

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**GRAFEN VE KARBON NANOTÜP İKİLİ PARTİKÜL
TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Yüksek Lisans Tezi

Tülin ŞENBAŞ

Danışman

Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

SAMSUN
2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Tülin ŞENBAŞ tarafından, Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL danışmanlığında hazırlanan “GRAFEN VE KARBON NANOTÜP İKİLİ PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 10.5.2024 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Bilal SUNGUR Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

26 /02 / 2024
Tülin ŞENBAŞ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : GRAFEN VE KARBON NANOTÜP İKİLİ PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 26/02/2024 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 20

Tek kaynak oranı : % 3 çıkmıştır.

26 /02 / 2024
Doç Dr. Mahmut Can ŞENEL

ÖZET

GRAFEN VE KARBON NANOTÜP İKİLİ PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Tülin ŞENBAŞ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Mart/2024

Danışman: Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

Bu tez çalışmasında, Al6061-grafen, Al6061-karbon nanotüp ve Al6061-karbon nanotüp-grafen kompozit yapılar toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Takviye oranlarının ve ısıtım işlem türlerinin (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme) üretilen kompozitlerin mikroyapısına, mekanik (yoğunluk, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği) ve tribolojik özelliklerine (sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve kütle kaybı) olan etkisi incelenmiştir.

Al6061 matrise ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 oranında grafen takviye edilerek üretilen numunelere uygulanan testler neticesinde; en iyi mekanik ve tribolojik özellikler sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1 grafen kompozitte elde edilmiştir. Al6061-%0,1 grafen takviyeli kompozitin yoğunluğu $2,6 \text{ g/cm}^3$, sertlik 126 HV, aşınma oranı $4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ ve kütle kaybı 0,0026 g olarak belirlenmiştir. Ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinden sonra grafenin topaklanması kompozitin özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir.

Ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlere uygulanan testler sonucunda; en yüksek yoğunluk ($2,59 \text{ g/cm}^3$) ve Vickers sertliği (119 HV) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş ağırlıkça %0,1 karbon nanotüp takviyeli kompozit yapıda ulaşılmıştır. Ayrıca bu kompozit yapının en düşük aşınma oranına ($5,1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$), kütle kaybına (0,0033 g) ve en yoğun mikro yapıya sahip olduğu görülmüştür. Karbon nanotüp takviyesiyle belirli bir orana kadar (ağırlıkça %0,1) mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al6061 matrisli grafen ve karbon nanotüp ikili partikül takviyeli kompozitlerde en iyi mekanik ve tribolojik özelliklerin sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1 karbon nanotüp-%0,1 grafen hibrit kompozitte olduğu tespit edilmiştir. Bu ikili partikül takviyeli kompozitin yoğunluğu $2,59 \text{ g/cm}^3$, sertliği 135 HV, aşınma oranı $3,52 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ ve kütle kaybı 0,0023 g olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak Al6061 matrise ağırlıkça %0,1 karbon nanotüp ve %0,1 grafen takviyesinin kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca sadece sinterleme işlemine kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin matris ve takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağını artırarak kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Al6061, Grafen, Karbon Nanotüp, Toz Metalurjisi, Kompozit

ABSTRACT

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE AND CARBON NANOTUBE BINARY PARTICLE REINFORCED ALUMINUM MATRIX COMPOSITES

Tülin ŞENBAŞ

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Master, March/2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahmut Can ŞENEL

In this thesis, Al6061-graphene, Al6061-carbon nanotube and Al6061-carbon nanotube-graphene composite structures were fabricated by powder metallurgy and induction hot pressing methods. The effects of reinforcement ratios and heat treatment types (sintering and induction hot pressing) on the microstructure, mechanical (density, porosity ratio, Vickers hardness) and tribological properties (coefficient of friction, wear rate and mass loss) of the composites were investigated.

As a result of the tests applied to the samples produced by reinforcing graphene at the rate of 0,1, 0,3, 0,5% by weight to the Al6061 matrix; The best mechanical and tribological properties were obtained in Al6061-0,1% graphene composite, hot pressed by induction after sintering. The density of Al6061-0,1% graphene reinforced composite was determined as 2,6 g/cm³, hardness was 126 HV, wear rate was 4x10⁻⁷ mm³/(Nm) and mass loss was 0,0026 g. The agglomeration of graphene after 0,1% by weight graphene reinforcement negatively affected the properties of the composite.

As a result of the tests applied to Al6061 matrix composites reinforced with 0,1, 0,3, 0,5% carbon nanotubes by weight ; the highest density (2,59 g/cm³) and Vickers hardness (119 HV) were achieved in the sintered and induction hot pressed 0.1% by weight carbon nanotube reinforced composite structure. It was also observed that this composite structure had the lowest wear rate (5,1x10⁻⁷ mm³/(Nm)), mass loss (0,0033 g) and the densest microstructure. It has been determined that mechanical properties are improved up to a certain rate (0,1% by weight) with carbon nanotube reinforcement.

Produced by powder metallurgy method Al6061 matrix graphene and carbon nanotube dual particle reinforced composites It was determined that the best mechanical and tribological properties were in the Al6061-0,1% carbon nanotube-0,1% graphene hybrid composite hot pressed by induction after sintering. The density, hardness, wear rate and mass loss of this dual particle reinforced composite was determined as 2,59 g/cm³, 135 HV, 3,52x10⁻⁷ mm³/(Nm), 0,0023 g.

As a result, it was determined that 0,1% carbon nanotube and 0,1% graphene reinforcement by weight in the Al6061 matrix improved the mechanical and tribological properties of the composite. In addition, compared to the sintering process alone, it has been observed that the induction hot pressing process after sintering improves the mechanical and tribological properties of the composite by increasing the interfacial bond between the matrix and the reinforcement element.

Keywords: Al6061, Graphene, Carbon Nanotube, Powder Metallurgy, Composites

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar her aşamasında özverili yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve zamanını ayırıp yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL'e teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Benim bugünlere gelmemde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan anneme ve babama teşekkür ederim. Her daim bana koşulsuz sevgi ve destek veren ablam Güzin ŞENBAŞ MECNUNOĞLU'na ve biricik yeğenim Umut Can MECNUNOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tülin ŞENBAŞ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Tezin Özgün Değeri	2
1.4. Tez Düzeni	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesine Yönelik Çalışmalar	4
2.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesine Yönelik Çalışmalar	7
3. KOMPOZİT MALZEMELER	11
3.1. Tanımı	11
3.2. Kompozit Malzemelerin Avantajı ve Dezavantajı	11
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
3.3.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler	12
3.3.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozitler	13
3.4. Metal Matrisli Kompozitler	15
3.4.1. Kullanılan Matris Malzemeleri	16
3.4.2. Kullanılan Takviye Malzemeleri	19
3.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	19
3.5.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri	20
3.5.2. İn-Situ Yöntemleri	25
3.5.3. Katı Faz Üretim Yöntemleri	26
4. TOZ METALÜRJİSİ	28
4.1. Tanımı ve Tarihçesi	28
4.2. Avantajları ve Dezavantajları	28
4.3. Tozlarının Üretim Yöntemleri	29
4.3.1. Kimyasal Üretim Yöntemleri	30
4.3.2. Elektrolizle Üretim Yöntemleri	30
4.3.3. Mekanik Üretim Yöntemleri	31
4.3.4. Atomizasyon Yöntemleri	32
4.4. Toz Metalürjisi Yönteminin Üretim Aşamaları	32
4.4.1. Tozların Karıştırılması ve Harmanlanması	33
4.4.2. Tozların Preslenmesi	34
4.4.3. Sinterleme	34
4.4.4. Bitirme İşlemleri	35
4.5. Kullanım Alanları	36
5. MATERYAL VE YÖNTEM	39
5.1. Materyal	39
5.2. Yöntem	40
5.2.1. Toz Metalürjisiyle Kompozit Malzeme Üretimi	41
5.2.2. Test Yöntemleri ve Karakterizasyon Teknikleri	49

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	56
6.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analiz Sonuçları	56
6.1.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları	56
6.1.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	57
6.1.3. Aşınma Testi Sonuçları	59
6.1.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskopik Analizi	61
6.1.5. Tozların SEM ve XRD Faz Analizleri.....	63
6.1.6. Üretilen Kompozitlerin XRD Faz Analizleri	64
6.1.7. Kırılmış Yüzeylerin SEM ve SEM-EDX ile Analizleri.....	64
6.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analiz Sonuçları.....	68
6.2.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları	68
6.2.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	69
6.2.3. Aşınma Testi Sonuçları	71
6.2.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskopik Analizi	72
6.2.5. Tozların SEM ve XRD Faz Analizleri.....	74
6.2.6. Üretilen Kompozitlerin XRD Faz Analizleri	75
6.2.7. Kırılmış Yüzeylerin SEM ve SEM-EDX ile Analizleri.....	75
6.3. Grafen ve Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analiz Sonuçları	80
6.3.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları	80
6.3.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	81
6.3.3. Aşınma Testi Sonuçları	82
6.3.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskopik Analizi	84
6.3.5. Tozların SEM ve XRD Faz Analizleri.....	86
6.3.6. Üretilen Kompozitlerin XRD Faz Analizleri	87
6.3.7. Kırılmış Yüzeylerin SEM ve SEM-EDX ile Analizleri.....	87
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
7.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi	92
7.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi.	94
7.3. Grafen ve Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi.....	95
7.4. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler.....	97
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Al6061	: Alüminyum 6061 Alaşımı
Al ₄ C ₃	: Alüminyum Karbür
Al ₂ O ₃	: Alümina
Ag	: Gümüş
B	: Bor
B ₄ C	: Bor Karbür
BN	: Bor Nitrür
C	: Karbon
CO	: Karbonmonoksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-Işını
Fe	: Demir
Fe ₃ O ₄	: Demir Oksit
FE-SEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
GNT	: Grafen Nanotabaka
HV	: Vickers Sertliği
KNT	: Karbon Nanotüp
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
Mn	: Manganez
O	: Oksijen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrür
Ti	: Titanyum
TM	: Toz Metalürjisi
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
XRD	: X-Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kompozitlerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması	13
Şekil 3.2. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri	20
Şekil 3.3. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi üretim aşamaları.....	21
Şekil 3.4. Karıştırılmalı döküm yöntemi	22
Şekil 3.5. Basınçlı döküm yöntemi	23
Şekil 3.6. İnfiltrasyon yöntemi.....	23
Şekil 3.7. Basınçlı infiltrasyon yöntemi.....	24
Şekil 3.8. Vakum infiltrasyon yöntemi	24
Şekil 3.9. Plazma püskürtme yöntemi.....	25
Şekil 3.10. İn-situ yöntemi.....	26
Şekil 3.11. Sıcak haddeleme yöntemi	27
Şekil 4.1. Demir tozunun kimyasal yöntemlerle üretim aşamaları	30
Şekil 4.2. Elektrolizle toz üretim yöntemi	31
Şekil 4.3. Tozların bilyalı öğütme cihazıyla üretimi.....	31
Şekil 4.4. Tozların atomizasyon yöntemiyle üretimi	32
Şekil 4.5. Metalik toz işleme akış şeması	32
Şekil 4.6. İki eksenli presleme işleminin aşamaları	34
Şekil 4.7. Mikroskopik ölçekte sinterleme aşamaları	35
Şekil 4.8. Toz metalürjisi ile üretilmiş parçalar: kasnak zamanlama parçası (a) ve dizel motor piston kolu (b)	37
Şekil 4.9. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş elektrik kontakları.....	37
Şekil 4.10. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş metalik filtreler	38
Şekil 4.11. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş fren balataları (a) ve dişliler (b).....	38
Şekil 4.12. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş biyopsi aletleri	38
Şekil 5.1. Grafen ve karbon nanotüp takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemiyle üretim aşamaları	41
Şekil 5.2. Hassas terazide toz tartım işlemi	42
Şekil 5.3. Yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırma işlemi	43
Şekil 5.4. Filtreleme işlemi	44
Şekil 5.5. Etüv fırınında kurutma işlemi	44
Şekil 5.6. Agat havanda dövme (a) ve eleme işlemi (b)	45
Şekil 5.7. Hidrolik pres (a) ve presleme işleminde kullanılan kalıp (b).....	45
Şekil 5.8. Preslenmiş ham numune örnekleri.....	46
Şekil 5.9. Vakum altında sinterleme işlemi	47
Şekil 5.10. Sinterlenmiş numune örnekleri	47
Şekil 5.11. Su soğutmalı RF indüksiyonla ısıtma makinesi ve hidrolik pres.....	48

Şekil 5.12. İndüksiyonla sıcak presleme makinası (a), grafit pota (b), ve numunenin grafit potaya yerleşimi (c)	48
Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma makinası	49
Şekil 5.14. Vickers sertlik ölçüm cihazı	50
Şekil 5.15. Aşınma test cihazı genel görünümü.....	51
Şekil 5.16. Aşınma test cihazına numune bağlanması işlemi	52
Şekil 5.17. Aşınma testinde sürtünme kuvveti verilerini alma işlemi.....	52
Şekil 5.18. Sinterlenmiş Al6061-%0,1GNT numunesi (a) ve sinterlenme sonrası sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT aşınma numunesi (b).....	53
Şekil 5.19. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) genel görüntüsü	54
Şekil 5.20. Kırık yüzey SEM analizi için hazırlanan numuneler: Al6061-0,1KNT (a), Al6061-0,5GNT (b) ve Al6061-0,1KNT-0,5GNT kompozit (c).....	54
Şekil 5.21. X-ışını kırınımı (XRD) cihazı.....	55
Şekil 6.1. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıtma işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi	57
Şekil 6.2. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıtma işlem türüne bağlı olarak sertlik değerindeki değişim.....	58
Şekil 6.3. Isıtma işlem türüne bağlı olarak Al6061-GNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri	59
Şekil 6.4. Al6061 alaşımına ve Al6061-GNT kompozit numunelere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değişimi.....	60
Şekil 6.5. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 (a,b), Al6061-%0,1GNT (c,d), Al6061-%0,3GNT (e,f) ve Al6061-%0,5GNT (g,h) kompozitlere ait aşınma izleri.....	62
Şekil 6.6. Al6061 alaşım (a) ve grafit (b) tozlarına ait SEM görüntüleri	63
Şekil 6.7. Al6061 alaşım (a) ve grafit (b) tozlarına ait XRD faz analizleri.....	63
Şekil 6.8. Al6061 alaşımının ve Al6061-GNT kompozitlerin XRD faz analizleri	64
Şekil 6.9. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a,b), Al6061-%0,1GNT (c,d), Al6061-%0,3GNT (e,f) ve Al6061-%0,5GNT (g,h) kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri	65
Şekil 6.10. Sadece sinterlenen Al6061-0,5GNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)	66
Şekil 6.11. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,5GNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)	67
Şekil 6.12. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT kompozitlerde ısıtma işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi	69
Şekil 6.13. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT kompozitlerde ısıtma işlem türüne bağlı olarak sertlik değerinin değişimi	70
Şekil 6.14. Isıtma işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri.....	71
Şekil 6.15. Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değişimi.....	72

Şekil 6.16. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a,b), Al6061-%0,1KNT (c, d), Al6061-%0,3KNT (e, f) ve Al6061-%0,5KNT (g, h) kompozitlere ait aşınma izleri.....	73
Şekil 6.17. Al6061 alaşım (a) ve KNT (b) tozlarına ait SEM görüntüleri	74
Şekil 6.18. Al6061 alaşım (a) ve karbon nanotüp (b) tozlarına ait XRD faz analizleri	74
Şekil 6.19. Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait XRD faz analizleri.....	75
Şekil 6.20. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a,b), Al6061-%0,1KNT (c, d), Al6061-%0,3KNT (e, f) ve Al6061-%0,5KNT (g, h) kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri	77
Şekil 6.21. Sadece sinterlenen Al6061-0,5KNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)	78
Şekil 6.22. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,5KNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j).....	79
Şekil 6.23. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerde ısıtma işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi.....	81
Şekil 6.24. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerde ısıtma işlem türüne bağlı olarak sertlik değerinin değişimi	82
Şekil 6.25. Isıtma işlem türüne bağlı olarak Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri.....	83
Şekil 6.26. Al6061-KNT-GNT hibrit kompozit numunelere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değişimi.....	84
Şekil 6.27. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a, b), Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT (c, d), Al6061-%0,1KNT-%0,3GNT (e, f) ve Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT (g, h) kompozitlere ait aşınma izleri	85
Şekil 6.28. Al6061 alaşım (a), GNT (b) ve KNT (c) tozlarına ait SEM görüntüleri	86
Şekil 6.29. Al6061 alaşım (a), KNT (b) ve GNT (c) tozlarına ait XRD faz analizleri	86
Şekil 6.30. Al6061 alaşımı ve Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitin XRD faz analizleri	87
Şekil 6.31. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a, b), Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT (c, d), Al6061-%0,1KNT-%0,3GNT (e, f) ve Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT (g, h) kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri	89
Şekil 6.32. Sadece sinterlenen Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j).....	90
Şekil 6.33. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j).....	91

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 3.1. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları.....	16
Tablo 5.1. Al6061 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri	39
Tablo 5.2. Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)	39
Tablo 5.3. Grafenin genel özellikleri	40
Tablo 5.4. Karbon nanotüpün genel özellikleri.....	40



1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Günümüzde metaller gibi klasik malzemeler gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayamayacak duruma gelmiştir. Bu nedenle daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmeye ve hızla geliştirilmeye başlanmıştır. Geleneksel malzemelere kıyasla kompozit malzemelerin hafiflik ve sağlamlıkları en belirgin özellikleridir (Pul, 2019).

Kompozit malzeme özelliklerinin geliştirilmesine yönelik yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetlerine 1900'lü yılların ikinci yarısından itibaren başlanmış olup halen devam etmektedir (Şenel, 2017). Yapılan araştırma ve geliştirmeler neticesinde, kompozitlerin çekme, darbe dayanımlarının artırılması, yorulma, kimyasal direnç ve elektrik özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmuştur. Kompozit malzemeler yaygın şekilde havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, makine, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarında kullanılmaktadır (Pul, 2019).

Alüminyum ve alaşımları sahip oldukları kolay şekillendirilme, iyi işlenebilirlik, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, yüksek tokluk, düşük yoğunluk, iyi elastisite modülü, yüksek korozyon direnci ve geri dönüşümünün kolay olması nedeniyle en fazla tercih edilen matris malzemesidir (Şenel, 2021).

Grafen nanotabaka (GNT), altıgen yapıda dizilmiş karbon atomlarının iki boyutlu formudur. Grafen ilk defa 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nden Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov isimli iki araştırmacı tarafından sentezlenmiştir. Doğadaki iki boyutlu tek malzeme olmasının yanında sıra dışı özelliklere de sahiptir. Grafenin çelikten 100 kat fazla elastisite modülüne, elmadan daha iyi ısı iletkenliğe, bakırdan daha yüksek termal iletkenliğe sahip olması, kolay esneyebilmesi, bilinen en hafif malzeme olması, insan vücudunda bulunan iyonik sıvılarda bozulmaması tercih edilme sebepleridir. Tüm bu sebeplerden ötürü dünyada önemli değişiklikler yaratabilecek sıra dışı bir malzeme olarak görölmektedir (Şenel, 2015).

Karbon nanotüpler (KNT); 1991 yılında Sumia Iijima tarafından ark boşalımı yöntemi ile fulleren üretimi sırasında katotta biriken yapının geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmesi sırasında keşfedilmiştir. Iijima'nın 1991 yılında

keşfettiği nanotüpler çok duvarlı karbon nanotüplerdir. Daha sonra 1993 yılında Iijima ve Ichihashi tarafından 1 nanometre çapında tek duvarlı karbon nanotüp sentezi rapor edilmiştir (Iijima, 1993).

Karbon nanotüp doğada bulunan en sağlam ve dayanıklı malzemelerdendir. Karbon nanotüp de grafen gibi sıradışı özelliklere sahiptir. Karbon nanotüpler kırılmadan yüksek oranda uzayabilirler. Tek duvarlı nanotüpler dikkate değer oranda esnektir. Burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir ya da başka çeşitli esnetmeler sonucunda kırılmadan kalabilirler. Ayrıca karbon nanotüp üzerindeki etki çekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığı gözlemlenmiştir. Karbon nanotüpler sahip oldukları yüksek yüzey alanı, gelişmiş iletkenlik, mekanik dayanıklılık, biyouyumluluk, fonksiyonelleştirilebilme gibi özellikleri sayesinde endüstriyel, çevresel ve biyomedikal gibi çeşitli alanlarda yaygın kullanım alanına sahiptir. Ayrıca karbon nanotüpler; kolayca sentezlenebilmeleri, boyutlarının kontrol edilebilir olması, yüzey kimyası ile spesifik olarak işlevselleştirilebilmeleri gibi özelliklerinden dolayı çok geniş ölçekli alanlarda uygulanabilmektedir (Iijima 1993; Büyük, 2017).

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, grafen ve karbon nanotüp ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi ve üretilen kompozitlerin mikroyapısının, mekanik, fiziksel ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda matris malzeme olarak Al6061 alaşımı seçilmiştir. Grafen, kendine özgün üstün mekanik dayanımı ve tribolojik özellikleri sebebiyle takviye elemanı olarak tercih edilmiştir. Karbon nanotüp ise sıradışı atomik yapısı, mükemmel kimyasal kararlılığı ve mekanik özellikleri nedeniyle bir diğer katkı elemanı olarak seçilmiştir. Bu tez çalışmasında, grafen-karbon nanotüp ilavesinin Al6061 alaşımının özelliklerine olan etkileri incelenerek daha yüksek dayanıma, daha iyi tribolojik özelliklere ve daha yoğun mikroyapıya sahip kompozitlerin üretilmesi amaçlanmıştır.

1.3. Tezin Özgün Değeri

Literatür çalışmaları incelendiğinde; grafen-karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mikroyapılarının, mekanik ve tribolojik özelliklerinin

incelenmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Grafen, yüksek mukavemet, termal iletkenlik, hafiflik ve incelik gibi üstün özelliklerinden dolayı matris yapıya çok düşük miktarda ilave edilmesi ile bile yüksek mekanik özellikler sergilemektedir. Bu sebeple grafen takviyesinin üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmesi beklenmektedir.

Bu tez çalışması ile yüksek mekanik dayanıma ve üstün tribolojik özelliklere sahip Al6061 matrisli grafen-karbon nanotüp ikili partikül takviyeli kompozitler üretilmektedir.

1.4. Tez Düzeni

Bu çalışmanın ilk bölümünde, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzemesi (Al6061) ve takviye malzemeleri (grafen ve karbon nanotüp) ile ilgili genel bilgiler verilerek çalışmanın amacı, özgün değeri ve tez düzeni anlatılmıştır. İkinci bölümde, grafen nanotabaka (GNT) ve karbon nanotüp (KNT) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, kompozit malzemeler ve özellikleri hakkında bilgiler verilerek kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve kullanım alanları anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, numunelerin üretim yöntemi olan toz metalürjisi yöntemi üzerinde durulmuştur. Toz metalürjisiyle (TM) parça üretim adımları ve bu yöntemin kullanım alanları anlatılmıştır. Beşinci bölümde, tez çalışmasında kullanılan takviye ve matris malzemelerin özellikleri, kompozit malzeme üretim yöntemi, test ve karakterizasyon teknikleri açıklanmıştır. Altıncı bölümde, üretilen Al6061-grafen, Al6061-karbon nanotüp, Al6061-karbon nanotüp-grafen kompozitlerin yoğunluk, sertlik, aşınma ve mikroyapı analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Yedinci bölümde, takviye malzemelerinin (GNT ve KNT) katkı oranlarının ve ısıtma işlem türünün (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme) kompozit malzemelerin, yoğunluğuna, sertlik değerine, aşınma oranına ve mikroyapılarına olan etkileri incelenmiş elde edilen sonuçlar ayrı ayrı özetlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar doğrultusunda ileride yapılacak çalışmalara yönelik önerilere de yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında; Al-GNT ve Al-KNT kompozitlerin mikro yapılarının, mekanik ve tribolojik özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar araştırılmış ve incelenen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesine Yönelik Çalışmalar

Abbas shafqat vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada, ağırlıkça %10 B₄C ve ağırlıkça %0,25, 0,6, %1,2 grafen takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozitleri incelemişlerdir. Söz konusu kompozitlerin sertlik değerinin saf alüminyuma kıyasla 3,5 kat arttığını tespit etmişlerdir. Grafen takviyesi ağırlıkça %0,6'nın üzerine çıktığında, grafenin kümelenme eğilimi nedeniyle sertlik değerinin azaldığını belirlemişlerdir.

Alipour vd. (2018) yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0,1 ve %1 grafen takviyeli AA7068 matrisli kompozitleri mekanik alaşımlama ve ultrasonik karıştırma metoduyla üretmişlerdir. Ağırlıkça %0,5 GNT takviye oranına kadar tane boyutunun azaldığını, takviye oranının artmasıyla tane boyutunda önemli bir değişim olmadığını tespit etmişlerdir. T6 ısıtılmasının kompozitlerin aşınma oranını düşürdüğünü belirlemişlerdir. Mikroyapı incelemesinde kompozitlerin aşınma mekanizmasının abrasif aşınma olarak tespit etmişlerdir. Yapılan test ve analizler sonucunda en iyi mikroyapı ve tribolojik özellikleri ağırlıkça %0,5 GNT takviyeli kompozitte elde etmişlerdir.

Bastwros vd. (2014) yaptıkları çalışmada, öğütme süresinin ve GNT takviye oranının kompozitin eğilme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Al6061-%0,1 grafen tozlarını 10-90 dk arasında farklı sürelerde öğütmüşlerdir. Test sonuçlarına göre; Al6061-%0,1GNT kompozitte Al6061 alaşımına kıyasla 60 dk öğütme süresinde %47 ve 90 dk öğütme süresinde ise %34 oranında eğme mukavemetinde artış tespit etmişlerdir.

Bisht vd. (2017) ağırlıkça %0,5-5 GNT katkılı Al esaslı kompozitleri toz metalürjisi ve spark plazma sinterleme yöntemleriyle imal etmişlerdir. Tozların karışım sıvısı olarak asetonu kullanmışlardır. Ağırlıkça %0,1 GNT takviyeli kompozitte, sertlik değerinin %21,4 akma mukavemetinin %84,5 ve çekme

mukavemetinin de %54,8 oranında iyileştiğini tespit etmişler, Orowan mekanizmasının kompozitlerin mukavemet değerlerini artırdığı sonucuna varmışlardır.

Hsieh vd. (2020) grafen nano tabaka (GNT) takviyeli Al6061 matrisli kompozit yapılarda GNT katkısının ve sıcak ekstrüzyon işleminin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,25GNT takviyeli kompozitlerde takviyesiz Al6061 alaşımına kıyasla; sertliğin %6, basma dayanımının %50 ve aşınma direncinin %17 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

Khan vd. (2019) yürüttükleri çalışmada ağırlıkça %0,1, 0,5, 1 ve 3 grafen nanotabaka takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elektrik iletkenliğinin ağırlıkça %1 GNT takviye oranına kadar artış gösterdiği, takviye oranı arttıkça elektrik iletkenliğinde düşüş olduğunu tespit etmişlerdir. Grafen parçacıklarının etkisiyle oluşan yüksek gözeneklilik sebebiyle elektrik iletkenliğinin düştüğünü belirlemişlerdir.

Kumar vd. (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada ağırlıkça %0,2 - 0,6 GNT esaslı Al6061 esaslı kompozitleri TM yöntemiyle üretmişlerdir. Ağırlıkça %0,4 grafen takviyeli Al6061 kompozitte en yüksek sertlik değerine (65 HV0,1) ve en düşük kütle kaybına (0,02 mg) ulaşmışlardır. Yaptıkları testler sonucunda grafen ilavesinin sürtünme katsayısına ve aşınma oranına olumlu etkisini tespit etmişlerdir. Ancak grafen takviye oranındaki artışın topaklanma eğilimini artırdığını bunun da yorulma ömrünü düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Li vd. (2015) ağırlıkça %0,5-2 GNT katkılı Al esaslı kompozitleri harmanlama, soğuk öğütme ve sıcak ekstrüzyon işlemleriyle elde etmişlerdir. GNT katkısının kompozitin mekanik özelliklerine olumlu katkısının yanında sıcak ekstrüzyon işleminin tane boyutunu küçültmesiyle mekanik özellikleri artırdığını tespit etmişlerdir. Bunların yanı sıra ağırlıkça %0,1'in üzerinde grafen takviyesinde mukavemetin olumsuz yönde etkilendiğini belirlemişlerdir.

Li vd. (2017) çalışmalarında ağırlıkça %0,25-1 GNT takviyeli Al esaslı kompozitleri üretmişler ve üretilen numuneleri vakum altında sıcak preslemişlerdir. Söz konusu kompozitlerin mukavemet özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde maksimum sertlik (81 HV0,1), %0,25 grafen

katkısında ise en yüksek çekme mukavemeti (164 MPa) değerine ulaşılmıştır. Grafen katkı oranının artmasıyla kompozitlerin mekanik özelliklerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Li vd. (2018) çalışmalarında, ağırlıkça %0,5, 1, 2 GNT takviyeli Al esaslı kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin FE-SEM (alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri incelendiğinde grafenin kompozit içerisinde homojen dağılmış olduğunu tespit etmişlerdir. Üretilen kompozitlerin basma dayanımının alüminyumla kıyaslandığında %330-586 seviyelerinde arttığını belirlemişlerdir.

Omrani vd. (2021) alüminyuma grafen nano tabaka takviyesinin tribolojik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Ağırlıkça farklı takviye oranlarında Al-GNT ve Al-GNT-Al₂O₃ kompozitlerini toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Soğuk preslendikten sonra sıcak preslenen kompozitlerde yapılan testler sonucunda sertlik değerinde saf alüminyuma göre Al-%1GNT kompozitinde %20, Al-%1GNT-%2Al₂O₃ kompozitinde ise %27 artış olduğu tespit edilmiştir. Al-%1GNT ve Al-%1GNT-%2Al₂O₃ kompozitlerinin sürtünme katsayılarında saf alüminyumla kıyaslandığında sırasıyla %22 ve %53 oranlarında düşüş gözlenmiştir.

Perez-Bustamante vd. (2015) yaptıkları çalışmada grafen katkı oranı, mekanik alaşımla ve sinterleme sürelerinin Al-GNT kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,25, 0,50 ve 1 oranlarında grafen alüminyuma 1, 3 ve 5 saat sürelerinde mekanik alaşımlanmıştır. Hazırlanan tozlar 950 MPa basınçta soğuk preslendikten sonra 0,5, 1, 2, 3, 4 ve 5 saat süresince 500 °C sıcaklıkta argon gazında sinterlenmiştir. Yapılan testler sonucunda alaşımlama süresinin ve grafen katkı oranının sertlik üzerinde olumlu etkisi olduğunu belirlemişlerdir. Al-GNT kompozitinde en yüksek sertlik değerlerini 5 saat mekanik alaşımlanan ve 2 saat sinterlenen numunelerde elde etmişlerdir. Saf alüminyumla kıyaslandığında söz konusu numunelerin sertlik değerlerinde %138 oranında artış belirlemişlerdir. Mekanik alaşımlama süresindeki artışın difüzyon oranını artırdığını tespit etmişlerdir.

Prakash vd. (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Al6061 alaşımına ağırlıkça %1,5 karbon nanotüp eklenmesiyle Al6061 alaşımının sertlik değerinin %18,6 ve darbe mukavemetinin %66,6 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

Shao vd. (2020) yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0,6 grafen takviyeli Al6061 kompozitleri farklı ekstrüzyon sıcaklıklarında ve basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişler ve 450°C’de ekstrüde edilen kompozitlerin takviyesiz Al6061 alaşımına oranla mukavemet değerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Şenel vd. (2017) çalışmalarında ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerde, GNT katkı oranının, sinterleme süresinin ve sıcaklığının kompozitlerin yoğunluğuna ve mikro Vickers sertliğine olan etkisini incelemişlerdir. En iyi mikro Vickers sertlik değerinin ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinde, 180 dk sinterleme süresinde ve 630 °C’lik sinterleme sıcaklığında olduğunu tespit etmişlerdir.

Wang vd. (2012) toz metalürjisi yöntemiyle grafen nanotabaka (GNT) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlere uyguladıkları mekanik testler sonucunda %0,3 grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin çekme dayanımının takviyesiz alüminyuma göre %62 oranında artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra numunelerde %13’lük boyuna uzama da elde edilmiştir. Grafen takviyesinin alüminyumun mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığını belirlemişlerdir.

2.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesine Yönelik Çalışmalar

Hanizam vd. (2019) çalışmalarında, sıvı faz üretim yöntemlerinden biri olan karıştırmalı döküm yöntemiyle A356-KNT kompozitlerini üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere T6 ısıtıl işlemi uygulanmıştır. KNT oranının, Mg katkısının ve mekanik karıştırma süresinin etkilerini deney tasarımı Taguchi yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Maksimum sertlik (106,4 HV) ve çekme dayanımı (277 MPa) 10 dk süresince karıştırılan A356-%0,5KNT-%0,5Mg kompozitinde elde edilmiştir. A356 malzemesiyle kıyaslandığında sertlik değerinde %76,3 ve çekme mukavemetinde %108,4 oranında artış tespit etmişlerdir.

Jeyasimman vd. (2014) Al6061 alaşımına ağırlıkça %0,5-2 oranlarında KNT ilavesiyle kompozit yapılar elde etmişlerdir. Yapısal hasarı önlemek için 30 saatlik

mekanik alaşımlama süresinin son 2 saatinde KNT tozu eklenmiştir. Hazırlanan toz karışımlar soğuk preslendikten sonra azot gazı (N_2) atmosferinde 450, 525 ve 600 °C’de sinterlenmiştir. KNT katkısının konsolidasyon davranışı Heckel, Panelli, Ambrosio Filho eşitlikleriyle incelenmiştir. Al-%2KNT kompozitinde 76 HV sertlik ve 161 MPa basma dayanımı tespit etmişlerdir.

Omidi vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, mekanik öğütme ve ekstrüzyon yöntemiyle üretilen Al6061 alaşımına farklı oranlarda KNT takviye edip 0,5 ve 4 saat mekanik öğütmeyle karıştırarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Soğuk presleme, homojenleştirme ve ekstrüzyon işlemiyle 13 mm çapında çubuk elde etmişlerdir. KNT takviyesiyle kompozitte maksimum yoğunluk elde edilirken, 236,1 HV maksimum sertlik değerine ağırlıkça %1,25 KNT takviyeli kompozitte ulaşmışlardır. %1,25 KNT takviyeli Al6061 kompozite düşük normal yükte minimum ağırlık kaybı olurken artan normal yükte minimum ağırlık kaybının KNT takviyesiz Al6061 alaşımında olduğunu tespit etmişlerdir.

Najimi vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, farklı sıcaklıklarda spark plazma sinterleme yöntemiyle üretilen Al6061 alaşımı ve karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Sinterleme sıcaklığı 450°C’den 550 °C’ye yükseltildiğinde alüminyum nano kristallerdeki hızlı büyüme nedeniyle çekme dayanımının 325 MPa’dan 290 MPa’a düştüğü bunun aksine karbon nanotüp takviyeli Al6061 kompozitte ise sinterleme sıcaklığındaki artışla çekme dayanımının 375 MPa’dan 430 MPa’a yükseldiği tespit edilmiştir. 550°C’de sinterlenen karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitin 450°C’de sinterlenen aynı yapıdaki kompozite kıyasla uzamasının %20 oranında iyileştiği tespit edilmiştir.

