

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



**Al7075-Al₂O₃-GRAFEN VE Al7075-ZrO₂-GRAFEN HİBRİT
KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Elif IŞIK

Danışman

Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Elif IŞIK tarafından, Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL danışmanlığında hazırlanan “Al7075-Al₂O₃-GRAFEN VE Al7075-ZrO₂-GRAFEN HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 21.7.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

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

Hayır ☒

02/06/2023

Elif IŞIK

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: Al₇O₃-Al₂O₃-GRAFEN VE Al₇O₃-ZrO₂-GRAFEN HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 02.06.2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

02/06/2023

Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

ÖZET

Al7075-Al₂O₃-GRAFEN VE Al7075-ZrO₂-GRAFEN HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ

Elif IŞIK

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Temmuz/2023

Danışman: Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL

Bu çalışmada, alüminyum matrise alümina (Al₂O₃), zirkonya (ZrO₂) ve grafen nanotabaka takviyesinin kompozitlerin mikroyapılarına, mekanik (yoğunluk, gözeneklilik oranı, sertlik, basma dayanımı) ve tribolojik özelliklerine (kütle kaybı, aşınma oranı, sürtünme katsayısı) olan etkisi incelenmiştir. Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak işlem yöntemleri kullanılarak, Al7075-ZrO₂, Al7075-ZrO₂-Grafen, Al7075-Al₂O₃ ve Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında takviye oranının ve ısıtma işlem türünün (sinterleme, indüksiyonla ısıtma işlemi) kompozitlerin mikroyapılarına, mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Mekanik ve tribolojik testler sonucunda; Al7075-ZrO₂ kompozitler içerisinde en yüksek deneysel yoğunluk (2,72 g/cm³), sertlik (157±4 HV), basma dayanımı (443±7 MPa) ve en düşük aşınma oranı (1,1x10⁻⁴ mm³/Nm) değerlerine sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtma işlemi görmüş Al7075-%6ZrO₂ kompozitte ulaşılmıştır. Al7075-Al₂O₃ kompozitlerde ise en yüksek mekanik ve tribolojik özelliklere (deneysel yoğunluk, sertlik, basma dayanımı, aşınma oranı) Al7075-%12Al₂O₃ (2,7 g/cm³, 170±2 HV, 471±6 MPa, 0,9x10⁻⁴ mm³/Nm) kompozitte ulaşılmıştır. Ardından Al7075-ZrO₂ ve Al7075-Al₂O₃ kompozitler içerisinde en üstün özellikler sergileyen takviye oranları (ağırlıkça %6 ve 12) sabit tutularak yapıya grafen takviyesi yapılmış ve alüminyum hibrit kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Grafen takviyesi yapılmış hibrit kompozitlerde ise en yüksek mekanik ve tribolojik özelliklere (deneysel yoğunluk, gözeneklilik oranı, sertlik, basma dayanımı ve aşınma oranı) sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtma işlemi görmüş Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen (2,74 g/cm³, %6,7, 169±2 HV, 478±4 MPa, 1x10⁻⁴ mm³/Nm) ve Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen (2,72 g/cm³, %7,5, 178±1 HV, 486±4 MPa, 0,7x10⁻⁴ mm³/Nm) kompozitlerde ulaşılmıştır. Ağırlıkça %0,1 takviye oranından sonra nano boyuta sahip olan grafen partikülleri elektrostatik çekim kuvvetleri sebebiyle topaklanma eğilimi gösterdiğinden malzeme özelliklerinde düşüş gözlenmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası yapılan indüksiyonla ısıtma işlemi ile mekanik ve tribolojik özelliklerde ciddi artışlar elde edilmiş olup bu işlemin etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Toz Metalürjisi, Al7075, Alümina, Zirkonya, Grafen

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL, TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF Al7075-Al₂O₃-GRAPHENE AND Al7075-ZrO₂-GRAPHENE HYBRID COMPOSITES

Elif IŞIK

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Master, July/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahmut Can ŞENEL

In this study, the effect of alumina (Al₂O₃), zirconia (ZrO₂), and graphene reinforcements on the microstructure, mechanical (density, porosity, hardness, compressive strength), and tribological properties (mass loss, wear rate, friction coefficient) of composites were investigated. Al7075-ZrO₂, Al7075-ZrO₂-Graphene, Al7075-Al₂O₃ and Al7075-Al₂O₃-Graphene composites were fabricated by powder metallurgy and induction heat treatment methods. Also, the effects of reinforcement ratio and heat treatment type (sintering, induction heat treatment) on the microstructure, mechanical and tribological properties of the composites were examined in detail.

As a result of mechanical and tribological tests; the highest apparent density (2,72 g/cm³), hardness (157±4 HV), compressive strength (443±7 MPa), and the lowest wear rate (1,1x10⁻⁴ mm³/Nm) values of Al7075-ZrO₂ composites were achieved in sintered and induction heat treated Al7075-6%ZrO₂ composites. In Al7075-Al₂O₃ composites, the highest mechanical and tribological properties (apparent density, hardness, compressive strength, wear rate) were achieved in Al7075-12%Al₂O₃ (2,7 g/cm³, 170±2 HV, 471±6 MPa, 0,9x10⁻⁴ mm³/Nm) composites. Then, Al7075-ZrO₂ and Al7075-Al₂O₃ hybrid composites were produced by reinforcing the structure with graphene while keeping the reinforcement ratios (6 and 12 wt%) constant, which gave the highest properties. Graphene-reinforced hybrid composites have the highest mechanical and tribological properties (apparent density, porosity, hardness, compressive strength, and wear rate) were achieved in sintered and induction heat-treated Al7075-6%ZrO₂-0,1%Graphene (2,74 g/cm³, 6,7%, 169±2 HV, 478±4 MPa, 1x10⁻⁴ mm³/Nm) and Al7075-12%Al₂O₃-0,1%Graphene (2,72 g/cm³, 7,5%, 178±1 HV, 486±4 MPa, 0,7x10⁻⁴ mm³/Nm) composites. After the 0,1 wt% reinforcement ratio, graphene particles with nano-size show a tendency to agglomerate due to electrostatic attraction forces, and a decrease in material properties is observed. In addition, significant increases in the mechanical and tribological properties have been obtained with induction heat treatment after sintering and this process has proven effective.

Keywords: Powder Metallurgy, Al7075, Alumina, Zirconia, Graphene

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana yol gösterip zaman ayıran, akademik kariyerimde bir adım daha ilerlememi sağlayan, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Mahmut Can ŞENEL'e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmam sırasında değerli bilgilerini benimle paylaşıp yol gösteren Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ, Dr. Öğr. Üyesi Onur YONTAR, Dr. Öğr. Üyesi Cengiz Gökem DENGİZ ve Dr. Öğr. Üyesi Betül KAFKASLIOĞLU YILDIZ'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında bana yardım eden Arş. Gör. Aleyna TAŞKIN, Mehmethan DEMİR ve Ömür Ekrem GÜNTÜRK'e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emeği olan ve bana her türlü destekte bulunan annem Birgül IŞIK'a ve babam Sadeddin IŞIK'a teşekkür ederim. Ayrıca tez düzeltmelerim konusunda bana yardımcı olan ve görüşlerini bildiren sevgili kız kardeşim Rabia IŞIK'a teşekkür ederim.

ELİF IŞIK

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Çalışmanın Amacı	3
1.3. Çalışmanın Özgün Değeri	3
1.4. Tez Düzeni	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Al-Grafen Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	5
2.2. Al-ZrO ₂ Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	8
2.3. Al-Al ₂ O ₃ Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	14
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	25
3.1. Genel Bilgiler	25
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	28
3.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler.....	28
3.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler	28
3.2.1.2. Seramik matrisli kompozitler	28
3.2.1.3. Metal matrisli kompozitler	29
3.2.2. Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler	29
3.2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler	30
3.2.2.2. Parçacık takviyeli kompozitler	30
3.2.2.3. Tabakalı kompozitler	31
3.2.2.4. Karma (hibrit) kompozitler.....	31
3.3. Metal Matrisli Kompozitler	31
3.3.1. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri.....	32
3.3.1.1. Titanyum ve alaşımları	32
3.3.1.2. Magnezyum ve alaşımları.....	33
3.3.1.3. Alüminyum ve alaşımları	33
3.3.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri	36
3.3.3. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri	37
3.3.3.1. Katı hal üretim yöntemleri.....	37
3.3.3.2. Sıvı hal üretim yöntemleri	39
4. TOZ METALÜRJİSİ	43
4.1. Genel Bilgiler	43
4.2. Metal Toz Üretim Teknikleri.....	45
4.2.1. Mekanik üretim teknikleri	46
4.2.2. Kimyasal üretim teknikleri	47
4.2.3. Elektroliz ile üretim teknikleri	47
4.2.4. Atomizasyon teknikleri	48
4.3. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Parça Üretimi	49
4.3.1. Karıştırma ve harmanlama	49
4.3.2. Presleme (Sıkıştırma)	50

4.3.3. Sinterleme	50
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	53
5.1. Materyal.....	53
5.2. Yöntem.....	55
5.2.1. Toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretimi.....	57
5.2.1.1. Tozların hazırlanması	57
5.2.1.2. Karışımın filtrelenmesi, kurutulması ve elenmesi işlemi	58
5.2.1.3. Tozların preslenmesi işlemi	59
5.2.1.4. Numunelerin sinterlenmesi işlemi	60
5.2.1.5. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi	61
5.2.1.6. Zımparalama ve parlatma işlemi	63
5.2.2. Test yöntemleri ve karakterizasyon teknikleri	64
5.2.2.1. Yoğunluk ve gözeneklilik ölçümü.....	64
5.2.2.2. Vickers sertlik ölçümü.....	66
5.2.2.3. Basma dayanımı tespiti.....	67
5.2.2.4. Aşınma ve sürtünme verilerinin tespiti.....	68
5.2.2.5. Tanecik boyut dağılımı analizi	70
5.2.2.6. X-ışını kırınım (XRD) analizi.....	70
5.2.2.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	71
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	73
6.1. Al7075 Matrisli ZrO ₂ /Grafen Takviyeli Kompozitlerin Analiz Sonuçları.....	73
6.1.1. Tozların SEM, XRD analizleri ve tane boyut dağılımı	73
6.1.2. Yoğunluk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi	75
6.1.3. Sertlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi.....	76
6.1.4. Basma testi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	78
6.1.5. XRD faz analizi sonuçlarının değerlendirilmesi	82
6.1.6. SEM ve SEM-EDX görüntülerinin değerlendirilmesi	82
6.1.7. Aşınma test sonuçlarının değerlendirilmesi	87
6.2. Al7075 Matrisli Al ₂ O ₃ /Grafen Takviyeli Kompozitlerin Analiz Sonuçları	94
6.2.1. Tozların SEM, XRD analizleri ve tane boyut analizi sonuçları	94
6.2.2. Yoğunluk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi	96
6.2.3. Sertlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi.....	97
6.2.4. Basma testi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	98
6.2.5. XRD faz analizi sonuçlarının değerlendirilmesi	100
6.2.6. SEM ve SEM-EDX görüntülerinin değerlendirilmesi	101
6.2.7. Aşınma test sonuçlarının değerlendirilmesi	106
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	112
7.1. ZrO ₂ /Grafen Takviyeli Al7075 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi.....	112
7.2. Al ₂ O ₃ /Grafen Takviyeli Al7075 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi	114
7.3. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler	115
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ.....	126

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alümina
B ₄ C	: Bor karbür
BN	: Bor nitrür
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
NaCl	: Sodyum klorür
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Si	: Silisyum
Si ₃ N ₄	: Silisyum nitrür
SiC	: Silisyum karbür
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
TiB ₂	: Titanyum diborür
TiC	: Titanyum karbür
WC	: Tungsten karbür
Zn	: Çinko
ZrO ₂	: Zirkonya

KISALTMALAR

EDX	: Enerji Saçılımlı X-Işını Analizi
HB	: Brinell Sertliği
HRB	: Rockwell Sertliği
HV	: Vickers Sertliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Kırınımı
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kompozit malzemelerde matris ve takviye fazları	26
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin farklı sektörlerdeki uygulama örnekleri	27
Şekil 3.3. Takviye malzemesine göre kompozitler: elyaf takviyeli (a), parçacık takviyeli (b) ve tabakalı kompozitler (c)	29
Şekil 3.4. Elyaf takviyeli kompozitler: sürekli ve kuvvet doğrultusunda yönlendirilmiş (a), süreksiz ve kuvvet doğrultusunda yönlendirilmiş (b), süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş (c).....	30
Şekil 3.5. Difüzyonla birleştirme işleminin şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.6. Toz metalürjisi sürecinin şematik gösterimi	38
Şekil 3.7. İnfiltrasyon işleminin şematik gösterimi	41
Şekil 3.8. Sıkıştırılmalı döküm yönteminin şematik gösterimi	40
Şekil 3.9. Karıştırılmalı döküm yöntemi.....	39
Şekil 3.10. Plazma sprej yönteminin şematik gösterimi	41
Şekil 4.1. Toz metalürjisinde kullanılan bazı tozların geometrik şekilleri.....	45
Şekil 4.2. Mekanik üretim tekniklerinin şematik gösterimi: talaşlı üretim (a), mekanik öğütme (b), mekanik alaşımlama (c)	47
Şekil 4.3. Elektroliz yönteminin şematik gösterimi	48
Şekil 4.4. Bazı atomizasyon tekniklerin şematik gösterimi: gaz atomizasyonu (a), su atomizasyonu (b), santrifüj atomizasyonu (c)	48
Şekil 4.5. Presleme işlemiyle mikroyapıda meydana gelen değişimler (a) ve presleme basıncının yoğunluğa etkisi (b).....	50
Şekil 4.6. Sinterleme aşamalarının sıcaklıkla değişimi (a) ve sinterleme sırasında mikroyapıda meydana gelen değişimler (b)	51
Şekil 5.1. Toz metalürjisi yöntemiyle üretim ve karakterizasyon süreci	56
Şekil 5.2. Hassas terazide tartım işlemi	57
Şekil 5.3. Isıticılı manyetik karıştırıcı (a) ve yüksek enerjili bilyalı değirmen (b)	58
Şekil 5.4. Karışımın filtrelenebilmesi (a) ve etüvde kurutulması (b).....	58
Şekil 5.5. Toz karışımının agat havanda dövülmesi (a) ve elenmesi (b)	59
Şekil 5.6. Presleme işleminde kullanılan paslanmaz çelik kalıp.....	59
Şekil 5.7. Şekillendirme işlemi için kullanılan hidrolik pres (a) ve presleme işlemi (b)	60
Şekil 5.8. Sinterleme işleminde kullanılan tüp fırın.....	60
Şekil 5.9. Vakum pompası	61
Şekil 5.10. İndüksiyonla sıcak işlem cihazı	62
Şekil 5.11. İndüksiyonla ısıtım işlemi proses parametrelerinin ayarlandığı kontrol paneli	63
Şekil 5.12. Zımparalama ve parlatma cihazı.....	63
Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma işlemi öncesi (a) ve sonrası (b) numune yüzeyi	64
Şekil 5.14. Numunelere su emdirilmesi (a) ve Arşimed terazisinde asılı ağırlıkların ölçümü (b)	65

Şekil 5.15. Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	66
Şekil 5.16. Basma test cihazı	68
Şekil 5.17. Aşınma test düzeneği.....	69
Şekil 5.18. Tane boyut ölçüm cihazı.....	70
Şekil 5.19. X-ışını kırınım (XRD) cihazı.....	71
Şekil 5.20. Taramalı elektron mikroskobu.....	72
Şekil 6.1. Al7075 alaşımı (a), grafen (b) ve ZrO ₂ (c) tozlarına ait SEM görüntüleri.....	74
Şekil 6.2. Al7075 alüminyum alaşım (a), grafen (b) ve ZrO ₂ (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri.....	74
Şekil 6.3. Al7075 alüminyum alaşım (a) ve ZrO ₂ (b) tozlarına ait tanecik boyut dağılımı ...	75
Şekil 6.4. Al7075-ZrO ₂ kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi	76
Şekil 6.5. Al7075-ZrO ₂ -Grafen kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi	76
Şekil 6.6. Al7075-ZrO ₂ kompozitlerin Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi	77
Şekil 6.7. Al7075-%6ZrO ₂ -Grafen kompozitlerin Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi.....	78
Şekil 6.8. Al7075-ZrO ₂ kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi	79
Şekil 6.9. Al7075-ZrO ₂ -Grafen kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi.....	80
Şekil 6.10. Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%6ZrO ₂ ve Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen kompozitlere ait XRD örgü desenleri.....	82
Şekil 6.11. Al7075 alüminyum alaşımı ve Al7075-ZrO ₂ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075 (a), Al7075-i (b), Al7075-%6ZrO ₂ (c), Al7075-%6ZrO ₂ -i (d), Al7075-%9ZrO ₂ (e), Al7075-%9ZrO ₂ -i (f).....	83
Şekil 6.12. Al7075-ZrO ₂ -Grafen kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075-%6ZrO ₂ (a), Al7075-%6ZrO ₂ -i (b), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,1Grafen (c), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,1Grafen-i (d), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen (e), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen-i (f).....	85
Şekil 6.13. Sadece sinterlenmiş Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-k)...	86
Şekil 6.14. Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-i)	87
Şekil 6.15. Al7075-ZrO ₂ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) değerleri indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ile aşınma oranı (d) değerleri	88
Şekil 6.16. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozitlere ait aşınma izleri (P=5 N): Al7075 alaşımı (a), Al7075-i (b), Al7075-%6ZrO ₂ (c), Al7075-%6ZrO ₂ -i (d), Al7075-%9ZrO ₂ (e), Al7075-%9ZrO ₂ -i (f).....	90

Şekil 6.17. Al7075-ZrO ₂ -Grafen kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ve aşınma oranı (d) değerleri.....	91
Şekil 6.18. Al7075-ZrO ₂ -Grafen kompozitlere ait indüksiyonla ısıtıl işlem öncesi ve sonrası aşınma izleri: Al7075-%6ZrO ₂ (a), Al7075-%6ZrO ₂ -i (b), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,1Grafen (c), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,1Grafen-i (d), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,3Grafen (e), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,3Grafen-i (f), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen (g), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen-i (h), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen (P=10 N) (i), Al7075-%6ZrO ₂ -%0,5Grafen-i (P=10 N) (j).....	92
Şekil 6.19. Al7075-ZrO ₂ ve Al7075-ZrO ₂ -Grafen kompozitlerde sürtünme katsayısının kayma mesafesiyle değişimi.....	93
Şekil 6.20. Al7075 alaşımı (a), grafen (b) ve Al ₂ O ₃ (c) tozlarına ait SEM görüntüleri	94
Şekil 6.21. Al7075 alüminyum alaşımı (a), grafen (b) ve alümina (c) tozlarına ait XRD faz analizi	95
Şekil 6.22. Al7075 alüminyum alaşımı (a) ve alümina (b) tozlarına ait tane boyut dağılımı	95
Şekil 6.23. Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi	96
Şekil 6.24. Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi	97
Şekil 6.25. Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlerin takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerinin değişimi	97
Şekil 6.26. Al7075-Al ₂ O ₃ -Grafen kompozitlerin Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi.....	98
Şekil 6.27. Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi	99
Şekil 6.28. Al7075-Al ₂ O ₃ -Grafen kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi.....	100
Şekil 6.29. Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%12Al ₂ O ₃ ve Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,1Grafen kompozitlere ait XRD faz analizi.....	100
Şekil 6.30. Al7075 alüminyum alaşımı ve Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075 alaşımı (a), Al7075-i (b), Al7075-%12Al ₂ O ₃ (c), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -i (d), Al7075-%15Al ₂ O ₃ (e), Al7075-%15Al ₂ O ₃ -i (f)	102
Şekil 6.31. Al7075 alüminyum alaşımı ve Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075-%12Al ₂ O ₃ (a), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -i (b), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,1Grafen (c), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,1Grafen-i (d), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,3Grafen (e), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,3Grafen-i (f), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,5Grafen (g), Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,5Grafen-i (h)	103
Şekil 6.32. Sadece sinterlenmiş Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,5Grafen hibrit kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-k).....	104
Şekil 6.33. Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al ₂ O ₃ -%0,5Grafen hibrit kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-k)	105
Şekil 6.34. Al7075-Al ₂ O ₃ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ile aşınma oranı (d)	106

- Şekil 6.35. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozitlere ait aşınma izleri (P=5 N): Al7075 alaşımı (a), Al7075-i (b), Al7075-%12Al₂O₃ (c), Al7075-%12Al₂O₃-i (d), Al7075-%15Al₂O₃ (e), Al7075-%15Al₂O₃-i (f) 107
- Şekil 6.36. Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) değerleri indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ile aşınma oranı değerleri..... 108
- Şekil 6.37. Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozitlere ait aşınma izleri: Al7075-%12Al₂O₃ (a), Al7075-%12Al₂O₃-i (b), Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen (c), Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen-i (d), Al7075-%12Al₂O₃-%0,3Grafen (e), Al7075-%12Al₂O₃-%0,3Grafen-i (f), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen (g), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen-i (h), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen (P=10 N) (ı), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen-i (P=10 N) (j)..... 110
- Şekil 6.38. Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-Al₂O₃ ve Al7075-%12Al₂O₃-Grafen kompozitlerde sürtünme katsayısının kayma mesafesiyle değişimi 111



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Alüminyum matrisli grafen takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar.....	21
Tablo 2.2. Alüminyum matrisli zirkonya takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar.....	22
Tablo 2.3. Alüminyum matrisli alümina takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar.....	23
Tablo 2.4. Alüminyum matrisli grafen, alümina ve zirkonya takviyeli kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalar	24
Tablo 3.1. Dövme alüminyum alaşımlarının gösterim kodları ve kullanım alanları	35
Tablo 3.2. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterim kodları ve alaşım elementleri.....	36
Tablo 3.3. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları	36
Tablo 3.4. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları ve özellikleri	37
Tablo 3.5. Metal matrisli kompozit malzeme üretim yöntemlerinin karşılaştırılması	42
Tablo 4.1. Toz metalürjisinin kullanım alanları.....	44
Tablo 4.2. Atomizasyon tekniklerinin karşılaştırılması	49
Tablo 5.1. Al7075 alüminyum alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri	53
Tablo 5.2. Al7075 alüminyum alaşımına ait kimyasal kompozisyon	53
Tablo 5.3. Grafenin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	54
Tablo 5.4. Zirkonyanın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	54
Tablo 5.5. Alüminanın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	55

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Gelişen teknolojiyle birlikte malzemelerden istenen üstün özelliklerin artması geleneksel malzemelerin birçok sektörde yetersiz kalmasına sebep olmuştur. Bu nedenle bu sektörlerde geleneksel malzemeler yerini daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere bırakmıştır. Bundan dolayı en az iki farklı malzemenin üstün özelliklerini bünyesinde toplayan kompozit malzemeler her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Özellikle son dönemlerde bu malzemeler hakkındaki araştırmalara ağırlık verilmiştir. Farklı malzeme kombinasyonları ve üretim teknikleriyle yapılan bu araştırmalar malzeme bilimi açısından büyük önem taşımaktadır (Kalemtaş, 2016).

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre seramik, polimer ve metal matrisli kompozitler olarak üçe ayrılmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak seramik esaslı malzemeler tercih edilmektedir. Seramik matrisli kompozitler yüksek aşınma dayanımı, korozyon dayanımı ve termal dayanım gibi avantajlara sahiptir. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan matris elemanları polimer esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler hafiflik, kolay üretim ve şekillendirme süreci gibi özellikleri sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerde ise matris malzemesini; titanyum (Ti), magnezyum (Mg), bakır (Cu), alüminyum (Al), nikel (Ni), çinko (Zn), demir (Fe), silisyum (Si), kalay (Sn) ve kurşun (Pb) gibi metaller ve bu metallerin alaşımları oluşturmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde malzemelerin özelliklerini arttırmak amacıyla en çok tercih edilen takviye elemanları; silisyum karbür (SiC), silisyum dioksit (SiO₂), silisyum nitrür (Si₃N₄), bor karbür (B₄C), bor nitrür (BN), titanyum karbür (TiC), zirkonya (ZrO₂) ve alümina (Al₂O₃) şeklinde sıralanabilir (Şahin, 2015; Şenel, 2018a).

Bu çalışmada, Al7075 matrisli ZrO₂-grafen ve Al₂O₃-grafen takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi ve indüksiyonla ısıtma işlem yöntemi kullanılarak üretimi ve karakterizasyonu amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan matris ve takviye malzemeleri hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

Alüminyum ve alaşımları, metal matrisli kompozitler için matris fazı olarak sıklıkla tercih edilen malzemelerdir. Bu malzemeler sahip oldukları hafiflik, yüksek korozyon dayanımı, kolay şekillendirilebilme ve yüksek özgül dayanım gibi

özellikleri sayesinde araştırmacıların ilgisini üzerine çekmektedir. Özellikle bu çalışmada da matris fazı olarak kullanılan Al7075 alüminyum alaşımı sahip olduğu yüksek mukavemet ve tokluk değerleriyle havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır (Karakoç, 2020).

Grafen, karbon atomlarının iki boyutlu olarak altıgen şekilde dizilmesiyle oluşmuş tek katmanlı bir yapıdır. Grafen bu iki boyutlu yapısı sayesinde başta elektriksel özellikleri olmak üzere birçok açıdan olağanüstü özellikler göstermektedir. Grafen yüksek mukavemet, yüksek sertlik, hafiflik ve yüksek esneme özelliğine sahiptir. Ayrıca yağlayıcılık özelliğine sahip olan grafen, metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanıldığında aşınma dayanımının artmasını ve sürtünme katsayısının azalmasını sağlamaktadır (Subaşı vd., 2017).

Bu çalışmada kullanılan bir diğer takviye elemanı olan zirkonya (ZrO_2), yüksek ergime sıcaklığı, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek korozyon ve aşınma dayanımı gibi üstün özelliklere sahip bir ileri teknoloji seramiğidir. ZrO_2 'nin kristal yapısı incelendiğinde monoklinik, tetragonal ve kübik olmak üzere üç farklı kristal yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca yüksek basınç ve sıcaklıkta ortorombik kristal yapı da gösterebilmektedir. Zirkonyanın farklı kristal yapılara sahip olması beraberinde bazı sorunları da getirmektedir. Özellikle tetragonal-monoklinik faz dönüşümü sırasında yapıda %3-5 oranında hacim değişikliği meydana gelmektedir. Bu dönüşüm sonucu ortaya çıkan gerilmeler kontrol altına alınmadığında yapıda hasara neden olmaktadır. Bu durum da zirkonyanın kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Zirkonyanın kristal yapısını kontrol altına almak ve yapının kararlılığını sağlamak amacıyla kalsiyum, alüminyum, magnezyum, seryum veya yttrium gibi metal oksitler kullanılmaktadır (Boyacıoğlu, 2007; Şimşek, 2019).

Alümina (Al_2O_3), alüminyumun doğada kristal yapıda bulunan tek bileşiğidir. Ayrıca atomları arasında bulunan yüksek enerjiye sahip kovalent ve iyonik bağlar sayesinde kararlı bir yapıya sahiptir. Alümina yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek refrakterlik, yüksek aşınma ve korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere sahip bir ileri teknoloji seramiğidir. $3,98 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa, 2070°C ergime sıcaklığına sahip olan alümina mohs ölçeğine göre neredeyse elmas kadar sert bir malzemedir (Al-Jaafari, 2021; Kaya ve Öz, 2020).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada Al7075-ZrO₂-grafen ve Al7075-Al₂O₃-grafen kompozitlerin üretimi yapılarak mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Üretim yöntemi olarak toz metalürjisi kullanılırken matris malzemesi olarak Al7075 alüminyum alaşımı, takviye malzemesi olarak ise Al₂O₃, ZrO₂ ve grafen nanotabaka seçilmiştir. Çalışmada sinterleme sonrası indüksiyonla ısıtılma işlemiyle mekanik özelliklerin artırılması amaçlanmaktadır. Üretilen numunelerin yoğunlukları, gözeneklilik oranları, basma dayanımları, Vickers sertlikleri, aşınma oranları ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışmada mikroyapı incelemeleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Faz analizleri için X-ışını kırınım (XRD) cihazı kullanılırken takviye malzemelerinin yapıdaki dağılımını incelemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağıtıcı X-ışını (SEM-EDX) analizleri yapılmıştır.

1.3. Çalışmanın Özgün Değeri

Literatür araştırması yapıldığında Al-Al₂O₃, Al-ZrO₂ ve Al-grafen kompozit malzemelerin üretimine ve özelliklerinin incelenmesine yönelik birçok çalışmaya rastlanırken Al7075 matrisli ZrO₂-grafen ve Al₂O₃-grafen takviyeli hibrit kompozitlerin mikroyapılarının, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği çok az çalışmaya rastlanılmıştır.

Ayrıca sinterleme sonrası indüksiyonla ısıtılma işleminin, Al7075-grafen, Al7075-ZrO₂-grafen, Al7075-Al₂O₃-grafen hibrit kompozitlerin mikroyapılarına, mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisinin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu durum, yürütülen çalışmanın özgün değerini göstermektedir.

1.4. Tez Düzeni

Birinci bölümde çalışma hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmanın amacı, özgün değeri ve tez düzeni bu bölümde belirtilmiştir. İkinci bölüm olan literatür araştırması kısmında ise çalışma konusu olan alüminyum matrisli Al₂O₃, ZrO₂ ve grafen takviyeli kompozit malzemeler hakkındaki çalışmalar incelenerek kısaca özetlenmiştir. Üçüncü bölümde kompozit malzemeler detaylı bir şekilde ele alınmış olup kompozit malzemelerin özellikleri, sınıflandırılması ve üretim yöntemleri gibi konularda temel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde çalışmada kullanılan üretim yöntemi olan toz metalürjisi yöntemi hakkında bilgiler

verilmiştir. Bu bölümde toz metalürjisinin tanımı, kullanım alanları, toz üretim teknikleri ve bu yöntemle parça üretim süreci detaylı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölüm olan materyal ve yöntemde çalışmada kullanılan malzemeler hakkında bilgilere yer verilirken üretim süreci ve karakterizasyon teknikleri detaylı olarak anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiş olup sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde Al7075-Al₂O₃, Al7075-Al₂O₃-Grafen, Al7075-ZrO₂ ve Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlere ait mikroyapı görüntüleri, yoğunluk, gözeneklilik oranı, sertlik, basma dayanımı, kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara etki eden mekanizmalar detaylı olarak açıklanmıştır. Yedinci bölümde yürütülen tez çalışması kısaca özetlenip elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmış ve ileride yapılacak çalışmalara yönelik tavsiyelere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışma kapsamında, Al-Grafen, Al-Al₂O₃ ve Al-ZrO₂ kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalara yönelik literatür araştırması yapılmış olup elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir.

2.1. Al-Grafen Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Chak ve Chattopadhyay (2020), yaptıkları çalışmada Al7075 matrise ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 oranlarında grafen takviyesi yaparak ürettikleri numunelerin mikroyapılarını, tribolojik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek çekme gerilmesi değerine ağırlıkça %0,3 takviye oranında erişilmiş olup Al7075 alaşımına kıyasla %36,9 oranında iyileşme sağlanmıştır. Ağırlıkça %0,3 takviye oranının üzerindeki değerlerde ise grafenin topaklanması sebebiyle çekme gerilmesi değerinde düşüş gözlenmiştir. Ayrıca yapılan sertlik testleri sonucunda en yüksek mikro sertlik değerlerine ağırlıkça %0,5 grafen takviyesinde ulaşılmıştır. Tribolojik özellikler incelendiğinde ise ağırlıkça %0,5 grafen takviyesi yapılmış numunelerde sürtünme katsayısı değerinde %24 azalma tespit edilmiştir (Chak ve Chattopadhyay, 2020).

Darshan vd. (2018), karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak Al7075 alüminyum matrise farklı oranlardaki (ağırlıkça %0,25, 0,5, 0,75, 1) grafen takviyesinin malzemenin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda maksimum çekme gerilmesi (329,34 MPa) ve akma gerilmesi (290,17 MPa) değerlerine ağırlıkça %1 grafen takviyesinin yapıldığı numunelerde tespit edilmiştir. Ayrıca en yüksek sertlik değeri (79,57 HB) ağırlıkça %0,5 grafen takviyesinin yapıldığı kompozitlerde elde edilmiştir. Aşınma testi sonuçlarına göre grafen takviyesinin artmasıyla aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Mikro yapı analizleri sonucunda ise ağırlıkça %0,5 grafen takviyeli numunelerdeki bazı gözenekler ve boşluklar dışında grafen dağılımının düzgün olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Darshan vd., 2018).

Khan vd. (2017), yaptıkları çalışmada saf alüminyum matrise ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında grafen takviyesinin malzemenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek sertlik (28±4 HV), basma dayanımı (82±4,5 MPa) ve eğme dayanımı (230±11 MPa)

değerlerine ağırlıkça %5 grafen takviyesinin yapıldığı numunelerde ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda saf numunelere kıyasla bu değerlerde sırasıyla %35, %433 ve %283 oranında artış tespit edilmiştir (Khan vd., 2017).

Kumar vd. (2021), yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemini kullanarak Al7075 alüminyum matrisli, ağırlıkça %0,6 oranında grafen takviyeli kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca numunelere sıcak ekstrüzyon işlemi uygulayarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çekme testi ve sertlik ölçümü sonucunda grafen takviyesinin çekme gerilmesi ve mikro sertlik değerlerinde sırasıyla %42,93 ve %43,54 oranında artış sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan mikroyapı analizinde grafenin düzgün bir şekilde dağıldığı tespit edilmiş olup bu durum ekstrüzyon işleminin yapıya zarar vermediği sonucuna bağlanmıştır (Kumar vd., 2021).

Lou vd. (2020), yaptıkları çalışmada yapısına ağırlıkça %0,5 grafen takviyesi yapılan alüminyum matrisli kompozit malzemelerde bilyalı öğütme hızı, bilyalı öğütme süresi ve ultrasonik karıştırma süresi vb. üretim parametrelerinin kompozit malzemelerin özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapı incelemeleri sonucunda ideal bilyalı öğütme süresi 6 saat, bilyalı öğütme hızı 300 devir/dakika, ultrasonik karıştırma süresi 90 dakika olarak belirlenmiştir. Çalışmada test edilen bu parametrelerin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Lou vd., 2020).

Singh (2021) yaptığı çalışmada Al2024 matrise ağırlıkça %0,5, 1, 1,5, 2, 3 ve 4 oranlarında grafen takviyesinin numunelerin mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemiştir. Karıştırmalı döküm yönteminin kullanıldığı çalışmada yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek çekme gerilmesi (245,53 MPa) ve mikro sertlik değerlerine (169,26 HV) ağırlıkça %3 takviye oranında erişilmiştir. Bu değer üstündeki takviye oranlarında ise grafenin yapı içerisinde topaklanmasından dolayı gerilme ve sertlik değerlerinde düşüş görülmüştür (Singh, 2021).

Srivastava vd. (2020), yaptıkları çalışmada Al1100 alüminyum matrise ağırlıkça %0,4, 0,8 ve 1,2 oranlarında grafen takviyesi yaparak karıştırmalı döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numuneler çekme, sertlik ve darbe testlerine tabi tutularak mekanik özelliklerindeki değişimler

incelenmiştir. Mekanik testler sonucunda en yüksek çekme gerilmesi (170,281 MPa), akma gerilmesi (155,676 MPa) ve sertlik (94 HRB) değerlerine ağırlıkça %1,2 takviye oranında erişilmiştir. Darbe testi sonuçlarına göre ise takviye oranının artmasıyla tokluk değerinin azaldığı (%32,17) sonucuna varılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde takviye fazının matris boyunca düzgün dağıldığı ancak bazı bölgelerde üretim işleminden kaynaklanan topaklanmalar olduğu tespit edilmiştir (Srivastava vd., 2020).

Şenel vd. (2018c), yaptıkları çalışmada toz metalürjisi yöntemini kullanarak ürettikleri grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde sinterleme sıcaklığındaki değişimin kompozitlerin yoğunluğuna, sertliğine ve mikroyapısına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada numuneler ağırlıkça %0,1, 0,3, ve 0,5 oranlarında grafen takviyesiyle üretilmiş olup sabit sürede 550, 600, 630°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta sinterlenmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek yoğunluk ($2,52 \text{ g/cm}^3$), sertlik değeri ($57 \pm 2 \text{ HV}$) ve en düşük gözeneklilik oranı (%6,7) ağırlıkça %0,1 grafen takviye oranında ve 630°C sinterleme sıcaklığında tespit edilmiştir. Çalışmada sinterleme sıcaklığının artması ile taneler arasındaki etkileşimin ve yoğunluğun arttığı, yapıdaki gözenekliliğin ise azaldığı sonucuna varılmıştır (Şenel vd., 2018c).

Venegopal vd. (2023), Al6061 alüminyum matrise ağırlıkça %3 ve %6 oranlarında grafen takviyesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm yönteminin kullanıldığı çalışmada en yüksek yoğunluk ($2,73 \text{ g/cm}^3$), çekme (175 MPa) ve basma dayanımı (343 MPa) değerlerine Al6061-%6Grafen kompozitlerde ulaşılmıştır (Venegopal vd., 2023).

Xia vd. (2020), ağırlıkça %0,3 grafen takviyeli Al7075 matrisli kompozitleri spark plazma sinterleme yöntemini kullanarak üretmişlerdir. Çalışma sonucunda yürütülen SEM mikroyapı incelemelerinden grafenin alüminyum matriste homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Raman spektroskopisi analizi sonucunda ise yüksek enerjili bilyalı öğütme ve sinterleme proseslerinin grafenin yapısında bozulmalara sebep olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan mekanik testler sonucunda sertlik ve elastik modül değerlerinde Al7075 alaşımına kıyasla sırasıyla %29 ve %36 oranlarında artış sağlanmıştır. Aşınma testi sonuçlarına göre ise grafen takviyesiyle aşınma oranında azalma olduğu tespit edilmiştir (Xia vd., 2020).

Zheng vd. (2021), saf alüminyum matrise ağırlıkça %5 oranında grafen takviyesi yaparak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Numune üretiminde spark plazma sinterleme ve sıcak ekstrüzyon yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada grafen takviyesinin kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Mikroyapı analizleri sonucunda grafenin homojen olarak dağıldığı ayrıca nano boyutlu tanelerin ekstrüzyonla şekillendirildiği ve boyutlarının küçüldüğü tespit edilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda ise grafen takviyesinin kompozitin akma gerilmesini %62, çekme gerilmesini %60 oranında arttırdığı tespit edilmiştir (Zheng vd., 2021).

2.2. Al-ZrO₂ Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bharti vd. (2021), yaptıkları çalışmada sürtünme karıştırma yöntemini kullanarak Al5052 alüminyum matrisli ZrO₂ takviyeli kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında farklı takım dönüş (710 ve 1400 dev/dk) ve hareket hızlarının (56 ve 80 mm/dk) malzemelerin sertlik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı dönüş ve hareket hızı kombinasyonlarıyla gerçekleştirilen deneyler sonucunda yüksek dönüş hızı ve düşük hareket hızının (1400 dev/dk, 56 mm/dk) sıcaklıkta artışa sebep olduğu ve bu artışın homojen dağılıma katkı sağladığı tespit edilmiştir. Yapılan mikro sertlik testleri sonucunda yapıya eklenen ZrO₂ takviyesinin ortalama sertlik değerini %32 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda ise ZrO₂ takviyesinin kütle kaybını azalttığı, sürtünme katsayısının artan dönme hızıyla azaldığı ve aşınma direncinin %36,8 oranında iyileştiği tespit edilmiştir (Bharti vd., 2021).

Boppana vd. (2020), yaptıkları çalışmada Al6061 matrisli ZrO₂ (ağırlıkça %1) ve grafen takviyeli (ağırlıkça %0,5 ve %0,75) hibrit kompozitlerin üretimini gerçekleştirerek mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda takviye malzemelerinin yapıda homojen bir şekilde dağıldığı ve güçlü bir arayüzey bağı oluşturduğu görülmüştür. Yapılan mekanik testler sonucunda ise çekme ve akma dayanımı değerlerinin artan grafen takviyesiyle beraber arttığı ve en yüksek değerlere (sırasıyla 250 MPa ve 182 MPa) ağırlıkça %0,75 grafen takviyesinde erişildiği tespit edilmiştir. Ayrıca değerlerdeki bu artışın yapıya eklenen sert ZrO₂ ve grafen takviyesinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Boppana vd., 2020).

Boppana vd. (2021b), karıştırılmalı döküm yöntemiyle ürettikleri Al6061 matrisli ağırlıkça %1 ZrO₂ ve ağırlıkça %1 grafen takviyeli hibrit kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda takviye elemanlarının yapıda homojen olarak dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde ise; yapıya eklenen ZrO₂ ve grafen parçacıklarının akma ve çekme dayanımında sırasıyla %48 ve %72,8'lik artış sağladığı tespit edilmiştir (Boppana vd., 2021b).

Girish ve Shobha (2018), karıştırma döküm yöntemini kullanarak ürettikleri A356.1 alüminyum matrisli nano ZrO₂ takviyeli (ağırlıkça %0,5, 1, 1,5, 2) kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan SEM analizleri sonucunda ZrO₂ partiküllerinin yapıda homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde tekrarlanan çekme ve sertlik ölçme testleri sonucunda, en yüksek çekme dayanımına 28°C sıcaklık değerinde ve ağırlıkça %2 ZrO₂ takviye oranında ulaşılırken sertlik değerinin ise artan takviye oranı ve sıcaklık değeriyle artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca sıcaklık değerindeki artışın çekme dayanımında azalmaya sebep olduğu vurgulanmıştır (Girish ve Shobha, 2018).

Gunasekaran vd. (2020), yaptıkları çalışmada Al7075 alüminyum matrise ağırlıkça %3, 6, 9 ve 12 oranlarında ZrO₂ takviyesi yaparak ürettikleri kompozit malzemelerin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapı incelemelerinde takviye malzemesinin yapıda homojen olarak dağıldığı ve gözenekliliğin minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir. Ancak takviye oranının artması ile gözeneklilik oranının da arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada yapılan mekanik testler sonucunda çekme gerilmesi ve sertlik değerlerinin ağırlıkça %6 takviye oranına kadar arttığı bu değerden sonra ise kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerin aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla yapılan aşınma testleri sonucunda takviye oranının artması ile aşınma oranının ve sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir (Gunasekaran vd., 2020).

Jamali ve Mirsalehi (2022), Al7075-T6 matrisli ZrO₂ takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde farklı takım dönüş hızı (1000 ve 1200 dev/dk) ve geçiş sayıları (1, 2 ve 3) gibi sürtünme karıştırma parametrelerinin numunelerin mikroyapılarına, mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir.

Çalışmada ilerleme hızı 40 mm/dk değerinde sabit tutulmuş olup dönme hızındaki artışın homojen dağılımı olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu durumun artan dönme hızının sebep olduğu ısı artışından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Geçiş sayısının yapıdaki topaklanmaların boyutu üzerindeki etkisinin dönme hızına bağlı olduğu vurgulanmıştır. 1000 dev/dk dönme hızında geçiş sayısının artması yapıdaki topaklanmaların ortalama boyutunu arttırırken 1200 dev/dk dönme hızında geçiş sayısının artması topaklanma boyutunu azaltmıştır. Yapılan mekanik ve tribolojik testler sonucunda yapıda bulunan sert ZrO_2 nanoparçacıklar sebebiyle sertlik değerlerinde %48 artış sağlanırken; aşınma oranı %62 oranında düşüş göstermiştir. Çalışma sonucunda ise homojen dağılım, tane boyutu, çekme dayanımı, sertlik ve aşınma özellikleri açısından optimum parametrelerin 1200 dev/dk dönme hızında ve 2 geçiş sayısında olduğu belirtilmiştir (Jamali ve Mirsalehi, 2022).

Karthik vd. (2022), karıştırma döküm yöntemini kullandıkları çalışmalarında Al5082-H321 matrise farklı oranlarda (ağırlıkça %3, 6, 9) ZrO_2 takviyesi yaparak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada farklı karıştırma hızı (300, 350 ve 400 dev/dk) ve süresi (20, 25, 30 dk) gibi döküm parametrelerinin darbe dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda maksimum darbe dayanımına (26,37 Nm) ağırlıkça %9 ZrO_2 takviye oranında erişilmiştir. Ayrıca bu değere ulaşabilmek için gerekli optimum döküm parametreleri 300 dev/dk karıştırma hızı ve 30 dakika karıştırma süresi olarak belirlenmiştir (Karthik vd., in press).

Karthikeyan vd. (2021), yaptıkları çalışmada LM6 alüminyum matrise ağırlıkça %3, 6, 9, 12 oranlarında ZrO_2 takviyesi yapılmış kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapıları, mekanik ve termal analizleri yapılmıştır. Mikroyapı analizleri sonucunda numunelerin kimyasal bileşimleri doğrulanmış ve yapıda büzülme ve gözeneklilik tespit edilmemiştir. Çalışmada yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek çekme (209 MPa) ve basma dayanımına (218 MPa) ağırlıkça %12 ZrO_2 takviyesinin yapıldığı numunelerde ulaşılmıştır. Ayrıca yapılan ısı transferi analizleri sonucunda, artan ZrO_2 takviyesiyle ısı transfer hızının kademeli olarak arttığı ve bu kompozitten üretilen kanatçıklarda verim ve etkinliğin normal alüminyum kanatçıklardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Karthikeyan vd., 2021).

Kennedy vd. (2021), yaptıkları çalışmada Al2024 matrise ağırlıkça %2, 4, 6 oranında ZrO₂ takviyesi yaparak ürettikleri kompozit malzemelerin mekanik ve korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapı analizleri sonucunda, zirkonya partiküllerinin yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ancak bazı bölgelerde zayıf ara yüzey bağı sebebiyle ZrO₂ ayrışmaları olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan sertlik testleri sonucunda, sertlik değerinin artan takviye oranıyla arttığı ve en yüksek değere ağırlıkça %6 takviye oranında ulaşıldığı tespit edilmiştir. Çalışmada %3,5 NaCl ortamında yapılan korozyon testleri sonucunda elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri incelendiğinde ZrO₂ partikül takviyesinin korozyon direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır (Kennedy vd., 2021).

