



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK CAM VE KARBON FİBER TOZU KATKILI Al7075 ALAŞIM
MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ
İLE ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İlhami AVCİ

**Aralık-2025
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK CAM VE KARBON FİBER TOZU KATKILI Al7075 ALAŞIM
MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ
İLE ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İlhami AVCI

**Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK**

Diğer Jüri Yeleri

Pr. Dr. Erol KILIÇKAP

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR

**Aralık-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

İlhami AVCI tarafından hazırlanan “Atık cam ve karbon fiber tozu katkılı Al7075 alaşım matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi” adlı tez çalışması 11/12/2025 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

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİR

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

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.

İlhami AVCİ
Tarih: 11/12/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK CAM VE KARBON FİBER TOZU KATKILI Al7075 ALAŞIM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İlhami AVCİ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2025, 74 Sayfa

Bu çalışmada, Al7075 alüminyum alaşımı toz formunda temin edilmiş ve atık cam ile karbon fiber tozlarıyla takviye edilerek güçlendirilmiştir. Takviyeler ağırlıkça %4, %8 ve %12 oranlarında eklenmiş ve kompozitler toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilmiştir. Üretim öncesinde tozlar mekanik karıştırıcıda 1 saat karıştırılmış, ardından 20 mm çapındaki kalıplara yerleştirilerek 300 MPa basınç altında preslenmiş ve 600 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Bu yöntemle hem tekil (cam veya karbon fiber) hem de hibrit kompozitler elde edilmiştir. Takviye oranlarının malzemenin sertlik ve aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sertlik testleri hem cam hem de karbon fiber takviyesinin Al7075 alaşımının sertliğini artırdığını, hibrit kompozitlerde ise sertliğin tekil kompozitler arasında değiştiğini göstermiştir. Aşınma testleri, karbon fiber ilavesiyle üretilen kompozitlerde aşınmanın daha az olduğunu ortaya koymuş, ancak düşük takviye oranlarında kısmi plastik deformasyonlar ve yüksek takviye oranlarında ise kısmi partikül kopmaları gözlenmiştir. Bu nedenle hibrit ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin aşınma deneyleri yapılmamıştır. Sadece daha iyi ve istikrarlı sonuçlar veren cam fiber takviyeli kompozitlerin aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş, X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmış ve yüzey görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Aşınma testleri, cam fiber takviyesinin kompozitlerin yalnızca sertliğini değil, aynı zamanda aşınma direncini de önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Takviye oranı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma oranı azalmıştır. Dönme devri hem sürtünme katsayısını hem de aşınma oranını azaltırken, uygulanan yükün artışı sürtünme katsayısını azaltmış, aşınma oranını ise arttırmıştır. XRD analizleri cam elyafın amorf yapısını ortaya koymuş ve takviyenin alaşımın kristal yapısını bozmadığını göstermiştir. SEM görüntüleri ise fiber takviyesinin yüzeydeki derin oyukları ve deformasyon izlerini azalttığını, matris döküntüleri ve oksitlenmiş bölgeler aracılığıyla mekanik aşınma etkisini düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Al7075, Metal Matrisli Kompozit, Toz Metalurjisi, Cam Fiber, Karbon Fiber, Sertlik, Aşınma.

ABSTRACT

MASTER THESIS

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF Al7075 ALLOY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH WASTE GLASS AND CARBON FIBER POWDER BY POWDER METALLURGY METHOD

İlhami AVCİ

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2025, 74 Pages

In this study, Al7075 aluminum alloy was supplied in powder form and reinforced with waste glass and carbon fiber powders. The reinforcements were added at weight fractions of 4%, 8%, and 12%, and the composites were fabricated using the powder metallurgy (PM) method. Prior to fabrication, the powders were mechanically mixed for 1 hour, then placed into 20 mm diameter molds, compacted under a uniaxial pressure of 300 MPa, and sintered at 600 °C. Both single (glass or carbon fiber) and hybrid composites were produced using this method. The effects of reinforcement ratios on the hardness and wear behavior of the materials were investigated. Hardness tests indicated that both glass and carbon fiber reinforcements increased the hardness of the Al7075 alloy, while in hybrid composites, hardness varied among the single composites. Wear tests revealed that composites produced with carbon fiber exhibited lower wear, however, partial plastic deformation was observed at low reinforcement ratios, while partial particle detachment occurred at high reinforcement ratios. Therefore, wear tests were not conducted for hybrid and high-carbon fiber composites. Only the glass fiber reinforced composites, which provided better and more consistent results, were subjected to wear testing, X-ray diffraction (XRD) analysis, and surface characterization using scanning electron microscopy (SEM). The wear tests demonstrated that glass fiber reinforcement significantly improved not only the hardness but also the wear resistance of the composites. As the reinforcement ratio increased, the friction coefficient and wear rate decreased. While an increase in rotational speed reduced both the friction coefficient and the wear rate, an increase in applied load decreased the friction coefficient but increased the wear rate. XRD analyses revealed the amorphous structure of the glass fibers and showed that the reinforcement did not alter the crystal structure of the alloy. SEM images indicated that fiber reinforcement reduced deep grooves and deformation traces on the surface and mitigated mechanical wear effects through matrix debris and oxidized regions.

Keywords: Al7075, Metal Matrix Composite, Powder Metallurgy, Glass Fiber, Carbon Fiber, Hardness, Wear.

ÖN SÖZ

Alüminyum esaslı kompozit malzemeler, yüksek özgül dayanım, iyi aşınma direnci ve üstün mekanik özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi birçok alanda yapısal uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Bu üstün özellikler, matris alaşımına eklenen uygun takviye elemanları ve uygulanan üretim yöntemleriyle daha da geliştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında, Al7075 alaşım tozu matris olarak seçilmiş, atık cam ve karbon fiber tozları takviye elemanı olarak kullanılarak toz metalurjisi yöntemiyle kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretim süreci boyunca tozlar homojen şekilde karıştırılmış, uygun basınç altında preslenmiş ve sinterlenmiştir. Elde edilen kompozit örnekler üzerinde gerçekleştirilen sertlik ve aşınma testleriyle, takviye tozlarının malzemenin mekanik ve tribolojik performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın amacı, kapsamı ve literatürde yer alan benzer çalışmaların genel değerlendirmesi sunulmuştur. İkinci bölümde kompozit malzemelerin sınıflandırılması, metal matrisli kompozitlerin bileşenleri ve üretim yöntemleri detaylandırılmış, toz metalurjisi yönteminin avantajları ve dezavantajları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalar ayrıntılı olarak açıklanmış, kullanılan malzemeler, üretim aşamaları ve uygulanan test yöntemleri tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen deneysel bulgular değerlendirilmiş, farklı takviye türlerinin ve üretim parametrelerinin malzeme performansına etkileri grafikler ve tablolarla ortaya konulmuştur. Son bölümde ise genel sonuçlar ve gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bilgi, deneyim ve akademik rehberlikleriyle her aşamada bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Yahya Hışman Çelik'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmanın planlanması, deneysel süreçlerin yürütülmesi ve bilimsel değerlendirme aşamalarında katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Okumuş'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin Demir'e teşekkür ederim. Ayrıca, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan kıymetli aileme ve bu sürecin her anında sabrı, anlayışı ve sevgisiyle en büyük desteği sağlayan sevgili eşime de içten teşekkürlerimi sunarım.

İlhami AVCİ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Çalışması.....	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
2.1. Kompozit Malzemeler	12
2.1.1. Matris malzemesine göre kompozitler.....	14
2.1.1.1. Polimer matrisli kompozitler	14
2.1.1.2. Seramik matrisli kompozitler.....	16
2.1.1.3. Metal matrisli kompozitler.....	17
2.1.2. Takviyeye göre kompozitler	17
2.1.3. Yapısına göre kompozitler.....	18
2.2. MMK'ların Sınıflandırılması, Bileşenleri ve Üretimi	19
2.2.1. MMK'ların sınıflandırılması.....	19
2.2.2. MMK'larda kullanılan matris malzemeleri	20
2.2.3. MMK'larda kullanılan takviye elemanları	22
2.2.4. MMK'ların uygulama alanları	24
2.2.5. MMK'ların üretim yöntemleri	25
2.2.5.1. Sıvı faz üretim yöntemi.....	25
2.2.5.2. Katı faz üretim yöntemi	27
2.2.5.3. Yerinde (In-Situ) üretim	28
2.2.5.4. Üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları	29
2.3. Toz Metalurjisi (TM) ile Kompozit Üretimi.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Kompozit Üretiminde Kullanılan Matris ve Takviye Malzemeleri.....	33
3.2. Matris ve Takviye Oranlarının Belirlenmesi ve Tartılması	34
3.3. Tozların Karıştırılması.....	36
3.4. Tozların Sıkıştırılması.....	37
3.5. Sinterleme İşlemi	39
3.6. Numune Hazırlama	40
3.7. Sertlik Ölçümü.....	41
3.8. Aşınma Testi	42
3.9. XRD Ölçümleri.....	43

3.10. SEM Analizleri	43
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	44
4.1. Sertlik Sonuçlarının Analizi.....	44
4.2. Aşınma Test Sonuçlarının Analizi	47
4.3. XRD Analiz Sonuçları	55
4.4. Aşınmış Yüzey SEM Morfolojisi	58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
5.1. Sonuçlar	61
5.2. Öneriler	62
KAYNAKLAR	63



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Al alaşım serilerinin özellikleri ve kullanım alanları.....	21
Tablo 2.2. Yaygın kullanılan takviye elemanlarının özellikleri.....	22
Tablo 2.3. Matrise bağlı olarak kullanılan takviyeler	23
Tablo 2.4. MMK'ların uygulama alanları ve kullanıldığı yerler	24
Tablo 2.5. MMK üretim yöntemlerine ait üstünlükler ve zayıf yönler	29
Tablo 3.1. Al7075 alaşımının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	33
Tablo 3.2. Al7075 matris ve cam/karbon fiber takviye oranlarının ağırlıkça dağılımı..	34



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Mühendislik malzemeleri ile kompozitlerin ilişkisi	12
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerinin sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.3. Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılması; (a) Sürekli fiber takviyeli kompozit, (b) Kısa fiber takviyeli kompozit, (c) Partikül takviyeli kompozit	19
Şekil 2.4. MMK’larda kullanılan matrisler	20
Şekil 2.5. MMK’larda kullanılan takviye elemanları	22
Şekil 2.6. Karıştırma dökümün şematik gösterimi; a) mekanik karıştırma döküm, b) ultrasonik karıştırma döküm.....	26
Şekil 2.7. Basınçlı infiltrasyonla üretim	26
Şekil 2.8. MMK’ların TM yöntemi ile üretiminin şematik gösterimi	30
Şekil 2.9. Toz işleme aşamasında sinterleme sonrası yapının değişimi	31
Şekil 3.1. Matris ve takviye olarak kullanılan toz partiküllerinin tartım işlemi: a) boş terazi, b) Al7075 matris tozu, c) cam fiber tozu, d) karbon fiber tozu (topaklanmış)....	35
Şekil 3.2. XQM-2 cihazı gösterimi.....	36
Şekil 3.3. Paslanmaz çelik kaba bilye/toz karışımının ilavesi: a) homojen karışım tozu, b) topaklanmış karbon fiber ve alaşım tozu.....	36
Şekil 3.4. Karıştırıldıktan sonra tartılan %8 karbon fiberli Al7075 alaşım tozu	37
Şekil 3.5. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan hidrolik pres.....	38
Şekil 3.6. Hidrolik pres sonrası toz numunelerden elde edilen silindirik numune	39
Şekil 3.7. Stuart Scientific sinterleme fırını ve sinterleme işlemi	39
Şekil 3.8. Sinterleme sonrası numunelerin ambalajlanması	40
Şekil 3.9. Minitech Parlatma Cihazı ve parlatma işlemi	41
Şekil 3.10. Numunenin Brinell Sertlik Cihazı ile sertliğinin ölçümü.....	41
Şekil 3.11. Pin-on-disk aşınma testi düzeneği	42
Şekil 3.12. XRD için kullanılan cihazın görünümü.....	43
Şekil 3.13. SEM analizinde kullanılan Quanta 650 Field Emission cihazı	43

Şekil 4.1. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerinin sertlik değişimi.....	44
Şekil 4.2. Al7075 alaşımı ve karbon fiber takviyesi içeren kompozitlerinin sertlik değişimi.....	45
Şekil 4.3. Al7075 alaşımı ve hibrit fiber takviyesi içeren kompozitlerinin sertlik değişimi.....	46
Şekil 4.4. Kompozitlerin aşınma iz görüntüleri: a) Cam fiber takviyeli, b) Hibrit fiber takviyeli, c) Karbon fiber takviyeli	47
Şekil 4.5. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerin 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı değişimi.....	48
Şekil 4.6. Karıştırma sonrası elde edilen tozların SEM görüntüleri: a) Al7075 (A), b) %8 Cam/Al7075 (C4), c) %12 Cam/Al7075 (C12).....	48
Şekil 4.7. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerin 400 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı değişimi.....	49
Şekil 4.8. C4 ve C8 kompozitlerinde farklı yükler altında elde edilen sürtünme katsayısı değişimi.....	50
Şekil 4.9. C4, C8 ve C12 kompozitlerinde farklı dönme devirlerinde elde edilen sürtünme katsayısı değişimi.....	51
Şekil 4.10. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerin 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında elde edilen aşınma oranı değişimi.....	52
Şekil 4.11. C4 ve C8 kompozitlerinde farklı yükler altında elde edilen aşınma oranı değişimi	53
Şekil 4.12. C4, C8 ve C12 kompozitlerinde farklı dönme devirlerinde elde edilen aşınma oranı değişimi	54
Şekil 4.13. Kompozit üretiminde kullanılan Al7075 alaşımının XRD deseni	55
Şekil 4.14. Kompozit üretiminde kullanılan cam fiberin XRD deseni.....	56
Şekil 4.15. Cam fiber takviyeli Al7075 alaşım matrisli kompozitlerin XRD desenleri: (a) %0 fiber katkılı, (b): %4 fiber katkılı, (c): %8 fiber katkılı, (d): %12 fiber katkılı numuneler	57
Şekil 4.16. Takviyesiz ve cam fiber takviyeli kompozitlerin aşınmış yüzeylerine ait SEM görüntüleri: a) Al7075 alaşımı, b) C4 kompoziti, c) C8 kompoziti, d) C12 kompoziti	59
Şekil 4.17. C4 kompozitinin aşınmış yüzeylerine ait SEM görüntüleri: a) 7 N, b) 10 N	60

KISALTMALAR

A	: Al7075
AMK	: Al Matrisli Kompozit
C	: Cam Fiber
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
K	: Karbon Fiber
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitler
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	: Seramik Matrisli Kompozitler
TM	: Toz Metalurjisi
XRD	: X-ışını Kırınımı

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi (TM), metalik tozların belirli bir yöntem dâhilinde işlenmesi ve şekillendirilmesine dayanan bir üretim teknolojisidir. Mikrometre ile nanometre boyutlarındaki toz formundaki ham maddelerin kullanılmasıyla çeşitli şekil ve yapılara sahip bileşenlerin üretildiği bir dizi işlem basamağını kapsamaktadır. Bu süreç; metalik tozların sıkıştırılması, birleştirilmesi, biçimlendirilmesi ve sinterlenmesi gibi temel aşamalardan oluşmaktadır. Geleneksel metal işleme yöntemlerine alternatif olarak kullanılan TM, hammaddenin etkin kullanımına imkân tanınması, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilebilmesi, farklı malzemelerin bir araya getirilebilmesi ve ileri teknolojik uygulamalara olanak sağlaması gibi pek çok avantaj sunmaktadır (German, 2005; Yazıcıoğlu ve Borat, 2021).

TM yöntemiyle üretilen malzemeler, homojen mikroyapı, yüksek mekanik özellikler ve iyi yüzey kalitesi gibi üstün özelliklere sahiptirler. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi kritik mühendislik gereksinimlerini karşılayabilecek niteliktedir. Ayrıca, TM teknolojisi; malzemelerin bileşiminde ve mikroyapısında hassas kontrol imkânı sunarak, belirli uygulamalara yönelik özelliklerin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Abdizadeh ve ark., 2014).

TM yöntemi, yalnızca tek bileşenli metal parçaların üretiminde değil, aynı zamanda bir matris fazı ve bir veya birden fazla takviye fazından oluşan kompozit malzemelerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanlarının türü ve miktarı, üretilecek malzemenin cinsi ve hedeflenen özelliklerine bağlı olarak değiştirilebilir. Daha fazla fiziksel ve kimyasal olarak farklı malzemenin bir araya getirilmesi, bireysel bileşenlere kıyasla iyileştirilmiş mekanik, termal ve tribolojik özellikler elde edilmesini sağlar (Çolak ve Turhan, 2016; Seçilmiş, 2017).

TM yöntemiyle üretilen kompozitlerde, B_4C , SiC , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiB_2 ve TiC gibi seramik partiküller en yaygın kullanılan takviye elemanlarıdır. Bu partiküller, eklendikleri kompozitlerde yüksek aşınma direnci sağlayarak malzemenin aşınma ve erozyona karşı dayanımını artırmaktadır. Ayrıca, seramik partiküllerinin yüksek erime sıcaklıkları nedeniyle, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren endüstriyel uygulamalarda da bu takviye elemanları yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu takviyeler, kompozit

malzemelerin yüksek sıcaklıklarda istikrarlı performans sergilemesini sağlayarak farklı sıcaklık koşullarında güvenilirliğini artırmaktadır. Öte yandan, TM ile üretilen kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle düşük yoğunluklu, düşük erime sıcaklıklı ve temin edilebilirliği yüksek metaller tercih edilmektedir. Bu bağlamda Al, Mg ve Cu gibi hafif metaller en yaygın kullanılan matris malzemeleri arasında yer almaktadır. Bu alaşım matris malzemeleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları sayesinde ulaşım ve otomotiv endüstrilerinde çeliklerin yerine kullanılabilmektedir. Ayrıca, mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri açısından yüksek performans gereksinimlerini karşılayabilme yetenekleriyle öne çıkmaktadırlar. Bu özellikler, söz konusu alaşımların metal matrisli kompozitlerin (MMK'ların) üretiminde tercih edilmelerinin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Erturun ve Karamış, 2016; Chouhan ve ark., 2024; Miller ve ark., 2000). Krishnan ve ark. (2019), Al matrisli kompozitlerde seramik parçacıklar gibi takviye fazlarının kullanımının, malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirebileceğini belirtmişlerdir.

Al, yerkabuğunda yaygın olarak bulunan ve dünyanın sabit yüzeyinin ağırlıkça yaklaşık %8'ini oluşturan bir elementtir. Bu nedenle, MMK'larda en yaygın tercih edilen hafif metal olarak kullanılmaktadır (Can, 2010; Becerik, 2020). TM yöntemi ile üretilen Al matrisli kompozitlerde (AMK'larda), matris içerisinde takviye elemanlarının homojen biçimde dağılabilmesi, bu yöntemin önemli avantajlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Çelik ve Kilickap, 2017). Bu bağlamda, birçok bilimsel çalışmada alüminyum ve farklı tür ile boyutlardaki seramik partiküllerini içeren kompozitler üretilmiş ve elde edilen malzemelerin sertlik başta olmak üzere tribolojik ve diğer önemli özellikleri incelenmiştir (Kanthavel ve ark., 2016; Çelik ve Seçilmiş, 2017; Saravanan ve ark., 2018; Ibrahim ve ark., 2019; Zamani ve ark., 2020; Munnur ve ark., 2021; Singh ve Kumar, 2022; Kumar ve ark., 2023; Demir ve Okumuş, 2024).

Takviye elemanları yalnızca seramiklerle sınırlı değildir. Özellikle cam ve karbon fiberlerin uçak, uzay ve otomotiv endüstrisindeki yaygın kullanımı, bu malzemelerin kompozit üretiminde de önemini artırmaktadır. Bu fiberler genellikle polimer matrislerde tercih edilse de karbon fiberin yüksek sıcaklıklara dayanımı dikkate alındığında, metal matrisli kompozitlerde kullanımı da ön plana çıkmaktadır (Li ve Chao, 2004; Liu ve ark., 2009; Si ve ark., 2023). Diğer yandan, üretim sürecinde atık hâline gelen veya kullanım ömrünü tamamlayan cam ve karbon fiberlerin geri dönüşümü oldukça önemlidir. Ahmed (2024), karbon fiberlerin sürdürülebilir üretim yöntemleriyle tekrar üretim sahasına kazandırılmasının, malzemelerin çevresel etkilerini minimize ettiğini ve otomotiv

endüstrisinde daha sürdürülebilir kaynaklar elde edilmesine imkân sağladığını vurgulamıştır.

Cam ve karbon fiberlerin TM yöntemi ile geri dönüşüme katılabilmesi için bunların toz formuna getirilmesi kritik bir husustur. Toz hâline getirilmiş cam ve karbon fiberler ticari olarak temin edilebilmektedir ve bu durum hem çevresel sürdürülebilirlik hem de maliyet etkinliği açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. TM yöntemi, bu tür heterojen malzemelerin homojen biçimde dağıtılmasını ve mikroyapıda kontrollü bir şekilde birleştirilmesini mümkün kıldığı için atık cam ve karbon fiberin kompozit üretiminde değerlendirilmesine uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu geri dönüştürülebilir malzemelerin Al matrisli kompozitlerde kullanımı hem malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine hem de atık yönetimi açısından sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

1.1. Literatür Çalışması

AMK'lar, literatürde genellikle Al_2O_3 , SiC ve B_4C gibi seramik takviyelerle incelenmiştir. Son yıllarda ise özellikle karbon bazlı takviyeler (karbon fiber, karbon nanotüpler, grafen veya atık kaynaklı karbon tozları gibi) üzerine yoğun araştırmalar yapılmış. Bu karbon temelli takviyelerin özgül mukavemet, aşınma direnci ve darbe dayanımı gibi mekanik ve tribolojik özellikleri olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. Aşağıda sunulan literatür özetlerinde, farklı matrisler ve takviye tipleri üzerinde yapılan çalışmalar tek tek ele alınmıştır. Her çalışmanın bulguları, özgül mukavemet, aşınma ve darbe dayanımı gibi önemli mekanik ve tribolojik parametreler açısından özetlenmiştir.

Abdizadeh ve ark. (2014), A356 alüminyum alaşımı ve MgO nanopartikülleri (hacimce %1,5; 2,5 ve 5) kullanarak Al-MgO nano kompozitlerini karıştırma döküm ve TM yöntemleriyle üretmişlerdir. Karıştırma döküm için 800, 850 ve 950 °C, TM için ise 575, 600 ve 625 °C işlem sıcaklıkları uygulanmıştır. Sonuçlar, TM numunelerinin döküm numunelerine kıyasla daha fazla gözeneklilik içerdiğini ve bunun döküm kompozitlerinde daha yüksek yoğunluk değerlerine yol açtığını göstermiştir. MgO nanopartiküllerinin Al matrisine eklenmesi, sertlik ve basma dayanımında artış sağlamış ve bu artış döküm numunelerinde daha belirgin olmuştur. En yüksek sertlik değerleri, döküm ve sinterleme numuneleri için sırasıyla 850 °C ve 625 °C'de, hacimce %5 MgO içeriğinde elde edilmiştir. SEM görüntüleri, sinterlenmiş kompozitlerde daha yüksek gözeneklilik ve döküm numunelerinde MgO nanopartiküllerinin daha fazla topaklandığını ortaya

koymuştur. TM yöntemine kıyasla, döküm yöntemi daha düşük gözeneklilik ve daha yüksek mekanik performans göstermiştir.

Akhlaghi ve Zare-Bidaki (2009), ağırlıkça %5–20 oranlarında grafit içeren Al₂O₃ matrisli kompozitleri TM yöntemiyle üreterek, bu kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. alışmalarında, retim yönteminin kompozitlerin matris tane boyutu, gözeneklilik düzeyi ve grafit dağılımı gibi mikroyapısal özellikleri etkileyerek arayüzey davranışı üzerinde belirleyici rol oynadığını ifade etmişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, artan grafit içeriği kompozitlerin sertlik ve eğilme dayanımı değerlerinde azalmaya yol açmıştır. Bununla birlikte, grafit miktarındaki artış hem kuru hem de yağ emdirilmiş kayma koşullarında sürtünme katsayısını düşürmüş, ancak bu etkinin kuru kaymada daha belirgin olduğu görülmüştür. Her iki durumda da %5 grafit içeren kompozitlerde aşınma oranı temel alaşıma kıyasla daha düşük bulunurken, grafit oranının bu değerin üzerine çıkarılması aşınma oranında artışa neden olmuştur.

