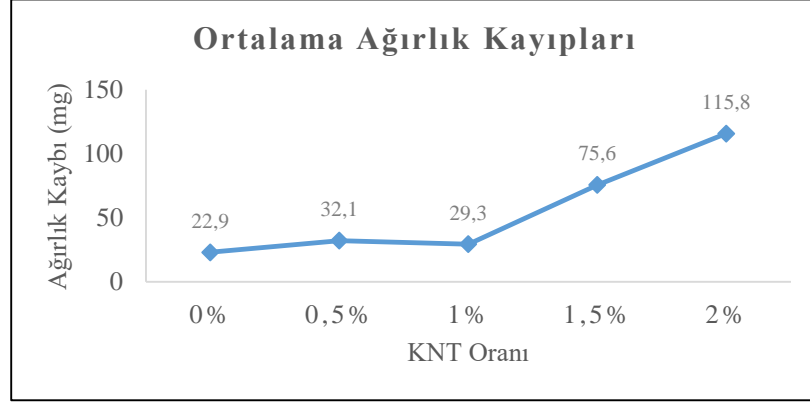
Pin-on-disk tipi aşınma cihazında, 1 m/s kayma hızında gerçekleştirilen aşınma testlerinde bir numune için izlenen yol Çizelge 5.1'de verilmiştir. Her KNT oranından (%0, 0,5, 1, 1,5, 2) 3 adet numune aşınma testine tabi tutulmuştur.

Çizelge 5.1. Bir numune için kullanılan aşınma mesafeleri ve yükler.

Mesafe Yük	300m	600m	900m	1200m
10N	X	X	X	X
20N	X	X	X	X
30N	X	X	X	X

Aşınma testleri sonuçları, Şekil 5.2'de görüldüğü üzere, KNT içeriği arttıkça ortalama ağırlık kaybı ve dolayısıyla aşınma miktarının arttığını ortaya koymuştur. 30 N yük altındaki aşınmada 1200 m kayma mesafesi sonunda en çok ortalama ağırlık kaybı %2 KNT-A356 kompozitinde gerçekleşmiştir (115,8 mg). Uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı genel olarak artmıştır [54]. Ayrıca, KNT oranı %1,5'den

%2'ye artarken sertlik değeri dūşmüő, ağırlık kaybı ve aşınma miktarları artmıőtır. Literatürde bu sonuçları destekleyen çalıőmalar bulunmaktadır [57,60,61].

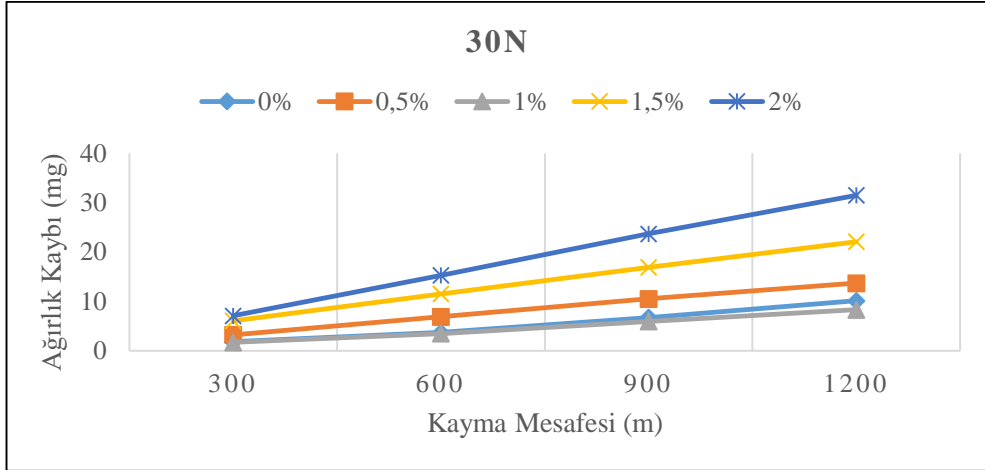
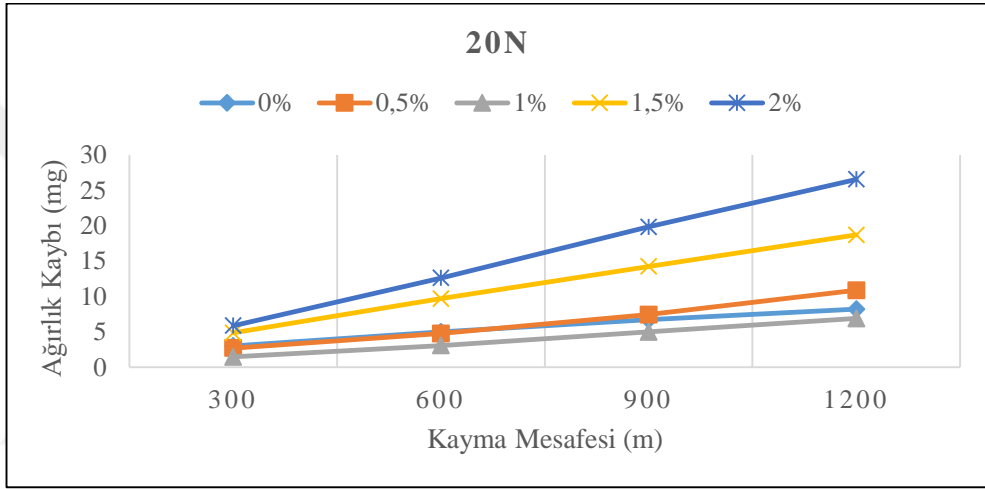
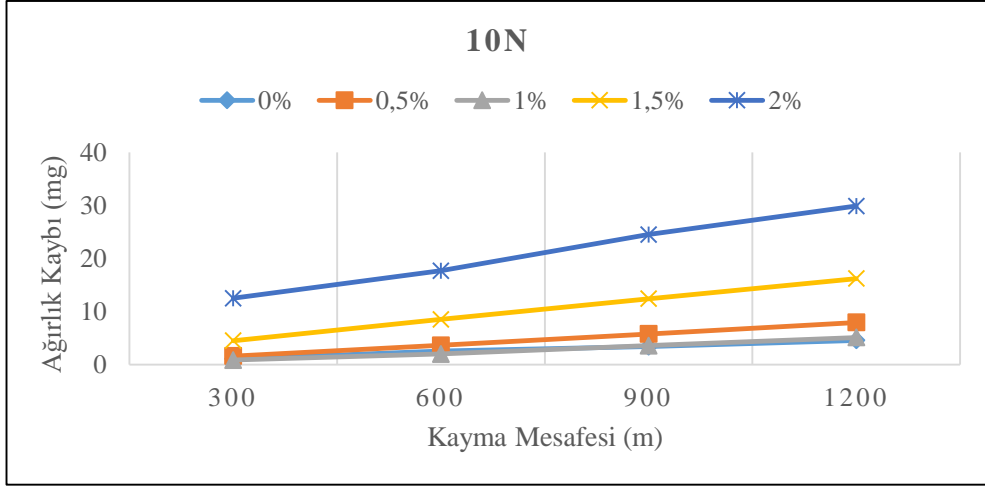


Şekil 5.2. Aşınma testlerinde ölçülen toplam ortalama ağırlık kayıpları.