Khalili vd. (2020), geliştirdikleri düşük maliyetli karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061 matrise ağırlıkça %3 ve 6 oranlarında ZrO₂ takviyesi yapılmış kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda, ağırlıkça %3 takviye oranında homojen dağılım gözlenirken, ağırlıkça %6 takviye oranında viskozite artışından kaynaklı topaklanmalar tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada nano indentasyon testi ile malzemelerin sertlik ve elastik modülleri ölçülmüş olup en yüksek değerlere ağırlıkça %3 ZrO₂ takviyesinde ulaşılmıştır. Numunelerin aşınma davranışlarını incelemek amacıyla yapılan nano çizik testi sonucunda ağırlıkça %3 takviye oranında düşük oranda malzeme kaybı ve yüksek aşınma direnci tespit edilmiştir. Ayrıca en yüksek korozyon dayanımına ağırlıkça %3 oranında ZrO₂ takviyesi yapılan numunelerde ulaşılmıştır (Khalili vd., 2020).

Kumar vd. (2019), yaptıkları çalışmada Al6061 alüminyum matrise ağırlıkça %2, 4, 6 oranlarında ZrO₂ takviyesi yaparak karıştırmalı döküm yöntemiyle ürettikleri numunelerin mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı analizlerinden takviye elemanının homojen bir dağılım gösterdiği, yapıda minimum oranda gözeneklilik bulunduğu ve arayüzey bağlanmasının iyi düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Mekanik test sonuçlarına göre çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin takviye oranının artmasıyla arttığı tespit edilmiş ve en yüksek çekme dayanımına (174,9 MPa) ve sertliğe (67,8 HB) ağırlıkça %6 ZrO₂ takviyesinde ulaşılmıştır. Ayrıca yürütülen aşınma testleri sonucunda

takviye oranının artmasıyla hacimsel aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir (Kumar vd., 2019).

Madhusudhan vd. (2017), Al7068 alüminyum matrise ağırlıkça %2, 4, 6, 8 oranlarında ZrO₂ takviyesi yaparak karıştırmalı döküm yöntemiyle ürettikleri numunelerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı analizleri sonucunda ZrO₂ parçacıklarının yapıda düzgün dağıldığı ve iyi bir arayüzey bağı kurduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek çekme dayanımı (163 MPa) ve sertlik (147,2 HV) değerlerine ağırlıkça %8 ZrO₂ takviyesinde ulaşıldığı tespit edilmiştir (Madhusudhan vd., 2017).

Martinez vd. (2015), ağırlıkça %2 ve %5 ZrO₂ takviyesi içeren Al7075 matrisli kompozitlerde kullanılan üç farklı değirmenin homojen dağılıma olan etkisini incelemişlerdir. Gezegensel, yatay atritör ve karıştırmalı bilyalı değirmenler seçilerek yapılan çalışma sonucunda yatay atritör değirmende istenilen seviyede bir dağılım sağlanamazken gezegensel bilyalı değirmende daha iyi bir dağılım sağlanmıştır. Ancak en iyi dağılım karıştırmalı bilyalı değirmende elde edilmiştir. Çalışma sonucunda değirmen tipi ve öğütme koşullarının numunelerdeki homojen dağılıma önemli oranda etki ettiği vurgulanmıştır (Martinez vd., 2015).

Nagasai vd. (2021), yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak ürettikleri ağırlıkça %3, 6, 9 oranlarında ZrO₂ içeren Al6061 alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda artan katkı oranı ile sertlik, çekme dayanımı ve akma dayanımında artış sağlandığı tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan çekme ve sertlik testleri sonucunda en iyi değerler ağırlıkça %9 ZrO₂ katkı oranında tespit edilmiş olup çekme dayanımında %14,93, akma dayanımında %22,36 ve sertlik değerinde ise %17,47'lik bir artış sağlanmıştır (Nagasai vd., 2021).

Pal vd. (2020), yaptıkları çalışmada alüminyum matrise %2, 4, 6 oranlarında ZrO₂ takviyesi yaparak ürettikleri numunelerin mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen numunelerin mikroyapı analizlerinde ZrO₂ parçacıklarının yapıda homojen olarak dağıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan sertlik testi sonucunda sertlik değerinin artan takviye oranıyla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiş olup en yüksek değere (92,7 HRB) ağırlıkça %6 takviye oranında erişilmiştir. Ayrıca

yapılan aşınma testinde ortalama aşınma değerinin ZrO_2 takviyesiyle azaldığı ve en düşük sürtünme katsayısına ağırlıkça %2 ve %6 ZrO_2 takviyelerinde erişildiği tespit edilmiştir. %3,5 NaCl içeren çözeltide yapılan korozyon testleri sonucunda ise ağırlıkça %6 ZrO_2 takviyesi yapılmış numunelerin korozyon direncinde %70'lik artış tespit edilmiş olup bu durum korozyona dirençli bir malzeme olan zirkonyanın yapıdaki varlığına bağlanmıştır (Pal vd., 2020).

Pul (2021), yaptığı çalışmada vakum infiltrasyon tekniğiyle ürettiği Al2024 matrisli farklı oranlarda (ağırlıkça %5, 10, 15, 20) ZrO_2 takviyesi içeren kompozit malzemelerin mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Yapılan mikroyapı analizlerinde yapıda homojen dağılım ve güçlü bir arayüzey bağı tespit edilmiştir. Ancak artan takviye oranının topaklanmaya sebep olduğu vurgulanmıştır. Mekanik testler sonucunda ise en yüksek yoğunluk ($\sim 3,1 \text{ g/cm}^3$) ve sertlik değerlerine (71,7 HB) ağırlıkça %20 ZrO_2 takviye oranında erişilmiştir. Farklı yük değerleri (10, 20, 40 N) altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda ise en düşük kütle kaybı ağırlıkça %20 takviye oranında ve 10 N'luk yük altında elde edilmiştir (Pul, 2021).

Rajaram vd. (2023), karıştırırmalı döküm yöntemiyle Al6063- ZrO_2 (ZrO_2 : ağırlıkça %2, 4) kompozitlerin üretimini gerçekleştirip mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Mikroyapı analizleri sonucunda, ZrO_2 partiküllerinin mikroyapı içerisinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Mekanik testler sonucunda ise en yüksek sertlik (71 HV) ve çekme dayanımına (168,38 MPa) Al6063-%4 ZrO_2 kompozitlerde erişilmiştir. 10 N yük altında gerçekleştirilen pin-on disk aşınma testleri sonucunda ise en düşük aşınma oranı Al6063-%4 ZrO_2 kompozitlerde $2,5 \times 10^{-6} \text{ mg/m}$ olarak tespit edilmiştir (Rajaram vd., 2023).

Ramanchandra vd. (2015), toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum matrisli farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2, 3, 4) ZrO_2 takviyesi içeren kompozit numunelerin üretimini gerçekleştirerek mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan SEM analizlerinde yapıda çok az miktarda topaklanma tespit edilmiş olup sinterleme işleminden sonra gözeneklilik oranının azaldığı sonucuna varılmıştır. Mekanik testler sonucunda ZrO_2 takviyesinin sertlik değerini arttırdığı ve en yüksek sertlik değerine ağırlıkça %4 takviye oranında erişildiği tespit edilmiştir. Bununla

birlikte yapılan aşınma testleri sonucunda en düşük aşınma oranına da ağırlıkça %4 takviye oranında erişilmiştir (Ramanchandra vd., 2015).

Singh vd. (2023), yaptıkları çalışmada AlMgSi alüminyum alaşımına ağırlıkça %1,47, 2,07 ZrO₂ takviyesinin kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm yönteminin kullanıldığı çalışmada ZrO₂ takviyesiyle sertlik değerinin azaldığı görülmüş olup en yüksek sertlik değerine (21,76 HB) ZrO₂ takviyesi içermeyen AlMgSi alüminyum alaşımında ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen pin-on disk aşınma testi sonucunda ise artan ZrO₂ takviyesiyle birlikte kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. En düşük kütle kaybı (14,3 mg), aşınma oranı ($0,15 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{N-m}$) ve sürtünme katsayısı ($2,41 \times 10^{-5}$) değerlerine ağırlıkça %2,07 ZrO₂ takviye oranında ulaşılmıştır (Singh vd., 2023).

Şimşek (2022), yaptığı çalışmada saf alüminyum matrise ağırlıkça %2 grafit ve %12 ZrO₂ takviyesinin kompozitlerin aşınma ve korozyon davranışları üzerine olan etkisini incelemiştir. Mekanik alaşımlama yönteminin kullanıldığı çalışmada farklı sıcaklık (oda sıcaklığı, 100, 200, 300, 400°C), yük (5, 10, 20 N) ve kayma mesafesi (53, 72, 94 m) değerlerinin aşınma dayanımına etkisi incelenmiştir. Aşınma test sonuçları incelendiğinde yük ve sıcaklık artışının kütle kaybını arttırdığı ve bu artışın 200°C'nin üzerinde hızla gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum 53 metrelik kayma mesafesine kadar devam etmiş olup ardından 94 metrelik kayma mesafesinde kütle kaybı azalmıştır. Sürtünme katsayısının ise artan kayma mesafesiyle azaldığı ancak artan yük ve sıcaklık değeriyle beraber arttığı tespit edilmiştir. NaCl ve H₂SO₄ elektrolitler kullanılarak yapılan korozyon testleri sonucunda ise kompozitlerin NaCl elektrolitte daha iyi korozyon direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca ZrO₂ takviyesinin korozyon direncini arttırdığı vurgulanmıştır (Şimşek, 2022).

2.3. Al-Al₂O₃ Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Aghajani vd. (2023), yaptıkları çalışmada Al7075 alüminyum matrise hacimce farklı oranlarda (%40, 50, 60) Al₂O₃ takviyesinin mikroyapıya ve mekanik özelliklere olan etkisini incelemiştir. Çalışmada kompozitlerde takviye oranının, karıştırma süresinin (10 dk, 5 saat) ve basma yükünün (50, 100 MPa) mekanik özelliklere olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda, en

yüksek bağıl yoğunluğa (%96,9) ve sertliğe (198,2 HV) hacimce %40 Al₂O₃ takviyesinde ve 5 saat karıştırma süresine sahip 100 MPa basınçta basılan numunelerde erişilmiştir. En yüksek basma dayanımına (652 MPa) ise 10 dakika karıştırma süresine sahip numunelerde ulaşılmıştır. Bu durumun 5 saat karıştırılan numunelerin küçük partikül boyutundan dolayı matris-takviye arasındaki bağı zayıflatmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Aghajani vd., 2023).

Al-Jaafari (2021), yaptığı çalışmada Al6066 ve Al7005 alüminyum matrislere 20, 40 ve 100 nm boyutlarında ve ağırlıkça %2 oranında Al₂O₃ takviyesi yaparak takviye partikül boyutunun mekanik özelliklere olan etkisini araştırmıştır. Yapılan sertlik ve çekme testleri sonucunda Al6066 ve Al7005 matrislerde alümina boyutunun azalmasıyla çekme dayanımlarında sırasıyla %25,65 ve %34,75 oranında, akma dayanımlarında %27,54 ve %36,98 oranında iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca partikül boyutunun azalmasıyla sertlik değerlerinde de önemli bir artış elde edilmiştir (Al-Jaafari, 2021).

Al-Salihi ve Kadhim (2020), yaptıkları çalışmada Al6061 matrisli farklı oranlarda Al₂O₃ (ağırlıkça %5, %10 ve %15) takviyesi içeren kompozitlerin mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Karıştırma döküm yönteminin kullanıldığı çalışmada yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda yapıda homojen bir dağılımın elde edildiği tespit edilmiş olup artan takviye oranının topaklanmalara sebep olduğu görülmüştür. Mekanik testler sonucunda ise en yüksek akma dayanımı (71 MPa), çekme dayanımı (158 MPa) ve sertlik (39 BHN) değerlerine ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviyesi içeren numunelerde erişilmiştir. Farklı yükler altında (20, 30, 40 N) gerçekleştirilen aşınma testlerinin sonuçları analiz edildiğinde ise sürtünme katsayısı ve aşınma oranının en düşük değerlerine ağırlıkça %10 Al₂O₃ takviyesinde ve 20 N yük altında ulaşılmıştır (Al-Salihi ve Kadhim, 2020).

Arık vd. (2017), yaptıkları çalışmada ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapıları ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelere sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Yapılan mikro yapı incelemeleri sonucunda Al₂O₃ parçacıklarının yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı ancak yeterli ara yüzey bağlanmasına sahip olmadığı görülmüştür. Ayrıca yapıdaki Al₂O₃ takviyesinin sertlik değerini saf

alüminyuma kıyasla %62 arttırdığı ve bu durumun aşınma derinliğini, aşınma katsayısını ve aşınma kuvveti değerini azalttığı tespit edilmiştir (Arık vd., 2017).

Aybarç ve Seydibeyoğlu (2021), yaptıkları çalışmada A356 alüminyum matrise ağırlıkça %0,5, 1, 1,5 oranlarında nano alümina ve ağırlıkça %0,075, 0,15, 0,25 oranlarında grafen takviyesi yaparak üretilen numunelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Mekanik testler sonucunda gözeneklilik oranının düşük olması sebebiyle %0,5 nano alümina katkısına sahip numunenin yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu ve alümina katkısının mekanik özellikleri grafen katkısından daha çok arttırdığı tespit edilmiştir (Aybarç ve Seydibeyoğlu, 2021).

Bharath vd. (2021), yaptıkları çalışmada karıştırma döküm yöntemiyle Al2014 alüminyum matrise ağırlıkça %9, 12, 15 oranlarında alümina takviyesi yaparak ürettikleri numunelerde mekanik özellikleri incelemişlerdir. Yapılan sertlik ölçme testlerinde en yüksek sertlik değerine alüminyum alaşımına göre yüzde %19,20 artışla %15 takviye oranında ulaşılmıştır. Aynı durum çekme ve akma dayanımları için de geçerli olup bu değerlerde sırasıyla %29,59 ve %29,54 oranında artış sağlanmıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise sünek kırılma gösteren alüminyum matrise alümina takviyesinin kırılma türünü gevrek kırılmaya dönüştürdüğü tespit edilmiştir (Bharath vd., 2021).

Bharti vd. (2020), yaptıkları çalışmada sürtünme karıştırma yöntemiyle üretilen Al2014 alüminyum matrisli alümina takviyeli kompozitlerin mikro sertlik ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Mikroyapı analizinde alümina partiküllerinin homojen dağıldığı, takım dönme hızındaki artışla tane boyutunda azalma yaşandığı ve yapıda topaklanma gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma tekniğinde dönme hızının arttırılması ile tanelerin küçülmesi sonucunda malzemenin mikro sertliğinde %30 iyileşme sağlanmıştır. Malzemedeki Al_2O_3 varlığı ve proses sırasındaki dönme hızının arttırılması sonucunda aşınma direncinde artış meydana gelmiştir. Çalışmada numunelerin yapısındaki Al_2O_3 varlığında ve proses parametrelerinde değişiklikler yapılarak malzemede daha iyi yüzey özelliklerinin elde edilebileceği vurgulanmıştır (Bharti vd., 2020).

Boppana vd. (2021a), yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061 alüminyum matrisli ağırlıkça %1 oranında grafen ve değişen oranlarda (ağırlıkça %5, 10, 15) Al_2O_3 takviyesi içeren numunelerin mekanik özelliklerini

incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda yapıdaki alümina takviye oranının artmasıyla çekme gerilmesi ve sertlik değerlerinde takviyesiz alüminyuma göre %62,09 ve %69,10'luk artış sağlanmıştır. Aynı zamanda takviye oranıyla birlikte akma gerilmesi değeri artarken yüzde uzama değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kırık yüzey incelemelerinden çukurlu bir kırılma yüzeyi tespit edilmiş olup takviyeli kompozitlerin transgranüler kırılmasına dikkat çekilmiştir (Boppana vd., 2021a).

Haddad vd. (2021), yaptıkları çalışmada Al2024-T351 alüminyum matrisli alümina takviyeli numunelere sürtünme karıştırma prosesi uygulamışlardır. Ayrıca çalışmada bu numunelerin mikroyapı ve tribolojik davranışlarına ısıtma işlemin etkisini incelemişlerdir. Yapılan SEM analizinde Al₂O₃ partiküllerinin matriste homojen bir şekilde dağıldığı ve düzgün bir sürtünme karıştırma bölgesi elde edildiği tespit edilmiştir. Isıtma işleminden sonra alümina partiküllerinin tane sınırlarında topraklandığı görülmüştür. Sürtünme karıştırma prosesi uygulanan bölgede ise ısıtma işleminden sonra alümina ve Al2024 alaşım elementlerinden oluşan karışık fazlar tespit edilmiştir. Yapılan aşınma testleri sonucunda; Al₂O₃ takviyeli kompozitlerde sürtünme karıştırma döngülerinin artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı ve ısıtma işlemi uygulanmayan numunelerde en düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sürtünme karıştırma prosesi uygulanmış ancak ısıtma işlemi uygulanmamış Al₂O₃ takviyeli numunelerin en yüksek aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Haddad vd., 2021).

Harish vd. (2019), yaptıkları çalışmada Al7075 matrisli alümina ve grafen takviyeli hibrit kompozitlerin mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm metoduyla üretilen numunelere ağırlıkça %1, 2, 3 oranlarında alümina ve grafen takviyesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşınma direncinin ve mekanik özelliklerin ağırlıkça %1 alümina ve %1 grafen takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerde optimum değerlerde olduğu tespit edilmiştir (Harish vd., 2019).

Karabulut vd. (2019), yaptıkları çalışmada farklı sürelerde (2, 4, 6, 10 saat) mekanik alaşımlama veya 1 saatlik karıştırma işleminin ağırlıkça %10 Al₂O₃ takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerde korozyon direncine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek yoğunluk değeri (%97,17) 1 saat karıştırma işlemi sonucunda elde edilmiş ve mekanik alaşımlama süresi arttıkça yoğunluk değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kompozit üretim süreci

tamamlandıktan sonra potansiyodinamik yöntem kullanılarak korozyon testleri yapılmıştır. Korozyon testleri sonucunda en iyi korozyon direnci 1 saat karıştırma işlemi sonucunda elde edilmiştir. Ayrıca mekanik alaşımlama süresinin artması ile korozyon dayanımının azaldığı tespit edilmiştir (Karabulut vd., 2019).

Liu vd. (2020), yaptıkları çalışmada alüminyum matrisli ağırlıkça %5 oranında Al_2O_3 takviyesi yapılmış kompozitlerde öğütme süresinin (5, 10, 15, 20 saat) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan alüminyum tozları ilk etapta eliptik ve geniş parçacık boyutuna sahipken öğütme süresinin artmasıyla daha düzgün ve küçük parçacıklar elde edilmiştir. 10 saatlik öğütmeden sonra parçacık boyutu önemli oranda azalmış ve bu değerden sonra sabit kalmıştır. 20 saatlik öğütme süresine çıkıldığında ise düzensiz faz büyük oranda azalmış ancak boyut çok değişmemiştir. Mekanik özellikler incelendiğinde ise en yüksek akma (550 MPa) ve çekme dayanımına (610 MPa) 20 saatlik öğütme süresinde erişildiği tespit edilmiştir. Çalışmada öğütme süresi değiştirilerek mikroyapı ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlanabileceği vurgulanmıştır (Liu vd., 2020).

Purohit vd. (2020), yaptıkları çalışmada Al6061 matrisli ağırlıkça %2, 2,5, 3 oranlarında Al_2O_3 takviyeli numunelerin üretimini ultrasonik prob destekli karıştırılmalı döküm yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numuneler sonrasında sıcak dövme ve T6 ısıtma işlemlerine tabi tutulmuş ve şekillendirme sonrası mekanik özellikler incelenmiştir. Isıl işlem görmüş ve görmemiş numunelere ayrı ayrı yapılan sertlik ölçme testleri sonucunda en yüksek değere sıcak şekillendirilmiş ve ısıtma işlem görmüş %3 Al_2O_3 takviyeli numunelerde erişilmiştir. Aynı şekilde en yüksek basma dayanımı değeri de (489,4901 MPa) ısıtma işlem görmüş numunelerde tespit edilmiştir. Mikroyapı analizlerinde ise ısıtma işlem uygulanmamış numunelerin uygulananlara kıyasla daha pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu, sıcak dövme sonrası matris ile takviye fazı arasında bir bağ oluştuğu ve ısıtma işleminin bu bağ güçlendirerek mekanik özellikleri iyileştirdiği belirlenmiştir (Purohit vd., 2020).

Purohit vd. (2023), ağırlıkça farklı oranlarda (%2,5, 3, 3,5, 4) Al_2O_3 içeren Al6061 matrisli kompozitleri karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen numunelere sıcak dövme ve ısıtma işlem uygulayarak kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda, en yüksek çekme dayanımı (320 MPa), basma dayanımı (487 MPa), darbe dayanımı (65 J) ve

sertlik değerlerine (67 HV) sıcak dövülmüş ve ısıtıl işlem görmüş Al6061-%3,5Al₂O₃ kompozitlerde erişilmiştir. Mikroyapı analizleri sonucunda ise, en homojen dağılımın ağırlıkça %3,5 Al₂O₃ içeren kompozitlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir (Purohit vd., 2023).

Reddy vd. (2019), yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al7075 alüminyum matrisli ağırlıkça %2, 4, 6 oranlarında grafen ve alümina takviyeli hibrit kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı analizleri sonucunda takviye elemanlarının matris içerisinde düzgün bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Yapılan mekanik testler sonucunda ise en yüksek çekme mukavemeti (143,66 MPa), basma mukavemeti (280,75 MPa) ve sertlik (199 HB) değerleri ağırlıkça %6 (%3 grafen+%3 alümina) oranında takviye içeren numunelerde tespit edilmiştir (Reddy vd., 2019).

Şenel ve Gürbüz (2020b), yaptıkları çalışmada ağırlıkça %0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 alümina katkısının alüminyum matrisli kompozitlerdeki etkisini incelemişlerdir. Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen numunelerde soğuk deformasyonun etkisini incelemek amacıyla farklı basma gerilmeleri altında presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek yoğunluk ve en düşük gözeneklilik oranı %2 alümina katkısında elde edilmiştir. Numunelerde en uygun soğuk şekil değiştirme oranının %11,8 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerden yüksek şekil değiştirme oranlarının mekanik özelliklerde düşüşe sebep olduğu sonucuna varılmıştır (Şenel ve Gürbüz, 2020b).

Tiku vd. (2020), toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş alüminyum matrisli ağırlıkça %1, 2, 3, 4 oranlarında Al₂O₃ takviyesi içeren kompozit malzemelerin korozyon davranışlarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan Rockwell sertlik ölçme testleri sonucunda takviye oranındaki artışın sertlik değerini de arttırdığı ve en yüksek sertlik değerine (105,6 HRB) ağırlıkça %4 takviye oranında ulaşıldığı tespit edilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre artan Al₂O₃ takviyesiyle birlikte aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısı ağırlıkça %2 takviye oranına kadar artarken bu değerden sonra düşüşe geçmiş ve en düşük sürtünme katsayısına (0,45) ağırlıkça %4 takviye oranında erişilmiştir (Tiku vd., 2020).

Zaiemyekheh vd. (2021), toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş saf alüminyum matrisli farklı oranlarda nano Al_2O_3 (ağırlıkça %2,5, 5, 7,5, 10) içeren kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek sertlik ve akma dayanımı değerlerine ağırlıkça %5 Al_2O_3 takviyesinde ulaşılmıştır. Farklı yükler (10, 15, 20 N) ve kayma hızları (1,5, 2 m/s) altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda artan yük değerinin sürtünme katsayısını ve kütle kaybını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek kayma hızında kütle kaybının daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Zaiemyekheh vd., 2021).

Zamani vd. (2020), yaptıkları çalışmada alüminyum matrisli ağırlıkça %10, 15, 20 oranlarında Al_2O_3 takviyesi içeren kompozitlerin üretimini toz metalürjisi yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Yürütülen mikroyapı incelemeleri sonucunda takviye fazın matris yapıda homojen dağıldığı ve matris ile takviye fazları arasında güçlü bir bağ kuvvetinin olduğu tespit edilmiştir. Yapılan yoğunluk ölçümleri sonucunda, numunelerin yüksek yoğunluğa sahip takviye elemanı içermesi sebebiyle yoğunluk değerinin artan takviye oranıyla arttığı ve bu değerlerin sinterleme sonrası %7 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan mekanik testler sonucunda en yüksek çekme dayanımı, akma dayanımı, basma dayanımı ve sertlik değerlerine ağırlıkça %20 oranında Al_2O_3 içeren numunelerde ulaşılmıştır. Darbe testi sonuçlarına göre ise takviye oranındaki artışın darbe enerjisinde azalmaya sebep olduğu tespit edilmiş olup bu durumun yapıdaki seramik partiküllerin düşük darbe enerjisinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Zamani vd., 2020).

Hasan vd. (2019), çalışmalarında Al7100 alüminyum matrise ağırlıkça %6 Al_2O_3 takviyesinin kompozitlerin mikroyapısı, elektriksel özellikleri ve aşınma direnci üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm yönteminin kullanıldığı çalışmada, kompozitlerin mikroyapısı incelendiğinde takviye elemanlarının homojen dağılım gösterdiği ve yapıda düşük topaklanmalara rastlandığı belirtilmiştir. 20 N yük altında gerçekleştirilen pin-on-disk aşınma testleri sonucunda ise Al_2O_3 takviyesiyle aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun ana sebebinin mikroyapı içerisine ilave edilen yüksek sertliğe sahip Al_2O_3 partikülleri olduğu vurgulanmıştır (Hasan vd., 2019).

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda Al-grafen, Al- Al_2O_3 ve Al- ZrO_2 kompozit malzemelerin üretimine yönelik birçok çalışmaya rastlanılmıştır. Literatürdeki mevcut çalışmaların detaylı olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla Tablo

2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4 oluşturulmuştur. Tablolarda verilen çalışmalar sertlik, çekme/basma ve akma dayanımı açısından birbiriyle karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Tablo 2.1’de grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar ve elde edilen test sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyum matrisli grafen takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar

Referans	Üretim Yöntemi	Üretilen Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme/Basma Dayanımı (MPa)	Sertlik
Darshan vd. (2018)	Karıştırmalı Döküm	Al7075-%0,25Grafen	237,9	270,14	77,86 HB
		Al7075-%0,5 Grafen	287,14	310,14	79,57 HB
		Al7075-%0,75Grafen	280,11	317,47	74,07 HB
		Al7075-%1Grafen	290,17	329,34	71,03 HB
Kumar vd. (2021)	Toz Metalurjisi + Sıcak Ekstrüzyon	Al7075	-	325	-
		Al7075-%0,6Grafen	-	457	-
Singh (2021)	Karıştırmalı Döküm	Al2024	-	187,14	138 HV
		Al2024-%0,5Grafen	-	193,5	142 HV
		Al2024-%1Grafen	-	205,12	148 HV
		Al2024-%1,5Grafen	-	212,31	153 HV
		Al2024-%2Grafen	-	226,85	158 HV
		Al2024-%3Grafen	-	245,53	169,26 HV
Natravan vd. (2019)	Karıştırmalı Döküm	Al8030	-	120	107 HV
		Al8030-%5Grafen	-	155	120 HV
		Al8030-%10Grafen	-	182	131 HV
		Al8030-%15Grafen	-	166	126 HV
		Al8030-%20Grafen	-	159	123 HV
Subbaiah vd. (2019)	Karıştırmalı Döküm	Saf Al	-	77,1	25 HV
		Al-%0,5Grafen	-	88,39	56,08 HV
		Al-%1Grafen	-	84,85	43,58 HV
		Al-%1,5Grafen	-	77,1	38,12 HV
Palampalle vd. (2018)	Karıştırmalı Döküm	Al-%2Grafen	-	65,15	34,7 HV
		Saf Al	-	77,1	26 HV
		Al-%2,5Grafen	-	119,92	44 HV
		Al-%3Grafen	-	119,98	56,08 HV
		Al-%3,5Grafen	-	95,29	41 HV
Khan vd. (2017)	Toz Metalürjisi	Al-%4Grafen	-	89,85	47 HV
		Al-%4,5Grafen	-	114,98	47,5 HV
		Saf Al	-	15±5	22±3 HV
		Al-%1Grafen	-	38±3	25±2 HV
Xia vd. (2020)	Spark Plazma Sinterleme	Al-%3Grafen	-	61±5	27±3 HV
		Al-%5Grafen	-	82±4,5	28±4 HV
		Al7075	-	-	98 HV
		Al7075-%0,3Grafen	-	-	124,9 HV

Tablo 2.2’de zirkonya takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar ve elde edilen test sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.2. Alüminyum matrisli zirkonya takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar

Referans	Üretim Yöntemi	Üretilen Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik
Boppa vd. (2020)	Karıştırmalı döküm	Al6061	128	180	-
		Al6061-%1ZrO ₂ -%0,5Grafen	160	225	
		Al6061-%1ZrO ₂ -%0,75Grafen	182	250	
Boppa vd. (2021b)	Karıştırmalı döküm	Al6061	55 81,4	125	-
		Al6061-%1ZrO ₂ -%1Grafen		216	
Patoliya ve Sharma (2015)	Karıştırmalı döküm	Al6061	-	141	20 HB
		Al6061-%2,5ZrO ₂		150	22 HB
		Al6061-%5ZrO ₂		153	24 HB
		Al6061-%7,5ZrO ₂		156,5	26 HB
Rao vd. (2015)	Karıştırmalı döküm	Al356.2-%10ZrO ₂	-	78,5	150 HB
		Al356.2-%15ZrO ₂		160	161 HB
		Al356.2-%20ZrO ₂		120	145 HB
Pandiyarajan vd. (2017)	Karıştırmalı döküm	Al6061	-	128	30 HRC
		Al6061-%2ZrO ₂		139	33 HRC
		Al6061-%4ZrO ₂		158	35 HRC
		Al6061-%6ZrO ₂		168	38 HRC
		Al6061-%8ZrO ₂		151	41 HRC
		Al6061-%10ZrO ₂		145	45 HRC
Kumar vd. (2019)	Karıştırmalı döküm	Al6061	-	92,14	40,8 HB
		Al6061-%2ZrO ₂		121,3	61,5 HB
		Al6061-%4ZrO ₂		148,1	64,6 HB
		Al6061-%6ZrO ₂		174,9	67,8 HB
Harsha vd. (2020)	Karıştırmalı döküm	A356	189,1	236,7	71,33 HB
		A356-%2,5ZrO ₂	250,56	299,2	84,11 HB
		A356-%5ZrO ₂	266	331	87,63 HB
Roseline vd. (2018)	Karıştırmalı döküm	Al6061	-	220	60 HV
		Al6061-%5ZrO ₂		176	69 HV
		Al6061-%10ZrO ₂		185	72 HV
		Al6061-%15ZrO ₂		198	75 HV
Vignesh vd. (2021)	Karıştırmalı döküm	Al7050	-	69	78 HV
		Al7050-%4ZrO ₂		113	82 HV
		Al7050-%8ZrO ₂		180	89 HV
		Al7050-%12ZrO ₂		220	95 HV
Madhusudhan vd. (2016)	Karıştırmalı döküm	Al7068	-	142	93,5 HV
		Al7068-%2ZrO ₂		148	96,3 HV
		Al7068-%4ZrO ₂		153	104,6 HV
		Al7068-%6ZrO ₂		158	126,8 HV
		Al7068-%8ZrO ₂		163	147,2 HV

Tablo 2.3’de alüminyum matrisli alümina takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesine yönelik literatürde yer alan çalışmalar ve elde edilen test sonuçları sunulmuştur.

Tablo 2.3. Alüminyum matrisli alümina takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenildiği çalışmalar

Referans	Üretim Yöntemi	Üretilen Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme/Basma Dayanımı (MPa)	Sertlik
Salihi ve Judran (2020)	Karıştırmalı Döküm	Al6061	52	122	28 HB
		Al6061-%5 Al ₂ O ₃	62	137	33 HB
		Al6061-%10 Al ₂ O ₃	69	158	38 HB
		Al6061-%15 Al ₂ O ₃	71	154	39 HB
Zamani vd. (2020)	Toz Metalürjisi	Saf Al	79	149	38 HV
		Al-%10 Al ₂ O ₃	98	160	43 HV
		Al-%15 Al ₂ O ₃	117	220	52 HV
		Al-%20 Al ₂ O ₃	130	240	58 HV
Dange ve Jayakumar (2018)	Karıştırmalı Döküm	Al6082	131,26	220,94	74,77 HB
		Al6082-%10Al ₂ O ₃	139,69	241,71	79 HB
		Al6082-%15Al ₂ O ₃	148,55	248,43	81 HB
		Al6082-%20Al ₂ O ₃	157,04	265,41	87,67 HB
Bharath vd. (2014)	Karıştırmalı Döküm	Al6061	138,06	149,76	94 HV
		Al6061-%6Al ₂ O ₃	145,51	167,93	105 HV
		Al6061-%9Al ₂ O ₃	155,94	173,61	150 HV
		Al6061-%12Al ₂ O ₃	178,91	193,47	182 HV
Shrivastva vd. (2022)	Toz Metalürjisi	Al7075	-	101	64,30 HV
		Al7075-%0,5Al ₂ O ₃	-	142	76,43 HV
		Al7075-%1,5Al ₂ O ₃	-	174	84,23 HV
		Al7075-%2Al ₂ O ₃	-	246	90,73 HV
		Al7075-%2,5Al ₂ O ₃	-	203	90,13 HV
Muraliraja vd. (2018)	Sıkıştırılmalı Döküm	Al7075	-	357	44,5 HB
		Al7075-%2,5Al ₂ O ₃	-	587	58 HB
Hallem vd. (2018)	Karıştırmalı Döküm	Al	-	100	38 HB
		Al-%2Al ₂ O ₃	-	180	57 HB
		Al-%4Al ₂ O ₃	-	220	73 HB
		Al-%6Al ₂ O ₃	-	240	86 HB
		Al-%8Al ₂ O ₃	-	250	98 HB

Tablo 2.4'te literatürde yer alan alüminyum matrisli grafen, alümina ve zirkonya takviyeli kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği bazı çalışmalara ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2.4. Alüminyum matrisli grafen, alümina ve zirkonya takviyeli kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalar

Referans	Üretilen Malzeme	Yük	Kayma mesafesi	Aşındırıcı malzeme	Aşınma oranı	Sürtünme katsayısı
Baradeswaran vd. (2013)	Al7075	10 N	1200 m	Paslanmaz çelik (62 HRC)	-	0,73
	Al7075-%2Al ₂ O ₃	20 N			0,012 mg/m	0,61
	Al7075-%4Al ₂ O ₃	30 N			0,010 mg/m	0,56
	Al7075-%6Al ₂ O ₃	40 N			0,008 mg/m	0,43
	Al7075-%8Al ₂ O ₃				0,009 mg/m	0,63
Pournaderi ve Akhlaghi (2017)	Al6061	20 N	1000 m	Paslanmaz çelik (64 HRC)	-	1,1
	Al6061-%15Al ₂ O ₃					0,58
	Al6061-%20Al ₂ O ₃					0,7
	Al6061-%25Al ₂ O ₃					0,68
Xia vd. (2020)	Al6061-%30Al ₂ O ₃					0,65
	Al7075	10 N		GCr15 paslanmaz çelik	0,0035 mm ³ /Nm	0,79
Pal vd. (2020)	Al7075-%0,3Grafen				0,0027 mm ³ /Nm	0,18
	Al	30 N			192,02 µm	0,53
	Al-%2ZrO ₂				174,07 µm	0,45
	Al-%4ZrO ₂				148,34 µm	0,53
	Al-%6ZrO ₂				69,30 µm	0,45
Kumar vd. (2016)	A356.1	10 N			47,7x10 ⁻⁶ g/m	-
	A356.1-%2ZrO ₂	20 N			28,5x10 ⁻⁶ g/m	
	A356.1-%2,5ZrO ₂	30 N			19,2x10 ⁻⁶ g/m	
	A356.1-%3ZrO ₂	40 N			9,8x10 ⁻⁶ g/m	
	A356.1-%3,5ZrO ₂	50 N			9,2x10 ⁻⁶ g/m	
Kavitha ve Prakash (2021)	Al6081-%2ZrO ₂	20 N	700-2100 m	EN 32 çelik disk	0,0046 mm ³ /m	-
	Al6081-%4ZrO ₂	30 N			0,0054 mm ³ /m	
	Al6081-%6ZrO ₂	40 N			0,0051 mm ³ /m	

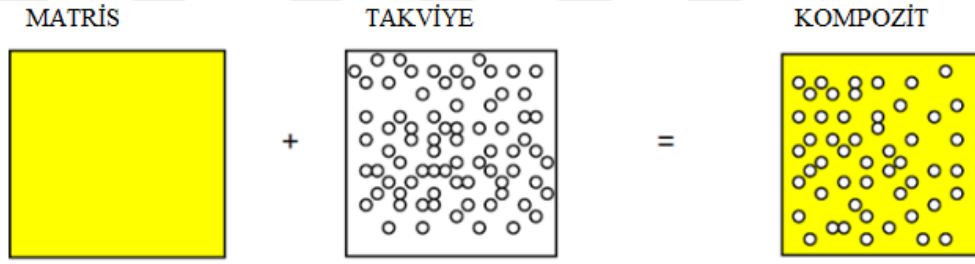
3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Genel Bilgiler

Günümüzde her gün daha da gelişen teknoloji karşısında geleneksel malzemeler sektörlerdeki malzeme gereksinimlerini karşılama konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanması amacıyla üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin üretilmesi zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle geleneksel malzemelerden daha üstün özelliklere sahip olan kompozit malzemeler üretilmeye ve birçok sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler, birbiri içinde çözünmeyen en az iki farklı malzemenin en iyi özelliklerinin bir malzemedeki toplanması amacıyla makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir (Şahin, 2015; Kelez, 2021; Kırsasöz, 2018).

İlk örneklerine antik çağlarda rastlansa da modern kompozit malzemelerin gelişimi 1930'lu yıllarda cam elyafın bulunmasıyla başlamıştır. Kompozit malzemelerin İkinci Dünya Savaşı sırasında üretilen araçların yapısal parçalarında kullanılması bu alandaki çalışmaları arttırmıştır. Bunun sonucu olarak da kompozit malzemeler birçok uçak parçasında kullanılmaya başlanmıştır. 1950'li yıllara gelindiğinde kompozit malzemeleri üretmek amacıyla yeni üretim yöntemleri denenmeye başlanmıştır. Aynı zamanda bu yıllarda yaşanan uzaya çıkma yarışı kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmaları hızlandırmıştır. 1961 yılında karbon elyaf üretiminin yapılmasıyla kompozit malzemelerin popülerliği artmaya başlamıştır. Daha sonra 1965 yılında bor fiberin, 1971 yılında aramid fiberin ve polietilen fiberin bulunmasıyla kompozit malzemelerin kullanım alanları genişlemiş ve gelişimi hız kazanmıştır. Ancak bu dönemde kompozit malzeme üretiminin zor ve maliyetli olması sebebiyle uygulamalar sınırlı kalmıştır. Metal ve seramik matrisli kompozitlerin de üretiminin başladığı bu yıllardan sonra yapılan araştırmalarla kompozit üretim maliyeti azaltılmaya başlanmıştır. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise hibrit kompozitler ve nanokompozitlerin üretilmeye başlanmasıyla kompozit malzemeler için yeni bir çağ başlamıştır. Bu dönemde üretim maliyetlerinin düşmesiyle kompozitlerin kullanım alanları genişlemiş ve günlük hayatımızda kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde ise birçok sektörde tercih edilen kompozit malzemeler gelişimini sürdürmeye devam etmektedir (ASM Handbook Committee, 2001; Sönmez, 2009).

Kompozit malzemeler temelde matris ve takviye fazı olmak üzere iki bileşenden oluşur. Bu yapılardan matris fazı, takviye fazını sararak sürekliliği sağlayıp yapıyı korur. Bunun için malzemeye uygulanan kuvveti takviye fazına ileterek homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Aynı zamanda matris fazı çatlak ilerlemelerini engellemede etkin rol oynamaktadır. Takviye faz ise yapıda malzemenin dayanımını arttırmak için kullanılır. Matris fazından iletilen kuvveti taşıyarak malzemeyi güçlendirir. Bunun gerçekleşebilmesi matris ve takviye fazı arasındaki uyuma ve bağlanma kuvvetine bağlıdır. Bu iki yapı arasında yer alan ve matristeki kuvveti takviye fazına ileten arayüzey bağının kuvveti malzemenin dayanıklılığını etkiler. Düşük ara yüzey bağına sahip yapılarda matris sürekliliğini koruyamaz ve malzemenin dayanımında azalma meydana gelir. Şekil 3.1’de kompozit malzemelerdeki matris ve takviye fazları şematik olarak gösterilmiştir. (Kelez, 2021; Kaya, 2016).



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerde matris ve takviye fazları (Erdil, 2020)

Kompozit malzeme üretimindeki temel amaçlardan biri farklı malzemeleri bir araya getirerek daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretmektir. Bu malzemeleri diğer malzemelere göre üstün kılan özellikler:

- Yüksek özgül dayanım (çekme dayanımı/yoğunluk) ve özgül elastisite modülü (elastik modül/yoğunluk),
- Yüksek yorulma ve sürünme dayanımı,
- Yüksek aşınma ve korozyon dayanımı,
- Elektrik ve ısı iletkenliği,
- Düşük ağırlık,
- Kolay şekillendirilme ve kaplama,
- Estetik görünüm,
- Ses yutuculuğu, ses tutuculuğu ve akustik iletkenlik

şeklinde sıralanabilir (Ercan, 2006; Kısasöz 2018; Dengiz, 2018).

Kompozit malzemelerin sektörde tercih edilmesine sebep olan üstün özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Pahalı hammadde,
- Zorlu üretim süreci,
- Anizotropik özellikleri sebebiyle farklı doğrultularda farklı özelliklere sahip olmaları,
- Onarım güçlüğü,
- Üretim sonrası işlemenin zor olması,
- Düşük yüzey kalitesi ve süneklik,
- Geri dönüşüm yapılamaması

şeklinde sıralanabilir (Dengiz, 2018; Kısasöz, 2018).

Kompozit malzemeler birtakım dezavantajlara sahip olsalar da birçok malzemeden daha iyi özellikler sergilediklerinden çeşitli sektörlerde tercih edilirler. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi özellikle savunma sanayi, havacılık ve uzay, inşaat, otomotiv, sağlık, spor, denizcilik, elektrik-elektronik, kimya gibi birçok sektör için kompozit malzemeler vazgeçilmez konumdadır (Şenel, 2018a).



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin farklı sektörlerdeki uygulama örnekleri (Erdil, 2020)

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması çok farklı şekillerde yapılabilmektedir. Ancak literatürde en çok kabul gören ve kullanılan şekli matris ve takviye malzemesine göre yapılan sınıflandırmadır. Matris malzemenin türü, takviye malzemenin türü ve şekli kullanılarak kompozit malzemeler isimlendirilmektedir (Şahin, 2015).

3.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Matris malzemesinin türü baz alınarak yapılan bu sınıflandırmada kompozitler polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler olarak üçe ayrılır.

3.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, matris malzemesi olarak polimerin kullanıldığı en yaygın kullanım alanına sahip kompozit türüdür. Polimer matrisli kompozitler, kolay üretim ve şekillendirme, düşük hammadde maliyeti, elektriksel ve ısı yalıtkanlık, hafiflik, yüksek korozyon ve aşınma direnci gibi avantajlara sahiptir. Ancak polimer matrisli kompozitlerin kullanım sıcaklığının düşük olması uygulama alanlarını daraltmaktadır (Pıçak, 2015).

Polimer matrisli kompozitler temelde termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak üçe ayrılırlar. Termoplastik malzemeler birbirine zayıf Van der Waals bağları ve mekanik kilitlemelerle bağlı uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşur. Bu zayıf bağlar sebebiyle termoplastikler kolayca eritilebilir ve soğuyunca tekrar katı bir form alabilirler. Termoset malzemelerde bulunan hidrokarbon zincirleri birbirine kovalent bağlarla bağlıdır. Bundan dolayı termoplastik malzemelerden daha dayanıklı ve rijittirler. Termosetlerin yapılarında bulunan kuvvetli bağlar tekrar şekillendirilmelerini engeller. Elastomerler ise herhangi bir kopma yaşamadan başlangıç boyunun yaklaşık 10 katına kadar uzayabilen ve kuvvet etkisini yitirdiğinde ilk haline dönebilen malzemelerdir (Kelez, 2021; Pıçak, 2015).

3.2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, matris malzemesi olarak alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si_3N_4), bor karbür (B_4C), zirkonya (ZrO_2) gibi seramiklerin kullanıldığı malzemelerdir. Seramik matrisli kompozitlerin termal

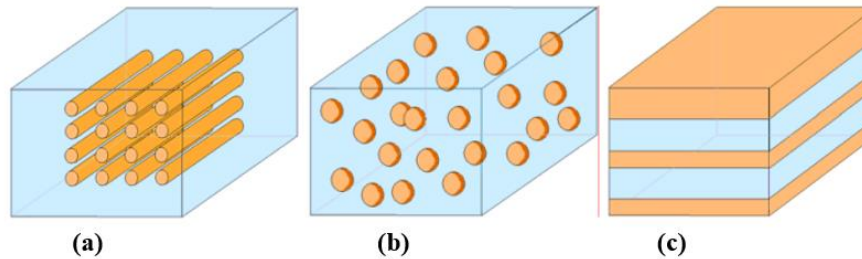
dayanımları, aşınma dayanımları, korozyon dayanımları ve kimyasallara karşı dayanımları oldukça yüksektir. Seramik matrisli kompozitlerin özellikle termal dayanımlarının yüksek olması yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun malzemeler olmalarını sağlamaktadır. Seramik matrisli kompozitler sahip oldukları özellikler sebebiyle zırhlı araçlar, savaş uçakları, ısıtım fırınları, türbin motorları başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak sert ve kırılgan bir yapı göstermeleri ve ısıtım şoklarına karşı dayanımlarının az olması uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. Ayrıca malzemenin bu kırılgan yapısı üretimini ve işlenmesini de zorlaştırmaktadır (Baydemir, 2018; Şenel, 2018a; Kelez, 2021).

3.2.1.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, matris malzemesi olarak metal veya metal alaşımları kullanılan kompozit malzemelerdir. Bu kompozitlerde matris malzemesi olarak magnezyum, bakır, alüminyum, titanyum gibi metaller ve alaşımları kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemeler Bölüm 3.3'te detaylı olarak ele alınmıştır (Kelez, 2021).