Amirkhanlou ve Ji (2020), Al esaslı alaşımlarda Young modülünün yapısal performansın kontrolünde kritik bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. alışmalarında, alaşım elementlerinin Young modülüne etkisinin faz durumuna bağlı olduğunu; katı czelti fazında atomik etkileşimlerin, ikinci faz oluşturduklarında ise bu fazların hacim oranı ve kendi elastisite modüllerinin belirleyici rol oynadığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, yalnızca alaşım elementleri ile sağlanan modül artışının genellikle %15’in altında kaldığını, bu nedenle anlamlı bir rijitlik artışı için seramik parçacıklar veya takviye fazlarının ilavesinin gerekli olduğunu vurgulamışlardır. AMK’larda Young modülünü belirleyen başlıca faktörlerin takviye fazının hacim oranı, boyut oranı ve arayüz özellikleri olduğunu; matris-takviye arasındaki güçlü arayüz bağının yk transferini etkin kılarak yalnızca Young modülünü değil, diğer mekanik özellikleri de geliştirdiğini ortaya koymuşlardır.

Bai ve ark. (2024), karbon fiber takviyeli titanyum/alüminyum sandviç kompozitlerin sıvı-katı infiltrasyon ekstrüzyon yöntemiyle üretilmesine yönelik yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Mekanik zellikler, mikroyapı, termal deformasyon ve korozyon direnci analizleri, Ti/Al interdifzyonuyla oluşan 10 µm genişliğindeki Al₃Ti geçiş tabakasının sandviç kompozitte meydana geldiğini ve karbon fiberlerin bu yapıda bir iç yapı oluşturduğunu göstermiştir. Karbon fiber-Al kompozitlerine kıyasla, bu sandviç kompozitin çekme dayanımı, elyafların eksenel ve radyal yönlerinde sırasıyla %137,04 ve %207,55 oranında artmış ve basınç dayanımı da belirgin şekilde iyileşmiştir.

Behera ve ark. (2022), TM yöntemi kullanarak geliştirdikleri Al-0.5Si-0.5Mg-2.5Cu-15SiC kompozitinin erozyon aşınma davranışlarını Taguchi deney tasarımı ve istatistiksel analiz yöntemleriyle incelemişlerdir. Çalışmada, SiC parçacıklarının metalurjik toz yolu ile matrise dahil edilmesinin erozif aşınma direncini %200–300 oranında artırabildiği rapor edilmiştir. Ayrıca, erozyon aşınma oranının çarpma hızından bağımsız olarak artan çarpma açısıyla azaldığı, en yüksek aşınmanın ise 30°'lik en düşük çarpma açısında meydana geldiği belirlenmiştir. Daha yüksek çarpma hızlarında erozyon oranının arttığı, buna karşılık stand-off mesafesi arttıkça parçacıkların kinetik enerjisini kaybetmesi nedeniyle erozyon oranının azaldığı ifade edilmiştir.

Bharathi ve Sampath Kumar (2023), TM ve mekanik alaşımlama yöntemi ile farklı oranlarda SiC takviyeli Al matris kompozitler ile sabit %2 B₄C eklenmiş hibrit kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin mekanik ile tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, Al+%6 SiC ve Al+%4 SiC+%2 B₄C kompozitlerinin sertlik değerlerinin saf Al matrisine göre %20,6 daha yüksek olduğu, bu artışın tane inceliği ve dislokasyon hareketine karşı dirençten kaynaklandığı rapor edilmiştir. SEM analizleri, Al+%4 SiC+%2 B₄C hibrit kompozitinde homojen dağılım ve güçlü arayüz bağlanması olduğunu, yüksek takviye oranlarına sahip hibritlerde ise kümelenme ve gözenekliliğin artarak mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini göstermiştir. XRD sonuçları, Al fazlarının yanı sıra SiC ve B₄C'nin karakteristik piklerini ortaya koyarken yeni bileşik oluşmadığı belirlenmiştir. Mekanik testlerde en yüksek sıkıştırma mukavemeti ve yoğunluk değerine (%94, 2.817 g/cm³) Al+%4 SiC+%2 B₄C hibrit kompozitinde ulaşıldığı, aşınma testlerinde ise 5 N ve 10 N yükler altında en düşük aşınma oranının Al+%5 SiC+%2 B₄C hibrit kompozitinde elde edildiği rapor edilmiştir.

Channi ve Channi (2025), AMK'ların gelişimi, işleme teknikleri, mekanik performansı ve aşınma özellikleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapmışlardır. Çalışmada, grafen ile takviye edilmiş AMK'lardaki ilerlemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir. TM yöntemi içinde özellikle spark plazma sinterleme tekniğinin yüksek yoğunluk ve faz kararlılığı sağladığı vurgulanmıştır. SiC ve karbon bazlı malzemeler gibi takviyelerin tane yapısını incelterek çekme mukavemeti, sertlik ve aşınma direncini artırdığı, nanoparçacıkların kullanılmasının yapısal bütünlüğü güçlendirdiği ve kendi kendini yağlayan elementlerin ise üstün tribolojik özellikler sağladığı rapor edilmiştir. Ayrıca, doğal minerallerin sürdürülebilir ve ekonomik takviye alternatifleri sunduğu da çalışmada öne çıkarılmıştır.

Chouhan ve ark. (2024), yüksek sertlik ve darbe dayanıklılığına sahip çok katmanlı Al7075/SiC işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemenin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Sıcak sıkıştırılmalı TM yöntemi kullanılarak üretilen malzemelerde, sıkıştırma basıncı, sıcaklık ve tutma süresi gibi kritik süreç parametreleri Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi ve gri ilişkisel analiz ile optimize edilmiştir. Numunelerin tokluğu ve mikrosertliği sırasıyla Charpy darbe ve Vickers sertlik testleriyle ölçülmüş, morfoloji, kırılma yüzeyi, element bileşimi ve faz yapısı SEM, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve XRD ile incelenmiştir. Analizler, 400 MPa sıkıştırma basıncı, 400 °C sıcaklık ve 15 dakikalık tutma süresi ile elde edilen kombinasyonun en yüksek gri ilişkisel dereceyi verdiğini göstermiş, optimize parametreler ile tokluk ve mikrosertlikte sırasıyla %25,05 ve %28,08 iyileşme sağlanmıştır. ANOVA sonuçları, mekanik yanıtlar üzerinde en etkili parametrenin sıcaklık (%53,74), ardından basınç (%40,37) ve tutma süresi (%1,98) olduğunu ortaya koymuştur. Mikroyapı incelemeleri, SiC parçacıklarının matriste homojen dağıldığını, tabakalar arası bağlanmanın güçlü olduğunu ve kırılma yüzeyinde hem gevrek hem sünek davranışın bir arada gözlemlendiğini göstermiştir. Bu durum, malzemenin darbe sırasında enerjiyi etkin şekilde absorbe ederek yüksek tokluk göstermesini sağlamıştır.

Çelik ve ark. (2018), 1–210 µm partikül boyutundaki Al matrisine 25–44 µm boyutunda ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında B₄C partikülleri ekleyerek, 400 ve 470 MPa presleme basınçlarında TM yöntemiyle ürettikleri kompozitlerin sertlik ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Araştırma sonuçları, B₄C oranı arttıkça sertlik değerlerinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir. En yüksek sertlik değeri, 475 MPa presleme basıncında üretilen ve %12 B₄C takviyeli numunede 51,3 HV olarak ölçülmüştür. Ayrıca, sertlik artışı ile birlikte aşınma direncinin de iyileştiği tespit edilmiştir. Presleme basıncı ve takviye miktarının artışı, aşınma kaybının azalmasına katkı sağlamıştır. En fazla aşınma 400 MPa presleme basıncında üretilen takviyesiz numunede gözlenmiştir.

Çelik ve Kilickap (2019), TM yöntemiyle farklı oranlarda B₄C ve SiC takviyeli Al matrisli kompozit ve hibrit kompozitler üretmişlerdir. Üretilen numunelerin mikroyapıları, sertlik değerleri ve aşınma davranışları incelenmiştir. Sertlik testleri, takviye oranının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. En yüksek değer, %16 B₄C takviyeli kompozitte 58,7 HV, %16 SiC takviyeli kompozitte ise 53,3 HV olarak elde edilmiştir. Hibrit kompozitlerde sertlik, kullanılan takviye fazının oranına yakın bir değerde ölçülmüştür. Mikroyapı gözlemleri, takviye parçacıklarının

matris içinde homojen dağılımının sertlik üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Aşınma testleri, takviye oranının artmasının ağırlık kaybını azalttığını, yük ve kayma mesafesinin artmasının ise aşınmayı artırdığını göstermiştir. Maksimum ağırlık kaybı, takviyesiz malzemede 15 N yük ve 750 m kayma mesafesinde 44,7 mg olarak ölçülmüş, minimum ağırlık kaybı ise %16 SiC takviyeli kompozitte 5 N yük ve 250 m kayma mesafesinde 18 mg olarak belirlenmiştir. Araştırmada, yüksek sertlik isteyen uygulamalar için B₄C, yüksek aşınma direnci gereken durumlar için SiC ve her iki özelliğin bir arada istenmesi durumunda B₄C/SiC hibrit takviyesinin tercih edilmesi önerilmiştir.

Güteryüz ve ark. (2012), B₄C partikülleriyle takviye edilmiş magnezyum metal matrisli kompozitlerin TM yöntemiyle üretimini ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada %3, %6 ve %9 B₄C takviyesi içeren kompozitler üretilmiş ve mikroyapı ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, B₄C partiküllerinin matriste homojen dağıldığı gözlemlenmiş ve yapılan faz analizlerinde kompozitte MgO, Al₂O₃ ve MgB₂ fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Sertlik değerleri B₄C takviyesi ile artmış ve en yüksek sertlik %9 B₄C içeren kompozitte elde edilmiştir. Eğilme testi sonuçları ise en yüksek eğilme dayanımının %3 B₄C takviyesi ile elde edildiğini göstermiştir.

Haque ve ark. (2022), TM proses parametrelerinin ve yaşlandırma işleminin nano Al₂O₃ takviyeli Al6063 matrisli kompozitlerin sertlik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test numuneleri, mekanik öğütme ve harmanlamanın ardından sıcak tek eksenli toz sıkıştırması yöntemiyle üretilmiştir. Bulgular, Al₂O₃ nanoparçacıklarının eklenmesiyle sertlik değerlerinde artış olduğunu ve bu artışın %6 hacim nano Al₂O₃ içeriğine kadar sürdüğünü, %8 ilave edildiğinde ise aglomerasyon ve zayıf partikül dağılımı nedeniyle sertlikte düşüş gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Aşınma oranı ise nano Al₂O₃ içeriği arttıkça azalmış, en düşük aşınma değerleri 60 dakikalık sıkıştırma süresinde elde edilmiştir. 90 dakikalık sıkıştırma süresi ise aşınma oranında artışa yol açmıştır. Ayrıca, yaşlandırma işleminin numunelerin hem sertlik hem de aşınma direnci üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığı rapor edilmiştir.

Li ve ark. (2016), TiC parçacıkları ve TiB elyafları ile güçlendirilmiş titanyum matrisli kompozitleri TM ve sıcak ekstrüzyon yöntemiyle hazırlamışlardır. TiB elyafları, sıcak ekstrüzyon işleminden sonra deformasyon eksenine paralel olarak hizalanırken, TiC parçacıkları ve TiB elyafları ekstrüde edilen kompozitler boyunca homojen bir şekilde dağılmıştır. %13,6 hacim fraksiyonuna sahip TiC–TiB hibrit güçlendiricileri içeren

kompozitlerin, saf titanyuma kıyasla çekme dayanımında %74'lük bir iyileşme sağladığı ve %2,6'lık kabul edilebilir bir uzama oranını koruduğu raporlanmıştır.

Nayak ve ark. (2022), TM yöntemi kullanarak hibrit Al/SiC/Al₂O₃ kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiş ve özellikle sinterleme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. SiC parçacıklarının hacim yüzdesindeki artışın (sabit Al₂O₃ yüzdesi için) sertliği artırdığı, ancak Al/SiC karışımına Al₂O₃ partiküllerinin hacim yüzdesindeki artışın yoğunluğu, sertliği ve sıkıştırma mukavemetini azalttığı gözlemlenmiştir. Takviyelerin aşırı miktarda eklenmesinin (hacimce %7 SiC ve %3 Al₂O₃ üzeri) zayıf sinterlenebilirliğe yol açarak sıkıştırma mukavemetini düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca sinterleme süresinin 30 dakikadan 90 dakikaya çıkarılmasının %7 SiC takviyeli Al kompozitinde yoğunluk ve sertlikte belirgin bir iyileşme sağladığı rapor edilmiştir. Çalışmada, optimum sinterleme koşulunun 700 °C'de 60 dakika olduğu ve bu koşulun hibrit kompozitlerde en yüksek yoğunluk ve mekanik özellikleri sağladığı tespit edilmiştir.

Padmavathi ve Ramakrishnan (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AMK'ların tribolojik ve mekanik davranışları incelenmiş ve farklı takviye oranlarının kompozitlerin sürtünme, aşınma ve sertlik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, Al6061 alaşımı, çok duvarlı karbon nanotüp ve SiC takviyeleri ile üretilmiş ve kompozitlerin sertlik ile aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, en yüksek sertliğin SiC takviyeli numunede elde edildiğini ve çok duvarlı karbon nanotüp ilavesinin sertliği azalttığını göstermiştir. Öte yandan, çok duvarlı karbon nanotüp ilavesi aşınma deneylerinde sürtünme katsayısını belirgin şekilde azaltmış ve kompozitin aşınma direncini artırmıştır.

Pasha ve ark. (2022), Al7075 matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışları üzerindeki tekli ve hibrit takviyelerin ağırlık yüzdesinin etkisini inceleyen mevcut bilimsel makaleleri derlemişlerdir. Çalışmada karbürler (SiC, TiC, WC, B₄C), nitrürler (Si₃N₄, h-BN, ZrN), oksitler (Al₂O₃, TiO₂) ve diğer takviyeler (uçucu kül, red mud, mermer tozu vb.) dahil olmak üzere yaygın kullanılan pek çok takviye türü değerlendirilmiştir. Bulgular, SiC, TiC, Al₂O₃ ve B₄C gibi dolgu maddelerinin mekanik ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesinde daha etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle Al7075 matrisinde SiC içeriğinin %6 ağırlık yüzdesine kadar artırılmasının çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini yükselttiği, ancak bu oranın üzerinde mekanik özelliklerin bir miktar gerilediği rapor edilmiştir. Ayrıca tribolojik performansı etkileyen başlıca proses parametrelerinin normal yük, kayma mesafesi ve kayma hızı olduğu

belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca üretim yöntemleri açısından karıştırma döküm, sıkıştırma döküm, TM ve sürtünme karıştırma yöntemi gibi teknikler karşılaştırılmış; bunlar arasında düşük maliyet ve uygulanabilirlik açısından karıştırma dökümün öne çıktığı vurgulanmıştır. Yazarlar, gelecekte Al7075 matrisinde yeni nanoparçacıkların takviye olarak değerlendirilmesi gerektiğini, ayrıca takviye parçacıklarının aglomerasyon ve kümelenme problemlerini azaltmaya yönelik araştırmalara ihtiyaç olduğunu da ifade etmişlerdir.

Rahimian ve ark. (2009), Al_2O_3 partikül boyutunun, sinterleme sıcaklığı ve süresinin Al- Al_2O_3 kompozitlerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada Al_2O_3 partikül boyutları 3, 12 ve 48 μm olarak belirlenmiş ve sinterleme işlemleri 500–600 °C sıcaklık aralığında 30–90 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Analizler, Al_2O_3 partikül boyutunun artışıyla kompozitlerin yoğunluğunun genel olarak yükseldiğini, ancak bağıl yoğunluğun belirli koşullarda azaldığını göstermiştir. Al_2O_3 partikül boyutunun 3 μm 'den 12 μm 'ye çıkarılması bağıl yoğunlukta artışa neden olurken, 48 μm 'ye ulaşması yoğunlukta azalmaya yol açmıştır. En yüksek bağıl yoğunluk 600 °C'de sinterlenen numunelerde %99,95 olarak gözlenmiştir. Mekanik özellikler açısından, ince partiküller (ortalama 3 μm) 600 °C'de 45 dakika sinterlendiğinde en yüksek sertlik olan 76 HB değerine ulaşmış, sinterleme süresi 90 dakikaya çıkarıldığında sertlik 59 HB'ye düşmüştür. Benzer şekilde, basma dayanımı en yüksek 318 MPa olarak ölçülmüş ve maksimum kırılma uzaması %61,8 olarak kaydedilmiştir. Daha uzun sinterleme süreleri mekanik dayanımı olumsuz yönde etkilemiştir.

Ranjan ve Bajpai (2021), grafen takviyeli MMK'ların geliştirilmesi ve bu süreçte karşılaşılan zorlukları inceledikleri çalışmalarında, grafen ilavesinin kompozitlerin mekanik özelliklerini belirgin biçimde iyileştirdiğini rapor etmişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlar, metal matris içerisine grafen eklenmesiyle çekme dayanımı ve sertlik değerlerinde artış sağlandığını göstermiştir. Ayrıca, grafen takviyesinin kompozitlerin termal iletkenliğini artırdığı ve aşınma direncini geliştirdiği belirtilmiştir. Ancak, çalışmada grafen ile takviye edilen kompozitlerin üretiminde karşılaşılan zorluklar, özellikle homojen dağılım sağlama ve üretim maliyetlerinin yüksekliği gibi sorunlar olarak vurgulanmıştır.

Rashad ve ark. (2015), Mg-Al-grafen nanoplatelet takviyeli nano kompozitleri TM yöntemi ile sentezlemişlerdir. Araştırmalarında, grafen nanoplatelet içeriğini ağırlıkça %0,18 sabit tutmuş ve Al içeriğini ağırlıkça %0,5 ile %1,5 arasında

değiştirmişlerdir. Al–grafen nanoplateletlerin saf Mg’ye eklenmesinin etkisini çekme ve Vickers sertlik testleri ile incelemişlerdir. Bulgularına göre Al içeriğindeki artış, akma mukavemeti, kopma mukavemeti ve kopma uzamasında artışa yol açmıştır. Ancak Al içeriği %1’in üzerine çıktığında kopma uzamasının azalmaya başladığını belirtmişlerdir. En iyi sonuçların Mg–1.0Al–0.18 grafen nanoplatelet numunesinden elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, sentezlenen kompozitlerin mekanik dayanımının Mg–Al–karbon nanotüp ve Mg–seramik kompozitlerden daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

Wang ve ark. (2012), grafen nano tabakaları ile takviye edilmiş AMK’ları TM yöntemiyle üretmişlerdir. Yalnızca %0,3 grafen nano tabaka içeren Al kompozitinde 249 MPa çekme dayanımı elde edilmiş ve bu değer takviyesiz Al matrisine kıyasla %62’lik bir artış sağlamıştır. Ayrıca, üretilen kompozitler %5’in üzerindeki üniform uzama değerleriyle mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir süneklik göstermiştir. Sonuçların teorik beklentilerin altında kaldığı vurgulansa da grafen nano tabakalarının metal matrisli kompozitlerde etkili bir takviye fazı olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Zhu ve ark. (2001), TM yöntemiyle ZrO_2 –NiCr fonksiyonel malzemelerin üretimini incelemişlerdir. Araştırmalarında, ZrO_2 ve NiCr tozlarını belirli oranlarda karıştırarak sıcak presleme ve sinterleme işlemleriyle adım adım üretmişlerdir. Mikroyapı analizleri, XRD ve SEM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gözlemler, ZrO_2 ve NiCr bileşenlerinin malzeme boyunca kademeli bir şekilde dağıldığını ve geleneksel seramik/metal makroskobik arayüzeylerinin ortadan kalktığını göstermiştir. Sinterleme sırasında, farklı bileşimlerin farklı büzülme davranışları sergilediği ve saf bileşenlerde neredeyse tam yoğunlaşma sağlanırken, karışım bileşimlerinde bu sürecin daha zor olduğu gözlemlenmiştir. Faz analizleri, Cr elementinin neredeyse tamamen Ni matrisinde çözüldüğünü ve ZrO_2 fazının büyük ölçüde tetragonal, az miktarda ise monoklinik yapı içerdiğini ortaya koymuştur. Mekanik testler, sertliğin Ni içeriğinin artışı ve gözeneklilikle birlikte azaldığını, eğilme dayanımının ise bileşimle monoton bir değişim göstermediğini ortaya koymuştur. Saf bileşenlerde yüksek olan eğilme dayanımı, ara bileşimlerde gözeneklilik ve matris sürekliliği farklılıklarına bağlı olarak düşmüştür.

Zhu ve ark. (2024), karbon fiber takviyeli AMK’larda dört farklı korozyon bariyer kaplamasının (Ni, TiO_2 , ZnO ve Al_2O_3) arayüz tepkimeleri, mekanik özellikler ve elektrokimyasal korozyon direnci üzerindeki etkilerini sıkıştırma döküm yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışmada, kaplama uygulanmamış numunelerde fiber-matris etkileşimi sonucu Al_4C_3 fazının oluştuğu ve bunun mekanik dayanımı düşürdüğü belirlenmiştir.

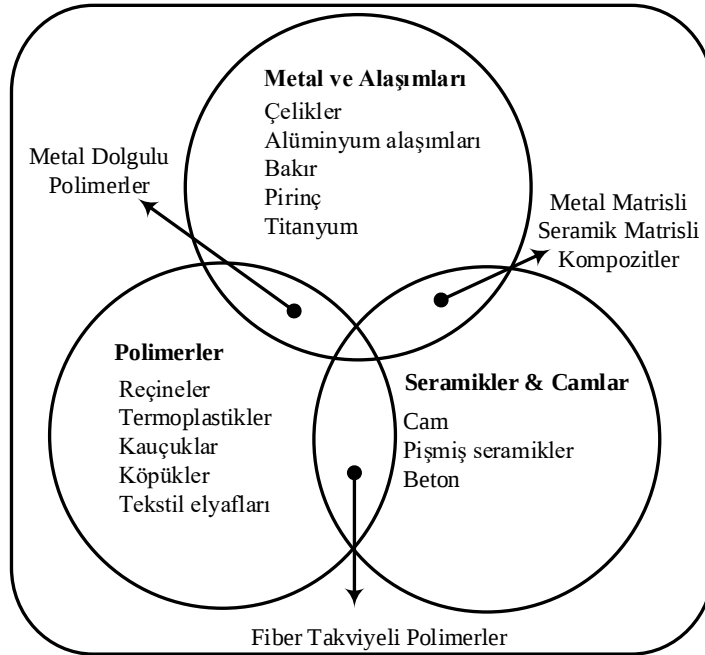
Korozyon bariyeri kaplama uygulanmasıyla Al_4C_3 oluşumu önemli ölçüde baskılanmış, özellikle ZnO kaplı kompozitlerde en yüksek iyileşme sağlanmıştır. Bu numunelerde eğilme dayanımı 796,4 MPa ve elastisite modülü 105,3 GPa olarak ölçülmüş, bu değerler kaplamasız numunelere kıyasla sırasıyla %114 ve %52,2 daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, korozyon bariyeri kaplamalı kompozitler 7 günlük tuzlu çözeltiye daldırma sonrası mekanik performanslarını koruyarak üstün korozyon direnci sergilemiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Ulaşım, havacılık ve su altı teknolojileri gibi stratejik mühendislik alanlarında kullanılan malzemelerden beklenen temel özellikler; düşük yoğunluk, yüksek dayanım, darbe direnci, sertlik ve aşınmaya karşı dirençtir. Son yirmi beş yılda, bu alanlardaki performans gereksinimlerinin önemli ölçüde artması, gelişmiş malzeme çözümlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Geleneksel mühendislik malzemeleri ise genellikle yüksek dayanımın yüksek yoğunlukla ilişkili olması veya sertlik ve dayanım artışının darbe direncinde azalmaya yol açması gibi sınırlamalar nedeniyle bu gereksinimleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamaları aşmak için farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin tek bir yapı içinde birleştirilmesi gerekmektedir (Padmavathi ve Ramakrishnan, 2014). Bu doğrultuda, üstün mekanik, fiziksel ve termal performans özellikleriyle öne çıkan kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozit malzemelerin mühendislik malzeme sınıfları arasındaki ilişkilerini gösteren şematik gösterim Şekil 2.1’de verilmiştir (Harris, 1999).