Prabhakar vd. (2019) çalışmalarında Al5083 matrisli KNT takviyeli kompozitleri sürtünme karıştırma yöntemiyle üretmişlerdir. 100x50x5 mm ebatlarındaki Al5083 plakalara 1 mm genişliğinde 2 mm derinliğinde açılan oyuklara KNT takviyesi yerleştirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmayla sürtünme karıştırma yönteminin MMK üretimde farklı bir metot olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Yapılan testler sonucunda alüminyum alaşıma kıyasla sertlik değerinde %25 oranında artış tespit etmişlerdir. Ayrıca korozyon direncinde de önemli oranda artış belirlemişlerdir.

Prakash vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, Al6061 matrisli çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Karbon nanotüp ilavesinin sertliği ve darbe ve çekme dayanımını iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Al6061 alaşımının sertliğinin, ağırlıkça %1,5 karbon nanotüp takviyesiyle %18,6 oranında iyileştiğini tespit etmişlerdir. Al6061 alaşımına ağırlıkça %1,5 KNT takviyesiyle darbe ve çekme dayanımı sırasıyla %66,6 ve %11,93 oranlarında iyileşmiştir. Ağırlıkça %1,5 karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin Al6061 alaşımına kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Preethi vd. (2023) yaptıkları çalışmalarında, ağırlıkça %1, 1,5 ve 2 oranlarında KNT takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Kullanılan KNT'ler 500 nm büyüklüğündedir. Elde ettikleri numunelerin mikro yapılarını taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) yöntemiyle incelemişler ve karbon nanotüplerin matrise iyi dağıldığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen numunelerin aşınma dirençlerini ve sertlik dayanımlarını ASTM normlarına göre değerlendirmişlerdir. Aşınma direncinin ve sertliğin KNT takviyesiyle arttığını tespit etmişlerdir.

Shin vd. (2015) ağırlıkça %0,3, 0,5, 0,7 KNT ve GNT takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Her iki takviye malzemesi benzer moleküler yapıya sahip olsalar da geometrik farklılıkları nedeniyle grafenin karbon nanotüpe kıyasla 12,8 kat daha fazla yüzey alanına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Aynı oranda karbon nanotüp ve grafen takviyeli kompozitler kıyaslandığında, grafen takviyeli kompozitin akma mukavemetinin karbon nanotüp takviyeli kompozite göre 3,5 kat arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca hacimce %0,7GNT kompozitin çekme mukavemetini 400 MPa olarak belirlemişlerdir.

Shivaramu vd. (2019) ağırlıkça %0,25-1 KNT katkılı Al esaslı kompozitleri TM yöntemiyle imal etmişlerdir. Üretilen kompozitlerin aşınma davranışını ASTM G99-95a standardına uygun olarak test etmişlerdir. Ağırlıkça %0,5 KNT takviyeli kompozitte en iyi aşınma değerini elde etmişlerdir.

Simões vd. (2015) ağırlıkça %0,1-0,5 KNT takviyeli Al matrisli kompozitler üretmişlerdir. KNT takviyesi sertlik üzerinde önemli fark oluşturmada da basma dayanımında belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Basma dayanımında en yüksek değeri ağırlıkça %0,5 KNT takviyeli kompozitte 506 MPa olarak tespit etmişlerdir.

Ujah vd. (2019) alışmalarında, Al-KNT-Nb hibrit kompozitleri spark plazma sinterleme yöntemiyle üretmişler. Sinterleme işleminin parametreleri olan sıcaklık, basınç, zaman ve ısıtma seviyesinin optimizasyonunu Taguchi metoduyla sağlamışlardır. Maksimum sertlik 38,57 HV ve bağıl yoğunluk %99,3 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler 630°C sinterleme sıcaklığında, 30 MPa basınçta, 10 dk sinterleme süresi ve 200 °C/dk ısıtma hızında elde edilmiştir.

Van Trinh vd. (2018) Al-KNT kompozitlerini toz metalürjisi ve sıcak- izostatik presleme yöntemlerinin kombinasyonu ile üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerde çeşitli mikroskobik incelemeler (Raman, SEM ve optik) gerçekleştirmişlerdir. Yapı içerisinde homojen dağılan KNT'lerin mikro çatlaklara köprü oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. KNT takviye oranının artmasıyla termal genleşme katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Tanımı

Kompozit malzemeler, kimyasal olarak birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin üç boyutlu olarak birleşmesiyle oluşan yapılardır. Elde edilen nihai malzeme bileşenlerin sahip olmadıkları özellikleri taşır. Başka bir deyişle, en az iki farklı malzemenin makroskopik düzeyde, birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir (Kaw, 2006).

Kompozit malzemelerde matris ve takviye bileşenleri mevcuttur. Takviye olarak ifade edilen bileşenden beklenen özellik taşıyıcı görev üstlenmesiyle, matris bileşen ise takviyeleri bir arada tutmaya ve desteklemeye yaramaktadır (Chak vd., 2020; Yu vd., 2019).

Kompozit malzemeler geleneksel mühendislik malzemelerinin bazı özelliklerini geliştirmek amacıyla üretilmektedir. Bu özellikler:

- Mekanik, elektriksel ve aşınma özellikleri
- Fiziksel, kimyasal, elektriksel ve termal özellikler
- Yalıtım özellikleri
- Yüzey özellikleri

şeklinde sıralanabilir (Pul, 2010).

3.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Üstün özelliklere sahip kompozitlerin avantajları aşağıda verilmiştir:

- Yüksek mekanik özellikler
- Düşük yoğunluk
- Yüksek elastisite modülü
- Tokluk ve darbelere karşı yüksek dayanım
- Yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik
- Yüzey kusurlarına karşı düşük hassasiyettir.

Üstün özelliklere sahip bu malzemelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir:

- Ekonomik açıdan yüksek maliyetli olması

- Üretim aşamalarının zor ve uğraştırıcı olması
- Metallere göre düşük sünekliğe sahip olmaları
- Malzemenin kalitesinin üretim yönteminin kalitesine bağlı olması
- Farklı doğrultularda gelen yüke karşı farklı mekanik özellikler göstermesi
- Bazı kompozitlerin aşındırıcı ve çözücü ortamlarda kullanılamaması
- Bazı montaj yöntemlerine uygun olmamaları, örneğin kaynaklı birleştirmelerinin kısıtlı olmasıdır (Bülbül, 2020; Altınsoy, 2020; Şenel, 2018).

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler yapısal ve fonksiyonel özelliklerine göre birden fazla şekilde sınıflandırılabilir. Ancak en yaygın olarak bilinen sınıflandırma matris malzemesine ve takviye malzemesinin türüne veya şekline göre yapılan sınıflandırmadır.

3.3.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Kompozit üretiminde kullanılan matris malzemesine göre kompozitler; polimer, seramik ve metal matrisli olmak üzere üçe ayrılır.

3.3.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Bu kompozitlerde matris malzemesi polimerdir. Polimerler termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki gruba ayrılır.

Termosetler tipik olarak oda sıcaklığında sıvı olup, kimyasal ilavesiyle sertleştirilirler. Bu malzemeler üretim esnasında sadece bir defa ısıtılıp şekillendirilebilirler.

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı olup ancak ısıtıldığında yumuşayarak akışkan hale gelirler. Termoplastiklerin işlenmesinde kimyasal bağlanma yoktur. Bu sebeple soğuması ve istenen şekle katılaşması için bir kalıba dökülebilirler. Termoplastikler, malzeme özelliklerini etkilemeden yeniden ısıtılabilir, geri dönüştürülebilir ve yeniden kalıplanabilir (Arı, 2022).

3.3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler, metal ve metal olmayan elementlerin birleşiminden

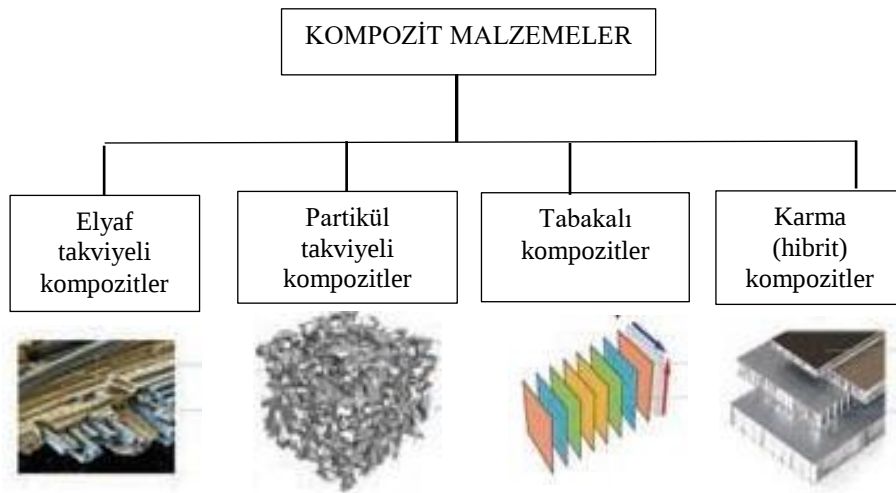
meydana gelen inorganik malzemelerdir. Yoğunluklarının düşük olması ve yüksek sıcaklıklarda (2000°C ve üzeri) çalışabilme özellikleri seramikleri matris malzemesi olarak öne çıkarmaktadır. Seramik matrisli malzemelerde kullanılan takviye elemanları sürekli ve süreksiz fazlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Tokluk değerlerinin daha iyi olması nedeniyle sürekli fiber takviyeli seramik kompozitler daha çok tercih edilmektedir. Seramik malzemelerde en çok tercih edilen matris malzemeleri: karbürler (silisyum karbür - SiC vb.), nitrürler (silisyum nitrür – Si₃N₄ vb.), oksitler (alümina mullit - Al₆Si₂O₁₃ vb.) ve cam seramiklerdir (lityum alüminasilikat vb.) (Özeker, 2021).

3.3.1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), matris malzemesinin metal olduğu kompozit malzeme grubudur. MMK'ler birbirinden farklı yapıdaki iki veya daha fazla bileşenden oluşurlar. Alüminyum, bakır ve magnezyum en çok tercih edilen matris malzemelerdir (Şenel, 2018).

3.3.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler takviye malzemesine göre: elyaf takviyeli, partikül takviyeli, tabakalı ve karma kompozitler olmak üzere 4 (dört) farklı grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kompozitlerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması (Kaya, 2016)

3.3.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Genellikle enine kesitleri dairesel olmakla birlikte bazen oval, dikdörtgen ve

hegzagonal olabilen filamentlerle güçlendirilmiş takviye elemanlarıdır. Elyaf lar uzun ve kısa elyaf lar olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Çapları yaklaşık 100 µm ve boy/çap oranı 100'den yukarı olanlar uzun elyaf olarak adlandırılmaktadır. Boy/çap oranı 10 ile 100 arasında olanlar ise kısa elyaf olarak adlandırılmaktadır. Kompozit yapıya elyaf takviyesinin kompozitin dayanımının artışı üzerine büyük etkisi vardır (Ekici, 2012). Bu dayanım artışı elyaf ın çapına ve yönüne göre değişim göstermektedir. Özellikle, havacılık ve uzay sektöründe istenilen yüksek mukavemet, hafiflik ve rijitlik gibi üstün özellikler sayesinde fiber takviyeli kompozitler bu alanlarda kullanılan önemli malzemelerdendir.

3.3.2.2. Partikül takviyeli kompozitler

Bu tip kompozitler, parçacık (partikül) halindeki malzemelerin, matris içine katılmasıyla oluşur. Kompozit içerisinde yer alan takviye parçacıkları kübik, küresel, tek tip veya farklı tip geometrilerde olabileceği gibi yönlendirilmiş ya da rastgele konumlara da sahip olabilir. Partiküller, sahip oldukları yüksek sertlikle birlikte yüksek sıcaklık dayanımlarına sahip olan matrisin içerisinde yer alırlar. Bu tür kompozitlerde dayanım; partiküllerin boyutuna, partiküllerin homojen dağılımına ve partiküller arası mesafeye bağlıdır. Kompozit malzeme üretiminde en çok tercih edilen katkı partikülleri; Al_2O_3 , B_4C ve SiC gibi seramik malzemelerdir (Bülbül, 2020; Demir, 2022).

3.3.2.3. Tabakalı kompozitler

Birbirlerinden farklı özellik gösteren birden fazla tabakanın, ana malzeme içerisinde değişik şekillerde yönlenmesiyle oluşur. En eski ve en yaygın kompozit yapı türü olan tabakalı kompozitler, farklı elyaf oryantasyonuna sahip tabakalardan ve yaprak biçiminde dağınık faz ile takviyelendirilmiş matristen meydana gelen kompozitlerdir. Bu kompozit çeşidi tabakaların özelliğine göre aşınma direncinin, korozyon dayanımının ve taşıma kapasitesinin yüksek olmasının istendiği uygulamalarda tercih edilmektedir. Nem ve ısıya karşı oldukça dayanıklı olan tabakalı kompozitlerin katmanları farklı malzeme gruplarından oluşabileceği gibi farklı çeşit ve şekillere sahip takviyelendirici içeren kompozit malzemelerden de oluşabilmektedir. Metallere oranla daha hafif ancak mukavemetlerinin yüksek olması sebebiyle birçok değişik tasarımda, askeri araç gereçler ve hafif zırhlarda tercih edilmektedir (Bülbül, 2020; Demir, 2022).

3.3.2.4. Karma (hibrit) kompozitler

Karma kompozitler, bir matris malzeme içerisinde birden fazla takviye malzeme çeşidi içeren yapılardır. Prensipite, çok sayıda farklı fiber, hibrit kompozit içerisinde yer alabilir. Fakat uygulamada çoğunlukla bir matris içerisinde iki farklı takviye kullanılır (Sarıkaya, 2019).

3.4. Metal Matrisli Kompozitler

MMK'ler daha üstün özelliklere sahip malzeme elde edilebilmesi için fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından birbirinden farklı iki veya daha fazla metalin birleşimiyle oluşan malzemelerdir (Singh vd., 2015).

Metal matrisli kompozitler takviye elemanının şekline göre; süreksiz (kısa elyaf, kılcal kristal ve parçacık takviyeli) veya sürekli elyaf takviyeli metal matrisli kompozitler olarak iki ana gruba ayrılır. MMK'lerin mekanik özellikleri takviye elemanına ve matris içerisindeki dağılımına bağlıdır (Ekici, 2012).

MMK'ler, takviyesiz alaşımlara ve polimer esaslı kompozitlere göre önemli avantajlara sahiptir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek çekme, basma ve eğme dayanımı
- Düşük yoğunluk özelliği
- Tokluk ve darbelere karşı yüksek dayanım
- Yüksek sürünme ve aşınma direnci
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği
- Termal şoklara karşı düşük hassasiyet
- Yüzey kusurlarına karşı düşük hassasiyet
- Mukavemet/yoğunluk oranının yüksek olması
- Yüksek şekil verilebilirlik
- Yüksek boyutsal kararlılık

olarak sıralanabilir (Bülbül, 2020; Şenel, 2018).

Metal matrisli kompozitlerin avantajlarının yanında bu malzemelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıda maddeler halinde ifade edilmiştir:

- Üretim maliyetlerinin yüksek olması

- Üretim zorlukları
- Düşük sünekliğe sahip olmalarıdır (Ekici, 2012).

Metal matrisli kompozitlerin çok çeşitli uygulama alanları mevcut olup metal matrisli kompozitler ve endüstriyel alanda kullanımı giderek artmaktadır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları (Mindivan, 2007)

Matris malzemesi	Takviye malzemesi	Uygulama alanı
Al Mg Pb Cu	Grafit	Uzay ve uydu parçaları Elektronik kontaktör ve bağlantıları
Al Mg Ti	Bor	Kompresör kanatları Anten yapıları Jet motoru fan kanatları
Al Ti	SiC kaplı bor	Fan kanatları
Al Pb Mg	Alümina	Süper iletken özelliğe sahip durdurucular Akümülatör ve helikopter parçaları
Al Ti Kobalt esaslı süper alaşım	SiC	Yüksek ısıda kullanılan motor parçaları
Süper alaşım	Molibden W	Yüksek ısıda kullanılan motor parçaları

3.4.1. Kullanılan matris malzemeleri

Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi sırasında; titanyum (Ti), magnezyum (Mg), bakır (Cu), alüminyum (Al) ve alaşımları ana malzeme olarak tercih edilmektedir (Kalemtaş, 2014).

3.4.1.1. Titanyum ve Alaşımları

Titanyum ve alaşımları, metal matrisli kompozitlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Titanyumun diğer metallere göre, ısı genleşme katsayısının düşük olması, ergime sıcaklığının, oksidasyon direncinin ve korozyon dayanımının yüksek olması sebebiyle havacılık ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra biyouyumlu olmasından dolayı sağlık sektöründe implant malzemesi olarak da tercih edilmektedir. Titanyum maliyetinin yüksek olması en önemli dezavantajdır (Bülbül,

2020).

3.4.1.2. Magnezyum ve Alaşımları

Magnezyum ve alaşımlarını matris malzemesi olarak öne çıkaran özellikleri; düşük yoğunluğa ($\sim 1.74 \text{ g/cm}^3$), yüksek mukavemete, yüksek ısı iletkenliğe, yüksek özgül dayanıma sahip olması, ergime sıcaklığının düşük olması, dökülebilir olması, yüksek kaynak edilebilirlik kabiliyetine ve yüksek sönümlleme kabiliyetine sahip olmasıdır. Bu özellikleri nedeniyle uzay uygulamalarında, cep telefonu ve kamera imalatında, yüksek hızlı trenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnezyum ve alaşımlarının üstün özelliklerinin yanında oksijenle çok kolay temas kurması, elastisite modülü ile yorulma dayanımının düşük olması, yüksek sıcaklık şartlarında sürünme dayanımının düşük olması gibi dezavantajları da söz konusudur (Kalaycıoğlu, 2010; Bülbül, 2020)

3.4.1.3. Bakır ve Alaşımları

Bakır ve alaşımlarının, yüksek korozyon direnci, yüksek elektrik iletkenliği, iyi çekme dayanımı, kontrol edilebilen tavlama ve lehimleme özellikleri nedeniyle matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Genel olarak otomotiv endüstrisi, uçak parçaları, vagon üretimi ve çekici tekerleklerinde tercih edilmektedir (Boag vd., 2009; Eker, 2008).

3.4.1.4. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyumun düşük yoğunluğa sahip olması ($\sim 2.70 \text{ g/cm}^3$), yüksek korozyon direnci, yüksek ısı iletkenliği, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek plastik deformasyon kabiliyeti, kolay işlenebilirliği ve kolay ulaşılabilirliği nedeniyle tercih edilmektedir (Kalaycıoğlu, 2010). Üretim yöntemleri esas alınarak alüminyum alaşımları döküm ve dövme olarak iki gruba ayrılabilir. Alüminyum alaşımları için Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından belirlenen dört rakamlı sistem dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sisteme göre dört rakamdan oluşan sayısal simgede ilk iki rakam, temel alaşım elementini belirtmektedir.

- 1xxx: Temel alaşım elementleri olarak silisyum (Si) ve demir (Fe) kullanılmaktadır. Alüminyum miktarı %99,33 ile saf alüminyuma çok yakındır. Deformasyon ile sertleşebilen alaşımlar grubunda yer almaktadır. Saf alüminyuma yakın olması sebebiyle, korozyon dayanımının, deformasyon

kabiliyetinin ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması istenilen durumlarda tercih edilir. Levha olarak bina yüzey kaplamaları, alüminyum folyolarda ve mutfak evyelerinde kullanılmaktadır.

- 2xxx: Temel alaşım elementi bakır (Cu) olmakla birlikte bazı alaşımlarda magnezyum (Mg) ve mangan (Mn) da alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Bu tür alaşımlar, ısıtım işlemi ile sertleşebilirler. Geniş sıcaklık aralığında yüksek mukavemet ve yüksek performans gösteren, işlenebilirliği mükemmel denilebilecek seviyede olan, düşük korozyon direncine ve düşük kaynak edilme kabiliyetine sahip alaşımlardır. Uçak gövdelerinde, cıvata ve perçin gibi birleştirilen parçalarda, tır, kamyon, traktör gibi yük taşıyan araçların gövdelerinde kullanılmaktadır.
- 3xxx: Manganın yanı sıra Cu ve Mg alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Yüksek şekil verilebilirlik, yüksek korozyon direnci ve orta düzey denilebilecek mukavemete sahip alaşımlardır. Kaynak ve lehimlemeye uygun olması sebebiyle; depo tankı, mutfak eşyaları, ısı değiştiriciler, radyatörler gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 4xxx: Silisyumun temel alaşım malzemesi olarak kullanıldığı bu alaşım grubu ısıtım işlemi ile sertleşebilir. Bu alaşım, kolay şekillendirilebilme, yüksek dayanım ve birtakım operasyonların (kaynak, sert lehimleme) kolaylığı nedeniyle pek çok sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Dövme uçak pistonları, giydirme levhaları gibi alanlarda kullanılmaktadır.
- 5xxx: Magnezyum ana alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Deformasyon sertleşmesi, yüksek korozyon dayanımı, tokluk ve kaynak edilebilirlik özelliklerine sahip alaşımlardır. Bu özellikleri sebebiyle inşaat sektöründe; binalarda, iskelelerde ve mimari yapılarda; ulaşım sektöründe tren, gemi ve otomobil uygulamalarında kullanılmaktadır.
- 6xxx: Magnezyum ve silisyum temel alaşım elementi olarak bulunmaktadır. Bu alaşım serisinin en önemli özelliklerinden biri ısıtım işlemi ile sertleşebilme kabiliyetinin olmasıdır. Bunun yanında yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, mükemmel şekil alabilirliği, kaynak edilme özellikleri sebebiyle bu tür alaşımlar tercih edilmektedir. Otomobiller, trenler, gemiler, mimari yapı

malzemeleri, akıllı cep telefonları ve yeni nesil LCD televizyon çerçevelerinde kullanılmaktadır.

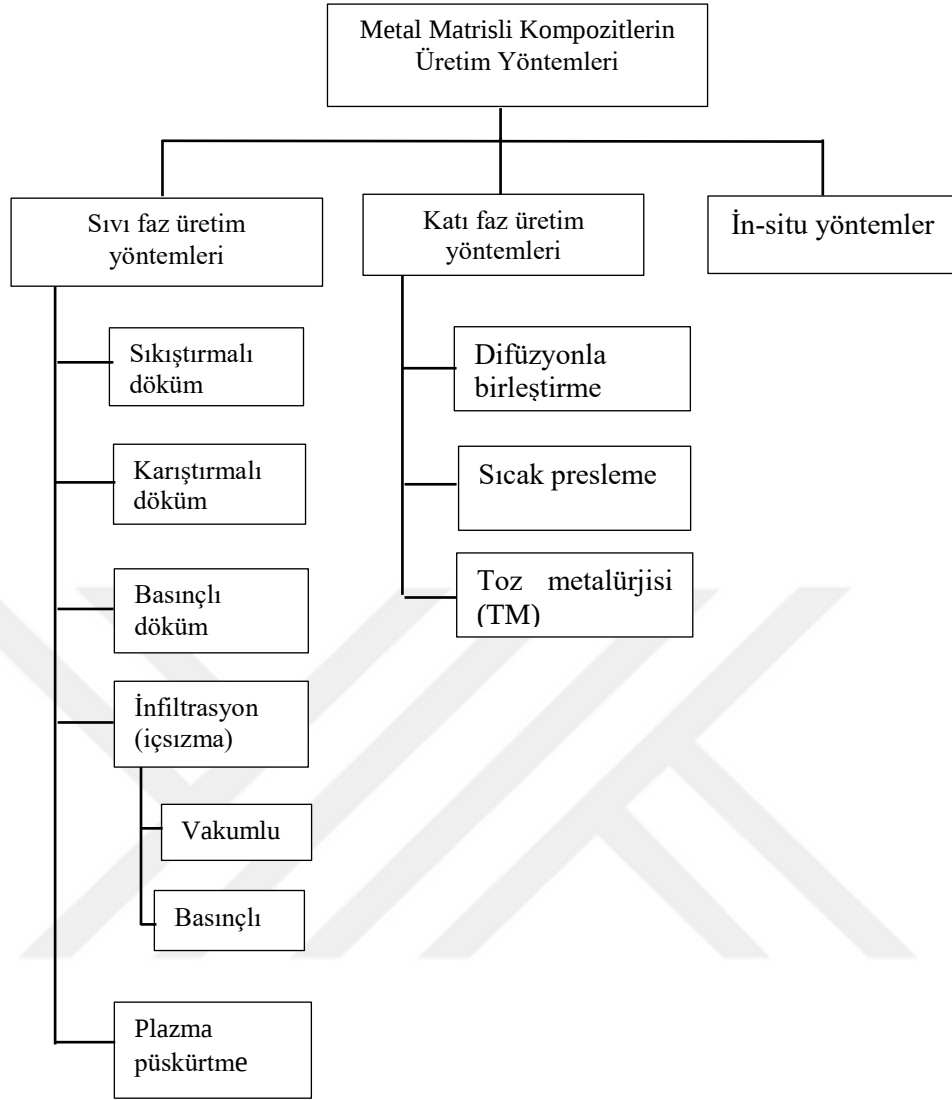
- 7xxx: Temel alaşım elementi Zn ve Mg olup yapısında Cu, Zr, Mn ve Ag gibi elementler de bulunmaktadır. Bu tür alaşımlar, yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Çekme dayanımı 500 MPa'ın üstünde olan alaşımlar, uçak yapısal bileşenleri ve diğer yüksek mukavemetli uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 8xxx: Yapısını oluşturan Fe, Si, Cu, Mn ve Li gibi elementlerle zenginleştirilmiştir. Isıl işlem ile sertleştirilen alaşımlar; mil yatağı, rulman vb. uygulamalarda tercih edilmektedir (Keleş, 2021).

3.4.2. Kullanılan takviye malzemeleri

Metal matrisli kompozitin istenilen özelliklerde elde edilebilmesi için takviye elemanının seçimi önemlidir. MMK malzemelerin üretiminde kullanılan takviye elemanları; partiküller, whiskersler, kısa ve sürekli elyaflar olarak sıralanabilir. Seramik veya karbon esaslı takviye elemanları metal matrisli kompozit yapılarda çok sık tercih edilmektedir. Bunlar; grafen, karbon nanotüp, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür (B_4C), silisyum nitrür (Si_3N_4) ve bor nitrür (BN) olarak sıralanabilir (Ekici, 2012).

3.5. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Günümüzde hemen her alanda yaşanan teknolojik gelişmelerin yanında ekonomik ve çevresel kaygılarında bunlara eklenmesiyle yeni malzemelere ihtiyacı daha çok artırmıştır. Bu ihtiyacı karşılayabilecek en önemli malzemeler metal matrisli kompozitler olarak görülmektedir. Kompozit üretim yöntemleri, klasik malzeme üretim yöntemleri ile kıyaslandığında; matris ve katkı elemanı arasındaki etkileşimler nedeniyle kompleks üretim gereksinimleri ve son ürün maliyetinin yüksek olması önemli dezavantajlarıdır. MMK malzemenin üretim yöntemi; imal edilecek parçanın geometrisine, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matris ile katkı elemanının özelliklerine göre belirlenir (Pul, 2010). MMK malzemeleri üretmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Şekil 3.2'de MMK'lerin üretim yöntemleri gösterilmiştir.



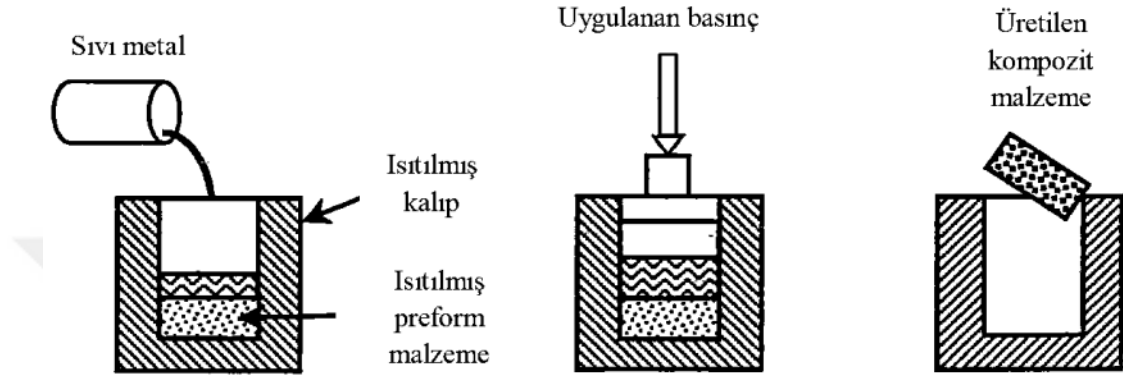
Şekil 3.2. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri (Pul, 2010).

3.5.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Bu yöntemde, takviye malzemesi ergitilmiş matris malzemesine ilave edilir. Sıvı faz üretim yöntemleri, ekonomik ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında bu yöntemlerin dezavantajları; matris malzemesinin takviye partiküllerini yeterli ıslatamaması, topaklanma, parçacık kırılması, istenmeyen fazların oluşması olarak sıralanabilir (Pul, 2010).

3.5.1.1. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

Sıkıştırılmalı döküm yönteminde; ısıtılmış kalıp içerisine ön şekil verilmiş ve ısıtılmış takviye malzemesi yerleştirilerek ergimiş matris malzemesi eklenip katılaşma olana kadar basınç uygulanır. Ön şekillendirmeyi etkilememek için uygulanan basınç düşük tutulur. Fiber ve parçacık takviyeli kompozitlerin üretimde kullanılan bir yöntemdir.

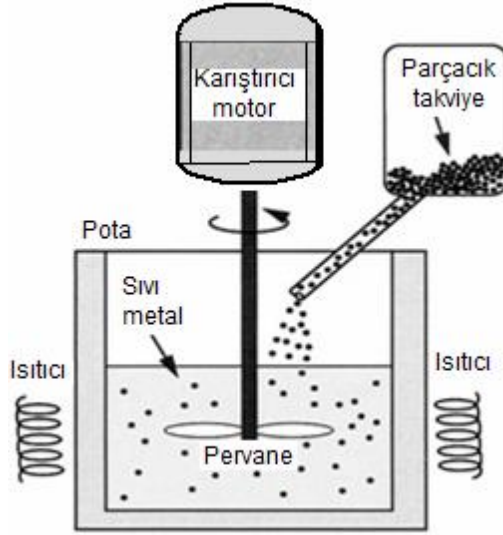


Şekil 3.3. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi üretim aşamaları (Pul, 2010)

Bu yöntemde, 70-100 MPa basınçların uygulanması ve katılaşma süresinin çok kısa tutulması nedeniyle, matris ile takviye malzemesi ara yüzeyinde reaksiyon meydana gelmez. Bu nedenle de boşluksuz ve yüksek dayanımlı kompozit malzemeler üretilir. Sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kalitesini etkileyen parametreler; kalıp ön ısı, takviyeler arası boşluk, uygulanan basınç düzeyi ve sıkıştırma hızıdır (Şenel, 2018).

3.5.1.2. Karıştırılmalı Döküm Yöntemi

Karıştırılmalı döküm yönteminde, yer çekimi etkisiyle çökmemesi için ön ısıtma yapılmış takviye malzemesi, sıvı metal matris alaşımına karıştırılarak ilave edilir (Şekil 3.4). Karıştırma işlemi homojen karışım elde edilene kadar devam ettirilir ve daha sonra elde edilen karışım kalıplara dökülerek soğumaya bırakılır.

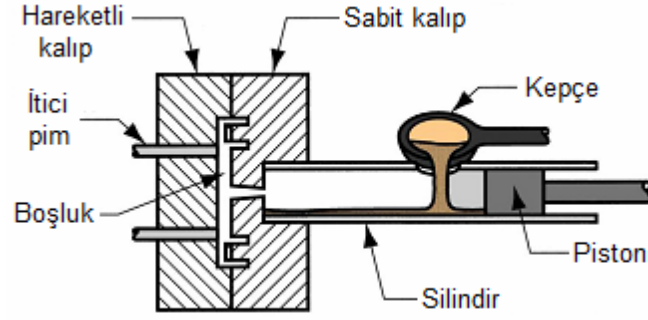


Şekil 3.4. Karıştırmalı döküm yöntemi (Pul, 2010)

Homojen bir yapı elde edilebilen ucuz ve kolay bir yöntemdir. Ancak takviye malzemesinin karıştırma esnasında hasar görebilme olasılığı, çökelme, istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşabilmesi, topaklanma ve gözenek oluşumu bu yöntemde karşılan belli başlı problemlerdir.

3.5.1.3. Basınçlı Döküm Yöntemi

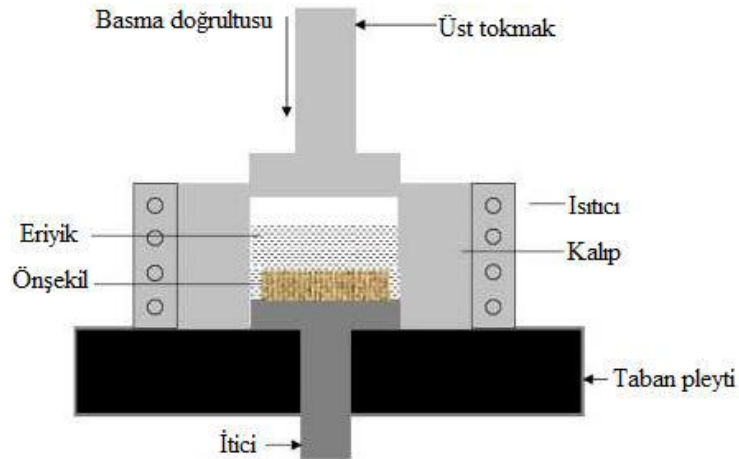
Basınçlı döküm yönteminde uygulanan basıncın sıkıştırırmalı döküm yöntemine göre daha düşük olması dışında birbirine benzer yöntemlerdir. Bu yöntemde, piston vasıtasıyla uygulanan basınçla sıvı metalin kalıp içerisinde hızla dolması sağlanır (Şekil 3.5). Katılaşma tamamlanıncaya kadar basınç uygulanmaya devam edilir. Basınçlı döküm yöntemiyle, ergime sıcaklığı 1000 °C'nin altında olan büyük ebatlı ve karışık şekilli parçalar üretilebilmektedir. Bu yöntemle üretilen parçalarda talaşlı imalat gereksinimi azdır. Magnezyum, kurşun, kalay, çinko ve alüminyum alaşımları basınçlı döküm yönteminde sıklıkla kullanılmaktadır (Pul, 2010).