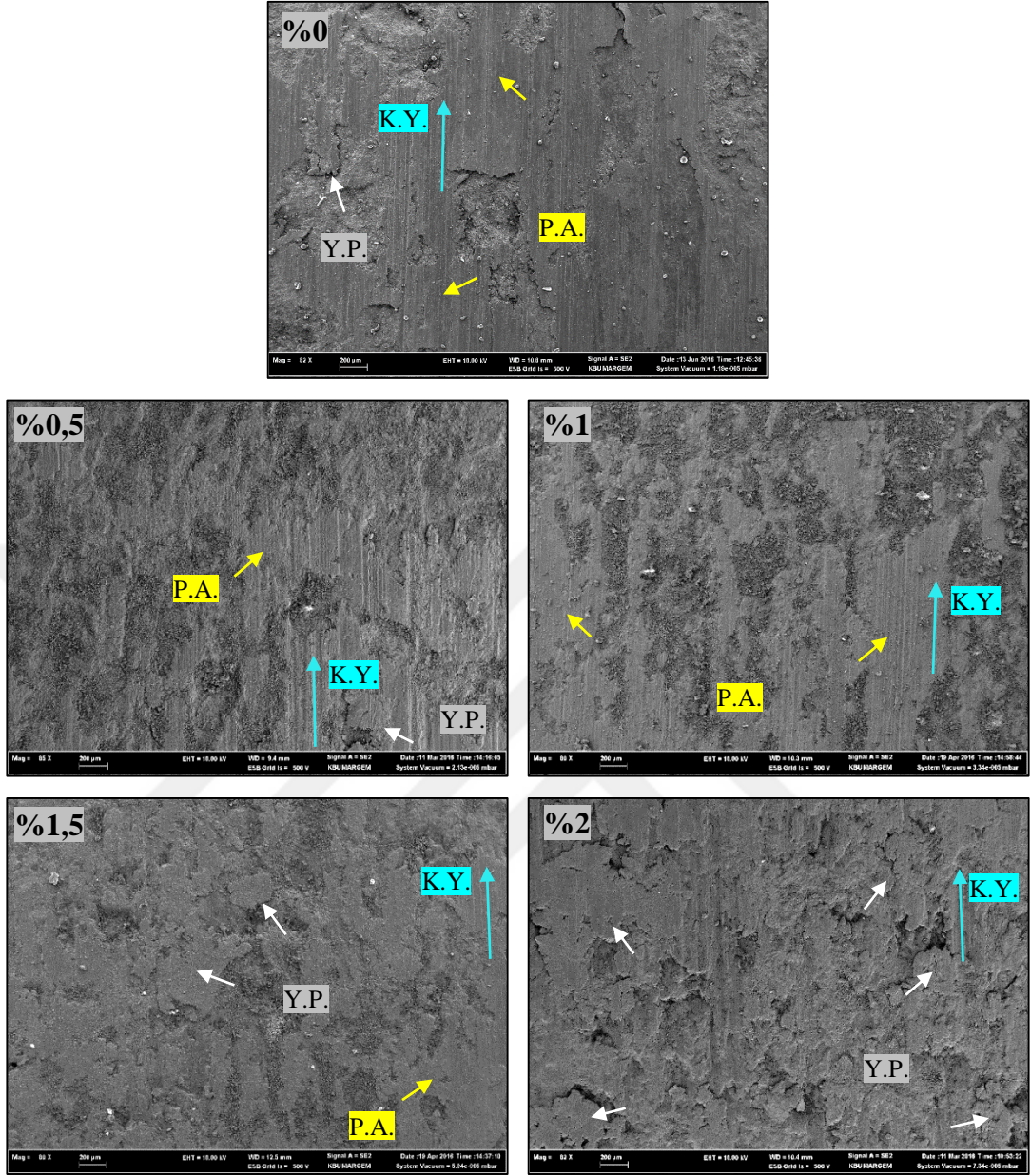
Uygulanan yükler altında %0 ve 1 KNT-A356 numuneleri birbirine yakın ağırlık kayıpları gösterirken %0,5, 1,5 ve 2 KNT oranlarında ağırlık kayıplarının giderek arttığı gözlemlenmiştir. Ağırlık kayıplarına ait grafikler Şekil 5.3'te gösterilmiştir. En yüksek ağırlık kaybı, 30 N yük altında %2 KNT içerikli numunede gözlenmiştir (31,5 mg).

10, 20 ve 30 N yükler altında aşındırılmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde, aşınan yüzeylerde kayarak aşınma ve koparak dökülmelerin gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, aşınma numunelerinin yüzeylerinde adhezif aşınma mekanizmasının gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 5.4'te aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.

%0, 0,5 ve %1 KNT oranlarında, yüzeylerdeki plastik akış daha düzgün görülmektedir ve bu akışın olduğu bölgeler SEM görüntülerinde sarı oklarla belirtilmiştir. %1,5 ve özellikle %2 KNT oranlarında ise aşınma sonrası çok katmanlı yüzeylerin oluştuğu görülmüştür. Aşınma sırasında kopan parçacıkların tekrar numune yüzeylerine yapışmasının ve tanecikler arası boşluk miktarının KNT içeriğine paralel olarak artmasının bu duruma neden olduğu düşünölmektedir. Görüntülerdeki beyaz oklar, aşınma sırasında yüzeyden koparak tekrar yüzeye yapışan parçacıkların oluşturduğu bazı katmanları işaret etmektedir.



Şekil 5.3. Uygulanan yük ve kayma mesafelerine göre ağırlık kayıpları.

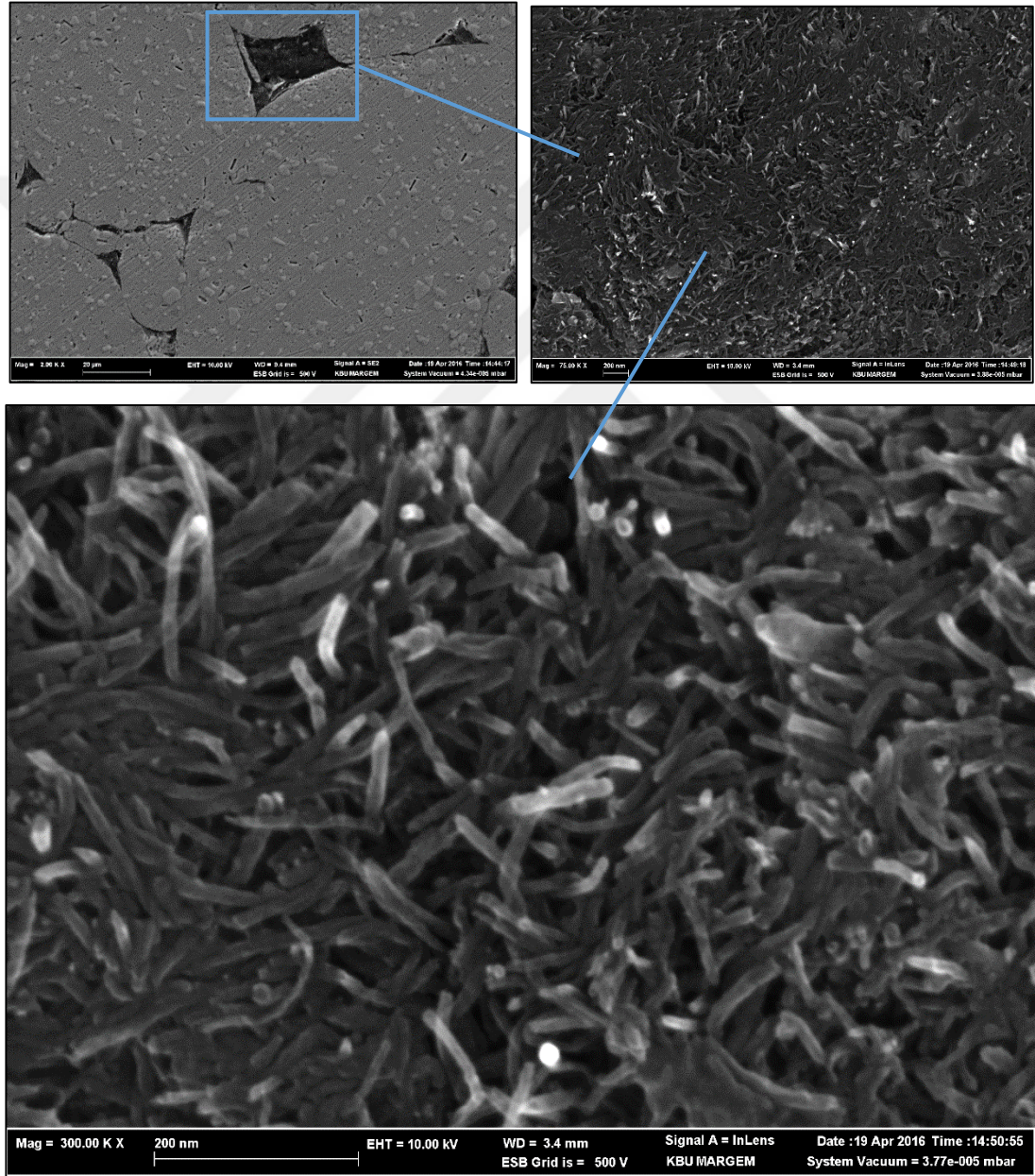


Şekil 5.4. KNT oranına göre, aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri (K.Y.: Kayma yönü, P.A.: Plastik akış bölgeleri, Y.P.: Aşınma sırasında kopup tekrar yüzeye yapışan parçalar).