Şekil 2.1. Mühendislik malzemeleri ile kompozitlerin ilişkisi (Harris, 1999)

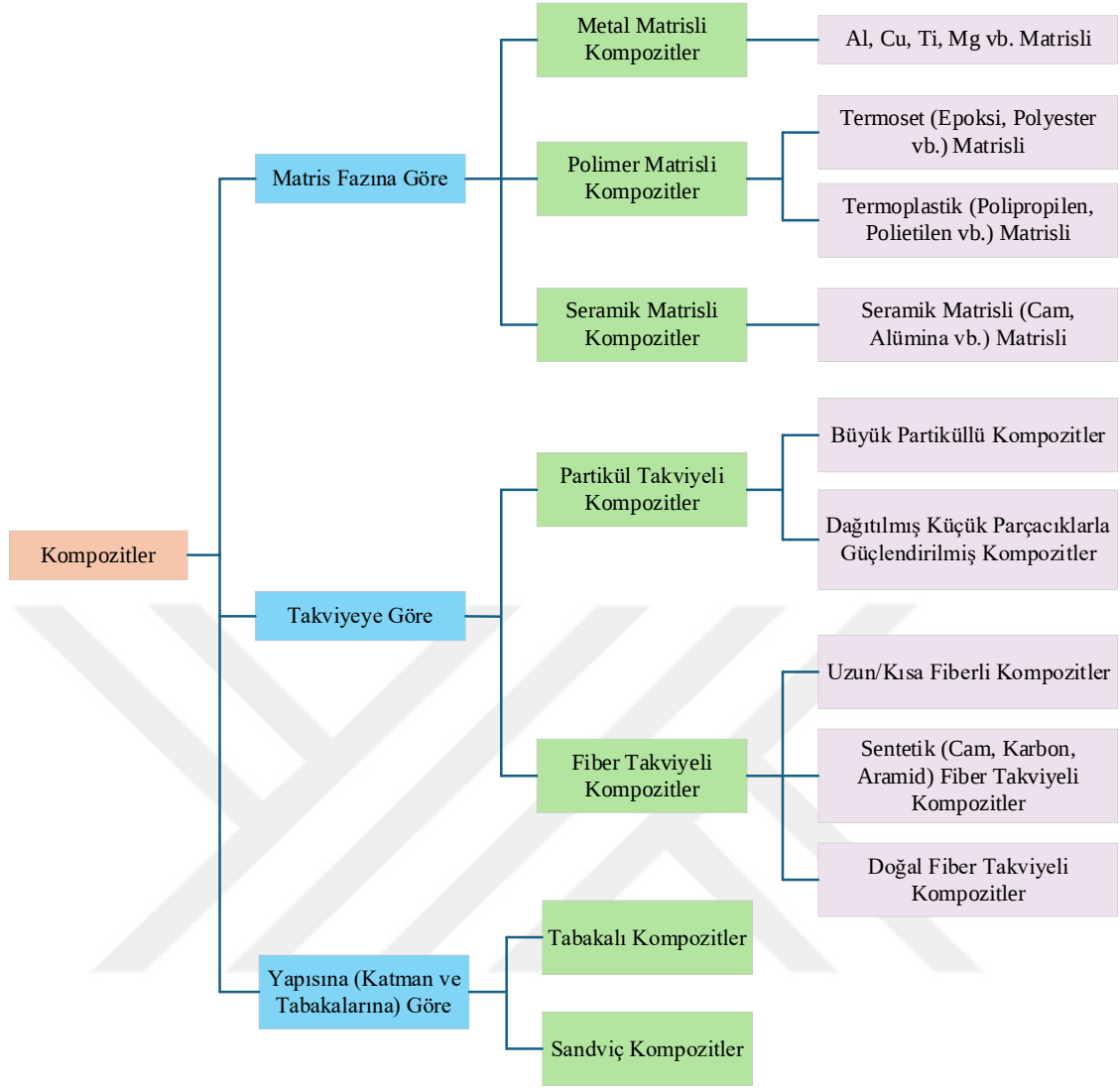
Kompozit malzemeler, yüksek mukavemetli ve yüksek elastik modüllü takviye elemanlarının sünek bir matris yapısı içinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok bileşenli sistemler olarak tanımlanır. Bu yapısal konfigürasyon, nihai malzemenin mekanik özellikler açısından hem matris alaşımının hem de takviye elemanının sağladığı özellikler arasında dengeli bir bileşim sunmasını sağlamaktadır. Kompozit sistemdeki her bir bileşen, tanımlı bir işlevi yerine getirir:

Takviye Elemanları: Malzemeye sertlik ve dayanım kazandırma temel göreviyle, çekme veya basma gibi harici mekanik yükleri taşıyan ana unsurlardır.

Matris (Sünek Faz): Takviye elemanlarını bir arada tutarak yapısal bütünlüğü sağlar, yük transferini etkin bir şekilde gerçekleştirir ve fiberleri çevresel faktörlere karşı koruma görevini üstlenir.

Bu çok bileşenli mimari sayesinde, kompozit malzemeler genellikle tek başına kullanılan monolitik malzemelere kıyasla daha üstün performans sergiler. Bir kompozit malzemenin göstereceği performans ve özellikler, bileşenlerin şekli, boyutu, yapının içerisindeki yerleşimi ve dağılımı ile bu bileşenlerin birbirine göre hacim oranlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Ayrıca, mikroyapı özellikleri, homojenlik düzeyi ve izotropi de kompozitin nihai özelliklerini belirleyen başlıca unsurlar arasında yer alır.

Kullanılan fazların niteliklerine ve oranlarına bağlı olarak, kompozitlerin Young modülü, kayma modülü, Poisson oranı, sürtünme katsayısı ve ısı genleşme katsayısı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri farklılaşır. Bu özelliklerin tahmini ve modellenmesi amacıyla çeşitli tahminsel modeller geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler, yapısal çeşitlilikleri nedeniyle farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Takviye elemanı olarak doğal liflerin kullanılması durumunda, bu malzemeler “doğal fiber takviyeli kompozitler” olarak adlandırılır. Sentetik fiberler veya parçacıklar kullanıldığında ise “yapay fiber takviyeli kompozitler” veya “fiber/parçacık takviyeli kompozitler” şeklinde tanımlanır. Yapay fiber veya parçacıkla güçlendirilmiş malzemeler hem kullanılan takviye elemanının türüne hem de matris bileşenine göre farklı alt gruplara ayrılır (Geçkinli, 1992; Karcı, 2009; Iyer, 2015). Kompozit malzemelerinin ayrıntılı olarak sınıflandırılması Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerinin sınıflandırılması (Sumithra ve ark., 2023)

2.1.1. Matris malzemesine göre kompozitler

2.1.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Kompozit malzemeler, farklı malzeme özelliklerini bir araya getirerek üstün mekanik ve fiziksel performans elde etmeyi amaçlayan mühendislik malzemeleridir. Bu malzemelerde en yaygın tercih edilen matris türü polimerlerdir. Polimerlerin bu denli yaygın kullanılmasının iki temel nedeni vardır. Birincisi, polimerlerin dayanım ve rijitlik değerlerinin metaller ve seramikler kadar yüksek olmaması nedeniyle yapısal uygulamalarda mekanik özelliklerinin yetersiz kalmasıdır. Bu sınırlılık, polimerlerin uygun takviye malzemeleri ile güçlendirilmesini gerekli kılmakta ve böylece hem

mekanik özelliklerde belirgin bir artış sağlamakta hem de kullanım alanlarını önemli ölçüde genişletmektedir. İkincisi, polimerlerin üretim süreçlerinde yüksek sıcaklık ve basınç ihtiyacı duymamaları, kompozit üretiminde kolaylık ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Bu iki faktör, polimer matrisli kompozitlerin (PMK'ların) mühendislik uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmasının temel gerekçelerini oluşturmaktadır (Alovsat, 2024).

PMK, bir polimer matrisine ek bileşenlerin takviye olarak dahil edilmesiyle oluşturulur. Bu nedenle bu kompozit malzeme sürekli faz (polimer matris) ve dağılmış faz (takviye) olmak üzere iki temel bileşene sahiptir. Termosetler veya termoplastikler, PMK'larda sürekli faz olarak kullanılır (Sharma ve ark., 2022)

PMK üretiminde en yaygın kullanılan matrisler termosetlerdir. Özellikle epoksi ve polyester en sık kullanılanlarıdır. Sıvı formda olmaları ve sertleştirici eklenerek belirli bir zaman aralığında kürleşme işleminin gerçekleşmesi bu tercihlerin en önemli sebeplerindendir. Bu nedenle cam fiber ve karbon fiber gibi sentetik fiberler ile jute ve rami gibi doğal fiberli kompozitlerde termosetler kullanılır. Termosetlerin sıvı formda olması, üretim yöntemlerinde el yatırma, reçine transfer kalıplama ve vakum torbalama gibi tekniklerin tercih edilmesini sağlar (Biron, 2007; Matykiewicz ve Skórczewska, 2022; Sharma ve ark., 2022; Mahmud ve ark., 2025; Fekiaç ve ark., 2025).

Diğer taraftan, PMK'larda termoplastikler de sürekli faz olarak kullanılabilir. En yaygın termoplastik matrisler arasında polipropilen, polietilen, poliamid ve polikarbonat gelmektedir. Termoplastik reçineler belirli sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında, polimerlerin karakteristik camsı geçiş sıcaklığına bağlı olarak yumuşama eğilimi gösterirler. Bu özellikleri sayesinde ısı ve basınç uygulanarak şekillendirilebilirler ve bu sürekli fazın kullanıldığı kompozitlerde kısa veya uzun lifler, parçacıklar veya tekstil yapıları takviye olarak eklenir. Termoplastik polimer matrisli kompozitlerde enjeksiyon kalıplama ve vakum destekli sıcak presleme gibi üretim yöntemleriyle üretilir (Miranda Campos ve ark., 2022; Ozturk ve ark., 2024; Shen ve ark., 2025).

PMK'ların üstün mekanik özelliklere sahip olmaları ve üretimlerinin kolay olması, bu kompozitlerin çok çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmasını sağlamaktadır. Otomotiv parçaları, uçak yapısal bileşenleri, elektronik cihazlar, spor ekipmanları ve inşaat sektöründe taşıyıcı elemanlarda PMK'lar yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, korozyon direncine sahip olmaları ve hafif yapıları sayesinde denizcilik, enerji ve savunma sanayii uygulamalarında da önemli avantajlar sunmaktadır (Oladele ve ark., 2020; Sajan ve Selvaraj, 2021).

2.1.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (SMK'lar), ileri mühendislik malzemeleri kategorisinde yer almakta olup, seramik bir matris içerisine yerleştirilmiş fiber veya parçacık takviyelerinden oluşmaktadır (Rashid ve ark., 2024; Shrivastava ve ark., 2024). SMK'ların geliştirilmesindeki temel motivasyon, monolitik seramiklerin düşük kırılma tokluğu, gevrek kırılma davranışı ve çatlamaya yatkınlık gibi sınırlamalarını aşmaktır (Karadimas ve Salonitis, 2023).

Geleneksel seramikler yüksek sertlik, aşınma direnci ve kimyasal kararlılık gibi avantajlara sahip olsalar da dış yükler altında kolayca kırılabilme, yüksek sıcaklık ve ağır mekanik koşullar altındaki kullanım alanlarını sınırlamaktadır. SMK'lar ise bu dezavantajları giderecek şekilde tasarlanmış olup, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci ve hasar toleransı gibi üstün özellikleriyle öne çıkmaktadır (Shrivastava ve ark., 2024). Fiber–matris arayüzünde çatlak ilerlemesinin durdurulması ve yönlendirilmesi sayesinde, gevrek bileşenlerden oluşan bu sistemler beklenmedik derecede yüksek tokluk sergileyebilmektedir (Rashid ve ark., 2024).

SMK'ların sınıflandırılması genel olarak oksit ve oksit olmayan sistemler şeklinde yapılmakla birlikte, kullanılan matrisler çoğunlukla oksitler, karbürler ve nitrürler olarak üç grupta ele alınmaktadır. Oksit matrisler içerisinde Al_2O_3 ve ZrO_2 en yaygın kullanılan malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklarda oksidatif ortamlara karşı kararlılıkları nedeniyle özellikle gaz türbinleri ve motor bileşenlerinde tercih edilmektedirler (Karadimas ve Salonitis, 2023). Bununla birlikte, oksit matrislerin kullanım sıcaklığı genellikle $1200\text{ }^{\circ}C$ ile sınırlıdır (Shrivastava ve ark., 2024). Karbür esaslı matrisler arasında SiC , B_4C ve TiC yüksek ergime sıcaklıkları, aşınma dirençleri ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle öne çıkmaktadır. Özellikle SiC/SiC kompozitleri, üstün yüksek sıcaklık dayanımları sayesinde jet motorları, hipersonik araçlar ve nükleer enerji uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulmuştur (Karadimas ve Salonitis, 2023; Qu ve ark., 2025). Nitrür esaslı matrisler arasında ise Si_3N_4 ve AlN yüksek termal şok direnci ve dayanıklılıklarıyla dikkat çekmekte olup elektronik, optik ve yüksek sıcaklık yapısal uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Shrivastava ve ark., 2024).

Bu matris sistemleri, sürekli fiber, kısa fiber veya nanopartikül gibi farklı takviye türleriyle birleştirilerek özel mühendislik gereksinimlerine uyarlanabilmektedir.

Özellikle karbon ve SiC elyafları günümüzde en yaygın kullanılan takviye elemanları arasında yer almaktadır (Qu ve ark., 2025).

SMK'ların üretim süreçleri, nihai malzemenin mikroyapısı, mekanik özellikleri ve gözenek miktarını belirleyen kritik faktörlerdir. Geleneksel sinterleme ve sıcak presleme yöntemleri parçacık takviyeli kompozitler için uygunken, sürekli elyaf takviyeli sistemlerde ise infiltrasyon tabanlı yöntemler daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Qu ve ark., 2025).

2.1.1.3. Metal matrisli kompozitler

Modern teknolojinin artan malzeme talepleri ve geleneksel malzemelerin (polimerler, metaller, seramikler) sınırlılıkları, yeni nesil mühendislik malzemelerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda ortaya çıkan metal matrisli kompozitler (MMK'lar), metal veya alaşım matris içerisine whisker (bıyık), lif ya da partikül gibi takviye elemanlarının katılmasıyla üretilen gelişmiş malzemelerdir (Bahl, 2021).

MMK'lar, yapısal olarak matris ve takviye olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Matris, sürekli fazı oluşturan metal veya alaşımdır, takviyeleri bir arada tutar, aralarındaki gerilmeleri aktarır ve yüksek kopma gerilimi ile yapının bütünlüğünü sağlar (Kumar ve ark., 2021). Takviye ise matris içerisine gömülen güçlendirici fazdır ve kompozitin mekanik, tribolojik ve fiziksel özelliklerini geliştirme görevini üstlenir (Sharma ve ark., 2023; Demir ve ark., 2023).

Takviyesiz metallere kıyasla MMK'ların sağladığı başlıca avantajlar arasında; yüksek özgül mukavemet, iyi özgül rijitlik, gelişmiş aşınma direnci, artan sönümleme kabiliyeti ve yüksek sıcaklık kararlılığı yer almaktadır (Demir ve ark., 2022). Ancak MMK'ların yüksek maliyet, karmaşık üretim süreçleri ve sınırlı endüstriyel deneyim gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Bahl, 2021).

MMK'larda kullanılan matris ve takviye elemanları, bu kompozitlerin üretim yöntemleri ile söz konusu yöntemlerin birbirine göre üstünlükleri ve sınırlılıkları hakkında ayrıntılı bilgiler, 2.2. başlığı altında detaylı olarak sunulacaktır.

2.1.2. Takviyeye göre kompozitler

Kompozit malzemeler, takviye türüne bağlı olarak partikül takviyeli ve fiber takviyeli olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Partikül takviyeli kompozitler, matris

yapıya mikron veya nano boyutundaki parçacıkların eklenmesiyle elde edilir. Bu tür malzemelerde özellikle metallerin aşınma direncini, sertliğini ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik performansını artırmak amacıyla genellikle nitrür, oksit veya karbür esaslı partikül takviyeleri tercih edilmektedir (Pugacheva ve ark., 2016; Kumar ve Birru, 2017; Clyne ve Hull, 2019).

Fiber takviyeli kompozitler ise ince fiberlerin matris içerisinde düzenlenmesiyle oluşturulur. Fiberlerin varlığı, malzemenin dayanımını artıran temel faktörlerden biridir. Bu tür kompozitler, uzun ya da kısa fiberlerden meydana gelebilir. Uzun fiberler genellikle matris içerisinde paralel olarak yerleştirilir ve bu nedenle boyuna doğrultudaki mekanik dayanım, enine doğrultudakinden daha yüksektir. Buna karşın kısa fiberler matriste daha rastgele dağılır. Bu durum, tüm yönlerde yaklaşık olarak benzer mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlar. Fiberlerin dayanıklılığı ve uzunluk/çap oranı, kompozitlerin yük taşıma kapasitesini belirleyen en kritik unsurlardandır. Günümüzde en yaygın kullanılan kompozit türleri fiber takviyeli olanlardır ve özellikle polimer matrisli fiber takviyeli kompozitler mühendislik uygulamalarında öne çıkmaktadır (Clyne ve Hull, 2019).

2.1.3. Yapısına göre kompozitler

Kompozit malzemeler, yapısal özelliklerine göre genellikle tabakalı (Guo ve ark., 2022) ve sandviç panel (Ma ve Elkin, 2022) biçiminde sınıflandırılmaktadır. Tabakalı kompozitler, farklı malzeme tabakalarının veya fiber yönlenmelerinin belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Katmanların uygun şekilde seçilmesiyle yüksek dayanım, sertlik ve rijitlik değerleri elde edilmektedir. Ayrıca bu yapılar geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün özellikler sergilemektedirler (Cabrioğlu, 2012; Guo ve ark., 2022). Sandviç paneller ise iki ince ve yüksek dayanımlı yüzey tabakası arasında, düşük yoğunluklu ancak kalın bir çekirdek malzemenin yerleştirilmesiyle oluşturulur. Bu yapı, yüksek rijitlik/ağırlık oranı, burkulma direnci ve eğilme dayanımı ile öne çıkmaktadır. Ayrıca sandviç paneller, yapısal taşıyıcılığın yanı sıra ses ve ısı yalıtımı gibi işlevleri de yapısına entegre edebilir (Ma ve Elkin, 2022).

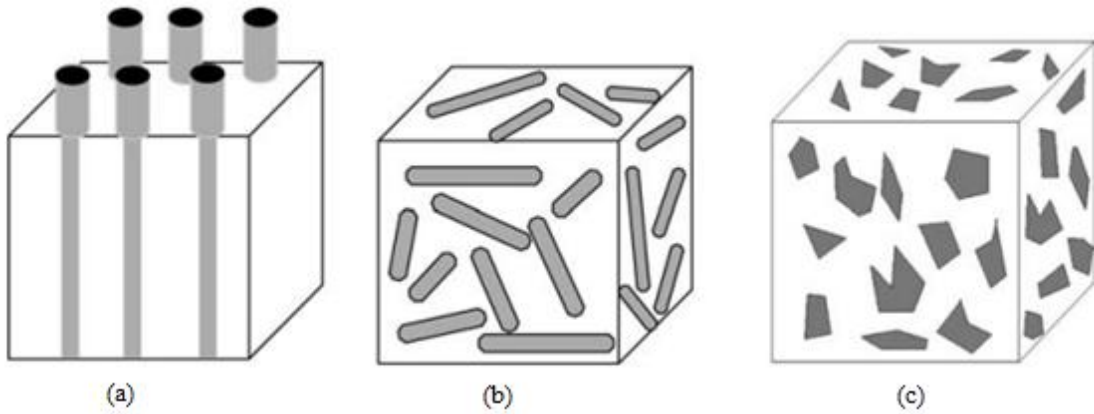
Yapısına göre sınıflandırılan bu kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, dayanıklılık ve çok yönlü kullanım avantajları sayesinde havacılık, otomotiv, denizcilik ve savunma sanayii gibi birçok mühendislik alanında yaygın şekilde tercih edilmektedir (Cabrioğlu, 2012; Guo ve ark., 2022; Ma ve Elkin, 2022).

2.2. MMK'ların Sınıflandırılması, Bileşenleri ve Üretimi

Metal matrisli kompozitler (MMK'lar), sahip oldukları farklı özellikler nedeniyle çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Ayrıca bu kompozitlerin performansını belirleyen temel unsurlar, kullanılan matris malzemeleri ile takviye elemanlarıdır. Bunun yanı sıra, üretim yöntemleri de MMK'ların mikroyapılarını ve dolayısıyla mekanik, tribolojik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu bölümde, MMK'ların sınıflandırılması, bileşenleri ve üretim yöntemleri ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.2.1. MMK'ların sınıflandırılması

MMK'lar, takviye elemanlarının geometrik şekline göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma kapsamında, sürekli fiber takviyeli MMK'lar, kısa veya kesikli fiber takviyeli MMK'lar ve partikül (parçacık) takviyeli MMK'lar yer almaktadır. Şekil 2.3'te, bu üç farklı MMK tipinin yapısı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılması; (a) Sürekli fiber takviyeli kompozit, (b) Kısa fiber takviyeli kompozit, (c) Partikül takviyeli kompozit (Rohatgi ve ark., 2008)

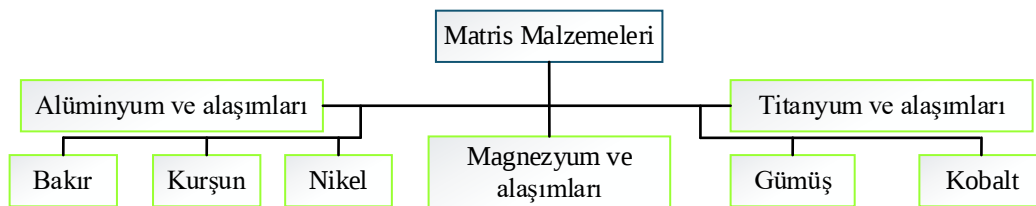
Sürekli veya kesikli fiber takviyeli MMK'lar, matris malzemesinde fiberlerin tek yönlü veya rastgele hizalanmasıyla elde edilmektedir. Fiberler genellikle yüksek dayanımlı malzemelerden seçilmektedir. Sürekli fiberlerin çapı çoğunlukla mikron mertebesinde olup, çapa uzunluk oranı (L/D) 200'e kadar ulaşabilmektedir. Sürekli fiber takviyeli kompozitler, mekanik özellikler açısından en yüksek performansı sağladıkları ve ticari potansiyelleri yüksek olduğu için, yüksek özgül dayanım ve özgül rijitlik gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Kısa veya kesikli fiber takviyeli

MMK’larda ise fiberler görece daha kısa boyutludur. Bu grupta, whisker olarak adlandırılan ince ve tek kristalli fiberler de yer almaktadır. Kısa fiberler matris içerisinde rastgele veya belirli bir doğrultuda hizalanabilmektedir. Bu tür takviyeler üretim esnekliği sağlamakla birlikte, sürekli fiberli kompozitlere kıyasla mekanik performans artışı daha sınırlıdır ve özellikle karmaşık geometrilili parçalar ile daha kolay üretim süreçleri gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

Partikül takviyeli MMK’lar, matris içerisine 0,5–100 µm boyutlarında düzensiz parçacıklar veya pulcukların dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Daha küçük boyutlu partiküller içeren kompozitler ise dispersiyonla güçlendirilmiş MMK olarak adlandırılmaktadır. Takviye malzemeleri grafit veya seramik (SiC, alümina, silika) olabilirken, matris çoğunlukla alüminyum, bakır, titanyum veya magnezyumdan oluşmaktadır. Bu kompozitler genellikle izotropik özellik göstermekte ve döküm sonrası haddeme, ekstrüzyon veya dövme gibi ikincil işlemlere uygun olmaktadır. Partikül takviyeli MMK’lar, aşınma direncini artırmada etkili olmakla birlikte, mekanik özelliklerde matris malzemeye kıyasla sınırlı bir iyileşme sağlamaktadır (Rohatgi ve ark., 2008; Bahl, 2021).

