



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANO TiO₂ ve NANO ZrO₂ TAKVİYELİ AL7075 ALAŞIMININ
MEKANİK, TRIBOLOJİK ve TERMAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ömer AYDIN

**Haziran-2025
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANO TiO₂ ve NANO ZrO₂ TAKVİYELİ AL7075 ALAŞIMININ
MEKANİK, TRİBOLOJİK ve TERMAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ömer AYDIN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR**

Diğer Jüri Yeleri

Prof.Dr. Erol KILIÇKAP Doç.Dr. Şehmus BADAY

**Haziran-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer AYDIN tarafından hazırlanan “Nano TiO₂ ve Nano ZrO₂ Takviyeli Al7075 Alaşımının Mekanik, Tribolojik Ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Emin DEMİR

Üye

Doç.Dr. Şehmus BADAY

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi - BAP Koordinasyon Birimi tarafından BTÜBAP-2023-YL-15 nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Ömer AYDIN
Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO TiO₂ VE NANO ZrO₂ TAKVİYELİ AL7075 ALAŞIMININ MEKANİK, TRİBOLOJİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ömer AYDIN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR

2025, 66 Sayfa

Bu tez çalışmasında TiO₂ ve ZrO₂ nano parçacıkları farklı oranlarda Al7075 matrise ilave edilerek toz metalürjisi yöntemiyle silindirik bulk numuneler üretilmiştir. İlave edilen TiO₂ ve ZrO₂ tozlarının tekli veya hibrit olarak ikili şekilde baz alaşıma ilave edilmesinin, kompozitlerin sertliği, mikroyapısı, aşınma performansı ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) ile üretilen kompozitlerin faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Hot disk cihazı ile ise termal özellikleri araştırılmıştır. Bununla birlikte tozların presleme, sinterleme ve dağlama sonrası mikroyapıları optik mikroskop ile analiz edilmiştir. Takviye tipi ve oranlarının kompozit sertliği üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla üretilen kompozitlerin Vickers sertlikleri ölçülmüştür. Ayrıca kompozitlerin deneysel ve teorik yoğunlukları da hesaplandıktan sonra pin on disk aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testlerinde takviye tipinin, yükün, kayma mesafesinin ve kayma hızının etkileri incelenmiştir. %3 TiO₂ takviyesiyle alaşımanın sertliğinin %20 artış sağlamıştır. En yüksek sertlik değerinin %2 TiO₂/ %3 ZrO₂ takviyeli hibrit kompozitte 95 Hv olarak elde edilmiştir. Hem TiO₂ hem de ZrO₂ nano parçacıkları alaşımanın aşınma performansını iyileştirdiği ve sürtünme katsayılarını düşürdüğü tespit edilmiştir. %3 nano TiO₂ takviyesiyle sürtünme katsayısı 0,81'den 0,62'e, %3 nano ZrO₂ takviyesiyle ise 0,57'e düşmüştür. Takviye oranı ve kayma hızı artışının aşınma direncini geliştirdiği, yük artışının ise aşınma oranını düşürdüğü belirlenmiştir. SEM ile incelenen aşınmış yüzeylerde, artan kayma hızında matris döküntüsünün azaldığı, kazıma izlerinin ise sığlaştığı gözlenmiştir. Termal özellikleri incelenen kompozitlerde en düşük termal iletkenlik Al7075 alaşımında 7,52 W/m·K ve en yüksek termal iletkenlik ise %2 TiO₂/ %3 ZrO₂ takviyeli hibrit kompozitte 23,81 W/m·K olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al7075, Aşınma, Hibrit kompozit malzeme, Sertlik, Termal özellik, TiO₂, ZrO₂

ABSTRACT
MASTER THESIS
INVESTIGATION OF MECHANICAL, TRIBOLOGICAL, AND THERMAL
PROPERTIES OF NANO TiO₂ AND NANO ZrO₂ REINFORCED AL7075
ALLOY

Ömer AYDIN

Batman University Graduate Education Institute

Mechanical Engineering Department of Science

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR

2025, 66 Pages

In this thesis study, In this thesis study, cylindrical bulk specimens were produced by the powder metallurgy method through the addition of TiO₂ and ZrO₂ nanoparticles in varying proportions to the Al7075 matrix. The effects of the addition of TiO₂ and ZrO₂ powders, either individually or as a hybrid combination, on the hardness, microstructure, wear performance, and thermal properties of the composites were investigated. Phase analyses of the produced composites were carried out using X-ray diffraction (XRD). Thermal properties were evaluated using a Hot Disk thermal analyzer. Additionally, the microstructures of the powders were examined using optical microscopy following compaction, sintering, and etching processes. To determine the effect of reinforcement type and content on the hardness of the composites, Vickers hardness measurements were carried out on the produced samples. Furthermore, both experimental and theoretical densities of the composites were calculated, followed by pin-on-disk wear tests. In these tests, the effects of reinforcement type, applied load, sliding distance, and sliding speed on wear behavior were studied. A 3 wt.% TiO₂ reinforcement resulted in a 20% increase in the hardness of the alloy. The highest hardness value, 95 Hv, was achieved in the hybrid composite reinforced with 2 wt.% TiO₂ and 3 wt.% ZrO₂. It was observed that both TiO₂ and ZrO₂ nanoparticles improved the wear performance of the alloy and reduced the coefficient of friction. With the addition of 3% nano TiO₂ reinforcement, the coefficient of friction decreased from 0.81 to 0.62, while with 3% nano ZrO₂ reinforcement, it further decreased to 0.57. It was found that increasing the reinforcement content and sliding speed enhanced the wear resistance, while increasing the applied load reduced the wear rate. SEM examinations of the worn surfaces revealed that matrix deformation decreased and the scratch marks became shallower with increasing sliding speed. In terms of thermal properties, the lowest thermal conductivity was measured as 7.52 W/m·K in the unreinforced Al7075 alloy, whereas the highest thermal conductivity was obtained as 23.81 W/m·K in the hybrid composite reinforced with 2 wt.% TiO₂ and 3 wt.% ZrO₂.

Keywords: Al7075, Wear, Hybrid composite material, Hardness, Thermal property, TiO₂, ZrO₂

ÖN SÖZ

Alüminyum bazlı kompozitler, gelişmiş mekanik ve aşınma özellikleri nedeniyle hafif yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber, eklenen takviye çeşitleri, oranları ve üretim yöntemlerine bağlı olarak bu özellikler daha da geliştirilebilmektedir. Bu nedenle, bu işlemlerin etkilerini daha iyi anlamak amacıyla gerçekleştirilen bu tez önemli bir yere sahiptir.

“Nano TiO_2 ve nano ZrO_2 takviyeli Al7075 alaşımının mekanik, tribolojik ve termal özelliklerinin incelenmesi” adlı tez çalışması beş bölümden meydana gelmektedir. İlk bölümde alüminyum matrisli kompozitlerin gelişen teknoloji ve uygulama ihtiyaçları doğrultusunda mekanik, tribolojik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla takviye malzemeleri ile güçlendirilmesinden bahsedilmiştir. İkinci kısımda kompozitlerin ZrO_2 , TiO_2 , SiC , Al_2O_3 gibi takviyelerle hazırlanan alüminyum matrisli kompozitlerin fiziksel, mekanik ve tribolojik davranışları üzerine yapılmış literatür araştırmaları incelenmiştir. Ayrıca, kompozit malzemeler ve bu malzemelerde kullanılan takviye ile matris çeşitlerine değinilmiştir. Ayrıca metal matrisli kompozitler ve özellikle alüminyum bazlı metal matrisli kompozitler hakkında bilgiler içermektedir. Üçüncü bölümde deneylerde kullanılan takviye ve alaşım malzemesi ve üretim yöntemine yer verilmiştir. Bununla birlikte tüm üretim süreci boyunca kullanılan cihazlar tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde sertlik, yoğunluk, XRD, aşınma ve termal testlere ait sonuçlar değerlendirilmiş, SEM görüntüleri ile malzemelerin aşınma sonrası yüzey morfolojileri analiz edilmiştir. Sertlik, yoğunluk, aşınma ve termal iletkenlik test sonuçları grafik ve tablolarla sunularak yorumlanmıştır. Son bölümde ise elde edilen genel sonuçlar toparlanmıştır.

Bu tez çalışma konusunun belirlenmesinde, tezin oluşturulmasında ve araştırılmasında tez çalışmama her fırsatta ilgi ve destek göstermesinden ötürü danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Emin DEMİR’e teşekkür ederim.

Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2023-YL-15 nolu proje kapsamında yaptığım çalışmalara desteklerinden dolayı Batman Üniversitesi’ne teşekkür ederim.

Ömer AYDIN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kompozit Malzemeler	7
2.1.1. Takviyeler	9
2.1.2. Matris	10
2.1.3. Arayüz.....	10
2.1.3.1. Metal matrisli kompozitler için ara yüzey	11
2.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler	12
2.2.2. Metal Matris Kompozitler (MMK).....	13
2.2.3. Seramik matrisli kompozitler.....	15
2.3. Alüminyum Bazlı Metal Matris Kompozitler (AMMK)	16
2.3.1. AMMK türleri.....	17
2.3.1.1. Partikül takviyeli alüminyum matris kompozitleri	18
2.3.1.2. Kısa lif takviyeli alüminyum matris kompozitler	18
2.4. Al7075 Alaşımı.....	18
2.5. Nanokompozitler	19
2.6. Toz Metalurjisi.....	20
2.6.1 Toz üretimi.....	21
2.6.2. Sıkıştırma	22
2.6.3. Sinterleme	23
2.7. Mekanik Alaşımlama	25
2.7.1 Mekanik alaşımlama süreci	25
2.7.2 Atmosfer kontrolü.....	26
2.8. Mekanik Özellikler	26
2.8.1. Sertlik.....	27
2.9. Aşınma	27
2.9.1. Aşınma mekanizmaları	28
3. YÖNTEM	30
3.1. Matris ve Takviye Malzemeleri	30
3.2. Nano Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Üretimi	31
3.3. Mekanik Alaşımlama Cihazında Matris ve Takviye Parçacıklarının Karıştırılması	32
3.4. Tozların Sıkıştırılması İşlemi.....	33
3.5. Sinterleme işlemi	34
3.6. Parlatma ve Dağlama İşlemleri	35
3.7. Optik Mikroskop.....	35

3.8. XRD Ölçümleri.....	36
3.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	36
3.10. Yoğunluk Ölçümü.....	37
3.11. Sertlik Ölçümü.....	38
3.12. Aşınma Testi	38
3.13. Termal İletkenlik Testi.....	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
4.1. XRD Sonuçları.....	40
4.2. Sertlik Sonuçları	40
4.3. Yoğunluk Sonuçları	42
4.3. Mikroyapısal karakterizasyon.....	44
4.4. Aşınma Sonuçları.....	45
4.5. Aşınmış Yüzey Morfolojisi	51
4.6. Termal İletkenlik Sonuçları	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR	59

ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ

Çizelge 3.1. Al7075 alaşımlın mekanik ve fiziksel özellikleri.....	30
Çizelge 3.2. Al7075'in kimyasal bileşimi	30
Çizelge 3.3. Kullanılan nano parçacıkların fiziksel ve mekanik özellikleri.....	31
Çizelge 3.4. Kompozit üretiminde matris ve takviye oranları.....	31
Çizelge 3.5. Kompozitlerin üretiminde kullanılan alaşım ve bileşiklerin yoğunluk değerleri	37

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elyaf ve reçine kullanarak kompozit malzeme oluşumu.....	9
Şekil 2.2. Farklı takviye konfigürasyonlarının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2. 3. Matris ve takviyeye göre kompozit malzeme sınıflandırması.....	12
Şekil 2.4. Farklı Metal matrisli kompozitler.....	14
Şekil 2.5. Seramik matrisli kompozitler	16
Şekil 2.6. Al alaşımların sınıflandırması	17
Şekil 2.7. Toz metalürjisi üretim aşamaları	23
Şekil 2.8. Sinterleme işlemi	24
Şekil 2. 9. Toz metalürjisi üretim akış şeması	24
Şekil 2.10. Mekanik alaşımlama süreci	26
Şekil 2.11. Aşınma kategorisi.....	28
Şekil 3.1. Kullanılan nano TiO_2 ve ZrO_2 tozları.....	31
Şekil 3.2. Matris ve takviye olarak kullanılan parçacıkların tartım işlemi.....	32
Şekil 3.3. Mekanik alaşımlama cihazı	32
Şekil 3.4. Karıştırma sonrası elde edilen tozların SEM görüntüsü: a) Al7075 tozu, b) %3 TiO_2 /%1 ZrO_2 /Al7075	33
Şekil 3.5. Presleme cihazı ve pres sonrası kalıptan çıkarılan sinterlenmemiş numune..	34
Şekil 3.6. Sinterlemede kullanılan fırın	34
Şekil 3.7. Zımparalama cihazı	35
Şekil 3.8. Optik mikroskop görüntüsü.....	36
Şekil 3.9. XRD cihazı	36
Şekil 3.10. Aşınmış yüzeylerin görüntülenmesinde kullanılan SEM cihazı	37
Şekil 3.11. Vickers Sertlik Cihazı	38
Şekil 3.12. Pin on disk aşınma cihazı	39
Şekil 3.13. Termal İletkenlik Ölçüm Cihazı.....	39

Şekil 4.1. Mekanik alaşımlama tekniği ile karıştırılan kompozit tozların XRD sonuçları	40
Şekil 4.2. Takviye tipi ve oranına bağlı baz alaşım ve kompozitlerin sertlik değişimleri	42
Şekil 4.3. Baz alaşım ve kompozitlerin gerçek ve teorik yoğunluk karşılaştırması	44
Şekil 4.4. A0, A3T ve A3Z numunelerin optik mikroskop görüntüsü	45
Şekil 4. 5. Takviye oranlarına bağlı olarak alaşımın ve kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinin değişimi	46
Şekil 4.6. Takviye oranlarına bağlı olarak alaşımın ve kompozitlerin aşınma oranı değişimi.....	48
Şekil 4.7. Kayma hızına bağlı sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değişimi.....	49
Şekil 4.8. Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değişimi.....	50
Şekil 4.9. Yük artışının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerindeki etkisi	51
Şekil 4.10. A0 ve A1T3Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) A0, B) A1T3Z.	52
Şekil 4.11. A1T3Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) 100 devir, B) 300 devir	52
Şekil 4.12. A3T1Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) 100 m, B) 200 m.....	53
Şekil 4.13. A3T1Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) 3 N, B) 5 N	54
Şekil 4.14. Takviyesiz ve takviyeli numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) A0, B) A1T3Z.....	54
Şekil 4.15. Nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik değişimleri.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

TiO ₂	: Titanyum dioksit
ZrO ₂	: Zirkonyum dioksit
SiC	: Silisyum Karbür
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbondioksit
H ₂ O	: Su
HNO ₃	: Nitrik Asit
HCl	: Hidroklorik Asit
HF	: Hidroflorik Asit
TiC	: Titanyum Karbür
KNT	: Karbon Nano Tüp
Ti	: Titanyum
Cu	: Bakır
GNP	: Grafen Nano Platelet
Al ₂ O ₃	: Alümina
Gr	: Grafit
AlN	: Alüminyum Nitrür
B ₄ C	: Bor-karbür
f	: Hacim fraksiyonu
ρ	: Teorik Yoğunluk

Kısaltmalar

HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
XRD	: X-Ray Difraksiyon Analizi
AMK	: Alüminyum Matrisli Kompozit
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
AMMK	: Alüminyum Metal Matrisli Kompozit
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit

1. GİRİŞ

Pek çok modern teknoloji, geleneksel alaşımlarla sağlanamayan üstün özelliklere sahip özel malzeme kombinasyonlarına ihtiyaç duymaktadır. Kompozit malzemeler, farklı özellikleri bir araya getirmek ve teknolojik ilerlemenin taleplerini karşılamak için ideal bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Kompozit malzemelerin başlıca avantajlarından biri, mühendislerin takviye bileşenlerini çeşitli şekillerde ve kombinasyonlarda entegre etmelerine olanak tanıyan tasarım esnekliğidir. Örneğin, lifler yüklerin yönüne göre yerleştirilerek malzemenin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilir ve bu sayede nihai ürünün ağırlığında önemli bir azalma sağlanmış olur (Callister ve Rethwisch, 2022). Belirli araç ve uçak bileşenleri ile ekipmanlarının üretiminde uygun hafif malzemelerin kullanılması, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir ve çevresel kısıtlamaları hafifletebilir. Alüminyum alaşımları yüksek termal iletkenlik, yüksek korozyon direnci, kolay geri dönüştürülebilirlik, yeterli mukavemet özellikleri, süneklik, dayanıklılık ve hafiflik gibi avantajlar sayesinde havacılık, inşaat ve özellikle otomotiv sektörü gibi birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aybarç, 2019; Esquivel ve Gupta, 2020). Ancak, bilim ve teknolojiye ilerlemelerle birlikte performans gereksinimleri giderek daha da artmıştır. Tek başına alüminyum alaşımları, hafif malzemeler için belirlenen tüm standartları karşılayamamaktadır. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının tribolojik alanlardaki kullanımı, nispeten düşük aşınma dayanımları nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle, ağırlık azaltımı ile üstün özellikler arasında iyi bir denge sunan alüminyum matrisli kompozitler (AMK), büyük ilgi görmeye başlamıştır (Zhang ve ark., 2023). Al 7075 alaşımı, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğundan, mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi için takviyeye ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla, daha iyi tribolojik özellikler, yorulma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük termal genleşme katsayısı gibi malzeme performansını arttırmak amacıyla alüminyum alaşımına çeşitli B_4C , Gr, SiC, Al_2O_3 , TiO_2 , AlN ve uçucu kül gibi tekli veya çoklu takviye parçacıkları eklenerek metal matrisli kompozitler (MMK) oluşturulmaktadır. Bu kompozitler, temel alaşım malzemesine kıyasla daha yüksek mukavemet sergilemektedir. Alaşım malzemelerindeki bu ilerleme, farklı uygulama alanlarında hızla gelişen teknolojilere uyum sağlamak için gereklidir. Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar,

MMK'lerde, bileşen veya dolgu malzemesi fazı değiştirilerek yoğunluk ve termal genleşme gibi fiziksel özelliklerin, basma ve çekme davranışı gibi mekanik özelliklerin ve tribolojik özelliklerin iyileştirilmesine olanak tanıdığını göstermektedir. Alüminyum metal matrisli kompozitler (AMMK), iki veya daha fazla mikro, makro veya nano bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşan bir malzeme sistemidir. Bu bileşenler birbirleriyle kimyasal olarak çözünmeyen ve arayüzleri belirgin şekilde ayrılan farklı fazlara sahiptir. AMMK'ler, takviye oranına ve matris malzemesinin bileşimine bağlı olarak mekanik davranışlarında değişim gösterdiğinden, mühendislik alanlarında, hem yapısal hem de fonksiyonel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Imran ve Khan, 2019).

Üretim tekniği, alaşım nanokompozitlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Benzer bileşenlere sahip nanokompozitler farklı üretim yöntemleri kullanılarak işlendiğinde performanslarında farklılıklar görülebilir. Alüminyum matrisine küçük miktarda nano takviyeler eklenmesi, sertlik, özgül dayanım, aşınma, sürünme ve yorulma gibi özellikleri kayda değer ölçüde geliştirmektedir (Idusuyi and Olayinka, 2019; Kottedda ve ark., 2022). Alüminyum matrisli nanokompozitleri sentezlemek için döküm, dövme, toz metalurjisi ve ultrasonik titreşimli döküm olmak üzere birçok üretim tekniği mevcuttur (Prakash ve ark., 2022). Karıştırma işlemiyle yapılan dökümde, nano takviyeler, bir motor karıştırma yardımıyla matriste eşit şekilde dağıtılabilir. Ancak, sıvı durumdaki döküm yöntemleriyle üretilen alaşım nanokompozitlerinde, nano takviyelerin topaklanması büyük bir sorundur. Takviye parçacıklarının uniform olmayan dağılımı, kompozit performansını olumsuz etkilemektedir. Nanoparçacık topaklanması, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak azaltılabilir (Mobasherpour ve ark., 2013). Literatür çalışmaları da, katı hal toz metalurjisinin diğer metal matris kompozit üretim tekniklerine göre birçok avantaja sahip olduğunu bildirmektedir.

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi kullanılarak Al7075 matris içine farklı iki nano seramik parçacık ilave edilmiş ve elde edilen kompozitlerin sertliğinin, aşınma ve termal özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

AMMK'lere ilave edilen titanyum oksit (TiO_2), zirkonyum dioksit (ZrO_2), alumina (Al_2O_3), silikon karbür (SiC), bor karbür (B_4C), titanyum karbür (TiC) gibi çeşitli nano takviyelerle yapılan çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Abd-Elwahed ve ark. toz metalurjisi yöntemiyle ürettikleri Ti- ZrO_2 nanokompozitlerde, ZrO_2 parçacık ilavesinin Ti matrisli kompozitlerin mikro yapı, aşınma ve sertlik üzerine etkilerini incelemişlerdir. ZrO_2 içeriği arttıkça, Ti elementinin piklerinin yoğunluğunun hafifçe azaldığını belirlemişlerdir. Sinterleme sürecinde Ti ve ZrO_2 arasında herhangi bir reaksiyon olmadığını belirlemişlerdir. Sinterlenmiş nanokompozitlerin yoğunlaşma davranışının, ZrO_2 yüzdesinin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek mikrosertliği, %10 ZrO_2 nanoparçacık takviyeli titanyum matrisli nanokompozitlerde 570 HV olarak ölçmüşlerdir. Yük arttıkça aşınma oranının arttığını ve ZrO_2 içeriği arttıkça aşınma oranının düştüğünü tespit etmişlerdir (Abd-Elwahed ve ark., 2020). Zubaidi ve ark. Al 7075 matrisine ağırlıkça %0, %0,8, %1,6 ve %2,4 oranlarında ZrO_2 nanoparçacıkları katarak karıştırma döküm yöntemiyle kompozitler üretmişlerdir. ZrO_2 takviye içeriğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Takviyesiz Al7075 alaşımın sertlik değerinin 120,49 olduğunu ve %2,4 ZrO_2 takviyeli Al7075 matrisli kompozitin sertlik değerini ise 177,13 olarak tespit etmişlerdir. %2,4 ZrO_2 takviyesiyle ZrO_2 /Al7075 kompozitin çekme dayanımının 624 MPa'dan 878 MPa'ya yükseldiğini bulmuşlardır. Termal iletkenliğin ise takviye içeriğini arttıkça yükseldiğini gözlemlenmiştir. En yüksek termal iletkenlik değerini %0,8 ZrO_2 takviye oranında elde etmişlerdir. Sonuç olarak ZrO_2 takviyesinin Al 7075'in mekanik ve termal özelliklerini geliştirdiğini belirlemişlerdir (Al Zubaidi ve ark., 2023). El tamimi ve ark. silanize edilmiş nano ZrO_2 parçacık takviyeli akrilik protez dişlerin sertlik, mikro yapı ve aşınma performanslarını değerlendirmişlerdir. ZrO_2 takviye içeriği arttıkça dişlerin sertlik değerinin arttığını belirlemişlerdir. %10 ZrO_2 takviyesiyle sertlik değerinin 45,59 HV'den 49,68 HV'ye çıktığını belirlemişlerdir. Ayrıca aşınma testlerinde en fazla yükseklik aşınma kaybının takviyesiz protez dişlerde elde edildiğini gözlemlenmiştir. ZrO_2 nanoparçacıkları içermeyen akrilik bazlı dişlerin aşınma yüzeylerini incelediklerinde derin aşınma izleri olduğunu gözlemlenmiştir.