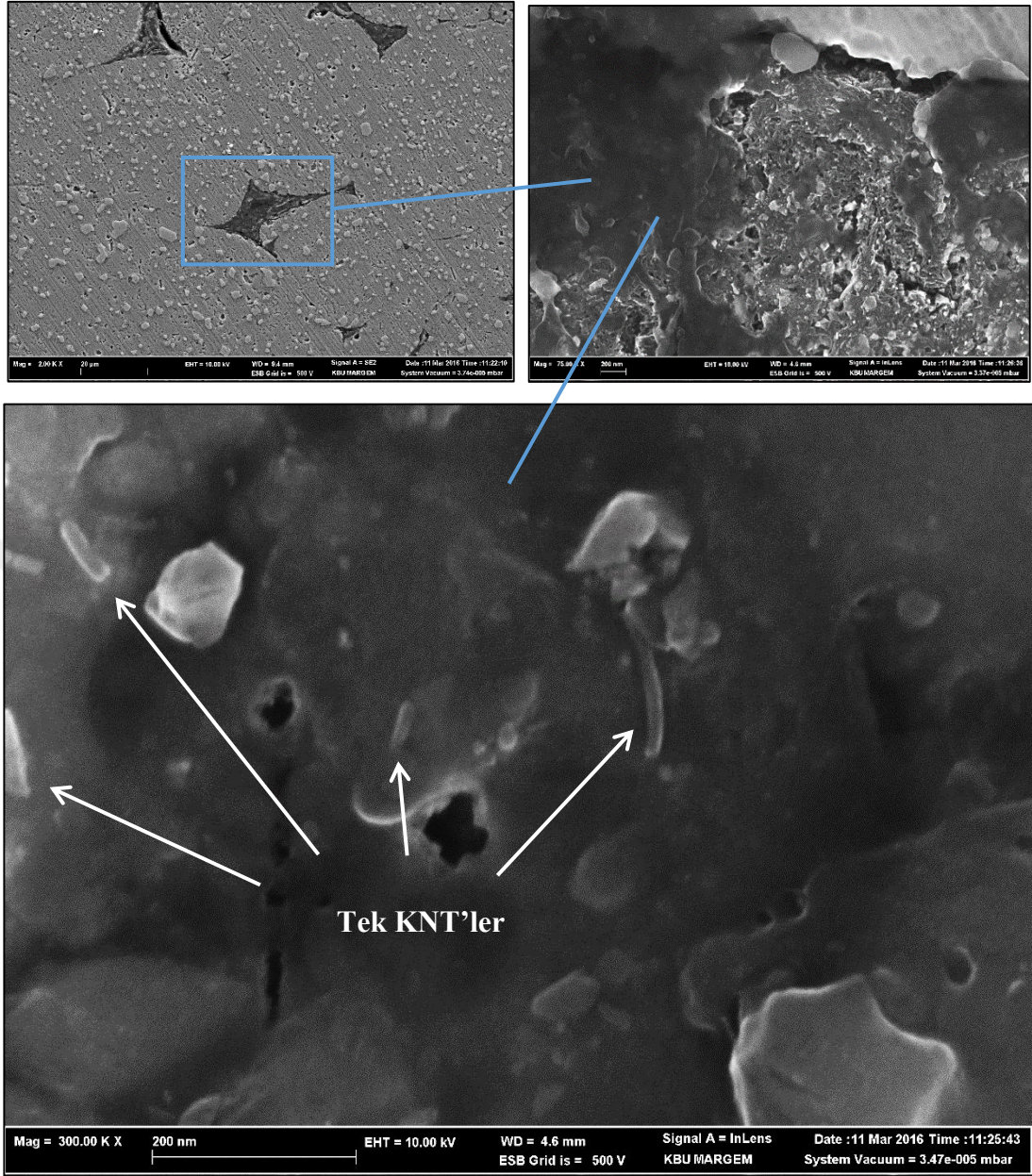
5.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ SONUÇLARI

Bilyeli öğütme işlemi, KNT'lerin matriste tekdüze dağılımı için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Öğütme süresinin ve öğütücü dönme hızının değiştirilmesi ile Al matrisin tanecik yapısı değişmektedir. Ayrıca karıştırma işleminde KNT'lerin demet haldeki yapısını kırmak amacıyla stearik asit gibi PCA'lar kullanılmaktadır [50].

KNT'lerin matris içerisinde homojen dağılımının gerçekleşmesinde kullanılan karıştırma şartlarının etkileri, dağılanan numune yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. 1 saat karıştırma sonunda, KNT'lerin büyük oranda yığın halinde, matris malzemesinin tane sınırları arasındaki boşluklarda yerleştiği Şekil 5.5'te verilen görüntülerde görülmektedir. Ayrıca, bu boşlukların yüzeye yakın katmanlarında KNT'lerin tek olarak yerleştiği de Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



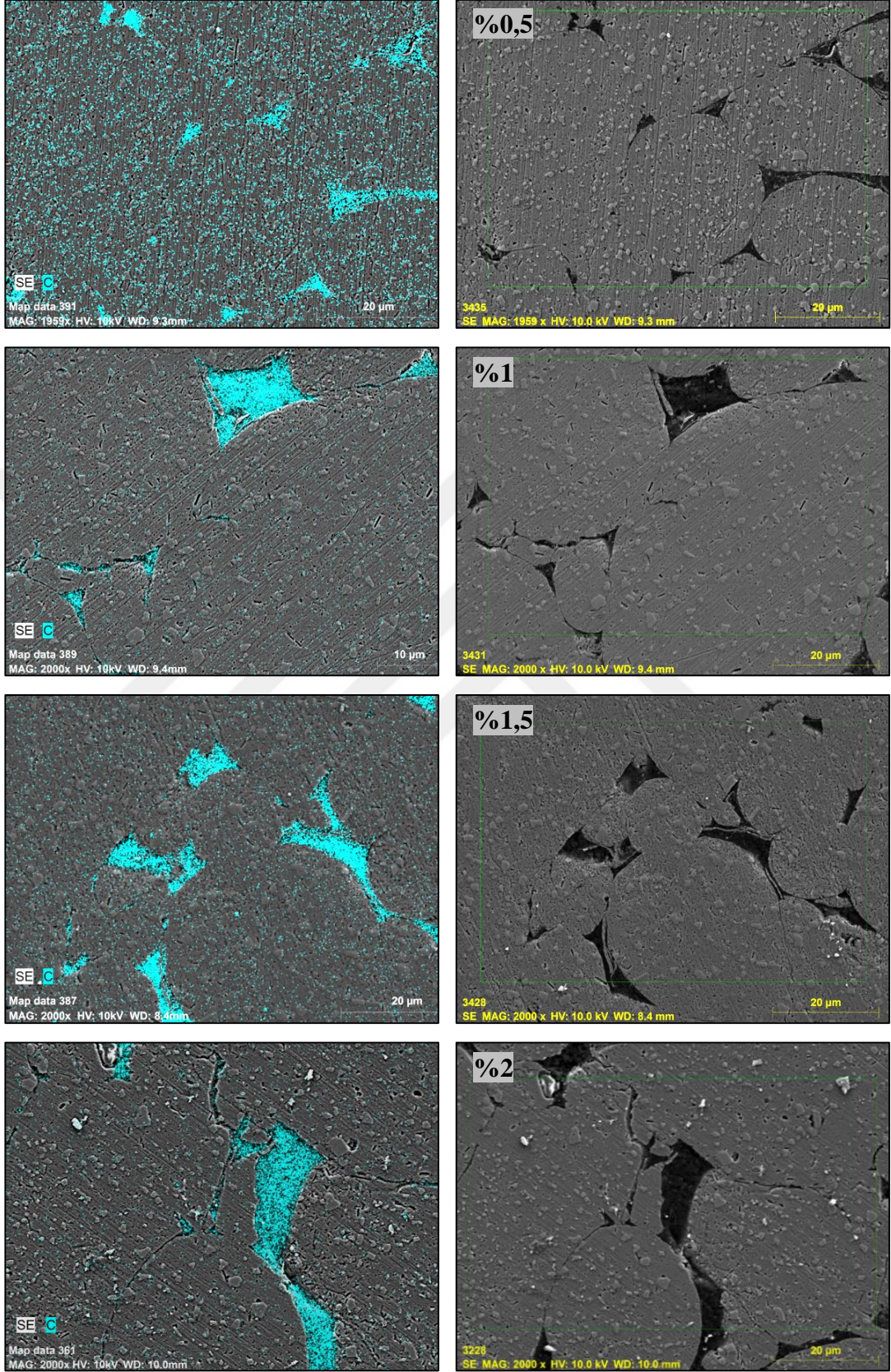
Şekil 5.5. %1 KNT-A356 kompozitin içyapısındaki KNT yığınları.



Şekil 5.6. %0,5 KNT-A356 kompozitinin tane sınırlarında, yüzeye yakın bir katmanda tek olarak görüntülenen KNT'ler.

Yıldırım ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada da KNT'lerin yığın halde ve matrisin taneleri arası boşluklarda yerleştiği gözlemlenmiştir. KNT'lerin bu şekildeki heterojen dağılımının, A356 tozları ve KNT'lerin boyutları arasındaki farktan dolayı olduğu açıklanmıştır [56].

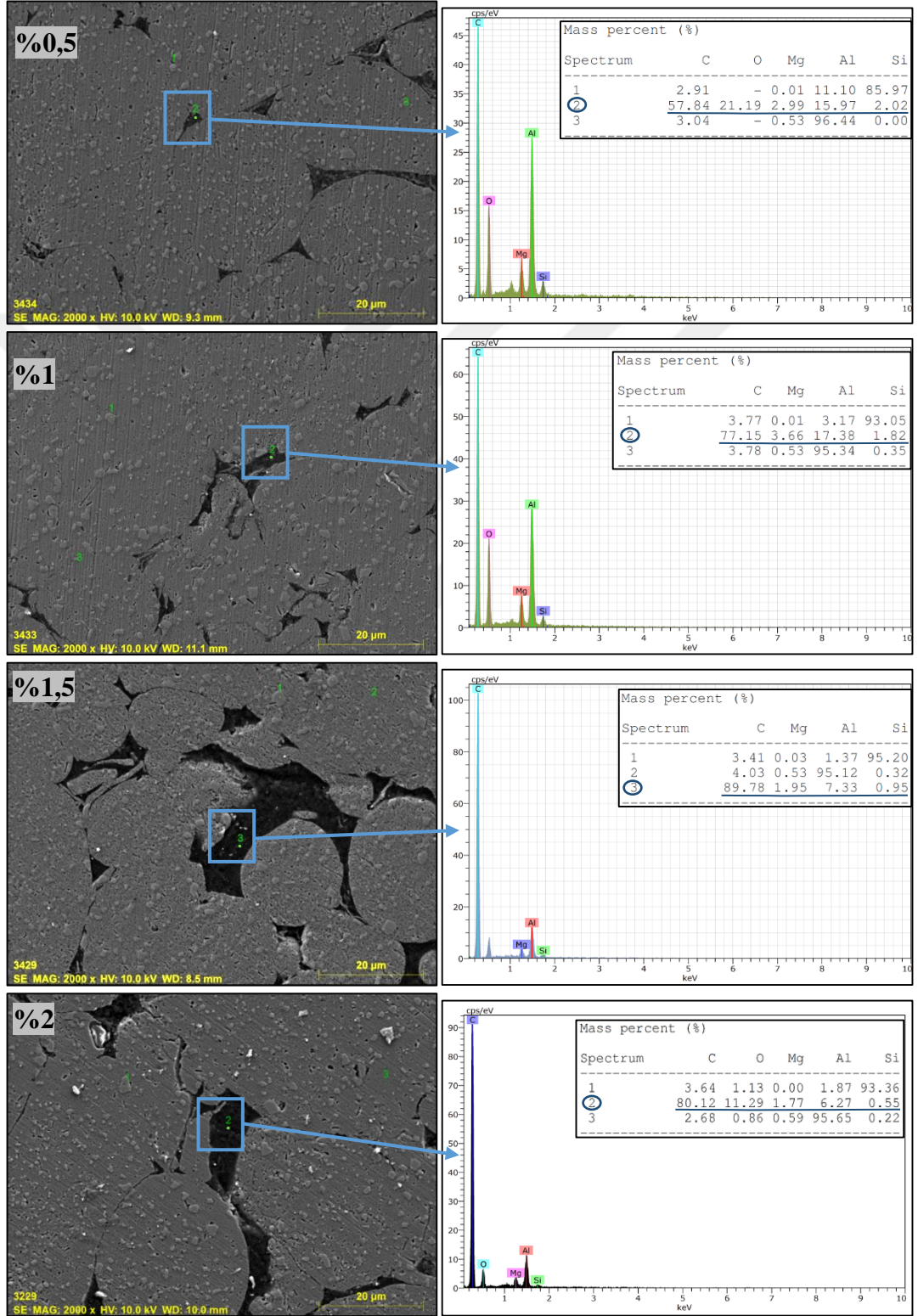
KNT yığınlarının yüksek oranda, matristeki taneler arası boşluklarda yerleştiği, Şekil 5.7'de verilen MAPPING görüntülerindeki Karbon haritalarından da anlaşılmaktadır.



(Mavi bölgeler, malzeme yüzeyindeki Karbon elementini göstermektedir.)

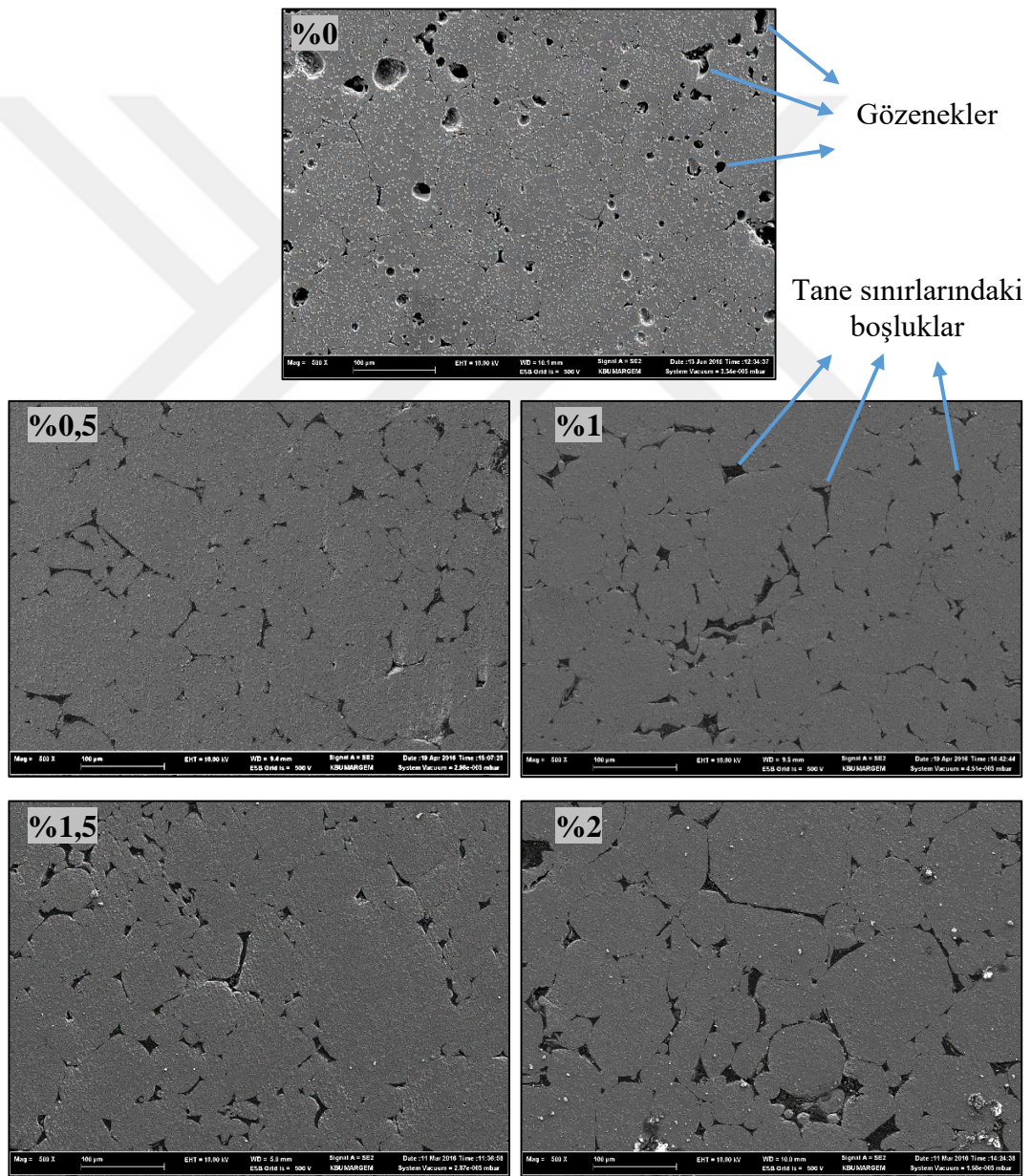
Şekil 5.7. KNT'lerin taneler arası boşluklarda yerleştiğini gösteren Karbon haritaları.

Noktasal EDX analizleri sonuçları, Karbon haritalarının verilerini desteklemektedir. Şekil 5.8’de, analiz edilen noktaların yer aldığı görüntüler ve yanlarında o noktaya ait malzeme yoğunluğu sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.8. KNT içeriğinin bulunduğu düşünülen noktaların analizleri.

SEM analiziyle elde edilen görüntülere bakıldığında %0 KNT-A356 numunesinde gözenekli bir yapının olduğu görülmektedir. KNT ilave edilmesiyle, Al matris taneleri arasında belirgin boşluklar oluşmaktadır. KNT oranının artmasıyla boşluk miktarının arttığı Şekil 5.9'daki görüntülerde gözlemlenmiştir. KNT'lerin yığın halde bulunduğu bu boşlukların artmasından ve KNT'ler ile Al matris etkileşime girmemesinden dolayı taneler arasında iyi bir bağlanma gerçekleşmemekte ve böylece uygulanan yüke bağlı olarak taneler birbirlerinden daha kolay ayrılmakta ve aşınma oranı artmaktadır [61].



(Siyah bölgeler taneler arası boşlukları göstermektedir)

Şekil 5.9. Numunelerdeki taneler arası boşlukları gösteren SEM görüntüleri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, A356 matrisle farklı oranlarda (%0,5, 1, 1,5, 2) KNT takviyesi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda KNT takviyesinin A356 matris malzemesinin sertlik ve aşınma dayanımında etkili olduğu gözlemlenmiştir. TM yöntemiyle KNT takviyeli Al matrisli kompozit üretiminin en temel noktalarından birisi KNT'nin Al matrisle homojen dağılımını gerçekleştirmektir. Bu durumun, bu çalışmada üretilen kompozitlerin mikroyapı, sertlik ve aşınma dayanımı özellikleri üzerindeki en önemli etken olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan karıştırma işlemi şartları sonucu KNT'lerin, kompozit iç yapısında yüksek oranda yığın halde ve matris taneleri arasında yerleştiği, bu durumun kompozitin aşınma davranışına olumsuz etkisi olduğu gözlemlenmiştir. KNT içermeyen numune belirli oranda boşluklu bir yapı sergilerken, KNT içeriğinin artmasıyla malzeme yüzeylerinde daha boşluklu yapılar oluşmuştur. Bu boşlukların aşınmayı hızlandırarak ağırlık kaybında artışa neden olduğu düşünülmektedir. KNT ilavesinin, sertlik değerlerinde artış sağladığı gözlemlenirken, bu değerlerin %0,5, 1 ve 1,5 KNT oranları için birbirine çok yakın olduğu ve %1,5 oranından sonra düştüğü gözlemlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise KNT takviyesinin A356 matrisin sertliğini artırdığı görülmüştür.

KNT takviyeli A356 matrisli kompozitin TM yoluyla üretiminde tozları karıştırma aşamasında karıştırma süresini artırmanın ve ayrıca KNT'lerin düğüm yapısını ilave bir işlem ile çözenin daha homojen bir yapı elde edilmesine imkân sağlayacağı, böylece KNT'nin matris malzemesinin mekanik ve morfolojik özelliklerine daha olumlu etki sağlayacağı düşünülmektedir. Buna ilaveten, toz basma işleminde kullanılan kalıbın ve presin tasarımları değiştirilerek, basıncın tozlara daha homojen bir şekilde iletmesinin sağlanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Tozluoğlu, A., öpür, Y., Özyürek, Ö. ve ıtlak, S., “Nanoselüloz üretim teknolojisi”, *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 16 (2): 203-219 (2015).
2. Şenel, F., “Nanotıp”, *Bilim ve Teknik Dergisi*, 78-83 (2009).
3. Koç, M. B., “Nanotüpler”, Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Ankara (2003).
4. Iijima, S., “Carbon naotubes, past and future”, *Physica B*, 323: 1–5 (2002).
5. Küçükyıldırım, B. O. ve Eker, A. A., “Karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri ve kullanım alanları”, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53 (630): 35-43 (2012).
6. Yılmaz, H., “Alüminyum esaslı SiCp partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler”, Bitirme Ödevi, *Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu*, 3 (2007).
7. Uygur, İ. ve Saruhan, H., “Alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1): 167 (2004).
8. Karaoğlu, M. ve Karaoğlu, S., “Toz metalürjisi ile üretilen alüminyum matrisli kompozitlerde proses ve malzeme değişkenlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 55 (649): 17-23 (2014).
9. Kalaycıoğlu, A. S., “SiC tane katkılı alüminyum kompozitlerin toz metalurjisi ile üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 12 (2010).
10. Gedik, D., “Alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasının sodyum dikromat ve sülfürik asit anodizing yöntemiyle geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-2 (2008).
11. TOBB, “Alüminyum sanayii”, *Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu 2010*, 51-56, (2011).
12. Tunçay, T., Tekeli, S. ve Özyürek, D., “Difüzörlü ve difüzörsüz yolluk sistemlerinin A356 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi*, 28 (2): 241 (2013).

13. Dwivedi, S. P., Sharma, S. and Mishra, R. K., “A356 aluminium alloy and applications- a review”, *Advanced Materials Manufacturing and Characterization*, 4 (2): 81 (2014).
14. Khare, R. and Bose, S., “Carbon nanotubes based composites- a review”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 4 (1): 31-46 (2005).
15. Özgür, I., “Nanotüp ve nanotel yapılarının XRD ile karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 16-17 (2008).
16. Shadaskhari, R., Mahesha, K. and Niranyan, H. B., “Carbon nanotube reinforced aluminium matrix composites - a review”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 1 (2): 206-212 (2012).
17. Nazik, C., “Alüminyum matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
18. Görener, A., “Ahp ve toptis yaklaşımlarıyla metal matrisli kompozit imalat makinelerinin seçimi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 52 (613): 60-63 (2011).
19. Agarwal, A., Bakshi, S. R. and Lahiri, D., “Carbon nanotubes reinforced metal matrix composites”, Introduction, *CRC Press*, USA (2011).
20. De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H. and Hart, A. J., “Carbon nanotubes: present and future commercial applications”, *Science*, 339: 535-539 (2013).
21. Yetim, A., “Karbon nano tüpler”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
22. Dresselhaus, M. S., G. Dresselhaus and P. Avouris, “Carbon nanotubes”, Preface, *Springer*, USA (2000).
23. Purohit, R., Purohit, K., Rana, S., Rana, R. S. and Patel, V., “Carbon nanotubes and their growth methods”, *3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation*, 717 (2014).
24. Jan, P., Jana, D., Jana, C., Jaromir, H., Ondrej, J., Vojtech, A. and Rene, K., “Methods for carbon nanotubes synthesis-review”, *Journal of Materials Chemistry*, 21:15872-15884 (2011).
25. Szabó, A., Perri, C., Csató, A., Giardano, G., Vuono, D. and Nagy, J. B., “Synthesis methods of carbon nanotubes and related materials”, *Materials*, 3: 3092-3140 (2010).

26. Varshney, K., “Carbon nanotubes: a review on synthesis, properties and applications”, *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2 (4): 660-677 (2014).
27. Kumar, M. and Ando, Y., “Chemical vapor deposition of carbon nanotubes: a review on growth mechanism and mass production”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10: 3739-3758 (2010).
28. Erdoğan, D., “Malzeme bilgisi 2. baskı”, *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi*, Ankara, 57 (2007)
29. Aran, A., “Malzeme bilgisi ders notları”, *İTÜ Makine Fakültesi*, İstanbul, 59 (2008).
30. Karagöz, S., “Malzeme bilgisi ders notu”, *Adnan Menderes Üniversitesi Aydın Meslek Yüksekokulu*, Aydın, 67 (2008).
31. Demir, E., “Alüminyum alaşımlarda ısıl işlem etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2008).
32. Şahin, İ., “Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin matkap ile delinmesi konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi”, *Mühendis ve Makine*, 55 (649): 9-16 (2013).
33. Çolak, M. ve Kayıkçı, R., “A356 döküm alaşımında elektromanyetik karıştırmanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (3): 346 (2009).
34. Abbasipour, B., Niroumand, B. and Vaghefi, S. M. M., “Compcasting of A356-CNT composite”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1561-1566 (2010).
35. Rashed, R. M., Awadallah, O. M. and Wifi, A. S., “Effect of MWCNTs content on the characteristics of A356 nanocomposite”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 58 (2): 74-80 (2013).
36. Kim, H. H., Babu, J. S. S. and Kang, C. G., “Hot extrusion of A356 aluminium metal matrix composite with carbon nanotube/Al₂O₃ hybrid reinforcement”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45 (5): 2636-2645 (2014).
37. Arslan, F. ve Öztürk, S., “Toz metalürjisi deneyi”, Laboratuvar Föyü, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 2-3 (2009).
38. Kurt, A. O., “Toz üretim yöntemleri ve sinterleme ders notları”, *Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Sakarya (2010).
39. Yılmaz, R. ve Ekici, M. R., “Üretim parametrelerin düşük alaşımlı TM çeliklerin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi”, *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 2546-2552 (2015).

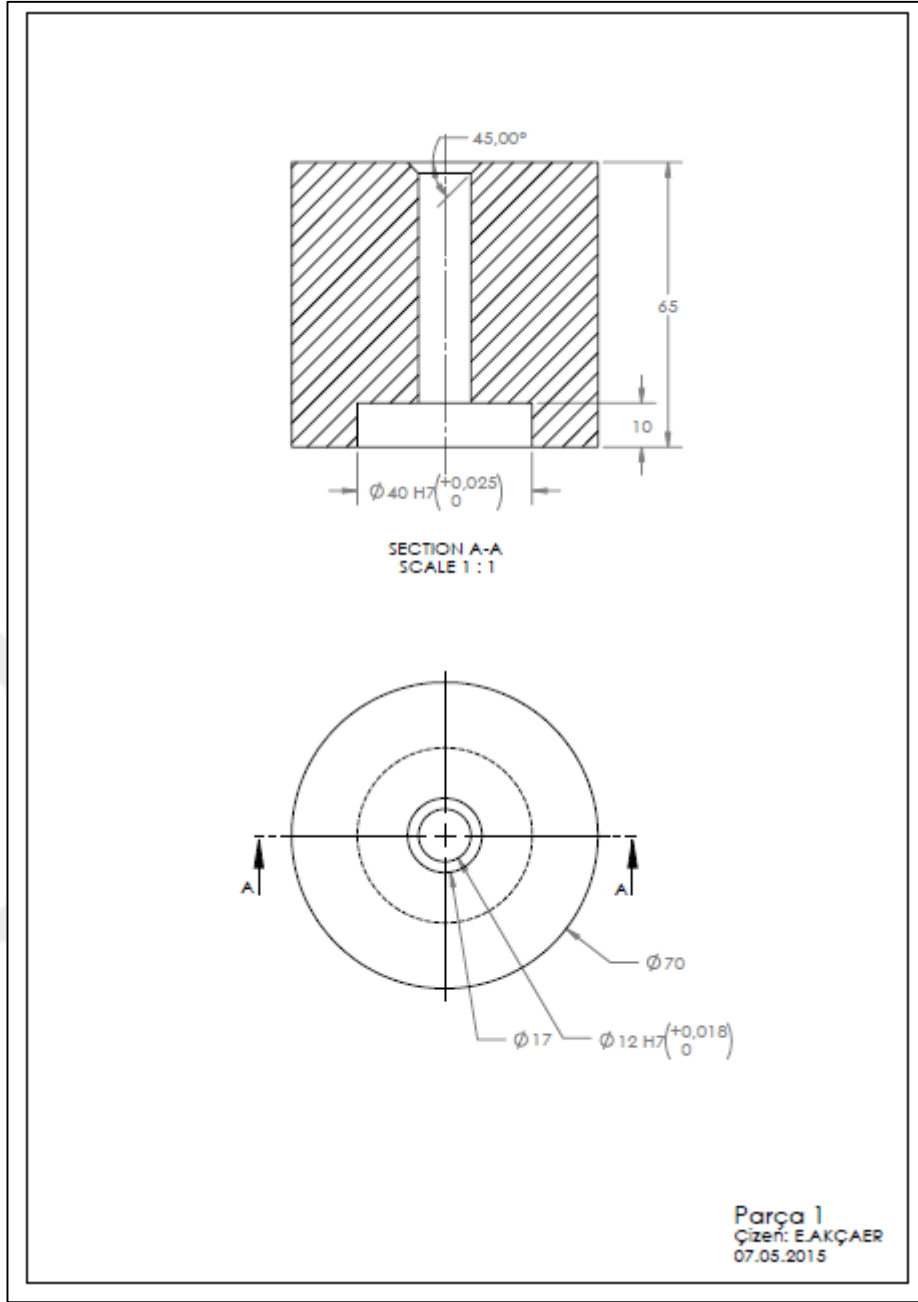
40. Öztoprak, A., “Toz metalürjisi ve sıcak presleme”, Bitirme Ödevi, *Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Kayseri (2007).
41. Karagöz, Ş., Yamanoglu, R. ve Atapek, Ş. H., “Metalik toz işleme teknolojisi ve prosesleme kademeleri açısından parametrik ilişkiler”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (3): 77-87 (2009).
42. Özgün, Ö., “Toz metalürjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2007).
43. Bakshi, S. R., Lahiri, D. and Agarwal, A., “Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – a review”, *Institute of Materials, Minerals and Mining*, 55(1): 42 (2010).
44. Esawi, A., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M. and Lanka, S., “Effect of carbon nanotube (CNT) content on mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites”, *Composites Science and Technology*, 70: 2237-2241 (2010).
45. Esawi, A. and Morsi, K., “Dispersion of carbon nanotube (CNTs) in aluminium powder”, *Composites: Part A*, 38: 646-650 (2007).
46. Abdullahi, U., Maleque, M. A. and Nirmal, U., “Wear mechanisms map of CNT-Al nano-composite”, *The Malaysian International Tribology Conference*, Procedia Engineering, 68: 736-742 (2013).
47. Jeyasimman, D., Sivaprasad, K., Sivasankaran, S. and Narayanasamy, R., “Fabrication and consolidation behavior of Al 6061 nanocomposite powders reinforced by multi-walled carbon nanotubes”, *Powder Technology*, 258: 189-197 (2014).
48. Kim, I., Lee, J., Lee, G., Baik, S., Kim, Y. and Lee, Y., “Friction and wear characteristics of the carbon nanotube-aluminium composites with different manufacturing conditions”, *Wear*, 267: 593-598 (2009).
49. Liu, Q., Ke, L., Liu, F., Huang, C. and Xing, L., “Microstructure and mechanical property of multi-walled carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites fabricated by stir processing”, *Materials and Design*, 45: 343-348 (2013).
50. Hao, X., Zhang, H., Zheng, R., Zhang, Y., Ameyama, K. and Ma, C., “Effect of mechanical alloying time and rotation speed on evolution of CNTs/Al-2024 composite powders”, *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 24: 2380-2386 (2014).
51. Perez-Bustamante, R., Bueno-Escobedo, J. L., Jimenez-Lobato, J., Estrada-Guel, I., Miki-Yoshida, M., Licea-Jimenez, L. and Martinez-Sanchez, R., “Wear behavior in Al₂₀₂₄-CNTs composites synthesized by mechanical alloying”, *Wear*, 292-293: 169-175 (2012).