2.2.2. MMK’larda kullanılan matris malzemeleri

MMK’larda kullanılan yaygın metal matris malzemeleri arasında, yüksek özgül mukavemet/ağırlık oranı ve düşük yoğunlukları nedeniyle özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde talep gören alüminyum (Al) ve alaşımları, düşük yoğunluğa ve iyi mekanik özelliklere sahip magnezyum (Mg) alaşımları (Singh ve ark., 2021; Sharma ve ark., 2024), yüksek mukavemet gerektiren geniş uygulama alanlarına sahip titanyum (Ti) alaşımları (Singh ve ark., 2021; Shetty ve ark., 2022) ile bakır (Cu), kurşun (Pb), nikel (Ni), gümüş (Ag) ve kobalt (Co) gibi diğer metaller (Bahl, 2021; Kumar ve ark., 2021) bulunmaktadır (Şekil 2.4). Bu matris malzemelerinden öne çıkanlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.



Şekil 2.4. MMK’larda kullanılan matrisler

Bakır ve alaşımları, ideal fiziksel özellikleri sayesinde antik çağlardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek süneklik ve yumuşaklık nedeniyle şekillendirmesi kolaydır. Atmosferik ortamda, deniz suyunda ve çeşitli kimyasal ortamlarda yüksek korozyon direnci ile birlikte iyi elektrik iletkenliği sunar (Bindal ve ark., 2015).

Magnezyum ve alaşımları, $1,7 \text{ g/cm}^3$ gibi oldukça düşük yoğunlukları sayesinde yapı malzemeleri arasında öne çıkmaktadır. Hekzagonal sıkı paket yapıda olan magnezyum, yaklaşık 45 GPa elastisite modülüne sahip yumuşak bir malzemedir. Ancak oda sıcaklığında şekillendirme kabiliyeti düşüktür. Bu nedenle genellikle döküm veya 200–350 °C arası sıcak şekillendirme yöntemleriyle işlenir. 651 °C gibi düşük bir ergime sıcaklığına sahiptir. Kimyasal olarak deniz suyunda korozyona karşı zayıf olsa da atmosferik koşullarda oksitlenmeye karşı dayanıklıdır (Bindal ve ark., 2015).

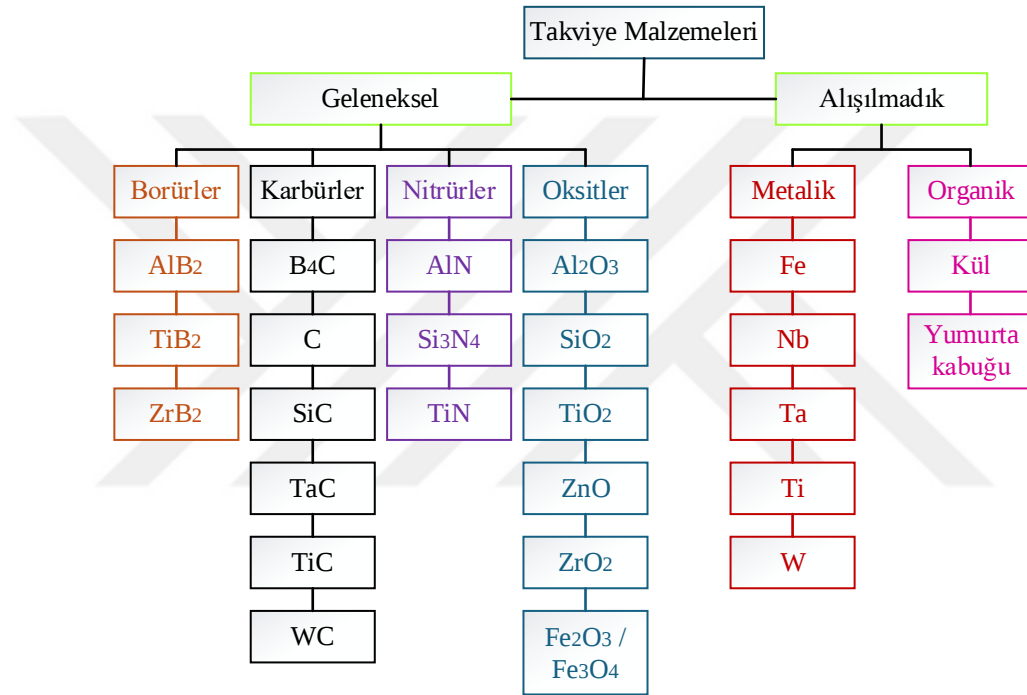
Alüminyum ve alaşımları, yer kabuğunda oksijen ve silikondan sonra en fazla bulunan üçüncü element olup, dünyanın katı yüzeyinde ağırlıkça yaklaşık %8 oranında yer alır. Kolay elde edilebilirliği, yüksek dayanımı, işlenebilirliği, sünekliği ve dövülebilirliği gibi özellikleri sayesinde en yaygın kullanılan demir dışı metaller arasında yer almaktadır. $2,7 \text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığıyla oldukça hafif olan alüminyum, taşıma kapasitesini artırırken yapıların toplam ağırlığını ve enerji tüketimini azaltır. Ayrıca yüzeyinde doğal olarak oluşan oksit tabakası sayesinde yüksek korozyon direncine sahiptir. Hafifliği sayesinde bakırdan neredeyse iki kat daha avantajlı olduğu için farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bazı alüminyum serilerine ait teknik özellikler ve bu serilerin kullanım alanları Tablo 2.1’te özetlenmiştir (Bajaj, 2008).

Tablo 2.1. Al alaşım serilerinin özellikleri ve kullanım alanları (Bajaj, 2008)

Al Alaşımı	Temel Özellikleri	Yaygın Kullanım Alanları
1050 / 1200	Isıl işleme uygun değildir, yüksek korozyon direncine sahiptir, şekillendirme ve kaynak işlemlerine elverişlidir.	Gıda ve kimya endüstrisinde kullanılır.
2014	Isıl işleme güçlendirilebilir, dayanımı yüksektir fakat korozyon direnci zayıftır, kaynak için uygun değildir.	Uçak gövdesi üretiminde tercih edilir.
5251 / 5052	Isıl işlem görmez, orta derecede mekanik dayanım sunar, korozyon direnci yüksektir, şekillendirme ve kaynaklamaya uygundur.	Araç kaplamaları, deniz ortamına maruz kalan yapılar, madencilikte kullanılan kafes sistemleri.
6063	Isıl işlemle mukavemeti artırılabilir, orta düzey dayanım ve iyi korozyon direnci sağlar, kaynaklanabilir.	Mimari yapı profilleri, pencere doğramaları ve sulama sistemlerinde kullanılır.
6061 / 6082	Isıl işlem görebilir, hava ile soğutulduğunda şekil bozulmaları azalır.	Yük taşıyan yapı parçaları, köprüler, vinç sistemleri, çatı iskeletleri ve bira fiçileri.
7075	Isıl işlemle sertliği artırılabilir, doğal yaşlandırma ile mukavemet kazanır, gerilme korozyonuna karşı duyarlıdır.	Askerî araçlar, taşınabilir köprü sistemleri, motosiklet ve bisiklet gövdeleri.

2.2.3. MMK’larda kullanılan takviye elemanları

Takviye malzemesi, kompozitin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla matris içerisine dağıtılan yüksek mukavemetli bir fazdır (Bahl, 2021). Takviye seçiminde sertlik, mekanik mukavemet, korozyon direnci, aşınma direnci ile termal ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler dikkate alınır (Kumar ve ark., 2021; Gill ve ark., 2022). MMK’larda kullanılan başlıca takviye malzemeleri Şekil 2.5’te gruplandırılarak gösterilmiş olup, en yaygın kullanılan takviyeler ve özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.5. MMK’larda kullanılan takviye elemanları (Seetharaman ve Gupta, 2021)

Tablo 2.2. Yaygın kullanılan takviye elemanlarının özellikleri (Seetharaman ve Gupta, 2021)

Takviye Elemanı	Kristal Yapı	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)	Mohr Sertliği	Modül (GPa)
Al ₂ O ₃	Hekzagonal	3,9	2050	6,5	410
AlN	Hekzagonal	3,25	2300	-	350
B ₄ C	Rhombohedral	2,52	2450	9,5	450
BN	Hekzagonal	2,2	3000	1-2	90
SiC	Hekzagonal	3,21	2300	9,7	480
Si ₃ N ₄	Trigonal, Hekzagonal, kübik	3,29	1900	-	310
TiB ₂	Hekzagonal	4,5	2900	-	370
TiC	Kübik	4,93	3140	-	320
TiN	Kübik	5,24	2950	-	600
WC	Hekzagonal	15,7	2800	9,5	690

Tablo 2.2’de verilen takviye elemanları, fiberler, whiskerler (ince kristal teller) ve partiküller şeklinde olabilir (Miyajima ve Iwai, 2003). Bu takviye elemanlarının seçimi, büyük ölçüde kullanılan matris malzemesine bağlıdır. Matris türüne göre tercih edilen takviye türleri ve malzemeleri Tablo 2.3’te verilmiştir.

Tablo 2.3. Matrise bağlı olarak kullanılan takviyeler (Alam, 2013)

Matris Malzemesi	Takviye Türü	Takviye Malzemesi
Alüminyum	Uzun Elyaf	Al_2O_3 , B_4C , C, SiC
	Kısa Elyaf	Al_2O_3
	Whisker	SiC
	Parçacık	Al_2O_3 , B_4C , C, SiC
Magnezyum	Uzun Elyaf	Al_2O_3 , Gr
	Whisker	SiC
	Parçacık	B_4C , SiC
Titanyum	Uzun Elyaf	SiC
	Parçacık	Ti
Bakır	Uzun Elyaf	SiC, C
	Parçacık	B_4C , SiC, TiC

Parçacık takviyeleri, fiber ve whisker takviyelere kıyasla daha düşük maliyetli olmaları ve üstün plastik şekillenebilirlik özellikleri sayesinde, tribolojik uygulamalarda en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Bu tür takviye elemanları arasında; Şekil 2.5’te verilen borürler, karbürler, nitrürler ve oksitler gibi süreksiz seramik bileşenler bulunur. Bunlara ilaveten katı yağlayıcı olarak görev yapan grafit partikülleri de kompozitlerin sıkışma direncini artırır ve hafif tribo bileşenler için potansiyele sahiptir. Tüm bu parçacık takviyeleri, matris malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirerek sertlik, çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve aşınma direnci gibi özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlar (Pugacheva ve ark., 2016; Mahdavi ve Akhlaghi, 2011; Kumar ve Birru, 2017).

- SiC: En sık kullanılan seramik takviyelerdendir. Düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık ve termal şok direnci ile yüksek aşınma direnci gibi ideal mekanik özelliklere sahiptir.
- Al_2O_3 : Silisyum karbürden sonra en çok kullanılan ikinci takviye malzemesi olup, yüksek termal iletkenliğe ve uygun yoğunluğa sahiptir.
- B_4C : Yüksek sertlikte, aşınmaya dayanıklı bir malzemedir ve yoğunluğu SiC’den daha düşüktür.
- TiC: Yüksek mikro sertlik, aşınma direnci ve basma mukavemeti sağlar.

- Katı Yağlayıcılar: Kendi kendini yağlama özellikleri sağlamak amacıyla Grafit, molibden disülfür ve hekzagonal bor nitrür kullanılır. Grafit, mükemmel doğal yağlayıcılığa sahip en hafif takviyelerdendir (Gill ve ark., 2022).

Her takviye malzemesi kendine özgü fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, takviye parçacıkları sertlik değerlerine göre de sınıflandırılmaktadır. Sert takviye grubunda yer alan SiC ve Al₂O₃ gibi parçacıklar yaklaşık 30 GPa sertliğe sahiptir. Diğer grupta ise sertliği 2 GPa'nın altında olan ve genellikle katı yağlayıcı özellikleriyle bilinen grafit ve molibden disülfür gibi yumuşak parçacıklar bulunmaktadır. Matris içerisinde yalnızca tek bir sertlik sınıfına ait takviye malzemesinin kullanılması istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Yüksek sertliğe sahip parçacıkların kompozite eklenmesi, genel sertliği, mekanik dayanımı ve aşınma direncini belirgin şekilde artırırken işlenebilirliği olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durumu dengelemek amacıyla, sert takviyelere ek olarak yumuşak gruba ait grafit parçacıklarının da kompozit yapıya dahil edilmesi faydalı olmaktadır (Miller ve ark., 2000).

2.2.4. MMK'ların uygulama alanları

MMK'lar, sahip oldukları yüksek özgül rijitlik, yüksek mukavemet, düşük termal genleşme katsayısı ve aşınma direnci gibi üstün özellikler sayesinde, geleneksel malzemelere kıyasla mühendislik uygulamalarında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık-uzay ve elektronik sektörlerinde geniş bir kullanım alanı bulan MMK'lar, aynı zamanda biyomedikal ve spor endüstrisi gibi farklı alanlarda da değerlendirilmektedir (Bahl, 2021; Singh ve ark., 2021; Gill ve ark., 2022; Sharma ve ark., 2023). MMK'ların başlıca uygulama alanları ve kullanım örnekleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. MMK'ların uygulama alanları ve kullanıldığı yerler

Uygulama Alanı	Kullanım Örnekleri	Kaynak
Otomotiv sektörü	Pistonlar (özellikle SiC/Al-Si bazlı), fren kampanaları, biyel kolları, supap sapları	Singh ve ark., (2021)
Havacılık ve uzay	SiC bıyık takviyeli Al alaşımlı uçak kanat panelleri; bor-alüminyum boru payandaları (%45 ağırlık tasarrufu)	Bahl, (2021); Singh ve ark., (2021)
Elektronik sanayi	Elektronik alt tabakalar, veri depolama ve iletişim için nano-kompozitler	Singh ve ark., (2021)
Diğer alanlar	Biyomedikal implantlar, golf sopaları, bisikletler, kafes yapılarında eklem/bağlantı elemanları	Shetty ve ark., (2022); Bahl, (2021)

Tablo 2.4'ten de görüldüğü üzere, MMK'lar yüksek performans gerektiren birçok sektörde geleneksel malzemelere alternatif oluşturarak geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin daha da artırılması amacıyla, farklı takviye elemanlarının metal matrislere ilavesine yönelik literatürde çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

2.2.5. MMK'ların üretim yöntemleri

MMK'ların üretimi için Sıvı Faz, Katı Faz ve Yerinde (In-Situ) olmak üzere üç ana yöntem grubu mevcuttur (Kumar ve ark., 2021; Sharma ve ark., 2024). Yöntem seçimi, matris ve takviyenin türüne, boyutuna, maliyete ve takviye parçacıklarının matris içinde ıslanabilirliği ve homojen dağılımı gibi faktörlere bağlıdır (Bahl, 2021).

2.2.5.1. Sıvı faz üretim yöntemi

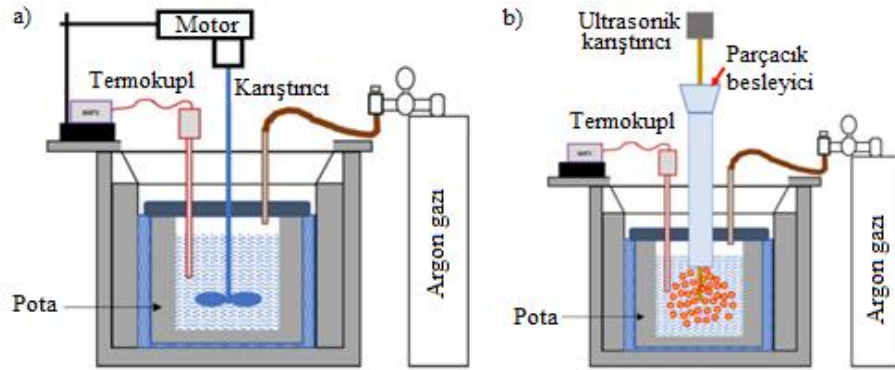
MMK'ların sıvı faz işleme yöntemi, takviye fazının ergimiş metal matrise entegre edilmesi ve ardından sistemin katılaştırılması esasına dayanır. Bu yöntemde, kompozit malzemenin mekanik özellikleri, takviye fazının matris içerisindeki dağılımına ve arayüzey bağına doğrudan bağlıdır.

MMK üretiminde en yaygın kullanılan sıvı faz yöntemleri arasında karıştırma döküm, sıkıştırma döküm ve basınçlı infiltrasyon yer almaktadır (Bahl, 2021; Singh ve ark., 2021; Sharma ve ark., 2023; Sharma ve ark., 2024).

Karıştırma döküm, en basit, en yaygın kullanılan ve en uygun maliyetli yöntemdir. Bu yöntemde, takviye fazı erimiş metal matris içerisine doğrudan eklenir ve mekanik karıştırıcı veya ultrasonik karıştırıcı yardımıyla homojen şekilde dağıtılmaya çalışılır. Daha sonra geleneksel döküm süreçleri ile kalıba aktarılır. Ancak bu yöntemde, takviye fazlarının matris içinde eşit dağılmaması, düşük ıslanabilirlik, arayüzey reaksiyonlarının oluşması ve gözeneklilik gibi birtakım problemlerle karşılaşılabilir (Rohatgi ve ark., 2008; Kamaraj ve Ramesh, 2015). Şekil 2.6'da mekanik ve ultrasonik karıştırıcılarla gerçekleştirilen karıştırma döküm işleminin şematik gösterimi verilmiştir.

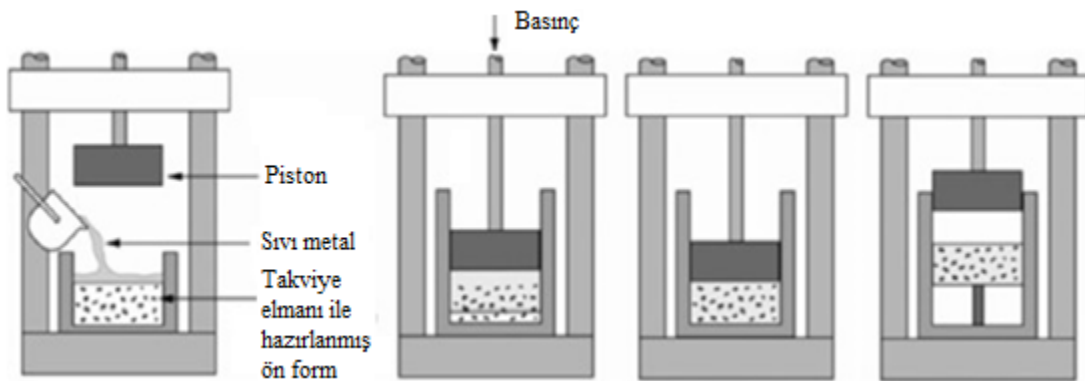
Sıkıştırma döküm, karıştırma döküm ile hazırlanan eriyiğin bir kalıba aktarılması ve ardından kalıba belirli bir basınç uygulanarak üretilmesi esasına dayanır. Bu yöntem, arayüzey reaksiyonlarını azaltarak ıslanabilirliği iyileştirir ve gözenekliliği ortadan kaldırır. Takviye ile eriyik arasındaki temas süresinin sınırlı olması, istenmeyen arayüzey reaksiyonlarının önüne geçer. Ayrıca yüksek soğuma hızları, ikinci faz partiküllerinin

daha düzgün dağılmasına ve mikroyapının daha saf kalmasına katkı sağlar (Kamaraj ve Ramesh, 2015; Bahl, 2021).



Şekil 2.6. Karıştırma dökümün şematik gösterimi; a) mekanik karıştırma döküm, b) ultrasonik karıştırma döküm (Seetharaman ve Gupta, 2021)

Basıncılı infiltrasyon yöntemi ise ergimiş matris malzemesinin takviye elemanının gözenekli yapısına basınç yardımıyla sızdırılmasıdır. İnfiltrasyon öncesinde takviye malzemesi bir ön şekil verme işleminden geçirilir. Bu işlem presle şekillendirme veya vakumla şekillendirme yöntemleriyle yapılabilir. Presle şekillendirmede, su bazlı fiber elyaf karışımı homojen hale getirildikten sonra kalıba dökülür; uygulanan basınçla su uzaklaştırılır ve kalan elyaf formu kurutularak kullanılabilir hale getirilir. Vakumla şekillendirmede ise elyaf-su karışımına vakum uygulanır ve elde edilen şekil kurutularak takviye elemanı oluşturulur (Chawla, 2012). Hazırlanan bu ön formlar, kalıp içerisine yerleştirilir ve önceden ısıtılmış kalıba ergimiş metal dökülür. Hidrolik pres yardımıyla uygulanan basınç sonucunda eriyik, takviye gözeneklerine nüfuz ederek üretim tamamlanır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Basıncılı infiltrasyonla üretim (Chawla, 2012)

2.2.5.2. Katı faz üretim yöntemi

Katı faz üretim yöntemi, matrisin ergime sıcaklığının altında, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında karşılıklı difüzyon yoluyla matris ve takviye arasında bağlanma sağlanması esasına dayanır (Kumar ve ark., 2021; Sharma ve ark., 2024). Bu yöntem kapsamında öne çıkan teknikler arasında difüzyon bağı, deformasyon işlemleri, sinter dövme, sürtünme karıştırma, kıvılcım plazma sinterleme ve TM yer almaktadır.

Difüzyon bağı, katı malzemelerde atomların termal enerji etkisiyle hareket ederek birbirine tutunması sürecidir. Özellikle MMK'ların sinterlenmesi ve mekanik alaşımlama işlemlerinde, parçacıklar arasında atomların yer değiştirmesiyle sağlam bağlantılar oluşur. Bu atom hareketi, kristal yapıdaki boşluklar ve kusurlar boyunca gerçekleşir ve malzemenin mikroyapısal dayanıklılığını artırır. Difüzyonun etkinliği; sıcaklık seviyesi, malzemenin kristal yapısı ve atomların hareket kabiliyetine bağlıdır. Böylece difüzyon bağı mekanizması, kompozit malzemelerde mekanik dayanım ve yapısal bütünlüğün temelini oluşturur (Mehrer, 2007; Shewmon, 2016).

Deformasyon işlemi, kompozit malzemelerin şekil değiştirerek yoğunlaştığı bir tür katı hal plastik şekillendirme tekniğidir. Sünek özellik gösteren iki fazlı MMK'ların dövme, ekstrüzyon, çekme ya da haddeleme gibi mekanik yöntemlerle işlenmesi, bu iki fazın birlikte deformasyona uğramasına neden olur. Bu durum, fazlardan birinin diğer faz içerisinde uzayıp lif benzeri bir yapıya dönüşmesini sağlar. Elde edilen bu tür malzemeler literatürde zaman zaman yerinde oluşan kompozitler olarak adlandırılmaktadır. İlk aşamada üretilen bu malzemelerin özellikleri, daha sonra deformasyonla geliştirilen kompozitlerin karakteristik özelliklerini belirler (Nourbakhsh ve ark., 1990).

Sinter dövme hem ekonomik hem de özgün bir deformasyon işlemi tekniğidir. Bu yöntemde, matris ve takviye tozlarının karışımına sırasıyla soğuk sıkıştırma, sinterleme ve ardından dövme işlemleri uygulanır. Yöntemin en önemli avantajı, parçaya son şeklinin dövme yoluyla verilmesi sayesinde neredeyse nihai forma çok yakın üretim yapılabilmesidir. Bu durum hem işleme ihtiyacını azaltır hem de malzeme israfını en aza indirir. Bu yöntemle üretilen sinterlenmiş ve dövülmüş kompozitlerin çekme ve yorulma performanslarının ekstrüzyon yöntemiyle üretilen kompozitlerle benzer seviyelerde olduğu belirtilmektedir (Sahraeinejad, 2014).

Sürtünme karıştırma işlemi, katı halde uygulanan yenilikçi bir yöntem olup, matris malzemesi ile takviye parçacıklarının yüksek sıcaklık ve basınç altında fakat ergimeye ulaşmadan karıştırılması esasına dayanır. Dönen bir takımın sürtünme yoluyla

oluşturduğu ısı ile etkisiyle matris malzemesi plastik hale gelir ve takviye parçacıkları bu yumuşamış bölgeye karıştırılarak homojen şekilde dağılır. Bu yöntemle üretilen kompozitlerde, ıslanabilirlik problemleri ve istenmeyen kimyasal reaksiyonlar büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Ayrıca sürtünme karıştırma, yüksek yoğunluklu ve ince taneli mikroyapılar oluşturması sayesinde kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirir. Özellikle tane küçülmesi, dağılım homojenliği ve arayüzey bağının gelişmesi gibi etkiler, malzemenin sertlik, aşınma direnci ve yorulma ömrü gibi kritik özelliklerini artırmaktadır (Sharma ve ark., 2024).

Kıvılcım plazma sinterleme, darbeli doğru akım ve tek eksenli basınç uygulanarak gerçekleştirilen, geleneksel sıcak preslemenin geliştirilmiş bir versiyonudur. Bu yöntemde elektrik akımı, matris ve takviye tozlarının doğrudan üzerinden geçirilerek hızlı ve kontrollü bir ısınma sağlanır. Böylece çok kısa sürelerde ve görece düşük sıcaklıklarda yoğun sinterleme gerçekleştirilir. Kıvılcım plazma sinterleme yönteminin en önemli avantajı, tane büyümesini sınırlaması ve ince taneli mikroyapıların korunmasına olanak tanımasıdır. Bu özellik, kompozitlerin yüksek sertlik, mukavemet ve termal kararlılık gibi özelliklerini geliştirmektedir. Ayrıca yöntem, lamine yapıli kompozitlerin üretimi için de uygundur ve diğeri katı faz yöntemlerine kıyasla daha homojen takviye dağılımı sağlamaktadır (Bahl, 2021; Sharma ve ark., 2024).

TM ise en yaygın kullanılan katı hal üretim yöntemidir. Bu yöntemde matris ve takviye elemanlarının karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi esasına dayanır. Bu üretim yöntemi, 2.3 numaralı başlık altında detaylı olarak sunulacaktır.

2.2.5.3. Yerinde (In-Situ) üretim

Yerinde (in-situ) üretim yöntemi, takviye fazının kompozit içerisinde doğrudan ergime ve katılaşma sırasında çökelme yoluyla oluştuğı bir teknik olarak tanımlanır. Bu yöntemde, takviye fazı önceden hazırlanmış bir toz veya lif olarak eklenmez. Bunun yerine, matrisin ergime sıcaklığında gerçekleştirilen kimyasal veya fiziksel reaksiyonlar sonucunda yeni bir faz oluşur. Bu süreç, matris ve takviye fazı arasında gelişmiş arayüzey bağı ve daha homojen faz dağılımı elde edilmesini sağlar. Çünkü çökelme sırasında yeni oluşan takviye fazı, matris içinde rastgele dağılmak yerine kristal büyüme kinetiğine bağıli olarak eşit şekilde yayılır. Bu durum, özellikle mekanik dayanım, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlar (Kumar ve ark., 2021).

2.2.5.4. Üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

MMK'ların üretimi sırasında karşılaşılan temel sorunlar arasında takviye parçacıklarının matris içerisinde topaklanması (aglomerasyon), düşük yoğunlaşma, ıslanabilirlik problemleri ve matris ile takviye arasında istenmeyen kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Bu sorunlar, kompozitlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek hedeflenen performans değerlerine ulaşılmasını zorlaştırmaktadır.

MMK'ların üretim yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar (Bahl, 2021; Kumar ve ark., 2021; Sharma ve ark., 2023; Seikh ve ark., 2024; Sharma ve ark., 2024) incelenerek, her bir yöntemin güçlü ve zayıf yönleri belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak özetlenerek Tablo 2.5'te verilmiştir.

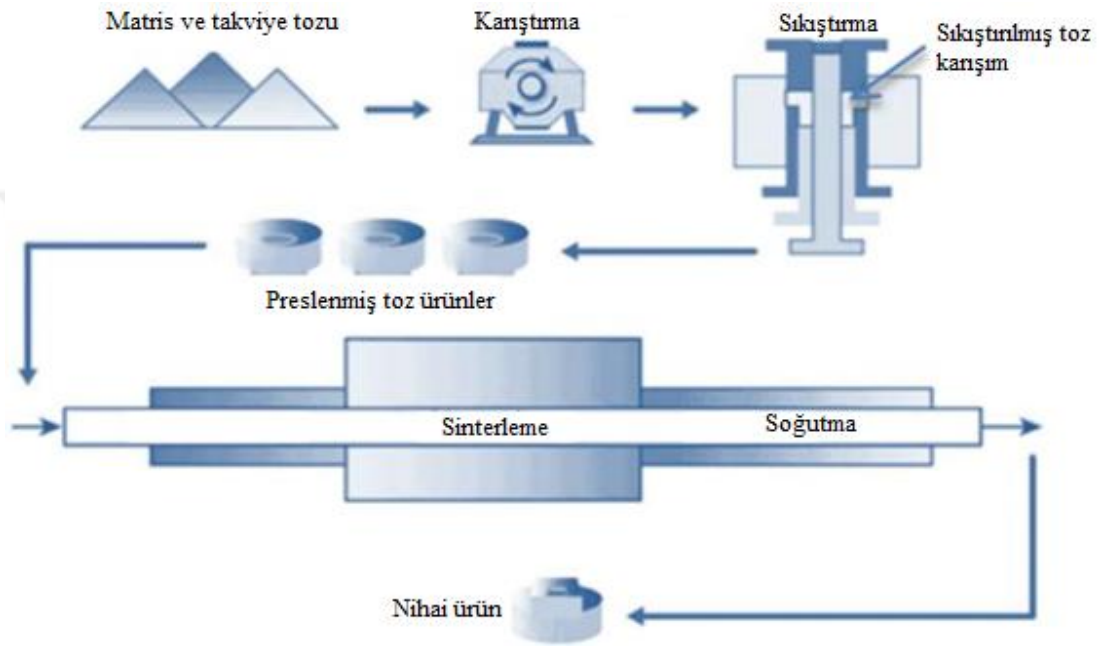
Tablo 2.5. MMK üretim yöntemlerine ait üstünlükler ve zayıf yönler

Yöntem	Üstünlükleri	Sınırlılıkları
Karıştırmalı Döküm (Sıvı Faz)	En basit, en yaygın ve en uygun maliyetlidir, karmaşık profiller üretilebilir.	Takviye homojen dağılmayabilir, yüksek sıcaklıkta karbür oluşumu gibi kimyasal reaksiyonlar riski vardır.
Sıkıştırılmış Döküm (Sıvı Faz)	Gözenekliliği ve büzülmeyi ortadan kaldırır, kısa temas süresi arayüzey reaksiyonlarını azaltır.	Üretilebilecek geometri türleri sınırlıdır.
Toz Metalurjisi_TM (Katı Faz)	Döküm yöntemlerine göre daha homojen takviye dağılımı olur, nihayi şekle yakın parçalar üretilir.	Karıştırmalı döküme göre daha pahalıdır, büyük veya karmaşık parçaların üretimi zordur.
Sürtünmeli Karıştırma İşlemi (FSP) (Katı Faz)	Islanabilirlik ve kimyasal reaksiyon sorunlarını ortadan kaldırır, yüksek yoğunluklu ve ince taneli yapılar üretilir.	İşlem mekaniği henüz tam anlaşılamamıştır.
Kıvılcım Plazma Sinterleme (Katı Faz)	Kısa sürede ve düşük sıcaklıkta sinterleme ile ince taneli yapılar oluşur, TM'ye göre daha homojen dağılım elde edilir.	Maliyetli bir prosedürdür ve genellikle basit simetrik şekiller için uygundur.
Yerinde Üretim (In-Situ)	Daha homojen takviye dağılımı ve gelişmiş arayüzey bağları sağlar, daha düşük maliyetli ekipmanlar kullanılır.	Reaksiyonların dikkatle kontrol edilmesi gerekir.

Tablo 2.5'te görüldüğü üzere, sıvı faz yöntemleri yüksek üretim hacmi ve düşük maliyet avantajı sunarken, homojen dağılımın sağlanması ve gözeneklilik açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Katı faz yöntemleri daha üstün mekanik özellikler elde edilmesine imkân tanısa da yüksek maliyet ve karmaşık üretim süreci dezavantajı barındırmaktadır. Yerinde üretim yöntemleri ise homojen dağılım ve güçlü arayüzey bağı sağlamalarının yanı sıra daha düşük maliyetli ekipman kullanımı ile öne çıkmakta, ancak bu yöntemlerde reaksiyonların dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir.

2.3. Toz Metalurjisi (TM) ile Kompozit Üretimi

MMK üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan TM, özellikle parçacıklı veya kısa elyaf takviyeli MMK'ların üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, deformasyon işlemleri ile ilişkili olarak soğuk presleme, sinterleme ve/veya sıcak presleme adımlarını içermektedir. TM sürecinin aşamaları Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. MMK'ların TM yöntemi ile üretiminin şematik gösterimi (HG ve Xavior, 2018)

Söz konusu yöntemle, takviye malzemesinin matris içinde homojen biçimde dağılması ve yoğun bir yapı oluşturulması hedeflenmektedir. Üretim süreci, matris ve takviye fazına ait tozların karıştırılmasıyla başlayıp, bu karışımın kalıba yerleştirilmesiyle devam etmektedir. Ardından, sıkıştırılmış toz veya yeşil kütle olarak adlandırılan, yaklaşık %80 yoğunluğa sahip ve ön şekillendirme için uygun bir ara ürün, soğuk presleme yoluyla elde edilmektedir. Soğuk preslenmiş bu yapı, parçacık yüzeylerinden emilen nemin uzaklaştırılması amacıyla kapalı bir ortamda korunmakta ve kurutulmaktadır. Sürecin son aşamasında ise sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Böylece tozlar arasında metalurjik bağlar oluşarak, istenilen mekanik özelliklere sahip nihai ürün elde edilmektedir (Venumbaka, 2015). Toz numunelerin tanecikli yapısının sinterleme sonrası bütünleşik bir yapı oluşturması Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Toz işleme aşamasında sinterleme sonrası yapının değişimi (HG ve Xavior, 2018)

TM yönteminin diğer imalat yöntemlerine kıyasla avantajları ve dezavantajları aşağıda özetlenmiştir.

Avantajları:

1. Üretilen parçalar homojen yapıya sahip olup, mekanik davranışları tutarlı ve öngörülebilirdir.
2. Karmaşık şekilli parçaların üretimine olanak sağlar.
3. Ürünlerin gözeneklilik ve kompozisyonu kontrol edilebilir.
4. Hammadde kullanımı yüksek verimlidir. Neredeyse tüm toz miktarı ürüne dönüşür ve ergitme kayıpları oluşmaz.
5. Yüksek ergime noktasına sahip malzemeler ve farklı alaşımlarla üretim mümkündür.
6. Birbirleri içerisinde çözünebilen veya çözünemeyen seramikler, metal alaşımları ve polimer bazlı kompozitlerin üretimine olanak sağlar.
7. Küçük ve karmaşık parçaların seri üretimi hızlı ve ekonomiktir.
8. Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip ürünlerin elde edilmesine imkân tanır.
9. Genellikle üretim sonrası işlemlere gerek yoktur.

Dezavantajları:

1. Tozların oksidasyonunu önlemek amacıyla, üretim ve depolama süreçlerinde hava ile temas etmeyecek şekilde korunaklı ortamlar gereklidir.
2. Çok karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi teknik olarak zordur.
3. Az sayıda üretim yapıldığında maliyet yüksek olabilir.

4. Karmaşık geometrik yapıya sahip parçaların üretimi bu yöntemle sınırlı kalabilmektedir.
5. Kullanılan tozların maliyeti ingot malzemelere göre daha yüksektir.
6. Gözenekli yapı, oksidasyona karşı duyarlılığı artırmakta ve malzemenin korozyon direncini olumsuz etkileyebilmektedir.
7. Büyük hacimli parçaların üretiminde yeterli yoğunluğun sağlanabilmesi için tozlara yüksek basınç uygulanması gerekmektedir (Dewidar, 2006; Panda ve ark., 2018; Arık, 2019; Gökçe, 2020).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, toz şeklindeki Al7075 alüminyum alaşımına, geri dönüştürülmüş cam fiber ve karbon fiber tozları belirli oranlarda ilave edilerek TM yöntemi ile kompozit malzemeler üretilmiştir. Çalışmanın temel amacı, geri dönüştürülmüş fiber tozlarının Al7075 alaşımının mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir.

Bu bölümde, kompozitlerin üretiminde kullanılan matris ve takviye malzemeleri, toz hazırlama, presleme ve sinterleme aşamaları ile üretilen numunelerin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihazlar ve test yöntemleri ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

3.1. Kompozit Üretiminde Kullanılan Matris ve Takviye Malzemeleri

Al7075 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, uçak, uzay ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenlerle Al7075 alaşımı, matris malzemesi olarak seçilmiştir. Alaşımın kimyasal bileşimi ile fiziksel ve mekanik özelliklerine ait bazı bilgiler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Al7075 alaşımının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Oran (%)	Fiziksel Özellikler	Değer
Alüminyum (Al)	Kalan	Yoğunluk	2,81 g/cm ³
Çinko (Zn)	5,10-6,10	Erime Noktası	640 °C
Magnezyum (Mg)	2,10-2,90	Isı İletkenliği	130-160 W/m·K
Bakır (Cu)	1,20-2,00	Mekanik Özellikler	Değer
Demir (Fe)	0,50	Çekme Mukavemeti	228 MPa
Silisyum (Si)	0,40	Akma Mukavemeti	103 MPa
Mangan (Mn)	0,30	Elastik Modül	71,7 GPa
Krom (Cr)	0,18-0,28	Kesme Mukavemeti	152 MPa
Titanyum (Ti)	0,20	Poisson Oranı	0,33

Bu özelliklere sahip Al7075 alaşımı toz şeklinde ticari olarak temin edilmiş olup, %99,7 saflığa ve 75-100 µm tane boyutuna sahiptir.

Cam ve karbon fiberler, özellikleri sayesinde uçak, uzay ve otomotiv endüstrileri olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu fiberler, kompozitlerde kırılma tokluğunu artırmak, yapısal dayanımı geliştirmek, aşınmaya dirençli malzemeler

üretmek, sertliği artırmak ve yorulma dayanımını iyileştirmek amacıyla tercih edilmektedir. Ancak bu fiberlerin sentetik olması, doğal kaynakların tükenmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda çevresel farkındalığın artmasıyla birlikte geri dönüştürülmüş fiberlerin kullanımı büyük önem kazanmıştır. Geri dönüştürülmüş fiberlerin kullanımı, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından katkı sağlamakta ve malzeme maliyetini düşürmektedir. Matris malzemesi olan Al7075 alaşım tozuna, bu fiber tozlarının eklenmesi, TM yöntemiyle üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki belirsizlikleri gidermek ve atık yönetimi ile sürdürülebilirliğe katkı sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Seçilen fiber tozları 50–75 µm boyuta sahip olup, hem matris malzemesinin boyutuna yakın olmaları hem de bu boyuttaki tozların daha homojen dağılması hedeflenerek belirlenmiştir.

3.2. Matris ve Takviye Oranlarının Belirlenmesi ve Tartılması

Deney numunelerinin miktarları, ön deneysel çalışmalar ve literatürde önerilen oransal değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşım tozunun kompozit karışımındaki oranı ağırlıkça %88–96, cam ve karbon fiber toz takviye elemanlarının oranı ise ağırlıkça %4–12 olacak şekilde seçilmiştir. Belirlenen değerler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Al7075 matris ve cam/karbon fiber takviye oranlarının ağırlıkça dağılımı

Numune No	Kod	Cam Fiber		Karbon Fiber		Al7075		Toplam ağırlık
1	A	-	-	-	-	%100	50 g	50
2	C4	%4	2 g	-	-	%96	48 g	50
3	C8	%8	4 g	-	-	%92	46 g	50
4	C12	%12	6 g	-	-	%88	44 g	50
5	K4	-	-	%4	2 g	%96	48 g	50
6	K8	-	-	%8	4 g	%92	46 g	50
7	K12	-	-	%12	6 g	%88	44 g	50
8	C2K2	%2	1 g	%2	1 g	%96	48 g	50
9	C2K6	%2	1 g	%6	3 g	%92	46 g	50
10	C2K10	%2	1 g	%10	5 g	%88	44 g	50
11	C4K4	%4	2 g	%4	2 g	%92	46 g	50
12	C6K2	%6	3 g	%2	1 g	%92	46 g	50
13	C6K6	%6	3 g	%6	3 g	%88	44 g	50
14	C10K2	%10	5 g	%2	1 g	%88	44 g	50

A: Al7075

C: Cam Fiber

K: Karbon Fiber

C ve K yanındaki sayısal değer fiberin kompozit yapı içerisindeki ağırlıkça oranıdır.

Ölçümler, hassasiyeti 0,001 g olan KERN marka hassas terazide gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Tartım işleminin güvenilirliğini sağlamak amacıyla bir dizi prosedür uygulanmıştır. Öncelikle cihazlar, onaylı referans ağırlıkları kullanılarak belirli aralıklarla kalibre edilmiş ve her tartım öncesi sıfırlama işlemi yapılmıştır. Teraziler, düz ve sabit bir yüzeye yerleştirilmiş, çevresel faktörlerden etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Ölçümler sırasında cihaz yüzeyleri temizlenmiş ve hareketli parçalarının bakımları düzenli olarak yapılmıştır. Her ölçüm, örneklerin teraziye düzgün yerleştirilmesi ve aynı örnek üzerinde birden fazla ölçüm yapılmasıyla gerçekleştirilmiş ve sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.1. Matris ve takviye olarak kullanılan toz partiküllerinin tartım işlemi: a) boş terazi, b) Al7075 matris tozu, c) cam fiber tozu, d) karbon fiber tozu (topaklanmış)

3.3. Tozların Karıştırılması

Tozlar, Batman Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Laboratuvarında bulunan XQM-2 marka bilyeli değirmen ile mekanik olarak karıştırılmıştır. Mekanik karıştırma chazı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. XQM-2 cihazı gösterimi

Karıştırma işlemi, cihazın döner tablasına yerleştirilmiş silindirik paslanmaz çelik kaplar içinde gerçekleştirilmiştir. Her çelik kapta toz-bilye kütle oranı 1/10 olacak biçimde, 50 g toz ile 500 g bilye kullanılmıştır. Toz ve bilyeler belirtilen oranlarda çelik kaba yerleştirilmiş olup, Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.3. Paslanmaz çelik kaba bilye/toz karışımının ilavesi: a) homojen karışimli toz, b) topaklanmış karbon fiber ve alaşım tozu

Karıştırma işlemi toplam 1 saat sürmüş olup, prosedür 20 dakika çalışma – 20 dakika dinlenme – 20 dakika çalışma şeklinde uygulanmıştır. Çalışma sırasında cihazın dönme hızı 350 rpm olarak ayarlanmıştır. Bu işlem sırasında, karbon fiber tozlarının kendiliğinden topaklanma eğilimi giderilmiş ve tozların homojen dağılımı sağlanmıştır. Karıştırma ve homojenleştirme tamamlandıktan sonra, her biri yaklaşık 10,5 g olacak şekilde poşetlenen numuneler, presleme işlemi için hazır hâle getirilmiştir. Özellikle topaklı formda bulunan karbon fiber, Al7075 alaşımı ile karıştırıldıktan sonra homojen hâle getirilmiş ve tartım sırasında gözlenen durumu Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Karıştırıldıktan sonra tartılan %8 karbon fiberli Al7075 alaşım tozu

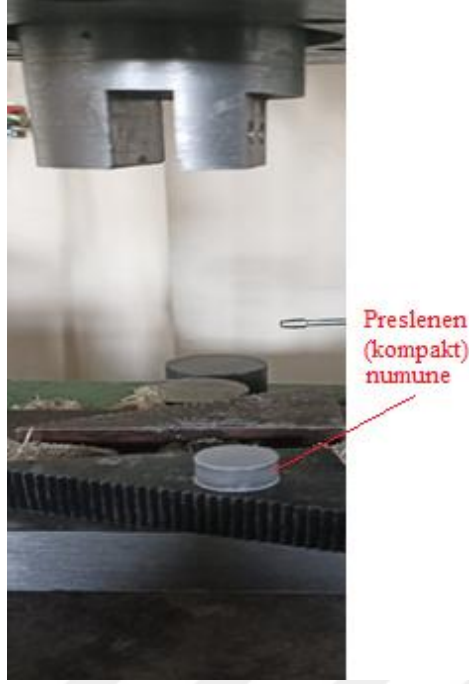
3.4. Tozların Sıkıştırılması

Mekanik alaşımlama cihazında karıştırılan toz numuneler, üretim sürecinde oluşabilecek gözenekliliği azaltmak ve karışımın birbirine kaynaşmasını sağlayarak nihai forma ulaşmasını temin etmek amacıyla presleme (sıkıştırma) işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemde, karıştırılmış tozlar 20 mm çapında çelik bir kalıp içine yerleştirilmiş ve 300 MPa basınç uygulanarak hidrolik presle sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi, Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan pres makinesine ait görsel Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan hidrolik pres

Preste tozların sıkıştırılması için kullanılan kalıp, yüksek basınç ve mekanik yüklere karşı üstün dayanım sağlayan sertleştirilmiş çelikten üretilmiş olup, 20 mm çapında zımba ve piston pernosları içermektedir. Kalıp silindirik geometriye sahiptir. Poşetlenen yaklaşık 10,5 g'lık toz karışımlar, silindirik kalıp içine yerleştirilmiş ve 20 mm'lik zımba pistonu ile tek eksenle 300 MPa basınç uygulanmıştır. Bu basınç 1–3 dakika arasında korunmuştur. Sıkıştırma tamamlandıktan sonra, kompakt numune kalıptan dikkatlice çıkarılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Hidrolik pres sonrası toz numunelerden elde edilen silindirik numune

3.5. Sinterleme İşlemi

Sinterleme işlemi, Batman Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümünde bulunan Stuart Scientific marka sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında numuneler, 600 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiştir. İşlem sonrasında numuneler, fırın kapağı açılarak oda sıcaklığında kontrollü bir şekilde soğutulmuştur. Sinterleme ve kontrollü soğutma işlemi ile kullanılan Stuart Scientific sinterleme cihazı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Stuart Scientific sinterleme fırını ve sinterleme işlemi

Fırınlama işlemine başlanmadan önce, numuneler hava ile temasını kesmek amacıyla özenle alüminyum folyo ile sarılmıştır. Bu önlem, malzemelerin oksitlenmesi veya dış etkenlerden etkilenmesi riskini en aza indirmek için alınmıştır. Her numune üzerinde numaralandırma işlemi yapılmış ve bu numaralandırmaya uygun olarak numuneler fırın içerisine yerleştirilmiştir. Numunelerin doğru şekilde yerleştirilmesi, sıcaklık dağılımının homojen olmasını sağlamak ve her bir örneğin aynı koşullarda işlenmesini temin etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı, malzeme üzerinde oluşabilecek iç gerilmeleri minimize etmek amacıyla yavaş bir hızla artırılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra, numunelerin folyoları çıkarılmış ve her biri takviye cinsi ve oranına göre ayrı ayrı ambalajlanmıştır. Bu işleme ilişkin görsel Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Sinterleme sonrası numunelerin ambalajlanması

3.6. Numune Hazırlama

20 mm çapa sahip numunelerin yüzeyleri, sertlik ölçümlerinin ve aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemler, Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan 20–700 rpm arasında dönme hızına sahip ve 250 mm disk çapı olan Presi Minitech 233 model cihazda gerçekleştirilmiştir.

Zımparalama sürecinde, cihazın dönen diskine sırasıyla 240, 400, 800, 1000 ve 1200 grit zımpara kâğıtları takılmış ve numune yüzeyleri her aşamada zımparalanmıştır (Şekil 3.9). İşlem sırasında numunelere su uygulanmış ve belirli aralıklarla 90° döndürülerek, yüzeydeki çiziklerin tamamen giderilmesi sağlanmıştır.

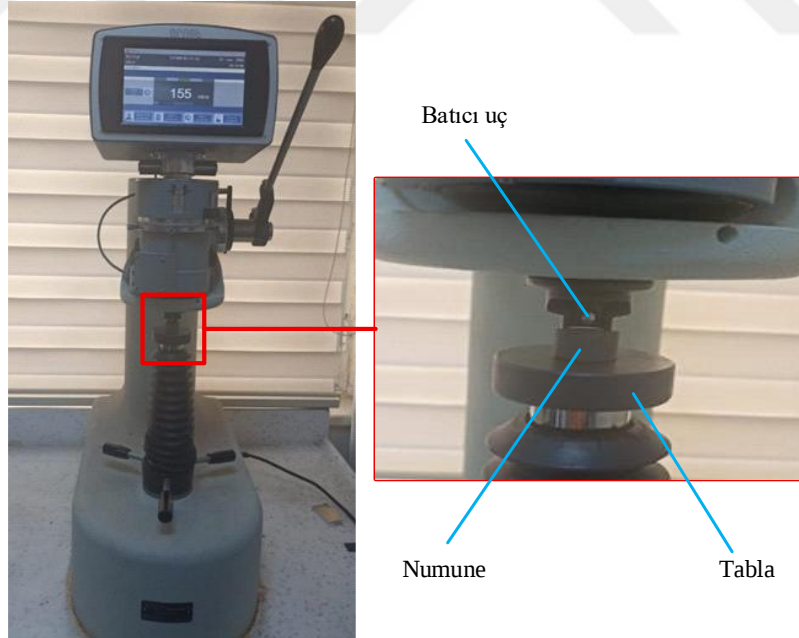
Zımparalama tamamlandıktan sonra, numuneler parlatma aşamasına geçirilmiştir. Bu işlemde çuha bezleri ile 6 µm elmas pasta kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Minitech Parlatma Cihazı ve parlatma işlemi

3.7. Sertlik Ölçümü

Sertlik deneyleri, Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki ERNST Brinell sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 62,5 kg yük altında yapılmıştır. Brinell sertlik ölçüm cihazı Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Numunenin Brinell Sertlik Cihazı ile sertliğinin ölçümü

Her bir numunenin sertlik değerinin tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla, üç farklı noktadan ölçüm alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalaması nihai sertlik değeri olarak belirlenmiştir.

3.8. Aşınma Testi

Malzemenin tribolojik özelliklerini değerlendirmek amacıyla pin-on-disk yöntemi kullanılarak aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, Batman Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Turkeyus marka aşınma cihazı ile yapılmıştır. Test düzeneğine ait görsel Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Pin-on-disk aşınma testi düzeneği

Testler, takviye cinsi, takviye oranı, yük ve dönme devrine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deney kombinasyonlarının sayısı fazla olduğundan, dönme devrine bağlı aşınma testlerinde sabit 5 N yük ve 200 d/dk ile 400 d/dk dönme devri seçilmiştir. Yüke bağlı aşınma testlerinde ise sabit 400 d/dk dönme devrinde, 7 N ve 10 N kuvvet etkisi altında deneyler yapılmıştır. 400 d/dk dönme devrinde farklı yüklerin seçilmesi, üç farklı yük kombinasyonunda sürtünme ve aşınma etkilerinin karşılaştırılabilmesini sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

Deney düzeneğinde, sabitlenmiş 6 mm çapındaki bir bilye aracılığıyla döner disk üzerindeki numune yüzeyine yük uygulanmıştır. Ardından döner disk döndürülmüş ve uygulanan yük, numune yüzeyinde yaklaşık 8 mm’lik iz çapına sahip bir dairesel yol boyunca 100 m’lik kayma mesafesi boyunca hareket etmiştir. Test süresince düşey yükler cihaz sensörleri aracılığıyla kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak zamana bağlı sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Aşındırıcı olarak çelik bilye kullanıldığından, iki malzemenin doğrudan teması sonucunda adhezif aşınma meydana gelmiş ve malzeme yüzeyinde sürtünme bölgesi boyunca belirgin bir aşınma izi oluşmuştur. ASTM G99 standardına uygun olarak, aşınma izinin boyutuna bağlı olarak aşınma hacmi hesaplanmış ve bu değerin kayma mesafesine oranı alınarak aşınma oranı belirlenmiştir.

3.9. XRD Ölçümleri

İstenilen verimde elde edilen kompozit numunelerde, mikroyapı fazlarının belirlenmesi amacıyla XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarındaki Rigaku MiniFlex II model cihazda yapılmıştır. XRD taramaları, 30 mA akım ve 40 kV gerilim altında, $0,5^\circ(2\theta)/s$ tarama hızı, $2\theta = 10^\circ - 85^\circ$ tarama aralığında, Cu-K α radyasyonu (dalga boyu $\lambda = 0,154056$ nm) kaynağı kullanılarak yürütülmüştür. Cihazın görüntüsü Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. XRD için kullanılan cihazın görünümü

3.10. SEM Analizleri

SEM analizleri, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarındaki Quanta 650 Field Emission SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın görüntüsü Şekil 3.13’te verilmiştir. SEM analizi, özellikle aşınma bölgelerinin morfolojik incelenmesi amacıyla uygulanmıştır.

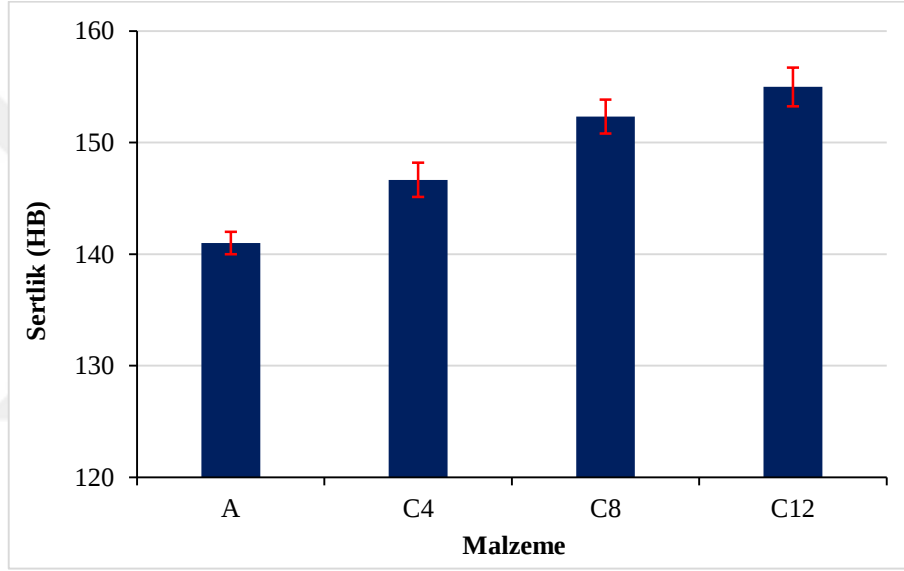


Şekil 3.13. SEM analizinde kullanılan Quanta 650 Field Emission cihazı

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Sertlik Sonuçlarının Analizi

Al7075 alaşım malzemesiyle %4, %8 ve %12 oranlarında cam fiber takviyesi uygulanarak üretilen Al7075 matrisli kompozitlerin Brinell sertlik değerleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

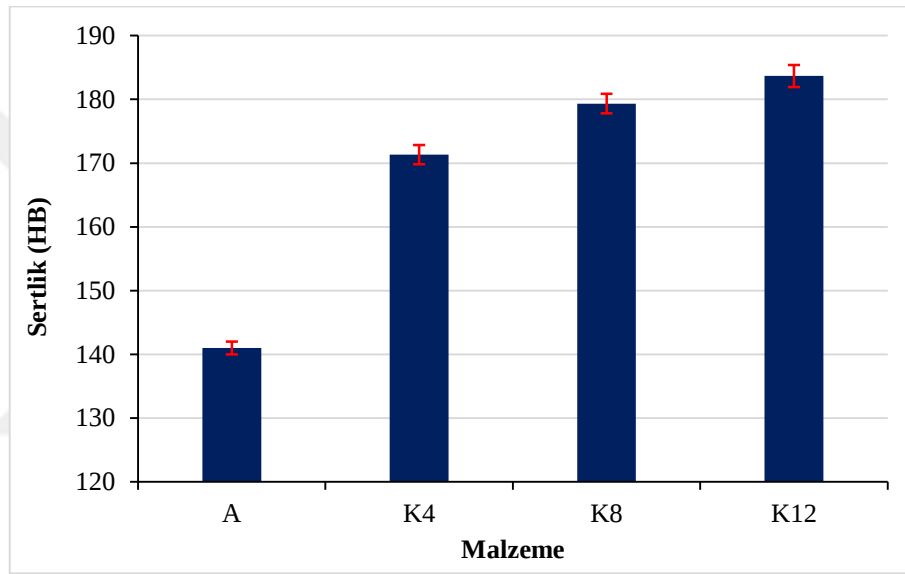


Şekil 4.1. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerinin sertlik değişimi

Şekil 4.1’de A ile gösterilen Al7075 baz alaşımının ortalama sertlik değeri 141 HB olarak elde edilmiştir. C4 ile gösterilen %4 cam fiber tozu katkılı Al7075 matrisli kompozitin ortalama sertlik değeri 147 HB olup, takviye ilavesi sertlik değerinde artış sağlamıştır. Cam fiber toz oranının %4’ten %8’e çıkarılmasıyla sertlik direncinin gelişmeye devam ettiği gözlenmiştir. C8 ile gösterilen %8 cam fiber tozu katkılı Al7075 matrisli kompozitin ortalama sertlik değeri 152 HB olarak ölçülmüştür. C12 ile gösterilen %12 cam fiber tozu katkılı kompozitin ortalama sertlik değeri ise en yüksek olup 155 HB olarak bulunmuştur. Grafikten anlaşılabacağı üzere, alaşımın sertliği sırasıyla %4, %8 ve %12 oranlarında cam fiber tozu ilavesiyle yaklaşık %4, %8 ve %10 oranında artmıştır. Bu durum, cam fiber tozu ile takviye edilmiş kompozitlerde plastik deformasyona karşı direncin artmasıyla açıklanabilir (Avcı ve ark., 2025). Nitekim Singh ve ark. (2022)

tarafından yapılan bir çalışmada, S-cam ilaveli hibrit Al matrisli kompozitlerde takviye oranının artmasıyla malzemenin deformasyona karşı direncinin arttığı ve cam takviyesinin uygulanan dış yükleri taşıyarak plastik deformasyonu engellediği belirtilmiştir. Diğer taraftan, kompozitlere ilave edilen takviye parçacıklarının Hall–Petch ilişkisine göre tane boyutunu küçülttüğü, tane sınırı bölgesini artırdığı ve böylece dislokasyon hareketini zorlaştırarak kompozit sertliğini artırdığı raporlanmıştır (Bhowmik ve ark., 2021; Bhowmik ve ark., 2022).

Karbon fiber katkılı Al7075 matrisli kompozitlerin Brinell sertlik değerleri, %4, %8 ve %12 takviye oranları için Şekil 4.2’de verilmiştir.

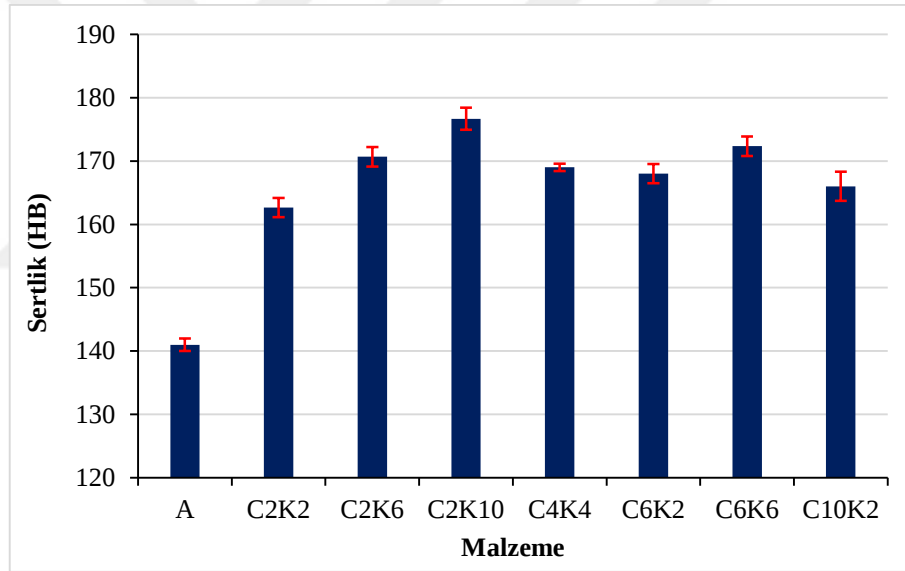


Şekil 4.2. Al7075 alaşımı ve karbon fiber takviyesi içeren kompozitlerinin sertlik değişimi

Şekil 4.2 incelendiğinde, cam fiber takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerde olduğu gibi karbon fiber ilavesinin de Al7075 matrisin sertliğini artırdığı görülmüştür. 141 HB ortalama sertlik değerine sahip olan Al7075 alaşıma ağırlıkça %4 karbon fiber (K4) ilavesi, ortalama sertliği 171 HB’ye yükseltmiştir. Karbon fiber tozu ilavesinin cam fiber tozu ilavesine kıyasla sertlik direncini daha fazla geliştirdiği anlaşılmaktadır. Karbon fiber tozu oranının K8 ile gösterilen %8’den K12 ile gösterilen %12’ye çıkarılması ek bir artış sağlamış ve sırasıyla 179 HB ve 184 HB değerleri elde edilmiştir. Karbon fiber ilavesiyle alaşımın sertliğinde meydana gelen artış, tane boyutlarının küçülmesi ve dislokasyon hareketlerinin sınırlandırılmasına bağlanabilir. Benzer bir çalışmada, sertlikteki artışın tane boyutu küçülmesine, Orowan döngülerine bağlı yüksek dislokasyona ve yumuşak faz Al ile sert karbon parçacıkları arasındaki elastik modül

farkına bağı Taylor pekleşmesine atfedildiği görülmüştür (Arşun ve ark., 2021). Deshpande ve ark. (2016) ise Al7075 matrisli kompozitlere %5–%30 arasında değışen oranlarda Ni kaplı karbon fiber ekleyerek kompozitlerin sertlik değışimlerini incelemiş ve baz alaşımanın sertliğinin 101 BHN’den 134 BHN’ye yükseldiğini belirlemişlerdir. Wu ve ark. (2021) ise %4–%12 oranlarında kısa karbon fiber takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerde artan takviye içeriğinin kompozit sertliğini sürekli artırdığını rapor etmişlerdir.

Cam ve karbon fiber tozlarının birlikte kullanılmasıyla elde edilen hibrit takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerin sertlik değıerleri de ölçülmüştür. Hibrit kompozitlerdeki fiber takviye oranları, tekli takviyeli kompozitlerde kullanılan %4, %8 ve %12 oranları göz önünde bulundurularak belirlenmiş ve bunların kombinasyonlarıyla üretilen hibrit kompozitlerin Brinell sertlik değıerleri Şekil 4.3’te verilmiştir.

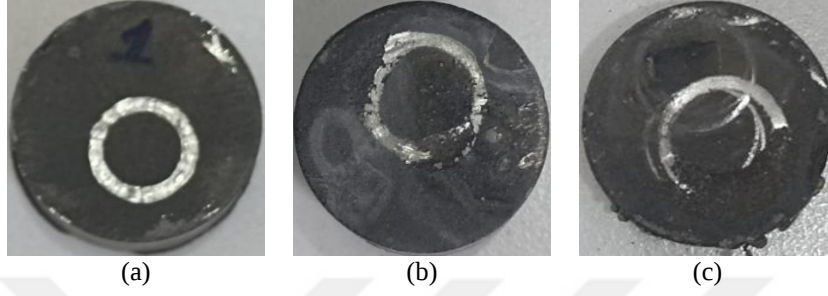


Şekil 4.3. Al7075 alaşıımı ve hibrit fiber takviyesi içeren kompozitlerinin sertlik değışimi

Şekil 4.3’te verilen hibrit kompozitlerin sertlik değıerleri, tekil kompozitlerden elde edilen sertlik değıerlerinin arasında yer almıştır. Elde edilen değıer, hangi fiberin oranı daha yüksek ise o fiberin bulunduğu tekil kompozite daha yakın çıkmıştır. Hibrit kompozitler arasında en yüksek sertlik, C2K10 ile gösterilen %2 cam fiber tozu ve %10 karbon fiber tozu içeren kompozitte elde edilmiş olup, ortalama sertlik değıeri 177 HB olarak bulunmuştur. Aynı takviye oranına sahip C10K2 ile gösterilen %10 cam fiber ve %2 karbon fiber tozu içeren kompozitte ise ortalama sertlik 166 HB olarak ölçülmüştür.

4.2. Aşınma Test Sonuçlarının Analizi

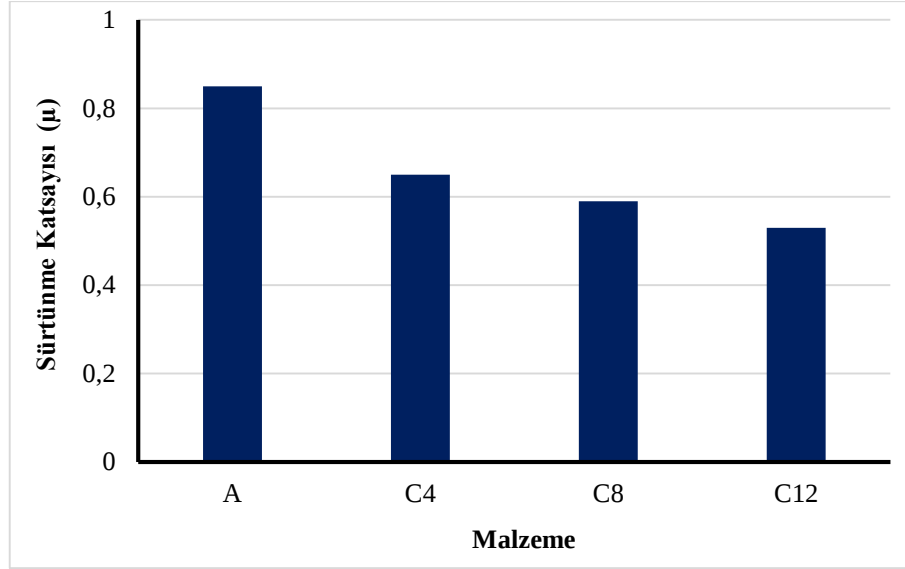
Cam ve karbon fiberler kullanılarak üretilen tekil ve hibrit kompozitlerin aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş olup, deneyler sonucunda elde edilen cam fiberli, hibrit ve karbon fiberli üç örnek yüzey Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kompozitlerin aşınma iz görüntüleri: a) Cam fiber takviyeli, b) Hibrit fiber takviyeli, c) Karbon fiber takviyeli

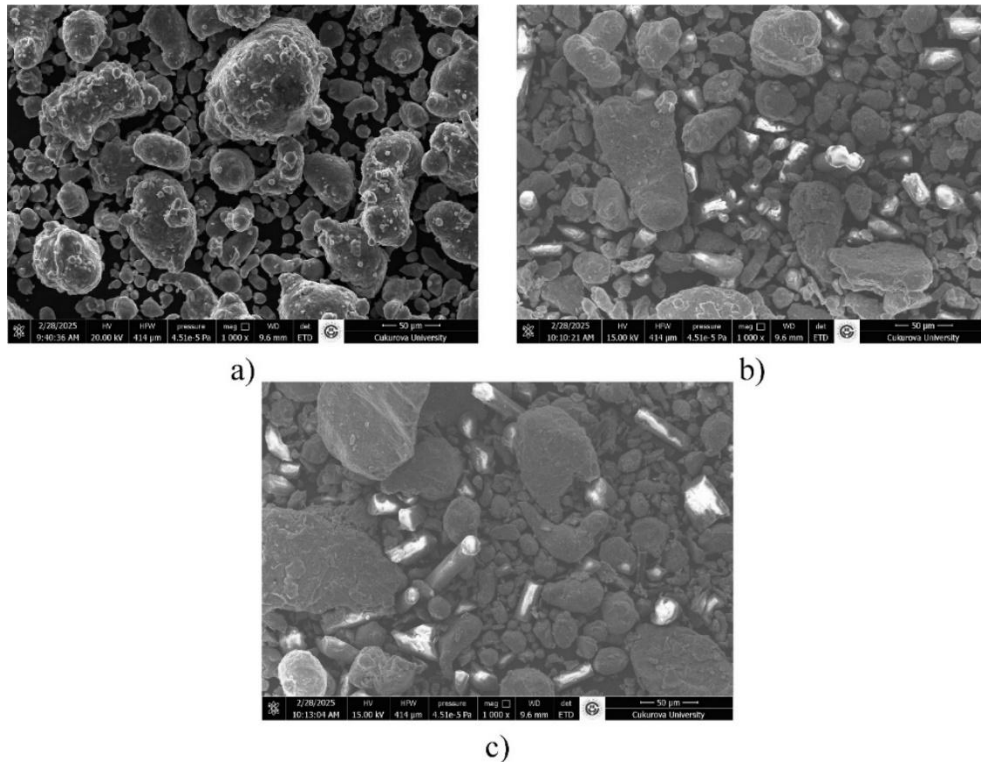
Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, cam fiber takviyeli kompozitlerin aşınma deneylerinde homojen bir aşınma izi elde edilmiş ve numune yüzeylerinde herhangi bir partikül kopması gözlemlenmemiştir. Buna karşın, karbon fiberlerin kullanıldığı, hibrit kompozitler dâhil tüm numunelerde, aşınma izlerinin cam fiber takviyeli kompozitlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiş, ancak yüzeylerde kısmi plastik deformasyonlar tespit edilmiştir. Özellikle yüksek oranda karbon fiber içeren kompozitlerde ise yüzeylerde yer yer partikül kopmaları meydana gelmiştir. Bu nedenle, karbon fiber içeriğine sahip kompozitlerin aşınma davranışının sağlıklı bir şekilde değerlendirilememesi sonucunda analizler yalnızca cam fiber takviyeli kompozitler üzerinden yürütülmüştür.

Şekil 4.5'te, 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinde, Al7075 alaşımındaki cam fiber takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Baz alaşım (A) için sürtünme katsayısı 0,85 iken, cam fiber toz oranının %4 olarak Al7075 matrisine eklenmesiyle (C4) sürtünme katsayısının 0,85'ten 0,65'e düştüğü gözlemlenmiştir. Takviye oranının artmasıyla en düşük sürtünme katsayısı, %12 cam fiber tozlu kompozitte (C12) 0,53 olarak elde edilmiştir. Cam fiber takviye toz oranının matris içinde artması, takviye parçacıklarının homojen dağılımı sonucunda matris yüzeyinde çıkıntı gibi davranarak Al7075 alaşımının çelik pin ile doğrudan temasını engellemesi ve bu sayede sürtünme katsayısında düşüş sağlanmasıyla ilişkilendirilmektedir.



Şekil 4.5. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerin 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı değişimi

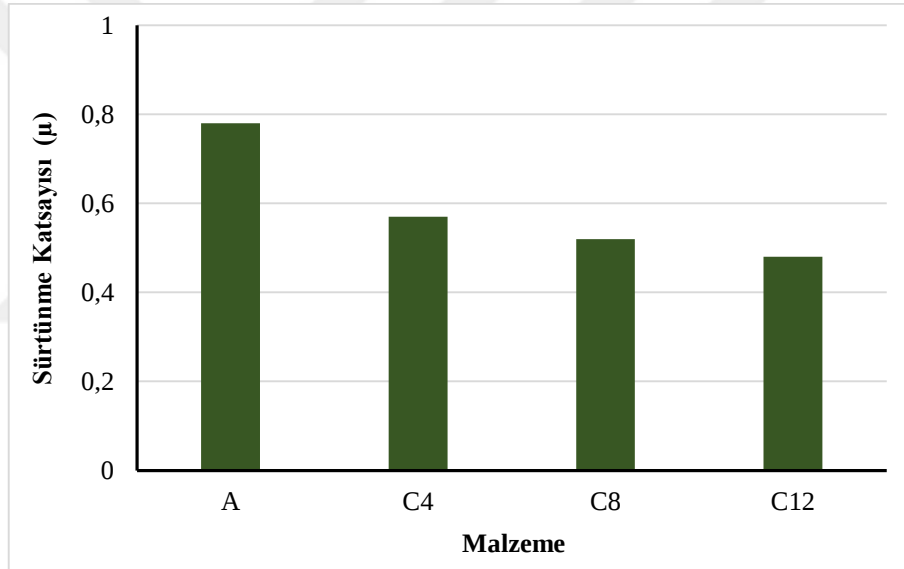
Homojen dağılım, kompoziti oluşturan tozların mekanik karıştırıcıda iyice karıştırılmasına bağlı olarak oluşmuştur. Elde edilen karışımın homojenliği, SEM görüntüleriyle açıkça gözlemlenmektedir. Farklı oranlarda cam fiber içeren Al7075 toz karışımlarına ait SEM görüntüleri Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Karıştırma sonrası elde edilen tozların SEM görüntüleri: a) Al7075 (A), b) %8 Cam/Al7075 (C4), c) %12 Cam/Al7075 (C12)

Şekil 4.6’da görüldüğü üzere, farklı oranlarda cam fiber içeren Al7075 toz karışımlarında takviye parçacıklarının matris içinde homojen dağıldığı açıkça gözlemlenmektedir. Homojen dağılımla birlikte artan takviye oranı, sertlikte meydana gelen artış sayesinde kompozitin yük taşıma kapasitesini artırmış ve sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağlamıştır. Benzer şekilde, Santhosh Kumar ve Grish (2018) yaptıkları çalışmada, değişen oranlarda tungsten karbür ve E-cam tozu ilaveli Al7075 matrisli kompozitlerde artan E-cam fiber ve tungsten karbür oranıyla sertliğin arttığını ve sürtünme katsayısının azaldığını ifade etmişlerdir.

400 d/dk dönme devri ve 5 N yük koşullarında gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda, Al7075 alaşımındaki cam fiber takviye oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri Şekil 4.7’de gösterilmektedir

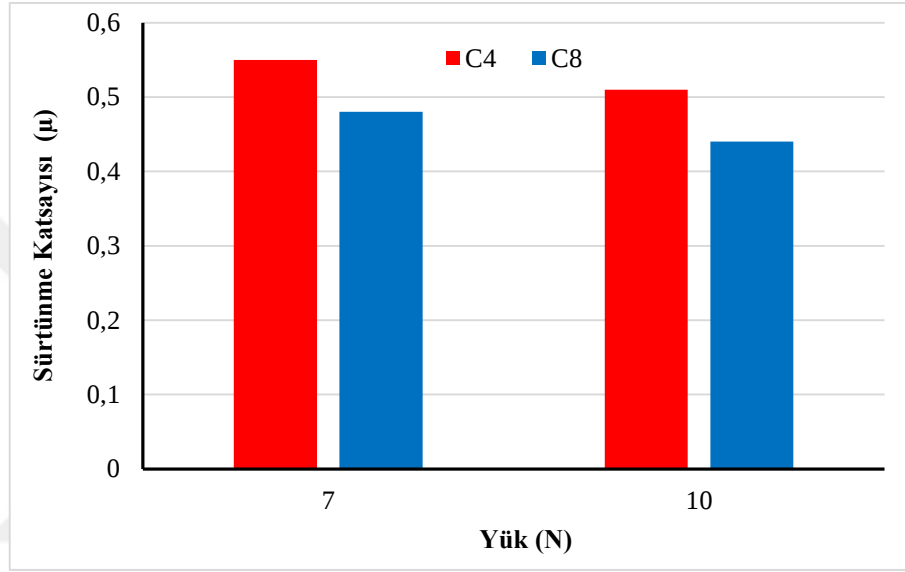


Şekil 4.7. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerin 400 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı değişimi

Dönme devrinin 200 d/dk’dan 400 d/dk’ya çıkarılmasıyla baz alaşımın (A) sürtünme katsayısı 0,85’ten 0,78’e düşmüştür. Benzer şekilde, diğer cam tozu takviyeli kompozitlerde de artan dönme hızının sürtünme katsayısını azalttığı belirlenmiştir. Aynı yük ve kayma mesafesinde, %4 cam fiber takviyeli kompozitte (C4) devrin 200 d/dk’dan 400 d/dk’ya çıkarılmasıyla sürtünme katsayısının 0,65’ten 0,57’ye düştüğü gözlemlenmiştir. Artan kayma hızıyla birlikte pin ile aşınan malzeme arasında yükselen yüzey sıcaklıkları, Al matrisin oksitlenmesini sağlayarak yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturmaktadır. Bu durum malzeme ile aşındırıcı karşı yüzey arasındaki teması azaltarak sürtünme katsayısının düşmesine neden olmaktadır (Baskaran ve ark., 2014). Tile ve

Thomas (2024) yaptıkları çalışmada, farklı parçacık takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerde aşınma hızının etkisini incelediklerinde, artan hızla birlikte temas eden gerçek yüzey alanının azaldığını ve buna bağlı olarak sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısının düştüğünü ifade etmişlerdir.

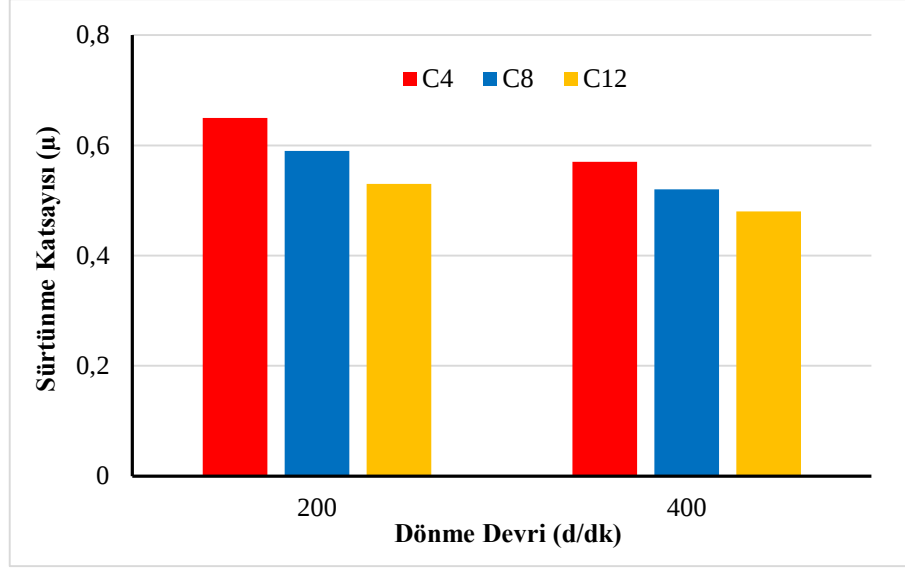
Şekil 4.8’de, 400 d/dk dönme devrinde C4 ve C8 ile gösterilen %4 ve %8 cam fiber takviyeli kompozitlerin iki farklı yük altındaki sürtünme katsayısındaki değişim verilmiştir.



Şekil 4.8. C4 ve C8 kompozitlerinde farklı yükler altında elde edilen sürtünme katsayısı değişimi

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, %4 cam fiber içeren C4 kompozitinde yükün 7 N’den 10 N’a çıkarılması, sürtünme katsayısının 0,55’ten 0,51’e düşmesine neden olmuştur. Kompozitte yüke bağlı olarak gözlenen bu azalma, triboyüzeyde oluşan koruyucu tabaka ve matris fazında meydana gelen deformasyon sertleşmesi ile açıklanabilir. Bhowmik ve ark. (2022), cam tozu takviyeli kompozitlerde artan yüklerle birlikte sürtünme katsayısında bir azalma belirlemiş ve bunun, pin ile dönen disk arasındaki temas yüzeyinin artmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlar da bu gözlemi desteklemektedir (Zhiqiang ve ark., 2005). C8 ile gösterilen %8 cam fiber takviyeli Al7075 matrisli kompozitte de artan yüklerle birlikte sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür.

%4, %8 ve %12 cam fiber takviye oranları ile üretilen C4, C8 ve C12 kompozitlerin dönme devrine bağlı sürtünme katsayısı değişim grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.

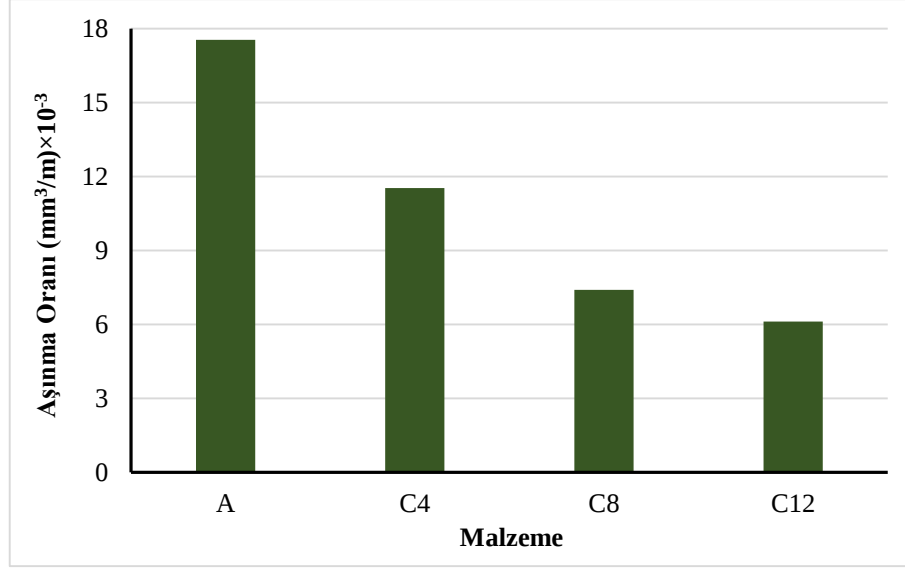


Şekil 4.9. C4, C8 ve C12 kompozitlerinde farklı dönme devirlerinde elde edilen sürtünme katsayısı değişimi

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere, cam fiber takviyeli kompozit türlerinde sürtünme katsayısı artan dönme devriyle birlikte azalma eğilimi göstermiştir. 200 d/dk dönme devrinde C4 olarak ifade edilen %4 cam fiber takviyeli kompozitte sürtünme katsayısı 0,65 iken, dönme devrinin 400 d/dk’ya çıkarılmasıyla bu değer 0,57’ye düşmüştür. En düşük sürtünme katsayısı, %12 cam fiber takviyeli kompozitte (C12) 400 d/dk dönme devrinde 0,48 olarak elde edilmiştir.

Dönme devrindeki artışla birlikte kompozit yüzeyindeki sıcaklık yükselmekte ve bu durum metal matrisli kompozitlerde oksit tabakası oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan bu transfer film tabakası, pin ile metal yüzey arasındaki doğrudan teması azaltarak sürtünme katsayısının düşmesine katkı sağlamaktadır. Raju ve Balakrishnan (2020), yaptıkları çalışmada, hızın belirli bir eşiği aşmasının sürtünme katsayısında düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir. Benzer şekilde, Şimşek ve ark. (2020) da parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerde artan hızla birlikte sürtünme katsayısı ve kütle kaybının azaldığını, bu durumun ise kompozit yüzeyinde oluşan koruyucu oksit tabaka ve matris içindeki katı yağlayıcı fazlardan kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Sürtünme katsayısındaki değişimlerin ardından, numunelerin aşınma davranışı da değerlendirilmiş ve Al7075 alaşımına eklenen cam fiber takviye oranının, yükün ve dönme devrinin aşınma oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, Al7075 alaşımı ile farklı oranlarda cam fiber eklenerek üretilen kompozitlerin 200 d/dk dönme devrinde ve 5 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma oranı değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir.

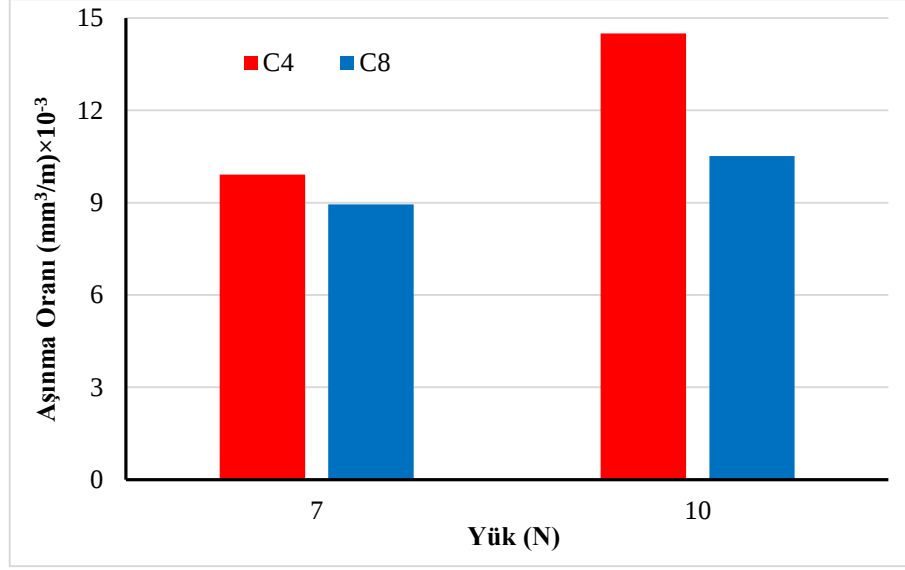


Şekil 4.10. Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyesi içeren kompozitlerin 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında elde edilen aşınma oranı değişimi

Şekil 4.10'daki grafikte, A ile gösterilen saf Al7075 alaşımının 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altındaki aşınma oranı $17,54 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ iken, C4 olarak gösterilen ve %4 cam fiber içeren Al7075 matrisli kompozitte bu değer $11,53 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Takviye oranının artmasıyla aşınma oranı belirgin şekilde düşmüş, C8 ve C12 kompozitlerinde sırasıyla $7,41 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ve $6,12 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ olarak bulunmuştur. En düşük aşınma oranı C12 kompozitinde elde edilmiştir.

Takviye oranının artmasıyla aşınma oranındaki düşüş, malzemenin sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerindeki artış ile ilişkilidir ve böylece aşınma sisteminin tribolojik davranışında da değişiklikler gözlenmektedir (Rao ve Das, 2011). Ayrıca, oluşan oksit tabakası ve deformasyon sertleşmesi de aşınma direncini artırmaktadır. Bu kapsamda, cam fiber takviye oranının yükseltilmesi, kompozitlerin aşınma direncini artırmakta ve malzeme kaybını azaltmaktadır. Matris içindeki cam fiberler, plastik deformasyona karşı direnç kazandırarak malzeme sertliğini artırmakta ve aşınma oranının düşmesine katkı sağlamaktadır (Jayappa ve ark., 2023).

Fiber cinsine bağlı olarak elde edilen aşınma davranışlarının ardından, yükün aşınma oranı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. 400 d/dk dönme devri altında ve 7 N ile 10 N yüklerde gerçekleştirilen aşınma deneylerinde, C4 ve C8 kompozitlerinde elde edilen aşınma oranı değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.

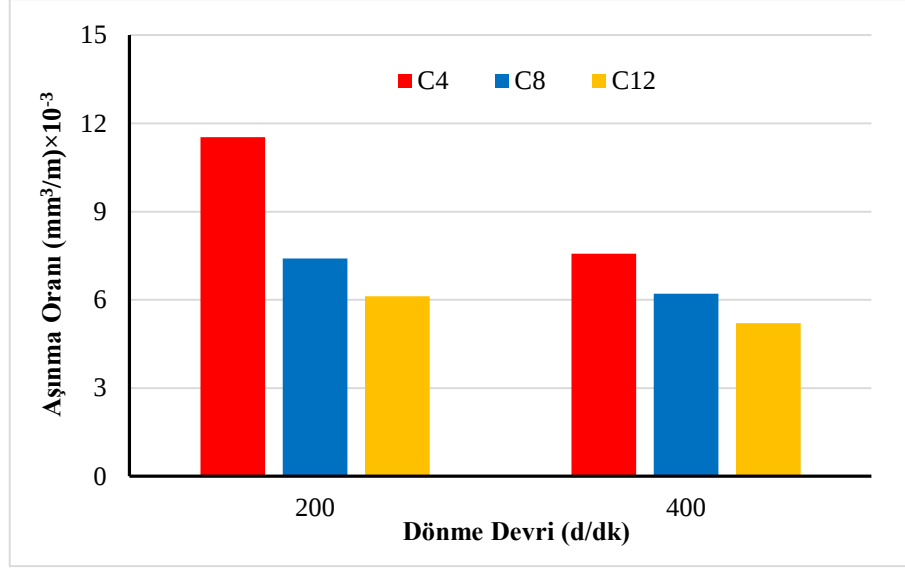


Şekil 4.11. C4 ve C8 kompozitlerinde farklı yükler altında elde edilen aşınma oranı değişimi

Şekil 4.11’de, %4 cam fiber takviyeli kompozit (C4) için 7 N yük altında aşınma hacmi $9,91 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$, 10 N yükte ise $14,50 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, %8 cam fiber takviyeli kompozit (C8) için 7 N yükte $8,96 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ olan aşınma hacmi, 10 N yükte $10,46 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ elde edilmiştir. Yükün artması aşınma hacmini arttırmıştır.

Yük, temas alanının büyüklüğünü ve deformasyon derecesini etkileyerek sürtünme ve aşınma davranışını değiştirmektedir. Yük arttıkça temas yüzeyinin gerçek temas alanı artmakta ve temas bölgesinde biriken aşındırıcı parçacıklar, daha yüksek deformasyona ve dolayısıyla aşınma oranında artışa yol açmaktadır (Wang ve Zhang, 2023). Ayrıca, artan yük mevcut tribofilm tabakasının zayıflamasına neden olarak aşınma davranışını hafif aşınma evresinden şiddetli aşınma evresine taşımaktadır. Bu nedenle, yüksek yükte cam fiber takviyeli kompozitlerin aşınma direnci düşmektedir (Zhang ve ark., 2008). Vijayakumar ve Karunamoorthy (2013) tarafından yapılan çalışmada da yük artışının pin ile kompozit arasındaki temas basıncını artırdığı ve bunun sonucunda aşınma oranının yükseldiği belirtilmiştir.

Cam fiber takviyesi ve yük etkisine bağlı aşınma davranışlarının incelenmesinin ardından, dönme devrinin aşınma oranı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, %4, %8 ve %12 cam fiber takviye oranları ile üretilen C4, C8 ve C12 kompozitlerin dönme devrine bağlı aşınma oranı değişim grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.



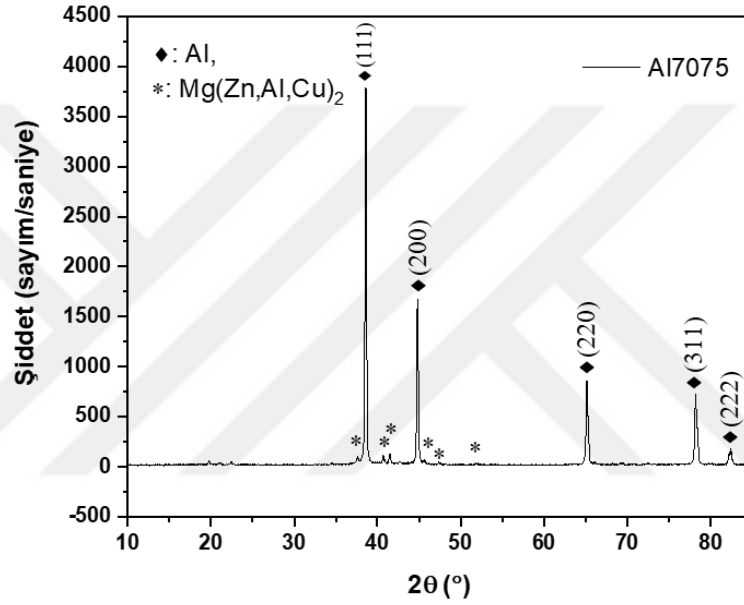
Şekil 4.12. C4, C8 ve C12 kompozitlerinde farklı dönme devirlerinde elde edilen aşınma oranı değişimi

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, artan dönme devri kompozitlerin aşınma oranını düşürmektedir. %4 cam fiber takviyeli kompozit (C4) için 200 d/dk dönme devrinde gerçekleştirilen testlerde aşınma oranı $11,53 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ iken, dönme devrinin 400 d/dk’ya çıkarılmasıyla aşınma oranı $7,57 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’e düşmüştür. %8 cam fiber takviyeli kompozit (C8) için 200 d/dk’dan 400 d/dk’ya dönme devrinin artmasıyla aşınma oranı $7,41 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’ten $6,21 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’e azalmıştır. %12 cam fiber takviyeli kompozit (C12) için 200 d/dk ve 400 d/dk dönme devirlerinden elde edilen aşınma oranları ise sırasıyla $6,12 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ve $5,21 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ’tür. Artan dönme devri ile aşınma oranındaki düşüş, C4, C8 ve C12 kompozitlerinde sırasıyla yaklaşık %34, %16 ve %15 olarak hesaplanmıştır.

Düşük dönme devirlerinde metal–metal temasının yoğun olması, yüksek dönme devirlerinde ise kompozit yüzey sıcaklığının artarak yüzeyde oksit oluşumunu sağlaması, bu tabakanın koruyucu bir film işlevi görerek aşınma kaybını azalttığı düşünülmektedir. Manikandan ve Karthikeyan (2014) çalışmalarında, kayma hızındaki artışın aşınma oranını azalttığı rapor edilmiştir. Bu durum, düşük hızlarda pin ile metal yüzey arasındaki temasın daha yoğun gerçekleşmesi nedeniyle aşınma mekanizmalarının daha etkin şekilde ortaya çıkmasına bağlanmıştır.

4.3. XRD Analiz Sonuçları

Numunelerin XRD analiz sonuçları, öncelikle Al7075 alaşım tozları ve cam fiber tozları üzerinde, ardından bu tozların kullanımıyla üretilen kompozit numuneler üzerinde incelenmiştir. Bu analizler, matris ile takviye malzemelerindeki kristal yapının, olası oksit fazlarının ve kompozitlerdeki faz dağılımlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13'te Al7075 alaşım tozlarına, Şekil 4.14'te ise cam fiber tozlarına ait XRD grafikleri verilmiştir.



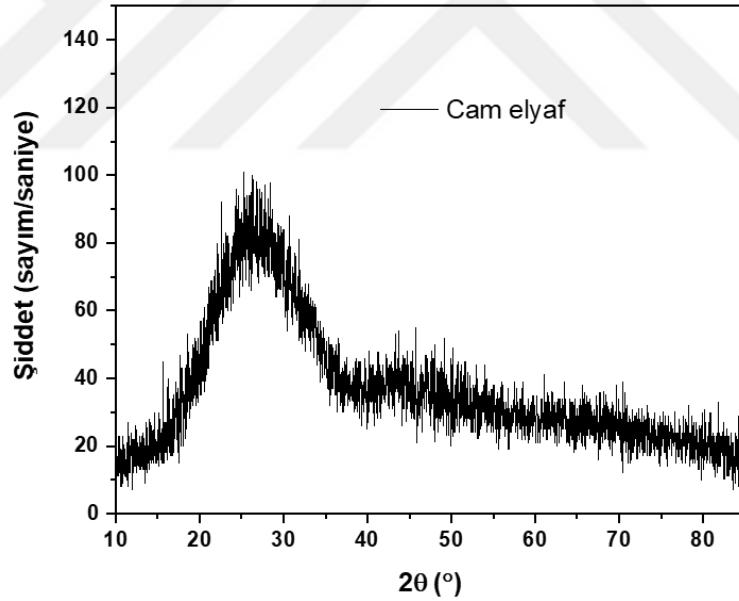
Şekil 4.13. Kompozit üretiminde kullanılan Al7075 alaşımının XRD deseni

Şekil 4.13'te Al7075 alüminyum alaşımına ait XRD deseninde, alaşımın temel bileşeni olan Al elementine ait kırınım piklerinin oldukça yüksek şiddette ve keskin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, alaşımın yüksek oranda Al içermesiyle doğrudan ilişkilidir. Buna karşılık, alaşım bileşiminde düşük oranlarda bulunan alaşım elementlerinin oluşturduğu $Mg(Zn,Al,Cu)_2$ katı çözelti fazlarının da mevcut olduğu, ancak bu fazlara ait piklerin çok daha düşük şiddette olduğu görülmektedir. Bu da söz konusu fazların konsantrasyonlarının görece daha düşük olduğuna işaret etmektedir.

Kırınım deseninde belirlenen Al pikleri sırasıyla $2\theta = 38,58^\circ$, $44,84^\circ$, $65,12^\circ$, $78,22^\circ$ ve $82,42^\circ$ açılarında tespit edilmiştir ve bu pikler sırasıyla (111), (200), (220), (311) ve (222) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu piklerin keskin ve yüksek

şiddetli oluşu, Al7075 alaşımının kristallit oranının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Yüksek kristalin yapı, tanecik boyutlarının nispeten büyük ve yapısal düzensizliklerin düşük olduğuna işaret eder. Dolayısıyla amorf veya nano boyutlu fazların baskın olmadığı bir yapı söz konusudur. Bu tür kristal yapı ve faz dağılımı, malzemenin mekanik ve termal özellikleri üzerinde doğrudan etkili olabilir. Özellikle tanecik sınırları, dislokasyon hareketi ve çökelti sertleşmesi gibi mikroyapısal süreçleri önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Elde edilen bulgular, literatürde Al bazlı alaşımlar üzerinde yapılan benzer XRD çalışmalarının sonuçlarıyla da uyumludur. Molnárová ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Al7075 alaşımında Al piklerinin baskın olduğu ve düşük oranlı ara fazlara ait piklerin görece daha zayıf şiddette ortaya çıktığı bildirilmiştir. Benzer şekilde, Gangadhar ve Girish (2021) tarafından yapılan araştırmada da Al7075 esaslı hibrit kompozitlerde Al piklerinin baskınlığı ve takviye fazlarına ait düşük şiddetli piklerin varlığı rapor edilmiştir.

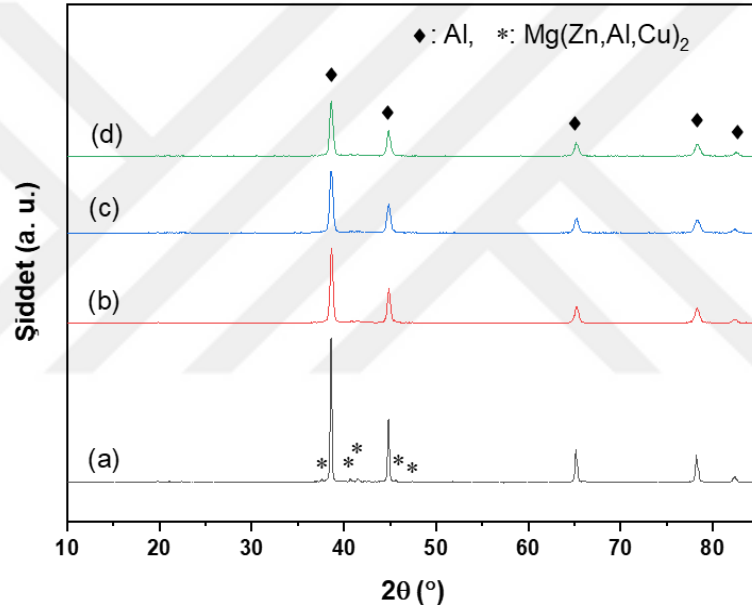


Şekil 4.14. Kompozit üretiminde kullanılan cam fiberin XRD deseni

Şekil 4.14'te cam fiber tozuna ait XRD kırınım deseni incelendiğinde ise karakteristik amorf yapı piklerinin oluştuğu ve herhangi bir kristalin fazı işaret eden keskin piklere rastlanmadığı görülmektedir. Kırınım deseninde belirgin şekilde geniş ve düşük şiddetli bir tepe yapısının gözlemlenmesi, beklenildiği üzere cam fiberin amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu tip geniş ve düşük kristallik düzeyi gösteren

tepe profili, düzensiz atomik dizilime sahip amorf fazların tipik bir göstergesidir (Fang ve ark., 2017). Literatürde de belirtildiği gibi (Li ve ark., 2012; Li ve ark., 2013), amorf yapıdaki cam fiberler, kristal yapıya sahip olanlara kıyasla daha kararlı bir yapıda olup bozunma oranları daha düşüktür. Bu durum, aşınma deneylerinde, cam fiber takviyeli kompozitlerin baz alaşıma kıyasla yapısal bütünlüğünü daha uzun süre koruyabilmesini sağlamış, dolayısıyla kompozitin sertlik ve aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerine olumlu katkı sunmuştur.

Al7075 alaşım ve cam fiber tozları ile üretilen kompozitlerde, matris ve takviye malzemelerin kristal yapısı, olası yeni faz oluşumları ve faz dağılımındaki değişimler XRD analizleri ile incelenmiş ve elde edilen grafik Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Cam fiber takviyeli Al7075 alaşım matrisli kompozitlerin XRD desenleri: (a) %0 fiber katkılı, (b): %4 fiber katkılı, (c): %8 fiber katkılı, (d): %12 fiber katkılı numuneler

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, tüm kompozit numunelerde anafaz olan Al elementine ait karakteristik kırınım pikleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Al7075 alaşımı içerisinde bulunan $Mg(Zn,Al,Cu)_2$ ara fazına ait kırınım pikleri, cam fiber takviyeli kompozitlerde tespit edilememiştir. Bu durum iki olasılıkla açıklanabilir. Birincisi, cam fiber oranındaki artışa bağlı olarak $Mg(Zn,Al,Cu)_2$ fazının kompozit içerisindeki bağlı miktarının azalması ve bu nedenle XRD cihazının algılama eşiğinin altına inmiş olmasıdır. İkincisi ise amorf yapıya sahip cam fiberin oluşturduğu geniş ve düşük şiddetli kırınım desenlerinin, bu zayıf ara faz piklerini örtüyor olabileceğidir.

Benzer gözlemler, literatürde amorf veya düşük kristallik düzeyine sahip takviye fazları içeren kompozitlerde de rapor edilmiştir (Fang ve ark., 2017; Li ve ark., 2012).

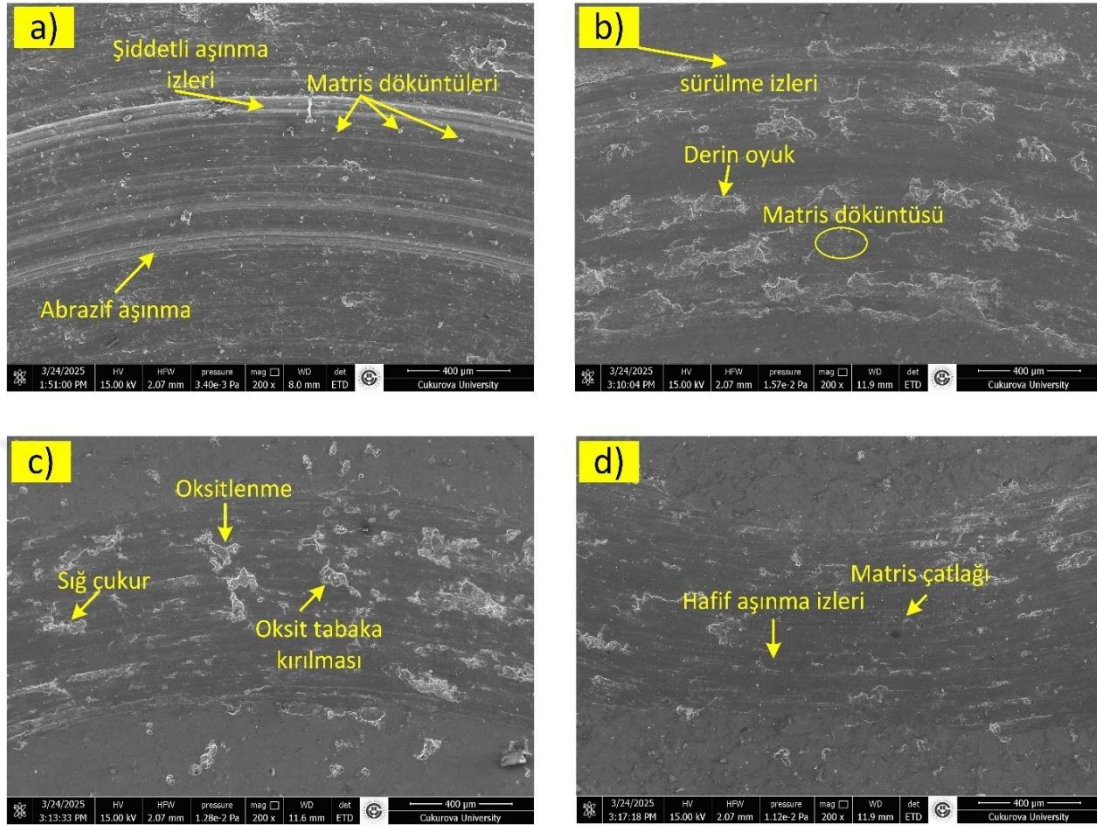
Şekil 4.15'teki desenler ayrıca, cam fiber takviye oranı arttıkça Al fazlarına ait kırınım piklerinin şiddetinde azalma, buna karşılık pik genişliklerinde artış meydana geldiğini göstermektedir. Pik genişliklerindeki bu artış, kristalit boyutlarının küçülmesiyle mikroyapıda oluşan iç gerilmeler ve amorflaşma düzeyindeki artışla ilişkilidir. Bu durum, sabit öğütme süresinde cam fiber oranı arttıkça daha fazla plastik deformasyon gerçekleştiğini, faz dağılımında daha homojen bir karışım ve tane incelmeleri oluştuğunu göstermektedir. Kristalit boyutundaki bu azalma, Hall–Petch mekanizmasına göre malzemenin mukavemetini artırıcı yönde etki yapabilir. Elde edilen sonuçların, literatürde daha önce yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür (Okumuş ve Bülbül, 2022; Bülbül ve Okumuş, 2022; Demir ve Okumuş, 2024). Sonuç olarak, XRD analiz verileri cam fiber katkısının mikroyapısal değişimi önemli ölçüde etkilediğini ve özellikle kristallinite düzeyi ile faz oluşum mekanizmaları üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Dolayısıyla, üretilen kompozitlerde cam fiber takviye oranının %4'ten %12'ye çıkarılmasıyla birlikte kristalit boyutunun küçülmesi ve amorflaşmanın artması, kompozitlerin sertlik ve aşınma davranışı gibi özelliklerinde iyileşmeye neden olmuştur.

4.4. Aşınmış Yüzey SEM Morfolojisi

Üretilen cam fiber takviyeli Al7075 alaşım matrisli kompozitlerin özellikleri, önceki bölümlerde yapılan sertlik, aşınma ve XRD analizleri ile değerlendirilmiştir. Sertlik ve aşınma testleri, cam fiber katkısının kompozitlerin mekanik dayanımı ve aşınma direnci üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. XRD analizleri ise cam fiber takviyesinin, kompozitlerin kristallinite düzeyi, kristalit boyutu ile faz şiddeti ve genişliği üzerinde önemli değişiklikler meydana getirdiğini ortaya koymuştur. Bu yapısal değişimlerin, malzemenin sertlik ve aşınma davranışları üzerinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmıştır.

Elde edilen bu bulgular doğrultusunda, aşınmış yüzeylerin morfolojik özelliklerinin incelenmesi, mekanik ve faz yapısındaki değişimlerin mikroyapısal etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla SEM ile gerçekleştirilmiştir. 5 N uygulanan yük, 200 d/dk dönme devri ve 100 m kayma mesafesinde gerçekleştirilen aşınma testleri

sonrasında, Al7075 alaşımı ve cam fiber takviyeli kompozitlerin aşınmış bölgelerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



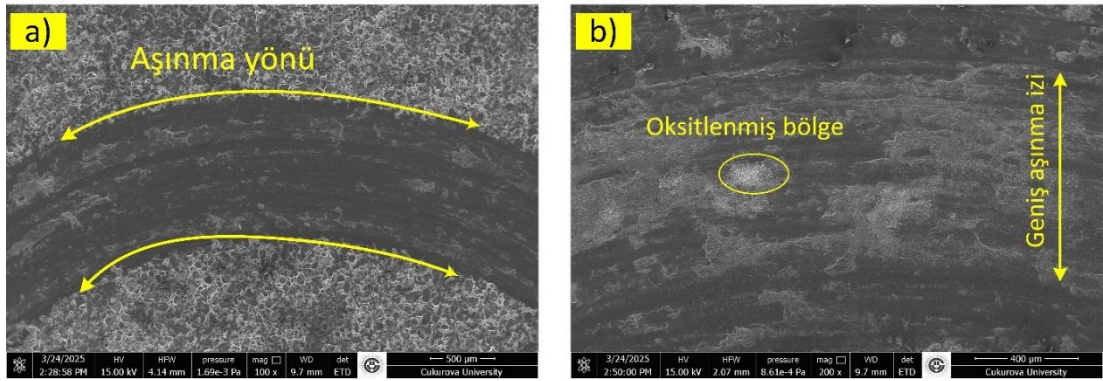
Şekil 4.16. Takviyesiz ve cam fiber takviyeli kompozitlerin aşınmış yüzeylerine ait SEM görüntüleri: a) Al7075 alaşımı, b) C4 kompoziti, c) C8 kompoziti, d) C12 kompoziti

Aşınma testlerinde pim ile numune yüzeyinin sürekli temas halinde olması nedeniyle, yüzeyde meydana gelen aşınma izleri Şekil 4.16’da açıkça gözlemlenmektedir. Şekil 4.16a’da verilen Al7075 alaşımının aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde, yüzeyde derin oyuk izlerinin yoğun olarak bulunduğu görülmüştür. Alaşım yüzeyinde belirgin plastik deformasyon bölgeleri ve pul şeklinde matris döküntüleri meydana gelmiştir.

Şekil 4.16b’de yer alan %4 cam fiber takviyeli C4 kompozitinin aşınmış yüzeyi incelendiğinde, Al7075 alaşımına kıyasla derin oyuk izlerinin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, takviyesiz alaşım ile karşılaştırıldığında yüzeyden uzaklaşan matris döküntülerinin miktarının da azaldığı belirlenmiştir. Kompozit malzemenin aşınma direncindeki bu artış, kompozit ile karşı yüzey arasında ince bir koruyucu tabaka oluşturan cam fiber takviyelerinin varlığından kaynaklanmaktadır.

Artan cam fiber takviye oranı ile birlikte kompozitlerde meydana gelen deformasyon ve aşınma hasarlarının azaldığı, dolayısıyla aşınma direncinin arttığı gözlenmiştir. En az yüzey hasarı ve çukur oluşumu, %12 cam fiber takviyeli C12 kompozitte tespit edilmiştir. Takviye miktarındaki artışa bağlı olarak matris sertliğinin yükselmesi, kompozitlerin aşınma yüklerine karşı daha etkin bir direnç göstermesini ve aşınma kaybının azalmasını sağlamaktadır. Yapılan benzer çalışmalarda da artan takviye içeriğinin kompozitlerin aşınma performansını iyileştirdiği rapor edilmiştir (Radhika ve ark., 2012; Rajmohan ve ark., 2013).

Cam fiber takviye oranının yanı sıra uygulanan yükün de kompozitlerin aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu kapsamda, %4 cam fiber takviyeli kompozitlerin 400 d/dk sabit dönme devrinde, 7 N ve 10 N yükler altında aşınma sonrası yüzey morfolojileri incelenmiştir. Elde edilen aşınmış yüzey görüntüleri Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. C4 kompozitinin aşınmış yüzeylerine ait SEM görüntüleri: a) 7 N, b) 10 N

Şekil 4.17’de verilen aşınmış yüzeyleri incelendiğinde, yük artışına bağlı olarak aşınma iz genişliğinin de arttığı görülmektedir. Yük artışıyla birlikte kompozit yüzeyinden kopan parçacıklar oksitlenerek bir tabaka oluşturmakta ve bu tabaka yüzeye yeniden yapışarak kaymayı kolaylaştırmakta, böylece sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağlamaktadır (Özyürek ve ark., 2014). Ancak yük artışı aynı zamanda aşınma kaybının da artmasına neden olmaktadır. 7 N yük altında yüzeyde hafif aşınma izleri gözlenirken, yükün 10 N’a çıkarılmasıyla plastik deformasyonun ve termal yumuşamanın etkisiyle aşınma izlerinin belirgin biçimde derinleştiği tespit edilmiştir. Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışının incelendiği benzer çalışmalarda da yük artışının kompozitlerde ciddi aşınma kayıplarına yol açtığı ve deformasyon hasarlarını artırdığı bildirilmiştir (Vijayakumar ve ark., 2013; AM ve ark., 2019).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, cam ve karbon fiber takviyeli Al7075 alaşım matrisli kompozitler TM yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiş olup takviye tipi ve oranının kompozitlerin performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Cam ve karbon fiber takviyeleri, Al7075 matris sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. Takviyesiz Al7075'in sertliği 141 HB iken, tekil cam fiber takviyesiyle sertlik artışı, takviyenin %4, %8 ve %12 olduğu numunelerde sırasıyla 147, 152 ve 155 HB olarak ölçülmüştür. Karbon fiber takviyesinde aynı oranlar için sertlik değerleri 171, 179 ve 184 HB olmuştur. Hibrit kompozitlerde (%2 cam + %2 karbon) sertlik 163 HB olarak ölçülmüş, bu değer aynı oranda tekil cam ve karbon fiber içeren kompozitlerin sertlik değerlerinin arasında yer almıştır. Hibrit kompozitlerde belirli bir fiber tipinin oranı arttıkça, malzemenin sertlik değeri ilgili fiberin tekil kullanımındaki sertlik değerine yaklaşmıştır.

Karbon fiber takviyeli ve hibrit kompozit numunelerde, karbon fiber–matris arayüzündeki uyumsuzluklar numune bütünlüğünü etkilemiş ve aşınma sırasında lokal malzeme kopmalarına yol açmıştır. Bu kopmalar, yüzeyde mikroçatlak oluşumunu tetikleyerek düzensiz aşınma davranışına neden olmuş ve söz konusu deneylerin sağlıklı bir şekilde sürdürülmesini engelleyerek testlerin sonlandırılmasına sebep olmuştur.

Cam fiber takviyeli Al7075 matrisli kompozitler tribolojik performans açısından karbon fiberli ve hibrit kompozitlere kıyasla daha güvenilir ve etkili sonuçlar sunmuştur.

Cam fiber takviyesinin, Al7075 kompozitlerde sürtünme katsayısı ve aşınma oranını belirgin şekilde azalttığı, matris sertliği ve yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. 200 d/dk dönme devri ve 5 N yük altında takviyesiz Al7075'in sürtünme katsayısı 0,85 iken, %4 ve %12 cam elyaf takviyesi ile sırasıyla 0,65 ve 0,53'e düşmüştür. Dönme devri 400 d/dk'ya çıkıldığında ise %4 cam fiber takviyeli kompozit için sürtünme katsayısı 0,57 olarak gerçekleşmiştir. Aynı koşullarda takviyesiz Al7075'in aşınma oranı $17,54 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ iken, %4 cam fiberli kompozitte 200 d/dk dönme devrinde 11,53

$\text{mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ ve 400 d/dk dönme devrinde $7,57 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$ 'e düşmüştür. %8 cam fiberli numunelerde 400 d/dk dönme devrinde yaklaşık %16'lık aşınma düşüşü gözlenmiştir. Artan yük, sürtünme katsayısını düşürürken aşınma kaybını artırmış, bunun temas alanının genişlemesi ve triboyüzey tabakasının zayıflamasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

XRD analizleri, cam fiber takviyeli numunelerde amorf yapıya bağlı olarak geniş ve düşük şiddetli pikler göstermiştir. Al piklerindeki azalma ve pik genişliğinin artışı, kristalit boyutunun küçüldüğünü ve mikroyapıda amorflaşma eğiliminin arttığını ortaya koymuştur.

SEM analizleri, takviyesiz Al7075'te derin oyuklar, pul şeklinde matris döküntüleri ve paralel tabakalar gözlemiş, aşınmanın mekanik etkilerle gerçekleştiğini göstermiştir. Cam fiber takviyesi, derin oyuk ve matris döküntülerini azaltmış, yüzey deformasyonu ve hasarları önemli ölçüde sınırlamıştır. %12 cam fiber takviyeli kompozitte en düşük yüzey hasarı ve çukur oluşumu gözlenmiştir. Matris sertliğindeki artış kompozitlerin aşınma yüklerine karşı direncini artırmıştır.

5.2. Öneriler

Elde edilen bulgular doğrultusunda, Al7075 matrisli cam ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin performansını artırmak ve üretim sürecini optimize etmek amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

1. Karbon fiber takviyeli kompozitlerde matris-elyaf arayüz uyumsuzluğunu azaltmak için presleme ve sinterleme parametreleri optimize edilmelidir.
2. Karbon fiberin homojen dağılımını sağlamak amacıyla karıştırma süresi, presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığı kontrollü bir şekilde belirlenmelidir.
3. Daha düşük karbon fiber takviye oranları için üretimler gerçekleştirilmelidir.
4. Cam ve karbon fiber takviyesinin kompozitlerin korozyon davranışına etkisi elektrokimyasal testlerle incelenmelidir. Bu, özellikle denizcilik, havacılık ve nemli ortamlarda kullanılan yapısal bileşenlerin güvenilirliği için önemlidir.
5. Elde edilen kompozitlerin endüstriyel üretim ölçeğine taşınabilirliği ve maliyet etkinliği analiz edilmelidir.
6. Takviye-matris arayüz kalitesini artıracak ek işlemler uygulanarak karbon fiberli kompozitlerin aşınma testlerinde güvenilirliği artırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdizadeh, H., Ebrahimifard, R., & Baghchesara, M. A. (2014). Investigation of microstructure and mechanical properties of nano MgO reinforced Al composites manufactured by stir casting and powder metallurgy methods: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 56, 217-221. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.023>
- Ahmed, N. T. (2024). *Otomotiv endüstrisinde karbon elyaf uygulamaları ile ilgili gelişmeler ve sürdürülebilirlik yaklaşımları*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi.
- Akhlaghi, F., & Zare-Bidaki, A. (2009). Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method. *Wear*, 266(1-2), 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.05.013>
- Alam, M. F. (2013). *Squeeze casting as alternative fabrication process for carbon fiber reinforced aluminium matrix composites* (Published master's thesis). University of Ottawa (Canada).
- Alovsat, T. Y. (2024). Classification and properties of composites based on matrix material. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24(2), 2278-82. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3608>
- AM, R., Kaleemulla, M., Doddamani, S., & KN, B. (2019). Material characterization of SiC and Al₂O₃-reinforced hybrid aluminum metal matrix composites on wear behavior. *Advanced Composites Letters*, 28, 0963693519856356. <https://doi.org/10.1177/0963693519856356>
- Amirkhanlou, S., & Ji, S. (2020). A review on high stiffness aluminum-based composites and bimetallics. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1485550>
- Arik, H. (2019). Toz metalurjisi metoduyla Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(3), 741-754.
- Arsun, O., Akgul, Y., & Simsir, H. (2021). Investigation of the properties of Al7075-HTC composites produced by powder metallurgy. *Journal of Composite Materials*, 55(17), 2339-2348. <https://doi.org/10.1177/0021998321990877>
- Avci, I., Demir, M. E., & Çelik, Y. H. (2025). *Al7075 alaşımında cam elyaf tozlarının sertlik üzerine etkisinin araştırılması* [Konferans sunumu]. 4th International Conference on Contemporary Academic Research-ICCAR, Konya-Türkiye, (pp. 343-347).

- Bahl, S. (2021). Fiber reinforced metal matrix composites-a review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>
- Bai, Y., Zhou, J., Zhao, C., Yun, K., & Qi, L. (2024). An experimental strategy and investigation of preparing high-strength and low-expansion carbon fiber reinforced Al matrix composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 999, 174978. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174978>
- Bajaj, P. (2008). *Mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composites reinforced with SiC and alumina*. [Master's thesis]. Thapar University.
- Baskaran, S., Anandakrishnan, V. A., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.074>
- Becerik, F. (2020). *Al/Ni-ÇKKNT kompozitlerin toz metalürjisi ile üretimi, mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Behera, R. K., Samal, B. P., Panigrahi, S. C., Parida, P. K., Muduli, K., Muhammad, N., Das, N., & Abd Rahim, S. Z. (2022). Erosion wear characteristics of novel AMMC produced using powder metallurgy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(3), 1027-1032. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.139697>
- Bharathi, P. K. T. S., & Kumar, T. S. (2023). Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B₄C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route. *Silicon*, 15(10), 4259-4275. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02347-0>
- Bhowmik, A., Dey, D., & Biswas, A. (2021). Comparative study of microstructure, physical and mechanical characterization of SiC/TiB₂ reinforced aluminium matrix composite. *Silicon*, 13(6), 2003-2010. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00591-2>
- Bhowmik, A., Meher, A., Biswas, S., Dey, D., Kumar, M. S., Biswas, A., & Alsharabi, R. M. (2022). Synthesis and characterization of borosilicate glass powder-reinforced novel lightweight aluminum matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 9487900. <https://doi.org/10.1155/2022/9487900>
- Bindal, C., Genel, K., Demirkol, M., Artır, R., Bakkal, M., & Parasız, S. A. (2015). *Malzeme bilimi ve mühendisliği* (8. Basımdan Çeviri) (Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., Materials Science and Engineering, Willey), Nobel Yayınları, İstanbul. ISBN978-605-133-418-9
- Biron, M. (2007). *Thermoplastics and thermoplastic composites: Technical information for plastics users* (1st Edition). Butterwoth-Heinemann: Oxford. Elsevier.

- Bülbül, B., & Okumuş, M. (2022). Microstructure, hardness, thermal and wear behaviours in Al-10Ni/TiO₂ composites fabricated by mechanical alloying. *Materials Chemistry and Physics*, 281, 125908. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125908>
- Cabioğlu, A. M. (2012). *Farklı sıcaklık ortamlarında pim bağlantılı kompozit plakaların yatak dayanımlarının incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Can, A. Ç. (2010). *Tasarımcı mühendisler için malzeme bilgisi*. Birsen Yayınevi, isbn 9789755114545.
- Çelik, