

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



**İNDÜKSİYONLA SICAK İŞLEMİN GRAFEN VE/VEYA
Si₃N₄/B₄C TAKVİYELİ AL6061 ESASLI KOMPOZİTLERİN
MEKANİK, TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE VE
MİKROYAPISINA OLAN ETKİSİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mehmethan DEMİR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL

Bu tez OMÜ BAP tarafından (Proje No: PYO.MUH.1901.20.001) desteklenmiştir.

SAMSUN
2022

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, enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm ve 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

27/12/2021
Mehmethan DEMİR

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen ve/veya $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{B}_4\text{C}$ Takviyeli Al6061 Esaslı Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 27/12/2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 7

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

27/12/2021
Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL

ÖZET

İNDÜKSİYONLA SICAK İŞLEMİN GRAFEN VE/VEYA $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{B}_4\text{C}$ TAKVİYELİ AL6061 ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE VE MİKROYAPISINA OLAN ETKİSİ

Mehmethan DEMİR

Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Şubat/2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL

Bu tez çalışmasında, toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri kullanılarak ağırlıkça farklı katkı oranlarında (Grafen: %0.15-0.45, B_4C : %1-30, Si_3N_4 : %1-12) Al6061-Grafen, Al6061- B_4C -Grafen ve Al6061- Si_3N_4 -Grafen kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluğu, sertliği, basma dayanımı, aşınma direnci, mikroyapısı ve faz yapısı sırasıyla; Arşimet yoğunluk ölçüm cihazıyla, mikro Vickers sertlik ölçüm cihazıyla, universal test makinesiyle, aşınma test cihazıyla, taramalı elektron mikroskopuyla ve X-ışını kırınımı cihazıyla incelenmiştir.

Üretilen kompozitlerde; sinterleme işlemi 600 °C sıcaklıkta 60 dk süresince ve indüksiyonla sıcak presleme işlemi ise 500 °C sıcaklıkta 25 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Kompozit yapılarda B_4C , Si_3N_4 ve grafen katkı oranının artmasıyla kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Buna karşın ağırlıkça %9 Si_3N_4 ve/veya %0.15 grafen takviyesinden sonra nanopartiküllerin toplanması sebebiyle kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin bozulduğu tespit edilmiştir.

Yürütülen testler neticesinde; en yoğun mikroyapı ile en iyi mekanik ve tribolojik özellikler (sertlik, basma dayanımı ve aşınma oranı); sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan Al6061-%0.15Grafen (151 HV, 341 MPa, $8.5 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$), Al6061-%30 B_4C -%0.15Grafen (238 HV, 510 MPa, $0.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) ve Al6061-%9 Si_3N_4 -%0.15Grafen (179 HV, 447 MPa, $6.0 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) kompozitlerde elde edilmiştir.

Sonuç olarak, grafen, B_4C ve Si_3N_4 katkı malzemelerinin belli bir katkı oranına kadar kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Al6061 matrisli kompozitlerde grafenin etkili bir katkı elemanı olduğu görülmüştür. Yürütülen ısıtma işlemi çalışmaları neticesinde; sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin yalnızca sinterlenmiş kompozitlere kıyasla ~%15-37 oranında daha iyi olduğunu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Grafen, Toz Metalürjisi, Metal Matrisli Kompozitler, Al6061

ABSTRACT

EFFECT OF HOT TREATMENT BY INDUCTION ON THE MECHANICAL, TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF GRAPHENE AND/OR $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{B}_4\text{C}$ REINFORCED AL6061 BASED COMPOSITES

Mehmethan DEMİR

Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering
M.Sc., February/2022

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mahmut Can ŞENEL

In this thesis, Al6061-Graphene, Al6061- B_4C -Graphene, and Al6061- Si_3N_4 -Graphene composites with various reinforcement rates (0.15-0.45wt.%Graphene, 1-30wt.% B_4C , 1-12wt.% Si_3N_4) were produced using the powder metallurgy and induction hot treated processes. The density, hardness, compressive strength, wear rate, microstructure, and phase structure of the composites were examined by Archimedes density meter device, micro Vickers hardness measurement device, universal testing machine, wear test machine, scanning electron microscope, and X-ray diffraction device, respectively.

The sintering process of the fabricated composites was carried out at a temperature of 600 °C for 60 minutes, and the induction hot pressing process was performed under a pressure of 25 MPa at a temperature of 500 °C. It was determined that the mechanical and tribological properties of the composites improved with the increase of B_4C , Si_3N_4 , and graphene contents in the composite structures. However, it was detected that the mechanical and tribological properties of composite materials deteriorated due to the agglomeration of nanoparticles after 9% Si_3N_4 and/or 0.15%graphene contents.

As a result of the tests, the densest microstructure, the best mechanical and tribological properties (hardness, compressive strength, and wear rate) were obtained at the sintered and induction heat treated Al6061-0.15%Graphene (151 HV, 341 MPa, $8.5 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$), Al6061-30% B_4C -0.15%Graphene (238 HV, 510 MPa, $0.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) and Al6061-9% Si_3N_4 -0.15%Graphene (179 HV, 447 MPa, $6.0 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) composites.

As a result, it was found that the increase in graphene, B_4C , and Si_3N_4 content up to a certain amount improved the mechanical and tribological properties of the composites. It was observed that graphene was an effective reinforcement element for the Al6061 matrix composites. As a result of the heat treatment studies, it was determined that the mechanical and tribological properties of the sintered and induction heat treated composites were enhanced by ~%15 and ~%37, respectively compared to only sintered composites.

Keywords: Aluminum, Graphene, Powder Metallurgy, Metal Matrix Composites, Al6061

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sırasında, değerli bilgi ve tecrübelerini esirgmeden benimle paylaşan, çalışmanın her aşamasında kıymetli zamanını ayırıp bana yol gösteren çok kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimime başlamaya karar vermemde çalışkanlığı ve çalışma azmine hayranlık duyduğum, tez çalışmamda deney ve yöntemlerin ilerlemesi esnasında yardımlarını esirgmeden bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmaları süresince yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Onur YONTAR ile Arş. Gör. Fevzi ŞAHİN'e teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmaları ve tez yazım sürecinde yardım ve desteklerinden ötürü yüksek lisans öğrencileri Aleyna TAŞKIN, Elif IŞIK ve Ömür Ekrem GÜNTÜRK'e teşekkür ederim. Çalışmalarım süresince laboratuvar imkanlarından faydalandığım Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlıklarına teşekkür ederim.

Ekip olma ruhunu birçok çalışmada beraber yaşayıp birbirimizi tamamladığımız, her zaman yanımda olduklarını hissettiğim değerli arkadaşlarım makine mühendisleri Furkan Enes GÜNDOĞDU, Hüseyin Zahid YAZICI ve İsmail KUŞÇU'ya teşekkür ederim.

Yıllardır her an yanımda olan, bu tez çalışması sırasında bana olan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Tülay Başaran Anadolu Lisesi'nden dostlarım, Ahmet Emre KAMACI, Kazım AKSAK, Mert KAYA, Oğuzhan ÖZTÜRK, Serhat UCUZAL ve Tolunay ADIYAMAN'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, bu günlere gelmemde çok büyük emeği olan, beni daima sabır ve anlayışla karşılayan değerli anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim. Ayrıca varlığı ile daima mutluluk duyduğum dedeme, yıllardır her an yanımda olan kuzenim Furkan AYDIN'a ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, PYO.MUH.1901.20.001 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

Mehmethan DEMİR

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xv
1.GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Özgün Değer	3
1.4. Tez Düzeni	3
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	4
2.2. Bor Karbür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	7
2.3. Silisyum Nitrür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	10
3.KOMPOZİT MALZEMELER.....	13
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	14
3.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler	14
3.1.1.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	14
3.1.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler (SMK).....	15
3.1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)	15
3.1.2. Takviye Elemanının Şekline Göre Kompozitler	15
3.1.2.1. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler	16
3.1.2.2. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozit Malzemeler	16
3.1.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	16
3.2. Metal Matrisli Kompozitler.....	16
3.2.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri.....	17
3.2.1.1. Titanyum ve Alaşımları	17
3.2.1.2. Magnezyum ve Alaşımları.....	17
3.2.1.3. Alüminyum ve Alaşımları	17
3.2.1.4. Al6061 Alaşımı ve Özellikleri.....	19
3.2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları.....	21
3.2.2.1. Grafen ve Özellikleri	22
3.2.2.2. Silisyum Karbür (SiC) ve Özellikleri	23
3.2.2.3. Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃) ve Özellikleri	23
3.2.2.4. Bor Karbür (B ₄ C) ve Özellikleri	24
3.2.2.5. Silisyum Nitrür (Si ₃ N ₄) ve Özellikleri	24
3.2.2.6. Bor Nitrür (BN) ve Özellikleri	25
3.2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	25
3.2.3.1. Katı Faz Üretim Yöntemleri	26
3.2.3.1.1. Difüzyon Bağlı Yöntemi	27
3.2.3.1.2. Toz Metalürjisi Yöntemi.....	27
3.2.3.2. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri.....	28
3.2.3.2.1. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi	28
3.2.3.2.2. Karıştırılmalı Döküm Yöntemi	29
3.2.3.2.3. İnfiltrasyon Yöntemi	29

3.2.3.2.4. Plazma Püskürtme Yöntemi.....	30
3.2.3.3. Diğer Yöntemleri.....	31
3.2.3.3.1. Rheocasting ve Compocasting Döküm Tekniği.....	31
3.2.3.3.2. İn-Situ Tekniği.....	31
3.2.3.3.3. XD Tekniği.....	32
3.2.3.3.4. Vidalı Ekstrüzyon Yöntemi.....	32
3.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	33
4. TOZ METALÜRJİSİ.....	35
4.1. Toz Metalürjisinin Tarihçesi.....	35
4.2. Toz Metalürjisinin Avantajları ve Dezavantajları.....	36
4.3. Toz Metalürjisinin Kullanım Alanları.....	37
4.4. Metal Tozların Üretim Yöntemleri.....	37
4.4.1. Kimyasal Yöntemler.....	38
4.4.2. Elektrolit Yöntemler.....	39
4.4.3. Mekanik Yöntemler.....	40
4.4.4. Atomizasyon Yöntemleri.....	41
4.5. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Parça Üretim Süreci.....	41
4.5.1. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması.....	42
4.5.2. Presleme.....	43
4.5.2.1. Kalıpta Presleme.....	44
4.5.2.2. Yüksek Basıncılı Presleme.....	45
4.5.2.3. Ekstrüzyon ile Presleme.....	45
4.5.2.4. İzostatik Presleme.....	45
4.5.3. Sinterleme.....	46
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	48
5.1. Materyal.....	48
5.2. Yöntem.....	50
5.2.1. Kompozit Malzeme Üretimi.....	52
5.2.1.1. Tozların Karıştırılması.....	52
5.2.1.2. Tozların Filtrelenmesi.....	53
5.2.1.3. Toz Karışımının Etüvde Kurutulması.....	53
5.2.1.4. Tozların Elenmesi.....	54
5.2.1.5. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması).....	54
5.2.1.6. Malzemenin Sinterlenmesi.....	55
5.2.1.7. İndüksiyonla Sıcak Presleme İşlemi.....	56
5.2.1.8. Zımparalama ve Parlatma İşlemleri.....	58
5.2.2. Kompozit Malzeme Karakterizasyonu.....	59
5.2.2.1. Yoğunluk Ölçümü.....	59
5.2.2.2. Vickers Sertlik Ölçümü.....	61
5.2.2.3. Basma Dayanımının Belirlenmesi.....	62
5.2.2.4. Aşınma Parametrelerinin Belirlenmesi.....	63
5.2.2.5. Tozların Tane Boyut Ölçümü.....	64
5.2.2.6. X ışını Kırınımı (XRD) Analizi.....	65
5.2.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	65
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	67
6.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analizleri.....	67
6.1.1. Al6061 ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri.....	67
6.1.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	68
6.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	69
6.1.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	70
6.1.5. XRD Faz Analizleri.....	72
6.1.6. SEM ve SEM-EDX Görüntülerinin Analizi.....	73
6.1.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	76
6.2. B ₄ C/Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analizleri.....	80
6.2.1. Al6061, B ₄ C ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri.....	80

6.2.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	82
6.2.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	83
6.2.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	85
6.2.5. XRD Faz Analizleri.....	86
6.2.6. SEM ve SEM-EDX Görüntülerinin Analizi.....	87
6.2.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	92
6.3. Si ₃ N ₄ /Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analizleri.....	98
6.3.1. Al6061, Si ₃ N ₄ ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri...	98
6.3.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	99
6.3.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	101
6.3.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	102
6.3.5. XRD Faz Analizleri.....	103
6.3.6. SEM ve SEM-EDX Görüntülerinin Analizi.....	105
6.3.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	109
7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	115
7.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi	115
7.2. B ₄ C/Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi ..	117
7.3. Si ₃ N ₄ /Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi	119
7.4. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler	121
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ.....	132

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Simge	Açıklama	Birim
Al	Alüminyum	[-]
Al6061	Alüminyum 6061 alaşımı	[-]
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit	[-]
Al ₄ C ₃	Alüminyum karbür	[-]
B ₄ C	Bor karbür	[-]
BN	Bor nitrür	[-]
C	Karbon	[-]
Cu	Bakır	[-]
E	Elastisite modülü	[GPa]
Fe	Demir	[-]
Mg	Magnezyum	[-]
O	Oksijen	[-]
Si	Silisyum	[-]
SiC	Silisyum karbür	[-]
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür	[-]
SiO ₂	Silisyum dioksit	[-]
t _s	Sinterleme süresi	[dk]
T _m	Ergime sıcaklığı	[°C]
T _s	Sinterleme sıcaklığı	[°C]
Ti	Titanyum	[-]
W _A	Asılı Kütle	[g]
W _D	Doymuş Kütle	[g]
W _K	Kuru Kütle	[g]
Zn	Çinko	[-]
%G	Yüzde gözeneklilik oranı	[-]
Δm	Kütle kaybı	[mg]
ΔV	Hacimsel aşınma miktarı	[mm ³]
γ	Kayma şekil değiştirme oranı	[-]
ε	Birim uzama miktarı	[-]
μ	Sürtünme katsayısı	[-]
%ρ _T	Yüzde teorik yoğunluk	[-]
ρ _D	DeneySEL yoğunluk	[g/cm ³]
ρ _T	Teorik yoğunluk	[g/cm ³]
ρ _K	Karışımın teorik yoğunluğu	[g/cm ³]
ρ _{Al6061}	Al6061'in yoğunluğu	[g/cm ³]
ρ _{Si3N4}	Si ₃ N ₄ 'ün yoğunluğu	[g/cm ³]
ρ _{B4C}	B ₄ C'nin yoğunluğu	[g/cm ³]
ρ _G	Grafenin yoğunluğu	[g/cm ³]
σ _b	Basma dayanımı	[MPa]
σ _ç	Çekme dayanımı	[MPa]
τ	Kayma gerilmesi	[MPa]

KISALTMALAR

AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
ASA	Amerikan Standartlar Birliği
EDX	Enerji Dağıtıcı X Işını
EKAP	Eş Kanallı Açısal Presleme
GNT	Grafen Nanotabaka
GO	Grafen Oksit
HB	Brinel Sertliği
HV	Vickers Sertliği
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
KİTAM	Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi
MMK	Metal Matrisli Kompozit
OMÜ	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
SSİSP	Sinterlenme Sonrası İndüksiyonla Sıcak Preslenmiş
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	Toz Metalürjisi
XRD	X-Işını Kırınımı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri	26
Şekil 3.2. Difüzyon bağı yöntemi.....	27
Şekil 3.3. Toz metalürjisi yöntemi	27
Şekil 3.4. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi	28
Şekil 3.5. Karıştırılmalı döküm işleminin şematik görünüşü	29
Şekil 3.6. İnfiltrasyon yöntemi.....	30
Şekil 3.7. Plazma püskürtme yöntemi	30
Şekil 3.8. Rheocasting tekniği.....	31
Şekil 3.9. İn-situ tekniği	32
Şekil 3.10. Vidalı ekstrüzyon işlemi.....	33
Şekil 4.1. Metal tozlarının üretim yöntemleri.....	37
Şekil 4.2. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi	39
Şekil 4.3. Elektrolit ile toz üretimi	40
Şekil 4.4. Mekanik toz öğütme yöntemi.....	40
Şekil 4.5. Atomizasyon ile toz üretimi aşamaları.....	41
Şekil 4.6. Toz metalürjisi işlem basamakları.....	42
Şekil 4.7. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları: dönen tambur (a), dönen çift koni (b), vidalı mikser (c) ve bıçaklı mikser (d)	43
Şekil 4.8. Tozların preslenmesinde kullanılan yöntemler	44
Şekil 4.9. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve kalıbın şematik gösterimi	44
Şekil 4.10. Ekstrüzyon ile presleme işlemi	45
Şekil 4.11. Soğuk izostatik preslemenin gösterimi.....	46
Şekil 4.12. Sinterleme işleminin aşamaları ile gözeneklerin gelişimi	47
Şekil 5.1. Al6061 matrisli kompozitlerin üretim aşamaları.....	51
Şekil 5.2. Hassas terazi ve özellikleri.....	52
Şekil 5.3. Yüksek enerjili bilyalı değirmen ve özellikleri	53
Şekil 5.4. Süzme işlemi	53
Şekil 5.5. Etüv fırını ve özellikleri	54
Şekil 5.6. Elek sarsma makinesi ve özellikleri	54
Şekil 5.7. Presleme işlemi için kullanılan kalıp.....	55
Şekil 5.8. Pres makinesi ve özellikleri.....	55
Şekil 5.9. Sinterleme fırını ve özellikleri.....	56
Şekil 5.10. Vakum altında sinterleme işlemi.....	56
Şekil 5.11. İndüksiyon cihazı ve özellikleri	57
Şekil 5.12. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi.....	58
Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma cihazı ve özellikleri	59
Şekil 5.14. Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası numuneler	59
Şekil 5.15. Arşimet terazisiyle numunelerin kütle ölçümü.....	60

Şekil 5.16. Vickers sertlik ölçüm cihazı ve özellikleri	61
Şekil 5.17. Vickers sertlik izi	62
Şekil 5.18. Basma/çekme test cihazı ve özellikleri	62
Şekil 5.19. Aşınma test cihazı ve özellikleri	63
Şekil 5.20. Tane boyut ölçüm cihazı	65
Şekil 5.21. X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ve özellikleri	65
Şekil 5.22. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve özellikleri.....	66
Şekil 6.1. Al6061 (a) ve grafen (b) tozlarına ait SEM görüntüleri	67
Şekil 6.2. Al6061 (a) ve grafen (b) tozlarına ait XRD örgü desenleri.....	68
Şekil 6.3. Al6061 tozunun tanecik boyut dağılımı	68
Şekil 6.4. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi	69
Şekil 6.5. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi.....	70
Şekil 6.6. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerin basma dayanımı değerleri	71
Şekil 6.7. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerin XRD örgü desenleri.....	73
Şekil 6.8. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-0.15GNT, (d) Al6061-0.15GNT-i, (e) Al6061-0.30GNT, (f) Al6061-0.30GNT-i, (g) Al6061-0.45GNT, (h) Al6061-0.45GNT-i.....	74
Şekil 6.9. Sadece sinterlenen Al6061-0.45GNT kompozitlere ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları	75
Şekil 6.10. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları	76
Şekil 6.11. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-GNT kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri	77
Şekil 6.12. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-GNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri (P=5 N)	78
Şekil 6.13. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-0.15GNT, (d) Al6061-0.15GNT-i, (e) Al6061-0.30GNT, (f) Al6061-0.30GNT-i, (g) Al6061-0.45GNT, (h) Al6061-0.45GNT-i kompozitlere ait aşınma izleri.....	79
Şekil 6.14. Al6061 (a), B ₄ C (b) ve grafen (c) tozlarına ait SEM görüntüleri	80
Şekil 6.15. Al6061 (a), B ₄ C (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri	81
Şekil 6.16. Al6061 (a) ve B ₄ C (b) tozlarının tanecik boyut dağılımı	81
Şekil 6.17. Al6061 alaşımı ve Al6061-B ₄ C kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi.....	82
Şekil 6.18. Al6061 alaşımı ve Al6061-30B ₄ C-GNT hibrit kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi	83
Şekil 6.19. Al6061 alaşımı ve Al6061-B ₄ C kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi.....	84
Şekil 6.20. Al6061 alaşımı ve Al6061-30B ₄ C-GNT hibrit kompozitlerde ısıtılma işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi	85
Şekil 6.21. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı ve Al6061-B ₄ C kompozitlerin basma dayanımı değerleri	85

Şekil 6.22. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı, Al6061-30B ₄ C ve Al6061-30B ₄ C-GNT hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri	86
Şekil 6.23. Al6061 alaşımı ve Al6061-B ₄ C kompozitlerin XRD örgü desenleri	87
Şekil 6.24. Al6061-30B ₄ C ve Al6061-30B ₄ C-GNT kompozitlerin XRD örgü desenleri.....	87
Şekil 6.25. Al6061 alaşımı ve Al6061-B ₄ C kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-15B ₄ C, (d) Al6061-15B ₄ C-i, (e) Al6061-30B ₄ C, (f) Al6061-30B ₄ C-i	88
Şekil 6.26. Al6061-30B ₄ C-GNT kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061-30B ₄ C, (b) Al6061-30B ₄ C-i, (c) Al6061-30B ₄ C-0.15GNT, (d) Al6061-30B ₄ C-0.15GNT-i, (e) Al6061-30B ₄ C-0.30GNT, (f) Al6061-30B ₄ C-0.30GNT-i, (g) Al6061-30B ₄ C-0.45GNT, (h) Al6061-30B ₄ C-0.45GNT-i	90
Şekil 6.27. Sadece sinterlenen Al6061-30B ₄ C-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları	91
Şekil 6.28. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-30B ₄ C-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları.....	92
Şekil 6.29. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-B ₄ C kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri	93
Şekil 6.30. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-15B ₄ C, (d) Al6061-15B ₄ C-i, (e) Al6061-30B ₄ C, (f) Al6061-30B ₄ C-i kompozitlere ait aşınma izleri	94
Şekil 6.31. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımı, Al6061-30B ₄ C ve Al6061-30B ₄ C-GNT kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri.....	95
Şekil 6.32. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımı, Al6061-30B ₄ C ve Al6061-30B ₄ C-GNT kompozit yapılara ait sürtünme katsayısı eğrileri (P= 5N).....	95
Şekil 6.33. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061-30B ₄ C, (b) Al6061-30B ₄ C-i, (c) Al6061-30B ₄ C-0.15GNT, (d) Al6061-30B ₄ C-0.15GNT-i, (e) Al6061-30B ₄ C-0.30GNT, (f) Al6061-30B ₄ C-0.30GNT-i, (g) Al6061-30B ₄ C-0.45GNT, (h) Al6061-30B ₄ C-0.45GNT-i kompozitlerin aşınma izleri	97
Şekil 6.34. Al6061 (a), Si ₃ N ₄ (b) ve grafen (c) tozlarına ait SEM görüntüleri	98
Şekil 6.35. Al6061 (a), Si ₃ N ₄ (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri	99
Şekil 6.36. Al6061 (a) ve Si ₃ N ₄ (b) tozlarının tanecik boyut dağılımı	99
Şekil 6.37. Al6061 alaşımı ve Al6061-Si ₃ N ₄ kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi	100
Şekil 6.38. Al6061 alaşımı, Al6061-9Si ₃ N ₄ ve Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT hibrit kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi	101
Şekil 6.39. Al6061 alaşımı ve Al6061-Si ₃ N ₄ kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi.....	101
Şekil 6.40. Al6061 alaşımı, Al6061-9Si ₃ N ₄ ve Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT hibrit kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi	102
Şekil 6.41. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı ve Al6061-Si ₃ N ₄ kompozitlere ait basma dayanımı değerleri	102
Şekil 6.42. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı, Al6061-9Si ₃ N ₄ ve Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri	103
Şekil 6.43. Al6061-Si ₃ N ₄ kompozitlerin XRD örgü desenleri	104
Şekil 6.44. Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT hibrit kompozitlerin XRD örgü desenleri	104
Şekil 6.45. Al6061 alaşımı ve Al6061-Si ₃ N ₄ kompozitlerine ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-9Si ₃ N ₄ , (d) Al6061-9Si ₃ N ₄ -i, (e) Al6061-12Si ₃ N ₄ , (f) Al6061-12Si ₃ N ₄ -i.....	105

Şekil 6.46. Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT kompozitlerine ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061-9Si ₃ N ₄ , (b) Al6061-9Si ₃ N ₄ -i, (c) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.15GNT, (d) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.15GNT-i, (e) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.30GNT, (f) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.30GNT-i, (g) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.45GNT, (h) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.45GNT-i	107
Şekil 6.47. Sadece sinterlenen Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları	108
Şekil 6.48. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları	109
Şekil 6.49. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-Si ₃ N ₄ kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri	110
Şekil 6.50. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-9Si ₃ N ₄ , (d) Al6061-9Si ₃ N ₄ -i, (e) Al6061-12Si ₃ N ₄ , (f) Al6061-12Si ₃ N ₄ -i kompozitlere ait aşınma izleri	111
Şekil 6.51. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının, Al6061-9Si ₃ N ₄ ve Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri	112
Şekil 6.52. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının, Al6061-9Si ₃ N ₄ ve Al6061-9Si ₃ N ₄ -GNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri (P= 5N)	112
Şekil 6.53. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061-9Si ₃ N ₄ , (b) Al6061-9Si ₃ N ₄ -i, (c) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.15GNT, (d) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.15GNT-i, (e) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.30GNT, (f) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.30GNT-i, (g) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.45GNT, (h) Al6061-9Si ₃ N ₄ -0.45GNT-i kompozitlere ait aşınma izleri	114

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi	20
Tablo 3.2. Al6061 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	21
Tablo 3.3. Grafenin özellikleri	22
Tablo 3.4. Silisyum karbürün özellikleri	23
Tablo 3.5. Bor karbürün özellikleri	24
Tablo 3.6. Silisyum nitrürün özellikleri	25
Tablo 4.1. Toz metalürjisi tarihindeki önemli gelişmeler	36
Tablo 4.2. Bazı malzemelerin toz üretim tekniği	38
Tablo 4.3. Bazı tozlar için presleme basınçları	43
Tablo 4.4. Bazı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri.....	46
Tablo 5.1. Al6061 alaşımına ait fiziksel ve mekanik özellikler	48
Tablo 5.2. Grafenin genel özellikleri.....	49
Tablo 5.3. Bor karbürün bazı özellikleri	49
Tablo 5.4. Silisyum nitrürün genel özellikleri.....	50

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Günümüzde, teknolojinin gelişmesi ve artan sanayileşme çalışmaları geleneksel yöntemlerle üretilen mühendislik malzemelerinden ve makine parçalarından istenen performansları karşılayamaz hale getirmiştir. Bundan dolayı, katma değeri yüksek ve ileri teknolojik malzemelerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerden en önemlisi ise kompozit malzemelerdir (Şenel vd., 2015).

Kompozit malzeme; birçok malzemenin üstün özelliklerini aynı malzemede toplamak amacıyla geliştirilmiş bir malzeme türüdür. Kompozit malzemeler ana (matris) malzeme ve takviye elemanından oluşur. Kompozit malzemeler ana malzemeye göre; seramik, metal ve polimer matrisli kompozitler şeklinde sınıflandırılmaktadır (Şahin, 2000).

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda alüminyum esaslı kompozit malzemeler; hafif olmaları, aşınma direncinin ve mekanik dayanımının yüksek olması sebebiyle uzay ve otomotiv sektörleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan takviye elemanları B_4C , Si_3N_4 , SiC , Al_2O_3 ve TiC şeklinde sıralanmaktadır (Kumdalı, 2008).

Grafen, 2004 yılında sentezlenen bir malzeme olup kompozit malzemelerin içerisinde takviye elemanı olarak kullanılmasına 2008 yılından itibaren başlanmıştır. Grafenin kompozit yapı içerisinde kullanılmasının malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Novoselov, 2011).

Metalik parçaların üretiminde bilinen en eski ve modern üretim yöntemi olan toz metalürjisi yöntemi, teknolojinin gelişmesi ile havacılık ve uzay sektörü başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem, toz halinde bulunan maddelerin birtakım işlemler sonucunda yararlı mühendislik malzemelerine dönüşmesini sağlamaktadır. Uygulama alanı oldukça geniş olan toz metalürjisi yöntemi, karmaşık ve hassas parça imalatına imkân sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir (Demir ve Şenel, 2021).

Toz metalürjisi yönteminde geleneksel (katı hal) sinterleme yöntemlerinin kullanılması, yüksek sıcaklıkta ve uzun sinterleme süresi uygulanması nedeniyle

sinterlenmiş numunelerde tane büyümesine neden olmaktadır. Bu yüzden, sinterleme sıcaklığını ve süresini kontrol ederek sinterleme sırasında tane büyümesini en aza indirmek gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtılmalı sinterleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu sayede, tane büyümesi olmaksızın oldukça kısa sürede metalik tozlar yoğun bir şekilde sinterlenebilmektedir.

Bu çalışmada, sanayide yoğun bir şekilde kullanılan grafen, B_4C , Si_3N_4 , B_4C -grafen ve Si_3N_4 -grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, toz metalürjisi metoduyla Al6061-grafen, Al6061- B_4C , Al6061- B_4C -grafen, Al6061- Si_3N_4 ve Al6061- Si_3N_4 -grafen kompozitler üretilerek Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Al6061 alüminyum alaşımı, otomotiv ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok sektörde üstün özellikleri sayesinde kullanılmaktadır. Yakın gelecekte grafenin; elektrik-elektronik sektörü, otomotiv ve havacılık sektörü, gemi, tramvay ve hızlı tren teknolojisi, enerji depolama, telekomünikasyon, biyokimya, tıp, robot yapımı ve güneş hücreleri gibi birçok alanda kullanılması beklenmektedir. Bu sebeple, grafen nano tabaka (GNT) takviye elemanı olarak seçilmiştir. Diğer takviye malzemeleri ise; silisyum nitrür (Si_3N_4) ve bor karbür (B_4C) olarak belirlenmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanarak kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin artırılması hedeflenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunlukları, gözeneklilik oranı, Vickers sertlikleri, basma dayanımları, aşınma davranışları ve mikro yapıları incelenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin içyapı görüntüleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM), faz analizi içinse X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılmıştır. Ayrıca kompozit yapılarda (Al6061-GNT, Al6061- B_4C , Al6061- B_4C -GNT, Al6061- Si_3N_4 ve Al6061- Si_3N_4 -GNT), katkı malzemelerinin içyapıdaki dağılımını görmek için SEM-EDX (Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağıtıcı X-ışını) analizi gerçekleştirilmiştir.

1.3. Özgün Değer

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Al-grafen, Al-Si₃N₄ ve Al-B₄C kompozit malzemelerin özelliklerinin incelenmesine yönelik birtakım çalışmaların olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber Al6061-B₄C-grafen ve Al6061-Si₃N₄-grafen hibrit kompozitlerinin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının incelendiği çok fazla çalışmaya rastlanmamıştır.

Yürütülen tez çalışmasını özgün yapan bir diğer husus ise, toz metalürjisi yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen kompozitlere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmasıdır. Al6061-grafen, Al6061-B₄C-grafen ve Al6061-Si₃N₄-grafen hibrit kompozit malzemelerin indüksiyonla sıcak presleme işlemi öncesi ve sonrası mekanik özellikleri, aşınma davranışları ile mikroyapısı ilk kez bu çalışmada incelenmiştir.

1.4. Tez Düzeni

Bu çalışmanın birinci bölümünde, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzemesi (Al6061) ve takviye malzemeleri (B₄C, Si₃N₄ ve grafen) ile ilgili genel bilgiler verilmiş olup çalışmanın amacı ve tez düzeni anlatılmıştır. İkinci bölümde, grafen, bor karbür ve silisyum nitrür takviyeli Al6061 matrisli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, kompozit malzemeler ve özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, kompozit malzeme üretim yöntemi olan toz metalürjisi yöntemi hakkında bilgilere yer verilmiştir. Beşinci bölümde, çalışma kapsamında tercih edilen malzemelerin genel özellikleri, kompozit malzeme üretim tekniği ve karakterizasyon yöntemleri anlatılmıştır. Altıncı bölümde, üretimi gerçekleştirilen grafen, B₄C, B₄C-grafen, Si₃N₄ ve Si₃N₄-grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri ile mikroyapı analizlerine yer verilmiştir. Üretilen kompozitlerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği, basma dayanımı, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri kapsamında kompozitlerin XRD analizleri ve kırık yüzey SEM ile SEM-EDX incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yedinci bölümde, tez çalışmasının sonuçlarına ve ileride yapılacak çalışmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde; grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitler ile grafen, B₄C ve Si₃N₄ takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikro yapılarının incelenmesine yönelik literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Abbas shafqat vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada B₄C ve grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri incelemiştir. Yapılan mekanik testler neticesinde B₄C (ağırlıkça %10) ve grafen (ağırlıkça %0.25-1.2) takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik değerlerinin saf alüminyuma kıyasla yaklaşık 3,5 kat arttığı (Al6061-%10B₄C-%0.6GNT) tespit edilmiştir. Grafen ilavesinin ağırlıkça %0.6'nın üzerinde olduğu durumda grafenin aglomerasyonu ve kümelenme eğilimi nedeniyle sertlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir (Abbas shafqat et al., 2019).

Bastwros vd. (2014) gerçekleştirdikleri çalışmada, Al6061 ile ağırlıkça %1 grafen katkılı kompozitlerin öğütme sürelerinin (10, 30, 60 ve 90 dk) eğme mukavemetine olan etkisini incelemişlerdir. Eğme testi sonuçları değerlendirildiğinde; 10 dk öğütme süresinde numunelerin eğme mukavemetinde düşüş görülmüştür. 30 dk öğütme süresinde ise numunelerin eğme mukavemetinde herhangi bir değişim görülmemiştir. Referans alınan Al6061 alaşımı ile Al6061-%0.1GNT kompoziti kıyaslandığında; 60 ve 90 dk sürelerde mukavemet artışı sırasıyla %47 ve %34 olarak tespit edilmiştir (Bastwros et al., 2014).

Göçer vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, Al6061 matrisli kompozitlerde B₄C partikül boyutunun (3, 17 ve 54 µm), ısıtma işlem tekniğinin ve grafit takviye oranının mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda B₄C tane boyutunun artmasının aşınma direncine olumlu yansıdığı görülmüştür. Ayrıca T6 ısıtma işlemi ile Al6061 matrisli kompozitlerin sertliği artmıştır. Ancak grafit takviyeli kompozit malzemelerin aşınma direncinin grafit takviyesiz kompozitlere göre düşük olduğu görülmüştür (Göçer ve Karamış, 2021).

Hedayatian vd. (2020) karıştırmalı döküm ve sıcak haddeleme ile üretilen Al6061 matrisli kompozitlere ağırlıkça %0.2, 0.5 ve 0.8 grafen oksit (GO) katkısının malzemelerin mekanik ve mikro yapı özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir.

Yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm ve sıcak haddelemenin eşzamanlı kullanılmasıyla yüksek mukavemete ve yüksek tokluğa sahip dökme nanokompozitler üretmişlerdir. Çalışma sonucunda ağırlıkça %0.8 oranında grafen takviyesinin; akma dayanımını, sünekliği ve tokluğu sırasıyla %43, %58 ve %116 oranlarında arttırdığı belirlenmiştir (Hedayatian et al., 2020).

Hsieh vd. (2020) grafen nano tabaka (GNT) takviyeli Al6061 matrisli kompozit yapılarında GNT katkısının ve sıcak ekstrüzyon işleminin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada %0.25GNT içeriğine sahip kompozitlerin takviyesiz Al6061 alaşımına kıyasla; sertliğin, basma dayanımının ve aşınma direncinin sırasıyla; %6, %50 ve %17 oranlarında iyileştiği tespit edilmiştir (Hsieh et al., 2020).

Khan vd. (2019) yürüttükleri çalışmada ağırlıkça %0.1, 0.5, 1 ve 3 grafen nanotabaka takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %1 GNT içeren kompozit malzemeye kadar elektriksel iletkenliğin arttığı, ağırlıkça %3 GNT katkılı numunelerde ise grafen parçacıkların yüksek gözenekliliği sebebiyle keskin bir düşüş olduğu belirlenmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla; Al6061-%1GNT kompozitin sertliği, basma mukavemeti ve eğilme mukavemeti artışı sırasıyla; %93, %61 ve %92 olarak tespit edilmiştir (Khan et al., 2019).

Kumar vd. (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada, toz metalürjisi metoduyla üretilen Al6061 matrisli (ağırlıkça %0.2, 0.4 ve 0.6) grafen takviyeli kompozit malzemelerin yorulma ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda grafen ilavesinin sürtünme ve aşınma oranına olumlu etkisi tespit edilmiştir. Ayrıca çatlamların başlamasıyla yorulma ömrünün azaldığı görülmüştür. Grafen katkısının artmasıyla yorulma ömrünün azaldığı anlaşılmıştır. Bunun sebebinin topraklanma seviyesindeki artıştan kaynaklandığı belirtilmiştir (Kumar and Xavior, 2016).

Li vd. (2017) yürüttükleri çalışmada grafen içeriğinin (ağırlıkça %0.25, 0.5 ve 1) alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0.25 grafen takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri (çekme ve akma dayanımı) saf alüminyum ile kıyaslandığında sırasıyla

%38 ve %56 oranında artış göstermiştir. Grafen takviye oranının artmasıyla kompozitlerin mekanik özelliklerinde bozulma tespit edilmiştir (Li and Xiong, 2017).

Prakash vd. (2021) yürüttükleri çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin eklenmesi, matrisin sertliğini ve darbe mukavemetini olumlu yönde etkilemiştir. Mekanik test sonuçlarına göre Al6061 alaşımına ağırlıkça %1.5 karbon nanotüp eklenmesiyle Al6061'in sertlik değerinin %18,6 ve darbe mukavemetinin %66.6 oranında arttığı tespit edilmiştir (Prakash et al., 2021).

Shahzad vd. (2019) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli bor karbür (ağırlıkça %10) ve grafen nano tabaka (ağırlıkça %0.25-1.2) katkılı hibrit kompozit malzemelerin mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal davranışlarını incelemişlerdir. Ağırlıkça %10grafen ve %0.6B₄C katkılı hibrit kompozit malzeme için en yüksek sertlik ile basma dayanımı sırasıyla 89 HBN ve 271 MPa olarak belirlenmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla Al6061-%0,6B₄C-%10GNT kompozitin aşınma oranının ve sürtünme katsayısının düştüğü gözlenmiştir. Ağırlıkça %0.6B₄C katkı oranlarından sonra mekanik özelliklerin ve aşınma performansının kötüleştiği tespit edilmiştir (Shahzad et al., 2019).

Shao vd. (2020) yaptıkları çalışmada farklı ekstrüzyon sıcaklıklarında basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretilen Al6061 matrisli grafen nanotabaka takviyeli kompozitleri incelemişlerdir. Ağırlıkça %0.6 grafen içeren Al6061 alaşımlı kompozitler, 13/1 ekstrüzyon oranı ile 500°C, 450°C ve 420°C sıcaklıkta ekstrüde edilmiştir. Takviyesiz Al6061 alaşımı ile GNT takviyeli Al6061 kompozitlerin mukavemeti ve tokluğu kıyaslandığında; grafen takviyesiyle kompozit malzemelerde önemli ölçüde iyileşme olduğu görülmüştür. Çalışmada 450°C'de ekstrüde edilen kompozitlerin en yüksek akma dayanımı ve gerilme mukavemeti sırasıyla 389 MPa ve 500 MPa olarak belirlenmiştir. Daha yüksek ve daha düşük sıcaklıkta malzemelerin mekanik özelliklerinin takviyesiz matrise göre iyileştiği tespit edilmiştir (Shao et al., 2020).

Şenel vd. (2018) çalışmalarında toz metalürjisi yöntemiyle grafen (ağırlıkça %0.1, 0.3 ve 0.5) takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Grafen katkısının alüminyum matrisli kompozitlerin yoğunluğu, Vickers sertliği, basma

dayanımı ve aşınma davranışı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. En yüksek sertlik değerine (57 HV), Al-%0.1GNT kompozit yapıda ulaşılmıştır. Belirli oranda (ağırlıkça %0.1) yapılan grafen takviyesinin, Al matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir (Şenel vd., 2018).

Tripathy ve Senapati (2021) yürütmüş oldukları çalışmada B₄C ve grafen takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Matris malzemeye ilave edilen B₄C ve grafenin darbe dayanımı, çekme mukavemeti, sertlik ve basma mukavemeti üzerine olumlu etkileri belirlenmiştir. Hibrit kompozitlerin sertlik ve yoğunluk değerlerinin, B₄C ve grafenin belli ağırlık oranlarında eklenmesiyle arttığı görülmüştür. Grafenin belirli katkı oranından (%0.3) daha fazla kullanılması durumunda grafenin topaklanması sebebiyle kompozitin yoğunluğunda azalma gözlenmiştir. Çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğunun belli bir grafen katkısına kadar arttığı bu katkı oranından sonra ise grafenin topaklanması sebebiyle düştüğü belirlenmiştir (Tripathy and Senapati, 2021).

Wang vd. (2012) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alüminyum matrisli grafen takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda ağırlıkça %0.3 grafen takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, saf alüminyuma kıyasla %62 oranında arttığı belirlenmiştir (Wang et al., 2012).

2.2. Bor Karbür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Alihosseini vd. (2017) yürütmüş oldukları çalışmada alüminyum matrisli B₄C (ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5) takviyeli kompozitlerde, sinterleme sıcaklığının ve takviye oranının mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda en iyi mekanik özelliklere Al-%5B₄C kompozit yapıda ve 600°C sıcaklığında ulaşılmıştır. Maksimum basma dayanımı ve Vickers sertliği sırasıyla; 265 MPa ve 165 HV olarak tespit edilmiştir (Alihosseini et al., 2017).

Halil vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada Al6061 matrisli SiC ve B₄C takviyeli hibrit kompozitleri sıcak ekstrüzyon tekniği ile üretmişlerdir. Kompozitlerin yoğunluk, sertlik, kopma mukavemeti, çekme mukavemeti ve aşınma davranışı gibi özellikleri bu çalışmada incelenmiştir. Al6061 alaşıma kıyasla %12B₄C takviyeli

kompozitin sertlik oranındaki artış %52 olarak belirlenmiştir. %12 SiC takviyeli kompozitin kopma mukavemeti ve çekme mukavemeti sırasıyla 402 MPa ve 185,1 MPa olarak belirlenmiştir. B₄C'nin yüksek sertliği ve SiC'ün iyi yapışma özellikleri sebebiyle %9B₄C-%3SiC katkılı alüminyum hibrit kompozit yapıda en iyi aşınma direncine ulaşıldığı tespit edilmiştir (Halil vd., 2019).

İpekoğlu vd. (2017) çalışmasında, sıkıştırırmalı döküm yöntemiyle B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. B₄C katkı oranının (ağırlıkça %0, 3, 5 ve 10) ve sıkıştırma basıncının (P= 0,75, 150 MPa) kompozitlerin mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda en iyi mekanik özelliklere (sertlik, çekme gerilimi ve akma gerilimi), %5 B₄C takviyeli kompozit yapıda ve P=150 MPa sıkıştırma basıncında ulaşılmıştır (İpekoğlu vd., 2017).

Karabulut vd. (2016) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al6061 matrisli B₄C (ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20) takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit yapıların sertlik değerlerinin B₄C katkısıyla arttığı ve maksimum sertliğin ağırlıkça %20B₄C ilavesinde elde edildiği belirlenmiştir. Matristeki B₄C ilavesinin artması ile darbe direncinin azaldığı ve %10B₄C ilavesinde maksimum kırılma tokluğuna ulaşıldığı tespit edilmiştir. En yüksek çekme ve kopma mukavemeti ağırlıkça %5B₄C takviyeli Al6061 matrisli kompozitte elde edilmiştir (Karabulut vd., 2016).

Manohar vd. (2021) yürütülen çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al7075 matrisli B₄C takviyeli kompozitlerde sinterleme koşullarının mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Sinterleme işlemi; geleneksel sinterleme (620°C sıcaklıkta 150 dk sürede), kıvılcım plazma sinterleme (500°C sıcaklıkta 5 dk sürede) ve mikrodalga sinterleme (500°C sıcaklıkta 30 dakikada) olmak üzere üç farklı teknik kullanılarak yapılmıştır. Mekanik özellikler karşılaştırıldığında; kıvılcım plazma sinterleme yöntemi kullanılarak sinterlenen numunelerin kısa sinterleme süresi ve düşük sinterleme sıcaklığı nedeniyle diğer yöntemlere göre üstün mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde kıvılcım plazma ve mikrodalga sinterleme yöntemiyle sinterlenen numunelerde topaklanma oluşumu tespit edilememiştir. Geleneksel sinterleme ile kıyaslandığında kıvılcım plazma ve mikrodalga sinterleme yönteminde gerilme tokluğu değerlerinin sırasıyla %19.2 ve %12.3 oranlarında arttığı tespit edilmiştir (Manohar et al., 2021).