3.2.2. Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler

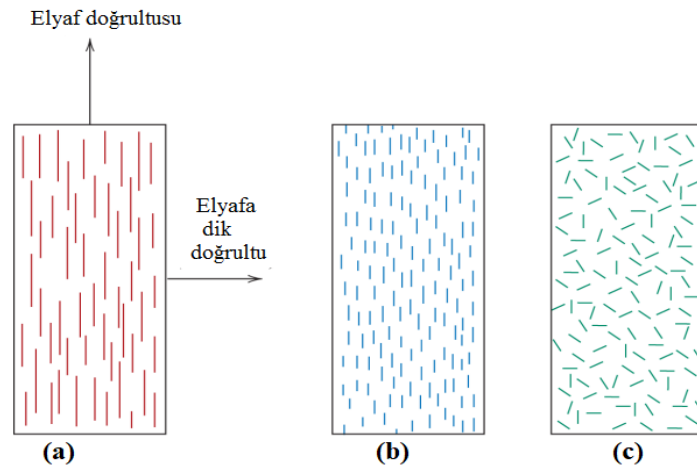
Takviye malzemesi yapıya mukavemet artışı sağlamak amacıyla eklenen ve kompozitlerde yük taşıyıcı olarak görev yapan fazdır. Kompozitlerde seçilen takviye elemanının matris ile uyumlu olması gerekmektedir. Matrise uygun seçilen bir takviye elemanı ile üstün özelliklere sahip kompozitlerin üretimi mümkün olmaktadır. Kullanılan takviye elemanları farklı tür veya şekillerde olabilmektedir. Bu yüzden takviye elemanları kompozitleri sınıflandırmada kullanılan bir ölçüttür. Kompozit malzemeler takviye elemanına göre elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve karma (hibrit) kompozitler olmak üzere dörde ayrılır (Şekil 3.3) (Callister ve Rethwisch, 2015).



Şekil 3.3. Takviye malzemesine göre kompozitler: elyaf takviyeli (a), parçacık takviyeli (b) ve tabakalı kompozitler (c) (Dokur, 2009)

3.2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Takviye fazının elyaf şeklinde olduğu elyaf takviyeli kompozitlerde amaç yüksek özgül dayanıma ve yüksek özgül modüle sahip kompozit malzemeler üretmektir. Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan elyafın şekli, kalınlığı, uzunluğu, matristeki yönlenmesi ve yoğunluğu gibi parametreler malzemenin özelliklerine etki etmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde mukavemette belirgin bir artış sağlanabilmesi için elyaf boyunun belirli bir kritik değerin üzerinde olması gerekmektedir. Bu kritik boydan daha uzun olan elyaflar sürekli elyaf, daha kısa olanlar ise süreksiz (kısa) elyaf olarak isimlendirilmektedir. Ayrıca bu elyafların matris faz içerisinde yönlenmesi de önemli konulardan biridir. Elyaf lar genellikle matris içerisinde sadece çekme doğrultusunda ya da rastgele olarak yönlenme gösterirler. Özellikle sürekli elyafların kuvvet doğrultusunda yönlenme göstermesinden dolayı malzeme anizotropik özelliğe sahip olur. Bu durumda kompozitler uygulanan kuvvet yönünde yüksek mekanik özellikler gösterirken yönlenmeye dik olan yönde düşük değerlere sahip olurlar. Süreksiz elyaflar ise Şekil 3.4’de gösterildiği gibi hem yönlenmiş hem de rastgele dağılım gösterebilirler (Callister ve Rethwisch, 2015; Kısasöz, 2018).



Şekil 3.4. Elyaf takviyeli kompozitler: sürekli ve kuvvet doğrultusunda yönlenmiş (a), süreksiz ve kuvvet doğrultusunda yönlenmiş (b), süreksiz ve rastgele yönlenmiş (c) (Callister ve Rethwisch, 2015)

3.2.2.2. Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler, yüksek mukavemete sahip partiküllerin matris içerisinde dağıtılmasıyla elde edilen malzemelerdir. Bu tür kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri genellikle yüksek sertlik değerine sahip olmaları sebebiyle

aşınma dayanımları yüksektir. Ayrıca elyaf takviyeli kompozitlerin aksine izotropik özellik gösteren parçacık takviyeli kompozitler, haddeleme, ekstrüzyon ve dövme gibi ikincil işlemler ile kolayca şekillendirilebilmeleri ve düşük hammadde maliyetleri sebebiyle tercih edilmektedirler. Parçacık takviyeli kompozitlerde takviye fazı olarak genellikle bor karbür (B_4C), alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si_3N_4), titanyum diborür (TiB_2) gibi seramik esaslı malzemeler kullanılmaktadır (Kösedağ ve Ekici, 2019).

3.2.2.3. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler, farklı tabaka ve katmanların üst üste dizilip birleştirilmesiyle elde edilen yapıların matrise eklenmesiyle oluşan malzemelerdir. Tabakalı kompozit üretiminde birçok farklı malzeme kullanılarak üretim yapılabilmektedir. Ancak buradaki en önemli unsur kullanılan malzemelerin birbirinin özelliklerini olumlu yönde etkilemesidir. Tabakalı kompozitlerde her katman farklı fiber yönlemesine sahip olabildiğinden yüksek mukavemet değerlerine erişilebilmektedir. Tabakalı kompozitler, ısı ve neme dayanıklılık, hafiflik, eğilmeye karşı dayanım, aşınma direnci ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptirler (Şahin, 2015).

3.2.2.4. Karma (hibrit) kompozitler

Hibrit kompozitler olarak da bilinen karma kompozitler aynı matriste iki veya daha fazla takviyenin bulunmasıyla oluşan malzemelerdir. Bu tür kompozitler takviye olarak kullanılan her malzemenin özelliklerini yapısında toplamaktadırlar. Bundan dolayı yapısında sadece tek takviye elemanı bulunduran kompozitlerden çok daha üstün özelliklere sahiptirler (Kısasöz, 2018).

3.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, matris malzemesi olarak metal veya metal alaşımlarının kullanıldığı malzemelerdir. Bu tür kompozitlerde takviye malzemesi olarak seramik veya refrakter malzemeler tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitler özellikle polimer matrisli kompozitlere ve takviyesiz malzemelere göre daha üstün özellikler gösterdiklerinden geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Şenel, 2018a). Bu özellikler;

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek mukavemet,

- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Yüksek sürünme direnci,
- Yüksek aşınma direnci,
- Yüksek korozyon direnci,
- Yüksek tokluk,
- Yüksek elastisite modülü

şeklinde sıralanabilir (Kalemtaş, 2014).

Metal matrisli kompozitler sahip oldukları üstün özellikler sayesinde endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler özellikle otomotiv, havacılık ve uzay, spor ve elektronik sektörlerinde öne çıkmaktadırlar. Metal matrisli kompozitlerin otomotiv sektöründeki uygulamaları arasında fren ve motor parçaları, süspansiyon, aktarma organları gibi parçalar yer almaktadır. Havacılık sektöründe ise özellikle iniş takımlarında, yüksek sıcaklıklara maruz kalan motor parçalarında, uçakların kanat ve gövde parçalarında kullanılmaktadırlar. Ayrıca metal matrisli kompozitler sahip oldukları yüksek elektrik iletkenlik özelliği sayesinde elektronik sektöründe de yer edinmişlerdir. Özellikle yüksek voltajlı elektrik kabloları, entegre devreler gibi uygulamalarda öne çıkmaktadırlar. Spor sektöründe ise tenis racketleri, golf sopaları ve bisiklet parçaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Miracle, 2005; Mindivan, 2007).

3.3.1. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi kompozitlerin özelliklerinde etkin rol oynamaktadır. Bundan dolayı matris malzeme seçimi önemli bir konudur. Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesinin düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek tokluk gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bu özellikleri sağlayan, titanyum (Ti), magnezyum (Mg), bakır (Cu), alüminyum (Al), nikel (Ni), çinko (Zn), demir (Fe), silisyum (Si), kalay (Sn), kurşun (Pb) gibi metaller matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Özellikle titanyum, alüminyum, magnezyum ve bu metallerin alaşımları matris malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kayabaşı, 2016; Şahin, 2015).

3.3.1.1. Titanyum ve alaşımları

Yoğunluğu $4,54 \text{ g/cm}^3$ olan titanyum, 1670°C ile en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan hafif metaldir. Titanyum yüzeyinde bulunan oksit tabakası sayesinde

yüksek korozyon direncine sahiptir. Yüksek çekme dayanımı, yüksek özgül dayanım, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri sayesinde dikkat çeken titanyum özellikle havacılık ve biyomedikal uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak işlenmesinin zor olması ve yüksek sıcaklıkta gösterdiği kimyasal reaktiflik nedeniyle özel üretim yöntemleri gerektirmektedir. Bu durum maliyetinin yükselmesine neden olur. Titanyum alaşımları, mikroyapısında bulunan fazlara göre alfa, beta ve alfa+beta alaşımları olarak sınıflandırılır. Alfa alaşımları üstün sürünme dayanımına sahipken soğuk şekillendirme kabiliyeti düşüktür. Beta alaşımları yüksek mukavemet ve dövülebilme özelliğine sahiptir. Alfa+beta alaşımları ise yüksek süneklik ve dayanım özellikleri gösterirler (Callister ve Rethwisch, 2015; Gavas vd., 2015).

3.3.1.2. Magnezyum ve alaşımları

Magnezyum sahip olduğu düşük yoğunluk değeriyle ($1,74 \text{ g/cm}^3$) birçok metalden daha hafiftir. Bundan dolayı özellikle hafif konstrüksiyonlarda oldukça sık tercih edilmektedir. Magnezyum, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, yüksek termal iletkenlik, yüksek sönümlenme, boyutsal kararlılık, talaşlı imalatla iyi işlenebilme gibi özellikleri sebebiyle savunma sanayi başta olmak üzere otomotiv, havacılık ve elektronik alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca sınırlı da olsa biyomalzeme olarak kullanımı mevcuttur. Ancak düşük sürünme direnci, düşük elastisite modülü, düşük yorulma dayanımı ve kimyasal reaksiyona girme yatkınlığından dolayı kullanım alanları kısıtlıdır. Bu dezavantajların azaltılması amacıyla magnezyum yapısına eklenen alüminyum, çinko, mangan, zirkonyum gibi elementler ile alaşımlar oluşturulmaktadır. Bu elementlerin yapıya eklenmesiyle mekanik özelliklerde iyileşme sağlanabilmektedir (Öztürk ve Kaçar, 2012; Kelez, 2021).

3.3.1.3. Alüminyum ve alaşımları

Alüminyum sahip olduğu mekanik özellikler nedeniyle demir esaslı malzemelerden sonra en çok tercih edilen metaldir. $2,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğuyla birçok metalden daha hafiftir. YMK (Yüzey merkezli kübik) kristal yapıya sahip olan alüminyum, üst düzeyde süneklik ve dövülebilme özellikleri gösterir. Ayrıca bu kristal yapı sayesinde süneklik özelliğini çok düşük sıcaklıklarda bile koruyabilir. Hemen hemen tüm yöntemlerle (haddeleme, ekstrüzyon, dövme vb.) şekillendirilmeye uygun olan alüminyum, yüksek şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir. Bu özelliği sayesinde çok düşük kalınlığa sahip plakalara dönüştürülebilmektedir. Fakat ergime sıcaklığının

düşük olması (660°C) yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanımını kısıtlamaktadır (Callister ve Rethwisch, 2015; Gavas vd., 2015).

Alüminyum sahip olduğu özellikler sayesinde otomotiv sektöründen gıda sektörüne kadar çok farklı alanlarda kullanılabilmektedir. Bu özellikler;

- Yüksek özgül dayanım,
- Yüksek korozyon dayanımı,
- Düşük ağırlık,
- Yanıcılık özelliği göstermemesi,
- Toksisite ve manyetik özellik göstermemesi,
- Kolay şekillendirilebilme,
- Yüksek elektrik ve termal iletkenlik

şeklinde sıralanabilir (Başer, 2012; Karadeniz, 2019).

Alüminyum her ne kadar iyi özelliklere sahip olsa da ergime sıcaklığının ve çekme dayanımının düşük olması, talaşlı imalatla şekillendirilmesinin zor olması gibi dezavantajlarından dolayı her uygulama için uygun olmamaktadır. Bu nedenle saf alüminyum içerisine eklenen alaşım elementlerinin farklı kombinasyonlarıyla mukavemet, sertlik, yorulma ve aşınma direnci gibi özelliklerde iyileşme sağlanabilmektedir. Bu amaçla alüminyum yapısına eklenen başlıca alaşım elementleri bakır (Cu), çinko (Zn), magnezyum (Mg), silisyum (Si), lityum (Li), ve mangan (Mn) şeklinde sıralanabilir (Callister ve Rethwisch, 2015).

Alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine göre döküm ve dövme alaşımları olmak üzere iki grupta incelenir. Döküm alaşımları düşük özgül ağırlık, yüksek akıcılık, yüksek yüzey kalitesi ve yüksek korozyon dayanımı gibi özellikleriyle bilinmektedir. Dövme alaşımlarının ise şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olduğundan kolayca şekillendirilebilmektedirler. Hem döküm hem de dövme alaşımları dört haneli sayılardan oluşan kodlarla ifade edilirler. Bu kodlar malzemenin alaşım elementleri hakkında bilgi verir. İlk sayı hangi alaşım elementini içerdiğini gösterirken ikinci sayı alaşımdaki değişimi gösterir. Son iki sayı ise alüminyum alaşımını belirtip saflık derecesini gösterir. Tablo 3.1’de dövme alüminyum alaşımlarının gösterim kodları, alaşım elementleri ve kullanım alanları verilmiştir (Güven, 2005; Kırsasöz, 2018).

Tablo 3.1. Dövm alüminyum alaşımlarının gösterim kodları ve kullanım alanları (Demir, 2020; Doğu, 2019)

Gösterim Kodu	Alaşımlar Elementi	Kullanım Alanları
1xxx	-	Elektrik ve kimya endüstrisi
2xxx	Cu	Havacılık sektörü
3xxx	Mn	Borular, sıvı tankları ve mimari uygulamalar
4xxx	Si	Levha üretimi, otomobil parçaları ve kaynaklı yapılar
5xxx	Mg	Deniz ortamındaki korozyon dayanımından dolayı bu ortamda çalışacak yapıların üretiminde
6xxx	Mg ve Si	Mimari uygulamalar ve otomotiv parçaları
7xxx	Zn	Uçak gövde parçaları ve yüksek gerilme altında çalışan parçalar
8xxx	Fe, Li ve Sn	Havacılık ve uzay sanayi

1xxx serisi alüminyum alaşımları en az %99 saflığa sahip olup yüksek korozyon direnci ve yüksek işlenebilirlik özellikleriyle bilinirler. Ancak düşük mekanik özellikler sergilerler. 2xxx serisi alüminyum alaşımları ise yapısında alaşımlar elementi olarak bakır bulundurur. Bu alaşımların korozyon direnci diğer alaşımlara göre daha düşüktür. 2xxx serisinde istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için ısıtıl işlem uygulanır. 3xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşımlar elementi manganez olup korozyon direnci ve işlenebilirliği yüksektir. 4xxx serisi alüminyum alaşımlarında ana alaşımlar elementi silisyumdur. Bu alaşımlar grubu yapısındaki silisyum sebebiyle iyi akıcılık özelliği gösterir. Ayrıca bu seride korozyon ve aşınma direnci yüksek, termal genişleme katsayısı ise düşüktür. Ana alaşımlar elementi magnezyum olan 5xxx serisi alüminyum alaşımları, yüksek kaynak kabiliyetine ve korozyon direncine sahiptirler. 5xxx serisinde yapıdaki magnezyum oranının artmasıyla mukavemet ve sertlik değerleri artar. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında ana alaşımlar elementleri olarak magnezyum ve silisyum kullanılır. Korozyon direnci, işlenebilirliği ve kaynak kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyonla parça üretiminde kullanılırlar. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında ana alaşımlar elementi çinko olmasına rağmen yapıya bakır, krom, magnezyum ve zirkonyum eklenerek çeşitlilik sağlanabilir. En yüksek mukavemete sahip alüminyum alaşımları olan 7xxx serisinin korozyon direnci düşüktür. 8xxx serisi alüminyum alaşımları yapılarında demir, kalay ve lityum barındırır. Bu alaşımlar grubunun yorulma dayanımı ve tokluğunun yüksek olması havacılık uygulamalarında kullanımını arttırmaktadır (Demir, 2020; Doğu, 2019).

Döküm alaşımları yapılarındaki silisyum içeriğinin fazla olması sebebiyle yüksek akıcılık ve dökülebilirlik özelliklerine sahiptirler. Bu alaşımların gösterim

kodlarında da dövme alaşımlarında olduğu gibi dört haneli sayı sistemi kullanılır. Ancak dövme alaşımlarından farklı olarak son sayıdan önce nokta bulunur. Tablo 3.2’de döküm alüminyum alaşımlarının gösterim kodları ve alaşım elementleri verilmiştir (Doğu, 2019).

Tablo 3.2. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterim kodları ve alaşım elementleri (Demir, 2020)

Gösterim Kodu	Alaşım Elementi
1xx.x	-
2xx.x	Cu
3xx.x	Si, Cu, Mg
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	Kullanılmamaktadır
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn

3.3.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri

Kompozit malzemelerde takviye elemanları, matristen aktarılan yükü taşıyarak yapıda dayanım artışı sağlarlar. Bu amaçla metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak genellikle seramik esaslı takviyeler tercih edilmektedir. Bunun sebepleri; düşük yoğunluk, yüksek sertlik, yüksek mekanik özellikler, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal ve termal kararlılık şeklinde sıralanabilir (Kelez, 2021).

Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları sürekli elyaf, parçacık, kılcal kristal veya kısa elyaf şeklinde olabilir. Tablo 3.3’de bu şekillerdeki takviye elemanlarına örnekler verilmiştir (Kayabaşı, 2016).

Tablo 3.3. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları (Kayabaşı, 2016)

Takviye şekli	Kullanılan Takviye Elemanları
Sürekli Elyaf	Al_2O_3 , $Al_2O_3+SiO_2$, B, C, SiC, Si_3N_4 , Nb-Ti
Parçacık	SiC, Si_3N_4 , Al_2O_3 , TiC, B_4C , WC
Süreksiz Elyaf - Kılcal Kristal	SiC, TiB_2 , Al_2O_3
Süreksiz Elyaf - Kısa Elyaf	Al_2O_3 , SiC, ($Al_2O_3 + SiO_2$),

Metal matrisli kompozitlerde en çok tercih edilen takviye elemanları silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si_3N_4), bor karbür (B_4C), titanyum diborür (TiB_2), titanyum karbür (TiC), tungsten karbür (WC), zirkonya (ZrO_2) ve alümina (Al_2O_3) şeklinde sıralanabilir. Tablo 3.4’de en çok kullanılan takviye elemanları ve özellikleri verilmiştir (Şenel, 2018a).

Tablo 3.4. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları ve özellikleri (Polat, 2019)

Takviye Elemanı	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)
SiC	3,21	200	2730
B ₄ C	2,50	650	2763
Si ₃ N ₄	3,25	550	1900
WC	15,88	530	2870
ZrO ₂	5,89	115-711	2823-2973
Al ₂ O ₃	3,98	248	2072
TiB ₂	4,52	373	2920

3.3.3. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

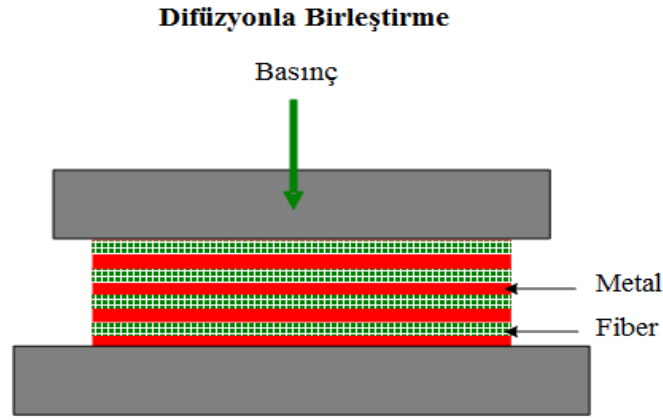
Kompozit malzemelerden istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için matris ve takviye fazı arasındaki uyumun ve arayüzey bağının güçlü olması gereklidir. Ayrıca takviye fazının matris içerisinde homojen dağılması önem arz etmektedir. Tüm bu özelliklerin geleneksel üretim yöntemleriyle sağlanması zor olduğundan kompozit malzemelerin üretiminde özel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler sıvı hal ve katı hal üretim yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Kelez, 2021).

3.3.3.1. Katı hal üretim yöntemleri

Katı hal üretim yöntemleri, matris ve takviye elemanlarının katı halde bulunduğu yöntemlerdir. Bu yöntemlerde ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılan matris malzemesinin takviye elemanı ile difüzyon mekanizması aracılığıyla birleşmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri sıvı hal üretim yöntemleri kullanılan kompozitlerden daha yüksektir. Katı hal üretim yöntemleri difüzyonla birleştirme ve toz metalürjisi olarak ikiye ayrılmaktadır (Şenel, 2018a).

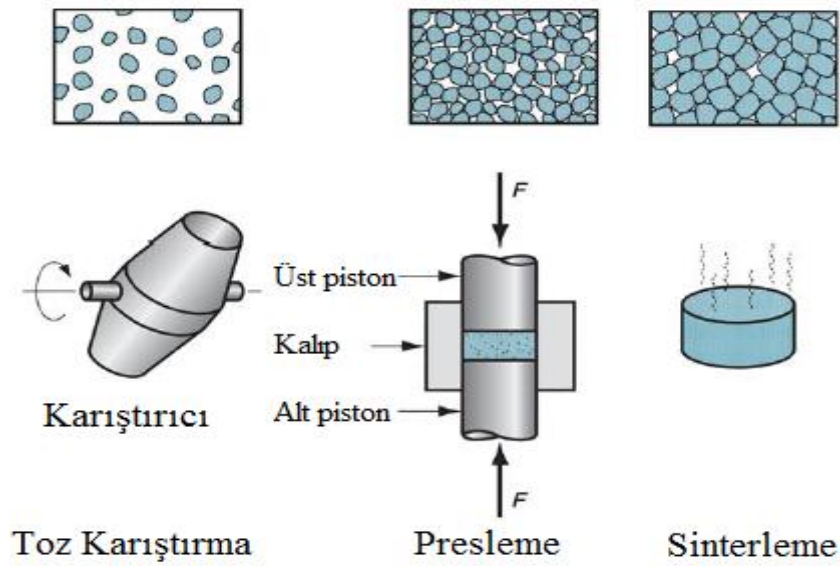
Difüzyonla birleştirme yönteminde, levha veya yaprak şeklindeki matris ve takviye malzemeleri üst üste konularak yüksek sıcaklık ve basınç altında birleştirilir. Ergime sıcaklığının altında gerçekleşen bu olayda matris ve takviye fazının birleşmesinde difüzyon mekanizması rol oynamaktadır. Şekil 3.5’de difüzyonla birleştirme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Difüzyonla birleştirme işleminde birleşecek yüzeylerin oksitlenmemiş ve temiz yüzeyler olması gerekmektedir. Düzgün yüzeyler, matris ve takviye fazları arasındaki bağın daha kuvvetli olmasını sağlayacağından kompozitlerin mekanik özelliklerine önemli ölçüde etki etmektedir. Difüzyonla birleştirme işlemi, farklı matris malzemelerinin kullanılabilmesi ve fiber yönünün belirlenebilmesi gibi avantajlara sahip olmasına rağmen yüksek maliyet,

uzun işlem süresi, yüksek basınç ve sıcaklık gereksinimi gibi dezavantajları kullanımını kısıtlamaktadır (Kandpal vd., 2014; Şenel, 2018a).



Şekil 3.5. Difüzyonla birleştirme işleminin şematik gösterimi (Kandpal vd., 2014)

Bir diğer katı hal üretim yöntemi olan toz metalürjisi, toz formundaki matris ve takviye elemanlarının belirli oranlarda karıştırılıp preslenmesi ve sinterlemesi sonucu istenilen şekilde kompozit malzeme elde edilmesini sağlayan yöntemdir. Toz metalürjisi yönteminde öncelikle tozlar belirli oranlarda karıştırılır. Ardından elde edilen bu tozlar istenilen şekillerde preslenerek şekillendirilir. Şekillendirilen numuneler istenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla sinterleme işlemine tabi tutulur. Gerekli durumlarda sinterleme sonrası ikincil işlemler (haddeleme, ekstrüzyon vb.) uygulanabilir. Şekil 3.6’da toz metalürjisi süreci şematik olarak verilmiştir (Kelez, 2021).

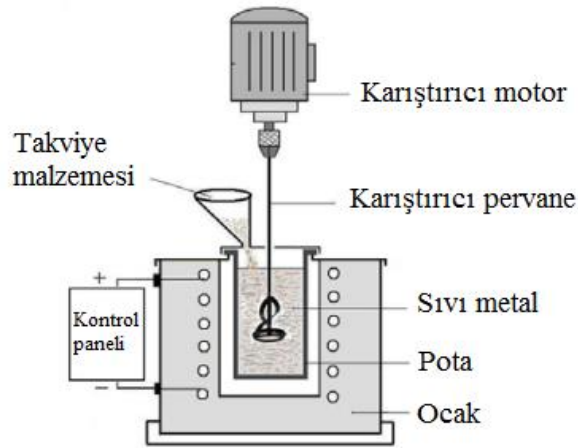


Şekil 3.6. Toz metalürjisi sürecinin şematik gösterimi (Groover, 2013)

3.3.3.2. Sıvı hal üretim yöntemleri

Sıvı hal üretim yöntemlerinde matris malzemesi ergitilerek takviye malzemesi ile bir araya getirilip kompozit üretimi gerçekleştirilir. Bu üretim yöntemleri maliyetlerinin düşük olması, uygulamanın basit olması ve karmaşık geometrili parçaların üretilmesi gibi avantajlara sahiptir. Ancak homojen dağılımın sağlanamaması, ara yüzeyde gerçekleşen reaksiyonlar, matris ve takviye malzemeleri arasındaki ıslatılabilirliğin düşük olması gibi problemler kullanımlarını sınırlamaktadır. Sıvı hal üretim yöntemleri infiltrasyon, sıkıştırılmalı döküm, basınçlı döküm ve karıştırılmalı döküm olmak üzere dörde ayrılmaktadır (Kıyasöz, 2018).

Karıştırılmalı döküm yöntemi, partikül veya kısa elyaf takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, mekanik bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılan sıvı metale takviye malzemelerinin eklenmesi ve takviyelerin homojen dağılımı sağlanır. Takviye malzemelerinin homojen bir şekilde dağılımı sağlandıktan sonra sıvı metal hazırlanan kalıplara dökülerek istenilen şekile sahip kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilir. Ucuz, basit ve homojen yapı elde etmenin kolay olduğu bu yöntemde üretilen kompozit malzemelerin yapısında gözenek ve boşluklar sık karşılaşılan sorunlardır. Şekil 3.7’de karıştırılmalı döküm yönteminin şematik gösterimi verilmiştir (Kelez, 2021).

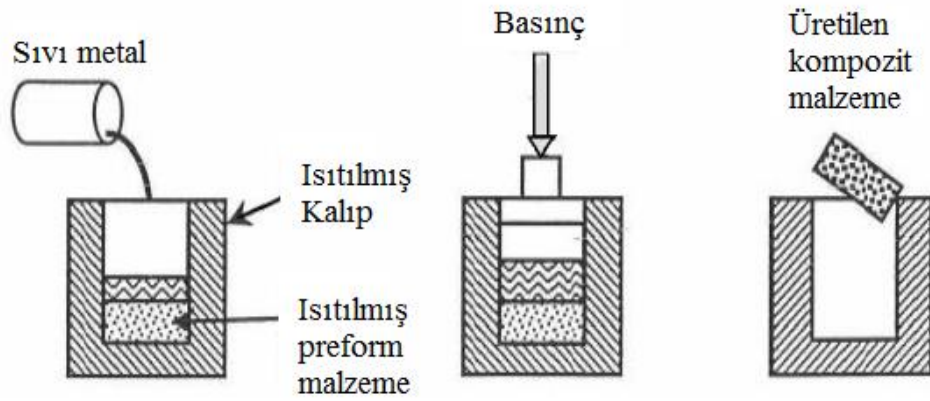


Şekil 3.7. Karıştırılmalı döküm yöntemi (Pul, 2019)

Büyük boyutlu ve karmaşık şekilli kompozit malzemelerin üretiminin gerçekleştirilebildiği basınçlı döküm yönteminde ise üretim süreci açısından sıkıştırılmalı döküm yöntemine benzetilmektedir. Ancak bu yöntemde uygulanan basınç değeri (10-15 MPa) çok daha düşüktür. Kalay, çinko, magnezyum, kurşun, alüminyum

ve alaşımlarının kullanılabilirdiği yöntemde üretim sonrası talaşlı işlemeye gerek yoktur. Ayrıca uygulanan basınç sayesinde katılaşma kısa sürede gerçekleşebilmektedir (Şenel, 2018a).

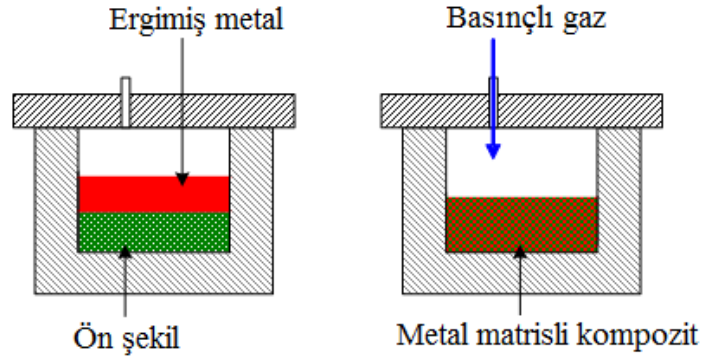
Sıkıştırırmalı döküm yönteminde, yapısında takviye elemanını bulunduran ön şekle yüksek basınç altında ergiyik metal emdirilerek katılaşması sağlanır. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi kalıba yerleştirilen ön şekil ön ısıtma işlemine tabi tutulur ve ardından sıvı metal kalıba dökülerek yüksek basınç altında infiltrasyonu sağlar. Yüksek hassasiyet gereken malzemelerin üretiminde kullanılan bu yöntemde uygulanan yüksek basınçtan dolayı döküm hatalarının (çekme boşlukları, gözenek, gaz boşlukları vb.) görülme olasılığı çok düşüktür. Bu yöntemde yüksek basınç gereksinimi ve parça boyutu sınırlaması gibi dezavantajlar bulunsa da kısa sürede karmaşık şekilli kompozit malzemelerin üretimi sağlanabilmektedir (Şenel, 2018a).



Şekil 3.8. Sıkıştırırmalı döküm yönteminin şematik gösterimi (Kelez, 2021)

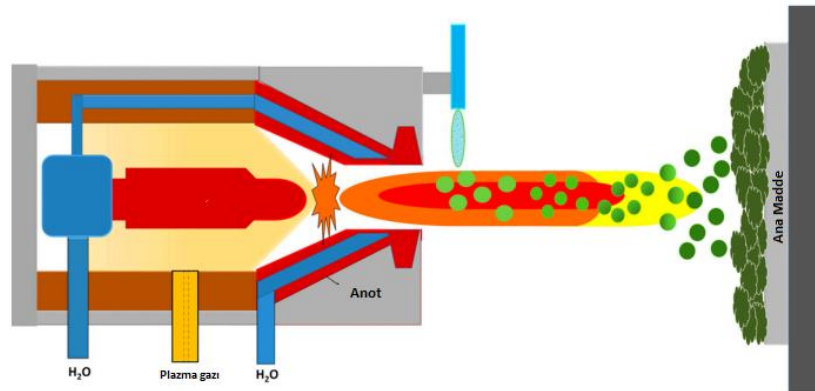
İnfiltrasyon yöntemi, belirli bir ön şekle sahip gözenekli yapıdaki takviye malzemesine sıvı metal şeklindeki matris malzemenin emdirilmesi ile kompozit üretimini amaçlamayan sıvı hal üretim yöntemidir. İnfiltrasyon yönteminde temel parametrelerden birisi takviye malzemesinin matris malzemesi tarafından ıslatılabilirliğidir. Islatılabilirlik sıvı matris malzemesinin takviye elemanı üzerinde yayılma kabiliyetidir. İnfiltrasyon basınçlı, basınçsız veya vakumlu şekillerde yapılabilir. Basınçsız infiltrasyonda sıvı metal ön şekil içerisine basınç uygulamadan emdirilmektedir. Bu durum da yüksek mekanik dayanıma sahip ön şekil gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır. Basınçlı infiltrasyonda ise sıvı metalin emdirilmesi sırasında basınçlı bir koruyucu gaz kullanılır. Bu durum infiltrasyonun daha kısa sürede tamamlanmasını ve takviye malzemesinin ıslatılamaması gibi problemlerin ortadan

kalkmasını sağlar. Eğer infiltrasyon işlemi vakum altında yapılırsa sıvı metalin emdirilmesi için yeterli bir basınç farkı oluşturulabilmektedir. Ayrıca vakum ortamı oksitlenmeyi ve yapıda kalan hava sebebiyle gözenek oluşumunu engellemektedir. Şekil 3.9’da infiltrasyon işlemi şematik olarak gösterilmiştir (Kalemtaş, 2016).



Şekil 3.9. İnfiltrasyon işleminin şematik gösterimi (Kopeliovich, 2012)

Hızlı katılaşma prensibine dayanan plazma püskürtme yöntemi, atomize edilmiş ergiyik metalin basınç yardımıyla püskürtülerek istenilen kalınlığın elde edilmesi işlemidir. Bu püskürtme işlemi sırasında takviye elemanlarının eriyik metal içerisine ilave edilerek ön ısıtma yapılmış katman üzerinde katılaşması sağlanır. Bu yöntem sayesinde toz metalürjisi gibi yöntemlerdeki birçok işlem basamağı ortadan kaldırılarak maliyet düşürülmüş olur. Aynı zamanda bu yöntem son şekle yakın ürün elde edilmesi, kısa işlem süresi ve düşük oksidasyon gibi birçok avantaja sahiptir. Şekil 3.10’da şematik olarak gösterilen plazma püskürtme yönteminde ergiyik metalin püskürtüldüğü nozul ve kolektör arası mesafenin değiştirilmesiyle tüp, şerit, disk gibi farklı şekilli parçaların üretimi mümkün olmaktadır (Salamcı, 2004).



Şekil 3.10. Plazma sprej yönteminin şematik gösterimi (Unabia vd., 2018)

Bu bölümde ele alındığı gibi birçok farklı kompozit malzeme üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Tablo 3.5’de bazı kompozit üretim yöntemlerinin farklı açılardan karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 3.5. Metal matrisli kompozit malzeme üretim yöntemlerinin karşılaştırılması (Yadav vd., 2022; Samal vd., 2020)

Üretim Yöntemi	Avantajları	Dezavantajları
Difüzyonla birleştirme	Farklı matrislerin kullanılabilmesi Fiber yönünün belirlenebilmesi	Yüksek maliyet Uzun işlem süresi Yüksek basınç ve sıcaklık gereksinimi
Toz metalürjisi	Karmaşık şekilli parça üretimi Hızlı ve yüksek kaliteli üretim süreci Düşük malzeme kaybı	Pahalı hammadde Sınırlı parça boyutu Yüksek ilk yatırım maliyeti
Sıkıştırılmalı döküm	Minimum seviyede döküm hatası	Yüksek basınç gereksinimi Parça boyutu sınırlaması
Karıştırılmalı döküm	Ucuz Basit Homojen yapı	Yapıda oluşan gözenek ve boşluklar
Basınçlı döküm	Talaşlı işlemeye ihtiyaç duyulmaması Karmaşık şekilli parça üretimi Kısa katılma süresi	Parça boyutu sınırlaması Yüksek maliyet Zor kalıp tasarımı
Plazma püskürtme	Son şekle yakın ürün eldesi Kısa işlem süresi Düşük oksidasyon	İnce cidarlı parçalar yüksek sıcaklıktan etkilendiğinden ekstra soğutma prosesi Hızlı soğumadan kaynaklı istenmeyen fazların oluşumu
Sürtünme karıştırma	Süper plastisiteye sahip ince tane yapısı Yüksek mukavemet Düşük gözeneklilik Yüksek aşınma direnci	Prosesin fiziksel altyapısı henüz açıklanamıyor
İnfiltrasyon	Uygun maliyet Karmaşık şekilli parça üretimi Yüksek sıcaklık dayanımı	İnfiltrasyon kanallarında tıkanma olasılığı

4. TOZ METALÜRJİSİ

4.1. Genel Bilgiler

Toz metalürjisi, toz forma sahip malzemelerin karıştırma, presleme ve sinterleme gibi işlem basamaklarından geçirilerek yeni parçalara dönüştürüldüğü üretim sürecidir. Bu yöntemde ergitme yapılmadan basınç ve sıcaklık kontrolüyle üretim yapılmaktadır. Toz metalürjisi özellikle döküm, plastik şekil verme gibi yöntemler kullanılarak elde edilemeyen malzemelerin üretimleri için iyi bir seçenektir. Diğer yöntemlerle üretimi zor olan kompleks şekilli parçaların üretiminin de yapılabildiği bu yöntemde istenilen son şekle yakın parçalar elde edilebilmektedir. Bu durum ikincil işlemlere olan ihtiyacı azaltması sebebiyle hem maliyeti hem de işlem süresini düşürmektedir (Yılmaz, 2006).

Toz metalürjisinin tarihi ilk çağlara kadar dayanmaktadır. İlk çağlardaki insanlar seramik, un, tuz, şeker gibi malzemeleri kullanabilmek amacıyla sinterlemeye benzer prosesler kullanmışlardır. M.Ö. 3000’li yıllara gelindiğinde ise Mısırlılar toz metalürjisi yöntemiyle sünger demir üretimi gerçekleştirmişlerdir. 18. ve 19. yüzyıllarda laboratuvarlarda platin teknolojisinin yaygınlaşmasıyla farklı toz üretim teknikleri geliştirilmiş ve bu tekniklerle tozların işlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu dönem toz metalürjisi yönteminin gelişim sürecinin ilk adımı sayılmaktadır. Ancak toz metalürjisinin asıl dönüm noktası 1900’lü yılların başında Coolidge'nin tungsten tozlarını kullanarak lamba filamenti üretmesi olmuştur. Bu tarihten sonra ilgi çekmeye başlayan toz metalürjisinin gelişimi 2. Dünya Savaşı ile birlikte hız kazanmıştır. Toz metalürjisinin kullanıldığı ilk uygulamalarda amaç tozları kullanarak farklı malzemeler elde etmek iken bu yöntem günümüzde neredeyse her sektörde kullanılmaktadır (Altıntaş, 2017; ASM Handbook Committee, 1984).

Toz metalürjisi günümüzde birçok sektörde yer edinmiştir. Özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere uçak sanayi, elektrik-elektronik, ev aletleri, biyomedikal gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe dişli çarklar, hidrolik sistemlerin parçaları, subap yuvaları ve kılavuzları gibi ürünlerin üretimi toz metalürjisi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bunun dışında elektrik kontakları, ortopedik aletler, tungsten lamba filamentleri, diş implantları ve ortopedik implantlar toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen malzemelere örnektir. Tablo 4.1’de toz

metalürjisinin kullanıldığı sektörler ve bu yöntemle üretilen ürünler daha detaylı olarak verilmiştir (Çelebi, 2013; Özkan, 2019).

Tablo 4.1. Toz metalürjisinin kullanım alanları (Çelebi, 2013; Özkan, 2019)

UYGULAMA ALANI	ÜRETİLEN ÜRÜNLER
Otomotiv Sektörü	Dişli çarklar Aktarma parçaları Subap yuvaları Subap kılavuzları Yataklar Amortisör parçaları Filtreler Pistonlar Şok sönmüleyiciler Buji gövdeleri Hidrolik direksiyon sistemleri Hidrolik sistem parçaları Fren balataları
Havacılık Sektörü	Isı tutucular Jet motor parçaları Fren balataları Dış çerçeveler
Elektrik-Elektronik Sektörü	Bataryalar Baskı devreler Yarı iletkenler Elektrik kontak malzemeleri
Genel Sanayi	Yataklar Kesici takımlar Filtreler
Sağlık Sektörü	Diş dolguları Diş implantları Ortopedik implantlar Ortopedik aletler

Toz metalürjisi, sektörde yer alan birçok üretim yöntemine göre (dövme, döküm vb.) üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- Özellikle karmaşık şekilli ve küçük boyutlu parçaların seri üretim sürecine uygundur.
- Üretilen parçalarda yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi elde edilebilir.
- Üretim sonrası talaşlı imalata neredeyse hiç ihtiyaç olmadığından malzeme kaybı çok azdır.
- Yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilir.
- Refrakter metallerin üretimi için ekonomik bir seçenek sunmaktadır.
- Hızlı ve yüksek kaliteli bir üretim süreci sağlar.

- Toz metalürjisinde gözeneklilik kontrol edilebildiğinden gözenekli kemik yapıları, kendinden kaymalı yataklar gibi malzemeler bu yöntemle üretilebilir (Özkan, 2019; Şenel, 2018a).

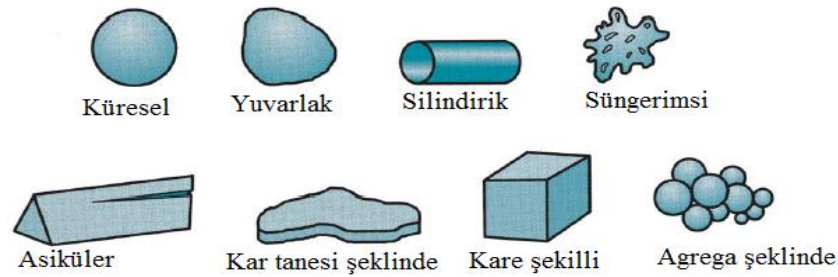
Toz metalürjisi bu özelliklerin yanı sıra her yöntemde olduğu gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar;

- Metal tozların pahalı olması,
- Metal tozlarının depolanmasının zor olması,
- Parça boyutu sınırlaması,
- Seri üretim yapılmazsa ilk yatırım maliyetinin yüksek olması,
- Yüksek mekanik özellikler için yapıdaki gözenekleri doldurma amaçlı ilave işlemlere ihtiyaç duyulması ve bunun için gerekli teçhizatın yüksek maliyetli olması,
- Gözenekli yapıdan kaynaklanan düşük korozyon direnci,
- Numunelerdeki değişken yoğunluk değerleri

şeklinde sıralanabilir (Çelebi, 2013; Şenel, 2018a).

4.2. Metal Toz Üretim Teknikleri

Toz metalürjisinde kullanılan toz boyutları ortalama 1-200 μm aralığında değişmektedir. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi farklı geometrik şekillere sahip olan tozlar, son ürünün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kullanılan tozun şekli, boyutu ve kimyasal özellikleri gibi birçok parametre üretilen ürünün özelliklerine etki etmektedir (Baydemir, 2018).



Şekil 4.1. Toz metalürjisinde kullanılan bazı tozların geometrik şekilleri (Groover, 2013)

Toz metalürjisinde toz üretimi için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Toz üretim yöntemi, tozun özelliklerini etkilemesi sebebiyle bu toz kullanılarak

üretilen parçanın özelliklerini de dolaylı olarak etkilemektedir. Toz üretimi için uygun yöntem seçilirken dikkat edilmesi gereken parametreler;

- Malzemenin ergime sıcaklığı,
- Malzemenin özgül ağırlığı,
- Malzemenin reaksiyon hızı,
- Malzemenin tutuşma hızı,
- Üretim sonucu elde edilen toz şekli,
- Maliyet

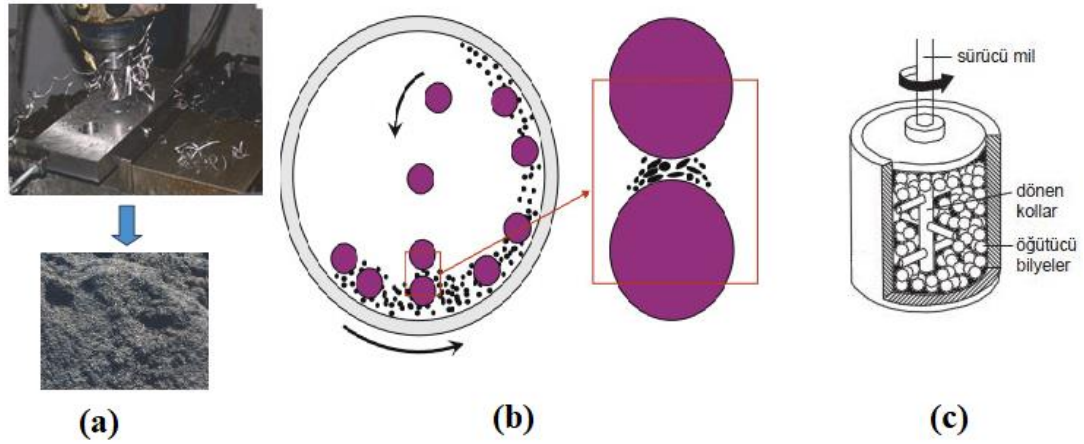
şeklinde sıralanabilir (Gavas vd., 2015).

Toz metalürjisi yönteminde toz üretimi için kullanılan yöntemler mekanik, kimyasal, elektroliz ve atomizasyon üretim teknikleri olmak üzere dört başlık altında toplanmıştır (Gavas vd., 2015).

