

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



**Al7075-Si₃N₄-GRAFEN VE Al7075-B₄C-GRAFEN HİBRİT
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Aleyna Taşkın

Danışman
Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1901.22.008 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Aleyna TAŞKIN tarafından, Doç Dr. Mahmut Can ŞENEL danışmanlığında hazırlanan “Al7075-Si₃N₄-GRAFEN VE Al7075-B₄C-GRAFEN HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 14/08/2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Bilal SUNGUR Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

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

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

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

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

19/06/2023
Aleyna TAŞKIN

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Al₇O₃-Si₃N₄-GRAFEN VE Al₇O₃-B₄C-GRAFEN HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 19.06.2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 10

Tek kaynak oranı : % 4 çıkmıştır.

19/06/2023
Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

ÖZET

Al7075-Si₃N₄-GRAFEN VE Al7075-B₄C-GRAFEN HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Aleyna TAŞKIN
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Ağustos/2023
Danışman: Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

Yapılan bu çalışmada toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri ile Al7075-Si₃N₄-grafen ve Al7075-B₄C-grafen kompozit yapılar üretilmiştir. Al7075 matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12 oranlarında Si₃N₄, %1, 3, 6, 9, 12, 15, 30 oranlarında B₄C ve %0,1, 0,3, 0,5 oranlarında grafen takviye edilmiştir. Katkı oranının ve ısıtma işlem türünün (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme) kompozitlerin mikroyapılarına, mekanik (yoğunluk, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı) ve tribolojik özelliklerine (aşınma oranı, kütle kaybı ve sürtünme katsayısı) olan etkisi incelenmiştir.

Yürütülen testler neticesinde Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yoğun mikroyapıya, en iyi mekanik ve tribolojik özelliklere indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapıda ulaşılmıştır. Bu nedenle grafen katkı oranının etkisini belirlemek amacıyla Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapısına farklı oranlarda grafen ilavesi yapılmıştır. Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitleri arasında en yüksek yoğunluk (2,8 g/cm³), Vickers sertliği (238 HV), basma dayanımı (378 MPa) ve en düşük aşınma oranı (0,00016 mm³/Nm), kütle kaybı (0,0021 g) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen kompozit yapıda elde edilmiştir. Al7075-B₄C kompozitleri arasında ise en yoğun mikroyapı, en iyi mekanik ve tribolojik özellikler %30 B₄C katkı oranında elde edilmiştir. Bu nedenle Al7075-30B₄C kompozit yapısına farklı oranlarda grafen takviye edilmiştir. Al7075-30B₄C-grafen kompozitleri arasında en yüksek yoğunluk (2,64 g/cm³), Vickers sertliği (256 HV), basma dayanımı (526 MPa) ve en düşük aşınma oranı (0,000076 mm³/Nm), kütle kaybı (0,001 g) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozit yapıda elde edilmiştir. Ancak %0,1 grafen katkı oranının üzerinde grafenin topaklanması sebebiyle kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri bozulmuştur.

Sonuç olarak Al7075 matrise belirli oranda Si₃N₄/B₄C ve grafen ilavesi ile kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin sadece sinterleme işlemine kıyasla mikroyapıdaki gözenekliliği azalttığı buna bağlı olarak da kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Al7075, Silisyum Nitrür, Bor Karbür, Grafen, Kompozit, Toz Metalürjisi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Al7075-Si₃N₄-GRAPHENE AND Al7075-B₄C-GRAPHENE HYBRID COMPOSITES

Aleyna TAŞKIN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Master, August/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahmut Can ŞENEL

In this study, Al7075-Si₃N₄-graphene and Al7075-B₄C-graphene composite structures were produced by the powder metallurgy and induction hot pressing methods. Al7075 matrix was reinforced with 1, 3, 6, 9, 12% Si₃N₄, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 30% B₄C and 0.1, 0.3, 0.5% graphene. The effects of reinforcement ratio and heat treatment type (sintering and induction hot pressing) on the microstructure, mechanical (density, porosity ratio, Vickers hardness, compressive strength) and tribological properties (wear rate, mass loss and friction coefficient) of composites were investigated.

As a result of the tests carried out, the densest microstructure and the best mechanical and tribological properties were reached in the induction hot pressed Al7075-9Si₃N₄ composite structure among the Al7075-Si₃N₄ composites. For this reason, graphene was reinforced to the Al7075-Si₃N₄ composite structure in different ratios. Among the Al7075-9Si₃N₄-graphene composites, the highest density (2.68 g/cm³), Vickers hardness (238 HV), compressive strength (378 MPa) and lowest wear rate (0.00016 mm³/Nm), mass loss (0.0021 g) induction hot pressed Al7075-9Si₃N₄-0.1graphene composite structure was obtained. Among the Al7075-B₄C composites, the densest microstructure and the best mechanical and tribological properties were obtained with 30%B₄C content. For this reason, graphene was reinforced to the Al7075-B₄C composite structure in different ratios. Among the Al7075-30B₄C-graphene composites, the highest density (2.64 g/cm³), Vickers hardness (256 HV), compressive strength (526 MPa) and the lowest wear rate (0.000076 mm³/Nm), mass loss (0.001 g) were obtained in the induction hot pressed Al7075-30B₄C-0.1graphene composite structure. However, the mechanical and tribological properties of composites deteriorated due to agglomeration of graphene above 0.1% graphene amount.

As a result, it was determined that the mechanical and tribologic certain amount of Si₃N₄/B₄C and graphene to the Al7075 matrix up to a certain content. In addition, the porosity in the microstructure was reduced by the effect of the induction hot pressing process. Accordingly, it was determined that the mechanical and tribological properties of the composite improved.

Keywords: Al7075, Silicon Nitride, Boron Carbide, Graphene, Composite, Powder Metallurgy

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sırasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, yüksek lisans eğitimime başlamam konusunda bana destek olan ve bu eğitim sırasında bana yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması sırasında değerli bilgilerini benimle paylaşarak bana yol gösteren ve çalışma hayatımda bana her zaman destek olan kıymetli hocalarım Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ, Dr. Öğr. Üyesi Onur YONTAR ve Dr. Öğr. Üyesi Cengiz Görkem DENGİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarını birlikte yürüttüğüm değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Elif IŞIK, Mehmethan DEMİR ve Ömür Ekrem GÜNTÜRK'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkıları olan annem Mevlüde TAŞKIN ve babam Cemal TAŞKIN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Aleyna TAŞKIN

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xii
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.....	5
2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	5
2.2. Si ₃ N ₄ Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	15
2.3. B ₄ C Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	20
3. KOMPOZİT MALZEMELER	26
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Özellikleri	26
3.2. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	28
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	29
3.3.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması	30
3.3.2. Takviye Elemanına Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması	33
4. TOZ METALÜRJİSİ	36
4.1. Toz Metalürjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	37
4.2. Toz Metalürjisi Yönteminin Kullanım Alanları.....	38
4.3. Toz Üretim Yöntemleri	38
4.3.1. Mekanik İşlem Yöntemi	39
4.3.1.1. Talaşlı imalat yöntemleri	39
4.3.1.2. Öğütme yöntemi	39
4.3.1.3. Mekanik alaşımlama yöntemi	39
4.3.2. Elektroliz Yöntemi	40
4.3.3. Atomizasyon Yöntemi	41
4.3.4. Kimyasal Yöntemler	41
4.4. Toz Metalürjisi Yönteminin Temel Üretim Aşamaları	42
4.4.1. Tozların Karıştırılması.....	42
4.4.2. Presleme (Sıkıştırma) İşlemi	42
4.4.3. Sinterleme İşlemi.....	43
4.4.4. İkincil İşlemler	45
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
5.1. Materyal.....	46
5.2. Yöntem	48
5.2.1. Toz Metalürjisi ve İndüksiyonla Sıcak Presleme Yöntemiyle Malzeme Üretimi	50
5.2.1.1. Tozların Karıştırılması İşlemi	50
5.2.1.2. Karışımın Filtrelenmesi İşlemi.....	52
5.2.1.3. Karışımın Kurutulması İşlemi.....	52
5.2.1.4. Karışımın Elenmesi İşlemi.....	53

5.2.1.5.	Tozların Preslenmesi İşlemi	53
5.2.1.6.	Ham Numunelerin Sinterlenmesi İşlemi	55
5.2.1.7.	İndüksiyonla Sıcak Presleme İşlemi	55
5.2.1.8.	Zımparalama ve Parlatma İşlemi.....	57
5.2.2.	Üretilen Numunelerin Karakterizasyonu	58
5.2.2.1.	Yoğunluk Ölçümü	58
5.2.2.2.	Vickers Sertlik Ölçümü	59
5.2.2.3.	Basma Dayanımı Testleri.....	60
5.2.2.4.	Aşınma Testleri	61
5.2.2.5.	Tozların Tane Boyutu Ölçümü.....	62
5.2.2.6.	X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi	63
5.2.2.7.	Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi.....	64
6.	BULGULAR ve TARTIŞMA.....	66
6.1.	Al7075 Matrisli Si ₃ N ₄ /Grafen Takviyeli Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	66
6.1.1.	Al7075, Si ₃ N ₄ ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyut Analizleri.....	66
6.1.2.	Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
6.1.3.	Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
6.1.4.	Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	73
6.1.5.	XRD Faz Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	76
6.1.6.	SEM-EDX Görüntülerinin Değerlendirilmesi.....	77
6.1.7.	Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	83
6.2.	Al7075 Matrisli B ₄ C ve Grafen Takviyeli Kompozitlerin Değerlendirilmesi	89
6.2.1.	Al7075, B ₄ C ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri.....	89
6.2.2.	Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	91
6.2.3.	Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	93
6.2.4.	Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	94
6.2.5.	XRD Faz Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	96
6.2.6.	SEM-EDX Görüntülerinin Değerlendirilmesi.....	97
6.2.7.	Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	104
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	110
7.1.	Al7075 Matrisli Si ₃ N ₄ /Grafen Takviyeli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi..	110
7.2.	Al7075 Matrisli B ₄ C/Grafen Takviyeli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi....	113
7.3.	İleride Yapılabilecek Çalışmalar İçin Öneriler	115
	KAYNAKLAR	117
	ÖZ GEÇMİŞ	127

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alümina
B ₄ C	: Bor karbür
BN	: Bor nitrür
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Mg	: Magnezyum
Si	: Silisyum
Si ₃ N ₄	: Silisyum nitrür
SiC	: Silisyum karbür
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Ti	: Titanyum
Zn	: Çinko
ZrO ₂	: Zirkonya
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-Işını
GNT	: Grafen Nanotabaka
GO	: Grafen Oksit
HB	: Brinell Sertliği
HV	: Vickers Sertliği
HRB	: Rockwell-B Sertliği
KNT	: Karbon Nanotüp
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
TM	: Toz Metalürjisi
XRD	: X-Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kompozit malzeme yapısı.....	26
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	30
Şekil 3.3. Elyaf takviyeli kompozitlerin yapısı.....	34
Şekil 3.4. Parçacık takviyeli kompozitlerin yapısı.....	35
Şekil 3.5. Tabakalı kompozitlerin yapısı.....	35
Şekil 4.1. Toz metalürjisiyle üretilen parçalar	38
Şekil 4.2. Bilyalı öğütücü	39
Şekil 4.3. Mekanik alaşımlama yöntemi ile toz üretimi	40
Şekil 4.4. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi	41
Şekil 4.5. Kimyasal yöntem ile demir tozu üretimi.....	42
Şekil 4.6. İki eksenli presleme işleminin aşamaları	43
Şekil 4.7. Sinterleme işlemi esnasındaki boyun oluşumu	44
Şekil 5.1. Toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretim aşamaları.....	49
Şekil 5.2. Hassas terazi.....	50
Şekil 5.3. Yüksek enerjili bilyalı değirmen	51
Şekil 5.4. Isıtıcı manyetik karıştırıcı	51
Şekil 5.5. Filtreleme işlemi.....	52
Şekil 5.6. Etüv fırın.....	53
Şekil 5.7. Agat havanda ezme işlemi (a) ve elek eleme işlemi (b).....	53
Şekil 5.8. Presleme işleminde kullanılan kalıp ve zımbalar	54
Şekil 5.9. Hidrolik pres makinası.....	54
Şekil 5.10. Sinterleme fırını (a) ve vakum pompası (b)	55
Şekil 5.11. İndüksiyonla sıcak presleme tertibatı	56
Şekil 5.12. Zımparalama ve parlatma cihazı.....	57
Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası numune yüzeyi	58
Şekil 5.14. Vickers sertlik ölçme işleminde kullanılan elmas piramit uç.....	59
Şekil 5.15. Vickers sertlik ölçme cihazı	60
Şekil 5.16. Basma/çekme test cihazı	61
Şekil 5.17. Aşınma test cihazı.....	61
Şekil 5.18. Tane boyut ölçüm cihazı	63
Şekil 5.19. X-ışını kırınım cihazı	64
Şekil 6.1. Al7075 alaşım (a), Si ₃ N ₄ (b) ve grafen (c) tozlarının SEM görüntüleri.....	67
Şekil 6.2. Al7075 alaşım (a), Si ₃ N ₄ (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri	68
Şekil 6.3. Al7075 alaşım (a) ve Si ₃ N ₄ (b) tozlarına ait tane boyut dağılımı	69
Şekil 6.4. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si ₃ N ₄ kompozitlerin ısıtma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri.....	70

Şekil 6.5. Al7075 alaşımı ile Al7075-9Si ₃ N ₄ , Al7075-9Si ₃ N ₄ -grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri.....	71
Şekil 6.6. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si ₃ N ₄ kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri.....	72
Şekil 6.7. Al7075 alaşımı ile Al7075-9Si ₃ N ₄ , Al7075-9Si ₃ N ₄ -grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri.....	73
Şekil 6.8. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımı ile Al7075-Si ₃ N ₄ kompozitlerin basma dayanımı değerleri.....	74
Şekil 6.9. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımı ile Al7075-Si ₃ N ₄ , Al7075-Si ₃ N ₄ -grafen kompozitlerin basma dayanımı değerleri.....	75
Şekil 6.10. Al7075-Si ₃ N ₄ ve Al7075-9Si ₃ N ₄ -grafen kompozitlere ait XRD örgü desenleri...	77
Şekil 6.11. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-3Si ₃ N ₄ (c), Al7075-9Si ₃ N ₄ (e), Al7075-12Si ₃ N ₄ (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-3Si ₃ N ₄ (d), Al7075-9Si ₃ N ₄ (f), Al7075-12Si ₃ N ₄ (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri.....	78
Şekil 6.12. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-9Si ₃ N ₄ (a), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,1grafen (c), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,3grafen (e), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-9Si ₃ N ₄ (b), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,1grafen (d), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,3grafen (f), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri.....	80
Şekil 6.13. Sadece sinterlenmiş Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-k)	81
Şekil 6.14. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-k).....	83
Şekil 6.15. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si ₃ N ₄ kompozitlerin ısı işlem türüne ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri.....	84
Şekil 6.16. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-9Si ₃ N ₄ (c), Al7075-12Si ₃ N ₄ (e) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-9Si ₃ N ₄ (d), Al7075-12Si ₃ N ₄ (f) kompozitlere ait aşınma izleri	85
Şekil 6.17. Al7075 alaşımı ile Al7075-9Si ₃ N ₄ , Al7075-9Si ₃ N ₄ -grafen kompozitlerin ısı işlem türüne ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri	86
Şekil 6.18. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si ₃ N ₄ , Al7075-9Si ₃ N ₄ -grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim eğrileri.....	87
Şekil 6.19. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-9Si ₃ N ₄ (a), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,1grafen (c), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen (e), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen (P=10 N) (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-9Si ₃ N ₄ (b), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,1grafen (d), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen (f), Al7075-9Si ₃ N ₄ -0,5grafen (P=10 N) (h) kompozitlere ait aşınma izleri.....	88
Şekil 6.20. Al7075 alaşım (a), B ₄ C (b) ve grafen (c) tozlarının SEM görüntüleri.....	89
Şekil 6.21. Al7075 alaşım (a), B ₄ C (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri	90
Şekil 6.22. Al7075 alaşım (a) ve B ₄ C (b) tozlarına ait tanecik boyut dağılımı.....	91
Şekil 6.23. Al7075 alaşımı ile Al7075-B ₄ C kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri.....	92

Şekil 6.24. Al7075 alaşımasının, Al7075-30B ₄ C ve Al7075-30B ₄ C-grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri.....	92
Şekil 6.25. Al7075 alaşımı ile Al7075-B ₄ C kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri.....	93
Şekil 6.26. Al7075 alaşımı ile Al7075-30B ₄ C, Al7075-30B ₄ C-grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri.....	94
Şekil 6.27. Al7075 alaşımı ile Al7075-B ₄ C kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak basma dayanımı değerleri	95
Şekil 6.28. Al7075 alaşımı ile Al7075-B ₄ C, Al7075-B ₄ C-grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak basma dayanımı değerleri	96
Şekil 6.29. Al7075-30B ₄ C ve Al7075-30B ₄ C-grafen kompozitlerin XRD örgü desenleri	97
Şekil 6.30. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-6B ₄ C (c), Al7075-15B ₄ C (e), Al7075-30B ₄ C (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-6B ₄ C (d), Al7075-15B ₄ C (f), Al7075-30B ₄ C (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri.....	98
Şekil 6.31. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-30B ₄ C (a), Al7075-30B ₄ C-0,1grafen (c), Al7075-30B ₄ C-0,3grafen (e), Al7075-30B ₄ C-0,5grafen (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-30B ₄ C (b), Al7075-30B ₄ C-0,1grafen (d), Al7075-30B ₄ C-0,3grafen (f), Al7075-30B ₄ C-0,5grafen (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri.....	100
Şekil 6.32. Sadece sinterlenmiş Al7075-30B ₄ C-0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-j)	102
Şekil 6.33. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B ₄ C-0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-k).....	104
Şekil 6.34. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al7075 alaşımına ve Al7075-B ₄ C kompozitlere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri	105
Şekil 6.35. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-15B ₄ C (c), Al7075-30B ₄ C (e) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-15B ₄ C (d), Al7075-30B ₄ C (f) kompozitlere ait aşınma izleri	106
Şekil 6.36. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al7075 alaşımı ile Al7075-30B ₄ C, Al7075-30B ₄ C-grafen kompozitlere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri.....	107
Şekil 6.37. Al7075 alaşımı ile Al7075-30B ₄ C, Al7075-30B ₄ C-grafen kompozitlerin ısı işlem türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim eğrileri.....	108
Şekil 6 38. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-30B ₄ C (a), Al7075-30B ₄ C-0,1grafen (c), Al7075-30B ₄ C-0,5grafen (e), Al7075-30B ₄ C-0,5grafen (P=10 N) (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-30B ₄ C (b), Al7075-30B ₄ C-0,1grafen (d), Al7075-30B ₄ C-0,5grafen (f), Al7075-30B ₄ C-0,5grafen (P=10 N) (h) kompozitlere ait aşınma izleri.....	109

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Kompozitlerin kullanıldığı endüstriler ve uygulama alanları.....	29
Tablo 3.2. MMK malzemelerin uygulama alanları	31
Tablo 4.1. Toz metalürjisi yöntemine ait iş akış basamakları.....	36
Tablo 5.1. Al7075 alaşımının genel özellikleri.....	46
Tablo 5.2. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)	46
Tablo 5.3. Grafenin genel özellikleri	47
Tablo 5.4. Si ₃ N ₄ 'ün genel özellikleri.....	48
Tablo 5.5. B ₄ C'nin genel özellikleri.....	48



1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Günümüzde insan ihtiyaçları doğrultusunda yeni malzemelere yönelim giderek artmaktadır. Seçilen malzemelerin kullanıldığı yere göre dayanımlarının artırılması sağlanabilir. Ancak birden fazla üstün özelliğe aynı anda ihtiyaç duyulduğunda kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır (Yılmaz, 2019). Kompozit malzemeler, farklı üstün özellikleri olan ve birbiri içerisinde çözünmeyen çeşitli malzemelerin makro boyutta bir araya getirilmesiyle oluşan yapılardır. Amaç, kompoziti oluşturan bileşenlerde olmayan daha farklı ve daha iyi özelliklere sahip yeni malzeme elde etmektir. Kompozit malzemeler matris ve takviye fazı olmak üzere birbirini tamamlayan iki ana bileşenden oluşmaktadır. Matris yapı; ana malzeme olup kompozitin bünyesinde takviye elemanlarını bir arada tutar ve malzeme üzerinde oluşan gerilmeleri homojen bir şekilde takviye yapıya dağıtır. Malzemeye bir yük uygulandığında düşük mukavemetli matris yapının şekli bozulur ve gerilmeyi yüksek mukavemetli takviye yapıya dağıtır. Takviye fazı; eğme, çekme ve burulma durumlarında yükü taşıyan ve mekanik özellikleri iyileştiren fazdır. Ayrıca takviye elemanları yüzeylerine yapışan matris yapı sayesinde bir bütün halinde bulunarak rijit kompozit yapıyı oluştururlar (Ak, 2019; Deniz, 2005). Kompozitler; metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Alüminyum (Al) ve alaşımları; düşük yoğunluğa sahip olması, kolay şekillendirilebilmesi ve takviye malzemesi ile iyi uyum göstermesi nedeniyle en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. Saf alüminyumun dayanımının düşük olması uygulamalarda kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu sebeple saf alüminyumun özelliklerinin iyileştirilmesi alaşımlama yapılarak sağlanmaktadır (Erek, 2016; Yıldırım ve Özyürek, 2018). Al7075 alaşımını da içeren 7XXX serisi yüksek mukavemet özelliğine sahip olmaları nedeniyle uçakların gövde ve kanatları başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu serinin en önemli özelliği çökme mukavetlenmesi olarak da bilinen yaşlandırma ısı işlemiyle dayanımlarının yaklaşık iki kat artırılabilmesidir. Yaşlandırma sertleşmesi bazı alüminyum alaşımlarının mukavemetini ve aşınma direncini artırmak için kullanılan alternatif yöntemlerdendir. Alaşımların bileşimi aşınma davranışı ve mukavemet özellikleri

açısından önemlidir. Al7075 alaşımı içerisinde ağırlıkça %5-6 çinko (Zn), %2-2,9 magnezyum (Mg) ve %1,6 oranında bakır (Cu) bulunabilir. Al7075 alaşımları döküm, dövme, ekstrüzyon ve toz metalürjisi gibi yöntemlerle üretilmektedir (Erek, 2016; Yıldırım ve Özyürek, 2018).

Silisyum nitrür (Si_3N_4) yüksek sertlik, aşınma direnci ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin bozulmaması sebebiyle Si_3N_4 üzerine son 30 yıl içerisinde pek çok araştırma yapılmıştır. Seramikler arasında en fazla öneme sahip olan Si_3N_4 'ün uygulama alanı gün geçtikçe artmaktadır (Öztop, 2017). Diğer bir takviye elemanı olan bor karbür (B_4C), 19. yüzyılda keşfedilmiş olup oksit olmayan seramik malzemeler arasında yer almaktadır. Düşük yoğunluğa, kimyasal kararlılığa, yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek sertliğe sahip olmasından dolayı havacılık ve savunma sanayinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bilinen en sert üçüncü malzeme olan B_4C , yüksek aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılmasının yanı sıra aşındırıcı malzeme olarak da kullanılmaktadır (Gündüz, 2018; Kabil, 2020).

Grafen, 2004 yılında keşfedilmiş olup altı adet karbon halkasının bir araya gelmesiyle oluşur. Altıgen kafes yapısına sahip olan grafen, karbon atomunun iki boyutlu biçimidir. Sahip olduğu mükemmel elektriksel özellikler, yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet, termal iletkenlik, olağanüstü elektron taşıma kapasitesi, hafiflik ve incelik gibi üstün özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca elastisite modülü çelikten 100 kat daha fazladır. Günümüze kadar keşfedilen en güçlü yapıdır. Çok düşük miktarda ilave edilmesi ile yüksek mekanik özellikler sergilemesi ve alaşımlama ile ilgili bazı sorunların giderilmesini sağlayan grafenin önemi gün geçtikçe artmaktadır (Korucu ve Gürkan, 2019).

Bu tez çalışmasında toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle Si_3N_4 -grafen ile B_4C -grafen takviyeli Al7075 matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Yapılan bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al7075- Si_3N_4 -grafen ve Al7075- B_4C -grafen kompozit yapıların mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Grafen ve seramik ilavesinin kompozit yapı üzerindeki

etkileri incelenerek, yüksek dayanımlı ve daha iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerin üretilmesi amaçlanmıştır. Havacılık başta olmak üzere birçok alanda grafen kullanımının gün geçtikçe artması ve diğer takviye elemanlarıyla karşılaştırıldığında daha üstün özelliklere sahip olması sebebiyle temel takviye malzemesi olarak grafen tercih edilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı ve aşınma direnci incelenmiştir. Kompozitlerin içyapı görüntüleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM), faz analizleri için X-ışını kırınımı cihazı (XRD) kullanılmıştır. Takviye elemanlarının matris içerisindeki dağılımını görüntülemek için SEM-EDX (Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağıtıcı X-ışını) analizi yapılmıştır.

1.3. Özgün Değer

Literatürde Si_3N_4 -grafen veya B_4C -grafen takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Grafen nanotabaka (GNT); yüksek mukavemet, termal iletkenlik, hafiflik ve incelik gibi üstün özelliklerinden dolayı matrise çok düşük miktarda ilave edildiğinde bile yüksek mekanik özellikler sergilemektedir. Bu sebeple grafen takviyesinin üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmesi ve yüksek yağlayıcılık özelliğinden dolayı aşınma direncini artırıp sürtünme katsayısını düşürmesi beklenmektedir.

Ayrıca yapılan bu çalışmada; üretilen kompozitlere indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozit yapıların mekanik özellikleri ve mikroyapıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

1.4. Tez Düzeni

Çalışmanın ilk bölümünde Al7075 alaşımı, takviye elemanları, kompozit malzemeler ve toz metalürjisi hakkında genel bilgiler verilmiş olup tezin amacı, özgün değeri ve tez düzeni anlatılmıştır. İkinci bölümde Al matrisli grafen, Si_3N_4 ve B_4C takviyeli kompozitler hakkında daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde kompozit malzemelerin tanımı, özellikleri, uygulama alanları ve sınıflandırılmasından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde toz metalürjisinin tanımı, avantaj-dezavantajları, uygulama alanları, üretim yöntemleri ve temel basamakları anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise çalışmada kullanılan materyaller hakkında bilgiler

verilip üretim yöntemi anlatılmıştır. Altıncı bölümde yürütülen testler sonucunda üretilen kompozitlerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, aşınma oranı, kütle kaybı, sürtünme katsayısı ve mikroyapıları incelenmiştir. Yedinci bölümde ise çalışmanın sonuçlarına ve ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilere maddeler halinde yer verilmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde grafen ve $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{B}_4\text{C}$ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

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

Atla ve Kaujala (2020) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle ürettikleri Al7075 esaslı grafit (ağırlıkça %5 ve 10) ve SiC (ağırlıkça %5) takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek yoğunluk ($2,93 \text{ g/cm}^3$) ve sertlik (77 HV) Al7075-5SiC kompozit yapıda elde edilmiştir. Ancak grafit ilavesiyle kompozitlerin yoğunluk ve sertlik değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Azalmanın sebebi grafitin düşük yoğunluğuna bağlanmıştır. Yapılan aşınma testleri (5 N yüklemde, 1000 m mesafede, 1,5 m/s hızda) sonucunda, en düşük kütle kaybı (0,00918 g) ve sürtünme katsayısı (0,1053) Al7075-5SiC-5grafit kompozitte tespit edilmiştir. Ancak ağırlıkça %10 grafit takviyesiyle mekanik ve tribolojik özelliklerin olumsuz etkilendiği belirtilmiştir (Atla ve Kaujala, 2020).

Baig vd. (2018) yaptıkları çalışmada, bilyalı öğütme yöntemiyle alüminyum matrisli grafen nanotabaka (ağırlıkça %0,5, 1 ve 1,5) takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. Farklı sıkıştırma basınçları (300, 400, 500 ve 600 MPa) altında üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Sıkıştırma basıncının artmasıyla kompozitlerin yoğunluklarında artış belirlenmiştir. En yüksek sertlik değeri (80 HV); 500 MPa basınç altında ve ağırlıkça %1,5 katkı oranında elde edilmiştir. Ancak grafen takviye oranının artmasıyla yoğunluk değerlerinde azalma tespit edilmiştir (Baig vd., 2018).

Darshan vd. (2018) tarafından, karıştırmalı döküm metoduyla üretilen Al7075 matrisli grafen (ağırlıkça %0,25, 0,5, 0,75 ve 1) takviyeli kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler neticesinde en yüksek çekme dayanımı (329,34 MPa) ve akma dayanımı (290,17 MPa) ağırlıkça %1 grafen katkı oranında elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri (79,57 HB) %0,5 katkı oranında tespit edilmiştir. Ancak grafenin sünek özelliğinden dolayı takviye miktarının artmasıyla sertliğin azaldığı belirtilmiştir. Aşınma testinde ise grafen miktarının artması ile aşınma dayanımının arttığı görülmüştür (Darshan vd., 2018).

Dasari vd. (2018), toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum esaslı grafen oksit (ağırlıkça %0,05, 0,1 ve 0,2) takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlere 600°C sıcaklıkta ve 4 saat süresince sinterleme işlemi uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda grafen oksit katkı oranının artmasıyla mikrosertliğin arttığı belirlenmiştir. En yüksek sertlik (~36 HV) %0,2 katkı oranında tespit edilmiştir. Sertliğin artmasının sebebi takviye oranının artmasıyla mikroyapının daha fazla yoğunlaşmasına bağlanmıştır (Dasari vd., 2018).

Dong vd. (2020) çalışmalarında, döküm yöntemiyle elde ettikleri grafen (ağırlıkça %0,2) takviyeli Al7075 matrisli kompozit yapılara tavlama işlemi uygulamışlardır. Yapılan mikroyapı incelemelerinde, grafen takviyeli kompozitin tane boyutunun (45 µm), Al7075 alaşımının tane boyutuna (78 µm) kıyasla daha küçük ve tane dağılımının daha homojen olduğu belirtilmiştir. İnceleme sonucunda grafen takviyesinin, döküm metoduyla üretilen kompozitlerin termal özellikleri üzerine etkisinin az olduğu, ancak 470°C sıcaklıkta ve 16 saat süresince yapılan tavlama işleminin etkisinin oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir (Dong vd., 2020).

Du vd. (2018a) yaptıkları çalışmada, grafen (ağırlıkça %0,25, 0,5 ve 1) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretmişlerdir. Grafen ve alüminyum arasındaki arayüzü iyileştirmek için grafen, kimyasal kaplama yöntemi kullanılarak bakırla kaplanmıştır. Grafenin matris içerisine homojen dağılımı için bilyalı öğütme ve kompozit mukavemetini artırmak için sıcak presleme yöntemi kullanılmıştır. Saf alüminyumla kıyaslandığında, ağırlıkça %0,5 oranında grafen takviyeli kompozitte çekme dayanımı %31, süneklik %30,6 oranında artmıştır. Mukavemet ve sünekliğin, grafenin alüminyum matris içerisinde homojen dağılmasından dolayı arttığı belirtilmiştir. Ancak ağırlıkça %1 katkı oranında, grafenin topaklanma eğiliminden dolayı kompozitin mukavemetinin azaldığı tespit edilmiştir (Du vd., 2018a).

Du vd. (2018b) tarafından yapılan çalışmada, grafen (ağırlıkça %1) ve SiC (ağırlıkça %0,25, 0,5, 1, 1,5, 2) takviyeli Al7075 matrisli kompozitler bilyalı öğütme ve vakum altında sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen kompozitlere 610°C sıcaklıkta, 50 MPa basınçta ve 90 dk süresince sinterleme işlemi yapılmıştır. X-ışını kırınım analizleri incelendiğinde; kompozit yapıda Al₄C₃ gibi ikincil faz oluşumu gözlemlenmemiştir. SiC nanopartiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı belirtilmiştir. Al7075 alaşımının Vickers sertliğiyle (92 HV)

kıyaslandığında, en yüksek sertlik değeri (158 HV), %2 SiC ve %1 grafen takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Sertliğin artmasına bağlı olarak, aşınma direncinde artış ve sürtünme katsayısında azalış olduğu belirlenmiştir (Du vd., 2018b).

Hadad vd. (2020), farklı oranlarda (ağırlıkça %0,01, 0,05 ve 0,1) karbon nanotüp ve grafen nanotabaka takviyeli A356 matrisli nanokompozitleri karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda hem karbon nanotüp hem de grafen nanotabaka takviyeli kompozitlerde en iyi mekanik özellikler %0,1 katkı oranında elde edilmiştir. Karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde basma dayanımı ve sertliğin sırasıyla 365,5 MPa ve 88,4 HV, grafen nanotabaka takviyeli kompozitlerde ise basma dayanımı ve sertliğin sırasıyla 519 MPa ve 85,1 HV olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak alüminyum matrise grafen nanotabaka ve karbon nanotüp eklenmesiyle mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir (Hadad vd., 2020).

Han vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, bilyalı öğütme ve sıcak ekstrüzyon yöntemleri kullanılarak bakır nano partikülleriyle kaplı grafen nanotabaka (ağırlıkça %1, 2,5 ve 3) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak en yüksek değerler %2,5 grafen katkı oranında belirlenmiştir. Saf alüminyumla kıyaslandığında %2,5 grafen nanotabaka takviyeli kompozitte akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin sırasıyla %160, %130 ve %115 oranında arttığı tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıkta bilyalı öğütme işleminin, grafenin matris içerisindeki dağılımını iyileştirdiği ve kompozitin mekanik özelliklerini arttırdığı belirtilmiştir (Han vd., 2020).

Hemalatha vd. (2021), yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm yöntemiyle SiC (ağırlıkça %10, 15 ve 16) ve grafen (ağırlıkça %1) takviyeli Al7075 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda en iyi değerler Al7075-15SiC-1grafen kompozitte elde edilmiştir. Sertlik değeri, çekme dayanımı ve darbe enerjisi Al7075 alaşımında sırasıyla 70,4 HR, 225,59 MPa ve 0,4 Joule iken; Al7075-15SiC-1grafen kompozitte sırasıyla; 94,8 HR, 266,62 MPa ve 1,4 Joule'e yükselmiştir. Aşınma test sonuçları incelendiğinde Al7075-15SiC-1grafen kompozitin kütle kaybının Al7075 alaşımıyla kıyaslandığında %46,4 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Ağırlıkça %16 SiC katkısında partiküllerin matris içerisinde homojen dağılmaması sebebiyle mekanik özelliklerin bozulduğu belirtilmiştir (Hemalatha vd., 2021).

Khan vd. (2017) tarafından, toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum matrise ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında grafen takviye edilerek kompozit yapılar üretilmiştir. Grafenin alüminyum matris içerisine homojen dağılmasını sağlamak için bilyalı öğütme işleminin yapıldığı belirtilmiştir. Kompozitlere uygulanan testler sonucunda sertlik, basma ve eğme dayanımı saf alüminyumda sırasıyla 22 HV, 15 MPa ve 60 MPa iken; ağırlıkça %5 oranında grafen takviyeli kompozitte bu değerler sırasıyla 28 HV, 82 MPa ve 230 MPa'a yükselmiştir. Mikroyapısal gelişme ve grafenin matris içerisine homojen olarak dağılmasından dolayı mekanik özelliklerde iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir (Khan vd., 2017).

Khan vd. (2020) yaptıkları çalışmada, spark plazma sinterleme metoduyla grafen (ağırlıkça %0,1, 0,5 ve 1) takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerde grafen katkı oranının kompozitin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Grafenin matris içerisine homojen bir şekilde dağılması için bilyalı öğütme yöntemi kullanılmıştır. Vickers sertliği Al6061-T6 yapıda 72 HV iken; Al6061-1GNT-T6 kompozit yapıda 90 HV'ye yükselmiştir. En yüksek çekme dayanımı (373 MPa) Al6061-0,5GNT-T6 kompozit yapıda tespit edilmiştir. Sonuç olarak tane sınırlarına yayılmaya başlayan grafen, dislokasyonlarla etkileşime geçerek tane inceltmeye yol açtığından kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir (Khan vd., 2020).

Khanna vd. (2023) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle grafen takviyeli (ağırlıkça %0-1 katkı oranlarında) Al matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Al-grafen kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. En iyi özellikler ağırlıkça %0,5 grafen katkı oranında elde edilmiştir. Bu katkı oranında kompozitin basma dayanımı ve Vickers sertliği; saf alüminyuma kıyasla sırasıyla %70 ve 73 oranlarında artmıştır. Ayrıca en yüksek çekme dayanımı saf alüminyuma kıyasla %135 oranında artışla %0,35 katkı oranında tespit edilmiştir. Sonuç olarak grafenin yüksek basma dayanımı ve yüksek sertliğinden dolayı kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir (Khanna vd., 2023).

Khoshghadam-Pireyousefan vd. (2020) çalışmalarında, alüminyum matrisli grafen oksit (ağırlıkça %0,3, 0,5, 0,7 ve 1) ve Cu (ağırlıkça %4) takviyeli kompozit

üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretim sırasında yüksek enerjili bilyalı öğütme, moleküler seviyede karıştırma ve spark plazma sinterleme yöntemleri kullanılmıştır. Spark plazma sinterleme işleminin yüksek yoğunlukta nanokompozitler elde edilmesinde etkili olduğu belirlenmiştir. Al-4Cu alaşımına kıyasla %1 oranında grafen oksit takviyeli nanokompozitin Vickers sertliğinde, akma ve çekme dayanımında sırasıyla %44, %78 ve %49 oranında artış tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde grafen oksitin matris içerisinde homojen dağılması ve matrisle aralarındaki güçlü bağdan dolayı kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir (Khoshghadam-Pireyousefan vd., 2020).

Lokesh vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, karıştırmalı döküm metoduyla üretilen Al7075 esaslı grafen (ağırlıkça %0,5, 1, 1,5 ve 2) takviyeli kompozit yapıların sertlik değerleri incelenmiştir. Yürütülen testler neticesinde en yüksek sertlik (75 HR), ağırlıkça %0,5 grafen takviyeli kompozitte belirlenmiştir. Artışın sebebi, grafenin matris içerisinde homojen dağılmasına bağlanmıştır. Ağırlıkça %0,5 katkı oranının üzerinde, grafenin topaklanması sebebiyle kompozitin sertliğinin düştüğü belirtilmiştir (Lokesh vd., 2017).

Lou vd. (2020) yaptıkları çalışmada, grafen nanotabaka (ağırlıkça %0,5) takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri; ultrasonik karıştırma, bilyalı öğütme, soğuk presleme ve vakum altında sıcak presleme işlemleriyle üretmişlerdir. Öğütme süresinin (2, 4, 6 ve 8 saat) ve öğütme hızının (200 ve 300 dev/dk) kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda en iyi homojen dağılım ve en iyi mekanik özellikler %0,5 oranında grafen nanotabaka takviyeli kompozitte, 300 dev/dk öğütme hızında ve 6 saat öğütme süresinde tespit edilmiştir. Saf alüminyumun çekme dayanımı 101,1 MPa iken; ağırlıkça %0,5 oranında grafen nanotabaka takviyeli kompozitte çekme dayanımı 156,8 MPa'a yükselmiştir (Lou vd., 2020).

Patil vd. (2021), grafen (ağırlıkça %2) ve berilyum (ağırlıkça %6) takviyesinin Al7075 matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen kompozitlerin Al7075 alaşımına kıyasla sertliğinin, akma dayanımının ve çekme dayanımının sırasıyla; %49,41, %65,5 ve %66,38 oranında arttığı tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerin iyileşmesinde, matris

yüzeyinin genişlemesi ve takviye partiküllerinin matris malzemesine göre daha sert olmasının etkisi olduğu belirtilmiştir (Patil vd., 2021).