Nanoparçacık eklenmemiş akrilik bazlı dişlerde aşınma mekanizmasının yorgunluk aşınması olduğu tespit etmişler ve yüksek yoğunlukta mikro çatlaklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Nanoparçacık miktarını %10'a çıkardıklarında, aşınma direncinin daha yüksek olduğunu ve hiçbir mikro çatlak oluşmadığını belirlemişlerdir (El-Tamimi ve ark., 2022). Sadoun ve ark. ZrO_2 /GNP (grafen nanoplatelet) takviyeli Cu matrisli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. GNP'lerin %0,5'e kadar eklenmesiyle Cu parçacıklarının kırılmasının hızlandığını ve topaklanma boyutunun belirgin şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, Cu-5% ZrO_2 /0,5%GNP hibrit nanokompozitlerinin kristalit boyutunu 142 nm ve 5% ZrO_2 -Cu nanokompozitinde kristalit boyutunu 300 nm olarak belirlemişlerdir. %0,5 GNP içeren hibrit nanokompozitlerde, her iki takviye fazının homojen dağılımını gözlemlemişlerdir. Cu-5% ZrO_2 nanokompozitinin sertlik değerinin 65,5 HV ve 5% ZrO_2 /0,5%GNP-Cu nanokompozitlerinin sertlik değerinin ise 169,3 HV olduğunu tespit etmişlerdir. Sertlikteki yükselişin nedenini Cu tane sınırlarında GNP'lerin çökerek dislokasyon hareketlerini engellemesine atfetmişlerdir. Aşınma oranının %0,5 GNP takviye oranına kadar düştüğünü, bu oranın üstüne çıkıldığında tekrar yükselme trendine girdiğini gözlemlemişlerdir. Kayma hızı arttıkça kompozitlerin aşınma oranının yükseldiğini belirlemişlerdir. Sürtünme katsayısı da %0,5'ten fazla GNP içeriğine kadar düşmüş ve bu oranın üstüne çıkıldığında sabit kalmıştır (Sadoun ve ark., 2020). Fathy ve ark. Cu- ZrO_2 nanokompozitleri, toz metalürjisi tekniği kullanarak üretmişlerdir. Bakır matrisinde ZrO_2 nanopartiküllerinin homojen bir dağılım gösterdiğini ve bunun Cu- ZrO_2 kompozitlerinin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. En yüksek sertlik ve basma dayanımını %9 ağırlık oranında ZrO_2 içeren nanokompozitlerde sırasıyla 136,5 HV ve 413,5 MPa olarak elde etmişlerdir. Nanokompozitlerin aşınma oranının, uygulanan yük veya kayma hızı arttıkça yükseldiğini belirtmişlerdir (Fathy ve ark., 2017). Reddy ve ark. Al7075 matris alaşımına %0,75, 1, 1,25, 1,5, 1,75 ve 2 ağırlık oranlarında ZrO_2 parçacıkları ekleyerek karıştırma döküm yöntemiyle kompozit oluşturmuşlardır. SEM görüntülerinden ZrO_2 parçacıklarının üniform bir şekilde matris içinde dağıldığını gözlemlemişlerdir. ZrO_2 parçacık takviyesinin Al7075 matrisin sertlik ve çekme dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir. Tüm kompozitler arasında, Al7075/1,5 ZrO_2 'in en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir (Reddy ve ark., 2020). Jamali ve Mirsalehi Al7075-T6 alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla ZrO_2 nanopartiküllerini sürtünme karıştırma işlemiyle eklemişlerdir. Mikro yapıda oluşan tane incilmesi ve sert ZrO_2 nanoparçacık ilavesiyle aşınma ve sertlik

özelliklerinin geliştiğini bildirmişlerdir. Nanoparçacık ilavesinin kompozit sertliğini %48 oranında arttırdığını ve aşınma oranının takviyesiz matrise kıyasla %62 oranında azalttığını tespit etmişlerdir. Sürtünme karıştırma tekniğinde dönüş hızının 1000 devirden 1200 devir'e artırılması, yüksek ısı girdisi nedeniyle kristalleşmiş tanelerin büyümesi için uygun bir ortam sağlasa da Zener-Holman mekanizmaları sayesinde nanoparçacıkların uygun dağılımına katkıda bulunarak aşırı büyümenin önlenmesini sağladığını belirtmişlerdir. Sert seramik nanoparçacıkların varlığı, bu nanoparçacıkların yük taşıma etkisi, pim ve matrisin temas yüzeyinin nanoparçacıklarla azalması ve tane boyutunun ciddi şekilde küçülmesi nedeniyle aşınma oranında %62'ye kadar önemli bir azalma sağladığını belirlemişlerdir (Jamali ve Mirsalehi, 2022). Ramachandra ve ark. %0 ile %4 arasında ZrO_2 ile takviye edilen alüminyum nanokompozitleri, çözünme yanma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Mikroyapı analizinde, n- ZrO_2 parçacıklarının homojen bir şekilde matris içinde dağıldığını ancak hafif topaklanma gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca mikroyapı, matris ile n- ZrO_2 parçacıkları arasında iyi bir arayüz bağı olduğunu gözlemlemişlerdir. n- ZrO_2 parçacıklarının alüminyum matrisine dahil edilmesiyle, sertlik ve aşınma direnci açısından kompozitlerin geliştiğini bildirmişlerdir (Ramachandra ve ark., 2015). Şenel ve Üstün, Al- ZrO_2 ve Al- ZrO_2 -grafen takviyeli kompozitlerinin tribolojik davranışları, yoğunluk, porozite, sertlik ve basınç dayanımlarını araştırmışlardır. ZrO_2 takviyeli Al matrisli kompozitte Vickers sertliğinin en yüksek %9 ZrO_2 takviye oranında 69 HV ve yoğunluğun ise $2,84 \text{ g/cm}^3$ olduğunu belirlemişlerdir. %9 ZrO_2 takviyeli kompozite %0,15 GNP ilavesiyle kompozitin sertliğinin 75 HV'e çıktığını tespit etmişlerdir. En düşük sürtünme katsayısını 10 N yük altında 0,18 ve kütle kaybını 5 N yük altında 0.011 g olarak elde edilmiştir. Al hibrit kompozitlerinin mekanik dayanımı ve tribolojik davranışlarının, ZrO_2 ve grafen nanoparçacıklarının aglomerasyonu nedeniyle %9 ZrO_2 ve %0,15 grafen içeriğinden sonra kötüleştiğini bildirmişlerdir. Grafenin mükemmel bir katı yağlayıcı olduğunu ve ZrO_2 'nin Al hibrit kompozitleri için kayda değer aşınma direncine sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Şenel ve Üstün, 2022). Adediran ve ark. karıştırma döküm yöntemiyle Al 7075 alaşımına TiO_2 mikro parçacıkları ilave ederek karıştırma dökümü parametrelerinin (karıştırma sıcaklığı, hızı ve süresi) kompozitin gerilme, sertlik, darbe dayanımı, elastik modül ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sıcaklık, hız ve süre için sırasıyla $779,3 \text{ }^\circ\text{C}$, 574,2 devir ve 2,5 dakika parametrelerinin en uygun karıştırma döküm parametreleri olduğunu belirlemişlerdir (Adediran ve ark., 2021). Alagarsamy ve Ravichandran TiO_2 içeriğinin Al7075 AMMK'lerin mekanik ve tribolojik davranışları

üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı ağırlık yüzdelerinde (%0, %5, %10 ve %15) TiO_2 parçacıkları kullanarak kompozitler üreterek, bu kompozitlerin mikro yapısal karakterizasyon, SEM, EDS ve XRD analizlerini yapmışlardır. SEM görüntülerinden, TiO_2 parçacıklarının Al7075 matrisinde uniform bir şekilde dağıldığını belirlemişlerdir. %10 TiO_2 oranına kadar kompozitlerin gerilme dayanımı, sertlik, darbe dayanımı, eğilme dayanımı ve basma dayanımının arttığını bu oranın üstüne çıkıldığında ise hafifçe azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca %10 TiO_2 oranına kadar aşınma testlerinde kütle kaybının azaldığını belirlemişlerdir. Artan yük oranlarında kütle kaybının yükseldiğini belirtmişlerdir (Sivasamy ve Ravichandran, 2019). Gajakosh ve ark. TiO_2 ve grafit (Gr) parçacıklarının Al7075 baz alaşımının mekanik davranışı ve mikro yapısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Al7075 ve hibrit kompozitleri, karıştırma döküm ve sıcak haddeleme teknikleri kullanarak üretmişlerdir. Mikro yapı incelemesi ile TiO_2 ve Gr takviye parçacıklarının Al7075 matrisi alaşımıyla iyi bir bağ kurduğunu ve yapı içinde iyi bir şekilde dağıldığını ortaya koymuşlardır. Sıcak haddeleme sayesinde TiO_2 /Gr takviyeli hibrit kompozitlerin gerilme mukavemeti ve mikrosertliğinin döküm kompozitlere kıyasla kayda değer ölçüde geliştiğini belirtmişlerdir. Al7075/ TiO_2 /Gr hibrit kompozitlerin mikrosertliğinin, döküm ve sıcak haddeleme numunelerinde, sırasıyla %63 ve %135 artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Gajakosh ve ark., 2021). Ahmad ve ark. TiO_2 içeriği %2'den %10'a kadar değişen Al-7075/ TiO_2 kompozitler üreterek kompozitin çekme, sertlik ve elastik modülü, aşınma ve mikro yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Mikro yapısal analiz ile, TiO_2 'nin yapı içinde homojen dağıldığını, tane incelmesinin gerçekleştiğini ve mekanik özelliklerin geliştiğini belirlemişlerdir. Çekme testlerinde, artan TiO_2 içeriği ile birlikte çekme dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Maksimum ve minimum modül değerlerinin, %8 TiO_2 içeren MMK için sırasıyla 25 °C'de 98,9 GPa ve 350 °C'de 77,3 GPa olduğunu tespit etmişlerdir. TiO_2 takviyesiyle kompozitin sürtünme katsayısında ve aşınma oranlarında düşüş tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda aşınma davranışının, TiO_2 içeriğine bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir (Ahmad ve ark., 2024). Zhibin ve ark. TiO_2 nanoparçacıklarıyla kaplanmış karbon nanotüp takviyeli (TiO_2 /KNT Al7075 kompozitleri ultrason destekli döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Daha sonra kompozitlere T6 ısıtma işlemi uygulamışlardır. Kompozitlerin mikro yapı ve aşınma performansını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. TiO_2 /KNT'lerin, α -Al tanelerinin incelmesinin teşvik ederek ortalama tane boyutunu %60,7 oranında azalttığını belirlemişlerdir. %1 ağırlık oranında TiO_2 /KNT ilavesi ve T6 işlemi uygulanmasıyla aşınma oranlarının sırasıyla

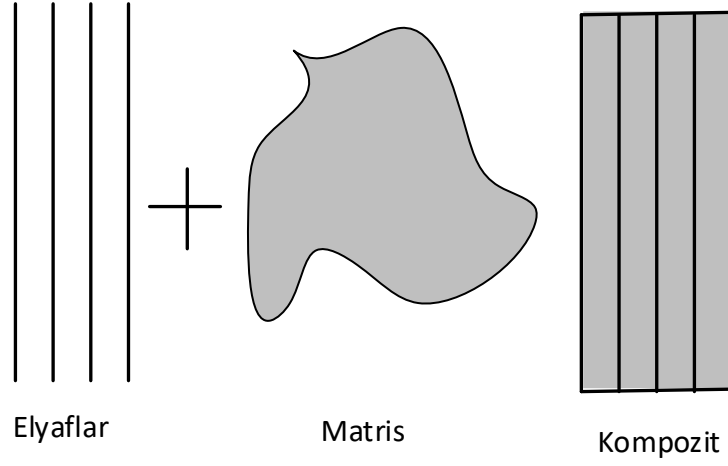
%48,2 ve %69,2 oranında azaldığını belirlemişlerdir. KNT'lerin kendinden yağlama özelliği ve tane inceltme mekanizması sayesinde aşınma direncinin arttığını, nano boyuttaki $MgZn_2$ çökeltileri ile α -Al matrisi arasındaki güçlü arayüz bağı ile de tribolojik özelliklerin daha da iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Aşınma testlerinde yük arttıkça aşınma oranı ve mikro çatlak eğiliminin arttığı gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda kayma hızı arttıkça, aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğünün önce azaldığını sonra tekrar artış gösterdiğini belirtmişlerdir (Liu ve ark., 2022). Zaree ve ark. $Al7075/TiO_2$ ve $Al7075/TiO_2/SiC$ kompozit tabakaları, saf alüminyum yüzeyinde sürtünme kaplama yöntemiyle üretmişlerdir. Seramik parçacıkların eklenmesiyle tane boyutlarının önemli ölçüde küçüldüğünü belirlemişlerdir. SiC parçacıklarının, TiO_2 'ye kıyasla kompozit tabakaların tane inceltme etkisini daha fazla arttırdığını gözlemlemişlerdir. Kompozitin mikrosertliğinin, takviye parçacıkların eklenmesiyle artmış olduğunu, SiC parçacıklarının eklenmesinin TiO_2 'ye kıyasla daha büyük bir sertlik artışı sağladığını belirtmişlerdir. Aşınma testlerinde, alüminyumun aşınma direncinin sürtünme kaplama işlemi ve seramik parçacıklarının eklenmesiyle önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermişlerdir. SiC parçacıklarının, tane inceltme etkisiyle kompozit tabakaların aşınma direncini arttırdığını, TiO_2 parçacıklarının ise yağlayıcı oksit tabakalarının oluşumuyla aşınma direncini iyileştirdiğini belirlemişlerdir (Alavi Zaree ve ark., 2022). Bharat ve ark. $Al7075$ alaşımına %0, %1, %2 ve %3 ağırlıkça nano TiO_2 parçacıkları ilave ederek elde edilen kompozitin tribolojik davranışını incelemişlerdir. TiO_2 nanoparçacıkların oranı ve normal yükün, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Sürtünme katsayısı için ideal koşulların, 2 m/s kayma hızı, 1000 m mesafe, 10 N normal yük ve %3 TiO_2 ağırlık yüzdesi olduğunu belirlemişlerdir. Taguchi analizi ile kompozitteki nano TiO_2 oranının, sürtünme katsayısı üzerinde en büyük etkiye (%38,54), normal yükün ise aşınma oranı üzerinde en büyük etkiye (%35,61) sahip olduğunu vurgulamışlardır (Bharat ve ark., 2023).

2.1. Kompozit Malzemeler

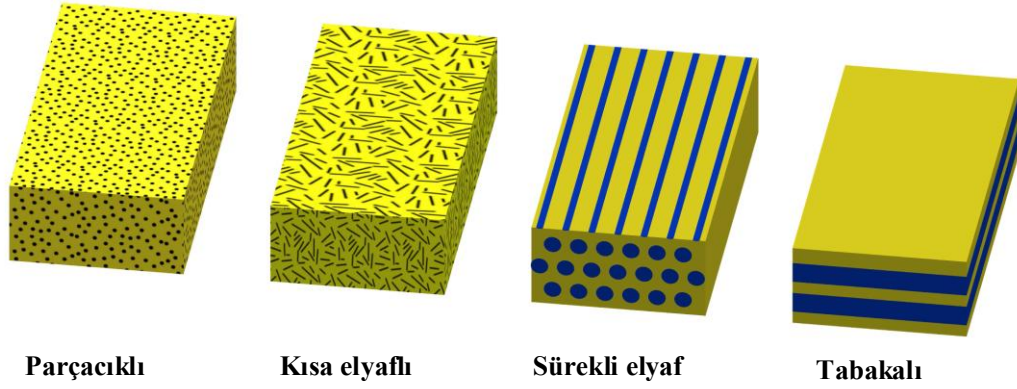
Kompozit malzeme, kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla malzemenin belirgin bir ara yüz ile bir araya getirilmesiyle oluşan bir malzemedir (Dagdag ve ark., 2019) Bileşen malzemeler, kompozit içinde özelliklerini korurlar, ancak ortaya çıkan malzeme, bileşenlerin bireysel özelliklerinden farklı özellikler ortaya çıkarmaktadır (Khalil ve ark., 2012). Bileşenlerden biri olan matris, sürekli fazı oluşturur (Asim ve ark.,

2017; Hsissou ve ark., 2019). Diğeri ise, genelde matris özelliklerini değiştirmek veya geliştirmek için matrise ilave edilen elyaflar veya parçacıklar şeklindeki takviye malzemesidir. Takviye malzemeleri, matris içinde homojen dağılan kesikli fazı ifade etmektedir. Takviye malzemesinin yüzeyi, matrise olan ıslanabilirliğini artırmak ve takviye ile matris arasındaki ara yüzey bağını kontrol etmek veya güçlendirmek amacıyla kimyasal olarak işlenebilir veya çok ince bir tabaka ile kaplanabilir. Bununla birlikte yüzey işlemleri takviye yüzeyini kimyasal maddeler ve nem gibi çevresel faktörlere karşı karşı koruma işlevi göstermektedir. Kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri polimer, metal veya seramik olabilmektedir (Cheng ve ark., 2020). Matris malzemesine bağlı olarak kompozitler, metal matrisli kompozitler (MMK), polimer matrisli kompozitler (PMK), veya seramik matrisli kompozitler (SMK) olarak kategorize edilebilmektedir. Ticari uygulamalarda en sık kullanıma sahip kompozit malzemeler PMK'lerdir. Fakat SMK ve MMK'ler yüksek sıcaklık koşullarında yöne çıkmaktadır. Yapısal kompozitlerde, takviye malzemeleri matrise göre çok daha sert veya güçlüdür. Kompozit yapıdaki takviye bileşeninin ana etkisi, kullanılan matris malzemeye bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin, polimer malzemeler, takviye liflerine nazaran çok daha düşük mukavemet ve modüle sahiptir. Bu nedenle, bu tür kompozitlerde lif ilavesinin temel amacı, polimer matrisinin modül ve mukavemetini arttırmasıdır.

Öte yandan, SMK'lerde takviyenin esas işlevi, matrisin kırılma tokluğunu arttırmak ve gevrek kırılmaya karşı daha dirençli hale getirmektir. Seramik matris malzemelerin modülü, takviye elyaflarına yakın ya da daha yüksek olabilmektedir. Fakat seramik matrisin kırılma tokluğu düşüktür. Seramik matrise elyaf ilave edilmesi, kırılma tokluğu ve çatlak direncinde ciddi bir artış sağlayabilmektedir.



Şekil 2.1. Elyaf ve reçine kullanarak kompozit malzeme oluşumu



Şekil 2.2. Farklı takviye konfigürasyonlarının şematik gösterimi (Mistry ve Gohil, 2018)

Kompozit davranışını iyi bir şekilde anlayabilmek için, takviyelerin ve matris malzemelerinin kompozitteki rollerini iyi bilmek gereklidir (Mazumdar, 2001).

2.1.1. Takviyeler

Takviyeler, genellikle MMK'nin mukavemetini, sertliğini ve sıcaklık dayanım kapasitesini artırırken, yoğunluğunu da düşürmektedir. Bu özelliklerin kazanılması, takviye türüne, üretim tekniğine ve matrisle olan kimyasal uyuma bağlıdır. Takviye malzemesinin seçilmesi sırasında dikkate alınması gereken bazı hususlar şunlardır:

- Boyut – çap ve şekil oranı
- Şekil – Kesilmiş lif, whisker veya düzensiz parçacıklar
- Yüzey morfolojisi – düzgün veya oluklu ve pürüzlü
- Yapısal kusurlar – boşluklar, ikinci fazlar
- Doğal özellikler – mukavemet, modül ve yoğunluk.

Farklı takviye formları arasında sürekli takviyeli AMMK'ler mükemmel özellikler sergiler. Ancak, sürekli takviyeli metalik kompozitlerin uzunlamasına ve enine yönler arasındaki özelliklerin dikkatlice dengelenmesi, daha iyi bir performans elde etmek için önemlidir. Alüminyum matris içinde partiküllerin düzgün bir şekilde dağılması, daha izotropik malzeme özellikleri sağlar ve bu da AMMK malzemesinin üretimini kolaylaştırır (Das, 2015).

2.1.2. Matris

Matris malzemeler, kompozit yapı içinde birkaç fonksiyonu gerçekleştirmektedir. Bunların birçoğu kompozit yapı performansı üzerinde kayda değer bir öneme sahiptir. Takviye, matris malzemesi veya bağlayıcı malzeme olmadan kendi başlarına çok az işe yaramaktadır. Bir matris malzemesinin önemli fonksiyonları şu şekilde sıralanabilir;

- Matris malzemesi, takviyeleri birarada tutar ve kuvveti takviyelere iletir. Yapının sert olmasını sağlar (Sharma ve ark., 2023).
- Matris, takviyeleri izole edererek takviyelerin ayrı ayrı hareket etmesini sağlar. Böylece çatlak ilerlemesini yavaşlatır.
- Matris, yüzey kalitesinin iyi olmasını sağlar.
- Matris, takviyeleri mekanik ve kimyasal etkilere karşı korur. Matris malzemesi, darbe direnci ya da süneklik gibi özellikleri doğrudan etkiler. Matris sünek olduğunda kompozitin tokluğu artar. Yüksek tokluk elde etmek için termoplastik matrisler seçilmelidir.
- Matris malzemenin türü ve takviye malzemesiyle uyumu, malzeme özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler (Mazumdar, 2001).

2.1.3. Arayüz

Takviye ile matris arasındaki arayüz, kompozit malzemenin genel performansını belirlemede temel bir rol üstlenmektedir. Takviye ile matris arasındaki güçlü ara yüzey bağı malzeme performansını ciddi derecede etkilemektedir. Ara yüzey özellikleri ayrıca, bir kompozitte çatlak yayılımına karşı direnci ve dolayısıyla kırılma tokluğunu da etkilemektedir. Lif takviyeli bir kompozitte en önemli iki enerji soğurma mekanizması, lif/matris ara yüzeyindeki ayrılma ve lifin çekilmesidir. Eğer ara yüzey kolayca ayrılıyorsa, çatlak yayılımı bu ayrılma süreci tarafından kesintiye uğratılır ve lifin içinden

geçmek yerine lif yüzeyi doğrultusunda ilerler. Böylece lif, daha yüksek düzeyde yük taşımaya elverişli hâle gelir. Lif çekilmesi, tüm liflerin çatlak düzleminde aynı anda kırılmamasından kaynaklanır. Lifler, çatlak düzleminde rastgele uzaklıklarda kırıldığından, kırılan lif uçlarından biri matristen çekilir. Çekilen bu lifler, ara yüzdeki yüksek kayma gerilmeleri ve sürtünme kuvvetlerine karşı koyabilirse, kompozitin kırılma tokluğu önemli oranda gelişir (Mallick, 1997).

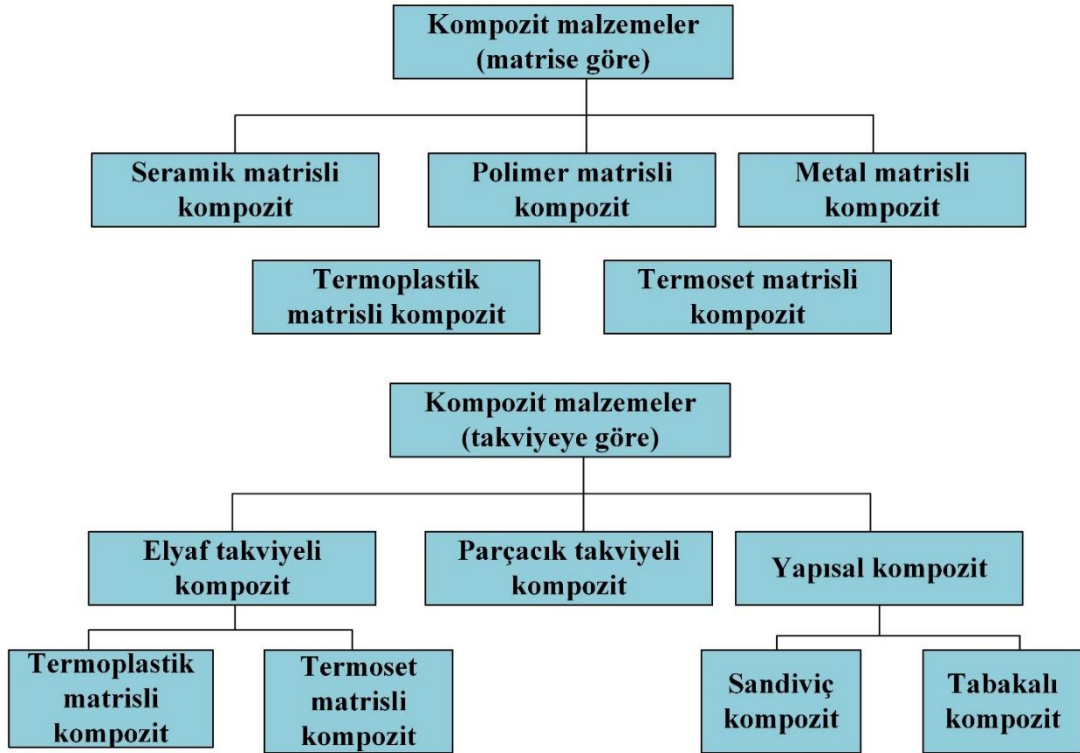
2.1.3.1. Metal matrisli kompozitler için ara yüzey

MMK'lerde güçlü bir takviye-matris arayüzey bağı oldukça istenen bir niteliktir. Ancak, SMK'lerde güçlü bir ara yüzey bağı her zaman faydalı olmayabilir ve genellikle bu durumdan kaçınılır. Seramik matris, çok sayıda mikro çatlak ve işlem hatasının yanı sıra düşük kırılma tokluğu nedeniyle gevrek bir malzemedir. Ara yüzey bağı güçlü ve elyafların zayıf olması durumunda, matriste oluşan çatlaklar elyafların içinden geçerek kompozitin ani kırılmasına sebep olabilir. Fakat, ara yüzey bağı zayıf ve elyaflar güçlü ise, elyaf-matris ara yüzü ayrışmakta ve matris çatlakları elyafların etrafında ilerlemektedir. Liflerin kırılması yerine ara yüzey ayrışması ve ardından liflerin çekilmesi, SMK'lerin yüksek kırılma tokluğuna ulaşması açısından kritik öneme sahiptir. Metal ve seramik matrisli kompozitlerde ara yüzey özel bir sorun teşkil eder, çünkü bu kompozitlerin üretiminde kullanılan yüksek işlem sıcaklıkları, takviye malzemesi ile onu çevreleyen matris malzemesi arasında istenmeyen kimyasal reaksiyonlara yol açabilir. Bu kimyasal reaksiyon, takviye yüzeyinin aşınmasına, matrisin takviye yüzeyine yakın bölgesinde alaşım elementlerinin tükenmesine neden olabilir ve en kötü durumda, reaksiyon ürünlerinden oluşan gevrek bir ara faz meydana getirebilir.

2.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması

Bir kompozit, iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan ve her bir bileşenin özelliklerini içeren tamamen farklı bir malzeme elde etmeyi amaçlayan bir yapıdır. Genellikle, kompozit malzemelerin her bir bileşeni, birleştirildiğinde en iyi özellikleri sunacak şekilde seçilir; bu da kompozit malzemeleri çoğu endüstriyel alanda yaygın olarak uygulanabilir kılar. Her kompozit malzeme, tüm yapıyı bir arada tutan matris olarak adlandırılan ana fazdan ve özelliklerini matris boyunca ileten takviye fazlarından oluşur. Bu özellik aktarımı, takviye ile matris arasındaki arayüz sayesinde

gerçekleşir. Takviye ve matris malzemelerine ayrı ayrı göre, kompozit malzemeler Şekil 2.3'te gösterildiği şekilde sınıflandırılabilir (Demirkol, 2023).



Şekil 2.3. Matris ve takviyeye göre kompozit malzeme sınıflandırması

Kompozit malzemeler, ana malzemeye göre üç kategoriye ayrılabilir (Chawla, 1998; Kheder ve ark., 2011).

1. Polimer Matrisli Kompozitler
2. Metal Matrisli Kompozitler
3. Seramik Matrisli Kompozitler

2.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Son yıllarda, PMK malzemeler yüksek özgül mukavemet ve rijitlikleri sayesinde büyük rüzgar türbini kanatlarından mikroelektronığa kadar geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır (Kessler, 2012). Ancak, uygulamalarında araştırılması gereken çeşitli teknik sorunlar ve endişeler devam etmektedir. Üretimin yanı sıra, kompozit malzemelerin maliyeti ve üretim süreci, matris malzemelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. PMK'lerin özellikleri, matris, takviye malzemeleri ve ara yüzey yapısından etkilenmektedir. Bu açıdan bir PMK'nin tasarımı için birçok faktörün göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Yapısal bir malzemenin kullanılacağı koşullara en

uygun şekilde üretilmesi için birçok değişkenin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. PMK'lerde mekanik özelliklerde izotropi elde etmek için sürekli lif takviyesi kullanılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, PMK'ler, lif yönüne dik gerildiğinde en kararlı hale gelirken, lif yönüne paralel gerildiğinde ise en zayıf durumdadır (Kumar Sharma ve ark., 2022). SMK'lerden farklı olarak, PMK'lerde takviye malzemesi yalnızca kırılma tokluğunu artırmakla kalmaz, aynı zamanda mukavemet ve rijitlik kazandırmak için kullanılır. Hizmet süresi boyunca yapıya uygulanan mekanik yükler, takviye malzemesi tarafından taşınmaktadır. Bununla birlikte, parçacıklar, lifler ve tekstil gibi PMK'lerde yaygın olarak kullanılan çeşitli takviye malzemeleri, üretim ve kullanım maliyetlerini azaltabilir. PMK'lerde polimerlerin sahip olduğu avantajları, takviye bileşeninin üstün mukavemetiyle birleştirilebilmektedir. Takviye malzemesi, performans artırıcı bir bileşen olarak görev yapmaktadır. PMK'ler, en yaygın kullanılan, en hızlı büyüyen ve en büyük kompozit malzeme sınıfını oluşturmaktadır. PMK'lerde matris olarak termosetler veya termoplastikler kullanılmaktadır. Mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki sürekli gelişmeler, PMK malzemelerin performansını arttırmıştır (Rajak ve ark., 2019). PMK'lerde lif takviyesi ile mukavemet artırılabilir. Cam, karbon, organik ve çeşitli diğer lif türleri bu malzemelerde kullanılabilir. Yüksek çekme mukavemetinin yanı sıra yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup iyi elektrik yalıtımı sağlamaktadır. Öte yandan cam lifi, kırılğan, aşınmaya dayanıklı olmayan ve insan cildi için rahatsız edici bir malzemedir. Organik liflerin çekme mukavemeti ve elastik modülü oldukça etkileyicidir. Doğal kauçuk, pamuk gibi polimer bazlı malzemeler günlük hayatımızda sıkça karşılaştığımız örneklerdir. Benzer şekilde, sentetik elyaf, kauçuklar ve polimerler de benzer özellikler sergilemektedir.

2.2.2. Metal Matris Kompozitler (MMK)

Metal matris kompozitler (MMK), fiziksel ve kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla bileşenden oluşan, mekanik veya metalurjik olarak birleştirilen ve her bir bileşenden farklı özellikler sergileyen kompozit malzemelerdir. Bu bileşenler mikroskobik düzeyde bir araya getirilmiş olup sıvı halde dahi çözünmezler. Genellikle bir metal matrise, oksitler veya diğer refrakter malzemeler gibi metal dışı takviye fazları eklenerek üretilirler. Bu kompozitlerde, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştiren takviye fazı, matris fazı içinde gömülü halde bulunur. Genellikle takviye fazı elyaf, parçacık veya pul şeklinde, matris fazı ise sürekli bir yapıda olmaktadır. Betonun çelik donatılarla

güçlendirilmesi veya epoksinin grafit lifleriyle takviye edilmesi gibi örnekler, kompozit sistemlere örnek olarak verilebilir. Kompozitlerin her bir bileşeni, nihai yapıda kimliğini koruyarak özgün özelliklerini devam ettirir. Genel olarak kompozitler, rijit bir takviye fazının (lifler veya parçacıklar gibi) daha sünek bir matris içinde dağıtılmasıyla oluşturulur. Matris fazı, kompozitin sürekli fazını oluştururken, takviye fazı ise genellikle yük taşıyan ve baskın mekanik özellikleri sağlayan bileşen olarak işlev görür (Das, 2015). MMK'lar, geleneksel monolitik metallere kıyasla önemli avantajlar sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlar arasında yüksek özgül mukavemet, elastik modül, yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özellikler ve düşük termal genleşme katsayısı bulunmaktadır. Ayrıca, MMK'lar, üstün yorulma ve aşınma dirençleri, yüksek elastik davranışları, gelişmiş termal ve elektriksel iletkenlikleri, nem duyarsızlığı ve PMK'lere kıyasla daha yüksek çalışma sıcaklıkları gibi dikkat çekici özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Öte yandan, PMK'larla karşılaştırıldığında yüksek yoğunluk ve yüksek üretim sıcaklığı gibi dezavantajlara sahiptirler (Öztoprak, 2018).



Şekil 2.4. Farklı Metal matrisli kompozitler (Miracle, 2005)

2.2.3. Seramik matrisli kompozitler

Seramikler yüksek sıcaklık koşullarında düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve sertlik gibi arzu edilen özelliklere sahiptirler. Ancak seramiklerin tokluğunun düşük olması bu cazip özellikleri olumsuz etkilemektedir. Seramikler, yüzeyde veya içyapıda bulunan kusurlar nedeniyle ani kırılmalara eğilimlidir. Termal şoklara son derece duyarlıdırlar ve üretim veya kullanım sırasında kolayca zarar görebilmektedirler. Bu nedenle, seramik matrisli kompozitlerde (SMK) temel hedefin, seramiklerin içine lifler ekleyerek tokluklarını artırmak olduğu anlaşılmaktadır. Böylece seramik malzemelerin yüksek sıcaklık mukavemeti ve çevresel direnç gibi avantajlarından, ani kırılma riski olmadan yararlanılabilir. SMK'lerin diğer kompozitlerden bazı temel farklar taşıdığına dikkat çekmek önemlidir. Seramik olmayan matrisli kompozitlerde genel yaklaşım, uygulanan yükün büyük bir kısmının lifler tarafından taşınmasını sağlamaktır. Bu yük paylaşımı, lif ve matrisin elastik modülleri oranına bağlıdır. SMK'lerde bu oran oldukça düşük olabilmektedir. SMK'lerle ilgili önemli bir diğer husus ise, matrisin yüksek üretim sıcaklığı ve düşük sünekliğinden dolayı unsurlar arasındaki termal uyumsuzluğun SMK özellikleri üstünde büyük bir etkisinin olmasıdır (Chawla, 2012). SMK'ler, kesikli takviyeli seramikler ve sürekli lif takviyeli seramikler olmak üzere ikiye ayrılır. Kesikli takviyeler; kristal lifçikler, parçacıklar, levhacıklar, nano parçacıklar olmaktadır ve genellikle matrisin kırılma tokluğunu artırmak amacıyla eklenir. Bu artış, büyük ölçüde çatlak sapması ve çatlak yayılmasının engellenmesi yoluyla sağlanmaktadır. SMK'lerde yüksek kırılma tokluğu sağlamanın en önemli noktası, matris-elyaf ara yüzey özelliklerinin düzgün şekilde kontrol edilmesidir. SMK'ler, araç motor bileşenleri ve gaz türbin kanatları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedirler. (Mallick, 1997)



Şekil 2.5. Seramik matrisli kompozitler (Sun ve ark., 2023)

2.3. Alüminyum Bazlı Metal Matris Kompozitler (AMMK)

AMMK'ler, yüksek mukavemet ve özgül modül, hafiflik, düşük ısıl genleşme ve yüksek aşınma direnci sayesinde ileri düzey malzeme grubunda değerlendirilmektedir. Bu özelliklerin kombinasyonu, konvansiyonel bir malzeme ile elde edilemez (Shorowordi ve ark., 2003). Yüksek işleme maliyetleri, AMMK'lerin kullanımını, askeri silahlar ve havacılık gibi çok spesifik uygulamalarla sınırlandırmaktadır. AMMK'lere olan talep son 20 yılda katlanarak artmış olup, yüksek tokluk, düşük yoğunluk ve korozyon direnci gibi olağanüstü özellikleri sayesinde havacılık, askeri, otomotiv ve mineral işleme sektörleri için ideal bir aday haline gelmiş ve son zamanlarda motor pistonları, silindir kaplamaları ve fren diskleri gibi otomotiv ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kar ve ark., 2024). AMMK'ler için işleme teknikleri sıvı halde işleme, yarı-sıvı işleme ve toz metalürjisi olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir (Lade ve ark., 2023). Genel olarak, parçacık takviyeli AMMK'ler toz metalürjisi, in-situ, infiltrasyon veya karıştırmalı döküm yöntemleriyle üretilmektedir. Bu malzemeler izotropik yapıda olup haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi farklı şekillendirme işlemleri yapılabilir. Kıl takviyeli kompozitler, toz metalürjisi işlemi veya infiltrasyon yöntemleriyle üretilirken, sürekli lif takviyeli kompozitler basınçlı infiltrasyon yöntemleriyle üretilmektedir. Tek filament takviyeli AMMK'ler ise difüzyon bağlama teknikleriyle üretilebilmektedir (Prasad Behera ve ark., 2020).

AMMK'lerin takviyesiz malzemelere kıyasla başlıca avantajları şunlardır (Kar ve ark., 2024):

- Daha yüksek mukavemet

- Gelişmiş sertlik
- Azaltılmış yoğunluk
- Geliştirilmiş yüksek sıcaklık özelliği
- Ayarlanabilir termal genleşme katsayısı
- Isı/yük yönetimi
- Geliştirilmiş ve özelleştirilmiş elektriksel performans
- Yüksek aşınma direnci
- Gelişmiş sönümleme kapasitesi

Al alaşımları		
Sınıflandırma	Bileşenler	Özellik ve uygulama alanları
1XXX	Al	Ucuzluk, kolay işleme, geleneksel kullanım
2XXX	Al-Cu Fe/Mn/ Zn	Yüksek Mukavemet, Uzay parçaları
3XXX	Al-Mn Cu/Mg/Si	Korozyon direnci, klima ve soğutucularda kullanım
4XXX	Al-Si Fe/Cu/ Mg	Yüksek ısı/aşınma direnci, kaynak telinde kullanım
5XXX	Al-Mg Mn/Si/Fe	Düşük yoğunluk, yüksek uzama, uzay parçaları
6XXX	Al-Mg-Si Zn/Fe/ Mn	Korozyon ve oksidasyon direnci, uçak parçaları
7XXX	Al-Zn-Mg Cu/Si/Fe	Yüksek mukavemet, Uçak parçaları

Şekil 2.6. Al alaşımların sınıflandırması (Khalid, Umer ve Khan, 2023)

2.3.1. AMMK türleri

AMMK'ler, takviye türüne bağlı olarak dört türe ayrılabilir: (Narasimha ve ark., 2013; Prasad Behera ve ark., 2020)

(a) Parçacık takviyeli AMMK'ler

(b) Kıl veya kısa lif takviyeli AMMK'ler

- (c) Sürekli lif takviyeli AMMK'ler
- (d) Mono filament takviyeli AMMK'ler

2.3.1.1. Partikül takviyeli alüminyum matris kompozitleri

Takviye olarak kullanılan parçacıklar metal, seramik veya polimer malzemeler olabilmektedir. Bu parçacıklar, matrisin modülünü artırmak, matrisin geçirgenliğini ve sünekliğini azaltmak amacıyla kullanılır. Partikül takviyeli alüminyum matris kompozitler, takviye edilmemiş malzemelere kıyasla dayanım ve sertlikte artış sağlamakta ve izotropik özellikler sergilemektedir. Partikül takviye olarak yaygın seramik takviyeleri genellikle oksitler, karbürler veya boritlerdir (Al_2O_3 , SiC veya TiB_2 gibi) ve yapısal ve aşınma direnci uygulamalarında hacim fraksiyonu genellikle %30'un altındadır. Fakat, elektronik paketleme alanlarında, takviye malzemesinin hacim fraksiyonu %70'e çıkabilmektedir.

2.3.1.2. Kısa lif takviyeli alüminyum matris kompozitler

Sürekli lif takviyesiyle mümkün olmayan karmaşık şekilli parçalar, whisker veya kısa liflerle oluşturulabilmektedir. Takviye, yapısal bir işlev sunmanın yanı sıra, aşınma direncini, sürtünme katsayısını veya ısı iletkenliği gibi özellikleri de değiştirir. Bu kategoride en sık kullanılan takviye parçacıkları SiC ve Al_2O_3 'tir. Kısa lif takviyeli kompozitler, kesikli lifler şeklinde dağılmış bir fazla güçlendirilmiş bir matristen oluşur. (Narasimha ve ark., 2013)

2.4. Al7075 Alaşımı

Al7075, ana alaşım elementi olarak çinko içeren bir alüminyum alaşımıdır. Yüksek yorulma dayanımına ve orta seviyede işlenebilirliğe sahip olmasına rağmen, diğer alaşımlara kıyasla düşük kaynaklanabilirlik ve düşük korozyon direnci göstermektedir (Baradeswaran ve Elaya Perumal, 2013). Genellikle havacılık ve yapısal uygulamalarda kullanılır. Yaygın olarak kullanılan birçok alüminyum alaşımı arasında, Al7075 alüminyum, çeşitli endüstriyel uygulamalarda en güçlü alüminyum alaşımı olarak öne çıkmaktadır. Hafif, kolay işlenebilir ve yeterli korozyon direncine sahip bir metal olması sayesinde, çelik alaşımlarına benzer bir mukavemet sağlarken aynı zamanda hafif

bir malzeme olarak avantaj sunmaktadır. Al7075'in özgül ağırlığı $2,73 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Al7075 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve olağanüstü gerilme korozyonu direnci gibi dikkat çekici fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle uçak uygulamalarında gövde ve kanat gibi çeşitli bileşenlerde kullanılmaktadır (Khalid ve ark., 2023).

2.5. Nanokompozitler

Kompozit malzemelerin özel bir alt sınıfı olan nanokompozitler, en az bir boyutu yaklaşık 100 nanometreden küçük olan takviye malzemeleri içermektedir. Boyuttaki bu belirgin küçülme, nanometre ölçeğinde geçerli olan mekaniklerin değişmesiyle ortaya çıkan özel özelliklere yol açmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan nanoyapılı takviye malzemeleri arasında yer alan TiO_2 , ZrO_2 , grafen, karbon nanotüpler sayılabilir. Metal malzemelerin nanopartiküllerle takviye edilmesi, son yıllarda benzersiz mekanik ve fiziksel özelliklere sahip yeni kompozitlerin geliştirilme potansiyeli nedeniyle önemli ölçüde araştırma ilgisi çekmiştir. Bu tür nanokompozitlerin üretimi, yeni teknolojik fırsatlar sunarken aynı zamanda bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Nanokompozitlerin istenen mekanik özelliklere sahip olabilmesi için, takviye edici nanoparçacıkların metal matris içinde homojen bir şekilde dağılması büyük önem taşımaktadır. Ancak, seramik nanoparçacıkların metal matrislerde homojen dağılımını sağlamak özellikle sıvı metalurji işlemlerinde oldukça zordur. Bu süreçte, nanoparçacıklar genellikle iri kümelerle topaklanma eğilimi gösterir. Bu durum, büyük yüzey alanına sahip nanoparçacıkların ergimiş metallerle zayıf ıslanabilirliğinden kaynaklanmaktadır. Bu sorunu aşmak için, mekanik alaşımlama işlemi, dışarıdan eklenen nanoparçacıkların metal matris içinde daha homojen şekilde dağılmasını sağlamak açısından oldukça gelişmiş ve etkili bir yöntemdir (Tjong, 2007). Nano parçacıkların üstün özelliklerinin kompozit yapıya aktarılabilmesi için, matris ile takviye malzemesi arasındaki ara yüzeyin artırılması gerekmektedir. Nanokompozitlerdeki ikinci ve en önemli olgu ise, yüzey alanı/hacim oranındaki belirgin artıştır. Bu artış, geleneksel yöntemlerle elde edilebilecek performans iyileştirmelerinin ötesine geçilmesini sağlar. Aynı kütle oranı için, bir malzeme daha küçük parçalara ayrıldığında, parçaların geometrisine bağlı olarak toplam yüzey alanı artar. Yüzey alanındaki bu artış, aynı ortamda temas halindeki bileşenler arasında daha fazla atomik etkileşim oluşmasına neden olur. Bu da kimyasal reaksiyon hızlarının artması, benzer yapıların arasındaki van der Waals kuvvetlerinin güçlenmesi gibi etkilerle sonuçlanır.

2.6. Toz Metalurjisi

Toz metalürjisi, metaller ve metal alaşımlarını mekanik ve fiziko-kimyasal yöntemlerle işleyerek, tozları eritmeden ısı ve basınç altında iş parçaları üretme sürecidir. Bu yöntemde, saf metallerin toz halindeki karışımları, seramik, karbon ve plastik bileşenlerle harmanlandıktan sonra basınca tabi tutulur. Ardından, metalin ergime noktasının altında bir sıcaklıkta sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem, parçacıkların temas yüzeylerinde güçlü bir bağ oluşturarak istenen özelliklerin kazanılmasını sağlar. Toz metalürjisi, metal işleme teknolojileri arasında, en yenilikçi üretim tekniklerinden biridir. Bu yöntem, karmaşık ve yüksek kaliteli bileşenlerin maliyet etkin bir şekilde üretilmesini mümkün kıldığı için oldukça verimlidir. Toz metalürjisi, farklı boyut, şekil ve sıkıştırma özelliklerine sahip metal tozlarının ilk sıkıştırılmasının ardından, sinterleme yoluyla parçacıkların birleşmesini ve sağlam, hassas, yüksek performanslı bileşenlerin oluşturulmasını sağlar. Bu avantajlar sayesinde, TM, yüksek malzeme verimliliği, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyet sağlar, bu da verimlilik, enerji ve hammaddeye ilişkin kaygıları giderir (Kruzhanov and Arnhold, 2012). Toz metalürjisi, küçük, karmaşık ve hassas boyutlu ürünlerin üretimi için mükemmel bir yöntemdir. Bu süreçte maddi kayıplar neredeyse sıfırdır. Elde edilen toleranslar isteğe bağlı olup, malzeme kaybı olmadan pürüzsüz yüzeyler elde edilir (James, 2015). Bu nedenle, TM, geleneksel metal şekillendirme tekniklerinin yerini almaktadır. Toz metalürjisi, tungsten lamba telleri, diş hekimliği ekipmanları, yağsız rulmanlar, cerrahi cihazlar, dişli çarklar, iş makinesi parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, elektrik bağlantıları, nükleer yakıt bileşenleri, pil parçaları ve jet motoru bileşenleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, metal tozları patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtı, baskı mürekkepleri, lehimleme araçları, katalizörler, gözenekli beton, baskılı devre kartları ve diğer çeşitli ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır (Oleiw, 2023). Toz metalürjisi yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Isıl işlem seçeneği sunarak, mukavemeti artırmak veya aşınma direncini geliştirmek için kullanılabilir. Ayrıca, korozyon direncini artırmak amacıyla kaplama yapılabilir.
- İşlemeyi ortadan kaldırır veya minimuma indirir
- %95'in üzerinde malzeme kullanımına sahiptir. Böylece verimliliği artırır.
- Karmaşık şekillerin üretimi diğer yöntemlere göre daha kolaydır.

- Yakın boyut toleranslarını mümkün kılar - net şekle yakın sonuçlar elde edilir.
- Orta ila yüksek hacimli bileşen üretim gereksinimlerine uygundur.
- Diğer birçok yöntemle kıyasla daha düşük maliyetle parçalar üretilebilir.
- İşlenmesi zor olan sert malzemelerin bileşenleri kolayca üretilebilir.
- Enerji açısından verimli ve çevre dostudur (Oleiw1, 2023).

Toz metalürjisinin dezavantajları ise kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Metal tozu parçacıklarının maliyeti, döküm yöntemlerinde kullanılan malzemelerden daha pahalıdır.
- Yüksek çap ve kalınlığa sahip parça üretimi zordur.
- Diğer yöntemlerle kıyaslandığında, mikro yapıda gözenek oluşumu nedeniyle düşük mekanik özellikler görülebilmektedir.
- Kalıp maliyetleri yüksektir (Oleiw1, 2023).

Mineral tozlarının üretiminden sonra, toz metalurjisi teknolojisi dört aşamadan oluşur.

- Toz üretimi
- Presleme veya sıkıştırma aşaması
- Sinterleme aşaması
- İkincil işlemler (Angelo ve ark., 2022).

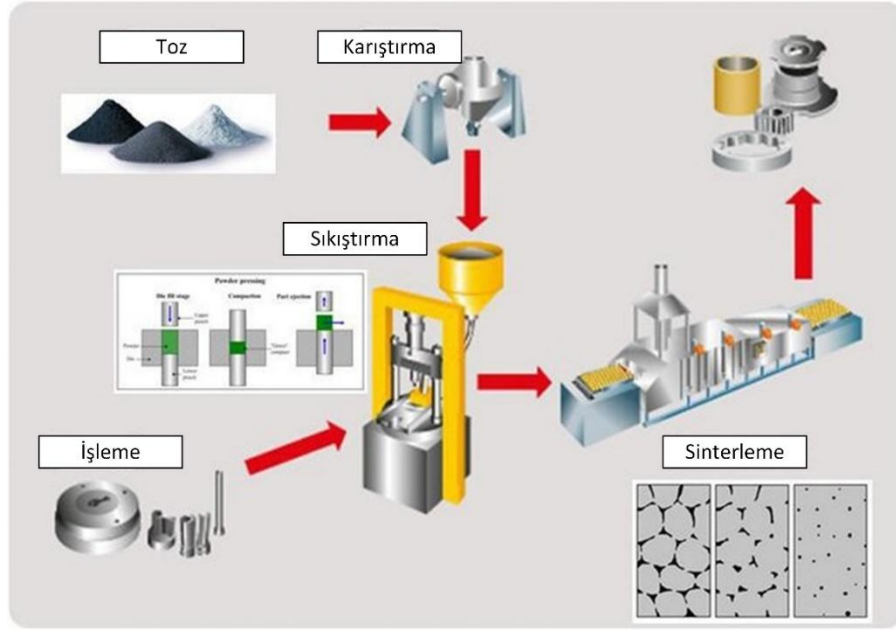
2.6.1 Toz üretimi

Toz metalurjisi için kullanılan ham madde tozlardır ve bu tozlar, sonraki işlemleri kolaylaştırmak için belirli özelliklere sahip mühendislik malzemeleri olarak üretilir. Toz metalurjisi işleminde kullanılan tozlar, saf elementler, element alaşımları veya ön alaşımlı tozlar olabilir. Başlangıç malzemesinin seçimi, ürünlerin %80'inin toz metalürjisiyle üretildiği göz önüne alındığında, nihai ürünün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toz üretimi için birkaç yöntem bulunmaktadır, bunların en yaygın olanı atomizasyon yöntemidir, çünkü bu yöntemle tozların hacminin yaklaşık %80'i üretilmektedir. Atomizasyon, genellikle demir ve demir dışı metallerin tozlarını üretmek için kullanılır; ayrıca paslanmaz çelik, süperalaşımlar ve alüminyum tozları da bu yöntemle elde edilir. Demir, bakır, tungsten ve molibden gibi metallerin üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir tekniktir. Diğer bir yaygın toz üretim yöntemi ise elektrolizdir; bu yöntem, özellikle bakır, gümüş ve benzeri metallerin tozlarının üretiminde tercih edilir. Üretilen tozların partikül boyutu, şekli ve diğer özellikleri, kullanım amacına uygun özellikler elde edebilmek için değiştirilir. Ayrıca, tozlar, döküm

sırasında malzeme akışını kolaylaştırmak ve yeşil kompaktın yoğunluğunu artırmak amacıyla genellikle yağlayıcılarla karıştırılır. Bu yağlayıcılar arasında mumlar veya metalik stearatlar gibi maddeler bulunur. Tozlar ayrıca, partikül boyutu, akış hızı, yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik gibi parametreler açısından da test edilerek karakterize edilir. Tozların karakterizasyonu, sıkıştırma davranışını ve sinterlenmiş parçaların nihai özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür (Angelo ve ark., 2022).

2.6.2. Sıkıştırma

Toz sıkıştırma işleminde, yüksek basınçlar kullanılarak bir kalıp yardımıyla metal tozu sıkıştırılmaktadır. Bu işlemde, zımba aracı kalıp boşluğunun altında dikey olarak hizalanmış bir şekilde yer alır. Ardından, toz belirli bir şekil alacak şekilde sıkıştırılır ve kalıp boşluğundan çıkarılır. Toz yoğunluğu, uygulanan basınca bağlı olarak artar. Tipik basınç aralığı 0,5-7 MPa arasındadır. Birden fazla yüksekliğe sahip parçalar için aynı sıkıştırma oranını sağlamak amacıyla birden fazla alt zımba kullanılması gerekir. Tek seviyeli kalıplama işlemi silindirik iş parçaları üretirken, çok seviyeli kalıplama daha karmaşık şekillerin oluşmasını sağlar. Standart üretim hızı dakikada 15-30 parçadır. Toz karışımlarının sıkıştırılması genellikle kapalı toleranslara sahip kalıplarla yapılır. Bu kalıplar genellikle çelik veya çimentolu karbürlerden üretilir. Sıkıştırma için kullanılan ekipmanlar mekanik veya hidrolik preslerden oluşur; hidrolik presler düzgün kuvvet uygulama yetenekleri nedeniyle daha yaygın olarak tercih edilir. Kalıp tasarımı büyük önem taşır ve sıkıştırma işleminin her aşamasında dikkatlice değerlendirilmelidir. Tozun tipi ve özellikleri, sıkıştırma basıncını etkileyen önemli faktörlerdir (Angelo ve ark., 2022).



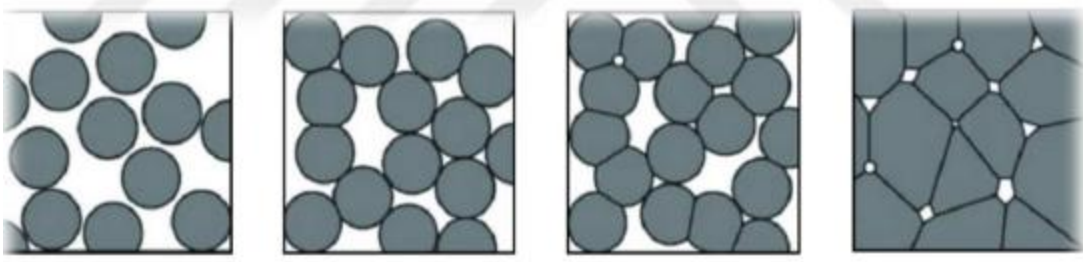
Şekil 2. 7. Toz metalürjisi üretim aşamaları (Rosiak ve ark., 2019)

2.6.3. Sinterleme

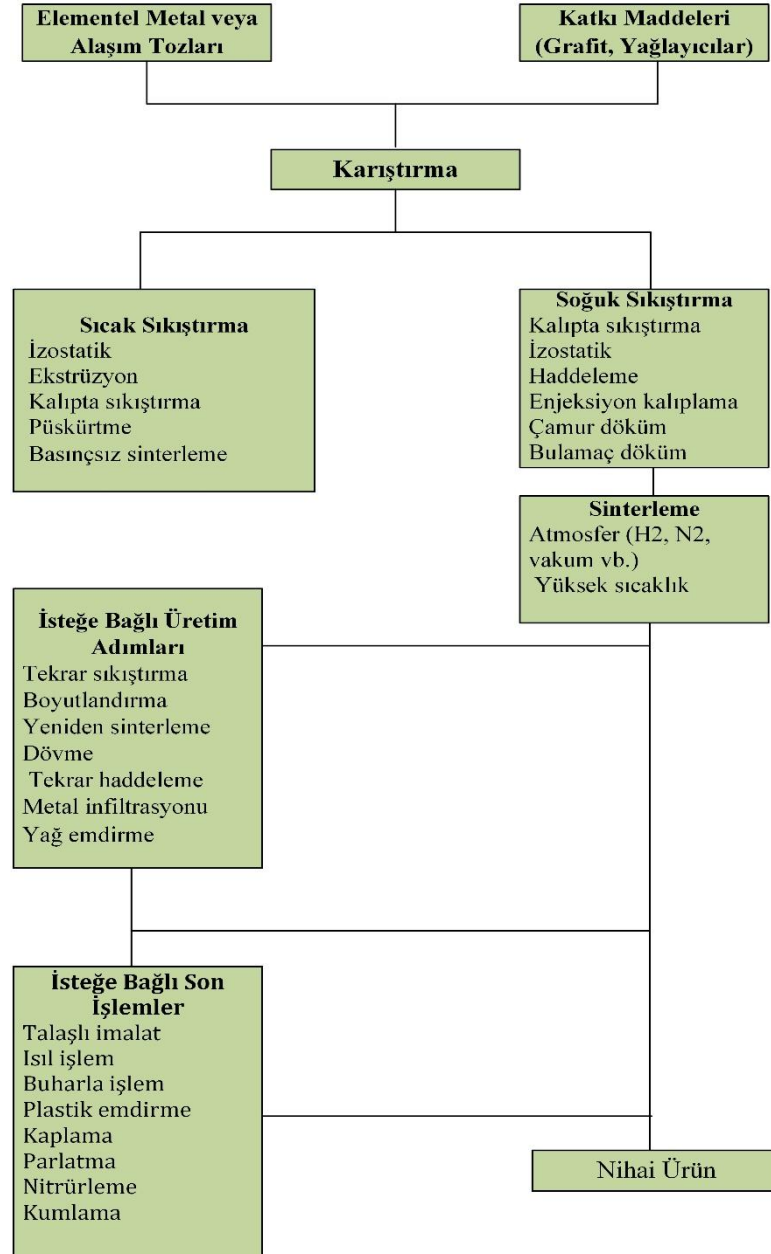
Sinterleme işlemi, parçacıkları metalurjik olarak birleştirmek amacıyla kontrollü bir atmosferde bir fırında gerçekleştirilir. Bu işlem, malzemenin erime noktasının yaklaşık %70'inde yapılır. Bağlanma, atomların difüzyon yoluyla gerçekleşir ve kompaktın bütünlüğünü sağlar. Başka bir deyişle, sinterleme, mekanik olarak bağlanmış tozları, istenen servis özelliklerine sahip, tutarlı bir yapıya dönüştürmeyi amaçlar. Sinterleme sırasında parçanın büzülmesi gerçekleşir ve bu durum, parçanın yoğunlaşmasına yol açar. Yoğunlaşma, parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerinin gelişmesini sağlar. Sinterleme işlemi farklı türde fırınlarda yapılabilir ve genellikle koruyucu bir atmosfer altında gerçekleştirilir. En yaygın kullanılan atmosferler arasında endotermik gazlar ve ayrılmış amonyak bulunur. Azot ise düşük maliyeti nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir (Angelo ve ark., 2022).

Sinterleme de kullanılan diğer atmosfer ortamları aşağıda verilmiştir (Oleiwı, 2023).

1. Nitrit atmosferi: Amonyak
2. Helyum, vakum, azot ve argon atmosferleri
3. CO₂, H₂, amonyak ve metan (CH₄) atmosferleri
4. CO₂, Hava ve H₂O



Şekil 2.8. Sinterleme işlemi (Nguyen Van ve ark., 2016)



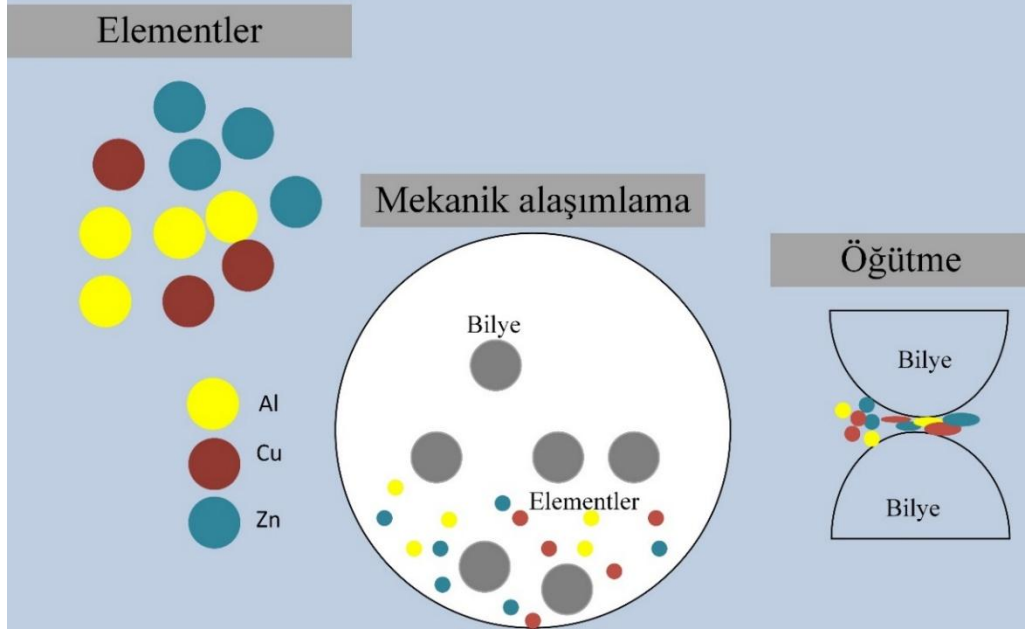
Şekil 2. 9. Toz metalürjisi üretim akış şeması (Angelo ve diğerleri, 2022)

2.7. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama, toz karışımının bilyeli değirmen içine konularak bilyelerin yüksek enerjili çarpışmalarına maruz bırakıldığı öğütme işlemidir. Bu işlem genellikle inaktif atmosfer ortamında gerçekleştirilir. Mekanik alaşımlama, metal veya seramik toz partiküllerini katı halde üretme amacıyla kullanılan alternatif bir yöntemdir. Mekanik alaşımlama sürecinde gerçekleşen en temel iki olay, toz karışımının sürekli olarak kaynaklanması ve kırılmasıdır (Suryanarayana ve ark., 2011). Alaşımlama işlemi kırılma oranı ile kaynak oranı arasındaki denge ve tozların ortalama parçacık boyutu sabit kaldığı sürece sürebilir. İşlemin özgün yapısı sayesinde, farklı element türevlerine sahip alaşımlar etkin bir şekilde sentezlenebilmektedir. Mekanik alaşımlama katı hal süreci olduğundan, yeni alaşımların oluşmasındaki dezavantajları aşmak için yüksek erime sıcaklığına sahip elementlerin ve alaşım oluşturmada zorlanan elementlerin katı karışımları kullanılarak yeni malzemelerin üretimine imkân sağlamaktadır. Genelde, mekanik alaşımlamada diğer bileşenleri bir arada tutmak amacıyla orta seviyede sünek bir metal, ana malzeme olarak seçilmelidir. Yapılan birçok çalışmada, kırılğan metallerin de amorf alaşımlar, intermetalik ve katı çözelti oluşturmak için mekanik olarak alaşımlanabileceği doğrulanmıştır (Lü and Lai, 2013).

2.7.1 Mekanik alaşımlama süreci

Mekanik öğütme işlemi, toz parçacıklarının kovan içinde bulunan bilyelerin yüksek enerjili çarpışmalarına maruz kaldığı katı hal işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kovan içindeki toz parçacıkları sürekli olarak bilyeler tarafından çarpıldığında, parçacıklar arasında soğuk kaynak ve parçalanma işlemleri meydana gelir. Bu işlemler, bilyeli öğütme sürecince defalarca gerçekleşir. Tüm süreç, tozların bilyeli değirmene konulmadan önce karıştırılması, oksidasyonu ve kirlenmeyi önlemek için tankın vakumlanması veya uygun bir atmosferle doldurulması ile başlar ve bilyalı öğütme süreciyle devam eder. Öğütme sonrası işlemler, mekanik alaşımlanmış alaşımların sıkıştırılması, dövülmesi ve son aşamada haddeleme veya ekstrüzyon yoluyla plastik şekillendirilmesini kapsar. Mekanik alaşımlamadan önce, farklı tozların homojen bir dağılımını sağlamak için başlangıçta bir karıştırıcıda harmanlanması önem arz etmektedir. Öğütme süreci için tank malzemesi, ortam atmosferi, tank içindeki toz/bilye oranı ve işlem kontrol ajanları gibi çeşitli kontrol parametreleri dikkate alınmalıdır (Lü and Lai, 2013). Şekil 2.10'da mekanik alaşımlama süreci gösterilmiştir.



Şekil 2. 10. Mekanik alaşımlama süreci

2.7.2 Atmosfer kontrolü

Mekanik alaşımlama sürecinde oksitlenme ve kirliliği önleme amacıyla, işlem genelde tepkimesiz bir atmosferde gerçekleştirilmektedir. Bilyalı değirmenler genellikle atmosfer kontrollü odalara bağlanır. Öğütme sırasında oksidasyonu önlemek için, tankın azot gazı ile doldurulması mümkündür. Çoğu durumda, öncelikle argon gazı, ardından daha inert olan helyum ve nitrojen gazları kullanılır. Toz karışımı tankın içine konulmadan önce bir eldiven kutusunda inert gaz ortamında hazırlanır. Bilyalı değirmen viali, eldiven kutusunda önce yüklenmeli, ardından vial çıkartılmadan önce conta bir kapak ile sızdırmaz hale getirilmelidir (Lü and Lai, 2013).

2.8. Mekanik Özellikler

Mekanik özellikler, metallerin deformasyon, gerinim veya kırılma yoluyla maruz kaldığı kuvvetler ve gerilmeler arasındaki ilişkiyi tanımlar. Mekanik özellikler; sertlik, aşınma direnci, basma mukavemeti gibi kavramları içerir. Bu özellikler büyük ölçüde minerallerin mikro yapısıyla ilişkilidir. Örneğin, faz dağılımı, tane boyutu ve ikinci faz içeriği gibi faktörler mikro yapıyı belirler. Ayrıca, kristal yapı ve elementlerin bileşimi gibi faktörler de mekanik özellikler üzerinde etkili olabilmektedir (Gunduz ve ark., 2009).

2.8.1. Sertlik

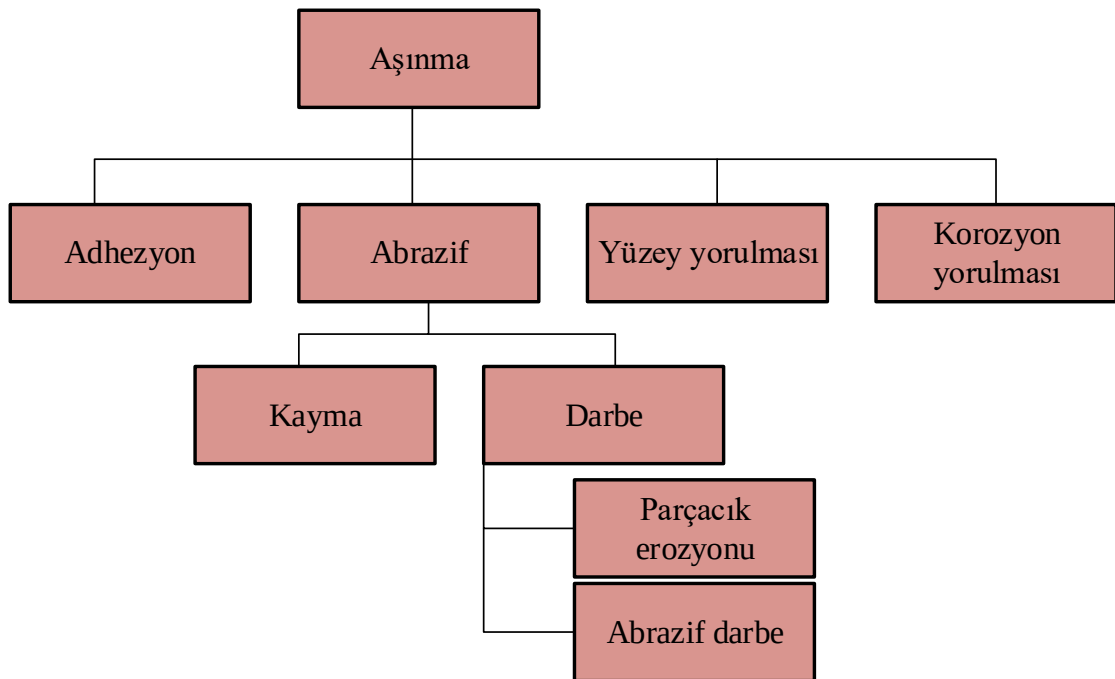
Malzemenin sertliği, genel mekanik özelliklerinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Sertlik, katı bir maddenin işlenebilirlik, delinme, girinti oluşturma, aşınma, kesme ve çizilme gibi yüzey hasarlarına karşı gösterdiği direnci ifade eder. Ayrıca, malzemenin yüzey dayanıklılığının bir göstergesi olarak da değerlendirilir. Genel olarak, sertlik özelliği malzemenin parçacıkları arasındaki bağ kuvvetine bağlıdır. Eğer parçacıklar arasındaki bağ güçlü ise sertlik değeri yüksek olur. Sertlik ayrıca malzemenin yüzey yapısına ve yumuşaklık derecesine de bağlıdır. Gözeneksiz malzemeler yüksek delinme direncine sahipken, gözenekli malzemeler daha düşük delinme direnci gösterir (Patel ve Sun, 2016).

2.9. Aşınma

Triboloji, çok kapsamlı bir araştırma alanı olup, temas halindeki yüzeyler ve görelî hareketlerin tanımlamakta kullanılan bir bilim dalıdır. Bu tanım, sürtünme, yağlama ve aşınma mekanizmalarını kapsayan triboloji disipliniyi ifade etmektedir. Triboloji bununla birlikte kimya, fizik, nanoteknoloji, malzeme bilimi, ile makine ve imalat mühendisliği gibi çeşitli alanları kapsayan çok disiplinli bir çalışma alanlarını da incelemektedir. Sürtünme, bir cismin başka bir yüzeyde hareket ederken karşılaştığı direnç olarak ifade edilebilir. Buna ek olarak, temas hâlindeki iki yüzey arasındaki görelî harekete karşı koyan bir kuvvet olarak da ifade edilebilir. Amontons yasasına göre sürtünme, yüzeyler arasında uygulanan normal kuvvetle orantılıdır ve bu durum yüzeylerin görünen temas alanından bağımsızdır. Bu geniş kavram, kayma ve yuvarlanma olmak üzere iki temel görelî hareket türünü kapsar. Sürtünme katsayısı, birbirine temas eden iki yüzey arasında oluşan sürtünme kuvvetinin, uygulanan normal kuvvete oranı olarak ifade edilmektedir. Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü, doğrudan sürtünme katsayısı ile belirlenir ve bu katsayı, hafif yüklü bir rulman yatağında yaklaşık 0.001 gibi çok düşük bir değeri iken, vakum ortamında kayan iki temiz metal yüzey için 10'un üzerine çıkabilir. Yaygın olarak kullanılan birçok malzeme yağlayıcı olmaksızın hava ortamında, sürtünme katsayısı genellikle 0,1 ile 1 arasında değişmektedir. Sıcaklık, hız, çevre koşulları ve parçanın yüzey durumu gibi değişkenler de sürtünme katsayısını etkileyen önemli faktörlerdir (Chirac matibe dionlar, 2025).

2.9.1. Aşınma mekanizmaları

Aşınma kavramı için, belirli bir yüzeyden malzeme uzaklaştırılması, bir yüzeyden diğerine malzeme transferi ve aynı yüzey içerisinde malzeme yer değiştirmesi gibi çeşitli tanımlar ortaya konmuştur. Aşınma, özellikle birbirine temas eden ve göreceli hareket eden yüzeylerden malzeme kaybı şeklinde tanımlanır. Bir katı yüzeyin bir ya da daha fazla maddeyle temas hâlinde hareket etmesi, genellikle aşınma olarak bilinen ilerleyici bir malzeme kaybına yol açar. Aşınma davranışının uygulamaya bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Bir aşınma problemini incelemenin ilk ve en önemli adımı, uygulamada söz konusu olan aşınma türünü anlamak ve aşınan parçaların kütlelerinde önemli azalmaya neden olan ana aşınma mekanizmalarını tanımlamaktır. Aşınma, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Mekanik aşınmaya ilişkin yedi farklı mekanizma tanımlanmıştır, ancak bunların tümü yalnızca üç tür yüzey-yüzey etkileşimi sonucu meydana gelir: kayma, sürtünme ve korozyon. Bu aşınma mekanizmaları ve bunlara ait temel özellikler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Chirac matibe dıonlar, 2025).



Şekil 2. 11. Aşınma kategorisi

Bir kaymalı aşınma deneyi sırasında, aşağıdaki temel unsurlar dikkatle değerlendirilmelidir:

- Deneyde kullanılacak hem aşındırıcı hem de aşınan malzemelerin türü ve özellikleri, aşınma davranışını doğrudan etkiler.
- Numunelerin boyutları ve şekli, temas alanı ve kuvvet dağılımı üzerinde önemli rol oynar.
- Temas basıncı ve uygulanan yük, aşınma miktarını ve mekanizmasını belirleyen en kritik parametrelerdendir.
- Kayma hızı, temas süresi ve sürtünme koşulları açısından aşınma performansını etkiler.
- Ortam koşulları (kuru, yağlamalı, aşındırıcı ortam vb.), sıcaklık, test süresi gibi deneysel koşulların tanımlanması gerekir.

Bu parametrelerin her biri, deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği ve gerçekçi yorumlanabilirliği açısından büyük önem taşır (Chirac Matıbe Dıonlar, 2025).

3. YÖNTEM

3.1. Matris ve Takviye Malzemeleri

Bu çalışmada MMK üretiminde matris malzemesi olarak Al7075 alaşım tozu kullanılmıştır. Al7075 iyi mekanik özellikler, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım/ağırlık oranından dolayı uzay, havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi ulaşım araçlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Imran and Khan, 2019). Al7075 alaşım tozu SKYGEN laboratuvar malzemeleri firmasından temin edilmiştir. Alaşım tozunun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de ve kimyasal bileşimi ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kompozit üretiminde ZrO₂ ve TiO₂ olmak üzere iki farklı nano parçacık kullanılmıştır. Nano parçacıklar NanoGrafı firmasından temin edilmiştir. Kullanılan TiO₂ 200 nm boyutlarında ve %99,5 saflıkta, ZrO₂ ise 30 nm boyutlarında ve %99,95 saflıktadır. Beyaz kristalin bir oksit olan ZrO₂, yüksek erime noktası ve yüksek yüzey gerilimi nedeniyle termal genleşmeyi ve erime akışkanlığını azaltmaktadır. ZrO₂, AMMK’lerde önemli bir takviye malzeme olup, özellikle düşük yoğunluklu, mükemmel aşınma direnci ve iyi mekanik ve yüzey özellikleri sağlayarak korozyona karşı yüksek direnç sunmaktadır (Prasanna Nagasai ve ark, 2021). TiO₂, kimyasal kararlılığı, üstün termal özellikleri, düşük maliyeti, yüksek aşınma direnci ve optik şeffaflığı nedeniyle sağlık sektörü, çevresel uygulamalar, cam ve boya sanayi gibi çeşitli alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir (Joshua ve ark., 2018; Wu ve ark., 2024). Kullanılan nano parçacıkların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3’te, kompozit üretiminde matris ve takviye oranları ise Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.1. Al7075 alaşımın mekanik ve fiziksel özellikleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Poison Oranı	Yoğunluk
228	103	71,7	152	0,33	2,81

Çizelge 3. 2. Al7075’in kimyasal bileşimi(Imran ve Khan, 2019)

Kompozisyon	Si	Zn	Ti	Fe	Cu	Cr	Mn	Mg	Diğer	Kalan
Oran	0,40	5,1–6,1	0,20	0,50	1,2–2,0	0,18–0,28	0,30	2,1–2,9	0,65	Al



Şekil 3.1. Kullanılan nano TiO_2 ve ZrO_2 tozları

Çizelge 3.3. Kullanılan nano parçacıkların fiziksel ve mekanik özellikleri (Pul, 2021)

Nano parçacıklar	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme dayanımı (MPa)	Erieme noktası ($^{\circ}\text{C}$)
ZrO_2	5,68	711	2823
TiO_2	4,23	680	1843

Çizelge 3.4. Kompozit üretiminde matris ve takviye oranları

Numune kodu	Al7075(%)	TiO_2 (%)	ZrO_2 (%)
A0	100	-	-
A3T	97	3	-
A3T1Z	96	3	1
A3T2Z	95	3	2
A3T3Z	94	3	3
A3Z	97	-	3
A1T3Z	96	1	3
A2T3Z	95	2	3

3.2. Nano Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Üretimi

Belirlenen toz ağırlık yüzdeleri hassas bir teraziyle doğru bir şekilde ölçülüp, mekanik alaşımlama süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan gezegen tipi top değirmeni ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemine başlamadan önce, tozlar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi 0,1 mg hassasiyetindeki Kern marka hassas terazi kullanılarak tartılmıştır.



Şekil 3.2. Matris ve takviye olarak kullanılan parçacıkların tartım işlemi

3.3. Mekanik Alaşımlama Cihazında Matris ve Takviye Parçacıklarının Karıştırılması

Tez kapsamında incelenen Al7075, Al7075/ZrO₂, Al7075/TiO₂ ve Al7075/TiO₂/ZrO₂ kompozit tozlarının karıştırılmasında, Batman Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne bağlı Laboratuvarda yer alan XQM-2 model yüksek enerjili bilyeli değirmen aracılığıyla, mekanik alaşımlama cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.3’de kullanılan ekipmanın iç ve dış kısımlarına ait görseller sunulmuştur.



Alaşımlama cihazı

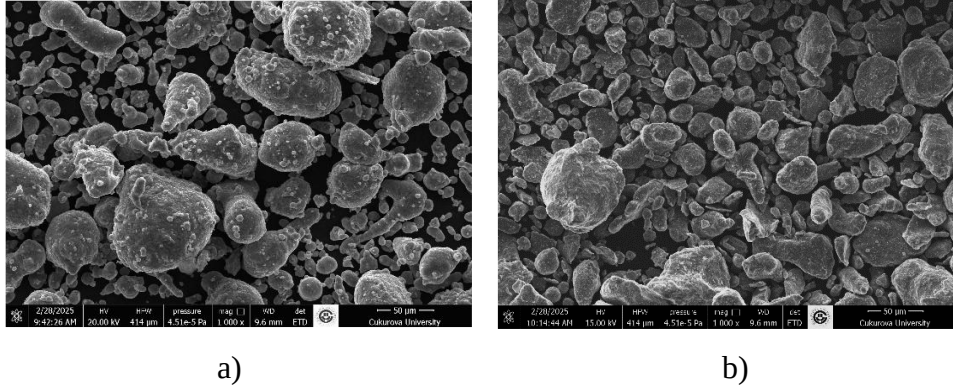


Bilye/toz karışımı

Şekil 3.3. Mekanik alaşımlama cihazı

8 farklı kompozit için Çizelge 3.4’te verilen Al7075, TiO₂ ve ZrO₂ parçacık oranları mekanik alaşımlama cihazında homojen karışımın sağlanması amacıyla 1 saat

süreyle karıştırılmıştır. İşlem süresince 10 mm çapında sertleştirilmiş çelik bilye, 10:1 bilye-toz ağırlık oranı ve 350 dev/dk dönüş hızı kullanılmıştır. Tozların dış atmosferle reaksiyona girmesini önlemek ve yapıda istenmeyen oksit fazlarının oluşumunu engellemek amacıyla mekanik alaşımlama işlemi sırasında argon gazı kullanılmıştır. Öğütme işlemi sırasında, değirmen içinde sıcaklık artışını önlemek amacıyla mekanik alaşımlama cihazı 20 dakika aralıklarla açılıp kapatılmıştır. Şekil 3.3'te mekanik alaşımlama cihazında takviyeli tozlar karıştırıldıktan sonra elde edilen toz karışımının SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.4a'da takviyesiz Al7075 alaşımların toz görüntüsü incelendiğinde parçacık boyutlarının büyük olduğu gözlenmektedir. Şekil 3.4b'de ise nano partikül takviyeli kompozitin SEM görüntüsü incelendiğinde parçacık boyutlarının Şekil 3.4a'ya kıyasla küçüldüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4. Karıştırma sonrası elde edilen tozların SEM görüntüsü: a) A0, b) A3T1Z

3.4. Tozların Sıkıştırılması İşlemi

Toz formunda mekanik alaşımlama cihazında karıştırılan numuneler, parça üretimi sırasında oluşabilecek gözenekliliği minimize etmek amacıyla, sıkıştırma olarak adlandırılan presleme işleminden geçirilmiştir. Mekanik alaşımlama cihazında karıştırılan tozlar 20 mm çapında çelik kalıp kullanılarak 300 MPa basınç altında hidrolik preste sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminde Balaban Makinede bulunan pres makinesi kullanılmıştır. Kullanılan hidrolik pres Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Presleme cihazı ve pres sonrası kalıptan çıkarılan sinterlenmemiş numune

3.5. Sinterleme işlemi

Tozlar sıkıştırılarak bulk (yığın) numune haline getirildikten sonra önceki benzer çalışmalarımız dikkate alınarak 650 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Belirlenen sinterleme sıcaklığına ulaşıldıktan sonra numuneler 1 saat boyunca yüksek sıcaklık fırınında bekletilmiş ve ardından soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işlemi için Batman Üniversitesi Petrokimya bölümünde bulunan 30 °C - 1500 °C sıcaklıklar arasında kullanılabilen Stuart marka fırın kullanılmıştır. Bu fırın istenilen sıcaklıkta sabitlenebilme özelliğine sahiptir. Aşağıda fırının iç ve dış kısımları ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen bazı numunelere ait fotoğraflar Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Sinterlemede kullanılan fırın

3.6. Parlatma ve Dağlama İşlemleri

Toz metalürjisiyle üretilen kompozitler, mikro yapı analizi için hazırlanmıştır. Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında, hazırlanan numunelerin yüzeyleri Şekil 3.7’de görüntüsü verilen PRESI Minitech 233 cihaz kullanılarak zımparalanmıştır. Bu zımparalama işlemi, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, grit numaralarına sahip SiC zımpara kağıtları kullanılarak su yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi sonrası numuneler su ile yıkanıp, ardından numune yüzeyleri alkol kullanılarak kurutulmuştur. Daha sonra keller solüsyonuyla numune yüzeyleri dağlanmıştır. Keller kimyasal bileşimi %1 HF, %1,5 HCl, %2,5 HNO₃ ve %95 H₂O’dan oluşmaktadır.



Şekil 3.7. Zımparalama cihazı

3.7. Optik Mikroskop

Mikroskobik yapıyı incelemek, mevcut fazları belirlemek ve tanelerin boyut ve şeklini analiz etmek amacıyla optik mikroskopi kullanılmıştır. Bu işlem, numunelerin zımparalanması, parlatılması ve keller çözeltisi içinde dağlanması sonrasında gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesi Batman Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünde bulunan Leica marka mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de kullanılan optik mikroskop görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Optik mikroskop görüntüsü

3.8. XRD Ölçümleri

Mekanik alaşımlama cihazında karıştırılan toz numunelerin XRD ölçümlerinin yapılması amacıyla Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Rigaku Miniflex 2 marka cihaz kullanılmıştır. Ölçümlerde $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızı ve $5-90^\circ$ tarama açısı aralığı kullanılmıştır. 30 mA akım ve 40kV gerilimi altında testler yapılmıştır. Analizlerin yapıldığı XRD cihazı Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. XRD cihazı

3.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Aşınma testi sonrası kompozit numunelerin aşınma bölgelerinin detaylı görüntülerini incelemek için, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında

(CÜMERLAB) bulunan Quanta 650 Field Emission SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Aşınmış yüzeylerin görüntülenmesinde kullanılan SEM cihazı(Cümerlab, n.d.)

3.10. Yoğunluk Ölçümü

Üretim sonrası, numunelerin deneysel yoğunlukları ölçülmüştür. Bunun için öncelikle, numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra numunelerin sinter sonrası çap ve yükseklikleri kumpas yardımıyla ölçülerek numunelerin hacimleri hesaplanmıştır. Hassas terazide tartılan numuneler hacimlerine bölünerek deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır. Kompozitlerin teorik yoğunluklarının hesaplanmasında Çizelge 3.5’te verilen elementlerin yoğunluk değerleri baz alınmıştır.

Teorik yoğunluk, karışım kurallarına göre hesaplanmış olup, Denklem 2’de verilmiştir.

$$\rho = \sum(f_i \times g_i) = f_{matris} \times \rho_{matris} + f_{parçacık} \times \rho_{parçacık} \quad (3.2)$$

f hacim fraksiyonunu, ρ ise kompozitteki her bir malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir.

Çizelge 3.5. Kompozitlerin üretiminde kullanılan alaşım ve bileşiklerin yoğunluk değerleri

Alaşım ve bileşikler	Yoğunluk (g/cm ³)
Al7075	2,81
TiO ₂	4,23
ZrO ₂	5,68

3.11. Sertlik Ölçümü

Parlatılmış ve dağlanmış numunelerin sertlik ölçümleri için, Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan AOB marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.11). Vickers sertlik ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla, numuneler cihaz tablasına yerleştirilmiş ve numuneye 0,3 kg kuvvet uygulanarak 10 saniye boyunca test edilmiştir. Doğru ve güvenilir bir sertlik değeri elde edebilmek için her numunenin beş farklı noktasından ölçüm alınmış, ardından bu ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak ortalama sertlik değeri belirlenmiştir.

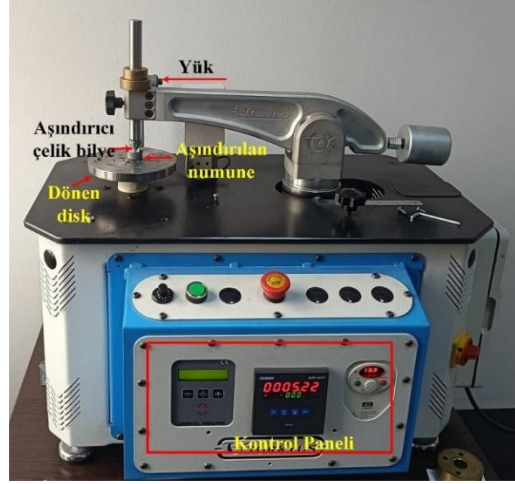


Şekil 3.11. Vickers Sertlik Cihazı

3.12. Aşınma Testi

Numunelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemek için pin on disk cihazında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test yöntemi, farklı kayma mesafeleri, temas basınçları ve kayma hızları altında çeşitli kayma sürtünme testlerinin analiz edilmesini sağlamaktadır. Deney düzeneği, sabit bir bilya ile dönen bir disk üzerine deney numunesinin sabitlenerek belirli bir yük uygulaması esasına dayanmaktadır. Test süresince, düşey kuvvetler test cihazı tarafından ölçülmekte ve bu veriler zamana bağlı sürtünme katsayısının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu sayede, numunenin sürtünme davranışı test süresince izlenebilmekte ve test sonrası aşınmış yüzeylerin görsel

incelemesiyle elde edilen aşınma karakteristikleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Tüm pin on disk testleri ASTM G99 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada test parametreleri olarak 2 farklı kuvvet (2 N ve 3 N), 2 farklı kayma mesafesi (100 m ve 200 m) 2 farklı hız (100 m/s, 200 m/s) uygulanarak testler gerçekleştirilmiştir. 3 mm bilya numunesi yarıçapı ve 5 mm aşınma izi yarıçapı olarak belirlenmiştir. Test düzeneği Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Pin on disk aşınma cihazı

3.13. Termal İletkenlik Testi

Kompozit malzemelerin farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini belirleyen en önemli faktörlerden biri de ısıl performanslarıdır. Bu amaçla nano parçacıklı Al matrisli kompozitlerin termal özellikleri incelenmiştir. Termal iletkenlik testleri Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan Hot Disk tps 500s cihazında 20 C sıcaklıkta 250 mW güç verilerek 10 sn boyunca uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan cihaz Şekil 3.13'te verilmiştir.

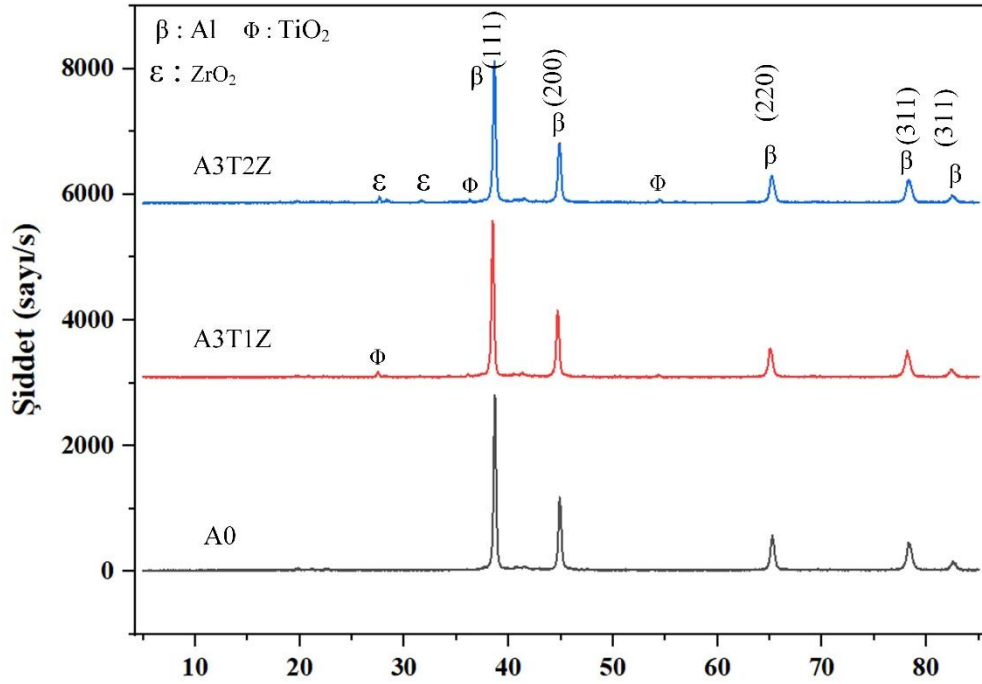


Şekil 3.13. Termal İletkenlik Ölçüm Cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. XRD Sonuçları

Şekil 4.1’de A0, A3T1Z ve A3T2Z’nin XRD ölçüm grafiği gösterilmiştir. XRD (X-ışını kırınımı) deseni, Cu-K tipi radyasyon kullanılarak elde edilmiştir. 2-theta aralığı 20° – 90° olarak belirlenmiştir. Takviye edilmemiş alüminyum alaşımı Al7075 matrislerinde alüminyuma ait bazı belirgin zirveler gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’de A3T1Z numunede TiO_2 ve ZrO_2 nanoparçacıklarıyla takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozit toplamda 5 ana Al7075 piki sergilemektedir. Grafikte, ayrıca TiO_2 ’e karşılık gelen piklerde tespit edilmiştir. A3T2Z kompozit numunede ise, TiO_2 ve ZrO_2 ’e karşılık gelen pikler belirlenmiştir.



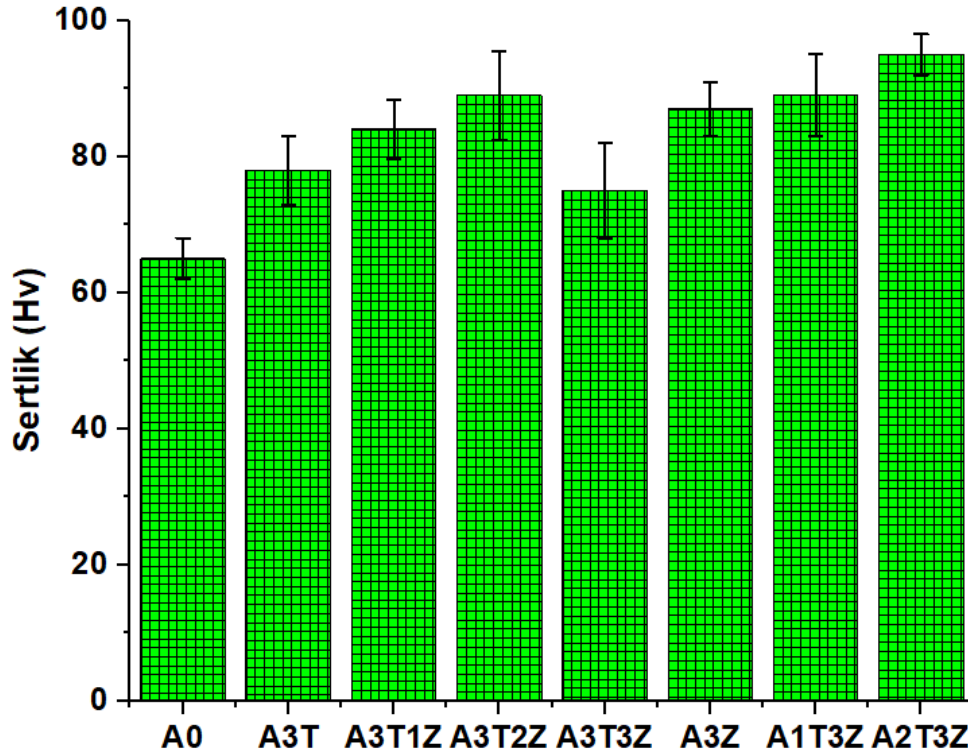
Şekil 4.1. Mekanik alaşımlama tekniği ile karıştırılan kompozit tozların XRD sonuçları

4.2. Sertlik Sonuçları

Şekil 4.2’de, Al7075 matriste TiO_2 ve ZrO_2 takviyelerinin mikro sertlik üzerindeki etkisi gösterilmektedir. A0 numune de baz Al7075 alaşımın sertliğinin 65 Hv olduğu görülmektedir. A3T numune de %3 TiO_2 takviyesiyle alaşımın sertliğinin 78 Hv’ye çıktığı

görülmektedir. Sert TiO_2 nano parçacıklarının katılmasıyla kompozitin sertliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Kompozit sertliğinde meydana gelen artış matris içine ilave edilen sert parçacıkların homojen dağılması ve tane incelmeye atfedilebilir. Benzer şekilde Joshua ve ark. Al7068 matrise %3 ile %9 arasında değişen oranlarda TiO_2 ilave ettiklerinde kompozitin sertliğinin arttığını belirlemişlerdir. %3 TiO_2 ilavesiyle kompozit sertlik değerinin 33 HVN'den 45 HVN'e çıktığını gözlemlemişlerdir. Kompozitlerin mikrosertliğindeki artışın başlıca nedenleri olarak takviye parçacıklarının matris içerisinde homojen dağılması ve TiO_2 'nin yüksek sertliği olarak belirtmişlerdir. (Joshua ve ark., 2018) Venugopal ve Karikalan Al6061 alaşımında farklı hacim oranlarında SiC ve TiO parçacıklarının matris sertliği üzerindeki etkisini araştırdıklarında, %2,5 SiC ve %2,5 TiO_2 takviyesiyle kompozit sertliğinin 40 brinell sertliğinden 45 brinell sertliğine yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Karıştırma döküm yöntemi sayesinde tane incelmeye sağlandığını ve matris ile takviye fazları arasında sağlam bir bağ oluşmasından ötürü sertliğin arttığını ifade etmişlerdir (Venugopal and Karikalan, 2021). A3T1Z numunesinde %3 TiO_2 'ye ilaveten %1 nano ZrO_2 ilave edildiğinde hibrit kompozitin sertliğinde yaklaşık %8'lik bir artış meydana gelmiştir. Nano parçacıkların matris içinde homojen dağılması ve mikroyapıda tane incelmeye sayesinde kompozitlerin sertliği artmaktadır. (Mirjavadi ve ark., 2017) Madhusudhan ve ark.'da döküm yöntemiyle ürettikleri Al7068 matrisli kompozitlerde ZrO_2 takviyesinin sertliği arttırdığını belirtmişlerdir. En yüksek sertliği %8 ZrO_2 takviyeli kompozitte 147,2 Hv olarak belirlemişlerdir. Takviye parçacıklarının düzgün dağılımının ve matris ile güçlü bir bağ kurmasının hem mekanik özellikleri geliştirdiğini hem de sertliği arttırdığını bildirmişlerdir (Madhusudhan ve ark., 2017). A3T2Z numunede ZrO_2 takviye parçacık oranının %2'ye çıkarılması hibrit kompozit sertliğini 89 Hv'e yükseltmiştir. %2 ZrO_2 takviye oranına kadar kompozitlerin sertliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Ağırlıkça nano takviye oranı artışı, hibrit kompozitlerin sertliğinin de artmasını sağlamıştır. Benzer durum Pandiyarajan ve ark. yaptığı çalışma ile de paralellik arz etmektedir (Pandiyarajan ve ark., 2022). Hibrit kompozitlerde dislokasyon hareketine karşı direncin artmasından dolayı hibrit kompozitler, tekli kompozit malzemelere göre daha yüksek sertliğe sahip olmuşlardır (Al-Gburi, 2022). A3T3Z numunede ZrO_2 oranının %3'e çıkarılmasıyla sertlik değerinde bir miktar düşüş yaşanmıştır. %3 TiO_2 ve %3 ZrO_2 nano parçacık ilavesiyle hibrit kompozitin sertlik ortalaması 75 Hv'e düşmüştür. %3 ZrO_2 ve %3 TiO_2 takviye oranında Al7075 matrisli kompozitin sertliğinin düşmesinin nedeni malzeme içinde nano parçacıkların uniform olmayan dağılımı ve topaklanmaya bağlı gözeneklilik

artışıdır. Padmavathi ve ark. Al alaşımda SiC ve TiO₂ takviyelerinin sertlik üzerindeki etkisini araştırdıklarında %2 nano TiO₂ takviye oranına kadar sertliğin arttığını belirlemişlerdir (Padmavathi ve ark., 2023). Ayrıca Ahamed ve ark. Al-6351 alaşımda %5 TiO₂ takviye oranında kompozitin sertliğinin 51,33 HRB'den 40,25 HRB'e düştüğünü belirlemişlerdir (Ahamad ve ark., 2020). A3Z numunesinde Al7075 alaşıma ağırlıkça %3 ZrO₂ nanoparçacık ilave edildiğinde kompozit sertliğinin 87 Hv'e yükseldiği belirlenmiştir. ZrO₂ seramik parçacıkların termal genleşme katsayısı, alüminyum alaşımına göre daha düşük olduğundan dolayı, sinter sırasında matris-parçacık arayüzünde büyük miktarda dislokasyonlar oluşmakta ve bu da matrisin sertliğini arttırmaktadır (Abdizadeh ve Baghchesara, 2013). ZrO₂ sert parçacıkları matris ara yüzeylerinde meydana getirdiği dislokasyon birikintileri, matrisin deformasyonunu kısıtlayarak plastik şekil değiştirmeye karşı direnç sağlamakta ve malzeme sertliğini geliştirmektedir (Şimşek ve ark., 2020). A1T3Z ve A2T3Z numunelerde artan TiO₂ takviyesiyle birlikte hibrit kompozitin sertliği 95 Hv değerine ulaşmıştır.

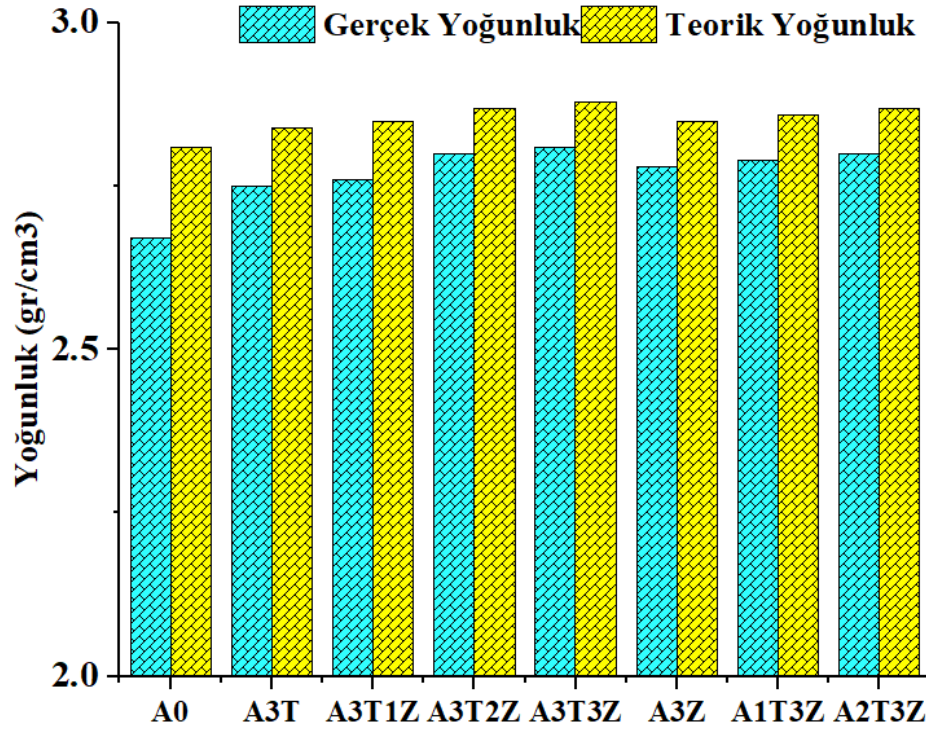


Şekil 4.2. Takviye tipi ve oranına bağlı baz alaşım ve kompozitlerin sertlik değişimleri

4.3. Yoğunluk Sonuçları

Malzeme özellikleri açısından yoğunluk, dayanım/ağırlık oranı ve malzemenin işlevsel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toz metalürjisi ile üretilen

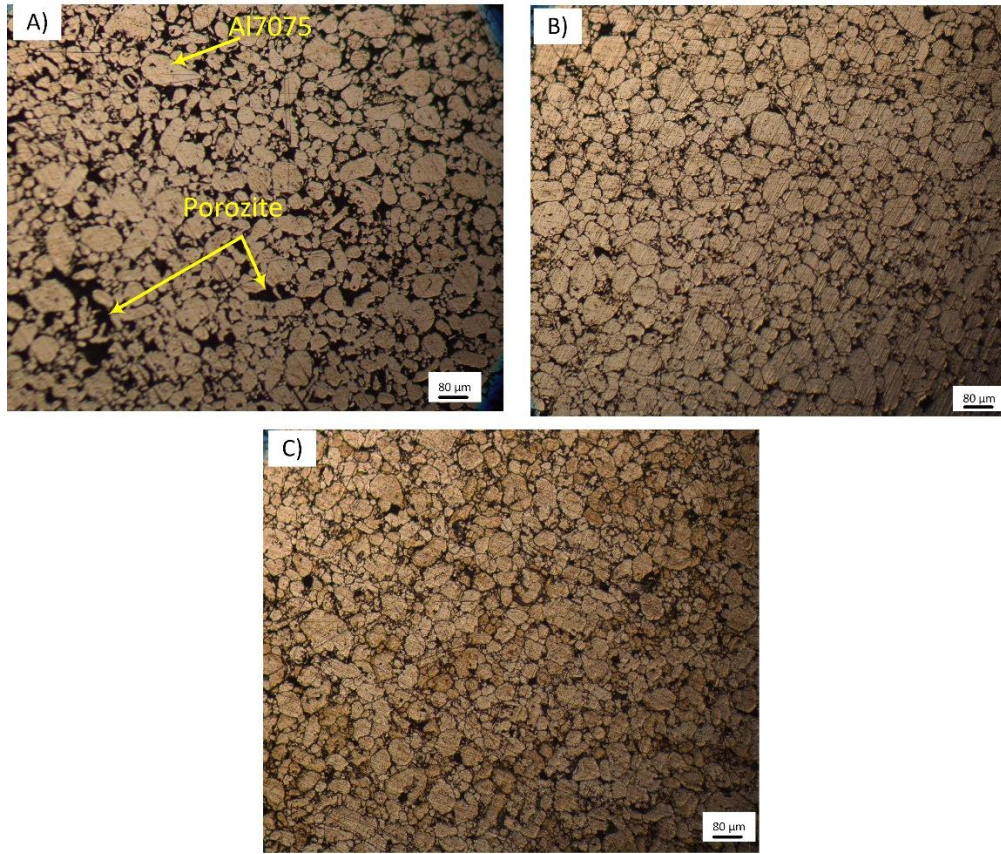
kompozitlerin yoğunluğu, uygulanan basınca, sinter sıcaklığına ve ilave edilen takviye parçacıklara bağlı olarak değişebilmektedir. Uygun bir sinterleme sıcaklığı, atomların difüzyonunu kolaylaştırarak gözenekliliğin azalmasına ve dolayısıyla yoğunluğun artmasına olanak sağlamaktadır. Sünek özellik gösteren matris içerisinde sert ve şekil değiştiremeyen parçacıkların bulunması ise malzemenin sıkıştırılabilirliğini azaltabilmektedir (Veeresh Kumar ve ark., 2010). Matris alaşımı olan Al7075, $2,81 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Nano takviye parçacıklarından ZrO_2 'nin yoğunluğu $5,68 \text{ g/cm}^3$ ve TiO_2 'nin yoğunluğu $4,23 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Şekil 4.3'te baz alaşım ve farklı takviye tipi ve takviye oranlarına sahip kompozitlerin gerçek yoğunluğu ve teorik yoğunlukları kıyaslanmıştır. Teorik yoğunluğun hesaplanmasında Eşitlik 2 kullanılmıştır. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere, baz alaşım Al7075'in teorik yoğunluğu $2,81 \text{ g/cm}^3$ iken deneysel yoğunluğu $2,67 \text{ g/cm}^3$ çıkmıştır. %3 TiO_2 ilavesiyle A3T kompozitin teorik yoğunluğu $2,84 \text{ g/cm}^3$ 'e çıkarken gerçek yoğunluğu ise $2,75 \text{ g/cm}^3$ 'e çıkmıştır. Kompozit yoğunluğundaki bu artış, TiO_2 parçacık yoğunluğunun Al7075 alaşımından daha yüksek olması ile açıklanabilir. Roshan Jaisingh'in yaptığı çalışmada da %5 TiO_2 takviye oranında gerçek yoğunluğun $2,78 \text{ g/cm}^3$ 'e yükseldiğini ancak takviye oranının %10'a çıkarılmasıyla yoğunlukta bir miktar düşüş oluştuğunu belirlemişlerdir (Xavier and Jaisingh, 2021). A3T1Z numunede ZrO_2 ilave edilmesiyle yoğunluktaki artış devam etmiştir. Tüm yoğunluk ölçümlerinde deneysel ve teorik yoğunluklardaki gözeneklilik oranı yaklaşık %2 ile %5 arasında değişmiştir. %3 TiO_2 ve %3 ZrO_2 ilavesiyle deneysel yoğunluk yaklaşık %5 artışla $2,67 \text{ g/cm}^3$ 'den $2,81 \text{ g/cm}^3$ 'e ulaşmıştır.



Şekil 4.3. Baz alaşım ve kompozitlerin gerçek ve teorik yoğunluk karşılaştırması

4.3. Mikroyapısal karakterizasyon

Şekil 4.4'te Al7075 alaşımının ve farklı ağırlık oranlarında TiO_2 ve ZrO_2 içeren Al7075 matrisli kompozitlerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4a'da baz alaşımın mikroyapısı incelendiğinde tane boyutlarının büyük olduğu ve porozitenin takviyeli kompozitlere kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Mikroyapıda görülen büyük siyah kısımlar gözenekleri işaret etmektedir. Şekil 4.4b ve 4.4c'de ise TiO_2 ve ZrO_2 takviye malzemelerinin matris içinde kümelenme olmaksızın düzgün bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Bu durum, malzemenin yoğunluğunun artmasını sağlamıştır. TiO_2 ve ZrO_2 parçacıklarının tane sınırı boşluklarına hapsolması ve tane küçülmesi sağlaması sertliğin artmasını da sağlamıştır.

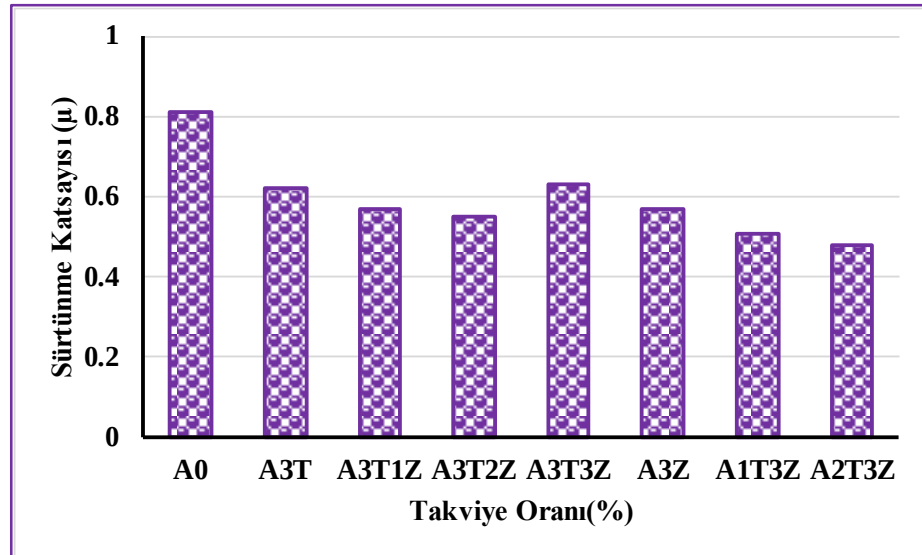


Şekil 4.4. A0, A3T ve A3Z numunelerin optik mikroskop görüntüsü

4.4. Aşınma Sonuçları

Şekil 4.5'te takviye oranına bağlı olarak Al7075 ve parçacık takviyeli hibrit kompozitlerin sürtünme katsayıları gösterilmiştir. Takviye oranına bağlı yapılan tüm deneylerde sabit 3 N yük 200 devir/dakika kayma hızı kullanılmıştır. Al7075 baz alaşımın sürtünme katsayısının 0,81 olduğu belirlenmiştir. Takviyesiz Al7075 alaşımı, en yüksek sürtünme katsayısı değerine sahiptir. A3T numunede %3 nano TiO_2 parçacık ilavesiyle kompozitin sürtünme katsayısının 0,62'e düştüğü görülmüştür. Sürtünme katsayı değerinde yaklaşık %23'lük bir düşüş görülmüştür. TiO_2 'nin yüksek sertliği sayesinde matris ile karşı yüzey arasındaki temas kuvveti azalmış ve sürtünme katsayısı düşmüştür. TiO_2 ilavesinin alaşımın sürtünme katsayısını düşürmede etkili olduğu gözlenmiştir. Paulraj ve ark. %0,5 ve %1 TiO_2 ilavesiyle A356 matrisli kompozitlerin artan TiO_2 takviye oranıyla sürtünme katsayısı değerinin düştüğünü belirlemişlerdir (Paulraj ve ark., 2021). Benzer şekilde Ramesh ve ark.'da Al6061 matrisli kompozitlerde TiO_2 ilavesinin sürtünme katsayısı düşürdüğünü belirlemişlerdir. Bunun nedenini, azalan hacimsel aşınma kayıp ve kompozitlerin artan sertliği ile ilişkilendirmişlerdir (Ramesh ve ark.,

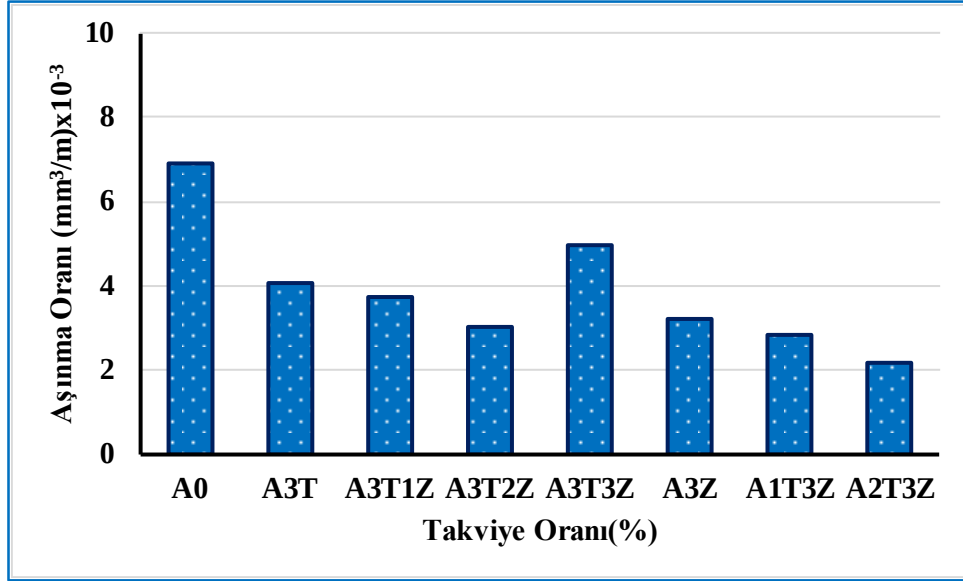
2005). ZrO_2 ilavesiyle sürtünme katsayısı değerindeki düşüş devam etmiştir. Bununla birlikte artan ZrO_2 nano parçacık takviye oranıyla da sürtünme katsayısı değerinin düşmeye devam ettiği belirlenmiştir. Yapıda artan ZrO_2 parçacıkların yüksek sertliği ve yüzeyde yağlayıcı bir katman oluşturması matris tabakasının daha az aşınmasını sağlayarak sürtünme katsayısı değerinin düşmesine katkı sunmaktadır. Elwahed ve ark. titanyum matrisli kompozitte artan ZrO_2 içeriğinin sürtünme katsayısı değerini düşürmede iyi bir performans sergilediğini belirtmişlerdir. %5 ZrO_2 ilavesiyle 10 N yük altında sürtünme katsayısı değerinin yaklaşık 0,78’den 0,74’e düştüğünü belirlemişlerdir. Kayma sırasında, ZrO_2 parçacıklarının Ti matrisinden yüzeye taşınarak temas yüzeyinde malzemenin daha az aşınmasını sağlayarak sürtünme katsayısı değerini azalttığını belirtmişlerdir (Abd-Elwahed ve ark., 2020). A3T3Z numunesinde takviye oranının %6’a çıkmasıyla sürtünme katsayısı değeri bir miktar yükselmiştir. Nano parçacıkların homojen dağılmaması ve topaklanmanın etkisiyle sertliğin düşmesinden dolayı malzeme yüzeyinin aşınma sırasında daha fazla deforme olması sürtünme katsayısı değerinin yükselmesine neden olmuştur. A3Z numunesinde %3 ZrO_2 takviyesiyle sürtünme katsayısı değerinin 0,57’e düştüğü belirlenmiştir. Aynı oranda ilave edilen TiO_2 ile karşılaştırıldığında ZrO_2 takviyesinin sürtünme katsayısı değerinin düşürülmesinde daha etkin olduğu anlaşılmıştır. A1T3Z ve A2T3Z numunelerinde artan TiO_2 takviyesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerinin 0,48’e kadar düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 4. 5. Takviye oranlarına bağlı olarak alaşımın ve kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinin değişimi

Şekil 4.6’da takviye oranına bağlı 200 devir ve 3 N yük altında aşınma oranlarının değişimi sunulmuştur. Takviyesiz Al7075 alaşımının aşınma oranının $6,90 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ olduğu belirlenmiştir. Matris malzemenin kompozit malzeme kıyasla daha düşük sertliğe sahip olması nedeniyle daha yoğun plastik deformasyona ve malzeme kaybına uğramakta, bu durum da aşınma oranının daha yüksek çıkmasıyla sonuçlanmaktadır. A3T numunede %3 TiO_2 takviyesiyle kompozitin aşınma oranının $4,07 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’e düştüğü görülmüştür. Sert seramik fazın matris içindeki varlığı yüksek sertlik sağlayarak aşınma direncini geliştirmektedir. Ahamed ve ark. Al matriste Al_2O_3 ve TiO_2 parçacıklarının aşınma oranı üzerindeki etkisini incelediklerinde Al_2O_3 ve TiO_2 parçacıklarının aşınma oranını düşürmede etkin olduğunu belirlemişlerdir (Ahamad ve ark., 2021). A3T1Z numunede yapıya %1 ZrO_2 nano parçacık ilavesiyle hibrit kompozitin aşınma oranının $4,07 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’den $3,73 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’e düştüğü görülmüştür. Hem TiO_2 hem ZrO_2 ’nin matris yapıda bulunmasından ötürü matrisin sertliği artmakta ve malzemenin plastik deformasyona karşı direnci gelişmektedir. Bundan ötürü de aşınma oranında düşüş gözlenmektedir. Muralidharan ve ark. %3 Al6061 matrisine %3 oranında ZrO_2 ilavesiyle aşınma oranının yaklaşık $0,7 \text{ mm}^3/\text{dak.}$ ’dan $0,4 \text{ mm}^3/\text{dak.}$ ’ya düştüğünü belirtmişlerdir. Artan ZrO_2 ilavesiyle bu oranın daha da düştüğünü gözlemlemişlerdir. ZrO_2 parçacıklarının alüminyum matris içerisine ilave edilmesinin, alaşımın rijitliğini ve sertliğini önemli ölçüde arttırdığını ve bu artışın, özellikle plastik deformasyon ve yüzey aşınmasına karşı sert seramik takviye fazlarının sağladığı yüksek direnç nedeniyle, aşınma sırasında malzeme uzaklaştırma oranında belirgin bir azalmaya yol açtığını vurgulamışlardır (Muralidharan ve ark., 2023). A3T3Z numunede TiO_2 ’ye ilaveten %3 ZrO_2 takviye oranında, kompozitin aşınma oranı diğer kompozitlere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Nano parçacıkların matris içinde uniform dağılmaması, porozite ve matrisle zayıf bağlanma nedeniyle sertliğin bir miktar düşmesi aşınma oranındaki artışın nedenleri olarak sıralanabilir. A3Z numunesinde yapıda sadece %3 ZrO_2 ilave edildiğinde %3 TiO_2 ’ye kıyasla aşınma oranının daha düşük olduğu gözlenmiştir. ZrO_2 parçacık sertliğinin TiO_2 parçacıklara kıyasla daha yüksek olması kompozitin aşınma performansını daha yüksek kılmaktadır. A1T3Z ve A2T3Z numune de artan TiO_2 oranının aşınma kaybını daha fazla düşürdüğü belirlenmiştir. %2 TiO_2 ilavesiyle aşınma oranının $2,15 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’e düştüğü belirlenmiştir. Artan TiO_2 oranıyla birlikte matriste gömülü olan seramik parçacıkların pinle olan temas yüzeyini düşürerek plastik deformasyonu engellemesi sayesinde aşınma oranının düşmesi sağlanmıştır (Paulraj ve ark., 2021). Benzer şekilde Elangoa ve Raghunath LM25Al alaşımında artan TiO_2 parçacık

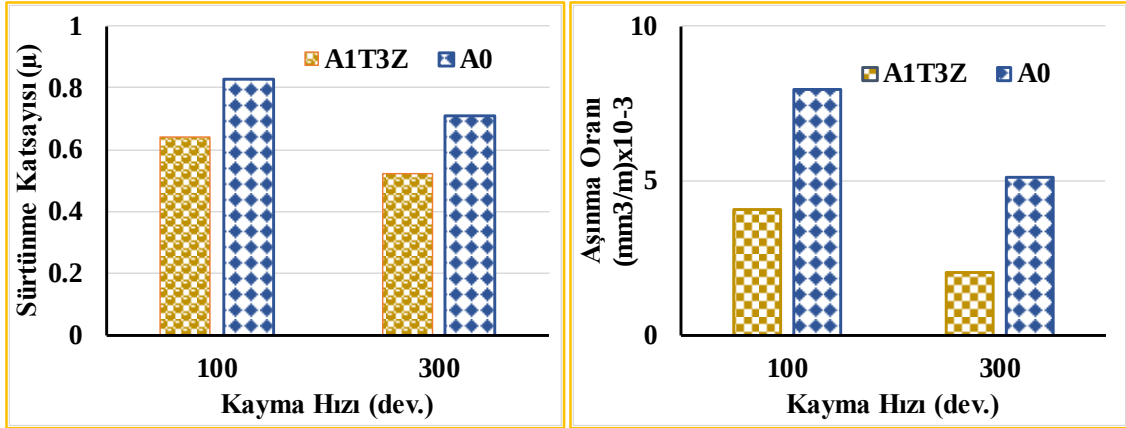
takviyesinin aşınma oranını düşürdüğünü ve bunun nedenini TiO_2 parçacıklarının doğal yağlayıcı özelliğine atfetmişlerdir (Elango and Raghunath, 2013).



Şekil 4.6. Takviye oranlarına bağlı olarak alaşımın ve kompozitlerin aşınma oranı değişimi

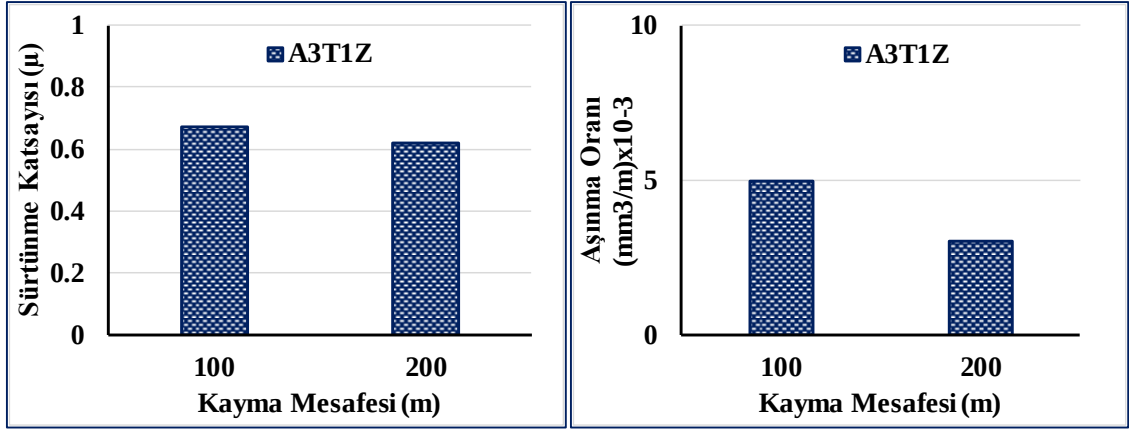
Şekil 4.7’de 100 devir ve 300 devir hızda ve sabit 3 N yükte A0 ve A1T3Z numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının değişimi gösterilmektedir. A0 baz alaşımın 100 devirdeki sürtünme katsayısı değerinin 0,83 olduğu, dönme devrinin 300 devir/dakika’ya çıkarılmasıyla birlikte sürtünme katsayısı değerinin 0,71’e düştüğü belirlenmiştir. Benzer şekilde A1T3Z numunede de 100 ve 300 devir hızda sürtünme katsayısı değerlerinin sırasıyla 0,64 ve 0,52 olduğu belirlenmiştir. Aşınma oranlarına bakıldığında ise 100 devir kayma hızında A1T3Z numunesinin aşınma oranı $4,07 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ iken devrin 300’e çıkarılmasıyla bu oran $2,0074 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’e düşmüştür. Kayma hızının artmasıyla birlikte gözlemlenen sürtünme katsayısı ve aşınma oranındaki azalma eğilimi, artan ara yüzey sıcaklıklarında alüminyum alaşımının oksidasyona uğrayarak yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturmasıyla temas yüzeyleri arasında doğrudan pin/kompozit temasını azaltarak, plastik deformasyon ve malzeme kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır (Rao ve Das, 2011; Radhika ve ark., 2012). Ayrıca hafif aşınma rejimine geçiş ve tribo yüzey oluşumu da aşınma oranının azalmasının nedenleri arasında sıralanabilir. Basavarajappa ve ark. parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerde kayma hızının 1,53’ten 3,06 m/s’e çıkarılmasıyla aşınma hacminin $1,08 \text{ mm}^3$ ’ten $0,82 \text{ mm}^3$ ’e düştüğünü bildirmişlerdir. Kayma hızının artmasıyla birlikte aşınma oranındaki azalmayı, pim ile karşı yüzey arasında koruyucu bir karışım tabaka oluşumuna

atfetmişlerdir (Basavarajappa ve ark., 2007). Ahmad ve ark.'da TiO₂ takviyeli Al 7075 matrisli kompozitlerde hız artışının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerini önce arttırdığını ve belirli bir hızdan sonra ise düşürme trendine girdiğini belirlemişlerdir. Yüksek kayma hızlarında, tribo-çiftlerin birbirleri üzerinde kayması nedeniyle yapışma-kayma etkisi azaldığını ve bu durumun sürtünme katsayısı değerinde düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir (Ahmad ve ark., 2024).



Şekil 4.7. Kayma hızına bağlı sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değişimi

Şekil 4.7’de 200 devir sabit hızda ve sabit 2 N yükte A3T1Z numunesinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının değişimi gösterilmektedir. Artan kayma mesafesiyle sürtünme katsayısı değerinin 0,67’den 0,62 ’e düştüğü gözlenmiştir. Ramesh ve ark.’da TiO₂ takviyeli Al kompozitte çalışmamızla uyumlu olarak artan kayma mesafesiyle aşınma katsayısının düştüğünü belirlemişlerdir (Ramesh ve ark., 2005). Kayma mesafesinin artmasıyla A3T1Z numunesinin aşınma oranının 4,95 mm³/m×10⁻³’ten 3,01 mm³/m×10⁻³’e düştüğü belirlenmiştir. Kayma mesafesinin artmasıyla pinin kompozit yüzeyine alışması ve matris içindeki sert parçacıkların zamanla yüzeye çıkarak malzemenin pinle olan temasını azaltması aşınma oranının düşmesini sağlamıştır. Benzer çalışmalarda da, artan kayma mesafesiyle birlikte aşınma oranında azalma gözlemlendiği bildirilmiştir (Baskaran ve ark., 2014; Mishra ve Srivastava, 2017; Xavier ve Jaisingh, 2021).

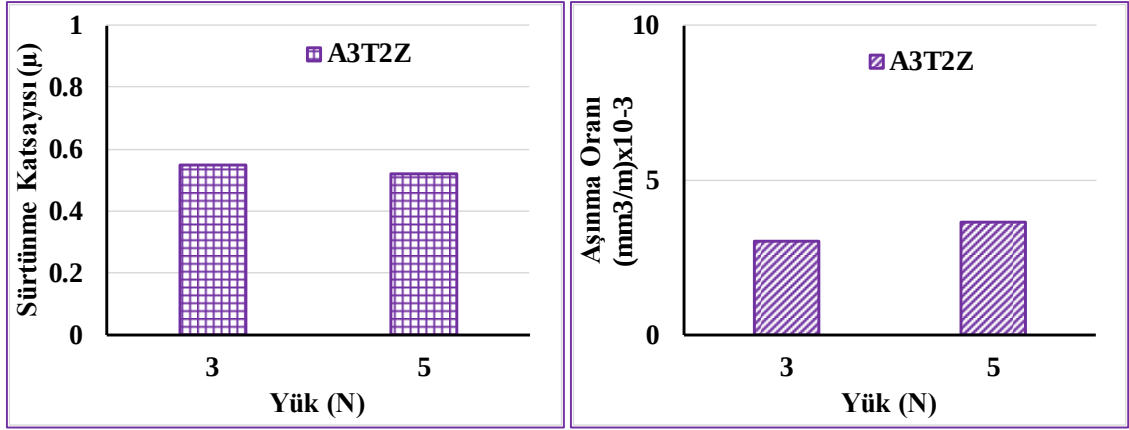


Şekil 4.8. Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değişimi

Şekil 4.9’da sabit 200 devirde A3T2Z numunesinin artan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değişimleri verilmiştir. 3 N yük uygulanan testlerde kompozitin sürtünme katsayısı değeri 0,55 olarak tespit edilmiş, yükün 5 N’a çıkarılmasıyla sürtünme katsayısı 0,52’ye düşmüştür. Artan yükle birlikte pin ve malzemenin temas bölgesindeki sıcaklık artışı sayesinde malzemenin yumuşamasından dolayı sürtünme katsayısı değerinde düşüş meydana gelmektedir (Murugabalaji ve ark., 2024). Numunelerin aşınma oranı Archard denklemi (1) ile ilişkilidir. Bu denkleme göre aşınma oranı ‘Q’ (mm³/km), numunenin sertliği ‘H’ (kg/mm²) ‘ve ‘K’ sabit aşınma katsayısı ‘W’ ise birim mesafe başına aşınan malzeme hacmi ile ifade edilir. Archard’ın denklemine göre, aşınma oranı uygulanan yükle orantılıdır. Ayrıca bu teori, öngörüldüğü üzere sertlik ile aşınma direncinin doğru orantılı olduğunu ifade etmektedir (Gajakosh ve ark., 2023)

$$Q = K \frac{W}{H} \quad (4.1)$$

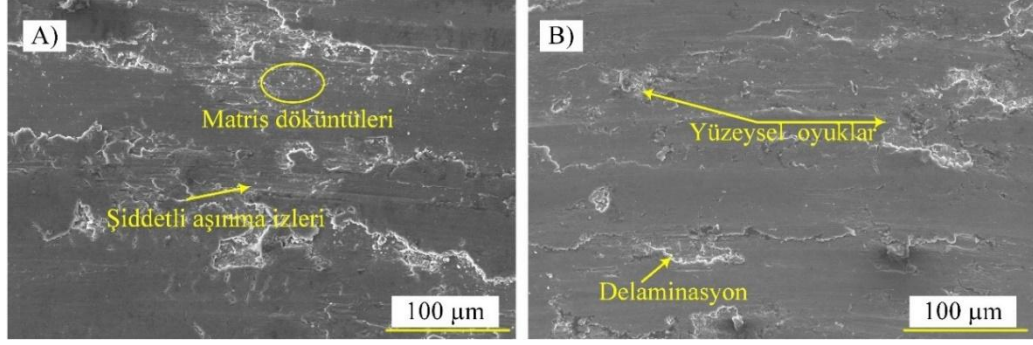
3 N yükte A3T2Z numunenin aşınma oranı 3,015 mm³/m iken yükün 5 N’a çıkarılmasıyla 3,62 mm³/m’e yükselmiştir. Yük artışının aşınma kaybını artırdığı görülmektedir. Artan yükle birlikte ısı artışı, matris ve takviye arasındaki bağı zayıflatır ve kompozitin de yumuşamasına neden olur. Böylece malzemedan parça kopuşları hızlanarak aşınma oranını yükseltir (Ravikumar ve ark., 2023). Artan yükle birlikte aşınma oranının arttığı yapılan benzer çalışmalarla da doğrulanmaktadır (Venkataraman and Sundararajan, 2000; Sardar ve ark., 2018; Yang ve ark., 2022).



Şekil 4.9. Yük artışının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerindeki etkisi

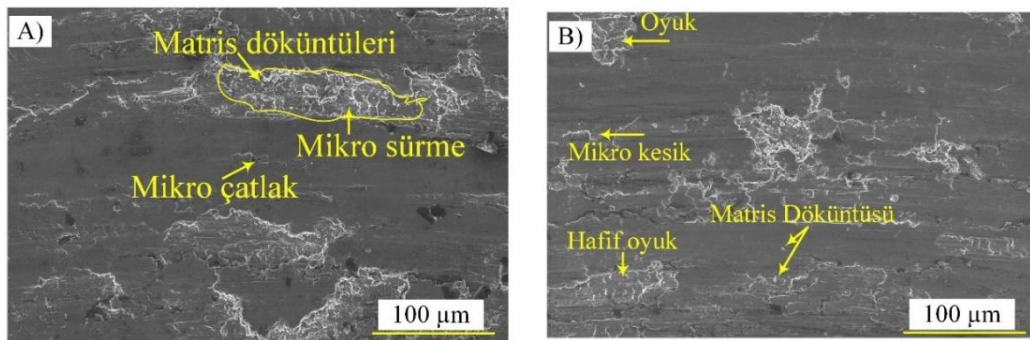
4.5. Aşınmış Yüzey Morfolojisi

Şekil 4.10'da 3 N yük ve 200 devirde A0 ve A1T3Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.10a'da aşınma mekanizmasında belirgin delaminasyonlar, adhezyon aşınması ve şiddetli deformasyon izleri gözlenmektedir. Pul şeklindeki matris döküntülerinin varlığı görülmektedir. Oyukların derin ve aşınma izlerinin belirgin olduğu görülmektedir. Şekil 4.10b'de A1T3Z numunesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde, matris yapıdaki sert nano parçacıkların aşınma direncini arttırdığı ve yüzeysel hasarın takviyesiz Al7075'e kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Matrise ilave edilen takviye parçacıklarının etkisiyle yüzeydeki çukur oluşumlarının daha sığ olduğu, matris deformasyonunun daha az olduğu gözlenmiştir. A1T3Z numunesindeki sert parçacıkların karşı yüzey ile matris arasında koruyucu bir bariyer görevi görerek malzeme kaybının düşürülmesinde başarılı olduğu belirlenmiştir. Böylece matris döküntüleri daha az ve oyuk oluşumları daha yüzeysel kalmıştır. Benzer bir durum Kumar ve ark. yaptığı çalışmada da gözlenmiştir. Sert seramik parçacık ilavesiyle Al7075 alaşımının aşınma direncinin geliştiğini, yüzey deformasyonlarının azaldığını ve malzeme kaybının düştüğünü belirlemişlerdir (Kumar ve ark., 2012).



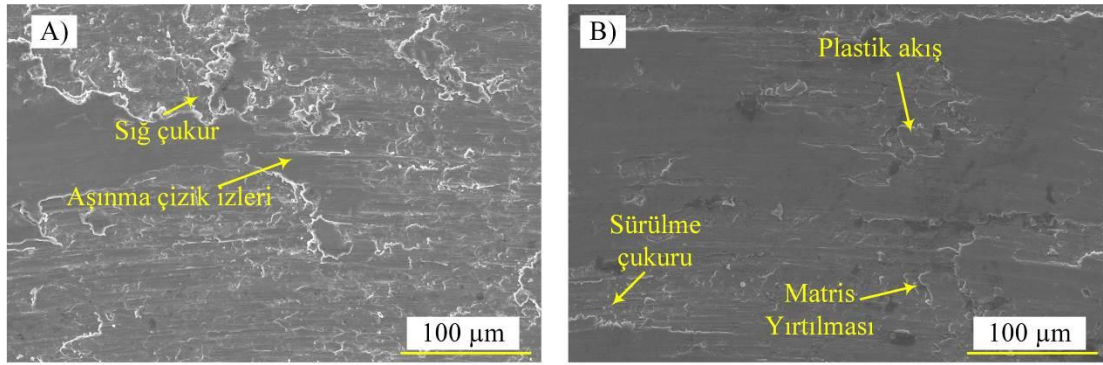
Şekil 4.10. A0 ve A1T3Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) A0, B) A1T3Z

Şekil 4.11’de A1T3Z’nin devir hızına bağlı olarak 3 N yükte aşınmış yüzey morfolojileri verilmiştir. Şekil 4.11a’da aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde 100 devirde gerçekleştirilen aşınma testinde A1T3Z numunenin matris döküntülerinin fazla olduğu ve hasar görmüş bölgelerin daha yaygın olduğu gözlenmektedir. Matris yüzeyindeki oyukların daha derin ve çatlak oluşumunun daha sık olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.11b’de ise devir sayısının 300’e çıkarılmasıyla, matris deformasyonunun daha yüzeysel bir forma döndüğü görülmektedir. Matris yüzeyinden kopuşların ve plastik deformasyonun daha az olduğu anlaşılmaktadır. Yüzeyde yalnızca hafif kazıma izleri ve küçük çukurlar gözlenmiştir. Devir sayısının artırılmasıyla aşınma şiddetinin belirgin şekilde azaldığını ortaya çıkmıştır. Kayma hızı arttıkça aşınma kaybındaki azalma eğilimi, pin ve malzeme yüzeyi arasındaki oksidasyon tabakasının oluşumundan kaynaklanmaktadır. Devrin artmasıyla, yüzey sıcaklığındaki artış sayesinde yüzeyde oluşan metal oksit tabakası, aşınma direncinin gelişmesinde önemli bir faktördür. (Deuis ve ark., 1997; Alipour ve ark., 2023) Yapılan benzer bir çalışmada da farklı takviye parçacıklı Al7075 matrisli kompozitlerde artan kayma hızının kütle kaybını ve aşınma hacmini düşürdüğünü belirlemişlerdir (Tile ve Thomas, 2024).



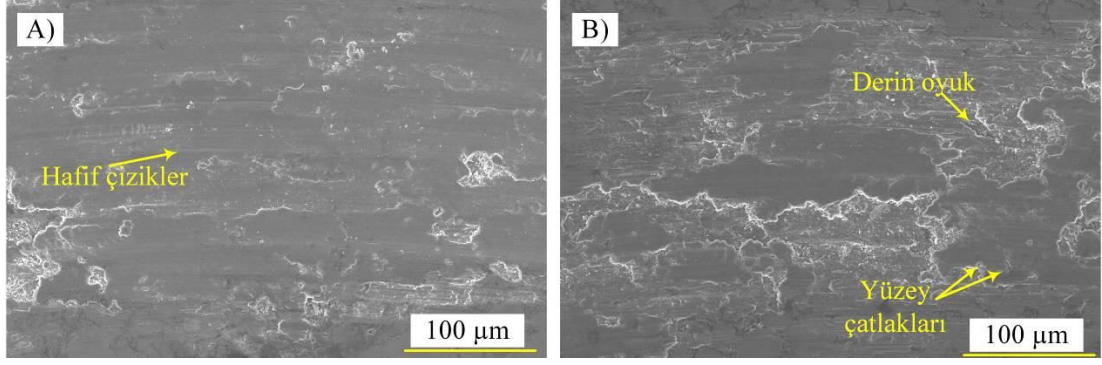
Şekil 4.11. A1T3Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) 100 devir, B) 300 devir

Şekil 4.12’de A3T1Z numunesinin kayma mesafesine bağlı olarak 100 m ve 200 m kayma mesafelerinde ve sabit 2 N yükte aşınmış yüzey morfolojisi görülmektedir. 100 m kayma mesafesinde kaymanın başlangıç dönemlerinde metalik temasın fazla olması nedeniyle aşınma miktarının fazla olduğu gözlenmektedir. Ancak kaymanın devam etmesiyle Şekil 4.12B’de oluşan aşınma kalıntıları malzeme ara yüzeyinde sıkışarak mekanik olarak karışmış katman oluşumuna neden olmaktadır. Böylece karşı yüzeyin aşındırıcı metalik temasının azalmasıyla birlikte aşınma miktarında düşüş gözlenmiştir. Bununla birlikte matris içine gömülü olan nano sert parçacıklarında yüzeye çıkması çelik pin ile olan teması azaltarak aşınma miktarının azalmasını sağlamaktadır. Ancak aşınma mesafesinin uzun sürelerle çıkarılması, bu döngüyü tersine çevirebilir. Bunun nedeni de kalınlaşan gevşek tribo katmanlarının malzemeden kopmasıyla açıklanabilir (Shinde ve Sahoo, 2022).



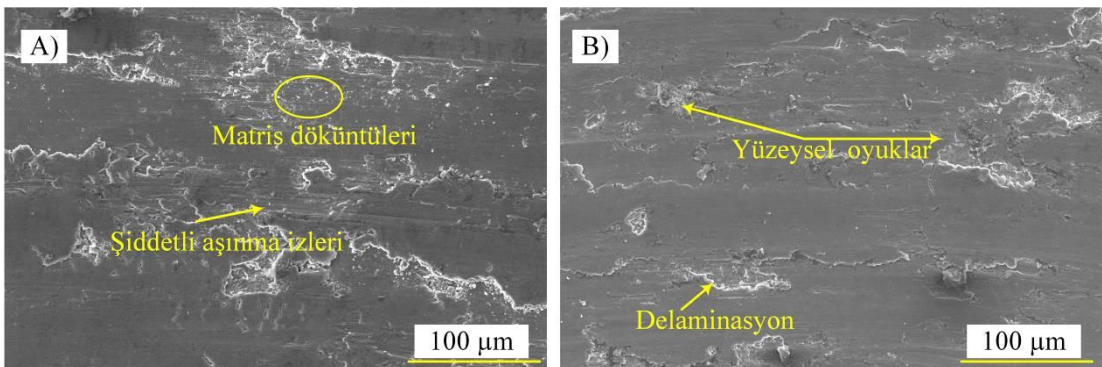
Şekil 4.12. A3T1Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) 100 m, B) 200 m

Şekil 4.13’te A3T2Z numunenin 3 N ve 5 N yük altında 200 devir kayma hızında aşınma yüzey morfolojileri gösterilmiştir. Düşük yüklerde aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde hafif aşınma izleri görülmektedir. Plastik deformasyonların ve yüzey hasarlarının belirgin bir karakter taşımadığı görülmektedir. Yük artışıyla birlikte aşınmış yüzey morfolojisinde hafif çizikler yerini belirgin oyuklara bırakmıştır. 5 N yükte malzeme yüzeyinde derin kraterler gözlenmiştir. Artan yüklerle birlikte matris malzemeden kopuşların arttığı, mikro kesik ve çatlak oluşumlarının hızlandığı gözlenmiştir. Rakshath ve ark.’da yaptıkları çalışmada oksit takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerde artan yüklerle birlikte matris yüzeyinde derin çukurların oluştuğunu ve mikro oyukların fazlaştığını belirtmişlerdir (Rakshath ve ark., 2020).



Şekil 4.13. A3T1Z numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) 3 N, B) 5 N

Şekil 4.14'te takviye etkisine bağlı olarak 3 N yükte gerçekleştirilen aşınma testlerinde kompozit malzemelerin aşınmış yüzey görüntüleri karşılaştırılmıştır. Takviyesiz baz Al7075 alaşımında kompozit yüzeyinde şiddetlik aşınma izlerinin aşınma doğrultuna paralel şekilde ilerlediği görülmektedir. Sürtünme süresince düşük sertliğe sahip olan A0 numune derin aşınma izleri ve plastik deformasyonlar sergilemektedir. Çelik pine karşı yumuşak matris tabakasının direnç gösteremediği anlaşılmaktadır. Şekil 4.13B'Şekilde ise ZrO_2 ve TiO_2 takviye parçacıklarının matrise dahil olmasıyla aşındırıcı karşı yüzey ile matris arasında bariyer görevi görerek matris yüzeyinin daha az aşınmasını sağladığı gözlenmiştir. Yumuşak matris içindeki nano takviyeler sayesinde nanokompozitin yük taşıma kapasitesi ve sertliği artmakta ve çelik pinin kompozit yüzeye nüfuziyeti azalmaktadır. Böylece matris yüzeyindeki derin çukur oluşumları yerini yüzeysel oyuklara bırakmıştır. Zhang ve ark.'da benzer şekilde ZrO_2 takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerde ZrO_2 ilavesiye kompozitin aşınma direncinin geliştiğini ve matris döküntülerinin ve malzeme kaybının azaldığını SEM analizi ile gözlemlemişlerdir (Zhang ve ark., 2023).



Şekil 4.14. Takviyesiz ve takviyeli numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri: A) A0, B) A1T3Z

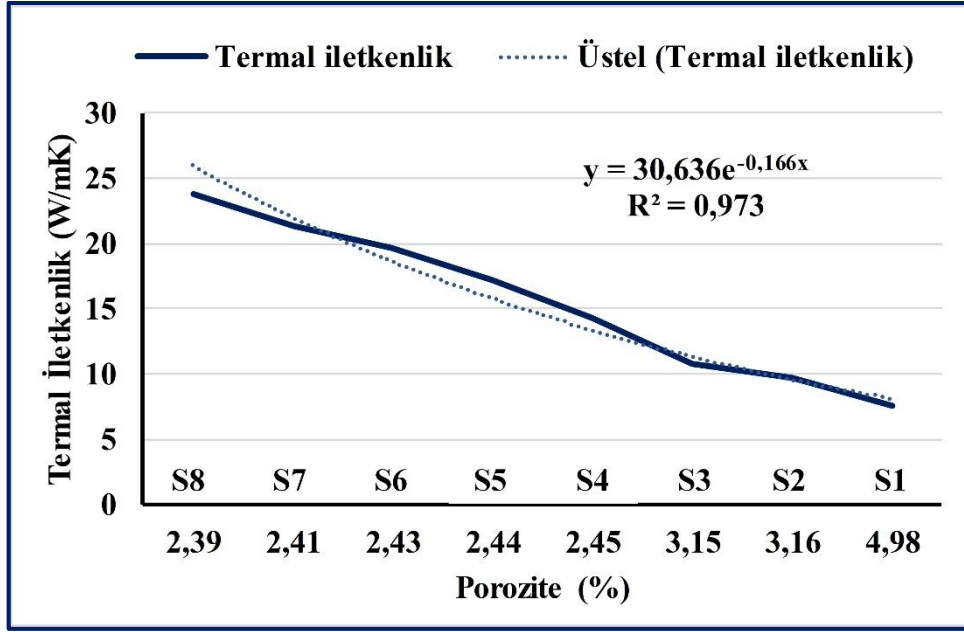
4.6. Termal İletkenlik Sonuçları

Şekil 4.15'te baz alaşım ve nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik değişimleri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, test edilen kompozit numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin 7,52 W/m·K ile 23,81 W/m·K arasında değiştiği, porozite oranlarının ise %2,39 ile %4,98 arasında seyrettiği belirlenmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde, en düşük ısı iletkenliğinin saf Al7075 matrisli kompozit malzemede gözlemlendiği, buna karşılık en yüksek ısı iletkenliğinin ise A2T3Z numunede elde edildiği görülmüştür.

Al7075 matrisli kompozit malzemeye eklenen TiO₂ ve ZrO₂ partiküllerinin oranı arttıkça, yapının iç gözeneklilik oranının azaldığı ve buna bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinin anlamlı şekilde yükseldiği tespit edilmiştir. Gözenekliliğin azalması, malzeme içerisindeki durgun hava hacminin düşmesine neden olmuş ve bu durumda ısı iletim yollarının sürekliliğini artırarak, toplam ısı iletim performansını iyileştirmiştir.

Bilindiği üzere, durgun havanın ısı iletkenliği oldukça düşüktür (yaklaşık 0,024 W/m·K). Bu nedenle, gözeneklilik oranı yükseldikçe, yapı içerisindeki hava hacmi artmakta ve buna bağlı olarak kompozit yapının genel ısı iletkenliği bu düşük değere yaklaşma eğilimi göstermektedir.

Öte yandan, gözenek yapısının sadece miktarı değil, aynı zamanda geometrik özellikleri, dağılımı ve ölçekliliği (mikro ve mezo düzeyde) de ısı iletim yolları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda, içyapıda yer alan mikro ve mezo gözeneklerin dağılımı ve bağlantısalılığı, kompozitlerin ısı iletkenlik özelliklerinin optimize edilmesinde kritik parametreler olarak değerlendirilebilir. Kumar ve ark.'da benzer şekilde değişen oranlarda Al₂O₃ and TiO₂ takviyeli nikel alaşımlarda takviye oranı artışına bağlı olarak termal iletkenliğin arttığını bildirmişlerdir. Baz nikel alaşımın termal iletkenliğinin %9 ağırlık oranında Al₂O₃ / TiO₂ takviyesiyle 36,57 W/m °C'den 58,39 W/m °C'ye yükseldiğini belirlemişlerdir (Kumaraswamy ve ark., 2021).



Şekil 4.15. Nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik değişimleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Al7075 alaşıma farklı oranlarda TiO₂ ve ZrO₂ nano parçacıkları ilave edilerek homojen dağılımın sağlanması amacıyla mekanik alaşımlama cihazında karıştırılmış ve toz metalürjisi yöntemiyle üretilerek sertlik, aşınma ve termal özellikleri incelenmiştir. Ayrıca aşınmış yüzey morfolojisi de SEM yardımıyla analiz edilmiştir. TiO₂ ve ZrO₂ nano takviye parçacıklarının Al7075 matrisli kompozitlerin mikro sertliğini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Al7075 alaşımının başlangıç sertliği 65 Hv iken, %3 TiO₂ ve %2 ZrO₂ takviyesiyle bu değer 89 Hv'ye kadar yükselmiştir. Takviye oranının %3 TiO₂ ve %3 ZrO₂'ye çıkarılmasıyla sertlik değeri 75 Hv'ye düşerken, yalnızca %3 ZrO₂ takviyesiyle 87 Hv sertlik elde edilmiştir. Takviye fazlarının yoğunluklarının matris alaşımından yüksek olması, kompozit malzemelerin yoğunluğunun artmasını sağlamıştır. Deneysel ve teorik yoğunluklar arasındaki fark, gözeneklilik oranının %2 ile %5 arasında değiştiğini göstermektedir. Aşınma test sonuçlarına göre artan takviye oranı ve takviye ilavesine bağlı olarak sürtünme katsayısının düştüğü belirlenmiştir. %3 nano TiO₂ parçacık ilavesiyle kompozitin sürtünme katsayı değerinin 0,81'den 0,62'e düştüğü görülmüştür. Baz alaşıma kıyasla TiO₂ ve ZrO₂ takviyeli kompozitlerin aşınma oranları daha düşük çıkmıştır. ZrO₂ takviyeli kompozitlerin ise TiO₂ takviyeli kompozitlerden daha üstün bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Artan kayma hızının sürtünme katsayısı ve aşınma oranını hem baz alaşım hemde takviyeli kompozit için azaldığı gözlenmiştir. Al7075 alaşım için kayma hızının 100 devir/dak.'dan 300 devir/dak.'ya yükseltilmesiyle 0,83'ten 0,71'e düşmüştür. Artan kayma hızı ile birlikte A1T3Z numune için aşınma oranı 4,07 mm³/m×10⁻³'ten 2,0074 mm³/m×10⁻³'e gerilemiştir. Kayma mesafesi artışının hibrit kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma oranını düşürdüğü belirlenmiştir. Uygulanan yük artışının ise kompozitin sürtünme katsayısını düşürdüğü, aşınma oranını ise artırdığı belirlenmiştir. 3 N yükten 5 N yüke çıkılmasıyla birlikte aşınma oranı 3,62 mm³/m'e yükselmiştir. Aşınmış yüzey morfolojisi takviye etkisine bakıldığında, baz alaşımın belirgin delaminasyonlar ve şiddetli deformasyon izleri gözlenmiştir. Derin oyuklar ve derin aşınma izlerine rastlanmıştır. Takviyeli kompozitte ise matris içindeki sert nano parçacıklar sayesinde aşınma yüzey hasarının daha düşük olduğu görülmüştür. Al matrise

nano paracak takviyesinin termal iletkenlik değerini yükselttiği belirlenmiştir. Kompozit numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin 7,52 W/m·K ile 23,81 W/m·K arasında değiştiği belirlenmiş ve en düşük termal iletkenlik Al7075 alaşımda elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abd-Elwahed, M.S., Ibrahim, A.F., Reda, M.M. (2020). Effects of ZrO₂ nanoparticle content on microstructure and wear behavior of titanium matrix composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 8528–8534.
- Abdizadeh, H., Baghchesara, M.A. (2013). Investigation on mechanical properties and fracture behavior of A356 aluminum alloy based ZrO₂ particle reinforced metal-matrix composites. *Ceramics International*, 39, 2045–2050.
- Adediran, A.A., Akinwande, A.A., Balogun, O.A., Olorunfemi, B.J., M., S.K. (2021). Optimization studies of stir casting parameters and mechanical properties of TiO₂ reinforced Al 7075 composite using response surface methodology. *Scientific Reports*, 11, 19860.
- Ahamad, N., Mohammad, A., Sadasivuni, K.K., Gupta, P. (2020). Structural and mechanical characterization of stir cast Al–Al₂O₃–TiO₂ hybrid metal matrix composites. *Journal of Composite Materials*, 54, 2985–2997.
- Ahamad, N., Mohammad, A., Sadasivuni, K.K., Gupta, P. (2021). Wear, optimization and surface analysis of Al–Al₂O₃–TiO₂ hybrid metal matrix composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 235, 93–102.
- Ahmad, S., Tian, Y., Hashmi, A.W., Singh, R.K., Iqbal, F., Dangi, S., Alansari, A., Prakash, C., Chan, C.K. (2024). Experimental studies on mechanical properties of Al-7075/TiO₂ metal matrix composite and its tribological behaviour. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8539–8552.
- Al-Gburi, M.K.M. (2022). Mechanical and wear behavior for aluminum alloy reinforced with dual nanoparticulate (TiO₂ + SiO₂).
- Al Zubaidi, F.N., Asaad, L.M., Alshalal, I., Rasheed, M. (2023). The impact of zirconia nanoparticles on the mechanical characteristics of 7075 aluminum alloy. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32.
- Alavi Zaree, S.R., Khorasanian, M., Mashak, O.G. (2022). In-situ manufacturing of Al7075/TiO₂, Al7075/SiC and Al7075/TiO₂/SiC based composite layers by friction surfacing on commercially pure aluminum. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 63, 237–245.
- Alipour, M., Keshavamurthy, R., Koppad, P.G., Shakiba, A., Reddy, N.C. (2023). Investigation of microstructure and mechanical properties of cast Al–10Zn–3.5Mg–2.5Cu nanocomposite reinforced with graphene nano sheets produced by ultrasonic assisted stir casting. *International Journal of Metalcasting*, 17, 935–946.
- Angelo, P.C., Subramanian, R., Ravisankar, B. (2022). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd.

- Asim, M., Saba, N., Jawaidd, M., Nasir, M., Pervaiz, M., Alothman, O. (2017). A review on phenolic resin and its composites. *Current Analytical Chemistry*, 13.
- Aybarç, U. (2019). Development of cast aluminum metal matrix composites by additional processes.
- Baradeswaran, A., Elaya Perumal, A. (2013). Influence of B₄C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B₄C composites. *Composites Part B: Engineering*, 54, 146–152.
- Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Paulo Davim, J. (2007). Application of Taguchi techniques to study dry sliding wear behaviour of metal matrix composites. *Composites Science and Technology*.
- Baskaran, S., Anandakrishnan, V., Duraiselvam, M. (2014). Investigations on dry sliding wear behavior of in situ casted AA7075–TiC metal matrix composites by using Taguchi technique. *Materials & Design*, 60, 184–192.
- Bharat, N., Jain, R., Rangilal, B., Bose, P.S.C. (2023). Optimization of wear parameters of Al7075 metal matrix composite reinforced with TiO₂ nanoparticles using Taguchi method. *NanoWorld Journal*, 9, S107–S112.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2022). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- Chawla, K.K. (1998). Metal matrix composites. In: Chawla, K.K. (Ed.), *Composite Materials: Science and Engineering* (pp. 164–211). Springer New York.
- Chawla, K.K. (2012). Ceramic matrix composites. In: Chawla, K.K. (Ed.), *Composite Materials: Science and Engineering* (pp. 249–292). Springer New York.
- Cheng, Q., Jiang, H., Li, Y. (2020). Effect of fiber content and orientation on the scratch behavior of short glass fiber reinforced PBT composites. *Tribology International*, 146, 106221.
- Chirac Matibe Dionlar. (2025). *Investigation on wear behavior of Hardox 450 steel in nano lubrication environment*. Karabük Üniversitesi.
- Cümerlab, S. (n.d.). *No title*.
- Dagdag, O., et al. (2019). Epoxy pre-polymers as new and effective materials for corrosion inhibition of carbon steel in acidic medium: Computational and experimental studies. *Scientific Reports*, 9, 11715.
- Das, S. (2015). Studies on the performance of metal matrix composites (MMC).
- Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellup, J.M. (1997). Dry sliding wear of aluminium composites—A review. *Composites Science and Technology*, 57, 415–435.

- El-Tamimi, K.M., et al. (2022). The effect of salinized nano ZrO₂ particles on the microstructure, hardness, and wear behavior of acrylic denture tooth nanocomposite. *Polymers*.
- Elango, G., Raghunath, B.K. (2013). Tribological behavior of hybrid (LM25Al + SiC + TiO₂) metal matrix composites. *Procedia Engineering*, 64, 671–680.
- Esquivel, J., Gupta, R.K. (2020). Review—Corrosion-resistant metastable Al alloys: An overview of corrosion mechanisms. *Journal of The Electrochemical Society*, 167, 81504.
- Fathy, A., Elkady, O., Abu-Oqail, A. (2017). Microstructure, mechanical and wear properties of Cu–ZrO₂ nanocomposites. *Materials Science and Technology*, 33, 2138–2146.
- Gajakosh, A., Keshavamurthy, R., Vasanth Kumar, R. (2023). Friction and wear characteristics of hot-rolled Al7075-TiO₂-Graphite hybrid composites. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 104, 623–642.
- Gajakosh, A. Kumar, Keshavamurthy, R., Jagadeesha, T., Kumar, R.S. (2021). Investigations on mechanical behavior of hot rolled Al7075/TiO₂/Gr hybrid composites. *Ceramics International*, 47, 14775–14789.
- Gunduz, G., Aydemir, D., Karakas, G. (2009). The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. *Materials & Design*, 30, 4391–4395.
- Hsissou, R., et al. (2019). Experimental, DFT and molecular dynamics simulation on the inhibition performance of the DGDCBA epoxy polymer against the corrosion of the E24 carbon steel in 1.0 M HCl solution. *Journal of Molecular Structure*, 1182, 340–351.
- Idusuyi, N., Olayinka, J.I. (2019). Dry sliding wear characteristics of aluminium metal matrix composites: A brief overview. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 3338–3346.
- Imran, M., Khan, A.R.A. (2019). Characterization of Al-7075 metal matrix composites: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 3347–3356.
- Jamali, A., 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.
- James, W.B. (2015). *Powder Metallurgy Methods and Applications* (Vol. 7). ASM International.
- Joshua, K.J., Vijay, S.J., Selvaraj, D.P. (2018). Effect of nano TiO₂ particles on microhardness and microstructural behavior of AA7068 metal matrix composites. *Ceramics International*, 44, 20774–20781.

- Kar, A., Sharma, A., Kumar, S. (2024). A critical review on recent advancements in aluminium-based metal matrix composites. *Crystals*.
- Kessler, M.R. (2012). Polymer matrix composites: A perspective for a special issue of *Polymer Reviews*. *Polymer Reviews*, 52, 229–233.
- Khalid, M.Y., Umer, R., Khan, K.A. (2023). Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*, 20, 101372.
- Khalil, H.P.S.A., Tehrani, M.A., Davoudpour, Y., Bhat, A.H., Jawaid, M., Hassan, A. (2012). Natural fiber reinforced poly(vinyl chloride) composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32, 330–356.
- Kheder, A.R.I., Marahleh, G.S., Al-Jamea, D.M.K. (2011). Strengthening of aluminum by SiC, Al₂O₃ and MgO. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 5, 533–541.
- Kottedda, T.K., Kumar, M., Kumar, P., Chekuri, R.B.R. (2022). Metal matrix nanocomposites: Future scope in the fabrication and machining techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Kruzhanov, V., Arnhold, V. (2012). Energy consumption in powder metallurgical manufacturing. *Powder Metallurgy*, 55, 14–21.
- Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., Selvaraj, N. (2012). Mechanical and dry sliding wear behavior of Al7075 alloy-reinforced with SiC particles. *Journal of Composite Materials*, 46, 1201–1209.
- Kumar Sharma, A., Bhandari, R., Sharma, C., Krishna Dhakad, S., Pinca-Bretotean, C. (2022). Polymer matrix composites: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2330–2333.
- Kumaraswamy, J., Kumar, V., Purushotham, G.G., Suresh, R. (2021). Thermal analysis of nickel alloy/Al₂O₃/TiO₂ hybrid metal matrix composite in automotive engine exhaust valve using FEA method. *Journal of Thermal Engineering*, 7, 415–428.
- Lade, J., et al. (2023). A critical review of fabrication routes and their effects on mechanical properties of AMMCs. *Materials Today: Proceedings*.
- Liu, Z., Yan, H., Tu, K., Xiong, J. (2022). Microstructure and tribological properties of Al 7075-TiO₂@CNTs composites under T6 treatment. *Vacuum*, 199, 110949.
- Lü, L., Lai, M.O. (2013). *Mechanical Alloying*. Springer Science & Business Media.
- Madhusudhan, M., Naveen, G.J., Mahesha, K. (2017). Mechanical characterization of AA7068-ZrO₂ reinforced metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 4, 3122–3130.
- Mallick, P.K. (1997). *Composites engineering handbook*. CRC Press.

- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering*. CRC Press.
- Demirkol, M. (2023). *Parameter optimization for fabrication of titanium dioxide nanoparticle reinforced PUA matrix photocatalytic composites to improve wear resistance*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Miracle, D.B. (2005). Metal matrix composites – From science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 65, 2526–2540.
- Mirjavadi, S.S., Alipour, M., Emamian, S., Kord, S., Hamouda, A.M.S., Koppad, P.G., & Keshavamurthy, R. (2017). Influence of TiO₂ nanoparticles incorporation to friction stir welded 5083 aluminum alloy on the microstructure, mechanical properties and wear resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 712, 795–803.
- Mishra, A.K., & Srivastava, R.K. (2017). Wear behaviour of Al-6061/SiC metal matrix composites. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98, 97–103.
- Mobasherpour, I., Tofigh, A.A., & Ebrahimi, M. (2013). Effect of nano-size Al₂O₃ reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying. *Materials Chemistry and Physics*, 138, 535–541.
- Muralidharan, N., K, C., K, K., & Nithyavathy, N. (2023). Investigation of ZrO₂ reinforced aluminium metal matrix composites by liquid metallurgy route. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9, 593–607.
- Murugabalaji, V., Rout, M., & Sahoo, B.N. (2024). Wear behaviour analysis of thermo-mechanically processed AA7075 and AA7075/SiC/Graphite composite. *Materials Chemistry and Physics*, 327, 129890.
- Narasimha, B.G., Krishna, V.M., & Xavior, A.M. (2013). A review on processing of particulate metal matrix composites and its properties. *International Journal of Applied Engineering Research*, 8, 647–666.
- Nguyen Van, C., Sistla, S., & van Kempen, S. (2016). A comparative study of different sintering models for Al₂O₃. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 124, 301–312.
- Oleiwi, F.H.O. (2023). The effect of Cr on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel used as implant material produced by powder metallurgy.
- Öztoprak, N. (2018). Investigation of similar and dissimilar friction stir welded metal matrix composites under variable loading.
- Padmavathi, K.R., Ramakrishnan, R., Karthikeyan, L., Tamizhselvan, S., & Chezian Babu, S. (2023). Comparison of the mechanical properties of micro/nano SiC/TiO₂ reinforced aluminium metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1996–2001.

- Pandiyarajan, R., P, M., S, M., & Prabakaran, M.P. (2022). Investigation on mechanical properties of ZrO₂, C and AA6061 metal matrix composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8, 178–186.
- Patel, S., & Sun, C.C. (2016). Macroindentation hardness measurement—Modernization and applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 506, 262–267.
- Paulraj, D., Jeyakumar, P.D., Rajamurugan, G., & Krishnasamy, P. (2021). Influence of nano TiO₂/micro (SiC/B₄C) reinforcement on the mechanical, wear and corrosion behaviour of A356 metal matrix composite. *Archives of Metallurgy and Materials*, 66, 871–880.
- Prakash, J., Gopalakannan, S., Chakravarthy, V.K. (2022). Mechanical Characterization Studies of Aluminium Alloy 7075 Based Nanocomposites. *Silicon*, 14, 1683–1694.
- Prasad Behera, M., Dougherty, T., Singamneni, S., De Silva, K. (2020). Selective laser melting of aluminium metal-matrix composites and the challenges. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5729–5733.
- Prasanna Nagasai, B., Anusha, C.H., Rajesh, A. (2021). Study on mechanical properties of Al-6061/ZrO₂ reinforced metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4552–4557.
- Radhika, N., Subramanian, R., Venkat Prasat, S., Anandavel, B. (2012). Dry sliding wear behaviour of aluminium/alumina/graphite hybrid metal matrix composites. *Industrial Lubrication and Tribology*, 64, 359–366.
- Rajak, D.K., Pagar, D.D., Menezes, P.L., Linul, E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*.
- Rakshath, S., Suresha, B., Sasi Kumar, R., Saravanan, I. (2020). Dry sliding and abrasive wear behaviour of Al-7075 reinforced with alumina and boron nitride particulates. *Materials Today: Proceedings*, 22, 619–626.
- Ramachandra, M., Abhishek, A., Siddeshwar, P., Bharathi, V. (2015). Hardness and Wear Resistance of ZrO₂ Nano Particle Reinforced Al Nanocomposites Produced by Powder Metallurgy. *Procedia Materials Science*, 10, 212–219.
- Ramesh, C.S., Khan, A.R.A., Ravikumar, N., Savanprabhu, P. (2005). Prediction of wear coefficient of Al6061–TiO₂ composites. *Wear*, 259, 602–608.
- Rao, R.N., Das, S. (2011). Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites. *Materials and Design*, 32, 1066–1071.
- Ravikumar, M., Naik, R., Vinod, B.R., Chethana, K.Y., Rammohan, Y.S. (2023). Study on nanosized Al₂O₃ and Al₂O₃-SiC on mechanical, wear and fracture surface of Al7075 composites for soil anchoring applications. *Materials Physics and Mechanics*, 51, 24–41.

- Reddy, M.S. Prashanth, Raju, H.P., Banapurmath, N.R., Meti, V.K.V. (2020). Influence of ZrO₂ nano particles on the behavior of mechanical and tribological properties of the AA7075 composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N*, 236, 55–62.
- Rosiak, A., Wermuth, D., De Lucca de Costa, L., Silva, L., Schaeffer, L. (2019). Processo de sinterforjamento: uma revisão.
- Sadoun, A.M., Fathy, A., Abu-Oqail, A., Elmetwaly, H.T., Wagih, A. (2020). Structural, mechanical and tribological properties of Cu–ZrO₂/GNPs hybrid nanocomposites. *Ceramics International*, 46, 7586–7594.
- Sardar, S., Karmakar, S.K., Das, D. (2018). High stress abrasive wear characteristics of Al 7075 alloy and 7075/Al₂O₃ composite. *Measurement*, 127, 42–62.
- Şenel, M.C., Üstün, M. (2022). Dry Sliding Wear and Friction Behavior of Graphene/ZrO₂ Binary Nanoparticles Reinforced Aluminum Hybrid Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 9253–9269.
- Sharma, H., Kumar, A., Rana, S., Sahoo, N.G., Jamil, M., Kumar, R., Sharma, S., Li, C., Kumar, A., Eldin, S.M., Abbas, M. (2023). Critical review on advancements on the fiber-reinforced composites: Role of fiber/matrix modification on the performance of the fibrous composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 2975–3002.
- Shinde, D.M., Sahoo, P. (2022). Influence of Speed and Sliding Distance on the Tribological Performance of Submicron Particulate Reinforced Al-12Si /1.5 Wt% B₄C Composite. *International Journal of Metalcasting*, 16, 739–758.
- Shorowordi, K.M., Laoui, T., Haseeb, A.S.M.A., Celis, J.P., Froyen, L. (2003). Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study. *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 738–743.
- Şimşek, İ., Şimşek, D., Özyürek, D. (2020). The effect of different sliding speeds on wear behavior of ZrO₂ reinforcement aluminium matrix composite materials. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 4, 1–7.
- Sivasamy, A., Ravichandran, M. (2019). Synthesis, microstructure and properties of TiO₂ reinforced AA7075 matrix composites via stir casting route. *Materials Research Express*, 6.
- Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., Liang, H., Qu, H., Binner, J., Bai, J. (2023). A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 138, 1–16.
- Suryanarayana, C., Klassen, T., Ivanov, E. (2011). Synthesis of nanocomposites and amorphous alloys by mechanical alloying. *Journal of Materials Science*, 46, 6301–6315.

- Tile, P.S., Thomas, B. (2024). Effect of Load, Sliding Velocity, and Reinforcements on Wear Characteristics of Al7075-Based Composite and Nanocomposites Fabricated by Ultrasonic-Assisted Stir-Casting Technique. *International Journal of Metalcasting*, 18, 180–195.
- Tjong, S.C. (2007). Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties. *Advanced Engineering Materials*, 9, 639–652.
- Veeresh Kumar, G.B., Rao, C.S.P., Selvaraj, N., Bhagyashekar, M.S. (2010). Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al₂O₃ metal matrix composites. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9, 43–55.
- Venkataraman, B., Sundararajan, G. (2000). Correlation between the characteristics of the mechanically mixed layer and wear behaviour of aluminium, Al-7075 alloy and Al-MMCs. *Wear*, 245, 22–38.
- Venugopal, S., Karikalan, L. (2021). Microstructure and physical properties of hybrid metal matrix composites AA6061-TiO₂-SiC via stir casting techniques. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1289–1294.
- Wu, L., Zhang, D., Jiang, Z., Zheng, B., Yu, Z. (2024). Effect of Cu content on the wear resistant behavior of arc-sprayed laminated-structured Cu-TiN/TiO₂ composite coating. *Ceramics International*, 50, 11966–11979.
- Xavier, X.R., Jaisingh, S.J. (2021). Synthesis and characterization of AA7050-TiO₂ reinforced aluminium matrix composite. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35, 4917–4924.
- Yang, Z.-R., Sun, Y., Li, X.-X., Wang, S.-Q., Mao, T.-J. (2022). Dry sliding wear performance of 7075 Al alloy under different temperatures and load conditions. *Rare Metals*, 41, 1057–1062.
- Zhang, J., Zhang, L., Ma, H. (2023). Effect of ZrO₂ additions on the microstructure, mechanical and wear properties of ZrO₂/7075 aluminium alloy composite. *Materials Today Communications*, 37, 107437.