52. 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).
53. Perez-Bustamante, R., Perez-Bustamante, F., Estrada-Guel, I., Licea-Jimenez, L., Miki-Yoshida, M. and Martinez-Sanchez, R., “Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/Al₂₀₂₄ composites produced by mechanical alloying”, *Materials Characterization*, 75: 13-19 (2013).
54. Özyürek, D., Kibar, E. ve Yılmaz, R., “Toz metalurjisi ile üretilen A356 alüminyum alaşımının aşınma davranışlarının incelenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük (2009).
55. İnternet: Laval Lab Inc., “Planetary Mono Mill Pulverisette 6”, <http://lavallab.com/products/crushers/planetary-mill> (2016).
56. İnternet: Shimadzu Scientific Instruments, “HMV-2 Micro Hardness Tester” <http://www.ssi.shimadzu.com/products/product.cfm?product=hmv2> (2016).
57. Yıldırım, M., Özyürek, D. ve Gürü, M., “Investigation of microstructure and wear behaviours of Al matrix composites reinforced by carbon nanotube”, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 6-7 (2016).
58. 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).
59. 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).
60. 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).
61. Özay, Ç. ve Hasçalık, A., “T/M yöntemi ile üretilen Cu-C-Al₂SiO₅ kompozitinde C oranının abrasiv aşınma dayanımına etkisi”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 151-154 (2004).

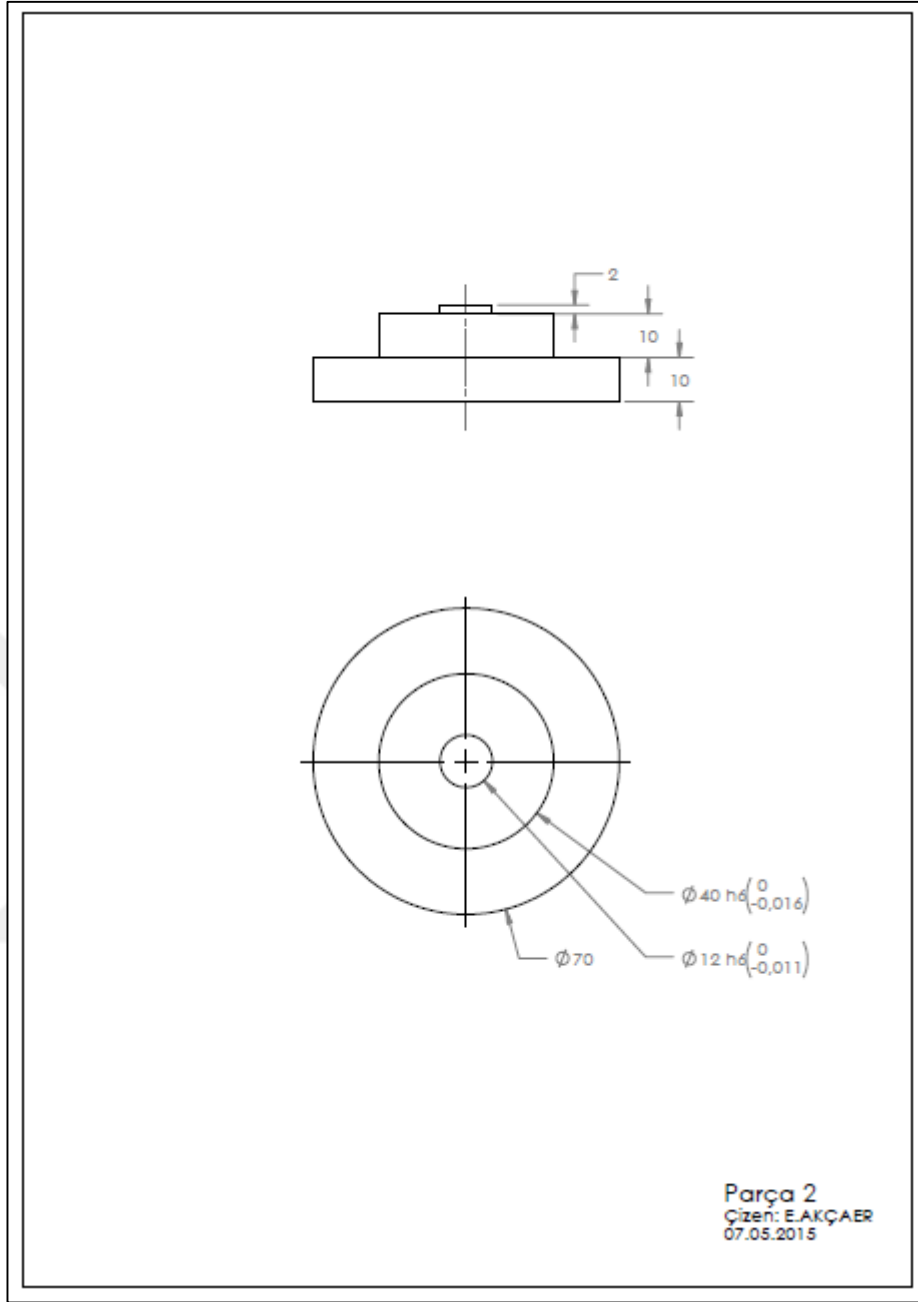


EK AÇIKLAMALAR A.

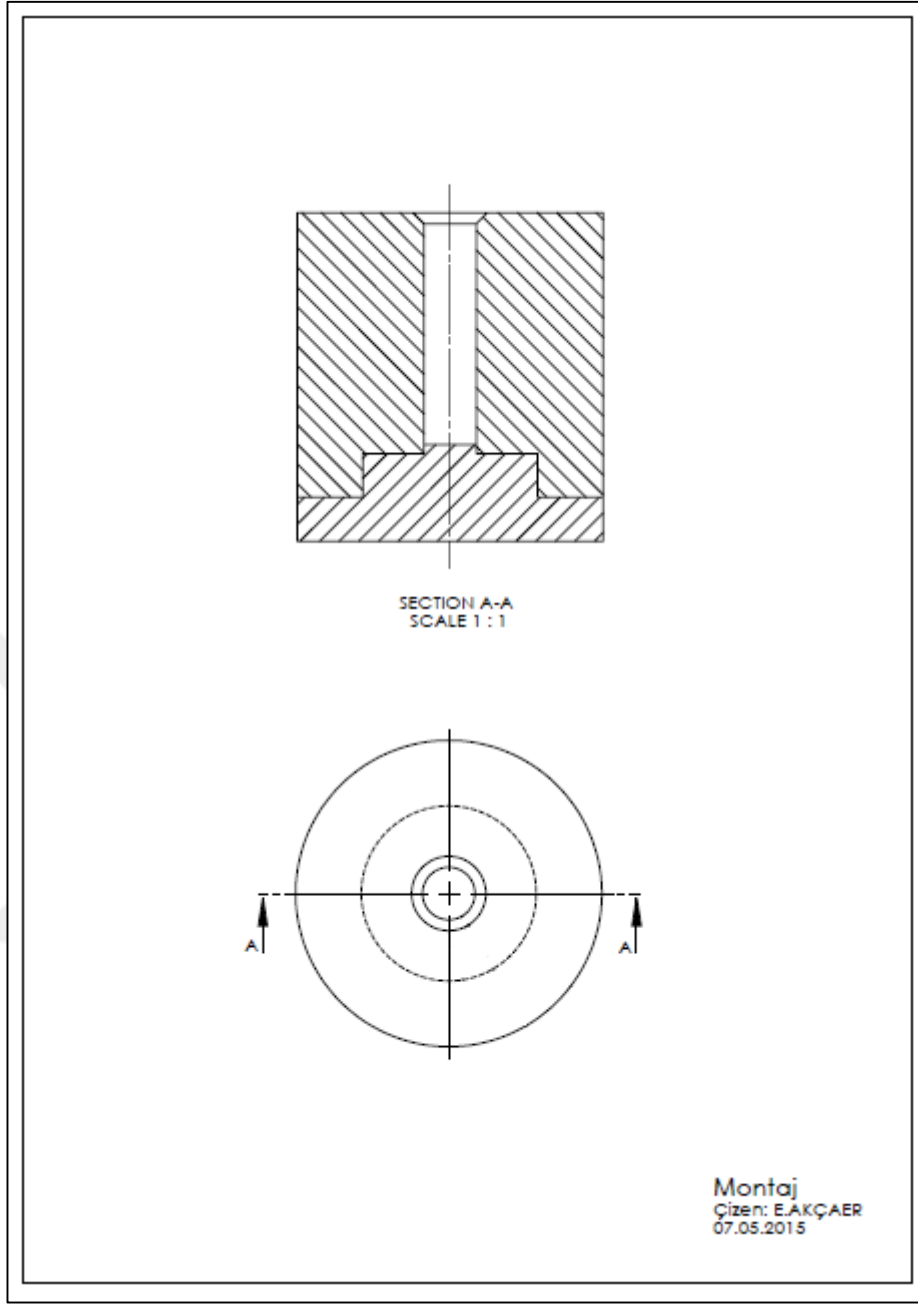
TOZ SIKIŞTIRMA KALIBI TEKNİK RESİMLERİ



Şekil Ek A.1. Toz sıkıştırma kalıbı gövdesi.



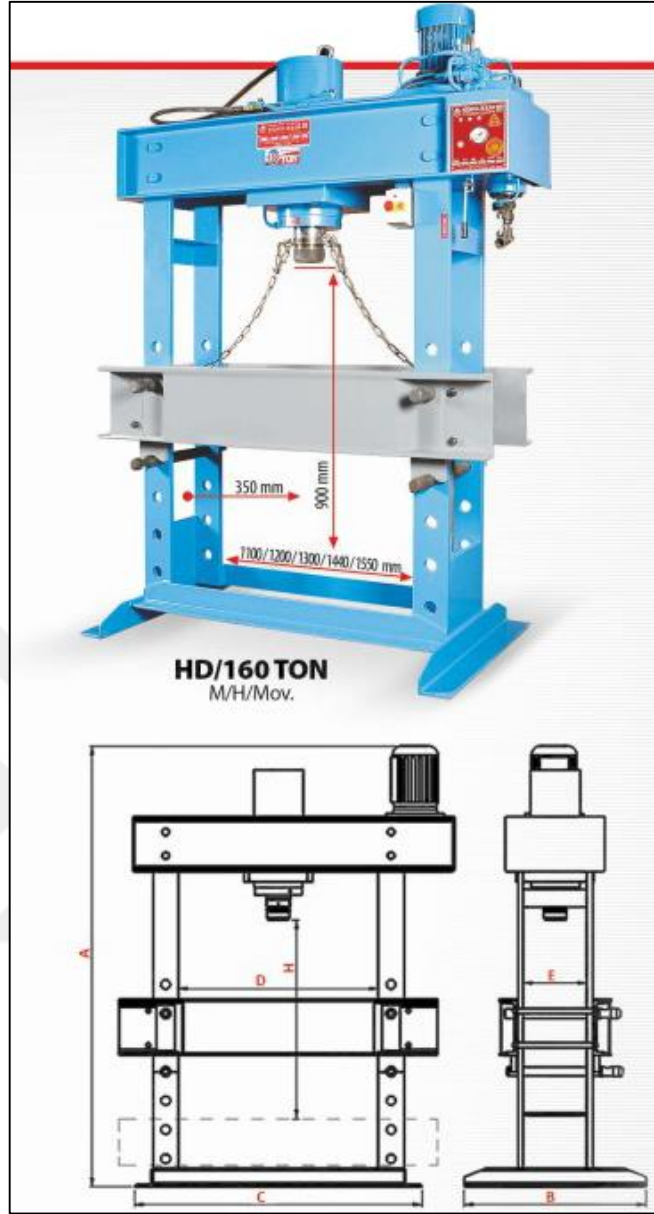
Şekil Ek A.2. Toz sıkıştırma kalıbı alt plakası.



Şekil Ek A.3. Toz sıkıştırma kalıbı montaj resmi.

EK AÇIKLAMALAR B.

HİDROLİK PRES TEKNİK ÖZELLİKLERİ



Şekil Ek B.1. Hidroliksan 160 ton kapasiteli hidrolik pres.

Kapasite (ton)	160
A (mm)	2550
B (mm)	950
C (mm)	1580
D (mm)	1100
E (mm)	350
H (mm)	900
Stroke (mm)	400
Motor (kw.)	5,5
Pompa (lt)	15
Ağırlık (kg)	1300
Çalışma basıncı (bar)	412

ÖZGEÇMİŞ

Eyyüb AKÇAER, 1988'de Sakarya'da doğdu. İlköğretimini Kocaeli Karamürsel'de tamamladı. Orta öğretimini Kocaeli Sabancı Anadolu Teknik Lisesi Elektronik Bölümü'nde 2006 yılında tamamladıktan sonra Sakarya Meslek Yüksek Okulu Mekatronik Bölümü'nde ön lisansa başladı ve 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2013 yılında mezun oldu. Halen 2013 yılında Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.

ADRES VE İLETİŞİM BİLGİLERİ

Adres : Emek Mah. Kamer Sok. Öztürk Apt. Kat:3
Safranbolu/ KARABÜK
Tel : (507) 370 31 00
E-posta : eakcaer@hotmail.com