4.2.1. Mekanik üretim teknikleri

Mekanik üretim tekniklerinde, darbe ve sürtünme gibi etkilerin yardımıyla malzemenin parçalanıp toz haline getirilmesi amaçlanmaktadır. Toz saflığının düşük ve üretilen tozların karmaşık şekillere sahip olduğu bu tekniklerde tozların üretimi için darbe, basma, kesme ve aşındırarak öğütme olmak üzere dört mekanizma kullanılır. Toz üretimi için darbe etkisi kullanıldığında malzeme ani ve hızlı uygulamalara maruz bırakılarak parçalanır. Kesme işleminde ise talaşlı imalat olduğu gibi malzeme kesilerek toz üretimi amaçlanır. Bu yöntemle üretilen tozlar büyük boyutlu ve karmaşık şekillidir. Ayrıca kesme işlemi için talaşlı imalat kullanıldığında üretim ortamından kaynaklanan kirlenmelerle (oksitlenme, farklı malzemelerle karışma, yağlanma vb.) karşılaşılabilir. Bundan dolayı toz boyutunun küçültülmesi ve elde edilen tozların temizlenmesi için ilave işlemlere ihtiyaç duyulur. Bu durum maliyetin artmasına ve işlem süresinin uzamasına yol açar. Basma mekanizması kullanılarak yapılan toz üretiminde ise malzeme, basma kuvveti kullanılarak deforme edilir ve toz haline getirilir. Aşındırarak öğütmede, aşındırıcıların birbirleri üzerinde oluşturdukları sürtünme kuvvetinden yararlanılır. Oluşan bu sürtünmenin yarattığı aşınmayla birlikte parçacık boyutunda azalma sağlanır. Bu mekanizmaların kullanıldığı mekanik üretim teknikleri; mekanik alaşımlama, talaşlı üretim ve mekanik öğütme olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bu

yöntemlerin şematik gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir (Altınışik, 2019; Gavas vd., 2015).



Şekil 4.2. Mekanik üretim tekniklerinin şematik gösterimi: talaşlı üretim (a), mekanik öğütme (b), mekanik alaşımlama (c)

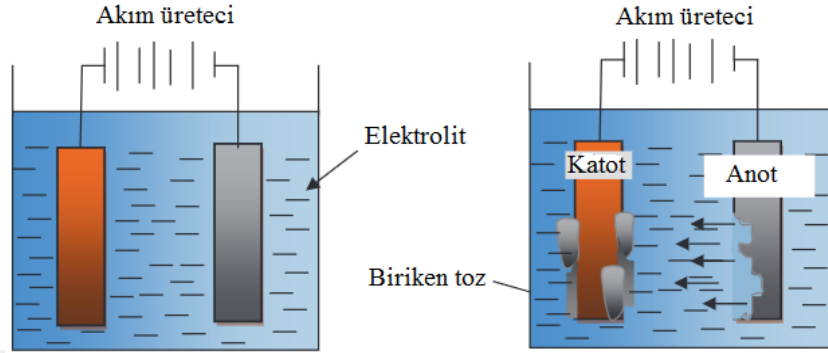
4.2.2. Kimyasal üretim teknikleri

Kimyasal üretim tekniklerinde katı, sıvı veya gaz faz tepkimeleri kullanılarak toz üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerde karbon monoksit ve hidrojen gibi indirgeyici gazlar kullanılarak metal oksitler kimyasal olarak indirgenir. İlk olarak bakır tozu üretmek için kullanılan yöntemler daha sonra demir tozu üretimi için standart hale getirilmiştir. Bu yöntemler kullanılarak farklı boyut ve geometrik şekillerde toz üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca kimyasal üretim tekniklerinde kullanılan metal oksitlerin kolayca temin edilebilmesi, toz boyut kontrolünün yapılabilmesi ve tozlarda gözenekli yapının elde edilebilmesi bu yöntemlerin avantajlarıdır. Ancak alaşım tozlarının üretilmemesi, üretilen tozların saflığının metal oksitin saflığına göre değişmesi ve indirgeyici olarak kullanılan gazların yüksek maliyetli olması bu yöntemlerin dezavantajları arasındadır. Kimyasal üretim teknikleri arasında yer alan kimyasal indirgenme, kimyasal çökeltme, sol-jel, ayrışma ve kimyasal reaksiyon teknikleri yaygın olarak tercih edilen yöntemlerdir (Gavas vd., 2015; Özkan, 2019).

4.2.3. Elektroliz ile üretim teknikleri

Elektroliz ile üretim tekniğinde toz üretimi için bir elektroliz hücresi içerisinde gerçekleşen anot ve katot reaksiyonları kullanılır. Bu yöntemde tozu elde edilmek istenen malzeme Şekil 4.3’de gösterildiği gibi elektrolitik banyo içerisine anot olarak yerleştirilir. Bir süre sonra uygulanan voltajın etkisiyle elektrolitik banyo içerisinde

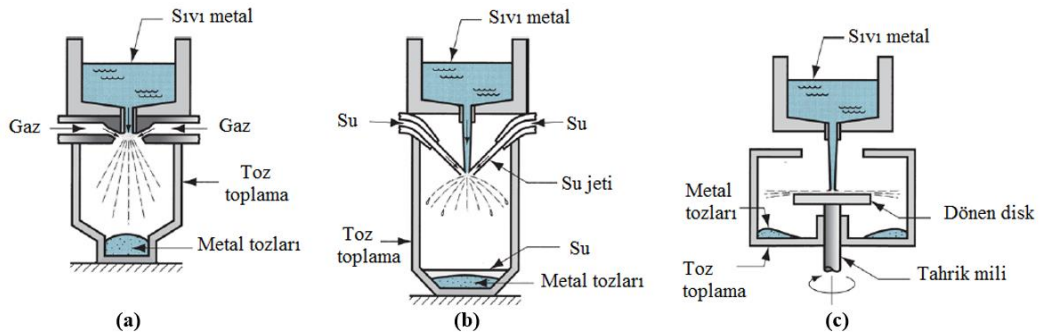
çözünen anot malzeme tozları katot üzerinde toplanır. Daha sonra bu tozlar katot üzerinden sıyrılarak yıkama, kurutma ve öğütme işlemlerine tabi tutulur. Bu yöntemle elde edilen tozlar yüksek saflığa, dendritik şekle ve süngerimsi bir yapıya sahiptirler (Altınışık, 2019; Özkan, 2019).



Şekil 4.3. Elektroliz yönteminin şematik gösterimi (Gavas vd., 2015)

4.2.4. Atomizasyon teknikleri

Atomizasyon teknikleri, ergitilen metalin sıvı veya gaz kullanılarak parçalanması ve soğutulularak toz haline getirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemlerde ergimiş metal basınç kullanılarak küçük deliklerden geçirilir. Bu esnada ergiyük metalin, üzerine gönderilen su, yağ veya farklı gazlar vasıtasıyla küçük parçacıklara ayrılması sağlanır. Daha sonra bu parçacıkların düştükleri soğuk yüzeyde katılaşmasıyla farklı şekilli tozların üretimi gerçekleştirilmiş olur. Atomizasyon teknikleri metal tozlarının üretiminde en çok tercih edilen toz üretim teknikleridir. Ayrıca bu yöntemlerle üretilen tozların boyutu, şekli ve kimyasal bileşimi gibi birçok özelliği kontrol edilebilmektedir. Şekil 4.4’de yaygın olarak kullanılan atomizasyon tekniklerinin şematik gösterimi verilmiştir (Altınışık, 2019; Özkan, 2019).



Şekil 4.4. Bazı atomizasyon tekniklerin şematik gösterimi: gaz atomizasyonu (a), su atomizasyonu (b), santrifüj atomizasyonu (c) (Groover, 2013)

Atomizasyon teknikleri kullanılarak farklı boyut ve şekillerde toz üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Tablo 4.2’de farklı atomizasyon tekniklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.2. Atomizasyon tekniklerinin karşılaştırılması (Gavas vd., 2015)

Üretim yöntemi	Toz boyut aralığı (µm)	Toz şekli	Maliyet
Gaz atomizasyonu	15-300	Küresel	Orta
Su atomizasyonu	5-800	Düzensiz	Düşük
Ergiyik savurma	200-1000	Pul	Düşük
Döner disk	50-300	Küresel	Yüksek
Döner elektrod	200-600	Küresel	Yüksek

4.3. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Parça Üretimi

Toz metalürjisi ile parça üretimi birkaç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar;

- Tozların karıştırılması,
- Tozların şekillendirilmesi (presleme)
- Sinterleme
- İsteğe bağlı ikincil işlemler (talaşlı imalat, ısıtma işlemi, yüzey işlemleri vb.)

şeklinde sıralanabilir (Özkan, 2019).

4.3.1. Karıştırma ve harmanlama

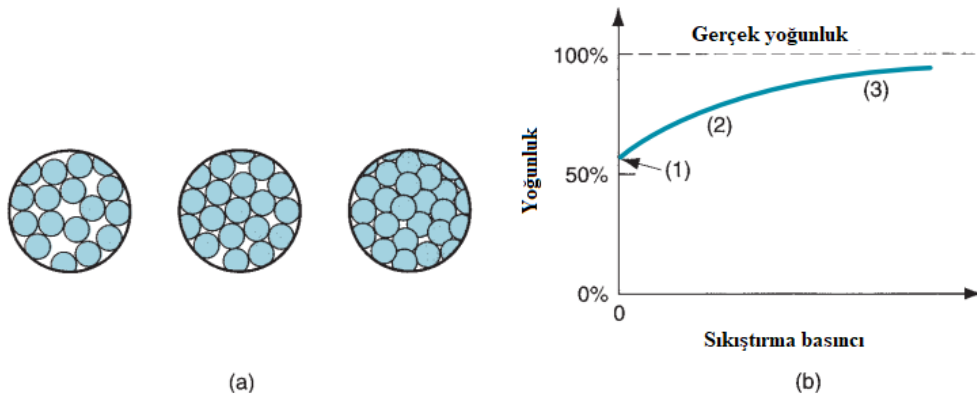
Toz metalürjisinde üretim sürecinin ilk adımı tozların karıştırılması ve harmanlanmasıdır. Tanım olarak bakıldığında harmanlanma aynı kimyasal bileşime sahip ancak boyutları farklı tozların karıştırılması iken, karıştırma aynı boyutlu farklı kimyasal bileşime sahip tozları bir araya getirmek amacıyla yapılan bir işlemdir. Harmanlama işlemiyle büyük taneli tozların arasına küçük tanelerin yerleşmesini sağlandığından sinterleme işlemi kolaylaşır ve yoğunluk değeri artar. Karıştırma işlemiyle ise tozların topaklanması önlenmiş ve homojen bir şekilde dağılması sağlanmış olur. Ayrıca farklı bileşime sahip malzemelerden yeni bir karışım elde edilmiş olur (Gavas vd., 2015; Şenel, 2018a).

Tozların kolay şekillendirilmesini sağlamak ve tanecikler arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla yağlayıcılar kullanılmaktadır. Yağlayıcı kullanımı kalıp yüzeyiyle toz karışımı arasında oluşabilecek sürtünmeyi engelleyeceğinden presleme sırasında yaşanan enerji kayıplarının azalmasını sağlar. Ancak yağlayıcı kullanılmazsa oluşan sürtünmeden dolayı gerekli sıkıştırma basıncı artmakta ve

kullanılan kalıbın zarar görmesine sebep olmaktadır. Bu amaçla en çok tercih edilen yağlayıcılar parafin, çinko stearat, stearik asit ve metalik stearatlardır (Gavas vd., 2015).

4.3.2. Presleme (Sıkıştırma)

Presleme işleminde toz taneciklerinin basınç kullanılarak birbirleriyle teması sağlanır. Bu işlem sonucunda toz tanecikleri hem istenilen şekle hem de belirli bir ham yoğunluğa sahip olurlar. Ham yoğunluk, presleme sonrası malzemenin kendi başına ayakta durabileceği yoğunluk değeridir. Bu değer sinterleme işlemiyle arttırılır. Şekil 4.5a'da görüldüğü gibi presleme işlemi sırasında toz tanecikleri basıncın etkisiyle deforme olarak birbirine yaklaşır. Bu durum tanecikler arasında bir bağ oluşmasına ve gözeneklerin kapanmasına neden olur. Yapıdaki gözeneklerin kapanması ise yoğunluk artışını sağlar. Yoğunluk artışına etki eden diğer bir olay ise artan sıkıştırma basıncıdır. Şekil 4.5b'de görüldüğü gibi sıkıştırma basıncının artmasıyla yoğunluk değeri artmakta ve gerçek yoğunluk değerine yaklaşmaktadır (Altınışik, 2019).



Şekil 4.5. Presleme işlemiyle mikroyapıda meydana gelen değişimler (a) ve presleme basıncının yoğunluğa etkisi (b) (Groover, 2013)

4.3.3. Sinterleme

Sinterleme, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen ve yoğun bir yapı elde etmek amacıyla toz partiküllerini kütle taşınım mekanizmasını kullanarak atomik ölçekte bağlayan işlemidir. Ergime sıcaklığının altında gerçekleşen bu bağlanma, atomların hareketleri veya sıvı bir faz oluşumuyla gerçekleşir ve taneler arası boyun oluşumu şeklinde görülür. Sinterleme işleminin temel amacı numunelerin şekillendirme sonrası sahip oldukları ham yoğunluk ve mukavemet değerlerini istenilen seviyelere

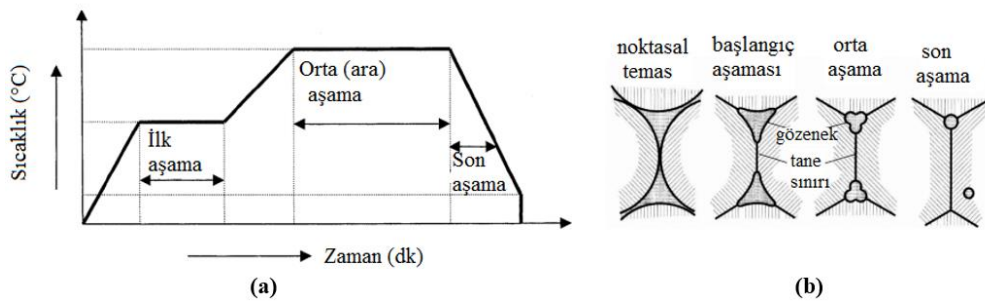
ulaştırmaktır. Sinterleme işlemi sonucunda istenilen özelliklere sahip bir malzeme elde edebilmek amacıyla bazı parametrelerin kontrol edilmesi gerekmektedir (Altan, 2017; Altınışıık, 2019). Bu parametreler;

- Sinterleme sıcaklığı ve süresi,
- Sinterleme atmosferi ve basıncı,
- Malzeme boyut ve bileşimi,
- Tane boyutu ve şekli,
- Gözenek boyutu ve şekli,
- Ham yoğunluk ve mukavemet

şeklinde sıralanabilir (Altınışıık, 2019; Altıntaş, 2017).

Sinterleme işlemi, yüksek sıcaklığa bağlı reaksiyonları önleme, yapıdaki bağlayıcı ve yağlayıcıları uzaklaştırma ve oksitlenme oluşumunu engelleme amacıyla koruyucu atmosfer altında gerçekleştirilir. Sinterleme işleminde koruyucu atmosfer olarak vakum ortamı veya argon, karbondioksit, azot ve helyum gibi gazlar kullanılmaktadır (Altıntaş, 2017).

Sinterleme işlemi Şekil 4.6’da görüldüğü gibi ilk, orta ve son aşama olmak üzere üçe ayrılır. Sinterleme işleminin ilk aşamasında birbirleriyle noktasal temas halinde olan toz parçacıkları arasında kütle taşınım mekanizmasının etkisiyle boyun oluşumu başlar. Boyun oluşumunun temas noktalarında olmasının sebebi bu noktalardaki yüksek yüzey enerjisi sebebiyle taşınımın kolay olmasıdır (Altan, 2017).



Şekil 4.6. Sinterleme aşamalarının sıcaklıkla değişimi (a) ve sinterleme sırasında mikroyapıda meydana gelen değişimler (b) (Boushiha, 2020)

Sinterlemenin orta aşaması malzemenin yoğunluğu ve özelliklerinin belirlenmesi açısından en önemli aşamadır. Bu aşamada gözenekler yuvarlak bir şekil alırlar. Bu aşamanın sonlarına doğru ise taneler büyür ve gözenekler küçülür.

Gözeneklerin küçülmesine bağlı olarak da yoğunluk artışı gerçekleşir. Teorik yoğunluğun %90-95'ine bu aşamada erişilir (Dengiz, 2018; German, 2014).

Son aşamada ise tane büyümesinin yanı sıra birbirinden ayrılarak küresel şekil alan gözenekler tane sınırlarından ayrılır. Bu gözeneklerin büzülmesi sonucu gözeneklilik oranı azalır. Bu aşamada gerçekleşen tane büyümesinin çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi taneler arasında gözeneklerin kalmasına sebep olabilir (Altıntaş, 2017).

Sinterleme işlemi malzemenin faz durumuna göre katı ve sıvı hal sinterleme olmak üzere ikiye ayrılır. Katı faz sinterleme, ergime sıcaklığının altında gerçekleşen ve toz taneciklerinin katı fazlarını koruduğu sinterleme türüdür. Sıvı faz sinterlemede ise sinterlenen malzemenin bileşimindeki yapılardan en az biri sıvı fazda bulunmaktadır. Genellikle ergime sıcaklıkları arasında fark bulunan tozlardan oluşan malzemelerde kullanılan bir yöntemdir. Sıvı faz sinterlemede amaç, sıvı fazın katı partiküllerin aralarında bulunan gözenekleri doldurmasıyla malzemede yoğunluk artışı sağlamaktır (Altınışik, 2019).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında toz metalürjisi ve indüksiyonla ısıtılma yöntemleri kullanılarak Al7075 alüminyum matrisli grafen, ZrO₂ ve Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Al7075 alaşımı, alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek mukavemet değerine sahip olan alaşımdır. Aynı zamanda hafif bir malzeme olan Al7075 alaşımı otomotiv ve havacılık sanayi başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Özellikle uçaklarda yapı malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşımı piston, motor gövdeleri, mermi, silah parçaları ve uçakların iniş takımları gibi farklı uygulamalarda kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında da matris malzemesi olarak ~10 µm boyutunda Al7075 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılacak Al7075 tozları Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. 2,81 g/cm³ yoğunluğa ve 560 MPa çekme dayanımına sahip olan Al7075 alaşımına ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir (Kibar, 2010).

Tablo 5.1. Al7075 alüminyum alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (Kibar, 2010)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2,81
Poisson oranı	0,33
Ergime Sıcaklığı (°C)	466-635
Çekme Dayanımı (MPa)	560
Akma Dayanımı (MPa)	460-490
Elastisite Modülü (GPa)	71,7
Uzama (%)	6-11
Sertlik (Rockwell)	87 HRB
Isıl Genleşme Katsayısı (K ⁻¹)	23,4x10 ⁻²
Spesifik Isı Kapasitesi (J/kg.K)	865

Al7075 alüminyum alaşımının ana alaşım elementi çinko olmasına rağmen yapısında bakır ve magnezyum da bulundurulur. Bunların dışında yapısında eser miktarda silisyum, demir, mangan, krom ve titanyum barındırır. Tablo 5.2’de Al7075 alüminyum alaşımına ait kimyasal kompozisyon verilmiştir.

Tablo 5.2. Al7075 alüminyum alaşımına ait kimyasal kompozisyon (% ağırlıkça) (Muraliraja vd., 2018)

Zn	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Diğer	Al
5,1-6,1	1,2-2,0	2,1-2,9	0,5	0,4	0,3	0,18-0,28	0,20	0,15	Kalan yüzde

Bu çalışmada kullanılan takviye elemanlarından biri 5–8 nm kalınlığa ve 5 µm nominal çapa sahip olan grafendir. Grafen, grafitin tek katmanından oluşan karbon atomlarının iki boyutlu olarak altıgen şeklinde dizilmesiyle oluşmuş bir yapıdır. Bu iki boyutlu yapı grafene yüksek elektrik ve termal iletkenlik, yüksek kimyasal kararlılık, olağanüstü mekanik ve optik özellikler kazandırmaktadır. Grafen çelikten çok daha hafif bir yapı olmasına rağmen bir o kadar da sert bir malzemedir. Ayrıca sahip olduğu bu sertliğin yanında çok yüksek bir esneme yeteneğine sahip olması grafeni kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak cazip kılmaktadır. Tablo 5.3’de grafene ait fiziksel ve mekanik özellikler verilmiştir (Lee vd., 2013; Şubaşı, 2017).

Tablo 5.3. Grafenin fiziksel ve mekanik özellikleri (Şenel, 2018a)

Özellik	Değer
Hibrit Şekli	sp ²
Tabaka Sayısı	Çok tabakalı
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Bağ Yapısı	Kovalent bağ
Boyut	2
Yoğunluk (g/cm ³)	0,2-0,4
Kalınlık (nm)	5-8
Yüzey Alanı (m ² /g)	120-150
Termal İletkenlik (W/m ² K)	4840-5300
Elastisite Modülü (TPa)	~1
Çekme Dayanımı (GPa)	~1100
Saydamlık (%)	~97,4

Çalışma kapsamında kullanılan bir diğer takviye elemanı ise 70 nm boyutundaki zirkonyadır. Zirkonya; yüksek ergime sıcaklığı, yüksek aşınma dayanımı, yüksek korozyon dayanımı ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikleriyle bilinen bir ileri teknoloji seramiğidir. Zirkonya; monoklinik, tetragonal ve kübik olmak üzere üç farklı kristal yapıya sahiptir. Oda sıcaklığında monoklinik kristal yapıda bulunan zirkonya 1170°C’den sonra tetragonal yapıya geçiş yapar ve 2370°C’den sonra kübik kristal yapının özelliklerini göstermeye başlar. Tablo 5.4’de zirkonyaya ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler verilmiştir (Şimşek, 2019).

Tablo 5.4. Zirkonyanın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Gautam vd., 2016)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	5,68
Ergime Sıcaklığı (°C)	2823-2973
Kaynama Sıcaklığı (°C)	4300
Poisson Oranı	0.22-0.32
Çekme Dayanımı (MPa)	115-711
Basma Dayanımı (MPa)	1200-5200
Elastisite Modülü (GPa)	100-250

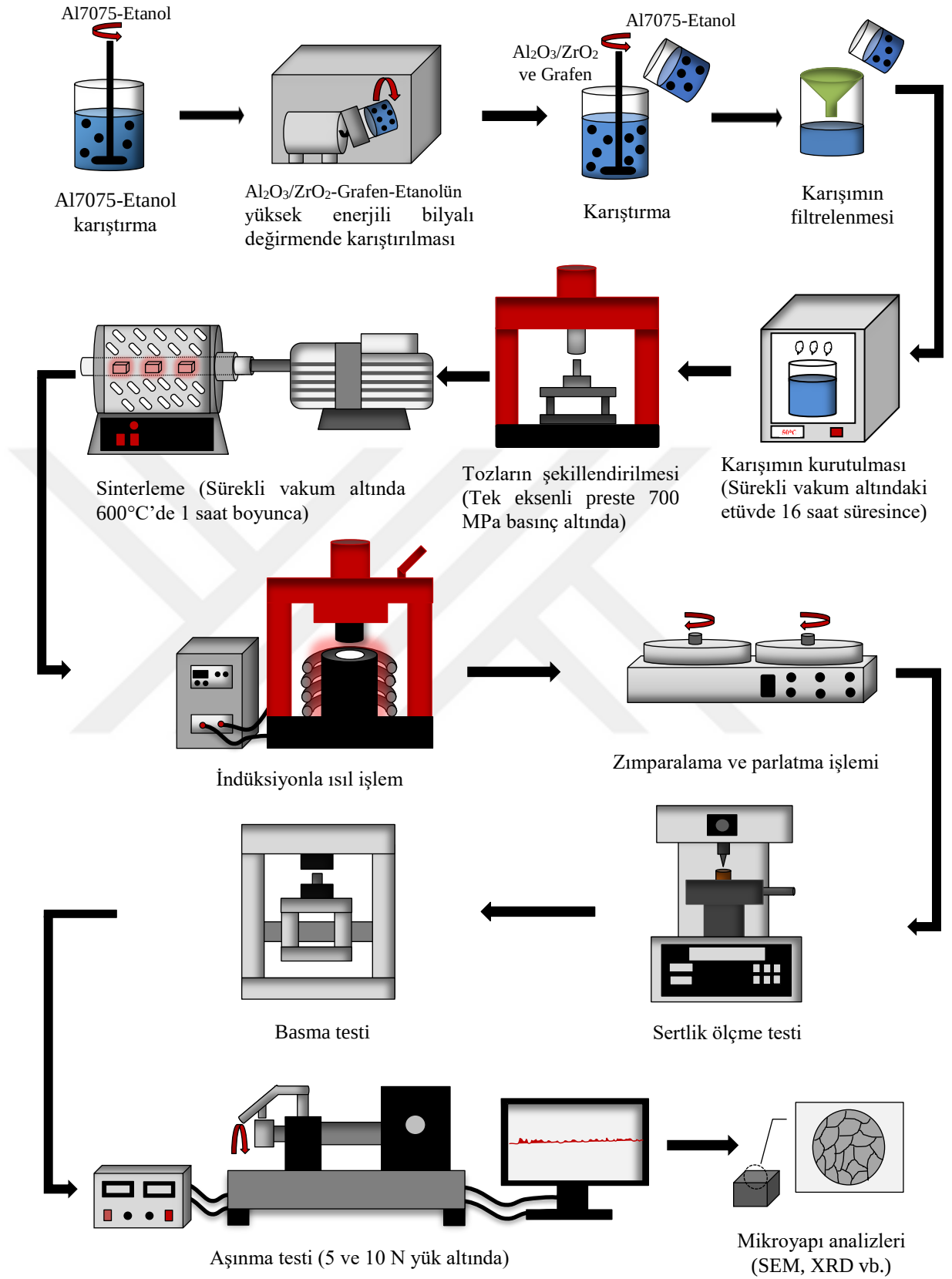
Takviye elemanı olarak kullanılan $\sim 4 \mu\text{m}$ boyuta sahip olan alümina (Al_2O_3) Hindalco (Hindistan) firmasından temin edilmiştir. Alümina; yüksek sertlik, yüksek basma dayanımı, yüksek elastisite modülü ve yüksek ergime sıcaklığı gibi özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu özellikler sayesinde başta kesici takımlar, bujiler, hafif zırhlar ve yüksek voltaj seramikleri olmak üzere birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Tablo 5.5’de alüminanın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir (Kaya ve Öz, 2020).

Tablo 5.5. Alüminanın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Mahdipour, 2022)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	3,98
Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	2072
Kaynama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	2977
Poisson Oranı	0,21
Çekme Dayanımı (MPa)	300-630
Basma Dayanımı (MPa)	2000-4000
Elastisite Modülü (GPa)	360

5.2. Yöntem

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi kullanılarak Al7075-ZrO_2 -grafen ve $\text{Al7075-Al}_2\text{O}_3$ -grafen hibrit kompozitlerin üretimi gerçekleştirilerek mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin üretim süreci; karıştırma, filtreleme, kurutma, eleme, şekillendirme, sinterleme ve indüksiyonla ısıtılma işleminden oluşmaktadır. Şekil 5.1’de üretim süreci şematik olarak verilmiştir.

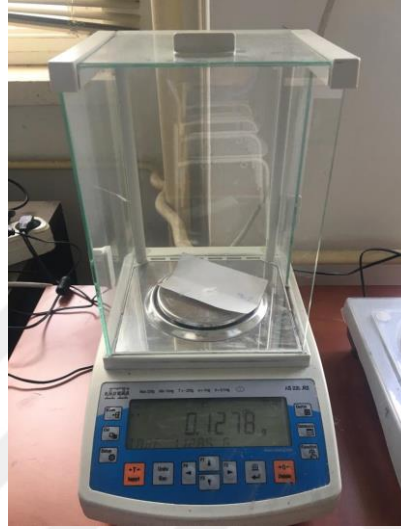


Şekil 5.1. Toz metalürjisi yöntemiyle üretim ve karakterizasyon süreci

5.2.1. Toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretimi

5.2.1.1. Tozların hazırlanması

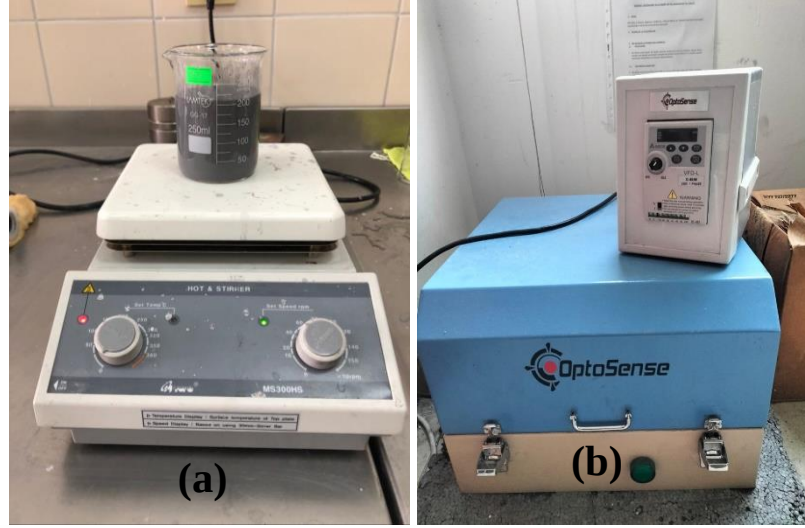
Çalışmanın ilk aşamasında tozlar hazırlanmıştır. Bunun için öncelikle kullanılacak tozların tartım işlemleri yapılmıştır. Tartım işlemi için Şekil 5.2’de gösterilen Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMÜ) Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarındaki Radwag AS 220.R2 marka hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Hassas terazide tartım işlemi

Ağırlığı belirlenen Al7075 tozu ve 100 ml etanol bir beher içerisine konularak OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarındaki Mtops MS300HS marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı yardımıyla 20 dk boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik karıştırma işlemi Şekil 5.3a’da gösterilmiştir.

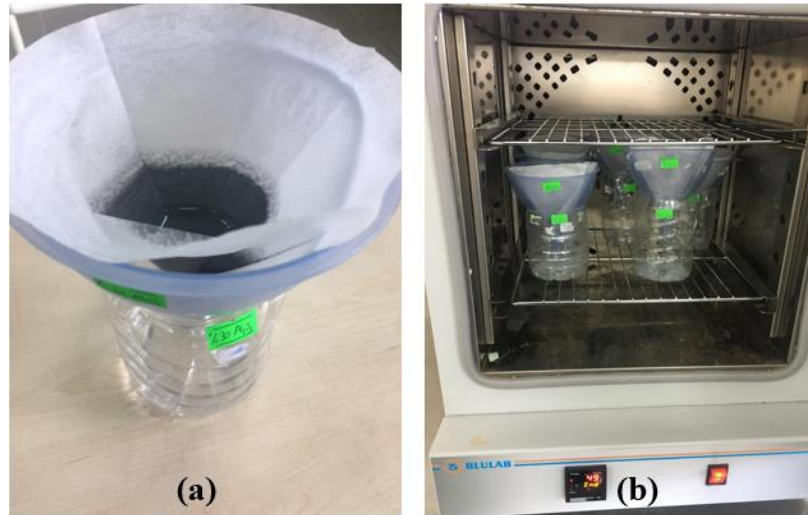
Grafen, kalınlığı çok düşük olan ve topaklanma eğilimi gösteren bir malzemedir. Topaklanmaların engellenmesi ve homojen bir yapı elde edilebilmesi amacıyla grafen ve seramik tozları yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi için öncelikle karıştırma haznesine hacimce 1/3 oranında zirkon bilya ve 1/3 oranında ise etanol-grafen-seramik karışımı ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım 1200 dev/dk’da 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi için Şekil 5.3b’de gösterilen MTI marka MSK-SFM-3 model yüksek enerjili bilyalı değirmen kullanılmıştır. Ardından matris-takviye elemanı etkileşimini arttırmak amacıyla ZrO_2 -grafen-etanol karışımı damla damla Al7075-etanol karışımına içerisine eklenerek ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 20 dakika boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 5.3. Isıtıcılı manyetik karıştırıcı (a) ve yüksek enerjili bilyalı değirmen (b)

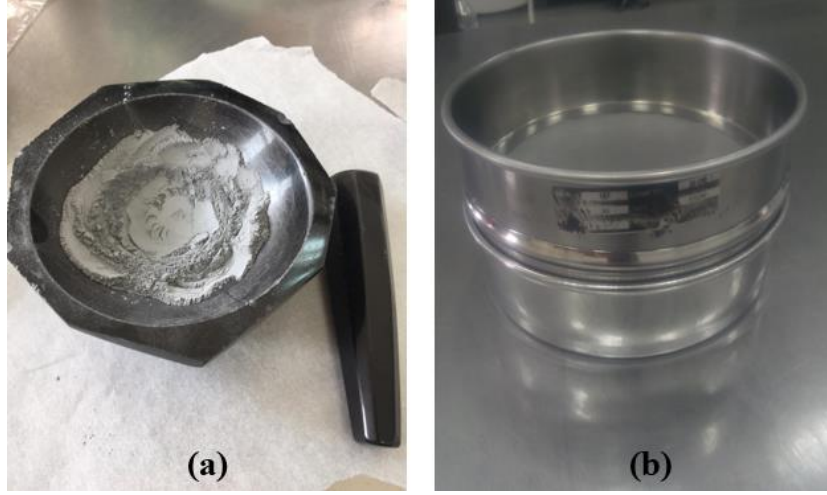
5.2.1.2. Karışımın filtrelenmesi, kurutulması ve elenmesi işlemi

Karıştırma işleminden sonra hazırlanan karışım içerisinde etanolü uzaklaştırmak amacıyla karışım 6 saat boyunca filtrelenir. Filtreleme işleminden sonra toz karışımı içerisinde kalan nemin uzaklaştırılması amacıyla karışımın 50°C sıcaklıkta sürekli vakum altında 16 saat süresince kurutulur. Filtreleme ve etüvde kurutma işlemleri Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Karışımın filtrelenmesi (a) ve etüvde kurutulması (b)

Etüvden çıkarılan tozlar, topakların giderilmesi amacıyla agat havanda hafif bir şekilde dövülür. Ardından dövülen tozlar 200 μm 'lik elek kullanılarak elenir. Elenen tozlar paketlenerek presleme işlemi için hazır hale getirilir. Şekil 5.5’de agat havanda dövme ve elekte eleme işlemleri görülmektedir.



Şekil 5.5. Toz karışımının agat havanda dövülmesi (a) ve elenmesi (b)

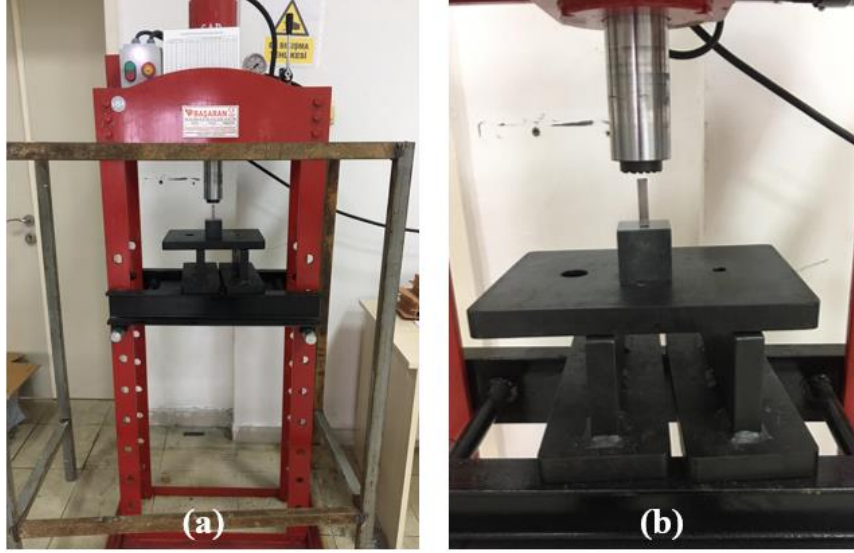
5.2.1.3. Tozların preslenmesi işlemi

Üretilen toz karışımının şekillendirilmesi amacıyla presleme işlemi yapılmıştır. Presleme işleminde Şekil 5.6'da gösterilen 10 ton yüke dayanıklı paslanmaz çelik kalıp kullanarak 10×10 mm boyutlarında kare kesitli numuneler üretilmiştir.



Şekil 5.6. Presleme işleminde kullanılan paslanmaz çelik kalıp

Presleme öncesinde, sıkıştırma ve numune çıkartma işlemlerinin kalıba zarar vermemesi amacıyla her işlem öncesi kalıbın iç duvarı temizlenerek yağlanır. Hazırlık işlemlerinin ardından miktarı belirlenen toz karışımı kalıba konularak Şekil 5.7'de gösterilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Başaran Hidrolik marka tek eksenli hidrolik pres kullanılarak 700 MPa basınç altında şekillendirilir.



Şekil 5.7. Şekillendirme işlemi için kullanılan hidrolik pres (a) ve presleme işlemi (b)

5.2.1.4. Numunelerin sinterlenmesi işlemi

Şekillendirilen numuneler belirli bir ham yoğunluk ve mukavemet değerine sahiptir. Ancak bu değerler istenilen seviyelerde değildir. Bu yüzden sinterleme işlemiyle numunelerin yoğunluk ve mukavemet değerlerinin artırılması amaçlanmaktadır. Sinterleme işlemi Şekil 5.8’de gösterilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Protherm marka tüp fırında yapılmıştır.



Şekil 5.8. Sinterleme işleminde kullanılan tüp fırın

Sinterleme işlemi, alüminyumun hızlı oksitlenmesinden dolayı sürekli vakum altında yapılmıştır. Vakumlama işlemi için Şekil 5.9’da gösterilen 5×10^{-2} Pa vakum

basıncına sahip OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Value marka vakum pompası kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Vakum pompası

Sinterleme işlemi için numuneler öncelikle yüksek sıcaklığa dayanıklı kuartz cam tüp içerisine yerleştirilmiştir. Ardından bu tüp çelik hortum ve kelepçe gibi bağlantı elemanlarının yardımıyla vakum pompasına bağlanmış ve numuneler 10 dk boyunca vakuma alınmıştır. Daha sonra tüp fırına yerleştirilen kuartz cam tüp içerisindeki numuneler sürekli vakum altında 600°C’de 60 dk boyunca sinterlenmiştir.

5.2.1.5. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi

Çalışma kapsamında üretilen kompozit numunelerde yüksek yoğunluk, yüksek mekanik özellik ve düşük gözeneklilik oranı elde etmek amacıyla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem yapılmıştır. Bu işlem sayesinde numunelere hem ısıtma işlemi hem de presleme işlemi uygulanabilmektedir. İndüksiyonla ısıtma işleminde sıcaklık ve basınç birlikte uygulandığından taneler birbirine yaklaşır. Aynı zamanda işlem süresinin kısa olmasından dolayı içyapıda tane büyümesi ve malzeme yüzeyinde oksidasyon oluşmaz. Şekil 5.10’da gösterilen indüksiyon cihazı 15 kW çıkış gücüne, 0-34 A çıkış akımına ve 30-80 Hz frekansa sahiptir. Bunun dışında ısıtma, soğutma, bekleme süreleri ve bu sürelerdeki enerji miktarı kontrol paneli üzerinden ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.10. İndüksiyonla sıcak işlem cihazı

İndüksiyonla ısıtmada, indüksiyon bobinine değişken akım uygulanmakta ve bobin üzerinde bir manyetik alan oluşturulmaktadır. Bu manyetik alanda bulunan iletken malzemenin üzerinde Eddy akımları dolaşmaktadır. Üzerinde Eddy akımları bulunan malzemenin sahip olduğu iç dirençten kaynaklı olarak kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıplardan dolayı da malzemenin hızlı bir şekilde ısıtılması sağlanabilmektedir. Geleneksel ısıtma yöntemlerinin aksine ısıtma için malzemenin kendi yapısından yararlanılmaktadır. İndüksiyonla ısıtmada yüksek verimle hızlı ısıtma gerçekleştirilebilmektedir. Aynı zamanda kontrolünün kolay olması, güvenli ve temiz bir üretim süreci sunması indüksiyonla ısıtmanın avantajları arasındadır (Dalcı vd., 2020).

İndüksiyonla ısıtma işleminin optimum parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda optimum parametreler 500°C işlem sıcaklığı, 41 saniye ısıtma süresi, 30 saniye bekleme süresi, 10 saniye soğutma süresi ve 25 MPa presleme basıncı olarak belirlenmiştir. Ayrıca indüksiyonla ısıtma işleminde kullanılan grafit kalıptaki sıcaklık değişimlerinin tespit edilebilmesi amacıyla kızılötesi termometre kullanılmıştır.



Şekil 5.11. İndüksiyonla ısıtma işlemi parametrelerinin ayarlandığı kontrol paneli

Şekil 5.11’de gösterilen kontrol paneli üzerinden optimum parametreler ayarlandıktan sonra numuneler grafit kalıp içerisine yerleştirilerek 41 saniyede 500°C sıcaklığa çıkartılmış ve numunelere tek eksenli pres yardımıyla 25 MPa basınç uygulanmıştır. 30 saniye bekleme ve 10 saniye soğutma süresinin ardından kuvvet kaldırılmış ve numuneler grafit kalıptan çıkarılmıştır.

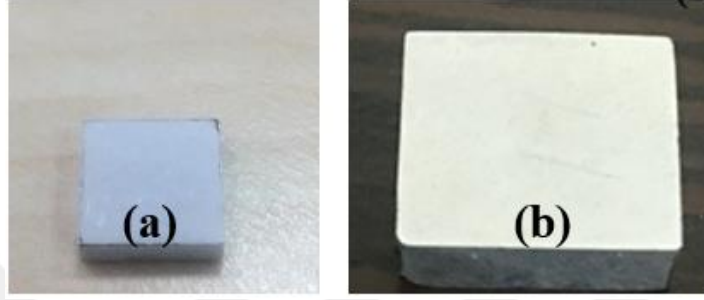
5.2.1.6. Zımparalama ve parlatma işlemi

Sinterlenen ve ısıtma işlemi gören numunelerin yüzeyinde bulunan oksit tabakanın uzaklaştırılması amacıyla numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Şekil 5.12’de gösterilen Metkon marka zımparalama ve parlatma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Zımparalama ve parlatma cihazı

Zımparalama işlemi için SiC su zımparaları, parlatma işlemi için ise elmas çuha ve alümina solüsyonu kullanılmıştır. Numuneler sırasıyla 600'lük, 1200'lük ve 2500'lük su zımparaları kullanılarak 300 dev/dk dönme hızında 15 dk boyunca zımparalanmıştır. Ardından elmas solüsyon çuha üzerine sıkılarak numuneler 300 dev/dk dönme hızında 15 dk boyunca parlatılmıştır. Şekil 5.13'de zımparalama ve parlatma işlemi öncesi ve sonrası numune yüzeyi görülmektedir.

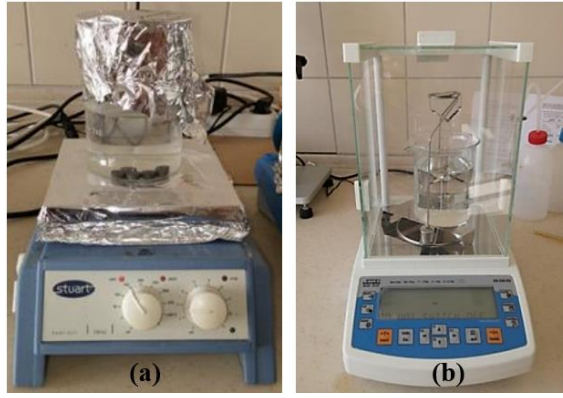


Şekil 5.13. Zımparalama ve parlatma işlemi öncesi (a) ve sonrası (b) numune yüzeyi

5.2.2. Test yöntemleri ve karakterizasyon teknikleri

5.2.2.1. Yoğunluk ve gözeneklilik ölçümü

Üretilen numunelerin sinterleme öncesi, sinterleme sonrası ve indüksiyonla ısıtılma işlem sonrası yoğunluklarının belirlenebilmesi amacıyla Arşimet metodu kullanılmıştır. Bu metotla yoğunluk ölçümünde, öncelikle numunelerin kuru ağırlıkları (m_k) alınmıştır. Ardından numuneler kaynamış su içerisinde 3 saat bekletilerek açık gözeneklerin su ile dolması sağlanmıştır. Bu işlemin ardından Arşimet terazisi kullanılarak numunelerinin su içindeki asılı ağırlıkları (m_a) alınmıştır. Son olarak ise, kompozitlerin doymuş ağırlıklarını (m_d) belirlemek amacıyla kaynamış su içerisinde bekleyen numunelerin ağırlıkları alınmıştır. Şekil 5.14'te numunelere su emdirilmesi ve Arşimet terazisiyle asılı ağırlıkların alınması süreçleri görülmektedir.



Şekil 5.14. Numunelere su emdirilmesi (a) ve Arşimed terazisinde asılı ağırlıkların ölçümü (b)

Elde edilen ağırlık sonuçları Denklem 5.1’de yerine yazılarak deneysel yoğunluk değeri (ρ_D) hesaplanmıştır. Ölçümler sırasında su kullanıldığından denklemdaki ρ_{su} değeri 1 g/cm^3 olarak alınmıştır. Yoğunluk hesabı için beş farklı ölçüm alınıp sonuçların ortalaması yoğunluk değeri olarak kabul edilmiştir.

$$\rho_D = \frac{m_k}{(m_d - m_a)} \times \rho_{su} \quad (5.1)$$

Kompozitlerin teorik yoğunlukları ise kullanılan tozların ağırlıkça oranları ve teorik yoğunlukları kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 5.2’deki $\%m_m$, $\%m_t$ sırasıyla matris ve takviye malzemenin ağırlıkça katkı oranını göstermektedir. ρ_m ve ρ_t ise matris ve takviye malzemelerinin yoğunluğunu ifade etmektedir (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

$$\rho_T = (\%m_m \times \rho_m) + (\%m_t \times \rho_t) \quad (5.2)$$

Numunelerin bağıl yoğunluğu ($\%\rho_R$) ise Denklem 5.3 yardımıyla hesaplanmaktadır (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

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

Kompozit numunelerin yapısında üretim sürecinden kaynaklanan gözenekler bulunabilmektedir. Bu gözenekler, malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedirler. Bu yüzden gözeneklilik oranının ($\%G$) belirlenmesi amacıyla;

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

bağıntısı kullanılmaktadır (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

5.2.2.2. Vickers sertlik ölçümü

Yüzeyleri zımparalanıp parlatılan numunelerin sertliklerinin belirlenmesi amacıyla Vickers sertlik ölçme testi kullanılmıştır. Vickers sertlik ölçme testi, 136° tepe açılı kare piramit şekilli bir elmas ucun malzeme yüzeyine batırılmasıyla gerçekleştirilir. Ardından yüzeyde oluşan izin boyutları optik mikroskop yardımıyla ölçülerek malzemenin sertlik değeri belirlenmektedir.

Vickers sertlik ölçme testi, hem yumuşak hem de sert malzemelere (5-1500 HV aralığı) uygulanabilen bir sertlik ölçüm yöntemidir. Bu özelliğinden dolayı kaplamalar, yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler, seramikler ve ince kesitli parçalar gibi farklı malzeme gruplarının sertlik ölçümünde tercih edilmektedir. Vickers sertlik ölçme testi, kısa işlem süresi, batma derinliğinin küçük olması, yüzeyde belirgin iz bırakmaması, yüksek doğruluk ve düşük maliyet gibi özellikleri sayesinde diğer sertlik ölçüm yöntemlerinden ayrılmaktadır (Argıncıklıgil, 2019).

Bu tez çalışmasında sertlik ölçümleri için Şekil 5.15’de gösterilen OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan HV1000B marka Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda kare piramit elmas uç kullanılarak malzeme yüzeyine farklı değerlerde (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) yükler uygulanabilmektedir.



Şekil 5.15. Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı

Bu çalışmada üretilen numunelerin yüzeyleri zımparalanıp parlatıldıktan sonra sertlik ölçümü yapılmıştır. Numuneler cihaza yerleştirildikten sonra elmas uç yardımıyla yüzeye 15 saniye boyunca 200 gf yük uygulanmıştır. Uygulanan yükten dolayı numune yüzeyinde oluşan izin köşegen uzunlukları (d_1 ve d_2) sertlik ölçme cihazı üzerinde bulunan mikroskop ve mikrometreler yardımıyla ölçülmüştür. Ardından elde edilen bu değerler Denklem 5.5’de verilen eşitlikte yerine konularak sertlik değeri hesaplanmıştır. Ayrıca numune yüzeyinden 5 farklı ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmış ve ortalama sertlik değeri belirlenmiştir.

$$HV = 1.854 \times \left(\frac{P}{d^2} \right) \quad (5.5)$$

Denklemde HV Vickers sertlik değerini, P uygulanan yük değerini (daN), d ise köşegen uzunluklarının ortalamasını (mm, $((d_1+d_2)/2)$) temsil etmektedir (Comba, 2020).

5.2.2.3. Basma dayanımı tespiti

Üretilen kompozit malzemelerin basma dayanımının belirlenebilmesi amacıyla basma testi uygulanmıştır. Basma testleri için OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan 10 ton yük uygulayabilen üniversal test cihazı (Mares marka TST-10t model) kullanılmıştır. Çalışma sırasında kullanılan basma test cihazı Şekil 5.16’da verilmiştir.

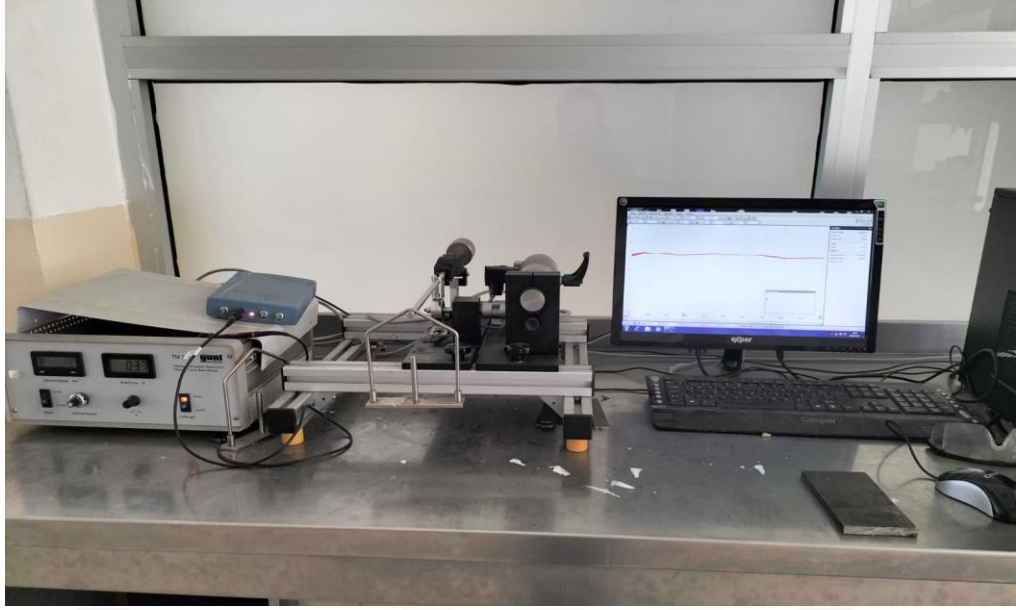
Basma testi için test parametreleri 3 mm/dk basma hızı, 1 mm/dk ön yük hızı ve 5 MPa ön yük olarak seçilmiştir. Basma testi için öncelikle numune şekli ve boyutları bilgisayar programına girilmiştir. Ardından cihaza girilen parametrelere göre malzemelere ait gerilme değerleri bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 5.16. Basma test cihazı

5.2.2.4. Aşınma ve sürtünme verilerinin tespiti

Üretilen numunelerin tribolojik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çalışma kapsamında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri için Şekil 5.17’de gösterilen OMÜ Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında yer alan GUNT TM260 marka triboloji deney seti kullanılmıştır. Triboloji deney setinde düzeneğe 0-80 N arasında yük uygulanabilmektedir. Mil dönüş hızı ise kontrol ünitesi yardımıyla kontrol edilebilmekte ve maksimum dönüş hızı olan 250 dev/dk’ya kadar ayarlanabilmektedir. Ayrıca sürtünme kuvveti değeri de kontrol ünitesi üzerinden elde edilebilmektedir. Ardından bu veriler PICO 4424 veri kaydecisi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Çalışma kapsamında da bu deney setinde bulunan karşı disk ve silindir blok arasındaki aşınma ve sürtünme deney modülü kullanılmıştır. Bu modül yardımıyla karşı disk ve numuneler arasındaki aşınma ve sürtünme davranışı araştırılmıştır.



Şekil 5.17. Aşınma test düzeneği

Aşınma testleri 5 ve 10 N olmak üzere iki farklı yük altında, 200 dev/dk dönüş hızında 40 dakika boyunca kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında 20 mm yarıçapa ve 50 HRC sertliğe sahip AISI304 paslanmaz çelikten yapılmış bir aşındırıcı disk kullanılmıştır. Aşınma testi sırasında, üretilen kompozit numune düzende yer alan tutucuya sabitlenir ve uygulanacak yük (5 ve 10 N) yükleme sepetine eklenir. Kontrol ünitesinden sürtünme kuvveti göstergesi sıfırlandıktan sonra sistem çalıştırılmaktadır. Aşındırıcı diskin dönmeye başlamasıyla birlikte elde edilen sürtünme kuvveti verileri veri kaydedici yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

Aşınma testleri gerçekleştirildikten sonra numunelerin aşınma davranışlarının değerlendirilebilmesi amacıyla kütle kaybı, aşınma hacmi, aşınma oranı, sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı parametreleri hesaplanmıştır.

Kütle kaybı (Δm), Denklem 5.6'da gösterildiği gibi hassas terazi yardımıyla ölçülen aşınma öncesi kütle değerinden (m_i) aşınma sonrası kütle değerinin (m_s) çıkarılmasıyla elde edilir (Mutuk vd., 2020).

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

Aşınma hacmi (ΔV), Denklem 5.7'de gösterildiği gibi kütle kaybının (Δm) deneysel yoğunluğa (ρ_D) bölünmesiyle elde edilmektedir. Aşınma davranışının belirlenmesi için önemli bir parametre olan aşınma hacminin birimi mm^3 veya cm^3 olarak verilmektedir (Mutuk vd., 2020).

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

Farklı malzemeler arasında aşınma miktarını karşılaştırmak amacıyla kullanılan aşınma oranı (W), birim yük ve mesafedeki hacimsel aşınma miktarı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma oranı, hacimsel aşınma (ΔV), kayma mesafesi (L) ve uygulanan yük (F) parametrelerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Denklem 5.8 yardımıyla hesaplanan aşınma oranının birimi mm³/Nm veya cm³/Nm olarak verilmektedir (Mutuk vd., 2020).

$$W = \frac{\Delta V}{FL} \quad (5.8)$$

Denklem 5.8’de yer alan kayma mesafesi değeri, aşındırıcı disk yarıçapı (r), disk dönüş hızı (n) ve test süresi (t) değerleri kullanılarak Denklem 5.9’daki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır (Mutuk vd., 2020).

$$L = 2\pi r \times n \times t \quad (5.9)$$

5.2.2.5. Tanecik boyut dağılımı analizi

Tez çalışmasında, üretimde kullanılan tozların tane boyutlarının doğrulanması amacıyla tane boyut ölçümü yapılmıştır. Bu işlem, OMÜ KİTAM bünyesinde bulunan 0,01-3500 µm aralığındaki toz boyutlarını ölçebilen Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5.18’de kullanılan tane boyut ölçüm cihazı verilmiştir.



Şekil 5.18. Tane boyut ölçüm cihazı

5.2.2.6. X-ışını kırınım (XRD) analizi

X-ışını kırınım (XRD) analizi, malzemelerin kristal yapıları ve yapısında bulundukları fazlar hakkında bilgi veren hasarsız bir analiz yöntemidir. Bu analiz yönteminde malzeme üzerine gönderilen X-ışınları malzeme düzlemlerine bağlı

olarak farklı açılarda kırınıma uğrar. Bu işlem sonucu elde edilen kırınım desenleri yardımıyla malzemenin kristal ve faz yapısı hakkında bilgiler edinilebilir (Chauhan vd., 2014).

Çalışma kapsamında kullanılan tozların ve üretilen kompozit malzemelerin X-ışını kırınımı analizi için Şekil 5.19’da gösterilen OMÜ KİTAM bünyesindeki Rigaku Smart Lab model X-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır.

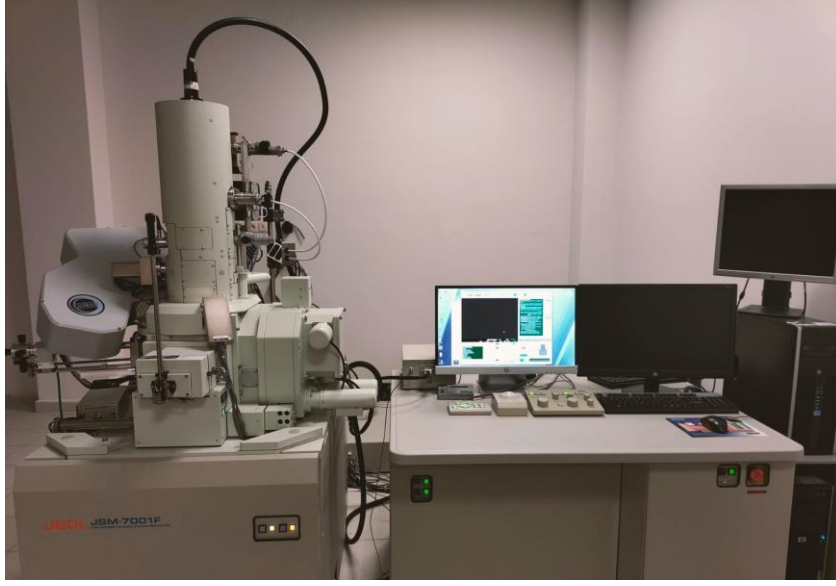


Şekil 5.19. X-ışını kırınım (XRD) cihazı

5.2.2.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek enerjili elektronların numune yüzeyine odaklanarak yüzeyi taraması sonucu yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Numune yüzeyine temas eden yüksek enerjili elektronlar gerçekleşen etkileşim sonucu farklı açılarda geri yansır. Numune yüzeyinden geri yansıyan bu düşük enerjili elektronlar bir dedektör yardımıyla toplanarak görüntü elde edilmesi sağlanır. Analiz edilen bu görüntüler yardımıyla malzemelerin faz yapısı, yüzey topografisi ve tanecik boyutu gibi bilgiler elde edilebilmektedir (Mohammed and Abdullah, 2018).

Bu tez çalışması kapsamında da üretilen numunelerin kırık yüzeylerini ve kullanılan tozların morfolojilerini incelemek amacıyla OMÜ KİTAM bünyesinde yer alan Jeol marka JSM7001F model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 5.20’de kullanılan taramalı elektron mikroskobu gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Taramalı elektron mikroskobu

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

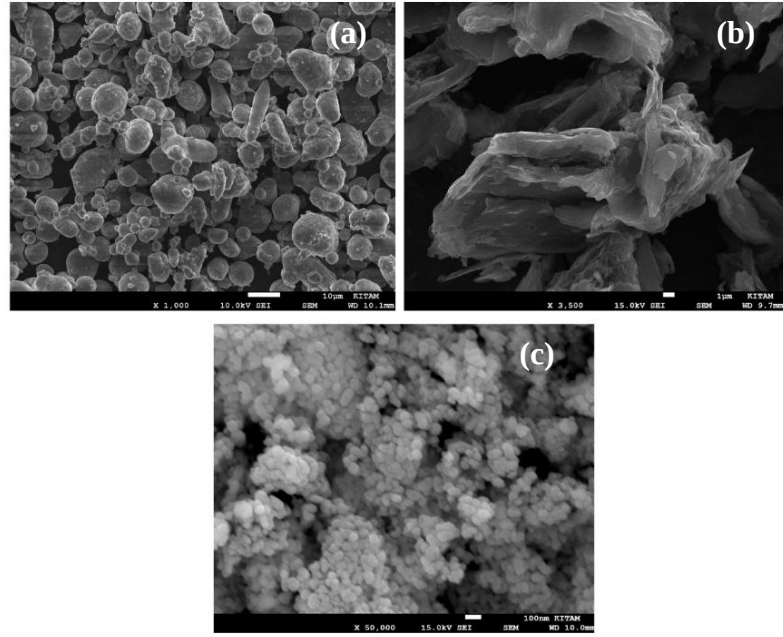
Bu çalışma kapsamında Al7075-Al₂O₃, Al7075-ZrO₂, Al7075-ZrO₂-Grafen ve Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlerin üretimi toz metalürjisi ve indüksiyonla ısıtılma yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen yoğunluk, gözeneklilik oranı, sertlik, basma dayanımı, aşınma test sonuçları ve mikroyapı analizleri bu bölümde detaylı olarak değerlendirilmiştir.

6.1. Al7075 Matrisli ZrO₂/Grafen Takviyeli Kompozitlerin Analiz Sonuçları

Bu bölümde Al7075-ZrO₂ (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ZrO₂ takviyesi) ve Al7075-ZrO₂-Grafen (ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 grafen takviyesi) kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve tribolojik test sonuçları detaylı olarak verilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle Al7075-ZrO₂ kompozit numuneler üretilerek en iyi mekanik ve tribolojik özelliklere sahip takviye oranı tespit edilmiştir. Ardından tespit edilen ZrO₂ takviye oranı sabit tutularak yapıya farklı oranlarda grafen ilavesinin numunelerin mikroyapı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler bu bölümde sunularak sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiştir.

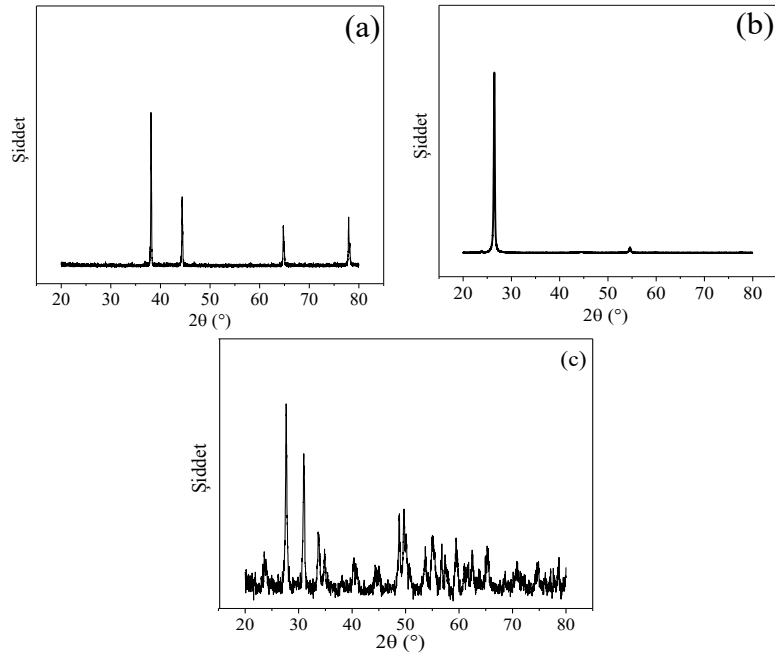
6.1.1. Tozların SEM, XRD analizleri ve tane boyut dağılımı

Tez çalışması kapsamında kullanılan Al7075 alüminyum alaşımı, ZrO₂ ve grafen tozlarının SEM görüntüleri alınmış ve toz morfolojileri incelenmiştir. Şekil 6.1'de çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.1(a)'da yer alan Al7075 alüminyum alaşım tozuna ait x1000 büyütme SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere tozların ~10 µm ortalama tanecik boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Al7075 alüminyum alaşımı tozunun düzensiz yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 6.1(b)'deki grafen tozunun x3500 büyütme SEM görüntüleri incelendiğinde, grafenin plakamsı ve tabakalı bir yapıda olduğu görülmektedir. Bunun yanında grafen tozlarının yaklaşık 10 nm kalınlığa ve 10 µm nominal çapa sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.1(c)'de yer alan nano-ZrO₂ tozları ise küresel bir morfolojiye sahiptir. Ayrıca SEM görüntülerinden, ZrO₂ tozlarının yaklaşık ~70 nm ortalama tanecik boyutuna sahip olduğu görülmektedir.



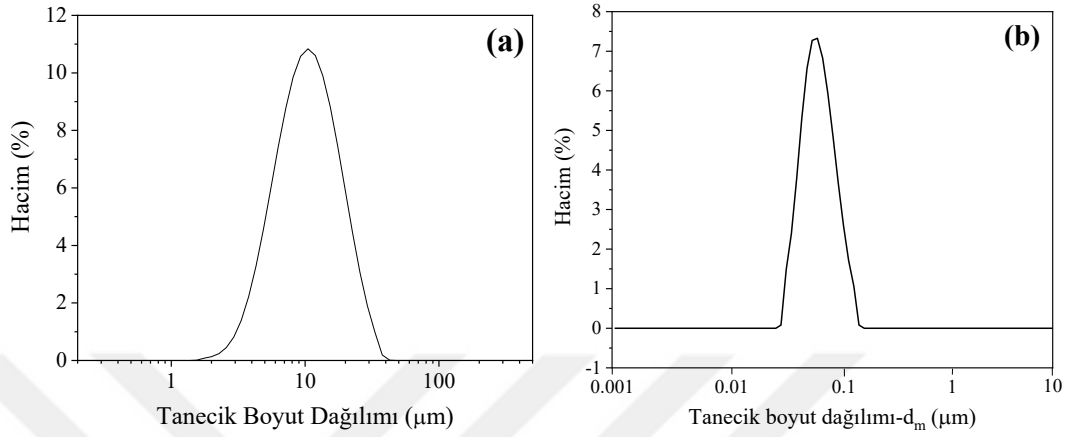
Şekil 6.1. Al7075 alaşımı (a), grafen (b) ve ZrO₂ (c) tozlarına ait SEM görüntüleri

Al7075 alüminyum alaşımı, nano-ZrO₂ ve grafen tozlarına ait XRD örgü desenleri Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde; Al7075 alüminyum alaşımına ait kırınım açıları $2\theta = \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ$ ve 78° olarak tespit edilmiştir. Kullanılan takviye elemanları olan ZrO₂ ve grafen tozlarına ait kırınım açılarının sırasıyla $2\theta = \sim 28,2^\circ, 31,5^\circ, 33,8^\circ, 38,5^\circ, 41,2^\circ, 45,4^\circ, 50,1^\circ, 56,3^\circ, 59,8^\circ, 62,7^\circ, 65,4^\circ, 71,2^\circ, 74,8^\circ, 78,3^\circ$ ve $2\theta = \sim 26,5^\circ$ olduğu görülmüştür.



Şekil 6.2. Al7075 alüminyum alaşım (a), grafen (b) ve ZrO₂ (c) tozlarına ait XRD örgü desenleri

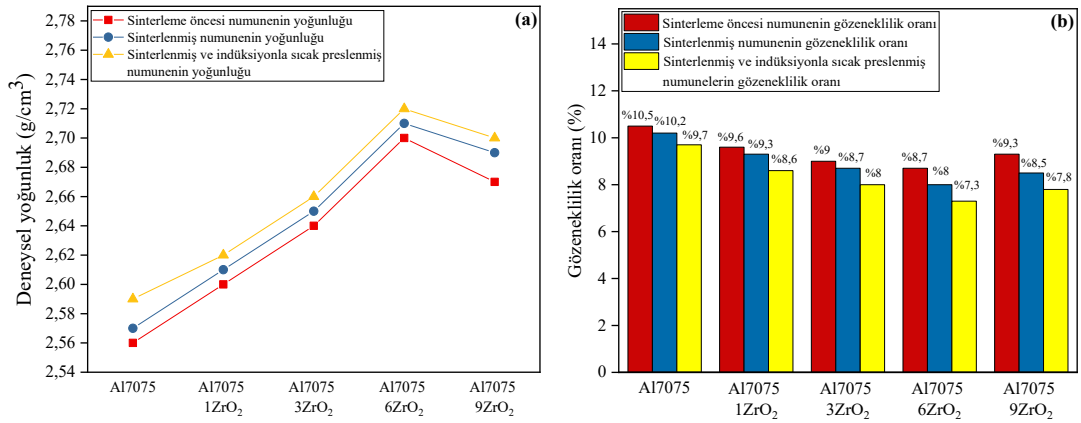
Al7075 alüminyum alaşımları ve nano-ZrO₂ tozlarının ortalama tanecik boyutlarını tespit etmek amacıyla tanecik boyut dağılım analizi yapılmıştır. Şekil 6.3’de verilen analiz sonuçlarına göre, Al7075 alüminyum alaşımlarının ve ZrO₂ tozlarının sırasıyla ~10 µm ve ~70 nm ortalama tanecik boyutuna sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3. Al7075 alüminyum alaşım (a) ve ZrO₂ (b) tozlarına ait tanecik boyut dağılımı

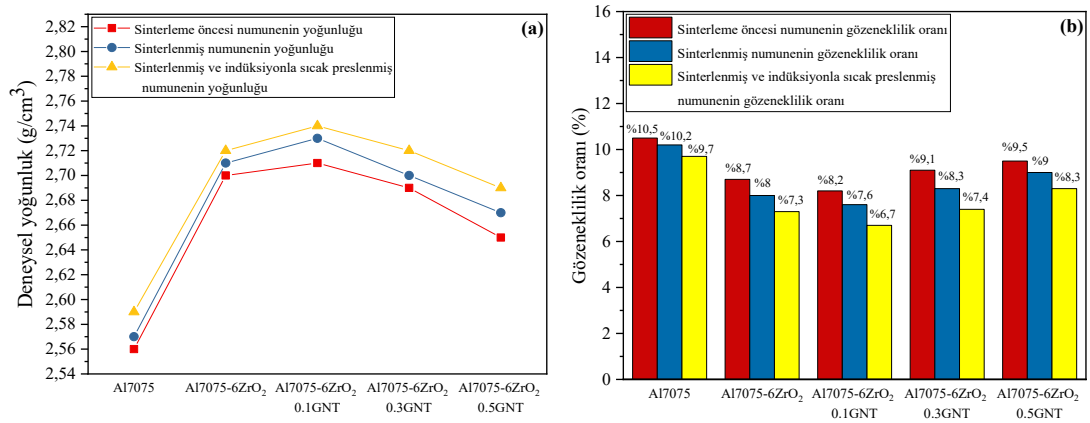
6.1.2. Yoğunluk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 6.4’de Al7075-ZrO₂ kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerlerinin ZrO₂ takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekiller incelendiğinde; artan ZrO₂ takviye oranıyla birlikte yoğunluk değerinin arttığı görülmüştür. Bu durumun yüksek yoğunluklu ZrO₂ partiküllerinin (5,68 g/cm³) mikroyapıya ilave edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemleri ile de yoğunluk değeri artış gösterirken gözeneklilik oranı azalmıştır. Sinterleme sırasında meydana gelen atomik difüzyon olayı sayesinde toz partikülleri birbirine bağlanmakta ve gözeneklilik oranı düşmektedir. Sinterlenen bu numunelere indüksiyonla sıcak presleme işlemi de uygulandığında taneler birbirine daha da yaklaşmakta ve yapıdaki gözeneklilik oranı sinterleme öncesine göre ciddi ölçüde azalmaktadır. Ayrıca gözeneklilik oranındaki düşüş numunelerin yoğunluklarının artmasına da neden olmaktadır. Bundan dolayı üretilen numunelerde en yüksek yoğunluğa (2,72 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranına (%7,3) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂ kompozitlerde erişilmiştir. Ancak bu katkı oranından (ağırlıkça%6) sonra mikroyapıda toplanan nano boyutlu ZrO₂ partikülleri nedeniyle yoğunluk değeri düşerken gözeneklilik oranı artmıştır.



Şekil 6.4. Al7075-ZrO₂ kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısı işlem türüne bağlı olarak değişimi

Optimum ZrO₂ takviye oranı belirlendikten sonra bu değer (ağırlıkça %6) sabit tutularak mikroyapıya grafen takviyesi (ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) yapılmıştır. Şekil 6.5’de Al7075-%6ZrO₂-grafen hibrit kompozitlere ait yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere en yüksek yoğunluğa (2,74 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranına (%6,7) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,1grafen kompozitte ulaşılmıştır. Ancak artan grafen takviye oranıyla birlikte yoğunluk değerinde azalma görülmüştür. Bu durumun elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle toplanan grafen partikülleri sebebiyle mikroyapıdaki gözeneklilik oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

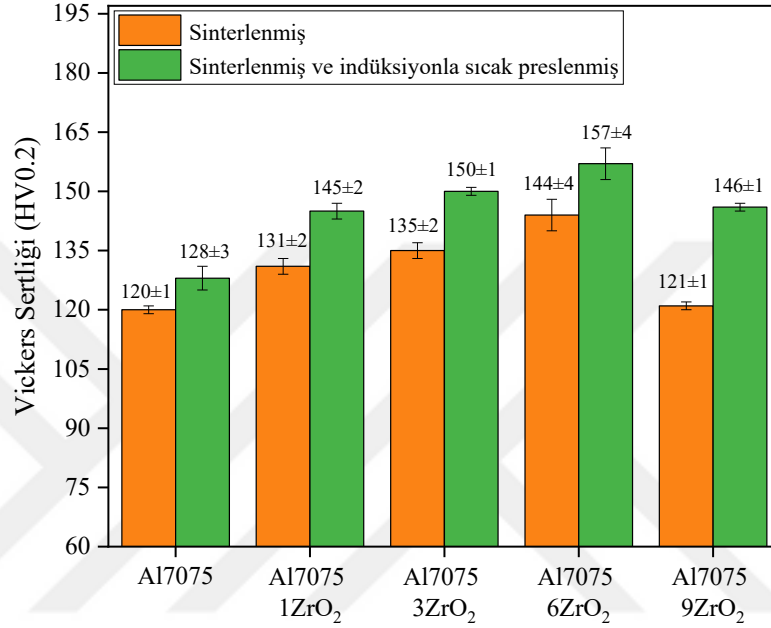


Şekil 6.5. Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısı işlem türüne bağlı olarak değişimi

6.1.3. Sertlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 6.6’da Al7075 alüminyum matrise ZrO₂ (ağırlıkça %1, 3, 6, 9) takviyesinin ve indüksiyonla sıcak preslemenin Vickers sertliğine etkisi verilmiştir. Şekil incelendiğinde; ZrO₂ takviyesinin kompozitlerin sertlik değerini arttırdığı ve en

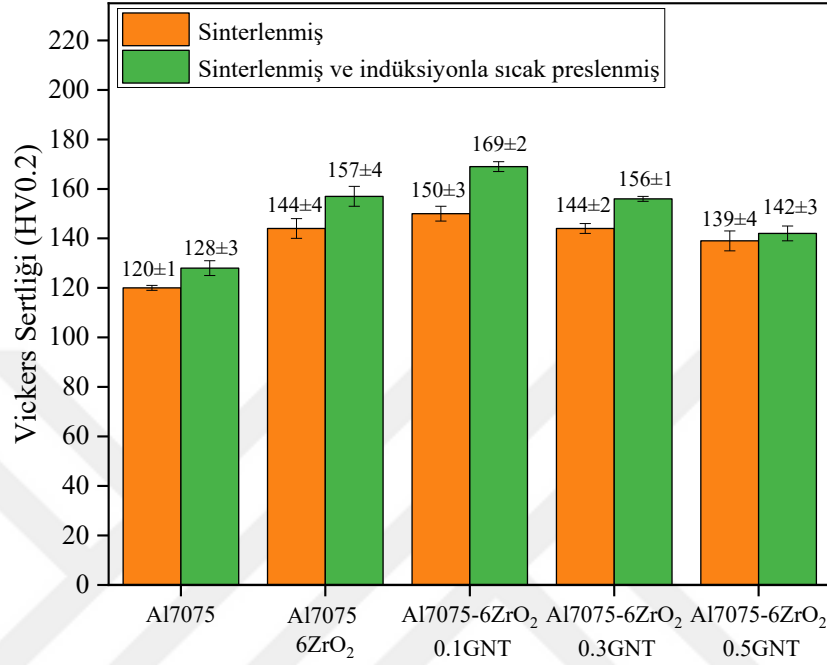
yüksek sertlik değerine (157 ± 4 HV) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂ kompozitte ulaşılmıştır. Takviye elemanı olarak mikroyapıya ilave edilen yüksek sertliğe sahip ZrO₂ partikülleri Al7075 alüminyum alaşımının da sertliğini arttırmıştır. Ağırlıkça %6 ZrO₂ takviye oranının üstündeki değerlerde ise nano boyutlu ZrO₂ partiküllerinin mikroyapıda topaklanmasından dolayı sertlik değerinde bir düşüş gözlenmiştir.



Şekil 6.6. Al7075-ZrO₂ kompozitlerin Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıtım türüne bağlı olarak değişimi

Üretilen hibrit kompozitlere ait Vickers sertlik değerlerinin grafen katkısı ve indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle değişimi Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekilden en yüksek sertlik değerine (169 ± 2 HV) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,1grafen kompozitte erişildiği görülmektedir. Sadece sinterlenen numunelerde (Al7075-%6ZrO₂-%0,1grafen) en yüksek sertlik değeri 150 ± 3 HV iken indüksiyonla sıcak presleme sonucu bu değer 169 ± 2 HV değerine yükselmiştir. Al7075 alüminyum alaşımı ile Al7075-%6ZrO₂-%0,1grafen hibrit kompozit kıyaslandığında ise; hem takviye elemanlarının hem de indüksiyonla ısıtımın etkisiyle sertlik değerinde %40,8 oranında artış sağlanmıştır. Bu durumun indüksiyonla sıcak presleme ile tanelerin birbirine yaklaşması sonucu gözeneklerin kapanarak daha yoğun bir yapı elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan dolayı da kompozitlerin sertlik değerinde artış sağlanmıştır. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen takviye oranının üzerindeki değerlerde sertlikte ciddi bir düşüş

gözenmiştir. Bu düşüşün sebebi ise nano boyutlu grafenin elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle topaklanmasıdır. Sonuç olarak üretilen Al7075-%6ZrO₂-Grafen kompozitlerde optimum grafen takviye oranı ağırlıkça %0,1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.7. Al7075-%6ZrO₂-Grafen kompozitlerin Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi

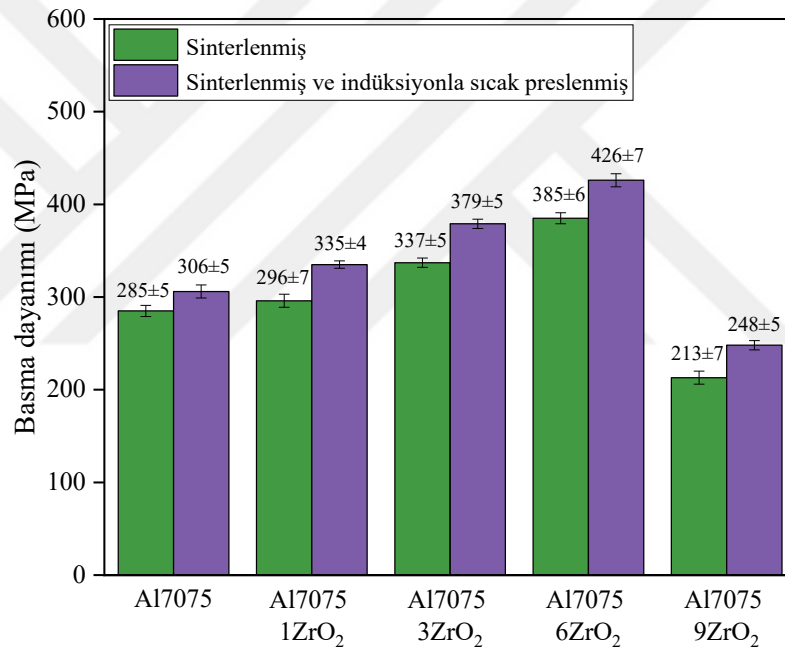
Yüksek sertliğe sahip takviye elemanlarının kompozitlerin sertliğine olan etkisi Denklem 6.1’de verilen karışımlar kuralı yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte H_K , H_M ve H_T sırasıyla kompozitin, matris elemanının ve takviye malzemesinin sertliğini ifade etmektedir. f_M ve f_T ise matris ve takviye elemanının hacimsel katkı oranlarını göstermektedir (Kaw, 2014).

$$H_K = H_M f_M + H_T f_T \quad (6.1)$$

6.1.4. Basma testi sonuçlarının değerlendirilmesi

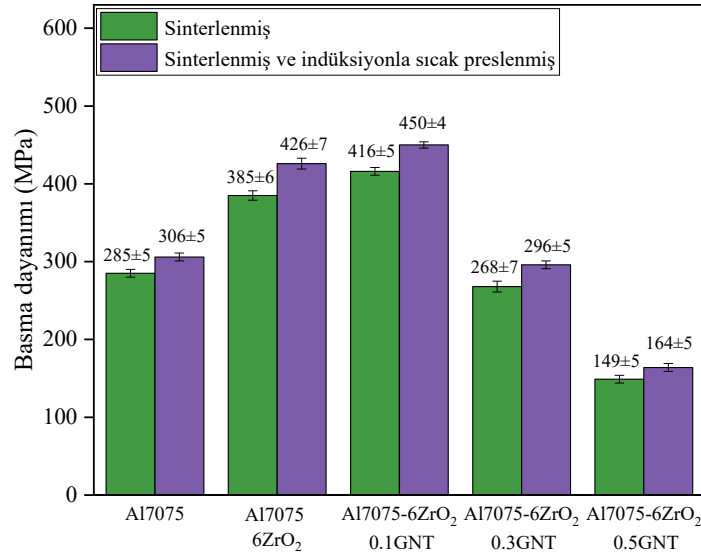
Al7075-ZrO₂ kompozitlerde basma dayanımının ZrO₂ katkı oranı ve indüksiyonla ısıtma işlemin etkisiyle değişimi Şekil 6.8’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; en yüksek basma dayanımı değeri Al7075 alüminyum alaşımına göre %35,1 artış oranıyla Al7075-%6ZrO₂ kompozitte (385±6 MPa) tespit edilmiştir. Al7075 matrise yapılan ZrO₂ takviyesi basma dayanımının artmasına sebep olmuştur. Bu artışta yük transfer mekanizmasının etkin olduğu düşünülmektedir. Bu

mekanizmada malzeme üzerine uygulanan yükün bir kısmı matris-takviye arayüzeyi aracılığıyla ZrO_2 partiküllerine aktarılmaktadır. Bundan dolayı da malzeme daha fazla yüke dayanabilmekte ve bu durum basma dayanımında artış olarak gözlemlenmektedir. İndüksiyonla ısıtıl işlem öncesinde 385 ± 6 MPa ($Al7075$ - $\%6ZrO_2$) olan basma dayanımı değeri bu işlem sonrasında $\%10,6$ artış göstererek 426 ± 7 MPa'a yükselmiştir. Bu artışın sebebi indüksiyonla ısıtıl işlem sonrası sıcak presleme etkisiyle matris-takviye eleman arayüzeyindeki etkileşimin artması olarak görülmektedir. Böylece uygulanan yük daha etkin bir şekilde takviye elemanlarına aktarılabilmektedir. Ancak $Al7075$ - $\%9ZrO_2$ kompozitlerde nano boyutlu ZrO_2 partiküllerinin elektrostatik çekim kuvvetleri etkisiyle topaklanması sonucu basma dayanımında bir düşüş gerçekleşmiştir.



Şekil 6.8. $Al7075$ - ZrO_2 kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi

Şekil 6.9'da $Al7075$ - $\%6ZrO_2$ -Grafen hibrit kompozitlere ait basma dayanımı değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde, en yüksek basma dayanımı değerine (450 ± 4 MPa) indüksiyonla ısıtıl işlem görmüş $Al7075$ - $\%6ZrO_2$ - $\%0,1$ Grafen kompozitte ulaşılmıştır. Ancak ağırlıkça $\%0,1$ katkı oranının üzerindeki değerlerde grafen mikroyapıda topaklanma eğilimi göstermiştir. Topaklanan grafen partikülleri matris-takviye elemanı arasındaki arayüzey bağının zayıflamasına neden olduğundan basma dayanımını düşürmüştür.



Şekil 6.9. Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıt işlemlerine bağlı olarak değişimi

Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanlarının mukavemet artışına etkisini açıklamak amacıyla tane inceltme güçlendirmesi, termal uyumsuzluk etkisi, yük transfer mekanizması ve dislokasyon güçlendirmesi gibi bazı mekanizmalar kullanılmaktadır (Kumar vd.,2022; Zhang vd., 2006).

Tane inceltme güçlendirmesinde, homojen dağılım gösteren ve tane sınırlarına yerleşen takviye elemanları ısıt işlemler sırasında gerçekleşen sıcaklık artışının aşırı tane büyümesine neden olmasını engellemektedir. Tane sınırlarındaki takviye elemanları hem tane büyümesini engeller hem de dislokasyonlar için engel görevi görerek mukavemet artışı sağlar. Denklem 6.2’de verilen Hall Petch eşitliğinde görüldüğü gibi tane boyutunun küçülmesi malzemenin akma dayanımını (σ_A) arttırmaktadır. Eşitlikte d partikül boyutu, σ_0 ve K ise malzeme sabitleridir (Ghodratı ve Ghomashchi, 2019; Kang ve Chan, 2004).

$$\sigma_A = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \quad (6.2)$$

Matris ve takviye elemanları farklı termal genleşme katsayısı ve elastik modül değerlerine sahiptir. Bu fark, sıcaklık değişimleri sırasında matris-takviye arayüzeyinde artık termal gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan artık termal gerilmeler ve elastik modül farklılığı mikroyapıdaki dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Artan dislokasyon yoğunluğu da malzeme de mukavemet artışı sağlamaktadır. Denklem 6.3’te verilen termal uyumsuzluk ile dislokasyon

yoğunluğu arasındaki ilişkiyi veren eşitlikte $\Delta\alpha\Delta T$ ifadesi termal genleşme farkıyla alakalıdır. Ayrıca b Burgers vektörü, N_A ise nanopartikül sayısıdır (Ma vd., 2017; Wang vd., 2022).

$$\Delta\rho = \Delta\alpha\Delta TN_A/b \quad (6.3)$$

Plastik deformasyon sırasında oluşan dislokasyonlar mikroyapıdaki takviye elemanları ile karşılaştığında hareketleri kısıtlanır. Dislokasyonlar takviye elemanları etrafında bükülerek dislokasyon döngüleri oluştururlar. Bu döngüler, aynı kayma düzleminde ilerleyen dislokasyonlar için engel oluşturarak hareketlerinin kısıtlanmasına neden olan bir geri gerilim meydana getirirler. Bu durum mikroyapıdaki dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olur. Denklem 6.4 ile ifade edilen ve Orowan mekanizması olarak bilinen bu durum malzemenin mukavemetinin artmasını sağlamaktadır. Bu denklemdaki λ parçacıklar arası mesafedir (Chen vd., 2020; Guler ve Bagci, 2020).

$$\Delta\sigma_{OR} = \frac{0.13bG}{\lambda} \ln \frac{d}{2b} \quad (6.4)$$

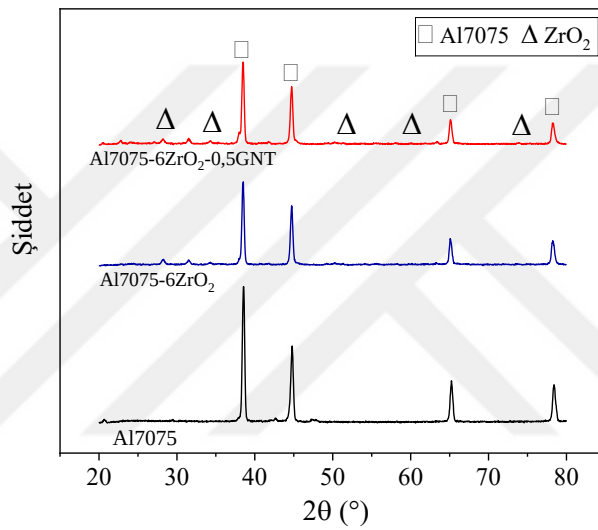
Mikroyapıdaki takviye elemanları dislokasyon hareketini engellemektedir. Ayrıca partiküller arasındaki mesafenin azalmasına da neden olurlar. Partiküller arasındaki mesafenin azalmasıyla dislokasyonlar partiküller arasından geçebilecek kadar keskin bir şekilde bükülemez ve dislokasyonları bükmek için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulur. Denklem 6.5’de artan takviye elemanı ile partiküller arası mesafenin ilişkisi verilmiştir. Denklemdaki f ve r sırasıyla takviye elemanının hacimce katkı oranını ve partikül yarıçapını temsil etmektedir (Dieter, 1961).

$$\lambda = \frac{[4r(1-f)]}{3f} \quad (6.5)$$

Yük transfer mekanizması ise malzeme üzerine uygulanan yükün arayüzey bağı aracılığıyla takviye elemanlarına aktarılmasına esasına dayanır. Bu mekanizmanın etkin bir şekilde uygulanabilmesi için partiküllerin mikroyapıda homojen bir şekilde dağılması ve matris-takviye arayüzey bağının güçlü olması gerekmektedir (Chen vd., 2020; Luo vd., 2022).

6.1.5. XRD faz analizi sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 6.10’da Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%6ZrO₂ ve Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozitlere ait XRD örgü desenleri sunulmuştur. XRD pikleri incelendiğinde; oluşan fazların zirkonya ve Al7075 alüminyum alaşımına ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca XRD örgü desenlerinde, sıcaklık etkisiyle (sinterleme ve indüksiyonla ısıtılma işlemi) oluşabilecek istenmeyen ikincil fazlara (Al₄C₃, AlN vb.) ait piklere rastlanılmamıştır. XRD cihazının düşük hassasiyeti ve grafenin düşük takviye oranlarında kullanılması sebebiyle faz analizinde grafen pikine rastlanılmamıştır. Şekil 6.10’da alüminyum “□” simgesi ile gösterilirken ZrO₂ “Δ” simgesi ile gösterilmiştir.