Şekil 3.5. Basınçlı döküm yöntemi (Vural, 2007)

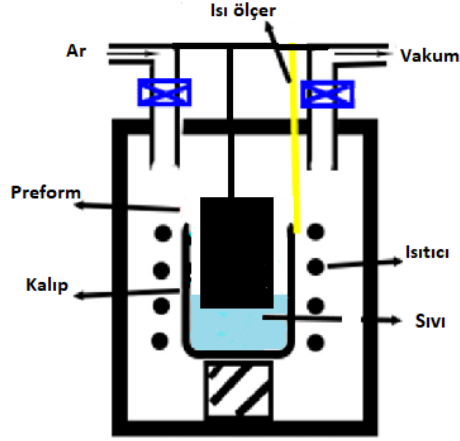
3.5.1.4. İnfiltrasyon (iç sızma) Yöntemi

Sıvı faz üretim yöntemlerinden biri olan infiltrasyon yöntemi (iç sızma) MMK'lerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.6). Bu yöntem basınçlı, basınçsız ve vakumlu olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmaktadır. Özellikle Al ve Mg esaslı kompozitler bu yöntemle üretilmektedir. Bu yöntemde matris malzemesini oluşturan sıvı metal, kalıp içerisine konulmuş ince parçacıklardan oluşan takviye malzemesine emdirilir. Bu işlem basınç, vakum veya normal atmosfer basıncında uygulanabilmektedir. Emdirme işlemiyle matris ve takviye malzemesi arasında bağ oluşturulur. Uygun şartların yakalanması durumunda üstün mekanik özelliklere sahip metal matrisli kompozitler üretilabilmektedir (Pul, 2010).



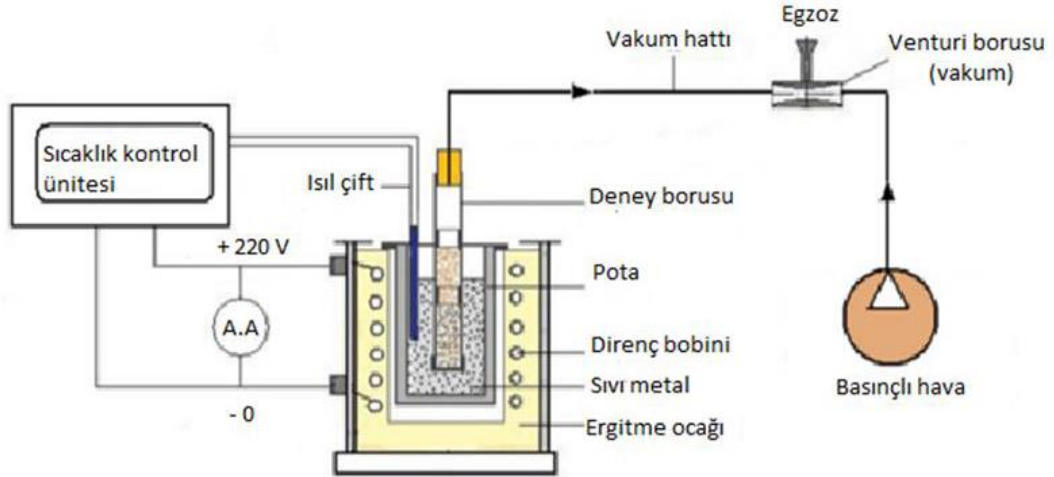
Şekil 3.6. İnfiltrasyon yöntemi (Kim vd, 2013)

Basınçlı infiltrasyon yöntemi, ön şekil verilmiş gözenekli takviye elemanına ergiyik metalin koruyucu bir gaz yardımıyla infiltre edildiği yöntemdir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Basınçlı infiltrasyon yöntemi (Kısasöz, 2018)

Vakum infiltrasyon yönteminde, basınç uygulama işlemi bir gaz yardımıyla ya da mekanik olarak uygulanabilmektedir (Şekil 3.8). Takviye hacim oranı, parçacık boyutu, vakum değeri, infiltrasyon sıcaklığı ve infiltrasyon süresi infiltrasyonda önemli parametrelerdir. İnfiltrasyon sürecinde vakum altında çalışılmasının eriyik metalin seramik pelete infiltrasyonuna yardımcı olduğu bilinmektedir. Ayrıca vakum ortamında infiltrasyon sürecinde sıvı metalin oksitlenmesinin engellendiği ve üretilecek kompozit yapıda gaz veya hava kalması sebebiyle gözeneklerin oluşmasının önlenildiği bildirilmektedir (Kısasöz, 2018).

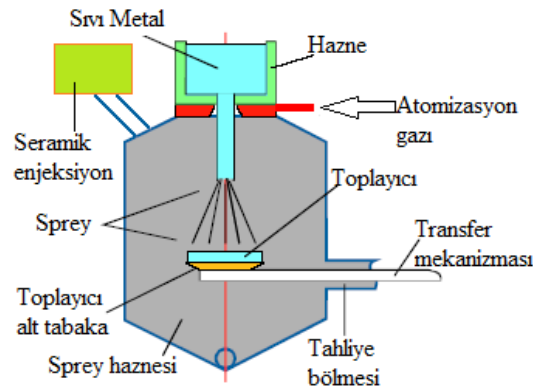


Şekil 3.8. Vakum infiltrasyon yöntemi (Kısasöz, 2018)

3.5.1.5. Plazma Püskürtme Yöntemi

Bu yöntemde, atomize edilmiş eriyik metalin katkı malzemesinin yüzeyine istenilen kalınlıkta püskürtülmesidir. Püskürtülen sıvı metal, takviye malzemesine yapışmaktadır. Matrisin hızlı katılaşmasıyla meydana gelen mukavemetteki artış ve matris-katkı malzemesi arasındaki reaksiyon süresinin kısılması bu yöntemin önemli avantajlarından (Demir, 2022)

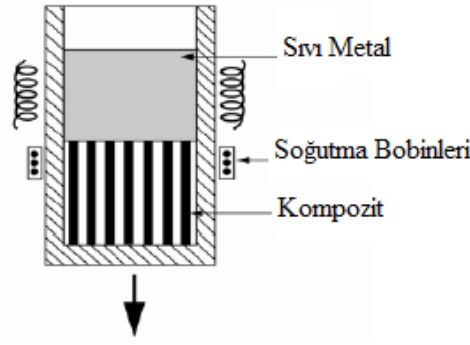
Üretim esnasında ergimiş metal zerreciklerinin takviye elemanına temas eder etmez katılaşması sorunu ve takviye-matris arasında oluşan ara yüzey reaksiyon problemleri bu üretim yöntemiyle en aza indirgenmektedir. Bu yöntem, genellikle ergime sıcaklığı düşük olan alüminyum gibi metallerde, parçacık ve sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimi sırasında kullanılmaktadır (Salamci, 2004). Şekil 3.9’da plazma püskürtme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.9. Plazma püskürtme yöntemi (Apelian vd, 1988)

3.5.2. İn-Situ Yöntemleri

İn-situ tekniği, takviye elemanlarının sıvı veya katı matris içerisinde kimyasal yöntemlerle elde edilmesidir. Bu yöntemle üretilen kompozitlerde genellikle nikel, kobalt ve alüminyum esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Fazla işlem gerektirmeden elde edilen kompozitlerin yapısı oldukça kararlıdır (Akdoğan, 2005). Şekil 3.10’da bir ötektik alaşımın tek yönlü katılaşmasının kontrollü bir şekilde gerçekleşmesiyle geliştirilmiş in-situ tekniği gösterilmiştir.



Şekil 3.10. İn-situ tekniği (Bilir, 2014)

3.5.3. Katı Faz Üretim Yöntemleri

Katı faz üretim yöntemleri metal matrisli kompozitlerin üretimi esnasında en sık tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir. Bu yöntemde, toz haldeki matris ve takviye malzemesi karıştırılır, preslenir ve sinterlenir (Çalışkan, 2019). Katı faz üretim yöntemiyle, sıvı faz üretim yöntemlerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi mümkündür. Bu yöntem ile üretilen kompozitlerin maliyetleri diğer yöntemlerden fazla olmaktadır. Katı faz üretim yöntemleri arasında en yaygın kullanılanları; difüzyon bağı yöntemi ile toz metalürjisi (TM) yöntemidir.

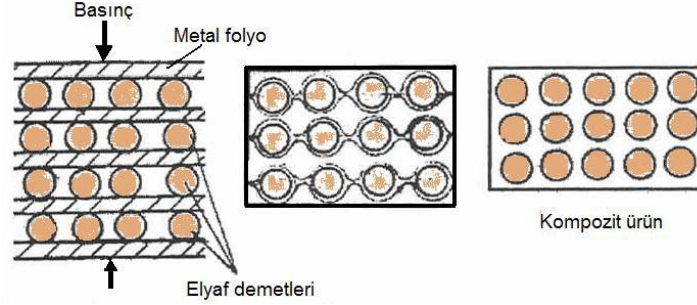
3.5.3.1. Difüzyonla Birleştirme Yöntemi

Difüzyonla birleştirme yönteminde, matris ve takviye malzemesi ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta preslenir veya haddelenir. Matris malzemeler yaprak veya levha şeklinde, takviye elemanları fiber veya levha şeklindedir. Etkili difüzyonla birleşme sağlanabilmesi için matris ve takviye elemanlarının yüzeyinin düzgün ve temiz olması büyük önem taşımaktadır. Kullanılan matris malzemeleri Ti ve Al alaşımları, takviye elemanları ise Al_2O_3 , SiC, C ve B gibi fiberlerdir. Bu yöntemle MMK'ler istenilen biçimde üretilebilir. Bu yöntemin dezavantajı üretim maliyetinin yüksek olmasıdır (Şenel, 2018).

3.5.3.2. Sıcak Haddeleme Yöntemi

Bu yöntemde de difüzyon yöntemine benzer olarak levha halindeki matrisler arasına yerleştirilen fiber takviyeler yüksek sıcaklıkta haddelenir (Şekil 3.11). Termal gerilmeleri azaltmak için komple yapı hızla soğutulmaz, normal hava şartlarında soğumaya bırakılır. Sıcak haddeleme yöntemi, katı ve sıvı faz yöntemleriyle

kıyaslandığında daha ekonomiktir ancak bu yöntemle karmaşık şekilli parçalar üretilmemektedir. Sıcak haddeleme yönteminde takviye elemanları süreksiz olarak kullanılabilir (Pul, 2010).



Şekil 3.11. Sıcak haddeleme yöntemi (Pul, 2010)

3.5.3.3. Toz Metalürjisi Yöntemi

Metal matrisli kompozit malzemelerin katı hal üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi yönteminde, karıştırılmış metal tozları oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda, üretilcek parça şekli ve boyutlarına sahip kalıp içinde preslenerek şekillendirilir. Preslenen yapı belirli bir sıcaklıkta istenen özelliklerin elde edilebilmesi için sinterlenir. Bu yöntem, tozların mekanik olarak karıştırılması, karıştırılan tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemlerden (haddeleme, ekstrüzyon, yağ emdirme, çapak alma, vb.) oluşur.

4. TOZ METALÜRJİSİ

4.1. Tanımı ve Tarihçesi

Metal matrisli kompozit malzemelerin katı hal üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi (TM) yönteminde, karıştırılmış metal tozları oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda, üretilecek parça şekli ve boyutlarına sahip kalıp içinde preslenerek şekillendirilir. Preslenen yapı istenen özelliklerin elde edilebilmesi için belirli bir sıcaklıkta ve sürede sinterlenir. Bu yöntem, tozların karıştırılması, preslenmesi, sinterlenmesi ve ikincil işlemlerden (ekstrüzyon, haddeleme vb.) oluşur (Kırsasöz, 2018).

Tozlardan metal parçalarının elde edilmesi ilk olarak İnkâ medeniyeti döneminde ve mücevher üretimiyle başlamıştır. Tarihi kaynaklara göre M.Ö. 3000 yıllarında Mısırlılar demir tozunu kullanmışlardır. Ticari olarak ilk gelişmeler, elektrik ampüllerinde kullanılan filament üretimiyle olmuştur. Coolidge 1910'da, preslenmiş tungsten tozunu yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak sinterledikten sonra tokluğunun artmasıyla birlikte tel şekline gelen malzemenin daha düşük ısılarda çalışması mümkün olmuştur. Günümüzde halen kullanılan bir uygulamadır. 1920'li yıllarda gözenekli yapısıyla kendinden yağlama özelliğine sahip bronz yataklar üretilmiştir. 1930'lu yıllarda sıvı faz yöntemi kullanılmıştır. İkinci Dünya Savaşı döneminde ise havacılık uygulamalarında TM yöntemi kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda toz birleştirme yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. 1980'li yıllarda ise toz üretim yöntemleri ortaya çıkmıştır (Söyler, 2007).

4.2. Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalürjisi bazı avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Yüksek sertlik, dayanım, yoğunluk gibi iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin daha ekonomik ve daha kaliteli bir biçimde üretilmesi
- Üretim sırasında malzemelerin yaklaşık %99'u kullanılarak malzeme israfının önlenmesi
- Yüksek geometrik doğruluğa ve iyi yüzey kalitesi sahip ürün elde edilebilmesi
- Diğer üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor kontrollü gözenekli ve geçirgen yapı üretilmesi

- Daha az enerji gereksinimiyle yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin üretimi
- Yoğunluk, ergime noktası ve fiziksel farklılıkları olan malzemelerden karışımlar elde edilebilmesi
- Takviye hacim oranının yüksek olması yüksek elastisite modülü ve düşük termal genleşme katsayılı kompozit malzeme üretimine olanak sağlamasıdır (Şenel, 2018; Bülbül, 2020).

Toz metalürjisinin bazı dezavantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Özellikle yüksek dayanım istenen malzemelerde, ikincil işlem uygulanmadığında hedeflenen mekanik özelliklerin elde edilememesi
- İlk yatırım maliyetinin yüksek olması
- Metal tozların maliyetinin yüksek olması
- Üretilebilecek parça boyunun sınırlı olması
- Üretilen parça kesiti boyunca özelliklerin değişkenlik gösterebilmesi
- Toz üretimi, yabancı maddelerden uzak ve temiz bir ortamda yapılması gereklidir. Aksi takdirde herhangi bir atık madde, malzeme içerisine nüfuz ederek malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir.
- Parçacıklar toplanabilir ve parçacıklar arasında sürtünme meydana gelebilir.
- Ortam kirliliğine sebep olabilir (Şenel, 2018; Bülbül, 2020).

4.3. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri

Ortalama boyutu 1-200 μm 'ye kadar olan tanecikler toz olarak tanımlanır. Hemen her malzeme toz haline getirilebilir. Pek çok toz üretim yöntemi olmasına karşın yöntem seçiminde, istenen özellikler ve maliyet en önemli iki kriterdir. Seçilen yöntemle göre tozun morfolojisi (küresel, dendritik vb.) ve yüzey durumu değişiklik gösterir. Tozun boyutu, tanecik şekli ve yüzey durumu parça üretimi açısından önemli hususlardır. En çok kullanılan toz üretim yöntemleri:

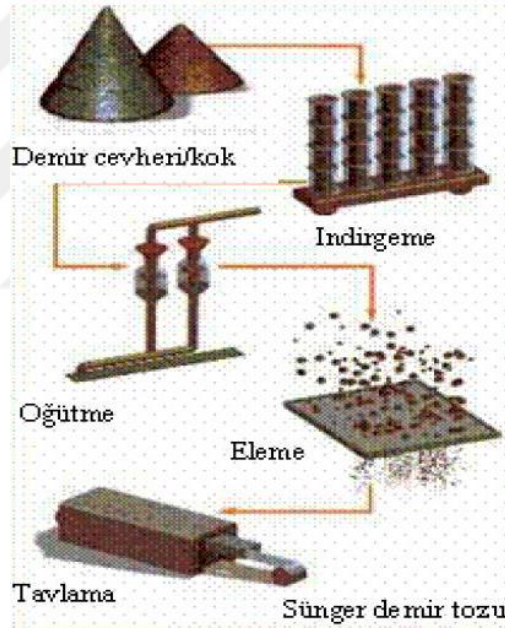
- Kimyasal üretim yöntemleri
- Elektrolizle üretim yöntemleri
- Mekanik üretim yöntemleri
- Atomizasyon teknikleri

olarak sıralanabilir (Şenel, 2018).

4.3.1. Kimyasal Üretim Yöntemleri

Metal tozların kimyasal yöntemle üretimi, metal oksitlerin (bakır, demir, tungsten, nikel, molibden ve kobalt), karbon monoksit (CO) veya hidrojen (H₂) gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesidir.

Sünger-demir tozu bu yöntemin önemli uygulama örneklerinden biridir. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilir. Kireç taşıyla, kok ve magnetit (Fe₃O₄) karıştırılır ve seramik kaplara doldurulur. Hazırlanan karışım, seramik kaplar içerisinde 1260°C sıcaklıkta ve 68 saat süresince fırınlanır. Şekil 4.1’de kimyasal yöntemle demir tozu üretiminin aşamaları verilmiştir. Son aşamada sünger demir tozu, H₂ gazı altında 870°C’de tavllanır ve elenir (Nazik, 2013).

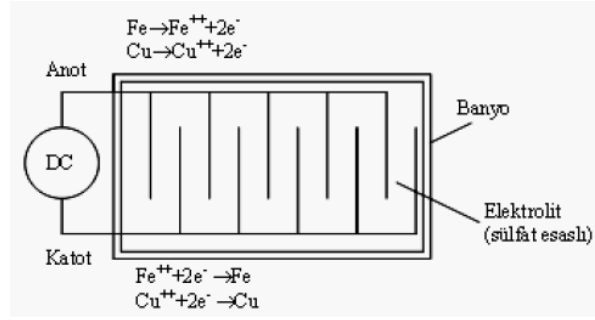


Şekil 4.1. Demir tozunun kimyasal yöntemle üretim aşamaları (Nazik, 2013)

4.3.2. Elektrolizle Üretim Yöntemleri

Bu yöntemde, çözelti içerisine yerleştirilmiş iki elektrot (anot ve katot) arasında elektrik akımı uygulanır. Elektrik akımının etkisiyle pozitif yüklü metal iyonları katoda doğru hareket ederek çöker (Şekil 4.2). Elde edilen birikinti önce yıkanır ve kurutulur ardından öğütülerek toz elde edilir. Ayrıca uçucu maddelerin ve gerilmelerin

giderilmesi için tavlama yapılır (Nazik, 2013; Bülbül, 2020).

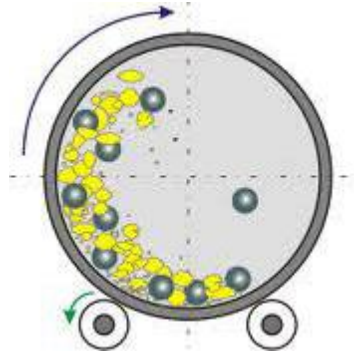


Şekil 4.2. Elektrolizle toz üretim yöntemi (Bülbül, 2020)

Yüksek maliyetli bir yöntem olduğundan genellikle yüksek saflıktaki tozların üretilmesinde tercih edilir. Alaşım tozlarının bu yöntemle üretimi mümkün değildir. Genellikle elde edilen tozlar süngerimsi veya dendritik şekle sahiptir. İşlemin gerçekleştirildiği çözeltinin şartları toz özelliklerini belirlemektedir (Şenel, 2018).

4.3.3. Mekanik Üretim Yöntemleri

Mekanik üretim yöntemi; malzemelerin bilyalı öğütücülerde çarpılarak öğütülmesi prensibine dayanır (Şekil 4.3). Bu yöntem kırılğan ve gevrek malzemeler için uygun olup, sünek davranış gösteren malzemeler için uygun değildir. Bunun nedeni sünek malzemelerin kırılmayarak birbiri üzerine sıvanmasıdır (Özer, 2019; Şenel, 2018).



Şekil 4.3. Tozların bilyalı öğütme cihazıyla üretimi (Şenel, 2018)

4.3.4. Atomizasyon Yöntemleri

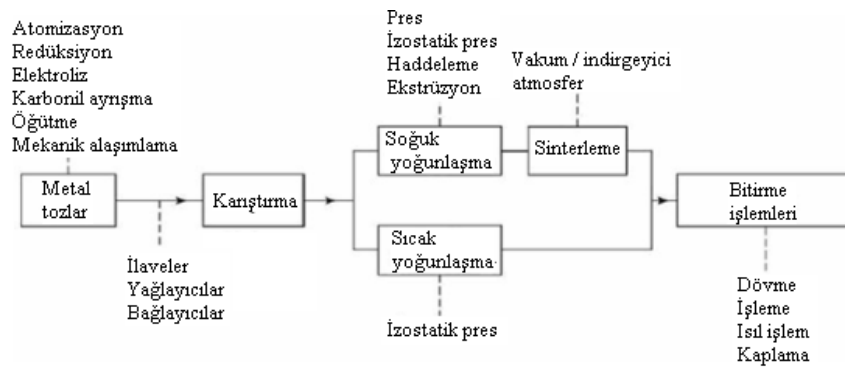
Atomizasyon yönteminde, çok ince şeritler halinde akıtılan sıvı metalin üzerine nozuldan püskürtülen basınçlı gaz veya sıvı yardımıyla küçük parçacıklara ayrılması ve bu parçacıkların ani soğutulması prensibine dayanır (Şekil 4.4). Bu yöntemde, sıvı metal dağılmış ve kararsız hale gelene kadar parçalanır. Atomizasyon yöntemi ergitilebilen ve ergime noktası düşük olan metallerden toz üretiminde tercih edilen bir yöntemdir (Söyler, 2007; Üstün, 2022).



Şekil 4.4. Tozların atomizasyon yöntemiyle üretimi (Ayata, 2014)

4.4. Toz Metalürjisi Yönteminin Üretim Aşamaları

Demir esaslı seri üretim parçalarının geleneksel yöntemlerle üretimine alternatif olarak toz metalürjisi yöntemi geliştirilmiş ve son yıllarda kullanımı büyük bir gelişme kaydetmiştir. Toz metalürjisi, metalürjinin metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle yapılan ürünlerin imalatı ile ilgili bölümüdür. Genel akış açısından basit seviye bir üretim teknolojisi gibi görünen bu yöntem, özünde birçok parametrik ilişkiler barındırmakta olup ürünün mikro yapı üzerinden mekanik ve fiziksel-kimyasal özelliklerine doğrudan kuvvetli bir etkisi vardır. Şekil 4.5 temel metalik toz işleme teknolojisinin üretim kademelerini göstermektedir (Ekici, 2012).



Şekil 4.5. Metalik toz işleme akış şeması (Ekici, 2012)

Toz metalürjisi yönteminde tozların geleneksel üretim yöntemi 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar:

- Tozların karıştırılması ve harmanlanması
- Tozların preslenmesi
- Sinterleme

işlemleridir.

4.4.1. Tozların Karıştırılması ve Harmanlanması

Karıştırma farklı bileşime sahip tozlara, harmanlama ise farklı boyutta aynı bileşime sahip tozlara uygulanan işlemlerdir. Tozların harmanlanması ve karıştırılması ile homojen bir karışım elde edilmesi, taneciklerin boyutlarının istenilen boyuta getirilmesi ve sinterleme sırasında yeni alaşımların oluşturulması sağlanmaktadır (German, 2007).

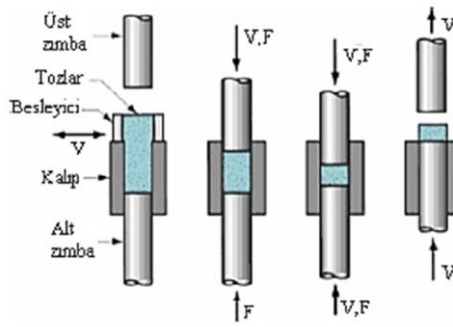
Karıştırma işleminde, karıştırıcının doluluk oranı ve karıştırma hızı önemli parametrelerdir. Karıştırıcının içerisi tozla dolduruldukça tozların göreceli (izafi) hareketliliği engellenir. Bu nedenle karıştırıcı haznesinin toz hacmi olarak %20'sinin veya %40'ının kullanımı genelde uygun olarak kabul edilir. Silindirik karıştırıcının dönme hızı düşük olursa, yeterli karışımın elde edilme süresini uzatabilir. Fazla miktarda serbest düşüş yapan tozlar tercihi boyut yerleşmesine neden olarak aşınmaya etki edebilir. Yüksek karıştırma hızı ise toza merkezkaç kuvveti vererek toz akışını engelleyebilir. İstenilen dönme hızı yer çekimi ile merkezkaç kuvvetlerini dengeleyen bir hızdır. N_0 dakikadaki dönme sayısı, d haznenin metre olarak dış yay çapı olmak üzere bir karıştırıcı için en uygun dönme hızı Eşitlik 4.1 ile hesaplanabilir (German, 2007).

$$N_0 = 32 / \sqrt{d} \quad (4.1)$$

Karıştırma sürecinin tasarımında yapılacak hatalar, parçacık ayrışmasına neden olabilir. Bu da büyük gözenekli yapının oluşmasına sebep olabilir. Yüksek hızda karıştırma, toz tanelerinde plastik deformasyon meydana gelmesine neden olabilir (Ayata, 2014). Harmanlama ve karıştırma işlemindeki önemli parametreler; karıştırıcı tipi, parçacık boyutu, karıştırma hızı, karıştırıcı içindeki tozun hacmidir. Bunlara ek olarak çevresel faktörler de karıştırma verimliliğini etkiler (German, 2007).

4.4.2. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırma)

Presleme (sıkıştırma) işlemi, karıştırılan tozlara istenilen şeklin verilebilmesi için tozların kalıp içerisinde alt ve üst zımbalar kanalıyla sıkıştırılmasıdır. Bu işlem tozlara en yaygın şekillendirme ve yoğunluk kazandırma yöntemidir (Şekil 4.6). Tozlar kalıba doldurulma sırasında sadece yer çekimi etkisi altında serbest, düzensiz ve gelişigüzel yığılırlar (Çelebi, 2016). Basınç uygulandıkça parçacıklar yerleşir, şekil değiştirir ve bağ oluştururlar. Yoğunluk artması düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artarak direnç gösterir. Tozun yapısına ve kalıba bağlı olarak 1000 MPa'a kadar basınç uygulanabilir.



Şekil 4.6. İki eksenli presleme işleminin aşamaları (Tabonah, 2019)

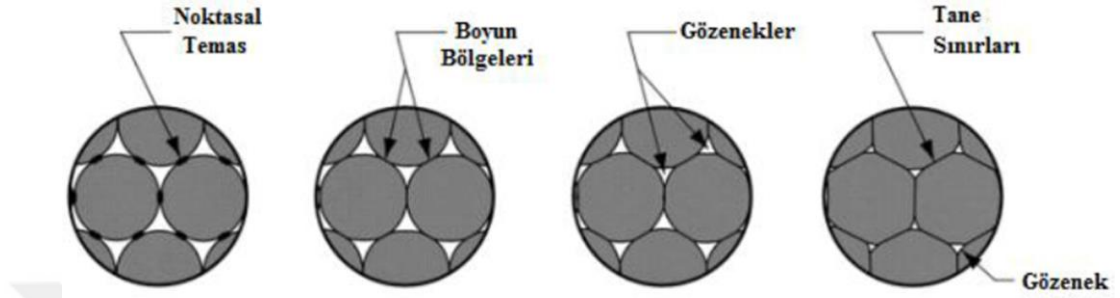
Kalıpla sıkıştırmada en önemli zorluklardan biri kalıp yüzeyinde oluşan sürtünmedir. Bu sürtünme, hem parçanın kolay çıkartılmasını engellediği gibi aynı zamanda yoğunluk farklılıklarının oluşmasına sebep olur. Zımbanın toza karşı olan hareketi kar küremeye benzer. Zımbaya yakın olan yerler yoğundur ancak uzaktaki tozlar etkilenmemiştir. Bu mesafeye bağlı basınç sönümünün sebebi tozun kuvveti kalıp çeperlerine sürtünme olarak yaymasıdır. Basınç hem yoğunluğu belirlediği için basınç farklılıkları yoğunluk farklılıklarını meydana getirir. Bu nedenle kalıbın temizliği ve yağlanması önem taşımaktadır.

Preslenen toz ham numune, yoğunluk ve mukavemet değerleri ise ham yoğunluk ve ham mukavemet olarak tanımlanır.

4.4.3. Sinterleme

Toz metalürjisinin önemli adımlarından biri de sinterleme işlemidir. Birbiriyle temas halindeki parçacıkların bağ oluşturmasını sağlayan bir tekniktir. Parçacıkların noktasal temasıyla başlayıp tane büyümesi ve gözeneklerin azalmasıyla tamamlanan

bir süreçtir (Şekil 4.7). Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sıvı ve katı faz sinterlemesi söz konusudur. Sıvı fazda sinterleme sıcaklığı malzemenin ergime sıcaklığının üzerindedir. Sinterleme esnasında oksitlenmeyi engellemek için çeşitli gazlar kullanılmaktadır. En çok kullanılanları Ar, H ve N gazlarıdır (Kalaycıoğlu, 2010).



Şekil 4.7. Mikroskopik ölçekte sinterleme aşamaları (Çelebi, 2016)

Malzemenin cinsi, numunenin şekli ve büyüklüğüne bağlı olarak değişik katı, sıvı ve reaksiyon olarak üç farklı sinterleme metodu söz konusudur. Ayrıca sinterleme sıcaklığı, sinterleme atmosferi ve sinterleme süresi de önemli sinterleme parametreleridir (Özkaya, 2014).

4.4.4. Bitirme İşlemleri

Sinterleme sonrası elde edilen ürünlere, istenilen bazı özelliklere kazandırmak için ek işlemler uygulanabilir. Belli başlı bitirme işlemleri:

- Yeniden presleme
- Talaşlı imalat
- Isıl işlem
- Birleştirme ve montaj
- Kaplamalar

olarak sıralanabilir (German, 2007).

a) Yeniden presleme: Büyük şekil değişiklikleri olmadan son boyutları ve yoğunluğu ayarlamak için yeniden düzenleme işlemidir. Sinterlenmiş parça, kapalı bir kalıp içine yerleştirilir ve yüksek şekil değiştirme hızlarında küçük şekil değiştirmelere tabi tutulur. Presleme basıncı ilk sıkıştırma basıncından fazladır. Yeniden sıkıştırma preslerinin çoğu 30-2500 kN (3-250 ton) aralığında ve 5-200 vuruş/dakika hızında

alışırlar (German, 2007).

b) Talaşlı imalat ve taşlama: Orijinal şekillendirmede yapılması zor olan vida açma, oyuk, yiv ve özel görünümle oluşturmak için kullanılır. Ayrıca sinterleme sonrası taşlama veya talaşlı imalat ile boyut sapması azaltılır ve yüzey kalitesi iyileştirilir. Bu yüzey düzeltme işlemleri yüksek hız, düşük ilerleme ile talaş kaldırılarak gerçekleştirilir. Yeniden preslemede ise kütle değişimi olmaksızın şekil değişimi meydana gelir (German, 2007).

c) Isıl işlem: Sinterlemeden sonra fazları, mikroyapıyı ve alaşım elementlerinin dağılımını düzenleme amaçlı yapılır. Metallerin üçte ikisi sinterlemeden sonra ısıt işleme tabi tutulur. Tavlama, karbo-nitrürleme, karbürleme, yüzey sertleştirme, nitro-karbürleme, çökelme sertleşmesi, çözündürme, buhar işlemi, gerilme giderme, menevişleme, tam sertleştirme sinterlenmiş malzemelere yaygın olarak uygulanan işlemlerdir (German, 2007).

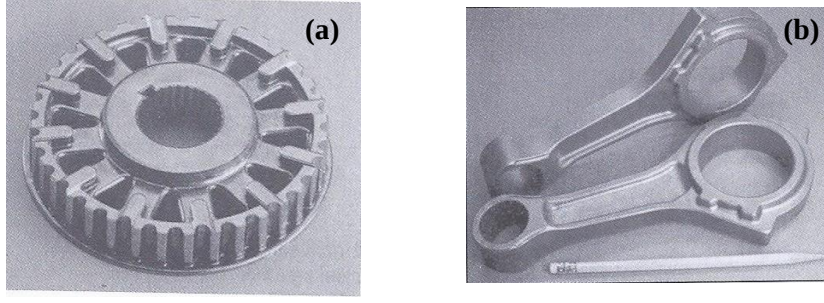
d) Birleştirme ve montaj: Sinterlenmiş parçalar ve malzemelere uygulanan birleştirme işlemleri; yapıştırma, ark kaynağı, sert lehim, yayınım (difüzyon) kaynağı, elektron ışını kaynağı, sürtünme kaynağı, lazer kaynağı, sıkı geçme, direnç kaynağı olarak sıralanabilir.

e) Kaplamalar: Sinterleme sonrası uygulanan kaplamalar aşınma ve korozyon direncini artırmak için yapılır. Kaplamalar, boyalardan sert yüzey katmanlarına kadar bir seri işlemi içerir. Kaplama teknikleri mekanik ve elektrokimyasal metotları kapsar.

4.5. Kullanım Alanları

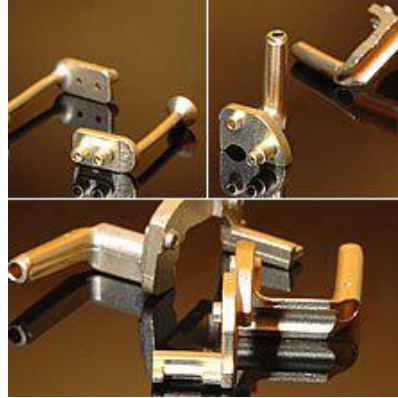
Tozların faydalı mühendislik parçalarına dönüşümü yarım asırdan beri kararlı bir şekilde genişlemekte ve günümüzde hala birçok yeni uygulamaları bulmaktadır.

Otomotiv, TM yönteminin en çok uygulandığı sektörlerden biridir. Özellikle yapısal otomotiv parçalarında, motor ve transmisyon parçalarında bu yöntem kullanılmaktadır. Şekil 4.8’de motor fonksiyonlarını yönetmek için atımlar sağlamak üzere tasarlanmış manyetik bölge içeren kasnak zamanlama parçası ve dizel motor piston kolu görülmektedir (German, 2007).



Şekil 4.8. Toz metalürjisiyle üretilmiş parçalar: kasnak zamanlama parçası (a) ve dizel motor piston kolu (b) (German, 2007)

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen malzemeler elektrik ve elektronik alanlarında da kullanılmaktadır. Yüksek ısıl iletken tozlar kullanılarak; diyot, transistör ve elektrik devreleri üretilmektedir. Ayrıca elektrik iletkenliği yüksek olan bakır ile gümüş, volfram, molibden ve nikel tozları karıştırılarak elde edilen malzemeler elektrik kontaklarında ve elektrik direnç kaynak elektronlarında kullanılmaktadır (Şekil 4.9). Alüminyum, nikel ve kobalt tozları kullanılarak ince yapılı ucuz mıknatıslar elde edilmektedir (Yalçın, 2015). Manyetik algılayıcılar ve tahrik elemanlarında da TM yöntemiyle üretilen malzemeler kullanılmaktadır. Bilgisayarlarda yarı iletkenlerden ısının uzaklaştırılması için gerekli olan yüksek ısıl iletkenliğe sahip montaj cihazlarında TM malzemeler tercih edilir (German, 2007).



Şekil 4.9. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş elektrik kontakları (Söyler, 2007)

Günümüzde yüksek hıza sahip bilgisayarlarda oluşan ısının kolaylıkla uzaklaştırılması için yüksek ısıl iletkenliğe sahip parçalar kullanılmaktadır. Bu parçaların üretiminde toz metalürjisi yöntemi öne çıkmaktadır. Toz metalürjisi yöntemiyle kontrollü gözenek içeren yapılar üretilebildiğinden sıvı gazları süzebilen metalik filtreler imal edilmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş metalik filtreler (Söyler, 2007)

Birbirinden farklı özellikteki malzemelerin örneğin; metal tozlar, reçineler ve katkı maddeleri toz haline getirilip birleştirilerek balataların ve debriyajların üretimi yapılabilmektedir. Ayrıca dar tolerans aralığına ve yüksek mukavemete sahip dişlilerin üretimi de toz metalürjisi yöntemiyle mümkündür (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş fren balataları (a) ve dişliler (b) (Söyler, 2007)

Toz metalürjisi savunma sanayinde roket yakıtları, patlayıcılar, bombalar gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (Söyler, 2007). TM yönteminin biyomedikal uygulamaları; cerrahi aletler, ortodontik diş telleri, kalça ve diz protezleri olarak sıralanabilir. Toz metalürjisiyle çok küçük boyutlu ve çok dar tolerans aralığına sahip parçaların üretimi mümkün olduğundan biyopsi aletlerinin imalatında da bu yöntem kullanılmaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş biyopsi aletleri (Söyler, 2007)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Bu tez çalışmasında, Al6000 serisinden Al6061 alaşımı matris fazı olarak tercih edilmiştir. Hibrit yapının oluşturulması içinse takviye malzemesi olarak grafen ve karbon nanotüp kullanılmıştır.

Matris malzemesi olarak kullanılan Al6061 alaşımı Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Söz konusu malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5.1’de kimyasal bileşimi ise Tablo 5.2’de verilmiştir. Al6061 alaşım tozu %99 saflıkta, 2,7 g/ cm³ teorik yoğunluğa ve 44 µm ortalama partikül boyutuna sahiptir.

Tablo 5.1. Al6061 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (Akkurt, 2005)

Özellikler	Değer
Bileşik formülü	Al/Mg/Si/Cu/Cr
Görünüm	Simli-Gri
Tane boyutu	325 mesh (~44 µm)
Yoğunluk (g/cm ³)	2,713
Sertlik (HV)	107
Ergime noktası (°C)	660
Kaynama noktası (°C)	2519
Dövme sıcaklığı (°C)	177
Akma mukavemeti (MPa)	270
Poisson oranı	0,33

Tablo 5.2. Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Türkoğlu,2022)

Si	Mn	Cr	zn	Cu	Ti	Mg	Al
0,4-0,8	<0,1	0,04-0,35	<0,2	0,15-0,40	<0,1	0,8-1,2	kalan

Tez çalışmasında kullanılan takviye malzemelerinden biri olan grafen tozu Graphene Chemical Industry (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Grafenin genel özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan grafen 5-8 nm kalınlığa, %99 saflığa ve 2,25 g/ cm³ teorik yoğunluğa sahiptir.

Tablo 5.3. Grafenin genel özellikleri (Şenel, 2018)

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2,25
Kalınlık (nm)	5-8
Yüzey alanı (m ² /g)	120-150
Isıl iletkenliği (W/(mK))	4840-5300
Elektron hareketliliği (cm ² /(V.s))	~1,5x10 ⁴
Elastisite modülü (TPa)	~1
Kristal yapısı	Hegzagonal
Bağ yapısı	Kovalent bağ

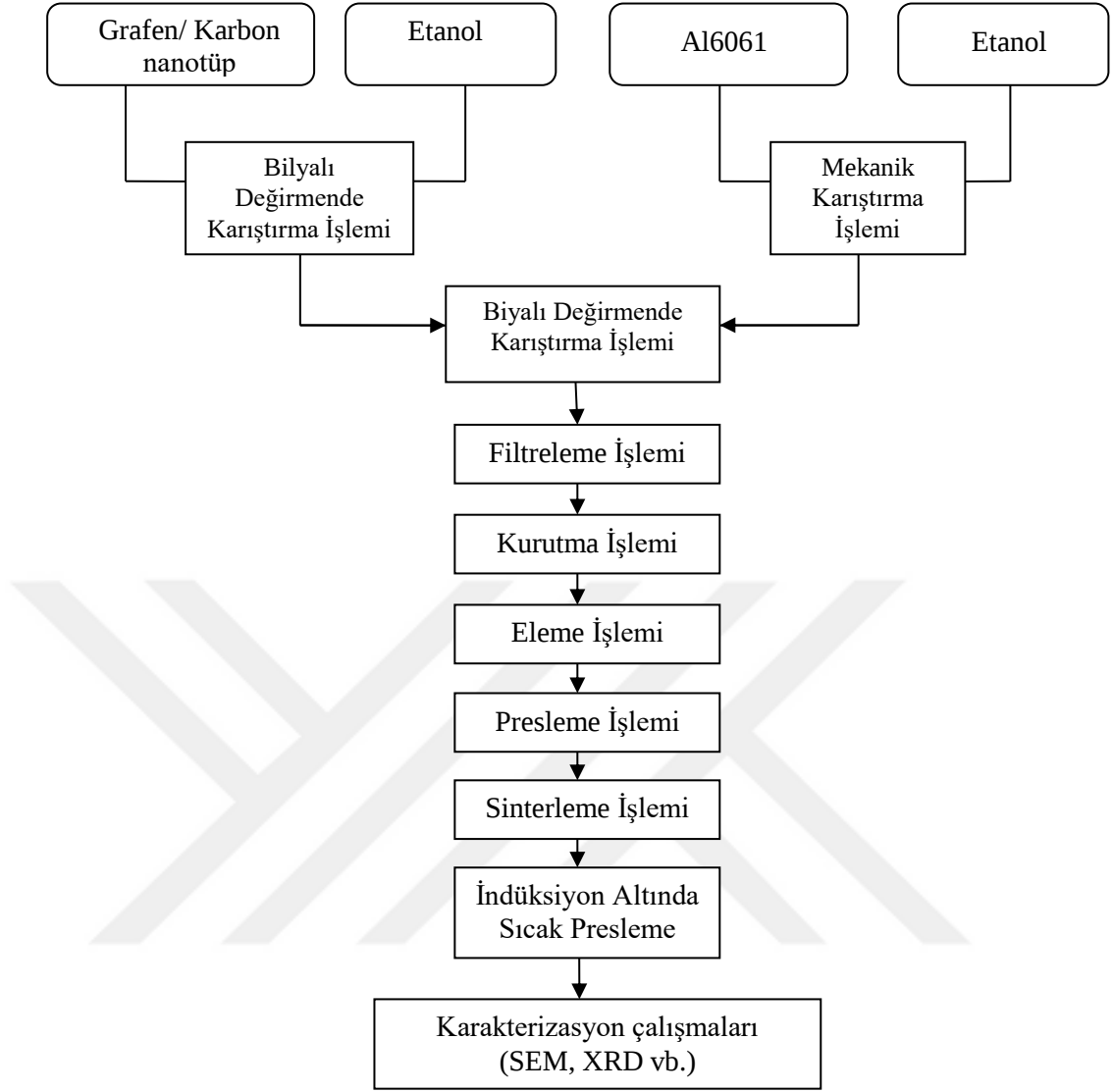
Tez çalışmasında kullanılan diğer takviye malzemesi olan karbon nanotüp Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Karbon nanotüpün genel özellikleri Tablo 5.4’de verilmiştir. Karbon nanotüp tozu, %99 saflığa ve 1,9 g/cm³ teorik yoğunluğa sahiptir.

Tablo 5.4. Karbon nanotüpün genel özellikleri (Preethi vd., 2023; Pul, 2019)

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	~1,7-2,2
Elastisite modülü (TPa)	~1-0,3
Termal kararlılık (°C)	>700 (havada), 2800 (vakumda)
Dayanım (GPa)	10-60
Direnç (μΩcm)	5-50
Spesifik yüzey alanı (m ² /g)	~200-400
Çap (nm)	1

5.2. Yöntem

Bu çalışmada, grafen ve karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş olup bu yöntem; mekanik karıştırma, filtreleme, kurutma, eleme, presleme, sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinden oluşmaktadır. Üretim sürecine ilişkin akış diyagramı Şekil 5.1’de verilmiştir.



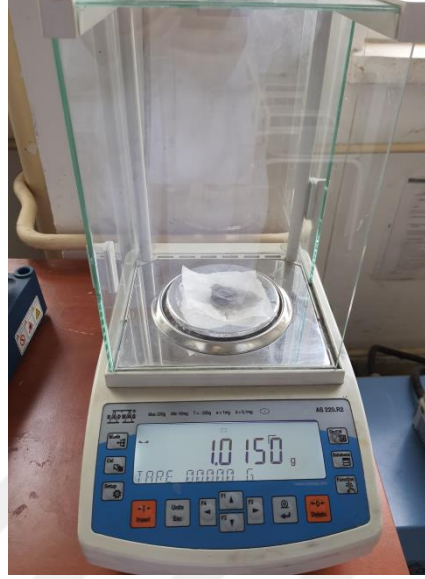
Şekil 5.1. Grafen ve karbon nanotüp takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemiyle üretim aşamaları

5.2.1. Toz Metalürjisiyle Kompozit Malzeme Üretimi

5.2.1.1. Tozların Tartılması ve Karıştırılması

Bu çalışmada, ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 grafen nanotabaka (GNT) takviyeli Al6061 matrisli kompozitler ile ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 karbon nanotüp (KNT) takviyeli Al6061 matrisli kompozitler üretilmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikleri en iyi olan Al-KNT kompozit yapıdaki KNT katkı oranı esas alınarak farklı grafen katkı oranlarında Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitler üretilmiştir.

Kompozit üretiminde ilk aşama olarak tozlar Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Redwag marka AS 220.R2 model hassas terazi kullanılarak tartılmıştır (Şekil 5.2). Tartılan tozlar gruplandırılarak kodlanmıştır. Hassas terazi 0,1 mg hassasiyete ve 0-220 g ölçüm aralığına sahiptir.



Şekil 5.2. Hassas terazide toz tartım işlemi

Grafen ve karbon nanotüp matris yapısı içerisinde topaklanma eğilimi göstermektedir. Söz konusu takviye malzemelerinin Al6061 alaşımı içerisinde topaklanmasını engellemek için tozlar yüksek enerjili bilyalı değirmende etanol içerisinde karıştırılmıştır. Bunun için OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan MTI marka MSK-SFM-3 model yüksek enerjili bilyalı değirmen kullanılmıştır (Şekil 5.3). Bu değirmen 0-1200 dev/dk dönüş hızlarında 0-60 dk süresince çalışabilmektedir.



Şekil 5.3. Yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırma işlemi

Değirmenin karıştırma haznesine hacimce 1/3 oranında zirkon bilya, farklı oranlarda takviye malzemeleri ve haznenin 1/3'ü boş kalacak şekilde etanol konulmuştur. Bu karışım 1200 dev/dak hızda 60 dk süresince karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak Al6061 tozu etanol içerisinde mekanik karıştırıcıyla 60 dk süresince karıştırılmıştır. Daha sonra Al6061-etanol karışımına grafen/karbon nanotüp-etanol karışımı eklenerek 400 dev/dk hızda 10 dk süresince yüksek enerjili bilyalı değirmende homojen karıştırma işlemi yapılmıştır.

5.2.1.2. Tozların Filtrelenmesi

Karıştırma işleminden sonra çözelti içerisindeki etanolü uzaklaştırmak için öncelikle karışıma filtreleme işlemi uygulanmıştır. Şekil 5.4'den görülebileceği üzere karışım filtre kağıdı yardımıyla filtrelenmiştir. Filtreleme işlemi için S&H Labware marka Ø125 mm çapında yavaş süzülen bir filtre kâğıdı kullanılmıştır. Filtreleme işlemi sırasında herhangi bir karışıklık olmaması için etiketleme işlemi yapılmıştır. Etanolün süzülmesi için 1-2 saat beklendikten sonra toz karışımı vakuma alınabilen bir etüvde kurutma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.4. Filtreleme işlemi

5.2.1.3. Toz Karışımın Etüvde Kurutulması

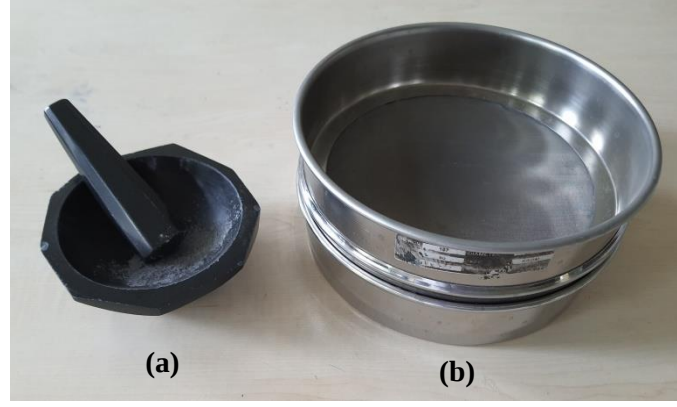
Filtrelenen karışımdan etanolü ve nemi tamamen uzaklaştırmak için toz karışımı, OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Bluelab marka FN120 model etüvde 50°C’de 16 saat süresince vakum altında kurutulmuştur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Etüv fırınında kurutma işlemi

5.2.1.4. Tozların Elenmesi

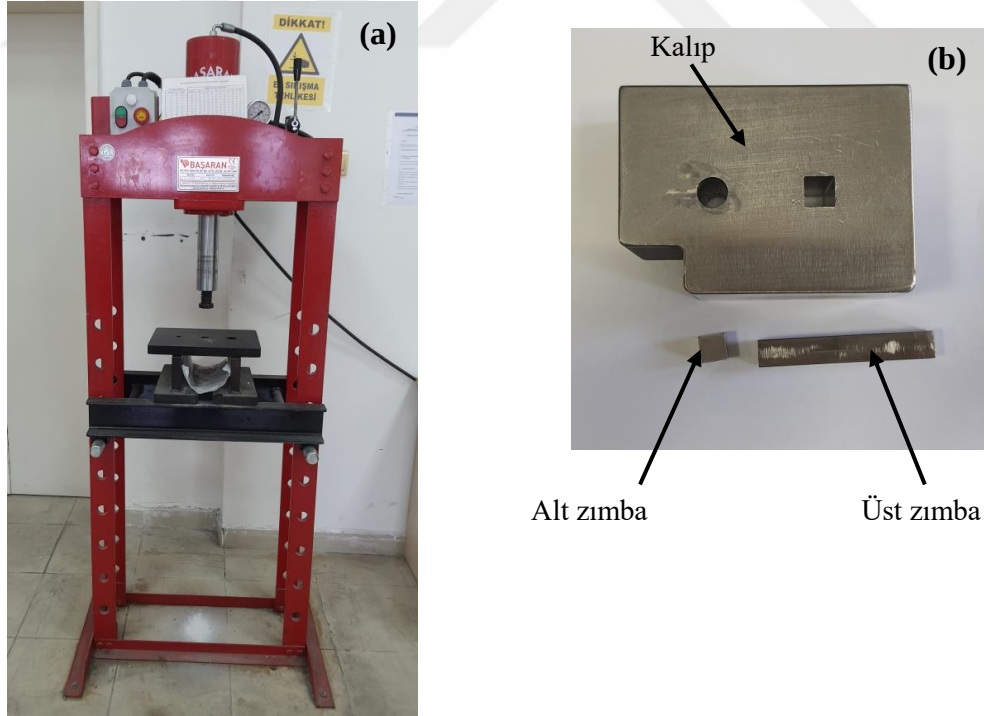
Etüvde kurutma işleminden sonra toz karışımların topaklanmasını önlemek için toz karışım agat havanda dövülerek eleme işlemine tabi tutulmuştur. Eleme işlemi için Ø200 mm çapa ve 80 µm eleme aralığına sahip Çelik Test marka paslanmaz çelik elek kullanılmıştır (Şekil 5.6). Elenen tozlar paketlenmiş ve kodlanmıştır.



Şekil 5.6. Agat havanda dövme (a) ve eleme işlemi (b)

5.2.1.5. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması)

Hazırlanan toz karışımlarından, gerekli boyut ve şekle sahip yarı mamül ürünler elde edebilmek için toz karışımları preslenmiştir. Bu çalışmada presleme işlemi için paslanmaz çelikten üretilmiş 10 ton yüke dayanıklı, toz haznesi 10x10 mm boyutlarında kare kesitli bir kalıp kullanılmıştır. OMÜ Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Başaran Marka hidrolik presle tozlar şekillendirilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Hidrolik pres (a) ve presleme işleminde kullanılan kalıp (b)

Presleme sürecinde numunenin kalıba zarar vermeden çıkarılabilmesi için kalıp iç duvarları özenle temizlendikten sonra WD-40 yağlayıcı ile yağlanmıştır. Bu işlem, her sıkıştırma ve numune çıkarma sonrasında tekrarlanmıştır.

Presleme öncesi 1 ve 2 gr olarak tartılan tozlar, hazırlanan kalıp boşluğuna konulmuştur. Hidrolik presle 750 MPa'lık basınç 10 s süresince kalıp boşluğundaki toz karışımına uygulanmıştır. Bu süreç sonrasında üretilen ham numune örnekleri Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



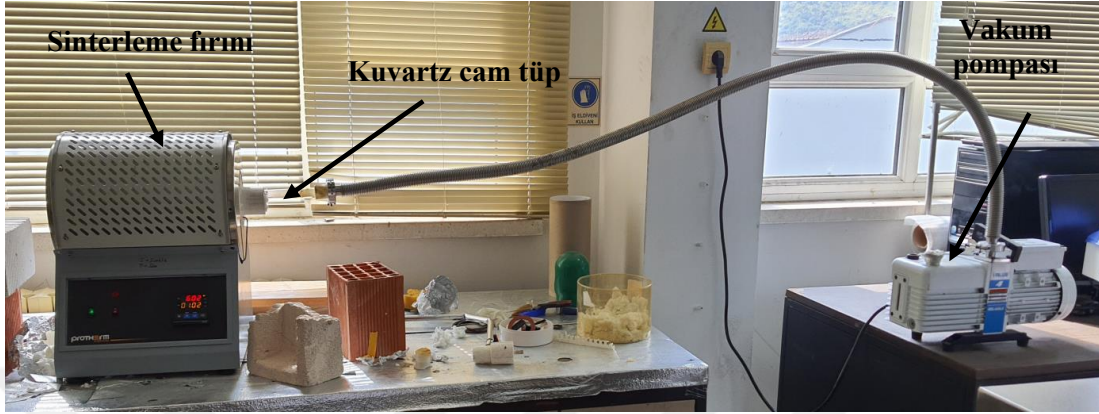
Şekil 5.8. Preslenmiş ham numune örnekleri

5.2.1.6. Ham Numunelerin Sinterlenmesi

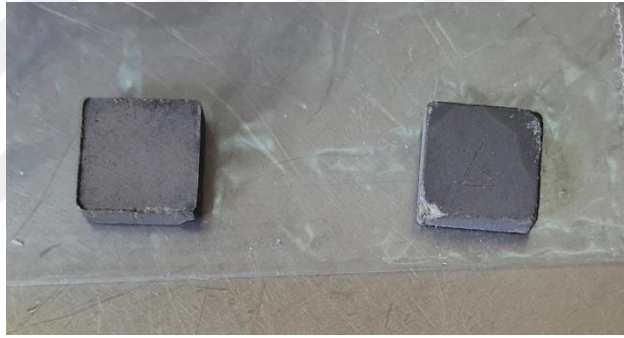
Presleme sonrasında, parçacıkların birbirlerine değen yüzleri arasında kuvvetli bağlar tesis etmek için ham kompozit numuneler, OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Protherm PTF 12/20/250 marka tüp fırında sinterlenmiştir. Numunelerin oksitlenmesini önlemek için sinterleme işlemi sürekli vakum altında gerçekleştirilmiştir. Vakumlama için 5×10^{-2} Pa vakum basıncına sahip bir vakum pompası (Value VRD-4) kullanılmıştır.

Sinterleme öncesi numuneler hassas terazi ile tartılmış, boyutları ölçülmüş ve veriler tabloya işlenmiştir. Sinterlenecek numuneler, öncelikle yüksek sıcaklığa dayanıklı kuvarz cam tüp içerisine yerleştirilmiştir. Kuvarz cam tüp, bağlantı elemanları ile vakum pompasına bağlanmıştır. Numuneler sinterleme işlemi öncesi 15 dk vakumlanmış ve vakuma alma işlemi sinterleme süresince devam etmiştir. Numuneler 60 dk süresince 600 °C'de tüp fırında sürekli vakum altında sinterlenmiştir (Şekil 5.9). Numuneler kuvarz cam tüp içerisinde sinterleme sonrası soğuma aşamasında oksidasyonun önüne geçmek için 15 dk süresince vakuma alınmıştır. Süre sonunda numuneler kuvarz cam tüpten çıkarılmıştır. (Şekil 5.10) Sinterlenen

numunelerin ağırlıkları soğuduktan sonra hassas terazi ile tartılmış, boyutları ölçülmüş ve tabloya işlenmiştir. Numunelerin boyut ölçümleri OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan 0,01 mm hassasiyete sahip mikrometre ile yapılmıştır.



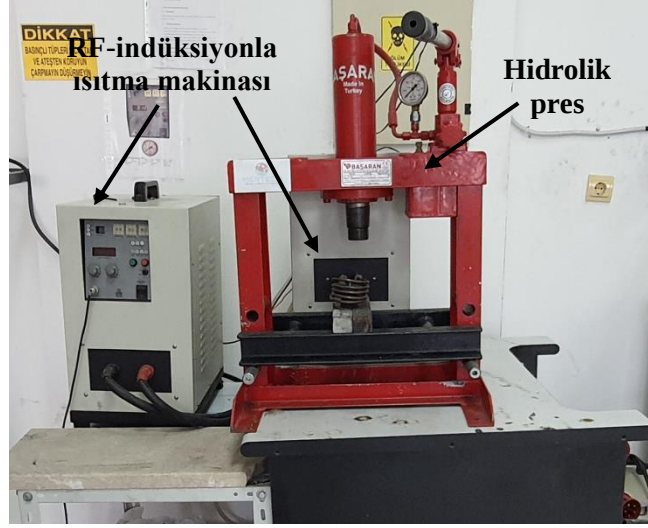
Şekil 5.9. Vakum altında sinterleme işlemi



Şekil 5.10. Sinterlenmiş numune örnekleri

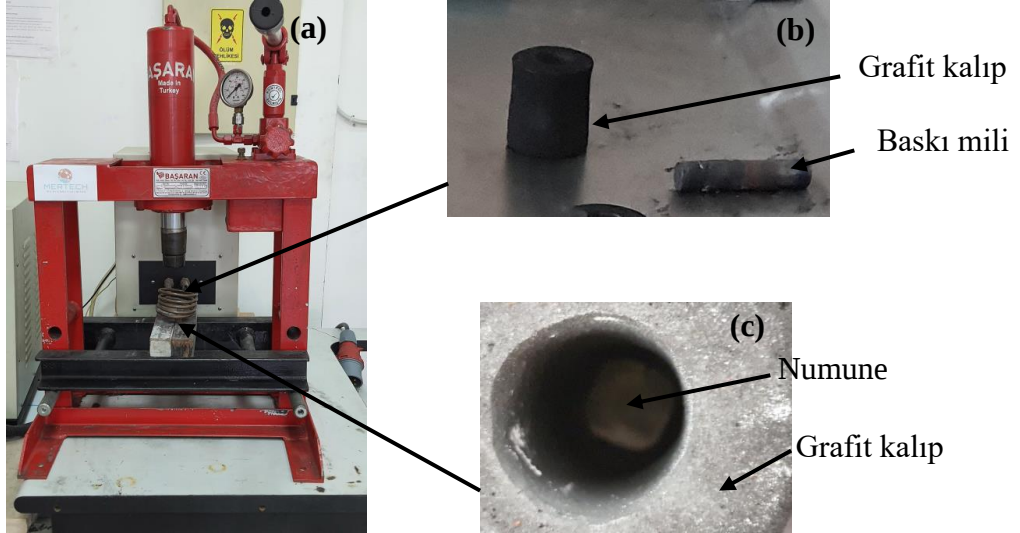
5.2.1.7. İndüksiyonla Sıcak Presleme İşlemi

Sinterleme işleminden sonra her seriden en az üç adet numune indüksiyon altında sıcak preslenmiştir. Tüm numuneler preslenmeyerek indüksiyonla sıcak preslemenin, kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Söz konusu işlemler için OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı'nda bulunan su soğutmalı RF (radyo frekans) indüksiyonla ısıtma makinesi (MTI EQ-SP-15VIM) ve Başaran BŞR-200 model 10 ton yük kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Su soğutmalı RF indüksiyonla ısıtma makinesi ve hidrolik pres

Sıcak presleme işleminin parametrelerini belirlemek için birkaç deneme yapılmıştır. Bu işlem sonrasında cihaz, işlem sıcaklığı 400 °C, ısıtma süresi 60 s, bekleme süresi 60 s ve soğutma süresi 10 s olarak ayarlanmıştır. Numuneler, 70 mm çapındaki grafit kalıbın içerisine konulmuş ve rezistanların ortasına yerleştirilmiştir. İşlem sıcaklığında (400 °C) ve bekleme süresi içerisinde 25 MPa'lık bir basınç 10 s süresince uygulanmıştır (Şekil 5.12). 10 s'lik soğutma süresi sonrasında numuneler çıkarılarak laboratuvar koşullarında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 5.12. İndüksiyonla sıcak presleme makinası (a), grafit pota (b) ve numunenin grafit potaya yerleşimi (c)

5.2.1.8. Zımparalama ve Parlatma İşlemleri

Numuneler zımparalanarak yüzeylerindeki oksit tabakası kaldırılmıştır. Zımparalama işlemi için, 100, 600 ve 1200 gritlik su zımparaları kullanılmıştır. Bu işlem, OMÜ Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Brightway marka MT S2 model 50-1000 dev/dk hız ayarlı zımparalama ve parlatma makinesiyle yapılmıştır (Şekil 5.13). Parlatma işlemi için çuha üzerinde 1 µm'lik alümina solüsyon kullanılmıştır.



Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma makinesi

5.2.2. Test Yöntemleri ve Karakterizasyon Teknikleri

5.2.2.1. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin deneysel yoğunlukları Arşimet yoğunluk ölçüm kitiyle Arşimet prensibine dayanarak Eşitlik (5.1)'den faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_D = (m_K / (m_D - m_A)) \times \rho_{su} \quad (5.1)$$

Burada ρ_D deneysel yoğunluk (g/cm^3), m_K numunelerin kuru ağırlığı (g), m_D suya doymuş ağırlığı (g), m_A asılı ağırlığı (g) ve ρ_{su} suyun yoğunluğudur.

Üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin yoğunluğu, karışım oranlarına bağlı olarak değişim gösterdiğinden, karışımların teorik yoğunluğu Eşitlik (5.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada matris malzemesi olarak kullanılan alaşımın yoğunluğu (ρ_M), matris malzemenin ağırlıkça katkı oranı (%M), takviye elemanın yoğunluğu (ρ_{TK}),

takviye malzemesinin ağırlıkça katkı oranını (%TK) ifade etmektedir.

$$\rho_T = (\rho_M \times \%M) + (\rho_{TK} \times \%TK) \quad (5.2)$$

Kompozit numunelerin bağıl yoğunluğu (ρ_R) ise Eşitlik (5.3) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\rho_R = (\rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (5.3)$$

Toz metalürjisi ile üretilen numunelerde mekanik özellikleri etkileyen önemli parametrelerden biri olan gözeneklilik oranı (G), Eşitlik (5.4) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\%G = (1 - \rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (5.4)$$

5.2.2.2. Sertlik Ölçümü

Yapılışının basit olması ve malzemeye hasar vermemesi nedeniyle malzeme üzerinde yapılan en genel mekanik testlerden biri sertlik ölçme testidir. Bu yöntem üç gruba ayrılabilir:

- 1) Malzeme yüzeyi sert bir cisim ile çizerek yapılan
- 2) Sert bir cismin kuvvet altında malzemeye batırılmasıyla yapılan
- 3) Sert bir bilyeyi malzeme üzerine düşürmek ve sıçratmak suretiyle yapılan sertlik ölçümüdür.

Bu çalışmada hazırlanan numunelerin sertlik ölçümleri sert bir cismin kuvvet altında malzemeye batırılmasıyla yapılan Vickers sertlik ölçme yöntemi ile yapılmıştır. Bunun için OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan TMTeck marka HV-1000B model Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.14).

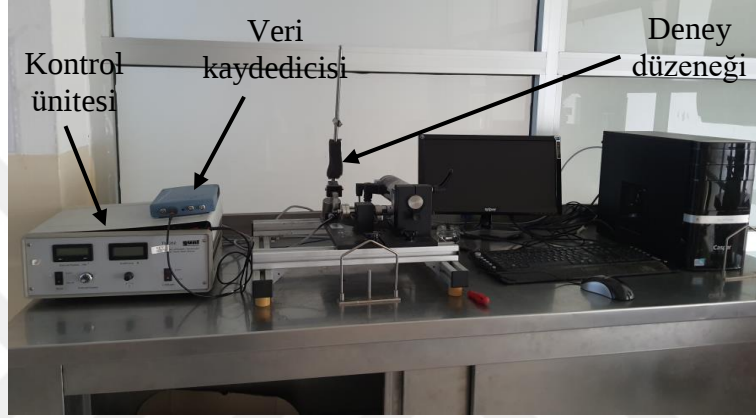


Şekil 5.14. Vickers sertlik ölçüm cihazı

Cihazın yük uygulama kapasitesi 0,098-9,807 N arasındadır. Üretilen numunelere, 1,961 N (0,2 kgf)'luk yük 15 s uygulanmış ve numune yüzeyinde kare tabanlı elmas piramit ucun oluşturduğu iz çapları ölçülmüştür. Elde edilen veriler cihaza girilip ekrandan ölçüm sonuçlarına karşılık gelen sertlik değeri okunmuştur.

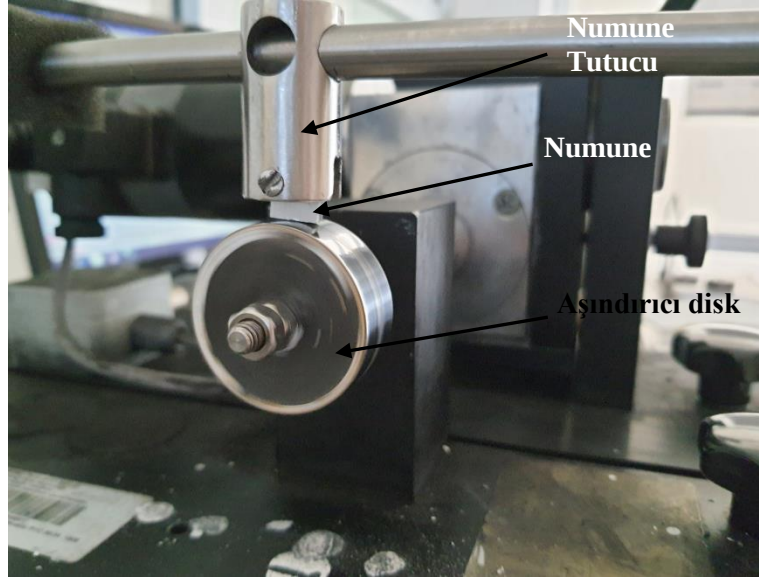
5.2.2.3. Aşınma Testi

Aşınma testleri OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Gunt marka TM260 model aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.15).



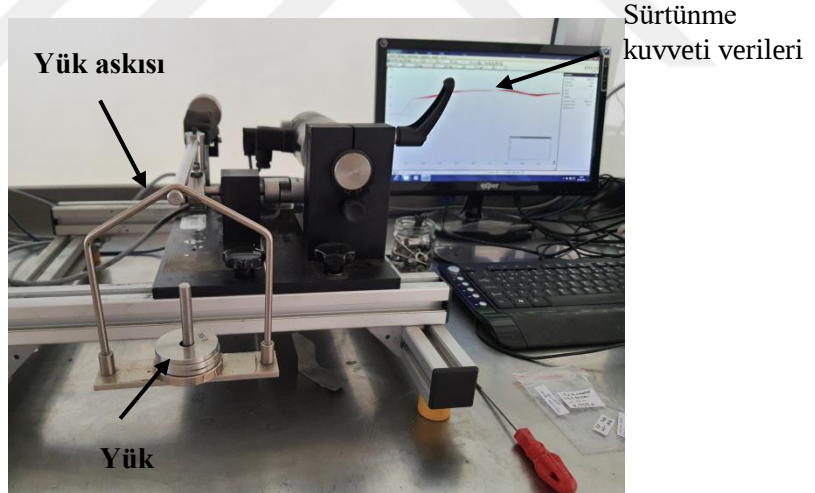
Şekil 5.15. Aşınma test cihazı genel görünümü

Söz konusu aşınma test cihazında farklı modüller bulunmaktadır. Bu çalışmada disk ve silindir blok arasındaki aşınma deney modülü kullanılmıştır. Deney düzeneğinin özellikleri; uygulanabilir yük 0-80 N, mil dönüş hızı 0-250 dev/dk arasındadır. Ayrıca kontrol ünitesinde bulunan gösterge N cinsinden sürtünme kuvvetini gösterir. PICO 4424 veri kaydedicisi ve yazılımı sürtünme verilerini saniyede bir bilgisayara aktarır. Bu çalışmada, farklı katkı oranlarındaki numuneler 5 N yüküyle test edilmiştir. Karşı disk olarak 50 HRC sertliğe sahip AISI304 paslanmaz çelik aşınma diski ($d=40$ mm) kullanılmıştır. Disk üzerine herhangi bir sıvı uygulanmamış testler kuru şartlar altında test gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi öncesi zımparalanan numuneler hassas terazi ile tartılmıştır. Daha sonra numuneler tutucuya sabitlenmiştir (Şekil 5.16).



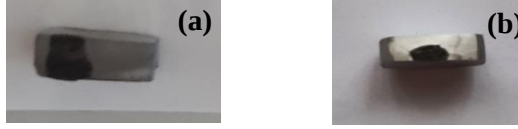
Şekil 5.16. Aşınma test cihazına numune bağlanması işlemi

Uygulanacak yük (5 N), yükleme askısına eklenerek kontrol ünitesi üzerindeki sürtünme kuvveti göstergesi sıfırlanmış ve sistem çalıştırılmıştır. 20 dakika süresince elde edilen sürtünme kuvveti verileri bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. Aşınma testinde sürtünme kuvveti verilerini alma işlemi

Aşınma testi sonrası numuneler tekrar hassas terazi ile tartılarak ağırlıklar kayıt altına alınmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Sinterlenmiş Al6061-%0.1 GNT numunesi (a) ve sinterleme sonrası sıcak preslenmiş Al6061-%0.1 GNT aşınma numunesi (b)

Numunelerde meydana gelen kütle kaybı Eşitlik (5.5) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada m_i aşınma öncesi numune kütlesi (g), m_s numunenin aşınma testi sonrası kütlesi (g) ve Δm kütle kaybını göstermektedir.

$$\Delta m = m_i - m_s \quad (5.5)$$

Aşınma testiyle kütle kaybı belirlendikten sonra hacimsel aşınma (ΔV), Eşitlik (5.6) kullanılarak belirlenmiştir. Burada kütle kaybının (Δm), numunelerin yoğunluğuna (ρ) oranı hacimsel aşınmayı (ΔV) vermektedir.

$$\Delta V = \Delta m / \rho \quad (5.6)$$

Kayma mesafesi (L) Eşitlik (5.7) kullanılarak hesaplanmıştır. 20 mm yarıçapında (r) AISI304 paslanmaz çelik disk, aşındırıcı disk olarak kullanılmıştır. Diskin dönüş hızı (n) 200 d/dk olup aşınma test süresi (t) 20 dakikadır. Bu durumda kayma mesafesi 500 m olarak hesaplanmıştır.

$$L = 2\pi r \times n \times t \quad (5.7)$$

Numuneler arasındaki aşınma miktarını karşılaştırmak amacıyla aşınma oranı (W), Eşitlik (5.8) kullanılarak belirlenmiştir. Burada F uygulanan yükü, L kayma mesafesini ve ΔV hacimsel aşınmayı ifade etmektedir.

$$W = \Delta V / (FL) \quad (5.8)$$

Bu çalışmada üretilen kompozitlerin aşınma dirençlerinin değerlendirilebilmesi için Eşitlik (5.9) kullanılmıştır. Burada W_R aşınma direncini, W aşınma oranını ifade etmektedir.

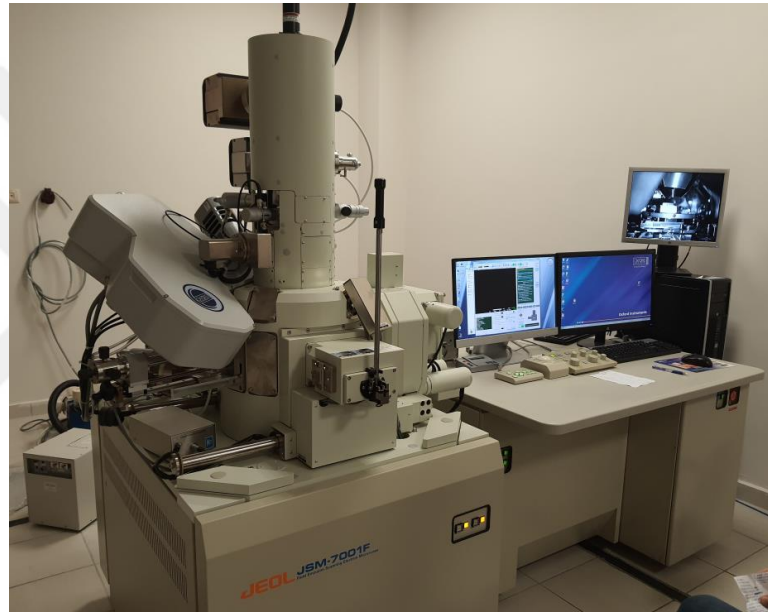
$$W_R = 1 / W \quad (5.9)$$

5.2.2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM’de, yüksek enerjili elektronlar numune ile etkileşerek elektron ve foton sinyalleri oluşturur. Farklı açılarda saçılan elektronlar, dedektör (algılayıcı) tarafından toplanır ve toplanan sinyallerin mikroskop yazılımı ile işlenmesi sonucunda görüntüler

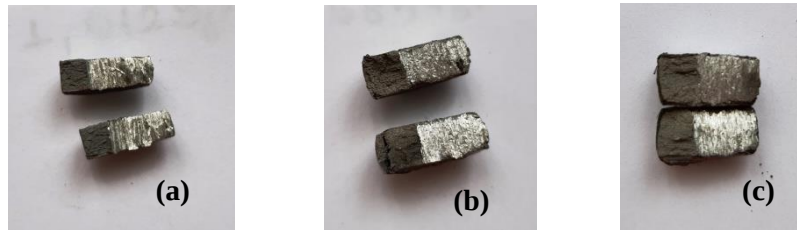
elde edilir. İkincil elektronlar, malzeme topografisi ve geri saçılan elektronlar, atom numarasına ve kontrasta bağlı atomik kompozisyon hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) dedektörü ile noktasal, çizgisel veya bölgesel nitel ve nicel analiz ile elementlerin dağılım haritalaması yapılmaktadır.

Bu çalışmada, kullanılan tozların morfolojisi, numunelerin kırık yüzey, aşınmış yüzey görüntüleri ve element dağılım haritaları için OMÜ KİTAM'da yer alan Jeol marka JSM7001F model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 5.19). Bu cihaz 10x ile 1000000x büyütme aralığına sahiptir. Ayrıca 200 mm çap ve 48 mm yükseklikte numunelerin analizini yapabilmektedir.



Şekil 5.19. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) genel görüntüsü

Üretilen kompozitlerin kırık yüzey analizleri için numuneler belirli bir oranda kesildikten sonra çekiçle vurularak kırık yüzey formları elde edilmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Kırık yüzey SEM analizi için hazırlanan numuneler: Al6061-0,1KNT (a), Al6061-0,5GNT (b), Al6061-0,1KNT-0,5GNT kompozit (c)

5.2.2.5. X-Işını Kırınımı (XRD) Faz Analizi

Bu yöntem, numune üzerine gönderilen x-ışınlarının farklı açılarda kırılarak yansıması prensibine dayanmaktadır. Analiz sonucu numune içerisindeki fazların dağılımı, kristal boyutu ve fazların miktarı belirlenebilmektedir. X-ışınının toz numunelere uygulanması sonucu kristal yapısının yanı sıra, tane boyutu ve tercihli yönelme gibi özellikleri hakkında bilgi edinilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin XRD faz analizi için OMÜ KİTAM’da bulunan Rigaku SmartLab model x-ışını kırınımı cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.21). Bu cihaz monokromatik Cu-K α ışınımı, 40 kV, 150 mA ve 0,154 nm dalga boyunda çalışma özelliklerine sahiptir.



Şekil 5.21. X-ışını kırınımı (XRD) cihazı

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

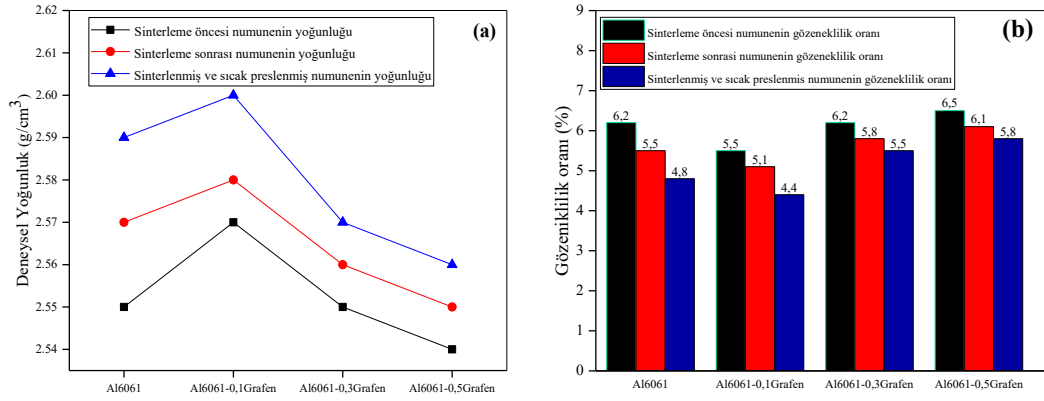
Tez çalışmasında farklı katkı oranlarında üretilen (ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) Al6061-GNT, Al6061-KNT, Al6061-KNT-GNT kompozitlerin, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, aşınma oranı, sürtünme katsayısı, mikroyapıları ve faz yapıları incelenmiştir.

6.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analiz Sonuçları

6.1.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinin, deneysel yoğunluğa ve gözeneklilik oranına olan etkileri bu bölümde incelenmiştir.

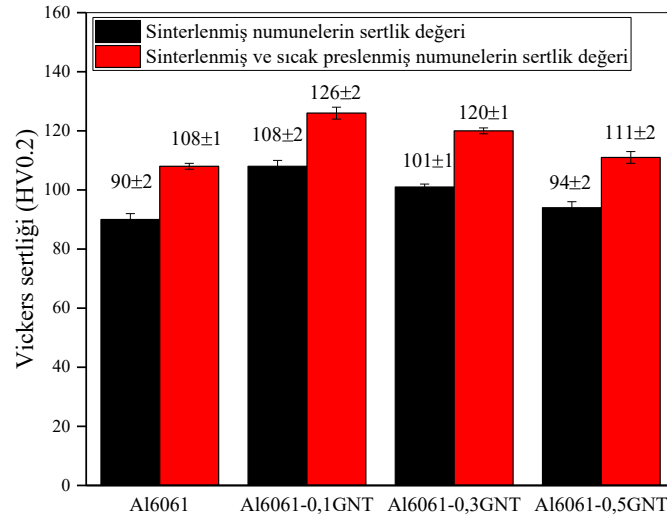
Üretilen GNT katkılı Al6061 matrisli kompozitlerde, takviye oranı esas alınarak ham, sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş numunelerin yoğunluğundaki ve gözeneklilik oranındaki değişim Şekil 6.1’de verilmiştir. Veriler incelendiğinde; ağırlıkça %0,1 grafen takviye oranına kadar, ham numunelere kıyasla sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş numunelerde yoğunlukta artış ve gözeneklilik oranında düşüş gözlenmiştir. En yüksek yoğunluğa sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinde ulaşılmış olup bu yoğunluk değeri $2,6 \text{ g/cm}^3$ ’tür. En düşük gözeneklilik oranı %4,4 ile sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş %0,1 grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitte tespit edilmiştir. Bu durum, sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş numunelerde ısıyla birlikte taneler arası etkileşimin artmasından ve etkin boyun oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ağırlıkça %0,1 grafen takviye oranının aşılmasıyla yoğunluk düşüş eğilimine girerken gözeneklilik oranında artış tespit edilmiştir. En düşük yoğunluk değeri $2,54 \text{ g/cm}^3$ ile ham (sinterlenmemiş) ağırlıkça %0,5 grafen takviyeli kompozitte ulaşılmıştır. Üretilen kompozitlerde en yüksek gözeneklilik oranı %6,54 ile sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş %0,5 grafen takviyeli kompozitte tespit edilmiştir. Grafen takviye oranının artmasıyla grafenin içyapıda homojen olarak dağıtılması zorlaşmış ve muhtemel topaklanmalar oluşmuştur. Bunun sonucunda da numunelerde mikro gözenekler oluşarak yoğunluk azalmış ve gözeneklilik oranı artmıştır. Bu sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür (Şenel, 2018).



Şekil 6.1. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıtım işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

6.1.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertlikleri incelenmiştir. Farklı grafen takviye oranlarına sahip kompozitlerin sinterleme ve sıcak preslemeye bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim Şekil 6.2’de verilmiştir. Grafen ilavesiyle birlikte her iki ısıtım işlem türünde de (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) sertlik değerlerinde artış görülmüştür. En yüksek sertlik değeri (126 ± 2 HV), sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-%0,1GNT kompozit numunede ölçülmüştür. Ağırlıkça %0,1 GNT katkısından sonra ise kompozitin sertlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu düşüşün, artan GNT katkı oranı sebebiyle grafenin yapı içerisinde homojen dağılamamasından ve Al6061-grafen arasındaki arayüz bağının zayıflamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.2. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak sertlik değerindeki değişim

Takviye malzemesinin sertliği kompozitin sertliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kompozitlerin sertliği (H_c) Eşitlik (6.1) ile hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte H_m matris malzemesinin sertliğini ve H_r takviye malzemesinin sertliğini ifade etmektedir. f_m matris malzemesinin hacimsel katkı oranını ve f_r takviye malzemesinin hacimsel katkı oranını gösterir (Şenel ve Üstün, 2022).

$$H_c = H_m f_m + H_r f_r \quad (6.1)$$

Ayrıca kompozit malzemelerin sertliği dislokasyon yoğunluk mekanizması ile artırılabilir. Yapı içerisinde yoğunluğu artan dislokasyonlar birbirlerini zorlamaktadır. Böylece malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç artmaktadır. Al6061 alaşımına grafen takviyesi kompozitin dislokasyon yoğunluğunu arttırmaktadır. Al-GNT kompozitlerin Vickers sertliği, dislokasyon yoğunluğunun kareköküyle orantılıdır. Bu durum teorik olarak Eşitlik (6.2) ile açıklanabilir. Bu eşitlikte H_c kompozitlerin sertliğini, b Burger vektörünü, α , h , G malzeme sabitlerini ve ρ dislokasyon yoğunluğunu ifade etmektedir (Gürbüz vd., 2018).

$$H_c = Gb\alpha\sqrt{\rho} + h\sqrt{td} \quad (6.2)$$

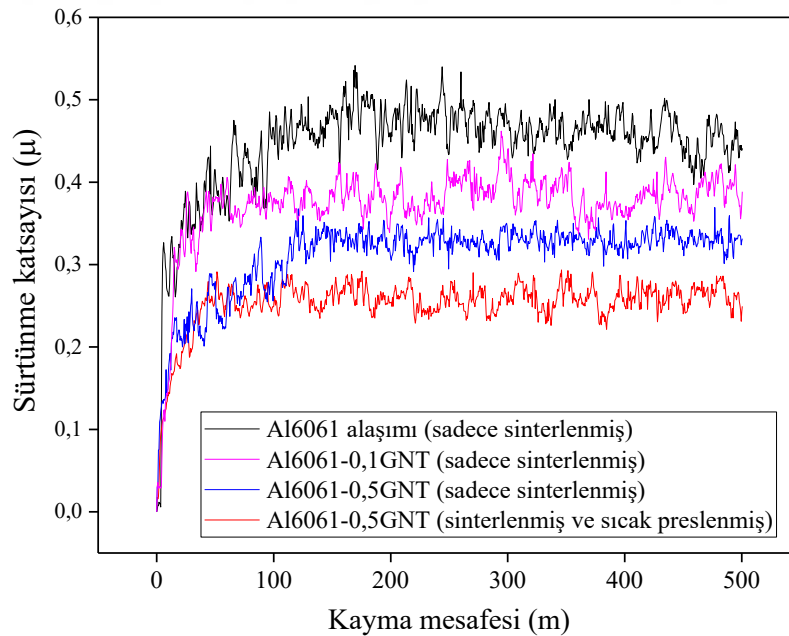
Kompozitlerin dayanımını artıran diğer etken tane boyutudur. Yapı içerisindeki taneler daha ince bir forma getirildiğinde veya daha ince taneli bir malzeme yapıya ilave edildiğinde tane sınırı sayısı artmaktadır. Tane sınırı sayısının artması dislokasyonların hareketini zorlaştırmakta ve kompozitin mukavemetini artırmaktadır. Tane inceltme

mekanizması olarak bilinen Hall-Petch denklemi Eşitlik (6.3) de alüminyum kompozit yapıdaki mukavemet artışını ifade etmektedir. Bu eşitlikte σ_Y akma dayanımını, d ortalama tane çapını ve k ise malzeme sabitini vermektedir.

$$\sigma_Y = kd^{-1/2} \quad (6.3)$$

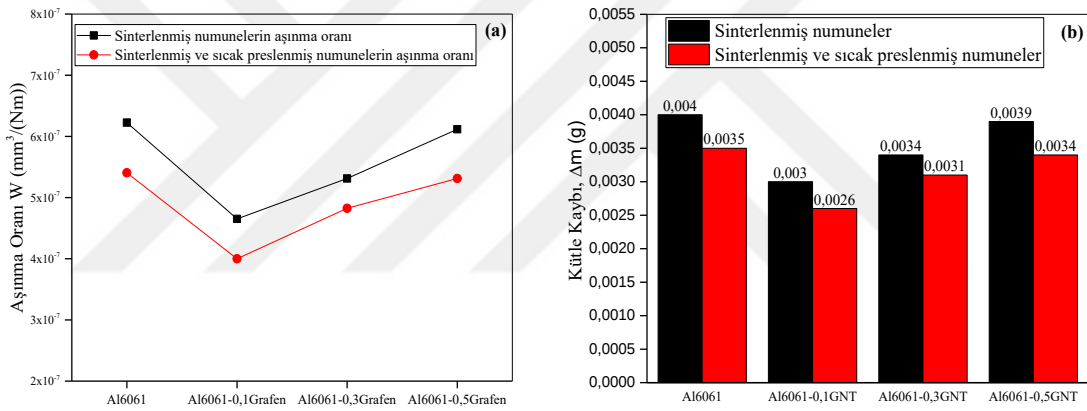
6.1.3. Aşınma Test Sonuçları

Bu bölümde, ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin kuru şartlarda $P=5$ N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonuçları analiz edilmiştir. Yapılan testler sonucunda ortalama 1200 sürtünme verisi kaydedilmiştir. Kayma mesafesi (L) yaklaşık 500 m (0,5 km) olarak hesaplanmıştır. Sinterlenmiş Al6061 alaşımı ve disk arasındaki ortalama kuru sürtünme katsayısı (μ) 0,45 olarak belirlenmiştir. Sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş ağırlıkça %0,5 grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozit ile disk arasındaki ortalama sürtünme katsayısı (μ) 0,25'e düşmüştür (Şekil 6.3). Al6061 alaşımına grafen takviyesi yapıldığında kuru sürtünme katsayısının düştüğü belirlenmiştir. Grafenin yağlayıcı özelliği nedeniyle temas eden yüzeylerde yağ film tabakası oluşması sürtünme katsayısının azalmasında etkili olmaktadır.



Şekil 6.3. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımına ve Al6061-GNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri

Yürütülen aşınma testleri sonucunda, Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozit yapılarda grafen katkı oranı ve ısıl işlem türlerinin (sinterleme ve sıcak presleme) aşınma oranı ve kütle kaybı üzerine olan etkisi Şekil 6.4’de verilmiştir. En yüksek aşınma oranı $6,2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ olarak sinterlenmiş Al6061 alaşımında tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı ($4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş ağırlıkça %0,1 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozit numunede görülmüştür. Aşınma testlerinde en fazla kütle kaybı (0,0040 g) Al6061 alaşımında gerçekleşmiştir. Alüminyum matrise GNT takviyesiyle kütle kaybı azalmış olup en düşük kütle kaybı (0,0026 g) sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozit numunede görülmüştür. Ağırlıkça %0,1 grafen takviyeli ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş numunelerde kütle kaybının azaldığı ancak grafen katkı oranı arttıkça kütle kaybının tekrar yükselişe geçtiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.4. Al6061 alaşımına ve Al6061-GNT kompozit numunelere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değişimi

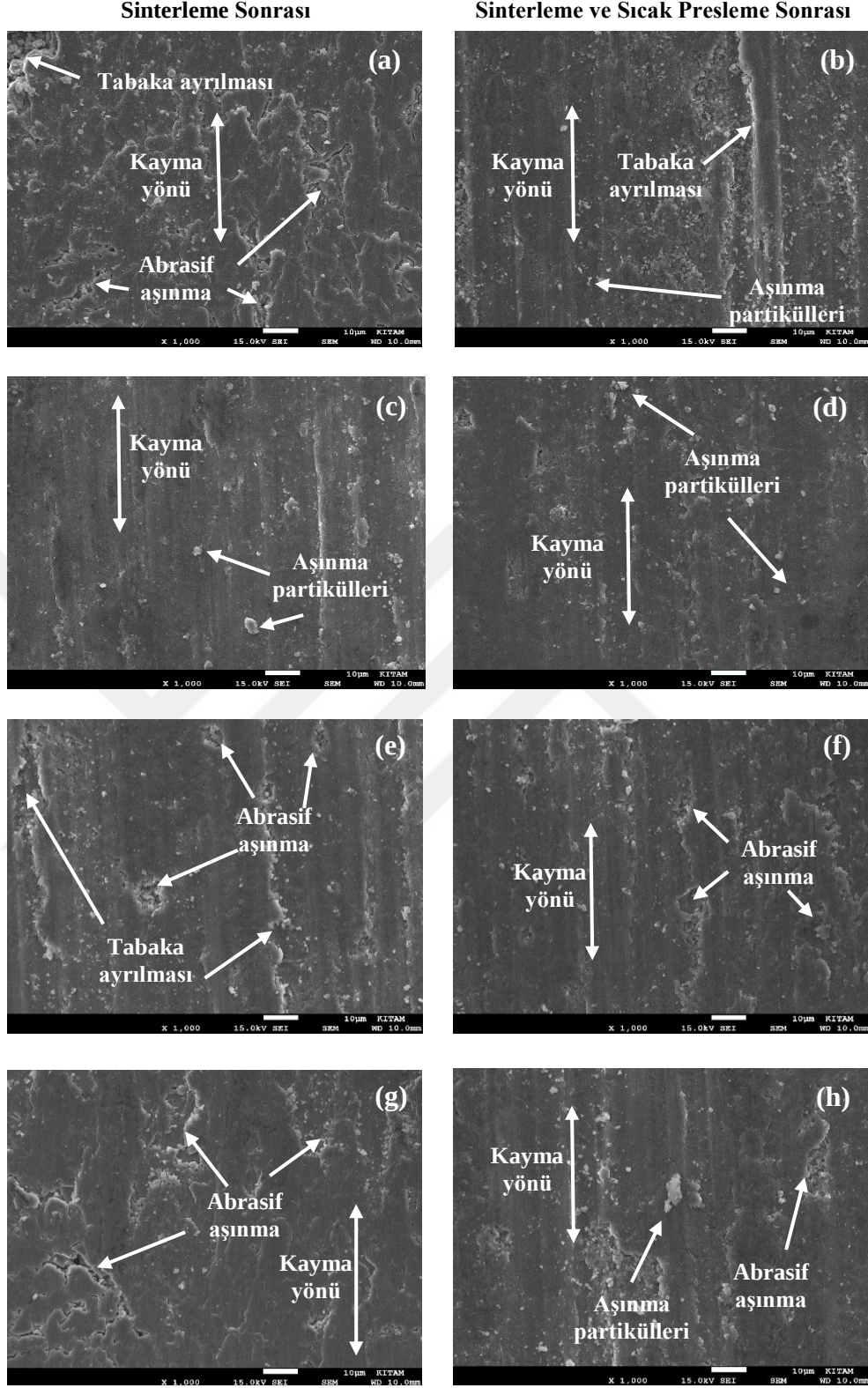
Aşınma oranı ile sertlik arasındaki ilişki Archard eşitliği (Eşitlik 6.4) ile açıklanabilir. Bu denklemde H numune sertliğini ve μ ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

$$\Delta V = F \times \mu \times L / H \quad (6.4)$$

Eşitliğe göre sertliğin artmasıyla aşınma oranı azalmaktadır (Şenel ve Üstün, 2022). Yapılan çalışmada elde edilen aşınma oranı sonuçları Archard eşitliği ile doğrulanmaktadır. Al6061-Grafen kompozitleri arasında en yüksek Vickers sertliği (126 HV) Al6061-%0,1GNT kompozitte ölçülmüş, en düşük aşınma oranı da $4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ ile bu kompozit yapıda tespit edilmiştir.

6.1.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskobik Analizi

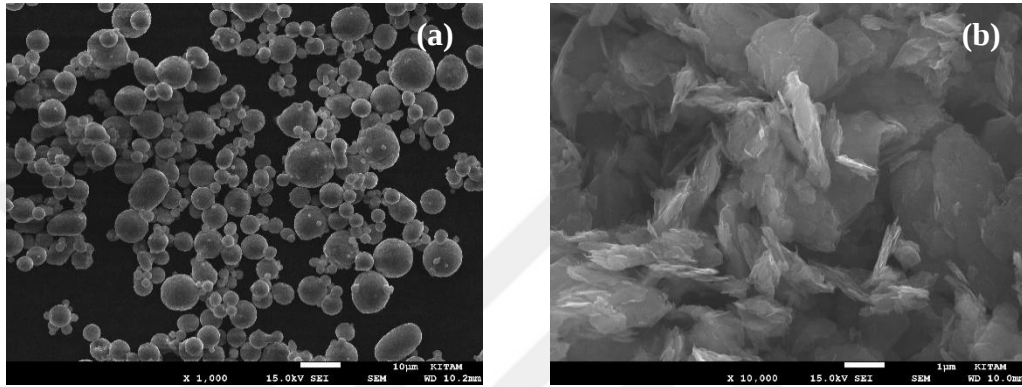
Aşınma testi sonrasında aşınan yüzeylerin görüntüleri SEM cihazı yardımıyla incelenmiştir. Sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061 alaşımının aşınma izleri incelendiğinde; özellikle sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımında yapının yüksek seviyede deforme olduğu ve parça ayrışmalarının olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.5(a, b)). Sinterlendikten sonra indüksiyon altında sıcak preslenmiş Al6061 alaşımında ise sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımına kıyasla daha az deformasyon görülmüştür. Al6061-%0,1GNT kompozitine ait aşınma görüntüleri incelendiğinde; grafenin yağlayıcı özelliğinin aşınma direncini artırdığı ve Al6061 alaşımında karşılaşılan yüksek hasarlı deformasyon bölgelerinin olmadığı net bir şekilde görülmüştür (Şekil 6.5 (c, d)). Ancak grafen takviye oranının artmasıyla abrasif aşınmanın ve parçaçık kopmalarının olduğu saptanmıştır. Aşınma izlerinin sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve kütle kaybı verileriyle de uyumlu olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.5. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 (a, b), Al6061-%0,1grafen (c, d), Al6061-%0,3grafen (e, f) ve Al6061-%0,5grafen (g, h) kompozitlere ait aşınma izleri

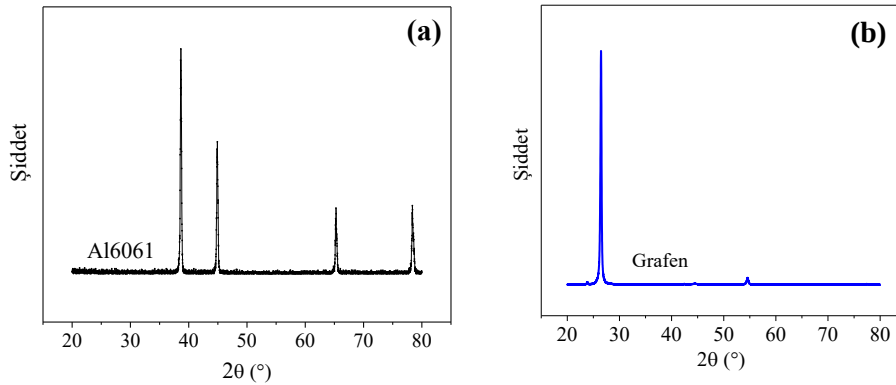
6.1.5. Tozların SEM ve XRD Faz Analizleri

Bu tez çalışmasında numune üretiminde kullanılan Al6061 alaşım ve grafen tozlarının görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Şekil 6.6(a)'da Al6061 tozlarının ortalama tanecik boyutunun 10 μm olduğu ve morfolojilerinin küresel olduğu görülmüştür. Şekil 6.6(b)'de katkı malzemesi olarak kullanılan grafenin ise SEM görüntülemesinde tabakalı formda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. Al6061 alaşım (a) ve grafen (b) tozlarına ait SEM görüntüleri

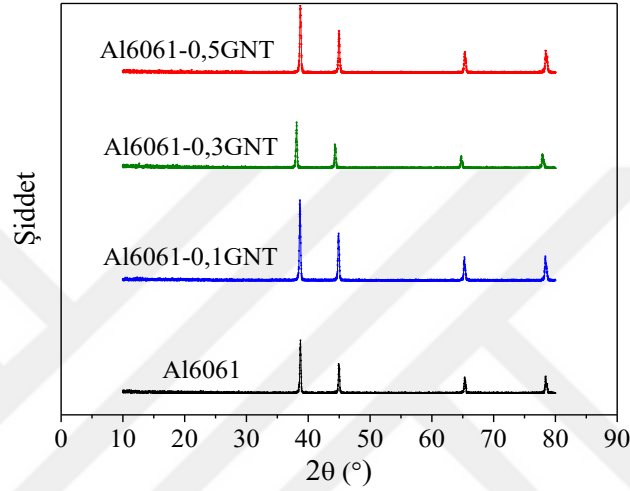
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan Al6061 alaşım ve grafen tozlarının faz analizleri Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazıyla gerçekleştirilmiştir. XRD örgü desenleri incelendiğinde; Al6061 alaşımının kırınım açılarının (2θ) $\sim 38^\circ$, 45° , 66° , 78° ve grafenin kırınım açısının (2θ) $\sim 26,5^\circ$ olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.7). Elde edilen bu değerlerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu analizlerle kompozit yapı içerisinde bulunan Al6061 alaşımı ve grafenin varlığı doğrulanabilecektir.



Şekil 6.7. Al6061 alaşım (a) ve grafen (b) tozlarına ait XRD faz analizleri

6.1.6. Üretilen Kompozitlerin XRD Faz Analizleri

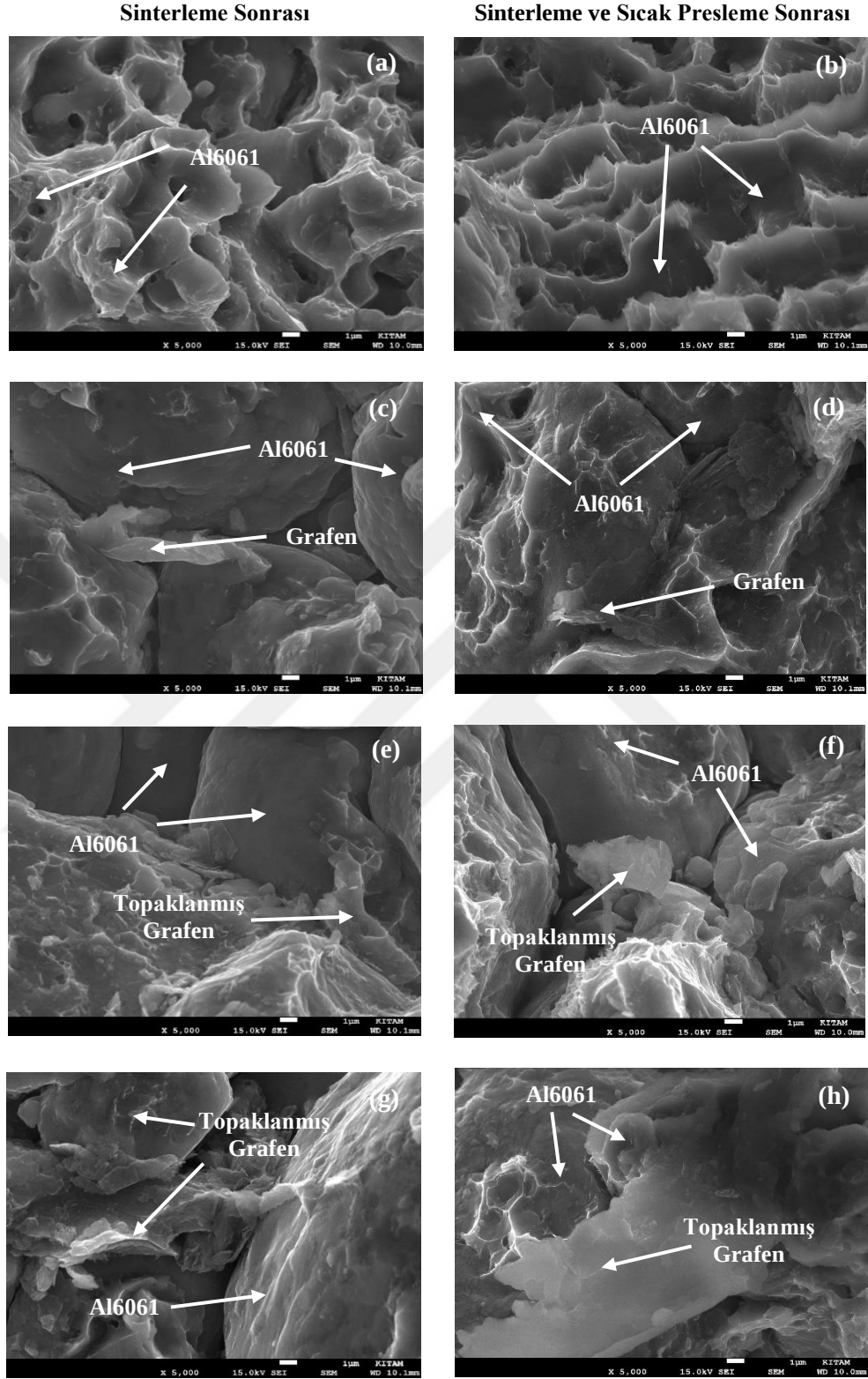
Al6061 alaşımasının ve Al6061-GNT kompozitlerin faz analizi Şekil 6.8’de verilmiştir. Al6061-GNT kompozitlerde alüminyumun varlığı kırınım açılarından ($2\theta \approx 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ, 78^\circ$) doğrulanmıştır. Ancak şekilden de görüleceği gibi herhangi bir grafen pikine rastlanmamıştır. Bu durum, X-ışını kırınımı cihazının düşük hassasiyetinden ve grafenin düşük katkı oranından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Al6061-GNT kompozit yapılarda ikincil faza rastlanmamıştır.



Şekil 6.8. Al6061 alaşımasının ve Al6061-GNT kompozitlerin XRD faz analizleri

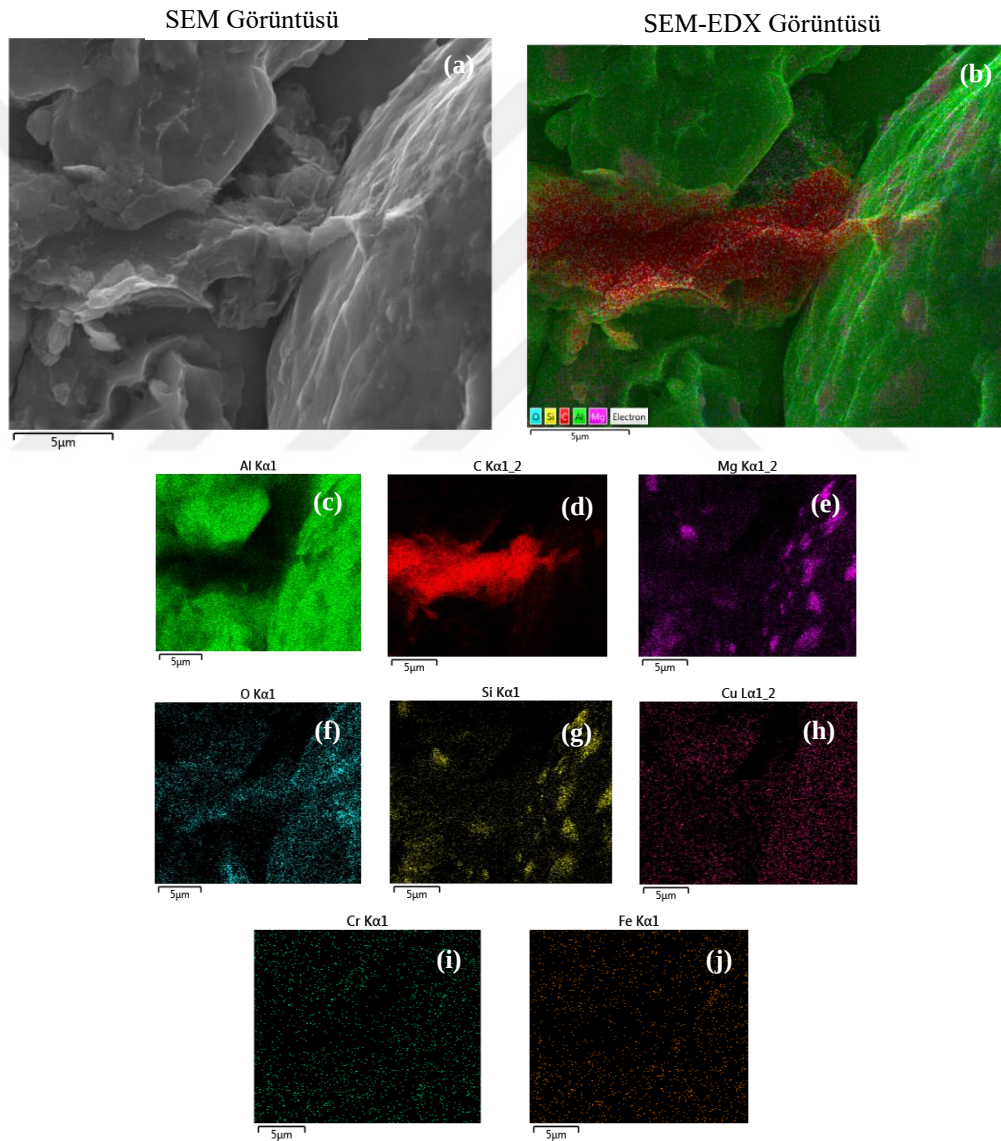
6.1.7. Kırılmış Yüzeylerin SEM ve SEM-EDX ile Analizleri

Bu çalışma kapsamında üretilen Al6061-GNT kompozitlerin kırık yüzey SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061 alaşımasının, Al6061-%0,1grafen, Al6061-%0,3grafen, Al6061-0,5grafen kompozitlerin kırılmış yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.9’da verilmiştir. İlk olarak referans olması için Al6061 alaşımasının sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş kırık yüzey SEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 6.9(a, b)). Al6061 alaşımın sinterleme sonrası sünek kırılma davranışı gösterdiği ve mikroyapıda sünek çukurların olduğu görülmektedir. Al6061 alaşımında sinterlendikten sonra sıcak preslemeyle gözeneklerin azaldığı tespit edilmiştir. Al6061-%0,1grafen, Al6061-%0,3grafen, Al6061-0,5grafen kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntülerinde grafenin alüminyumun tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür (Şekil 6.9(c-h)). Sıcak preslemeyle taneler arası etkileşimin arttığı gözenekliliğin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak grafen takviye oranının artmasıyla topaklanmaların olduğu gözlemlenmiştir.



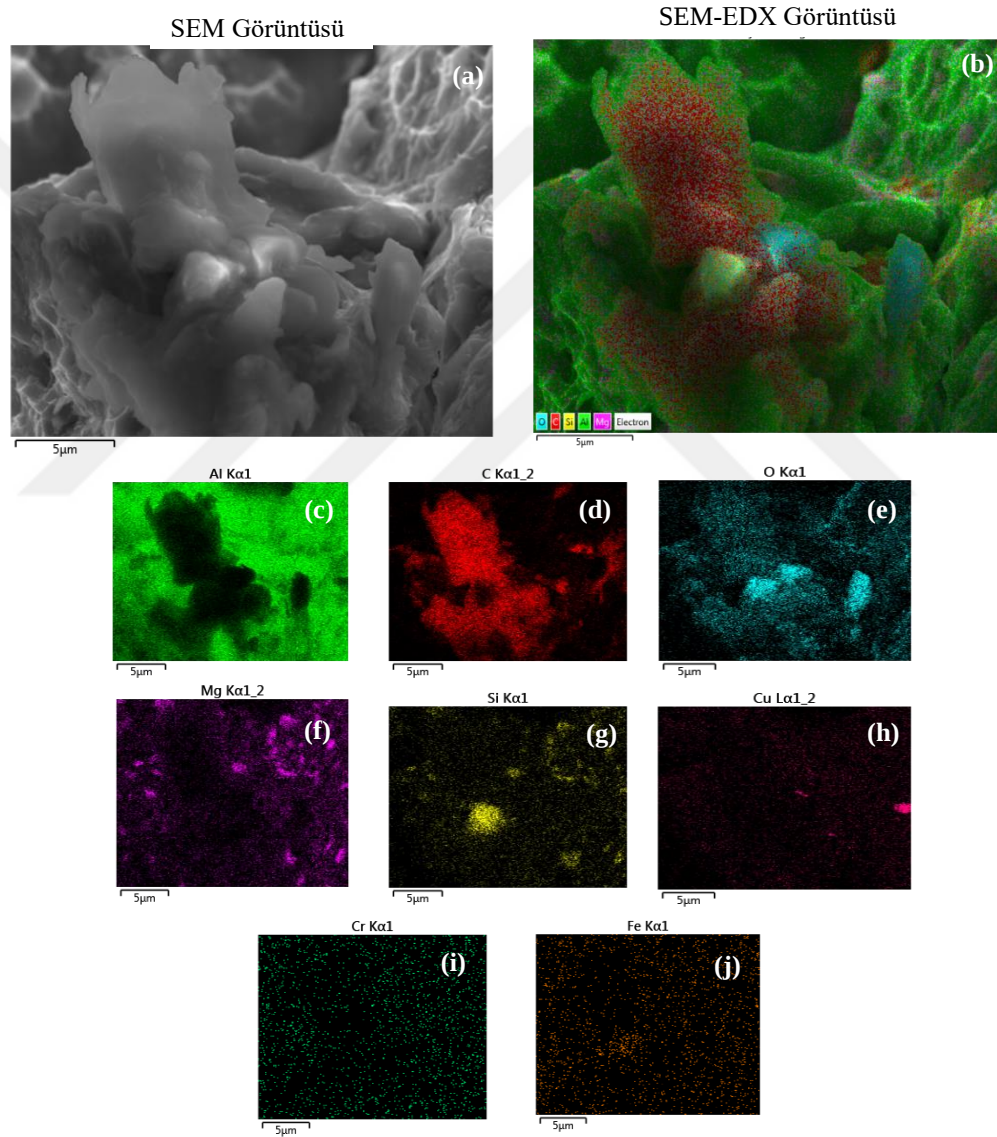
Şekil 6.9. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a, b), Al6061-%0,1GNT (c, d) Al6061-%0,3GNT (e, f) ve Al6061-%0,5GNT (g, h) kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri

Sadece sinterlenmiş Al6061-%0,5GNT kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.10'da verilmiştir. Kompozit yapı içerisindeki elementlerin (Al, C, O, Mg, Si, Cu, Cr, Fe) her biri farklı renk ile gösterilmiştir. Al, O, Mg, Si, Cu, Cr, Fe elementleri Al6061 dağılımını yansıtmaktadır. Al6061 alaşımının ana elementi alüminyum (Al) yeşil renk dağılımlı, karbon (C) elementinin bir allotropu olan grafen kırmızı renk dağılımlı olarak görülmektedir. Kırmızı renk dağılımına bakıldığında grafenin belli bölgelerde yoğun olarak kümелendiği tespit edilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olan topaklanmalar SEM-EDX analizi ile doğrulanmıştır.



Şekil 6.10. Sadece sinterlenen Al6061-0,5GNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,5GNT kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.11’de verilmiştir. Al6061 matris malzemesinin ana elementleri olan Al, O, Mg, Si, Cu, Cr ve Fe yapı içerisinde tespit edilmiştir. SEM-EDX element harita taramasından karbon (C) elementi ise grafeni temsil etmekte olup kırmızı renk ile gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde grafenin tane sınırlarında bulunduğu ve topaklandığı görülmektedir. Ayrıca indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunelerde mikroyapının sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.



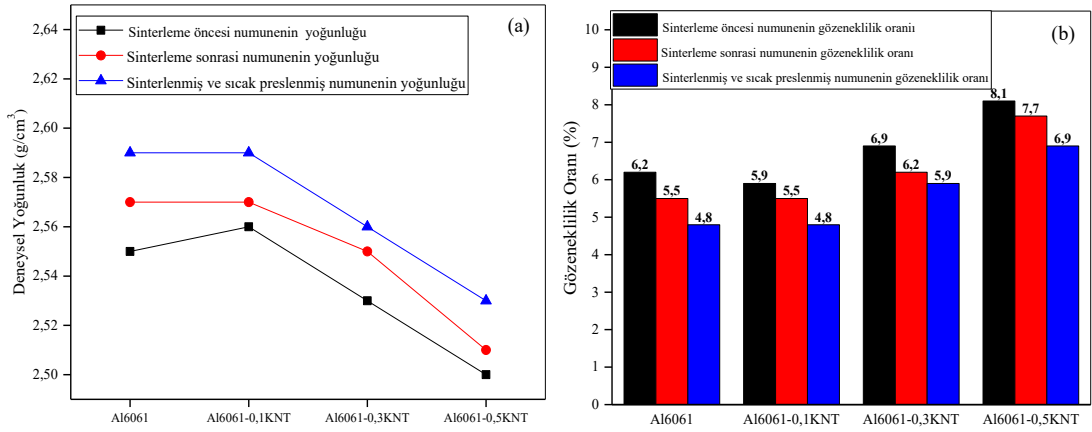
Şekil 6.11. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,5GNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

6.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analiz Sonuçları

6.2.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 KNT takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinin, deneysel yoğunluğa ve gözeneklilik oranına olan etkileri bu kısımda incelenmiştir.

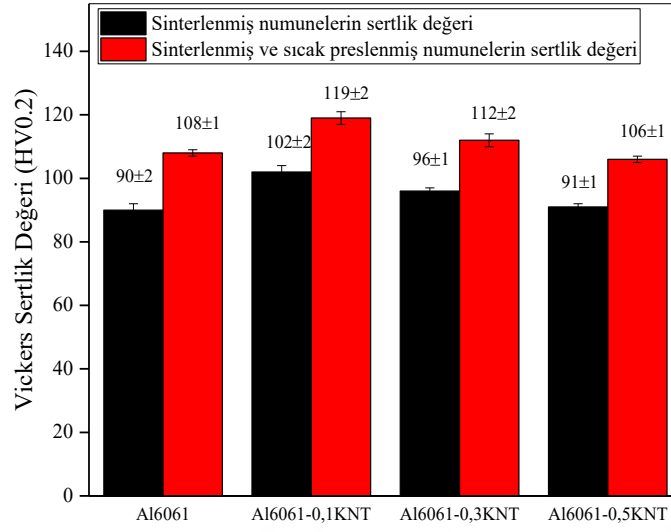
Üretilen karbon nanotüp katkılı Al6061 matrisli kompozitlerde, takviye oranı esas alınarak ham, sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş numunelerin yoğunluk ve gözeneklilik oranlarındaki değişim Şekil 6.12’de sunulmuştur. En yüksek yoğunluğa sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061 alaşımında ve %0,1KNT takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde ulaşılmış olup bu değer $2,59 \text{ g/cm}^3$ ’tür. Üretilen kompozitlerde en yüksek yoğunluk sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerde tespit edilmiştir. En düşük yoğunluk değeri ise $2,51 \text{ g/cm}^3$ olarak ham (sinterlenmemiş) ağırlıkça %0,5 karbon nanotüp takviyeli kompozitte ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0,1 karbon nanotüp takviye oranının aşılmasıyla yoğunluk düşüş eğilimine girmektedir. Üretilen kompozitlerde en yüksek gözeneklilik oranına (%8,1) ham (sinterlenmemiş) %0,5 karbon nanotüp takviyeli kompozit numunede ulaşılmıştır. En düşük gözeneklilik oranı (%4,8) sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş %0,1 karbon nanotüp takviyeli kompozitte tespit edilmiştir. Karbon nanotüp partiküllerinin kolay topaklanabilen bir yapıya sahip olması, takviye oranının artmasıyla çok duvarlı karbon nanotüpün etanol içerisinde dağılmasını güçleştirmektedir. Bu durumun da gözeneklilik oranının artmasına dolayısıyla yoğunluğun düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.12. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

6.2.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında üretilen ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 KNT takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertlikleri incelenmiştir. Farklı grafen takviye oranlarına sahip kompozitlerin sinterleme ve sıcak preslemeye bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim Şekil 6.13’de verilmiştir. Karbon nanotüp ilavesiyle birlikte her iki ısıtıl işlem türünde de (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) sertlik değerlerinde artış görülmüştür. En yüksek sertlik değeri (119 ± 2 HV), sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-%0,1KNT kompozit numunede ölçülmüştür. Karbon nanotüp takviyesinin plastik deformasyonunu engellemesi sebebiyle kompozitin sertliği iyileşmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1’den daha yüksek oranlardaki KNT takviyesinin sertliği düşürdüğü görülmektedir. KNT takviye oranının ağırlıkça %0,5 olduğu durumda numunenin dağılma eğilimi sergilediği ve bu durumun sertlik ölçümünü zorlaştırdığı gözlenmiştir. KNT yüksek spesifik yüzey alanına sahip olması sebebiyle sinterleme ve sıcak presleme sırasındaki ısıyı absorbe etmekte, ısıнын matris malzemesine olan etkisi engellenmekte ve bu nedenle de partiküllerin birbiriyle bağ yapması zorlaşmaktadır. Bu durumun da kompozitin sertliğini olumsuz yönde etkilediği öngörülmektedir.



Şekil 6.13. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT kompozitlerde ısıtılma işlemi türüne bağlı olarak sertlik değerinin değişimi

Kompozit yapılarda takviye elemanının mukavemeti ve boyutu üretilen kompozitin dayanımını etkilemektedir. Karbon nanotüp partiküller arasındaki mesafe Eşitlik (6.4) kullanılarak teorik olarak belirlenebilmektedir. Bu eşitlikte r ve f sırasıyla karbon nanotüp partiküllerinin yarıçapı ve hacimsel katkı oranıdır.

$$\lambda = [4r(1 - f)]/(3r) \quad (6.4)$$

Karbon nanotüp katkı oranının artmasıyla alüminyum tanecikler arasındaki mesafe azalmaktadır. Al tanecikler arasındaki mesafe λ ile kayma gerilmesi τ_0 arasındaki ilişki Eşitlik (6.5)'de ifade edilmiştir.

$$\tau_0 = Gb/\lambda \quad (6.5)$$

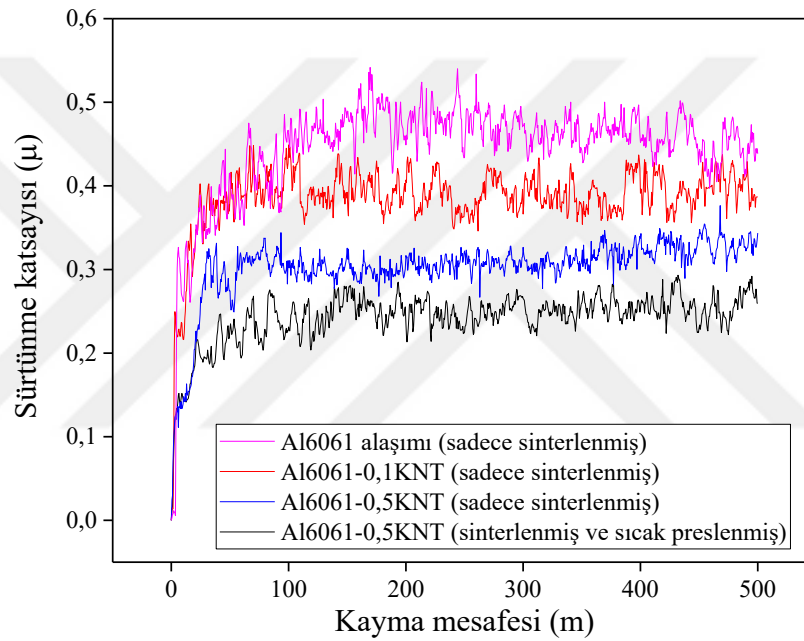
Burada b Burger vektörünü ifade etmektedir. Tanecikler arasındaki mesafenin azalmasıyla karbon nanotüp katkılı alüminyum matrisli kompozitin dayanımı da artmaktadır. Karbon nanotüp kompozit yapı içerisinde dislokasyon hareketini engellemekte ve bu durum da mukavemetin artışına sebep olmaktadır.

Kompozit malzemeye yapılan takviyeler sonucunda mekanik özelliklerdeki artış Eşitlik (6.6) ile ifade edilebilmektedir. Burada, σ_t ve σ_a takviye ve ana malzemenin mukavemetini, f_t ve f_a takviye ve ana malzemenin hacimsel katkı oranını belirtmektedir.

$$\sigma_c = \sigma_a f_a + \sigma_t f_t \quad (6.6)$$

6.2.3. Aşınma Test Sonuçları

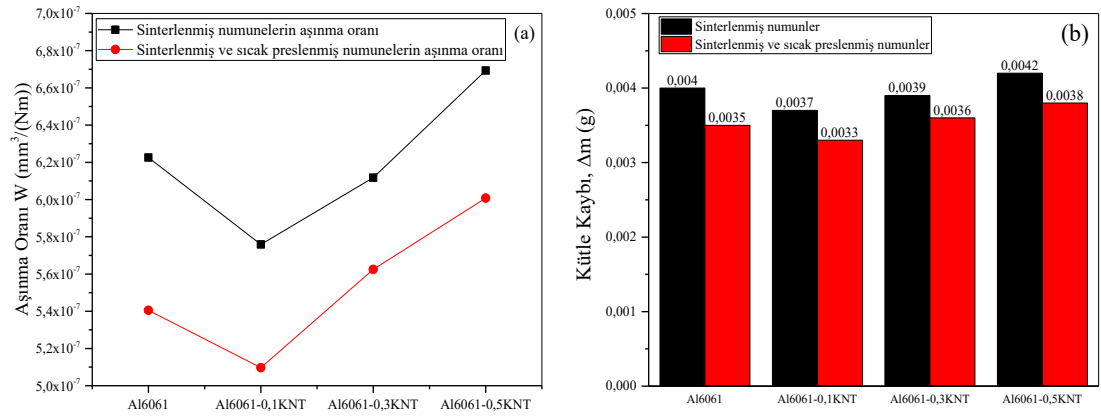
Bu bölümde, ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 KNT takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin kuru şartlarda $P=5$ N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonuçları analiz edilmiştir. Sinterlenmiş Al6061 alaşımı ve disk arasındaki ortalama kuru sürtünme katsayısı (μ) 0,45 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.14). Sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş Al6061-%0,5KNT ve disk arasındaki ortalama sürtünme katsayısı (μ) 0,24'e düşmüştür. Karbon esaslı malzeme takviyeli metal matrisli kompozitlerde gözlenen doğal yağlayıcı film yapısı sürtünme katsayısını önemli oranda düşürmektedir.



Şekil 6.14. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri

Al6061 alaşımı ile ve Al6061-KNT kompozit yapılarda, takviye malzemesi KNT katkı oranının ve sinterleme-sıcak presleme işlemlerinin kütle kaybı üzerine olan etkisi Şekil 6.15'de verilmiştir. En yüksek aşınma oranı ($6,7 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) sadece sinterlenmiş Al6061-%0,5KNT kompozitte tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı ($5,1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT kompozitte elde edilmiştir. Aşınma oranına paralel olarak en yüksek kütle kaybı (0,0042 g) Al6061-%0,5KNT kompozitte görülürken; en az kütle kaybı (0,0033 g) Al6061-0,1KNT kompozit yapıda gözlenmiştir. Ağırlıkça %0,1'in üzerindeki katkı oranında karbon nanotüp partikülleri alüminyum matris içerisinde homojen

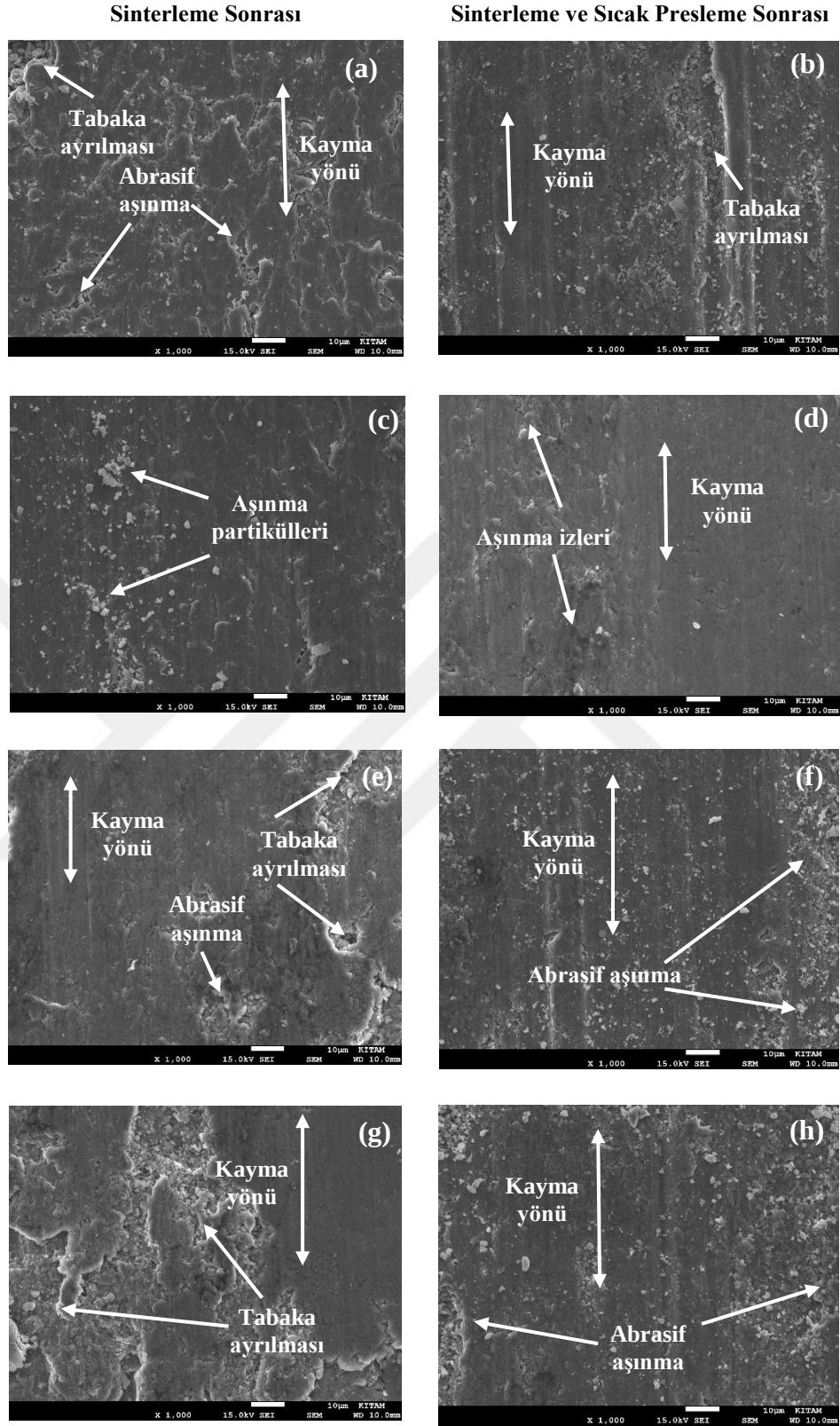
dağılmadığından matris malzemeler arasındaki bağı zayıflatmıştır. Bu sebeple de aşınma oranı ve kütle kaybı artmıştır.



Şekil 6.15. Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değişimi

6.2.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskobik Analizi

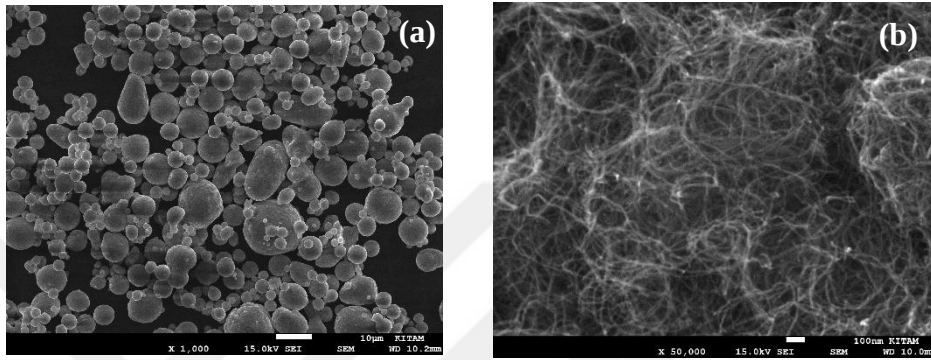
Aşınma testi sonrasında aşınan yüzeylerin morfolojileri SEM cihazı yardımıyla incelenmiştir (Şekil 6.16). Tüm numunelere ait aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde abrasif aşınma izleri gözlenmiştir. Ayrıca en derin aşınma izleri alüminyum alaşımda tespit edilmiştir (Şekil 6.16(a, b)). Al6061-%0,1KNT kompozitine ait aşınma görüntüleri incelendiğinde; karbon nanotüpün katı yağlayıcı özelliği sayesinde aşınma direncinin arttığı ve Al6061 alaşımında karşılaşılan yüksek hasarlı deformasyon bölgelerinin oluşmadığı net bir şekilde görülmüştür (Şekil 6.16(c, d)). Aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde özellikle karbon nanotüp takviye oranının %0,1'in üzerine çıkmasıyla abrasif aşınmanın yoğunlaştığı ve yüzeyde parçaçık kopmalarının olduğu saptanmıştır (Şekil 6.16(e-h)). Numunelere ait aşınma izi görüntülerinin sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve kütle kaybı verileriyle de uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.16. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a, b), Al6061-%0,1KNT (c, d), Al6061-%0,3KNT (e, f), Al6061-%0,5KNT (g, h) kompozitlere ait aşınma izleri

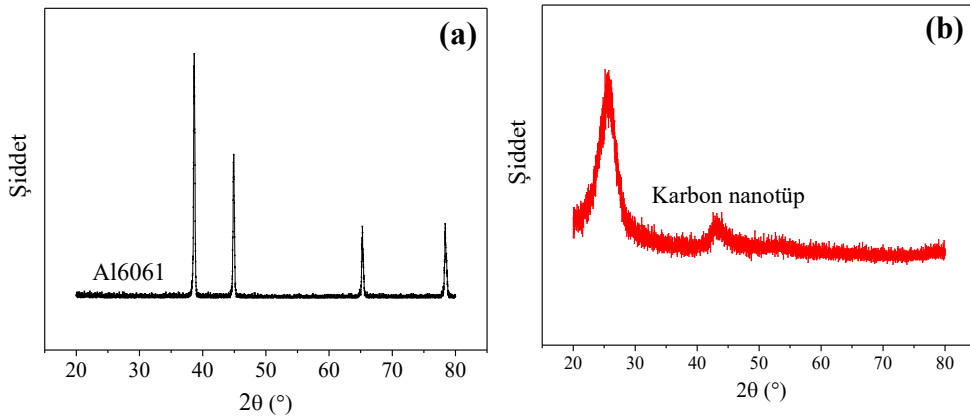
6.2.5. Tozların SEM ve XRD Faz Analizleri

Bu tez çalışmasında numune üretiminde kullanılan Al6061 alaşım ve karbon nanotüp tozlarının görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Şekil 6.17(a)'da Al6061 alaşım tozlarının genellikle düzensiz bir morfolojiye sahip olduğu görülmüştür. Şekil 6.17(b)'de takviye malzemesi olarak kullanılan karbon nanotüpe ait SEM görüntüsünden karbon nanotüpün nano boyutlu silindirik yapıdaki tüplerden oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 6.17. Al6061 alaşımı (a) ve KNT (b) tozlarına ait SEM görüntüleri

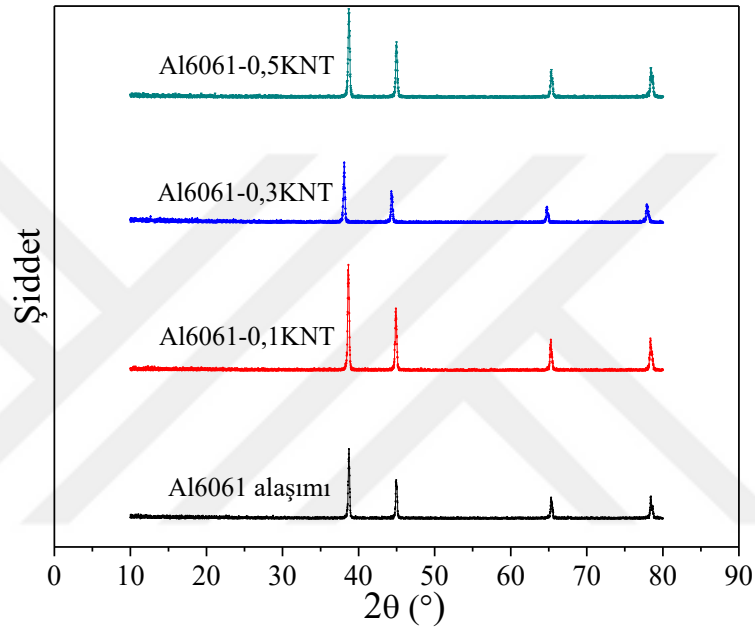
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan Al6061 alaşım ve KNT tozlarının faz analizleri Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazıyla gerçekleştirilmiştir. XRD örgü desenleri incelendiğinde; Al6061 alaşımının kırınım açılarının (2θ) $\sim 38^\circ$, 45° , 66° , 78° ve KNT'nin kırınım açılarının (2θ) $\sim 25,8^\circ$, $44,1^\circ$ olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.18). Elde edilen bu değerlerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu analizlerle kompozit yapı içerisinde bulunan Al6061 alaşımının ve karbon nanotüpün varlığı doğrulanabilecektir.



Şekil 6.18. Al6061 alaşım (a) ve karbon nanotüp (b) tozlarına ait XRD faz analizleri

6.2.6. Üretilen Kompozitlerin XRD Faz Analizleri

Al6061 alaşımasının ve Al6061-KNT kompozitlerin faz analizi Şekil 6.19’da verilmiştir. Al6061-KNT kompozitlerde alüminyumun varlığı kırınım açılarından ($2\theta \approx 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ, 78^\circ$) doğrulanmıştır. Ancak şekilden de görüleceği gibi herhangi bir karbon nanotüp pikine rastlanmamıştır. Bu durum, X-ışını kırınımı cihazının düşük hassasiyetinden ve karbon nanotüpün düşük katkı oranından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Al6061-KNT kompozit yapılarda ikincil faza rastlanmamıştır.



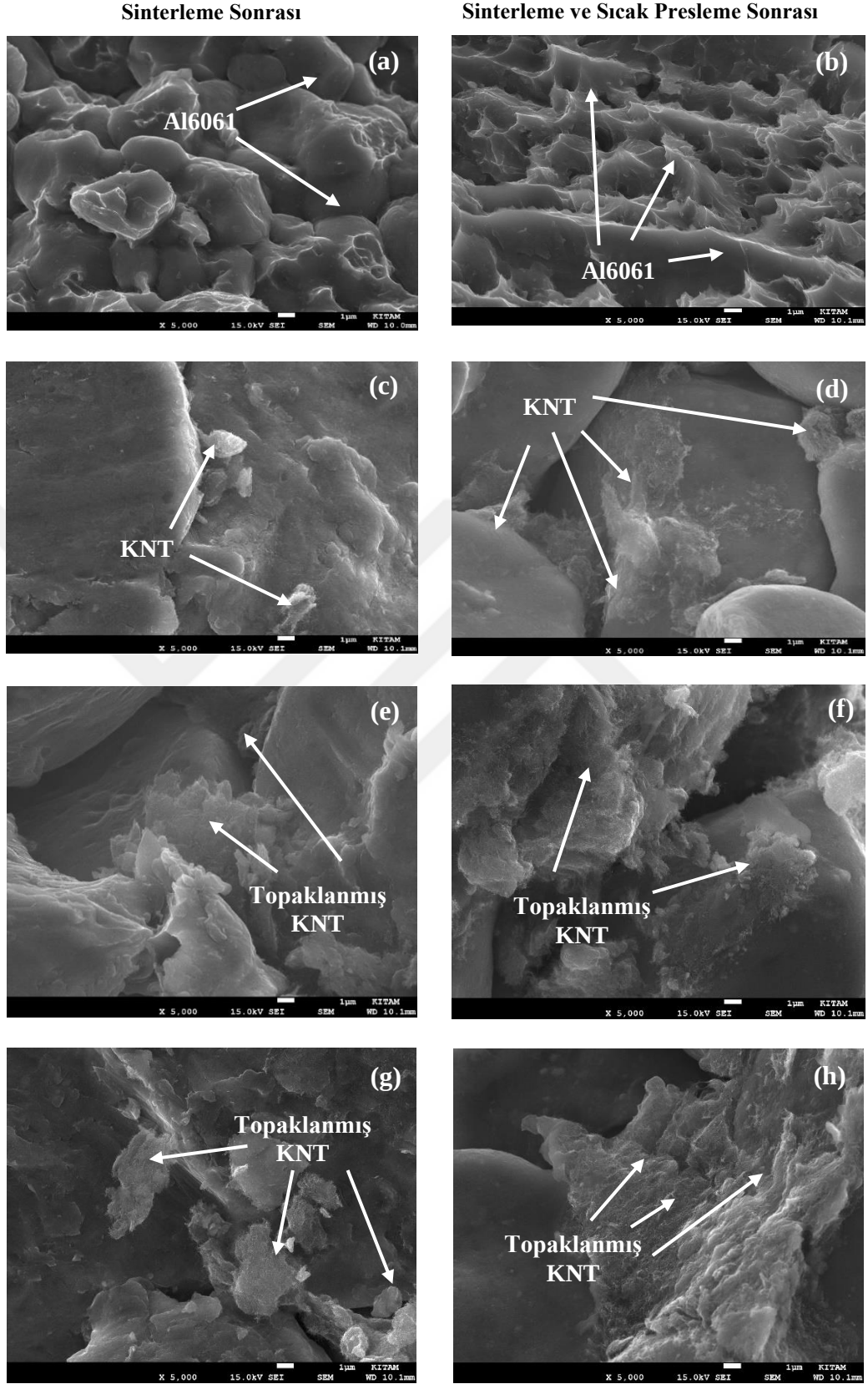
Şekil 6.19. Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait XRD faz analizleri

6.2.7. Kırılmış Yüzeylerin SEM ve SEM-EDX ile Analizleri

Bu çalışma kapsamında üretilen Al6061-KNT kompozitlerin kırık yüzey SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061 alaşımı, Al6061-%0,1KNT, Al6061-%0,3KNT ve Al6061-0,5KNT kompozitlerin kırılmış yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.20’de verilmiştir. Al6061 alaşımasının sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş kırık yüzey SEM görüntüsü incelendiğinde sinterleme sonrası kırılmanın tane sınırlarında meydana geldiği görülmüştür (Şekil 6.20(a, b)). Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen alaşımın sünek kırılma davranışı gösterdiği ve yapıda sünek çukurların varlığı tespit edilmiştir. Al6061-%0,1KNT kompozitin kırık SEM görüntüleri incelendiğinde; karbon nanotüpün kompozit yapı içerisinde tane sınırlarında

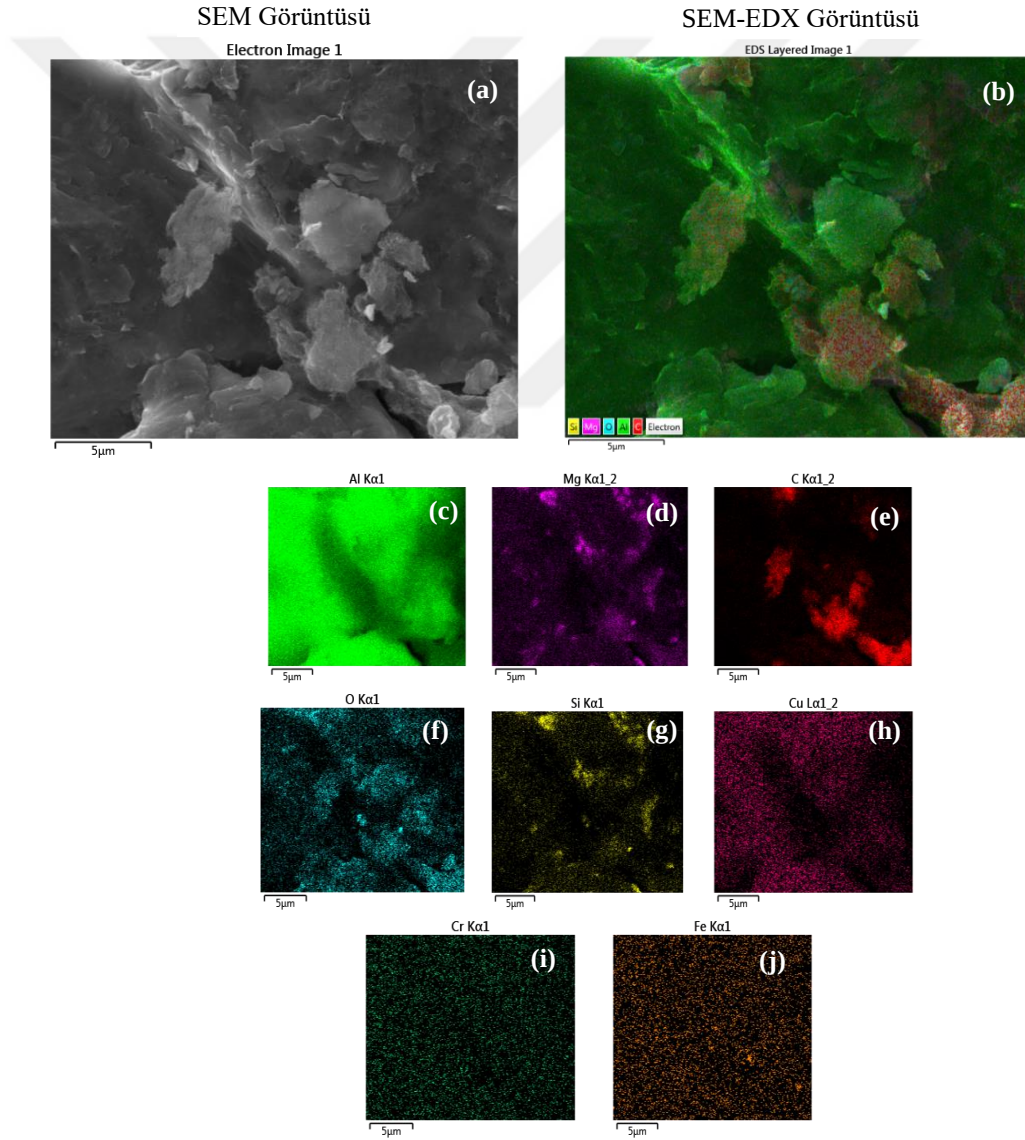
bulunduğu ve özellikle sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak presleme sonrası karbon nanotüpün alüminyumun tane sınırlarını kapladığı net bir şekilde görülmüştür ( ekil 6.20(c, d)). Bu sayede, sinterlemenin etkisiyle güçlü bir arayüz etkisi oluşmuştur. Al6061-%0,3KNT ve Al6061-0,5KNT kompozitlerde ise karbon nanotüpün topaklandığı gözlemlenmiştir ( ekil 6.20(e-h)). Karbon nanotüplerin bir metal matris içerisinde dağılımlarını; karbon nanotüplerin yönelimi, karbon nanotüp/matris malzeme arasındaki adezyon kuvvetleri, karbon nanotüpün en/boy oranı, matristeki karbon nanotüplerin hacim veya ağırlık oranı gibi birçok faktör etkilemektedir ( enel, 2021). Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş tüm numunelerin sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha yoğun bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.





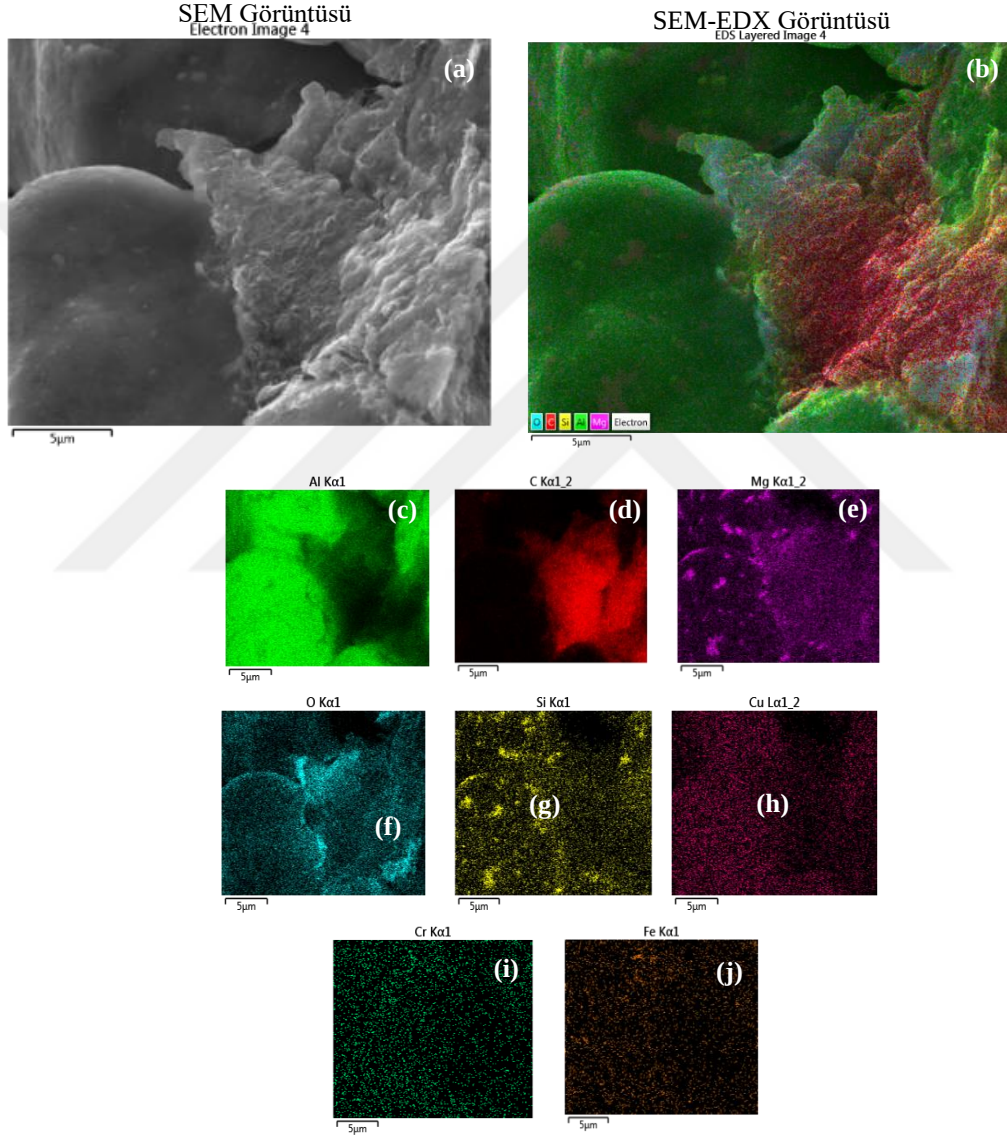
Şekil 6.20. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a, b), Al6061-%0,1KNT (c, d), Al6061-%0,3KNT (e, f), Al6061-0,5KNT(g, h) kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri

Sadece sinterlenmiş Al6061-%0,5KNT kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.21’de verilmiştir. Kompozit yapı içerisinde bulunan Al, C, Mg, O, Si, Cu, Cr, Fe elementlerinin her biri farklı bir renk ile gösterilmiştir. Al, Mg, Si, Cu, Cr, Fe elementleri Al6061 alaşımının dağılımını temsil etmektedir. Al6061 alaşımının ana elementi olan alüminyum (Al) yeşil renk dağılımlı, karbon (C) elementi ise karbon nanotüpü temsil etmekte olup kırmızı renk dağılımlı olarak sunulmuştur. Kırmızı renkteki C element dağılımı incelendiğinde; karbon nanotüpün belli bir bölgede yoğun olarak kümелendiği açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumun kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği öngörülmektedir.



Şekil 6.21. Sadece sinterlenen Al6061-0,5KNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,5KNT kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.22’de verilmiştir. Al6061 matris malzemesinin ana elementleri olan Al, O, Mg, Si, Cu, Cr ve Fe yapı içerisinde tespit edilmiştir. C elementi ise karbon nanotüpü temsil etmekte olup kırmızı renk ile gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde karbon nanotüpün kompozit yapı içerisinde homojen dağılmadığı ve tane sınırlarında topaklandığı görülmüştür. Bu durum test sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

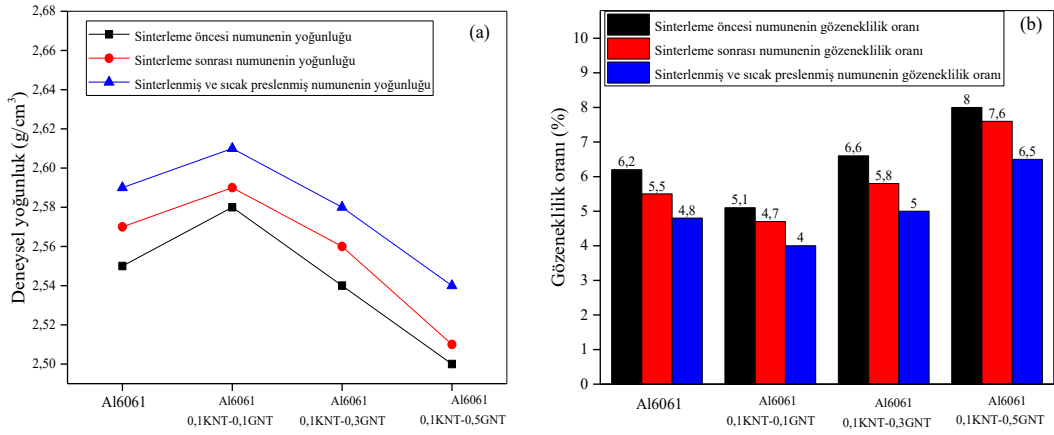


Şekil 6.22. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,5KNT kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

6.3. Grafen ve Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analiz Sonuçları

6.3.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

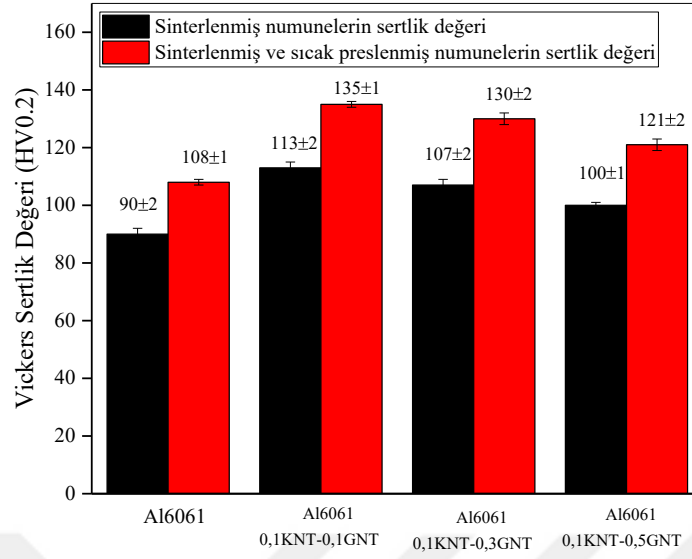
Daha önceki bölümde yürütülen çalışmada en uygun KNT takviye oranı ağırlıkça %0,1 olarak belirlenmiştir. Bu KNT takviye oranı sabit tutulup ağırlıkça farklı grafen katkı oranlarında (%0,1, 0,3, 0,5) Al6061-%0,1KNT-Grafen hibrit kompozitler üretilmiştir. Alüminyum hibrit kompozit yapılarda grafen katkı oranının ve sinterleme-indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinin deneysel yoğunluğa ve gözeneklilik oranına etkisi Şekil 6.23’de verilmiştir. %0,1KNT-%0,1GNT ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli kompozit numunelerde yoğunluk artış eğilimi göstermiş ve $2,61 \text{ g/cm}^3$ en yüksek değer olarak tespit edilmiştir. Nano boyutlu grafen ve karbon nanotüpün yoğunluğa önemli katkı sunduğu görülmüş olup bu durum nano boyutlu partiküllerin alüminyum tanecikler arasındaki boşlukları doldurmasına dayandırılmıştır. Grafen katkı oranı arttıkça yoğunlukta azalma gözlenmiş ve $2,5 \text{ g/cm}^3$ ile en düşük yoğunluk oranı %0,1KNT-%0,5GNT ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli sinterlenmemiş numunelerde ölçülmüştür. Bu durumun herhangi bir ısıtma işlemin uygulanmamasından ve nano takviye partiküllerin topaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretilen kompozitlerde en yüksek gözeneklilik oranına %8 ile %0,1KNT-%0,5GNT ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli sinterlenmemiş numunelerde ulaşılmıştır. En düşük gözeneklilik oranı (% 4,02) olarak %0,1KNT-%0,1GNT ikili takviyeli Al6061 matrisli sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş numunede tespit edilmiştir. Sinterleme ve indüksiyonla sıcak preslemenin yüksek difüzyon oranı sağladığı ve yapıdaki gözeneklerin eliminasyonunu arttırdığı düşünülmektedir. Ancak grafen takviye oranı arttıkça homojen dağılımın sağlanamaması sonucu, oluşan topaklanmalar ısıtmanın alüminyum tanelerine nüfuzunu etkilemiş ve yapıdaki gözeneklilik oranını artırmıştır.



Şekil 6.23. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

6.3.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

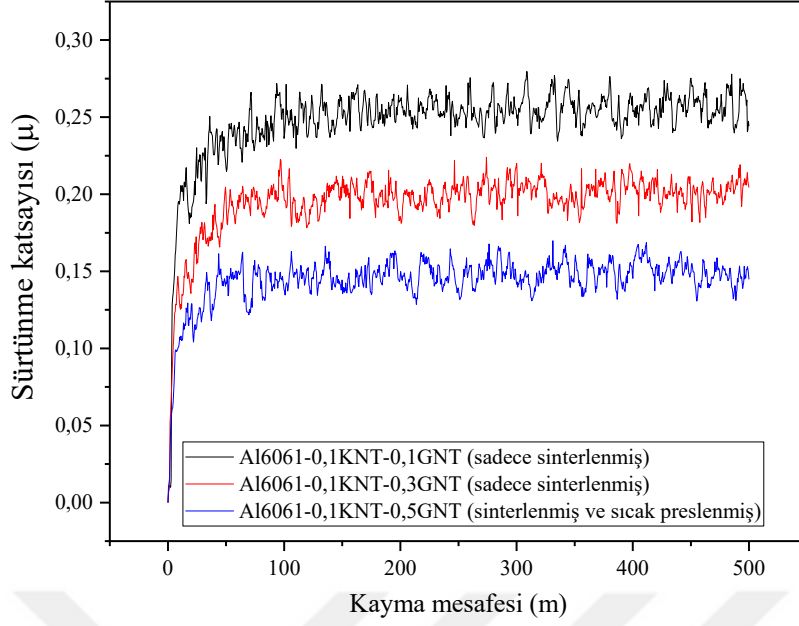
Bu tez çalışması kapsamında üretilen, Al6061-%0,1KNT-xGNT (x =ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) hibrit kompozitlerin sinterleme ve indüksiyonla sıcak preslemeye bağlı olarak Vickers sertlikleri incelenmiştir (Şekil 6.24). Karbon nanotüp ve grafen takviyesinin ağırlıkça %0,1 katkı oranına kadar her iki ısıtıl işlem türünde de (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) alüminyum hibrit kompozitlerin sertlik değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Nano boyutlu KNT ve grafen elemanlarının dislokasyon hareketlerini engelleyerek alüminyum hibrit kompozitin sertliğini arttırdığı düşünülmektedir. En yüksek sertlik değeri ($135 \pm HV$), sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş %0,1KNT-%0,1GNT ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli kompozit numunede ölçülmüştür. Grafen takviye oranı ağırlıkça %0,1'in üzerine çıkıldığında kompozit numunelerin sertliğinde düşüş tespit edilmiştir. Bu durumun takviye malzemelerin homojen dağılamaması ve dolayısıyla ısıtıl işlemlerle (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme) beklenen matris-takviye elemanı arasındaki güçlü ara yüzey bağının sağlanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.24. Al6061 alaşımında ve Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak sertlik değerinin değişimi

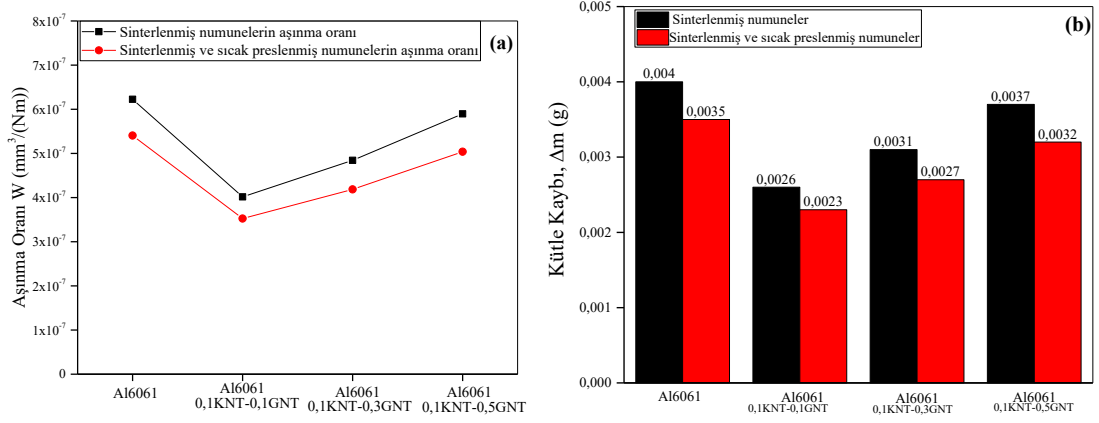
6.3.3. Aşınma Test Sonuçları

Bu bölümde, Al6061-%0,1KNT-xGNT (x=ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) hibrit kompozitlerin kuru şartlarda P=5 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonuçları analiz edilmiştir. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı (μ) Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozit ile paslanmaz çelik disk arasında 0,25 olarak belirlenmiştir. En düşük ortalama sürtünme katsayısı (μ) ise Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT hibrit kompozit ile paslanmaz çelik disk arasında 0,15 olarak tespit edilmiştir. Karbon esaslı grafinin kendinden yağlayıcı özelliği sayesinde sürtünme katsayısını düşürdüğü öngörülmektedir. Ayrıca temas yüzeyinde kayma esnasında yüzeyi sürtünmeye karşı koruma eğiliminde olan takviye elemanları yük taşıyıcı elemanlar olarak hareket ederler. Bu sebeple de sürtünme katsayısı düşmektedir.



Şekil 6.25. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri

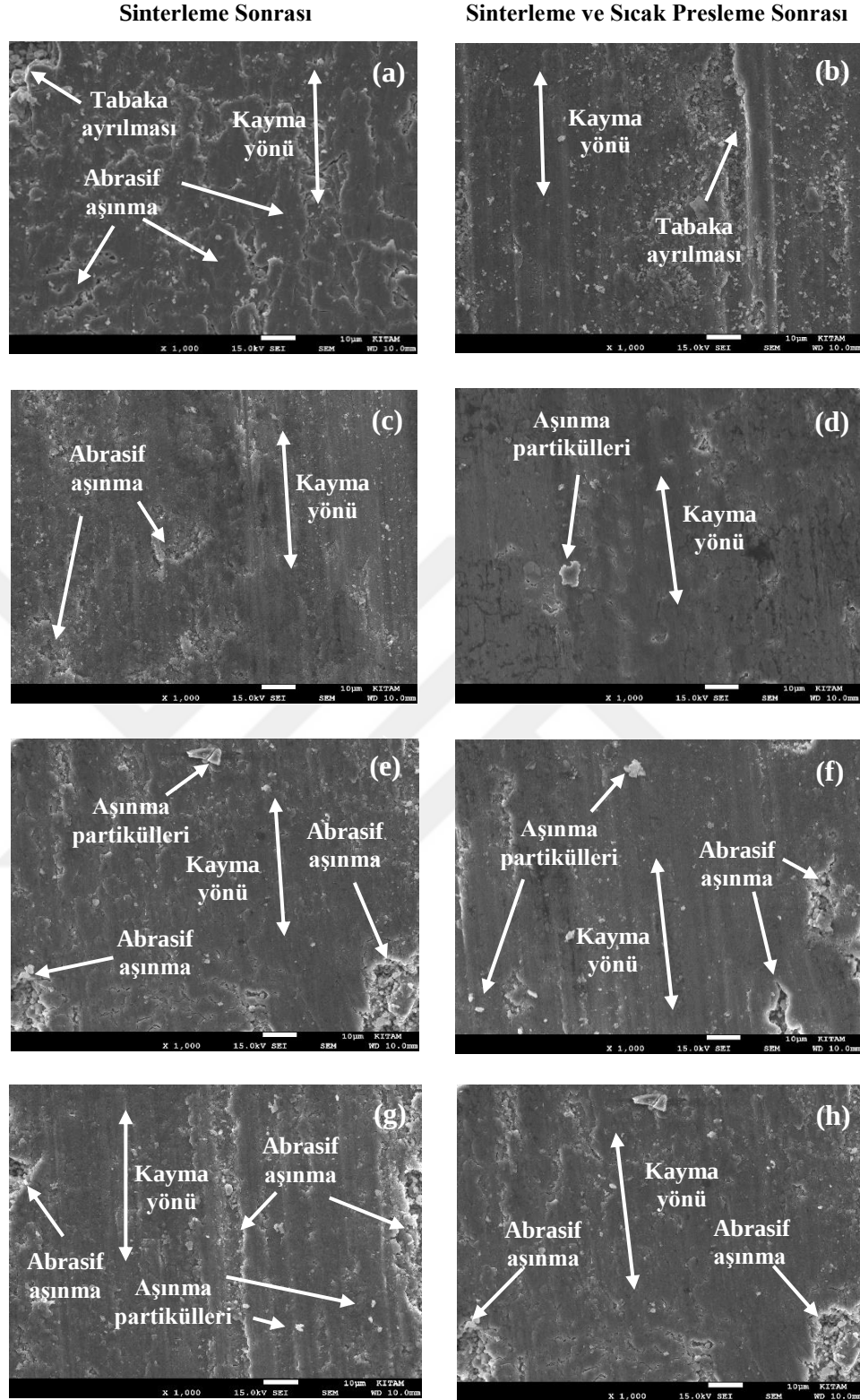
Yapılan testler sonucunda Al6061-%0,1KNT-xGNT (x=ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) hibrit kompozit numunelerde sinterleme ve sıcak presleme işlemlerine bağlı olarak kütle kaybı ve aşınma oranlarındaki değişim Şekil 6.26’da verilmiştir. En fazla kütle kaybı (0,0040 g) sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımında gerçekleşmiştir. Üretilen numunelerde en az kütle kaybı (0,0023 g) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozit numunede tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0,1GNT takviyeli alüminyum hibrit kompozit yapının aşınma oranında düşüş gözlenirken grafen takviye oranı arttıkça aşınma oranı da artmaktadır. En yüksek aşınma oranı ($6,22 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımında tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı ($3,52 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş ağırlıkça %0,1KNT-%0,1GNT ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli kompozit numunede görülmüştür. Kompozitlerin aşınma oranı ve kütle kaybı, takviyelerin matris faz içerisindeki dağılımına ve matris ve takviye eleman arasındaki arayüzey bağı gibi içyapı özelliklerine bağlıdır.



Şekil 6.26. Al6061-KNT-GNT hibrit kompozit numunelere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değişimi

6.3.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskopik Analizi

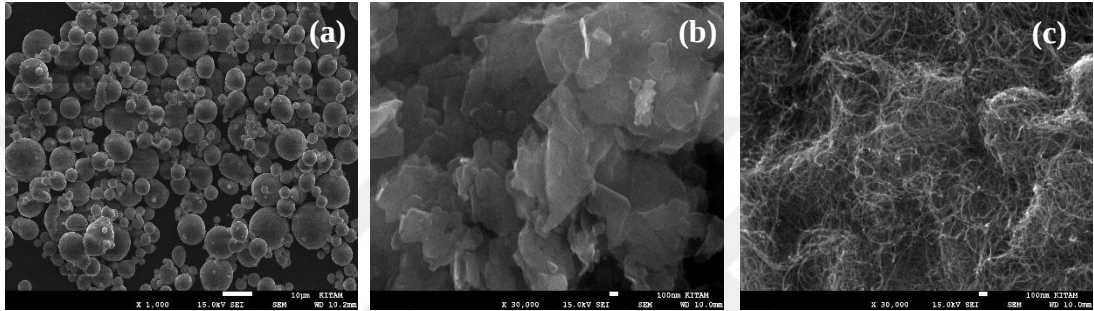
Aşınma testi sonrasında aşınan yüzeylerin görüntüleri SEM cihazı yardımıyla incelenmiştir (Şekil 6.27). Bu incelemeler sonucunda numunelerin tamamında abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu gözlenmiştir. Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozitine ait aşınma görüntüleri incelendiğinde; aşınma oranı ve kütle kaybı verileriyle de uyumlu olarak yüksek hasarlı bölgelerin oluşmadığı görülmüştür (Şekil 6.27(c, d)). Ancak grafen takviye oranının %0,1'in üzerine çıkmasıyla abrasif aşınma ve parçacık kopmalarında artış saptanmıştır (Şekil 6.27(e-h)).



Şekil 6.27. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 (a, b), Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT (c, d), Al6061-%0,1KNT-%0,3GNT (e, f), Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT (g, h) kompozitlere ait aşınma izleri

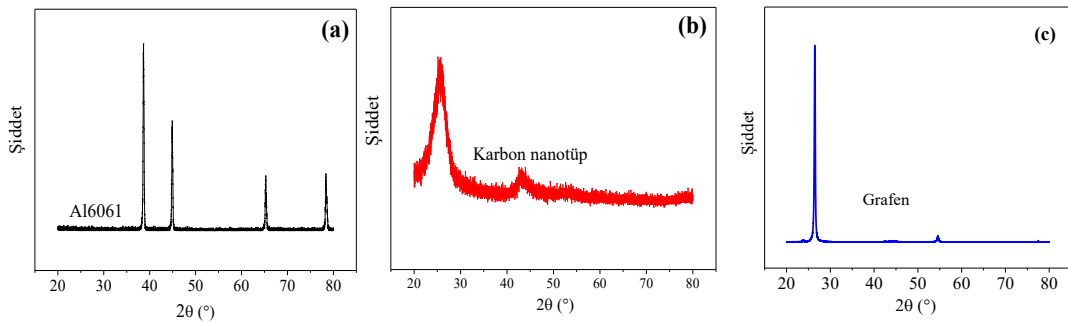
6.3.5. Tozların SEM ve XRD Faz Analizleri

Bu tez çalışmasında kullanılan Al6061 alaşım, grafen ve karbon nanotüp tozlarının görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Şekil 6.28(a)'da Al6061 alaşım tozların morfolojilerinin küresel yapıda olduğu görülmektedir. Takviye malzemesi olarak kullanılan grafenin SEM görüntüsünde bu tozun tabakalı bir formda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.28(b)). Diğer takviye malzemesi olan karbon nanotüp tozunun ise nano boyutlu tüplerden oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.28(c)).



Şekil 6.28. Al6061 alaşım (a), GNT (b) ve KNT (c) tozlarına ait SEM görüntüleri

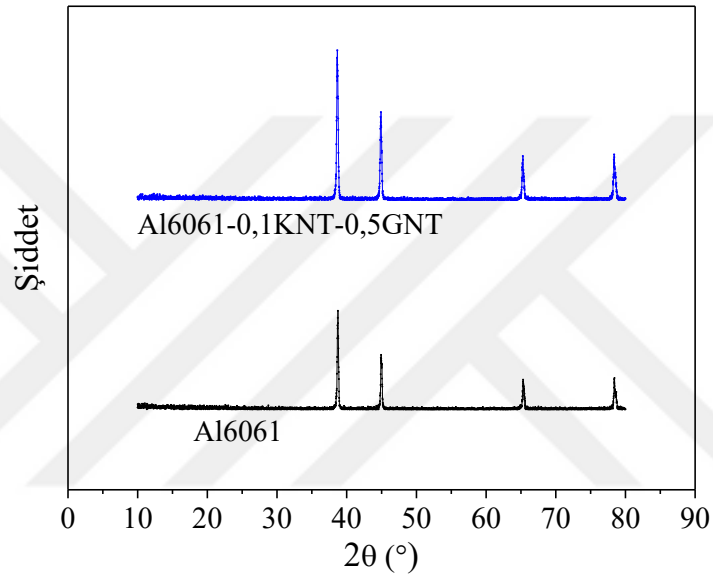
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan Al6061 alaşım, karbon nanotüp ve grafen tozların faz analizleri Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden Al6061 alaşımının kırınım açılarının (2θ) $\sim 38^\circ$, 45° , 66° , 78° , KNT'nin kırınım açılarının (2θ) $\sim 25,8^\circ$, $44,1^\circ$ olduğu ve grafenin kırınım açısının (2θ) $\sim 26,5^\circ$ olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.29). Bu inceleme, Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitin XRD faz yapısının belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.



Şekil 6.29. Al6061 alaşım (a), KNT (b) ve GNT (c) tozlarına ait XRD faz analizleri

6.3.6. Üretilen Kompozitlerin XRD Faz Analizleri

Al6061 alaşımasının ve Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitin faz analizleri Şekil 6.30’da verilmiştir. Al6061 alaşımında alüminyumun varlığı kırınım açılarından ($2\theta \approx 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ, 78^\circ$) doğrulanmıştır. Ancak alüminyum hibrit yapıya ait XRD faz analizinde, herhangi bir karbon nanotüp ve grafen pikine rastlanmamıştır. Bu durum, X-ışını kırınımı cihazının düşük hassasiyetinden ve grafenin düşük katkı oranından kaynaklanmaktadır. Ayrıca alüminyum hibrit kompozit yapıda ikincil bir faza rastlanmamıştır.



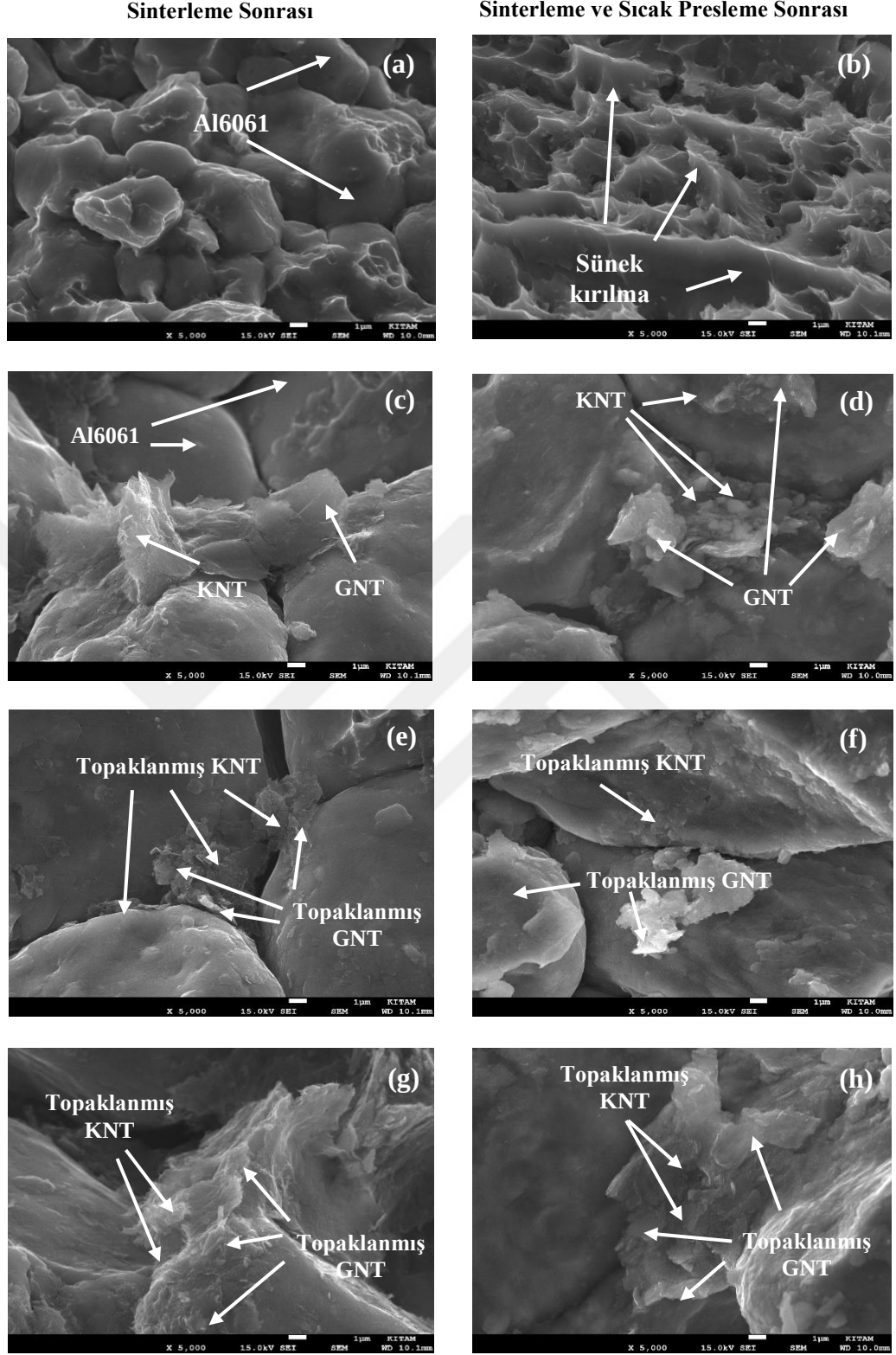
Şekil 6.30. Al6061 alaşımı ve Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitin XRD faz analizleri

6.3.7. Kırılmış Yüzeylerin SEM ve SEM-EDX ile Analizleri

Bu çalışma kapsamında Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerin kırık yüzey SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş ve sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061 alaşımının, Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT, Al6061-%0,1KNT-%0,3GNT ve Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.31’de verilmiştir. Tüm kırık yüzey SEM görüntülerinden mikroyapının oldukça yoğun olduğu görülmüştür. Alüminyum hibrit kompozitlere ait SEM görüntüleri incelendiğinde, karbon nanotüp ve grafenin alüminyum tane sınırlarına yerleştiği tespit edilmiştir. Sinterlenmiş numunelerle karşılaştırıldığında sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin daha yoğun bir yapıda olduğu ve indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerde daha belirgin bir boyun oluşumu gerçekleştiği

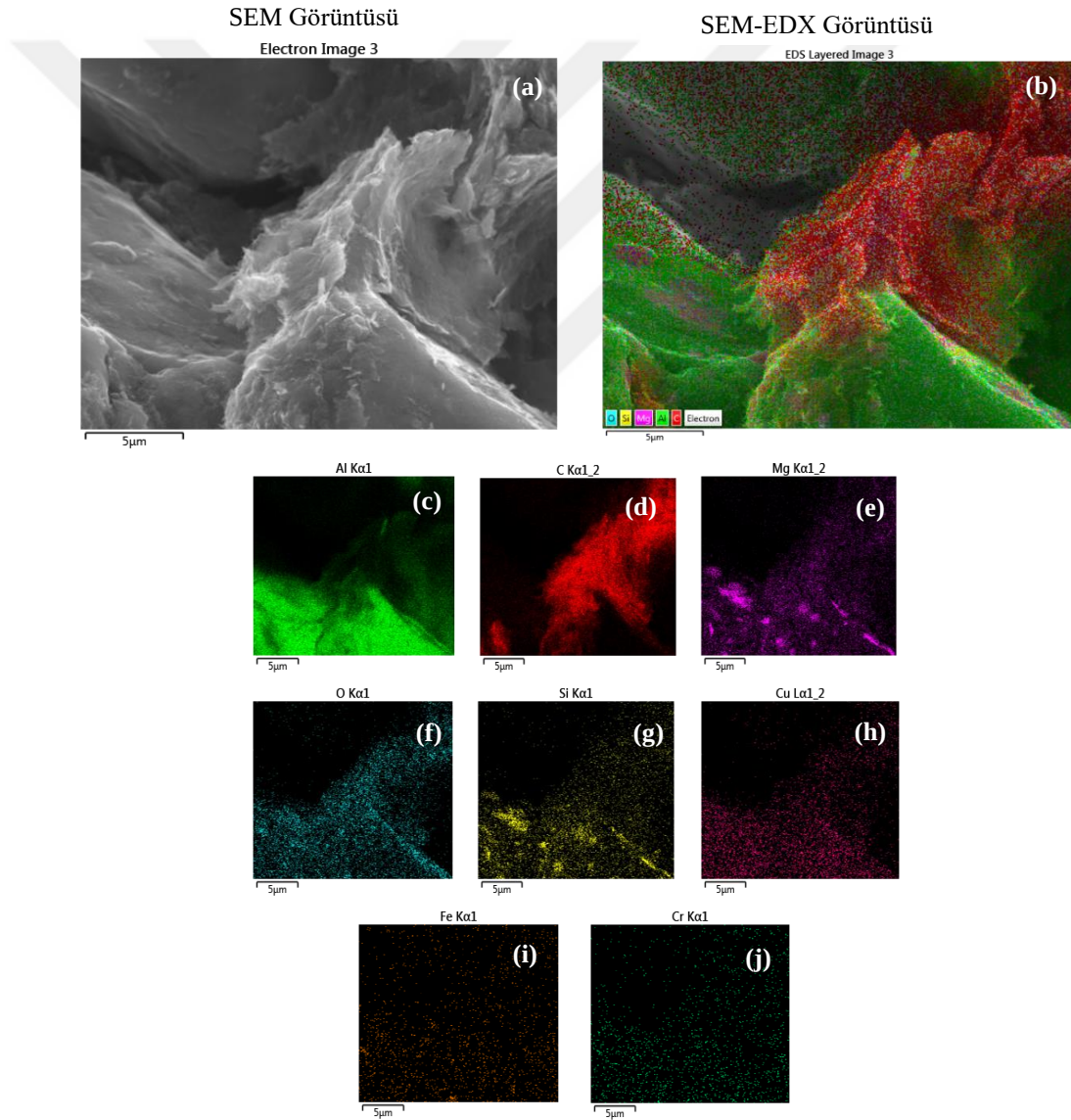
görülmüştür. Ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinden sonra grafenin topaklanma eğilimi sergilediği görülmüştür. Isıl işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) ve grafen katkı oranına bağlı olarak mekanik özelliklerde oluşan değişimler SEM kırık yüzey görüntüleriyle de doğrulanmıştır.





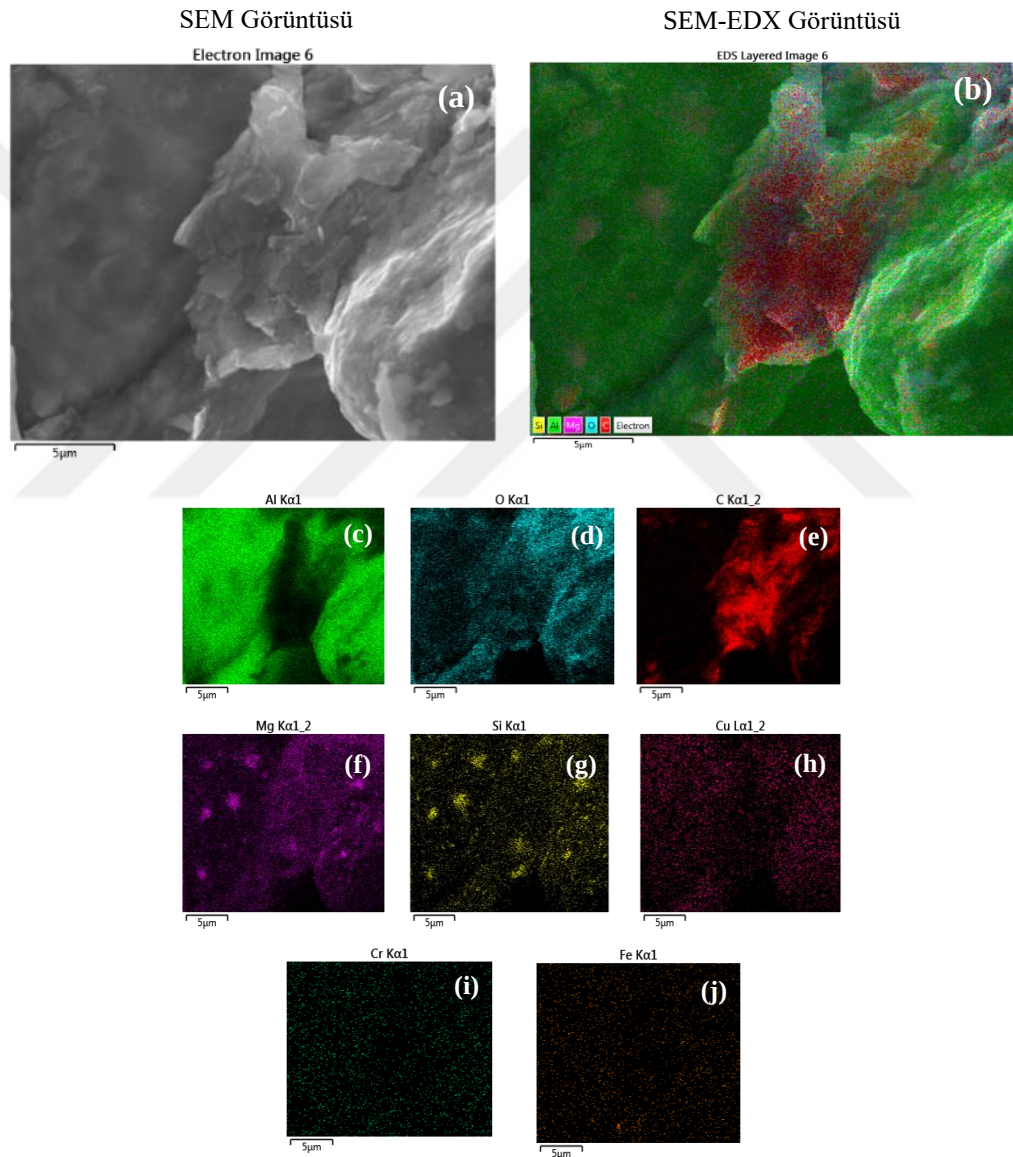
Şekil 6.31. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası Al6061 alaşımına (a, b), Al6061-%0,1KNT-% 0,1GNT (c, d), Al6061-%0,1KNT-%0,3GNT (e, f) ve Al6061-0,1KNT-%0,5GNT (g, h) kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri

Sadece sinterlenmiş Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT hibrit kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.32’de verilmiştir. Kompozit yapı içerisinde bulunan Al, C, Mg, O, Si, Cu, Fe, Cr elementlerinin her biri farklı bir renk ile gösterilmiştir. Al, Mg, O, Si, Cu, Fe, Cr elementleri Al6061 alaşımının dağılımını temsil etmektedir. Al6061 alaşımının ana elementi alüminyum (Al) yeşil renk dağılımlı, karbon (C) elementi kırmızı renk dağılımlı olup karbon nanotüpü ve grafeni temsil etmektedir. Kırmızı renk dağılımına bakıldığında karbon nanotüpün ve grafenin belli bir bölgede yoğun olarak kümelendiği açık bir şekilde görülmektedir. Üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olan topaklanmalar SEM-EDX analizi ile doğrulanmaktadır.



Şekil 6.32. Sadece sinterlenen Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT-%0,5GNT hibrit kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.33’de verilmiştir. Al6061 matris malzemesinin ana elementleri olan Al, O, Mg, Si, Cu, Cr ve Fe yapı içerisinde tespit edilmiştir. Karbon (C) elementi ise kırmızı renk ile gösterilmekte olup karbon nanotüpü ve grafeni temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde karbon nanotüpün ve grafenin kompozit içerisinde homojen dağılmadığı ve tane sınırlarında toplandığı görülmüştür. Bu durum mekanik ve aşınma test sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.



Şekil 6.33. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,1KNT-0,5GNT hibrit kompozitine ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle farklı takviye oranlarında Al6061-GNT, Al6061-KNT ve Al6061-KNT-GNT kompozitleri üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin bir kısmı sadece sinterlenmiş bir kısmı ise sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiştir. Kompozitlerde KNT/GNT katkı oranlarının ve ısıtım işlem türlerinin (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme); kompozitin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, sürtünme katsayısı, aşınma oranı, kütle kaybı ve mikro yapısı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar üç alt başlık altında sunulmuştur.

7.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi

Yürütülen çalışmada, Al6061 alaşımına ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında grafen takviye edilerek Al6061-GNT kompozitler toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. GNT katkı oranının ve ısıtım işlem türlerinin üretilen kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Üretilen Al6061-GNT kompozitler içerisinde en yüksek yoğunluğa ($2,6 \text{ g/cm}^3$) ve en düşük gözeneklilik oranına %4,4 sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozitte ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0,1 grafen takviye oranının aşılmasıyla yoğunluk düşerken gözeneklilik oranı artmıştır. Tüm numunelerde sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemi yoğunluğu artırırken gözeneklilik oranlarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozitte gözeneklilik oranı Al6061 alaşımına kıyasla %12 daha düşüktür. Ağırlıkça %0,1 takviye oranında grafenin tane sınırlarına yerleşerek gözeneklilik oranını düşürdüğü ancak takviye oranının artmasıyla grafenin topaklandığı ve gözenekliliğin arttığı mikro yapı görüntüleriyle de tespit edilmiştir.
- En yüksek sertlik değeri $126 \pm 2 \text{ HV}$ olarak sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozitte ölçülmüştür. Al6061-%0,1GNT kompozitin sinterleme sonrası sertlik değeri Al6061 alaşımının

sertlik değerinden %20 daha yüksektir. İndüksiyonla sıcak presleme sonrası Al6061-%0,1GNT kompozitin Al6061 alaşımına kıyasla sertlik değerleri %17 artmıştır. Isıl işlemlerle birlikte taneler arasındaki bağın güçlenmesi sertliği artırmıştır. Ancak takviye oranındaki artışla grafen topaklanmaları taneler arası baği zayıflatmış ve bu durum sertliğin düşmesine neden olmuştur. Dikkat çeken husus; grafen takviyesi sonucu elde edilen kompozitlerin sertlik değerlerinin Al6061 alaşımının sertlik değerinden yüksek olduğudur.

- Üretilen Al6061-GNT kompozitlere uygulanan aşınma testleri sonucunda; en düşük ortalama sürtünme katsayısı sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozitte (μ) 0,25 olarak tespit edilmiştir. Grafenin katı yağlayıcılık özelliği nedeniyle düşüş tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı ($4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0,0026 g) yine sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozitte elde edilmiştir. Sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061-%0,1GNT kompozitin Al6061 alaşımına kıyasla aşınma oranı %24 ve kütle kaybı ise %25 oranında daha düşüktür. Aşınma test sonuçları, grafen takviyesinin kompozitlerde sürtünme, kütle kaybı ve aşınma üzerine olumlu etki yaptığını göstermiştir.
- Al6061-GNT kompozitlerin aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitte sadece sinterlenmiş kompozite kıyasla aşınan yüzey derinliğinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Al6061-GNT kompozit yapılarına ait XRD faz analizlerinde yalnızca alüminyum piki gözlenmiştir. Kompozit yapılarda grafenin düşük takviye oranı sebebiyle XRD faz analizinde grafen pikine rastlanmamıştır.
- Üretilen Al6061-GNT kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde; grafenin tane sınırlarında yer aldığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0,1 grafen takviye oranında sadece sinterlenmiş kompozite kıyasla indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitte tanelerin daha iyi boyun vererek mikroyapıdaki gözenekliliği azalttığı ve kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkı oranından sonra grafenin kümelenme eğilimine girdiği ve matris ile takviye malzemesi arasında güçlü arayüzey bağının oluşmadığı tespit edilmiştir. Bu durum SEM-EDX element

dağılım haritalarıyla da doğrulanmıştır. XRD faz analizi sonucunda; kompozit yapılarda Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir.

- Sonuç olarak, Al6061 matrisine ağırlıkça %0,1 oranında grafen takviye edildiğinde mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir. Sinterlemenin kompozitin özelliklerine olumlu katkısı olsa da en önemli etkiyi sinterleme işleminden sonraki indüksiyonla sıcak presleme işleminin yaptığı test ve analiz sonuçlarıyla görülmüştür.

7.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi

Bu çalışmada, Al6061 alaşımına ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında karbon nanotüp takviye edilerek Al6061-KNT kompozitler toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. KNT katkı oranının ve ısıtma işlem türlerinin üretilen kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Üretilen Al6061-KNT kompozitlerinde en yüksek yoğunluk ($2,59 \text{ g/cm}^3$) ve en düşük gözeneklilik oranı (%4,8) sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT kompozitte tespit edilmiştir. Al6061 alaşımı ve Al6061-KNT kompozitlerinde sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinin matris malzeme ve takviye eleman arasındaki arayüzey bağıntı iyileştirdiği ve bu durumun yoğunluğu artırırken gözeneklilik oranını düşürdüğü belirlenmiştir.
- En yüksek sertlik değeri $119 \pm 2 \text{ HV}$ olarak sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT kompozitte ölçülmüştür. Al6061-%0,1KNT kompozitin sertlik değerinin Al6061 alaşımının sertlik değerinden %13 daha yüksek olduğu görülmüştür. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT kompozitin sertliği Al6061 alaşımına kıyasla %10 artmıştır. Ancak ağırlıkça %0,1'in üzerindeki karbon nanotüp takviyesi kompozitin sertliğini azaltıcı etki yapmıştır.
- Sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT kompozitin aşınma oranının ve kütle kaybının sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061 alaşımına kıyasla %5 daha az olduğu belirlenmiştir. Aşınma test sonuçları,

karbon nanotüp takviyesinin kompozitlerde sürtünme, kütle kaybı ve aşınma üzerine olumlu etki yaptığını göstermiştir.

- Al6061-KNT kompozitlerin aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT kompozitte aşınma izlerinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Karbon nanotüp takviye oranının artmasıyla malzeme yüzeyinde daha fazla aşınma meydana geldiği görülmüştür.
- Üretilen Al6061-KNT kompozitin XRD faz analizlerinde sadece alüminyum piki gözlenmiştir. XRD cihazının düşük hassasiyeti nedeniyle karbon nanotüp pikine rastlanılmamıştır.
- Al6061-KNT kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde; sinterleme ve indüksiyonla sıcak preslemeyle birlikte taneler arası etkileşimin arttığı ve gözenekliliğin azaldığı görülmüştür. Ağırlıkça %0,1 oranının üzerindeki takviye oranlarında karbon nanotüpün düzensiz dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde topaklanma eğilimi grafen takviyeli kompozitlere göre daha belirgindir. Bu durum SEM-EDX element dağılım haritalarıyla da doğrulanmıştır. XRD faz analizi sonucunda istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir.
- Sonuç olarak, Al6061 matrisine farklı oranlardaki karbon nanotüp takviyesinin kompozit yapının Vickers sertliği ve aşınma mekanizmaları üzerine etkin rol oynadığı görülmüştür. Al6061-KNT kompozitleri üzerinde yapılan testler incelendiğinde optimum karbon nanotüp takviye oranının %0,1 olduğu belirlenmiştir.

7.3. Grafen ve Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi

Bu tez çalışmada, Al6061 alaşımına ağırlıkça %0,1 oranında karbon nanotüp ve %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında GNT ilave edilerek Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitler toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Takviye oranının ve ısıtma işlem türlerinin üretilen kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik

oranlarına bakıldığında üretilen kompozitlerin yoğunluk değerleriyle Al6061 alaşımının yoğunluk değeri arasında önemli bir fark tespit edilmezken gözeneklilik oranlarında önemli düşüş gözlenmiştir. Sinterlendikten sonra sıcak preslenmiş Al6061 alaşımı ile Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozitin gözeneklilik oranı mukayese edildiğinde %15,89'luk düşüş tespit edilmiştir. Sinterleme öncesine kıyasla alüminyum hibrit kompozitin gözeneklilik oranında %17,92'lik düşüş gerçekleşmiştir. Takviye malzemeleri tane sınırlarına yerleşerek gözenekliliğin önemli oranda düşmesini sağlamıştır. Bu durum mikroyapı görüntüleriyle de tespit edilmiştir.

- Sinterlenmiş ağırlıkça %0,1KNT ve %0,1GNT ikili partikül takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozitin sertlik değerinin sinterlenmiş Al6061 alaşımına kıyasla %26 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozitin sertlik değeri de Al6061 alaşımına kıyasla %25 artış göstermiştir. Her iki takviye malzemesi de Al6061 alaşımının sertlik değerini artırmıştır. En yüksek değer %0,1KNT ve %0,1GNT takviye oranlarında elde edilmiştir. İkili partikül takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerinin Al6061 alaşımının sertlik değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Nano boyutlu takviyelerin dislokasyon hareketini engelleyerek sertliği önemli ölçüde arttırabileceği sonucuna varılmıştır.
- Aşınma sonuçları değerlendirildiğinde; sinterlenmiş Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozitin aşınma oranı sinterlenmiş Al6061 alaşımının aşınma oranından %35,5 daha düşüktür. Sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak preslenen ağırlıkça %0,1 karbon nanotüp ve %0,1 grafen takviyeli Al6061 hibrit kompozitin aşınma oranı Al6061 alaşımına kıyasla %12,21 daha düşüktür. İkili partikül takviyeli kompozitlerin kütle kaybı ve aşınma oranı takviyesiz Al6061 alaşımından daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Al6061-KNT-GNT hibrit kompozitlerin aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT kompozitte diğer kompozitlere kıyasla yüzeydeki aşınma izlerinin daha az olduğu

görülmüştür. Kompozit yapıya eklenen karbon nanotüpün ve grafenin aşınma mekanizmaları üzerinde etkin rol oynadığı belirlenmiştir.

- Üretilen Al6061-%0,1KNT-%0,1GNT hibrit kompozitin SEM görüntüleri incelendiğinde, matris/takviye eleman arasındaki arayüzey bağlanmasının diğer kompozitlere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinden sonra yüksek Van der Waals çekim gücüne sahip GNT ve KNT'nin birbiriyle topaklanma eğilimine girdiği tespit edilmiştir. Bu durum SEM-EDX element dağılım haritalarıyla da doğrulanmıştır. XRD faz analizi sonucunda istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir.
- Sonuç olarak, Al6061 alaşımı ve grafen veya karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerle kıyaslandığında, ağırlıkça %0,1 oranında ikili partikül (GNT ve KNT) takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir.

7.4. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Bu tez çalışmasında Al6061-GNT, Al6061-KNT ve Al6061-KNT-GNT kompozitleri toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Karbon nanotüp ve grafen takviye oranlarının ve ısıtılma türlerinin (sinterleme ve sinterlendikten sonra indüksiyonla sıcak presleme) kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. İleride yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Bu çalışmada Al6061 alaşımı matris malzeme olarak kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda matris malzeme olarak 2xxx serisi, 5xxx serisi ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılarak KNT ve GNT ikili partikül takviyeli kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
- Yürütülen çalışmada kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. İleriki çalışmalarda farklı üretim yöntemleri (karıştırılmalı döküm, mekanik alaşımlama vb.) kullanılarak ikili partikül takviyeli kompozitler üretilebilir.
- Sinterleme işlemindeki parametreler örneğin uygulanan sıcaklık ve süre değiştirilerek kompozit yapı üzerindeki etkileri incelenebilir.

- Bu tez çalışmasında üretilen kompozitlere ikincil işlem olarak indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. İlerideki çalışmalarda farklı ikincil işlem yöntemleri (ekstrüzyon, dövme, haddeleme, infiltrasyon, yüzey kaplama vb.) uygulanarak kompozit yapıya etkileri incelenebilir.
- İlerideki çalışmalarda Al6061-KNT-GNT ikili partikül takviyeli hibrit kompozitlerin termal özellikleri, çekme ve basma dayanımları incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Abbas shafqat, Q., Rafi-ud-din, u., Shahzad, M., Khan, M., Mehmood, S., Syed, W. A., Basit, A., Mehboob, N. and Ali, T. (2019). Mechanical, tribological, and electrochemical behavior of hybrid aluminum matrix composite containing boron carbide (B₄C) and graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Research*, 34(18), 3116-3129.
- Alipour, M., Farsani, R.E., and Abuzin, Y.A. (2018). Influence of graphene nanoplatelet reinforcements on microstructural development and wear behavior of an aluminum alloy nanocomposite. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 210809, 233–246.
- Altınsoy, F. E. (2020). *Kompozit malzemelerin mekanik bağlantılarında hidrotermal etkiler*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 79, Balıkesir.
- Akdoğan, A. (2005). İmalatta kompozit malzemeler. *Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları*, İstanbul.
- Akkurt, A. (2005). Ticari saf alüminyum ve Al6061 alüminyum alaşımı malzemelerin aşındırıcı su jeti ile kesilmesi uygulamalarında kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Politeknik Dergisi*, 8(1), 69-79.
- Apelian, D., Lawley, A., Luo, X. and Mathur, P. (1988). Fundamentals of droplet consolidation during spray deposition of aluminum alloys and metal matrix composites. *Modern Developments in Powder Metallurgy*, 19, 397-424.
- Arı, A. (2022). *Polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, 124, Bursa.
- Ayata, A. (2014). *Toz metal alüminyum malzemelerin mikrodalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, 103, Ankara.
- Bastwros, M., Kim, G.-Y., Zhu, C., Zhang, K., Wang, S., Tang, X. and Wang, X. (2014). Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering. *Composites Part B: Engineering*, 60, 111-118.
- Bilir, H. (2014). *Al/SiC kompozitlerin karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 123, Kırıkkale.
- Bisht, A., Srivastava, M., Kumar, R. M., Lahiri, I., and Lahiri, D. (2017). Strengthening mechanism in graphene nanoplatelets reinforced aluminum composite fabricated through spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering A*, 695, 20–28.
- Boag, A., Hughes, A.E., Wilson, N.C., Torpy, A., MacRae, C.M., Glenn, A.M., Muster, T.H. (2009). How complex is the microstructure of AA2024-T3? *Corrosion Science*, 51(8), 1565–1568.
- Bülbül, B. (2020). *Al-Ni/GO ve Al-Ni/TiO₂ Metal matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 117, Batman.
- Büyük, M. (2017). *Karbon nanatüp üretiminde metal katalizörün taban malzemeye tutunma etkileri*. Yüksek Lisans tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 116, Ankara.

- Chak, V., Chattopadhyay, H., (2020). A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1059–1074.
- Çalışkan, O. (2019). *Nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli nanokompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, Karabük.
- Çelebi, M. (2016). *ZA27/Graphite/Al₂O₃ hibrit nanokompozitlerin üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 120, Trabzon.
- Demir, M. (2022). *İndüksiyonla sıcak işlemin grafen ve/veya Si₃N₄/B₄C takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 148, Samsun.
- Eker, A.A. (2008). *Bakır ve Bakır Alaşımları, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları*, İstanbul.
- Ekici, E. (2012). *Alüminyum matrisli B₄C takviyeli ve grafit katkılı kompozitlerin üretilmesi, mekanik özellikleri ve frezede işlenebilirliğinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, 209, Ankara.
- German, R. M. (2007). *Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri*. Türk Toz Metalürjisi Derneği Yayınları, (Çev. N. Durlu, S. Sarıtaş ve M. Türker), Ankara.
- Gürbüz, M., Şenel, M. C. and Koç, E. (2018). The effect of sintering temperature, time and graphene addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum composites. *Journal of Composite Materials*, 52(4), 553-563.
- Hsieh, C.-T., Ho, Y.-C., Wang, H., Sugiyama, S. and Yanagimoto, J. (2020). *Mechanical and tribological characterization of nanostructured graphene sheets/A6061 composites fabricated by induction sintering and hot extrusion*. *Materials Science and Engineering: A*, 786, 138998.
- Hanizam, H., Salleh, M. S., Omar, M. Z. and Sulong, A. B. (2019). Optimisation of mechanical stir casting parameters for fabrication of carbon nanotubes-aluminium alloy composite through Taguchi method, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2223–2231.
- Iijima, S., Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 363, 603-605.
- Jeyasimman, D., Sivasankaran, S., Sivaprasad, K. And Narayanasamy, R. (2014). Fabrication and consolidation behavior of Al 6061 nanocomposite powders reinforced by multi-walled carbon nanotubes. *Powder Technology*, 258, 189–197.
- Kalaycıoğlu, A.S. (2010). *SiC tane katkılı alüminyum kompozitlerin toz metalurjisi ile üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 142, İzmir.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech & Composites*, 22, 18-30.
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38–45.
- Kaw, A.K. (2006) *Mechanics of Composite Materials*, Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Keleş, Ö. (2021). *Alüminyumun Serüveni. İTÜ Vakfı Yayınları*, İstanbul.

- Khan, M., Din, R. U., Wadood, A., Syed, W. H., Akhtar, S. and Aune, R. E. (2019). Effect of graphene nanoplatelets on the physical and mechanical properties of Al6061 in fabricated and T6 thermal conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 1076-1091.
- Kim, H., Babu, J. and Kang, C. (2013). Fabrication of A356 aluminum alloy matrix composite with CNTs/Al₂O₃ hybrid reinforcements. *Materials Science and Engineering: A*, 573, 92-99.
- Kırsasöz, A. A. (2018). *Alüminyum matrisli titanyumdiborür in situ takviyeli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 99, İstanbul.
- Kumar, H. P. and Xavier, M. A. (2016). Fatigue and wear behavior of Al6061-graphene composites synthesized by powder metallurgy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(2), 415-419.
- Li, J.L., Xiong, Y.C., Wang, X.D., Yan, S.J., Yang, C., He, W.W., Chen, J.Z., Wang, S.Q., Zhang, X.Y. and Dai, S.L. (2015). Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling. *Materials Science&Engineering A*, 626, 400-405.
- Li, G. and Xiong, B. (2017). Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets / aluminum composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 697, 31-36.
- Li, D., Ye, Y., Liao, X., and Qin, Q. H., (2018). A novel method for preparing and characterizing graphene nanoplatelets/aluminum nanocomposites. *Nano Research*, 11(3), 1642–1650.
- Najimi, A. A., Shahverdi, H.R., (2017). Microstructure and mechanical characterization of Al6061-CNT nanocomposites fabricated by spark plasma sintering. *Materials Characterization*, 133, 44-53.
- Nazik, C. (2013). *Alüminyum matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 108, Konya.
- Omidi, M., Khodabandeh, A., Nategh, S. and Khakbiz, M. (2018). Microstructural and tribological properties of nanostructured Al6061-CNT produced by mechanical milling and extrusion. *Advanced Powder Technology*, 29, 543–554.
- Omrani, E., Moghadam, A. D., Kasar, A. K., Rohatgi, P. and Menezes, P. L. (2021). Tribological performance of graphite nanoplatelets reinforced Al and Al/Al₂O₃ self-lubricating composites. *Materials (Basel)*, 14(5), 1–17.
- Özeker, M. B. (2021). *Pin on disk metodu ile B₄C oranının alüminyum matrisli ve b₄c takviyeli toz metal kompozit malzemelerin aşınma davranışı üzerine etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 150, Ankara.
- Özer, E.K. (2019). *Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen sade karbonlu çeliklerin statik deformasyon yaşlanması davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 63, Ankara.
- Özkaya, S. (2014). *Alüminyum-B₄C parçacık takviyeli metal matrisli nanokompozitlerin üretimi, iç yapı, fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans

Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 132, Trabzon.

- Pérez-Bustamante, R., Bolaños-Morales, D., Bonilla-Martínez, J., Estrada-Guel, I. and Martínez-Sánchez, R. (2015). Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 615(S1), 578–582.
- Prabhakara, G. V. N. B., Pavan Kumarb, Y.V.R.S.N., Dileep Kumarb, P., Prasanna Kumarb, B., Gopi Rajub, M., Naseemab, Sk., Ravi Kumarc, N., Jagannathamd, M. and Ratna Sunile, B. (2019). Producing Al5083-CNT composites by friction stir processing: Influence of grain refinement and CNT on mechanical and corrosion properties. *Materials Today: Proceedings*, 15, 44–49.
- Prakash, B., Sivananthan, S. and Vijayan, V. (2021). Investigation on mechanical properties of Al6061 alloy – multiwall carbon nanotubes reinforced composites by powder metallurgy route. *Materials Today: Proceedings*, 37, 336-340.
- Preethi, K., Raju, T. N., Shivappa, H. A., Shashidhar, S. and Medava Nagral. (2023). Processing, microstructure, hardness and wear behavior of carbon nanotube particulates reinforced Al6061 alloy composites. *Materials Today: Proceedings*, 81, 449–453.
- Pul, M. (2010). *Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı, 210, Ankara.
- Pul, M. (2019). Karbon nanotüp (CNT) ve nano grafen (G) takviyeli Al2024 kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretilerek aşınma ve işlenebilme özelliklerinin incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(1), 370-382.
- Salamci, E. (2004). Spray casting. *Gazi University Journal of Science*, 17(2), 155-173.
- Sarıkaya, E. (2019). *Doğal fiber takviyeli kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Mekanik ve Mukavemet Bilim Dalı, 100, Denizli.
- Shao, P., Chen, G., Ju, B., Yang, W., Zhang, Q., Wang, Z., Tan, X., Pei, Y., Zhong, S. and Hussain, M. (2020). Effect of hot extrusion temperature on graphene nanoplatelets reinforced Al6061 composite fabricated by pressure infiltration method. *Carbon*, 162, 455-464.
- Shin, S. E., Choi, H. J., Shin, J. H. and Bae, D. H. (2015). Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites. *Carbon*, 82, 143–151.
- Shivaramu, H. T. and Umashankar, K. S. (2019). Dry sliding wear behaviour of multi walled carbon nanotubes reinforced aluminium composites produced by powder metallurgy technique. *Materials Research Express*, 6, 1150d7.
- Simões, S., Viana, F., Reis, M. A. L. And Vieira, M.F. (2015). Influence of dispersion/mixture time on mechanical properties of Al-CNTs nanocomposites. *Composite Structures*, 126, 114–122.
- Singh, M., Rana, R. S., Purohit, R., Sahu K. (2015). Development and analysis of al-matrix nano composites fabricated by ultrasonic assisted squeeze casting process, *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3697-3703.
- Söyler, M. (2007). *Toz metalürjisi uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği, 82, Gebze.

- Şenel, M. C. (2018). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 118, Samsun.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2017). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 974-978.
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2021). Investigation on mechanical properties and microstructure of B4C/Graphene binary particles reinforced aluminum hybrid composites. *Metals and Materials International*, 27(7), 2438-2449.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-47.
- Tabonah, T. M. K. (2019). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen nanopartikül katkılı Ni-B alaşımların mikroyapı ve korozyon özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, Kastamonu.
- Türkoğlu, T. (2022). *TiC, karbon nanotüp ve grafen takviyeli 6061 alüminyum esaslı hibrit kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi, özelliklerinin incelenmesi ve analizi*. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 157, Balıkesir.
- Iijima, S., Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 363, 603-605.
- Ujah, C. O., Popoola, A. P. I., Popoola, O. M. and Aigbodion, V. S. (2019). Optimisation of spark plasma sintering parameters of Al-CNTs-Nb nano-composite using Taguchi Design of Experiment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 1563–1573.
- Üstün, M. (2022). *Al-ZrO₂-grafen ve Al-SiO₂-grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 131, Samsun.
- Van Trinh, P., Luan, N. V., Phuong, D. D., Minh, P. N., Weibel, A., Mesguich, D. and Laurent, C. (2018). Microstructure, microhardness and thermal expansion of CNT/Al composites prepared by flake powder metallurgy. *Composites: Part A*, 105, 126–137.
- Vural, M. (2007). EÜT 231 Üretim yöntemleri ders notları. *İTÜ Makine Fakültesi*, İstanbul.
- Yalçın, Ö. F. (2015). *Toz metalürjisi üretim parametrelerinin gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayısına üretim parametrelerinin etkileri*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 84, Trabzon.
- Yu, Z., Tan, Z., Xu, R., Ji, G., Fan, G., Xiong, D., Guo, Q., Li, Z., Zhang, D. (2019). Enhanced load transfer by designing mechanical interfacial bonding in carbon nanotube reinforced aluminum composites. *Carbon*, 146, 155–161.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z. and Zhang, D. (2012). Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites. *Scripta Materialia*, 66(8), 594-597.

ÖZ GEÇMİŞ

Tülin ŞENBAŞ, Merzifon Lisesi'ni bitirdikten sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde 1989 yılında mezun oldu. Mezuniyetin ardından 2018 yılında emekli olana kadar özel sektörde çalıştı. Temel ilgi alanları, metal matrisli kompozitler, toz metalürjisi, sürdürülebilirlik, kalite yönetim sistemleri ve entegre yönetim sistemleridir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0009-0006-7676-2660

Yayınlar:

1. Şenbaş, T. ve Şenel M.C. (2023). Sıcak preslenmiş grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 25-26 Aralık, Konya.

Projeler

1. Yürütücü ve proje ekip üyesi: Tülin Şenbaş, Proje Adı: Otomotiv Süspansiyon Parçalarının Geliştirilmesinde Rekabetçi Ar-Ge Alt Yapısı Kurulması, Destekleyen Kurum: TÜBİTAK, 2006-2007
2. Yürütücü ve proje ekip üyesi: Tülin Şenbaş, Proje Adı: Enerji Tasarrufu ile Küresel Isınma Tedbirlerine Destek Projesi, Destekleyen Kurum: KOSGEB, 2010-2011
3. Yazar, yürütücü ve proje ekip üyesi: Tülin Şenbaş, Proje Adı: Üretim Süreçlerinin İyileştirilmesinin ve Sürdürülebilirliğinin sağlanması, Destekleyen Kurum: KOSGEB, 2016-2017