Patil ve Haneef (2019), karıştırmalı döküm yöntemiyle grafen nanotabaka (ağırlıkça %0,5, 1, 1,5 ve 2) ve berilyum (ağırlıkça %6) takviyeli Al7075 matrisli kompozit yapıları üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Berilyum, grafen ve matris arasında güçlü bir bağ olduğu ve takviye elemanlarının matris içerisine homojen şekilde dağıldığı belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek değerler Al7075-6Be-2GNT kompozit yapıda tespit edilmiştir. Al7075-6Be-2GNT kompozitte çekme dayanımı (231,86 MPa), akma dayanımı (199,35 MPa) ve sertlik değerinin (126,7 HB) Al7075 alaşımına kıyasla sırasıyla %77,09, %75,21 ve %49,41 oranında arttığı belirlenmiştir. Kompozit yapıya yük uygulandığında takviye elemanlarının dislokasyonlara karşı bariyer görevi görmesi ve berilyum partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı kompozitin mekanik özellikleri iyileşmiştir (Patil ve Haneef, 2019).

Radha vd. (2020) yaptıkları çalışmada, grafen nanotabaka (ağırlıkça %0,1, 0,2 ve 0,3) ve B₄C (ağırlıkça %5, 10 ve 15) takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. En yüksek çekme dayanımı (168 MPa) ve sertlik değeri (78 HV) Al7075-10B₄C-0,2GNT kompozitte belirlenmiştir. Yapılan aşınma testleri sonucunda en düşük aşınma oranı Al7075-10B₄C-0,2GNT kompozitte, 5 N yüklemde ve 3000 m kayma mesafesinde tespit edilmiştir (Radha vd., 2020).

Raj vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen Al7075 matrisli grafen (ağırlıkça %0,25, 0,5, 0,75 ve 1) takviyeli mikrokompozit ve nanokompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozitlere, 600°C sıcaklıkta 1 saat süresince argon gazı altında sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme sonrasında nanokompozitlerin yoğunluğunun, azaltılmış partikül boyutundan dolayı mikrokompozitlerin yoğunluğuna kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Her iki kompozit türünde de grafen miktarının artmasıyla yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Nanokompozitler ile mikrokompozitler arasında en yüksek sertlik %1 katkı oranında sırasıyla 106,4 HV ve 60,13 HV olarak belirlenmiştir. Ayrıca aşınma oranının mikrokompozitlerde nanokompozitlere kıyasla

daha fazla olduğu ve her iki kompozitte de aşınma oranının ağırlıkça %0,75 grafen takviyesine kadar azaldığı belirtilmiştir (Raj vd., 2021).

Reddy vd. (2019) yaptıkları çalışmada, karıştırmalı döküm metoduyla Al7075 alaşımına ağırlıkça %2, 4 ve 6 oranlarında grafen ve alümina takviye ederek kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek çekme dayanımı (146 MPa), basma dayanımı (280,75 MPa) ve sertlik (199 HB) ağırlıkça %6 oranında grafen-alümina takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, grafen ve alümina partiküllerinin matris içerisine homojen şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak Al7075 matrise grafen-alümina takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği belirtilmiştir (Reddy vd., 2019).

Saravanan vd. (2020), karıştırmalı döküm yöntemiyle SiC (ağırlıkça %10) ve grafen (ağırlıkça %3 ve 6) takviyeli Al7075 matrisli kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek sertlik Al7075-10SiC-3grafen kompozitte 222 HV olarak tespit edilmiştir. Ancak ağırlıkça %3'ün üzerinde grafen ilavesinde kompozitlerin sertliğinin azaldığı belirtilmiştir. En yüksek çekme dayanımına (200 MPa) ise, Al7075-10SiC-%6grafen kompozit yapıda ulaşılmıştır. Ayrıca grafen takviye oranının artmasıyla darbe dayanımının da arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak Al7075 matrise SiC ve belirli oranda grafen takviyesiyle mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir (Saravanan vd., 2020).

Shao vd. (2020) yaptıkları çalışmada, basınçlı infiltrasyon yöntemiyle grafen (ağırlıkça %0,6) takviyeli Al6061 matrisli kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlere farklı sıcaklıklarda (420, 450, 500°C) ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda 450°C sıcaklıkta ekstrüzyon işlemi uygulanan kompozitlerin, saf alüminyuma kıyasla akma ve çekme dayanımlarının %16,8 ve %40,1 oranında artarak 389 MPa ve 500 MPa'a yükseldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak ekstrüzyon sıcaklığının grafenin matris içerisinde dağılımını ve kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği belirtilmiştir (Shao vd., 2020).

Sun vd. (2017), toz metalürjisi metoduyla Al7075 alaşımına ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,50 oranlarında grafen oksit takviye ederek kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere 560°C sıcaklıkta 120 dk süresince sinterleme işlemi ve 450°C

sıcaklıkta ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Yürütülen testler neticesinde en yüksek akma dayanımı (385 MPa) ve çekme dayanımı (505 MPa) ağırlıkça %0,30 oranında grafen oksit takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Al7075 alaşımına göre %0,30 grafen takviyesinde akma dayanımı ve çekme dayanımının sırasıyla %15,6 ve %11,7 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ancak %0,50 oranında grafen oksit takviyesinde Al₄C₃ miktarı ve çatlakların artması nedeniyle kompozitlerin akma dayanımı ve çekme dayanımında azalma olduğu tespit edilmiştir. Takviye miktarının artmasına bağlı olarak kompozitin sertlik değerinin arttığı ve uzama miktarının azaldığı belirtilmiştir (Sun vd., 2017).

Şenel vd. (2017) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi metoduyla elde ettikleri alüminyum esaslı kompozitlerde, grafen katkı oranının (ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5), sinterleme süresinin (20, 60, 90, 120, 180 ve 300 dk) ve sinterleme sıcaklığının (550, 600 ve 630°C) mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda en yüksek sertlik (57 HV) ve yoğunluk (2.52 g/cm³) %0,1 katkı oranında, 630°C sinterleme sıcaklığında ve 180 dk sinterleme süresinde tespit edilmiştir. 180 dk'nın üzerindeki sinterleme süresinde tane büyümesinden dolayı kompozitin sertliğinin düştüğü belirtilmiştir. Alüminyum matrise ağırlıkça %0,1 grafen katkısından sonra kompozitlerin mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir (Şenel vd., 2017).

Şenel vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle SiC (ağırlıkça %0-30) ve grafen nanotabaka (ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. SiC ve grafen nanotabaka katkı oranının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Grafen nanotabaka ve SiC takviyeli kompozitler arasında en yüksek sertlik değeri sırasıyla %0,1 (57 HV) GNT ve %30 (79 HV) SiC katkı oranında belirlenmiştir. Hibrit kompozitler arasında en yüksek sertlik değeri (85 HV), Al-30SiC-0,5GNT kompozit yapıda tespit edilmiştir. Sertlik değerindeki artışın SiC partiküllerinin yüksek sertliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca en yüksek basma dayanımına (271 MPa) Al-30SiC-0,1GNT kompozitte ulaşılmıştır. Katı yağlayıcılık özelliğine sahip olan grafen nanotabaka katkısının artmasıyla, kompozitin kolay şekilde plastik deformasyona uğradığı ve grafenin topaklanma eğilimine girdiği bu durumun da mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir (Şenel vd., 2018).

Şenel vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, toz metalürjisi metoduyla alüminyum matrisli Si_3N_4 (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12) ve grafen nanotabaka (ağırlıkça 0,1, 0,3 ve 0,5) takviyeli kompozitler üretilmiştir. Elde edilen Si_3N_4 takviyeli kompozitler arasında en yüksek yoğunluk ($2,57 \text{ g/cm}^3$), sertlik (57,5 HV) ve basma dayanımı (268 MPa) Al-%9 Si_3N_4 kompozit yapıda tespit edilmiştir. Ağırlıkça %9 oranının üzerinde Si_3N_4 takviyesi yapıldığında Si_3N_4 'ün topaklanması nedeniyle yoğunluk, sertlik ve basma dayanımının azaldığı belirtilmiştir. GNT ve Si_3N_4 takviyeli kompozitlerde en yüksek sertlik (82,3 HV) Al-9 Si_3N_4 -0,5GNT kompozitte belirlenmiştir. En yüksek basma dayanımı (334 MPa) ve yoğunluk ($2,59 \text{ g/cm}^3$) ise Al-9 Si_3N_4 -0,1GNT kompozitte elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,1 oranının üzerinde grafen nanotabaka takviyesinde, grafenin topaklanma eğiliminden dolayı kompozitin basma dayanımının ve yoğunluğunun azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak Si_3N_4 'ün yüksek basma dayanımının ve grafenin üstün özelliklerinin, alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine olumlu bir etki yarattığı belirtilmiştir (Şenel vd., 2019).

Wang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, toz metalürjisi ve sıcak ekstrüzyon yöntemleri kullanılarak Al7075 matrisli kompozitler üretilmiştir. Al7075 alaşımına ağırlıkça %0,5 ve %1 oranlarında grafen nanotabaka katkısı yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek sertlik (137 HV), akma dayanımı (275 MPa) ve çekme dayanımı (385 MPa) ağırlıkça %1 oranında grafen takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Al7075 alaşımıyla karşılaştırıldığında ağırlıkça %1 oranında grafen takviyeli kompozitte sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımının sırasıyla %69,1, %59,9 ve %51,6 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bilyalı öğütme işleminin, grafen nanotabakaların matris içerisine homojen şekilde dağılmasında önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Ayrıca sıcak presleme ve sıcak ekstrüzyon işlemleri, kompozitlerin yoğunluğunu önemli oranda arttırmıştır. Sonuç olarak, grafenin Al7075 matrise iyi bir takviye elemanı olabileceği belirtilmiştir (Wang vd., 2017).

Xia vd. (2020) yaptıkları çalışmada, spark plazma sinterleme yöntemiyle ağırlıkça %0,3 oranında grafen nanotabaka takviyeli Al7075 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. SEM analizleri incelendiğinde grafen partiküllerinin matris içerisine homojen şekilde dağıldığı belirlenmiştir. Yapılan mekanik testler neticesinde

kompozit yoğunluğunun ve aşınma oranının, Al7075 alaşımının yoğunluğuna ve aşınma oranına kıyasla daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu durumun sebebi, grafenin gözenekliliği belirli ölçüde artırıp yoğunluğu azaltan oksijen ve nitrojen gibi gaz elementlerini kolayca çekmesine bağlanmıştır. Kompozitin sertliğinin (124,9 HV) ve elastisite modülünün (135 GPa), Al7075 alaşımıyla kıyaslandığında %29 ve %36 oranında arttığı tespit edilmiştir (Xia vd., 2020).

Xu vd. (2020) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi ve sıcak ekstrüzyon yöntemleriyle, grafen oksit (ağırlıkça 0,3) ve karbon nanotüp (ağırlıkça %1) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde takviye elemanlarının matris içerisine homojen şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Yürütülen testler sonucunda, saf alüminyumun çekme dayanımı ve akma dayanımı sırasıyla 175 MPa ve 119 MPa iken; grafen oksit ve karbon nanotüp takviyeli kompozitte çekme dayanımının ve akma dayanımının 249 MPa ve 175 MPa'a yükseldiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda kompozitin mekanik özelliklerinin grafen oksit ve karbon nanotüp takviyesiyle önemli ölçüde iyileştiği belirtilmiştir (Xu vd., 2020).

Yang vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilen ağırlıkça %0,54 oranında grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Saf alüminyumla karşılaştırıldığında kompozitlerin çekme dayanımı ve akma dayanımlarında ekstrüzyondan önce %45 ve %116 oranında artış meydana gelirken; ekstrüzyondan sonra akma ve çekme dayanımlarının %93 ve %228 oranında arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, grafenin güçlendirme etkisinin kompozitin mekanik özelliklerini ekstrüzyon işleminden sonra daha fazla iyileştirdiği tespit edilmiştir (Yang vd., 2018).

Zhang vd. (2020) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yoluyla SiC-grafit ve SiC-grafen nanotabaka takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Alüminyuma göre ağırlıkça %5 oranında SiC, %1 oranında GNT ve %1 oranında grafit katkısı yaparak elde ettikleri kompozitlerin mikroyapılarını ve takviye elemanlarının dağılımını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, SiC-GNT takviyesinin matris içerisine, SiC-grafit takviyesine göre daha homojen dağıldığı belirlenmiştir. SiC-grafit

takviyeli kompozitte 10 µm boyutuna kadar grafit kümelerinin varlığı tespit edilmiştir (Zhang vd., 2020).

2.2. Si₃N₄ Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Abdelatty vd. (2021) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle grafen nanotabakaka (ağırlıkça %0,5, 1 ve 1,5) ve Si₃N₄ (ağırlıkça %5) takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Takviye oranının üretilen kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Saf alüminyumun deneysel yoğunluk değeri, akma dayanımı ve basma dayanımı sırasıyla 2,57 g/cm³, 49 MPa ve 307 MPa iken; bu değerler ağırlıkça %0,5 GNT takviyesinde sırasıyla 2,58 g/cm³, 92 MPa ve 345 MPa değerlerine yükselmiştir. Ağırlıkça %0,5 katkı oranının üzerindeki GNT takviyesinde grafenin topaklanma eğiliminden dolayı yoğunluk, akma dayanımı ve basma dayanımında düşüş tespit edilmiştir. Sertlik ölçme test sonuçlarına göre ağırlıkça %1,5 GNT takviyeli kompozitin mikrosertliğinin saf alüminyuma kıyasla %35,4 oranında arttığı belirtilmiştir (Abdelatty vd., 2021).

Arık (2019) yaptığı çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum matrisle farklı oranlarda (ağırlıkça %5, 10 ve 15) α-Si₃N₄ takviye ederek kompozit yapılar üretmiştir. Üretilen kompozit yapıların mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla şekil değişimi sınırlanmış ve kompozitlerin sertlik değeri artmıştır. En yüksek sertlik değeri ağırlıkça %15 katkı oranında (76,1 HB) elde edilmiştir. Ayrıca farklı yüklerde (5, 10, 15 N) yapılan aşınma testlerine göre aşınma direncinin uygulanan yük arttıkça azaldığı, takviye oranı arttıkça arttığı belirtilmiştir (Arık, 2019).

Bhuvanesh vd. (2017) yaptıkları çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle LM25 matrisli Si₃N₄ (ağırlıkça %10) takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin kuru şartlar altında aşınma davranışını incelemişlerdir. Farklı yükler (10, 20, 30 N) altında, farklı kayma hızlarında (1,5, 3, 4,5 m/s) ve farklı kayma mesafelerinde (400, 800, 1200 m) aşınma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Aşınma direncini; yükün %25,58, kayma hızının %16,28 ve kayma mesafesinin %19,77 oranında etkilediği belirtilmiştir. Testler neticesinde, LM25-10Si₃N₄ kompozitler için

en iyi tribolojik özellikler 10 N yüklemede, 3 m/s kayma hızında ve 1200 m kayma mesafesinde elde edilmiştir (Bhuvanesh vd., 2017).

Dwivedi (2023) çalışmasında toz metalürjisi yöntemini kullanarak Al matrisli Al_2O_3 (ağırlıkça %5 katkı oranında) ve Si_3N_4 (ağırlıkça %2,5-7,5 katkı oranında) takviyeli kompozit malzemeleri üretmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapısı incelendiğinde Al-5 Al_2O_3 -5 Si_3N_4 yapısında takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı belirlenmiştir. Yürütülen testler neticesinde Al-5 Al_2O_3 -5 Si_3N_4 kompozitin sertliğinin, basma dayanımının ve çekme dayanımının saf Al'ye göre sırasıyla %82,85, 18,94 ve 62,60 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Al matrise belirli oranlarda Al_2O_3 ve Si_3N_4 takviyesinin kompozitin mekanik özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir (Dwivedi, 2023).

Fayomi vd. (2019) çalışmalarında Al8011 matrisli ZrB_2 ve Si_3N_4 (ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20) takviyeli kompozitleri karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Katkı oranının kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Yürütülen deneyler sonucunda katkı oranının artmasıyla sert ZrB_2 - Si_3N_4 parçacıkları kompozit yapı içerisinde dislokasyon hareketlerini kısıtlamıştır. Bunun sonucunda kompozitlerin sertlik değerlerinde, çekme ve akma dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Ayrıca takviye elemanlarının homojen dağılmasının kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir (Fayomi vd., 2019).

Haq ve Anand (2018) çalışmalarında, karıştırmalı döküm tekniğiyle Al7075 matrisli Si_3N_4 takviyeli kompozitleri üreterek takviye oranının (ağırlıkça %2, 4, 6 ve 8), sertlik ölçme testindeki bekleme süresinin (1, 5, 10 sn) ve sertlik ölçme testindeki uygulanan yükün (1, 2, 3, 5 N) kompozitlerin sertliği üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde Si_3N_4 parçacıklarının yüksek sertliğinden dolayı katkı oranı arttıkça mikrosertliğin arttığı, bekleme süresinin ve uygulanan yükün artmasıyla mikrosertliğin azaldığı belirlenmiştir (Haq ve Anand, 2018).

Kumar vd. (2019), karıştırmalı döküm yöntemi kullanarak Al6063 alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10) Si_3N_4 takviye ederek kompozit yapılar üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere mekanik testler uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda en yüksek değerler %10 katkı oranında elde edilmiştir. Al6063-%10 Si_3N_4 kompozitte sertlik, yoğunluk ve çekme dayanımı Al6063 alaşımına kıyasla sırasıyla %86, %1,74 ve %77 oranında artmıştır. Bunun sebebi; Si_3N_4 partiküllerinin yüksek

sertliğine, yüksek yoğunluğuna ve matris içerisindeki dağılımına bağlanmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre takviye oranının artmasıyla aşınmaya karşı direncin artarak kütle kaybının azaldığı tespit edilmiştir (Kumar vd., 2019).

Kumar vd. (2020) yaptıkları çalışmada, karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al7075 alaşımına ağırlıkça %4, 8 ve 12 oranlarında Si_3N_4 takviye ederek kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, Si_3N_4 partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı Si_3N_4 katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertlik değerleri artmıştır. En yüksek sertlik değeri Al7075-12 Si_3N_4 kompozitte elde edilmiştir. Ancak kompozit yapılarıdaki gözeneklilik oranının takviye miktarının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Çift karıştırma tekniğinin kullanılmasıyla katılma sırasında gaz sıkışmasının engellenerek gözeneklilik oranındaki artışın önlenilebileceği belirtilmiştir (Kumar vd., 2020).

Mattli vd. (2019), toz metalürjisi yöntemiyle nano Si_3N_4 (ağırlıkça %1, 2 ve 3) takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Takviye oranının kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. EDX ve SEM analizlerine göre Si_3N_4 'ün alüminyum matris içerisine homojen dağıldığı belirlenmiştir. Saf alüminyumun mikrosertliği 38 HV, akma dayanımı 70 MPa, basma dayanımı 305 MPa iken; ağırlıkça %3 Si_3N_4 takviyeli kompozit yapıda bu değerlerin sırasıyla 77 HV, 127 MPa ve 364 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Si_3N_4 'ün yüksek yoğunluğuna bağlı olarak takviye oranı arttıkça kompozit yapıların yoğunluğunda artış meydana geldiği belirtilmiştir (Mattli vd., 2019).

Mistry ve Gohil (2019), elektromanyetik karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al7075 matrisli Si_3N_4 takviyeli (ağırlıkça %4, 8 ve 12) kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek sertlik değeri (203 HV), takviye elemanının deformasyonu azaltmasından dolayı Al7075-12 Si_3N_4 kompozitte elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımına (329 MPa) ise Al7075-%8 Si_3N_4 kompozitte ulaşılmıştır. Ancak ağırlıkça %8 katkı oranından sonra taneciklerin kümelenmesi sebebiyle çekme dayanımı 312 MPa'a düşmüştür. Kütle kaybının ağırlıkça %4, 8 ve 12 katkı oranlarında sırasıyla %11,64, 24,61 ve 37,17 oranında azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca kayma hızının artmasıyla kütle kaybının azaldığı, kayma mesafesi ve yükün artmasıyla arttığı belirlenmiştir (Mistry ve Gohil, 2019).

Mohanavel vd. (2020) çalışmalarında karıştırmalı döküm metoduyla Al6351 matrisli Si₃N₄ takviyeli (ağırlıkça %1, 2 ve 3) kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SEM, XRD ve EDX analizi sonuçlarına göre Si₃N₄ takviyesinin matris içerisindeki varlığı doğrulanmış ve homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan mekanik testlerin sonuçlarına göre en yüksek mikro sertlik (94 HV) ve çekme dayanımı (13 MPa) Al6351-3Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. 15, 25 ve 35 N yüklemede yapılan aşınma testlerinde, en düşük aşınma oranı ağırlıkça %3 Si₃N₄ takviyesinde elde edilmiştir. Sonuç olarak takviye oranının artmasının kompozitin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir (Mohanavel vd., 2020).

Öztop ve Gürbüz (2021) çalışmalarında, atık alüminyum içecek kutularının ergitilmesiyle elde edilen matrise, ağırlıkça %0,5, 0,75 ve 1 oranlarında Si₃N₄ takviye ederek ürettikleri kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Saf alüminyumun yoğunluğu 2,53 g/cm³, sertliği 70 HV, gözeneklilik oranı %36, çekme dayanımı 54,5 MPa ve darbe dayanımı 4,94 J iken; %1 Si₃N₄ takviyeli kompozitte bu değerlerin sırasıyla 2,6 g/cm³, 87,9 HV, %6,35, 105,17 MPa ve 13,18 J olduğu belirlenmiştir. Yapmış oldukları mikroyapı incelemelerinde takviye fazının matris içerisinde homojen şekilde dağıldığını gözlemlemişlerdir. Si₃N₄ katkı oranının artmasıyla kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir (Öztop ve Gürbüz, 2021).

Ramesh vd. (2009) karıştırmalı döküm tekniğiyle Al6061 matrisli Si₃N₄ (ağırlıkça %4, 6, 8 ve 10) takviyeli kompozitleri üretilen katkı oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Seramik takviyesinin zayıf ıslanabilirliğini ortadan kaldırmak için Ni-P kaplı Si₃N₄ takviyesi kullanmışlardır. Al6061-10Si₃N₄ kompozitte çekme dayanımı ve sertlik değeri Al6061 alaşımına kıyasla %43,3 ve %99 oranında artmıştır. Bunun sebebi takviye elemanının yüksek sertliğinden dolayı çekme gerilmesine karşı direncin artmasına bağlanmıştır. Sonuç olarak takviye elemanının matris içerisinde homojen dağılması ve katkı oranının artmasının kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Ramesh vd., 2009).

Ramu vd. (2021) çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061 alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2, 3 ve 4) Si₃N₄ takviyesi yaparak kompozit

üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen kompozit yapılara 3 geçişli eş kanallı açısallı presleme işlemi (EKAP) uygulayarak mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek yoğunluk ($2,84 \text{ g/cm}^3$) ve sertlik değeri (85 HB) %4 Si_3N_4 katkıli kompozit yapıda EKAP işlemi sonrası elde edilmiştir. EKAP işlemi sonrası boşlukların ve kusurların en aza indirilmesinden dolayı yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Yapılan aşınma testlerine göre EKAP işlemi tekrar sayısının ve takviye oranının artmasıyla kompozitlerin aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak EKAP işleminin ve artan katkı oranının üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir (Ramu vd., 2021).

Rao ve Mohan (2020), karıştırmalı döküm yöntemiyle alüminyum matrise farklı oranlarda (ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10) Si_3N_4 takviyesi yaparak kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozit yapılardaki Si_3N_4 takviyesinin kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan sertlik ölçme ve çekme dayanımı test sonuçlarına göre en yüksek sertlik (54,4 HB) ve çekme dayanımı (178,5 MPa) Al-%8 Si_3N_4 kompozitte belirlenmiştir. Bunun sebebi, Si_3N_4 taneciklerinin yüksek sertliğine bağlanmıştır. Ayrıca Si_3N_4 katkı oranının artmasıyla, matrisin kompozit içerisindeki akışı sınırlandığından yüzde uzama miktarında azalma gerçekleştiği tespit edilmiştir (Rao ve Mohan, 2020).

Smart vd. (2021), Al7075 matrisli TaC (ağırlıkça %0,25, 0,5, 0,75 ve 1), Si_3N_4 (ağırlıkça %2, 4, 6 ve 8) ve Ti (ağırlıkça %0,5, 1, 1,5 ve 2) takviyeli kompozitleri karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Takviye oranının kompozitlerin mikroyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kompozitlerin SEM analizlerine göre TaC/ Si_3N_4 /Ti takviyelerinin Al7075 matris içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek yoğunluk ($3,09 \text{ g/cm}^3$), en yüksek basma dayanımı (394 MPa), en yüksek korozyon direnci ve en düşük aşınma oranı (20 N yüklemede, 3 m/s kayma hızında, 120°C sıcaklıkta) Al7075-1TaC-8 Si_3N_4 -2Ti kompozit yapıda elde edilmiştir. Sonuç olarak takviye oranı arttıkça kompozitlerin mekanik özelliklerinde ve aşınma davranışlarında iyileşme olduğu belirtilmiştir (Smart vd., 2021).

Şenel ve Gürbüz (2020) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum matrise Si_3N_4 (ağırlıkça %1, 3, 6 ve 9) ve grafen (ağırlıkça %0,1, 0,3 ve

0,5) takviyesi yaparak kompozit yapılar üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek yoğunluk değeri ($2,59 \text{ g/cm}^3$), en yüksek Vickers sertliği (66 HV) ve en düşük gözeneklilik oranı (%5,6) Al-9Si₃N₄-0,1GNT kompozitte belirlenmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğinden, grafenin ise katı yağlayıcılık özelliğinden dolayı hem mekanik hem de aşınma özelliklerinde iyileşme meydana gelmiştir. Grafenin ağırlıkça %0,1 katkı oranı üzerinde topaklanma eğilimi göstermesi sebebiyle kompozitin mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir (Şenel ve Gürbüz, 2020).

Xiu vd. (2009) sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle Al2024 alaşımına ağırlıkça %36 oranında Si₃N₄ takviye ederek kompozit yapılar üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere ekstrüzyon işlemi uygulayarak, ekstrüzyon işleminin kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde kompozitlerin çekme dayanımının ve elastisite modülünün ekstrüzyon öncesi 178,7 MPa ve 113,6 GPa iken; ekstrüzyon sonrası sırasıyla 497,1 MPa ve 151,7 GPa olduğu belirlenmiştir. Uygulanan ekstrüzyon işleminin takviye elemanının oluşturduğu topaklanmaları azalttığı belirtilmiştir (Xiu vd., 2009).

Zhang vd. (2017) çalışmalarında, sıcak presleme yöntemiyle alüminyum matrisli β -Si₃N₄ kısa lif takviyeli (ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30) kompozit yapılar üretmişlerdir. Takviye oranının, bilyalı öğütme işleminin ve sinterleme sıcaklığının (530, 545, 560°C) kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yürütülen testler sonucunda sinterleme sıcaklığının artmasıyla kompozitlerin yoğunluk değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı (312 MPa), 560°C sinterleme sıcaklığında ve ağırlıkça %20 katkı oranındaki kompozitte elde edilmiştir. Ayrıca bilyalı öğütme işleminin saf alüminyumun çekme dayanımında %19 oranında artışa yol açtığı belirtilmiştir (Zhang vd., 2017).

2.3.B₄C Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Anjan Babu vd. (2021), çalışmalarında B₄C (ağırlıkça %12) takviyeli Al2030 esaslı kompozitleri karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapılarını ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemelerine göre B₄C partiküllerinin matris içerisinde homojen şekilde dağıldığı

belirlenmiştir. Kompozitlerin aşınma testleri farklı yüklemelerde (10, 20, 30 ve 40 N) ve farklı hızlarda (100, 200, 300 ve 400 dev/dk) yapılmıştır. Aşınma oranının B₄C takviyesiyle azaldığı, uygulanan yükün ve hızın artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. En yüksek aşınma direnci 10 N yüklemde 100 dev/dk kayma hızında elde edilmiştir. Sonuç olarak matrise eklenen B₄C partiküllerinin kompozitin sertliğini arttırması sebebiyle tribolojik özellikleri olumlu etkilediği belirtilmiştir (Anjan Babu vd., 2021).

Akçay vd. (2022), toz metalürjisi ve mekanik öğütme yöntemlerini kullanarak Al matrise ağırlıkça %10, 20 ve 40 oranlarında B₄C takviye ederek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Yürütülen testler sonucunda matrise yapılan B₄C takviye oranının artmasıyla kompozitin sertliğinin arttığı ancak yoğunluğunun azaldığı belirlenmiştir. Bu azalmanın B₄C partiküllerinin düşük yoğunluğundan kaynaklandığı belirtilmiştir. En yüksek sertlik değeri (290,70 HV) Al-40B₄C kompozitte elde edilmiştir. En yüksek yoğunluk değeri (2,622 g/cm³) ise Al-10B₄C kompozit yapıda belirlenmiştir. Ayrıca yapılan elektriksel ölçüm sonuçları doğrultusunda takviye oranının artmasıyla kompozitin elektriksel özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir (Akçay vd., 2022).

Chand vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, mekanik alaşımlama metoduyla Al6061 alaşımına B₄C (ağırlıkça %2, 4, 6 ve 8) ve BN (ağırlıkça %2) takviye ederek kompozit yapılar üretmişlerdir. Katkı oranının ve sinterleme sıcaklığının (400, 500 600°C) kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. En yüksek Vickers sertliği (184 HV) ve basma dayanımı (249 MPa) Al6061-8B₄C-2BN kompozit yapıda 600°C sinterleme sıcaklığında elde edilmiştir. Kompozitlerin yoğunluklarının B₄C katkı oranının artmasıyla azaldığı, sinterleme sıcaklığının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluk (2,57 g/cm³) %2 B₄C katkı oranında ve 600°C sinterleme sıcaklığında elde edilmiştir (Chand vd., 2021).

Chandrasheker ve Raju (2021) çalışmalarında, elektromanyetik karıştırma yöntemiyle Al7075 alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça %3, 6 ve 9) B₄C takviye ederek elde ettikleri kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan SEM analizlerine göre B₄C parçacıklarının kompozit yapı içerisinde homojen şekilde dağıldığı ve Al7075 alaşımıyla güçlü ara yüzey bağı oluşturduğu belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek çekme dayanımı (153 MPa) %3 B₄C katkısında, en yüksek sertlik değeri (84,27 HV) %6 B₄C katkısında

tespit edilmiştir. Ağırlıkça %9 katkı oranında B₄C partiküllerinin kümelenmesinden dolayı mekanik özelliklerde bozulma meydana geldiği belirtilmiştir (Chandrasheker ve Raju, 2021).

Karabacak ve Çanakçı (2023), yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemini kullanarak Al₂O₃ matrisli B₄C ve SiC takviyeli (ağırlıkça %2,5 ve 5 katkı oranlarında) kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları incelendiğinde takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Takviye oranının artmasıyla gözeneklilik oranının arttığını belirterek en düşük gözeneklilik oranının (%3,71) Al₂O₃-2,5B₄C-2,5SiC hibrit kompozitte elde edildiği belirtilmiştir. En yüksek sertlik değeri (209,9 HB) ve en yüksek eğme dayanımı (799,2 MPa) Al₂O₃-5B₄C kompozitte belirlenmiştir. Al₂O₃ alaşımına kıyasla B₄C ve SiC takviyeli kompozitlerin korozyon dayanımının yaklaşık %87 oranında arttığı ifade edilmiştir. Takviye partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir (Karabacak ve Çanakçı, 2023).

Hynes vd. (2020), karıştırmalı döküm yöntemiyle elde ettikleri Al₆₀₆₁ matrisli B₄C (ağırlıkça %5, 10 ve 15) takviyeli kompozit yapıların mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yürütülen testler neticesinde sert seramik malzeme olan B₄C takviyesinin artmasından dolayı en yüksek mikrosertlik (70,40 HV), aşınma oranı (~5 mm³/m) ve sürtünme katsayısı (0,435) %15 B₄C takviyesinde tespit edilmiştir. Sonuç olarak Al₆₀₆₁ alaşımına B₄C takviyesiyle kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir (Hynes vd., 2020).

Nagaral vd. (2017) yaptıkları çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al₂O₃ matrisli B₄C (ağırlıkça %3 ve 6) takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mikroyapı analizleri sonucunda B₄C partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yürütülen testler neticesinde Al₂O₃ alaşımının çekme ve akma dayanımı sırasıyla 157,4 MPa ve 136,1 MPa iken; Al₂O₃-6B₄C kompozitte bu değerlerin sırasıyla 191,9 MPa ve 183,1 MPa'a yükseldiği belirlenmiştir. Bu artışın matris ve takviye malzemesi arasındaki güçlü ara yüzey bağından dolayı gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %6 B₄C takviyeli kompozitlerin yüzde uzamasında

(%9,8), Al₂O₃ alaşıma (%14,1) kıyasla azalma olduğu gözlemlenmiştir (Nagaral vd., 2017).

Nagaral vd. (2021), karıştırmalı döküm metoduyla Al₂O₃ alaşıma farklı oranlarda (ağırlıkça %2, 4, 6 ve 8) B₄C takviye ederek elde ettikleri kompozit yapıların mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde B₄C partiküllerinin düşük yoğunluğundan dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitlerin yoğunluklarının azaldığı belirtilmiştir. Al₂O₃ alaşıyla kıyaslandığında Al₂O₃-8B₄C kompozit yapıda basma, çekme ve akma dayanımının sırasıyla %51,4, %54,1 ve %55,5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Al₂O₃ alaşımında 62,9 HB olan sertlik değerinin, %8 B₄C katkı oranında 102,3 HB'ye yükseldiği belirlenmiştir. En yüksek aşınma direncine 40 N yüklemede, 0,5 m/s kayma hızında ve %8 B₄C katkı oranında ulaşılmıştır. Aşınma direncinin katkı oranının artmasıyla arttığı, uygulanan yük ve kayma hızının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir (Nagaral vd., 2021).

Pandiyarajan vd. (2021) yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle B₄C (ağırlıkça %10, 15 ve 20) ve SiC (ağırlıkça %10, 15 ve 20) takviyeli alüminyum esaslı kompozit yapıları üretmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SEM ve EDX analizlerinden takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Yürütülen testler sonucunda en yüksek Vickers sertliğine (50,3 HV) Al-20B₄C-10SiC kompozit yapıda ulaşılmıştır. Sonuç olarak takviye elemanlarının yüksek sertliğinden dolayı kompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşme meydana geldiği belirtilmiştir (Pandiyarajan vd., 2021).

Pang vd. (2018), toz metalürjisi yöntemiyle Al₆₀₆₁ matrisli B₄C (ağırlıkça %8) ve nano boyutta Al₂O₃ (ağırlıkça %2,5) takviyeli kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, Al₆₀₆₁ alaşımının akma dayanımı 70 MPa, çekme dayanımı 144 MPa iken Al₆₀₆₁-8B₄C-2,5Al₂O₃ kompozitte akma dayanımının 242 MPa'a, çekme dayanımının 306 MPa'a yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca elastisite modülünde %76,5 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak Al₆₀₆₁ alaşıma B₄C ve Al₂O₃ takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği belirtilmiştir (Pang vd., 2018).

Ramadoss vd. (2020) çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al7075 matrisli B₄C (ağırlıkça %3, 6 ve 9) ve BN (ağırlıkça %3) takviyeli kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen kompozit yapıların mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde en yüksek sertlik değerine (~100 HRC), çekme dayanımına (~250 MPa) ve basma dayanımına (~550 MPa) Al7075-9B₄C-3BN kompozit yapıda ulaşılmıştır. Sonuç olarak takviye elemanlarının matris içerisinde homojen dağılması ve tane incelmelerinden dolayı takviye oranı arttıkça kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir (Ramadoss vd., 2020).

Shantharaj vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al7075 matrise B₄C (ağırlıkça %3 ve %6) takviye ederek kompozit malzemeler elde etmişlerdir. Katkı oranının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Al7075-6B₄C kompozitin akma ve çekme dayanımının, Al7075 alaşımına kıyasla %27,2 ve %21,77 oranlarında arttığı belirtilmiştir. Ayrıca takviye miktarının artması ve deformasyonun azalmasından dolayı yüzde uzamada düşüş olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak B₄C katkı oranının artması kompozitlerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir (Shantharaj vd., 2021).

Şenel ve Gürbüz (2020) yaptıkları çalışmada, B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozit yapıları toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. B₄C katkı oranının (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30) ve partikül boyutunun (3,5 ve 20 µm) kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Yürütülen testler neticesinde en yüksek sertlik (68,8 HV), deneysel yoğunluk (2,61 g/cm³), basma dayanımı (242 MPa) ve minimum gözeneklilik oranı (%1,4) ağırlıkça %30 katkı oranında ve 3,5 µm partikül boyutunda elde edilmiştir. Sonuç olarak sert yapısı ve yüksek basma dayanımından dolayı, alüminyum matrise B₄C katkısı yapıldığında mekanik özelliklerin iyileştiği belirtilmiştir (Şenel ve Gürbüz, 2020).

Topçu (2020) çalışmasında, mekanik alaşımlama metoduyla alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemeleri üretmiştir. Katkı oranının (ağırlıkça %5, 10 ve 15) ve sinterleme sıcaklığının (600, 625 ve 650 °C) kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışları üzerine olan etkisini incelemiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek Vickers sertliği (~200 HV) Al-15B₄C kompozit yapıda 650°C sinterleme sıcaklığında belirlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla kompozitlerin

yoğunluklarının arttığı ancak katkı oranının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca katkı oranının ve sinterleme sıcaklığının artmasıyla kompozitlerin aşınma dirençlerinde iyileşme olduğu belirtilmiştir (Topçu, 2020).



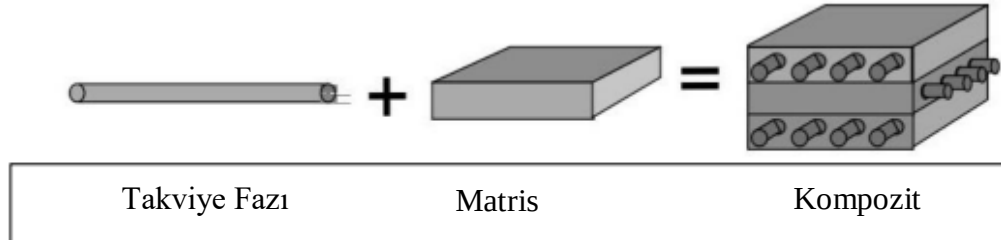
3. KOMPOZİT MALZEMELER

20. yüzyılın ikinci yarısında üretimin hızla gelişmesiyle birlikte malzeme biliminde de gelişmeler hızlanmıştır. Çünkü bu dönemde yapılan çalışmalar daha ekonomik, mukavemetli ve hafif malzemelerin üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi de endüstriyel ihtiyaçları karşılayabilecek olan kompozit malzemelerdir (Deniz, 2005).

Bu bölümde kompozit malzemelerin genel tanımı yapıp avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Daha sonra kompozit malzemelerin kullanım alanları ve sınıflandırılması hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Özellikleri

Kompozit malzemeler, tek başlarına kullanılması durumunda kullanım yeri ve yükleme şartlarını karşılayamayan ve yeterli dayanım gösteremeyen farklı malzeme veya fazların birbirlerinin zayıf yönlerini destekleyerek daha üstün özellikler elde etmek amacıyla birleştirilmeleridir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kompozitler matris malzemesi ve takviye fazından oluşmaktadır. Matris malzeme ana fazdır ve kompozite uygulanan kuvveti takviye fazına iletir. Takviye fazı ise ikincil faz olarak bilinir ve matris malzemesinden gelen yükü karşılayarak kompozitin mukavemetini sağlar.



Şekil 3.1. Kompozit malzeme yapısı (Yılmaz, 2019)

Kompozit malzemeler yüksek korozyon direnci, yüksek darbe dayanımı, düşük yoğunluk, hafiflik ve iyi iletkenlik gibi özelliklerinden dolayı oldukça sık tercih edilirler (Evcı, 2009). Asıl üretilme amaçları kompoziti oluşturan malzemelerde istenilen en iyi özellikleri bir araya getirerek mekanik özellikleri daha iyi olan yeni bir yapı elde etmektir. Böylece birden fazla ve karmaşık olan yapıların yerine tek başlarına kullanılabilmektedirler (Umur, 2017).

Kompozit malzemelerin oluşması için bazı şartlar bulunmaktadır. Aşağıda verilen bu şartları sağlayan malzemeler kompozit malzeme olarak kabul edilmektedir:

- Doğal bir malzeme olmaması ve dışarıdan bir etki ile üretilmiş olması
- Kimyasal özellikleri birbirinden farklı ve fiziksel olarak da birbirinden ayrılmış en az iki adet malzemenin bir araya gelmesiyle oluşmuş olması
- Malzemelerin birbiriyle fiziksel olarak birleştirilmiş olması
- Birleşimini oluşturan malzemelerin her birinin güçlü özelliklerini taşıması ve dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olmasıdır (Mallick, 2007; Şahin, 2006).

Kompozit malzemelerin diğer geleneksel malzemelere göre pek çok üstün özelliği bulunmaktadır. Bu özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- Mukavemet/ağırlık oranı: Kompozit malzeme içerisine yerleştirilecek olan takviye elemanlarının dikkatli bir şekilde seçilmesi ile istenen mukavemet değerlerini elde etmek mümkündür.
- Tasarım esnekliği: Kompozit malzemeler kullanım yerine ve amacına, kullanıcıların beklentilerine ve tasarımcının isteklerine göre büyük, küçük, esnek, karmaşık, basit şekilli olarak üretebilmektedir.
- Diğer malzemelerle bağdaşma: Kompozit malzemeler istenildiği takdirde başka malzemelerle birlikte de kullanılmaktadırlar (metal insörtler, takviye amaçlı köpük gibi).
- Korozyona karşı dayanım: Kompozit malzemeler çok sayıda kimyasal maddeye karşı da suda olduğu gibi dayanıklıdır. Bu özelliğinden dolayı, korozyonun problem oluşturduğu alanlarda özellikle metallerin yerini almışlardır.
- Hava koşullarına ve UV ışınlarına karşı dayanım: Kompozit malzemeler uygun malzeme kullanıldığında su ve kimyasal maddelerde olduğu gibi iklim şartlarından ve UV ışınlarından da etkilenmezler.
- Çok iyi elektrik ve termik yalıtım özelliği: Rakipsiz elektrik ve termik yalıtım özelliğine sahip kompozitler özellikle enerji nakil sistemlerinde ve bu özelliklerin gerekli olduğu alanlarda kullanılmaktadırlar.
- Elektromanyetik dalgalara karşı saydamlık: Elektromanyetik dalgalara karşı saydam olan kompozit malzemeler bu sistemlerin gerekli olduğu alanlarda kullanılmaktadırlar.
- Parça konsolidasyonu: Uygun kalıplama yöntemiyle başka malzemeler kullanılarak birkaç parçadan oluşan mamüller tek kalıplama ile

üretilebilmektedir. Bu özellik işlem miktarını, işçiliği ve stoklama maliyetini düşürmektedir (Deniz, 2005).

Kompozit malzemelerin birçok üstün özelliğinin bulunmasına rağmen üretim metotları ve kullanılan malzemeye bağlı olarak aşağıda belirtilen bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

- Üretimin zor olması
- İşlenme güçlüğü
- Maliyetinin yüksek olması
- Tamirlerinin zor olması
- Yapı içindeki çatlakların tespit edilememesi
- Geri dönüşümünün olmaması
- Üretim metodu kalitesiyle ilgili olarak aynı yapıda bile farklı mukavemet özelliklerinin gözlenebilmesidir (Asi, 2018).

3.2. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

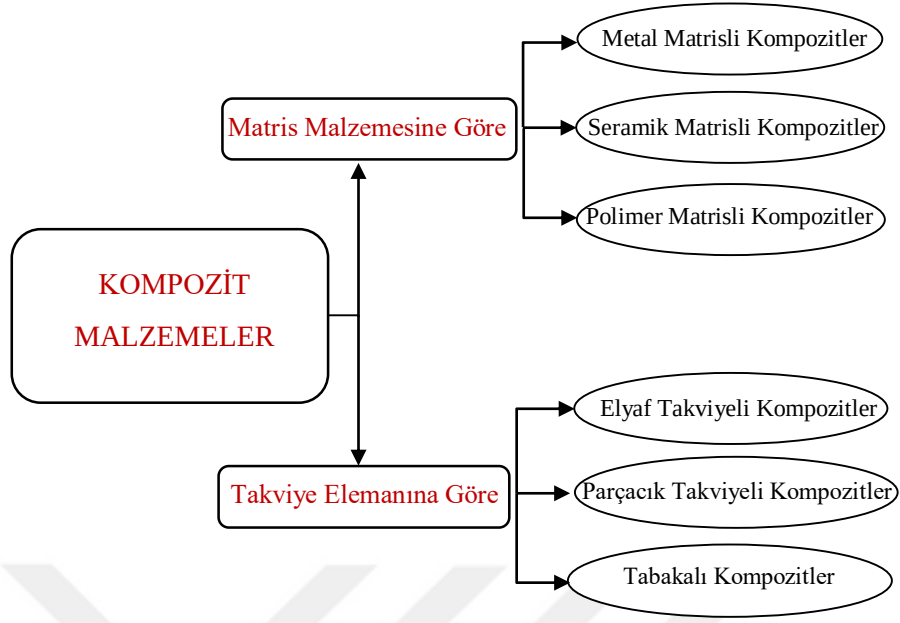
Kompozit malzemeler üstün özelliklerinden dolayı başta sanayi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel kullanım alanları arasında denizcilik, inşaat sektörü, otomobiller, elektrik endüstrisi, tarım sektörü, ev aletleri, şehircilik alanı, spor malzemeleri, uçak ve uzay araçları, savunma sanayi ve iş makinaları bulunmaktadır. Tablo 3.1’de kompozit malzemelerin kullanıldığı bazı endüstriler ve uygulama alanları gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kompozitlerin kullanıldığı endüstriler ve uygulama alanları (Asi, 2018; Bilir, 2014; Sarıkaya, 2019)

Endüstriyel Alan	Uygulanan Alanı
Denizcilik	Dubalar Şamandıralar İskeleler Tekne ve filika gibi deniz araçları
İnşaat	Bina ve balkon korkuluğu Pencere elemanları Prefabrik binalar Beton kalıpları Çatı kaplama elemanları Gövde panelleri Şase Ön cam Diğer yapısal parçalar
Otomotiv	Uçak ve helikopterler Uyduların gövde tasarımları Yakıt tankları Roket gövdeleri
Uçak ve uzay araçları	Kano Yarış bisikleti Kayak takımları Golf sopaları Oltalar
Spor	Sulama kanalları Su boruları Tahıl toplama siloları Seralar
Tarım	Toplu konut yapımı Çevre güzelleştirme çalışmaları
Şehircilik	

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin üretim ve kullanım alanları çok geniş olduğu için matris malzemesine göre ve takviye elemana göre iki temel gruba ayrılmaktadır. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

3.3.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), matris malzemesi metal veya metal alaşımı olan kompozitlerdir. Üretim amaçları; metallerin üstün özelliklerini koruyarak mekanik özellikleri geliştirilmiş yeni yapılar elde etmektir. Matris malzemesi olarak genellikle Al, Cu, Ti, Mg gibi metaller kullanılır. Ancak metal matrisli kompozitlerde çalışmaların çoğu alüminyum üzerine odaklanmıştır. Hafiflik, yüksek dayanım, yüksek iletkenlik ve birçok üstün mekanik özelliklerin bir araya gelmesi alüminyum ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanılmasını uygun hale getirmiştir. Takviye elemanı olarak ise Al_2O_3 , TiC, SiC, B_4C ve karbon esaslı malzemeler oldukça sık tercih edilir (Şenel vd., 2015).

Metal matrisli kompozitler takviyesiz metallere göre birçok üstün özelliğe sahiptir. Bu özelliklerin bazıları şunlardır:

- Düşük termal genleşme katsayısı
- Yüksek dayanım
- Yüksek yorulma direnci
- Yüksek elastisite modülü
- Özgül rijitlik

- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı
- Yüksek aşınma dayanımı
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği
- Yüksek elastisite modülü/yoğunluk oranı
- Düşük sürünme oranı
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesidir (Bilir, 2014; Yakut, 2015).

Metal matrisli kompozitler, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitlerle kıyaslandığında; yüksek radyasyon direnci, yüksek tokluk, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca metal matrisli kompozitler, enine kesitlerde diğer kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir. Metal matrisli kompozitler otomotiv ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok alanda kullanılır. MMK'ların kullanıldığı endüstriyel sektörler ve uygulama alanları Tablo 3.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. MMK malzemelerin uygulama alanları (Anıl, 2012)

Metal Matrisli Kompozitler	Endüstriyel Sektörler	Uygulama Alanları
Al-SiC, Al-Al ₂ O ₃ , Mg-SiC, Mg-Al ₂ O ₃	Otomotiv endüstrisi	Bağlantı sistemleri
		Piston pimleri Piston kolları Kardan milleri Valf yay başlıkları Kardan milleri
Al-SiC, Al-B, Mg-C, Al-C, Al-Al ₂ O ₃	Havacılık-uzay sanayi	Antenler Birleştirme bağlantıları
Al-B, Al-SiC, Al-C, Ti-SiC	Savunma-sivil amaçlı hava taşıtları	Akslar Dişli kutuları Fanlar Kompresör kanatları Türbin kanatları
Cu-C, Ag-Al ₂ O ₃ , Ag-C, Ag-Ni	Elektrik endüstrisi	Karbon fırçaları Elektrik kontakları İletim malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerin üretilmeleri sıvı hal üretim ve katı hal üretim yöntemleri olmak üzere iki gruba ayrılır.

Sıvı hal üretim yöntemleri;

- Sıvı infiltrasyon
- Sıkıştırılmalı döküm
- Karıştırılmalı döküm
- Basınçlı enjeksiyon
- Savurma döküm

Katı hal üretim yöntemleri ise;

- Toz metalürjisi
- Difüzyon bağlama
- Ekstrüzyon
- Plazma sprey
- Vakumda presleme

şeklindedir.

Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK), matris malzemesi polimer olan kompozitlerdir. Polimer matrisli kompozitlerin yüksek özgül mukavemeti, düşük yoğunluğu, elektriksel yalıtkanlığı, yüksek darbe dayanımı gibi özellikleri birçok alanda kullanılmasına yol açmaktadır. Yüksek korozyon ve aşınma direnci polimer matrisli kompozitlerin ileri teknoloji uygulamalarında kullanılmasının başlıca nedenidir. Ayrıca yüksek sıcaklığa karşı olan dirençleri sayesinde uzay ve havacılık alanında sıklıkla tercih edilirler. Ancak metal malzemeler ile karşılaştırıldığında mukavemetlerinin ve elastisite modüllerinin düşük olmaları negatif bir durumdur (Öztoprak, 2015; Topuz, 2019).

Polimer matrisli kompozitler matris malzemelerine göre termoset ve termoplastik kompozit olmak üzere ikiye ayrılırlar. Takviye elemanı olarak cam fiberler, karbon fiberler, bor fiberler ve aramid fiberler kullanılır. Ayrıca polimer matrisli kompozitler iplik sarma, elle yatırma, enjeksiyon kalıplama, spreyleme, termal şekillendirme ve bant sarma gibi yöntemlerle üretilmektedirler (Yılmaz, 2019b).

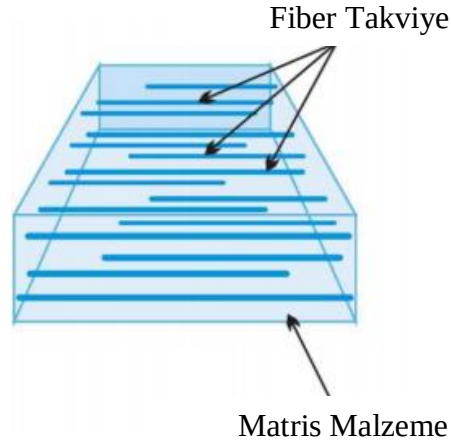
Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler; düşük yoğunluk, hafiflik, yüksek basma dayanımı, yüksek oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak tercih edilirler. Ancak kırılğan olmaları, çekme dayanımlarının ve çarpma yüklerinin düşük olması yapısal uygulamalarda kullanılmalarına engel olmaktadır. En önemli dezavantajları ise ani mekanik ve ısıl değişimlere karşı dirençlerinin düşük olması ve matris ile takviye elemanı arasındaki termal genleşme farkıdır. Bu fark seramik matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin düşmesine sebep olmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerde (SMK) matris malzemesi olarak genellikle Al_2O_3 , SiC, B_4C , Si_3N_4 , takviye elemanı olarak ise seramik oksit fiberler (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2) ve seramik oksit olmayan fiberler (Si_3N_4 , SiC, ZrC) kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozitler; türbinlerde, boru hatlarında, fren disklerinde, zırhlarda ve optiklerde kullanılmaktadır (Smith, 2001).

3.3.2. Takviye Elemanına Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler, matris yapı içerisine fiberlerin takviye edilmesi ile elde edilmektedir. Yüksek elastisite modülü, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk gibi üstün özelliklerinden dolayı takviye elemanı olarak sıklıkla tercih edilirler. Fiberlerin kompozit yapı içerisinde belirli doğrultularda yerleştirilebilmeleri büyük bir avantaj sağlar. Kompozitin kullanıldığı yer ve üzerine gelen yükleme durumlarında basma, çekme ve eğilme gerilmeleri için istenilen yönlerde dayanım özelliklerine ulaşılabilir. Fiberler birbirlerine paralel doğrultuda yerleştirildiğinde mukavemet artarken, birbirlerine dik doğrultuda yerleştirildiğinde mukavemet azalır. Kompozitlerde genellikle cam elyaf, alümina elyaf, bor elyaf, polyester elyaf ve poliamid elyaf kullanılmaktadır (Sarıkaya, 2019; Şen, 2020). Elyaf takviyeli kompozit yapısı Şekil 3.3'de gösterilmektedir.

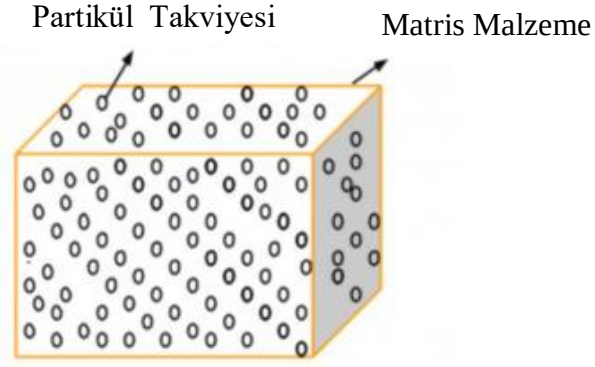


Şekil 3.3. Elyaf takviyeli kompozitlerin yapısı (Sarıkaya, 2019)

Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler matris içerisine partikül takviye edilmesi ile elde edilir. Şekil 3.4’de parçacık takviyeli kompozit yapısı gösterilmektedir. Takviye edilen parçacıkların matris içerisine yerleştirilme şekilleri kompozitin dayanımını etkilemez. Dayanım bütün yönlerde aynıdır. Ancak takviye elemanının sertliği kompozitin dayanımının belirlenmesinde önemli bir etkindir. Parçacık takviyesi ile kompozitlerin elektrik iletkenliği, aşınma dayanımı, sertlik vb. özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanır. Parçacık takviyeli kompozitlerin elyaf takviyeli kompozitlere göre mekanik özellikleri daha düşüktür. Ancak elyaf takviyeli kompozitlere göre üstün özellikleri de bulunmakta olup bu özellikler aşağıda belirtilmiştir;

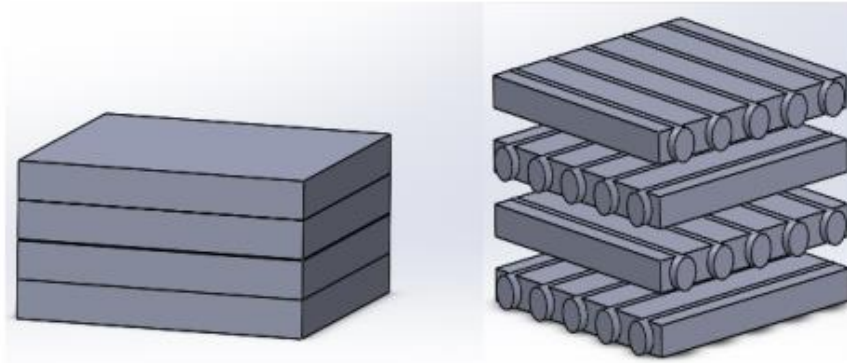
- Maliyetin diğer takviye elemanlarına göre düşük olması,
- Üretiminin kolay olması,
- Özelliklerinin yönden bağımsız olması (izotropik)
- Takviye hacminin %40’dan düşük olması durumunda metal işleme yöntemleri ile uyumlu olmasıdır (Asi, 2018; Öztürk, 2020; Zor, 2018).



Şekil 3.4. Parçacık takviyeli kompozitlerin yapısı (Sarıkaya, 2019)

Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler, farklı yönlerde takviye edilmiş elyaf tabakalarının birleştirilmesiyle elde edilirler. Elyafların farklı doğrultularda yönlenmesiyle kompozitin dayanımı önemli ölçüde artabilmektedir. Kompozitin maruz kalacağı yükleme durumuna göre elyafların yönlenmesi belirlenmektedir. Isıya ve neme karşı dirençleri oldukça yüksek olup en yaygın ve en eski türdeki kompozit grubudur. Metallerle karşılaştırıldığında hafifliğe ve yüksek mukavemete sahiptir. Tabakalı kompozitler sanayide birçok alanda kullanılmakla birlikte, uçak kanatlarında ve kuyruklarında da kullanılmaktadırlar (Okur, 2019; Zor, 2018). Şekil 3.5’de tabakalı kompozit yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Tabakalı kompozitlerin yapısı (Okur, 2019)

4. TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalürjisi (TM); ileri teknolojik malzemelerin üretilmesine imkân veren bir imalat yöntemidir. TM çeşitli metal ve seramik tozların imal edilmesi, karakterizasyonu ile bu tozların değişik ısı ve mekanik deformasyon prensiplerinin uygulanarak parçalara dönüştürülmesini amaçlayan bir süreçtir (Yalçın, 2015). Toz halinde bulunan metaller, plastikler, karbonik bileşikler veya seramiklerin karıştırıldıktan sonra basınç altında preslenerek mamül elde edilmesi toz metalürjisinin esasını oluşturmaktadır. Presleme işleminden sonra toz halinde bulunan malzemelerin temas yüzeyleri arasında daha kuvvetli bağlar oluşturmak için ergime sıcaklığının altında sinterleme işlemi uygulanır. Toz metalürjisi yöntemi karmaşık şekilli parçaların ekonomik olarak üretilmesi için oldukça uygundur. Bu durum toz metalürjisi kullanımını daha yaygın hale getirmektedir. Bu yöntem karmaşık şekilli parçaların yanında küçük ve boyutsal olarak ciddi hassasiyet isteyen parçaların imalatına da elverişlidir. Üretim esnasında malzeme kaybı çok azdır ve bu da ekonomik avantaj sağlar (Ayvacı, 2019). Tablo 4.1’de toz metalürjisi iş akış basamakları gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Toz metalürjisi yöntemine ait iş akış basamakları (Ayvacı, 2019)

İş Akış Basamağı	Özellikler
Toz Teknolojisi	Parçacık Boyutu
	Parçacık Şekli
	Parçacık Üretimi
	Mikroyapı
	Bileşim
Toz İşleme	Karıştırma
	Sıkıştırma
	Şekil Verme
	Polimer Yakma
	Sinterleme
Karakterizasyon ve Test Aşaması	Sıcaklık Yoğunlaştırma
	Yoğunluk
	Mekanik Özellikler
	Elektriksel Özellikler
	Manyetik Özellikler
	Isıl Özellikler
	Aşınma ve Korozyon

4.1. Toz Metalürjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Toz metalürjisi yöntemi, diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında üretilmesi zor ve maliyetli olan iş parçalarını en az malzeme kaybı ile seri olarak üretebilmeyi amaçlamaktadır. Diğer üretim yöntemlerine göre oldukça avantajlıdır. Toz metalürjisi yönteminin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek yüzey kalitesindeki parça üretimi,
- Yüksek mukavemetli parça elde edebilmesi,
- Alaşım elementlerinin uygun kombinasyonunun sağlanması,
- Yüksek sıcaklığa maruz kalan parçaların üretilmesi,
- Küçük ve karmaşık yapıli parça üretimi,
- Gözenekli yapıdaki parçaların üretimine uygun olması,
- Üretim sonunda malzemenin gözeneklilik oranının belirlenebilmesi,
- Çevreye duyarlı olması,
- Üretim sonunda parçaların titreşim ve gürültüyü azaltıcı özellikte olması,
- Geniş üretim kapasitesi,
- Hammaddenin ucuz olması ve kolay bulunabilmesi,
- Yüksek aşınma direncine sahip parça üretilmesi,
- Yaklaşık %99 oranında hammadde kullanımı ile en az malzeme kaybının sağlanması,
- Kendinden yağlamalı yataklar ve kesici uçların üretimine uygun olması

gibi özellikleri toz metalürjisinin diğer üretim yöntemlerine göre daha çok tercih edilmesine yol açmaktadır (Kevenlik, 2013; Yurt, 2019).

Toz metalürjisi yönteminin diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında sağladığı birçok avantaja rağmen bazı dezavantajları bulunmaktadır. TM yönteminin dezavantajları aşağıda belirtilmiştir:

- Üretimin ilk aşamalarında yatırım maliyeti fazladır (presleme kalıpları, sinterleme ekipmanları vb.).
- Büyük ve değişik kesitler içeren parçaların üretilmesinde elverişli değildir.
- Diğer üretim yöntemlerine göre toleransı yüksektir.

- Bazı parçaların şekillendirilmesinde yüksek basınca ihtiyaç duyulur.
- Seri üretim yapılmazsa parça üretimi ekonomik değildir.
- İş sağlığı ve güvenliği açısından risk oluşturabilir (Kevenlik, 2013; Matik, 2003).

4.2. Toz Metalürjisi Yönteminin Kullanım Alanları

TM yöntemiyle mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek yararlı parçalar elde edilmektedir. Bu yöntem ile dökümde olduğu gibi net şekilli parça üretimi yapılmaktadır. Hatta döküm yöntemiyle üretilmeyen yüksek ergime sıcaklığına sahip seramikler, birbiri içerisinde çözünmeyen tozlar, refrakter malzemeler ve karışık fazlı bileşimler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir. Bu yöntem, üretim maliyetinin düşük olması, üretilen parçaların performansının yüksek olmasından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır (Taşçı, 2016; Yalçın, 2015). TM yöntemi elektrik temas alanları, yüksek sıcaklık filtreleri, zırh delici mermiler, saat gövdeleri, fren balataları, protezler, iş makineleri ve donanım endüstrisinde kullanılmaktadır (Şenel, 2018). Şekil 4.1’de toz metalürjisi yöntemiyle üretilen parçalar gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Toz metalürjisiyle üretilen parçalar (Taşar, 2021)

4.3. Toz Üretim Yöntemleri

Üretim yöntemlerinin, tozların şekli ve boyutu gibi özelliklerinin tayin edilmesinde önemli etkisi vardır. Ayrıca her malzemenin toz üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ancak genel olarak mekanik işlem yöntemi, elektroliz yöntemi, atomizasyon yöntemi ve kimyasal yöntem kullanılmaktadır.

4.3.1. Mekanik İşlem Yöntemi

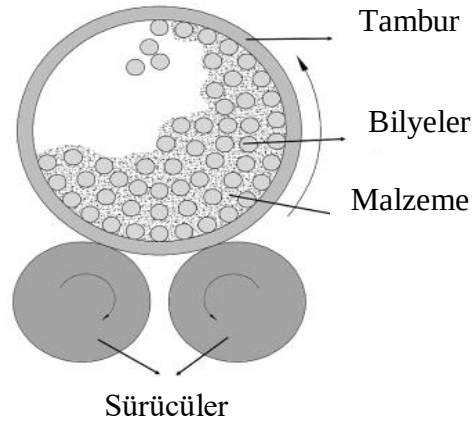
Mekanik işlem; darbeli öğütücü içinde metal tanelerinin kırılması ile toz elde etme yöntemidir. Öğütülen toz tanelerinin tavlama işlemi ile birlikte gerilimleri giderilir. Üretim sonunda elde edilen tozların şekli pul puldur. Mekanik yöntemler; talaşlı imalat, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır (Şimşek, 2017).

4.3.1.1. Talaşlı imalat yöntemleri

Tornalama, frezeleme gibi yöntemlerin kullanılması ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemidir. İri boyutta üretilen tozların kırma ve eleme gibi yöntemlerle boyutları küçültülmektedir. Yüksek karbonlu çelik tozlar bu yöntem kullanılarak üretilmektedir (Şimşek, 2017).

4.3.1.2. Öğütme yöntemi

Öğütme yönteminin temelinde darbe mekanizması vardır. Toz haline getirilmesi istenilen malzeme ile sert bir cisim arasında darbe kuvveti oluşması sonucunda öğütme gerçekleşir. Ayrıca diğer yöntemlerle üretilmiş olan tozlara da öğütme işlemi uygulanarak topakların giderilmesi sağlanabilmektedir. Öğütme yöntemi, bilyalı öğütücüler, pervaneli öğütücüler ve titreşimli öğütücüler kullanılarak gerçekleştirilir (Kevenlik, 2013; Mahmutoglu, 2006). Şekil 4.2’de bilyalı öğütücü gösterilmiştir.

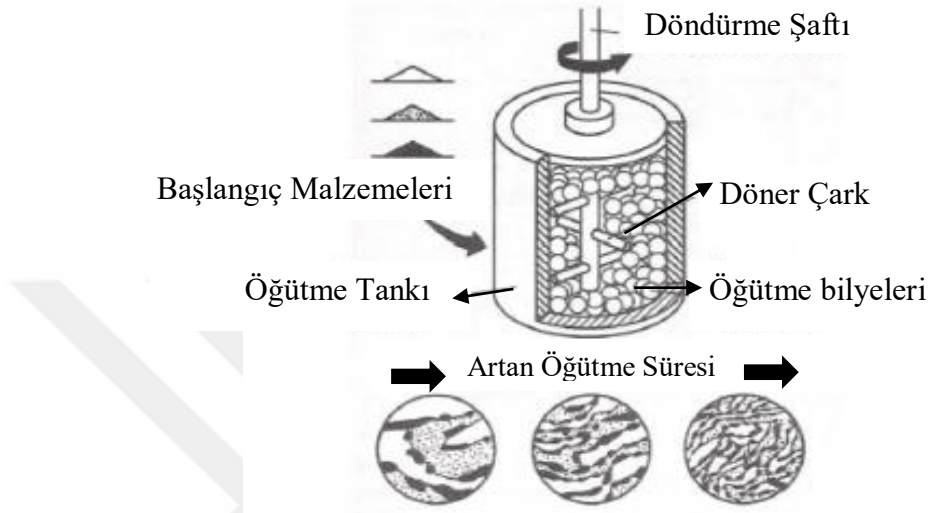


Şekil 4.2. Bilyalı öğütücü (Şimşek, 2017)

4.3.1.3. Mekanik alaşımlama yöntemi

Mekanik alaşımlama yöntemi, kuru ve katı haldeki tozların yüksek enerjili ortamda öğütülmesi işlemidir. Genellikle parçacık takviyeli kompozit üretiminde

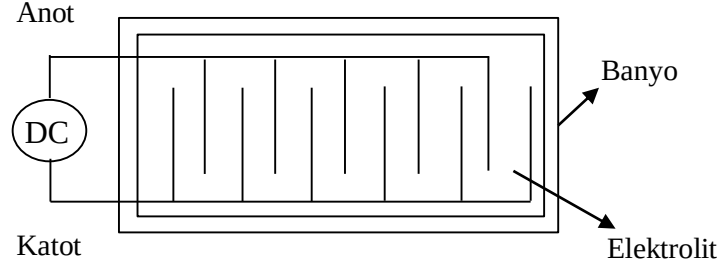
kullanılmaktadır. Homojen yapı ve yüksek dayanımlı kompozitlerin üretilmesi amacıyla tercih edilen bir yöntemdir. Mekanik alaşımlama sonucunda öğütülen partiküller gevrek ve kırılgan duruma gelmektedir. Öğütme süresi ve öğütme sıcaklığı mekanik alaşımlama yöntemi için önemli bir etkidir (Şimşek, 2017; Tekoğlu, 2015). Şekil 4.3'te mekanik alaşımlama yöntemi ile toz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Mekanik alaşımlama yöntemi ile toz üretimi (Tekoğlu, 2015)

4.3.2. Elektroliz Yöntemi

Elektroliz yöntemi ile iletkenlik oranı yüksek olan metal tozları üretilmektedir. Çözelti içerisine elektrik gerilimin uygulanması ile anottan ayrılan tozların bir elektroliz hücresinin katodu üzerinde toplanması ile gerçekleştirilir. Saflık derecesi yüksek olan metallerin elektrolitik çözelti içerisinde çökeltilmesi işlemidir. Katot üzerinde toplanan tozlar önce katottan ayrılır. Daha sonra yıkanır ve kurutulur ve öğütülür. Bu işlem ile gözenekli tozlar farklı boyutlarda üretilmektedir. Elektroliz yönteminde demir, bakır, mangan, çinko ve krom elementleri kullanılmaktadır (Şenel, 2018; Şimşek, 2017). Şekil 4.4'te elektroliz yöntemi ile toz üretimi gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi (Şenel, 2018)

4.3.3. Atomizasyon Yöntemi

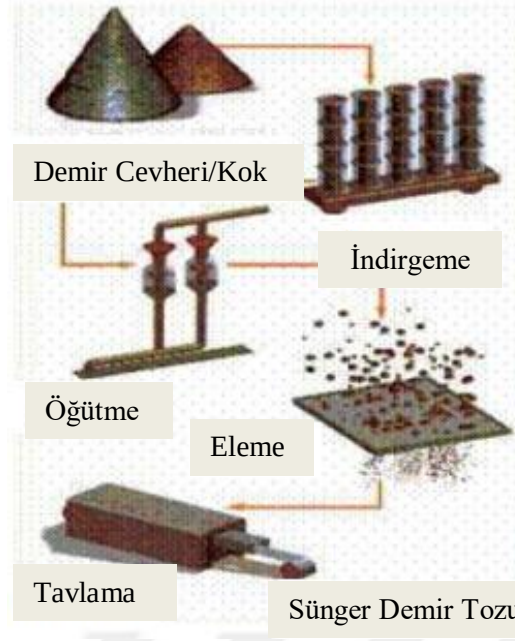
Atomizasyon yöntemi, basınçlı gaz veya belirli hızdaki sıvı yardımıyla toz üretme işlemidir. Ayırıcı olarak hava, azot, argon gazı, su ve gazyağı-parafin tercih edilmektedir. Diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında tane boyutu ve dağılımın kontrol edilebilmesi açısından daha sık tercih edilir. Atomizasyon yöntemi sırasıyla ergitme, atomize edilme, kurutma ve eleme işlemlerinden oluşmaktadır.

Dört temel tekniği bulunmaktadır. Bunlar;

- Su atomizasyonu
- Gaz atomizasyonu
- Döner disk atomizasyonu
- Döner elektrot atomizasyonudur (Ayvacı, 2019; Şenel, 2018; Şimşek, 2017).

4.3.4. Kimyasal Yöntemler

Metaller kimyasal yöntemler kullanılarak da toz boyutuna getirilebilmektedir. Üretilen tozların boyutları kimyasal yöntemdeki etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Kimyasal indirgeme yöntemi; oksitlerinden indirgeme yoluyla bakır, kobalt, nikel ve tungsten gibi tozların üretilmesinde kullanılan bir toz üretim yöntemidir. Genel olarak oksit indirgeme, ısıl bozunma ve sıvıdan çökeltme yöntemleri kullanılmaktadır. En iyi bilinen örneği sünger-demir tozudur. Uygun indirgeyicilerle kimyasal işlemeye uğratılan demir oksitin 1260°C sıcaklıkta 68 saat bekletilmesiyle elde edilen tozların süngerimsi bir yapı oluşturmasıdır. Daha sonra bu süngerimsi yapı öğütme gibi işlemlerden geçirilerek istenilen boyutta toz haline getirilir (Şenel, 2018; Şimşek, 2017). Şekil 4.5’de kimyasal yöntem ile demir tozu üretimi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Kimyasal yöntem ile demir tozu üretimi (Nazik, 2013)

4.4. Toz Metalürjisi Yönteminin Temel Üretim Aşamaları

Toz metalürjisi yöntemi; karıştırma, presleme (tozların sıkıştırılması) ve sinterleme olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır.

4.4.1. Tozların Karıştırılması

TM yöntemi ile üretilecek parça için uygun tozlar seçilip karıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada homojen bir toz karışımı elde etmek, üretilecek parçanın mekanik özelliklerini belirlemede oldukça önemli bir etkindir. Eğer karıştırma işlemi yeterince iyi yapılmazsa, şekillendirme sonrasında oluşan parçada gözenekler meydana gelebilir. Karıştırma işlemi süresinin fazla olması durumunda homojen karışım elde edilemez ve plastik deformasyon oluşmaya başlar. Karışımı oluşturacak tozların miktarları üretilecek parçanın ağırlığına göre % olarak hesaplanır. Ayrıca karışım içerisine, tozlar arasındaki ve kalıp yüzeylerindeki sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı eklenir (Ayata, 2014).

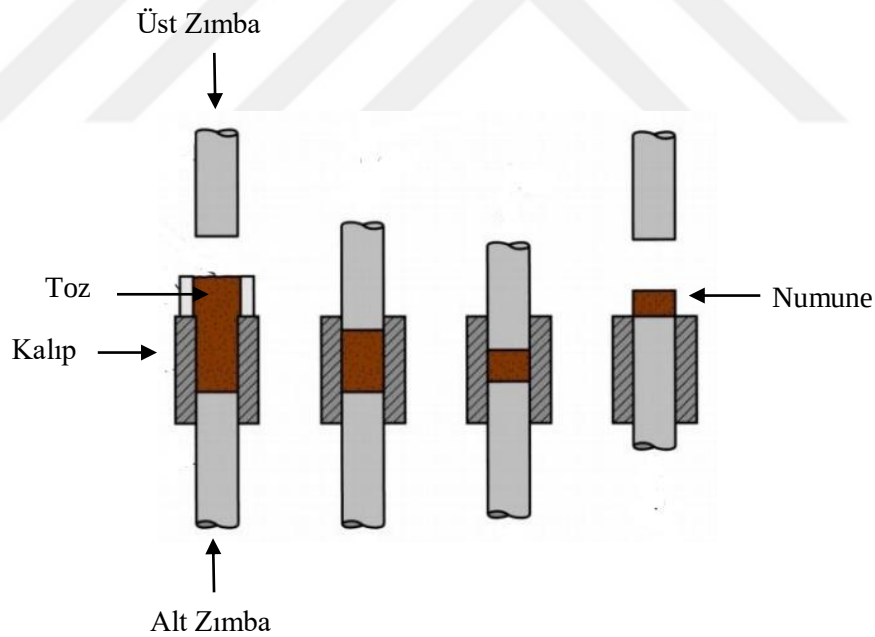
4.4.2. Presleme (Sıkıştırma) İşlemi

Karıştırılan tozlara istenilen şeklin verilebilmesi için, presleme işlemi uygulanır. Presleme işlemi; aksenal, izostatik ve hacim deformasyonu olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Aksenal yüklemede uygun kalıp ve zımbalar yardımıyla tozlar, belirli yük altında şekillendirilirler. Presleme esnasında tozlar önce birbirini üzerine kayarlar

ardından kullanılan kalıbın şeklini alırlar. Kalıbın, sıkıştırma işlemi sırasında sürtünmenin etkisi ile zarar görmemesi için sert olması gerekmektedir. İzostatik presleme, soğuk ve sıcak olarak iki durumda yapılabilir. Hacim deformasyonu ise ekstrüzyon, haddeleme ve dövme işlemlerinden oluşmaktadır. Presleme işlemi yapılırken aşağıda belirtilen özellikler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Kullanılan tozun tipi
- Bağlayıcı ve yağlayıcı kullanımı
- Rijit kalıp kullanımı
- Üretilcek malzemeden beklenen özellikler

Presleme sonrasında basıncın etkisiyle belirli bir şekle girip yoğunluk kazanan tozlarda gözeneklilik azalır ve mukavemet artışı olur. Ancak bu artış, uygulamalarda kullanılacak kadar yeterli değildir. Bu nedenle sıkıştırılan tozlara sinterleme işlemi uygulanır (Ayata, 2014; Çelebi, 2016). Şekil 4.6'da iki eksenli presleme işleminin aşamaları gösterilmektedir.



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

4.4.3. Sinterleme İşlemi

Sinterleme, basınç altında sıkıştırılmış tozların sıcaklık etkisi ile mukavemetlerinin artırılması işlemidir. Sinterleme işlemi birbirine temas eden tozların aralarındaki bağın kuvvetlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu bağlanma ergime

sıcaklığı altında, atomların hareketleriyle gerçekleşmektedir. Taneler arasındaki boyun oluşumu ile bu bağ kuvvetlenmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Sinterleme işlemi esnasındaki boyun oluşumu (Kalaycıoğlu, 2010)

Sinterleme işlemi ile yapı içerisindeki yüzey alanı ve gözenek boyutunun küçülerek kompozitlerin dayanımının artması sağlanmaktadır (Ayata, 2014). Sinterleme işleminin başlangıcında, gevşek bir şekilde birbirlerine temas eden tozlar sıcaklığın etkisiyle işlem sonunda boyun vererek birbirlerine bağlanmaktadır. Sinterleme işlemi katı hal sinterleme ve sıvı hal sinterleme olarak iki gruba ayrılmaktadır. Katı hal sinterleme, fazların tamamının katı halde olması ile gerçekleşmektedir. Sıvı hal sinterleme ise fazlardan birinin sıvı durumdayken gerçekleştiği işlemdir (Çivi, 2016). Sinterleme işleminin doğru bir şekilde yapılabilmesi için sinterleme sıcaklığı ve süresi oldukça önemlidir. Sinterleme sonucunda istenmeyen mekanik özellikler, sinterleme sıcaklığı ve süresinin yanlış belirlenmesinden kaynaklanabilmektedir (Şenel, 2018). Sinterleme esnasında malzemede bulunan gözenek miktarının ve geometrik değişimin kontrol edilebilme yöntemleri vardır. Bu yöntemler:

- Dilatometre çalışmaları
- Gaz absorpsiyonu
- Porozimetre
- Endirekt metotlar (sertlik vb.)
- Mikroskobik analizler şeklindedir (Kalaycıoğlu, 2010).

4.4.4. İkincil İşlemler

Toz metalürjisi ile üretilen parçalara; mekanik özellikleri iyileştirmek, düşük toleranslar elde edebilmek ve korozyon direncini artırmak gibi amaçlarla ikincil işlemler uygulanmaktadır. İkincil işlemler üretilen parçalara özgü olarak yapılabilmektedir. Ancak genellikle parçalara uygulanan ikincil işlemler toz metalürjisi yöntemi dışındaki yöntemlerde de kullanılmaktadır. Bu işlemlerden bazıları aşağıda özetlenmiştir:

- İnfiltrasyon; üretilen parça içerisindeki gözeneklerin ergitilmiş sıvı metal ile doldurulmasıdır. Amaç parçaya sızdırmazlık özelliği kazandırmaktır. Ancak bu işlemde parçanın boyut hassasiyeti azalır. Basıncılı ya da basınçsız olmak üzere iki yöntemle yapılabilmektedir.
- Yağ emdirme; gözenekli parçaların içerisine bu gözenekleri dolduracak şekilde yağ emdirilmesidir. Bu yöntemle kendinden yağlamalı sinter burçları üretilmektedir.
- Talaşlı imalat; presleme işlemiyle son şekle getirilemeyen parçaların tornalama, frezeleme, diş açma gibi yöntemlerle nihai ürün haline getirilmesidir.
- Yüzey kaplama; üretilen parçanın yüzeyinin korozyon direncini artırmak için kaplanması işlemidir. Elektrokaplama, galvanizleme, kimyasal buhar biriktirme yüzey kaplama yöntemlerinden bazılarıdır (Kasapgil, 2014).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Yapılan bu çalışmada; matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı, takviye elemanı olarak grafen, Si₃N₄ ve B₄C kullanılmıştır. Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri ile Al7075-Si₃N₄, Al7075-Si₃N₄-grafen, Al7075-B₄C ve Al7075-B₄C-grafen kompozit yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum ve alaşımları; yüksek dayanım, elektrik iletkenliği, hafiflik, ısı iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde matris malzeme olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımları arasında çinko elementinin yoğun olduğu Al7075; dayanımının yüksek olması, yoğunluğunun düşük olması, yorulma direncinin ve tokluğunun yüksek olması gibi üstün özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe oldukça sık kullanılmaktadır (Özkan, 2019; Yıldırım, 2016). Bu çalışmada kullanılan Al7075 alaşım tozu ~10 µm boyuta sahiptir. Al7075 alaşımının genel özellikleri Tablo 5.1’de, kimyasal bileşimi Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Al7075 alaşımının genel özellikleri (Demir, 2021; Yıldırım, 2016)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2,81
Sertlik (HV)	68
Akma dayanımı (MPa)	96,5
Çekme dayanımı (MPa)	221
Uzama (%)	9-10
Erime sıcaklığı °C	635
Elastik modülü (MPa)	71,7
Poisson oranı (MPa)	0,33
Kayma mukavemeti (MPa)	152

Tablo 5.2. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Özkan, 2019)

Cu	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Diğer	Al
1,20-2	5,10-6,10	2,10-2,90	0,40	0,30	0,50	0,18-0,28	0,20	0,15	Kalan

Takviye elemanı olarak kullanılan grafen; karbon atomlarından oluşan altıgen yapıların bir araya gelmesi ile oluşan bal peteği şeklindeki bir yapıdır. Bilinen en ince ve en güçlü malzeme olmakla birlikte doğada iki boyutta bulunan tek malzeme özelliğine de sahiptir. Alüminyum, magnezyum, titanyum gibi metallere takviye

malzemesi olarak kullanılan grafen; havacılık, uzay, tren, gemi ve savunma sanayi gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Yalçın, 2018). Çalışmada kullanılan grafen tozları 120-150 m²/g yüzey alanına, 5-8 nanometre boyuta ve 5 µm çapa sahiptir. Grafenin genel özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Grafenin genel özellikleri (Yalçın, 2018)

Özellik	Değer
Hibrit şekli	sp ²
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Saflık derecesi (%)	99
Kütleli yoğunluk (g/cm ³)	~0,3
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	2,25
Kalınlık (nm)	~1-2
Yüzey alanı (m ² /g)	2600
Sıcaklık direnci (°C)	-75 +200 °C
Termal iletkenlik (WK ⁻¹ /m)	4840-5300
Elektron hareketliliği (cm ² /V/s)	~2,5x10 ⁵
Elastisite modülü (TPa)	~1

Al7075 matrise takviye elemanı olarak grafenin yanı sıra Si₃N₄ ve B₄C tozları kullanılmıştır. Si₃N₄; yüksek sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda sertlik ve dayanımını korumasından dolayı sıcaklık korozyonunun görüldüğü uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Si ve N atomları arasındaki kovalent bağ oldukça kuvvetlidir. Bu nedenle Si₃N₄ sert ortam şartlarına, metaller ve polimerlere göre daha fazla dayanıklıdır. Si₃N₄ altıgen kafes yapısına sahip α ve β olmak üzere iki farklı kristal modifikasyonda bulunmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla Si₃N₄'ün α olan polimorfik yapısı β yapısına dönüşmektedir (Tümer, 2004). Bu tez çalışmasında kullanılan Si₃N₄ tozları 0,8 µm boyuta sahiptir. 3,25 g/cm³ yoğunluğa, 310 GPa elastisite modülüne ve 0,26 poisson oranına sahip olan Si₃N₄'ün genel özellikleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Si₃N₄'ün genel özellikleri (Şenel, 2018)

Özellik	Değer
Yoğunluk (α -Si ₃ N ₄) (g/cm ³)	3,17-3,19
Yoğunluk (β -Si ₃ N ₄) (g/cm ³)	3,19-3,20
Poisson oranı	0,24
Isıl iletkenlik (W/mK)	29
Sertlik (HV)	1450
Elastisite modülü (GPa)	310
Isıl genleşme katsayısı (293-1473 °K) (K ⁻¹)	3,3x10 ⁻⁶
Ergime sıcaklığı (°C)	1800
Kırılma tokluğu (25 °C) (MPa.m ^{1/2})	5,7
Molekül ağırlığı (g/mol)	140,28
Eğme dayanımı (25°C 4 nokta eğme) (MPa)	689

Bilinen en sert malzemelerden biri olan B₄C yüksek elastisite modülüne ve yüksek ergime noktasına sahiptir. Yüksek darbe dayanımı ve aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı kurşun geçirmez yelek, tank vb. üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca diğer takviye elamanlarıyla karşılaştırıldığında iyi ıslanabilirlik, termal kararlılık ve kimyasal eylemsizliğe sahip olması alüminyum matrise takviye elemanı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Chand vd., 2021; Ramadoss vd., 2020). Yoğunluğu ~2,52 g/cm³, eğme dayanımı ~345 MPa olan B₄C'nin genel özellikleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

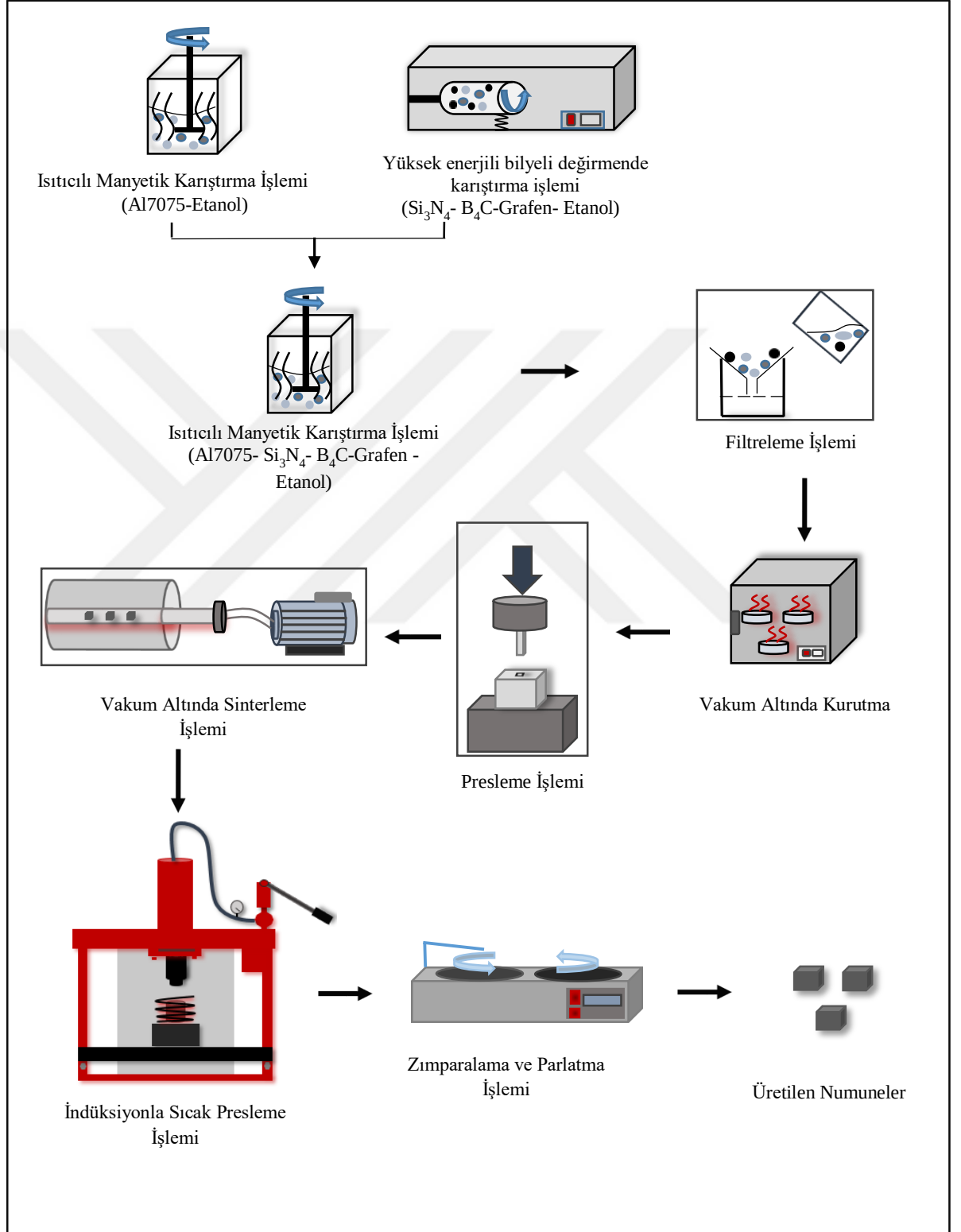
Tablo 5.5. B₄C'nin genel özellikleri (Şahin, 2018)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2,52
Ergime noktası (°C)	2400
Eğme dayanımı (MPa)	345
Çekme mukavemeti (MPa)	155-162 (980-1425 °C)
Elastisite modülü (GPa)	290-450
Sertlik (Vickers) (GPa)	27,4-34,3

5.2. Yöntem

Yapılan tez çalışmasında Al7075-Si₃N₄, Al7075-Si₃N₄-grafen Al7075-B₄C ve Al7075-B₄C-grafen hibrit kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş olup kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Üretim aşamaları; yüksek enerjili bilyalı değirmende ve ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda tozları karıştırma, filtreleme/süzme, etüvde kurutma, eleklerle eleme, presleme, sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme, zımparalama-parlatma, mekanik testler ve mikroyapı

incelemelerinin yapılmasıdır. Şekil 5.1’de kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretim aşamaları gösterilmiştir.

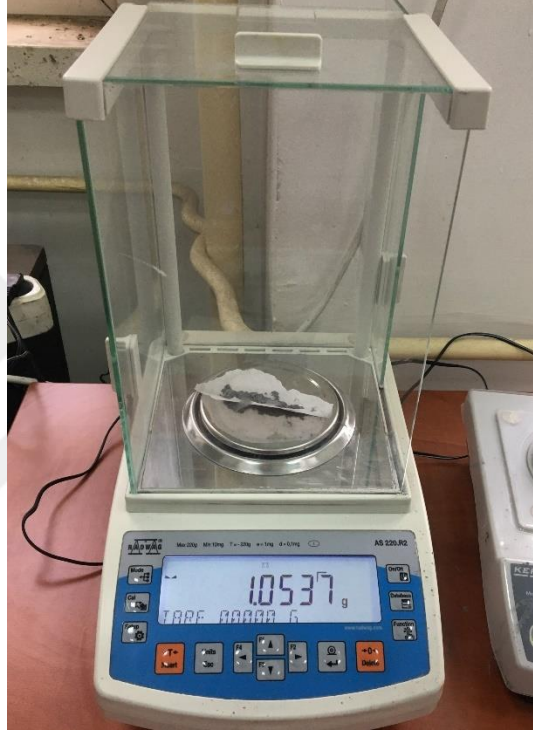


Şekil 5.1. Toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretim aşamaları

5.2.1. Toz Metalürjisi ve İndüksiyonla Sıcak Presleme Yöntemiyle Malzeme Üretimi

5.2.1.1. Tozların Karıştırılması İşlemi

Kompozit üretimindeki ilk aşama tozların doğru bir şekilde tartılmasıdır. Al7075, B₄C, Si₃N₄ ve grafen tozları Şekil 5.2’de gösterilen Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMÜ) Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Radwag marka AS 220.R2 model 0,0001 g hassasiyete sahip terazide tartılmıştır.



Şekil 5.2. Hassas terazi

Grafen, topaklanma eğilimi gösteren bir takviye elemanı olduğu için matris içerisine mümkün olduğu kadar homojen dağıtılması gerekmektedir. Yüksek enerjili bilyalı karıştırıcıda öğütücü haznenin motor sayesinde döndürülmesiyle, haznedeki bilyaların tozlara çarpıp ezmesi sonucu topakların dağıtılması ve homojen bir karışım elde edilmesi sağlanır. Bu nedenle grafen tozları etanol içerisinde Şekil 5.3’te gösterilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan MTI marka MSK-SFM-3 model yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi için tartılan tozlar, hacimce 1/3 oranında zirkon bilya ve 1/3 oranında etanol hazneye boşaltılarak yüksek enerjili bilyalı değirmende 1200 dev/dk hızda 60 dk süresince karıştırılmıştır.



Şekil 5.3. Yüksek enerjili bilyalı değirmen

Eş zamanlı olarak Al7075 tozu 100 ml etanol içerisinde 400 dev/dk hızda Şekil 5.4'te gösterilen Mtops marka MS300HS model ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 20 dk süresince karıştırılmıştır. Tabla üzerine konulan beher içerisindeki Al7075 tozu ve etanol, manyetik alan etkisiyle manyetik balıkla karıştırılır. Sonrasında $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{B}_4\text{C}$ -grafen-etanol karışımı azar azar Al7075-etanol karışımı içerisine dökülüp manyetik karıştırıcıda 20 dk süresince karıştırılmıştır.



Şekil 5.4. Isıtıcılı manyetik karıştırıcı

5.2.1.2. Karışımın Filtrelenmesi İşlemi

Karıştırılan tozlara Şekil 5.5’de gösterildiği gibi filtreleme/süzme işlemi uygulanmıştır. Filtreleme işlemi karışımdan etanolün uzaklaşıp yalnızca katı partiküllerin kalması amacıyla yapılır. Karışım; beher, huni, süzgeç ve filtre kağıdı kullanılarak yaklaşık altı saat boyunca filtrelenir.



Şekil 5.5. Filtreleme işlemi

5.2.1.3. Karışımın Kurutulması İşlemi

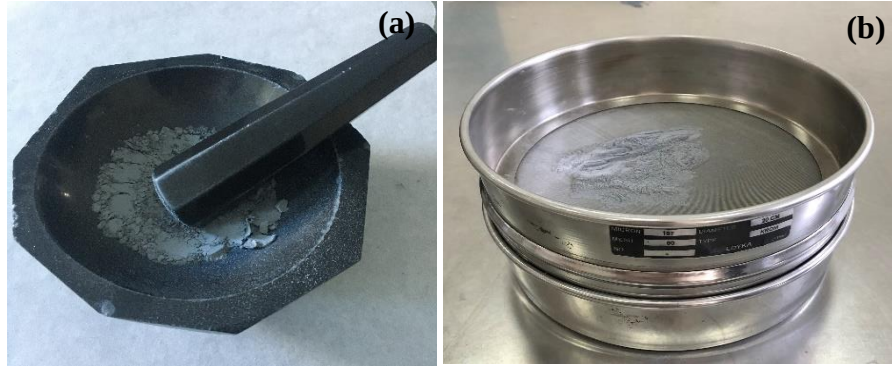
Filtrelenen toz karışımları, içerisindeki nemi uzaklaştırmak için etüv fırında 45°C sıcaklıkta 16 saat süresince sürekli vakum altında kurutulmuştur. Etüv fırın içerisindeki karışımın her yerine eşit sıcaklık etki etmesi sayesinde homojen bir kurutma işlemi gerçekleşmektedir. Kurutma işleminde Şekil 5.6’da gösterilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Bluelab marka FN120 model etüv fırın kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Etiv fırın

5.2.1.4. Karışımın Elenmesi İşlemi

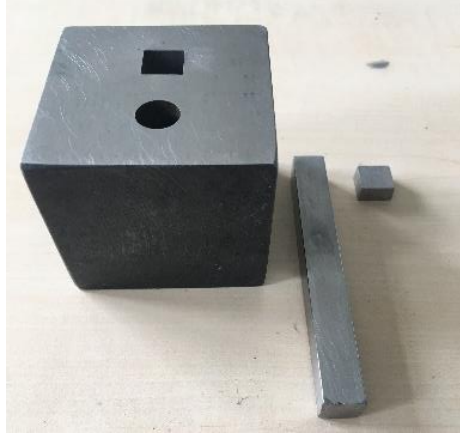
Kurutulan toz karışımlarına, içerisindeki topakları dağıtmak için agat havanda ezme işlemi uygulanmıştır. Ardından toz partikülleri eleklerle (197 μm boyutunda) elenmiştir. Şekil 5.7’de agat havanda ezme ve eleklerle eleme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Agat havanda ezme işlemi (a) ve eleklerle eleme işlemi (b)

5.2.1.5. Tozların Preslenmesi İşlemi

Tozlara ham yoğunluk kazandırmak amacıyla tek eksenle presleme işlemi uygulanmıştır. İlk olarak tozlar Şekil 5.8’de gösterilen yaklaşık 10x10 mm boyutlarındaki kalıp içerisine dikkatli bir şekilde boşaltılmıştır.



Şekil 5.8. Presleme işleminde kullanılan kalıp ve zimbalar

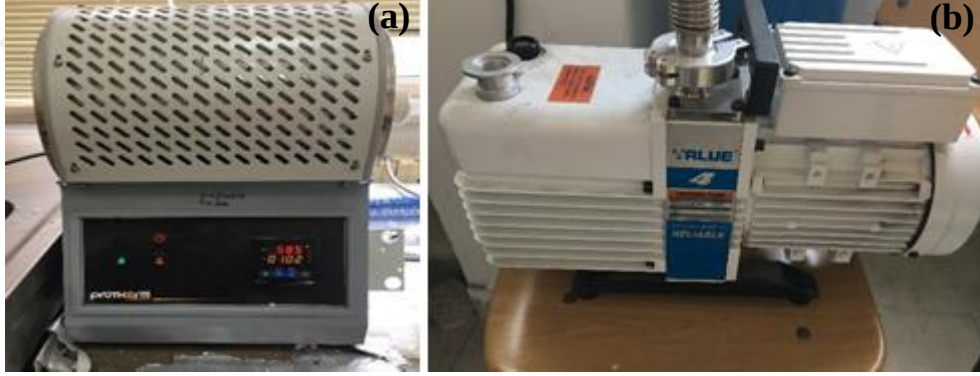
Sonrasında tozlar 800 MPa basınç altında hidrolik pres makinesinde sıkıştırılmıştır. Böylece ham yoğunluğa sahip numuneler elde edilmiştir. Ayrıca hem numunelerin kalıptan çıkmasını kolaylaştırmak hem de temizleme amacıyla her presleme işleminden sonra kalıp ve zimbalar WD-40 yağlayıcı sprej kullanılarak yağlanıp temizlenmiştir. Eğer kalıp yeterince iyi temizlenmezse içerisinde toz partikülleri kalarak kalıbın zarar görmesine neden olabilmektedir. Presleme işlemi için Şekil 5.9’da gösterilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan hidrolik pres makinesi kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Hidrolik pres makinası

5.2.1.6. Ham Numunelerin Sinterlenmesi İşlemi

Presleme işlemi sonrasında oluşan ham numuneler yeterli mukavemete ve sertliğe sahip değildir. Presleme işlemiyle belirli miktarda dayanım kazanan tozlar, asıl mukavemeti sinterleme işlemiyle elde etmektedirler. Sinterleme işleminde sıcaklığın etkisiyle taneler arasındaki bağ kuvvetlenip numunelerin yoğunluğu ve mukavemeti artar. Böylece mekanik özelliklerde iyileşme meydana gelir. Sinterleme işlemi OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Protherm marka PTF 12/20/250 model sinterleme fırınında sürekli vakum altında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında oksijensiz ortam oluşturup numunelerin yüzeyinin oksitlenmesini önlemek amacıyla OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Value marka VRD-4 model vakum pompası kullanılmıştır. Sinterlenecek numuneler 1500°C sıcaklığa kadar dayanabilen kuvarz cam tüp içerisine konulmuş ve bağlantı elemanlarıyla vakum pompasına bağlanıp sinterleme fırını içerisine yerleştirilmiştir. Ardından numuneler 5×10^{-2} Pa vakum basıncında, 600°C sıcaklıkta ve 60 dk süresince sinterlenmiştir. Şekil 5.10'da sinterleme fırını ve vakum pompası gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Sinterleme fırını (a) ve vakum pompası (b)

5.2.1.7. İndüksiyonla Sıcak Presleme İşlemi

Geleneksel (katı hal) sinterleme yöntemlerinin kullanılması, yüksek sıcaklıkta sinterleme süresinin uzun olması sebebiyle numunelerde tane büyümesine neden olmaktadır. Malzemenin mekanik özelliklerinin yüksek olması için sinterleme sıcaklığını ve süresini kontrol ederek, sinterleme sırasında tane büyümesini en aza indirmek önemli bir etkindir. Ayrıca geleneksel sinterleme işleminde kullanılan fırınların istenilen sıcaklığa ulaşması ve bu sıcaklıkta çok uzun sürelerde sabit kalması

enerji ve maliyet açısından olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek için sinterleme çalışmalarında farklı yöntemlerin (spark plazma, mikrodalga, sıcak presleme ve indüksiyonla sinterleme) kullanılması hız kazanmıştır. Bu yöntemler arasında indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle, tane büyümesi gerçekleşmeden oldukça kısa sürelerde seramik ve metalik tozlar yoğun bir şekilde sinterlenebilmektedir (Kim vd., 2007). Literatür çalışmaları incelendiğinde, kompozit malzemelere indüksiyonla sıcak presleme işleminin uygulanması sonucunda malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir (Şenel ve Mahmutoglu, 2022). İndüksiyonla sıcak presleme işleminde, kompozit numuneye sıcaklık ve basınç aynı anda uygulanarak kompozitin dayanımının artırılması sağlanmaktadır. Bu nedenle yürütülen bu çalışmada sinterleme işleminden sonra kompozit numunelerin yoğunluk değerlerini artırmak, gözeneklilik oranlarını azaltmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla numunelere indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için Şekil 5.11’de gösterilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan MTI marka EQ-SP15VIM model su soğutmalı indüksiyonla ısıtma makinesi ve Başaran marka BŞR-200 model hidrolik pres kullanılmıştır. İndüksiyonla ısıtma makinesi 220 V ile 50 Hz çalışma gerilimine, 2-25 kW güce, 300-2000 °C çalışma sıcaklığına ve 5-52 A çalışma akımına sahiptir. Soğutma işlemi ise 4 mm çapta ve 0,5 mm et kalınlığındaki bakır borularla sağlanmaktadır.



Şekil 5.11. İndüksiyonla sıcak presleme tertibatı

İndüksiyonla sıcak presleme işleminde optimum parametreleri belirlemek için termometre ile birçok kez deneme yapılmıştır. Yapılan tekrarların sonucunda kompozit numunelerin 500°C sıcaklıkta 30 sn süresince sabit kalması gerektiği belirlenmiştir. İlk olarak kompozit numuneler 70 mm çapındaki grafit kalıp içerisine konularak 25 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. 41 sn'de 500°C sıcaklığa ısıtılmış, 30 sn süresince 500°C sıcaklıkta bekletilmiş ve 10 sn süresince soğutulmuştur. Kalıp içerisinden çıkarılan numune yüzeyindeki pürüzlerin giderilmesi amacıyla numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır.

5.2.1.8. Zımparalama ve Parlatma İşlemi

Sinterlenen numunelere, yüzeydeki pürüzlerin giderilmesi amacıyla zımparalama işlemi uygulanmıştır. Sırasıyla 600, 1200 ve 2500 gritlik SiC su zımparaları, OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Metkon marka Forcipol 2V model zımpara makinesine yerleştirilmiştir (Şekil 5.12). Ardından numuneler 300 dev/dk dönme hızında 15 dk süresince zımparalanmıştır.



Şekil 5.12. Zımparalama ve parlatma cihazı

Daha sonra elmas çuha üzerine elmas solüsyon damlatılarak 300 dev/dk dönme hızında 15 dk süresince numune yüzeyleri parlatılmıştır. Şekil 5.13'de zımparalama ve parlatma işlemi sonrası numune yüzeyi gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası numune yüzeyi

5.2.2. Üretilen Numunelerin Karakterizasyonu

5.2.2.1. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) Eşitlik 5.1’de verilen Arşimet yöntemiyle belirlenmiştir. İlk olarak numunelerin suyun içerisindeki asılı kütleleri (m_A) ölçülmüştür. Sonrasında numuneler 3 saat süresince kaynamış suda bekletilmiş ve numunelerin suya doymuş kütlesi (m_D) belirlenmiştir. Kompozit numuneler etüv fırında vakum altında 50°C sıcaklıkta 180 dk bekletildikten sonra hassas terazide numunelerin kuru kütleleri (m_K) tespit edilmiştir.

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{SU} \quad (0.1)$$

Kompozit numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_K) Eşitlik 5.2’de belirtilen formül ile belirlenmektedir. Eşitlikteki ρ_M ve %M sırasıyla matris malzemesinin (Al7075) yoğunluğu ve ağırlıkça katkı oranıdır. ρ_{TK} ve %TK ise takviye elemanının (B_4C , Si_3N_4 , grafen) yoğunluğu ve ağırlıkça katkı oranıdır.

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

Kompozit numunelerin bağıl yoğunluğu ($\% \rho_R$) ise Eşitlik 5.3 yardımıyla hesaplanmaktadır.

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

Kompozitlerde gözeneklilik oranı mekanik özellikleri etkileyen önemli parametrelerden biridir. Gözeneklilik oranının azalmasıyla kompozitlerin mekanik özellikleri iyileşmektedir. Üretilen kompozitlerin gözeneklilik oranı (%G) Eşitlik 5.4 ile hesaplanmaktadır (Şenel ve Gürbüz, 2020).

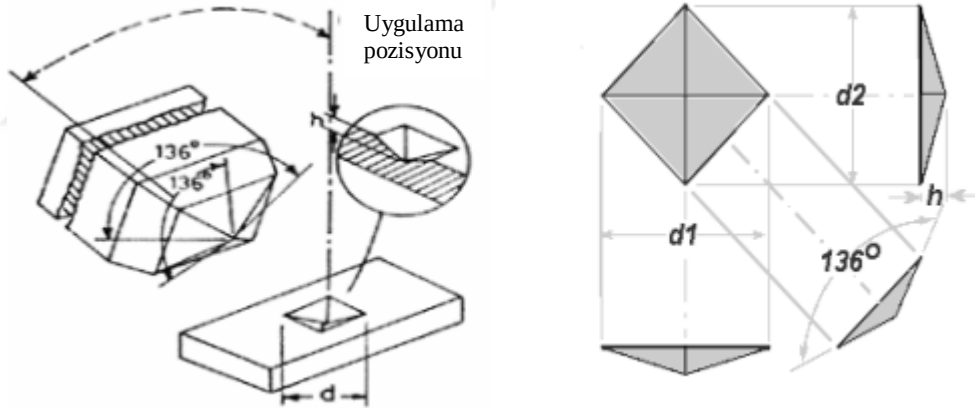
$$\%G = \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho_K} \right) \times 100 \quad (5.4)$$

5.2.2.2. Vickers Sertlik Ölçümü

Kompozit numunelerin sertliklerini ölçmek için Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Vickers sertlik ölçme yöntemi 136° tepe açısına sahip olan kare tabanlı piramit şeklindeki ucun, belirli bir yük ile parça yüzeyine bastırılması esasına dayanmaktadır. Yüzeyde iz bırakan uç kaldırıldıktan sonra izin köşegenleri mikroskop aracılığıyla ölçülür ve numunenin Vickers sertlik değeri (HV) bulunur (Eşitlik 5.5).

$$HV = \frac{1,8544 \times P}{d^2} \quad (5.5)$$

Bu eşitlikte; P parça yüzeyine uygulanan yükü (kgf), d ise izin ortalama köşegen uzunluğunu $((d_1 + d_2)/2, \text{mm})$ ifade etmektedir. Vickers sertlik ölçme yöntemi, parça üzerindeki izin kolay bir şekilde okunması, sert malzemelere de uygulanabilmesi ve düşük maliyetli olması gibi sebeplerle sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntemde, sert olması sebebiyle kare tabanlı piramit şeklindeki elmas uç kullanılmaktadır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Vickers sertlik ölçme işleminde kullanılan elmas piramit uç (Argıncıklıgil, 2019)

Bu tez çalışmasında OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan TMTeck marka HV-1000B model Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.15). Cihaz parça 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 yük uygulayabilmektedir. Kompozit numunelere 1,961 N yük, 15 sn süresince uygulanmıştır. Uç kaldırıldıktan sonra oluşan kare tabanlı piramit izin köşegen uzunlukları mikroskop aracılığıyla ölçülmüştür. Rastlantısal hatayı azaltmak için her numuneden yaklaşık 10 ölçüm

alınmıştır. Ardından belirlenen değerler manuel olarak sertlik ölçme cihazına girilmiş ve numunelerin ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 5.15. Vickers sertlik ölçme cihazı

5.2.2.3. Basma Dayanımı Testleri

Basma dayanımı, malzemelerin statik yük altında dayanabileceği maksimum basma gerilmesini ifade eder. Malzemenin basma dayanımı gerilme-gerinim diyagramının tepe noktası olup Eşitlik 5.6 ile belirlenir.

$$\sigma = F_{maks} / A_0 \quad (5.6)$$

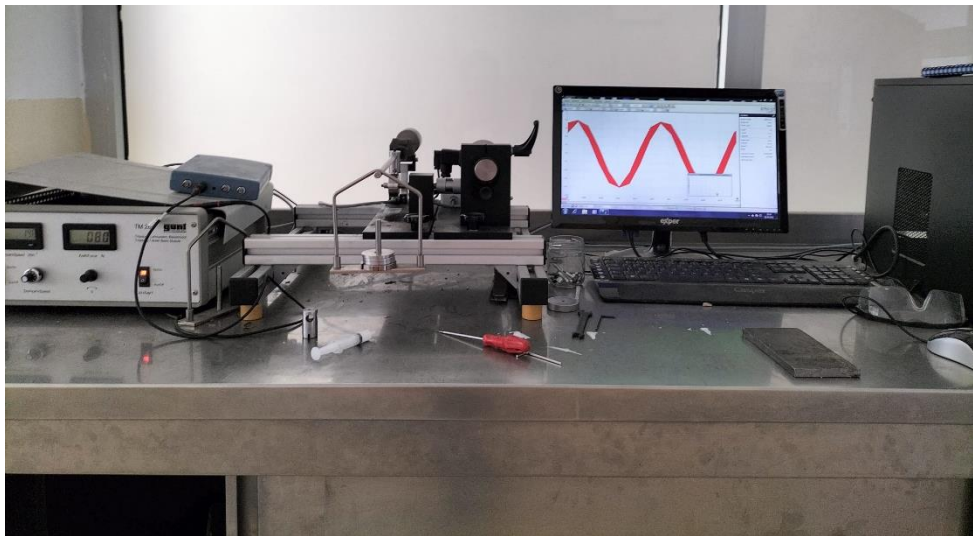
Burada σ basma gerilmesi, F_{maks} numuneye uygulanan maksimum kuvvet, A_0 ise numunenin ilk kesit alanıdır. Basma testinde numune iki plaka arasına yerleştirilir ve belirli bir hızda yük uygulanır. Numune kırıldığı anda test sonlanır. Elde edilen verilerle gerilme-gerinim diyagramı çizilerek basma dayanımı belirlenir. Bu tez çalışmasında numunelerin basma dayanımı OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Mares marka Tst 10t model basma/çekme test cihazı ile belirlenmiştir (Şekil 5.16). Plakalar arasına yerleştirilen numunelere 1 mm/dk ön yükleme hızında 5 MPa ön yük uygulanmıştır. Ardından 3 mm/dk hızda basma testi gerçekleştirilmiştir. Numune kırıldığında test sonlanmış ve basma test cihazına entegre olan yazılımdaki gerilme-gerinim diyagramından basma dayanımı tespit edilmiştir.



Şekil 5.16. Basma/çekme test cihazı

5.2.2.4. Aşınma Testleri

Üretilen kompozit numunelerin tribolojik özellikleri (sürtünme katsayısı, kütle kaybı, aşınma oranı) OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Gunt marka TM260 model pin-on disk aşınma test düzeneğiyle belirlenmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. Aşınma test cihazı

Aşınma test düzeneğine 0-80 N arasında yükleme yapılabilmekte ve mil dönüş hızı 0-250 dev/dk arasında ayarlanabilmektedir. İlk olarak aşındırıcı paslanmaz çelik disk elmas solüsyon ve elmas çuha yardımıyla parlatılmıştır. Ardından numune tutucuya yerleştirilen numune, aşındırıcı paslanmaz çelik diske temas ettirilmiştir. Yükleme sepetine uygulanacak yükler yerleştirilip, kontrol ünitesinden sürtünme kuvveti değeri manuel olarak sıfırlanmıştır. Sonrasında kontrol ünitesindeki başlat tuşuna basılarak disk dönmeye başlamış ve bilgisayar yazılımı sürtünme kuvvetini saniyede bir ekrana aktarmıştır. Aşınma testleri kuru koşullar altında; 5-10 N yüklemede, 200 dev/dk dönme hızında, 1000 m kayma mesafesinde ve 40 dk test süresinde gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin aşınma oranını belirlemek için aşındırıcı diskin yarıçapına ($R=20$ mm), test süresine ($t=40$ dk) ve diskin dönme hızına ($n=200$ dev/dk) bağlı olan kayma mesafesinin (L) hesaplanması gerekmektedir (Eşitlik 5.7). Bu eşitliğe göre kayma mesafesi 1000 m olarak hesaplanmıştır.

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

Aşınma hacmi (ΔV) Eşitlik 5.8 ile belirlenebilmektedir. Burada m_i aşınma öncesi numune kütlesi, m_s aşınma sonrası numune kütlesi ve ρ_D deneysel yoğunluktur.

$$\Delta V = (m_i - m_s) / \rho_D \quad (5.8)$$

Malzemelerin tribolojik özelliklerini belirlemede etkili olan diğer bir parametre ise aşınma oranıdır (W , mm³/Nm). Aşınma oranı; aşınma hacminin (ΔV), uygulanan kuvvet (F) ve kayma mesafesine (L) bölünmesiyle hesaplanabilmektedir (Eşitlik 5.9).

$$W = \frac{\Delta V}{F \times L} \quad (5.9)$$

5.2.2.5. Tozların Tane Boyutu Ölçümü

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan tozlar farklı firmalardan temin edilmiştir. Ticari olarak temin edilen tozların boyutlarını doğrulamak amacıyla tane boyut ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümde lazer kırınım yöntemi kullanılmıştır. Tozların üzerine yansıtılan lazer ışınları kırılarak yansımakta ve mercekten geçerek tarayıcıya ulaşmaktadır. Tarayıcıdan bilgisayar ekranına gelen ışınlar değerlendirilerek tozların tane boyutu belirlenmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan tozların tane boyut ölçümü OMÜ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (KİTAM)'nde yer

alan Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazıyla yapılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Tane boyut ölçüm cihazı

5.2.2.6. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını kırınım (XRD) analizi ile yapı içerisindeki atomların düzlemlerdeki dizilimine bağlı olarak malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi edinilmektedir. XRD analizinde malzeme üzerine x-ışınları gönderilmekte ve bu ışınlar farklı açılarda yansıma yapmaktadır. Böylelikle yapı içerisindeki farklı malzemelerin faz dağılımı, faz miktarları ve yönlenmeleri belirlenebilmektedir. Tez çalışması kapsamında XRD faz analizi için OMÜ KİTAM'da bulunan Rigaku marka Smartlab model x-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.19).

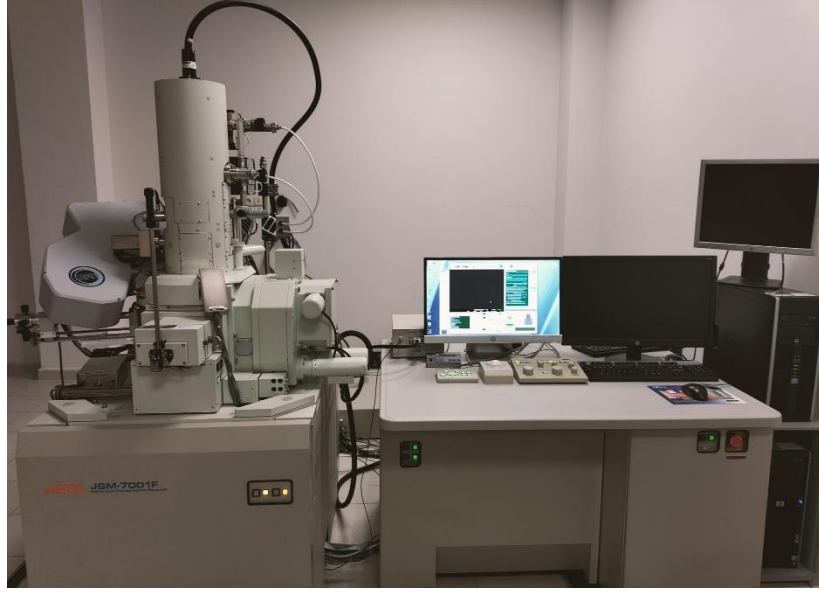


Şekil 5.19. X-ışını kırınım cihazı

5.2.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, yüksek enerjili elektron demetinin malzeme üzerine gönderilerek malzeme üzerindeki atomlarla bu elektronların etkileşime girmesi ve geri yansıyan elektronların incelenmesi esasına dayanmaktadır. SEM analizi ile yapı içerisindeki tanecik boyutu, faz miktarı, faz dağılımı ve malzeme morfolojisi hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Ayrıca SEM analizi ile 1 nm'nin altındaki boyutlarda yüksek çözünürlükte görüntüler alınabilmektedir.

Bu tez çalışmasında SEM analizi ile tozların yüzey morfolojisi, numunelerin kırık yüzey görüntüleri ve element dağılım haritaları belirlenmiştir. SEM analizleri için OMÜ KİTAM'da bulunan Jeol marka JSM-7001F model SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

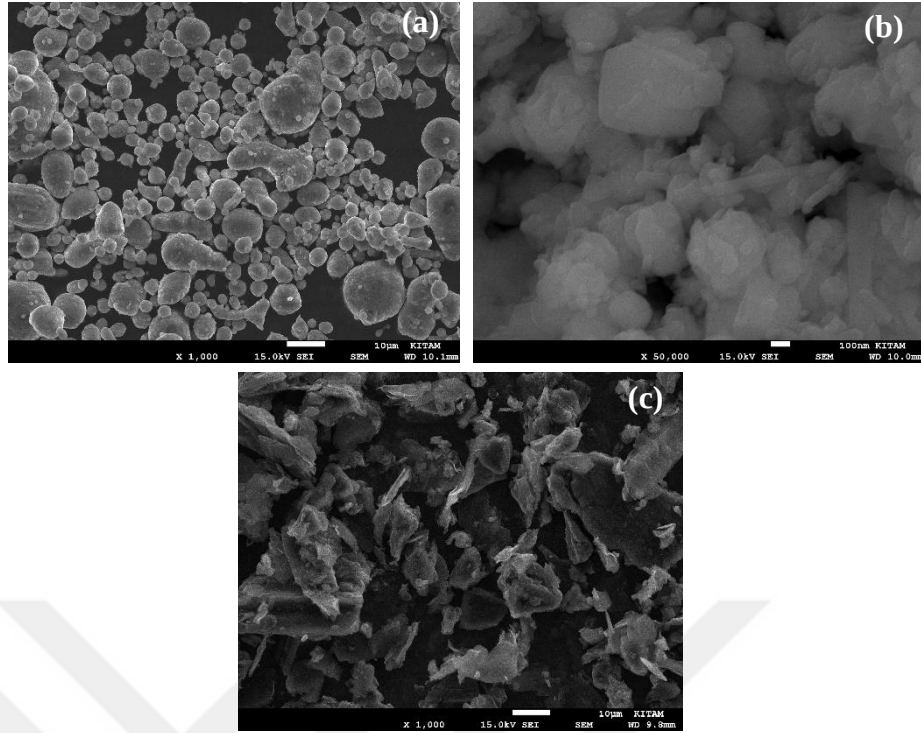
Bu tez çalışması kapsamında toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrisli B₄C, Si₃N₄ ve grafen takviyeli kompozitler üretilmiştir. Bu bölümde üretilen Al7075-B₄C-grafen ve Al7075-Si₃N₄-grafen kompozitlerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve mikroyapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

6.1. Al7075 Matrisli Si₃N₄/Grafen Takviyeli Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde Al7075 matrisli Si₃N₄ (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında) ve grafen (ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 katkı oranlarında) takviyeli kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında kompozit malzemelerin tane boyutu, faz yapısı, mikroyapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı incelenmiştir.

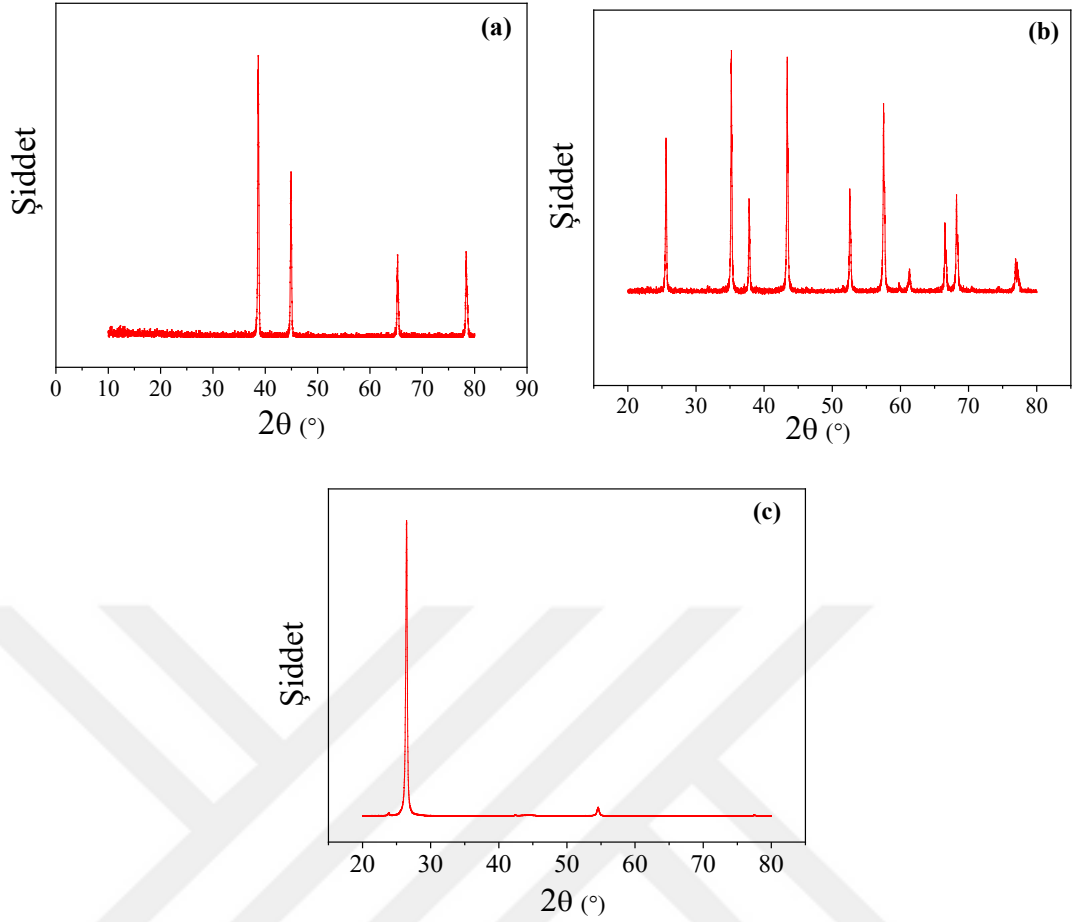
6.1.1. Al7075, Si₃N₄ ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyut Analizleri

Çalışmada kullanılan Al7075, Si₃N₄ ve grafen tozlarının SEM görüntüleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Al7075 tozunun SEM görüntüsü incelendiğinde, küresel morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin küresel olmayan ve düzensiz yapıda, grafen tozunun ise tabakalı ve plaka benzeri yapıda olduğu görülmüştür.



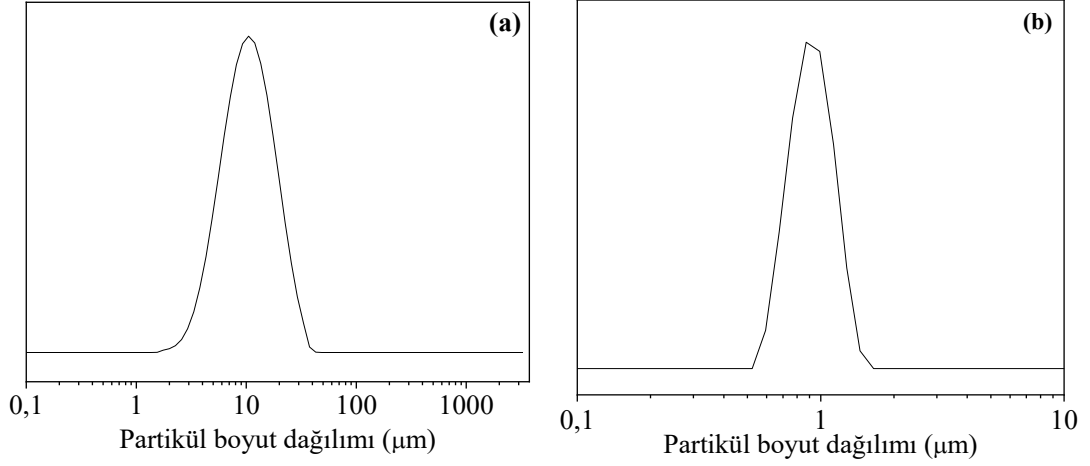
Şekil 6.1. Al7075 alaşım (a), Si₃N₄ (b) ve grafen (c) tozlarının SEM görüntüleri

Al7075 alaşımı, Si₃N₄ ve grafen tozlarının faz analizi Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2’de verilen XRD örgü desenleri incelendiğinde matris malzemesi olarak tercih edilen Al7075 alaşımının kırınım açılarının $2\theta \sim 38^\circ$, 45° , 66° ve 78° olduğu tespit edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan Si₃N₄’ün kırınım açılarının $2\theta \sim 26^\circ$, 35° , 38° , 43° , 53° , 57° , 61° , 67° , 69° , 77° ve grafenin kırınım açısının $2\theta \sim 26,5^\circ$ olduğu belirlenmiştir. Bu analiz kompozit yapı içerisindeki alüminyum, grafen ve Si₃N₄’ün varlığını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. Al7075 alaşım (a), Si₃N₄ (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri

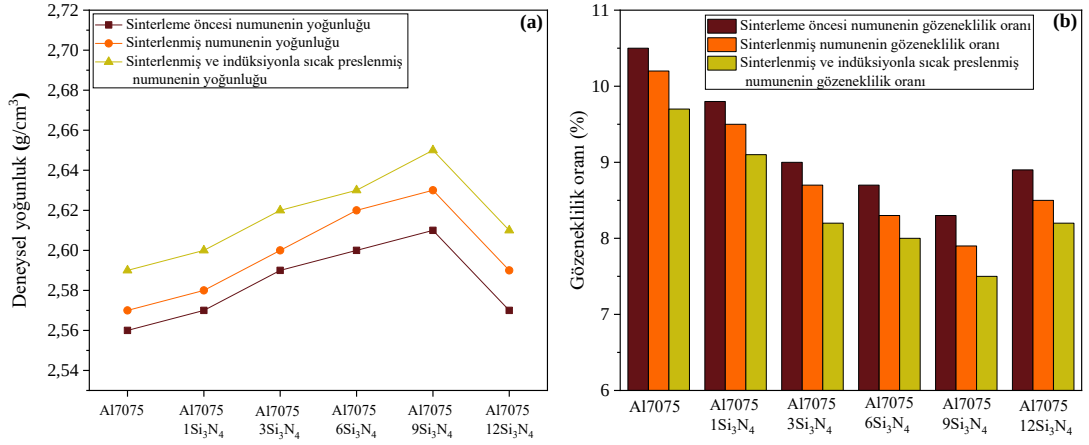
Al7075 alaşımını ve Si₃N₄ tozlarının tane boyutu Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyutu ölçüm cihazıyla belirlenmiştir (Şekil 6.3). Şekil incelendiğinde y eksenini tanecik boyutunun hacimsel oranını, x eksenini ise tanecik boyut dağılımını ifade etmektedir. Yapılan ölçümlere göre Al7075 tozunun ~10 µm tanecik boyutunda olduğu, Si₃N₄'ün ise ~0,8 µm tanecik boyutunda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.3. Al7075 alaşım (a) ve Si₃N₄ (b) tozlarına ait tane boyut dağılımı

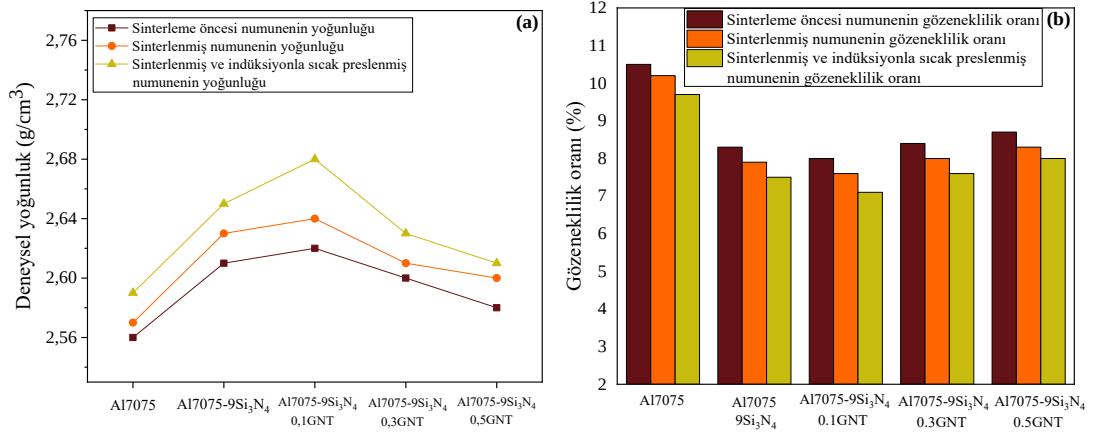
6.1.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Al7075 esaslı Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin takviye oranı ve ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk değerleri ve gözeneklilik oranları Şekil 6.4’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde ısıtılma işlemin etkisiyle kompozitlerin yoğunluk değerinin arttığı, gözeneklilik oranının ise azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, ısıtılma işlem sırasında sıcaklığın etkisiyle tanelerin boyun vererek yapı içerisindeki gözenekliliğin azalmasından kaynaklanmaktadır. Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek yoğunluk (2,65 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Bu sebeple %9Si₃N₄ takviye oranına farklı oranlarda grafen ilavesi yapılarak grafen katkı oranının kompozitlerin yoğunluk, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, tribolojik özellikleri ve mikroyapısına olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 6.4. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri

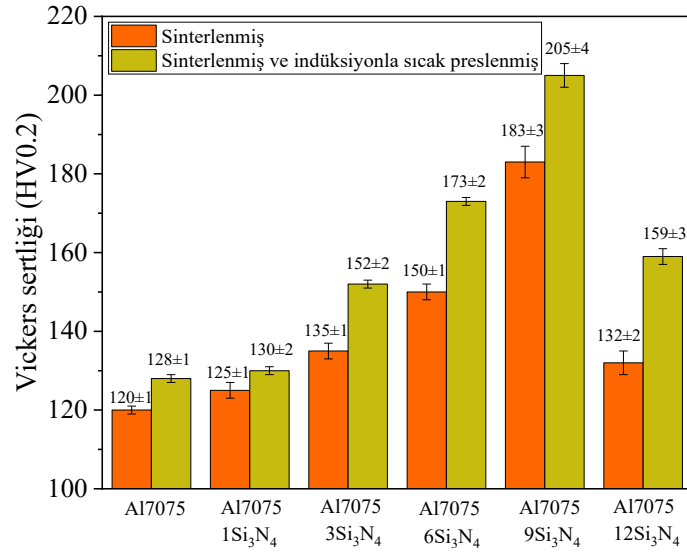
Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin grafen katkı oranı ve ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk ve gözeneklilik oranı değişimleri Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Grafen katkı oranının ve indüksiyonla sıcak presleme işleminin etkisiyle kompozitlerin yoğunluk değerleri artmış ve gözeneklilik oranları azalmıştır. En yüksek yoğunluk (2,68 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,1) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen kompozitte tespit edilmiştir. Bu kompozit yapının yoğunluğu sinterleme öncesi Al7075 alaşımının yoğunluğuna kıyasla %4,7 oranında artmıştır. Ancak %0,1 grafen katkısından sonra grafen partiküllerinin toplanması ve partiküller arasındaki boşluğun artması sebebiyle kompozitlerin yoğunluk değerleri azalarak gözeneklilik oranları artmıştır.



Şekil 6.5. Al7075 alaşımı ile Al7075-9Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin ısıtılma türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri

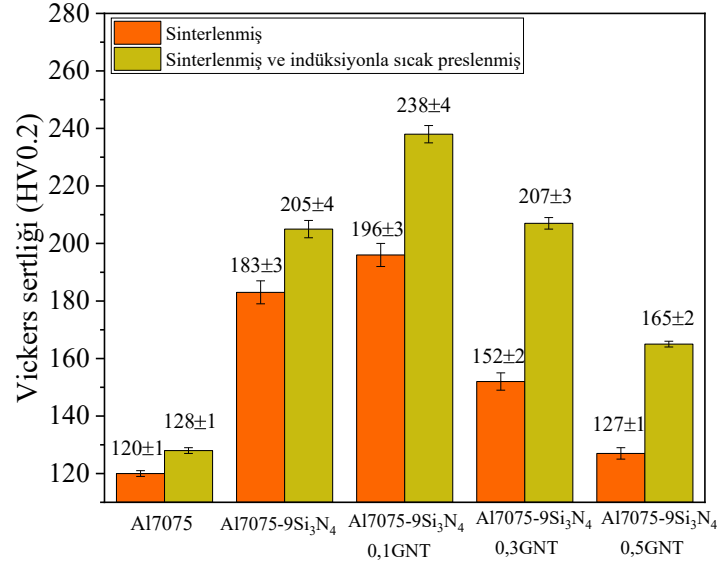
6.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üretilen Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin takviye oranı ve ısıtılma türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Her numune yüzeyinden yedi sertlik ölçümü yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Şekil incelendiğinde sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerin Vickers sertliğinin arttığı görülmüştür. Bu artışın sebebi, sıcaklık ve basıncın etkisiyle yapı içerisindeki boşluğun azalarak yumuşak matris bölgelerine takviye elemanının yerleşmesidir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı Si₃N₄ katkı oranının artmasıyla Vickers sertliğinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek Vickers sertliği (205 HV) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte tespit edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına (120 HV) kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte sertlik değeri %70,8 oranında artmıştır. Ancak %12 Si₃N₄ katkı oranında partiküllerin farklı bölgelerde toplanmasından dolayı kompozitin Vickers sertliğinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.6. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri

Şekil 6.7’de Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin takviye oranı ve ısıtılma işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri verilmiştir. En yüksek Vickers sertliği (238 HV) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen kompozitte elde edilmiştir. Bu kompozitte Vickers sertliği, sadece sinterlenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozite (183 HV) kıyasla %30,1 oranında artmıştır. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkı oranından sonra grafenin matris içerisinde homojen dağılmamasından dolayı Vickers sertlik değeri azalmıştır.



Şekil 6.7. Al7075 alaşımı ile Al7075-9Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri

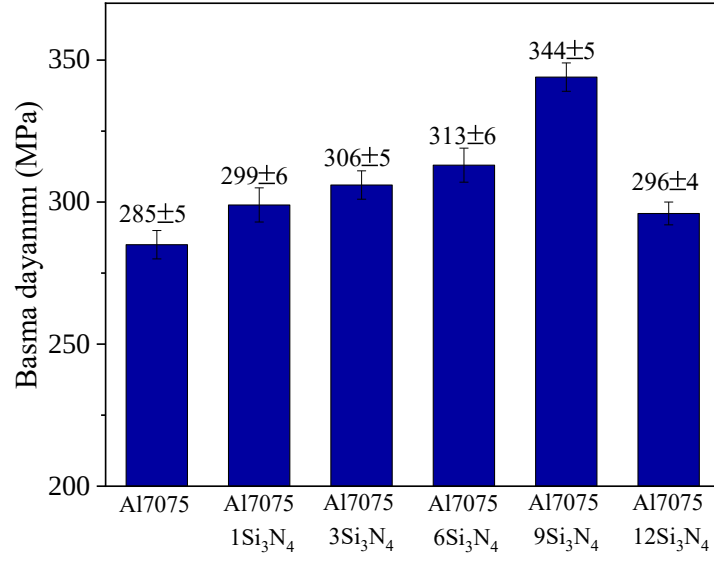
Kompozitlerin sertliğinin belirlenmesinde takviye malzemesinin sertliğinin önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır. Kompozitlerin sertliği (H_c) Eşitlik 6.1 ile hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte H_m ve H_r matris ve takviye malzemesinin sertliğini, f_m ve f_r ise matris ve takviye malzemesinin hacimsel katkı oranını ifade etmektedir (Şenel ve Üstün, 2022).

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

Ayrıca kompozit malzemelerin sertliği dislokasyon yoğunluk mekanizması ile artırılabilir. Yapı içerisinde yoğunluğu artan dislokasyonlar birbirlerini zorlamaktadır. Böylece malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç artmaktadır. Bu durum da kompozitin sertliğinin artmasına yol açmaktadır (Şenel ve Üstün, 2022).

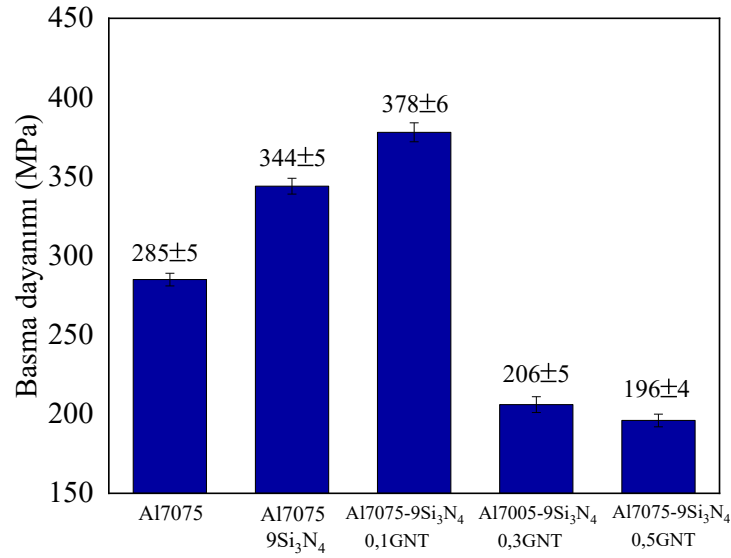
6.1.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sadece sinterlenmiş Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin Si₃N₄ katkı oranına bağlı olarak basma dayanımı değerleri Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde Si₃N₄’ün sert yapısından dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitlerin basma dayanımında artış tespit edilmiştir. Al7075 alaşımına (285 MPa) kıyasla %20,7 oranında artışla maksimum basma dayanımı (344 MPa) Al7075-9Si₃N₄ kompozit malzemede elde edilmiştir. Ağırlıkça %12 Si₃N₄ takviyesinde ise tozların homojen olmayan dağılımından dolayı basma dayanımı azalmıştır.



Şekil 6.8. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin basma dayanımı değerleri

Şekil 6.9’da sadece sinterlenmiş Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin basma dayanımı değerleri gösterilmiştir. En yüksek basma dayanımı (378 MPa) Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen kompozitte elde edilmiştir. Ancak %0,1 grafen katkısından sonra kompozitlerin basma dayanımı azalmıştır. Grafenin mükemmel katı yağlayıcı özelliğine sahip olmasından dolayı plastik deformasyon sırasında kayma oluşmuş ve grafen katkı oranının artmasıyla kompozitin basma dayanımı azalmıştır.



Şekil 6.9. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄, Al7075-Si₃N₄-grafen kompozitlerin basma dayanımı değerleri

Kompozit malzemelerin dayanımını artırmak için birçok mekanizma (yük transferi, tane inceltme, termal uyumsuzluk, Orowan güçlendirme) bulunmaktadır. Kompozit malzemenin dayanımı (σ_c) Eşitlik 6.2 ile bulunabilmektedir (Şenel ve Mahmutoglu, 2022).

$$\sigma_c = \sigma_m + \sqrt{\Delta\sigma_L^2 + \Delta\sigma_H^2 + \Delta\sigma_T^2 + \Delta\sigma_O^2} \quad (6.2)$$

Burada σ_m matris malzemesinin dayanımı, $\Delta\sigma_L$, $\Delta\sigma_H$, $\Delta\sigma_T$, $\Delta\sigma_O$ sırasıyla yük transferi, tane inceltme, termal uyumsuzluk ve Orowan mekanizmasının kompozitin dayanımındaki artış miktarını ifade etmektedir. Yük transfer mekanizması Eşitlik 6.3 ile belirlenebilmektedir. Eşitlikte f_r takviye malzemesinin hacimsel oranı, σ_{YM} matris malzemesinin akma dayanımıdır. Matris malzemesi hasara uğradığında yük takviye elemanlarına transfer olmaktadır. Böylece matris malzemesi ve takviye elemanları arasında güçlü bir arayüzey bağı oluşmaktadır (Şenel ve Mahmutoglu, 2022).

$$\sigma_L = 0,5 f_r \sigma_{YM} \quad (6.3)$$

Tane inceltme mekanizması (σ_{GR}) Hall-Petch denklemiyle ifade edilmektedir (Eşitlik 6.4). Eşitlikte k malzeme sabitini ve d ortalama tane çapını belirtmektedir. Tanelerin incilmesiyle tane sınırı sayısı artar ve dislokasyonlar kolay hareket edemez. Böylece dislokasyon yoğunluğu artarak kompozitin dayanımında iyileşme görülmektedir (Chen vd., 2018).

$$\sigma_{GR} = kd^{-1/2} \quad (6.4)$$

Kompozit malzemelerin dayanımını etkileyen mekanizmalardan diğeri ise termal uyumsuzluktur. Matris ve takviye elemanı arasındaki termal uyumsuzluk dislokasyon yoğunluğunu artırarak plastik şekil değişimine karşı direnç oluşturmaktadır. Termal uyumsuzluğun kompozitin dayanımına katkısı ($\Delta\sigma_{CTE}$) Eşitlik 6.5 ile belirlenebilmektedir. Bu eşitlikte; G matris malzemesinin kayma modülünü, ΔT üretim sıcaklığı ile oda sıcaklığı arasındaki farkı, ΔCTE ise matris ve takviye elemanı arasındaki termal uyumsuzluğu ifade etmektedir (Pourmand ve Asgharzadeh, 2020; Jiang vd., 2019).

$$\Delta\sigma_{CTE} = 4,33Gb\sqrt{\frac{\Delta T(\Delta CTE)V}{bd}} \quad (6.5)$$

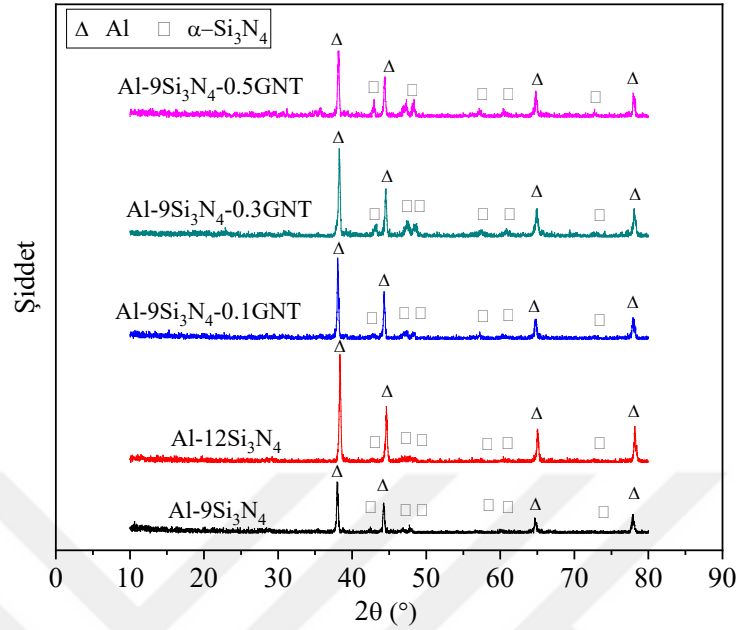
Kompozit yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğunun artması ile Orowan döngüleri oluşur. Orowan döngüleri; dislokasyon çizgilerinin belirli bir yoğunluktan sonra tanecikler etrafında dairesel bir şekil almasıdır. Bu döngüler dislokasyonların hareketini engelleyerek kompozitin dayanımını artırmaktadır. Orowan güçlendirme mekanizması (σ_O) Eşitlik 6.6’da verilmiştir. Eşitlikte λ takviye elemanının taneleri arasındaki mesafeyi ve r ise tanelerin yarıçapını ifade etmektedir (Munoz-Morris vd., 2002).

$$\sigma_O = 0,13(Gb / \lambda)\ln(r / b) \quad (6.6)$$

6.1.5. XRD Faz Analizlerinin Değerlendirilmesi

Al7075-9Si₃N₄, Al7075-12Si₃N₄ ve Al7075-9Si₃N₄-GNT kompozitlerin XRD faz analizleri Şekil 6.10’da gösterilmiştir. Alüminyum ve Si₃N₄ sırasıyla “Δ” ve “□” simgeleriyle gösterilmiştir. Si₃N₄, 1420°C sıcaklığın altında α-Si₃N₄ yapısındadır. Bu çalışmada, kompozitler 600°C sıcaklıkta sinterlendiğinden yalnızca α-Si₃N₄ yapı bulunmaktadır. Şekil incelendiğinde tüm piklerin alüminyum ve α-Si₃N₄’e ait olduğu görülmektedir. Grafenin nanometrik boyuta sahip olmasından ve matrise düşük miktarda takviye edilmesinden dolayı XRD analizlerinde grafen piki (2θ=26,5°) tespit edilememiştir. Ayrıca kompozit yapılarda Al₄C₃ gibi ikincil faza rastlanılmamıştır. Al₄C₃ oluşumu grafenin yapısına hasar verebilmekte ve kompozitin mekanik özelliklerinin iyileşmesine engel olabilmektedir. Al₄C₃ oluşumu için kritik sıcaklık

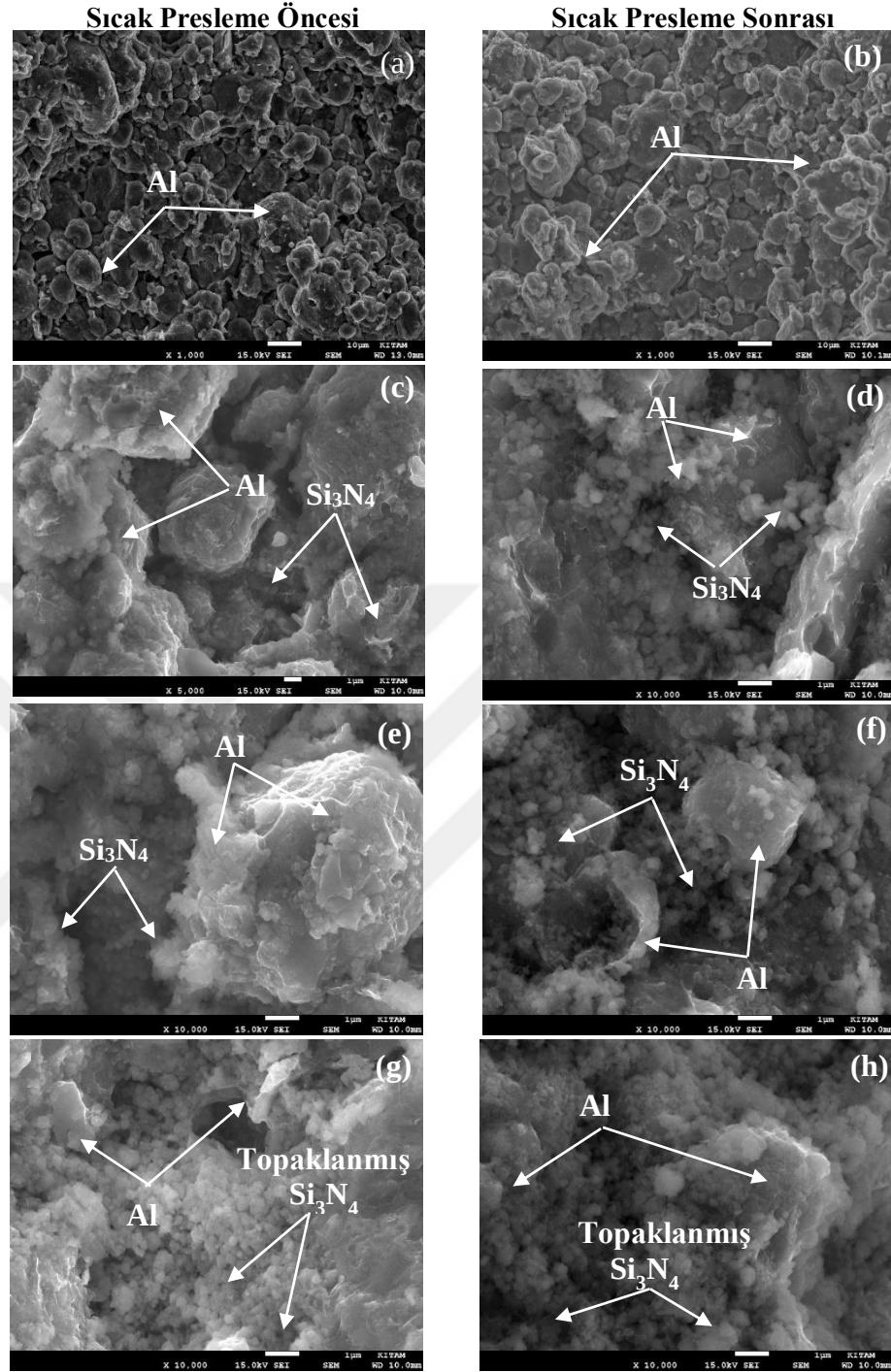
830°C'dir. Ancak çalışmada sinterleme işleminin 600°C sıcaklıkta yapılması sebebiyle ikincil faz oluşumuna neden olabilecek yeterli sıcaklık oluşmamıştır.



Şekil 6.10. Al7075-Si₃N₄ ve Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlere ait XRD örgü desenleri

6.1.6. SEM-EDX Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle üretilen Al7075 ve Al7075-3Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-12Si₃N₄ kompozitlerin, indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde indüksiyonla sıcak presleme öncesi sinterlemenin etkisiyle Al7075 ve Si₃N₄ partikülleri arasında güçlü arayüzey bağı olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde ise sıcaklığın yanında basıncın da etkisiyle daha yoğun bir mikroyapı görülmektedir. Ancak ağırlıkça %12Si₃N₄ katkısında partiküllerin topaklandığı gözlemlenmiştir.

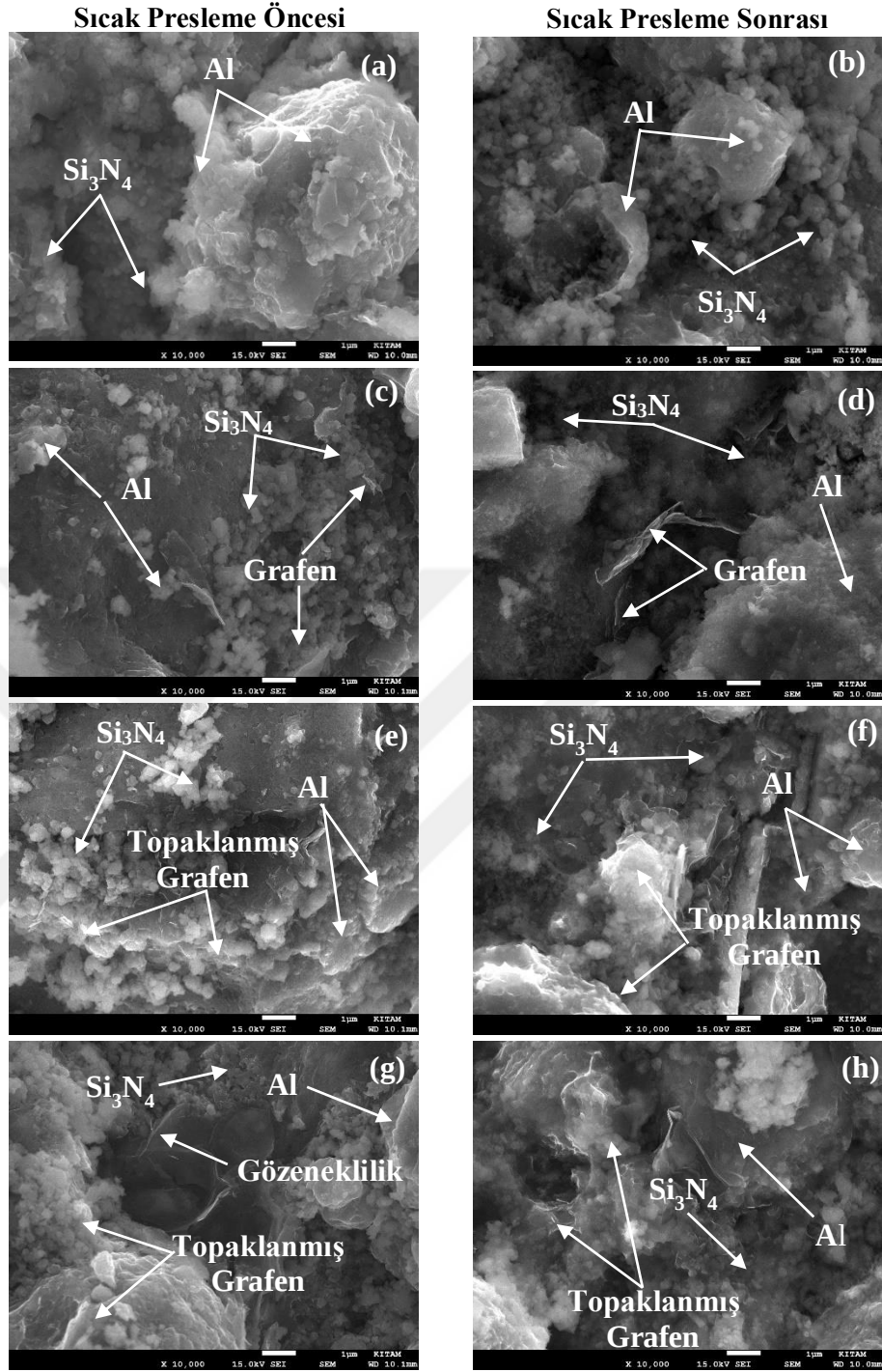


Şekil 6.11. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-3Si₃N₄ (c), Al7075-9Si₃N₄ (e), Al7075-12Si₃N₄ (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-3Si₃N₄ (d), Al7075-9Si₃N₄ (f), Al7075-12Si₃N₄ (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

Al7075-9Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen, Al7075-9Si₃N₄-0,3grafen ve Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen kompozitlerin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen kompozit yapıda grafen partiküllerinin homojene yakın dağıldığı

gözlemlenmiştir (Şekil 6.12c, d). Ayrıca indüksiyonla sıcak presleme işlemiyle taneler arasında boşluğun azalarak mikroyapının yoğunlaştığı belirlenmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkısından sonra yapı içerisinde topaklanmalar ve gözenekler tespit edilmiştir (Şekil 12e-h). Bu sebeple ağırlıkça %0,1 grafen katkısından sonra kompozitin mekanik özelliklerinin bozulduğu belirlenmiştir. Böylelikle sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinin belirli bir grafen katkı oranına kadar kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği SEM görüntüleri ve mekanik test sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

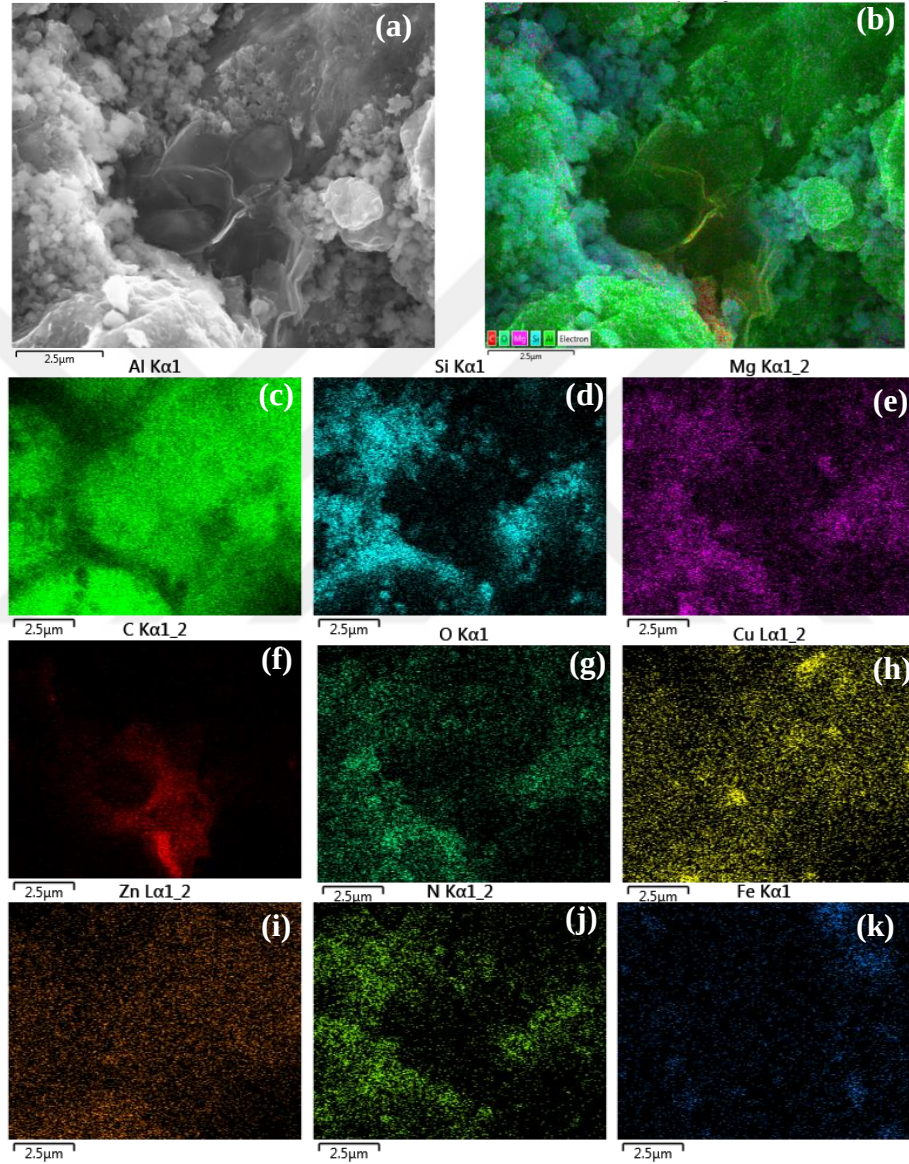




Şekil 6.12. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-9Si₃N₄ (a), Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen (c), Al7075-9Si₃N₄-0,3grafen (e), Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-9Si₃N₄ (b), Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen (d), Al7075-9Si₃N₄-0,3grafen (f), Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

Şekil 6.13’de sadece sinterlenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüleri ve element dağılım haritası verilmiştir. Kompozit yapı içerisindeki elementlerin (Al, Si, Mg, C, O, Cu, Zn, N, Fe) her biri farklı renk ile

gösterilmiştir. Al, Mg, O, Cu, Zn ve Fe elementleri Al7075 alaşımının dağılımını yansıtmaktadır. Si ve N elementleri yapı içerisindeki Si_3N_4 varlığını doğrulamaktadır. C dağılımı ise grafeni temsil etmektedir. Görüntüler incelendiğinde kırmızı renk ile gösterilen grafenin bazı bölgelerde topaklandığı tespit edilmiştir. Al7075-9 Si_3N_4 -0,5grafen kompozit yapıda mekanik özelliklerin bozulmasında topaklanmış grafen partiküllerinin etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

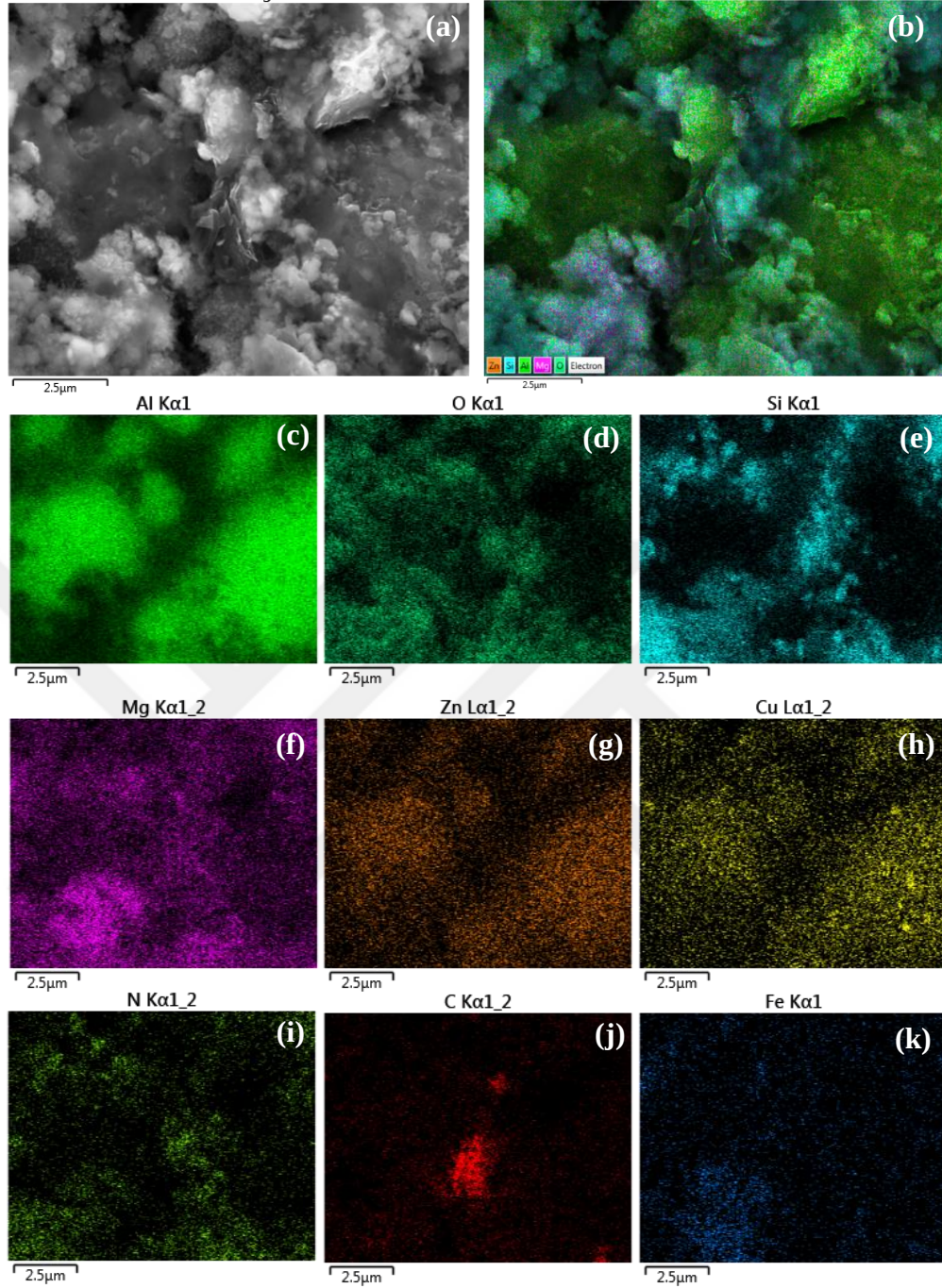


Şekil 6.13. Sadece sinterlenmiş Al7075-9 Si_3N_4 -0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-k)

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9 Si_3N_4 -0,5grafen kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Al, O, Mg, Zn, Cu ve Fe elementleri matris malzemesi olan

Al7075 alaşımının yapı içerisindeki varlığını doğrulamaktadır. Si ve N elementleri takviye elemanı olan Si_3N_4 'ün dağılımını yansıtmaktadır. C elementi ise grafeni temsil etmekte olup kırmızı renk ile gösterilmiştir. şekil incelendiğinde grafenin bazı bölgelerde kümelendiği ve tane sınırlarına yerleştiği görülmektedir. Ayrıca indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunelerde mikroyapının sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.



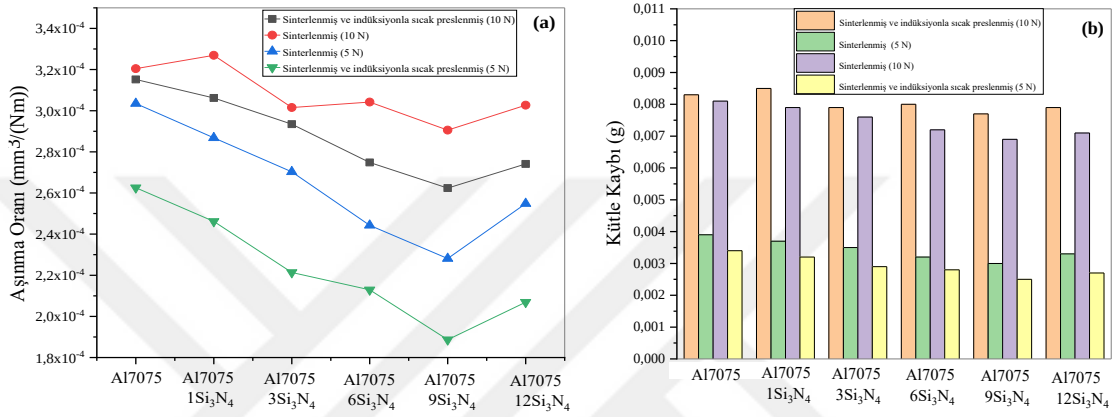


Şekil 6.14. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-k)

6.1.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 6.15’de Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin ısıt işlem türü ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri verilmiştir. Aşınma testleri 5-10 N yüklemde, 200 dev/dk dönme hızında ve 1000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Şekle genel olarak bakıldığında sinterleme sonrası indüksiyonla

sıcak presleme işleminden dolayı kompozitlerin aşınma oranı ve kütle kaybı değerlerinin sıcak presleme öncesine göre azaldığı görülmektedir. En düşük aşınma oranı ($0,00018 \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı ($0,0025 \text{ g}$) 5 N yüklemde sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak test sırasında uygulanan yükün artması, kompozit ile çelik disk arasındaki temas alanını doğrudan etkilediğinden tribolojik özellikleri olumsuz etkilemiştir. Bu sebeple kompozitlerin aşınma oranı ve kütle kaybı değerlerinde artış görülmüştür.



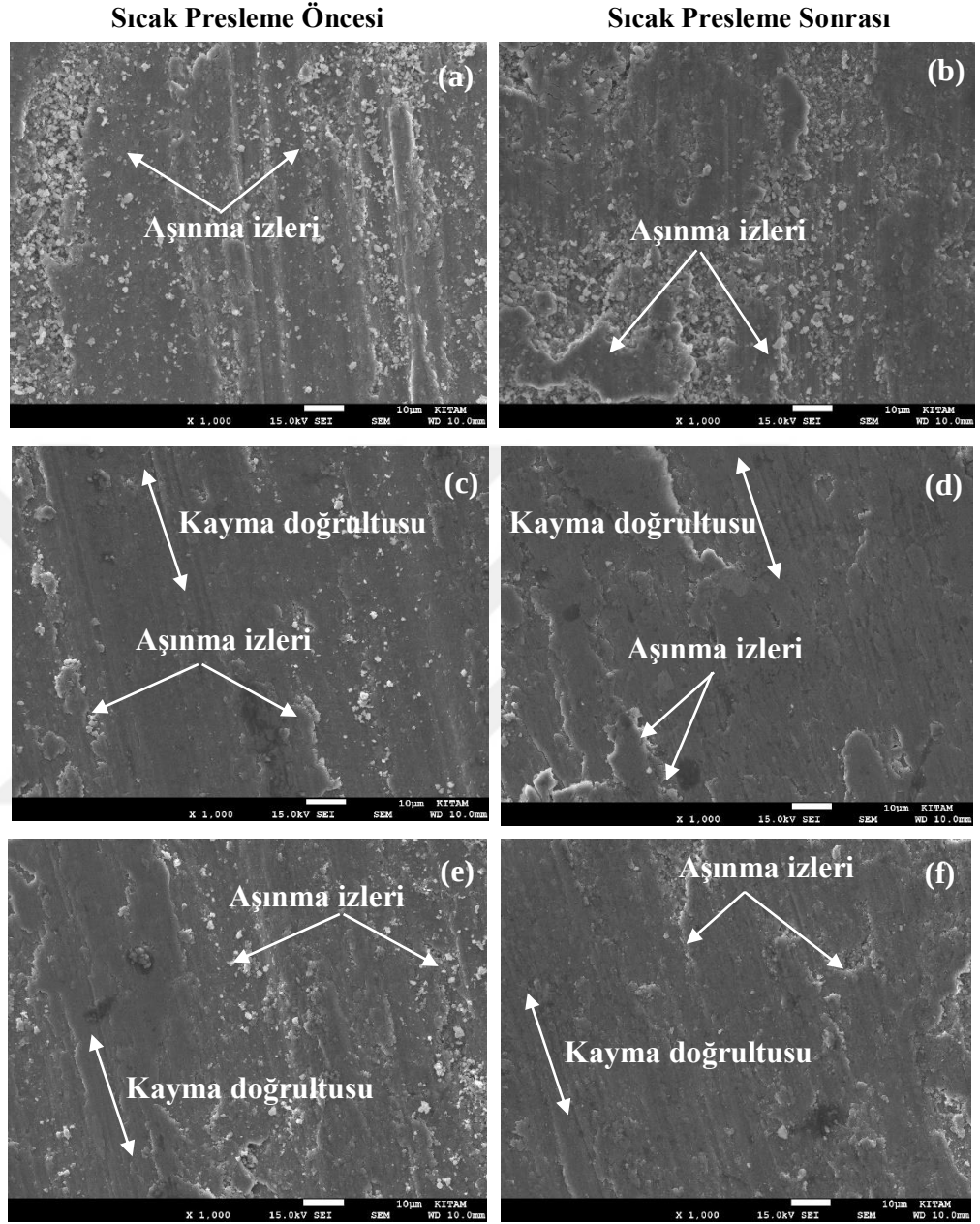
Şekil 6.15. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin ısıtım türüne ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri

Aşınma oranı ile sertlik arasındaki ilişki Archard eşitliği (Eşitlik 6.7) ile açıklanabilir. Bu denklemde H numune sertliğini, μ ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Denklem göre sertliğin artmasıyla aşınma oranı azalmaktadır (Şenel ve Üstün, 2022). Yapılan çalışmada elde edilen aşınma oranı sonuçları Archard eşitliği ile doğrulanmaktadır. Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek Vickers sertliği (205 HV) Al-9Si₃N₄ kompozitte elde edildiğinden en düşük aşınma oranı ($0,00018 \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) bu kompozitte tespit edilmiştir.

$$\Delta V = F \times \mu \times L / H \quad (6.7)$$

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin ısıtım türüne bağlı olarak aşınma izlerinin SEM görüntüleri Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde kompozitlerde abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu gözlemlenmiştir. Numune yüzeylerinde çukurlar ve oluklar belirlenmiştir. En derin aşınma izleri sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımında, en küçük aşınma izleri ise sıcak presleme sonrası Al7075-9Si₃N₄ alaşımında görülmüştür. Al7075 alaşımına sert

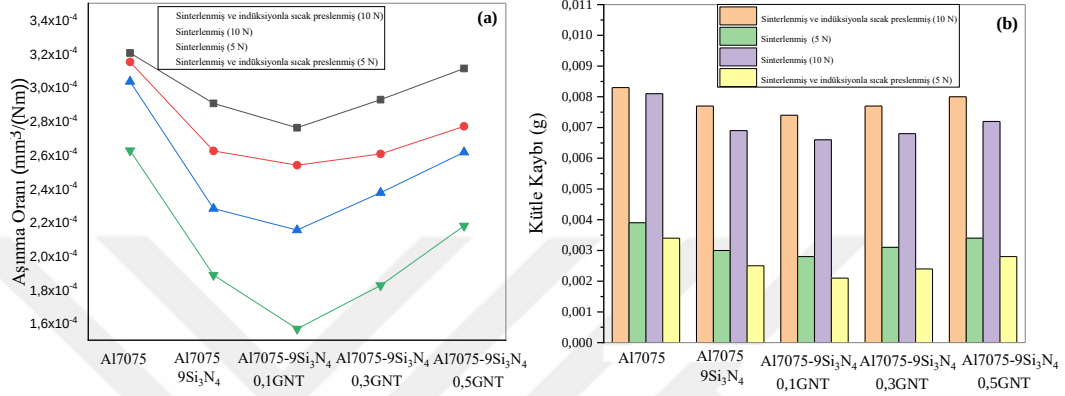
Si_3N_4 partiküllerinin takviyesi ile kompozitin aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.16. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-9 Si_3N_4 (c), Al7075-12 Si_3N_4 (e) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-9 Si_3N_4 (d), Al7075-12 Si_3N_4 (f) kompozitlere ait aşınma izleri

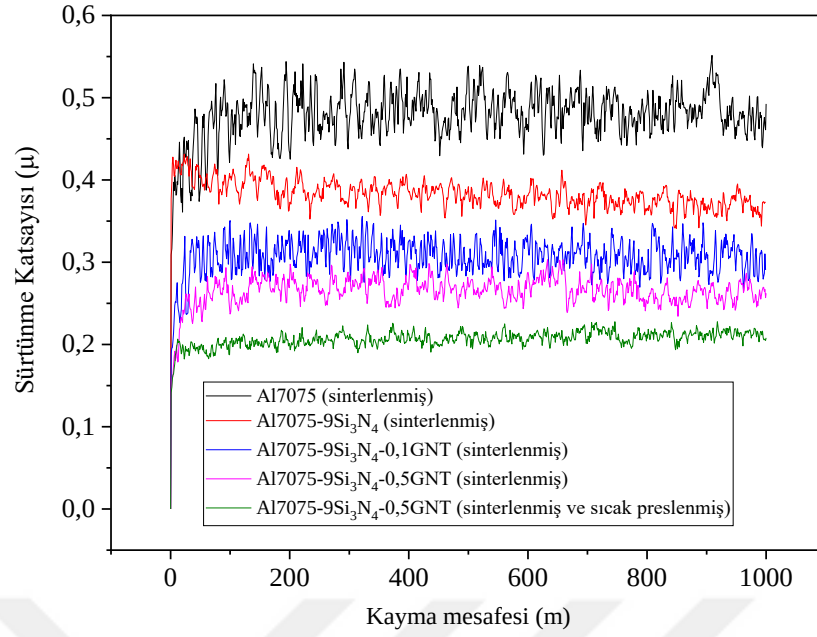
Al7075 alaşımı, Al7075-9 Si_3N_4 ve Al7075-9 Si_3N_4 -grafen kompozitlerin uygulanan ısı işlem türüne ve yüke bağlı olarak aşınma oranı ve kütle kaybı değişimi Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekle göre en düşük aşınma oranı (0,00016 $\text{mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0,0021 g) 5 N yüklemde sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak

preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen kompozit yapıda elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkısının üzerinde aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri artmıştır. Bu artışın sebebi grafenin nano boyutu nedeniyle yapı içerisinde homojen dağılamaması ve topaklanma eğilimine girmesidir. Topaklanan grafen tabakaları üst üste istiflenir ve aşınma sırasında kolay kayma oluşur. Buna bağlı olarak da grafen miktarının artmasıyla kompozitin tribolojik özellikleri kötüleşmektedir.



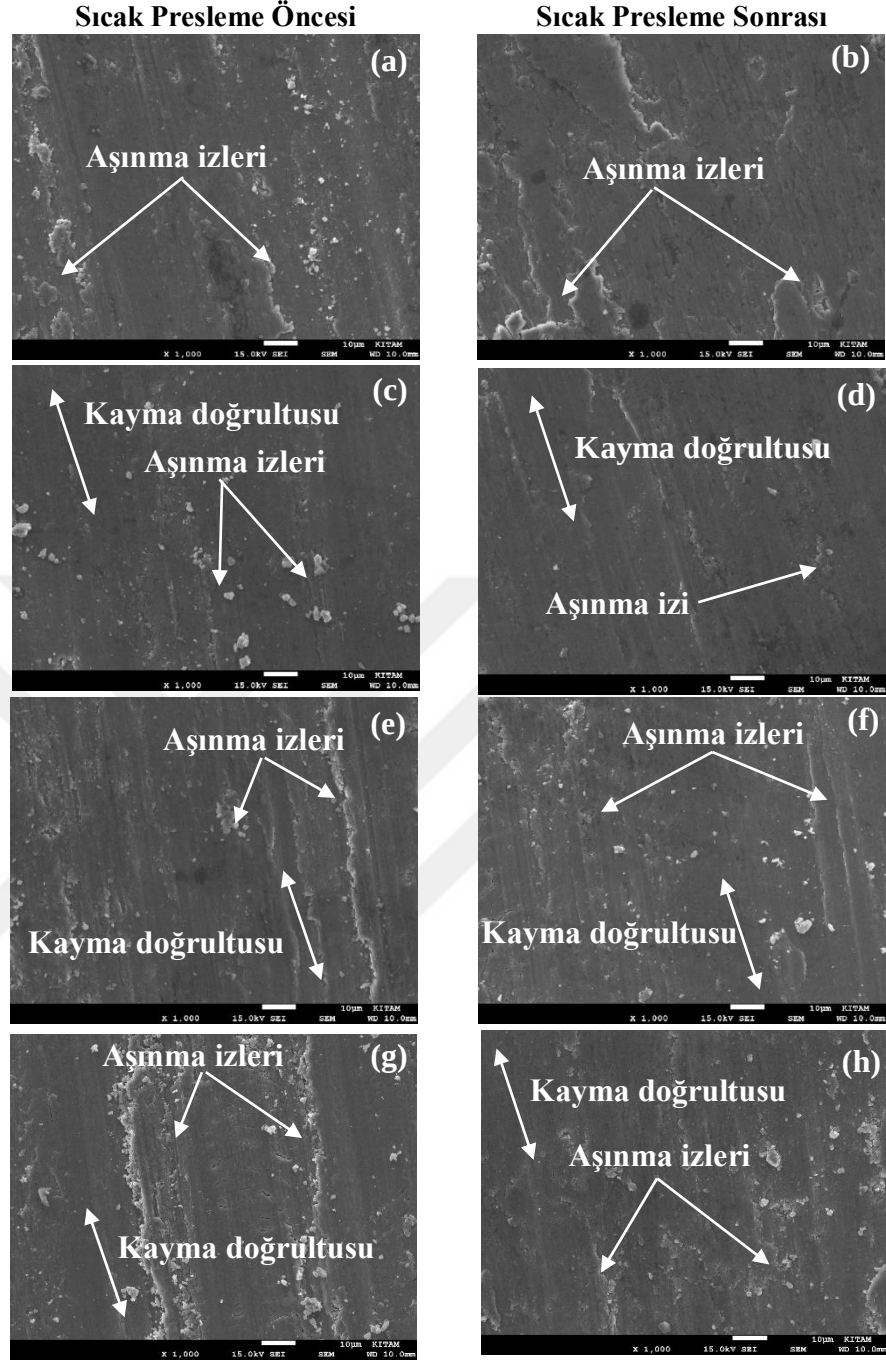
Şekil 6.17. Al7075 alaşımı ile Al7075-9Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin ısıtma işlem türüne ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri

Al7075 alaşımı, Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin sürtünme katsayısı değişim eğrileri Şekil 6.18’de gösterilmiştir. Şekle göre Al7075 matrisine Si₃N₄ ve grafen takviye edilmesi ve indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmasıyla sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. En düşük ortalama sürtünme katsayısı (~0,2) paslanmaz çelik diskle sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al-9Si₃N₄-0,5grafen kompozit yüzey çifti arasında elde edilmiştir. Bu durum sünek matris malzemesinin aşınma sırasında deforme olduğunu ve grafenin çelik disk ile doğrudan temas halinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.18. Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin ısıtıl işlem türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim eğrileri

Şekil 6.19’da verilen Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozitlerin ısıtıl işlem türü ve uygulanan yüke bağlı olarak abrasif aşınma izleri incelendiğinde en derin izlerin sadece sinterlenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte olduğu görülmektedir. Ancak grafen takviyesi ile kompozit yapının sertliği artmış ve aşınma izleri küçülmüştür. En küçük aşınma izlerinin sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ 0,1grafen kompozit yapıda (5 N) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca uygulanan yükün artmasıyla partiküller arasındaki arayüzey bağının zayıflayarak numune yüzeyinde daha derin izler oluştuğu tespit edilmiştir. Çelik bilyenin temas ettiği bölgede aşırı plastik deformasyon gerçekleşmiş ve aşınma izleri artmıştır. Aşınma izlerine ait SEM görüntüleri aşınma testi sonuçlarını doğrulamaktadır.



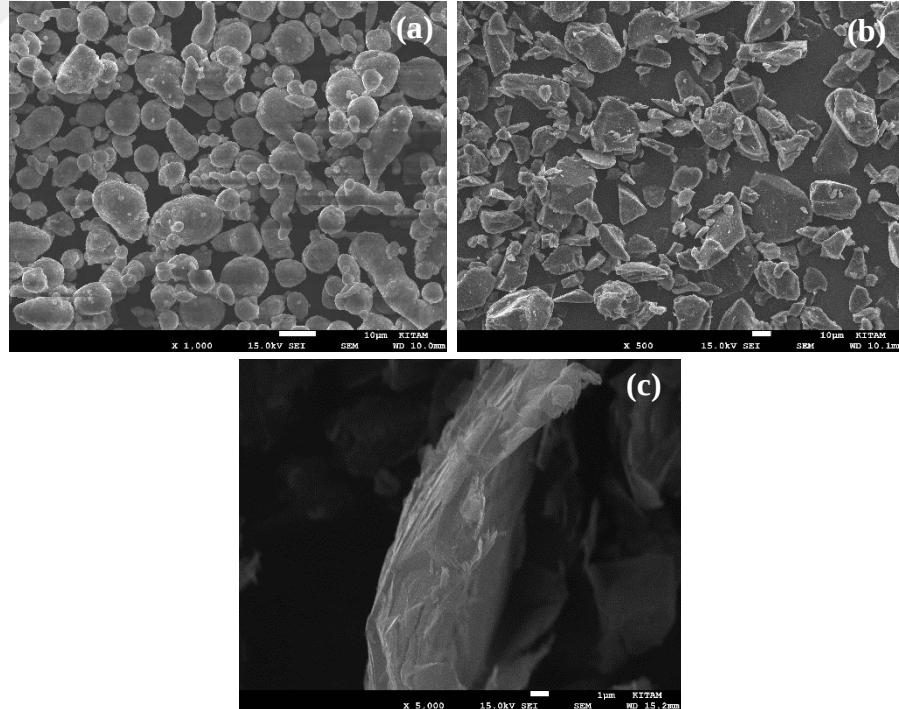
Şekil 6.19. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-9Si₃N₄ (a), Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen (c), Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen (e), Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen (P=10 N) (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-9Si₃N₄ (b), Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen (d), Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen (f), Al7075-9Si₃N₄-0,5grafen (P=10 N) (h) kompozitlere ait aşınma izleri

6.2. Al7075 Matrisli B₄C ve Grafen Takviyeli Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde Al7075 matrisli B₄C (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 katkı oranlarında) ve grafen (ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 katkı oranlarında) takviyeli kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında kompozit malzemelerin tane boyutu, faz yapısı, mikroyapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, basma dayanımı, kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı incelenmiştir.

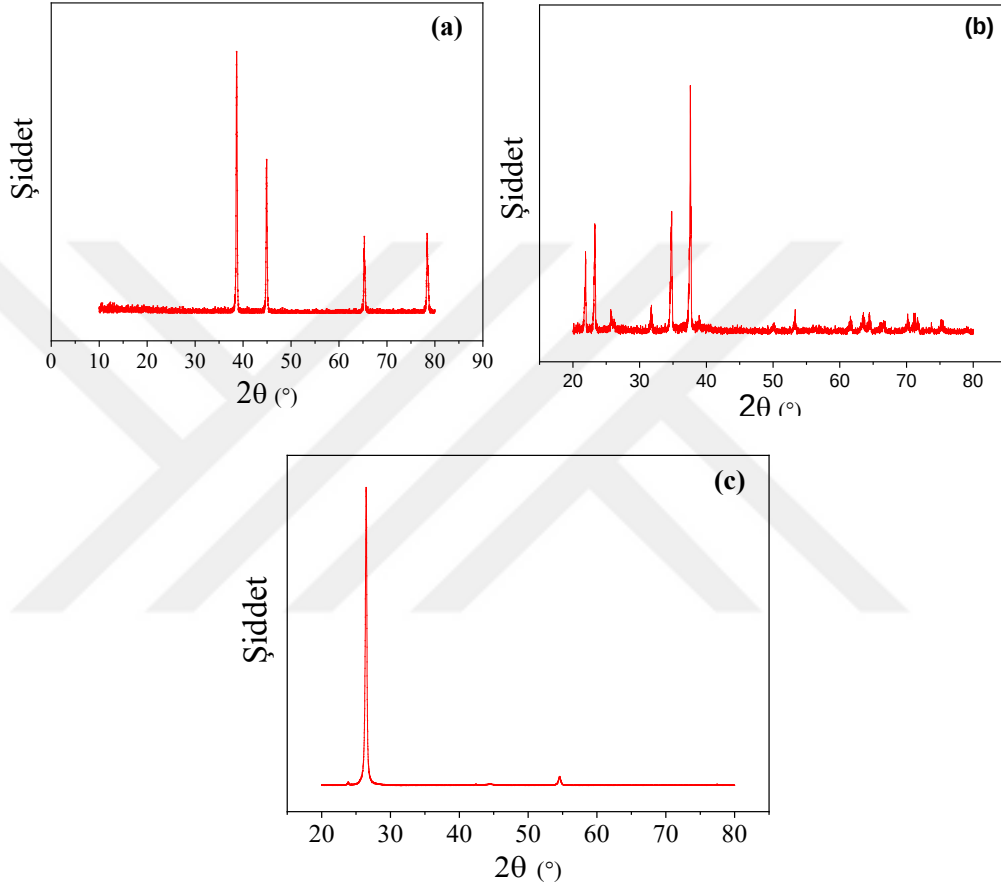
6.2.1. Al7075, B₄C ve Grafen Tozlarının SEM, XRD ve Tane Boyutu Analizleri

Hibrit kompozitlerin üretilmesinde kullanılan Al7075 alaşım, B₄C ve grafen tozlarının SEM görüntüleri Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşım tozunun küresel morfolojide, takviye elemanı olarak kullanılan B₄C tozunun keskin kenarlı bir yapıda ve grafenin tabakalı yapıda olduğu görülmektedir.



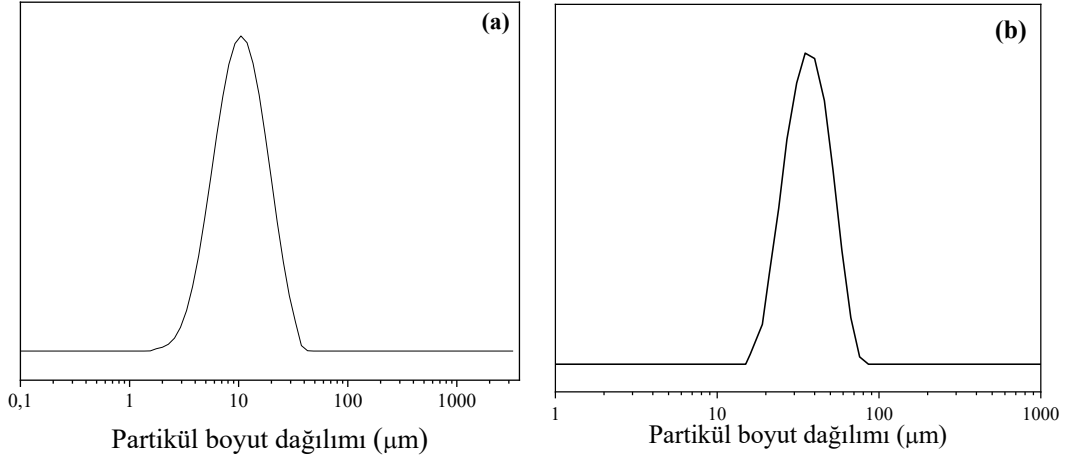
Şekil 6.20. Al7075 alaşım (a), B₄C (b) ve grafen (c) tozlarının SEM görüntüleri

Çalışma kapsamında Al7075 alaşımı, B₄C ve grafen tozlarının XRD faz analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.21). XRD örgü desenleri incelendiğinde Al7075 alaşımına ait kırınım açısının $2\theta = \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ$ ve 78° ; B₄C'ye ait kırınım açılarının $2\theta = \sim 22^\circ, 23^\circ, 26^\circ, 32^\circ, 35^\circ, 38^\circ, 39^\circ, 50^\circ, 54^\circ, 62^\circ, 64^\circ, 67^\circ, 72^\circ, 74^\circ, 75^\circ, 78^\circ$ ve grafene ait kırınım açısının $2\theta = \sim 26,5^\circ$ olduğu tespit edilmiştir. Üretilen kompozitlerin faz yapılarını tespit etmek açısından bu analiz önem arz etmektedir.



Şekil 6.21. Al7075 alaşım (a), B₄C (b) ve grafen (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri

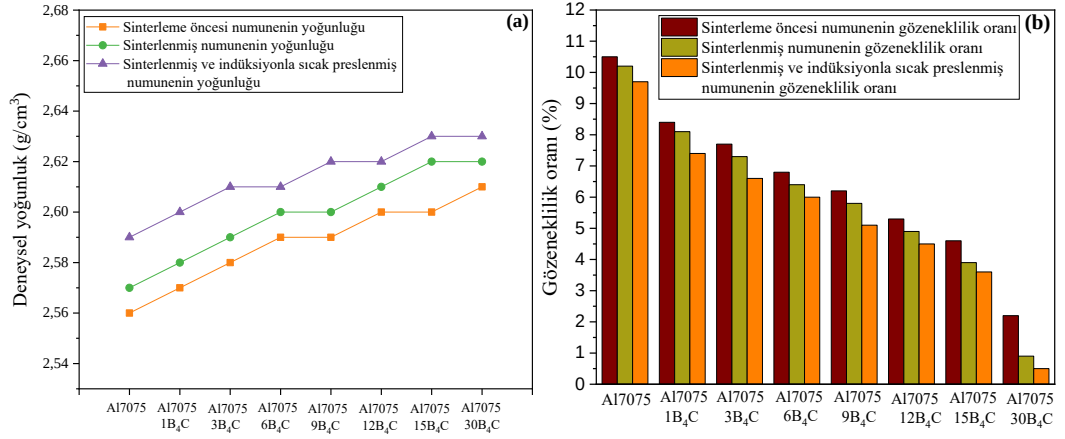
Hibrit kompozitlerin üretilmesinde kullanılan Al7075 alaşım ve B₄C tozlarına ait tane boyut dağılımı Şekil 6.22'de verilmiştir. Tane boyut dağılımı analizine göre Al7075 alaşım tozlarının $\sim 10 \mu\text{m}$ boyutunda, B₄C partiküllerinin ise $\sim 44 \mu\text{m}$ boyutunda olduğu belirlenmiştir. Tozların tane boyut dağılımlarının SEM görüntüleri ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.22. Al7075 alaşım (a) ve B₄C (b) tozlarına ait tanecik boyut dağılımı

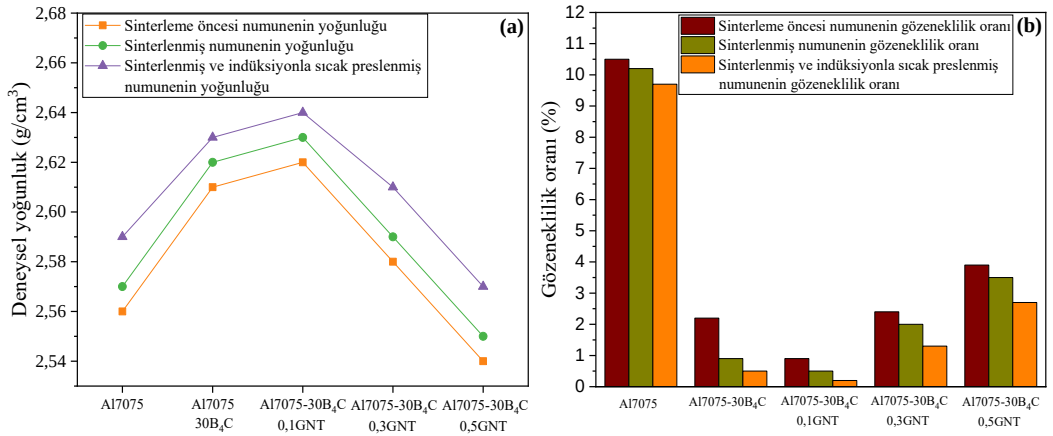
6.2.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde Al7075 alaşımının ve Al7075-B₄C kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk ve gözeneklilik oranları değerlendirilmiştir. Şekil 6.23 incelendiğinde en yüksek yoğunluk (2,63 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%0,5) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir. Bor karbürün tane boyutunun Al7075'in tane boyutundan büyük olması sebebiyle B₄C katkısıyla kompozitin yoğunluğu artmış ve gözeneklilik oranı azalmıştır. Ayrıca indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerin yoğunluğu sadece sinterlenmiş kompozitlerin yoğunluğuna kıyasla daha fazladır. Çünkü sıcaklık ve basıncın etkisiyle taneler birbirlerine yaklaşarak boyun vermiştir. Böylece yoğunluk artmış ve gözeneklilik oranı azalmıştır.



Şekil 6.23. Al7075 alaşımı ile Al7075-B₄C kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri

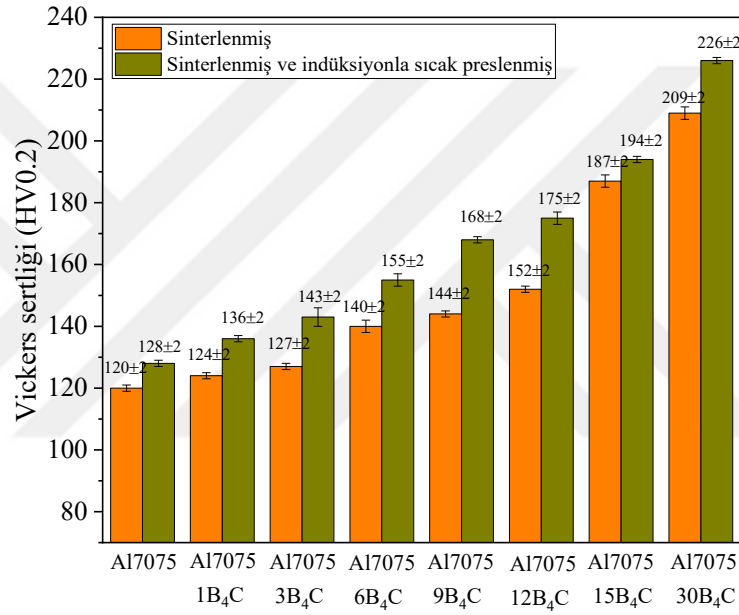
Al7075-B₄C kompozitleri arasında en iyi mekanik özellikler ağırlıkça %30 B₄C katkısında elde edildiği için Al7075-30B₄C yapısına ağırlıkça farklı katkı oranlarında (%0,1, 0,3 ve 0,5) grafen ilave edilerek hibrit kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk ve gözeneklilik oranları Şekil 6.24'de verilmiştir. Maksimum yoğunluk (2,64 g/cm³) ve minimum gözeneklilik oranı (%0,2) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozitte elde edilmiştir. Ancak %0,1 grafen takviyesinden sonra grafenin topaklanarak kompozitin yoğunluğunun azalmasına ve yapı içerisinde boşluk oluşturarak gözeneklilik oranının artmasına sebep olmuştur.



Şekil 6.24. Al7075 alaşımının, Al7075-30B₄C ve Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri

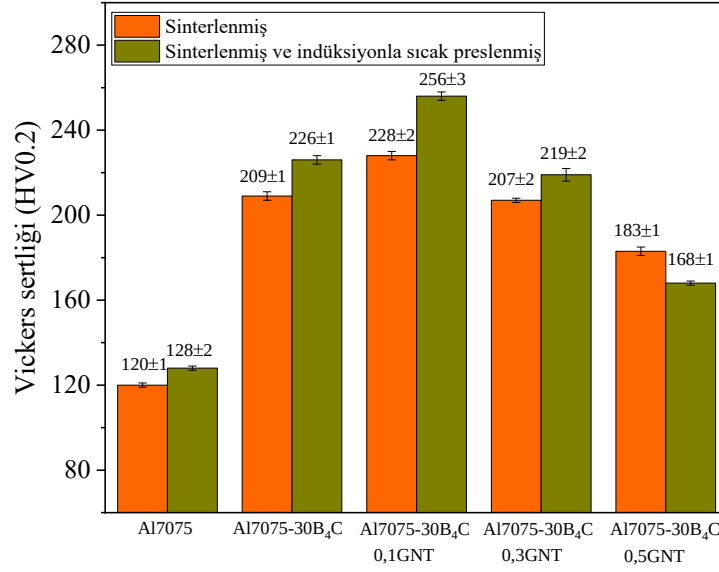
6.2.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen Al7075-B₄C kompozitlerin ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin (226 HV) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C kompozit yapıda elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 6.25). Bu kompozit yapıda sertlik değeri, sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımının sertlik değerine kıyasla %88 oranında artmıştır. Sert bor karbür partiküllerinin kompozit yapıdaki dislokasyonlara karşı bariyer görevi görmesi sebebiyle kompozitin sertliğinin arttığı öngörülmektedir.



Şekil 6.25. Al7075 alaşımı ile Al7075-B₄C kompozitlerin ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri

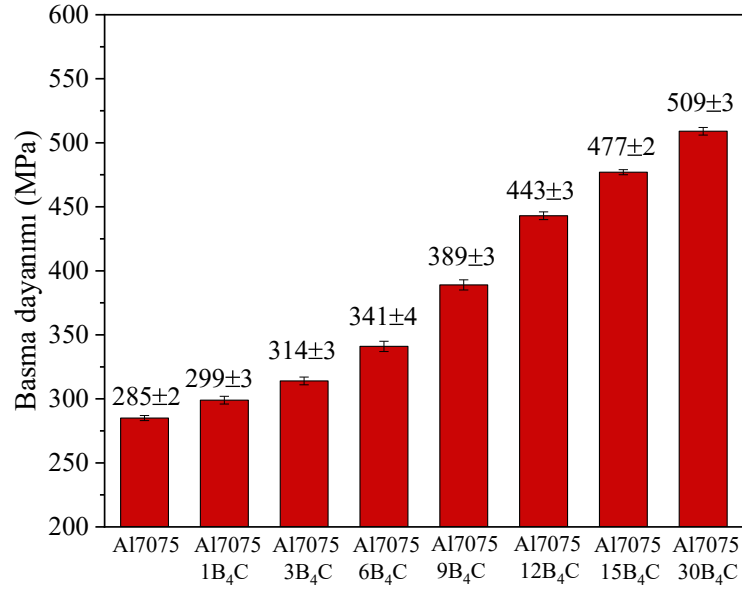
Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertliğinin değişimi Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekle göre Al7075-30B₄C-grafen kompozitleri arasında en yüksek Vickers sertliği sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozit yapıda elde edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımının sertlik değeri 120 HV iken; Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozitin sertlik değeri 256 HV olarak belirlenmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkısından sonra grafen partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağılmaması ve matrisin takviye elemanlara kıyasla daha düşük sertliğe sahip olmasından dolayı kompozitin sertliği azalmıştır.



Şekil 6.26. Al7075 alaşımı ile Al7075-30B₄C, Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıt işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri

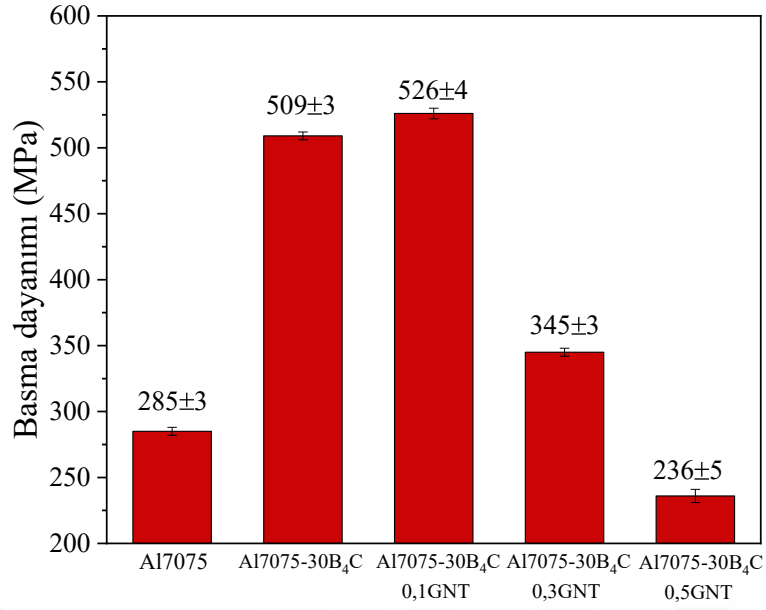
6.2.4. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında üretilen Al7075 alaşımının ve Al7075-B₄C kompozitlerin B₄C katkı oranına bağlı olarak basma dayanımı değerleri Şekil 6.27’de gösterilmiştir. En yüksek basma dayanımı (509 MPa) Al7075-30B₄C kompozit yapıda elde edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımının basma dayanımına kıyasla Al7075-30B₄C kompozitin basma dayanımının %79 oranında arttığı belirlenmiştir. Bor karbürün yüksek sertliğinden dolayı B₄C katkı oranının artmasıyla kompozitin basma dayanımı artmıştır.



Şekil 6.27. Al7075 alaşımı ile Al7075-B₄C kompozitlerin ısıtılma işlemi türüne bağlı olarak basma dayanımı değerleri

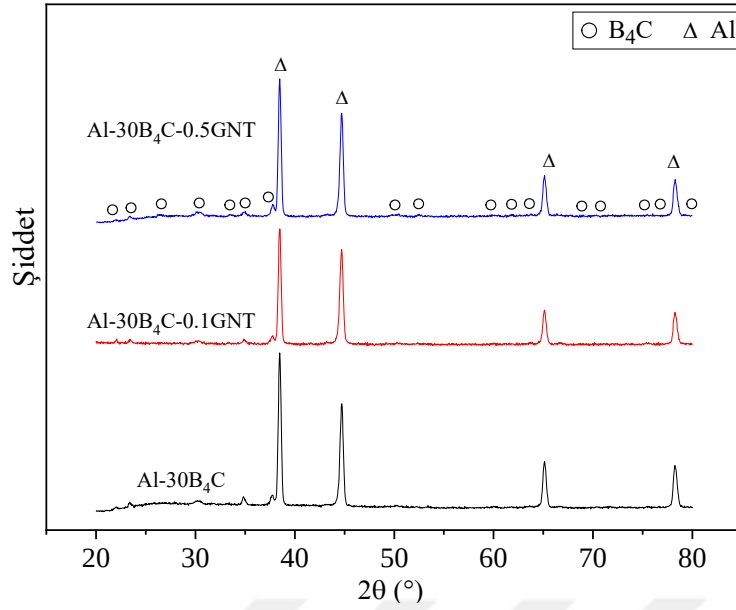
Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımı ile Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin basma dayanımı değerleri incelendiğinde maksimum basma dayanımı (526 MPa) Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozit yapıda belirlenmiştir (Şekil 6.28). Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımında basma dayanımı 285 MPa iken; Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozit yapıda basma dayanımı %84,6 oranında artarak 526 MPa'a yükselmiştir. Ancak %0,1 grafen katkı oranından sonra kompozit yapıya yükleme yapılması durumunda, yoğun grafen tabakalarının kaymasından dolayı basma dayanımının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.28. Al7075 alaşımı ile Al7075-B₄C, Al7075-B₄C-grafen kompozitlerin ısıt işlem türüne bağlı olarak basma dayanımı değerleri

6.2.5. XRD Faz Analizlerinin Değerlendirilmesi

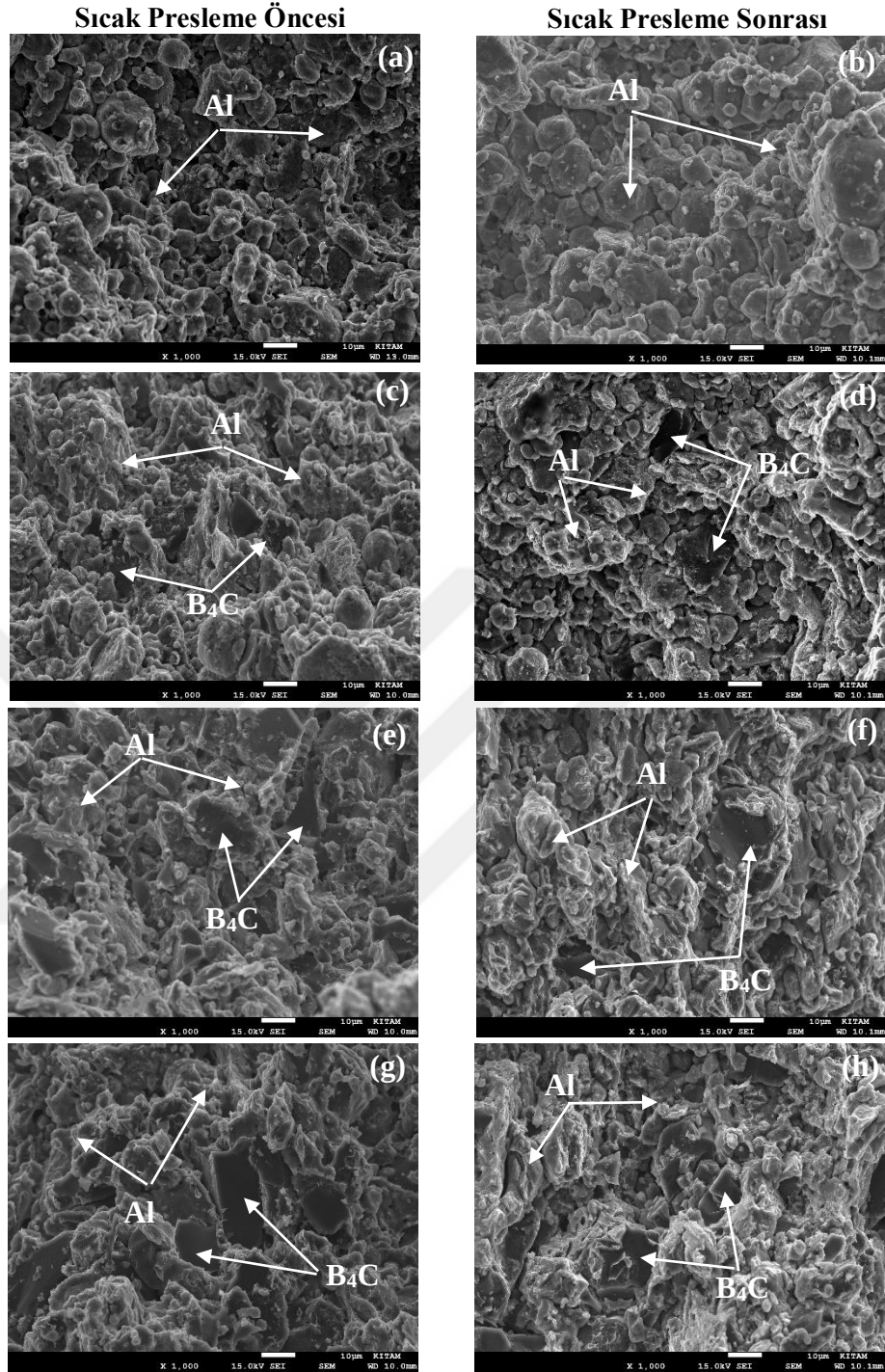
Al7075 matrisli bor karbür ve grafen takviyeli kompozitlere ait XRD faz analiz sonuçları Şekil 6.29’da verilmiştir. Alüminyum “Δ” simgesi, B₄C “○”simgesi ile temsil edilmiştir. XRD örgü desenleri incelendiğinde tüm piklerin alüminyum ve bor karbüre ait olduğu belirlenmiştir. XRD cihazının düşük hassasiyeti ve grafenin düşük katkı oranından dolayı XRD faz analizinde grafen pikine rastlanılmamıştır. Ayrıca Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir.



Şekil 6.29. Al7075-30B₄C ve Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin XRD örgü desenleri

6.2.6. SEM-EDX Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Sinterleme işlemi uygulanan Al7075 ve Al7075-B₄C kompozitlerin ısıtıl işlem türüne bağlı olarak kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.30'da gösterilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; bor karbür partiküllerinin matris yapı içerisinde homojen dağıldığı belirlenmiştir. Sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerde taneler arası daha yoğun bir boyun oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerde mikroyapının daha yoğun olduğu görülmektedir. Uygulanan ısıtıl işlemin etkisiyle yapı içerisindeki gözenekliliğin azaldığı tespit edilmiştir.

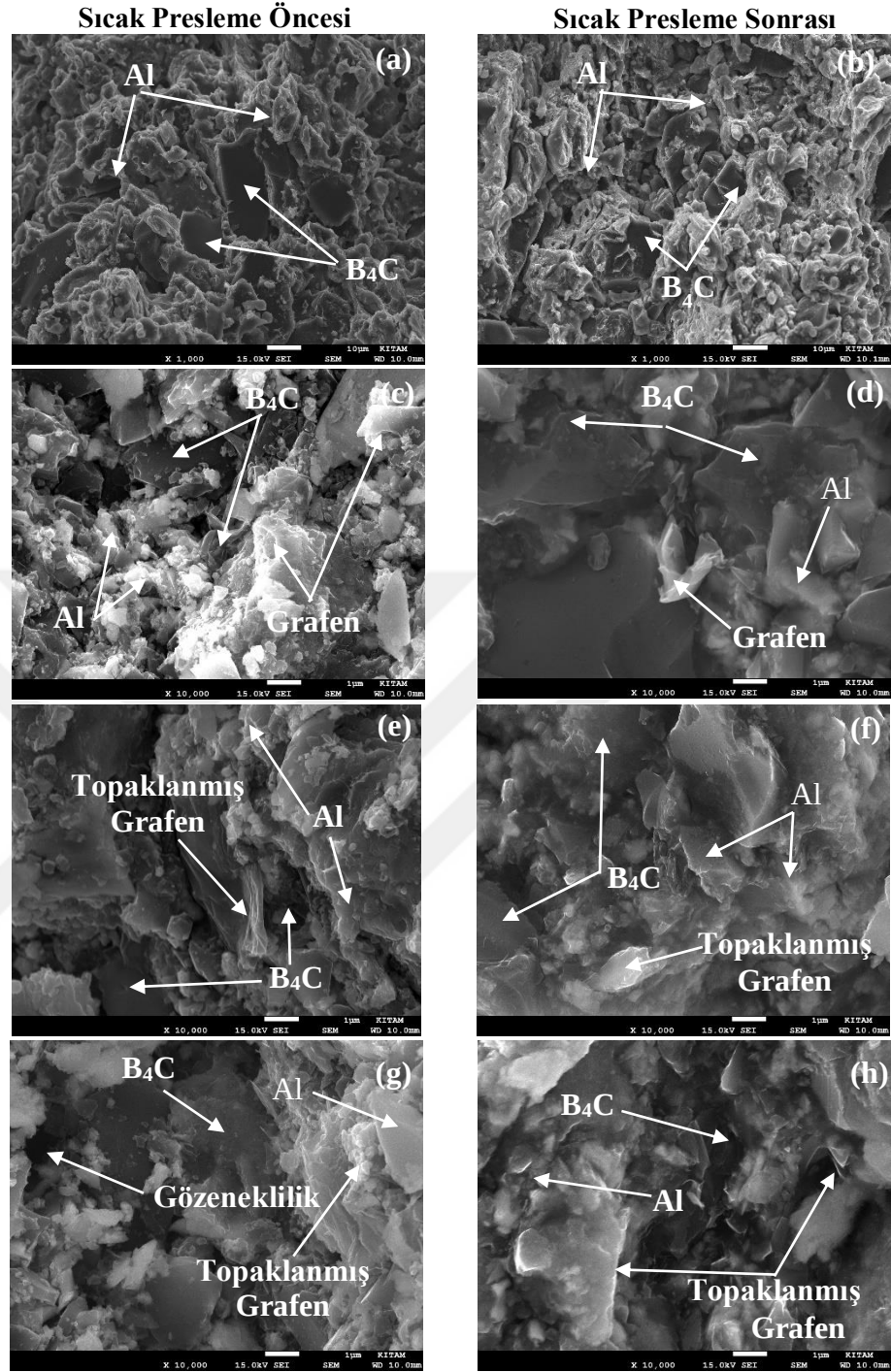


Şekil 6.30. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-6B₄C (c), Al7075-15B₄C (e), Al7075-30B₄C (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-6B₄C (d), Al7075-15B₄C (f), Al7075-30B₄C (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

Al7075-30B₄C ve Al7075-30B₄C-grafen hibrit kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde bor karbür partiküllerinin matris yapı içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.31). Ağırlıkça %0,1

grafen katkı oranında grafenin tane sınırlarına yerleştiği ve bu nedenle kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ancak ağırlıkça %0,3 ve 0,5 grafen katkılı kompozitlerin SEM görüntülerine bakıldığında, grafenin matris içerisinde homojen dağılmadığı ve topaklandığı görülmektedir. Bu topakların yapı içerisinde gözenek oluşmasına neden olduğu ve buna bağlı olarak kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulduğu belirlenmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerde tanelerin yönlendiği ve yapı içerisindeki gözeneklerin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca sıcak preslemenin etkisiyle taneler arası etkileşimin arttığı ve daha yoğun bir mikroyapı elde edildiği sonucuna varılmıştır.



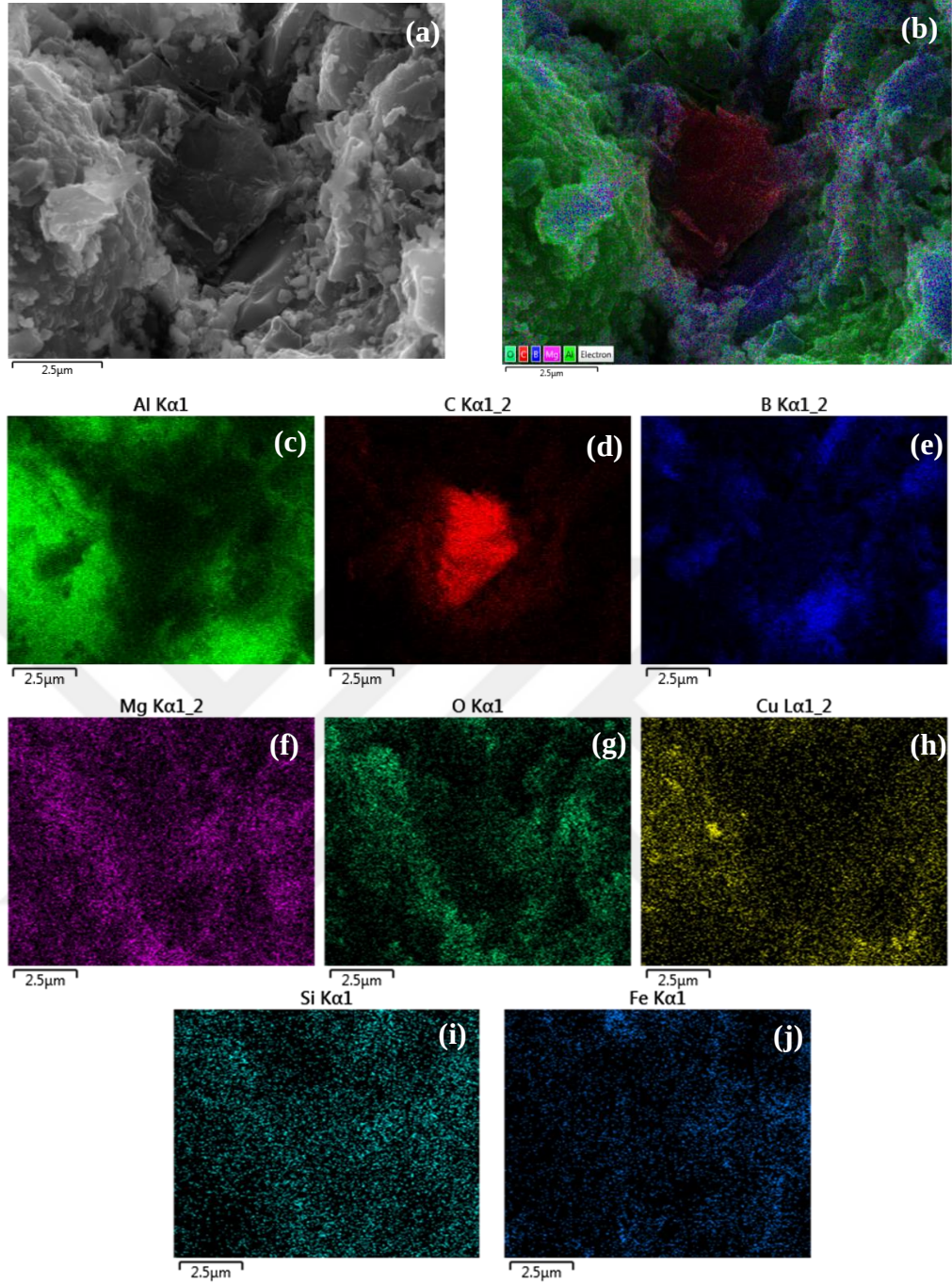


Şekil 6.31. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-30B₄C (a), Al7075-30B₄C-0,1grafen (c), Al7075-30B₄C-0,3grafen (e), Al7075-30B₄C-0,5grafen (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-30B₄C (b), Al7075-30B₄C-0,1grafen (d), Al7075-30B₄C-0,3grafen (f), Al7075-30B₄C-0,5grafen (h) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

Şekil 6.32’de sadece sinterlenmiş Al7075-30B₄C-0,5grafen kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüleri ve element dağılım haritası verilmiştir. Kompozit yapı içerisindeki elementlerin (Al, Si, Mg, C, O, Cu, Zn, N, Fe) her biri farklı renk ile

gösterilmiştir. Al, Zn, Fe, Mg, O ve Cu elementleri matris malzemesi olan Al7075 alaşımının varlığını doğrulamaktadır. B elementi takviye elemanlarından biri olan B₄C'nin varlığını ifade etmektedir. C elementi ise diğer takviye elemanı olan grafenin mevcudiyetini temsil etmektedir. Şekilde grafenin (kırmızı renk) bazı bölgelerde topaklandığı belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu topaklanmış grafen partiküllerinin kompozitin mekanik özelliklerinde düşüşe sebep olduğu öngörülmektedir. Kompozitin mekanik özelliklerinin kötüleştiği SEM-EDX analizleri ve mekanik test sonuçlarıyla doğrulanmıştır.



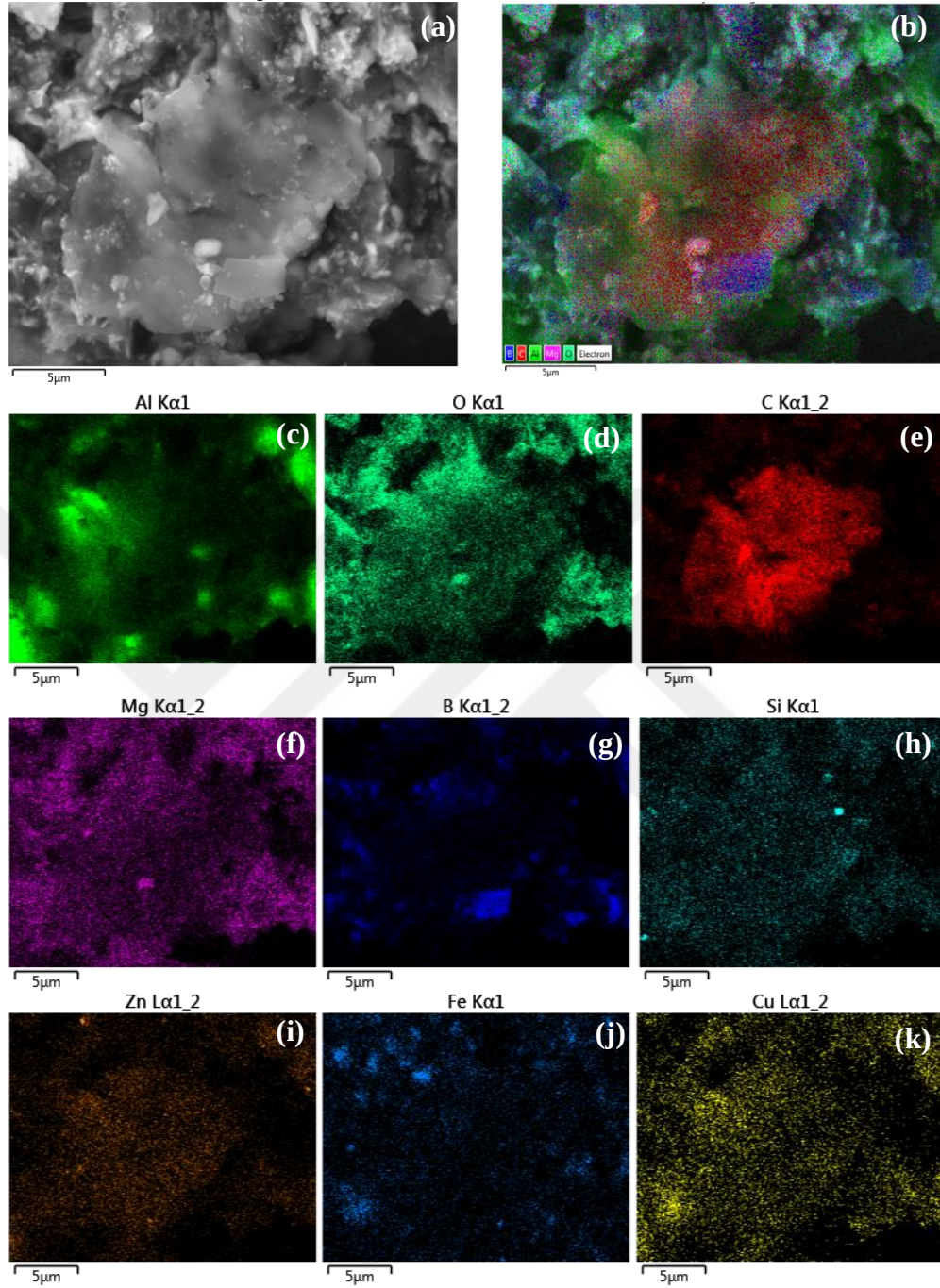


Şekil 6.32. Sadece sinterlenmiş Al7075-30B₄C-0,5grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-j)

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9B₄C-0,5grafen kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüsü ve element dağılım haritası Şekil 6.33'de gösterilmiştir. Al, O, Mg, Si, Zn, Fe ve Cu elementleri Al7075 alaşımının dağılımını temsil etmektedir. B elementi B₄C takviye elemanının varlığını doğrulamaktadır. C elementi ise grafen dağılımını göstermektedir. Şekil incelendiğinde kırmızı renk ile gösterilen grafenin kümелendiği ve tabaka şeklinde üst

üste istiflendiği tespit edilmiştir. Bu durumda kompozitin mekanik özelliklerinin kötüleşmesine sebep olduğu öngörülmektedir. Ayrıca sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde yapı içerisinde gözeneklerin küçüldüğu belirlenmiştir.



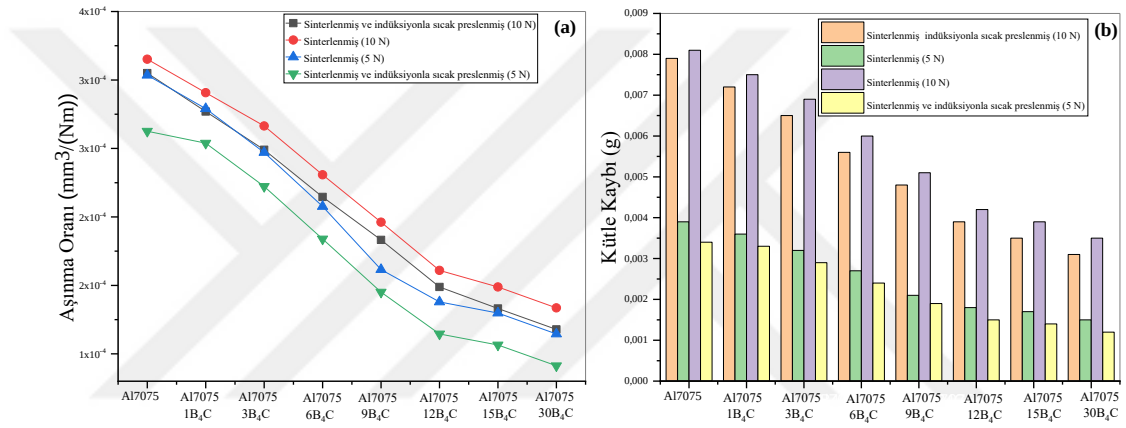


Şekil 6.33. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,5grafen hibrit kompozite kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritaları (c-k)

6.2.7. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

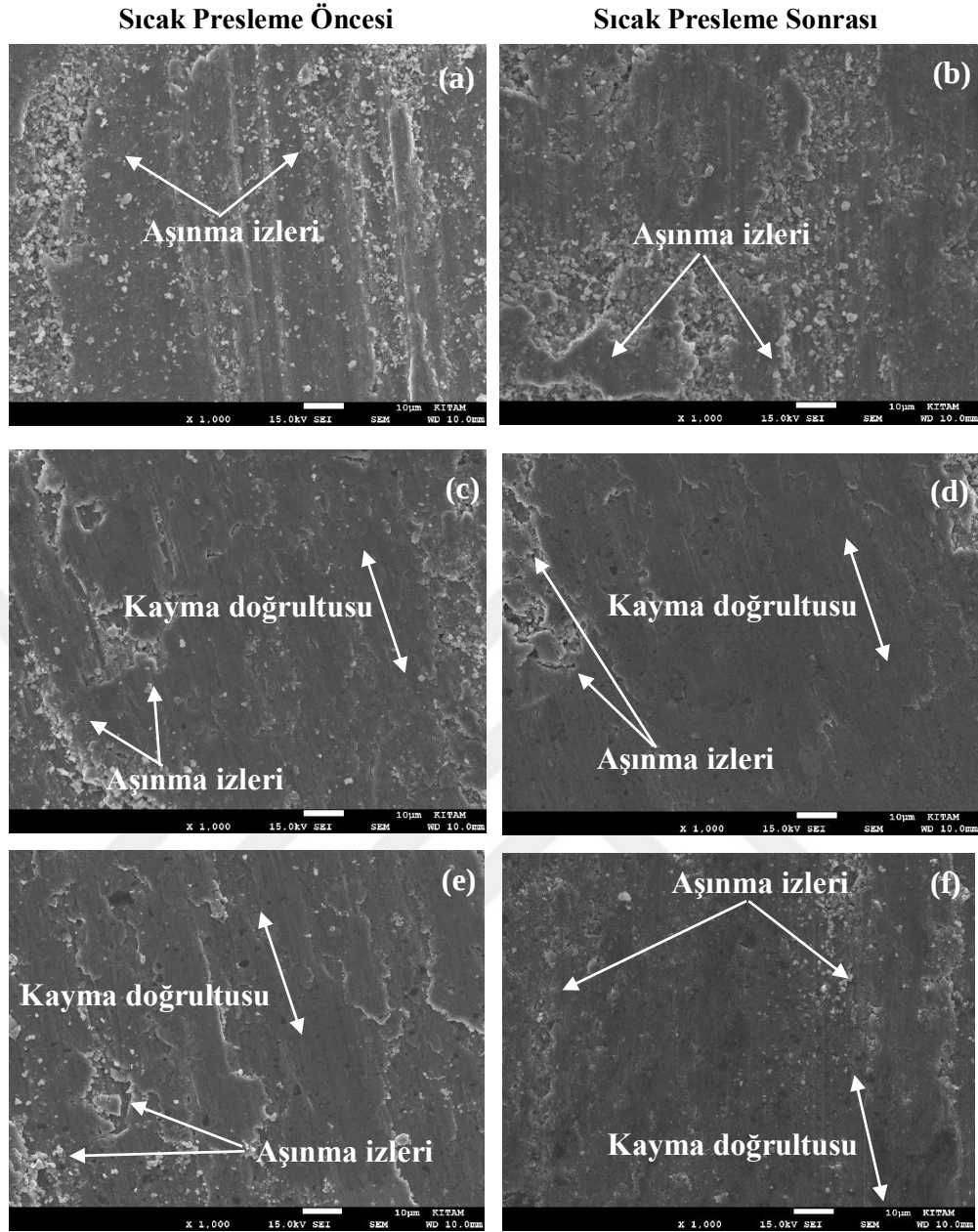
Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen Al7075 matrisli bor karbür takviyeli kompozitlerin aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri Şekil

6.34’de gösterilmiştir. Kuru şartlarda yürütülen aşınma test sonuçlarına göre en yüksek aşınma oranı ($0,00032 \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve en yüksek kütle kaybı ($0,0081 \text{ g}$) 10 N yük altında sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımında tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı ($0,000092 \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve en düşük kütle kaybı ($0,0012 \text{ g}$) ise 5 N yüklemde sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir. Bor karbürün yüksek sertliğinden dolayı bor karbür takviye oranının artmasıyla kompozitin tribolojik özellikleri iyileşmiştir. Al7075-B₄C kompozitleri arasında en yüksek sertlik Al7075-30B₄C kompozit yapıda tespit edildiğinden en düşük aşınma oranı ve en düşük kütle kaybı da bu kompozit yapıda elde edilmiştir. Ayrıca Archard eşitliğinin aşınma test sonuçlarını doğruladığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6.34. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al7075 alaşımına ve Al7075-B₄C kompozitlere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri

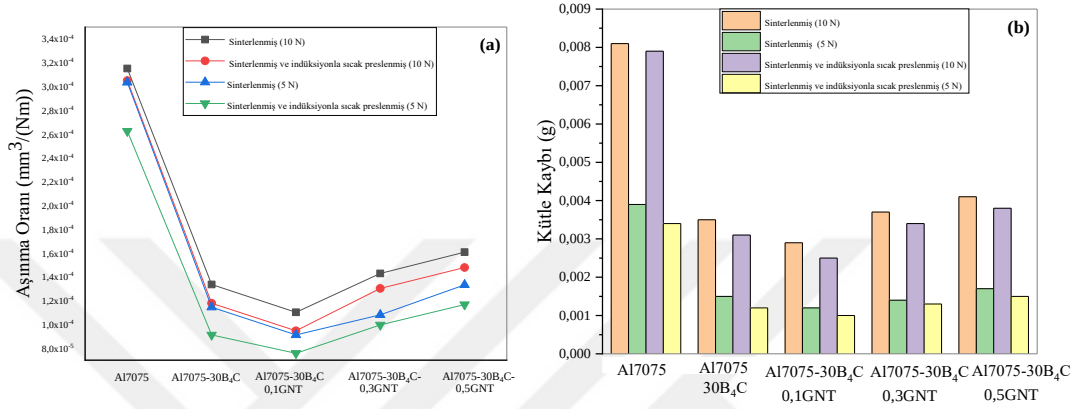
Al7075, Al7075-15B₄C ve Al7075-30B₄C kompozitlerin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma izlerine ait SEM görüntüleri Şekil 6.35’de verilmiştir. Test sırasında sadece numune yüzeyinin aşınması sebebiyle kompozitlerde abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Aşınma görüntüleri incelendiğinde en belirgin aşınma izleri indüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımında tespit edilmiştir. Bunun sebebi çelik bilyenin karşısındaki yumuşak matris bölgesinde aşırı plastik deformasyon meydana gelmesidir. Ancak takviye oranının artmasıyla izler küçülmüştür. En küçük izler indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C yapıda gözlemlenmiştir. Bor karbürün yüksek basma dayanımı ve yüksek sertliği kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirmiş ve bu yüzden numune yüzeyindeki oluklar küçülmüştür. Kompozitlerin aşınmış yüzey görüntülerine göre numune yüzeyinde oluşan izlerin kayma yönüne paralel olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.35. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075 alaşımına (a), Al7075-15B₄C (c), Al7075-30B₄C (e) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075 alaşımına (b), Al7075-15B₄C (d), Al7075-30B₄C (f) kompozitlere ait aşınma izleri

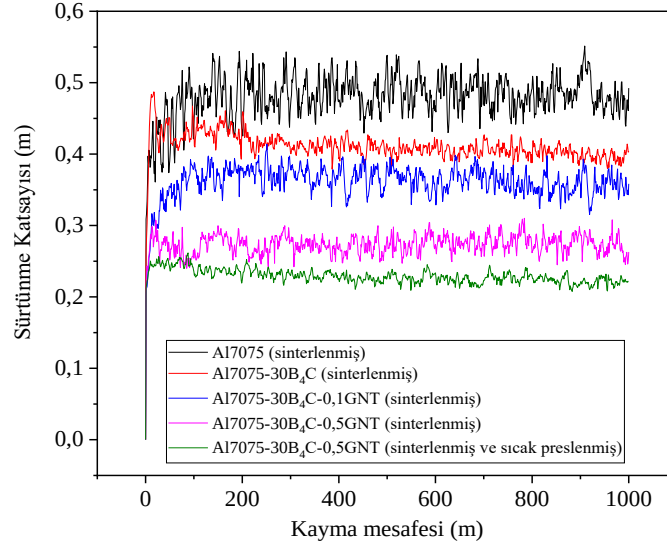
Al7075 alaşımı ile Al7075-30B₄C, Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıtılma işlem türüne bağlı olarak aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri Şekil 6.36’da verilmiştir. En düşük aşınma oranı (0,000076 mm³/(Nm)) ve en düşük kütle kaybı (0,001 g) sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozitte 5 N yüklemde elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkı oranından sonra grafen partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılmaması ve grafen tabakalarının üst üste istiflenerek aşınma sırasında bu tabakaların kayması

sebebiyle kompozitin aşınma miktarı artmıştır. Aynı katkı oranında sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerde sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla aşınma direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla kompozit yüzey ile çelik diskin temas alanının artmasından dolayı aşınma oranı ve kütle kaybı artmıştır. Ayrıca sertlik ve aşınma test sonuçlarının Archard eşitliğine göre birbirleriyle tutarlı olduğu tespit edilmiştir.



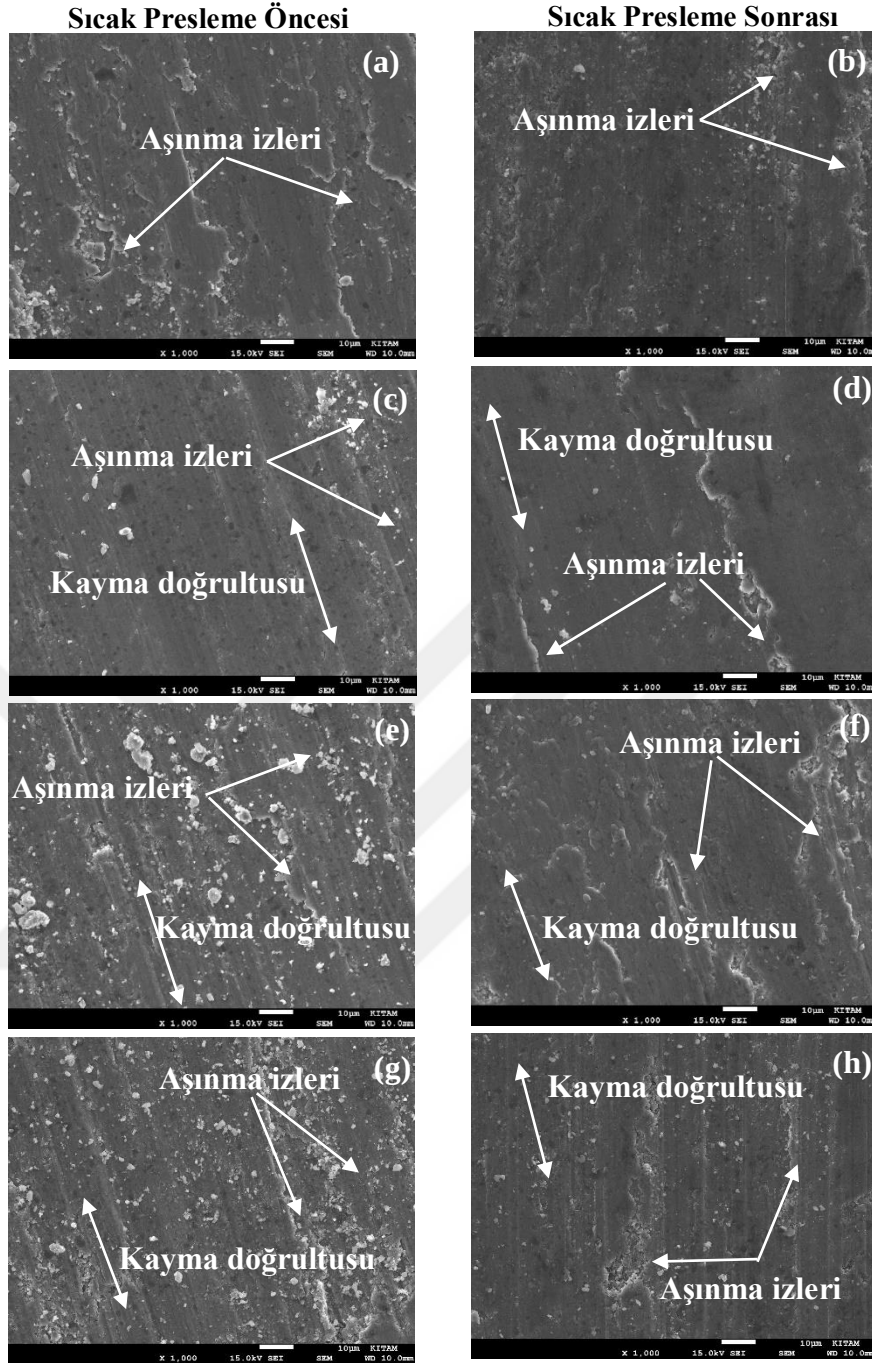
Şekil 6.36. Isıl işlem türüne bağlı olarak Al7075 alaşımı ile, Al7075-30B₄C, Al7075-30B₄C-grafen kompozitlere ait aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri

Al7075 alaşımı ile Al7075-30B₄C, Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıl işlem türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim eğrileri Şekil 6.37’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı (~0,5) paslanmaz çelik aşındırıcı disk ile sadece sinterlenmiş Al7075 alaşım çifti arasında tespit edilmiştir. Grafen katkı oranının artmasıyla grafenin katı yağlayıcılık özelliği sayesinde aşındırıcı paslanmaz çelik disk ile kompozit yüzey çifti arasındaki sürtünme katsayısı azalmıştır. En düşük sürtünme katsayısı (~0,25) Al7075-30B₄C-0,5GNT kompozit yapıda belirlenmiştir. Sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerin sürtünme katsayısının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun indüksiyonla sıcak presleme işleminin etkisiyle kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileşmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir. Ayrıca uygulanan yükün artmasıyla çelik disk ile kompozit yüzey çifti arasında temas alanının artmasından dolayı sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir.



Şekil 6.37. Al7075 alaşımı ile Al7075-30B₄C, Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıtılma türüne bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim eğrileri

Al7075-30B₄C ve Al7075-30B₄C-grafen kompozitlerin ısıtılma türüne bağlı olarak abrasif aşınma izlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde en küçük izler indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen kompozitte belirlenmiştir (Şekil 6.38). Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkısından sonra grafen partiküllerinin toplanmasından dolayı aşınma izleri büyümüştür. Ayrıca %0,5 grafen katkı oranında uygulanan yükün artmasıyla (P=10 N) aşınma izlerinin daha fazla derinleştiği görülmüştür. Çünkü yük arttığında matris ve takviye malzemesi arasındaki bağ zayıflayarak malzeme yüzeyinden daha büyük parçalar kopmuştur. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde gözeneklerin küçülmesi ve mikroyapının daha yoğun olması sebebiyle tribolojik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir.



Şekil 6 38. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al7075-30B₄C (a), Al7075-30B₄C-0,1grafen (c), Al7075-30B₄C-0,5grafen (e), Al7075-30B₄C-0,5grafen (P=10 N) (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al7075-30B₄C (b), Al7075-30B₄C-0,1grafen (d), Al7075-30B₄C-0,5grafen (f), Al7075-30B₄C-0,5grafen (P=10 N) (h) kompozitlere ait aşınma izleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle Al7075-Si₃N₄, Al7075-Si₃N₄-grafen, Al7075-B₄C ve Al7075-B₄C-grafen kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek, mikroyapısını geliştirmek amacıyla 500°C sıcaklıkta 30 sn süresince indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında kompozitlerin mekanik (yoğunluk, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği ve basma dayanımı) ve tribolojik özellikleri (aşınma oranı, kütle kaybı ve sürtünme katsayısı) incelenmiştir. Ayrıca kompozitlere SEM, SEM-EDX ve XRD faz analizleri uygulanarak kompozitlerin mikroyapıları ve faz yapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

7.1. Al7075 Matrisli Si₃N₄/Grafen Takviyeli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Yürütülen bu çalışmada Al7075 matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında Si₃N₄ takviye edilerek Al7075-Si₃N₄ kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozitler arasında en iyi mekanik ve tribolojik özellikler ağırlıkça %9 Si₃N₄ takviyeli Al7075 matrisli kompozitte elde edilmiştir. Bu Si₃N₄ katkı oranına (%9 Si₃N₄) ağırlıkça %0,1 0,3 ve 0,5 oranlarında grafen takviye edilerek Al7075-9Si₃N₄-grafen hibrit kompozitler üretilmiştir. Isıl işlem yöntemlerinin (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme) ve takviye oranlarının kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek deneysel yoğunluk (2,65 g/cm³), Vickers sertliği (205 HV), basma dayanımı (344 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliği ve matris içerisinde homojen dağılımı sebebiyle ağırlıkça %9 Si₃N₄ katkı oranında kompozitin mekanik özellikleri iyileşmiştir. Ancak ağırlıkça %12 Si₃N₄ katkı oranında Si₃N₄ partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağıtılamaması sebebiyle mekanik özellikler bozulmuştur.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla sadece sinterlenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte deneysel yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve

basma dayanımının sırasıyla %2,3, 52,5 ve 20,7 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.

- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄ kompozitte deneysel yoğunluğun ve Vickers sertliğinin sırasıyla %3,1 ve 70,8 oranlarında arttığı belirlenmiştir.
- Üretilen Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı ve matris ile takviye malzemesi arasında güçlü arayüzey bağının oluştuğu tespit edilmiştir. XRD faz analizi sonucunda; kompozit yapılarda Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde mikroyapının daha yoğun olduğu belirlenmiştir.
- Al7075-9Si₃N₄-grafen hibrit kompozit yapılarda en yüksek deneysel yoğunluk (2,68 g/cm³), Vickers sertliği (238 HV), basma dayanımı (378 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,1) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen hibrit kompozitte tespit edilmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkı oranının üzerindeki takviyelerde grafenin topaklandığı belirlenmiştir. Topaklanan grafen partikülleri; plastik deformasyonun kolaylaşmasını sağladığından mekanik özelliklerin kötüleşmesine sebep olmuştur.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla sadece sinterlenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen hibrit kompozitte deneysel yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve basma dayanımının sırasıyla %3,1, 63,3 ve 32,6 oranlarında arttığı belirlenmiştir.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen hibrit kompozitte deneysel yoğunluğun ve Vickers sertliğinin sırasıyla %4,3 ve 98,3 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.
- Al7075-9Si₃N₄-grafen hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde %0,1 grafen katkısının matris içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. Aynı katkı oranında sadece sinterlenmiş

kompozite kıyasla indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitte tanelerin daha iyi boyun vererek mikroyapıdaki gözenekliliği azalttığı ve kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ancak %0,1 grafen katkısından sonra grafenin topaklanma eğilimine girdiği tespit edilmiştir. Al7075-9Si₃N₄-grafen hibrit kompozitlerin XRD faz analizi sonucunda; bütün piklerin alüminyum ve Si₃N₄'e ait olduğu belirlenmiştir. Ancak grafenin düşük katkı oranından dolayı XRD faz analizinde grafen pikine rastlanılmamıştır.

- Al7075-Si₃N₄ kompozitlere uygulanan aşınma test sonuçlarına göre en düşük aşınma oranı (0,00019 mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0,0025 g) indüksiyonla sıcak preslenmiş ve 5 N yük uygulanan Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla aşınma direnci artmıştır.
- Al7075-9Si₃N₄-grafen hibrit kompozitler arasında en düşük aşınma oranı (0,00016 mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0,0021 g) indüksiyonla sıcak preslenmiş ve 5 N yük uygulanan Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen hibrit kompozitte elde edilmiştir. Grafenin katı yağlayıcılık özelliğinden dolayı Al7075-9Si₃N₄ kompozite ağırlıkça %0,1 grafen takviye edildiğinde kompozitin tribolojik özellikleri iyileşmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 katkı oranının üzerinde; grafen tabakalarının topaklanma eğilimi gösterip üst üste istiflenmesiyle aşınma sırasında kolay kayma oluşmuş ve kompozitin aşınma direnci azalmıştır.
- Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄-grafen kompozit yapıların aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; en küçük izler indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-9Si₃N₄-0,1grafen hibrit kompozitte 5 N yüklemede elde edilmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla aşınma izlerinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uygulanan yükün artmasıyla kompozit yüzeyindeki izlerin derinleştiği ve aşınma direncinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak Al7075 matrise belirli oranda Si₃N₄/grafen takviye edildiğinde ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi

uygulandığında kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir.

7.2. Al7075 Matrisli B₄C/Grafen Takviyeli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 katkı oranlarında B₄C takviye edilerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Al7075-B₄C kompozitler arasında en iyi mekanik ve tribolojik özellikler Al7075-30B₄C kompozit yapıda elde edilmiştir. Bu sebeple ağırlıkça %30 B₄C katkı oranına ağırlıkça %0,1 0,3 ve 0,5 oranlarında grafen takviye edilerek Al7075-30B₄C-grafen hibrit kompozitler üretilmiştir. Isıl işlem yöntemlerinin (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme) ve takviye oranının üretilen kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkisi aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Al7075 matrise B₄C katkısı ile kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Al7075-B₄C kompozitleri arasında en yüksek deneysel yoğunluk (2,63 g/cm³), Vickers sertliği (226 HV), basma dayanımı (509 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (% 0,5) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla sadece sinterlenmiş Al7075-30B₄C kompozitte deneysel yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve basma dayanımının sırasıyla %1,9, 74,2 ve 78,6 oranlarında arttığı belirlenmiştir.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C kompozitte deneysel yoğunluğun ve Vickers sertliğinin sırasıyla %2,3 ve 88,3 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.
- Al7075-30B₄C kompozitlerin SEM analizleri sonucunda takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. XRD faz analizi sonucunda; kompozit yapılarda Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir. Sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan Al7075-B₄C kompozitlerde mikroyapının daha yoğun olduğu belirlenmiştir.

- Al7075-30B₄C-grafen hibrit kompozit yapılarda en yüksek deneysel yoğunluk (2,64 g/cm³), Vickers sertliği (256 HV), basma dayanımı (526 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%0,2) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen hibrit kompozitte tespit edilmiştir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen katkı oranının üzerindeki takviyelerde grafen topaklanma eğilimine girerek yapı içerisinde gözenek oluşumuna sebep olmuştur. Bundan dolayı ağırlıkça %0,1 grafen katkısının üzerinde kompozitin mekanik özelliklerinin bozulduğu belirlenmiştir.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla sadece sinterlenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen hibrit kompozitte deneysel yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve basma dayanımının sırasıyla %2,3, 90 ve 84,6 oranında arttığı tespit edilmiştir.
- Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına kıyasla indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen hibrit kompozitte deneysel yoğunluğun ve Vickers sertliğinin sırasıyla %2,7 ve 113,3 oranlarında arttığı belirlenmiştir.
- Al7075-30B₄C-grafen hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı belirlenmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin matris ve takviye elemanı arasındaki arayüzey bağıni iyileştirerek kompozitin mikroyapısını geliştirdiği tespit edilmiştir. Ancak %0,1 grafen katkısından sonra matris içerisinde grafen kümeleri gözlemlenmiştir. Al7075-30B₄C-grafen hibrit kompozitlerin XRD faz analizleri incelendiğinde alüminyum ve B₄C piklerine rastlanılmıştır. Ancak XRD cihazının düşük hassasiyeti nedeniyle grafen pikine rastlanılmamıştır.
- Bor karbür partiküllerinin yüksek sertliği ve yüksek basma dayanımından dolayı Al7075 matrise B₄C takviyesiyle kompozitin aşınma oranı ve kütle kaybı azalmıştır. En düşük aşınma oranı (0,000091 mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0,0012 g) indüksiyonla sıcak preslenmiş ve 5 N yük uygulanan Al7075-30B₄C kompozit yapıda elde edilmiştir.
- Al7075-30B₄C-grafen hibrit kompozitler arasında en düşük aşınma oranı (0,000076 mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0,001 g) indüksiyonla sıcak

preslenmiş ve 5 N yük uygulanan Al7075-30B₄C-0,1grafen hibrit kompozitte belirlenmiştir. Grafen katkı oranının ve uygulanan yükün artmasıyla aşınma oranının ve kütle kaybının arttığı tespit edilmiştir.

- Al7075 alaşımı ile Al7075-B₄C, Al7075-30B₄C-grafen kompozit yapıların aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde en küçük izler indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-30B₄C-0,1grafen hibrit kompozitte (5 N yük altında) elde edilmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan numunede mikroyapının daha yoğun olması ve gözenekliliğin az olması sebebiyle aşınma izlerinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uygulanan yükün artmasıyla kompozit malzeme yüzeyinde daha fazla aşınma meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak Al7075 matrise belirli katkı oranına kadar B₄C/grafen takviyesinin ve indüksiyonla sıcak presleme işleminin kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.
- Üretilen kompozitlerin gelişmiş mekanik ve tribolojik özellikleri sayesinde savunma sanayi başta olmak üzere birçok alanda kullanılması öngörülmektedir.

7.3. İleride Yapılabilecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrisli Si₃N₄/B₄C ve grafen takviyeli hibrit kompozitler üretilmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme yönteminin ve takviye oranının kompozitlerin mikroyapısına, mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. İleride yapılacak çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Bu çalışmada toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemi kullanılarak hibrit kompozitler üretilmiştir. İleride yapılacak olan çalışmalarda farklı üretim yöntemleri (karıştırmalı döküm, mekanik alaşımlama vb.) kullanılarak alüminyum esaslı hibrit kompozitler üretilebilir.
- Bu çalışma kapsamında kompozit üretimi için matris malzemesi olarak 7xxx serisi alüminyum alaşımlarından biri olan Al7075 tercih edilmiştir. İlerideki çalışmalarda 2xxx, 5xxx ve 6xxx serisi alüminyum alaşımları matris malzemesi olarak kullanılabilir.

- Takviye malzemesi olarak Si_3N_4 ve B_4C seramik malzemeleri kullanılmıştır. İleride yapılacak olan çalışmalarda farklı seramik malzemeleri (WC, SiO_2 , BN, SiC vb.) tercih edilebilir.
- Bu çalışmada üretilen kompozitlere ikincil işlem olarak indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. İlerideki çalışmalarda kompozitlere farklı ikincil işlem yöntemleri (ekstrüzyon, dövme, haddeleme, infiltrasyon, yüzey kaplama vb.) uygulanabilir.
- İndüksiyonla sıcak presleme işleminde kompozit malzemeye uygulanan sıcaklık ve basınç değiştirilerek bu parametrelerin kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisi incelenebilir.
- Bu tez çalışmasında üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. İlerideki çalışmalarda mekanik ve tribolojik özelliklerle birlikte kompozitlerin termal özellikleri ve korozyon davranışları da incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelatty, R., Khan, A., Yusuf, M., Alashraf, A. and Shakoor, R. A. (2021). Effect of silicon nitride and graphene nanoplatelets on the properties of aluminum metal matrix composites. *Materials*, 14(8), 1898.
- Ak, S. (2019). *Karbon nanotüp ve bor nitrür nano partikülleri ilaveli karbon fiber-epoksi kompozit borularının mekanik özelliklerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 87, Konya.
- Akçamlı, N., Gökçe, H. and Uzunsoy, D. (2016). Processing and characterization of graphene nano-platelet (GNP) reinforced aluminum matrix composites. *Materials Testing*, 58(11), 946-952.
- Akçay, S. B., Varol, T., Güler, O. ve Aksa, H. C. (2022). Bor karbür takviyeli Al esaslı kompozitlerin özellikleri üzerine bor karbür takviye miktarının etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(2), 869-881.
- Anıl, E. A. (2012). *Toz metalürjisiyle üretilen Al-SiC_p metal matrisli kompozitlerde faktör etkileşimlerinin partikül dağılımı, eğme dayanımı ve aşınma özelliklerine etkileri*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 202, İzmir.
- Anjan Babu, V. A., Saravanan, R., Raviprakash, M., Nagaral, M. and Kumar, N. (2022). Microstructural characterization and wear behavior of 12 wt% of boron carbide reinforced Al2030 alloy composites. *Materials Today: Proceedings*, 52, 439-444.
- Argıncıklıgil, A. (2019). *Çeliklerde vickers sertlik değerlerine uygulanan yük etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühensiliği Anabilim Dalı, 41, Sakarya.
- Arık, H. (2019). Al-Si₃N₄ toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(4), 776-787.
- Asi, D. (2018). *Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması*. Doktora Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 153, Uşak.
- Atla, S. and Kaujala, P. L. (2020). Investigation of graphite effect on the mechanical and tribological properties of Al 7075-SiC-graphite hybrid metal matrix composites. *TRIBOLOGIA-Finnish Journal of Tribology*, 37(1), 26-32.
- Ayata, A. (2014). *Toz metal alüminyum malzemelerin mikrodalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Bilimi Mühendisliği Anabilim Dalı, 86, Ankara.
- Ayvacı, B. (2019). *Toz metalürjisi ile üretilen çeliklerde presleme tekniğinin mikroyapı mekanik özelliklere etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 82, Karabük.
- Baig, Z., Mamat, O., Mustapha, M., Mumtaz, A., Sarfraz, M. and Haider, S. (2018). An efficient approach to address issues of graphene nanoplatelets (GNPs) incorporation in aluminium powders and their compaction behaviour. *Metals*, 8(2), 90
- Bhuvanesh, D., Radhika, N. and Vidyapeetham, A. (2017). Experimental investigation on tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(5), 1295-1306.

- 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, 111, Kırıkkale.
- Chand, S., Chandrasekhar, P., Roy, S. and Singh, S. (2021). Influence of dispersoid content on compressibility, sinterability and mechanical behaviour of B₄C/BN reinforced Al6061 metal matrix hybrid composites fabricated via mechanical alloying. *Metals and Materials International*, 27(11), 4841-4853.
- Chandrasheker, J. and Raju, N. V. S. (2021). Mechanical characterization of al7050 metal matrix composite reinforced with B₄C by electromagnetic stir casting method. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1834-1838.
- Chen, X., Tao, J., Yi, J., Liu, Y., Li, C. and Bao, R. (2018). Strengthening behavior of carbon nanotube-graphene hybrid in copper matrix composite. *Materials Science and Engineering A*, 718, 427-436.
- Çelebi, M. (2016). *Za27/Grafit/Al₂O₃ hibrit nanokompozitlerin üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Bilimi Mühendisliği Anabilim Dalı, 103, Trabzon.
- Çivi, C. (2016). *Toz metal parçaların orta ve düşük frekanslı indüksiyon ile sinterlenmesinde sinterleme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 178, Manisa.
- Çolak, N. Y. ve Turhan, H. (2019). Al-7Si%10B₄C kompozit malzeme üretiminde farklı sinterleme sıcaklıklarının mikroyapı ve sertlik üzerine etkisi. *Journal of Boron*, 4(1), 60-65.
- Darshan, M., Reddappa, H. N. and Vinood Kumar, R. (2018). Mechanical and tribological properties of AA-7075 and graphene reinforced metal matrix composites. *International Journal of Scientific Development and Research*, 3(7), 230-235.
- Dasari, B. L., Morshed, M., Nouri, J. M., Brabazon, D. and Naher, S. (2018). Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 145, 136-144.
- Demir, M. E. (2021). *Aramid fiber ve B₄C parçacık ile takviye edilmiş Al7075 matrisli kompozitlerde haddelemenin ve yaşlandırmanın mekanik ve tribolojik özelliklere etkisi*. Doktora Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 156, Batman.
- Deniz, M. E. (2005). *Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işlemle presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 94, Şanlıurfa.
- Dwivedi, S. P. (2023). Effect of microwave sintering on the microstructure and mechanical properties of Al-Al₂O₃-Si₃N₄ hybrid composite fabricated by powder metallurgy techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*.
- Dong, Y., Ren, B., Wang, K., Wang, J. and Leng, J. (2020). Effects of graphene addition on the microstructure of 7075Al. *Materials Research Express*, 7(2), 1-8.
- Du, X., Zheng, K. and Liu, F. (2018a). Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced aluminum-matrix composites. *Materiali in Tehnologije*, 52(6), 763-768.

- Du, X., Zheng, K., Zhao, T. and Liu, F. (2018b). Fabrication and characterization of Al 7075 hybrid composite reinforced with graphene and SiC nanoparticles by powder metallurgy. *Digest Journal Nanomaterials and Biostructures*, 13, 1133-1140.
- Erek, H. B. (2016). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımına Ti ve B₄C ilavesinin korozyon ve elektrik iletkenliğine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, Karabük.
- Evcı, C. (2009). *Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi*. Doktora Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 271, Ankara.
- Fayomi, J., Popoola, A., Oladijo, O., Popoola, O. and Fayomi, O. (2019). Experimental study of ZrB₂-Si₃N₄ on the microstructure, mechanical and electrical properties of high grade AA8011 metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 610-615.
- Groover, M. P. (2013). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley and Sons.
- Gündüz, Ö. (2018). *Bor karbür sentezi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 60, Eskişehir.
- Hadad, M., Babazade, A. and Safarabadi, M. (2020). Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplates and carbon nanotubes on the improvement of mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(9), 2535-2547.
- Han, T., Li, J., Zhao, N. and He, C. (2020). Microstructure and properties of copper coated graphene nanoplates reinforced Al matrix composites developed by low temperature ball milling. *Carbon*, 159, 311-323.
- Haq, M. I. U. and Anand, A. (2018). Microhardness studies on stir cast AA7075-Si₃N₄ based composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19916-19922.
- Hemalatha, K., Ashwin, R., Santhanam, M., Riyaz, M. M., Sozhamannan, G. G. and Venkatachalapthy, V. S. K. (2021). Experimental study on behaviour of SiC and Graphene on AL7075 hybrid metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 39, 26-30.
- Hynes, N. R. J., Raja, S., Tharmaraj, R., Pruncu, C. I. and Dispınar, D. (2020). Mechanical and tribological characteristics of boron carbide reinforcement of AA6061 matrix composite. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(4), 1-11.
- Jiang, Y., Xu, R., Tan, Z., Ji, G., Fan, G., Li, Z., Xiong, D. B., Guo, Q., Li, Z. and Zhang, D. (2019). Interface-induced strain hardening of graphene nanosheet/aluminum composites. *Carbon*, 146, 17-27.
- Kabil, A. (2020). *Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozit malzeme üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 79, İstanbul.
- Kalaycıoğlu, A. S. (2010). *SiC tane katkılı alüminyum kompozitlerin toz metalürjisi ile üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 132, İzmir.
- Karabacak, A. H. ve Çanakçı, A. (2023). Farklı seramik takviyeli Al alaşım matrisli nanokompozitlerin mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 1-14.

- 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.
- Kasapgil, E. (2018). *Stearik asitin demir tozunun mekanik alaşımlanması sürecine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, İstanbul.
- Kevenlik, O. F. (2013). *Toz metalürjisi yöntemi ile SiC takviyeli Al2014 esaslı kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 118, Kırıkkale.
- Khan, M., Amjad, M., Khan, A., Ud-Din, R., Ahmad, I. and Subhani, T. (2017). Microstructural evolution, mechanical profile, and fracture morphology of aluminum matrix composites containing graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Research*, 32(11), 2055-2066.
- Khan, M., Ud-Din, R., Wadood, A., Husain, S. W., Akhtar, S. and Aune, R. E. (2020). Physical and mechanical properties of graphene nanoplatelet-reinforced Al6061-T6 composites processed by spark plasma sintering. *The Journal of The Minerals*, 72(6), 2295-2304.
- Khanna, V., Kumar, V., Bansal, S. A., Prakash, C., Ubaidilluh, M., Shaikh S. F., Pramanik, A., Basak, A. And Shankar, S. (2023). Fabrication of efficient aluminium/graphene nanosheets (Al-GNPs) composite by powder metallurgy for strenght applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 3402-3412.
- Khoshghadam-Pireyousefan, M., Rahmanifard, R., Orovciik, L., Švec, P. and Klemm, V. (2020). Application of a novel method for fabrication of graphene reinforced aluminum matrix nanocomposites: Synthesis, microstructure, and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 1-17.
- 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.
- Korucu, S. and Gürkan, S. (2019). Alüminyum matrisli kompozitlerde tungsten karbür ve grafen takviyelerinin mekanik özelliklere etkileri üzerine bir araştırma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1466-1487.
- Kumar, G. B. V., Panigrahy, P. P., Suresh, N., Pramod, R. and Rao, C. S. P. (2019). Assessment of mechanical and tribological characteristics of Silicon Nitride reinforced aluminum metal matrix composites. *Composites Part B-Engineering*, 175, 1-11.
- Kumar, N. M., Kumaran, S. S. and Kumaraswamidhas, L. A. (2016). Wear behaviour of Al 2618 alloy reinforced with Si₃N₄, AlN and ZrB₂ in situ composites at elevated temperatures. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 19-36.
- Kumar, S. A., Vignesh, J. H. and Joshua, S. P. (2020). *Investigating the effect of porosity on aluminium 7075 alloy reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) metal matrix composites through STIR casting process*. 3rd International Conference on Advanced Materials and Modern Manufacturing (ICAMMM), Apr 03-04, 414-419, India.
- Liu, J., Khan, U., Coleman, J., Fernandez, B., Rodriguez, P., Naher, S. and Brabazon, D. (2016). Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites: powder synthesis and prepared composite characteristics. *Materials and Design*, 94, 87-94.

- Lokesh, K., Chetan, I. and Thomas, P. (2017). Influence of graphene on hardness number of Aluminium-7075 based metal matrix composites. *International Journal of Innovative Science and Research Technolog*, 2(12), 285-289
- Lou, S. M., Qu, C. D., Guo, G. X., Ran, L. W., Liu, Y. Q., Zhang, P. P., Su, C. J. and Wang, Q. B. (2020). Effect of fabrication parameters on the performance of 0.5 wt.% graphene nanoplates-reinforced aluminum composites. *Materials*, 13, 1-20.
- Mahmutoğlu, S. A. (2006). *Toz metalürjisi yöntemiyle yüzeyine karbür takviye edilmiş düşük karbonlu çeliklerin üretilmesi ve mikroyapısı*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 98, Elazığ.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC Press.
- Matik, U. (2003). *Toz metalürjisi ile üretilmiş demir esaslı parçaların akımsız nikel kaplanabilirliği ve yorulma dayanımına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 116, Zonguldak.
- Mattli, M. R., Matli, P. R., Shakoar, A. and Amer Mohamed, A. M. (2019). Structural and mechanical properties of amorphous Si₃N₄ nanoparticles reinforced Al matrix composites prepared by microwave sintering. *Ceramics*, 2(1), 126-134.
- Mistry, J. M. and Gohil, P. P. (2019). Experimental investigations on wear and friction behaviour of Si₃N₄p reinforced heat-treated aluminium matrix composites produced using electromagnetic stir casting process. *Composites Part B: Engineering*, 161, 190-204.
- Mohanavel, V., Ali, K. A., Prasath, S., Sathish, T. and Ravichandran, M. (2020). Microstructural and tribological characteristics of AA6351/Si₃N₄ composites manufactured by stir casting. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14662-14672.
- Munoz-Morris, M. A., Oca, C. G. and Morris, D. G. (2002). An analysis of strengthening mechanisms in a mechanically alloyed, oxide dispersion strengthened iron aluminide intermetallic. *Acta Materialia*, 50(11), 2825-2836.
- Nagaral, M., Deshapande, R. G., Auradi, V., Boppana, S. B., Dayanand, S. and Anilkumar, M. R. (2021). Mechanical and wear characterization of ceramic boron carbide-reinforced Al2024 alloy metal composites. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 7, 1-12.
- Nagaral, M., Pavan, R., Shilpa, P. and Auradi, V. (2017). Tensile behavior of B₄C particulate reinforced Al2024 alloy metal matrix composites. *FME Transactions*, 45(1), 93-96.
- Nazik, C. (2013). *Alüminyum matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 108, Konya.
- Okur, Z. Ş. (2019). *Karbon elyaf takviyeli epoksi esaslı tabakalı kompozitlerin üretimi ve kırılma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 60, Osmaniye.
- Özkan, Z. (2019). *AA7075-Al₂O₃ ve SiC parçacık takviyeli hibrit/kompozit malzemelerin aşınma davranışı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, Konya.

- Öztop, B. (2017). *Atık alüminyum kullanarak grafen ve silisyum nitrür takviyeli kompozit üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, Samsun.
- Öztop, B. and Gürbüz, M. (2021). Investigation of mechanical properties of Si_3N_4 reinforced composites produced from aluminum waste. *European Journal of Science and Technology*, 28, 758-765.
- Öztoprak, M. (2015). *Polimer matrisli hibrit takviyeli kompozitlerin mekanik davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı 78, Kayseri.
- Öztürk, K. (2020). *Alüminyum matrisli melez kompozit üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 114, İstanbul.
- Pandiyarajan, R., Prabakaran, M. P., Rajkumar, T., Vetrivel Kumar, K. and Manikandan, R. (2021). Metallurgical and mechanical properties of $\text{SiC}/\text{B}_4\text{C}$ reinforced with aluminum composites synthesized by mechanical alloying. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1794-1798.
- 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.
- Patil, S. and Haneef, M. (2019). Microstructure, tensile properties and hardness behavior of Al7075 matrix composites reinforced with graphene nanoplatelets and beryl fabricated by stir casting method. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 6761-6765.
- Patil, S., Raju, B., Haneef, M. and Nagaral, M. (2021). Reinforcement with graphene nano platelets and Beryl in Al7075 matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 45, 27-33.
- Pourmand, N. S. and Asgharzadeh, H. (2020). Aluminum matrix composites reinforced with graphene: a review on production, microstructure, and properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(4), 289-337.
- Radha, A., Suresh, S., Ramanan, G., Mohanavel, V. and Prema, C. E. (2020). Processing and characterization of mechanical and wear behavior of Al7075 reinforced with B₄C and nano graphene hybrid composite. *Materials Research Express*, 6:12, 1-24.
- Raj, R. R., Yoganandh, J., Saravanan, M. S. and Kumar, S. S. (2021). Effect of graphene addition on the mechanical characteristics of AA7075 aluminium nanocomposites. *Carbon Letters*, 31, 125-136.
- Ramadoss, N., Pazhanivel, K. and Anbuezhhiyan, G. (2020). Synthesis of B₄C and BN reinforced Al7075 hybrid composites using stir casting method. *Journal of Materials Research and Technology*, 9:3, 6297-6304.
- Ramesh, C. S., Keshavamurthy, R., Channabasappa, B. H. and Ahmed, A. (2009). Microstructure and mechanical properties of Ni-P coated Si_3N_4 reinforced Al6061 composites. *Materials Science and Engineering: A*, 502:1, 99-106.
- Ramu, P., Hari Kiran Reddy, R., Kunaal Kumar, B., Padmanathan, T. and Phanibhushana, M. V. (2021). Investigation of wear characteristics of Al6061- Si_3N_4 composites subjected to strain hardening through equal channel angular pressing. *Materials Today: Proceedings*, 46, 790-794.

- Rao, P. R. and Mohan, C. (2020). Study on mechanical performance of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5534-5538.
- Rashad, M., Pan, F., Yu, Z., Asif, M., Lin, H. and Pan, R. (2015). Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25:5, 460-470.
- Reddy, S., Harish, P., Siddiq, S., Srikanth, V. M. and Ravindra, P. (2019). Influence of graphene and alumina on mechanical and microstructural properties of Al7075 based hybrid composites. *Journals of Advancement in Machines*, 4(2), 10-22.
- Saravanan, C., Dinesh, S., Sakthivel, P., Vijayan, V. and Kumar, B. S. (2020). Assessment of mechanical properties of silicon carbide and graphene reinforced aluminium composite. *Materials Today Proceeding*, 21, 744-747.
- Sarıkaya, E. (2019). *Doğal fiber takviyeli kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 87, Denizli.
- Shantharaj, P., Prashanth, A. S., Nagaral, M., Bharath, V., Auradi, V. and Dharshan, K. (2021). Microstructure, tensile and compression behaviour of B₄C particles reinforced Al7075 matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1135-1139.
- 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.
- Smart, D. R., Kumar, J. P. and Periasamy, C. (2021). Microstructural, mechanical and wear characteristics of AA7075/TaC/Si₃N₄/Ti based hybrid metal matrix composite material. *Materials Today: Proceedings*, 43, 784-794.
- Smith, W. F. (2001). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Sun, Y., Zhang, C., Liu, B., Meng, Q., Ma, S. and Dai, W. (2017). Reduced graphene oxide reinforced 7075 Al matrix composites: powder synthesis and mechanical properties. *Metals*, 7(11), 1-14.
- Şahin, O. (2018). *TiB₂ ve B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı 104, Kırıkkale.
- Şahin, Y. (2006). *Kompozit malzemelere giriş (Genişletilmiş 2. Basım)*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Şen, T. (2020). *Takviyeli kompozit malzemelerin otomotiv sektöründe kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, Isparta.
- Şenel, M. C. (2018). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 118, Samsun.

- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020). 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., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-47.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2017). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 974-978.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2018). Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 154, 1-9
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2019). Fabrication and characterization of aluminum hybrid composites reinforced with silicon nitride/graphene nanoplatelet binary particles. *Journal of Composite Materials*, 53(28), 4043-4054.
- Şenel, M. C. and Mahmutoglu, Ü., (2022). Effect of induction heat treatment on the mechanical properties of Si₃N₄-graphene reinforced Al2024 hybrid composites. *Bulletin of Materials Science*, 45(1), 1-17.
- Şenel, M. C. and Üstün, M. (2022). Dry sliding wear and friction behavior of Graphene/ZrO₂ binary nanoparticles reinforced aluminum hybrid composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 9253-9269.
- Şimşek, İ. (2017). *Toz metalürjisi ile üretilen titanyum alaşımı biyomalzemelerin korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 107, Karabük.
- Tabonah, T. M. K. (2019). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen nanopartikül katkılı Ni-B alaşımların mikroyapı ve korozyon özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, Kastamonu.
- Taşar, B. (2021). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen bor ve nikel katkılı A356 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında, 76, Karabük.
- Taşçı, M. T. (2016). *Toz metalürjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çeliğine nikel ilavesinin mikroyapı mekanik özellikleri üzerine etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 79, Karabük.
- Tekoğlu, E. (2015). *Mekanik alaşımlama yöntemleri ile üretilmiş Al15Si2,5Cu0,5Mg matrisli ve CeO₂, Y₂O₃, La₂O₃ pekiştiricili kompozitlerin geliştirilmesi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 129, İstanbul.
- Tian, W.M., Li, S.M., Wang, B., Chen, X., Liu, J.H. and Yu, M. (2016). Graphene-reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 23(6), 723-729.
- Topçu, İ. (2020). Investigation of wear behavior of particle reinforced Al/B₄C composites under different sintering conditions. *Tehnički Glasnik*, 14(1), 7-14.
- Topuz, T. (2019). *Alüminyum matrisli silisyum karbür ve vanadyum karbür ilaveli hibrit kompozit üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 82, Karabük.

- Tümer, M. (2004). *Silisyum tozu üretimi ve sinterlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 96, Sakarya.
- Umur, H. (2017). *Nano B₄C partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 67, Nevşehir.
- Wang, T., Zhang, Y., Li, G., Ma, C. and Xiao, W. (2017). Enhanced mechanical properties of Al7075 alloy with graphene nanoplates prepared by ball milling and hot extrusion. *Chinese Materials Conference, Springer*, 827-834.
- Xia, H. M., Zhang, L., Zhu, Y.C., Li, N., Sun, Y.Q., Zhang, J.D. and Ma, H.Z. (2020). Mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced 7075 aluminum alloy composite fabricated by spark plasma sintering. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(9), 1295-1300.
- Xiu, Z. Y., Chen, G. Q., Liu, Y. M., Yang, W. S. and Wu, G.H. (2009). Effects of extrusion deformation on mechanical properties of sub-micron Si₃N₄/2024 composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 373-377.
- Xu, Z. Y., Li, C. J., Wang, Z., Fang, D., Gao, P., Tao, J. M., Yi, J. H. and Eckert, J. (2020). Balancing the strength and ductility of graphene oxide-carbon nanotube hybrid reinforced aluminum matrix composites with bimodal grain distribution. *Materials Science and Engineering: A*, 796, 1-7.
- Yakut, R. (2015). *B₄C takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin yarı katı karıştırma yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 98, Edirne.
- Yalçın, E. D. (2018). *ZA27/Grafen/B₄C nanokompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, Trabzon.
- Yalçın, Ö. F. (2015). *Toz metalürjisi üretim parametrelerinin gözeneklilik, mikrosertlik ve ısı genleşme katsayısına etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, Trabzon.
- Yang, W., Zhao, Q., Xin, L., Qiao, J., Zou, J., Shao, P., Yu, Z., Zhang, Q. and Wu, G. (2018). Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method. *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 748-758.
- Yıldırım, M. (2016). *Mekanik alaşımlama yöntemi ile AA7075-karbon nanotüp takviyeli metal matrisli kompozit üretimi karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 116, Karabük.
- Yıldırım, M. ve Özyürek, D. (2018). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen 7075 Al Alaşımlarında Mn Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2), 269-276.
- Yılmaz, H. (2019). *Grafen takviyeli polimer kompozit üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lif ve Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı, 62, Bursa.
- 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, 149, Samsun.

- Yurt, Ö. E. (2019). *Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen parçacık takviyeli alüminyum kompozit profillerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, Kastamonu.
- Zhang, C., Yin, J., Yao, D., Zuo, K., Xia, Y., Liang, H. and Zeng, Y. (2017). Enhanced tensile properties of Al matrix composites reinforced with β -Si₃N₄ whiskers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 102, 145-153.
- Zhang, J., Liu, Q., Yang, S., Chen, Z., Liu, Q. and Jiang, Z. (2020). Microstructural evolution of hybrid aluminum matrix composites reinforced with SiC nanoparticles and graphene/graphite prepared by powder metallurgy. *Progress in natural science: materials international*, 30(2), 192-199.
- Zor, M. 2018. *Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları*, İzmir.



ÖZ GEÇMİŞ

Aleyna Taşkın, Samsun Karşıyaka Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 27.05.2020 tarihinde mezun oldu. 2020 yılında OMÜ LEE Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. 2022 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak göreve başlayan Aleyna Taşkın iyi derecede İngilizce bilmektedir (YÖKDİL:88). Temel ilgi alanları, metal matrisli kompozit malzemeler, toz metalürjisi ve sonlu elemanlar analizidir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0002-8308-9957

Yayınlar:

1. Taşkın, A., Şahin, F., Dengiz, C.G., Demirbaş, T.C. (2023). Numerical and experimental investigation of nano-particle added waste oils on lubrication performance. *OMU Journal of Engineering Sciences and Technology*, 3(1), 29-45.
2. Taşkın, A., Şenel, M.C. (2022). Tungsten karbür katkısının alüminyum esaslı kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışına etkisi. *1st International Conference on Innovative Academic Studies*.
3. Taşkın, A., Dengiz, C.G., Şenel, M.C. (2022). Döküm yataklar için kullanılabilecek otomatik beslemeli pnömatik montaj sistemi tasarımı. *2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*.
4. Taşkın, A., Dengiz, C.G. (2022). Halka ezdirme testinde sürtünme katsayısı ve yüzey geometrisinin deformasyona etkisi. *1st International Conference on Scientific and Academic Research*.
5. Taşkın, A., Dengiz, C.G., Şenel, M.C. (2022). Bantlar arası pnömatik transfer tertibatı tasarımı. *2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*.
6. Kaya, M.A., Taşkın, A., Dengiz, C.G. Şenel, M.C. (2022). Hidrolik kontrollü zımparalama ve parlatma makinesi tasarımı. *2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*.
7. Taşkın, A., Dengiz, C.G., Şahin, F. (2022). Investigation of lubrication performance of nano-particle added waste oils. *Cooperation of Climate Change and Green Deal Symposium*.