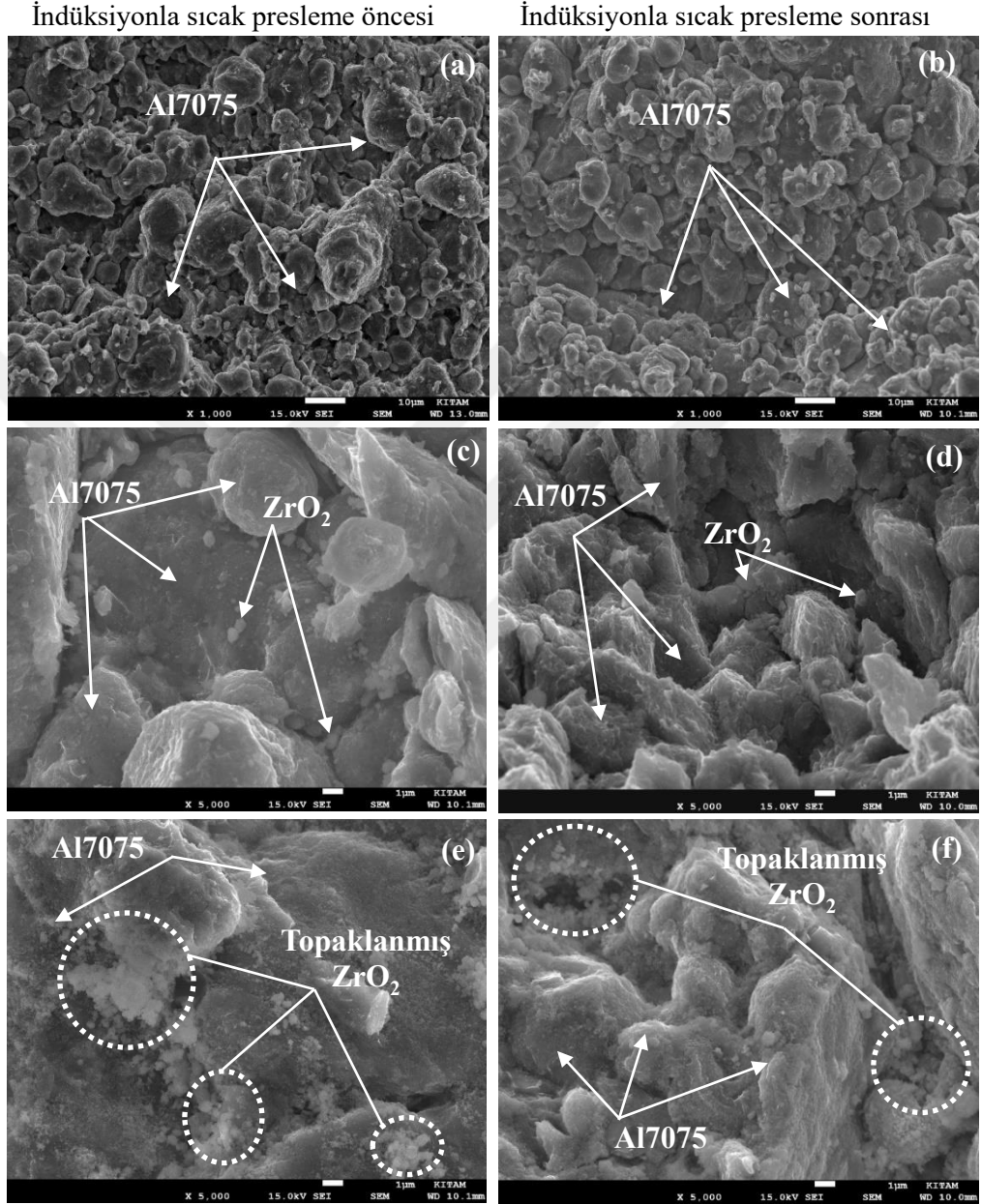


Şekil 6.10. Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%6ZrO₂ ve Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozitlere ait XRD örgü desenleri

6.1.6. SEM ve SEM-EDX görüntülerinin değerlendirilmesi

Al7075-ZrO₂ kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.11’de verilmiştir. Şekil 6.11(a), (c), (e)’de sadece sinterlenmiş numunelere ait SEM görüntüleri verilirken; 6.11(b), (d), (f)’de sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtılma işlemi görmüş numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri sunulmuştur. Al7075-%6ZrO₂ kompozit yapıya ait SEM görüntüleri incelendiğinde; ZrO₂ partiküllerinin mikroyapıda homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca indüksiyonla ısıtılma işlemi görmüş numunelerin sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha yoğun bir mikroyapı sergilediği görülmüştür. Sıcak preslenmiş numunelerde taneler arası etkileşimin artması sebebiyle daha iyi bir boyun oluşumu gözlenmiştir. SEM görüntülerinden; ZrO₂ partiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği belirlenmiştir. Tane sınırlarındaki ZrO₂ partikülleri engel gibi davranarak sıcaklık etkisiyle (sinterleme ve

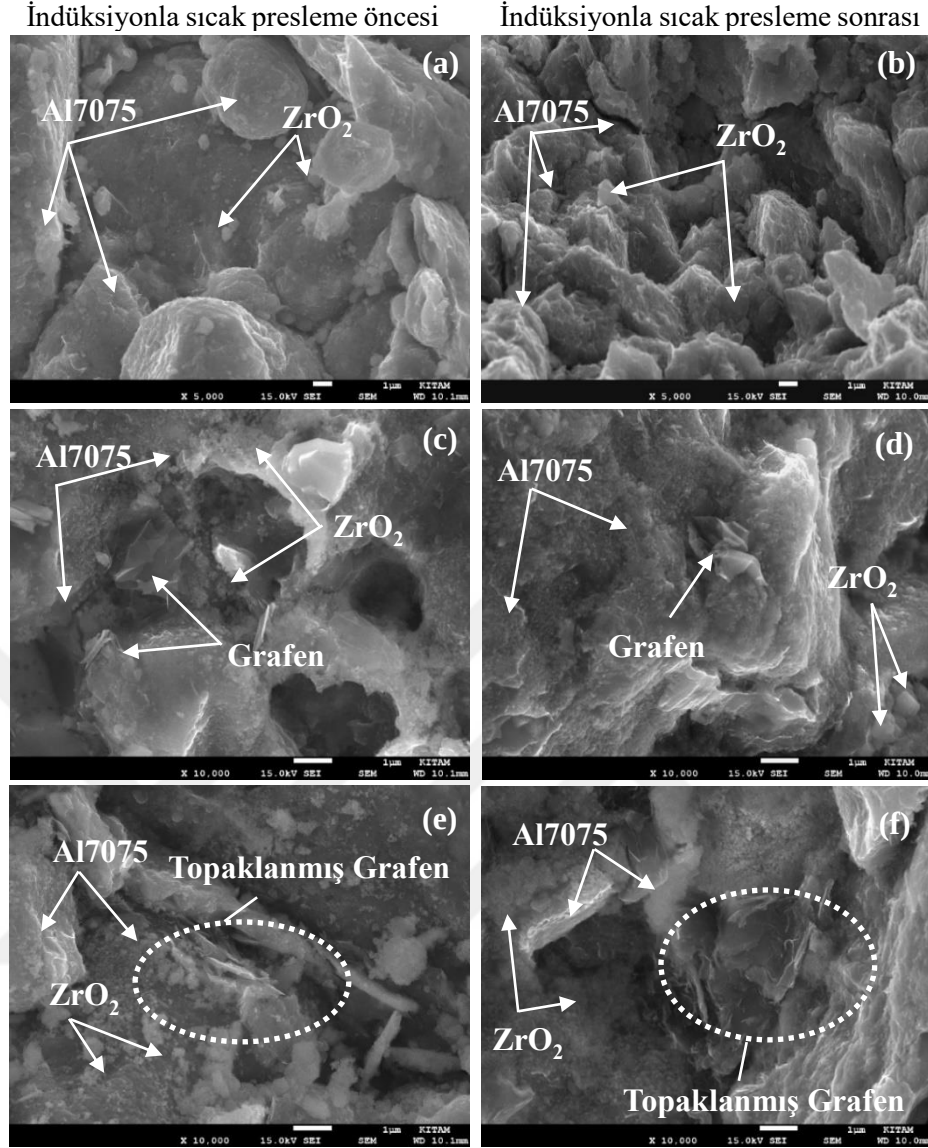
indüksiyonla ısıtıl işlem) aşırı tane büyümesini engellemiştir. Ağırlıkça %9 ZrO₂ takviyesinde ise mikroyapıda topaklanmalar ve gözenekler tespit edilmiştir. Bu durum topaklanma sebebiyle yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı değerlerinde görülen düşüşü doğrulamaktadır.



Şekil 6.11. Al7075 alüminyum alaşımı ve Al7075-ZrO₂ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075 (a), Al7075-i (b), Al7075-%6ZrO₂ (c), Al7075-%6ZrO₂-i (d), Al7075-%9ZrO₂ (e), Al7075-%9ZrO₂-i (f)

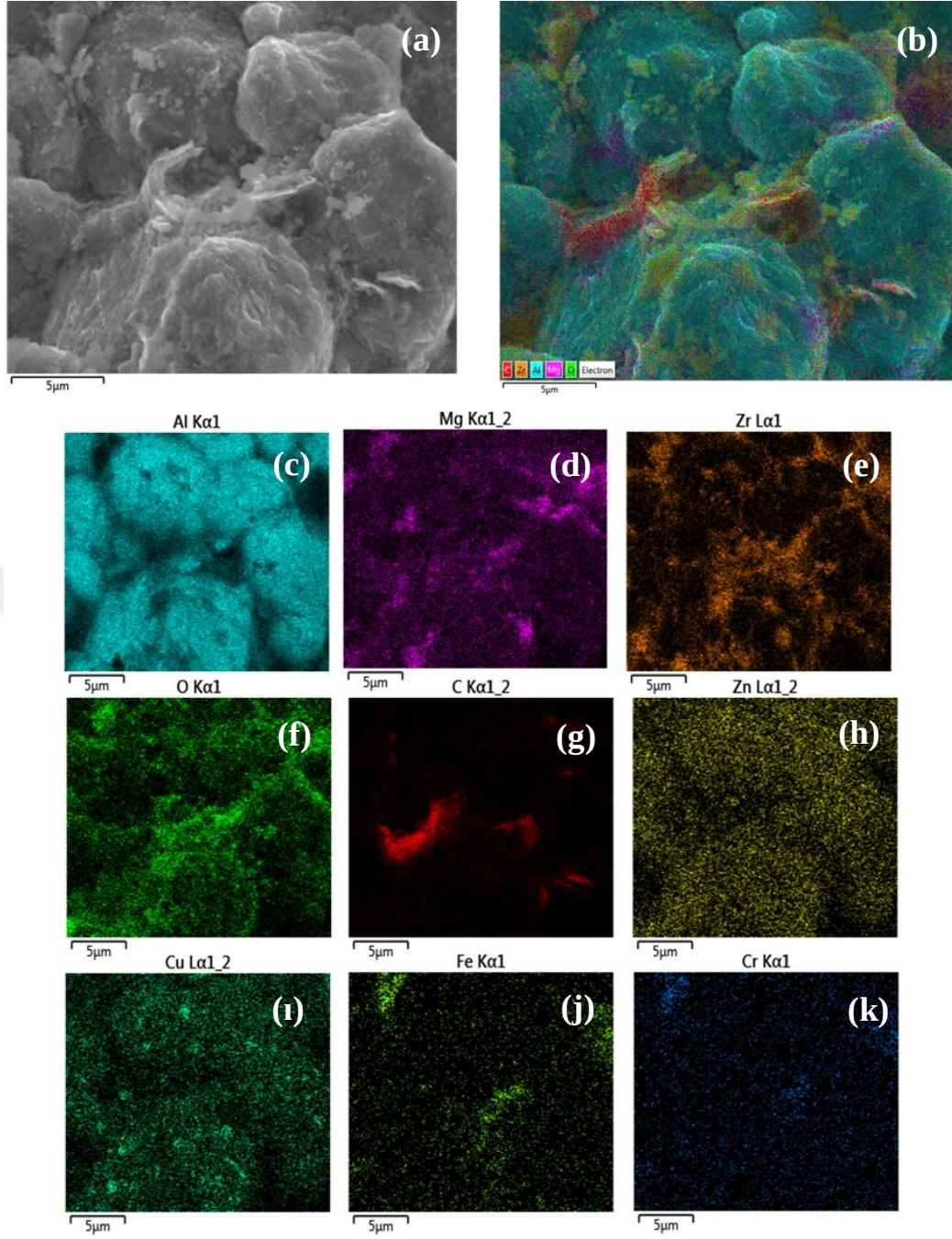
Şekil 6.12’de Al7075-%6ZrO₂-Grafen kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde; ağırlıkça %0,1 grafen içeren numunelerde takviye elemanlarının homojen bir şekilde dağıldığı ve tane

sınırlarına yerleştği görülmüştür. Sadece sinterlenen numunelerde (Şekil 6.12(a), (c), (e)) boyun oluşumu gözlenmiş olup, kompozitlerin yoğun bir mikroyapı sergilediği görülmüştür. Sinterlenen ve indüksiyonla ısıtılma işlem gören numunelerde (Şekil 6.12(b), (d), (f)) ise sıcak presleme etkisiyle tanelerin birbirine yaklaştığı ve sadece sinterlenen numunelere kıyasla daha yoğun bir mikroyapı oluştuğu görülmüştür. Ayrıca sinterlenen ve indüksiyonla ısıtılma işlem gören numunelerin sadece sinterlenen numunelere göre daha güçlü bir arayüzey bağına sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin kırılma karakteristiği incelendiğinde ise; hem sadece sinterlenen hem de indüksiyonla ısıtılma işlem görmüş kompozitlerde taneler arası kırılma karakteristiğinin baskın olduğu görülmüştür. Al7075-6ZrO₂-0,3Grafen ve Al7075-6ZrO₂-0,5Grafen hibrit kompozitlerde ise indüksiyonla ısıtılma işlem öncesi ve sonrasında grafen takviyesinin artmasıyla birlikte topaklanmalar tespit edilmiştir. Bu durum mekanik test verilerinde gözlenen düşüşün sebebi olarak düşünülmekte olup elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.



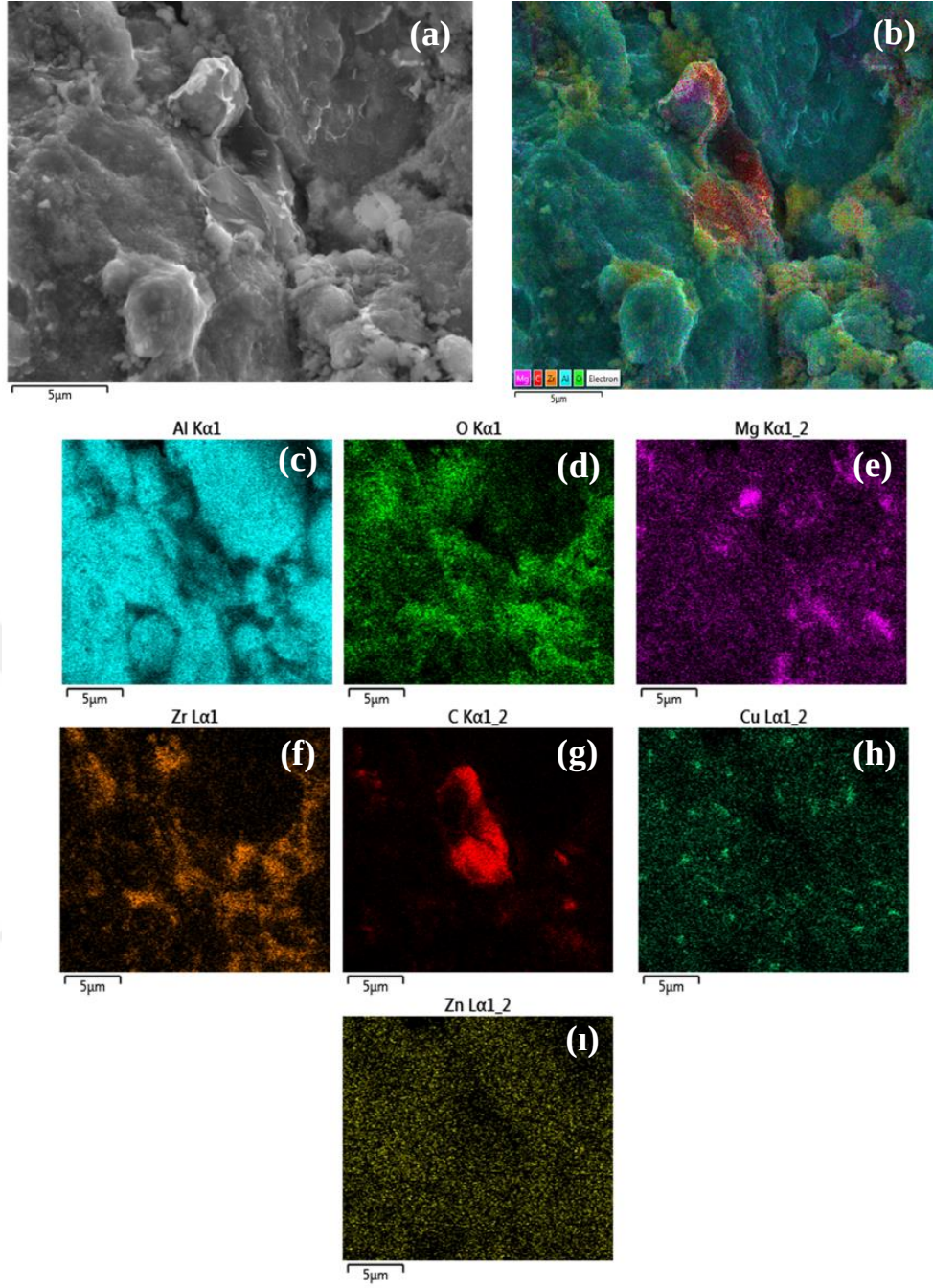
Şekil 6.12. Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075-%6ZrO₂ (a), Al7075-%6ZrO₂-i (b), Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen (c), Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen-i (d), Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen (e), Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen-i (f)

Şekil 6.13’de sadece sinterlenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozitlere ait SEM-EDX görüntüleri verilmiştir. Element dağılım haritasında, Al7075 alüminyum alaşımına ait elementler Al (mavi renk), Zn (sarı renk), Mg (mor renk) ve Cu (koyu yeşil renk) mikroyapıda tespit edilmiştir. Zr (turuncu renk) ve O (açık yeşil renk) elementleri ise mikroyapıdaki nano-ZrO₂ dağılımını göstermektedir. Ayrıca C (kırmızı renk) elementi mikroyapıdaki grafen varlığını doğrulamaktadır. Kırmızı renkli bölgeler incelendiğinde grafenin belirli bir bölgede topaklandığı görülmüştür.



Şekil 6.13. Sadece sinterlenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-k)

Şekil 6.14’de sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtılmış Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozitlere ait SEM-EDX element dağılım analizleri görülmektedir. Mikroyapıdaki Al (mavi renk), Zn (sarı renk), Mg (mor renk) ve Cu (koyu yeşil renk) elementleri Al7075 alüminyum alaşımına ait elementlerdir. Ayrıca Zr (turuncu renk) ve O (açık yeşil renk) elementlerinin varlığı mikroyapıdaki ZrO₂ varlığını doğrulamıştır. Kırmızı renkli bölgelerde ise grafen varlığı doğrulanmış ve tane sınırlarına yerleşen grafenin topaklandığı tespit edilmiştir.

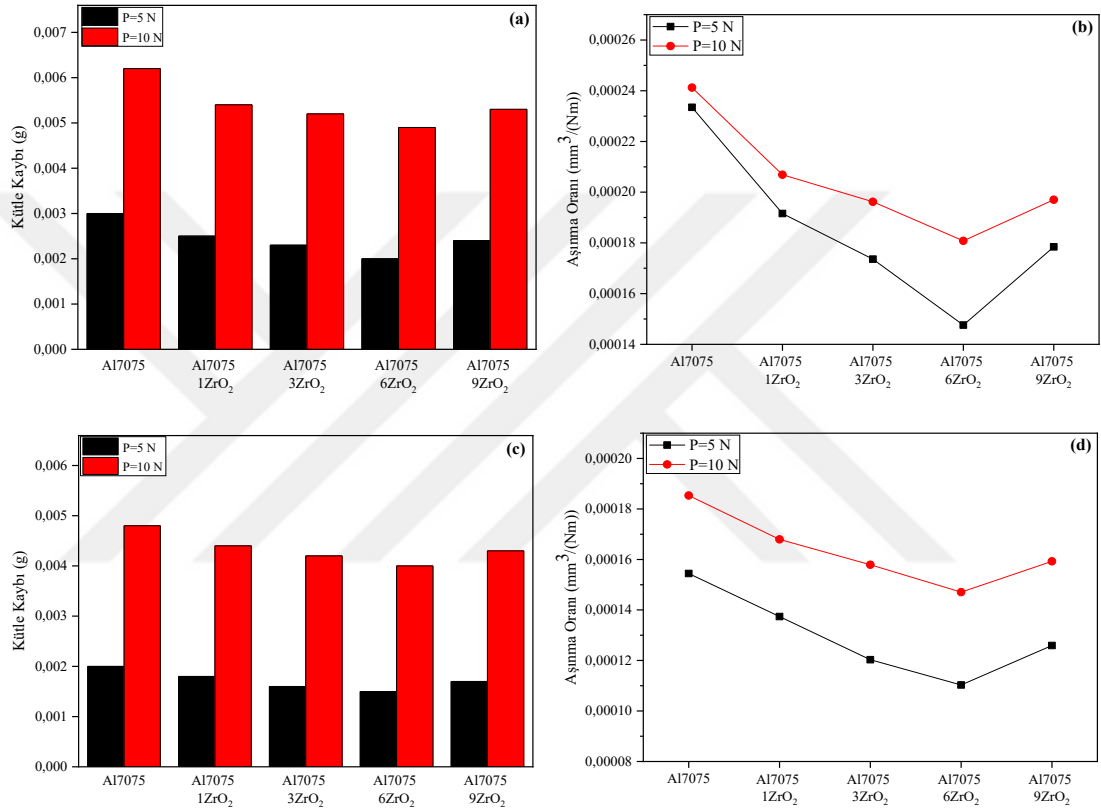


Şekil 6.14. Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-i)

6.1.7. Aşınma test sonuçlarının değerlendirilmesi

Al7075-ZrO₂ kompozitlerin indüksiyonla ısıtılma işlem öncesi ve sonrası kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri Şekil 6.15’de verilmiştir. Çalışmada aşınma testleri 5 ve 10 N olmak üzere iki farklı yük altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca karşı disk olarak 50 HRC sertlikteki AISI304 paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Şekiller incelendiğinde; kompozitlerde artan ZrO₂ takviye oranıyla birlikte aşınma oranı (W) ve kütle kaybının

(Δm) azaldığı görülmüştür. İndüksiyonla sıcak presleme sonrasında ise bu değerler daha da düşmüş olup sıcak presleme işleminin aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ancak uygulanan kuvvetin artması ile birlikte artan sürtünme kuvvetinden dolayı aşınma oranı ve kütle kaybının arttığı belirlenmiştir. En düşük aşınma oranı ($1,1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) ve kütle kaybı (0,0015 g), 5 N yük altında sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂ kompozitte elde edilmiştir.



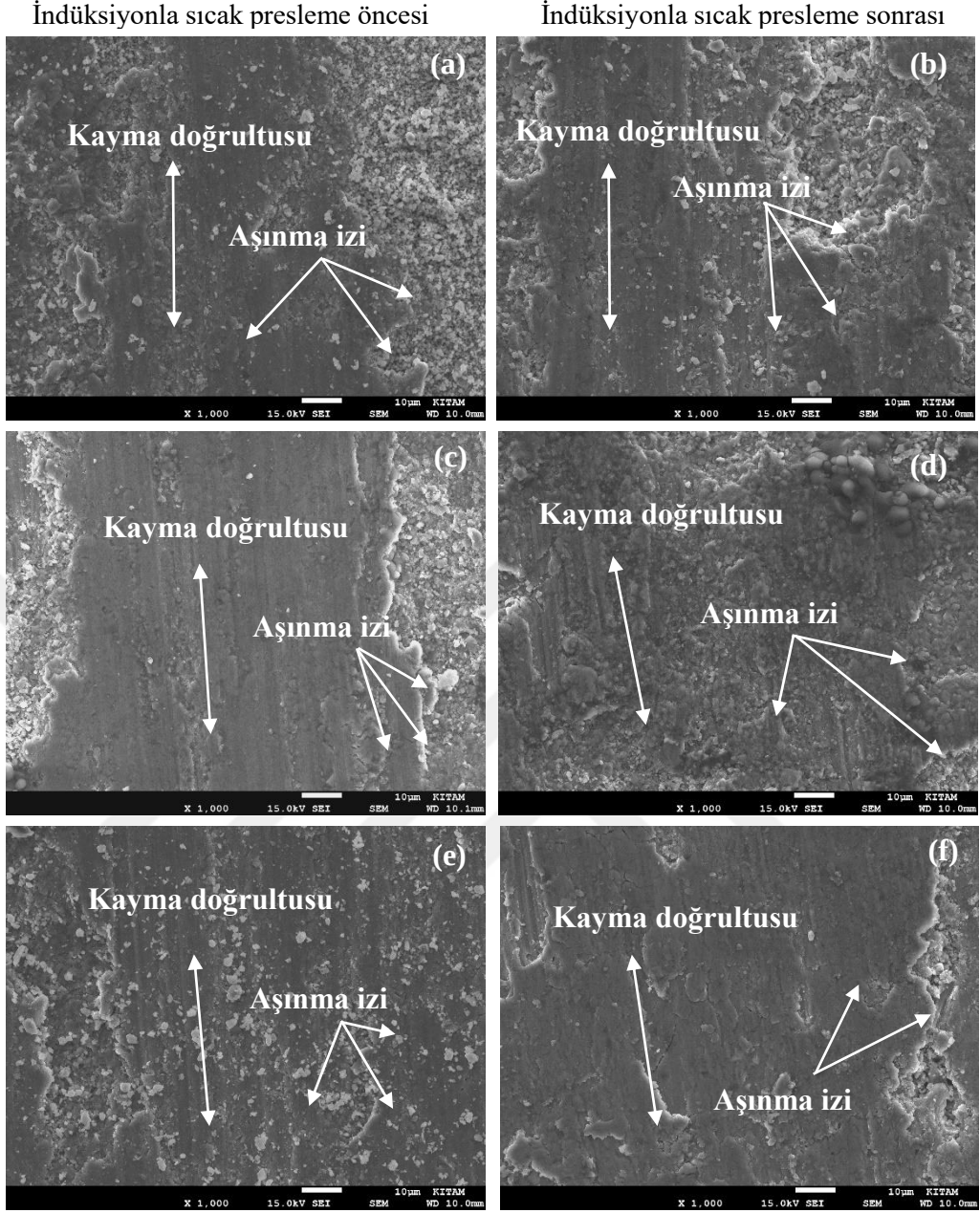
Şekil 6.15. Al7075-ZrO₂ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) değerleri indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ile aşınma oranı (d) değerleri

Kütle kaybı ve aşınma oranındaki azalma indüksiyonla ısıtma işlemi sonrası sertlik artışıyla da ilişkilendirilebilmektedir. Aşınma oranı ve sertlik arasındaki ilişki Denklem 6.6'da verilen Archard eşitliği yardımıyla tanımlanmaktadır. Archard eşitliğine göre, kompozitin aşınma hacminin (ΔV) uygulanan kuvvet ve kayma mesafesiyle doğru orantılı, sertlik ile ise ters orantılı olduğu görülmektedir (Şenel vd., 2018b).

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

Eşitlikteki F uygulanan kuvveti, L kayma mesafesini, μ sürtünme katsayısını ve H sertliği temsil etmektedir. Archard eşitliği dikkate alındığında, ZrO_2 takviyesi ve indüksiyonla ısıtıl işlem sonrası artan sertlik sonucunda aşınma oranında ciddi bir düşüş görülmüştür.

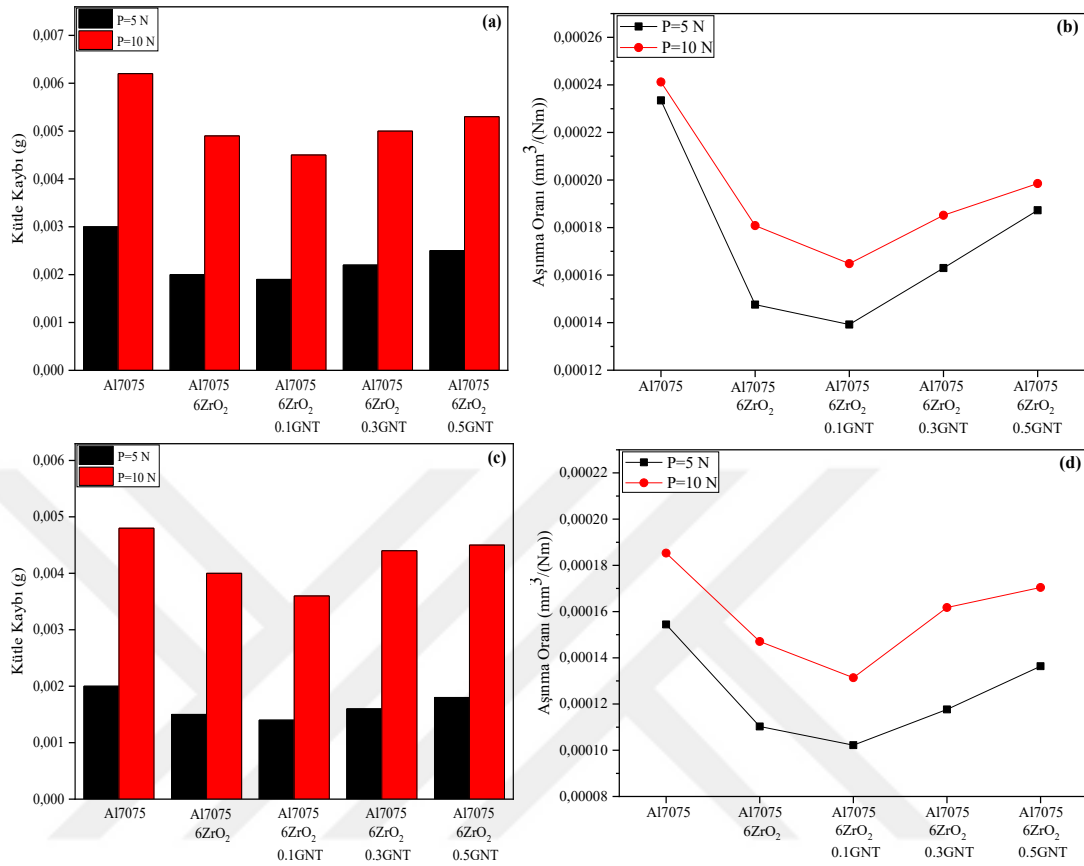
Şekil 6.16'da $Al7075-ZrO_2$ kompozitlerin indüksiyonla ısıtıl işlem öncesi ve sonrası aşınma izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; sadece sinterlenmiş numunelerde oluşan aşınma izlerinin sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtıl işlem görmüş numunelere kıyasla daha yoğun ve derin olduğu görülmüştür. Ayrıca aşınmanın etkisiyle ZrO_2 partikülleri açığa çıkmıştır. Bu sert partiküller numune yüzeyini çizip kaldırarak abrasif aşınma mekanizmasının görülmesine neden olmuştur. Sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtıl işlem görmüş $Al7075-6ZrO_2$ kompozitlerin yüzeyinde oluşan deformasyonun minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.16. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozitlere ait aşınma izleri (P=5 N): Al7075 alaşımı (a), Al7075-i (b), Al7075-%6ZrO₂ (c), Al7075-%6ZrO₂-i (d), Al7075-%9ZrO₂ (e), Al7075-%9ZrO₂-i (f)

Şekil 6.17’de Al7075-%6ZrO₂-Grafen kompozitlere ait aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri verilmiştir. Aşınma oranı ve kütle kaybının grafen takviyesiyle birlikte azaldığı görülmüştür. Bu durumun grafenin katı yağlayıcılık özelliğine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafenin katı yağlayıcılık özelliği göstermesi aşınma davranışını iyileştirmektedir. En düşük kütle kaybı (0,0014 g) ve aşınma oranına ($1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) 5 N yük altında sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtılmış Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen kompozitte erişilmiştir. Grafen takviyesinin artmasıyla birlikte ise grafenin topaklanması sebebiyle kütle kaybı ve

aşınma oranının arttığı görülmüştür. Ayrıca uygulanan yük 10 N değerine çıkarıldığında ise aşınma oranı ve kütle kaybı değerlerinde artış tespit edilmiştir.

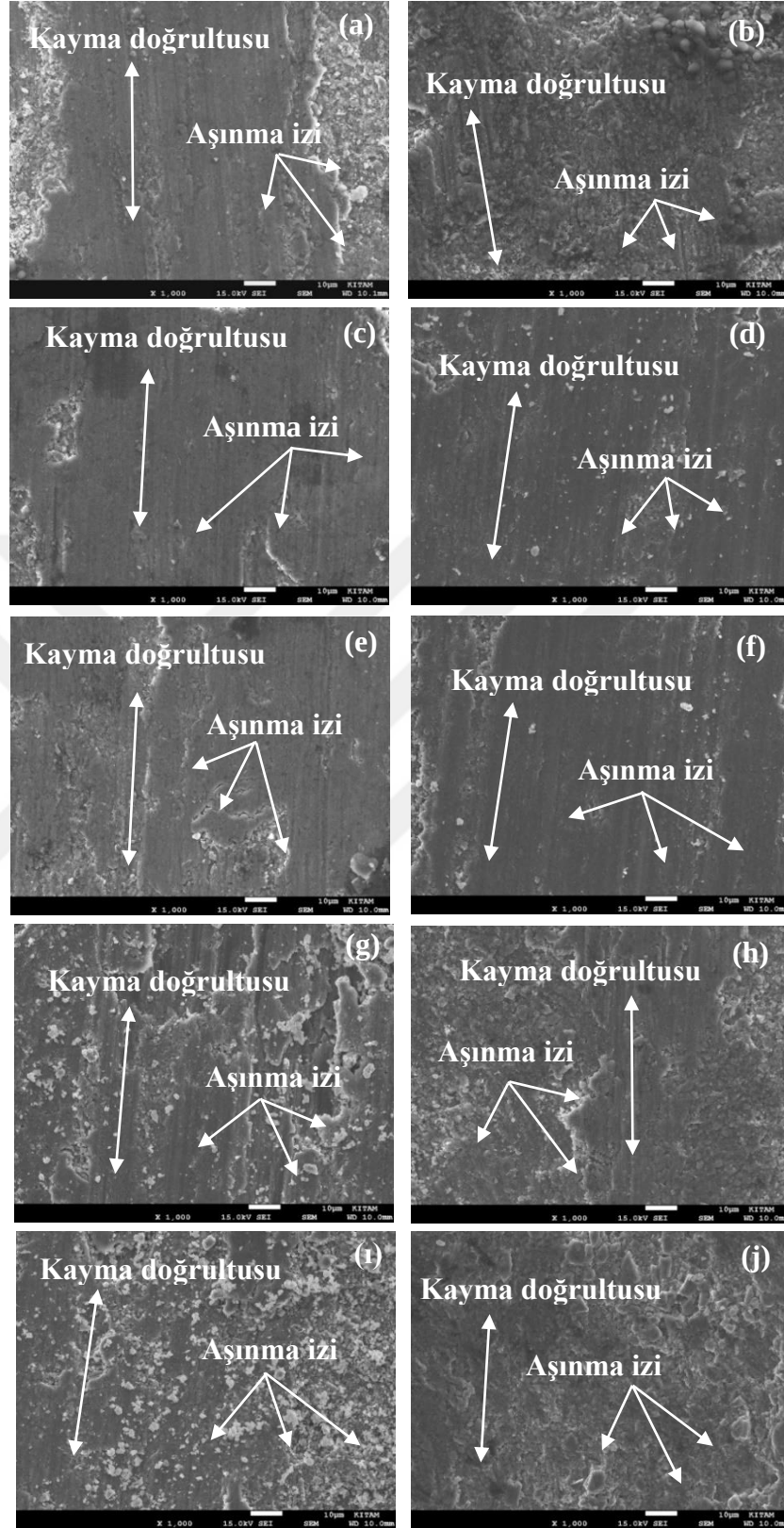


Şekil 6.17. Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ve aşınma oranı (d) değerleri

Şekil 6.18’de Al7075-%6ZrO₂-Grafen hibrit kompozitlerin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinden, sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtılmış Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen hibrit kompozitlerin yüzeyinde oluşan deformasyonun minimum seviyede olduğu ve aşınma izi derinliğinin daha az olduğu görülmüştür. Bu durumdan indüksiyonla ısıtılmanın aşınma davranışını iyileştiren etkili bir yöntem olduğu sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca aşınma testi sırasında uygulanan yükün artmasıyla (10 N) aşınma izlerinin yoğunlaştığı görülmüştür.

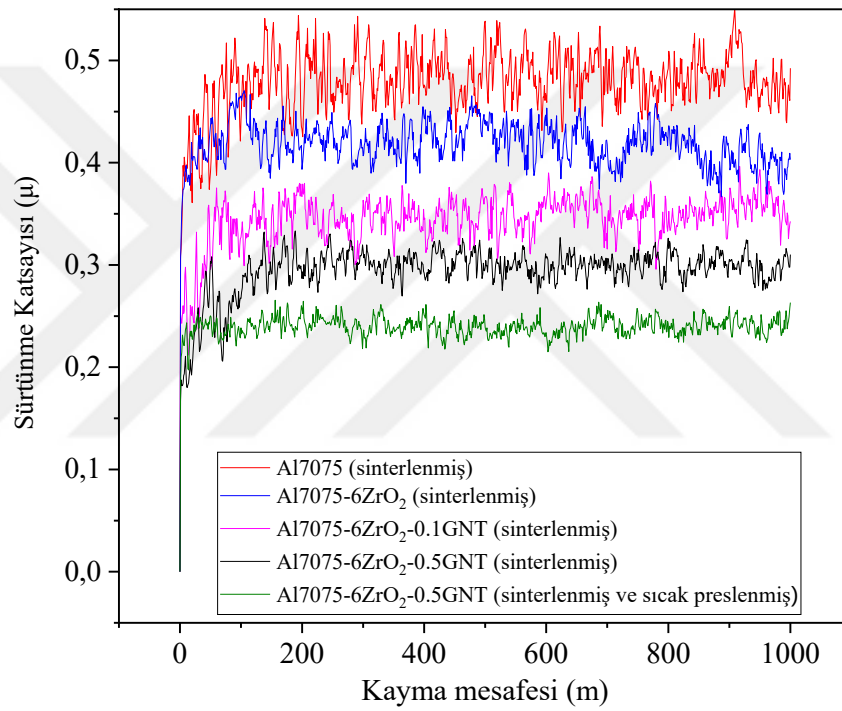
İndüksiyonla sıcak presleme öncesi

İndüksiyonla sıcak presleme sonrası



Şekil 6.18. Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlere ait indüksiyonla ısıtıl işlem öncesi ve sonrası aşınma izleri: Al7075-%6ZrO₂ (a), Al7075-%6ZrO₂-i (b), Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen (c), Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen-i (d), Al7075-%6ZrO₂-%0,3Grafen (e), Al7075-%6ZrO₂-%0,3Grafen-i (f), Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen (g), Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen-i (h), Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen (P=10 N) (i), Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen-i (P=10 N) (j)

Şekil 6.19’da karşı disk ile üretilen numuneler arasında oluşan sürtünme katsayısı değişim eğrileri verilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişimi hesaplamak için saniyede bir olmak üzere toplam 2400 veri alınmış olup kayma mesafesi (L) yaklaşık 1000 m olarak hesaplanmıştır. Şekil incelendiğinde; Al7075 alüminyum alaşımının ortalama sürtünme katsayısının $\mu=0,43$ olduğu tespit edilmiştir. Ağırlıkça %6 ZrO₂ takviyesiyle bu değer $\mu=0,36$ değerine düşmüştür. Grafen miktarının artmasıyla birlikte ise sürtünme katsayısı düşmüş olup en düşük sürtünme katsayısı değerine ($\mu=0,22$) sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıl işlem görmüş Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen kompozitte ulaşılmıştır.



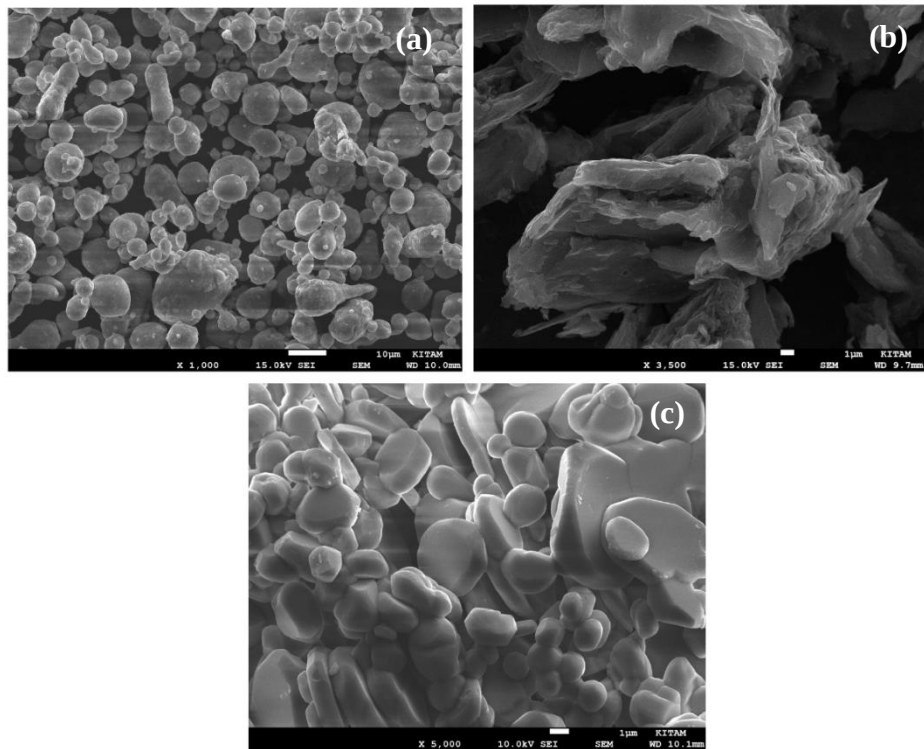
Şekil 6.19. Al7075-ZrO₂ ve Al7075-ZrO₂-Grafen kompozitlerde sürtünme katsayısının kayma mesafesiyle değişimi

6.2. Al7075 Matrisli Al₂O₃/Grafen Takviyeli Kompozitlerin Analiz Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında öncelikle farklı takviye oranlarında alümina içeren Al7075-Al₂O₃ (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15) kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelendikten sonra en iyi özelliklere sahip Al₂O₃ takviye oranı belirlenmiştir. Ardından bu oran sabit tutularak içyapıya farklı oranlarda grafen takviyesi (ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) yapılmış Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitler üretilerek bu kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları bu bölümde sunularak detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

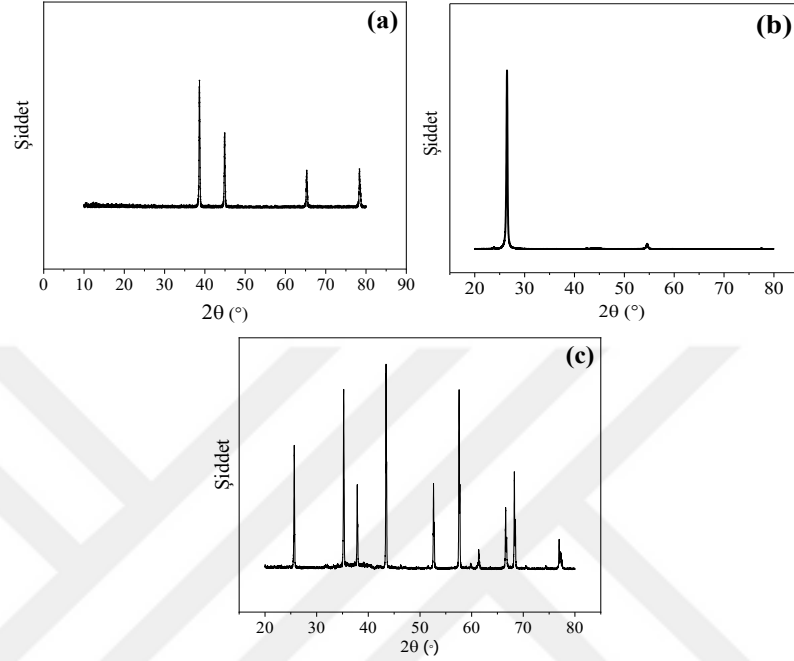
6.2.1. Tozların SEM, XRD analizleri ve tane boyut analizi sonuçları

Şekil 6.20’de sırasıyla Al7075, grafen ve Al₂O₃ tozlarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, Şekil 6.20(a)’daki Al7075 alüminyum alaşımı tozlarının düzensiz şekile sahip olduğu, Şekil 6.20(b)’deki grafen tozlarının ise tabakalı bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.20(c)’de verilen Al₂O₃ tozlarının ise düzensiz bir morfolojiye ve ~4 µm ortalama tanecik boyutuna sahip olduğu görülmektedir.



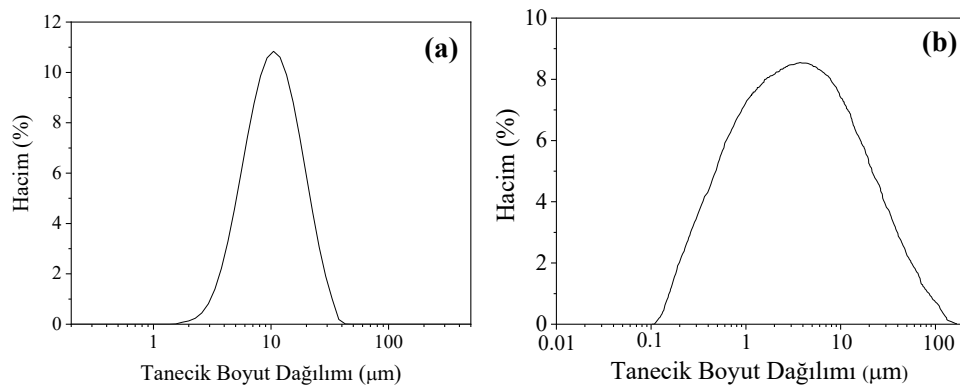
Şekil 6.20. Al7075 alaşımı (a), grafen (b) ve Al₂O₃ (c) tozlarına ait SEM görüntüleri

Şekil 6.21’de çalışmada kullanılan tozlara ait XRD örgü desenleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde; Al7075 alüminyum alaşımının kırınım açılarının $2\theta = \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ$ ve 78° ; grafinin kırınım açısının $2\theta = \sim 26,5^\circ$ ve alüminanın kırınım açılarının $2\theta = \sim 25^\circ, 35^\circ, 38^\circ, 43^\circ, 53^\circ, 58^\circ, 61^\circ, 67^\circ, 68^\circ, 77^\circ$ olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.21. Al7075 alüminyum alaşım (a), grafit (b) ve alümina (c) tozlarına ait XRD faz analizi

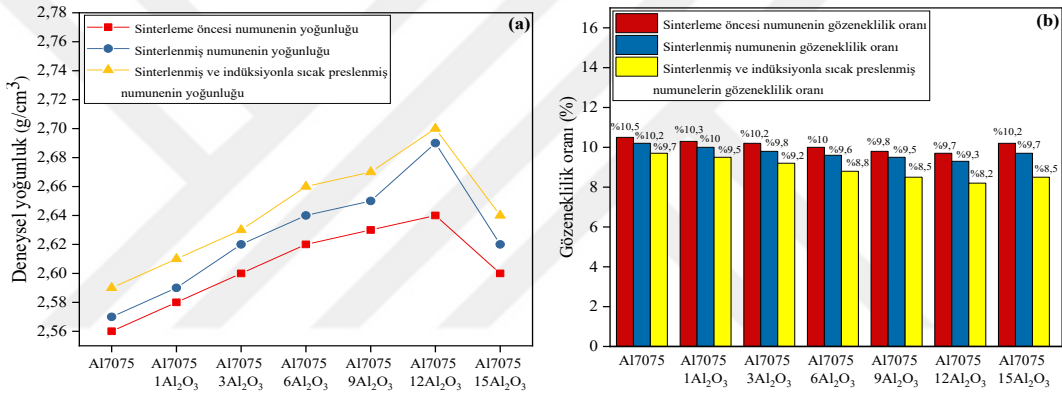
Al7075 alüminyum alaşımı ve Al_2O_3 tozlarına ait tanecik boyut dağılımı Şekil 6.22’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, Al7075 alüminyum alaşımının ve Al_2O_3 tozlarının sırasıyla $\sim 10 \mu\text{m}$ ve $\sim 4 \mu\text{m}$ toz boyutuna sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca tanecik boyut dağılımı sonuçlarının SEM görüntüleriyle tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 6.22. Al7075 alüminyum alaşımı (a) ve alümina (b) tozlarına ait tane boyut dağılımı

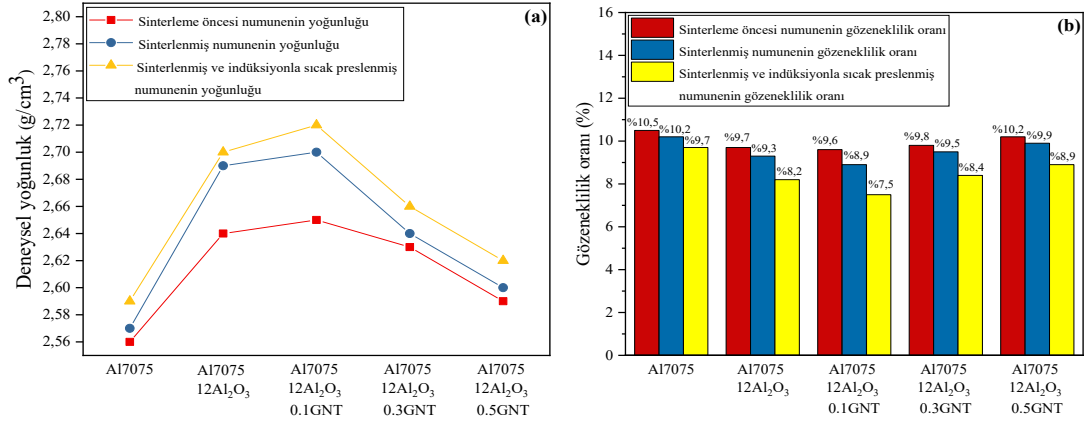
6.2.2. Yoğunluk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik oranının takviye oranı ve ısıtıl işlem türüyle değişimi Şekil 6.23’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde; en yüksek yoğunluğa (2,7 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranına (%8,2) sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtıl işlem görmüş Al7075-%12Al₂O₃ numunelerde ulaşılmıştır. Al₂O₃ takviyesi ile yoğunluk değerinin arttığı ve gözeneklilik oranının azaldığı görülmüştür. Bu durumun Al₂O₃ partiküllerinin yüksek yoğunluğa (3,95 g/cm³) sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca indüksiyonla ısıtıl işlem sonrası birbirine yaklaşan taneler nedeniyle gözeneklilik oranı azalmaktadır. Ancak takviye elemanının topaklanması sebebiyle ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviye oranında kompozitin yoğunluğu düşerken gözeneklilik oranı artmıştır.



Şekil 6.23. Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısıtıl işlem türüne bağlı olarak değişimi

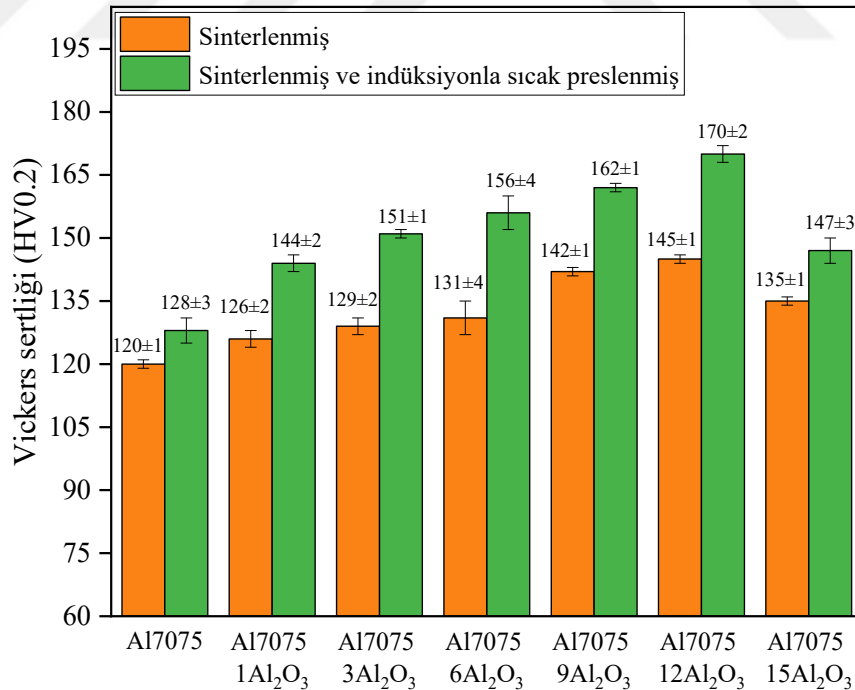
Şekil 6.24’de ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 grafen takviyesi yapılmış hibrit kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik oranları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde; en yüksek yoğunluğa (2,72 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranına (%7,5) sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtıl işlem görmüş Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen kompozitlerde erişilmiştir. Üretilen hibrit kompozitlerde yoğunluk değeri Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla %3,5 oranında artış gösterirken; gözeneklilik oranı %17,5 oranında azalmıştır. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinin üzerindeki değerlerde mikroyapıda homojen bir dağılım elde edilememesi sebebiyle yoğunluk değerinde düşüş gözlenmiştir. Ayrıca topaklanan grafen partiküllerinin arayüzey bağımlı zayıflatmasından dolayı gözeneklilik oranında da bir artış tespit edilmiştir.



Şekil 6.24. Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin deneysel yoğunluğunun (a) ve gözeneklilik oranının (b) takviye oranı ve ısı işlem türüne bağlı olarak değişimi

6.2.3. Sertlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

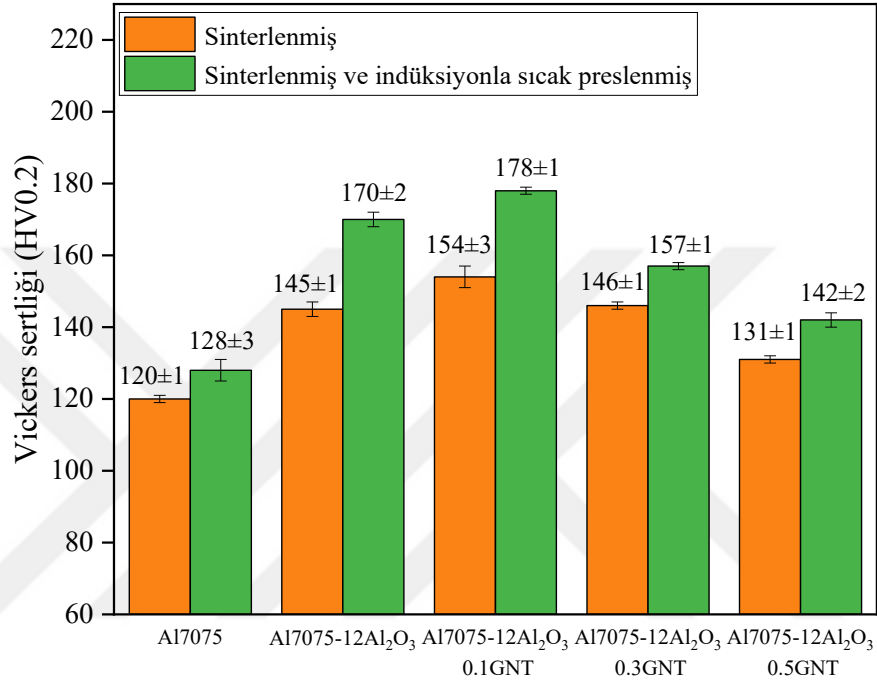
Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait Vickers sertlik değerleri incelendiğinde; en yüksek sertlik değerine (170±2 HV) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃ kompozitte ulaşılmıştır (Şekil 6.25). Ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviye oranında ise topaklanan partiküller sebebiyle sertlik değerinde düşüş gözlenmiştir. Bundan dolayı optimum Al₂O₃ takviye oranı ağırlıkça %12 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.25. Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin takviye oranı ve ısı işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerinin değişimi

Grafen ve Al₂O₃ takviyeli Al7075 matrisli hibrit kompozitlerde grafen takviyesi ve indüksiyonla sıcak preslemenin sertlik değerine etkisi Şekil 6.26'da verilmiştir.

Şekil incelendiğinde; sadece sinterlenmiş Al7075-%12Al₂O₃ numunelerin sertliğinin ağırlıkça %0,1 grafen takviyesi ile 145±1 HV değerinden 154±3 HV değerine yükseldiği görülmüştür. Bu değer sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme sonrasında 178±1 HV değerine yükselmiştir. Bu artışın sebebi matris malzemesinden daha yüksek sertliğe sahip olan grafen ve Al₂O₃ partiküllerinin mikroyapıda bulunmasıdır.



Şekil 6.26. Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlerin Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıtma işlem türüne bağlı olarak değişimi

İndüksiyonla sıcak preslemede deformasyon etkisiyle tanelerin birbirine yaklaşması sonucu yapı daha yoğun hale gelmekte ve dislokasyon yoğunluğu artmaktadır. Artan dislokasyon yoğunluğu sonucunda ise kompozitlerin sertlik değerleri artış göstermektedir. Kompozitin sertliği (H) ve dislokasyon yoğunluğu (ρ) arasındaki ilişki Denklem 6.7 ile gösterilebilmektedir (Gürbüz ve Mutuk, 2019).

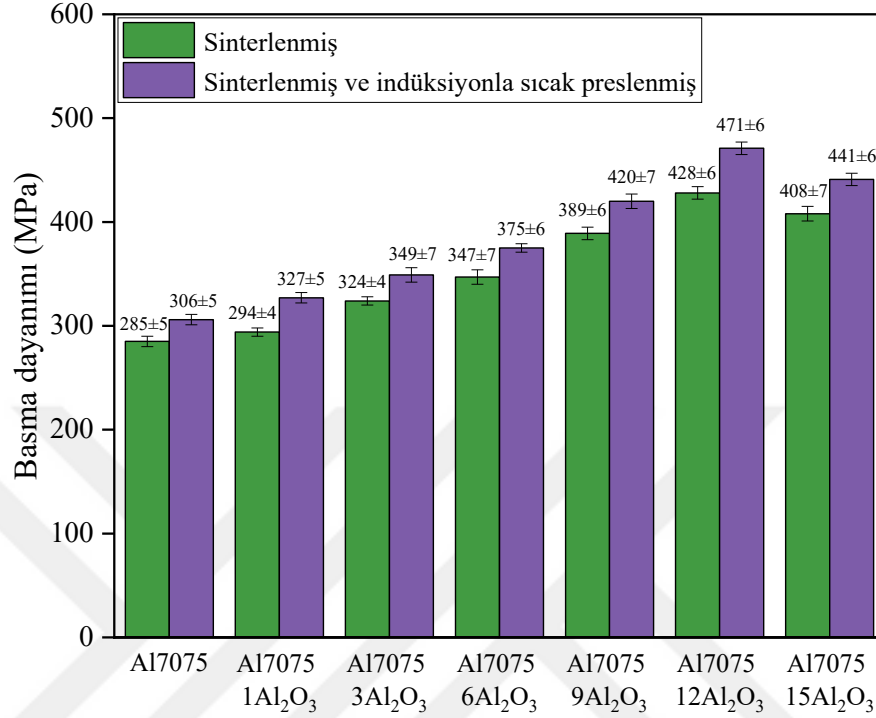
$$H = h\sqrt{Dt} + \alpha Gb\sqrt{\rho} \quad (6.7)$$

Burada b Burgers vektörü, α ve G malzeme sabitleridir.

6.2.4. Basma testi sonuçlarının değerlendirilmesi

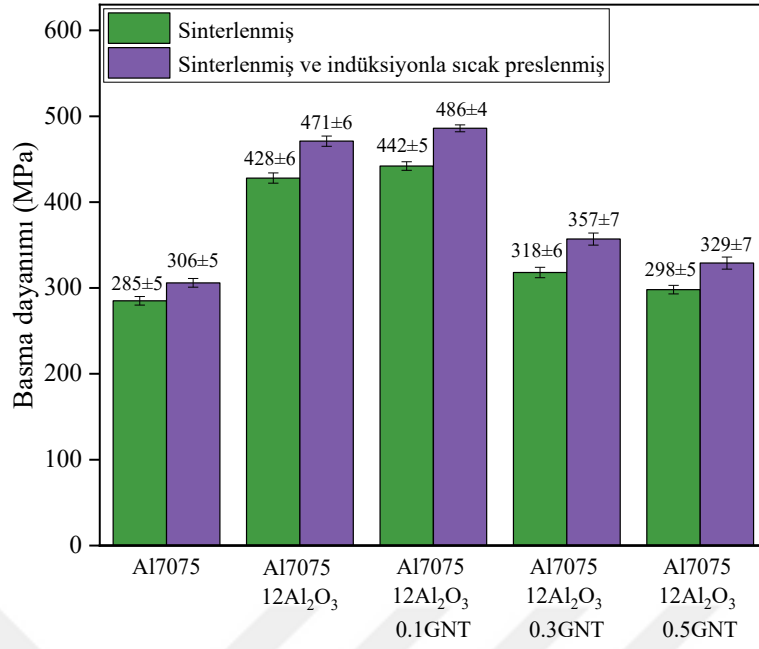
Şekil 6.27’de Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve indüksiyonla ısıtma işlemi ile değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde; 285±5 MPa basma dayanımına sahip olan Al7075 alüminyum alaşımının basma dayanımı ağırlıkça

%12 Al_2O_3 takviyesiyle 428 ± 6 MPa değerine yükselmiştir. Bu değer indüksiyonla sıcak presleme sonrası 471 ± 6 MPa değerine ulaşmıştır. Ancak ağırlıkça %15 takviye oranında basma dayanımında düşüş görülmüştür.



Şekil 6.27. Al7075- Al_2O_3 kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısı işlem türüne bağlı olarak değişimi

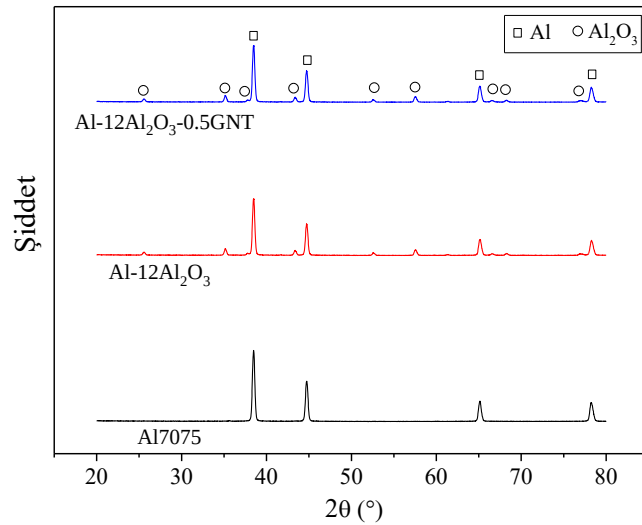
Al7075- Al_2O_3 -Grafen hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri Şekil 6.28'de verilmiştir. Şekillerden, grafen takviyesi ve indüksiyonla ısı işlemle birlikte basma dayanımının arttığı görülmektedir. En yüksek basma dayanımına (486 ± 4 MPa) ise sinterlenmiş ve indüksiyonla ısı işlem görmüş Al7075-%12 Al_2O_3 -%0,1Grafen kompozitlerde erişilmiştir. Basma dayanımında sadece sinterlenmiş Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla %70,5 oranında artış sağlanmıştır. Bu artışın sebebi olarak önceki bölümde açıklanan mukavemet artırıcı mekanizmalar (yük transfer mekanizması, Orowan mekanizması, tane inceltme mekanizması, termal uyumsuzluk vb.) gösterilebilmektedir. Ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinin üzerindeki değerlerde grafenin topaklanmasından kaynaklı olarak basma dayanımında düşüş görülmüştür.



Şekil 6.28. Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlerin basma dayanımının takviye oranı ve ısıl işlem türüne bağlı olarak değişimi

6.2.5. XRD faz analizi sonuçlarının değerlendirilmesi

Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%12Al₂O₃ ve Al7075-12Al₂O₃-0,1Grafen kompozitlere ait XRD örgü desenleri Şekil 6.29’da sunulmuştur. Şekilde Al “□” simgesi ile gösterilirken; Al₂O₃ “○” simgesi ile gösterilmiştir. XRD analizi sonucunda, oluşan piklerin Al₂O₃ ve alüminyuma ait olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca yapıda Al₄C₃ ve AlN gibi istenmeyen fazlara ait piklerin oluşmadığı görülmüştür. Ancak düşük cihaz hassasiyeti nedeniyle grafen pikine de rastlanmamıştır.



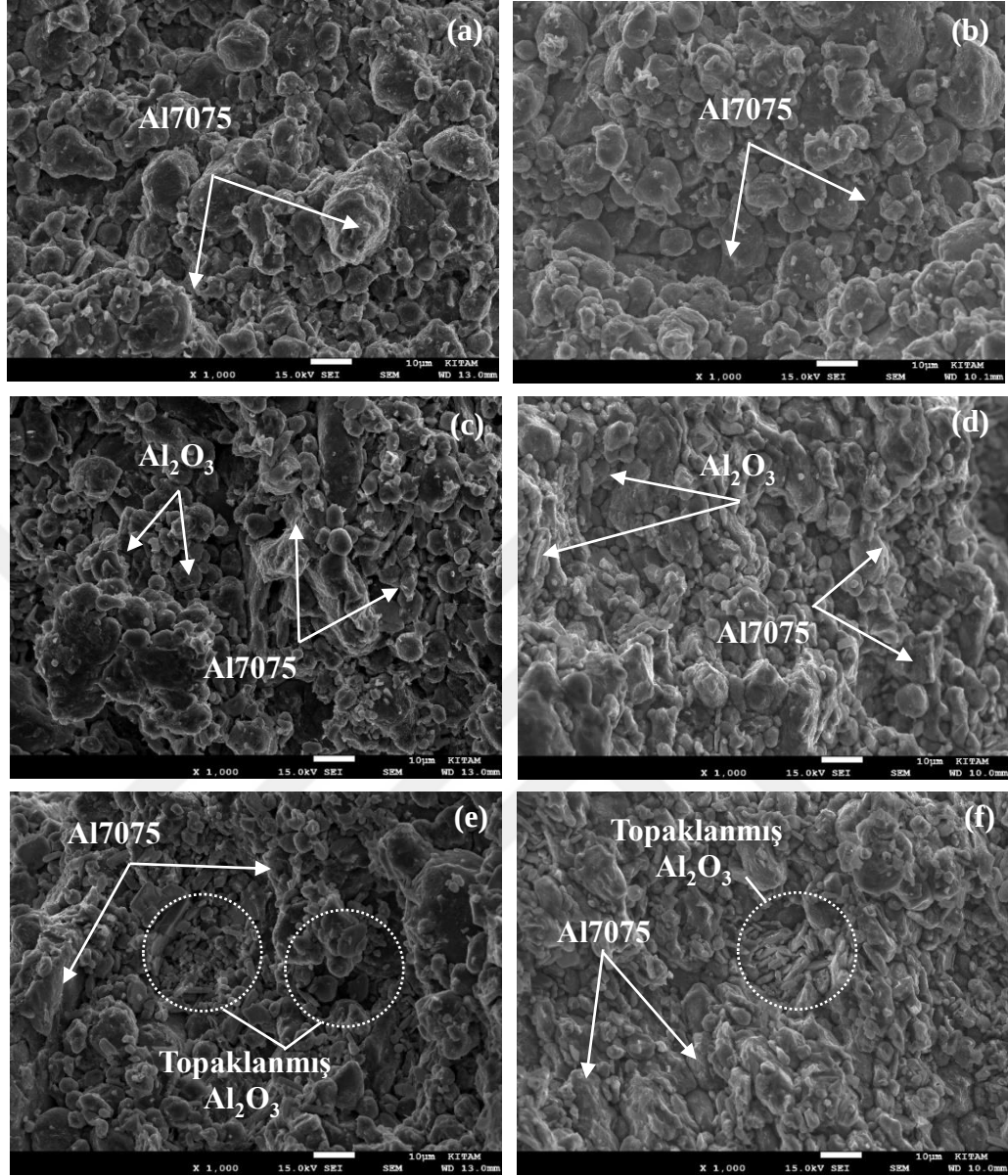
Şekil 6.29. Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%12Al₂O₃ ve Al7075-%12Al₂O₃-0,1Grafen kompozitlere ait XRD faz analizi

6.2.6. SEM ve SEM-EDX görüntülerinin değerlendirilmesi

Şekil 6.30'da Al7075 alüminyum alaşımına ve Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.30 (a), (c), (e)'de sadece sinterlenmiş numunelere ait SEM görüntüleri verilirken; 6.30 (b), (d), (f)'de sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin SEM görüntüleri sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde; Al₂O₃ partiküllerinin mikroyapıda homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ayrıca sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerdeki arayüzey bağının sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla daha güçlü olduğu görülmüştür. Sinterlenmiş numunelerde gözlemlenen boyun oluşumunun indüksiyonla sıcak presleme sonrası daha güçlü hale geldiği ve taneler arası etkileşimin arttığı tespit edilmiştir. SEM görüntülerinden, numunelerin taneler arası kırılma karakteristiği gösterdiği görülmüştür. Ayrıca Al7075 alüminyum alaşımının sünek kırılma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Ancak mikroyapıya eklenen sert ve kırılğan Al₂O₃ partikülleriyle birlikte kırılma karakteristiğinin değiştiği ve malzemenin gevrek kırılma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviyesinde ise Al₂O₃ partiküllerinin topaklandığı gözlemlenmiştir.

İndüksiyonla sıcak presleme öncesi

İndüksiyonla sıcak presleme sonrası

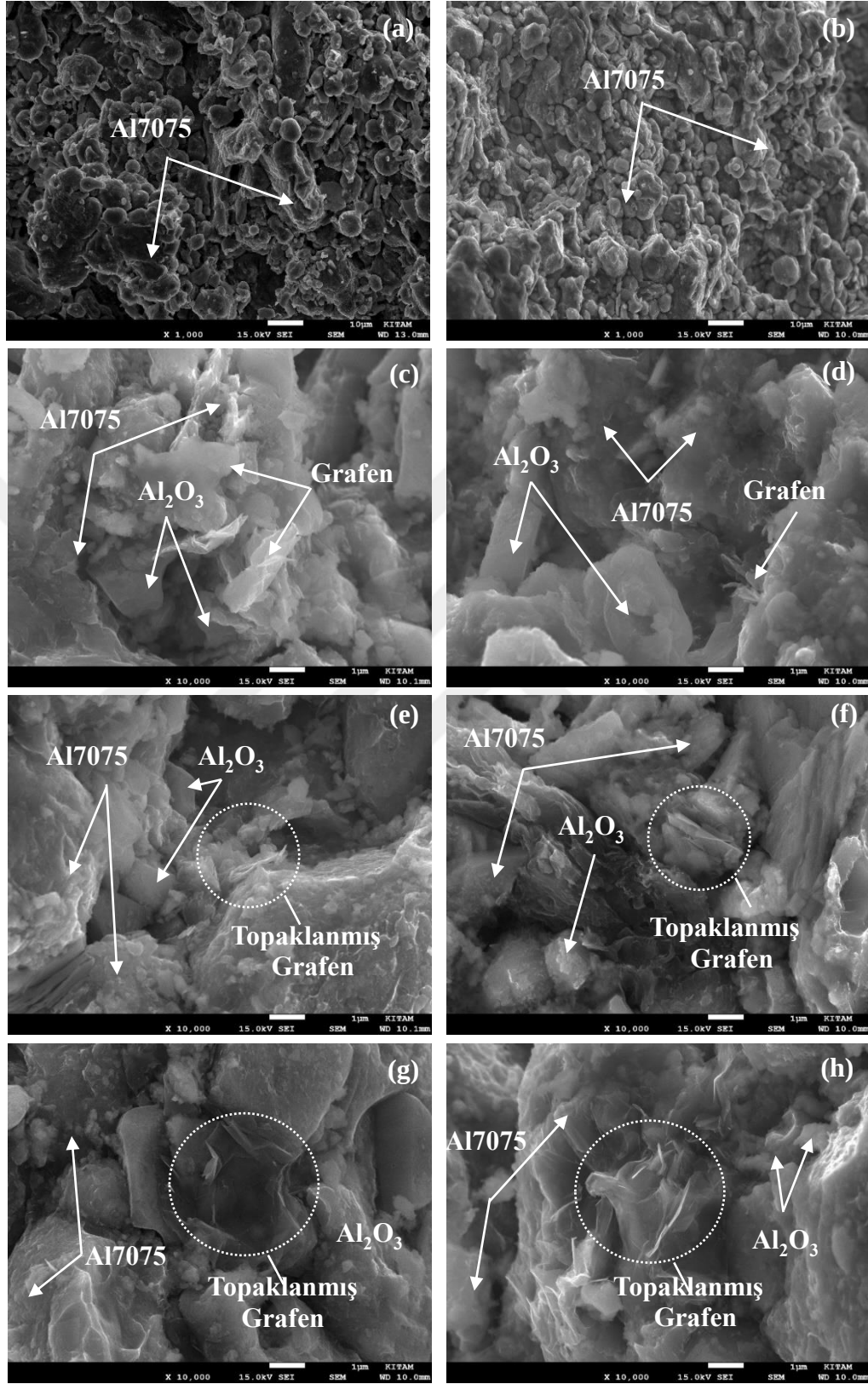


Şekil 6.30. Al7075 alüminyum alaşımı ve Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075 alaşımı (a), Al7075-i (b), Al7075-%12Al₂O₃ (c), Al7075-%12Al₂O₃-i (d), Al7075-%15Al₂O₃ (e), Al7075-%15Al₂O₃-i (f)

Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.31’de verilmiştir. Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen hibrit kompozite ait kırık yüzey SEM görüntülerinden, Al₂O₃ ve grafen partiküllerinin mikroyapıda homojen dağılım gösterdiği görülmüştür. İndüksiyonla sıcak presleme işlemiyle birlikte numunelerin, sadece sinterlenen numunelere oranla daha yoğun bir mikroyapı sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak ağırlıkça %0,3 ve 0,5 oranlarında grafen içeren numunelerde grafenin topaklandığı görülmüştür. Bu durum mekanik test sonuçlarıyla tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

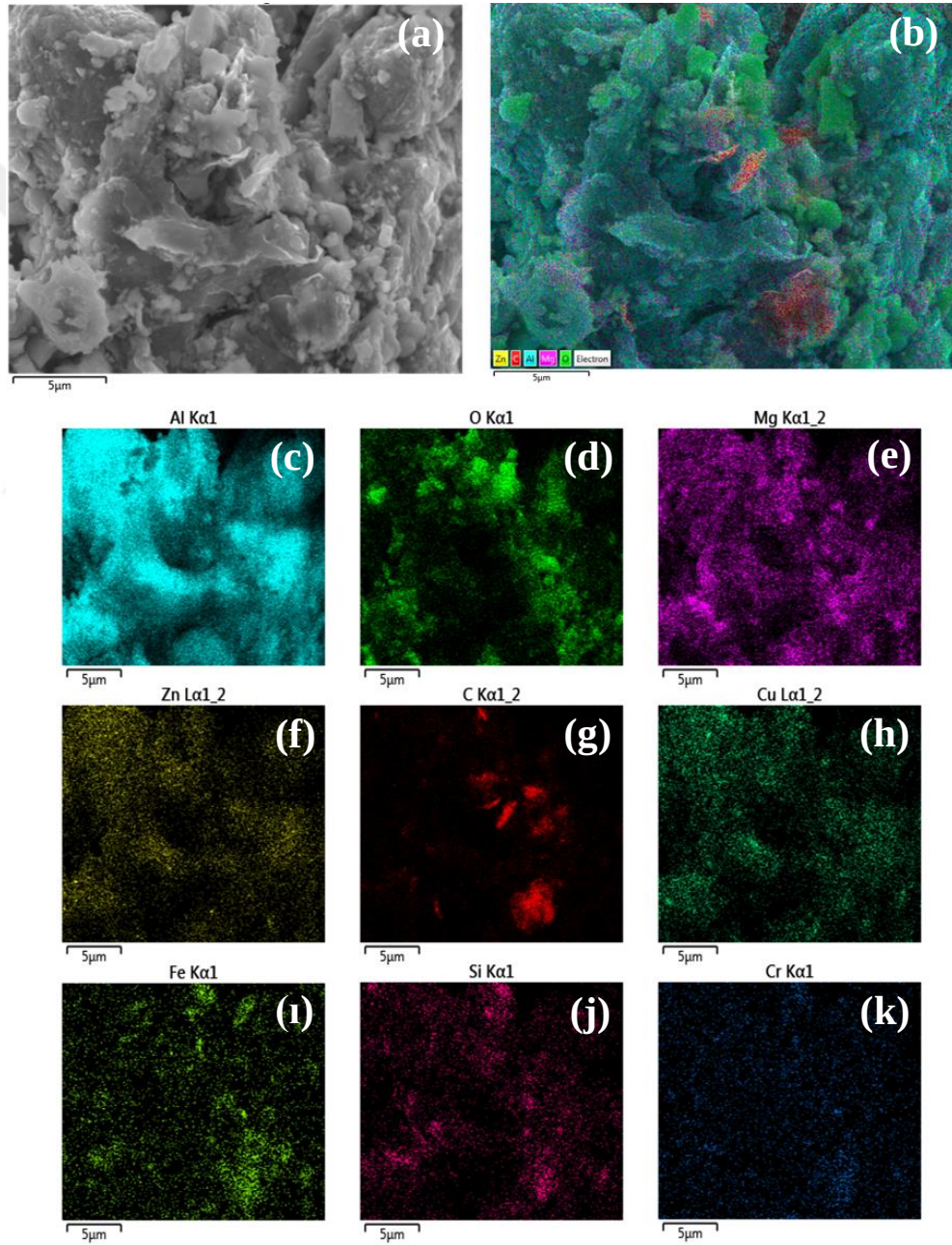
İndüksiyonla sıcak presleme öncesi

İndüksiyonla sıcak presleme sonrası



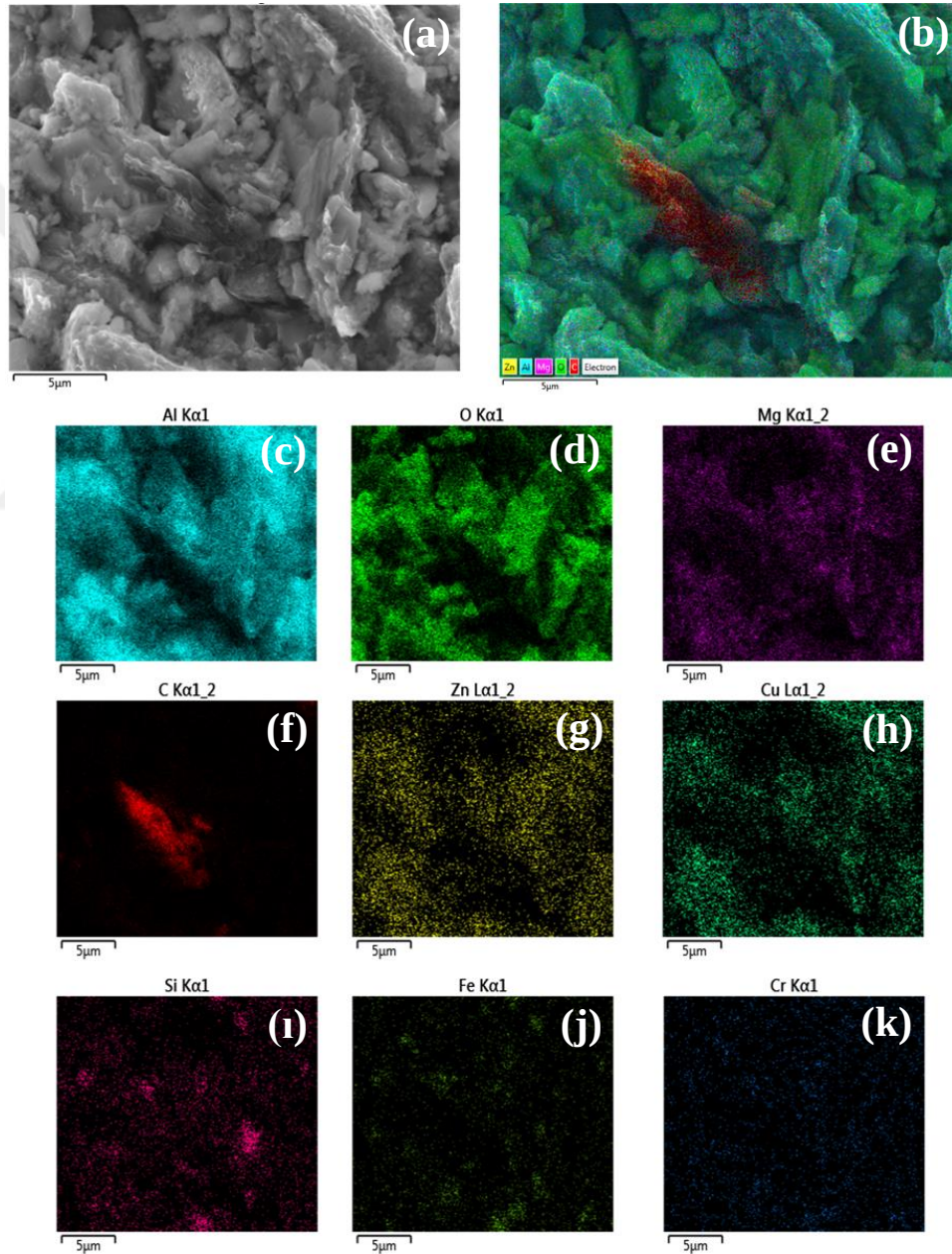
Şekil 6.31. Al7075 alüminyum alaşımı ve Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri: Al7075-%12Al₂O₃ (a), Al7075-%12Al₂O₃-i (b), Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen (c), Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen-i (d), Al7075-%12Al₂O₃-%0,3Grafen (e), Al7075-%12Al₂O₃-%0,3Grafen-i (f), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen (g), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen-i (h)

Sadece sinterlenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen kompozitlere ait SEM-EDX görüntüleri Şekil 6.32’de görülmektedir. SEM-EDX element dağılım haritasında, Al7075 alüminyum alaşımına ait elementlerin (Al (mavi renk), Zn (sarı renk), Mg (mor renk) ve Cu (yeşil renk)) ve C (kırmızı renk)) mikroyapıdaki varlığı doğrulanmıştır. Ayrıca takviye elemanı olarak kullanılan alüminaya ait Al (mavi renk) ve O (yeşil renk) elementleri mikroyapıda tespit edilmiştir. Element dağılım haritası incelendiğinde, kırmızı renkle gösterilen C elementinin belirli bir bölgede yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum grafenin topaklandığını göstermektedir.



Şekil 6.32. Sadece sinterlenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen hibrit kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-k)

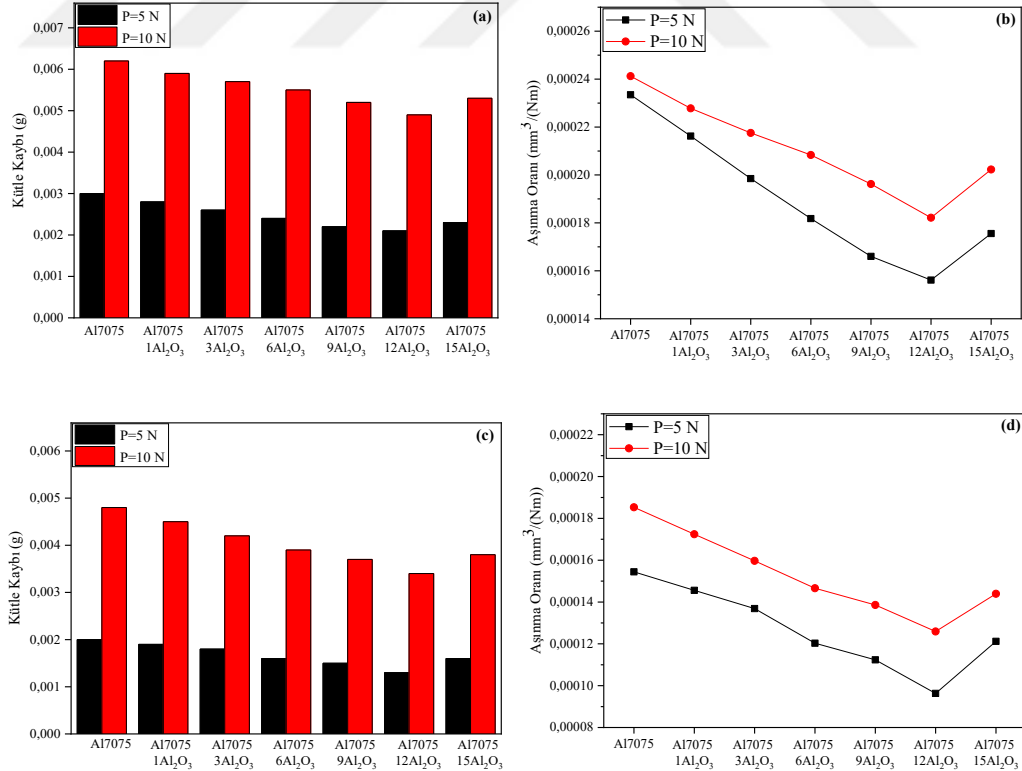
Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen hibrit kompozitlere ait SEM-EDX görüntüleri Şekil 6.33’de verilmiştir. SEM-EDX görüntüleri ile yapıdaki Al7075, Al₂O₃ ve grafen varlığı doğrulanmıştır. Al (mavi renk), Zn (sarı renk), Mg (mor renk), Cu (koyu yeşil renk) ve Fe (yeşil renk) elementleri Al7075 alüminyum alaşımının varlığını doğrulamaktadır. Kırmızı renkle gösterilen karbon atomu grafenin tane sınırlarına yerleştiğini ve bu bölgelerde topaklandığını göstermektedir. Aynı zamanda Al (mavi renk) ve O (yeşil renk) elementleri mikroyapıdaki Al₂O₃ varlığını doğrulamaktadır.



Şekil 6.33. Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen hibrit kompozite ait SEM görüntüsü (a), SEM-EDX görüntüsü (b) ve element dağılım haritaları (c-k)

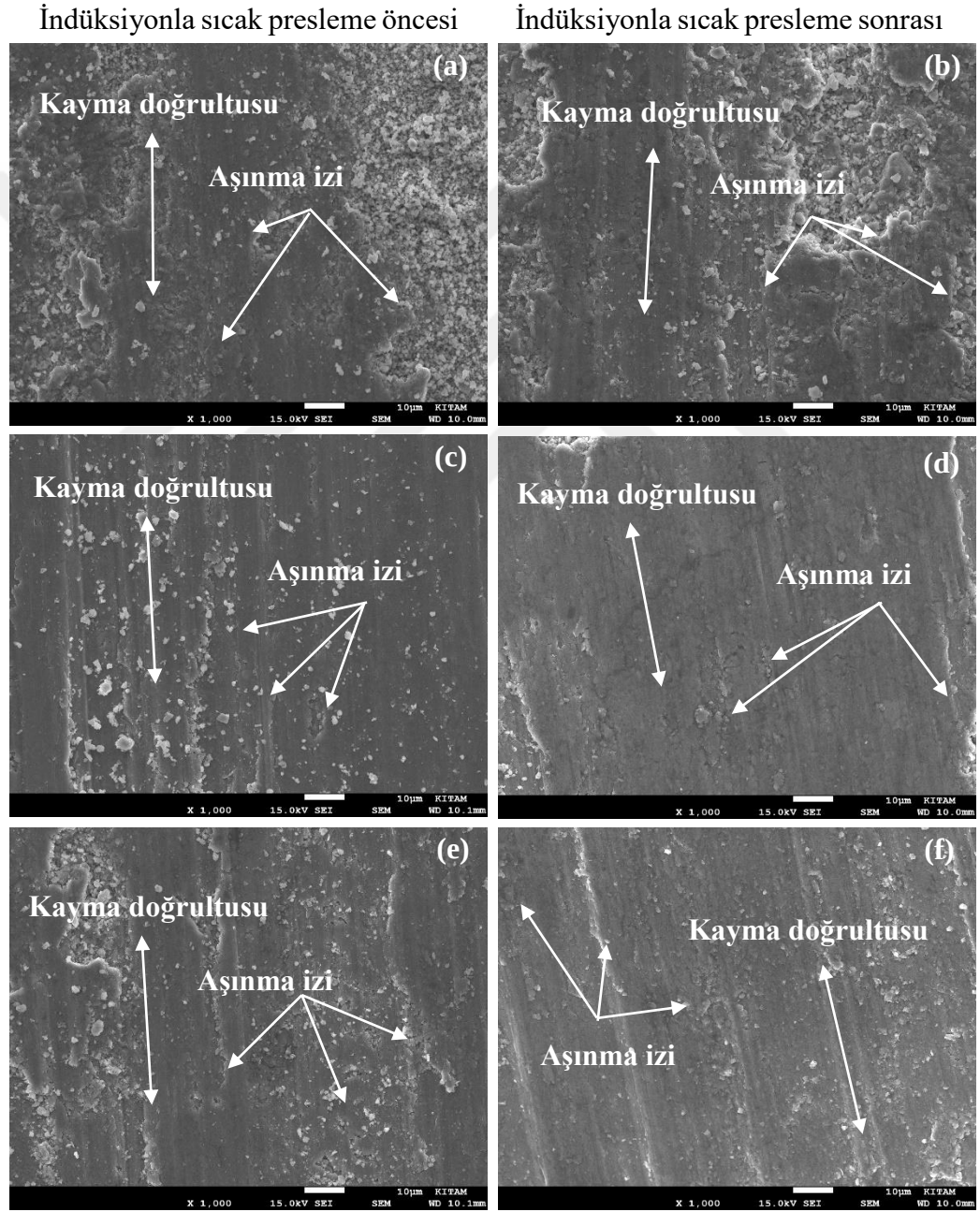
6.2.7. Aşınma test sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 6.34’de verilen Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait kütle kaybı ve aşınma oranı grafikleri incelendiğinde; Al₂O₃ takviyesiyle birlikte kütle kaybı ve aşınma oranının azaldığı görülmüştür. En düşük aşınma oranı ve kütle kaybı Al7075-%12Al₂O₃ kompozitlerde $1,5 \times 10^{-4}$ mm³/Nm ve 0,002 g olarak bulunmuştur. İndüksiyonla ısıtılma işlem sonrasında ise kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri sırasıyla 0,001 g ve $0,9 \times 10^{-4}$ mm³/Nm olarak belirlenmiştir. Kütle kaybı ve aşınma oranında görülen bu azalma indüksiyonla ısıtılma işlem sonrasında artan sertlikle ilişkilidir. Denklem 6.2’de verilen Archard eşitliğine göre sertlikteki artış aşınma oranında azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca aşınma testi sırasında kullanılan yükün artırılmasıyla (10 N) aşınma oranı ve kütle kaybı değerlerinde artış görülmüştür. Yükteki artışla birlikte aşınan malzeme ve karşı disk arasında sürtünmeden kaynaklı olarak sıcaklık artışı gerçekleşmektedir. Bu sıcaklık artışı malzemede yumuşamaya dolayısıyla da aşınma oranı ve kütle kaybında artışa neden olmaktadır. Sonuç olarak en düşük aşınma oranı ve kütle kaybına 5 N yük uygulanan sinterlenmiş ve indüksiyonla ısıtılma işlem görmüş Al7075-%12Al₂O₃ kompozitlerde ulaşılmıştır.



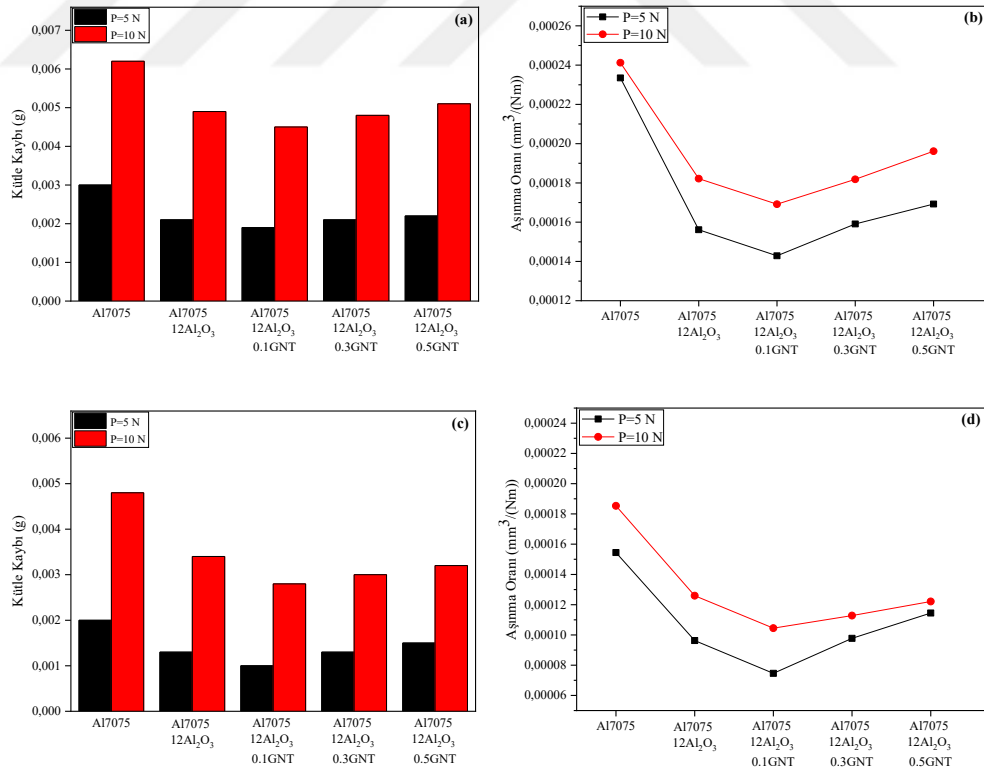
Şekil 6.34. Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi kütle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ile aşınma oranı (d)

Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait aşınma izlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃ kompozitin yüzeyindeki aşınma izlerinin minimum seviyede olduğu görülmüştür (Şekil 6.35). Ayrıca numune yüzeylerinde Al₂O₃ partiküllerine rastlanılmıştır. Bu sert partiküller numunelerin abrasif olarak aşınmasına neden olmuştur. Al7075-%15Al₂O₃ kompozit yapıdaki aşınma izlerinin Al7075-%12Al₂O₃ kompozite kıyasla daha derin olduğu tespit edilmiştir.



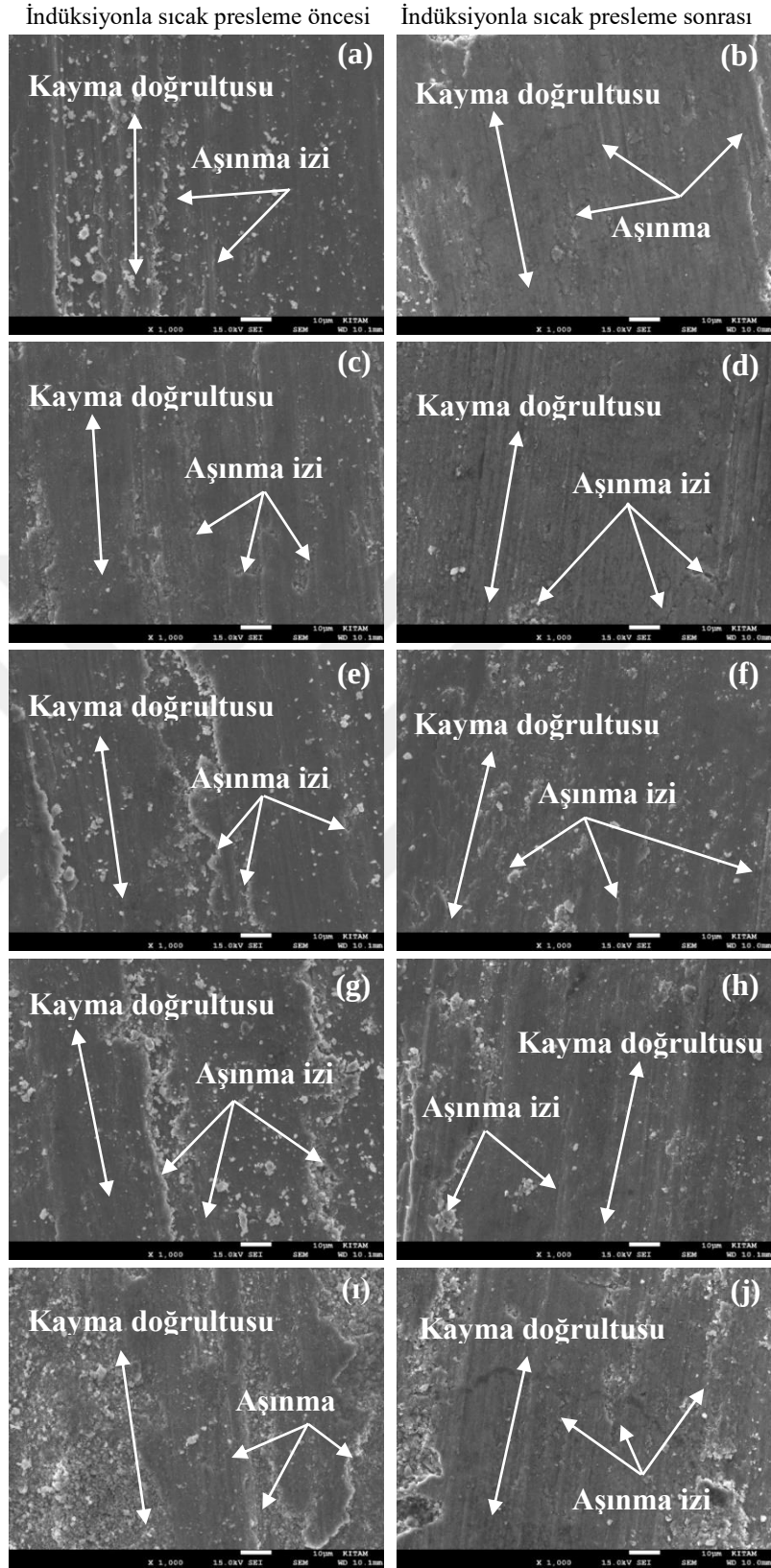
Şekil 6.35. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozitlere ait aşınma izleri (P=5 N): Al7075 alaşımı (a), Al7075-i (b), Al7075-%12Al₂O₃ (c), Al7075-%12Al₂O₃-i (d), Al7075-%15Al₂O₃ (e), Al7075-%15Al₂O₃-i (f)

Al7075-%12Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlere ait kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri incelendiğinde; katı yağlayıcılık özelliğine sahip grafen takviyesinin aşınma davranışını iyileştirdiği görülmüştür (Şekil 6.36). Uygulanan yükün 5 N'dan 10 N'a çıkarılmasıyla numunelerin aşınma oranı ve kütle kaybı artmıştır. En düşük aşınma oranına ($0,7 \times 10^{-4}$ mm³/Nm) ve kütle kaybına (0,001 g) ise 5 N yük altında ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen hibrit kompozitlerde ulaşılmıştır. Grafen takviyesinin artışıyla birlikte ise artan topaklanmadan kaynaklı olarak aşınma oranı ve kütle kaybı artmıştır. İndüksiyonla sıcak preslemenin etkisi incelendiğinde ise; sıcak preslenen numunelerin kütle kaybı ve aşınma oranı değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 6.36). Bu durum indüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerin yüksek sertliği ile açıklanabilmektedir. Denklem 6.2'de verilen Archard eşitliğine göre sertlik ve aşınma dayanımının doğru orantılı olduğu bilinmektedir. İndüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerde sıcaklık ve basıncın kombinasyonu ile partiküller arası kuvvetli bağların oluşması sebebiyle yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Sertlik değerinin yüksek olmasından kaynaklı olarak da numunelerin aşınması zorlaşmış olup aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri düşmüştür.



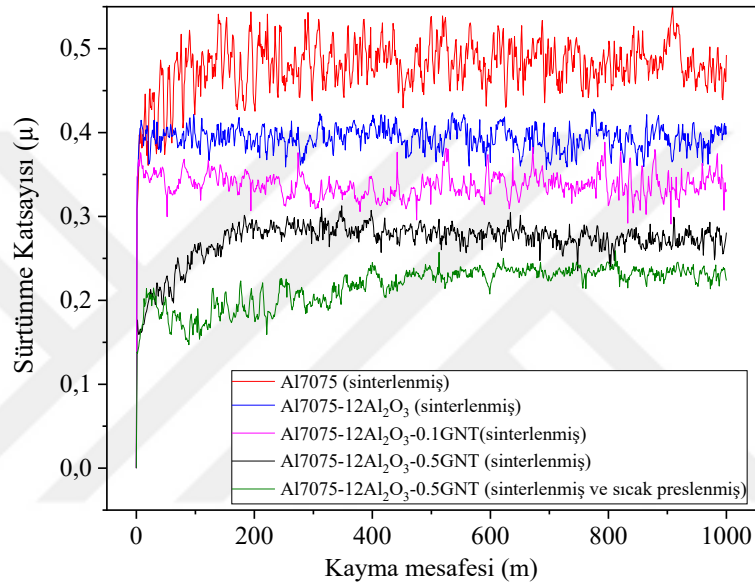
Şekil 6.36. Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ktle kaybı (a) ile aşınma oranı (b) değerleri indüksiyonla sıcak presleme sonrası kütle kaybı (c) ile aşınma oranı değerleri

Şekil 6.37’de Al7075-%12Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlerin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası aşınma izlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; Al7075-%12Al₂O₃ kompozitteki aşınma izlerinin Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen kompozittekine kıyasla daha derin ve yoğun olduğu görülmektedir. Bu durum mikroyapıya ilave edilen katı yağlayıcılık özelliğine sahip olan grafenin aşınma dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak grafen katkı oranının artmasıyla birlikte oluşan aşınma izlerinin de arttığı görülmüştür. Grafen katı yağlayıcılık özelliği ile aşınma dayanımını olumlu yönde etkilemesine rağmen yüksek oranlarda kullanımı durumunda mikroyapıda topaklanmıştır. Topaklanan grafen partikülleri istenilen etkiyi gösteremediğinden dolayı aşınma dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum aşınma izlerine ait SEM görüntüleriyle kanıtlanmıştır. Ağırlıkça %0,3 ve %0,5 oranlarında grafen içeren hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde ise; aşınma izlerinin arttığı görülmüştür. İndüksiyonla sıcak preslenmiş numunelerde ise sadece sinterlenmiş numunelere kıyasla aşınma izlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca aşınmadan kaynaklı oluşan deformasyonun en düşük olduğu kompozitin indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen hibrit kompozit olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yükün 10 N’a çıkarılmasıyla birlikte ise aşınma izlerinin yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Artan yük sebebiyle sürtünme kuvvetinin artması sonucu sıcaklık yükselmiştir. Bu durumda malzemenin yumuşayarak daha kolay aşınmasına sebep olmuştur. Ayrıca numunelerde abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. Aşınma testleri sonucunda elde edilen aşınma oranı ve kütle kaybı değerleriyle SEM görüntülerinin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.37. Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlere ait indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kompozitlere ait aşınma izleri: Al7075-%12Al₂O₃ (a), Al7075-%12Al₂O₃-i (b), Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen (c), Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen-i (d), Al7075-%12Al₂O₃-%0,3Grafen (e), Al7075-%12Al₂O₃-%0,3Grafen-i (f), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen (g), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen-i (h), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen (P=10 N) (i), Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen-i (P=10 N) (j)

Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-%12Al₂O₃ ve Al7075-%12Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitler ve paslanmaz çelik karşı disk arasındaki sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi Şekil 6.38’de verilmiştir. Sürtünme katsayısı değişim eğrileri incelendiğinde; ağırlıkça %12 Al₂O₃ katkısıyla sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Grafen katkısıyla ise grafenin katı yağlayıcılık özelliğinden dolayı sürtünme katsayısı azalmıştır. Al7075-%12Al₂O₃-%0,5Grafen hibrit kompozitin indüksiyonla sıcak preslenmesi sonrasında ise en düşük sürtünme katsayısına (0,21) ulaşılmıştır.



Şekil 6.38. Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-Al₂O₃ ve Al7075-%12Al₂O₃-Grafen kompozitlerde sürtünme katsayısının kayma mesafesiyle değişimi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, Al7075-ZrO₂, Al7075-Al₂O₃, Al7075-ZrO₂-Grafen ve Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitler toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş olup mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Farklı oranlarda takviye malzemelerinin (ZrO₂: ağırlıkça %1, 3, 6, 9; Al₂O₃: ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15; Grafen: ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) ve uygulanan ısı işlem türünün (sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme) mekanik (yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı) ve tribolojik özelliklere (aşınma oranı, kütle kaybı ve sürtünme katsayısı) olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

7.1. ZrO₂/Grafen Takviyeli Al7075 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi

Al7075 alüminyum matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9 oranlarında ZrO₂ takviyesi yapılarak toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenerek en iyi özelliklere sahip en uygun ZrO₂ takviye oranı belirlenmiştir. Optimum takviye oranına (ağırlıkça %6) karar verildikten sonra yapıya ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 oranlarında grafen takviyesi yapılarak hibrit kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen numunelerin yoğunluk ve sertlik ölçümü, basma ve aşınma testleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Al7075-ZrO₂ kompozitlerde en yüksek deneysel yoğunluk (2,72 g/cm³), sertlik (157±4 HV), basma dayanımı (426±7 MPa); en düşük kütle kaybı (0,0015 g) ve aşınma oranı (1,1x10⁻⁴ mm³/Nm) değerlerine sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş ağırlıkça %6 oranında ZrO₂ içeren kompozitlerde erişilmiştir. Ağırlıkça %9 ZrO₂ takviyesinde ise nanopartiküllerin topaklanmasından dolayı mekanik ve tribolojik özelliklerde düşüş gerçekleşmiştir.
- Al7075-ZrO₂ kompozitler için yapılan SEM analizlerinde; ZrO₂ nanopartiküllerinin mikroyapıda homojene yakın bir şekilde dağıldığı, indüksiyonla sıcak presleme sonrasında ise taneler arası etkileşimin

artarak arayüzey bağının güçlendiği tespit edilmiştir. XRD analizlerinde ise mikroyapıda istenmeyen ikincil fazlara rastlanmamıştır.

- Al7075-%6ZrO₂-Grafen hibrit kompozitlerde en yüksek deneysel yoğunluğa (2,74 g/cm³), en yüksek sertliğe (169±2 HV), en düşük gözeneklilik oranına (%6,7) ve en yüksek basma dayanımına (450±4 MPa) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen kompozitlerde ulaşılmıştır. Grafen katkı oranının artmasıyla birlikte ise elektrostatik çekim kuvvetleri sebebiyle grafen nanopartiküller topaklanmış olup bu durum mekanik ve tribolojik özellikleri olumsuz etkilemiştir. Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen kompozitlerde Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla yoğunluk, sertlik ve basma dayanımında sırasıyla; ~%7, ~%32,1 ve ~%47,05 oranlarında artış sağlanmıştır.
- Aşınma testleri sonucunda en düşük kütle kaybı (0,0014 g) ve aşınma oranı (1x10⁻⁴ mm³/Nm) 5 N yük altında sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen hibrit kompozitlerde elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise (0,22) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%6ZrO₂-%0,5Grafen hibrit kompozitlerde elde edilmiştir. Grafenin katı yağlayıcılık özelliği sebebiyle tribolojik özellikleri iyileştirdiği tespit edilmiştir. Grafen takviyesi ile birlikte Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla Al7075-%6ZrO₂-%0,1Grafen kompozitlerin kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısında sırasıyla; ~%30, ~%33,8 ve ~%48,84 oranlarında azalma görülmüştür.
- Al7075-%6ZrO₂-Grafen hibrit kompozitlerin SEM analizlerinde, grafen ve ZrO₂ nanopartiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür. Bu durum ısıtma işlemleri sırasında (sinterleme ve indüksiyonla ısıtma işlemi) aşırı tane büyümesinin önüne geçerek mekanik özelliklerin iyileşmesini olumlu yönde etkilemektedir. XRD örgü desenlerinde ise sadece alüminyum ve ZrO₂ piklerine rastlanılmıştır. Düşük takviye oranı ve düşük cihaz hassasiyetinden dolayı grafen pikleri gözlemlenememiştir.

7.2. Al₂O₃/Grafen Takviyeli Al7075 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirmesi

Çalışmanın bu bölümünde, Al7075 matrise farklı oranlarda Al₂O₃ (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15) ve grafen (ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) takviyesinin kompozitlerin mikroyapısına, mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Üretilen Al7075-Al₂O₃ ve Al7075-Al₂O₃-Grafen kompozitlerin mikroyapı analizleri, yoğunluk ölçümleri, sertlik, basma ve aşınma testleri gerçekleştirilerek elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin mekanik test sonuçlarına göre; en yüksek deneysel yoğunluk (2,7 g/cm³), sertlik (170±2 HV), basma dayanımı (471±6 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%8,2) değerlerine sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃ kompozitlerde ulaşılmıştır. Sadece sinterlenmiş Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃ kompozitlerin yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı değerlerinde sırasıyla ~%5,1, ~%41,67 ve ~%65,3 oranlarında artış sağlanmıştır.
- Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin aşınma test sonuçlarına göre; en düşük kütle kaybına (0,001 g) ve aşınma oranına (0,9x10⁻⁴ mm³/Nm) 5 N yük altında sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃ kompozitlerde ulaşılmıştır. Ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviyesinde ise alümina taneciklerin topaklanması sebebiyle kompozitin tribolojik özellikleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Ayrıca aşınma yükü 10 N değerine çıkarıldığında kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlemlenmiştir.
- SEM incelemelerine göre; indüksiyonla ısıtıl işlem sonrası sıcak preslemeden dolayı oluşan deformasyon etkisiyle tanelerin yakınlaştığı ve gözeneklilik oranının düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum mekanik özelliklerin indüksiyonla sıcak presleme sonrası artışını açıklamaktadır. Ayrıca Al₂O₃ partikülerinin kırılma davranışını değiştirdiği ve kompozitlerin gevrek kırılma davranışı gösterdiği görülmüştür. Ağırlıkça %15 Al₂O₃ takviyesinde ise alümina taneciklerinin topaklandığı tespit edilmiştir. Bu durum mekanik test sonuçlarını doğrulamaktadır.

- Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlerde ise en yüksek deneysel yoğunluk (2,72 g/cm³), sertlik (178±1 HV), basma dayanımı (486±4 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) değerlerine sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen hibrit kompozitlerde ulaşılmıştır. Ancak grafenin nano boyutlu yapısı sebebiyle daha yüksek oranlarda kullanımı (ağırlıkça %0,3, 0,5) mikroyapı içerisinde topaklanmalara neden olmakta ve kompozitin mekanik özellikleri kötüleşmektedir.
- Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlerin aşınma testi sonuçlarına göre; en düşük kütle kaybı (0,001 g) ve aşınma oranı (0,7x10⁻⁴ mm³/Nm) 5 N yük altında sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%12Al₂O₃-%0,1Grafen hibrit kompozitlerde belirlenmiştir. Katı yağlayıcılık özelliği gösteren grafenin Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin aşınma davranışını iyileştirdiği belirlenmiştir.
- Al7075-Al₂O₃-Grafen hibrit kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntülerinden; Al₂O₃ ve grafen partiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası taneler arası boyun oluşumu etkisiyle arayüzey bağının güçlendiği görülmüştür. Bu arayüzey bağı indüksiyonla sıcak presleme sonrasında daha da güçlenmiş ve bu durum mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde ise; grafen takviyesiyle aşınma izi derinliğinin azaldığı görülmüştür. Ancak grafen katkı oranının ağırlıkça %0,1'in üzerine ve uygulanan yükün 10 N'a çıkarılmasıyla aşınma izlerinin sayısı ve derinliğinin arttığı görülmüştür.
- Sonuç olarak, Al₂O₃ ve grafen takviyesinin Al7075 alüminyum matrisin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştiren etkili takviye elemanları olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca indüksiyonla sıcak preslemenin kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştiren etkili bir yöntem olduğu görülmüştür.

7.3. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Bu çalışmada, Al7075 alüminyum matrise Al₂O₃, ZrO₂ ve grafen takviyesi yapılarak toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları, mekanik

ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda yüksek mekanik ve tribolojik özelliklere sahip kompozitler elde edilmiş olup gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Bu çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alüminyum alaşımı yerine 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx ve 6xxx serilerinden alüminyum alaşımlar tercih edilebilir.
- Çalışmada takviye malzemesi olarak kullanılan Al_2O_3 ve ZrO_2 seramikleri yerine Si_3N_4 , B_4C , TiC , SiC , BN ve TiO_2 gibi farklı seramiklerle grafen takviyeli hibrit kompozitler üretilip mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
- Üretim yöntemi olarak toz metalürjisi yöntemi yerine karıştırma döküm, mekanik alaşımlama, sürtünmeli karıştırma vb. yöntemler kullanılabilir.
- Üretilen kompozitlerin farklı mekanik özellikleri (çekme mukavemeti, eğme mukavemeti, yorulma mukavemeti, darbe dayanımı, kırılma tokluğu, sürünme dayanımı vb.) incelenebilir.
- Üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri dışında elektriksel, termal, optik, manyetik ve korozyon davranışları araştırılabilir.
- Mikroyapı incelemeleri için SEM, SEM-EDX ve XRD analizlerine ilaveten Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Raman spektroskopu analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdizadeh, H. and Baghchesarab, M. A. (2013). Investigation on mechanical properties and fracture behavior of A356 aluminum alloy based ZrO₂ particle reinforced metal-matrix composites. *Ceramics International*, 39(2), 2045-2050.
- Aghajani, S., Pouyafar, V., Meshkabadi, R., Volinsky, A. A. and Bolouri, A. (2023). Mechanical characterization of high volume fraction Al7075-Al₂O₃ composite fabricated by semisolid powder processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 2569-2580, <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10881-9>.
- Al-Jaafari, M. A. A. (2021). Study the effects of different size of Al₂O₃ nanoparticles on 6066AA and 7005AA composites on mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 42(5), 2909-2913.
- Al-Salihi, H. A. and Judran, H. K. (2020). Effect of Al₂O₃ reinforcement nanoparticles on the tribological behaviour and mechanical properties of Al6061 alloy. *Materials Science*, 7(4), 486-498.
- Altan, D. (2017). *Grafen nano plaka takviyeli alümina-zirkonya kompozitlerinin spark plazma sinterleme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 67, İstanbul.
- Altıntaş, A. (2017). *Alümina ve grafen tozlarının vakum altında yüksek frekanslı indüksiyon sistemiyle sinterlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, Manisa.
- Argıncıklıgil, A. (2019). *Çeliklerde vickers sertlik değerlerine uygulanan yük etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 42, Sakarya.
- Arık, H., Semerci, P. ve Kırmızı, G. (2017). Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al₂O₃ takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışlarının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(4), 87-97.
- ASM Handbook Committee. (1984) *ASM handbook volume 7: Powder Metallurgy*. United States of America: ASM International.
- ASM Handbook Committee. (2001) *ASM handbook volume 21: Composites*. United States of America: ASM International.
- Aybarç, U. ve Seydibeyoğlu, M. Ö. (2021). The comparison of nano-Al₂O₃ vs graphene additives for the reinforcement of aluminum matrix composite. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 4(1), 67-78.
- Başer, T. A. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımları. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(635), 51-58.
- Baydemir, E. (2018). *Sıcak presleme yöntemi ile üretilen AA6061 matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 81, Denizli.
- Bharath, V., Auradi, V. and Nagaral, M. (2021). Fractographic characterization of Al₂O₃p particulates reinforced Al2014 alloy composites subjected to tensile loading. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 15(57), 14-23.
- Bharath, V., Nagaral, M., Auradib, V. and Koric, S. S. (2014). Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by stir casting and evaluation of mechanical and wear properties. *Procedia Materials Science*, 6, 1658 – 1667.
- Bharti, S., Ghetiya, N. D. and Dutta, V. (2021). Investigating microhardness wear behavior of Al5052/ZrO₂ surface composite produced by friction stir processing. *Materials Today: Proceedings*, 44(1), 52-57.

- Bharti, S., Ghetiya, N. D. and Patel, K. M. (2020). Micro-hardness and wear behavior of AA2014/Al₂O₃ surface composite produced by friction stir processing. *SN Applied Sciences*, 2(11), 1760. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03585-2>.
- Boppana, S. B., Aravinda T., Dayanand, S., Reddy, V., Kumar, V., Gautham, R. and Nagaraj, M. (2021b). Synthesis and characterization of ZrO₂ and graphene particle reinforced Al6061 metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 46(13), 6064-6067.
- Boppana, S. B., Dayanand, S., Murthy, V. B., Nagaral, M., Telagu, A., Kumar, V. and Auradi, V. (2021a). Development and mechanical characterisation of Al6061-Al₂O₃-graphene hybrid metal matrix composites. *Journal of Composites Science*, 5(6), 155. <https://doi.org/10.3390/jcs5060155>.
- Boppana, S. B., Dayanandb, S., Kumar, A., Kumar, V. and Aravinda, T. (2020). Synthesis and characterization of nano graphene and ZrO₂ reinforced Al 6061 metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7354-7362.
- Boushiha, K. F. I. (2020). *Toz metalurjisi yöntemi ile WC takviyeli CUNİSİ kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 63, Kastamonu.
- Boyacıoğlu, T. (2007). *Katı oksit yakıt hücrelerinde elektrolit malzemesi olarak kullanılan kübik zirkonyum oksitin (c-ZrO₂) değişik oranlarda metal oksit katkıları ile oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, 105, Ankara.
- Bradeswaran, A., Elayaperumal, A. and Issac, R. F. (2013). A Statistical analysis of optimization of wear behaviour of Al-Al₂O₃ composites using taguchi technique. *Procedia Engineering*, 64, 973-982.
- Callister, W. D. and Retwisch, D. G. (2015). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. Kenan Genel (çev.), Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Chak, V. and Chattopadhyay, H. (2020). Fabrication and heat treatment of graphene nanoplatelets reinforced aluminium nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, 791(1), 139657. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139657>.
- Chauhan, A. and Chauhan, P. (2014). Powder XRD Technique and its Applications in Science and Technology. *Journal of uoJ Analytical & Bioanalytical Techniques*, 5(5), 1-5.
- Chen, W., Yang, T., Dong, L., Elmasry, A., Song, J., Elmarakbi, A., Liu, T., Lu, H. B. and Fu, Y. Q. (2020). Advances in graphene reinforced metal matrix nanocomposites: mechanisms, processing, modelling, properties and applications. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 3(4), 189–210.
- Comba, A., Scotti, N., Maravic, T., Mazzoni, A., Carossa, M., Breschi, L. and Cadenaro, M. (2020). Vickers hardness and shrinkage stress evaluation of low and high viscosity bulk-fill resin composite, *Polymers*, 12(7), 1477.
- Çelebi, C. (2013). *Bakır esaslı kompozit malzeme üretimi ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 90, Trabzon.
- Dange, A. S. and Jayakumar, J. (2018). Evaluation of Mechanical and Wear Properties of Aluminium-Al₂O₃ Composite Material. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(8), 1440-1447.
- Darshan, M., Reddappa, H. N., Chandrashekar, A. and Vinod Kumar, R. (2018). kumar. *International Journal of Science & Engineering Development Research*, 3(7), 230-235.
- Demir, M. (2020). *Alüminyum-7075 dövme alaşımlarının dökülebilmesi ve T6 yaşlandırma ısıtma işlemi ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi*. Yüksek Lisans

- Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, Sakarya
- Dengiz, Ö. E. (2018). *Grafen takviyeli magnezyum kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 86, Samsun.
- Dieter, G. E. (1961). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, (London).
- Doğu, B. S. (2019). *Sıcak presleme yöntemi ile Al₂Cu ve h-BN katkılı alüminyum ve alüminyum alaşım matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 63, İstanbul.
- Dokur, M. M. (2009). *Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, İstanbul.
- Ercan, H. (2006). *Uçak sanayiinde kullanılan balpeteği kompozitlerin mekanik davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 180, İstanbul.
- Erdil, A. (2020). *Kompozit malzemelerin genel özellikleri ve kullanımı*. Erişim: 21 Aralık 2021, <https://blog.tekyaz.com/kompozit-malzemelerin-genel-ozellikleri-ve-kullanimi/>
- Gautam, C., Joyner, J., Gautam, A., Rao, J. and Vajtai, R. (2016). Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. *Dalton Transactions*, 45(48), 19194-19215.
- Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M. ve Altunpak, Y. (2015). *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri* (4. Baskı), Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Ghodrati, H. and Ghomashchi, R. (2019). Effect of graphene dispersion and interfacial bonding on the mechanical properties of metal matrix composites: an overview. *FlatChem*, Elsevier B.V.
- Groover, M. P. (2013). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley and Sons.
- Guler, O. and Bagci, N. (2020). A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 6808–6833.
- Gunasekaran, T., Vijayan, S. N., Prakash, P. and Satishkumar, P. (2020). Mechanical properties and characterization of Al7075 aluminum alloy based ZrO₂ particle reinforced metal-matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.114>.
- Gürbüz, M. ve Mutuk, T. (2019). Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler. *Mühendis ve Makine*, 60(695), 101-118.
- Güven, O. (2005). *Alüminyum silisyum döküm alaşımlarının yapı incelemesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, İstanbul.
- Haddad, A., Benamor, A., Chiker, N., Hadji, Y., Temmar, M., Hakem, M., Badji, R., Abdi, S. and Hadji, M. (2021). Effect of heat treatment on microstructure and tribological behavior of friction stir processed Al₂O₃-reinforced AA2024-T351 matrix. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5(6), <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07237-6>.
- Hallem, A. H., Jasim, T. A. and Radhi, N. S. (2018). Effect of alumina reinforcement on some mechanical properties of aluminum matrix composites produced by stir casting process. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(10), 1271-1280.
- Harish, P., Siddiq, S., Srikanth, V. M.; Reddy, S. B. K. and Kishore Kumar, K. C. (2019). Effect of alumina and graphene on mechanical and tribological behaviour of Al-7075 hybrid composite. *Applied Engineering Letters*, 4(3), 79-87.

- Harsha, R. N., Kulkarni, M. V. and Babu, B. S. (2020). Study of mechanical properties of aluminium/nano-zirconia metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3100-3106.
- Hasan, A. S., Qudah, M. K., Faraj, S. R. and Al-Alkawi, H. J. M. (2019). Experimental investigation on electrical properties and wear rate of aluminum matrix nanocomposite (AMNC) of AA7100/Al₂O₃. *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*, 19(2), 193-206.
- Jamali, A. and Mirsalehi, S. E. (2022). Production of AA7075/ZrO₂ nanocomposite using friction stir processing: Metallurgical structure, mechanical properties and wear behavior. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 55-69.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech and Composite*, 22, 18-30.
- Kalemtaş, A. (2016). İnfiltrasyon yöntemiyle kompozit üretiminde etkili olan temel değişkenler. *Putech and Composite*, 20-26.
- Kandpal, B. C., Kumar, J. and Singh, H. (2014). Production technologies of metal matrix composite: a review. *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, 4(2), 27-32.
- Kang, Y. C. and Chan, S. L. I. (2004). Tensile properties of nanometric Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum matrix composites. *Mater Chem Phys*, 85(2-3), 438-443.
- Karabulut, H., Karacif, K. ve Çıtak, R. (2019). Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerde mekanik alaşımlama süresinin korozyon davranışına etkilerinin incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 576-583.
- Karadeniz, Ö. F. (2019). *Alüminyum titanyum karbür tane küçültücülerin elementel karbon yöntemiyle üretimi ve farklı alüminyum alaşımlarında performans etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 93, İstanbul.
- Karakoç, H. (2020). Toz metal Al7075/B₄C/Si₃N₄ kompozit malzemelerin üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1141-1151.
- Karthik, R., Gopalakrishnan, K., Venkatesh, R., Krishnan, A. M. and Marimuthu, S. (2022). Influence of stir casting parameters in mechanical strength analysis of Aluminium Metal Matrix Composites (AMMCs). *Materials Today: Proceedings*, 62, 1965-1968.
- Karthikeyan, G., Elatharasan, G., Thulasi, S. and Vijayalakshmi, P. (2021). Tensile, compressive and heat transfer analysis of ZrO₂ reinforced aluminum LM6 alloy metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 303-309.
- Kavitha, K. R. and Prakash, S. (2021). A systematic approach for the evaluation of wear characteristics of ZrO₂ and AA6081 using Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*, 44(5), 3908-3913.
- Kaw, A. K. (2014). *Kompozit malzeme mekaniği*. B. Okutan Baba, Ramazan Karakuzu (çev.), Ankara: Efil Yayınevi.
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech and Composite*, 29, 38-45.
- Kaya, N. ve Öz, D. C. (2020). Sol-Jel yöntemiyle üretilen alüminanın fizikokimyasal ve yapısal özellikleri üzerine kalsinasyon sıcaklığının etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1459-1478.
- Kayabaşı, İ. (2016). *Metal matrisli kompozit malzeme üretim sistemi imalatı ve performansının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 71, Karabük.
- Kelez, S. B. (2021). *Alüminyum matrisli farklı oranlarda grafen içeren B₄C takviyesi ile üretilen kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans

- Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 62, Karabük.
- Kennedy, E., Sachin, B. S., Ramachandra, M., Niranjan, C. A., Sriraman, N., Jain, V. K. S. and Narayanan, N. S. (2021). Effect of ZrO₂ nano-particles on mechanical and corrosion behaviour of Al2024 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 39(1), 1710-1713.
- Khalili, V., Heidarzadeh, A., Moslemi, S. and Fathyunes, L. (2020). Production of Al6061 matrix composites with ZrO₂ ceramic reinforcement using a low-cost stir casting technique: microstructure, mechanical properties, and electrochemical behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15072-15086.
- Khan, M., Amjad, M. and Khan, A. (2017). Microstructural evolution, mechanical profile and fracture morphology of aluminum matrix composites containing graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Research*, 32(11), 2055-2066.
- Kısaşöz, A. A. (2018). *Alüminyum matrisli titanyumdiborür in situ takviyeli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 87, İstanbul.
- Kibar, E. (2010). *7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan RRA ısıt işlemlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 142, Sakarya.
- Kishore, K. L. and Padal, K. T. B. (2022). Effect of graphene nano plateletson microstructural and wear behavior of AA7075/Al₂O₃ nano composites, *Materials Today: Proceedings*, 62, 4424-4431, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.903>.
- Kopeliovich, D. (2012). *Liquid state fabrication of metal matrix composites*. Erişim: 24 Kasım 2021, substech.com/dokuwiki/doku.php?id=liquid_state_fabrication_of_metal_matrix_composites
- Kösedağ, E. ve Ekici, R. (2019). Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 384-393.
- Kumar, H. G. P., Xavior, M. A. and Lobo, L. S. (2021). Property evaluation of hot extruded aluminum alloy-graphene nanocomposites. *Materials Letters*, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128688>
- Kumar, N. and Maheshwari, S. (2022). Expounding the influence of micro/nano particles on mechanical and tribological properties of AA 7050 matrix composite: a review. *Mater Today Proc*, 62, 3361–3367.
- Kumar, R., Al, R. N., Ahamed, S., Chaubey, N. K. and Girish, K. B. (2016). Microstructure and wear properties of zirconium nano metal matrix composites. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, 5(6), 1-9.
- Kumar, V. G. B.; Pramod, R., Sekhar, G., Kumar, G.P. and Bhanumurthy, T. (2019). Investigation of physical, mechanical and tribological properties of AL6061–ZrO₂ nano-composites. *Heliyon*, 5(11),
- Lee, S. K., Kim, H. and Shim, B. S. (2013). Graphene: an emerging material for biological tissue engineering. *Carbon Letters*, 14(2), 63-75.
- Liu, J., Cao, G., Zhu, X., Zhao, K. and An, L. (2020). Optimization of the microstructure and mechanical properties of heterogeneous Al-Al₂O₃ nanocomposites. *Materials Today Communications*, 25, 101199. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101199>.
- Lou, S. M., Qu, C. D., Gou, 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(16), 3483.
- Luo, K., Liu, S., Xiong, H., Zhang, Y., Kong, C. And Yu, H. (2022). Mechanical properties and strengthening mechanism of aluminum matrix composites

- reinforced by high-entropy alloy particles. *Metals and Materials International*, 28(11), 2811–2821.
- Ma, P., Jia, Y., Gokuldoss, P., Yu, Z., Yang, S., Zhao, J. and Li, C. (2017). Effect of Al_2O_3 nanoparticles as reinforcement on the tensile behavior of Al-12Si composites. *Metals (Basel)*, 7(9).
- Madhusudhan M., G. J. and Naveen, K. M. (2017). Mechanical characterization of AA7068-ZrO₂ reinforced metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3122-3130.
- Mahdipour, F. (2022). *Formation of calcium phases in the polycrystalline α -alumina ceramics*. Master Thesis, Sabanci University Institute of Science and Technology, Materials Sciences and Nano Engineering, 101, Istanbul.
- Martinez, S. E. H., Rivera, J. J. C., Reyes, C. G. G., Sanchez, R. M., Guel, I. E. and Rivera, J. L. H. (2015). Comparative study of synthesis of AA7075–ZrO₂ metal matrix composite by different mills. *Journal of Alloys and Compounds*, 643, 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.126>.
- Mindivan, H. (2007). *Silisyum karbür takviyeli alüminyum matris kompozitlerin tribolojik davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 224, İstanbul.
- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites from science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 65 (15-16), 2526-2540.
- Mohammad, A. and Abdullah, A. (2018). Scanning electron microscopy (SEM): A review. *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics – HERVEX*.
- Muraliraja, R., Arunachalam, R., Al-Fori, I., Al-Maharbi, M. and Piya, S. (2018). Development of alumina reinforced aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process. *Journal of Materials: Design and Applications*, 233(3), 1-8.
- Mutuk, T., Gürbüz, M. and Mutuk, H. (2020). Prediction of wear properties of graphene-Si₃N₄ reinforced titanium hybrid composites by artificial neural network. *Materials Research Express*, 7.
- Nagasai, B. P., Anusha, C. H. and Rajesh, A. (2021). Study on mechanical properties of Al-6061/ZrO₂ reinforced metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 47(6), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.424>.
- Natrayan, L., Yogeshwaran, S., Yuvaraj, L. and Kumar, M. S. (2019). Effect of graphene reinforcement on mechanical and microstructure behavior of AA8030/Graphene composites fabricated by stir casting technique. *International Conference on Inventive Material Science Applications AIP Conf. Proc.* 2166, 020012-1–020012-6; <https://doi.org/10.1063/1.5131599>.
- 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, 116, Konya.
- Öztürk, F. ve Kaçar, İ. (2012). Magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 12-20.
- Pal, K., Navin, K. and Kurchania, R. (2020). Study of structural and mechanical behaviour of Al-ZrO₂ metal matrix nanocomposites prepared by powder metallurgy method. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 2714-2719.
- Pal, K., Navin, K. and Kurchania, R. (2020). Study of structural and mechanical behaviour of Al-ZrO₂ metal matrix nanocomposites prepared by powder metallurgy method. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 2714-2719.
- Palampalle, B. P., Brahmaraju, K. and Venkata Subbaiah, K. (2018). Development and Characterization of Al-GNPs Composites by Stir Casting Method. *SAE Technical Paper*, <https://doi.org/10.4271/2018-28-0096>.

- Pandiyarajan, P., Maran, P., Marimuthu, S. and Ganesh, K. C. (2017). Synthesis and characterization of zirconium dioxide particulate reinforced aluminium alloy metal matrix composite. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 24 (5), 390-396.
- Patoliya, D. M. and Sharma, S. (2015). Preparation and Characterization of Zirconium Dioxide Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(5), 3315-3321.
- Pıçak, S. (2015). *Karbon nanotüp katkılı alumina epoksi nano kompozitlerin mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe deneyine cevabı*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 107, Ankara.
- Polat, S. F. (2019). *Al₂O₃, TiB₂ parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin sıcak presleme ile üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 97, Antalya.
- Pournaderi, S. and Akkhlaghi, F. (2017). Wear behaviour of Al6061-Al₂O₃ composites produced by in-situ powder metallurgy (IPM). *Powder Technology*, 313, 184-190.
- Pul, M. (2019). Farklı yöntemler ile üretilen MgO takviyeli alüminyum kompozitlerde mekanik davranışların karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 255-265.
- Pul, M. (2021). Effect of ZrO₂ quantity on mechanical properties of ZrO₂ reinforced aluminum composites produced by the vacuum infiltration technique. *Revista de Metalurgia*, 57(2), e195.
- Purohit, R., Kumar, A., Qureshi, M. M. U., Rana, R. S. and Kushwaha, S. (2023). Development of Al-Al₂O₃ nanocomposites by stir casting followed by hot forging and heat treatment and testing of their properties. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.011>.
- Purohit, R., Qureshi, M. M. U. and Jain, A. (2020). Forming behaviour of aluminium matrix nano Al₂O₃ composites for automotive applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(2), 272-283.
- Rajaram, S., Karthikeyan, P., Surya, T. J., Kaniskar, K. and Pazhanivel, V. (2023). Experimental investigation of mechanical properties of AA6063/ZrO₂ metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 74, 105-109.
- Ramachandra, M., Abhishek, A., Siddeshwar, P. and Bharathi, V. (2015). Hardness and wear resistance of ZrO₂ Nano Particle Reinforced Al nanocomposites produced by powder metallurgy. *Procedia Materials Science*, 10, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.043>.
- Rao, N. S. P., Murthy, P. L. S. and Suraj, S. (2015) Mechanical properties of aluminium alloy Al3562 matrix reinforced with zirconium particles. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(4), 1049–1052.
- Reddy, S. B. K., Harish, P., Siddiq, S., Srikanth, V. M. and Babu, P. R. (2019). Influence of graphene and alumina on mechanical and microstructural properties of AL7075 based hybrid composites. *Journal of Advancement in Machines*, 4(2), 10-22.
- Roseline, S., Paramasivam, V. and Jayabal, S. (2018). Evaluation of Structure and Mechanical Properties of Zirconia Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 15, 830-838.
- Salamcı, E. (2004). Spray casting. *Gazi University Journal of Science*, 17 (2), 155-173.
- Samal, P., Vundavilli, P. R., Meher, A. and Mahapatra, M. M. (2020). Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties. *Journal of Manufacturing Process*, 59(5), 131-152.
- Shrivastava, V., Gupta, G. K., Jain, H., Mangal, D. V., Singh, P. and Singh, I. B. (2022). Novel synthesis approach of making efficient nanocomposite via powder metallurgy route: Study of microstructure and mechanical properties. *Manufacturing Letters*, 31, 36-39.

- Singh, P. K. (2021). Mechanical characterization of graphene- aluminum nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 44(1), 2304-2308.
- Singh, S. K., Sondhi, L., Tripathi, H., Madan, R., Gupta, R. K. and Gurung, B. (2023). Wear and hardness analysis of aluminium-zirconium-based composites, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.009>.
- Sönmez, M. (2009). *Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımı*nda önemi ve geleceği: Türkiye'den dört örnek firma üzerine inceleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Ürünleri Tasarımı Anabilim Dalı, 183, İstanbul.
- Srivastava, A. K., Sharma, B., Saju, B. R., Shukla, A., Saxena, A. and Maurya, N. K. (2020). Effect of graphene nanoparticles on microstructural and mechanical properties of aluminum based nanocomposites fabricated by stir casting. *World Journal of Engineering*, 17(6), 859-866.
- Subaşı, A., Zurnacı, M., Kahyaoglu, A. ve Demir, E. (2017). Polyester/Grafen kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 472-481.
- Subbaiah, V., Palampalle, B. and Brahmaraju, K. (2019). Microstructural Analysis and Mechanical Properties of Pure Al- GNPs Composites by Stir Casting Method. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 100, 493-500.
- Şahin, Y. (2015). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayınevi, 3. Baskı, Ankara.
- Şenel, M. C. (2018a). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalurjisi yoluyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 183, Samsun.
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020). Microstructure and wear behaviour of graphene-Si₃N₄ binary particle-reinforced aluminium hybrid composites. *Indian Academy of Sciences*, 43(148), 6-11.
- Şenel, M. C. ve Gürbüz, M., (2020b). Mikron altı boyutlu alümina katkısının ve soğuk deformasyon işleminin üretilen alüminyum kompozit yapının mekanik özellikleri ve mikroyapısına etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 76-85.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2018b). Mechanical and tribological behaviours of aluminium matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets. *Materials Science and Technology*, 34(16), 1980-1989.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2018c). Grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde sinterleme sıcaklığının kompozitlerin yoğunluğuna, gözenekliliğine, sertliğine ve mikroyapısına olan etkisinin incelenmesi. *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, Samsun.
- Şimşek, D. (2022). An investigate on hot wear and corrosion performance of Al matrix hybrid composites produced by mechanical alloying method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06672-1>.
- Şimşek, İ. (2019). Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda ZrO₂ takviyeli Al-2Gr matrisli kompozit malzemelerin aşınma performanslarının incelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 594-605.
- Tiku, V., Navin, K. and Kurçhania, R. (2020). Study of structural and mechanical properties of Al/Nano-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite fabricated by powder metallurgy method. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73, 1007-1013.
- Unabia, R., Candidato, R. T. and Pawlowski, L. (2018). Current Progress in Solution Precursor Plasma Spraying of Cermets: A Review. *Metals*, 8(420), 1-18.
- Venugopal, S., Baskar, S. and Samuel, P. N. F. (2023). Study on the mechanical behaviour of metal matrix composites (MMC). *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.208>
- Vignesh, P., Alagarsamy, S. V., Raveendran, P., Saravanan, H. and Karthikeyan, K. (2021). Effect of zirconia content on properties of Al7050 alloy composites by stir casting method. *Materials Today: Proceedings*, 47(13), 4121-4125.

- Wang, F., Liu, H., Liu, Z., Guo, Z. and Sun, F. (2022). Microstructure analysis, tribological correlation properties and strengthening mechanism of graphene reinforced aluminum matrix composites. *Sci Rep*, 12(1).
- Xia, H. M., Zhang, L., Zhu, Y. C., Li, N., Sun, Y. Q., Zhang, J. D. and Ma, H. Z. (2020). Graphene nanoplatelets reinforced 7075 aluminum alloy composites fabricated by spark plasma sintering. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 27(9), 1295-1300.
- Yadav, S. K., Swaroop, C., Das, A., Shukla, M. and Bhardwaj, T. (2022). Recent advances in aluminium metal matrix composites: a critical review. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.603>.
- Yılmaz, O. (2006). *Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kesici uçların proses, yapı ve mekanik özellik ilişkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, İstanbul.
- Zaiemyekheh, Z., Liaghat, G. and Khan, M. K. (2021). Effect of Al₂O₃ nanoparticles on the mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composite synthesized via powder metallurgy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235(10), 2340-2355.
- Zamani, N. A. B. N., Iqbal, A. K. M. A. and Nuruzzaman, D. M. (2020). Fabrication and characterization of Al₂O₃ nanoparticle reinforced aluminium matrix composite via powder metallurgy. *Materials Today: Proceedings*, 29(1), 190-195.
- Zhang, Z. and Chen, D. L. (2006). Consideration of orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: a model for predicting their yield strength. *Scr Mater*, 2006, 54(7), 1321–1326.
- Zheng, Z., Yang, X., Li, J. C., Zhang, X. X., Muhammad, I. and Geng, L. (2021). Preparation and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminum composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(4), 878-886.

ÖZGEÇMİŞ

Elif IŞIK, Samsun Canik İMKB 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. Lisans mezuniyetinden bu yana Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak görev yapan Elif IŞIK, orta derecede İngilizce bilmektedir (Yökdil: 71,25). Temel araştırma alanları toz metalürjisi, seramik zırh malzemeleri, 3 boyutlu seramik eklemeli imalatı, metal ve seramik matrisli kompozit malzemelerdir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0001-8289-9512

Yayınlar:

1. IŞIK, E., & ŞENEL, M. C. (2022). Alümina Takviyeli Al7075 Esaslı Kompozitlerin Mikroyapısının ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Presented at the 1st International Conference on Innovative Academic Studies (ICIAS 2022), Konya.
2. KAFKASLIOĞLU YILDIZ, B., IŞIK, E., & ŞANLI, T. (2023). The effect of samarium oxide and magnesium nitrate additives on the microstructure and densification of alumina ceramics. Presented at the 7th International Aegean Conference on Innovation Technologies and Engineering, İzmir.
3. KATIRCI, R., KAFKASLIOĞLU YILDIZ, B., OĞUZ, T., & IŞIK, E. (2022). Investigation Of Photovoltaic Performance For Boron And Phosphorus Doped CZTS Thin Films Using In-Slico Methods. Presented at The 3. International Hasankeyf Scientific Research And Innovation Congress.
4. BOZKURT, S., IŞIK, E., TÜR, Y. K., & KAFKASLIOĞLU YILDIZ, B. (2023). Farklı oranlarda samaryum oksit katkısının alümina seramiklerin mekanik özellikleri üzerine etkisi. Presented at the 9. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, İstanbul.