Pang vd. (2018) yaptıkları çalışmada sıcak izostatik presleme ile ürettikleri Al6061 matrisli %12B₄C ve %2.5Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin çekme özelliklerini ve mikro yapılarını incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde kompozit yapıların çekme mukavemetinin, Al6061 alaşımına kıyasla yaklaşık %246 oranında arttığı tespit edilmiştir (Pang et al., 2018).

Rajkumar vd. (2014) çalışmalarında, karıştırma yöntemiyle üretilen Al6061 matrisli B₄C takviyeli kompozitlerde ısıtıl işlem ile mikrodalga ısıtıl işleminin kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda ısıtıl işlem görmüş kompozitlerin mekanik özelliklerinin ısıtıl işlem görmemiş kompozitlere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca mikrodalga ısıtıl işleminin kompozit malzemelerde darbe dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir (Rajkumar et al., 2014).

Sathiyaraj vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada Al6061 matrisli B₄C (ağırlıkça %3, 5, 7 ve 10,5) takviyeli kompozitleri karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Çalışma neticesinde Al6061 matrise %7B₄C ilavesiyle kompozitlerin sertliğinin (70 HV) ve çekme mukavemetinin (186.09 MPa) arttığı belirlenmiştir (Sathiyaraj et al., 2021).

Şenel ve Gürbüz (2021) yaptıkları çalışmada B₄C (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30) ve grafen (ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45) takviyeli Al matrisli hibrit kompozitleri toz metalürjisi yöntemi ile üreterek kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre en yüksek Vickers sertliği (109.8±1.5 HV), basma dayanımı (245 MPa), yoğunluk (2.54±0.005 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%4) Al-%30B₄C-%0.15GNT hibrit kompozit yapıda elde edilmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen katkısından sonra alüminyum hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulduğu belirlenmiştir (Şenel ve Gürbüz, 2021).

Varol ve Çanakçı (2013) yürüttükleri çalışmada Al2024 matrisli B₄C takviyeli kompozitleri mekanik öğütme ile üretmişlerdir. B₄C tanecik boyutunun (5 µm ve 49 µm) ve partikül takviye oranlarının (%0, 5, 10 ve 20) kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda tanecik boyutu 5 µm olan %10B₄C takviyeli kompozitlerin sertlik değerinin saf Al2024 alaşımına kıyasla %51 oranında arttığı belirlenmiştir (Varol ve Çanakçı, 2013).

Wang vd. (2020) yaptıkları çalışmada sıcak presleme yöntemiyle üretilen B₄C matrisli kompozitlerde, grafen (ağırlıkça %1, 2, 4 ve 10) katkı oranının kompozitlerin mekanik özelliklerine (yoğunluk, sertlik, eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğu) olan etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %1 grafen katkılı kompozitlerin bağıl yoğunluğu %99,12, Vickers sertliği 32,8 HV, eğilme mukavemeti 580 MPa ve kırılma tokluğu 4.66 MPa olarak belirlenmiştir. %1'in üzerindeki grafen katkısında kompozitin mekanik özelliklerin kötüleştiği tespit edilmiştir (Wang et al., 2020).

2.3. Silisyum Nitrür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Abdelatty vd. (2021) yaptıkları çalışmada Si₃N₄ ve grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri incelemişlerdir. Ağırlıkça %5 Si₃N₄ katkısının bulunduğu hibrit kompozitlerde grafen miktarı ile birlikte mekanik özelliklerde iyileşme görülmüştür. Ağırlıkça %1.5 grafen içeren kompozitlerde en iyi sertlik değerine (86.72 HV) ulaşılmıştır (Abdelatty et al., 2021).

Arık (2019) yapmış olduğu çalışmada, toz metalürjisi metodu ile elde ettiği α -Si₃N₄ (ağırlıkça %5, 10, 15) takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma davranışını incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde; saf alüminyuma kıyasla üretilen kompozit malzemelerin tamamının aşınma oranı azalmıştır. En yüksek aşınma direnci Al-%15Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Ayrıca Al-%15Si₃N₄ kompozit numunesinin sertlik değeri (76.1 HB), matris malzemeye göre %65 oranında artmıştır (Arık, 2019).

Karakoç (2020) çalışmasında, toz metalürjisi yöntemiyle Al7075 matrisli B₄C (ağırlıkça %5, 10 ve 15) ve Si₃N₄ (ağırlıkça %2) takviyeli kompozit malzemeleri üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin yoğunluğunu, sertliğini, aşınma özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, Si₃N₄ takviyesinin kompozitlerin yoğunluk değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Sertlik verileri incelendiğinde, Si₃N₄ takviyesinin, B₄C takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerin sertlik değerini arttırdığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri (110 HB) Al7075-%15B₄C-%2Si₃N₄ kompozit malzemesinde tespit edilmiştir. Elde edilen numunelerin aşınma davranışları incelendiğinde, Si₃N₄ ilavesinin aşınma oranını azalttığı görülmüştür (Karakoç, 2020).

Öztop ve Gürbüz (2021) yaptıkları çalışmada, atık içecek kutuları ergiterek üretilen alüminyum alaşımına Si₃N₄ (ağırlıkça %0.5, 0.75 ve 1) takviyesi yaparak,

takviye oranının kompozitlerin sertlik, yoğunluk, çekme dayanımı, darbe dayanımı ve mikroyapısına olan etkisini incelemişlerdir. %1Si₃N₄ takviyesiyle sertlik değeri 70 HV'den 87.9 HV'ye, darbe mukavemeti 4.94 J'den 13.18 J'ye ve çekme mukavemeti 54.5 MPa'dan 105.17 MPa'a yükselmiştir. En iyi mekanik özelliklere %1 Si₃N₄ katkılı alüminyum esaslı kompozit yapısında ulaşılmıştır. Yapılan SEM analizlerinde, takviye oranının artmasıyla partikül dağılımının azaldığı ve takviye malzemenin matris içerisinde homojen olarak dağılmadığı görülmüştür (Öztop ve Gürbüz, 2021).

Öztop ve Gürbüz (2018) çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemiyle atık alüminyum kutularından elde ettikleri alaşıma Si₃N₄ (ağırlıkça %0.5, 0.75, 1, 1.25, 2 ve 3) takviye etmişlerdir. Takviye oranının yoğunluk, sertlik ve mikroyapıya olan etkisini incelemişlerdir. Kompozitlerde ağırlıkça %1Si₃N₄ takviyesine kadar sertlik değerinin 70 HV'den 87.9 HV'ye kadar arttığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %1 katkı oranından sonra taneciklerde oluşan topaklanmalar sebebiyle sertlik değerinin düştüğü tespit edilmiştir (Öztop ve Gürbüz, 2018).

Raghavendra vd. (2020) yürüttükleri çalışmada karıştırmalı döküm yöntemiyle alüminyum matrisli Si₃N₄ (ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10) takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda en yüksek sertlik değeri (54 HB) %8Si₃N₄ takviyeli kompozit yapıda elde edilmiştir. Matrise ağırlıkça %8'e kadar yapılan Si₃N₄ takviyelerinde mekanik özelliklerin iyileştiği; sonrasında ise düşüşe geçtiği tespit edilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde takviye malzemelerin %10Si₃N₄ katkı oranına kadar matriste homojen olarak dağıldığı bu katkı oranında sonra ise topaklanmaların oluştuğu tespit edilmiştir (Raghavendra Rao and Mohan, 2020).

Ramu vd. (2021) çalışmalarında, karıştırmalı döküm tekniğini kullanarak Al6061 matrisli Si₃N₄ (ağırlıkça %1, 2, 3 ve 4) takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere 3 geçişli eş kanallı açısallı presleme (EKAP) uygulanıp mekanik özellikleri incelenmiştir. Si₃N₄ takviyesinin ve EKAP işleminin ana malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk (2.84 g/cm³) ve sertlik (85 HB) değerine %4Si₃N₄ katkılı alüminyum matrisli kompozit yapıda ulaşılmıştır. Takviye miktarının artmasına ve uygulanan EKAP işlemine bağlı olarak aşınma dayanımının arttığı belirlenmiştir (Ramu et al., 2021).

Sharma vd. (2015) çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Si_3N_4 (ağırlıkça %3, 6, 9 ve 12) takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Testler sonucunda Al6082 alaşımın teorik yoğunluğu, sertliği ve çekme mukavemeti sırasıyla 2.69 g/cm^3 , 49.5 HV ve 161.5 MPa iken; Al6082-%9 Si_3N_4 kompozitin deneysel yoğunluğu, sertliği ve çekme dayanımı sırasıyla 2.75 g/cm^3 'e, 93.5 HV'ye ve 201 MPa'a yükselmiştir (Sharma et al., 2015).

Şenel vd. (2017) toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Si_3N_4 (ağırlıkça %3, 6, 9 ve 12) ve SiC (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30) katkılı alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemişlerdir. En iyi Vickers sertliği ve basma dayanımına sırasıyla Al-%9 Si_3N_4 (57 HV ve 292 MPa) ve Al-%30SiC (79 HV ve 198 MPa) kompozit yapılarda elde edilmiştir (Şenel vd., 2017a).

Şenel ve Gürbüz (2020) Si_3N_4 (ağırlıkça %1, 3, 6 ve 9) ve grafen (ağırlıkça %0.1, 0.3 ve 0.5) katkılı alüminyum matrisli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Üretimi gerçekleştirilen hibrit kompozitlerin mikroyapı, Vickers sertliği, yoğunluğu ve gözeneklilik oranı gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda en yüksek Vickers sertliğine ($66 \pm 1 \text{ HV}$), en yüksek yoğunluğa ($2.59 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) ve en düşük gözeneklilik oranına (%5.6) Al-%9 Si_3N_4 -%0.1GNT hibrit kompozit yapıda ulaşılmıştır. Ayrıca Si_3N_4 katkısının aşınma hızını arttırdığı ve sürtünme katsayısını azalttığı tespit edilmiştir. Grafen katkı oranının ağırlıkça %0.1 üzerine çıktığı kompozisyonlarda grafenin topaklanma eğilimine girmesinden dolayı mekanik özelliklerde düşüş meydana gelmiştir (Şenel ve Gürbüz, 2020b).

3. KOMPOZİT MALZEMELER

En az iki veya daha fazla malzemenin en iyi özelliklerinin makro düzeyde birleşmesiyle oluşan ve kendini oluşturan malzemelerden farklı mekanik ve fiziksel özellikler gösteren malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılır (Şahin, 2000; Russell and Lee, 2005).

Kompozit malzeme esas olarak sürekli faz olan matris ve süreksiz faz olan takviye elemanından meydana gelmektedir. Matris, takviye parçalarını birarada tutup onları dış etkilere karşı korumaktadır. Takviye elemanları ise kompozitin matris elemanının mukavemeti gibi birtakım zayıf kısımlarını güçlendirmek üzere kullanılmaktadır (Mazumdar, 2002).

Kompozit malzemeler, sahip olduğu yüksek mekanik, elektriksel, termal ve tribolojik özellikler sayesinde endüstride birçok alanda (uzay, uçak, savunma ve otomotiv sanayisinde) yaygın olarak kullanılmaktadır (Ekici, 2012).

Kompozit malzemelerde genellikle malzemelerin belli özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özellikler;

- Mekanik özellik (çekme, basma, eğilme, çentik darbe gibi),
- Yorulma dayanımı ve aşınma direnci,
- Elektrik ve termal iletkenlik,
- Yoğunluk,

olarak sıralanabilir (Yılmaz, 2019).

Kompozit malzemelerin düşük özgül ağırlıklarına karşı gösterdikleri yüksek dayanım, elastiklik modüllerinin yüksek olması, yüksek aşınma dayanımları gibi üstün özellikleri sayesinde kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Kompozit malzemelerin tercih edilme sebepleri ve sağladığı birtakım avantajlar bulunmaktadır. Bunlar;

- *Yüksek mukavemet:* Kompozit malzemelerin eğilme momenti ile çekmeye karşı gösterdiği dayanım oldukça yüksektir.
- *Yüksek elektriksel ve ısı direnci:* Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye elemanına bağlı olarak yüksek ısı ve elektriksel dirence sahiptir.

- *Yüksek korozyon dayanımı:* Çevre koşullarından kaynaklı, kimyasal ve korozyon etkilerine karşı dayanıklıdır.
- *Yüksek şok darbe dayanımı:* Sünek yapılarından dolayı ani yüklere ve darbelere karşı dayanıklıdır.
- *Şekillendirme kolaylığı:* Büyük ve karmaşık parçalar tek parça halinde üretilip, kaplama işlemi kolaylıkla yapılmaktadır (Russell and Lee, 2005; Callister and Rethwisch, 2011; Kırmızı vd., 2019).

Her malzemede olduğu gibi kompozit malzemelerde de bazı dezavantajlar bulunmaktadır. Bunlar;

- *Pahalı hammadde:* Kompozit malzemelerde kullanılan bazı matris ve takviye elemanlarının maliyetleri yüksektir.
- *Farklı standart özellikler göstermesi:* Üretim yöntemlerine ve üretim koşullarına bağlı olarak her durumda çekme, basma ve eğilme mukavemet değerleri birbirinden farklıdır.
- *Karmaşık ve zor üretim:* Her ürüne özel ve hassas üretim prosesi gerektirdiği için yeterli kalifiye personeli bulunmamaktadır.
- *Onarım zorluğu:* Herhangi bir hata ve arıza durumunda malzemenin onarımında güçlükler yaşanabilmektedir (Şahin, 2000; Arıcasoy, 2006).

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Günümüzde üretilen kompozit malzemeler her geçen gün arttığından sınıflandırmaya ihtiyaç duyulmuştur. Kompozit malzemeleri matris malzemesine veya takviye elemanının şekline göre sınıflandırmak mümkündür (Topçu vd., 1991).

3.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Matris malzemesine göre kompozit malzemeler aşağıdaki gibi üç gruba ayrılır.

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

3.1.1.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Esas yapı malzemesi metal veya metal alaşımı olan kompozit malzemelerdir. Matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerde matris malzemesi olarak, alüminyum ile alüminyum

alaşımları oldukça fazla tercih edilmektedir. Bunun yanında magnezyum, titanyum, bakır gibi metaller ile bunların alaşımları da matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Sahip olduğu yüksek dayanım, yüksek aşınma direnci, düşük yoğunluk ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme gibi üstün özellikleri sayesinde birçok alanda tercih edilmektedir (Russell and Lee, 2005; Bulut, 2014).

Seramik esaslı malzemeler metal matrisli kompozit yapılarda çok sık tercih edilen takviye elemanlarıdır. Bor karbür (B_4C), silisyum nitrür (Si_3N_4), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), titanyum nitrür (TiN) gibi seramikler yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklık direnci ve yüksek sertlik gibi üstün özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir.

3.1.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler, gevrek ve sert yapıda bir karakteristiğe sahip olup plastik deformasyona uğramadan kırılırlar. Bu tür malzemelerin ısıl şok direnci ve tokluğu düşük olup çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Seramiklerin toklukları düşük olmasına karşın fiber takviyeler ile arttırılmaktadır. Havacılık, otomotiv, uzay sanayi ve askeri alanda kullanılan bu malzemeler yüksek biyouyumluluk göstermesi sebebiyle insan vücudundaki protezlerde de yaygın kullanım alanları bulmaktadır (Onat, 2015).

3.1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Plastiklerin yapı taşı olarak kullanılan polimerler; kolay şekil alabilen, maliyeti düşük malzemelerdir. Korozyona karşı yüksek dayanımları sebebiyle denizcilik, hafif olmaları sebebiyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yoğun olarak tercih edilmektedir. Bor, karbon fiber ve cam fiber polimer matrisli kompozit malzemelerde sıklıkla kullanılan takviye elemanlarıdır (Onat, 2015; Dengiz, 2018).

3.1.2. Takviye Elemanının Şekline Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler, üretim sırasında kullanılan takviye elemanlarının şekline göre sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Partikül takviyeli kompozit malzemeler,
- Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemeler,
- Tabakalı kompozit malzemeler,

şeklinde.

3.1.2.1. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bu tip kompozitler, parçacık (partikül) halindeki malzemelerin, matris içine katılmasıyla oluşur. 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 üretiminden en çok kullanılan takviye partikülleri; Al_2O_3 , B_4C ve SiC gibi seramik malzemelerdir (Şahin, 2000; Nijssen, 2015).

3.1.2.2. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bu tür malzemelerde, kompozite gelen yük matris tarafından fibere iletilir ve yükün çoğu fiber tarafından taşınır. Fiberler, kompozit malzemenin içerisinde yönlendirilmiş ya da tek yönlü olarak bulunabilmektedir. Özellikle, havacılık ve uzay sektöründe istenilen yüksek mukavemet, hafiflik ve rijitlik gibi üstün özellikler sayesinde fiber takviyeli kompozitler bu alanlarda kullanılan önemli malzemelerdendir (Jones, 1975).

3.1.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Birbirlerinden farklı özellik gösteren birden fazla tabakanın, ana malzeme içerisinde değişik şekillerde yönelmesiyle oluşur. Isı ve neme karşı oldukça dayanıklıdır. Uçak gövdelerindeki sandviç yapılı malzemeler tabakalı kompozit yapıların kullanıldığı endüstriyel alanlardandır (Uçak, 2018).

3.2. Metal Matrisli Kompozitler

Mevcut mühendislik malzemelerinin teknolojik gelişmelere cevap verememesi sebebiyle, 1959 yılından sonra MMK malzemelerin üretimi başlamıştır (Mortensen vd., 1988). Son yıllarda teknolojik gelişmelerle birlikte metal matrisli kompozitlerin üretimi ve kullanımı artış göstermektedir. Metal matrisli kompozit malzemeler, diğer malzemelere kıyasla yüksek dayanım, düşük ağırlık, geliştirilmiş ısı ve mekanik özellikler sayesinde çeşitli alanlarda ilgi görmektedir (Topçu vd., 1991). Metal matrisli kompozitlerin, takviyesiz metallere oranla önemli avantajları vardır. Bunlar:

- Yüksek elastisite modülü ve mukavemet,
- Yüksek eğme, basma ve çekme dayanımı,
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı,
- Yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik,
- Yüksek aşınma ve sürünme direnci,

şeklinde sıralanabilir (Akbulut, 1994).

Metal matrisli kompozitlerin avantajları ile birlikte bazı dezavantajları mevcuttur. Bu özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- Metallere göre kompozit malzemelerin sünekliği düşüktür.
- Metalik malzemelere oranla üretim maliyetleri yüksektir.
- MMK üretimi için genellikle zor ve karmaşık bir sürece ihtiyaç duyulmaktadır (Şahin, 2000).

3.2.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri

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

3.2.1.1. Titanyum ve Alaşımları

Titanyum (Ti), sahip olduğu $\sim 4.54 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk ve $\sim 115 \text{ GPa}$ elastisite modülü ile çok önemli bir havacılık ve uzay malzemelerindendir. Üstün mekanik ve fiziksel özelliklerine sayesinde son yıllarda dikkat çeken malzemelerden olmuştur. Titanyum, nispeten yüksek ergime sıcaklığı (1672°C), iyi oksidasyon ve korozyon direncine sahiptir (Karaduman, 2010).

Titanyumun diğer metallere göre ısı genleşme katsayısı düşüktür. Dolayısıyla, yüksek sıcaklık uygulamalarında Ti ve alaşımları tercih edilmektedir. Havacılık ve uzay sanayisinin yanı sıra biyoyumlu malzeme özelliğinden dolayı sağlık sektöründe implant malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Mutuk ve Gürbüz, 2019).

3.2.1.2. Magnezyum ve Alaşımları

Magnezyum (Mg) $\sim 1.74 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Düşük yoğunluğundan dolayı alüminyumdan %36 ve demirden de %78 daha hafiftir. Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluklarıyla beraber yüksek mukavemet, yüksek ısıl iletkenlik ve basit geri dönüşüm gibi üstün özelliklere sahiptir. Bununla birlikte magnezyum ve alaşımları; uzay uygulamalarında, cep telefonu ve kamera imalatında, yüksek hızlı trenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kelen et al., 2019).

3.2.1.3. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum (Al), $\sim 2.70 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa, $\sim 70 \text{ GPa}$ elastisite modülüne, 660°C ergime sıcaklığına sahiptir. Yerkabuğundaki %8 civarındaki içeriğiyle, oksijen ve

silisyumdan sonra en çok kullanılan üçüncü elementtir (Ashby, 1996). Alüminyum, kolay işlenebilirlik, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi oldukça önemli özelliklere sahiptir. Alüminyum alaşımları ise farklı üretim yöntemleriyle ekonomik olarak üretilmektedir. Alüminyum alaşımların mukavemetleri oldukça iyi olup mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Kalemtaş, 2014).

Alüminyum alaşımlarını, üretim yöntemlerine göre döküm ve dövme alaşımları olarak iki ana gruba ayırmak uygundur. 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, mutfak evyelerinde kullanılmaktadır.
- 2xxx: Temel alaşım elementi bakır (Cu) olmakla birlikte bazı alaşımlarda magnezyum (Mg) ve mangan 'da (Mn) alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Bu tür alaşımlar, ısıtılma 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 (285 MPa) 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 ısıtılma 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 ısıtılma 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).

3.2.1.4. Al6061 Alaşımı ve Özellikleri

Al6061 alaşımı; mükemmel mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve yüksek tokluk gibi özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Tandoğan, 2009). Al6061 alaşımı endüstriyel uygulamalarda; 1100 veya 2024 alaşımlarına göre daha fazla tercih edilmektedir. Al1100 alaşımı yüksek darbe dayanımına, Al2024 alaşımı ise üstün mekanik özelliklere sahiptir. Al6061 alaşımı ise yüksek tokluğa ve üstün mukavemete ve iyi korozyon direncine sahiptir (Kamber, 2017). Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Akkurt, 2005)

Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Ti	Cr	Mn
0,70	0,40-0,80	0,15-0,40	0,80-1,20	0,25	0,15	0,04-0,35	0,15

Al6061 alaşımında yer alan çeşitli alaşım elementleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- Fe (Demir): Alaşımın sertliğini ve dayanımını arttırır. Alüminyum alaşımlarına eklenmesi ile gevreklik artışına sebep olur.
- Si (Silisyum): Akışkanlığın artmasına sebep olur, sıcak çatlamadaki eğilimi azaltır.
- Mn (Mangan): Demirle birlikte kullanılarak dökülebilirliğin artmasını sağlar. Alaşımlarda tokluk ve sünekliği arttırır. Metaller ile yapılan bileşiklerin özelliklerinin değişmesi sağlar.
- Mg (Magnezyum): Katı çözeltili sertleşmesi meydana getirir. Si-Al alaşımlarındaki dayanımın artmasını sağlar.
- Zn (Çinko): Yüksek çinko içeren alaşımlarda soğuk çekmeyle birlikte sıcak çatlama gerçekteşir. Farklı alaşım elementleri ile çinko katkısı dayanımın artmasını sağlar. Bununla birlikte dökülebilirliğin düşmesine neden olur.
- Cu (Bakır): Alüminyum metaline ağırlıkça %12 oranına kadar ekleme yapıldığında alaşımın dayanımını arttırır. Bu katkı oranından daha fazla oranlarda yapılan katkılarda alüminyum alaşımı gevreklik gösterir (Keskin, 1991).

Al6061 alaşımının sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Al6061 alaşımının fiziksel ve mekanik  zellikleri (Akkurt, 2005)

�zellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.713
Ergime noktası (�C)	660
Kaynama noktası (�C)	2519
Termal iletkenlik (W/(m�K))	167
Özgül ısı (J/(g�C))	0,896
Elastisite modülü (GPa)	69
Çekme dayanımı (MPa)	310
Akma dayanımı (MPa)	270
Sertlik (HV)	107
Poisson oranı	0,33

Al6061 alaşımı, çok iyi süneklik, yüksek ağırlık/dayanım oranı, iyi korozyon direnci, şekil değiştirmesindeki kararlık ve m kemmek kaynak edilebilirlik gibi üstün özelliklere sahiptir (Altuner ve Keleşoğlu, 2012). Al6061 alaşımı, ağırlıkça hafif olması sebebiyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde, korozyon dayanımının yüksek olması ve kaynak yapılabilirliğinin iyi olması sebebiyle de kazan imalatında kullanılmaktadır (Akkurt ve Ovalı, 2009). Dişli  arklar, kamyon yayları, sürünmeye dirençli manyetik malzemeler, nükleer reaktörler, elektrik kontak malzemeleri ve deniz araçları yapımında da Al6061 alüminyum alaşımları tercih edilmektedir (Gui and Kang, 2000).

3.2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin üretiminde; takviye elemanlarının seğimi, üretim yöntemi ile matris malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Kullanım alanına bağlı olarak MMK’lardaki takviye elemanlarından beklenen özellikler aşağıda özetlenmiştir:

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek dayanım,
- Yüksek ısı dayanımı,
- Matris malzemesi ile kimyasal uyumu,
-  retimnin kolaylığı,
- Maliyetinin düşüklüğü,

şeklinde (şahin, 2000; Miracle, 2005).

Seramik veya karbon esaslı takviye elemanları metal matrisli kompozit yapılarda çok sık tercih edilmektedir. Grafen, karbon nanotüp, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al₂O₃), bor karbür (B₄C), silisyum nitrür (Si₃N₄) ve bor nitrür (BN) en sık kullanılan takviye elemanlarından (Mortensen, 2001).

3.2.2.1. Grafen ve Özellikleri

Manchester Üniversitesi'nden Konstantin Sergeevich Novoselov ve Andre Geim isimli bilim adamları tarafından 2004 yılında keşfedilmiştir. Grafenin yapısını oluşturan karbon atomlarının iki boyutlu altıgen yapısı, grafenin olağanüstü mekanik, ısı, elektriksel ve tribolojik özelliklere sahip olmasını sağlamıştır. Tablo 3.3'de grafene ait özellikler verilmiştir (Kumar and Xavier, 2014).

Tablo 3.3. Grafenin özellikleri (Şenel vd., 2015)

Özellikler	Değer
Hibrit şekli	sp ²
Kristal yapısı	Hegzagonal
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Boyut	İki
Saflik derecesi (%)	99
Kütlesel yoğunluk (g/cm ³)	0.3
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	2.25
Kalınlık (mm)	1-2-
Yüzey alanı (m ² /g)	2600
Termal iletkenliği (W/(m ² K))	4840-5300
Elastisite Modülü (GPa)	1000

Doğada en ince malzeme olarak bilinen grafen, sahip olduğu güçlü karbon bağları sebebiyle yüksek dayanıma sahip bir malzemedir. Yüksek elastisite modülü ile çelikten daha üstün dayanıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. İyi bir ısı iletkenliğine sahip olmasının yanı sıra yüksek elektriksel iletkenliğe ve doğal yağlayıcılık özelliğine sahip olması sebebiyle aşınma dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. Elmaştan sert olmasına rağmen şekil verme kolaylığı ve esnekliği sebebiyle birçok malzemenin kaplanması kullanılmaktadır (Jang and Zhamu, 2008; Savage, 2012).

Grafenin en önemli kullanım alanı, yüksek mukavemete sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi olarak öngörülmektedir. Alüminyum başta olmak üzere magnezyum ve titanyum gibi malzemelere grafen katkısı yapılarak geliştirilen grafen

takviyeli metal matrisli kompozitlerin, havacılık, otomotiv, tıp gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılması beklenmektedir (Şenel vd., 2015).

3.2.2.2. Silisyum Karbür (SiC) ve Özellikleri

Silisyum ve karbon elementlerine doğada bol miktarda rastlanmasına rağmen silisyum karbür doğada bileşik olarak bulunmamaktadır. Silisyum karbür oldukça fazla kullanılan yapısal seramiklerdendir. Yaklaşık olarak 1400°C çalışma sıcaklığına sahiptir. En büyük avantajı, maruz kaldığı yüksek sıcaklığa rağmen rijitlik ve mukavemet değerlerini koruyup termal şoklara karşı dayanıklı olmasıdır. Çok sert ve aşındırıcı bir malzeme olan SiC'ün yüksek sürünme mukavemeti bulunmaktadır. Bu özellikler sayesinde sergilediği termal şok dayanımı mükemmeldir. Seramik malzemeler arasında dayanımı en yüksek malzemelerden biri sinterlenmiş silisyum karbürdür. SiC'ün ticarileşmesinin en önemli nedenlerinden birisi de sertliğinin yüksek olmasıdır. Çok geniş bir renk dağılımına sahip olan silisyum karbür genelde siyah görüntüsüyle ortaya çıkmaktadır. Tablo 3.4'de silisyum karbürün genel özellikleri belirtilmiştir (Jones et al., 1999; Şenel vd., 2017b).

Tablo 3.4. Silisyum karbürün özellikleri (Weimer, 2012)

Özellikler	Değer
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.21
Molekül ağırlığı (g/mol)	40,1
Termal iletkenliği (W/(m°K))	126
Ergime sıcaklığı (°C)	2797
Sertlik, vickers (kg/mm ²)	3100
Elastik modül (GPa)	410

Silisyum karbür, ileri teknoloji malzemelerine ihtiyaç duyulan sektörler başta olmak üzere, uzay teknolojisinde, türbin motorlarında, bilgisayar çiplerinde ve seramik zırh malzemelerinde kullanılmaktadır (Sınmazçelik, 2003).

3.2.2.3. Alüminyum Oksit (Al₂O₃) ve Özellikleri

Alüminyum oksit (Al₂O₃) diğer bir ifadeyle alümina, düşük yoğunluğu (3.987 g/cm³), yüksek aşınma direnci, yüksek ergime sıcaklığı (2500°C), yüksek sıcaklıktaki iyi korozyon dayanımı ve düşük maliyeti sebebiyle sıklıkla tercih edilen takviye elemanlarından (Sak vd., 2018).

Alüminanın bu üstün özellikleri sayesinde tıp ve sağlık sektörü başta olmak üzere savunma sanayi (roket nozulları ve motor parçaları vb.) gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Şenel ve Gürbüz, 2019).

3.2.2.4. Bor Karbür (B_4C) ve Özellikleri

Bor karbür (B_4C), seramiklerin içerisinde kübik bor nitrür ve elmaştan sonra en yüksek sertlik değerine sahip olan bir malzemedir. Ayrıca bor karbür, yüksek ergime sıcaklığı, düşük yoğunluğu ve kimyasala karşı korozyon direnci oldukça iyi yeni nesil mühendislik malzemesidir (Kaya, 2014). Bor karbürün bazı özellikleri Tablo 3.5’de verilmiştir (Spohn, 1995).

Tablo 3.5. Bor karbürün özellikleri (Spohn, 1995)

Özellikler	Değer
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.52
Isıl genleşme ($^{\circ}C^{-1}$)	5.10^{-6}
Rengi	Siyah
Ergime sıcaklığı ($^{\circ}C$)	2400
Sertlik (HV)	3800
Elektrik iletkenliği ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)	140
Elastisite modülü (GPa)	441
Termal iletkenlik ($W/(m^{\circ}K)$)	4.3
Poisson oranı	0,17
Çekme Dayanımı (MPa)	155

Bor karbürün sahip olduğu, yüksek aşınma direnci ve sertliği sebebiyle çeşitli nozullarda, düşük özgül ağırlığının avantajıyla savunma sanayinde zırh malzemesi olarak tercih edilmektedir.

3.2.2.5. Silisyum Nitrür (Si_3N_4) ve Özellikleri

Silisyum nitrür, yüksek termal şok direnci, iyi ısı iletkenlik, yüksek aşınma dayanımı ve düşük yoğunluk gibi üstün özellikleri sebebiyle takviye elemanı olarak kullanılmaktadır (Segal, 1997). Tablo 3.6’da silisyum nitrürün özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.6. Silisyum nitrürün özellikleri (Bozkurt, 2019)

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	3.17
Isıl genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.3×10^{-6}
Termal iletkenliği ($\text{W/(m}^{\circ}\text{K)}$)	29
Elastisite modülü (GPa)	310
Molekül ağırlığı (g/mol)	140.28
Sertlik (HV)	1450
Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1800
Eğme mukavemeti (MPa)	690
Kırılma tokluğu (MPa)	5.7
Poisson oranı	0.24

Günümüzde seramik bilyalı rulmanlar, türbin bıçakları, ateşleme bujileri gibi alanlarda silisyum nitrür kullanılmaktadır (Kata and Lis, 2005).

3.2.2.6. Bor Nitrür (BN) ve Özellikleri

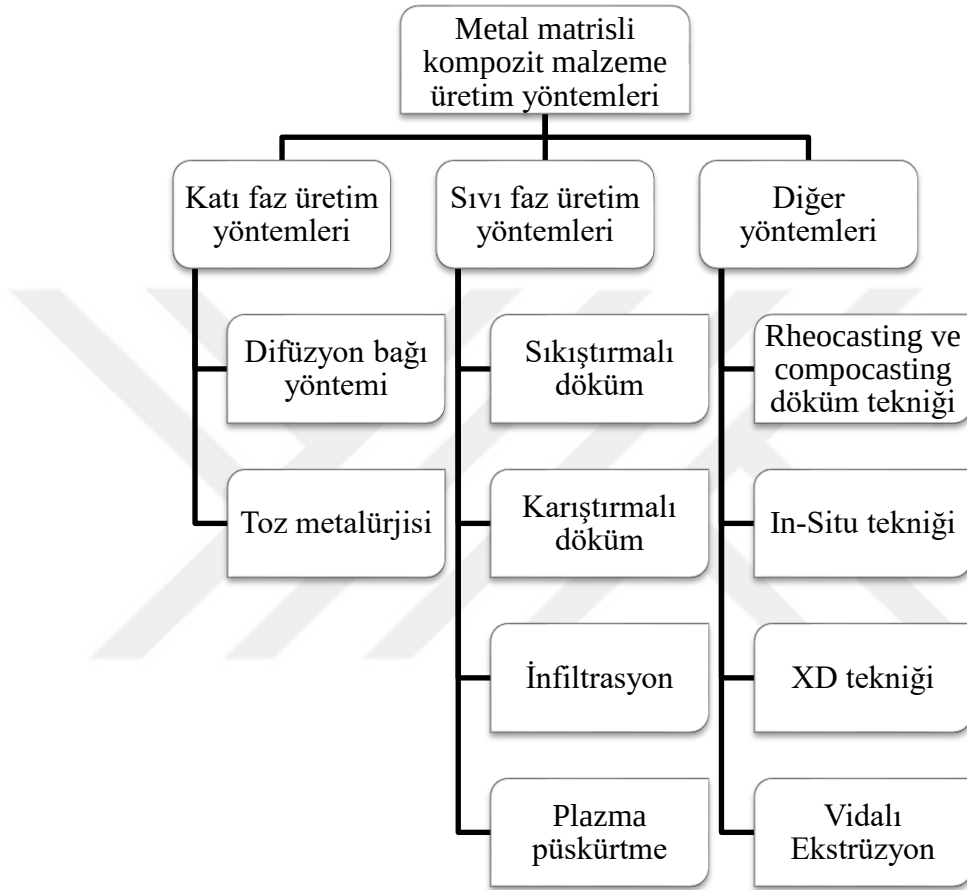
Üretimi 19. yüzyılın başlarında başlamış olan bor nitrür, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek ısıl direnç, kimyasal kararlılık ve elektriksel yalıtkanlık gibi üstün özelliklere sahiptir. Günümüzde hegzağonal (h-BN), würstitik (w-BN) ve kübik (c-BN) bor nitrür yapılarına rastlanmaktadır. Kristal yapısı karbona benzediğinden hegzağonal bor nitrür genellikle grafit veya beyaz karbon olarak adlandırılmaktadır (Thompson et al., 1970; Hagiwara et al., 1986; Rudolph, 2001;).

3.2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Geleneksel mühendislik malzemeleri gelişen teknoloji ile birlikte endüstrinin ihtiyacı olan daha üstün mekanik özellikleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda bu eksikliği gidermek amacıyla kompozit malzemelerin gelişmesi hız kazanmıştır. Geliştirilen kompozit malzemelerin üretim yöntemleri üzerine de yoğunlaşılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemi, üretilmek istenilen ürünün boyutuna, fiziksel ve mekanik özelliklerine, matris ile takviye elemanlarının birbirleri arasındaki uyuma, çalışma sıcaklığına ve üretim maliyetine göre belirlenmektedir (Kalaycıoğlu, 2010). Üretim yöntemlerinin türüne özgü, avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. MMK malzemeleri üretmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar:

- Katı faz üretim yöntemleri,
- Sıvı faz üretim yöntemleri,
- Diğer üretim yöntemleri,

olarak sınıflandırılmaktadır (Surappa, 2003). Şekil 3.1’de MMK üretim yöntemleri verilmiştir.



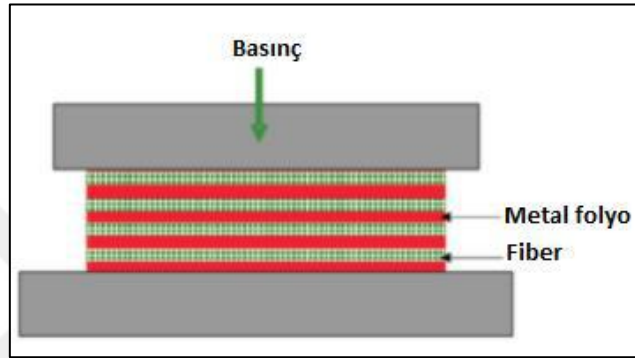
Şekil 3.1. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

3.2.3.1. Katı Faz Üretim Yöntemleri

Katı faz üretim yöntemleri metal matrisli kompozitlerin üretimi esnasında en sık tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir. Bu yöntemde, matris malzemesine ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta farklı işlemler uygulanmaktadır (Çalışkan, 2020). Katı faz üretim yöntemiyle, sıvı faz üretim yöntemlerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır. Bu yöntem ile üretilen kompozitlerin maliyetleri diğer yöntemlerden fazla olmaktadır. Katı faz üretim yöntemleri arasında en yaygın kullanılanları; difüzyon bağı yöntemi ile toz metalürjisi yöntemidir.

3.2.3.1.1. Difüzyon Bağı Yöntemi

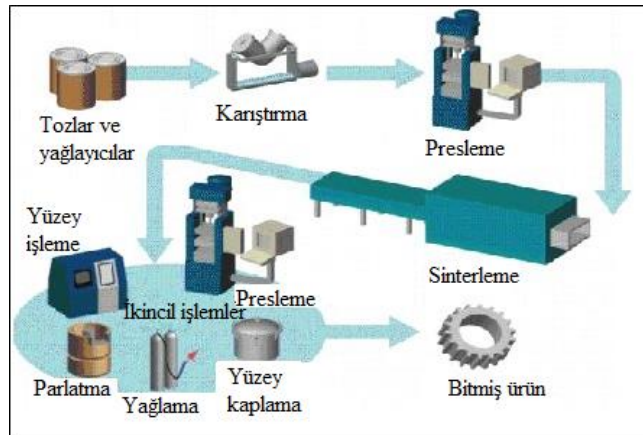
Difüzyon bağı yöntemi, katı halde üretilen kompozitlerin en pratik olanlarından biridir. Bu yöntemle, takviye elemanları matris malzemenin üzerine istenilen açıda ve miktarda yerleştirilmektedir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta preslenip matris ile takviye malzeme arasında bir bağ oluşturularak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmektedir (Kandpal et al., 2014). Difüzyon bağı yöntemi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalınması sebebiyle üretim maliyetleri yüksektir.



Şekil 3.2. Difüzyon bağı yöntemi (Kandpal vd., 2014)

3.2.3.1.2. Toz Metalürjisi Yöntemi

Metal matrisli kompozitlerin üretilmesi esnasında en fazla kullanılan yöntemlerden biridir (Şahin, 2000). Bu yöntemde; istenilen formdaki matris ve takviye elemanı belli bir kalıpta sıkıştırılır. Sıkıştırılan tozlar arasındaki birleşmeyi sağlamak için ergime sıcaklığı altında sinterleme işlemi yapılır. Sinterleme işlemi sonrası ikincil işlemlerle son şekli verilen numuneler elde edilir. Toz metalürjisi yöntemi ve aşamaları Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Toz metalürjisi yöntemi (Yılmaz, 2019)

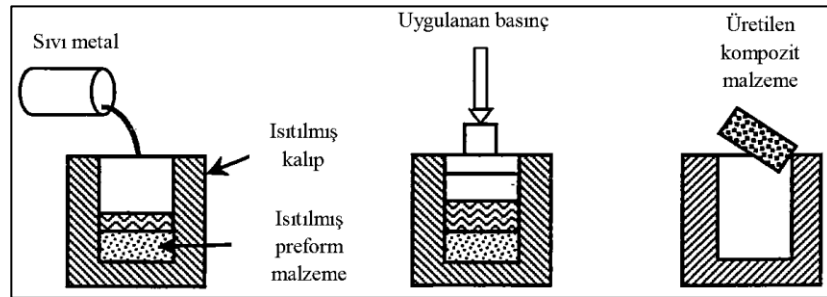
Toz metalürjisi yöntemi, üretilen parçaların yatırım maliyetlerinin düşüklüğü, verimliliklerinin yüksekliği, donanımsal esnekliği, karmaşık şekilli parçaların kolaylıkla ve seri bir biçimde üretilmesi sebebiyle geniş bir uygulama alanına sahiptir (Ayata, 2014). Günümüzde, otomotiv sektöründe, yakıt elemanları, gözenekli malzemeler (filtreler vb.), fren balataları, elektrik kontakları, sürtünme elemanları, dişli çarklar, akü elemanları ve sert metaller olmak üzere birçok sektörde toz metalürjisiyle üretilen parçalara rastlanmaktadır (Yılmaz ve Özyürek, 2009).

3.2.3.2. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Sıvı faz üretim yöntemleri; kompozit malzemeyi oluşturan ana malzemenin ergitilerek takviye elemanlarının birleştirilmesi işlemidir. Sıvı faz üretim yöntemleri; basit bir şekilde uygulanabilmesi, ucuzluğu ve karmaşık şekilli parçaların kolaylıkla üretilmesi sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna karşın; takviye edilen seramik parçaların homojen dağılım göstermemesi, matrisin içinde topaklanmaların oluşması, matris malzemenin takviye elemanını yeteri oranda ıslatmaması gibi sorunlarla da karşılaşmaktadır (Kısasöz, 2018).

3.2.3.2.1. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

Sıkıştırılmalı döküm yöntemi; önceden ısıtılmış metal kalıba yerleştirilen seramik veya başka bir takviye malzemesinden oluşan malzemeye, yüksek basınç altında ergiyik metalin emdirilmesi işlemidir (Onat, 2015). Şekil 3.4’de sıkıştırılmalı döküm tekniği gösterilmiştir.



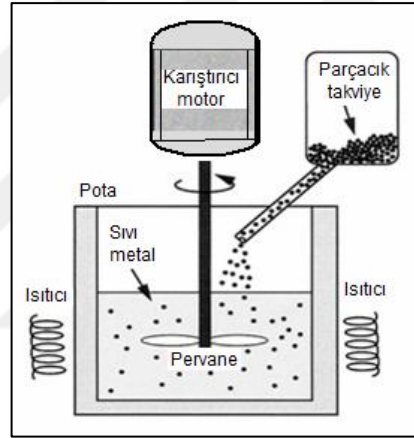
Şekil 3.4. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi (Günay, 2009)

Sıkıştırılmalı döküm yöntemi, yüksek hassasiyet gerektiren mühendislik malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır. Sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kalitesini etkileyen önemli üretim faktörleri; kalıbı ön ısıtma sıcaklığı, takviye elemanının sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, eriyik metalin kalitesi, basınç

uygulanma esnasında geçen süre, kalıbı oluşturan malzeme ile bu malzemeden oluşan kalıbın tasarımı, uygulanan basınç ve ön şeklin yoğunluklarıdır (Kıyasöz, 2018). Parça boyutunda sınırlamalara neden olması ve yüksek basınç gerektirmesi, bu yöntemin en önemli dezavantajlarından biridir. Bu yöntem, karmaşık şekilli kompozit malzeme üretiminde en etkili yöntem olarak görülmektedir.

3.2.3.2.2. Karıştırılmalı Döküm Yöntemi

Karıştırılmalı döküm yönteminde, ön ısıtmadan geçmiş takviye fazları, sürekli karıştırılmaya maruz bırakılan sıvı metale ilave edilmektedir. Matris malzemesini oluşturan sıvı metal içerisindeki takviye partikülleri homojen olarak dağıtılmakta ve sonrasında sıvı metal kalıplara dökülerek katılaşmaya bırakılmaktadır. Şekil 3.5'te bu yöntemin şematik görünüşü verilmiştir (Kocaman, 2017).



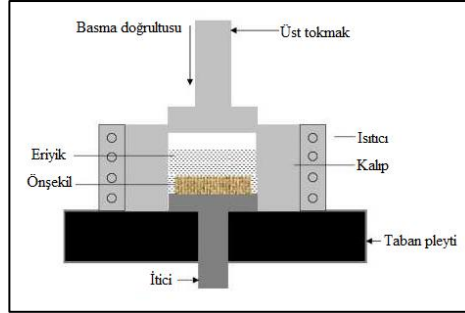
Şekil 3.5. Karıştırılmalı döküm işleminin şematik görünüşü (Günay, 2009)

Karıştırılmalı döküm işleminde ergimiş metallerin atmosferden gaz alma sorunuyla karşılaşması sebebiyle vakum altında veya koruyucu gaz altında gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Ucuz ve basit bir yöntem olmasıyla birlikte literatürde, topaklanma, çökelme, segregasyon oluşumları ile takviye malzemenin karıştırılırken zarara uğraması gibi istenmeyen durumlarla sıklıkla karşılaşılmaktadır (Kalaycıoğlu, 2010).

3.2.3.2.3. İnfiltrasyon Yöntemi

İnfiltrasyon (içsızma) tekniği metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi esnasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, bir kalıp içerisine yerleştirilen takviye fazlarına sıvı haldeki metal matris malzemesinin emdirilmesi işlemidir. Bu yöntem; vakumlu, basınçlı ve basınçsız olarak

uygulanabilmektedir. Bu yöntemin kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmasının en önemli avantajları; hızlı ve yüksek üretim kapasitesine sahip olması ile son ürünün şekline benzer bir şekil elde edilmesidir. İnfiltrasyon yöntemi Şekil 3.6’da gösterilmiştir (Pul, 2010).

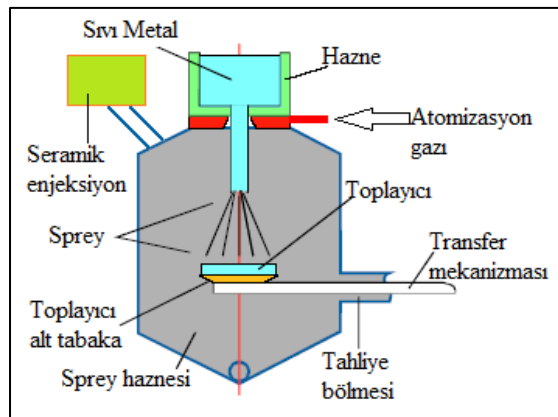


Şekil 3.6. İnfiltrasyon yöntemi (Kim et al., 2013)

3.2.3.2.4. Plazma Püskürtme Yöntemi

Plazma püskürtme yöntemi, atomize edilmiş eriyik metalin takviye elemanları yüzeyine istenilen kalınlıkta püskürtülmesidir. Püskürtülen eriyik metal parçacıkları, takviye elemanlarına yapışmakta ve hızla katılaşmaya başlamaktadır.

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 3.7’de plazma püskürtme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.7. Plazma püskürtme yöntemi (Apelian et al., 1988)

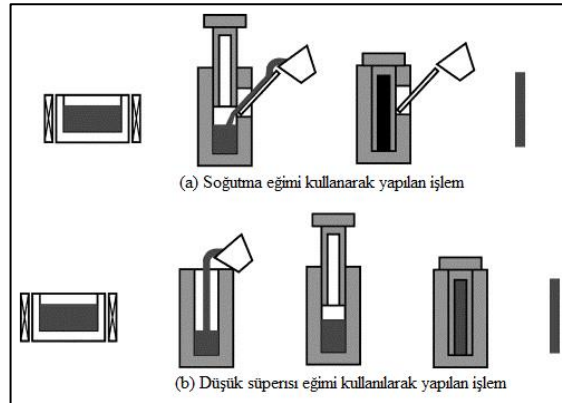
3.2.3.3. Diğer Yöntemleri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan diğer yöntemler aşağıda belirtilmiştir.

3.2.3.3.1. Rheocasting ve Compocasting Döküm Tekniği

Yarı katı döküm yöntemi olarak da adlandırılan, rheocasting ve compocasting tekniği metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerindendir. Sıvı metal karıştırma tekniğinde meydana gelen ıslanabilirlik sorununu ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. Rheocasting ve compocasting döküm tekniği, kısa fiber ve parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde en ekonomik üretim yöntemidir. Bu yöntemle matris malzemesi karıştırma üniteli bir fırında ergime sıcaklığının 40 ile 50 derece üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra kontrollü bir şekilde soğutulmaktadır. Alaşım %50 katı hale geldiğinde takviye elemanı matris malzemesine eklenmeye başlamaktadır. Matris malzemesinin takviye elemanlarını iyice ıslatması sağlanana kadar sıcaklık artırma ve karıştırma işlemine devam edilmektedir (Onat, 2015).

Bu yöntemde düşük viskoziteye sahip karışıma döküm yapıldığında buna “Rheocasting” adı verilir. Ergime sıcaklığının üzerinde bir karışım gerçekleştiriliyorsa buna “Compocasting” adı verilir. Şekil 3.8’de Rheocasting tekniğinin uygulandığı 2 farklı işlem tipi gösterilmiştir.

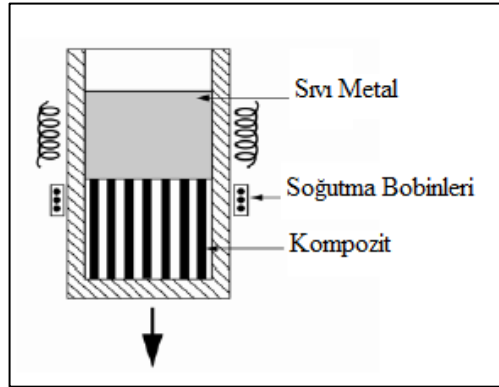


Şekil 3.8. Rheocasting tekniği (Haga and Kapranos, 2002)

3.2.3.3.2. İn-Situ Tekniği

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 3.9’da bir

ötektik alaşımın tek yönlü katılaşmasının kontrollü bir şekilde gerçekleşmesiyle geliştirilmiş in-situ tekniği gösterilmiştir.



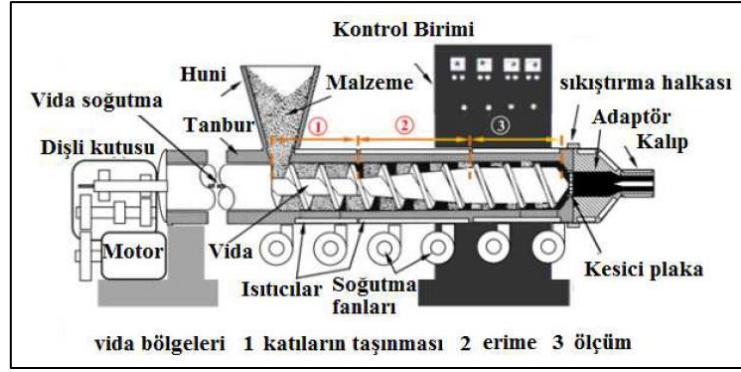
Şekil 3.9. İn-situ tekniği (Bilir, 2014)

3.2.3.3.3. XD Tekniği

Martin Marietta tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Takviye olarak eklenen fazın, sıvı metal içerisinde bir bileşik eklenmesiyle oluştuğu kompozit malzeme üretim tekniğidir. Bu teknik kullanılarak sıvı matris içerisinde birçok seramik bileşik oluşturulmaktadır. Sıvı matris yapının içinde oluşan partiküller, oksitlenmemiş ve tek kristalli ara yüzeylere sahiptir. İşlem ile oluşan parçacık boyutları işlem parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Akdoğan, 2005).

3.2.3.3.4. Vidalı Ekstrüzyon Yöntemi

Bu yöntem, magnezyum matrisli kompozit malzemelerin üretimi amacıyla Dow laboratuvarları tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemle birlikte esas malzemeyi oluşturan magnezyum, takviye edilen partiküllerle küçük parçacıklı olarak hazneye doldurulur. Vidalı ekstrüzyon işleminin kolaylıkla yapılması için haznenin ağzı özel bir geometride imal edilmektedir. Haznenin içerisinde beraber ilerlemesi sağlanan matris malzeme ile takviye elemanı bu haznede birlikte karıştırılmakta ve eş zamanlı olarak ısıtılmaktadır. İlerlemenin sürdüğü sırada matris malzemesinin ergime sıcaklığı yakınlarına ulaşıldığında yarısı sıvı yarısı katı halde olan karışım, sistemin sonunda bulunan bir kalıp içerisine beslenir. Bu teknik kullanılarak sürekli olarak kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Ürkmez, 2004). Şekil 3.10'da vidalı ekstrüzyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Vidalı ekstrüzyon işlemi (Bilir, 2014)

3.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler çok eski zamanlardan itibaren çeşitli araç gereçler başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin Orta Doğu'da eğilme dayanımını arttırmak amacıyla farklı liflerin üst üste getirilerek ok yayı imal edilmektedir. İşlenmiş deri ve metalin bir araya getirilmesiyle üretilen ok yayı gövdesinde daha iyi darbe direnci elde edilmektedir. Binaların yapımı sırasında karıştırılan çamur, saman ve kerpiç de kompozit yapıya örnektir. Havacılık firması Boeing tarafından üretilen 737, 747 gibi uçakların kanatları, arka kenar denge sağlayıcıları, iniş kapı dişlileri karbon elyafı ve cam elyafı kullanılarak kompozit bir yapıda üretilmektedir (Şahin, 2015).

Savunma, otomotiv ve havacılık sektörlerinde metal matrisli kompozit malzemelerin kullanımı oldukça yaygındır. Alüminyum alaşımların yoğunluklarının düşük olmasına karşın bu alaşımlar seramik malzemelerle güçlendirilerek klasik araçların motorlarında kullanılmaktadır (Mutlu, 2012). Alüminyum matrisli kompozitler üzerine 19.yüzyılın sonlarından itibaren çalışılmaya başlanmış olup otomotiv sanayinde, zırh geliştirmede ve spor malzemelerinin imalatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Tatar ve Özdemir, 2010).

Uzay mekiği metal matrisli kompozit malzemelerin ilk uygulama alanlarından biridir. Mekiğin gövde kısmı hafif ve yüksek sertlikte bir malzeme olan karbon fiber ve bor katkılı alüminyum esaslı kompozitten üretilmektedir (Srivatsan et al., 1991).

Fren diskleri de alüminyum esaslı kompozitlerin otomotiv sektöründe kullanımına örnek olarak gösterilebilir. Yaklaşık ağırlığı 5.4 kg olan ve dökme demirden imal edilen bir fren diski, alüminyum esaslı kompozit malzemeyle

retildiğinde 2.5 kg'a kadar düşüş göstermektedir. Ağırlığın düşmesiyle birlikte yakıt tasarrufu ve aşınmanın azalması sağlanmaktadır (Ahlatcı, 2003).

Yat, bot gibi deniz araçları karbon, aramid ve cam elyaftan oluşan kompozit malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Bunun yanında kompozitler; vanalarda, jet motorlarında, pervanelerde, kompresörlerde ve golf sopalarında kullanılmaktadır.



4. TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalürjisi (TM) yöntemi, tozların belirli aşamalardan geçirilerek faydalı mühendislik malzemelerine dönüşmesi ile gerçekleşen bir üretim yöntemidir.

Toz metalürjisi birbirinden çok farklı metal ve alaşımları ile seramik malzemelerin şekillendirilmesi için tercih edilen pratik ve hızlı bir tekniktir. Toz metalürjisi yönteminin tercih edilmesinin temel nedeni, bu yöntemin yüksek hassasiyete sahip karmaşık yapılı ve yüksek kalitede ürünlerin imalatına imkân sağlamasıdır (Yılmaz vd., 2008).

4.1. Toz Metalürjisinin Tarihçesi

5000 yıllık bir geçmişe sahip olan toz metalürjisi yöntemi, demir ve demir olmayan alaşımların eritilmesi ile madenlerin işlenmesinden önce ortaya çıkan teknolojiye benzemektedir. Bu yöntem, ilk başlarda silah ve süs eşyaları ile buna benzer yeni ürünlerin üretiminde tercih edilmekteydi. Daha sonra bu teknoloji Doğu Akdeniz, Orta ve Kuzey Avrupa ülkeleriyle Asya'nın doğusu ve Hindistan'a yayılması gerçekleşti. Yumuşak platinlere olan ihtiyacın ortaya çıktığı 1750 ile 1825 yıllarında endüstriyel toz metalürjisi ihtiyacı doğmuştur. İlk olarak 19. yüzyılla birlikte karmaşık şekilli malzemelerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. 1830 yılında, paranın preslenmesi ve sinterlenmesi için çalışma yapan Osann ile çok önemli bir gelişme yaşanmıştır. Osann yaptığı diğer çalışmalarıyla kurşun, bakır ve gümüşün gelişmesine de katkı sağlamıştır. Gwynn, 1870 yılında metal tozlarını kullanarak yataklama elemanlarının geliştirilmesi için çaba sarf etmiştir. Bu çalışmalar ile geliştirdiği elemanlar kendinden yağlamalı yataklar olarak günümüzde yer almaktadır.

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 getirilip malzemenin daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını sağlamıştır. Günümüzde de bu uygulama hala kullanılmaya devam etmektedir.

1940 ile 1950'li yıllarda, kendinden yağlamalı yataklar ile bakır tozları, modern toz metalürjisinin başlangıcında yer almıştır. Otomotiv sektörünün II. Dünya Savaşı'nın başlangıcında gelişmesiyle birlikte demir tozu ticari olarak ilerlemiştir (Lawley, 1992). Tablo 4.1'de toz metalürjisi tarihindeki önemli gelişmeler verilmiştir.

Tablo 4.1. Toz metalürjisi tarihindeki önemli gelişmeler (Roll, 1984)

Tarih	Gelişme	Yer
M.Ö. 3000	Alet yapımı için sünger demir	Mısır, Afrika, Hindistan
M.S. 1200	Güçlendirilmiş platin taneleri	Güney Amerika
1781	Platin arsenik alaşımı	Fransa, Almanya
1830	Metallerin sinterlenmesi	Avrupa
1900	Lamba tellerinin yapımı	Amerika
1940	Demir tozu teknolojisi	Avrupa
1970	Sıcak izostatik presleme	Amerika
1980	Toz enjeksiyon kalıplama	Amerika

4.2. Toz Metalürjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalürjisi yöntemiyle parça üretiminin avantaj ve dezavantajlarının kavranabilmesi için, şekil boyutlarının, malzeme türünün, şekil karmaşıklığının, maliyetin, toleransların, fiziksel ve mekanik özelliklerin dikkate alınması gerekir. TM yönteminin 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,
- Oldukça iyi yüzey kalitesinin oluşması,
- Kendinden yağlamalı yataklar ve gözenekli kemik yapıları gibi ürünlerin imal edilebilmesi,
- Yüksek termal dayanıma ve mukavemete sahip kristal ve amorf yapıların yalnızca bu yöntemle üretilmesi,
- Küçük boyutlu karmaşık yapıya sahip parçaların seri olarak üretilmesi,
- Diğer yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan, yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakterlerin (tantalyum, tungsten, molibden vs.) ve sert metallerin üretiminde ekonomik yöntem olmasıdır.

Parça imalatının yüksek kalitede ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi, diğer klasik yöntemlere göre toz metalürjisini ön plana çıkarmaktadır. Fakat toz metalürjisi yönteminin avantajlarının yanı sıra bazı sınırlamaları da mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek mukavemet gerektiren malzemelerde, infiltrasyon ve gözenek doldurma gibi ikincil işlem uygulanmazsa, diğer yöntemlere göre daha kötü mekanik özelliklerin elde edilmesi,
- Seri imalat yapılmazsa sıkıştırma ve sinterleme gibi toz metalürjisi ünitelerinin ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması,
- Metal tozların maliyetinin, ingot haldeki malzemedan daha pahalı olması,
- Çok büyük boyutlu parça üretiminin yapılamaması,

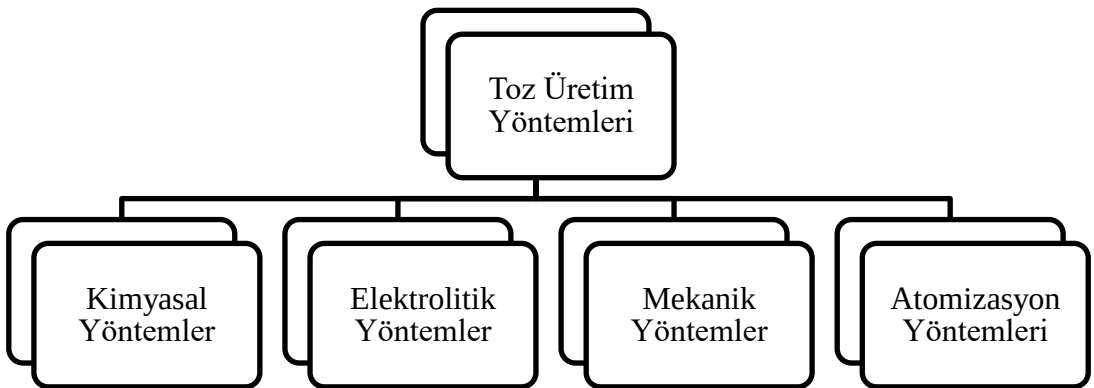
şeklinde (Şenel, 2018).

4.3. Toz Metalürjisinin Kullanım Alanları

Günümüzde, toz metalürjisinin çok geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere diş dolgularında, tungsten lamba tellerinde, elektrik kontaklarında, takım çeliklerinde, dişli çarklarda, süper alaşımlarda, kendinden yağlamalı yataklarda, katalizörlerde, nükleer güç yakıt elemanlarında ve jet motorlarında kullanılmaktadır (Biçer, 2015).

4.4. Metal Tozların Üretim Yöntemleri

Ortalama boyutu 1 μm 'den 200 μm 'ye kadar olan tanecikler toz olarak tanımlanmaktadır. Çoğu malzemeyi toz haline getirmek mümkündür. Fakat toz haline getirilmek istenen malzeme için seçilecek yöntem, istenen özellikler ve maliyet gibi önemli faktörler bulunmaktadır (German, 2007). Metal tozlarının üretim yöntemleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Metal tozlarının üretim yöntemleri

Toz üretim tekniğiyle, üretimi gerçekleştirilen tozun şekli, boyutu, mikro yapısı ve kimyasal özellikleri arasında bir ilişki bulunmaktadır. Belirli özelliklere sahip toz

üretilmesi esnasında değişik teknikler bulunmaktadır. Toz üretilmesi sırasında tercih edilen teknikler tozun fiziksel özelliklerine etki etmektedir. Bu yüzden üretilmesi düşünülen parçaya göre uygun toz ve üretim şekline karar verilmelidir. Bazı malzemelerin toz üretim tekniği Tablo 4.2’de gösterilmiştir (Lawley, 1992).

Tablo 4.2. Bazı malzemelerin toz üretim tekniği (German, 2007)

Materyal	Yöntem
Alüminyum	Atomizasyon, Mekanik öğütme
Takım çelikleri	Atomizasyon, Santrifüj yöntemi
Berilyum	Mekanik öğütme, Gaz atomizasyonu
Sementit karbid	Mekanik öğütme
Kobalt	Kimyasal yöntemler
Kompozitler	Mekanik alaşımlama, Atomizasyon
Bakır	Elektrolitik, Su atomizasyonu, Gaz atomizasyonu
Pirinç	Su atomizasyonu, Gaz atomizasyonu
Altın	Elektrolitik, Su atomizasyonu, Kimyasal yöntemler
Demir	Su atomizasyonu, Elektrolitik, Santrifüj atomizasyonu
Nikel alaşımlar	Gaz atomizasyonu, Su atomizasyonu
Değerli metaller (Ag)	Su Atomizasyonu, Elektrolitik, Kimyasal yöntemler
Reaktif metaller (Ti)	Kimyasal yöntemler, Santrifüj atomizasyonu
Süperalaşımlar	Mekanik alaşımlama, Gaz atomizasyonu, Santrifüj yöntemi

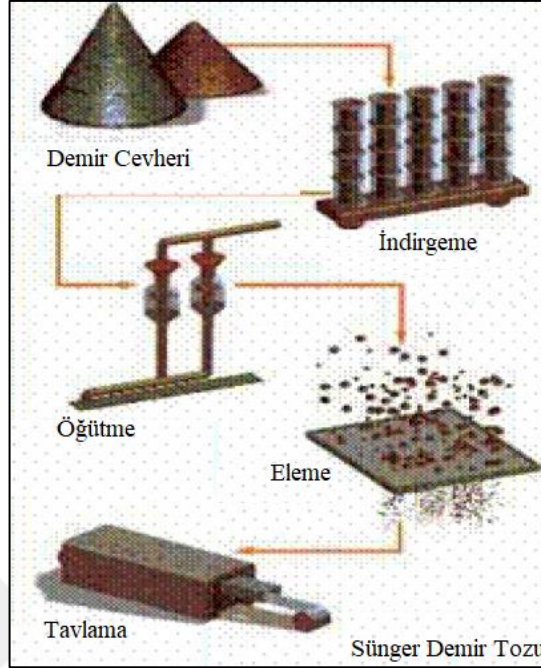
4.4.1. Kimyasal Yöntemler

Karbon monoksit (CO) veya hidrojen (H₂) gibi indirgeyici gazlar ile metallerin oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesi sonucu oluşan yöntemlerdir.

Demir tozlarının üretimi sırasında kimyasal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin önemli uygulama örneklerinden biri olarak sünger-demir tozu gösterilebilir. Kimyasal yöntemlerle demir tozu üretim şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir. İşlem sırası aşağıda sunulmuştur:

- Seçilen cevher kok, magnetit (Fe₃O₄) ve kireç taşı ile karıştırılıp seramik kaplara doldurulur.
- Karışım, 1260°C sıcaklıkta ve 68 saat süresince fırında bekletilir.
- İndirgemenin tamamlanmasıyla sünger demir elde edilir.
- Yüksek sıcaklığa maruz kalan sünger demirde meydana gelen kaynak olmuş tozları istenilen tane boyutuna getirmek için tozlara öğütme işlemi uygulanır.

- Son olarak, sünger demir tozu, H_2 gazı altında $870^\circ C$ sıcaklıkta tavlama işlemi ile elenir ve tozlar hazırlanmış olur (Nazik, 2013).

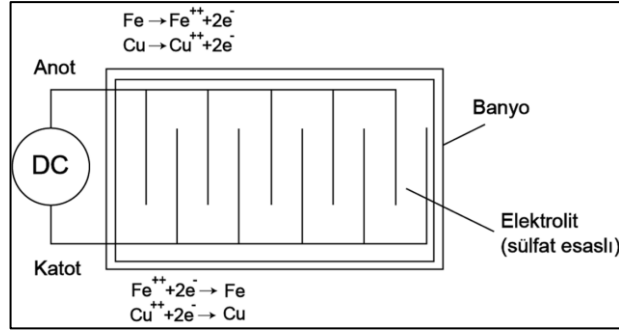


Şekil 4.2. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi (Şenel, 2018)

4.4.2. Elektrolit Yöntemler

Genellikle iyi preslenebilen ve sinterlenebilen yüksek saflıktaki metal tozların üretiminde bu metod kullanılmaktadır. Bu yöntemle elde edilen tozlar %99 ve üzeri bir saflıktadır (German, 2007).

Bu yöntemde tozu elde edilecek malzeme anot olarak elektrolitik banyo içerisine yerleştirilir. Gerilim uygulandığında anot elektrolitik banyo içerisinde çözünür ve katot üzerinde toplanır. Katot üzerindeki tozlar sıyrılarak alınır ve öğütülerek ince toz haline getirilir. Tozlar indirgeyici bir atmosfer altında tavlansak oksitten arındırılır ve bu işlem sayesinde tanelerin daha iyi sıkıştırılabilmesi sağlanmış olur. Elektrolitik yöntemle elde edilen toz, dentritik, süngerimsi ve gözenekli bir yapıdadır (Pavlovic and Popov, 2005).



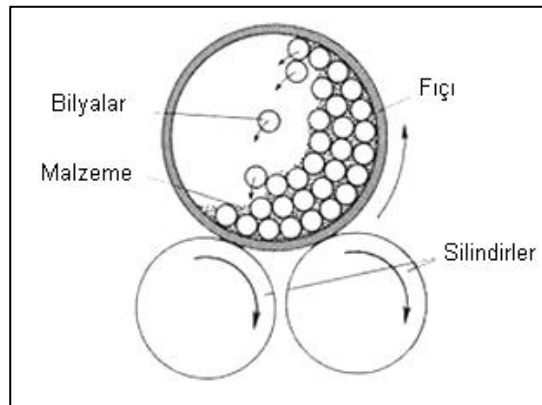
Şekil 4.3. Elektrolit ile toz üretimi (German, 2007)

Tozun özellikleri, elektrolit kompozisyonu, elektrolit sıcaklığı, elektrolit sirkülasyon hızı, akım yoğunluğu, anot ve katotun boyutu, şekli, elektrod aralığı ve tozun uzaklaştırma hızı gibi etkenlere bağlıdır.

4.4.3. Mekanik Yöntemler

Kırılgan ve gevrek yapıya sahip, kimyasal bağları zayıf, karışık kristalli yapıda bulunan metal ve seramik malzemelerin çarpışma sonucu ufalanarak toz haline getirilmesi işlemidir. Bu yöntem oksit tozların üretiminde en çok kullanılan üretim yöntemidir. Bu yöntemle Al, Cu, Sn, Pb, Mn, Co, Si, Zn, Fe, Fe veya Cu esaslı tozlar üretilmektedir (Sarıtaş, 1996)

Tozu elde edilecek malzeme iri taneli parçacıklar halinde bilyalı silindirik fiçi içerisine konulur. Bu malzeme, fiçi içerisinde yer alan aşınmaya dayanıklı bilyalarla birlikte döndürülür. Bilyalarla çarpışan malzeme ince toz haline gelir. Bu yöntemde sünek malzemelerin kullanımı tercih edilmez. Bunun nedeni sünek malzemenin kırılmayarak taneciklerin birbiri üzerine sıvanmasıdır

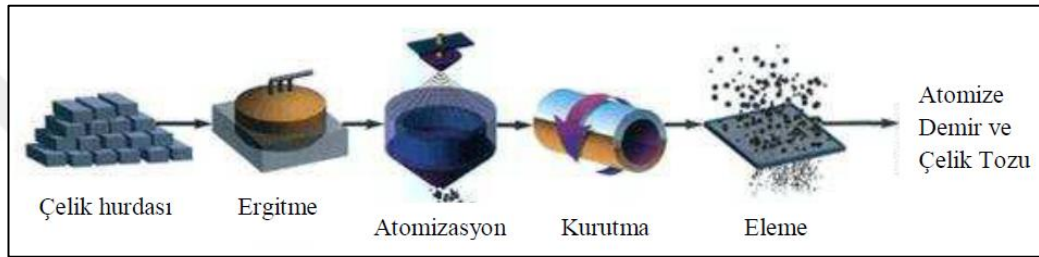


Şekil 4.4. Mekanik toz öğütme yöntemi (German, 2007)

4.4.4. Atomizasyon Yöntemleri

Atomizasyon, bir sıvı metalin 100-150 μm 'den daha küçük boyutlarda sıvı damlacıklar oluşturacak şekilde parçalanması ve bu parçacıkların ani ve aşırı soğumasıyla toz haline getirilmesi işlemidir. Diğer toz üretim tekniklerine göre atomizasyon yöntemleri, metal ve alaşım tozlarının üretiminde en çok tercih edilen yöntem olup metalik tozların %90'ı bu yöntemle üretilmektedir (Akpınar, 2011).

Bu yöntemin temel prensibi, eriyik haldeki metalin çok ince bir şerit halinde akıtılması ve bu sırada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulmasıdır (Şenel, 2018).



Şekil 4.5. Atomizasyon ile toz üretimi aşamaları (Şenel, 2018)

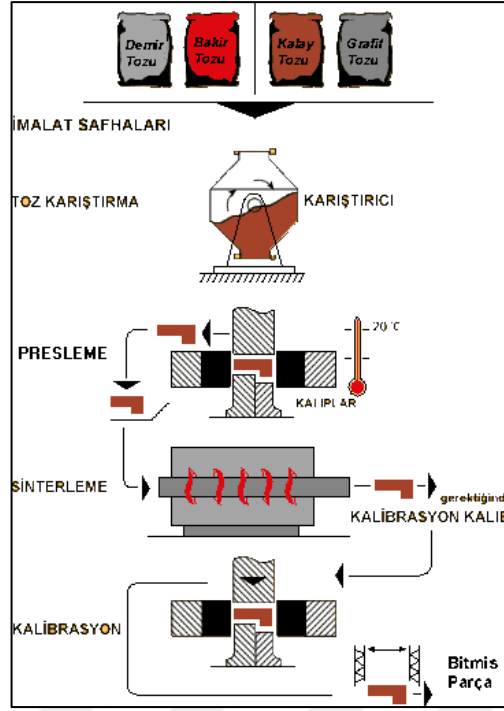
Toz üretiminde atomizasyon yönteminin tercih edilmesinin nedenleri aşağıda verilmiştir:

- Atomizasyon yöntemlerinin çeşitliliği sayesinde, tozun boyutu, şekli ve yüzey yapısı istenilen şekilde elde edilebilir.
- Ergitilebilen malzemelerin hemen hemen tamamı bu yöntemle toz haline getirilebilir.
- Demir tozlarının dışında, alüminyum, bakır, paslanmaz çelik gibi yüksek kalitede tozlar ile demir ve demir dışı alaşımlara ait tozlar bu yöntemle üretilmektedir.

4.5. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Parça Üretim Süreci

Toz metalürjisi ile birlikte belirli işlemlerden geçen tozlar yüksek performanslı yararlı mühendislik malzemelerine dönüşürler. Toz metalürjisi yönteminde üretim süreci 3 temel aşamadan oluşmaktadır (Şekil 4.6). Bu aşamalar;

- Tozların karıştırılması,
- Preslenmesi,
- Sinterlenmesi.



Şekil 4.6. Toz metalürjisi işlem basamakları (Downson and Whittaker, 2008)

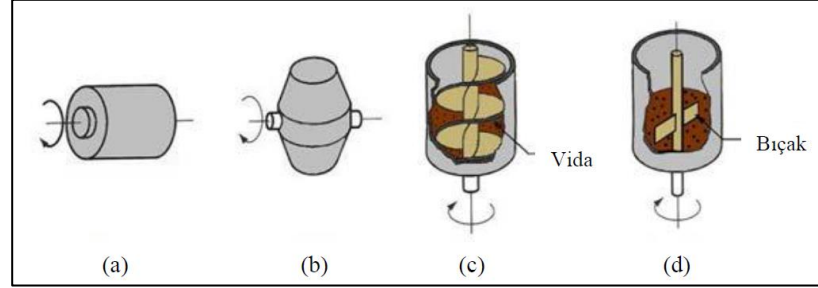
4.5.1. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması

Metal tozların harmanlanması, aynı bileşime sahip tozların birbirleriyle karıştırılması olarak tanımlanmaktadır. Karıştırma ise iki veya daha çok sayıdaki farklı kimyasal bileşime sahip tozların karıştırılması olarak tanımlanmaktadır. Tozların harmanlanması ve karıştırılması ile homojen bir karışım elde edilmesi, taneciklerin boyutlarının istenilen boyuta getirilmesi ve sinterleme sırasında yeni alaşımların oluşturulması sağlanmaktadır (German, 2007).

Toz karışımlarının hazırlanması sırasında, tozların kalıp yüzeyindeki ve birbirleri arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla toz karışımının içerisine belli oranlarda yağlayıcı ilave edilir. Yağlayıcı ilavesinin olmadığı durumlarda tozlarla kalıbın yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı basınç farklılıkları oluşur. Bu sebeple, preslenen numunede gerilme farklılıkları meydana gelir. Eklenen yağlayıcı ile preslenen parçaların kalıptan daha rahat çıkması da sağlanmış olur. Toz karışımının içerisine yaklaşık olarak ağırlıkça %0.5 ile %1.5 arasında yağlayıcı ilavesi yapılır (Upadhyaya, 2000).

Karıştırma işlemi sırasında, karışma süresi ile karıştırma tipi karışımın kalitesini doğrudan etkiler. Şekil 4.7’de değişik öğütme ve karıştırma makinaları gösterilmiştir. Karıştırma işlemi sırasında karıştırıcı doluluk oranının %30 civarında olması tercih

edilmektedir. Karıştırma işlemi için seçilen devir ve karıştırma süresi, karışımın yoğunluğuna doğrudan etki etmektedir. Uygun karıştırılma yapılmadığı takdirde üretilen kompozit numunelerin mekanik özellikleri bozulmaktadır.



Şekil 4.7. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları: dönen tambur (a), dönen çift koni (b), vidalı mikser (c) ve bıçaklı mikser (d) (Ayata, 2014)

4.5.2. Presleme

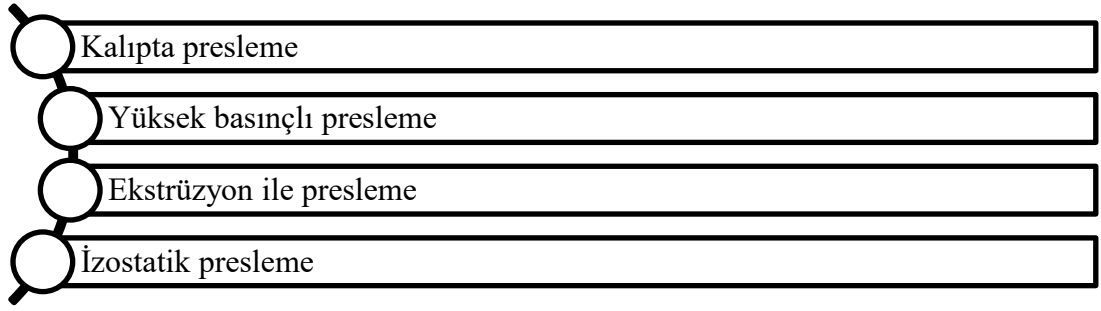
Karıştırma işleminden sonra numuneleri şekillendirmek ve yoğunluk artışı sağlamak için preslemek gerekmektedir. Preslenecek numuneye uygun aşınma direncine ve sertliğe sahip bir kalıp içerisinde genellikle 300 ile 800 MPa altında bir basınç uygulanır. Tablo 4.3’de bazı tozlara ait presleme basınçları verilmiştir.

Tablo 4.3. Bazı tozlar için presleme basınçları (Boothroyd, 1994)

Malzeme	Basınç MPa
Alüminyum	69-276
Pirinç	414-687
Karbon	138-165
Alümina	110-138
Ferit	110-165
Demir (yüksek yoğunlukta)	483-827

Preslenen toza ham parça, yoğunluğuna ham yoğunluk, mukavemetine ise ham mukavemet denilmektedir (Boothroyd, 1994; German, 2007).

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen numunelerin şekilleri ve boyutları üzerinde olan kısıtlamalar presleme yöntemiyle ilişkilidir. Tozların preslenmesi için farklı yöntemler kullanılmakta olup bu yöntemler Şekil 4.8’de verilmiştir.



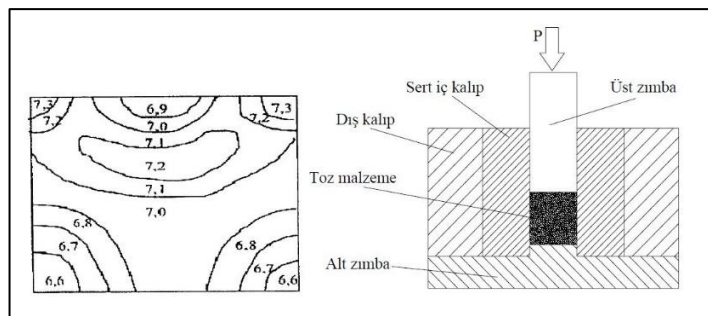
Şekil 4.8. Tozların preslenmesinde kullanılan yöntemler

4.5.2.1. Kalıpta Presleme

Şekillendirme yöntemleri arasında kalıpta presleme işlemi en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemle birlikte hidrolik veya mekanik presler kullanılarak ham yoğunluğu %99'a kadar ulaşabilen parçalar imal edilebilmektedir. Tek yönlü veya çift yönlü olmak üzere 2 farklı yöntemle kalıpta presleme yapılmaktadır.

Tek eksenli presleme işlemi dört aşamada oluşur. İlk olarak, sıkıştırılacak toz kalıba yerleştirilir. İkinci aşamada, üst zımba presleme konumuna doğru çekilir. Daha sonra, toz karışımı uygulanması istenilen yüke maruz bırakılır. Son olarak da üst zımba geri çekilip alt zımbanın numuneyi iterek çıkarması sağlanır.

Tek eksenli preslemede parça homojen olarak dağılım göstermektedir (Şekil 4.9). Yoğunluğun, sabit olmayan zımbaya daha yakın olduğu, sabit zımbanın yakınlığında azaldığı görülmektedir. Yoğunluktaki bu farklılık malzemenin boy/çap oranı ile bağlantılıdır (Bahçeci, 2006).



Şekil 4.9. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve kalıbın şematik gösterimi (Bahçeci, 2006)

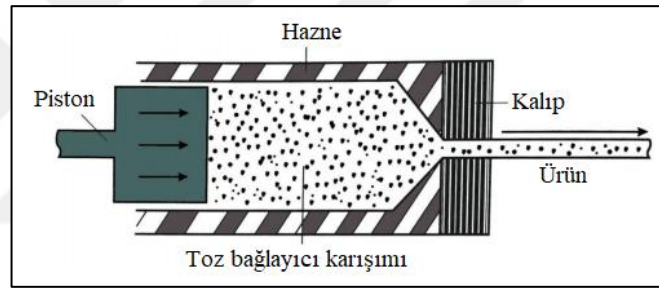
Birbirine zıt yönlü zımbalar ile çift yönlü sıkıştırma işlemi de mümkündür. Bu yöntemle gerçekleştirilen sıkıştırma işleminin sonucunda oluşan numune daha yoğun ve daha homojen bir yapıya sahip olmaktadır. Çift yönlü sıkıştırma ile kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırmaya ulaşılmaktadır (Akoral, 2003).

4.5.2.2. Yüksek Basıncılı Presleme

Bazı ürünlerin tam yoğunluğa ulaşması amacıyla 1 ile 3 GPa arasında değişen yüke maruz bırakılarak yapılan sıkıştırma işlemidir. Bu yöntemde çok yüksek basınçlara dayanabilen sert metallere oluşmuş kalıplar tercih edilmektedir. Yağlanma sırasında çok fazla hacim kaplayacağından yağın toz ile temasından kaçınılmalı ve yalnızca kalıp duvarları yağlanmalıdır (German, 2007).

4.5.2.3. Ekstrüzyon ile Presleme

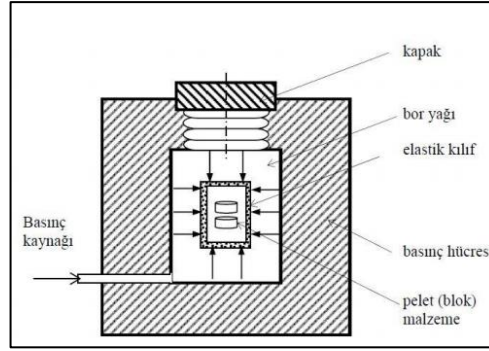
Ekstrüzyon ile presleme yöntemi; çubuklar, tüpler, matkap uçları, kaynak elektrotları gibi genişliği ince olan parçaların üretilmesinde kullanılır. Şekil 4.10'da gösterildiği üzere önceden ısıtılmış bir hazneye toz ve bağlayıcı karışımı doldurulur. Piston yardımıyla haznenin sonuna doğru itilen tozların sıkışması sağlanır. Bu işlem neticesinde yoğunluğu yüksek olan numuneler imal edilir. Genellikle takım çeliklerinin üretilmesinde bu yöntem tercih edilmektedir (Önel, 1995; German, 2007).



Şekil 4.10. Ekstrüzyon ile presleme işlemi (Yalçınkaya, 2018)

4.5.2.4. İzostatik Presleme

İzostatik presleme, tozların bir hidrolik yağ basıncı ile sıkıştırılması işlemidir. Akışkan maddelerin her noktaya aynı değerlerde basınç uygulaması prensibinden yararlanılır. Esnek kalıp içerisinde bulunan toz numuneler, gerekli sızdırmazlığın sağlanmasından sonra içinde su veya yağ gibi bir sıvı bulunan bir kalıp içerisinde sıkıştırılır (Şekil 4.11). Basıncın her yönden eşit uygulanmasıyla numunede oluşan yoğunluk her noktada aynı değeri göstermektedir. Süper alaşımlı uçak türbini diskleri gibi diğer yöntemlerle homojen olarak üretimi gerçekleştirilemeyen malzemelerin üretiminde tercih edilir (Yalçınkaya, 2018).



Şekil 4.11. Soğuk izostatik preslemenin gösterimi (Ekinci, 2007)

4.5.3. Sinterleme

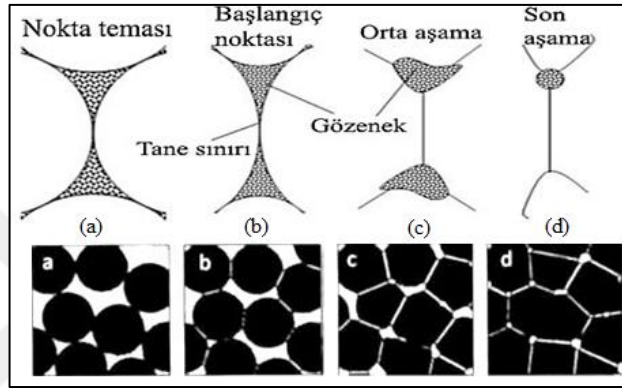
Sinterleme, preslenip şekil verilen numunelerin mekanik dayanımının geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bir ısıtma işlemidir. Birbirlerine temas eden taneciklerin yüksek sıcaklıklara maruz kalarak birbirlerine bağlanması ile gerçekleşir. Her malzemenin sinterlenme süresi ve sıcaklıkları farklılık göstermektedir. Tablo 4.4'te bazı malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ile süreleri gösterilmiştir. Sinterleme sıcaklığı tek bileşenden oluşan malzemelerde ergime sıcaklığının 0.6 veya 0.8 katı olarak seçilmektedir. Birden fazla bileşene sahip malzemeler için sinterleme sıcaklığı belirlenirken ergime sıcaklığının en düşük olduğu malzemenin ergime sıcaklığı seçilerek hesaplama yapılmaktadır. Atomik difüzyona dayanan sinterleme işlemi ile difüzyonla beraber atomların mikro yapıda oluşan boşlukları doldurulması sağlanır (German, 1994; Chung and Lin, 1996).

Tablo 4.4. Bazı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri (Yalçınkaya, 2018)

Malzeme	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)
Alüminyum	550-600	20-60
Bakır	870	25
Demir	1150	25
Nikel	1040	40
Titanyum	1200	120
Wolframium	2350	480
Paslanmaz çelik	1150	40

Sinterleme işlemi süresince gözeneklerin gelişim aşamaları Şekil 4.12'de gösterilmiş olup bu aşamalar aşağıda özetlenmiştir:

- (a) Sinterleme başlangıcında nokta teması halinde olan parçacıklar arasında boyun verme gerçekleşir. Başlangıç seviyesinde gözeneklerin köşeli ve düzensiz olduğu görülür.
- (b) Boyun oluşumlarının birbirinden bağımsız olarak geliştiği görülür. Gözenekler küresel bir şekil alırlar.
- (c) Sinterlemenin ilerlemesiyle birlikte gözenekler küçülmeye başlar, tanecikler büyür ve yoğunluk artışı meydana gelir.
- (d) Son aşamada gözenekler tamamen küresel bir şekil alır (Boz, 2003).



Şekil 4.12. Sinterleme işleminin aşamaları ile gözeneklerin gelişimi (Algan, 2015)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Bu tez çalışmasında, matris malzemesi olarak Al6061 alaşımı ve takviye malzemeleri olarak ise grafen nanotabaka (GNT), bor karbür (B₄C) ve silisyum nitrid (Si₃N₄) kullanılarak toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum esaslı kompozit malzemeler üretilmiştir.

Matris malzemesi olarak kullanılan Al6061 alaşımı; Al2024 veya Al1100 alaşımlarına kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Al2024 alaşımının yüksek mukavemete, Al1100 alaşımının ise yüksek darbe dayanımına sahip olduğu bilinmektedir. Al6061 alaşımı çok yüksek tokluk ve üstün korozyon dayanımıyla birlikte çok iyi mukavemet sergilemektedir (Schwartz, 1997). Bu çalışmada kullanılan Al6061 alaşımı Nanografi Technology (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Al6061 alaşımı 325 mesh (~44 µm) boyutundadır. Ortalama yoğunluğu ~2.71 g/cm³ ve ergime noktası 660°C olan Al6061 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Al6061 alaşımına ait fiziksel ve mekanik özellikler (Akkurt, 2005)

Özellikler	Değer
Bileşik formülü	Al/Mg/Si/Cu/Cr
Görünüm	Simli-Gri
Ergime noktası (°C)	660
Kaynama noktası (°C)	2519
Yoğunluk (g/cm ³)	2.713
Ergime noktası (°C)	660
Kaynama noktası (°C)	2519
Termal iletkenlik (W/(m°K))	167
Özgül ısı (J/(g°C))	0,896
Elastisite modülü (GPa)	69
Çekme dayanımı (MPa)	310
Akma dayanımı (MPa)	270
Sertlik (HV)	107
Poisson oranı	0.33
Dövme sıcaklığı (°C)	177

Takviye elemanı olarak kullanılan grafen, ilk kez 2004 yılında keşfedilmiş olup karbon atomlarının bir düzlemde altıgen hücreler ile bir araya gelmesinden oluşur. Bu

tez çalışmasında takviye elemanı olarak kullanılan grafen nano tabaka, Graphene Checimal Industry (Türkiye) firmasından temin edilmiş olup ortalama 120-150 m²/g yüzey alanına, 5–8 nm kalınlığa ve 5 µm nominal çapa sahiptir. Grafene ait genel özellikler Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Grafenin genel özellikleri (Şenel vd., 2015)

Özellikler	Değer
Hibrit şekli	sp ²
Kristal yapısı	Hegzagonal
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Boyut	İki
Saflık derecesi (%)	99
Yoğunluk (g/cm ³)	2.25
Kalınlık (mm)	1-2
Yüzey alanı (m ² /g)	2600
Termal iletkenliği (W/m °K)	4840-5300
Elastisite modülü (GPa)	1000

Kullanılan bir diğer takviye elemanı olan bor karbür (B₄C), elmastan sonra en yüksek sertliğe, yüksek ergime sıcaklığına, düşük yoğunluğa ve üstün korozyon direncine sahip yeni nesil mühendislik malzemesidir (Kaya, 2014). Bu çalışmada kullanılan B₄C tozları, Zhengzhou Haixu Abrasive (Çin) firmasından temin edilmiştir. Ergime sıcaklığı 2400°C ve sertlik değeri yaklaşık 3800 HV olan bor karbürün bazı özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir (Spohn, 1995).

Tablo 5.3. Bor karbürün bazı özellikleri (Spohn, 1995)

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.52
Isıl genleşme (°C ⁻¹)	5.10 ⁻⁶
Rengi	Siyah
Ergime sıcaklığı (°C)	2400
Sertlik (HV)	3800
Elektrik iletkenliği (Ω ⁻¹ .m ⁻¹)	140

Tez çalışmasında takviye elemanı olarak kullanılan silisyum nitrür (Si₃N₄), oksit dışı nitrür seramik malzemeler arasında yer alan üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramik malzemelerdendir. Yüksek korozyon direnci, yüksek aşınma direnci, yüksek

sertlik ve kopma mukavemeti gibi özelliklere sahip olması sebebiyle silisyum nitrür yüksek performans uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Si_3N_4 takviye malzemesi, Ube Industry (Japonya) firmasından temin edilmiştir. Yoğunluğu 3.17 g/cm^3 ve sertliği 1450 HV olan silisyum nitrürün genel özellikleri Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Silisyum nitrürün genel özellikleri (Bozkurt, 2019)

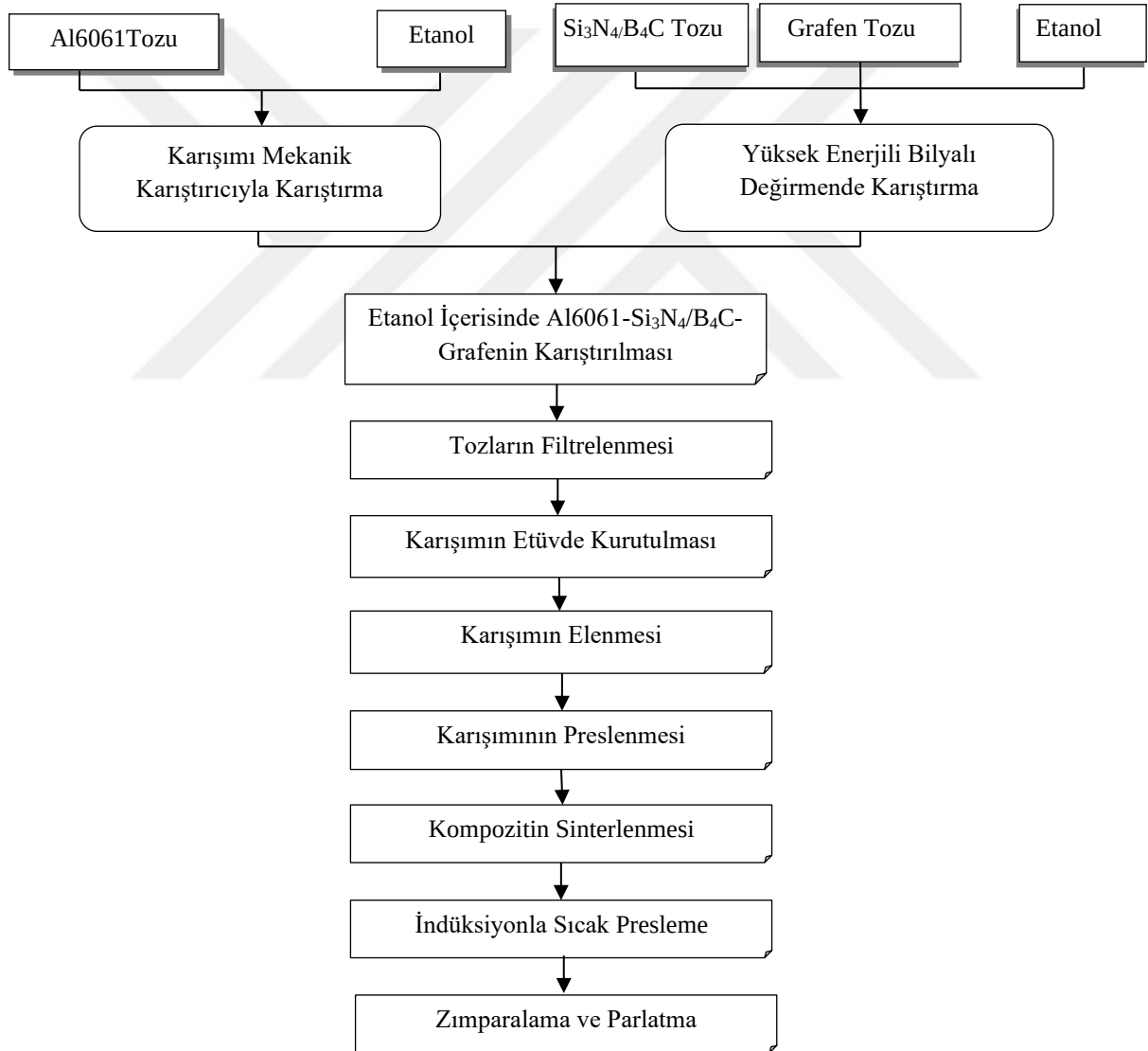
Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	3.17
Isıl genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{C}$)	$3.3 \cdot 10^{-6}$
Termal iletkenliği ($\text{W/m } ^{\circ}\text{K}$)	29
Elastisite modülü (GPa)	310
Molekül ağırlığı (g/mol)	140,28
Sertlik (HV)	1450
Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1800
Eğme mukavemeti (MPa)	690
Kırılma tokluğu (MPa)	5.7
Poisson oranı	0.24

5.2. Yöntem

Bu çalışmada, Al6061 alaşımının Al6061-GNT, Al6061-GNT- Si_3N_4 ve Al6061-GNT- B_4C kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilip mekanik, tribolojik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Üretim süreci; mekanik karıştırma, yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırma, filtreleme, kurutma, eleme, presleme, sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme, zımparalama ve parlatma gibi işlemlerden oluşmaktadır.

Şekil 5.1’de toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozitlerin üretim aşamaları görülmektedir. İlk olarak takviye tozları etanol içerisinde belirli oranlarda yüksek enerjili bilyalı değirmende 60 dk süresince karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak Al6061 tozu etanol içerisinde mekanik karıştırıcıyla karıştırılmıştır. Sonrasında etanol-takviye toz karışımı azar azar etanol-Al6061 karışımına eklenerek 60 dk süresince mekanik olarak karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar filtre kağıtları yardımıyla süzölmüştür. Daha sonra, etüvde 50°C sıcaklıkta 18 saat süresince kurutulmuştur. İçerisindeki etanolden ayrıştırılan toz karışımı elenmiştir. Üretimi gerçekleşen tozları şekillendirmek için tozlar tek eksenli hidrolik preste yaklaşık 750 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Şekillendirilen numuneler vakum altında 600°C sıcaklıkta 60 dk süresince

sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin ardından üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini daha da geliştirmek amacıyla indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen numuneler üzerinde çeşitli mekanik, tribolojik testler ve mikroyapı analizleri gerçekleştirmek için numuneler 30’ar dakika boyunca sırasıyla 600, 1200, 2000 SiC su zımparaları kullanılarak zımparalanmış ardından numuneler elmas çuha ile parlatılmıştır. Son aşamada üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelere gerekli mekanik testler, aşınma testleri ve mikroyapı analizleri uygulanmıştır.



Şekil 5.1. Al6061 matrisli kompozitlerin üretim aşamaları

5.2.1. Kompozit Malzeme Üretimi

5.2.1.1. Tozların Karıştırılması

Çalışmanın ilk aşamasında kompozit üretiminde kullanılacak Al6061, grafen, B₄C ve Si₃N₄ tozları Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Radwag marka AS 220.R2 model hassas terazi (Şekil 5.2) yardımıyla tartılmıştır. Tartılan tozlar, her bir kompozisyon için gruplandırılarak tozların kodlanması yapılmıştır.

	Marka: Radwag	Model: AS 220.R2
	Kapasite: 220 g	Okunabilirlik: 0,1 mg
	Minimum yük: 10 mg	Çalışma sıcaklığı: +10° - +40°C
	Tekrarlanabilirlik: 0,1 mg	Lineerlik: ±0,2 mg
	Stabilizasyon süresi: 3,5 s	Kefe boyutu: ø 85 mm
	Kabin boyutu: 490×400×505 mm	Net yük: 5,6 kg
	Dara ağırlığı: -220 mg	Güç kaynağı: 12-16 V DC / 250 mA

Şekil 5.2. Hassas terazi ve özellikleri

Tabakalı bir yapıya sahip karbon allotropu olan grafen, kompozit malzeme içerisinde topaklanma eğilimi göstermektedir. Grafenin alüminyum yapı içerisinde kullanılabilmesi için topaklanma oluşumlarının önlenmesi gerekmektedir. Grafende oluşan bu topaklanma oluşumlarını önlemek için, OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan MTI marka yüksek enerjili bilyalı değirmen (Şekil 5.3) kullanılarak grafen etanol içerisinde karıştırılmıştır. Karıştırma sıvısı olarak tozlarla tepkimeye girmeyen ve uçuculuğu yüksek olan etanol kullanılmıştır. Bu işlemi gerçekleştirmek için, değirmenin karıştırma haznesine hacimce 1/3 oranında zirkon bilya, kompozit formu için belirlediğimiz farklı yüzdelerde takviye malzemesi ile hazne içerisi 1/3 oranında boş kalacak şekilde etanol eklenmiştir. Bu karışım 60 dk süresince 400 dev/dk karıştırma hızıyla karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak Al6061 alaşım tozu 600 dev/dk hızda etanol içerisinde mekanik olarak karıştırılmıştır. Daha sonra da Al6061-etanol karışımı azar azar grafen-Si₃N₄/B₄C-etanol karışımına eklenip 30 dk süresince mekanik olarak karıştırılmıştır.

	<i>Marka:</i> MTI
	<i>Model:</i> MSK-SFM-3
	<i>Dönüş hızı:</i> 1200 dev/dk
	<i>Zamanlama Aralığı:</i> 0-60dk
	<i>Ağırlık:</i> 40 kg
	<i>Güç:</i> 300 W

Şekil 5.3. Yüksek enerjili bilyalı değirmen ve özellikleri

5.2.1.2. Tozların Filtrelenmesi

Karıştırma işleminin ardından toz karışımı filtreleme/süzme işlemine tabi tutulmuştur. Etanol içerisinde karıştırılan toz karışımını etanolden ayırmak için süzme işlemi yapılır. Filtreleme işlemi için Şekil 5.4’den görülebileceği üzere filtre kâğıdı, huni ve beherden faydalanılmıştır. Bu işlem yaklaşık 6 saatte tamamlanmaktadır.



Şekil 5.4. Süzme işlemi

5.2.1.3. Toz Karışımının Etüvde Kurutulması

Filtreleme işleminden sonra karışımındaki etanolü uzaklaştırmak amacıyla toz karışımı OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Bluelab marka FN120 model etüvde 50°C’de ve 18 saat süresince vakum altında kurutulmuştur (Şekil 5.5).

	<i>Marka:</i> Bluelab	<i>Model:</i> FN120
	<i>Sıcaklık Çalışma Aralığı Ortam Sıcaklığı:</i> + 5°C / 250°C	<i>İç Yüzey Yapısı:</i> Paslanmaz Çelik
	<i>Sıcaklık Sensörü:</i> Fe-Const.	<i>Güç Değerleri:</i> 230 V, 50 Hz.
	<i>Sıcaklık Değişimi:</i> ± 2°C	<i>İç Ölçüler:</i> 500x480x500 mm
	<i>Sıcaklık Dalgalanması:</i> 1°C	<i>Dış Ölçüler:</i> 730x671x8505 mm
	<i>Zamanlayıcı:</i> 1 dk- 99,9 saat	<i>Paket Ölçüleri:</i> 830x760x1050 mm
	<i>Kullanılabilir Hacim:</i> 120 lt	<i>Net Ağırlığı:</i> 72 kg

Şekil 5.5. Etüv fırını ve özellikleri

5.2.1.4. Tozların Elenmesi

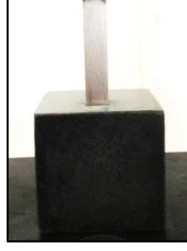
Etüv fırından çıkartılan toz karışımlarının birbirine yapışmasını ve topaklanmasını önlemek için toz karışımları elenmiştir. Filtre kağıdının üzerinden çıkartılan tozlar agat havanda bir miktar ezildikten sonra OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Fritsch marka Analysette 3 model elek sarsma makinesindeki (Şekil 5.6) 80-100 μ m'lik eleklerle elenmiştir. Elekten geçirilen tozlar presleme işlemine hazır hale getirilmiştir.

	<i>Marka:</i> Fritsch
	<i>Model:</i> Analysette 3
	<i>Maksimum Elek Sayısı:</i> 10 Adet (50 mm) / 16 Adet (25 mm)
	<i>Kuru Eleme Ölçüm Aralığı:</i> 32 μ m-63 mm
	<i>Islak Eleme Ölçüm Aralığı:</i> 20 μ m-10 mm
	<i>Elek Boyutu:</i> 200mm /50 mm
	<i>Maksimum Örnek Miktarı:</i> 20–100 gr

Şekil 5.6. Elek sarsma makinesi ve özellikleri

5.2.1.5. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması)

Elde edilen toz karışımları şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem olabildiğince yüksek yoğunluklu numuneler elde etmek için oldukça önemlidir. Presleme öncesinde kalıbın dikkatle hazırlanması gerekmektedir. Bu sebeple, öncelikle kalıp iç duvarı temizlenir ve bir yağlayıcı kullanılarak yağlanır. Bu işlem her sıkıştırma ve numune çıkartma işleminden sonra tekrarlanır. Böylece, kalıp herhangi bir deformasyona uğramadan, numunenin kalıptan çıkartılması sağlanmaktadır.



Şekil 5.7. Presleme işlemi için kullanılan kalıp

Presleme işleminde kullanılan kalıp, 10 ton yüke dayanıklı paslanmaz çelikten üretilmiş olup toz haznesi yaklaşık 10x10 mm boyuta sahiptir (Şekil 5.7). Kalıptaki toz haznesine yerleştirilen toz karışımları OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Başaran Hidrolik marka BŞR-204 model hidrolik pres (Şekil 5.8) yardımıyla yaklaşık 750 MPa basınç altında preslenmiştir. Bu işlem sonucunda ham numuneler üretilmiştir.

	<i>Marka:</i> Başaran Hidrolik
	<i>Model:</i> BŞR-204
	<i>Maksimum Kapasite:</i> 25 ton
	<i>Kontrol:</i> Otomatik hidrolik pres
	<i>Strok Mesafesi:</i> 125 mm
	<i>Ağırlık:</i> 155 kg

Şekil 5.8. Pres makinesi ve özellikleri

5.2.1.6. Malzemenin Sinterlenmesi

Şekillendirme aşaması sonrası üretilen ham kompozit numuneler, OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Protherm marka tüp fırın (Şekil 5.9) içerisinde sinterlenmiştir. Sinterlemenin temel amacı, blok parçalardaki partiküller arası atomik yayınmayla kimyasal bağlanmayı gerçekleştirmek ve böylece blok parçada hedeflenen mukavemet ve yoğunluğa ulaşmaktır. Sinterleme sırasında numuneleri vakuma alma işlemi, 5×10^{-2} Pa vakum basıncına sahip Value marka vakum pompası yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.10).

	<i>Marka:</i> Protherm
	<i>Model:</i> PTF 12/20/250
	<i>Maksimum sıcaklık:</i> 1200°C
	<i>Sürekli kullanım sıcaklığı:</i> 1150°C
	<i>Isınma Uzunluğu:</i> 250mm
	<i>Tüp şekli:</i> Yatay
	<i>Tüp boyutları:</i> 200x50 mm
	<i>Ortalama ağırlık:</i> 22 kg

Şekil 5.9. Sinterleme fırını ve özellikleri

Sinterlenecek numuneler, öncelikle yüksek sıcaklığa dayanıklı kuartz cam tüp içerisine yerleştirilir. Bu kuartz cam tüp, çelik hortumlar ve kelepçe vasıtasıyla vakum pompasına bağlanır. Böylece, sinterleme süresince tüpün içerisindeki hava boşaltılarak malzemenin oksitlenmesinin önüne geçilmektedir. Sinterleme işlemi, 60 dk süresince ve 600°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10. Vakum altında sinterleme işlemi

5.2.1.7. İndüksiyonla Sıcak Presleme İşlemi

Geleneksel (katı hal) sinterleme yöntemlerinin kullanılması, yüksek sıcaklık ve uzun süre nedeniyle sinterlenmiş örneklerde tane büyümesine neden olmaktadır. Sinterleme sıcaklığını ve süresini kontrol ederek sinterleme sırasında tane büyümesini en aza indirmek özellikle mekanik özellikler açısından oldukça önemlidir. Ayrıca geleneksel sinterleme işleminde kullanılan fırınların istenilen sıcaklığa ulaşması ve bu sıcaklıkta çok uzun süreler sabit kalması ciddi enerji sarfıyatı ve maliyeti oluşturmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek için farklı metotlarla (Spark plazma,

mikrodalga, sıcak presleme ve indüksiyonla sinterleme) sinterleme çalışmaları hız kazanmıştır. Bunlardan yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtmalı sinterleme yöntemi ile tane büyümesi olmaksızın oldukça kısa sürelerde seramik ve metalik tozlar yoğun bir şekilde sinterlenebilmektedir (Kim et al., 2007). Sıcak presleme işlemi, yüksek performans istenen malzemelerin üretilmesinde tercih edilmektedir. Bu işlem sıcaklık ve basıncın eş zamanlı uygulanmasıyla aşınma direnci yüksek malzemeler ve kompozit malzemeler gibi birçok alanda tercih edilmektedir (Ergün, 2006).

Bu çalışmada, sinterlenmiş kompozit malzemelerin yoğunluk değerlerinin artırılması, gözeneklilik oranlarının düşürülmesi ile numunelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla malzemelere sinterlenme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Bunun için, OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı'nda yer alan (MTI EQ-SP-15VIM) su soğutmalı RF indüksiyonla ısıtma makinesi (Şekil 5.11) ve Başaran BŞR-200 model 10 ton yük kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır.

	Marka: MTI
	Model: EQ-SP-15VIM
	Çalışma Gerilimi: 220V, 50 Hz
	Çıkış gücü: 2-25 kW
	Çalışma sıcaklık aralığı: 300°C - 2000°C
	İndüksiyon bobini ölçüleri: 150x140x65 mm
	Çalışma akımı: 5-52 A

Şekil 5.11. İndüksiyon cihazı ve özellikleri

Kompozit numuneler 50 Hz frekansa, 25 kW çıkış gücüne sahip olan indüksiyon makinesine entegreli hidrolik pres kullanılarak sıcak preslenmiştir. İndüksiyonun sıcaklığını kontrol etmek amacıyla infrared termometre kullanılmıştır. İndüksiyon sistemi, bobin çapı 4 mm ve et kalınlığı 0,5 mm olan su soğutmalı bakır borudan oluşmaktadır. İndüksiyon makinesiyle entegreli olarak konumlandırılan hidrolik pres, yüksek sıcaklıklarda mukavemeti fazla olan grafit kalıp kullanılarak kompozit numunenin sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Şekil 5.12'de indüksiyonla sıcak presleme işleminin uygulandığı gösterilmiştir.



Şekil 5.12. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi

İndüksiyonla sıcak presleme işleminin optimum parametrelerini belirlemek amacıyla, deneme yanılma yoluyla birçok tekrar sonucu işlem sıcaklığı 30 saniye süresince 500°C’de sabit kalacak şekilde belirlenmiştir. Optimum işlem parametreleri belirlendikten sonra, 70 mm çapındaki grafit kalıp içerisindeki numuneye indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sırasında indüksiyon cihazında; ısıtma süresi 41 s, bekleme süresi 30 s ve soğutma süresi 10 s olarak ayarlanmıştır. 500°C sıcaklıkta 30 s süresince 25 MPa’lık bir basınç uygulanmıştır. Kuvvet kaldırıldıktan sonra numuneler kalıptan çıkarılmıştır. İndüksiyonla sıcak preslemiş kompozit numunelerin yüzeylerinde ısıl işlem ve preslemenin etkisiyle bozulmalar meydana gelmiştir. Numunelerin üzerinde mekanik, tribolojik ve mikroyapı testlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır.

5.2.1.8. Zımparalama ve Parlatma İşlemleri

Kompozit malzemelerin yüzey zımparalama ve parlatma işlemleri OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Metkon marka metal zımparalama ve parlatma cihazıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.13).

	<i>Marka:</i> Metkon
	<i>Model:</i> Forcipol 2V
	<i>Ağırlık:</i> 40 kg
	<i>Teker çapı:</i> 250 mm
	<i>Dönüş hızı:</i> 50-600 dev/dk
	<i>Motor Gücü:</i> 0.75 HP-230 V-50 Hz
	<i>Ölçüler:</i> 700x690x340 mm

Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma cihazı ve özellikleri

Zımparalama işlemi için SiC su zımparaları kullanılmıştır. Parlatma işlemi, elmas çuha ve alümina solüsyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Numune yüzeyindeki oksit tabakayı uzaklaştırmak amacıyla numunelere zımparalama işlemi uygulanmıştır. Bunun için öncelikle 30'ar dk sırasıyla 600'lük, 1200'lük ve 2000'lik SiC su zımparaları kullanılarak numuneler zımparalanmıştır. Daha sonra elmas çuha üzerine bir şırınga yardımıyla alümina solüsyon sıkılarak numunenin yüzeyi 30 dk süresince parlatılmıştır. Zımparalama işlemi sonrası numunelerin genel görünümü Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.14. Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası numuneler

5.2.2. Kompozit Malzeme Karakterizasyonu

5.2.2.1. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin deneysel yoğunluklarını belirlemek amacıyla Arşimet yönteminden faydalanılmıştır. Deneysel yoğunluk ölçümü için Arşimet terazisi kullanılmıştır (Şekil 5.15). Deneysel yoğunluk tespit edilirken aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

- Numunelerin asılı kütleleri (W_A), Arşimet terazisinde ölçülmüştür.
- Numunelerin doymuş kütlesi (W_D), kaynamış su içerisinde 3 saat bekledikten sonra hassas terazide tartılarak ölçülmüştür.

- Numunelerin kuru kütleleri (W_k), vakuma alınabilen bir etüv fırınında, 50°C sıcaklıkta ve en az 18 saat kurutulduktan sonra tartılarak belirlenmiştir.



Şekil 5.15. Arşimet terazisiyle numunelerin kütle ölçümü

Kompozit numunelerin deneysel yoğunluğu (ρ_D) Eşitlik (5.1)'den hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte (W_A) kompozit malzemelerin suyun içindeki asılı kütlesi, (W_K) kurumuş haldeki kütlesi ve (W_D) suya doymuş kütlesini ifade etmektedir.

$$\rho_D = \frac{W_K}{(W_D - W_A)} \rho_{Su} \quad (5.1)$$

Üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin teorik yoğunluklarını (ρ_T) belirlemek için Eşitlik (5.2)'den faydalanılmaktadır. Bu eşitlikte bulunan, m numunelerin kütlesini (g), V kare kompozit numunelerin hacmini (cm^3) ifade etmektedir.

$$\rho_T = \frac{m}{V} \quad (5.2)$$

Karışımın teorik yoğunluğu (ρ_K) Eşitlik (5.3)'de belirtilen formül kullanılarak belirlenebilmektedir. Formülde belirtilen (ρ_M) matris malzemesi olarak kullanılan Al6061 alaşımının yoğunluğunu, % M matris malzemesinin ağırlıkça takviye oranını, (ρ_{TK}) takviye elemanının yoğunluğunu ve % TK ise takviye elemanının ağırlıkça katkı oranını göstermektedir.

$$\rho_K = (\rho_M \times \%M) + (\rho_{TK} \times \%TK) \quad (5.3)$$

Toz metalürjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen ürünler için çok önemli bir parametre olan gözeneklilik oranı, (% G) Eşitlik (5.4)'den hesaplanabilmektedir.

$$\%G = \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_K}\right) \times 100 \quad (5.4)$$

5.2.2.2. Vickers Sertlik Ölçümü

Vickers sertlik ölçme yöntemi, yumuşak malzemelerden çok sert malzemelere kadar birçok malzemenin sertliğini ölçmek amacıyla 1921 yılında Vickers şirketi tarafından geliştirilmiştir. Sertlik ölçümü malzeme yüzeyine belirli bir yük altında piramit şeklinde bir ucun batırılması ve malzeme yüzeyinde oluşan köşegenlerin izinin bir mikroskop yardımıyla ölçülmesi sonucu gerçekleştirilmektedir. Ölçüm sırasında 136° tepe açılı elmas kare piramit uç kullanılmaktadır. Numunelere sertlik ölçümü yapmak amacıyla OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan TMTeck marka HV-1000B model Vickers Sertlik Ölçüm cihazı (Şekil 5.16) kullanılmıştır.

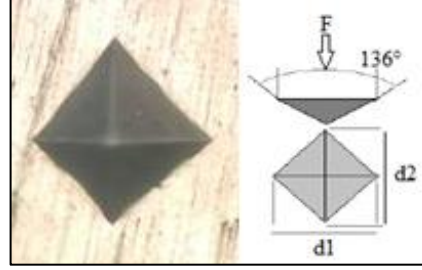
	Marka: TMTeck
	Model: HV-1000B
	Test kuvveti uygulama yöntemi: Otomatik yükleme
	Mikroskobun büyütmesi: 400x (Ölçüm), 100x (Gözlem)
	Test kuvvetinin bekleme süresi: 0-60 s (5s'lik aralıklarla)
	Maksimum örnek yüksekliği: 70 mm
	İşaretleyicinin dış panel ile arasındaki mesafe: 98 mm
	Ağırlık: 25 kg
	Güç kaynağı: AC220V/50~60Hz

Şekil 5.16. Vickers sertlik ölçüm cihazı ve özellikleri

Vickers sertlik deneyinde kare tabanlı elmas piramit uç kullanılarak, numune yüzeyine 0.098 N, 0.245 N, 0.49 N, 0.9807 N, 1.961 N, 2.942 N, 4.903 N ve 9.807 N'luk yükler uygulanabilmektedir. Sertlik değeri hesaplanırken;

- Üretilen numunelere 1.961 N (200g)'lık bir yük 15 s boyunca uygulanmaktadır.
- Numuneye uygulanan yük kaldırıldıktan sonra malzemenin yüzeyinde oluşan iz (d_1 ve d_2 uzunlukları) (Şekil 5.17) sertlik ölçme cihazındaki mikrometreler kullanılarak ölçülmektedir.

- Bu iz çapları (d_1 ve d_2), manuel olarak sertlik ölçme cihazına girilmekte ve dijital ekran üzerinden bu iz çaplarına karşılık gelen sertlik değeri okunmaktadır.



Şekil 5.17. Vickers sertlik izi

Vickers sertlik (HV), Eşitlik (5.5)'de verilmiş olup F uygulanan yüke (kg) ve d ortalama köşegen genişliğine, ($d=(d_1+d_2)/2$, mm) bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (5.5)$$

5.2.2.3. Basma Dayanımının Belirlenmesi

Numunelerin basma testi OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Mares marka Tst 10t model üniversal test makinesiyle (Şekil 5.18) gerçekleştirilmiştir.

	Marka: Mares
	Model: Tst 10t
	2 veya 4 taşıyıcı ve 2 askı millî hidrolik sistem
	Yük kapasitesi: 10 ton
	Yazılım türü: PC denetimi test yazılımı
	Dokunmatik PC denetim sistemi
	Farklı elektronik yük (LC) seçenekleri
	Uzama ölçümü: Travers, ekstensometre

Şekil 5.18. Basma/çekme test cihazı ve özellikleri

Basma testinde basma hızı 5 mm/dk, ön yükleme hızı 2 mm/dk ve ön yükleme 5 MPa olarak belirlenmiştir. Basma test koşulları (numune boyutları, basma hızı, ön yük vb.) bilgisayar yazılımına girilerek test süreci bu yazılım üzerinden takip edilmiştir. Basma testlerinin birbiriyle tutarlı olup olmadığını belirlemek amacıyla her bir

kompozisyona ait en az 3 (üç) adet basma testi gerçekleştirilerek basma eğrileri oluşturulmuştur.

5.2.2.4. Aşınma Parametrelerinin Belirlenmesi

Aşınma testleri OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Gunt marka TM260 model aşınma test cihazında (Şekil 5.19) gerçekleştirilmiştir.

	Marka: Gunt
	Model: TM260
	Maksimum yük: 80 N
	Aşınma kuvveti için kuvvet sensörü: 0-50 N
	Aşındırma tekeri çapı: 49 mm
	Ölçüm aralıkları: Kuvvet 0-50 N, Hız: 0-200 dev/dk

Şekil 5.19. Aşınma test cihazı ve özellikleri

Aşınma deney düzeneğinde, yükleme sepetine 0-80 N arasında yük uygulanabilmekte, kontrol ünitesi üzerinden mil dönüş hızı 0-250 dev/dk arasında değiştirilebilmektedir. Aşınma testlerinde karşı disk olarak 50 HRC sertliğe sahip AISI304 paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Aşınma testlerinde uygulanacak adımlar aşağıda verilmiştir:

- İlk olarak numune tutucuya sabitlenir,
- Uygulanacak yük (5 N ve 10 N), yükleme sepetine eklenerek kontrol ünitesi üzerindeki sürtünme kuvveti göstergesi sıfırlanır,
- Sistemin çalışmasıyla aşındırıcı disk dönmekte ve numune kuru şartlar altında aşınmaya başlamaktadır,
- Elde edilen sürtünme kuvveti verileri, PICO 4424 veri kaydedicisi ve yazılımı ile saniyede bir bilgisayara aktarılmaktadır.

Kütle kaybı (Δm), Eşitlik (5.6)'dan hesaplanmakta olup malzemenin aşınma öncesi kütlesi (m_i), aşınma sonrası kütlesi (m_s) çıkarılarak elde edilmektedir.

$$\Delta m = m_i - m_s \quad (5.6)$$

Aşınma testlerinde, kütle kaybı hesaplandıktan sonra hacimsel aşınma, Eşitlik (5.7)'den belirlenebilmektedir. Hacimsel aşınma (ΔV), kütle kaybının (Δm)

malzemenin deneysel yoğunluğuna (ρ_D) bölünmesiyle elde edilmektedir. Hacimsel aşınmanın birimi (mm^3) veya (cm^3) olarak verilmektedir.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_D} \quad (5.7)$$

Aşındırıcı disk olarak 20 mm yarıçapında (r) AISI304 paslanmaz çelik bir disk kullanılmıştır. Diskin dönüş hızı (n) 200 d/dk olup aşınma test süresi (t) 40 dakikadır. Buna göre kayma mesafesi (L), Eşitlik (5.8)'den yaklaşık 1000m olarak hesaplanmaktadır

$$L = 2\pi r \times n \times t \quad (5.8)$$

Aşınma oranını (W) belirlemek için malzemeler arasında uygulanan yük (F), kayma mesafesi (L) ve hacimsel aşınma (ΔV) değerlerinin bilinmesi gerekmektedir (Eşitlik (5.9)). Aşınma oranının birimi (mm^3/Nm) veya (cm^3/Nm) olarak verilmektedir.

$$W = \frac{\Delta V}{FL} \quad (5.9)$$

Aşınma direnci (W_R) de aşınma testlerinde dikkate alınan parametrelerden biridir. Aşınma direnci yüksek olan malzemeler zor aşınan malzemelerdir. Aşınma direnci (W_R), Eşitlik (5.10)'de verilmiş olup (Nm/mm^3) veya (Nm/cm^3) birimiyle ifade edilmektedir.

$$W_R = \frac{1}{W} \quad (5.10)$$

5.2.2.5. Tozların Tane Boyut Ölçümü

Kompozit malzeme üretimi için satın alınan tozların boyutlarını doğrulamak amacıyla tane boyut ölçümü yapılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan tozların boyut ölçümü OMÜ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (KİTAM) bünyesinde yer alan Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazıyla (Şekil 5.20) gerçekleştirilmiştir.

	<i>Marka:</i> Malvern
	<i>Model:</i> Mastersizer 3000
	<i>Ölçüm aralığı:</i> 0,01-3500 μm
	<i>Ölçüm süresi:</i> 10 s
	<i>Ölçüm prensibi:</i> Lazer ışığı saçılması
	<i>Boyut:</i> 690x300x450 mm
	<i>Güç kaynağı:</i> AC220V/50~60 Hz

Şekil 5.20. Tane boyut ölçüm cihazı

5.2.2.6. X ışını Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını kırınımı (XRD) analizi, malzeme üzerine gönderilen X-ışınlarının farklı açılarla kırılarak yansması prensibine dayanmaktadır. Bu yansımalar parmak izi gibi her malzemeye özgü desende oluşmaktadır. XRD analizi ile malzeme tahrip edilmediği gibi çok az miktarda bulunan numuneyle dahi analiz gerçekleştirilebilmektedir. XRD analizi ile malzeme içerisindeki fazların dağılımı, kristal boyutu ile yönlenmesi ve fazların miktarı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin XRD analizinin yapılması amacıyla OMÜ KİTAM bünyesinde yer alan X-ışını kırınımı (XRD) cihazı (Şekil 5.21) kullanılmıştır.

	<i>Marka:</i> Rigaku
	<i>Model:</i> Smartlab
	2 θ tarama yöntemi
	Ani sıcaklık değişimlerini kontrol eden su soğutucusu
	3 kW sızdırmaz X-ray tüpü, çapraz ışın optiği
	Yüksek çözünürlükte Grafit Monokromatör
	<i>Boyut:</i> 1300x1880x1300 mm
	<i>Ağırlık:</i> 750 kg

Şekil 5.21. X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ve özellikleri

5.2.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek enerjili odaklanmış bir elektron demetinin malzeme yüzeyini tarayarak incelemesi prensibine dayanır. Malzemede bulunan atomlarla etkileşen elektronlar, analizi gerçekleştirilen numunelerin

morfolojisi hakkında farklı sinyalizasyon uygulamaktadır. SEM analizi ile tanecik boyutu, faz miktarı, faz dağılımı ve malzeme topografisi gibi konularda bilgi sahibi olunabilmektedir. SEM analizi ile birlikte 1 nm'nin altındaki detaylara çok yüksek çözünürlükte ulaşılabilir.

SEM analiz cihazları ile yüksek vakum altında, iletken ve kuru yüzeylerin analizi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, tozların morfolojisi, kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri ve element dağılım haritaları gerçekleştirilebilmektedir. Bu analizler OMÜ KİTAM'da yer alan taramalı elektron mikroskobu (Şekil 5.22) kullanılarak yapılmıştır.

	<i>Marka:</i> Jeol
	<i>Model:</i> JSM-7001F
	<i>Büyütme:</i> x10- x1000000
	<i>Maksimum numune çapı:</i> 200 mm
	<i>Ölçüm Seçenekleri:</i> SEM-EDX WDS CL STEM
	<i>Hızlandırıcı gerilim:</i> 0.5-2.9 kV (10V adımlarla), 3.0-30 kV (100V adımlarla)
	<i>Çözümleme (ikincil elektron görüntüsü):</i> 1.2 nm (30 kV), 3.0 nm (1.0 kV), 3.0 nm (15 kV) 10 mm WD, 5 nA

Şekil 5.22. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve özellikleri

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

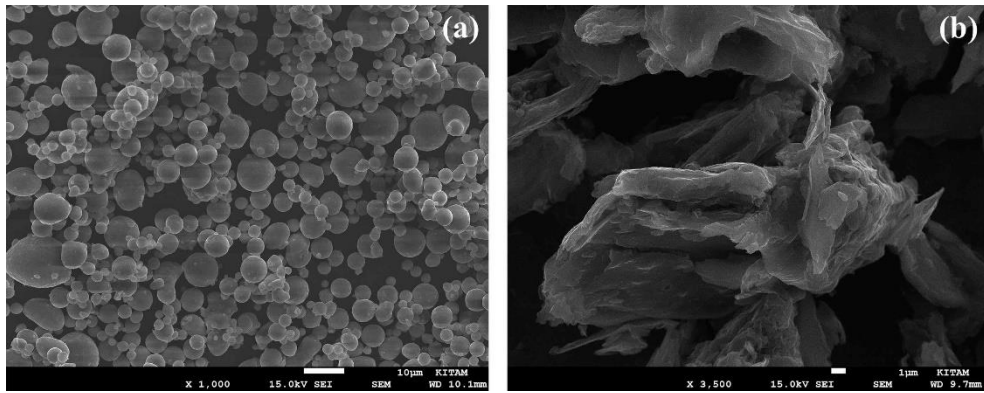
Bu tez çalışması kapsamında toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Al6061 alaşımının matris malzeme olarak kullanıldığı bu çalışmada; grafen, B₄C ve Si₃N₄ takviye elemanları olarak tercih edilmiştir. Al6061-Grafen, Al6061-B₄C, Al6061-B₄C-Grafen, Al6061-Si₃N₄ ve Al6061-Si₃N₄-Grafen kompozitleri üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, aşınma oranı, sürtünme davranışı ve mikroyapı incelemeleri bu bölümde detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

6.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analizleri

Bu bölümde ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozit malzemelerin analizi gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan tozların tane boyutu, XRD ve SEM analiziyle üretilen kompozitlerin mikroyapısı, faz yapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, aşınma ve sürtünme davranışı incelenmiştir.

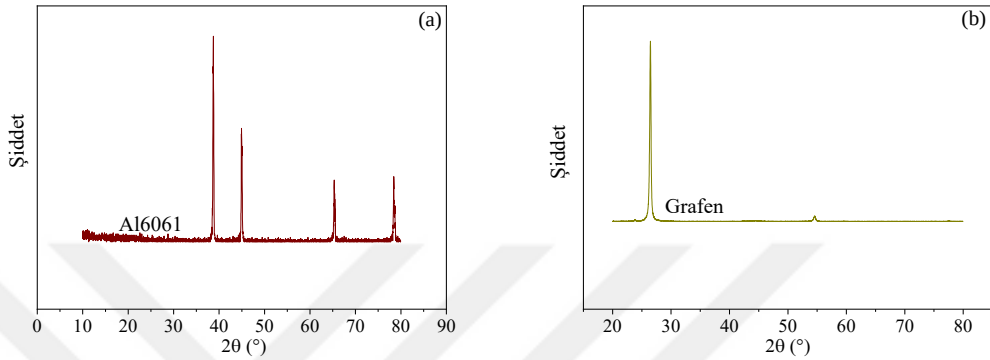
6.1.1. Al6061 ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri

Bu tez çalışmasında kullanılan Al6061 alaşımı ve grafen tozlarının görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Al6061 tozunun 1000 büyütmeli mikroskop görüntüleri incelendiğinde; toz boyutunun ~10 µm ve tozun küresel morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Grafen tozlarına ait 3500 büyütmeli SEM görüntüsünde ise grafenin tabakalı ve plakamsı bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.1).



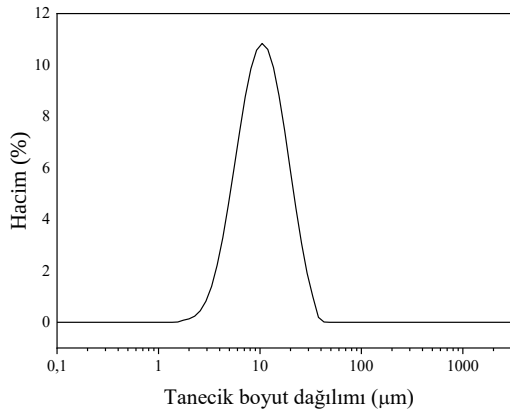
Şekil 6.1. Al6061 (a) ve grafen (b) tozlarına ait SEM görüntüleri

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan Al6061 alaşımı ve grafen tozlarının faz analizleri için X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılmıştır. XRD örgü desenleri incelendiğinde; Al6061 alaşımının kırınım açıları (2θ) 38° , 45° , 66° , 78° ve grafenin kırınım açısının 26.5° olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.2). Bu analizlerle kompozit yapı içerisinde bulunan Al6061 alaşımı ve grafenin varlığı doğrulanabilmektedir.



Şekil 6.2. Al6061 (a) ve grafen (b) tozlarına ait XRD örgü desenleri

Al6061 tozlarının tanecik boyutu Mastersizer 3000 tane boyut ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre Al6061 tozunun $\sim 10 \mu\text{m}$ boyutta olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.3).



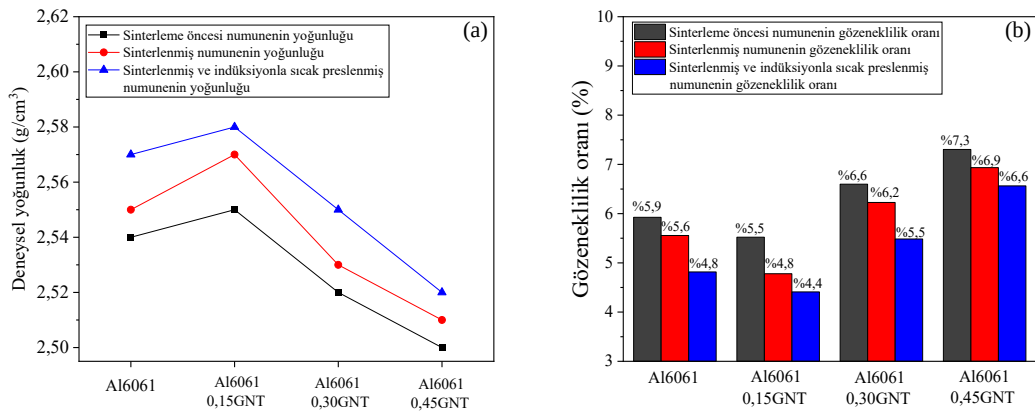
Şekil 6.3. Al6061 tozunun tanecik boyut dağılımı

6.1.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Al6061 alaşımı ve grafen takviyeli (ağırlıkça %0.15, 0.3, 0.45) Al6061 esaslı kompozitlerin sinterleme öncesi, sinterleme sonrası ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası yoğunluk ve gözeneklilik oranları incelenmiştir.

Grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitler, 600°C sıcaklıkta ve 60 dk süresince sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra numunelere 500°C sıcaklıkta ve 25 MPa basınç altında indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen numunelerin deneysel yoğunluğu Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki önemli bir diğer parametre gözeneklilik oranı olup bu oranın düşük olması mekanik özelliklerin yüksek olduğunu göstermektedir.

Grafen takviye oranına ve ısıl işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı değişimi Şekil 6.4'de verilmiştir. Sinterlemenin etkisiyle Al6061 matrisli grafen takviyeli kompozitlerde deneysel yoğunluğun arttığı, gözeneklilik oranının azaldığı tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk (2.58 g/cm^3) ve en düşük gözeneklilik oranına (%4.4) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş (SSİSP) Al6061-0.15GNT kompozitte ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0.15 GNT takviyesinden sonra grafenin topaklanma eğiliminden dolayı yoğunluğun azaldığı ve gözeneklilik oranının arttığı tespit edilmiştir.

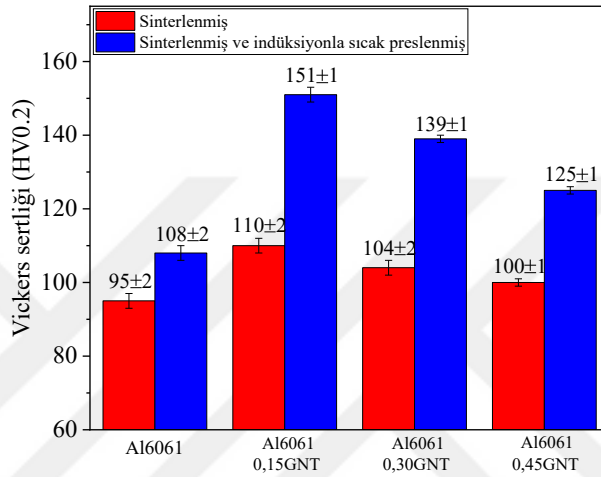


Şekil 6.4. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıl işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

6.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Al6061 alüminyum alaşımı ve ağırlıkça %0.15, %0.3 ve %0.45 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertlikleri incelenmiştir. Zımparalanmış ve parlatılmış numunenin yüzeyinden seçilen yedi noktanın sertlik verilerinin ortalaması alınarak Vickers sertlik değeri belirlenmiştir. Grafen takviye

oranına ve ısıtıl işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak Al6061 esaslı kompozitlerin Vickers sertlik değerleri (HV0.2) Şekil 6.5’de verilmiştir. Grafen ilavesiyle birlikte her iki ısıtıl işlem türünde de (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) sertlik değerlerinde artış görülmüştür. En yüksek Vickers sertlik değeri (151 ± 1 HV), indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-0.15GNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Al6061 alüminyum alaşımıyla (95 ± 2 HV) karşılaştırıldığında sinterlenen Al6061-0.15GNT kompozitin (110 ± 2 HV) sertlik değeri %15.79 oranında artmıştır.



Şekil 6.5. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi

Takviye elemanının sertliği üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerlerini doğrudan etkilemektedir. Takviye malzemesinin sertlik değerinin matris malzemenin sertlik değerine etkisi karışımlar kuralına göre Eşitlik (6.1)’de açıklanmaktadır (Dieter ve Bacon, 1976).

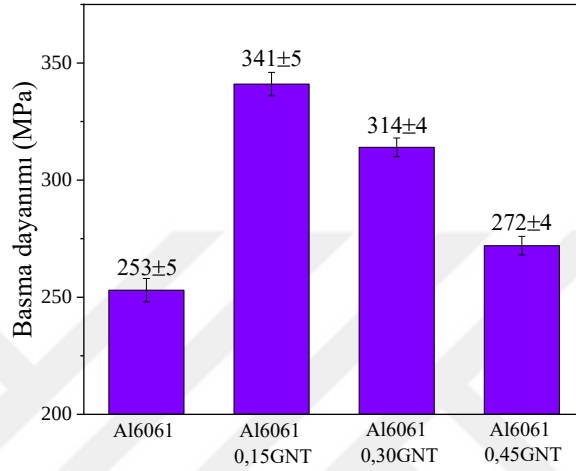
$$H_k = H_m f_m + H_r f_r \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte, H_k kompozit malzemenin sertliğini, H_m matris malzemenin sertliğini, H_r takviye elemanının sertliğini, f_m matris malzemenin hacimsel katkı oranını ve f_r takviye elemanının hacimsel katkı oranını göstermektedir.

6.1.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Al6061 alüminyum alaşımı ile Al6061-0.15GNT, Al6061-0.3GNT, Al6061-0.45GNT kompozitlerin sinterleme sonrası basma dayanımı değerleri Şekil 6.6’da verilmiştir. Basma testi sonuçlarının doğruluğu ve tutarlılığı için basma testleri üç kez tekrarlanmıştır. En yüksek basma dayanımı değerine (341 ± 5 MPa); Al6061-0.15GNT

kompozit yapıda ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0.15 grafen katkı oranından sonra ise maksimum basma dayanımı düşmüştür. Belirli bir grafen katkı oranına kadar (ağırlıkça %0.15) Al6061 esaslı kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Basma testi için uygun numunelerin üretilmemesi sebebiyle sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlere basma testi uygulanamamıştır.



Şekil 6.6. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerin basma dayanımı değerleri

Kompozit malzemelerin basma dayanımları üzerinde dislokasyon yoğunluğu doğrudan etkili bir parametredir. Al6061 alüminyum alaşımına grafen takviyesi sonucu matris içerisinde dislokasyon yoğunluğu artmakta bu da mekanik özellikleri geliştirmektedir. Grafen takviyesi, Al6061 alüminyum alaşım matrisi içerisinde tane sınırlarına yerleşip burada bir engel vazifesi görerek dislokasyon hareketini engellemektedir. Dislokasyon yoğunluğu ile mekanik özellikler arasındaki ilişki Orowan eşitliği olan Eşitlik (6.2) ile ifade edilebilir (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

$$\gamma = b\rho g \quad (6.2)$$

Bu eşitlikte, γ kayma şekil değiştirme oranını, b Burger vektörünü, ρ dislokasyon yoğunluğunu ve g dislokasyon hızını ifade etmektedir.

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemelerinin boyutu ve şekli üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Takviye malzemesinin boyutu ile takviye malzemesinin tanecikleri arasındaki mesafenin birbiriyle olan ilişkisi Eşitlik (6.3)'te verilmektedir (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

$$\lambda = [4r(1-f)] / (3f) \quad (6.3)$$

Bu eşitlikte; λ grafen taneciklerinin arasındaki mesafe, r grafen taneciklerinin yarıçapı ve f grafen taneciklerinin hacimsel katkı oranıdır. Al6061 alüminyum alaşımına GNT takviyesi sonucu tanecikler arasındaki boşluğun azalmasına bağlı olarak tanecikler arasındaki kayma gerilmesi artmaktadır. Tanecikler arasındaki mesafeye bağlı olarak tanecikler arasındaki kayma gerilmesi Eşitlik (6.4)'te verilmektedir.

$$\tau_0 = Gb / \lambda \quad (6.4)$$

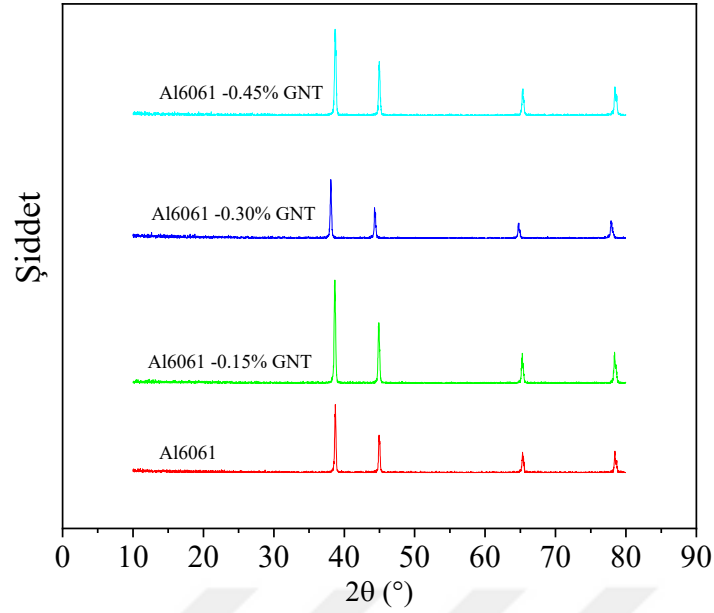
Burada; τ_0 tanecikler arasındaki kayma gerilmesi (MPa), λ tanecikler arasındaki mesafe (μm), G kayma modülü (MPa) ve b Burger vektörüdür. Kompozit malzemeye yapılan takviyeler sonucu mekanik özelliklerdeki artış teorik olarak Eşitlik (6.5)'te verilmektedir (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_r f_r \quad (6.5)$$

Bu eşitlikte σ_c kompozit malzemenin mukavemeti (MPa), σ_m matris malzemenin mukavemeti (MPa), σ_r takviye malzemesinin mukavemeti (MPa), f_m matris malzemenin hacimsel katkı oranı ve f_r takviye malzemesinin hacimsel katkı oranıdır.

6.1.5. XRD Faz Analizleri

Bu bölümde, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen kompozitlerin faz yapısını belirlemek amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirilmiştir. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlere ait XRD örgü desenleri Şekil 6.7'de verilmiştir. XRD örgü deseni incelendiğinde; kompozitlerde sadece Al6061 alaşımına ait piklere rastlanmıştır. XRD cihazının düşük hassasiyeti ve grafenin düşük katkı oranı sebebiyle grafen pikine ($2\theta=26.5^\circ$) rastlanmamıştır. Ayrıca kompozit yapılarda Al_4C_3 gibi ikincil faz oluşumu görülmemiştir.

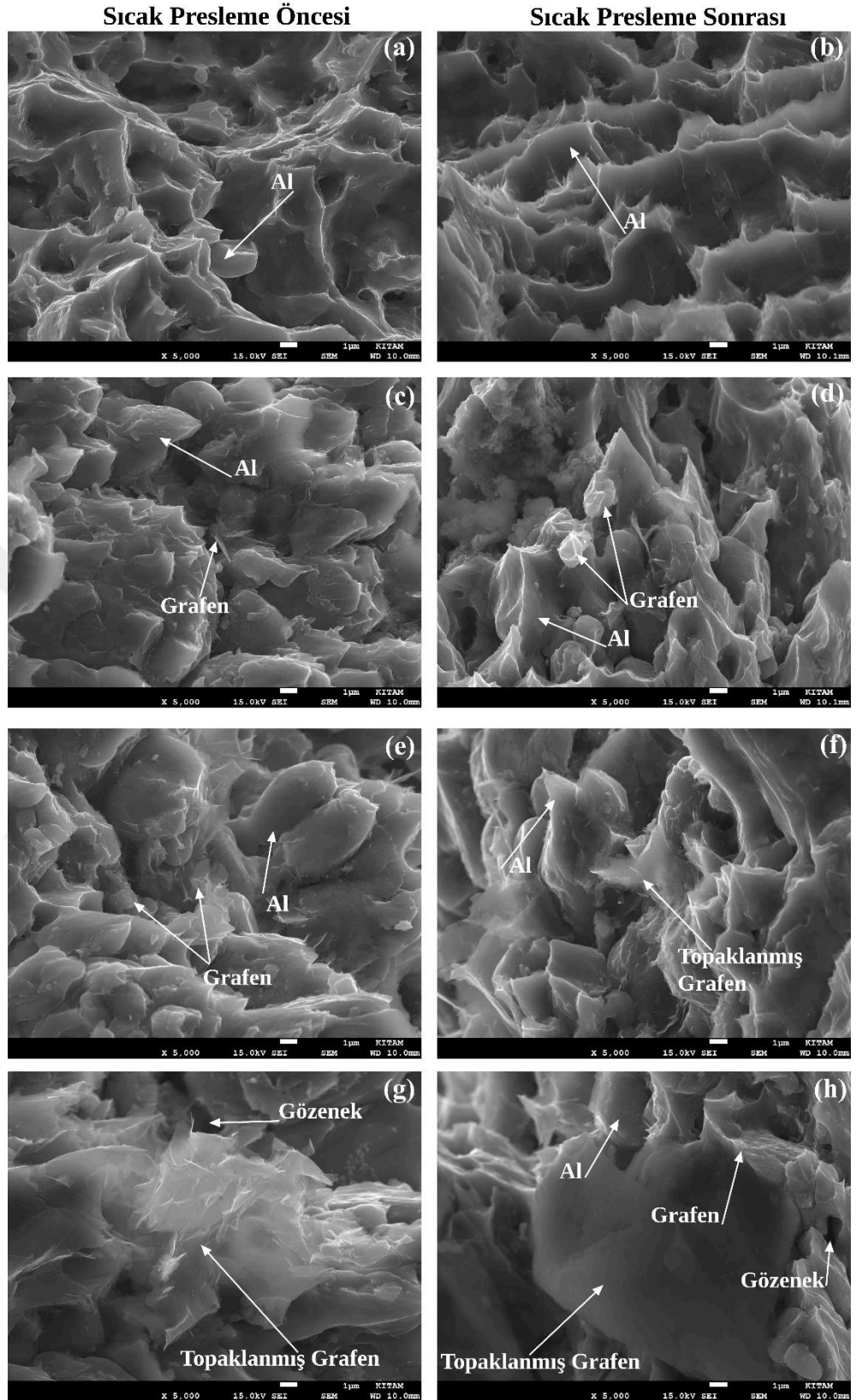


Şekil 6.7. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerin XRD örgü desenleri

6.1.6. SEM ve SEM-EDX Görüntülerinin Analizi

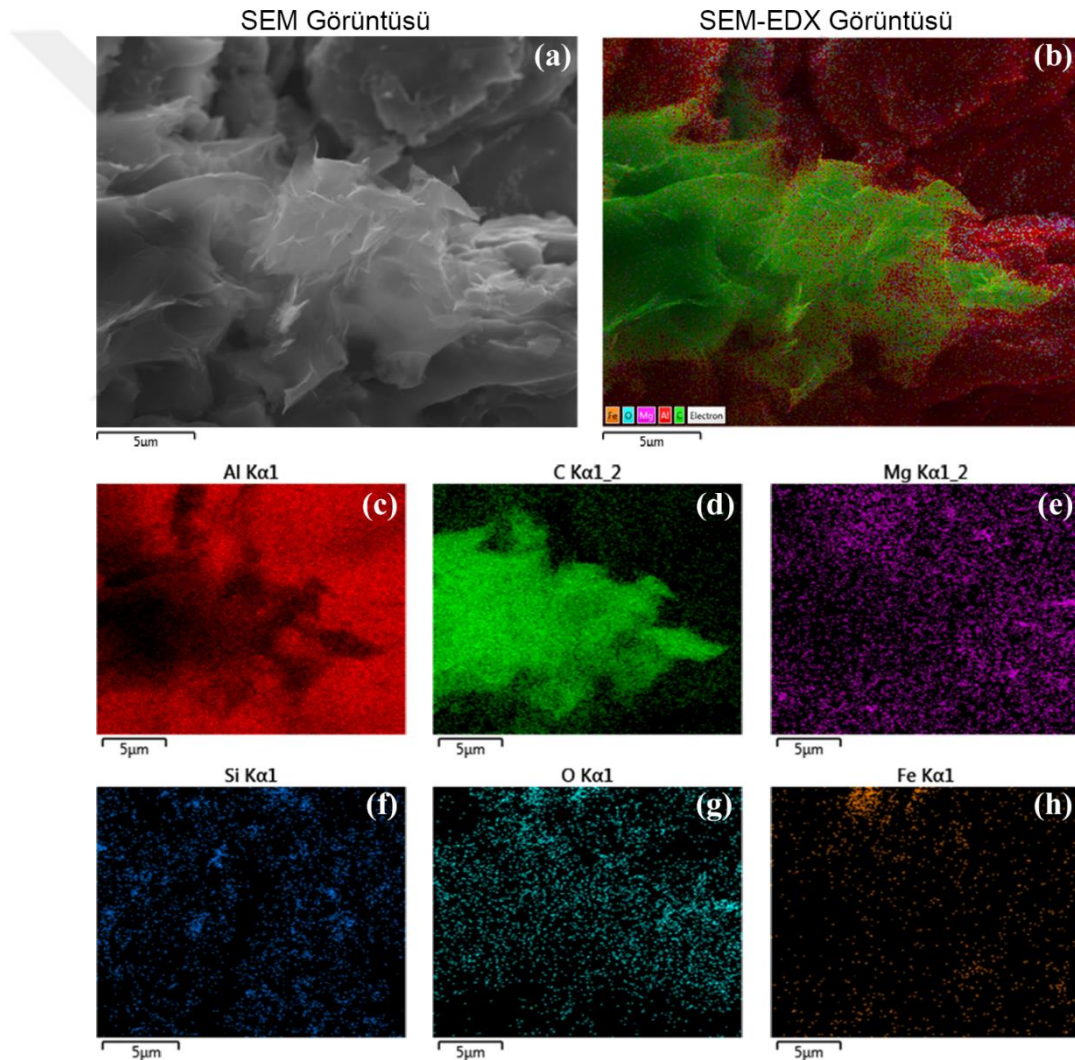
Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle üretilen Al6061 matrisli kompozitlerin mikro yapılarını incelemek amacıyla kırık yüzey SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 6.8’de verilmiştir.

SEM görüntüleri incelendiğinde, kompozit yapı içerisindeki grafen partiküllerinin homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Sinterlemenin etkisiyle alüminyum ve grafen tanecikleri arasında güçlü arayüz etkisi oluşmuştur. Sinterlenmiş numunelerle karşılaştırıldığında sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin daha yoğun bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde daha belirgin bir boyun oluşumu gerçekleşmiştir. Taneler arasında arayüz incelemesi yapıldığında, indüksiyonla sıcak presleme işleminin taneler arası etkileşimi arttırdığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen takviyesinden sonra grafen taneciklerinde topaklanmaların meydana geldiği ve bu topaklanmaların etkisiyle mikroyapıda gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir. Bunun sonucunda üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulduğu öngörülmektedir. Isıl işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) ve grafen katkı oranına bağlı olarak mekanik özelliklerde oluşan değişimler SEM kırık yüzey görüntüleriyle doğrulanmıştır.



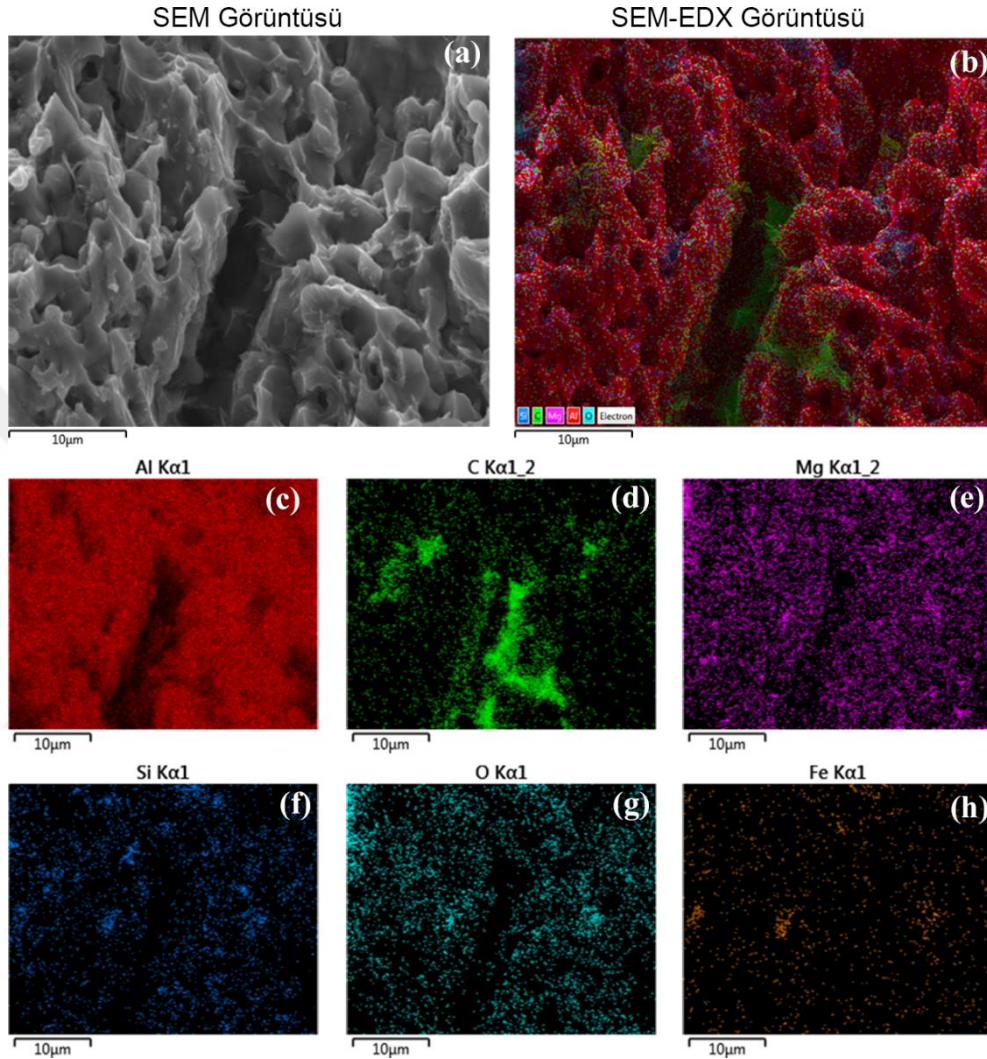
Şekil 6.8. Al6061 alaşımı ve Al6061-GNT kompozitlerin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-0.15GNT, (d) Al6061-0.15GNT-i, (e) Al6061-0.30GNT, (f) Al6061-0.30GNT-i, (g) Al6061-0.45GNT, (h) Al6061-0.45GNT-i

Sadece sinterlenmiş Al6061-0.45GNT kompozit malzemesine ait Taramalı Elektron Mikroskobu–Enerji Dağıtıcı X-ışını (SEM-EDX) ile elde edilen element dağılım haritası Şekil 6.9’da verilmiştir. Kompozit numunenin kırık yüzeyinde gerçekleştirilen SEM-EDX element harita taramasında, Al6061 alaşımının ana elementleri olan Al (kırmızı dağılımlı), Mg (mor dağılımlı) ve Si (mavi dağılımlı) yapı içerisinde rahatlıkla görülmektedir. Karbon (C) elementinin bir allotropu olan grafen ise yapı içerisinde yeşil dağılımlı olarak görülmüştür. Yeşil dağılımlara bakıldığında grafenin belli bir bölgede yoğun olarak kümелendiği açık bir şekilde görülmektedir. Üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olan topaklanmalar SEM-EDX analizi ile doğrulanmaktadır.



Şekil 6.9. Sadece sinterlenen Al6061-0.45GNT kompozitlere ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-0.45GNT kompozit yapıya ait taramalı elektron mikroskopuyla elde edilen element dağılım haritası Şekil 6.10'da verilmiştir. SEM-EDX element harita taramasından yeşil renkteki dağılım incelendiğinde grafenin tane sınırlarında bulunduğu ve topaklandığı görülmektedir.

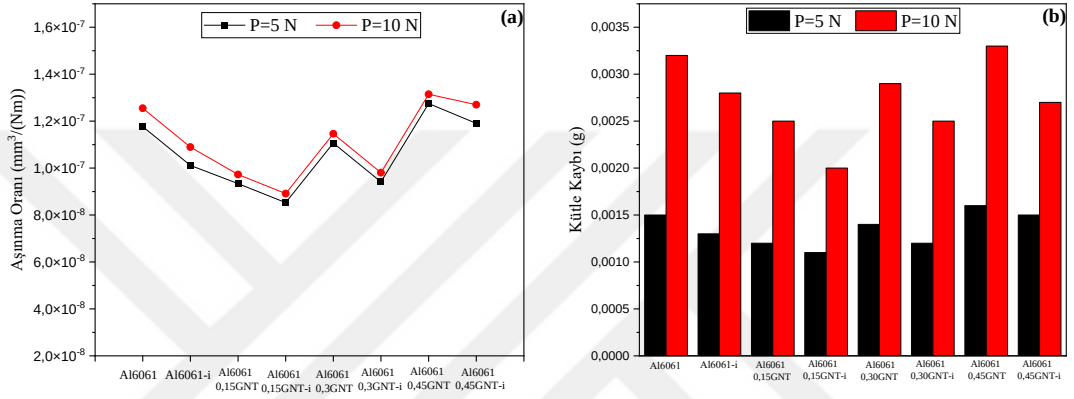


Şekil 6.10. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları

6.1.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozit malzemeler için farklı yükler ($P=5$ N, 10 N) altında gerçekleştirilen aşınma testi sonuçları analiz edilmiştir. Karşı disk olarak 50 HRC sertliğe sahip AISI304 paslanmaz çelik disk kullanılmış olup yürütülen aşınma testleri sonucunda Al6061 ve Al6061-GNT kompozit yapılarıdaki aşınma oranı ve kütle kaybı değişimi Şekil 6.11'de verilmiştir. Aşınma testlerinde uygulanan yükün artmasıyla kütle kaybının (Δm) ve

aşınma oranının (W) arttığı belirlenmiştir. En düşük aşınma oranı ($8.5 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0.0011 g), Vickers sertliğinin en yüksek ($110 \pm 2 \text{ HV}$) olduğu sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-0,15GNT kompozit yapıda $P=5 \text{ N}$ yük altında tespit edilmiştir. Aynı katkı oranında indüksiyonla sıcak preslenen numunelerde aşınmanın daha az olduğu tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen takviyesinden sonra grafenin yapı içerisinde homojen dağılmaması sebebiyle numunelerin daha fazla aşındığı belirlenmiştir. Ayrıca yükün artmasıyla ($P=10 \text{ N}$) aşınma oranının ve kütle kaybının arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.11. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-GNT kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri

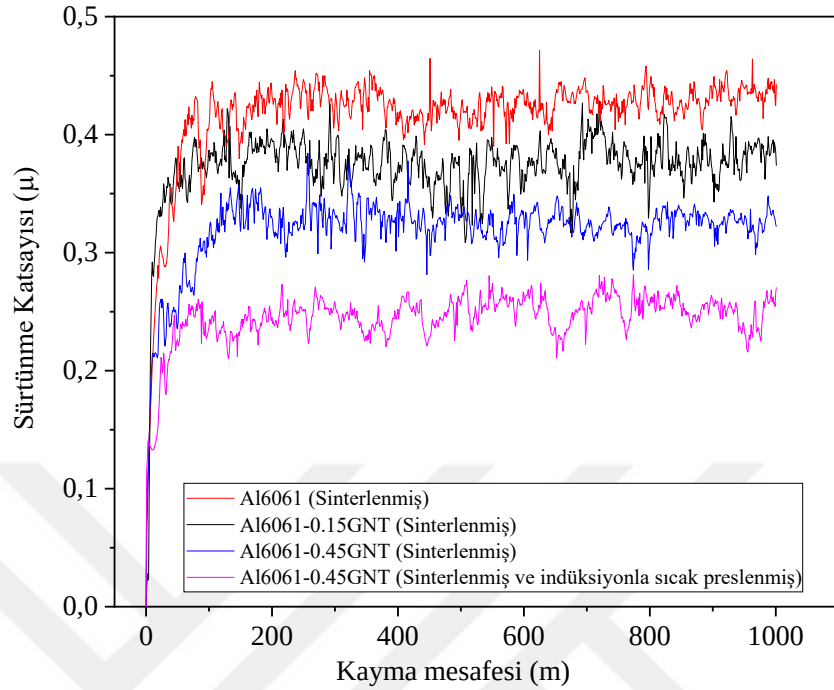
Literatürde, aşınma oranının sertlik ile ters orantılı olarak değişimi Eşitlik (6.6)'da verilen Archard denklemi ile doğrulanmaktadır (Liu ve Li, 2001).

$$\Delta V = \mu \times F \times L / H \quad (6.6)$$

Bu eşitlikte; μ sürtünme katsayısını, F uygulanan aşınma yükünü, L kayma mesafesini ve H sertliği ifade etmektedir.

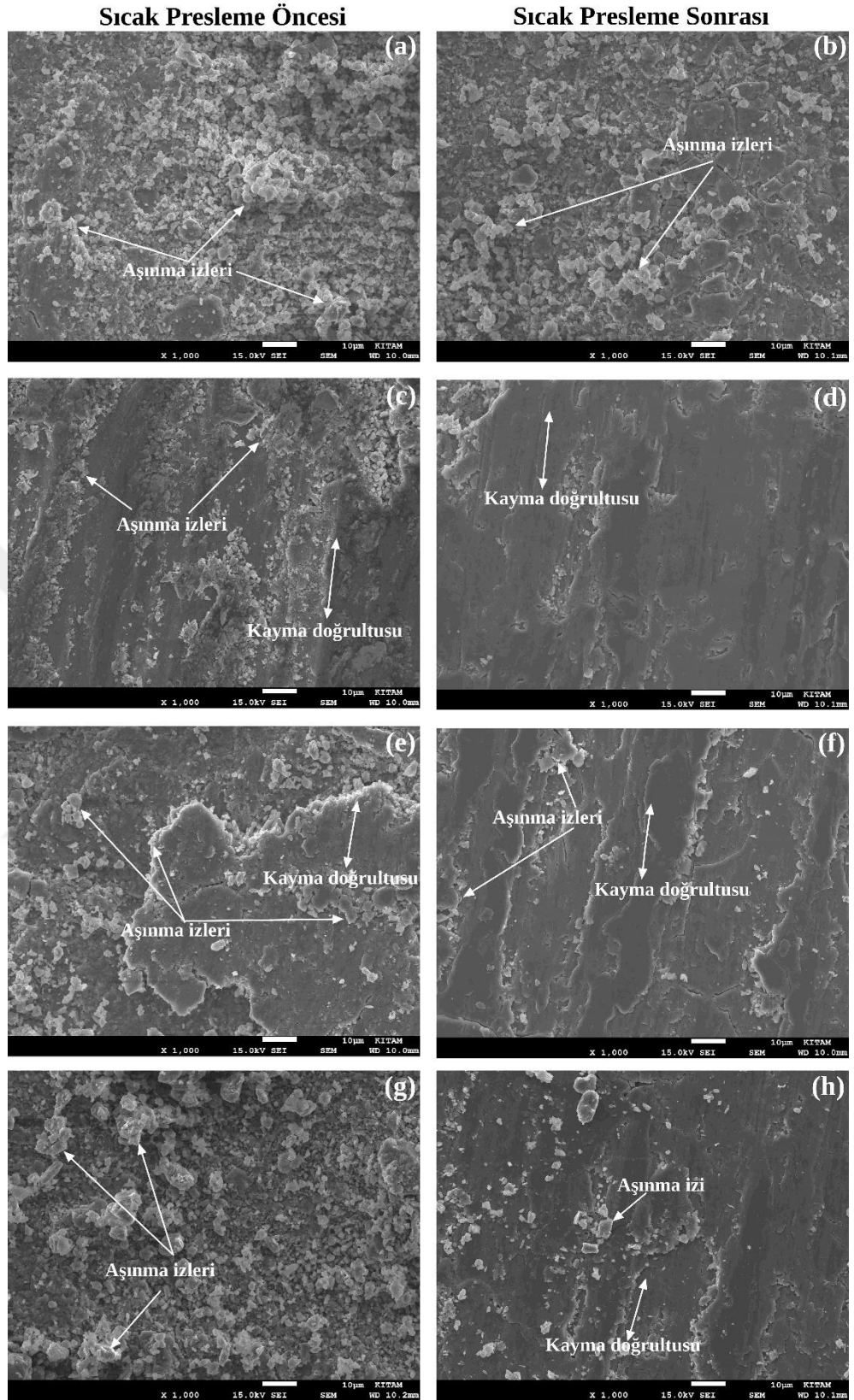
Paslanmaz çelik disk ile Al6061-GNT kompozitleri arasındaki sürtünme katsayısı değişim eğrileri aşınma testleri sonucu belirlenmiştir (Şekil 6.12). Gerçekleştirilen testler neticesinde, her bir saniyede bir veri olmak üzere 2400 sürtünme katsayısı verisi elde edilmiştir. Sürtünme verilerine karşılık kayma mesafesi (L) yaklaşık 1000 m (1 km) olarak hesaplanmıştır. Sinterlenmiş Al6061 alaşımı ile paslanmaz çelik disk arasındaki ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0.42$ olarak belirlenmiştir. Al6061 alaşımına grafen ilavesiyle sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Isıl işlem türünün değişmesiyle sürtünme katsayısının düştüğü tespit

edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-0,45GNT kompozit yapıda ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0.23$ 'e kadar düşmüştür.



Şekil 6.12. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-GNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri (P=5 N)

Al6061 ve Al6061-GNT kompozit yapıların sinterleme sonrası ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası aşınma izleri Şekil 6.13'de verilmiştir. Aşınma izleri incelendiğinde, minimum deformasyonun sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-0.15GNT kompozit yapıda (Al6061-0.15GNT-i) olduğu gözlemlenmiştir. En fazla aşınmanın ise Al6061 alaşımında olduğu görülmüştür. Uygulanan yük arttırıldığında (10 N) izlerin derinleştiği, diğer bir ifadeyle deformasyonun ve aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu aşınma izlerinin, aşınma test verilerini doğruladığı belirlenmiştir.



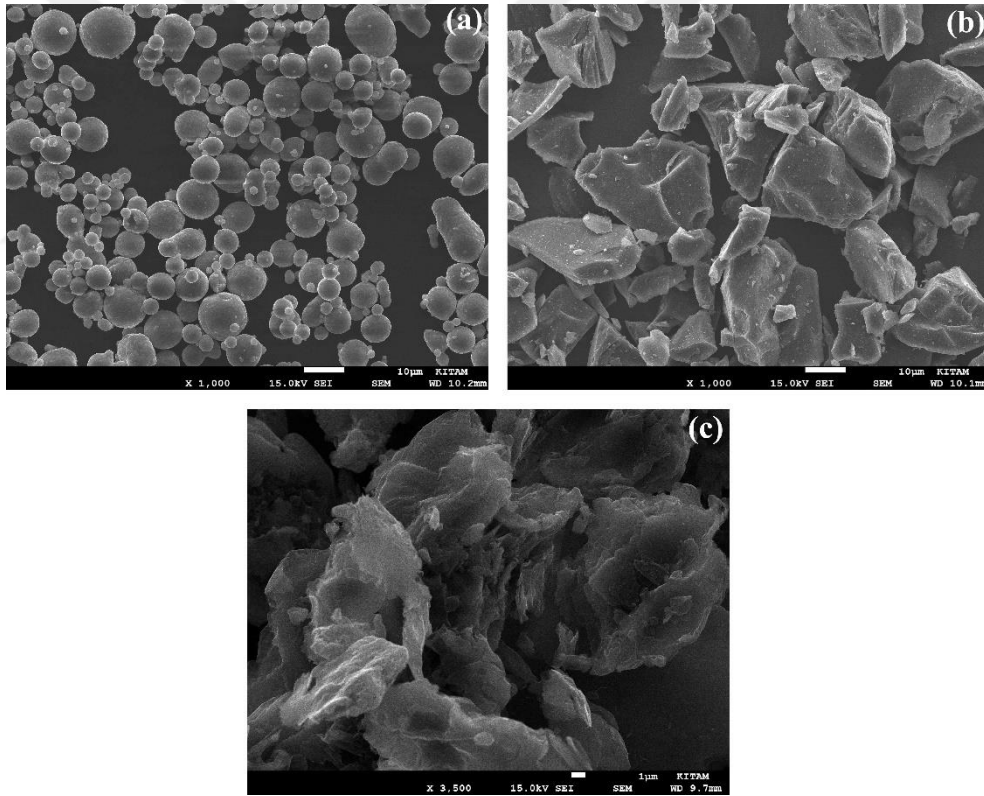
Şekil 6.13. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-0.15GNT, (d) Al6061-0.15GNT-i, (e) Al6061-0.30GNT, (f) Al6061-0.30GNT-i, (g) Al6061-0.45GNT, (h) Al6061-0.45GNT-i kompozitlere ait aşınma izleri

6.2. B₄C/Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analizleri

Bu bölümde, Al6061-B₄C (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 katkılı) ve Al6061-30B₄C-xGNT (x= ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkılı) kompozitlerin mekanik özellikleri, tribolojik özellikleri ve mikro yapıları incelenmiştir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan tozların tane boyutu, SEM ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.2.1. Al6061, B₄C ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri

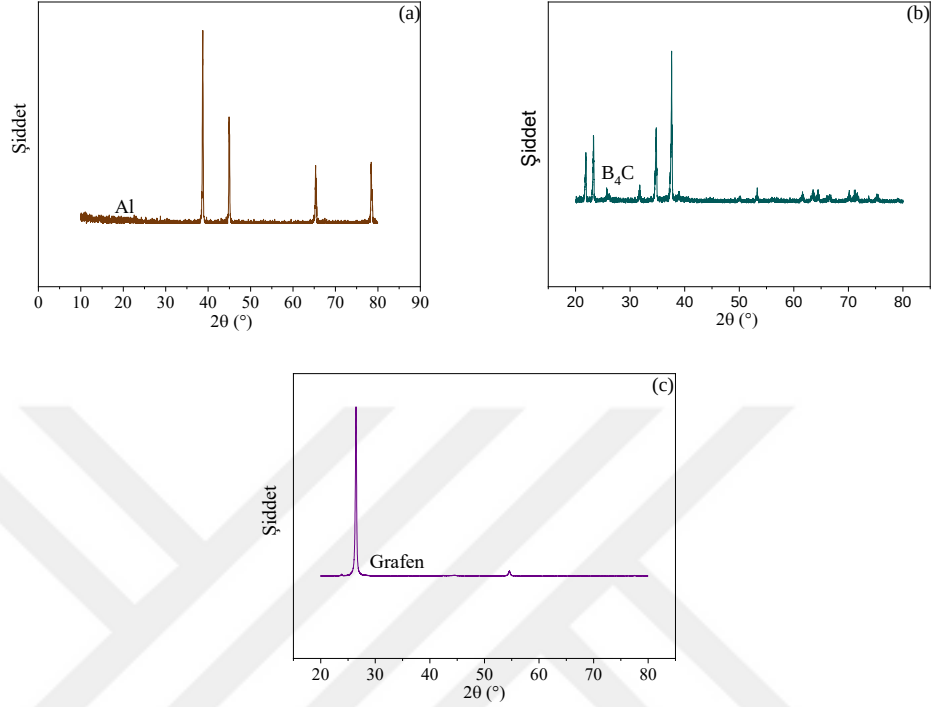
Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Al6061, B₄C ve grafen tozlarının, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 6.14’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde; Al6061 tozunun küresel morfolojide olduğu, grafen tozlarının tabakalı yapıda ve B₄C tozlarının keskin kenar morfolojisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.14. Al6061 (a), B₄C (b) ve grafen (c) tozlarına ait SEM görüntüleri

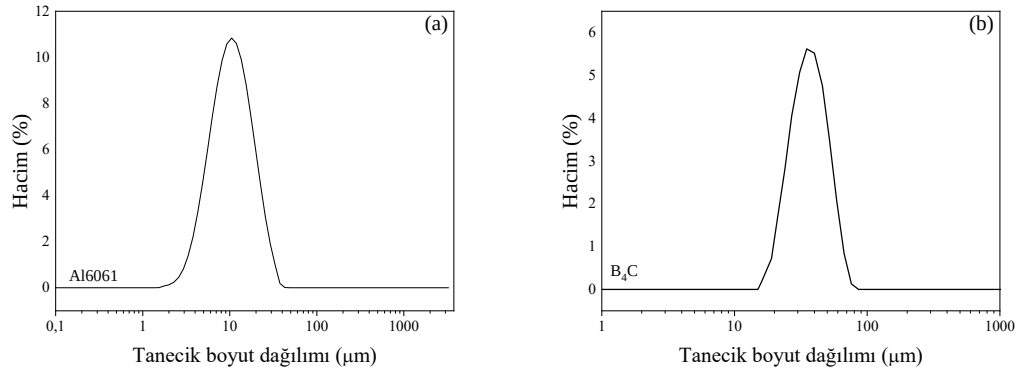
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan Al6061 alaşımı, B₄C ve grafen tozlarına ait XRD faz analizi Şekil 6.15’de verilmiştir. XRD örgü deseni incelendiğinde; belirlenen kırınım açılarının alüminyuma ($2\theta = \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ, 78^\circ$), bor karbüre ($2\theta = \sim 22^\circ, 23^\circ, 26^\circ, 32^\circ, 35^\circ, 38^\circ, 39^\circ, 50^\circ, 54^\circ, 62^\circ, 64^\circ, 67^\circ, 72^\circ, 74^\circ$,

75°, 78°) ve grafene ($2\theta = \sim 26.5^\circ$) ait olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen XRD analizleri, kompozitlerin faz yapısının tespiti açısından son derece önem arz etmektedir.



Şekil 6.15. Al6061 (a), B₄C (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri

Kompozitlerin üretilmesinde kullanılan Al6061 ve B₄C tozlarının tanecik boyut dağılımı Şekil 6.16’da verilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre; Al6061 taneciklerinin ~10 µm boyutunda ve B₄C taneciklerinin ~40 µm boyutunda olduğu belirlenmiştir.

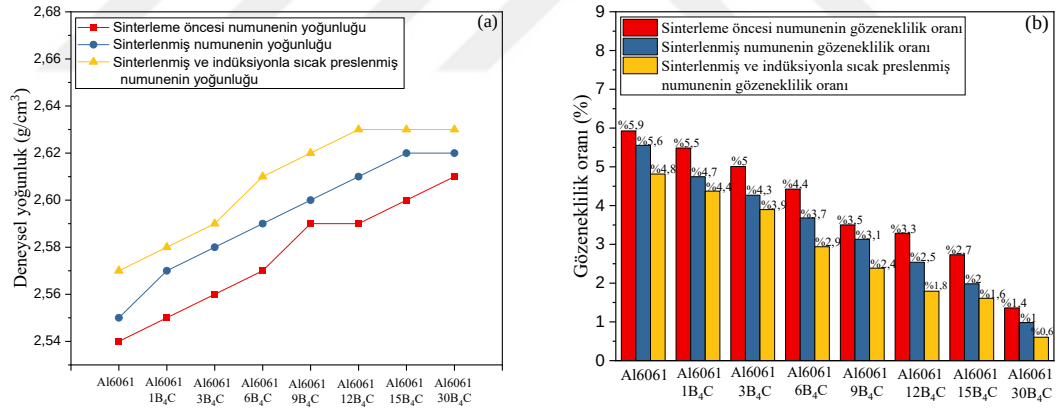


Şekil 6.16. Al6061 (a) ve B₄C (b) tozlarının tanecik boyut dağılımı

6.2.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 B₄C takviyeli Al6061 matrisli kompozitler ile Al6061-30B₄C-xGNT (x= ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkılı) hibrit kompozitlerin deneysel yoğunlukları ve gözeneklilik oranları incelenmiştir.

Bor karbür takviye oranına ve ısıtıl işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak Al6061 matrisli kompozitlerin deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri Şekil 6.17’de verilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunelerin yoğunluğunun, sinterlenmiş numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk ve en düşük gözeneklilik oranı sırasıyla 2.63 g/cm³ ve %0.6 olarak sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C kompozit yapıda tespit edilmiştir. Bor karbür katkı oranının artmasıyla ve ısıtıl işlemlerin (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) etkisiyle Al6061-B₄C kompozitlerde deneysel yoğunluğun arttığı ve gözeneklilik oranının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, alüminyuma (~10 µm) göre tanecik boyutu büyük olan bor karbürden (~40 µm) kaynaklandığı düşünülmektedir.

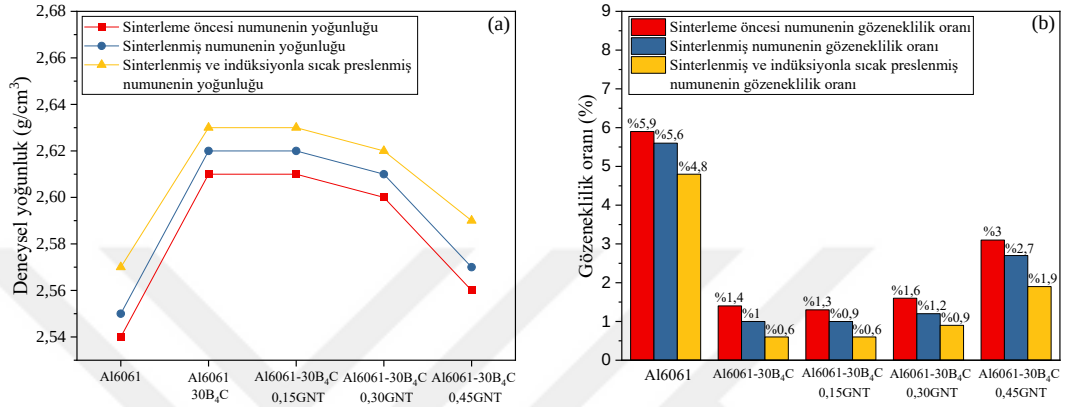


Şekil 6.17. Al6061 alaşımı ve Al6061-B₄C kompozitlerde ısıtıl işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

Gerçekleştirilen yoğunluk ve gözeneklilik oranı ölçüm sonuçlarına göre en iyi mekanik özellikler (yoğunluk 2.63 g/cm³, Vickers sertlik 213±3 HV, basma dayanımı 482±7 MPa) Al6061-%30B₄C kompozit yapıda elde edilmiştir. Bu sebeple %30B₄C katkısı esas alınarak Al6061-30B₄C-xGNT (x=ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkılı) hibrit kompozitler üretilerek mekanik özellikleri incelenmiştir.

Al6061-30B₄C-xGNT (x=ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkılı) hibrit kompozitlerde grafen takviye oranına ve ısıtıl işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla

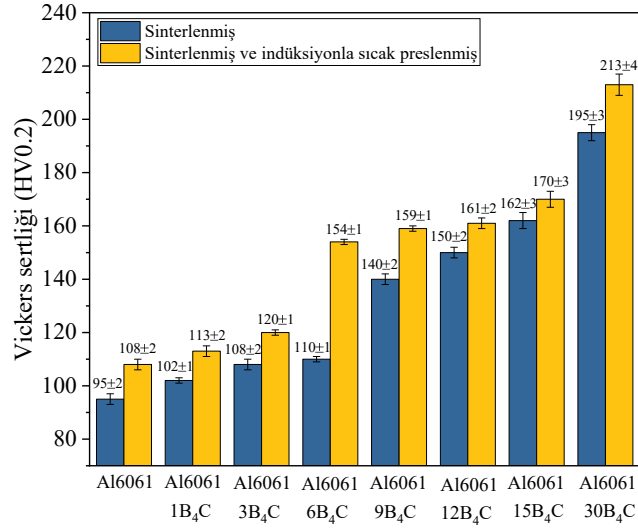
sıcak presleme) bağı olarak deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı değişimi Şekil 6.18’de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde; en yüksek deneysel yoğunluk (2.63 g/cm^3) ve en düşük gözeneklilik oranı (%0.6) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-30B₄C-0.15GNT hibrit kompozitte elde edilmiştir. Bor karbür ve grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde ısıt işlemin etkisiyle yoğunlukların arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.18. Al6061 alaşımı ve Al6061-30B₄C-GNT hibrit kompozitlerde ısıt işlem türüne bağı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

6.2.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Al6061-B₄C kompozit yapıların takviye oranına ve ısıt işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağı olarak Vickers sertliğinin değişimi Şekil 6.19’da verilmiştir. Şekil incelendiğinde; kompozitlerin Vickers sertliği B₄C partiküllerinin sert seramik yapısı sebebiyle katkı oranının artmasıyla artmıştır. En yüksek Vickers sertlik değeri ($213 \pm 4 \text{ HV}$), sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C kompozit yapıda elde edilmiştir.



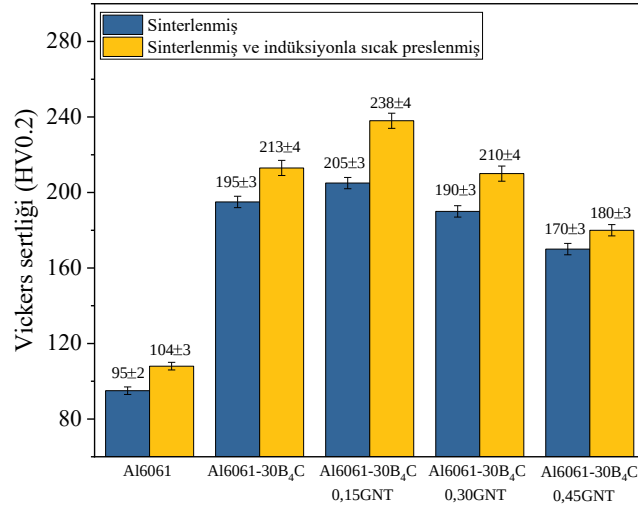
Şekil 6.19. Al6061 alaşımı ve Al6061-B₄C kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi

Kompozit malzemelere belirli bir orana kadar yapılan B₄C takviyesi sonucu Vickers sertlik değerinde görülen artış, dislokasyon teorisi ile açıklanabilir. Dislokasyon hareketini azaltmak veya engellemek, malzemelerin sertliklerinin ve dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. Dislokasyon yoğunluğu, dislokasyonların hareketini sınırlar ve malzemelerin plastik deformasyonunu zorlaştırır. Kullanılan takviye malzemesinin nano boyutta olması Al6061-B₄C kompozitlerin dislokasyon yoğunluklarını arttırmakta ve buna bağlı olarak kompozit malzemelerin sertlik değerleri artmaktadır. Dislokasyon yoğunluğu ile kompozit malzemelerin Vickers sertlik değerleri arasındaki ilişki Eşitlik (6.7)'de verilmiştir (Yılmaz, 2019).

$$H = H^* + \alpha Gb\sqrt{\rho} \quad (6.7)$$

Bu eşitlikte, H^* ve α malzeme sabitleri, G kayma modülü, b Burger vektörü, ρ dislokasyon yoğunluğunu göstermektedir.

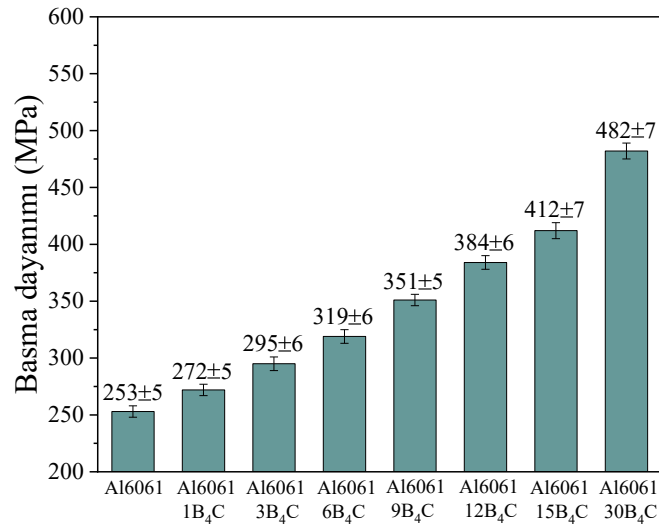
Ağırlıkça %30B₄C katkısı esas alınarak üretilen Al6061-30B₄C-xGNT (x= ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkılı) hibrit kompozitlerin grafen takviye oranına ve ısıt işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi Şekil 6.20'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, maksimum Vickers sertlik değeri (238±4 HV) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C-0,15GNT hibrit kompozit yapıda elde edilmiştir. Kompozitlerin sertlik değerleri grafenin katı yağlayıcılık özelliğinden dolayı ağırlıkça %0.15 katkısından sonra düşmüştür.



Şekil 6.20. Al6061 alaşımı ve Al6061-30B₄C-GNT hibrit kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi

6.2.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

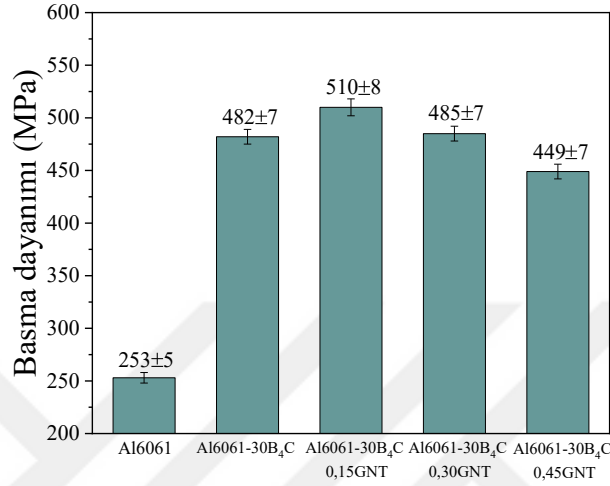
Bor karbür takviyeli (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30) Al6061 matrisli kompozitlerin basma dayanımındaki değişim Şekil 6.21’de verilmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek basma dayanımı (482±7 MPa) Al6061-30B₄C kompozit yapıda tespit edilmiştir. B₄C takviye miktarının artmasıyla basma dayanımının arttığı ve mekanik özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir.



Şekil 6.21. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı ve Al6061-B₄C kompozitlerin basma dayanımı değerleri

Ağırlıkça %30B₄C ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45) grafen takviyeli Al6061 esaslı hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri Şekil 6.22’de verilmiştir. En iyi basma dayanımına ağırlıkça %30B₄C ve %0.15GNT takviyeli

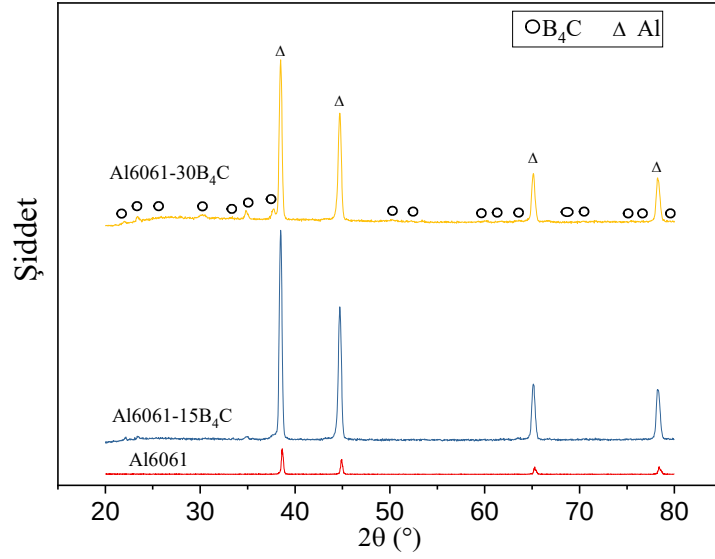
Al6061 matrisli hibrit kompozit yapıda 510 ± 8 MPa olarak ulaşılmıştır. Tane sınırları boyunca yerleşen grafen partikülleri tane büyümesini engelleyerek daha küçük tane oluşmasını sağlamaktadır. Böylece plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketi daha fazla tane sınırı ile karşılaşarak hibrit kompozit yapıların mukavemetinin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 6.22. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı, Al6061-30B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri

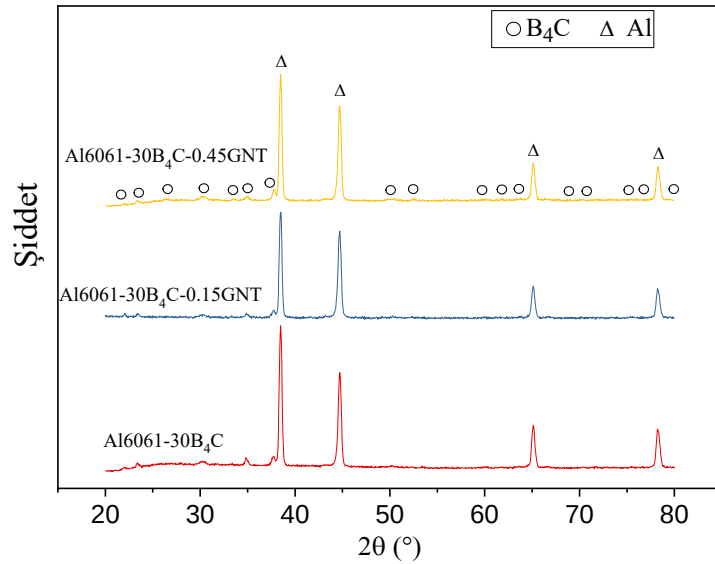
6.2.5. XRD Faz Analizleri

Bor karbür takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin XRD örgü desenleri Şekil 6.23’de verilmiştir. Şekilde “Δ” simgesiyle alüminyum, “O” simgesiyle B₄C sembolize edilmiştir. XRD örgü desenleri incelendiğinde; kompozit yapılardaki B₄C varlığı doğrulanmıştır. B₄C piklerinin yoğunluğunun, takviye oranının artmasıyla sıklaştığı görülmüştür. Ayrıca faz analizinde alüminyum karbür (Al₄C₃) gibi istenmeyen ikincil fazlara rastlanmamıştır.



Şekil 6.23. Al6061 alaşımı ve Al6061-B₄C kompozitlerin XRD örgü desenleri

Bor karbür ve grafen takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin XRD örgü deseni Şekil 6.24’de verilmiştir. XRD örgü deseni incelendiğinde; grafenin düşük miktarlarda takviye edilmesinden dolayı grafen piki ($2\theta=26.5^\circ$) tespit edilememiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda B₄C ve grafen katkılı Al6061 esaslı kompozitlerde istenmeyen Al₄C₃ gibi fazlar saptanmamıştır.

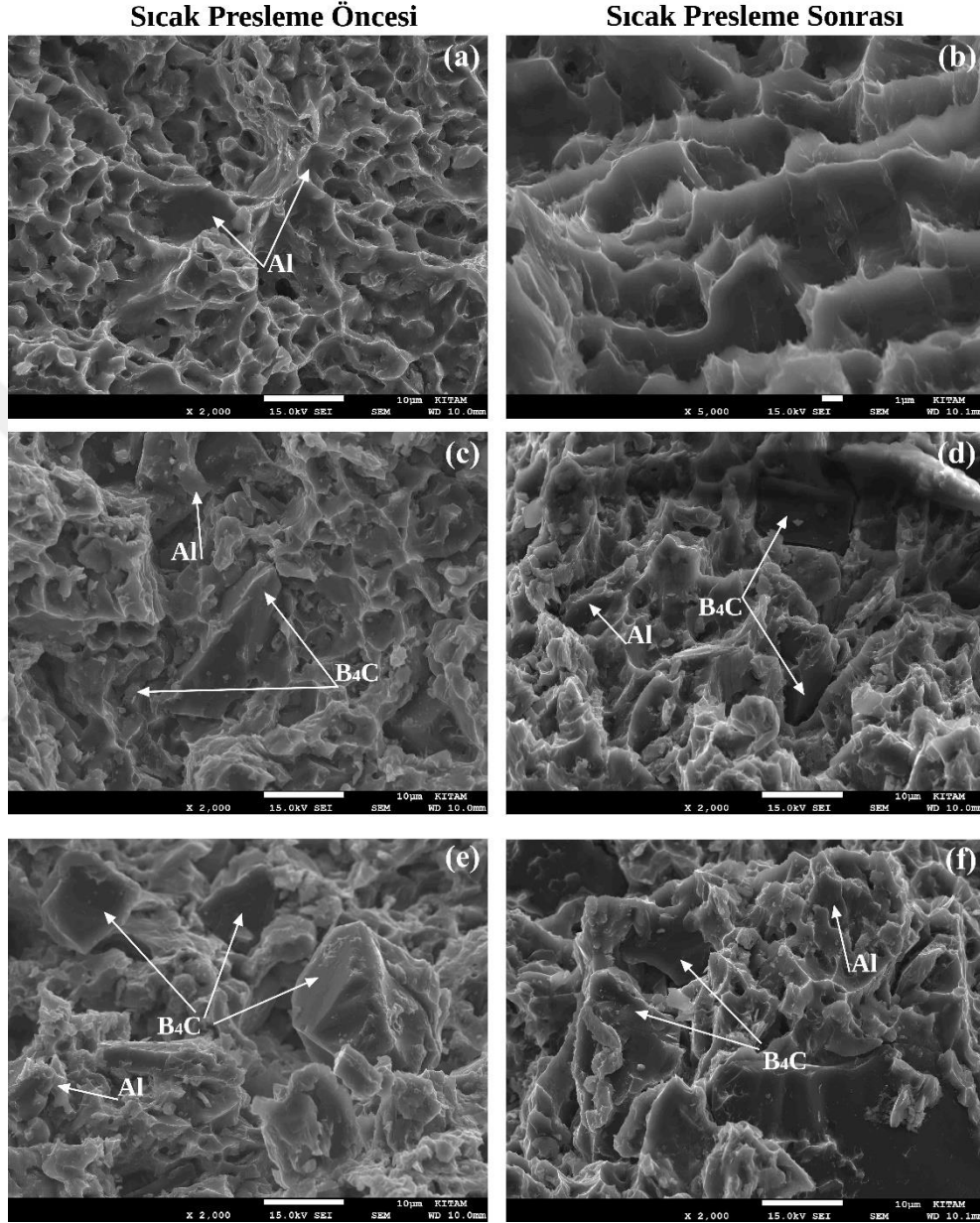


Şekil 6.24. Al6061-30B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT kompozitlerin XRD örgü desenleri

6.2.6. SEM ve SEM-EDX Görüntülerinin Analizi

Sinterlenmiş (Al6061, Al6061-15B₄C ve Al6061-30B₄C) ve sinterleme sonrası sıcak preslenmiş (Al6061-i, Al6061-15B₄C-i ve Al6061-30B₄C-i) kompozitlerin SEM

görüntüleri Şekil 6.25’de verilmiştir. Kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde; takviye malzemesinin (B_4C) kompozit yapı içerisinde homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha yoğun bir mikroyapıda olduğu tespit edilmiştir.

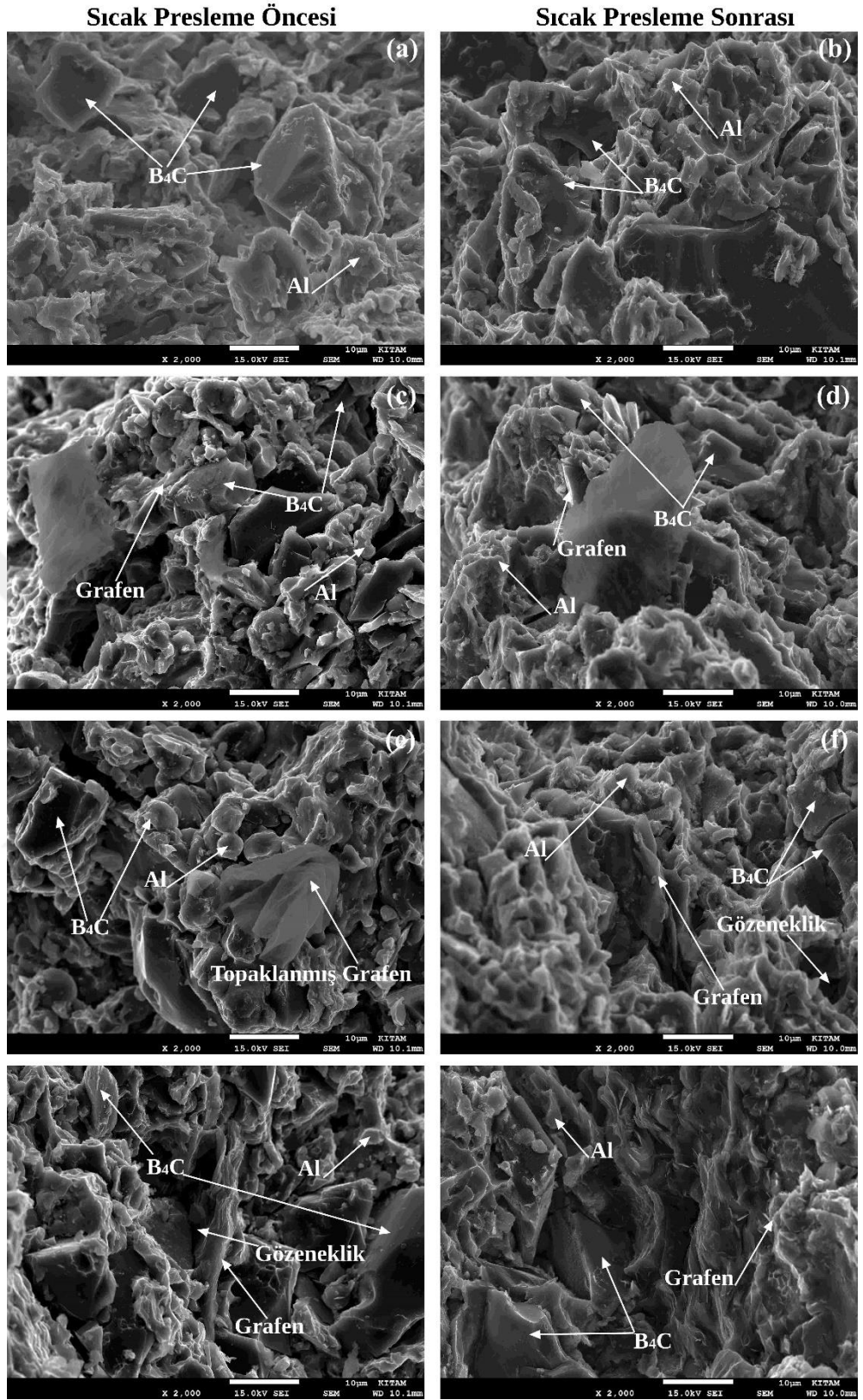


Şekil 6.25. Al6061 alaşımı ve Al6061- B_4C kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-15 B_4C , (d) Al6061-15 B_4C -i, (e) Al6061-30 B_4C , (f) Al6061-30 B_4C -i

Sinterlenmiş ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30 B_4C -GNT kompozit yapıları ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.26’da verilmiştir. Şekillerde Al6061, B_4C ve GNT tanecikleri arasında arayüz etkileşiminin

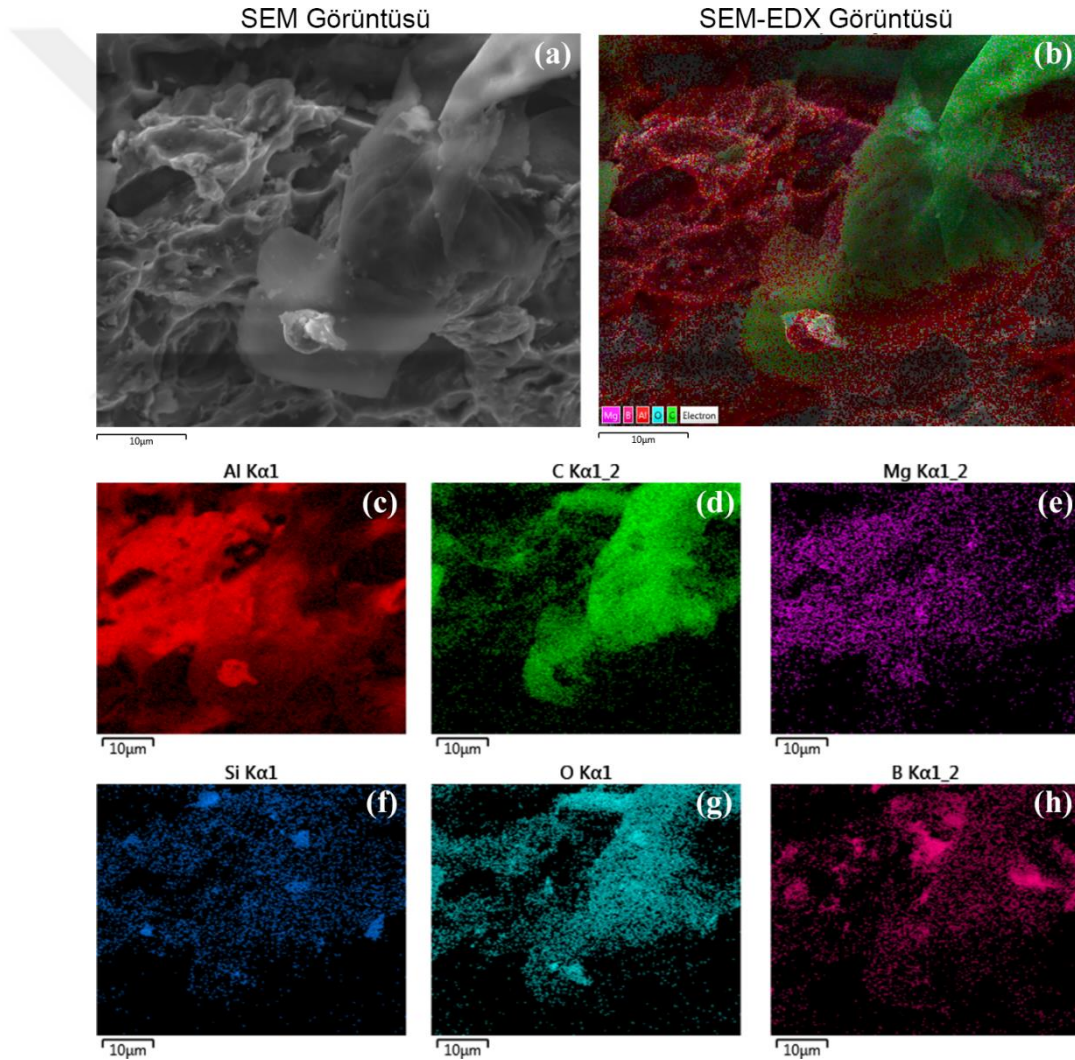
oldukça güçlü olduğu gör÷lm÷ştür. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerde takviye elemanlarının yapı içerisinde daha homojen bir dağılım sergilediği belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.30 ve %0.45 grafen takviyeli kompozit numunelerde gözeneklilik artışı tespit edilmiştir. Bu artış, SEM-EDX analizleriyle tekrar incelenmiştir.





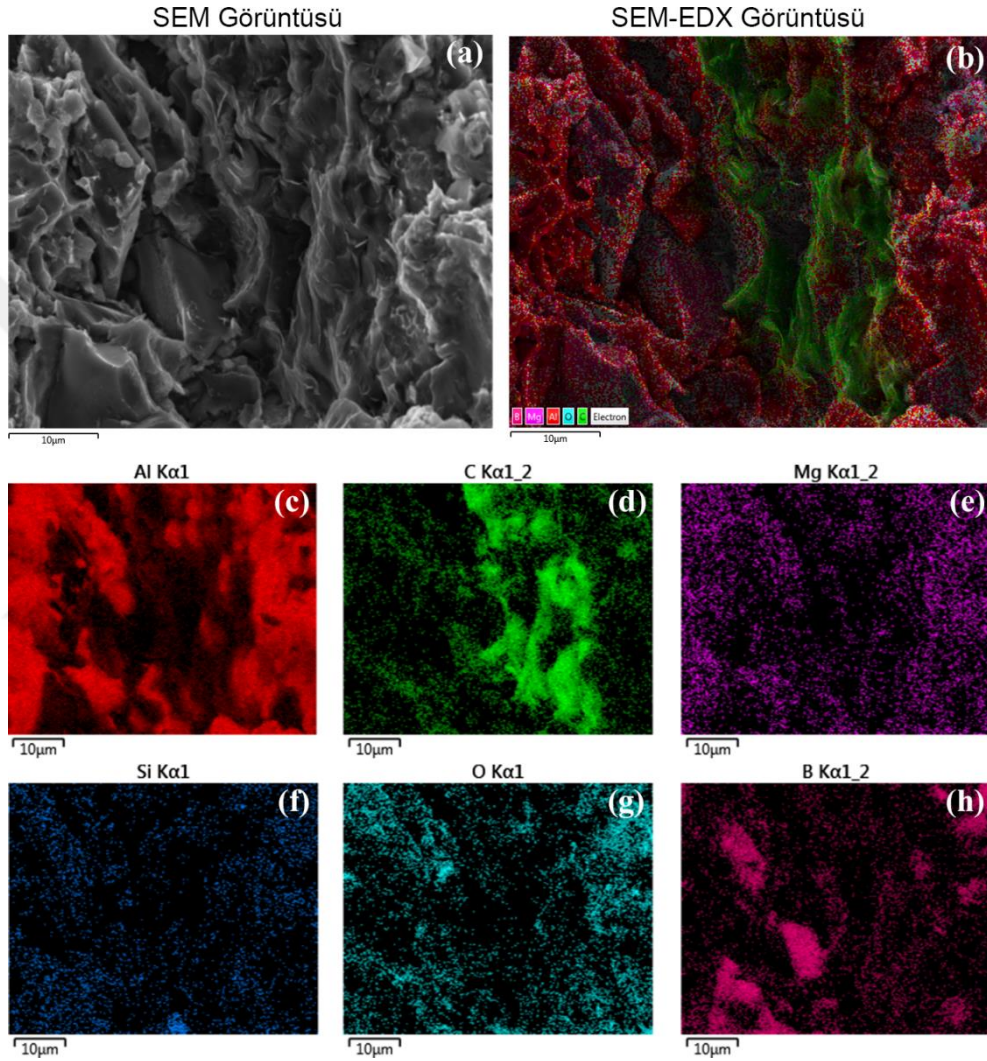
Şekil 6.26. Al6061-30B₄C-GNT kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061-30B₄C, (b) Al6061-30B₄C-i, (c) Al6061-30B₄C-0.15GNT, (d) Al6061-30B₄C-0.15GNT-i, (e) Al6061-30B₄C-0.30GNT, (f) Al6061-30B₄C-0.30GNT-i, (g) Al6061-30B₄C-0.45GNT, (h) Al6061-30B₄C-0.45GNT-i

Sadece sinterlenen Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozit yapının SEM-EDX element dağılım haritası Şekil 6.27’de verilmiştir. Kompozit numunenin kırık yüzeyinde gerçekleştirilen SEM-EDX analizlerinde her bir element farklı renk ile gösterilmiştir. SEM-EDX haritalama analizinde Al (kırmızı dağılımlı), C (yeşil dağılımlı), Mg (mor dağılımlı), Si (mavi dağılımlı), O (turkuaz dağılımlı) ve B (pembe dağılımlı) yapı içerisinde görülmüştür. Oksijen elementi içyapıdaki oksit tabakasının varlığını göstermektedir. Yeşil renkteki dağılıma bakıldığında ise grafenin belirli bir bölgede yoğun olarak kümелendiği görülmektedir. Bu analizlerde kompozitin mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olan grafene ait topaklanma oluşumları doğrulanmaktadır.



Şekil 6.27. Sadece sinterlenen Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozit yapının SEM-EDX element dağılım haritası Şekil 6.28’de verilmiştir. SEM-EDX analizi incelendiğinde içyapıda bulunan elementlerin (Al, C, Mg, Si, O ve B) dağılımı belirlenebilmektedir. Karbon dağılımı içerisinde yer alıp bor dağılımında yer almayan tanecikler mikroyapıda grafenin varlığını doğrulamaktadır. Böylece topaklanan grafen nanopartikülleri rahatlıkla gözlemlenebilmektedir.

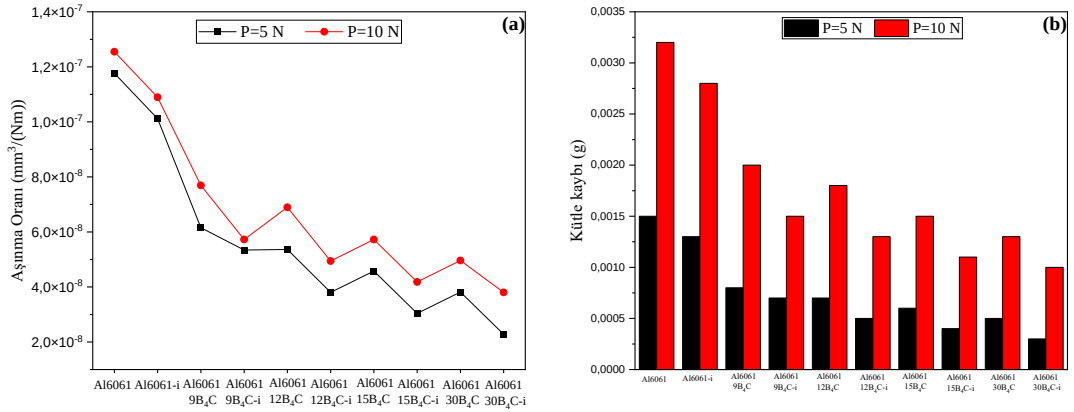


Şekil 6.28. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları

6.2.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

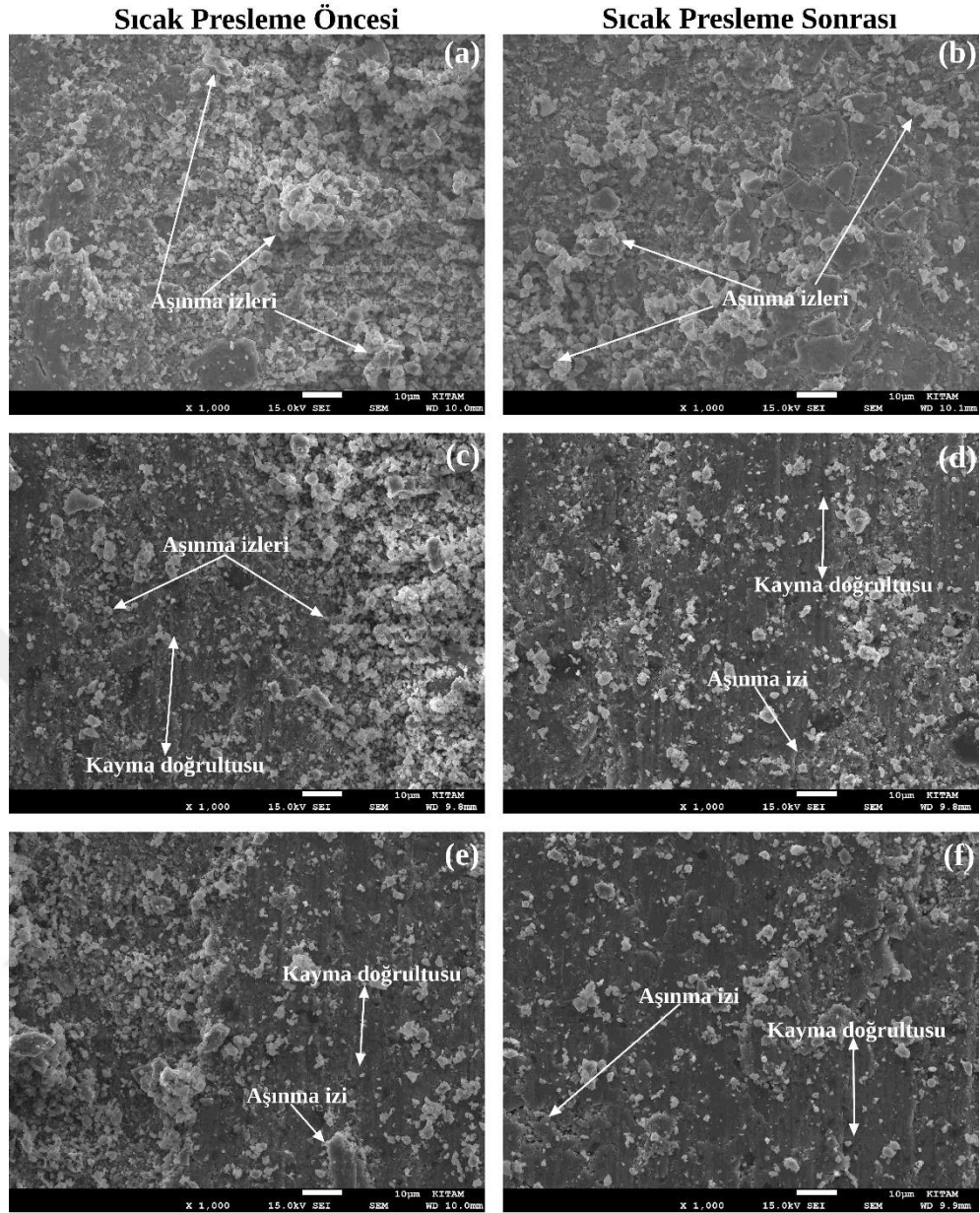
Al6061 ve Al6061-B₄C kompozit yapılarıdaki aşınma oranı ve kütle kaybı değişimi Şekil 6.29’da verilmiştir. Yüksek sertliğe sahip B₄C katkısıyla Al6061-B₄C kompozitlerin aşınma oranının ve kütle kaybının azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük aşınma oranına ($2.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybına (0.0003 g) sinterleme sonrası

indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C kompozit yapıda P=5 N yük altında ulaşılmıştır.



Şekil 6.29. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının ve Al6061-B₄C kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri

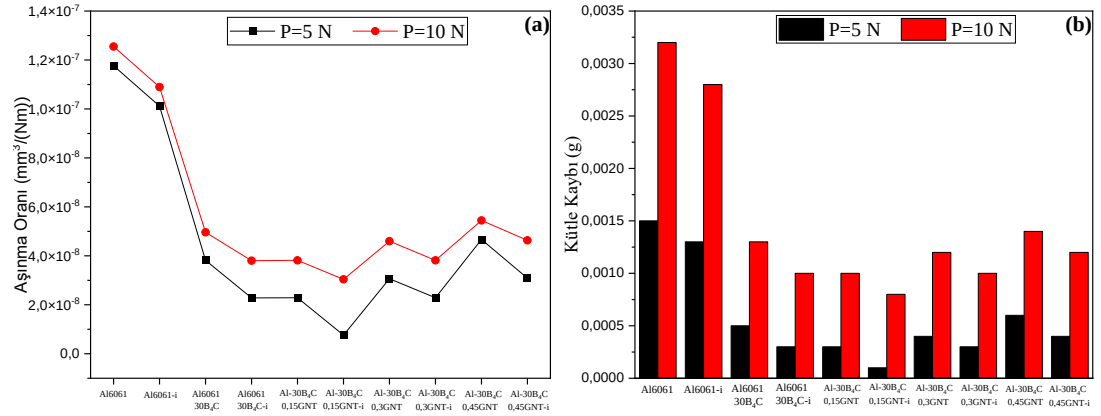
Al6061 ve Al6061-B₄C kompozit yapıların indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma izleri Şekil 6.30'da verilmiştir. SEM aşınma izlerinden, artan B₄C miktarıyla numunelerin yüzeyinde oluşan deformasyonların azaldığı görülmektedir. Aynı katkı oranında indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerdeki aşınma izlerinin sadece sinterlenmiş numunelere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %30B₄C katkılı Al6061 matrisli kompozit yapıda krater çukurcuklarının minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan yükün artmasıyla aşınmanın arttığı belirlenmiştir. SEM görüntüleri aşınma test sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 6.30. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-15B₄C, (d) Al6061-15B₄C-i, (e) Al6061-30B₄C, (f) Al6061-30B₄C-i kompozitlere ait aşınma izleri

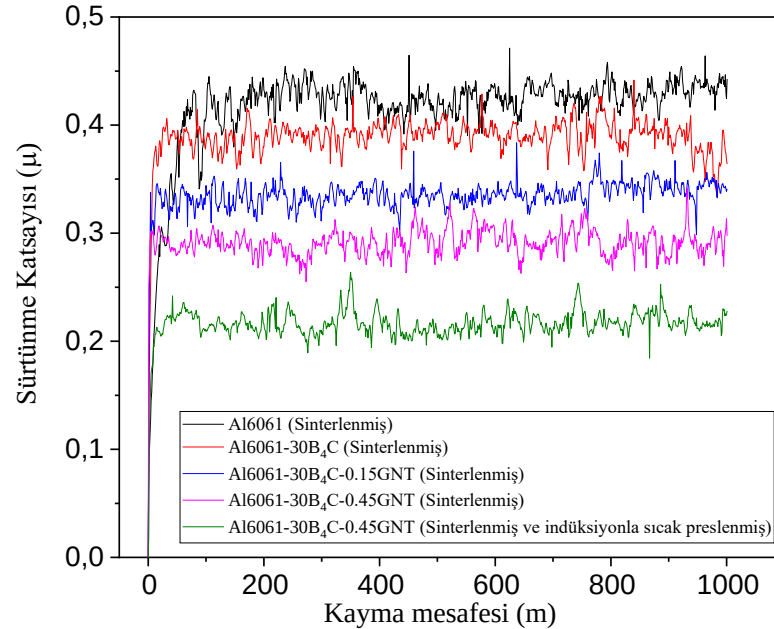
Al6061 alaışımının, Al6061-30B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT kompozit malzemelerin aşınma oranı ve kütle kaybı değişimi Şekil 6.31’de verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda en düşük aşınma oranı ($0.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0.0001 g) P=5 N yük altında sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozitte elde edilmiştir. Ağırlıkça %0.30 ve 0.45 grafen takviyesiyle grafenin matris içinde topaklanma eğilimine girdiği ve aşınma miktarının artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Aynı katkı oranında indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerdeki aşınma oranının ve kütle kaybının sadece sinterlenmiş

numunelere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma testi için uygulanan yükün artmasıyla (P=10 N) kütle kaybının (Δm) arttığı belirlenmiştir.



Şekil 6.31. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımı, Al6061-30B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri

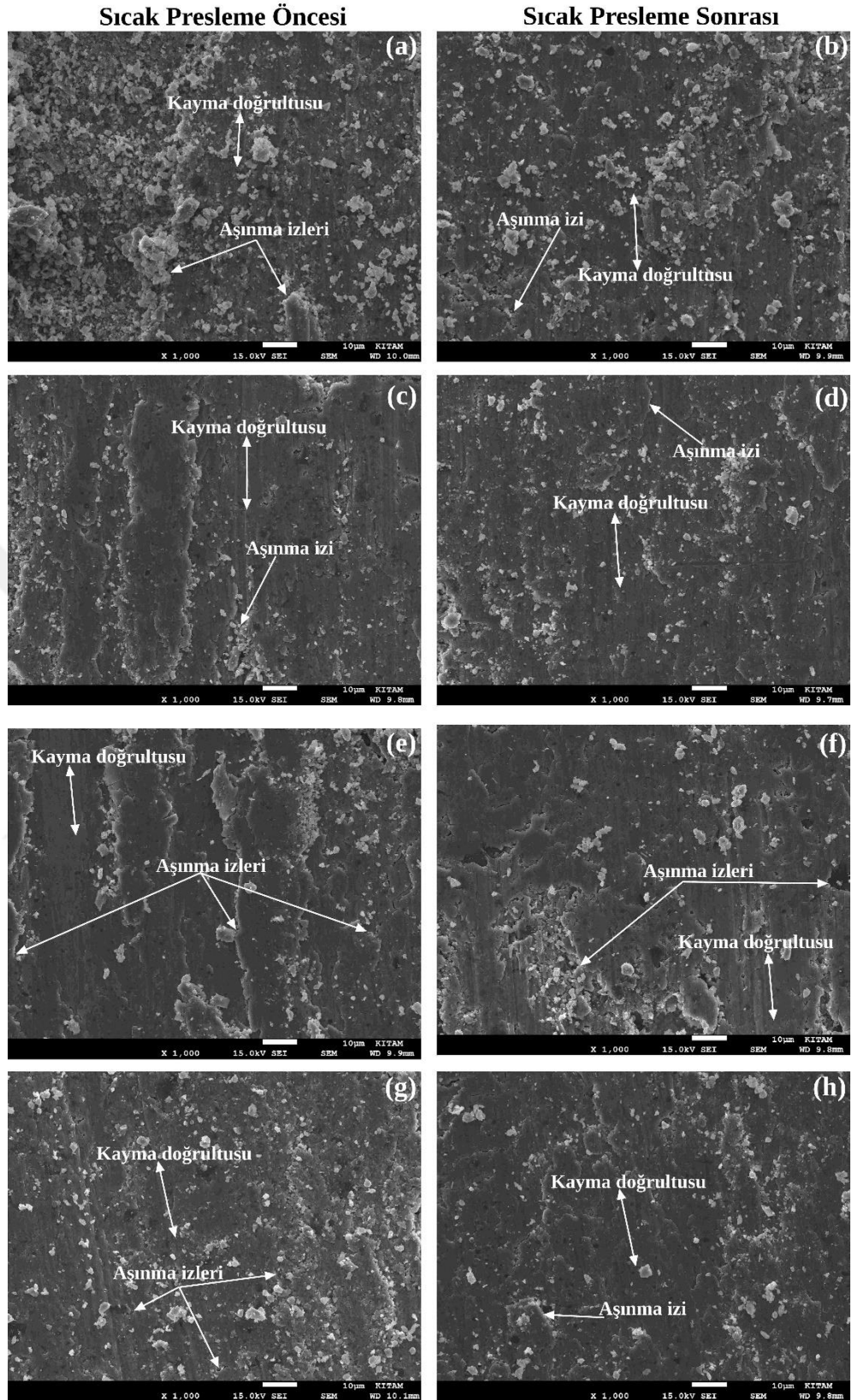
Paslanmaz çelik disk ile Al6061-30B₄C-GNT kompozitler arasındaki sürtünme katsayısı değişimi Şekil 6.32’de verilmiştir. Yürütülen testler neticesinde, sinterlenmiş Al6061 alaşımı ile paslanmaz çelik disk arasındaki ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0.42$ olarak belirlenmiştir. Grafen takviye oranının artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ($\mu \sim 0.22$) sinterlenme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 6.32. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımı, Al6061-30B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT kompozit yapılarına ait sürtünme katsayısı eğrileri (P= 5N)

Al6061 alaşımını, Al6061-30B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT kompozit yapıların indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma izleri Şekil 6.33’de verilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerine göre, minimum deformasyon sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozit yapıda gözlenmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme işleminin üretilen kompozitlerin aşınma izlerini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca uygulanan yük arttırıldığında (10 N) ise izlerin derinleştığı, diğeri bir ifadeyle deformasyonun ve aşınmanın arttığı belirlenmiştir.





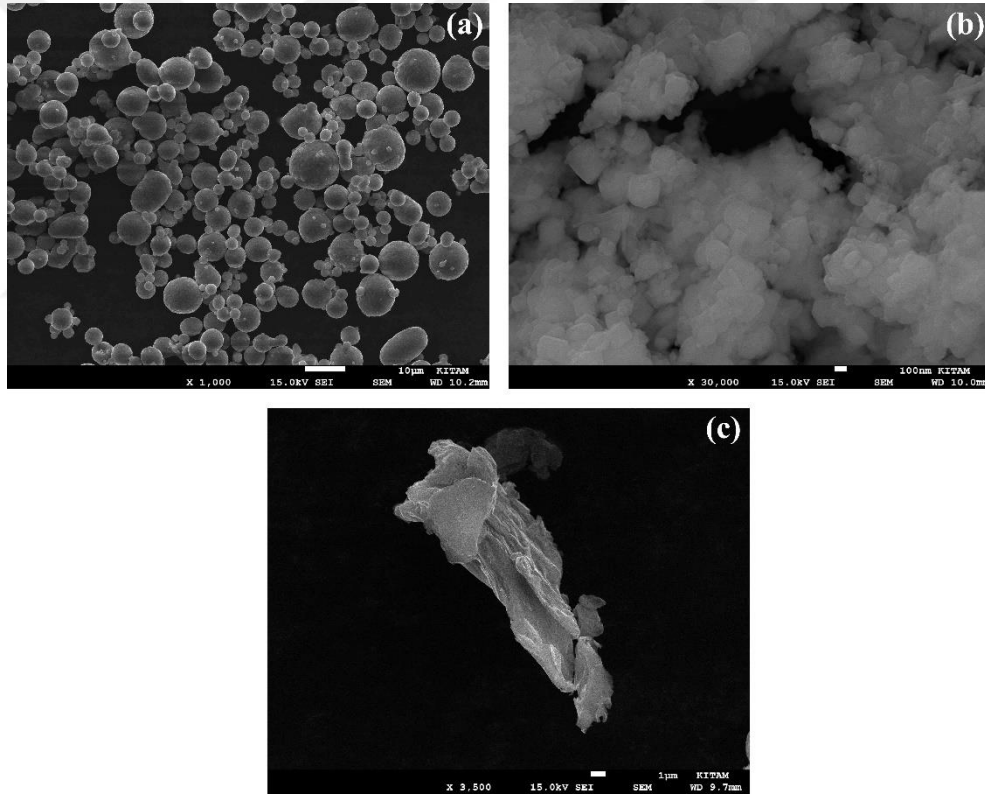
Şekil 6.33. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061-30B₄C, (b) Al6061-30B₄C-i, (c) Al6061-30B₄C-0.15GNT, (d) Al6061-30B₄C-0.15GNT-i, (e) Al6061-30B₄C-0.30GNT, (f) Al6061-30B₄C-0.30GNT-i, (g) Al6061-30B₄C-0.45GNT, (h) Al6061-30B₄C-0.45GNT-i kompozitlerin aşınma izleri

6.3. Si₃N₄/Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Analizleri

Bu bölümde, Al6061-xSi₃N₄ (x=ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı) ve Al6061-9Si₃N₄-xGNT (x=ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkı) kompozitlerin analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikro yapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir

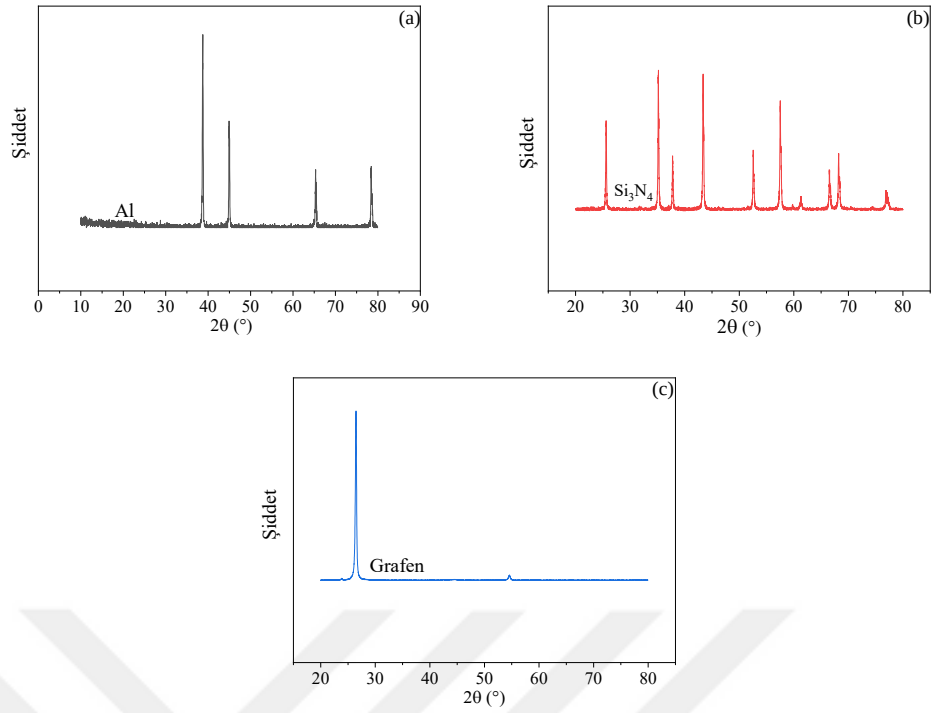
6.3.1. Al6061, Si₃N₄ ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri

Alüminyum hibrit kompozit malzeme üretiminde kullanılan Al6061, Si₃N₄ ve grafen tozlarının SEM görüntüleri Şekil 6.34’de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Al6061 tozunun küresel morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Si₃N₄ tozlarının küresel olmayan düzensiz kenar morfolojisinde, grafen tozlarının ise plaka benzeri yapıda olduğu görülmektedir.



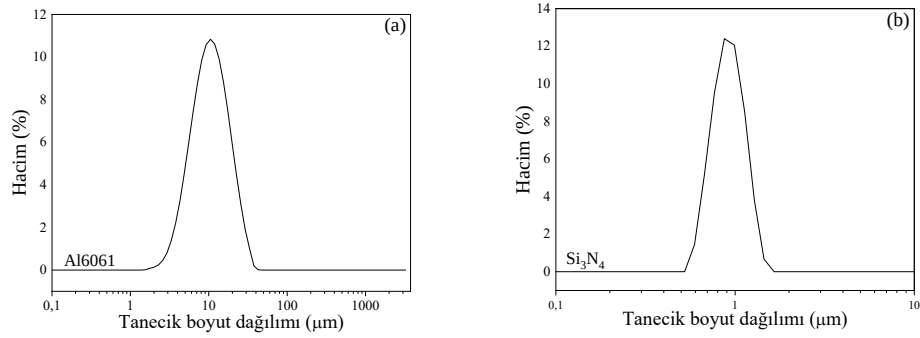
Şekil 6.34. Al6061 (a), Si₃N₄ (b) ve grafen (c) tozlarına ait SEM görüntüleri

Al6061, Si₃N₄ ve grafen tozlarına ait XRD faz analizi Şekil 6.35’de verilmiştir. Bu analizlerde; alüminyum tozunun kırınım açılarının (2θ) 38°, 45°, 66°, 78°, silisyum nitrürün kırınım açılarının (2θ) 26°, 35°, 38°, 43°, 53°, 57°, 61°, 67° 69°, 77° ve grafenin kırınım açısının (2θ) 26.5° olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.35. Al6061 (a), Si₃N₄ (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri

Al6061 ve Si₃N₄ tozlarının tanecik boyut dağılımı Şekil 6.36’da verilmiştir. Al6061 taneciklerinin ~10 µm boyutunda ve Si₃N₄ taneciklerinin ~0.8 µm boyutunda olduğu belirlenmiştir.

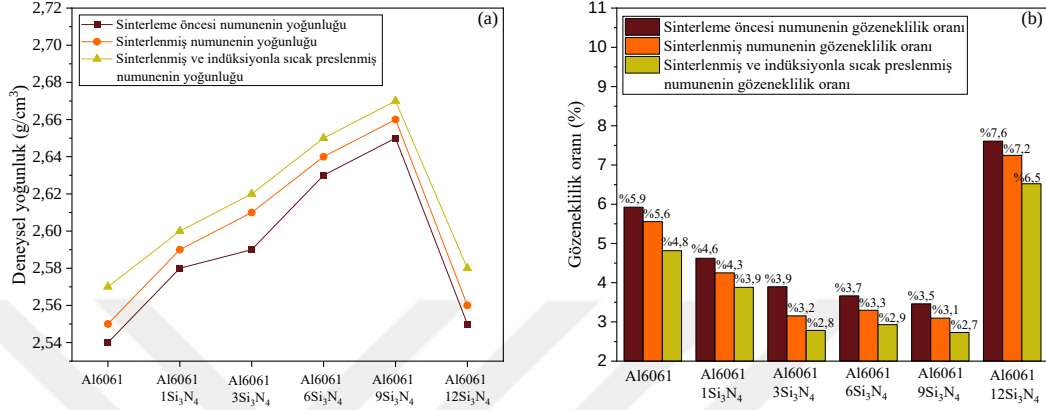


Şekil 6.36. Al6061 (a) ve Si₃N₄ (b) tozlarının tanecik boyut dağılımı

6.3.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Si₃N₄ takviye oranına ve ısıtma işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak Al6061 matrisli kompozitlerin deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranları Şekil 6.37’de verilmiştir. Sinterlemenin etkisiyle silisyum nitrid takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde deneysel yoğunluğun arttığı ve gözeneklilik oranının azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk (2.67 g/cm³) ve en düşük

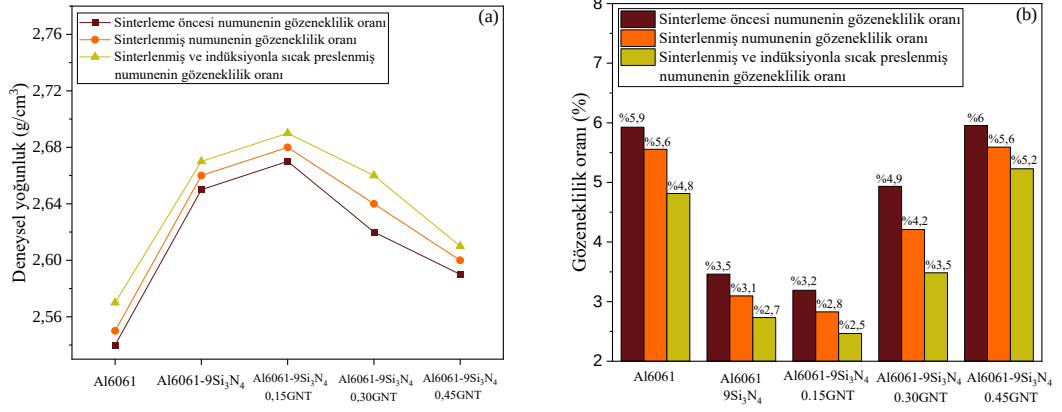
gözeneklilik oranı (%2.7), sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş ağırlıkça %9Si₃N₄ katkılı Al6061 matrisli kompozit numunede elde edilmiştir. Ağırlıkça %12Si₃N₄ katkılı kompozitte deneysel yoğunluk (2.58 g/cm³) azalmış, gözeneklilik oranı (%6.5) artmıştır. Gözeneklilik oranındaki artış, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir.



Şekil 6.37. Al6061 alaşımı ve Al6061-Si₃N₄ kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

Yapılan testler sonucunda; Si₃N₄ takviyeli Al6061 matrisli kompozitler arasında en iyi mekanik özellikler (yoğunluk 2.67 g/cm³, Vickers sertlik 156±3 HV, basma dayanımı 408±6 MPa) Al6061-9Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Bundan dolayı, %9Si₃N₄ katkısı esas alınarak Al6061-9Si₃N₄-xGNT (x=ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 katkılı) hibrit kompozitler üretilmiştir.

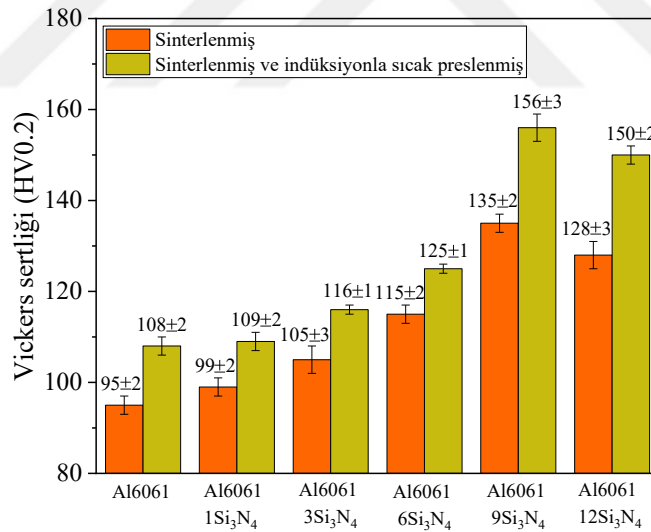
Al6061-9Si₃N₄-GNT hibrit kompozitlerde grafen takviye oranına ve ısıt işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı değişimi Şekil 6.38'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde sinterlemenin ve indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle kompozitlerin yoğunluklarının arttığı, gözeneklilik oranının düştüğü belirlenmiştir. %9Si₃N₄ takviyeli Al6061 esaslı kompozitin deneysel yoğunluğu, grafen katkısıyla artmıştır. En yüksek deneysel yoğunluğa (2.69 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranına (%2.5) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT hibrit kompozitte ulaşılmıştır. Ancak bu takviye oranından sonra kompozit yapıda grafenin toplanmasına bağlı olarak deneysel yoğunluk değerinde düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 6.38. Al6061 alaşımı, Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT hibrit kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak yoğunluğun (a) ve gözeneklilik oranının (b) değişimi

6.3.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

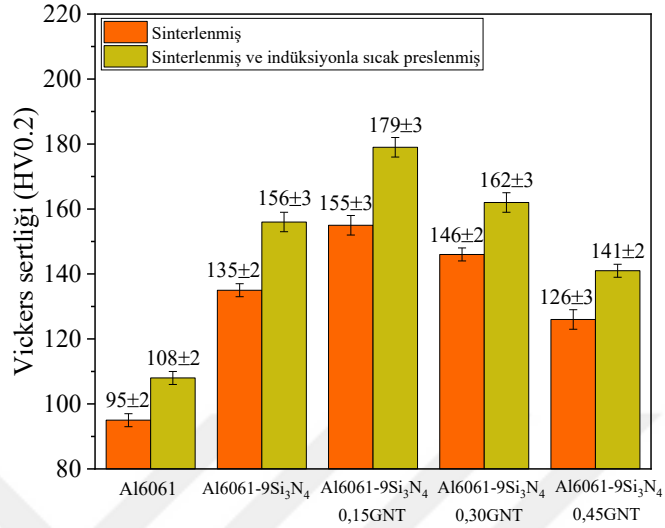
Al6061 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozit yapıların Vickers sertlik değişimi Şekil 6.39’da verilmiştir. En yüksek sertlik değerine (156±3 HV) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ağırılıkça %9Si₃N₄ takviyesinden sonra Si₃N₄’ün toplanması sebebiyle Vickers sertliğinin düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6.39. Al6061 alaşımı ve Al6061-Si₃N₄ kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi

Al6061 matrisli Si₃N₄ (ağırlıkça %9) ve grafen (ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45) takviyeli hibrit kompozitlerde grafen takviye oranına ve ısıt işlem türüne (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi Şekil 6.40’da verilmiştir. Maksimum Vickers sertliği (179±3 HV) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT hibrit kompozit yapıda belirlenmiştir.

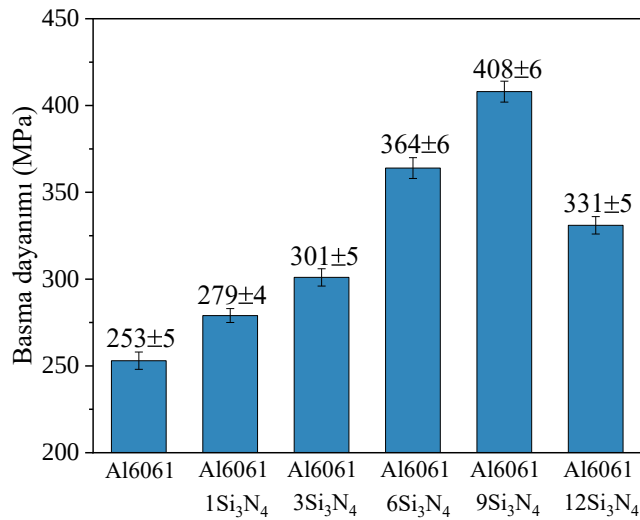
Al6061 esaslı kompozitlerin sertliğinin artmasında, takviye elemanlarının matris içerisinde homojene yakın bir şekilde dağılmasının ve ısıt işlemlerin etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.40. Al6061 alaşımı, Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT hibrit kompozitlerde ısıt işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değışimi

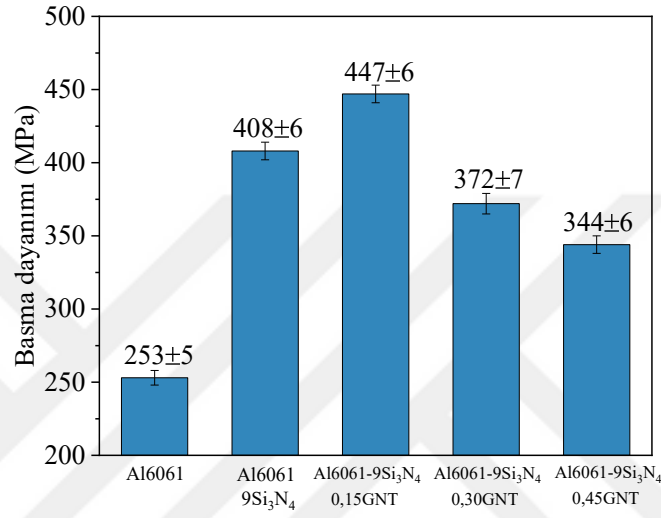
6.3.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Al6061 alaşımı ile Si₃N₄ (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12) takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin basma dayanımı değeri Şekil 6.41’de verilmiştir. En yüksek basma dayanımı (408±6 MPa) Al6061-9Si₃N₄ kompozit yapıda tespit edilmiştir. Ancak Si₃N₄ takviyesinin topaklanma eğilimi göstermesinden dolayı %12Si₃N₄ katkı oranında basma dayanımı (331±5 MPa) düşmüştür.



Şekil 6.41. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı ve Al6061-Si₃N₄ kompozitlere ait basma dayanımı değeri

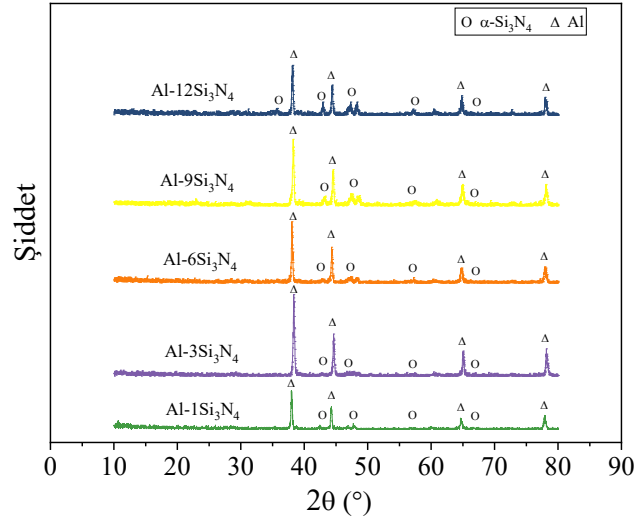
Silisyum nitür (ağırlıkça %9) ve grafen (ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45) katkı Al6061 esaslı kompozitlerin basma dayanımı değişimi Şekil 6.42’de verilmiştir. Al6061-9Si₃N₄-GNT hibrit kompozitlerde, en yüksek basma dayanımı (447±6 MPa) Al6061-9Si₃N₄-0,15GNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Bu kompozit yapıdaki basma dayanımı, Al6061 alaşımına (253±5 MPa) kıyasla %76,67 oranında artmıştır. Plastik deformasyon sırasında grafenin topaklanması sebebiyle grafen takviye oranının artmasıyla basma dayanımı değeri düşmüştür



Şekil 6.42. Sadece sinterlenen Al6061 alaşımı, Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri

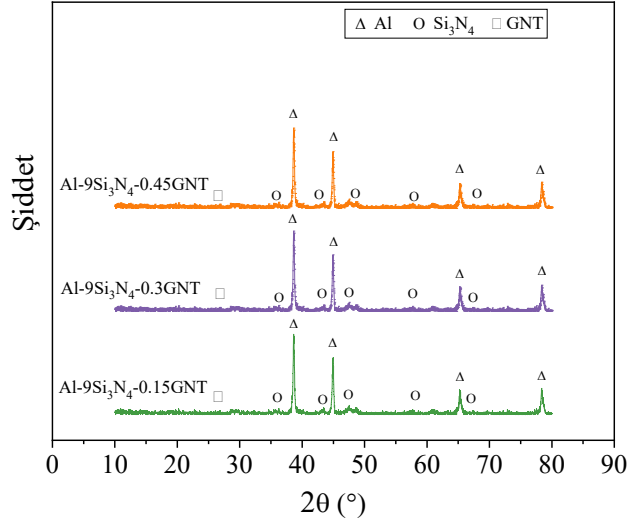
6.3.5. XRD Faz Analizleri

Al6061-Si₃N₄ kompozitlere ait XRD örgü desenleri Şekil 6.43’de verilmiştir. Şekilde “Δ” simgesiyle Al ve “O” simgesiyle Si₃N₄ sembolize edilmiştir. Si₃N₄ düşük sıcaklıklarda (1420°C’nin altındaki) α-Si₃N₄ yapıda bulunmaktadır. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler 600°C sıcaklıkta sinterlenmiştir. XRD örgü desenleri incelendiğinde; tüm piklerin alüminyuma ve α-Si₃N₄’e ait olduğu görülmektedir.



Şekil 6.43. Al6061-Si₃N₄ kompozitlerin XRD örgü desenleri

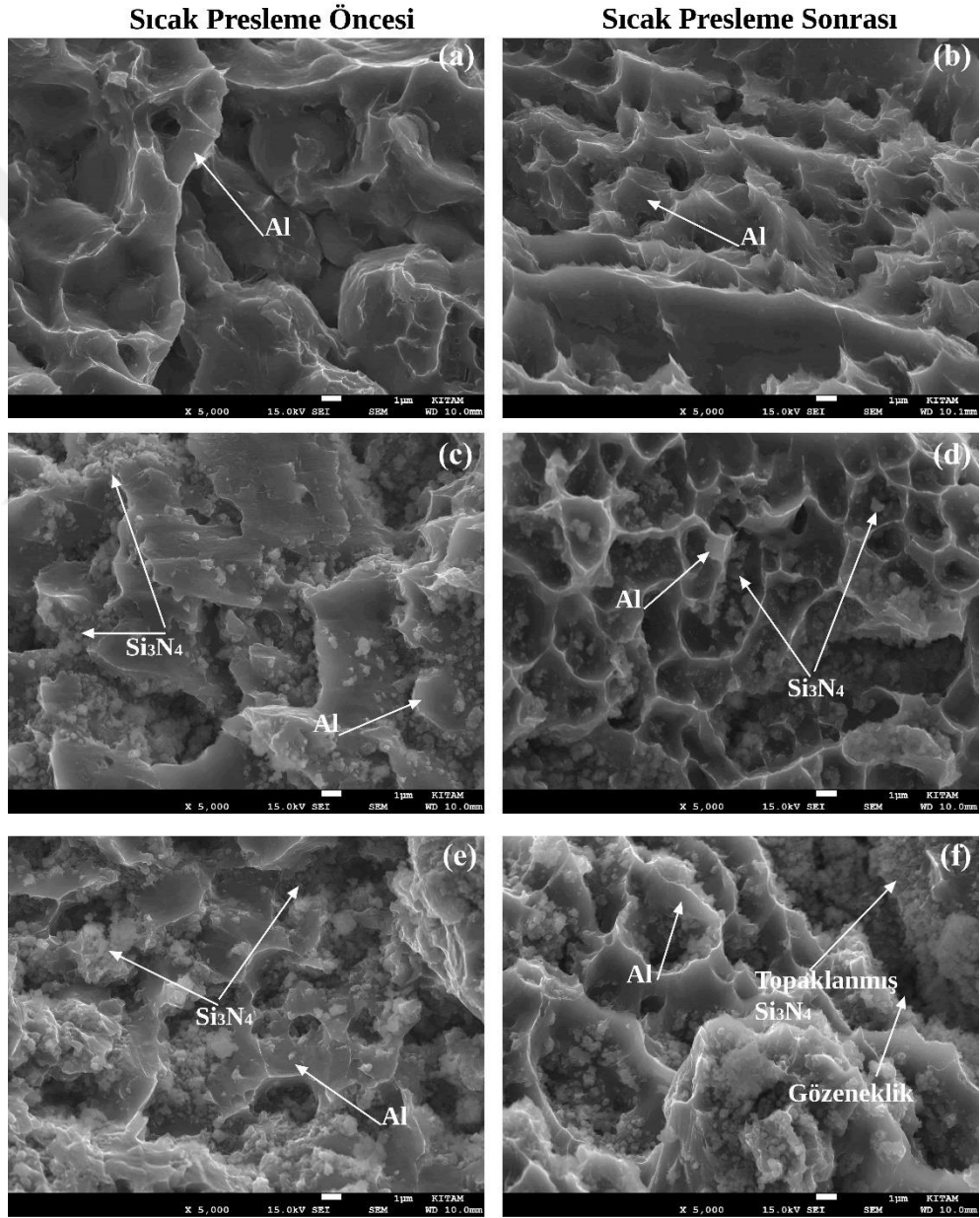
Al6061-9Si₃N₄-xGNT (x= ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45) kompozitlerin XRD faz analizleri Şekil 6.44’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm piklerin alüminyuma ve α -Si₃N₄’e ait olduğu tespit edilmiştir. XRD cihazının düşük hassasiyeti ve grafenin düşük katkı oranı sebebiyle kompozitlerde grafen pikine rastlanmamış olup $2\theta=26.5^\circ$ ’de şekilde “□” simgesiyle sembolize edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen analiz sonucunda Si₃N₄ ve GNT katkılı kompozitlerde istenmeyen Al₄C₃ gibi ikincil fazlara rastlanmamıştır.



Şekil 6.44. Al6061-9Si₃N₄-GNT hibrit kompozitlerin XRD örgü desenleri

6.3.6. SEM ve SEM-EDX Görüntülerinin Analizi

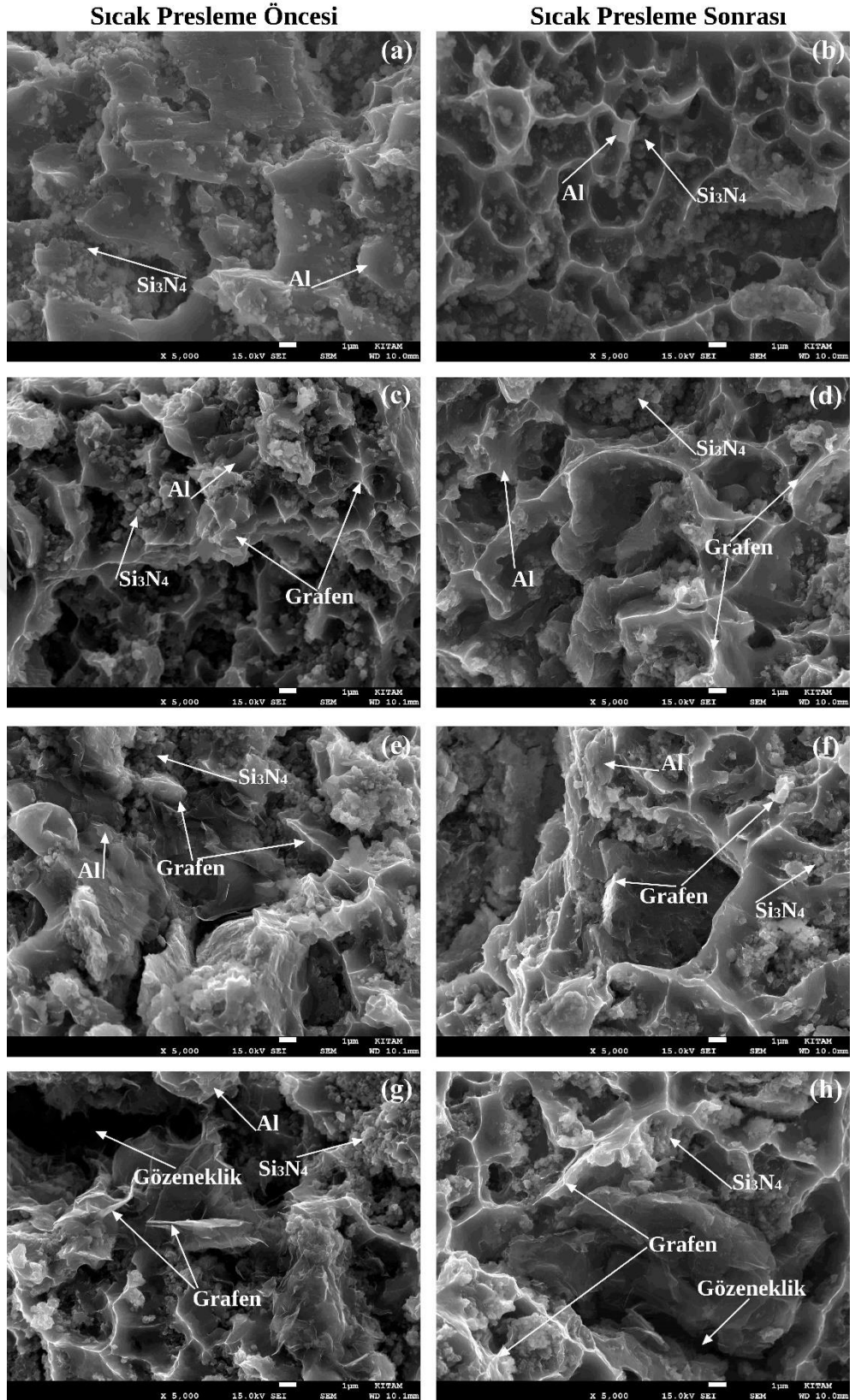
Sinterlenmiş ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozitlere ait SEM görüntüleri Şekil 6.45’de verilmiştir. Kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde, Al6061 ile Si₃N₄ tanecikleri arasında arayüz etkileşimin oldukça güçlü olduğu görülmüştür. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenme işlemi uygulanmış kompozitler arasında daha güçlü boyun oluşumu belirlenmiştir. Ağırılıkça %12Si₃N₄ takviyesinde, Si₃N₄’ün kompozit yapı içerisinde topaklandığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.45. Al6061 alaşımı ve Al6061-Si₃N₄ kompozitlerine ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-9Si₃N₄, (d) Al6061-9Si₃N₄-i, (e) Al6061-12Si₃N₄, (f) Al6061-12Si₃N₄-i

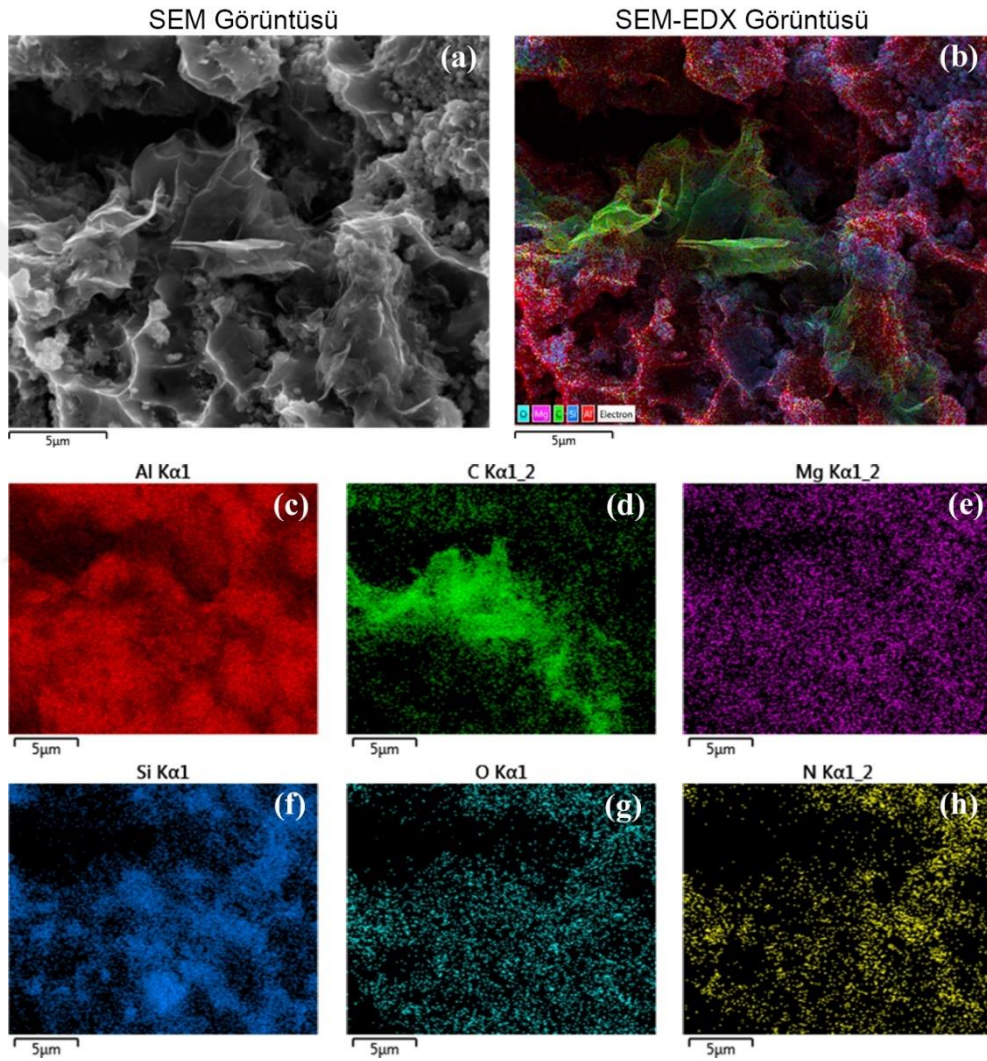
Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozit yapıları ait SEM görüntüleri Şekil 6.46'da verilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, ağırlıkça %0.15 grafen ve %9Si₃N₄ takviyeli Al6061 kompozit yapıda tanecikler homojene yakın bir şekilde dağılırken, grafen katkı oranının ağırlıkça %0.15'den fazla olduğu kompozitlerde gözeneklilik ve topaklanma oluşumu gözlemlenmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenme işlemi sonucu tanecikler arasında kuvvetli ara yüzey bağlarının oluştuğu ve taneciklerin yönlendiği tespit edilmiştir. SEM analizlerinin mekanik test sonuçlarını doğruladığı belirlenmiştir.





Şekil 6.46. Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozitlerine ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası SEM görüntüleri: (a) Al6061-9Si₃N₄, (b) Al6061-9Si₃N₄-i, (c) Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT, (d) Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT-i, (e) Al6061-9Si₃N₄-0.30GNT, (f) Al6061-9Si₃N₄-0.30GNT-i, (g) Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT, (h) Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT-i

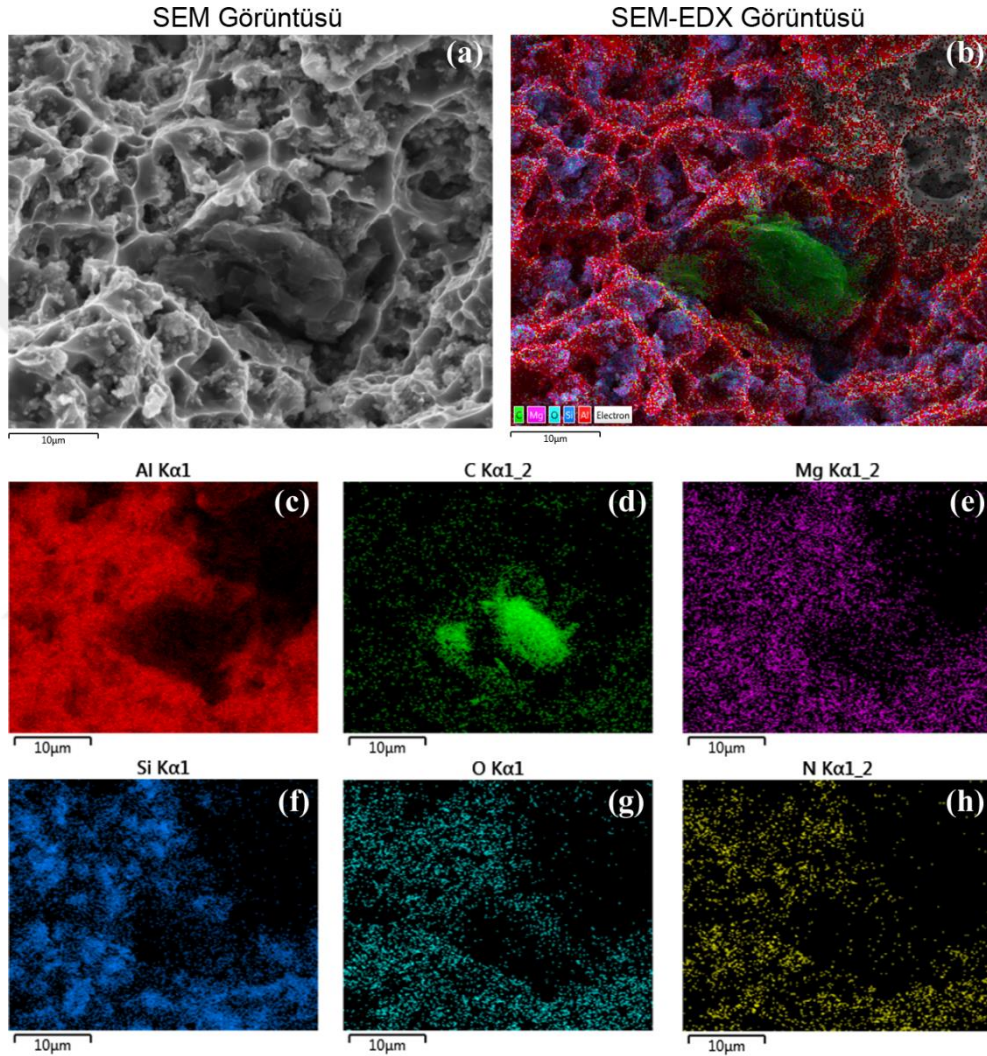
Sadece sinterlenmiş Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT kompozit yapıya ait SEM-EDX element dağılım haritası Şekil 6.47’de verilmiştir. Element dağılım analizi kompozit numunenin kırık yüzeyinde gerçekleştirilmiştir. SEM-EDX analizlerinde her element (Al, C, Mg, Si, O ve N) farklı renk ile gösterilmiştir. Yapılan SEM-EDX analizinde yeşil renkteki dağılımların yoğun olarak bulunduğu bölgede, grafenin topaklandığı tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olan bu topaklanmalar, SEM-EDX analizi ile doğrulanmaktadır.



Şekil 6.47. Sadece sinterlenen Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT kompozit yapının SEM-EDX element dağılım haritası Şekil 6.48’de verilmiştir. Kompozit numunenin kırık yüzeyinde gerçekleştirilen SEM-EDX analizlerinde her bir element farklı renk ile gösterilmiştir. Element dağılım haritalama analizinde Al6061

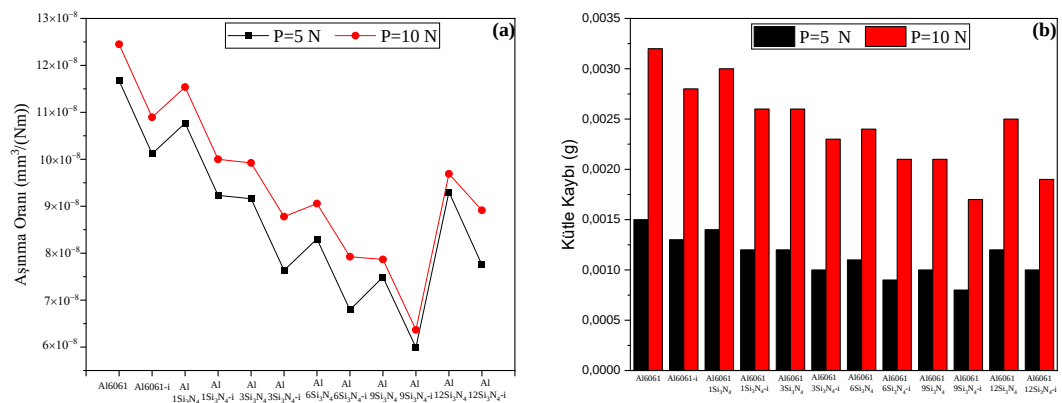
matris malzemesinin ana elementleri olan Al, Mg ve Si yapı içerisinde görülmektedir. Takviye elemanlarına ait Si_3N_4 'ün bileşenleri olan Si ve N ile karbon elementinin bir allotropu olan grafenin varlığı SEM-EDX analizi ile doğrulanmıştır. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunelerin sinterlenmiş numunelere kıyasla daha yoğun bir mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir. Artan grafen miktarı ile topaklanmış grafen nanopartiküller SEM-EDX analizi ile doğrulanmıştır.

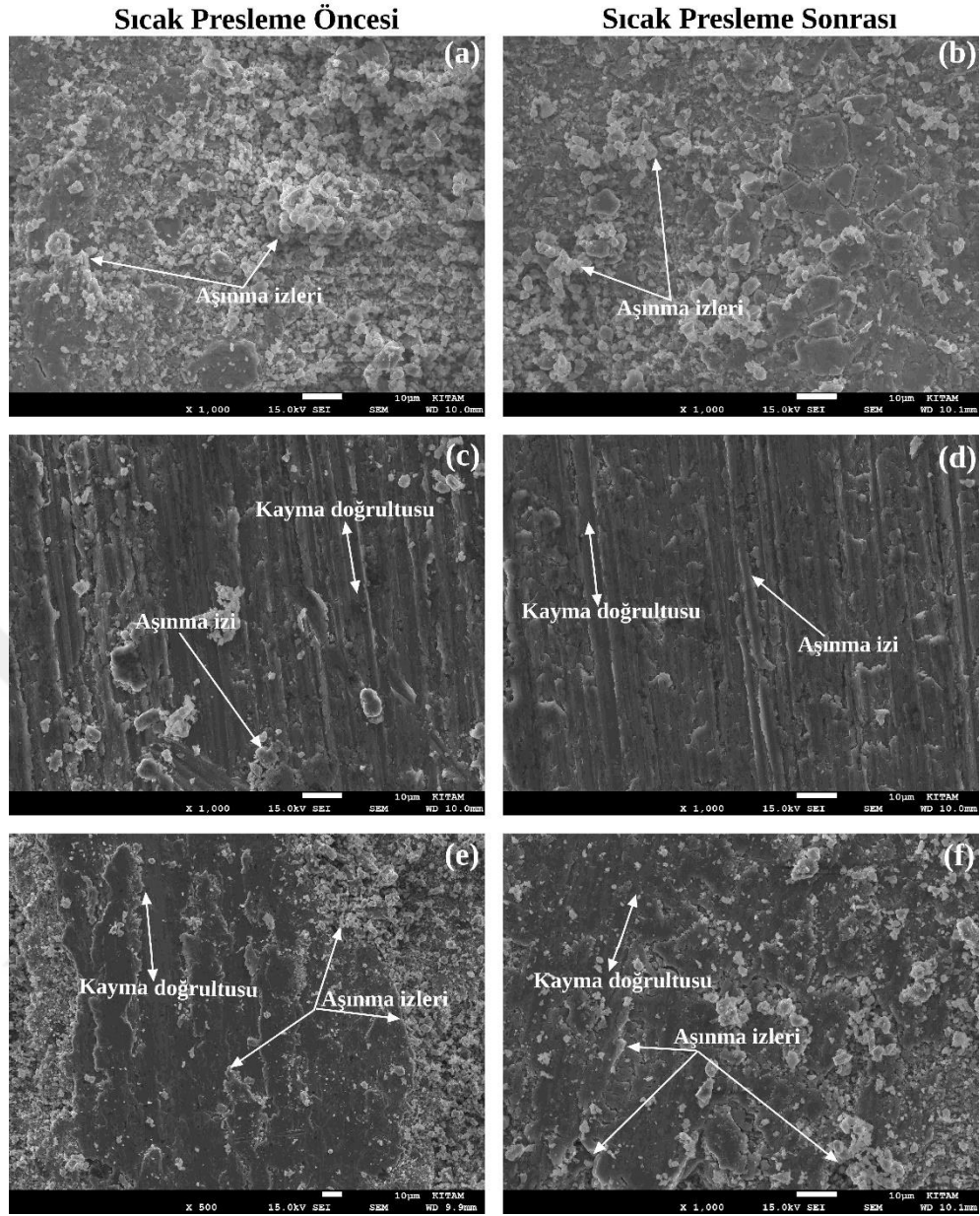


Şekil 6.48. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT kompozite ait (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları

6.3.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

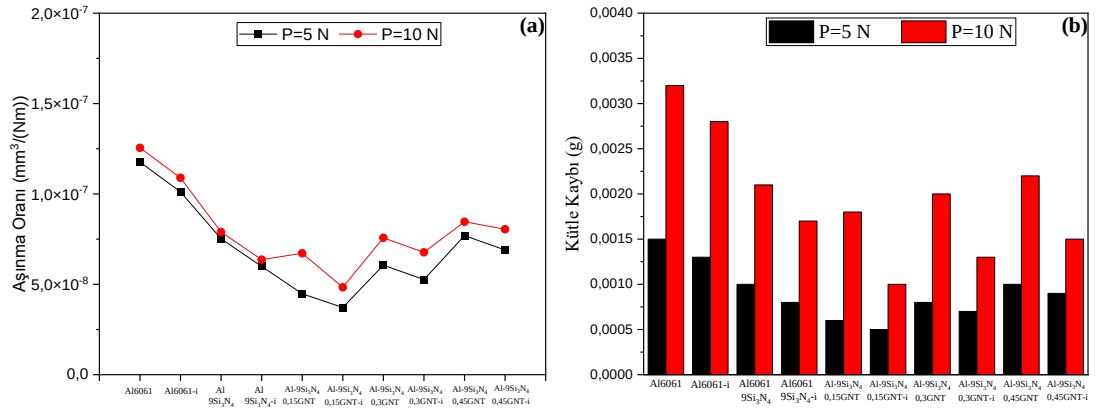
Al6061 alaşımı ve Al6061-Si₃N₄ kompozit yapıların indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma oranı ve kütle kaybı değişimi Şekil 6.49'da verilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla birlikte kütle kaybının (Δm) ve aşınma oranının (W) arttığı gözlemlenmiştir. En düşük aşınma oranı ($6 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve





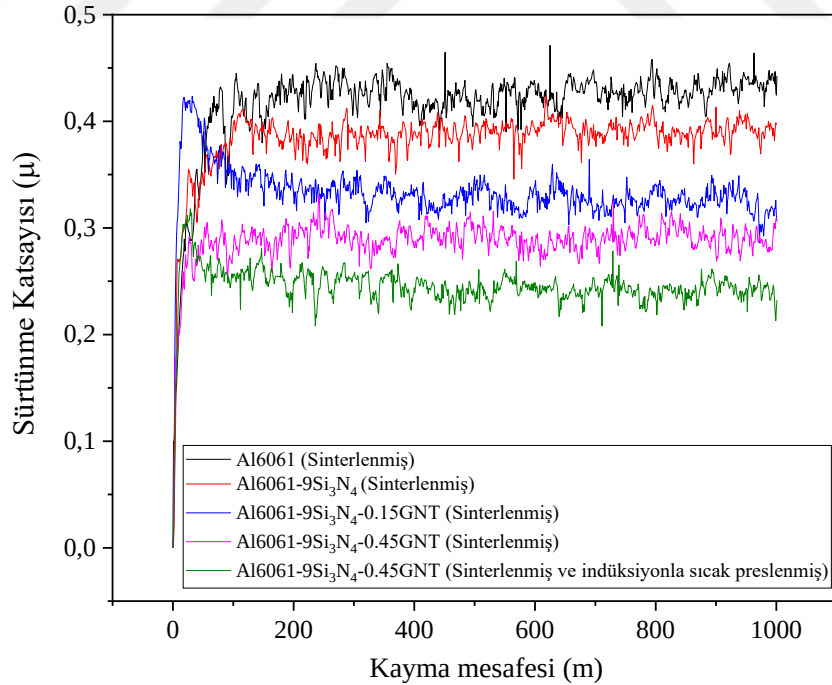
Şekil 6.50. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-9Si₃N₄, (d) Al6061-9Si₃N₄-i, (e) Al6061-12Si₃N₄, (f) Al6061-12Si₃N₄-i kompozitlere ait aşınma izleri

Al6061 alaşımı, Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozit malzemelerinin aşınma oranı ve kütle kaybı değişimi Şekil 6.51’de verilmiştir. En düşük aşınma oranı ($3.7 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0.0006 g) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş %9Si₃N₄ ve %0.15GNT takviyeli Al6061 matrisli kompozit yapıda tespit edilmiştir. Bununla birlikte artan grafen takviyesiyle aşınma oranı ve kütle kaybı yükselmiştir. Bunun sebebi ise grafenin topaklanma eğilimine girmesi ve matris içinde grafen kümelenmelerinin oluşmaya başlamasıdır.



Şekil 6.51. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının, Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozitlere ait (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri

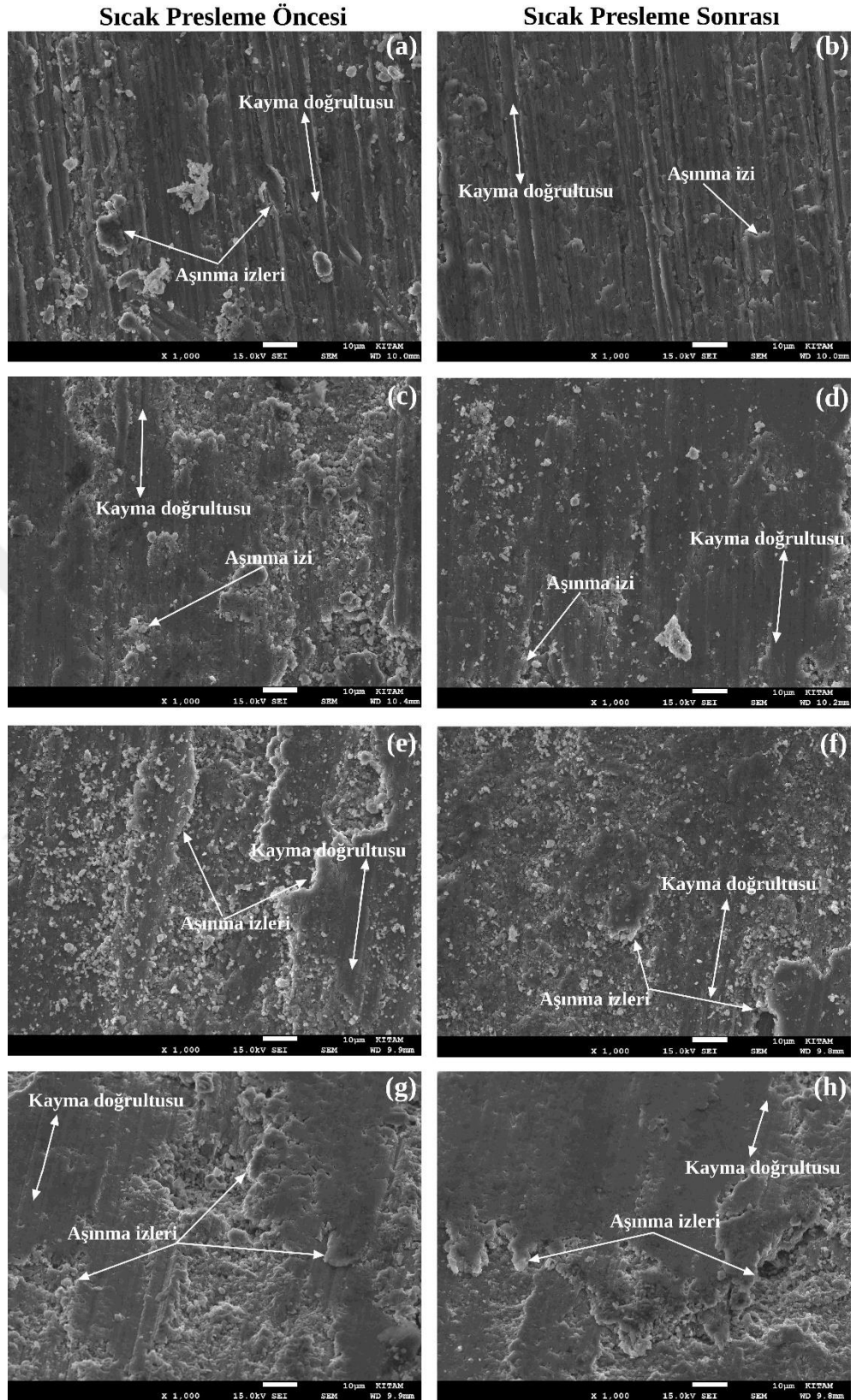
Si₃N₄ ve GNT takviyeli Al6061 matrisli kompozitler üzerinde yapılan aşınma testlerinde en düşük sürtünme katsayısı ($\mu \sim 0,25$) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT kompozit yapıda tespit edilmiştir (Şekil 6.52). Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenme işleminin kompozitin sürtünme katsayısını düşürmede etkili bir proses olduğu görülmüştür. Grafenin katı yağlayıcılık etkisi sebebiyle artan grafen katkısıyla sürtünmenin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.52. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al6061 alaşımının, Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozitlere ait sürtünme katsayısı eğrileri ($P=5 \text{ N}$)

Al6061-9Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozit yapıların indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma izleri Şekil 6.53’de verilmiştir. Abrasif aşınma izleri incelendiğinde, minimum deformasyonun sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT kompozit yapıda olduğu gözlenmiştir. SEM görüntülerindeki aşınma izleri, aşınma testlerini doğrulamaktadır.





Şekil 6.53. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası (a) Al6061-9Si₃N₄, (b) Al6061-9Si₃N₄-i, (c) Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT, (d) Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT-i, (e) Al6061-9Si₃N₄-0.30GNT, (f) Al6061-9Si₃N₄-0.30GNT-i, (g) Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT, (h) Al6061-9Si₃N₄-0.45GNT-i kompozitlere ait aşınma izleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Al6061-GNT, Al6061-B₄C, Al6061-30B₄C-GNT, Al6061-Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozitler toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Takviye malzemelerinin (GNT, B₄C ve Si₃N₄) katkı oranlarının ve ısıtıl işlem türünün (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) kompozit malzemelerin; yoğunluğuna, sertliğine, basma dayanımına, sürtünme katsayısına, aşınma oranına ve mikroyapılarına olan etkisi incelenmiştir. Yürütülen tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda ayrı ayrı özetlenmiştir.

7.1. Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen kompozitler 600°C sıcaklıkta 60 dk süresince vakum altında sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelere 500°C sıcaklıkta, 30 s süresince 25 MPa basınç altında indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Grafen takviyesinin ve ısıtıl işlem türünün (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) kompozit malzemelerin yoğunluğu, Vickers sertliği, basma dayanımı, aşınma oranı (P= 5, 10 N yükleme için), sürtünme katsayısı ve mikroyapıları üzerine olan etkisi incelenmiştir.

- Grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitler içerisinde en yüksek yoğunluk (2.58 g/cm³), en düşük gözeneklilik oranı (%4.4), en yüksek Vickers sertlik değeri (151±1 HV) ve en yüksek basma dayanımı (341±5 MPa) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş (SSİSP) %0.15 grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitte tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen takviyesinden sonra grafenin topaklanma eğiliminden dolayı mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir.
- Al6061 alaşımına kıyasla sadece sinterlenmiş Al6061-0.15GNT kompozit yapının yoğunluğu, Vickers sertliği ve basma dayanımı sırasıyla ~%0.15, ~%16 ve ~%35 oranlarında artmıştır.
- Sadece sinterlenmiş Al6061-0.15GNT kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmış Al6061-0,15GNT kompozit yapının yoğunluğu ve Vickers sertliği ~%0.07 ve ~%37 oranlarında yükselmiştir.

- Gerçekleştirilen XRD faz analizlerinde, Al6061-0.15GNT kompozite ait tüm piklerin alüminyum ve grafene ait olduğu görülmüştür. Ayrıca kompozit malzemelerde istenmeyen Al_4C_3 gibi ikincil fazların oluşmadığı belirlenmiştir.
- SEM incelemeleri neticesinde, sinterlenme sonrası grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde tanecikler arasında iyi bağlanma ve boyun oluşumu gözlenmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen katkısından sonra grafenin matris içerisinde topaklandığı görülmüştür. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunelerin taneciklerinin sadece sinterleme işlemi uygulanan numunelere kıyasla daha yoğun bir mikroyapıda olduğu tespit edilmiştir.
- Aşınma test sonuçları incelendiğinde, en düşük aşınma oranı ($8.5 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0.0011 g), sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%0.15GNT kompozit yapıda belirlenmiştir. Aşındırıcı disk olarak paslanmaz çelik diskin kullanıldığı aşınma testlerinde, en düşük sürtünme katsayısı ($\mu \sim 0.23$) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-0.45GNT kompozitte elde edilmiştir. Yükün artmasıyla birlikte aşınma oranının ve kütle kaybının arttığı tespit edilmiştir. Grafenin katı yağlayıcılık özelliği sayesinde grafen katkısıyla tribolojik ve sürtünme davranışının iyileştiği belirlenmiştir.
- Aşınmış yüzeyler üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri neticesinde, Al6061-0.15GNT kompozit yapısında aşınma kanallarının minimum seviyede olduğu görülmüştür. Sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerde aşınma izlerinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma testlerinden elde edilen sonuçların mekanik testlerin sonuçlarını doğruladığı görülmüştür.
- Sadece sinterlenmiş Al6061-0,15GNT kompozitlere kıyasla; sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmış Al6061-0,15GNT kompozit yapıda aşınma oranının ~%30 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak, Al6061 matrisine belirli bir orana kadar yapılan grafen katkısının ve sinterleme sonrası uygulanan indüksiyonla sıcak presleme işleminin kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

7.2. B₄C/Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 B₄C takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. En iyi mekanik özellikleri (yoğunluk, Vickers sertlik ve basma dayanımı) sağlayan B₄C katkı oranı (ağırlıkça %30) belirlenip bu B₄C katkı oranına ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 grafen takviyesi yapılarak Al6061 matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. B₄C/GNT takviye oranının ve ısıtma işlemi prosedürünün (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) kompozit malzemelerin yoğunluğuna, Vickers sertliğine, basma dayanımına, aşınma oranına (P=5 ve 10 N yükleme için), sürtünme katsayısına ve mikroyapısına olan etkisi incelenmiştir.

- Bor karbür katkı oranının artmasıyla kompozitlerin yoğunluğunun, Vickers sertliğinin, basma dayanımının arttığı ve aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek deneysel yoğunluk (2.63 g/cm³), en yüksek Vickers sertlik (213±4 HV), en yüksek basma dayanımı (482±7 MPa) ve en düşük aşınma oranı (2.3x10⁻⁸ mm³/(Nm)) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan %30B₄C takviyeli Al6061 matrisli kompozit yapıda ulaşılmıştır. Bu durum B₄C partiküllerinin sert seramik yapısından kaynaklanmaktadır.
- Kompozit yapılarda gerçekleştirilen SEM analizleri sonucunda; B₄C taneciklerinin matris içerisine homojene yakın bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Al6061-B₄C kompozitlere ait XRD örgü deseni incelendiğinde; tüm fazların alüminyum ve bor karbürüne ait olduğu belirlenmiştir.
- Al6061-30B₄C-GNT kompozit yapılar içerisinde en yüksek yoğunluk (2.63 g/cm³), en düşük gözeneklilik oranı (%0.6), en yüksek Vickers sertlik değeri (238±4 HV) ve en yüksek basma dayanımı (510±8 MPa) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen takviyesinden sonra, toplanan grafen taneciklerinin B₄C tanecikleri arasındaki sürtünmeyi azaltması ve sert B₄C tanecikleri arasındaki kaymanın artmasıyla mekanik özelliklerde bozulmalar oluşmuştur.

- Al6061 alaşımına kıyasla sadece sinterlemiş Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozit yapının yoğunluğu, Vickers sertliği ve basma dayanımı sırasıyla; ~%0.30, ~%115 ve ~%101 oranlarında artmıştır.
- Sadece sinterlenmiş Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmış Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozit yapının yoğunluğu ve Vickers sertliği ~%0.35 ve ~%16 oranlarında yükseldiği tespit edilmiştir.
- Al6061-B₄C ve Al6061-30B₄C-GNT kompozit yapılara ait XRD faz analizlerinde yalnızca alüminyum ve bor karbür pikleri gözlenmiştir. Kompozit yapılarda grafenin düşük katkı oranı sebebiyle grafen piklerine rastlanmamıştır.
- SEM analizlerinde, bor karbür ve grafenin tane sınırlarında yer aldığı tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası tanecikler arasında iyi bir boyun oluşumu gözlenmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin taneciklerin arasında daha kuvvetli bağların oluşmasını sağladığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen katkısından sonra grafenin yapı içinde topaklandığı görülmüştür. Bu durum, Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozite ait SEM-EDX element dağılım haritalarıyla da doğrulanmıştır.
- Bor karbür katkısıyla aşınma oranı ve kütle kaybı azalmıştır. En düşük aşınma oranı ($0.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve en düşük kütle kaybı (0.0001 g) P=5 N yük altında sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozit yapıda tespit edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda, en düşük sürtünme katsayısı ($\mu \sim 0.22$) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-30B₄C-0.45GNT kompozitte elde edilmiştir. Yükün artmasıyla birlikte aşınma oranının ve kütle kaybının arttığı tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi, kompozit malzemelerin aşınma davranışını olumlu etkilemiştir. SEM aşınma analizlerine göre belirli orana kadar (ağırlıkça %0.15) grafen katkısının kompozitlerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerini azalttığı görülmüştür.
- Sadece sinterlenmiş Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan Al6061-30B₄C-0.15GNT kompozitin aşınma oranının ~%66 oranında azalmıştır.

- Sonuç olarak, Al6061 matrise belirli bir orana kadar yapılan B₄C ve grafen takviyesinin ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

7.3. Si₃N₄/Grafen Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 Si₃N₄ takviyeli Al6061 matrisli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Gerçekleştirilen testler neticesinde en iyi mekanik özellikleri veren (yoğunluk, Vickers sertlik, basma dayanımı ve aşınma davranışı) Si₃N₄ katkı oranı (ağırlıkça %9) belirlenip bu Si₃N₄ katkı oranına, ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45 oranında grafen katkısı yapılarak Al6061 matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. Si₃N₄/GNT katkı oranının ve ısıtma işlem prosedürünün (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) kompozit malzemelerin yoğunluğuna, Vickers sertliğine, basma dayanımına, aşınma oranına (P=5 ve 10 N yükleme için), sürtünme katsayısına ve mikroyapısına olan etkisi incelenmiştir.

- Al6061-Si₃N₄ kompozit yapılarda Si₃N₄ katkı oranının artmasıyla yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve basma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi yapılan %9 Si₃N₄ takviyeli kompozit yapısında; en yüksek deneysel yoğunluk (2.67 g/cm³), Vickers sertliği (156±3 HV) ve basma dayanımı (408±6 MPa) değerlerine ulaşılmıştır. Ağırlıkça %12Si₃N₄ katkısında ise; Si₃N₄ taneciklerinin matris içerisinde homojen dağılmamasından dolayı kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulduğu tespit edilmiştir.
- SEM analizleri sonucunda; Si₃N₄ taneciklerinin homojene yakın bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre; Al6061-Si₃N₄ kompozit yapılarda sinterleme sonrası Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil fazların oluşumu gözlemlenmemiştir.
- Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozit yapılar içerisinde en düşük gözeneklilik oranı (%2.5), en yüksek yoğunluk (2.69 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (179±3 HV) ve en yüksek basma dayanımı (447±6 MPa) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen katkısından sonra kümelenmiş grafen partikülleri sebebiyle mekanik özelliklerde bozulmalar meydana

gelmiştir. Bu durum, grafen taneciklerinin sert Si_3N_4 tanecikler üzerinde rahatlıkla hareket ederek plastik deformasyonu kolaylaştırmasından kaynaklanmaktadır.

- Al6061 alaşımına kıyasla sadece sinterlemiş Al6061-9 Si_3N_4 -GNT kompozit yapının yoğunluğu, Vickers sertliği ve basma dayanımı değerleri sırasıyla ~%0.51, ~%63 ve ~%77 oranlarında artmıştır.
- Sadece sinterlenmiş Al6061-9 Si_3N_4 -GNT kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmış Al6061-9 Si_3N_4 -GNT kompozit yapının yoğunluğu ve Vickers sertliği ~%0.19 ve ~%15 oranlarında artmıştır.
- Al6061-9 Si_3N_4 -GNT kompozit yapılarda XRD örgü desenleri incelendiğinde; fazların alüminyum ve silisyum nitrüre ait olduğu tespit edilmiştir. Kompozitlerde grafenin düşük katkı oranlarında kullanılması sebebiyle faz analizinde grafen piklerine rastlanmamıştır.
- Al6061-9 Si_3N_4 -GNT kompozitlere ait SEM analizlerinde Si_3N_4 ve grafenin tane sınırlarına yerleştiği tespit edilmiştir. Isıl işlemler sonucunda tanecikler arasında iyi bağlanma ve boyun oluşumu belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen katkısından sonra grafenin topaklanma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunelerin tanecikleri arasında daha iyi bir boyun oluşumu görülmüştür.
- Al6061- Si_3N_4 ve Al6061-9 Si_3N_4 -GNT yapıları kompozitlerin farklı yükler altında yapılan aşınma test sonuçları değerlendirildiğinde, en düşük kütle kaybı (0.0005 g) ve aşınma oranı ($6.0 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9 Si_3N_4 -0.15GNT kompozitte elde edilmiştir. Ayrıca en düşük sürtünme katsayısına ($\mu \approx 0.25$) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-9 Si_3N_4 -0.45GNT kompozit yapıda ulaşılmıştır.
- Aşınma numunelerine ait SEM analizleri sonucunda; sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin yüzeyindeki aşınma izlerinin sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Al6061-9 Si_3N_4 -0.15GNT kompozit yapıda aşınmış yüzey kanallarının minimum derinlikte olduğu ve artan yüklerle birlikte aşınmış yüzey derinliğinin arttığı belirlenmiştir.

- Sadece sinterlenmiş Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan Al6061-9Si₃N₄-0.15GNT kompozitin aşınma oranının ~%28 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak, Al6061 matrise belirli bir orana kadar yapılan Si₃N₄ ve grafen takviyesinin ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslemenin kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir.

7.4. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Bu tez çalışmasında, Al6061-GNT, Al6061-B₄C, Al6061-30B₄C-GNT, Al6061-Si₃N₄ ve Al6061-9Si₃N₄-GNT kompozitleri toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu bilimsel çalışma sonucunda olumlu neticeler elde edilmiş olup ileride yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- Bu tez çalışmasında, Al6061 alaşımı matris malzeme olarak kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda matris malzeme olarak 2xxx serisi, 5xxx serisi ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılarak grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemeler üretilip kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
- Bu tez çalışmasında, Al6061-B₄C-GNT ve Al6061-Si₃N₄-GNT hibrit kompozitler üretilerek mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. İleriki çalışmalarda, grafen ve farklı seramik malzemelerle (SiC, BN, TiB₂, Al₂O₃ vb.) takviye edilmiş Al6061 matrisli hibrit kompozitler üretilerek mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
- Bu tez çalışmasında, kompozit malzeme üretimi toz metalürjisi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İleriki çalışmalarda farklı üretim yöntemleri (karıştırmalı döküm, mekanik alaşımlama vb.) kullanılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilir.
- Bu tez çalışmasında, üretilen kompozit malzemelere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. İleride yapılacak başka

bir çalışmada sinterlenmiş malzemelere sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanarak malzeme karakterizasyon çalışmaları yürütülebilir.



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 (B_4C) and graphene nanoplatelets*. Journal of Materials Research, 34:18, 3116-3129.10.1557/jmr.2019.242.
- Abdelatty, R., Khan, A., Yusuf, M., Alashraf, A. and Shakoob, R. A. (2021). *Effect of silicon nitride and graphene nanoplatelets on the properties of aluminum metal matrix composites*. Materials, 14:8, 1898.
- Ahlatcı, H. (2003). *Alüminyum-silisyum karbür kompozitlerin mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına takviye boyutunun ve matris bileşiminin etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 313, İstanbul.
- Akbulut, H. (1994). *Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matrisli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı-özellik ilişkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 177, İstanbul.
- Akdoğan, A. (2005). *İmalatta kompozit malzemeler*. Lisans Ders Notu, Yıldız Teknik Üniversitesi, 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.
- Akkurt, A. ve Ovalı, İ. (2009). *Ezme ve geleneksel bitirme işlemlerinin Al6061 alüminyum alaşımı parçaların yüzey pürüzlülüğü ve daireselliği üzerine etkisi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15:3, 371-382.
- Akoral, E. (2003). *Toz metalurjisi yöntemi ile Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 170, Manisa.
- Akpınar, İ. Ş. (2011). *Atomizasyon yöntemiyle toz metal üretimi ve tozların karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 86, İzmir.
- Algan, İ. B. (2015). *Organik fren balatalarında kullanılan metal tozlarının sürtünme ve aşınma performansının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 111, Ankara.
- Alihosseini, H., Dehghani, K. and Kamali, J. (2017). *Microstructure characterization, mechanical properties, compressibility and sintering behavior of Al- B_4C nanocomposite powders*. Advanced Powder Technology, 28:9, 2126-2134.
- Altuner, S. ve Keleşoğlu, E. (2012). *Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde Y_2O_3 arayüzey kaplamasının ıslatma özelliklerine etkisi*. Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma, 30, 252-258.
- 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, 397-424.
- Arıcasoy, O. (2006). *Kompozit sektör raporu*. İstanbul Ticaret Odası Yayınları, 1, 4-15.
- Arık, H. (2019). *Al-Si $_3$ N $_4$ toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7:4, 776-787.

- Ashby, M. (1996). *An introduction to their properties & application*. Engineering Materials, 183-186.
- Ayata, A. (2014). *Toz metal alüminyum malzemelerin mikrodalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 103, Ankara.
- Bahçeci, E. (2006). *Al matrisli α -Si₃N₄ takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 152, 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.
- Biçer, A. (2015). *Toz metalurjisi ile üretilen Ni₃Al partikülleriyle pekiştirilmiş metal matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 100, Eskişehir.
- Bilir, H. (2014). *Al/SiC kompozitlerin karıştırılmalı döküm yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 123, Kırıkkale.
- Boothroyd, G. (1994). *Product design for manufacture and assembly*. Computer-Aided Design, 26:7, 505-520.
- Boz, M. (2003). *Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme-aşınma özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 148, Ankara.
- Bozkurt, D. (2019). *Silisyum nitrür esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bilim Dalı, 94, İstanbul.
- Bulut, M. (2014). *Türkiyede kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 95, Ankara.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2011). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Çev. Ed. K.Genel)*, Sekizinci baskıdan çeviri. Nobel Yayınevi, Ankara.
- Chung, W.-S. and Lin, S.-J. (1996). *Ni-coated SiCp reinforced aluminum composites processed by vacuum infiltration*. Materials Research Bulletin, 31:12, 1437-1447.
- Çalışkan, O. (2020). *Nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli nanokompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, Karabük.
- Demir, M. ve Şenel, M. C. (2021). *Bor karbür Takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi*. Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi (ICONSAD'21), Bildiriler Kitabı, 335-343, 22-25 Aralık.
- Dengiz, E. Ö. (2018). *Grafen takviyeli magnezyum kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 100, Samsun.
- Dieter, G. E. and Bacon, D. J. (1976). *Mechanical metallurgy*. McGraw-hill New York,
- Downson, G. and Whittaker, D. (2008). *Introduction to powder metallurgy: the process and its products (revised edition)*. European Powder Metallurgy Association, 2.

- Ekici, E. (2012). *Alüminyum matrisli B₄C takviyeli ve grafit katkıli kompozitlerin üretilmesi, mekanik özellikleri ve frezede işlenebilirliğinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 209, Ankara.
- Ekinci, V. Ş. (2007). *Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 111, Ankara.
- Ergün, N. (2006). *Borkarbür silisyum karbür kompozitlerinin reaktif sıcak presleme ile üretilmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisli Anabilim Dalı, 82, İstanbul.
- German, R. M. (1994). *Powder metallurgy science*, Princeton. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 472, New Jersey.
- German, R. M. (2007). *Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri*. Türk Toz Metalürjisi Derneği Yayınları, (Çev. N. Durlu, S. Sarıtaş ve M. Türker), Ankara.
- Göçer, A. and Karamış, M. B. (2021). *An investigation on the tribological behaviors of Al 6061–B₄C metal matrix composites*. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 57:3, 579-588.10.1134/S2070205121030138.
- Gui, M. and Kang, S. B. (2000). *6061Al/Al–SiCp bi-layer composites produced by plasma-spraying process*. Materials Letters, 46:5, 296-302.
- Günay, M. (2009). *Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Teknik Eğitim Bölümü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 232, Ankara.
- Haga, T. and Kapranos, P. (2002). *Simple rheocasting processes*. Journal of materials processing technology, 130, 594-598.
- Hagiwara, H., Tanji, H. and Tamaki, S. (1986). *Inorganic synthetics containing boron (BN, B₄C, LaB₆) and their application*. Ceramic Data Book, Gordon and Beach Science Publisher, 201-213.
- Halil, K., İsmail, O., Sibel, D. and Ramazan, Ç. (2019). *Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B₄C hybrid composites produced with powder metallurgy*. Journal of Materials Research and Technology, 8:6, 5348-5361.
- Hedayatian, M., Vahedi, K., Nezamabadi, A. and Momeni, A. (2020). *Microstructural and mechanical behavior of Al6061-graphene oxide nanocomposites*. Metals and Materials International, 26:6, 760-772.
- 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, 138998.
- İpekoğlu, M., Nekouyan, A., Albayrak, Ö. and Altıntaş, S. (2017). *Mechanical characterization of B₄C reinforced aluminum matrix composites produced by squeeze casting*. Journal of Materials Research, 32:3, 599-605.10.1557/jmr.2016.495.
- Jang, B. Z. and Zhamu, A. (2008). *Processing of nanographene platelets (NGPs) and NGP nanocomposites: a review*. Journal of Materials Science, 43:15, 5092-5101.
- Jones, B. R., Prunier Jr, A. R. and Pyzik, A. J. (1999). United States of America Patent No. US5957251A. Google Patents: Company T D C.
- Jones, M. J. (1975). *Mechanics of Composite Materials*. Scripta Book Company, 355, Washington DC.

- Kalaycıoğlu, A. S. (2010). *SiC tane katkılı alümiyum kompozitlerin toz metalurjisi ile üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 132, İzmir.
- Kalemtaş, A. (2014). *Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış*. Putech&Composites, 22, 18-30.
- Kamber, O. (2017). *Al6061 matrisli geleneksel ve atık takviyeli hibrit kompozitlerin tribolojik davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 92, Bartın.
- Kandpal, B. C., Kumar, J. and Singh, H. (2014). *Production technologies of metal matrix composite: a review*. International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology, 4:2, 27-32.
- Karabulut, Ş., Karakoç, H. and Çıtak, R. (2016). *Influence of B₄C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061/B₄C composites*. Composites Part B: Engineering, 101, 87-98.
- Karaduman, B. (2010). *Titanyum matrisli titanyum karbür takviyeli kompozit üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Seramik Mühendisliği Bilim Dalı, 104, İstanbul.
- Karakoç, H. (2020). *Toz metal Al7075/B₄C/Si₃N₄ kompozit malzemelerin üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi*. Politeknik Dergisi, 23:4, 1141-1151.
- Kata, D. and Lis, J. (2005). *Silicon nitride rapid decomposition for ceramic nanopowder manufacturing*. Glass Physics and Chemistry, 31:3, 364-369.
- Kaya, B. (2014). *Al/Si-xB₄C ve Al/Si-xZrB₂ (x=% 5, % 10 ve % 15) kompozitlerinin mekanik alaşımlama ve sinterleme süreçlerinin incelenmesi ve karakterizasyon çalışmaları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, 175, İstanbul.
- Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M. ve Dikici, B. (2019). *Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş magnezyum matrisli kompozitlerin korozyon duyarlılıkları*. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8:3, 914-920.
- Keleş, Ö. (2021). *Alüminyumun Serüveni*. İTÜ Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Keskin, I. (1991). *Malzeme el kitabı*. Onarsan İnşaat Sanayii ve Ticaret A.Ş. II. Baskı, Ankara.
- 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.-C., Shon, I.-J., Jeong, I.-K., Ko, I.-Y., Yoon, J.-K. and Doh, J.-M. (2007). *Rapid sintering of ultra fine WC and WC-Co hard materials by high-frequency induction heated sintering and their mechanical properties*. Metals and Materials International, 13:1, 39-45.
- 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.
- Kırmızı, G., Arık, H. and Çinici, H. (2019). *Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites*. Composites Part B: Engineering, 164, 345-357.

- 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.
- Kocaman, R. (2017). *Geleneksel ve atık takviyeli metal matrisli kompozitlerin aşınma davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 89, Bartın.
- Kumar, H. P. and Xavier, M. A. (2014). *Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review*. Procedia Engineering, 97, 1033-1040.
- 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.
- Kumdalı, F. (2008). *Alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, İstanbul.
- Lawley, A. (1992). *Atomization: the production of metal powders*. Metal Powder Industries Federation. 1105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540-6692, USA, 1992. 159.
- 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.
- Liu, R. and Li, D. Y. (2001). *Modification of Archard's equation by taking account of elastic/pseudoelastic properties of materials*. Wear, 251:1, 956-964.
- Manohar, G., Pandey, K. M. and Maity, S. R. (2021). *Effect of sintering mechanisms on mechanical properties of AA7075/B₄C composite fabricated by powder metallurgy techniques*. Ceramics International, 47:11, 15147-15154.
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing—materials, product and process engineering*—CRC Press. Composites Manufacturing.
- Miracle, D. (2005). *Metal matrix composites—from science to technological significance*. Composites science and technology, 65:15-16, 2526-2540.
- Mortensen, A. (2001). *Metal matrix composites in industry: an overview*. Proceedings: MMC VIII conference, London-November.
- Mortensen, A., Cornie, J. A. and Flemings, M. C. (1988). *Solidification processing of metal-matrix composites*. JOM, 40:2, 12-19.
- Mutlu, İ. (2012). *Alüminyum matrisli metal kompozit malzemelerin üretilmesi*. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED), 4:1, 31-36.
- Mutuk, T. ve Gürbüz, M. (2019). *Grafen Takviyesi Miktarının Titanyum Matrisli Kompozitlerin Özelliklerine Etkisi*. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6:Özel Sayı (ISMSIT2017), 1-9.
- 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.
- Nijssen, R. (2015). *Composite Materials: An Introduction*. Inholland University of Applied Sciences,
- Novoselov, K. S. (2011). *Nobel lecture: Graphene: Materials in the flatland*. Reviews of Modern Physics, 83:3, 837-849.10.1103/RevModPhys.83.837.

- Onat, A. (2015). *Kompozit malzemeler ders notu*. Sakarya Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı, Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/12475078-Sakarya-meslek-yuksekokulu-makina-ve-metal-teknolojileri-bolumu-metalurji-programi-kompozit-malzemeler-ders-notu.html>, (20.10.2021).
- Önel, K. (1995). *Sürekli SiC katkılı alüminyum matrisli kompozitler (1 bölüm)*. Metalurji Dergisi, 46-53.
- Öztop, B. ve Gürbüz, M. (2018). *Si₃N₄ takviyesiyle atık alüminyumdan üretilmiş kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi*. Technological Applied Sciences, 13:1, 57-66.
- Öztop, B. and Gürbüz, M. (2021). *Investigation of mechanical properties of Si₃N₄ reinforced composites produced from aluminum waste*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi:28, 758-765.
- Pang, X., Xian, Y., Wang, W. and Zhang, P. (2018). *Tensile properties and strengthening effects of 6061Al/12 wt%B₄C composites reinforced with nano-Al₂O₃ particles*. Journal of Alloys and Compounds, 768, 476-484.
- Pavlovic, M. G. and Popov, K. I. (2005). *Metal powder production by electrolysis*. Electrochemistry Encyclopedia.
- 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.
- 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.
- Raghavendra Rao, P. S. and Mohan, C. B. (2020). *Study on mechanical performance of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites*. Materials Today: Proceedings, 33, 5534-5538.
- Rajkumar, K., Rajan, P. and Charles, J. M. A. (2014). *Microwave Heat Treatment on Aluminium 6061 Alloy-Boron Carbide Composites*. Procedia Engineering, 86, 34-41.
- Ramu, P., Hari Kiran Reddy, R., Kunaal Kumar, B., Padmanathan, T. and Phanibhushana, M. V. (2021). *Investigation of wear characteristics of Al6061-Si₃N₄ composites subjected to strain hardening through equal channel angular pressing*. Materials Today: Proceedings, 46, 790-794.
- Roll, K. (1984). *History of powder metallurgy*, Metals Handbook, 9th edn, Vol. 7: Powder Metallurgy: Coordinated by E. Klar), American Society for Metals, OH.
- Rudolph, S. (2001). *Materials review boron nitride*. American Ceramic Society Bulletin, 80:8, 68-71.
- Russell, A. M. and Lee, K. L. (2005). *Structure-property relations in nonferrous metals*. Wiley Online Library.
- Sak, N., Zeren, M. ve Yamanoğlu, R. (2018). *Alümina katkılı ve nikel ile alaşımlandırılmış alüminyum esaslı kompozitlerde özelliklerin karakterizasyonu*. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1:1, 1-7.
- Salamci, E. (2004). *Spray casting*. Gazi University Journal of Science, 17:2, 155-173.
- Sarıtaş, S. (1996). *Bir titreşimli öğütücü imalatı ve metal tozlarının öğütmeye bağlı özelliklerinin araştırılması*. I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Düzenleyen: Türk Toz Metalurjisi Derneği, 387-396.

- Sathiyaraj, S., Senthilkumar, A., Muhammed Ameen, P., Sundar, R. and Saseendran, V. (2021). *Experimental investigations on mechanical properties of Al-B₄C metal matrix composites*. Materials Today: Proceedings, 45, 6372-6376.
- Savage, N. (2012). *Materials science: Super carbon*. Nature, 483:7389, S30-S31.
- Schwartz, M. M. (1997). *Composite materials: properties, nondestructive testing, and repair*. Prentice Hall,
- Segal, D. (1997). *Chemical synthesis of ceramic materials*. Journal of Materials Chemistry, 7:8, 1297-1305.
- 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.
- 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.
- Sharma, P., Sharma, S. and Khanduja, D. (2015). *Production and some properties of Si₃N₄ reinforced aluminium alloy composites*. Journal of Asian Ceramic Societies, 3:3, 352-359.10.1016/j.jascer.2015.07.002.
- Sınmazçelik, T. (2003). *Kompozit malzemeler ders notları*. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Spohn, M. T. (1995). *Boron carbide*. American Ceramic Society Bulletin, 74:6, 113-115.
- Srivatsan, T. S., Ibrahim, I., Mohamed, F. and Lavernia, E. J. (1991). *Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites*. Journal of Materials Science, 26:22, 5965-5978.
- Surappa, M. (2003). *Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities*. Sadhana, 28:1-2, 319-334.
- Şahin, Y. (2000). *Kompozit malzemelere giriş*. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Şahin, Y. (2015). *Kompozit malzemelere giriş (Introduction to composite materials)*: Seçkin Yayıncılık Ankara, Turkey.
- Şenel, M. C. (2018). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalurjisi yoluyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 183, Samsun.
- Şenel, M. C. ve Gürbüz, M. (2019). *Al₂O₃ tanecik boyutunun ve katkı oranının alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerine olan etkisi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9:1, 565-575.
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020a). *The influence of particle size and reinforcement rate of B₄C on mechanical and microstructure properties of Al-B₄C composites*. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8:3, 1864-1876.
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020b). *Microstructure and wear behaviour of graphene-Si₃N₄ binary particle-reinforced aluminium hybrid composites*. Bulletin of Materials Science, 43:1, 148.10.1007/s12034-020-02124-4.
- 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, 2438-2449.10.1007/s12540-019-00592-w.

- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2015). *Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler*. Engineer & the Machinery Magazine:669.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2017a). *Fabrication and characterization of SiC and Si₃N₄ reinforced aluminum matrix composites*. Univers. J. Mater. Sci, 5:4, 95.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2017b). *Seramik katkılı alüminyum matrisli kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi ve karakterizasyonu*. ISMSIT 2017, Gaziosmanpaşa University 1st Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar ve Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, 153-156, Tokat.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2018). *Mechanical and tribological behaviours of aluminium matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets*. Materials Science and Technology, 34:16, 1980-1989.10.1080/02670836.2018.1501839.
- Tandoğan, G. R. (2009). *SiC preform üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 63, İstanbul.
- Tatar, C. and Özdemir, N. (2010). *Investigation of thermal conductivity and microstructure of the α -Al₂O₃ particulate reinforced aluminum composites (Al/Al₂O₃-MMC) by powder metallurgy method*. Physica B: Condensed Matter, 405:3, 896-899.
- Thompson, R., Brotherton, R. and Steinberg, H. (1970). *Progress in boron chemistry*. Brotherton RJ. Pergamon, Oxford, 173-230.
- Topçu, M., Tarakçılar, A. ve Taşgetiren, S. (1991). *Mühendislik malzemesi olarak kompozitler ve özelliklerini belirleyen faktörler*. Mühendis ve Makina, 1, 420.
- Tripathy, S. K. and Senapati, A. K. (2021). *An extensive analysis of mechanical and tribological studies of Al6061 alloy based hybrid composite reinforced with B₄C and Graphene*. Materials Today: Proceedings, 44, 2808-2812.
- Uçak, Y. M. (2018). *Tabakalı karbon elyaf kompozit malzemelerde nano boyutta SiC, NiO, kil ve karbon tüp partikül katkılarının mekanik özelliklere etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 63, Denizli.
- Upadhyaya, G. (2000). *Sintered metallic and ceramic materials-sintered low-alloy ferrous materials*. John Wiley & Sons LTD, West Sussex, England.
- Ürkmez, N. (2004). *AlMg₃/SiCp kompozitlerinin üretimi ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin incelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 119, İstanbul.
- Varol, T. and Çanakçı, A. (2013). *Effect of particle size and ratio of B₄C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al₂₀₂₄-B₄C composite powders*. Powder Technology, 246, 462-472.
- Wang, A., He, Q., Liu, C., Hu, L., Tian, T., Zhang, Z., Xiong, Y., Wang, W., Wang, H. and Fu, Z. (2020). *Microstructure and mechanical properties of boron carbide/graphene nanoplatelets composites fabricated by hot pressing*. Ceramics International, 46:6, 7879-7887.
- 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.
- Weimer, A. W. (2012). *Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing*. Springer Science & Business Media.

- Yalçinkaya, F. (2018). *Toz metalurji metodu ile üretilen alüminyum matrisli ve alümina takviyeli kompozit malzemenin abrasiv aşınma davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 134, Ankara.
- Yılmaz, Ö. (2019). *Atık alüminyum içecek kutuları kullanarak grafen/SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve mekanik karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı, 170, Samsun.
- Yılmaz, R. and Özyürek, D. (2009). *Toz metalurjisi ile üretilen Fe-Cu-C esaslı malzemelerin aşınma özellikleri*. 5st Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Bildiriler Kitabı, 1230-1235.
- Yılmaz, S. S., Ünlü, B. S. ve Varol, R. (2008). *Borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı T/M malzemelerde aşınma ve mikro yapı özelliklerine etkisi*. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4:1, 1-8.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmethan DEMİR, Samsun Tülay Başaran Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimini 2018 yılında tamamladı. Lisans eğitimi sırasında çeşitli mühendislik proje ekiplerinde yer aldı. Lisans mezuniyeti sonrasında üretim ve hizmet sektöründe çeşitli alanlarda çalıştı. 2019 yılında başladığı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans programından 2022 yılında mezun olmuştur. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Temel ilgi ve çalışma alanları kompozit malzemeler, toz metalürjisi, bilgisayar destekli tasarım, ürün geliştirme ve üretimdir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0002-0236-8621

Yayınlar

Demir, M. ve Şenel, M.C., (2021). “*Bor Karbür Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapısının İncelenmesi*”. Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi’nde ICONSAD’21 sunulmuştur, 22-25 Aralık.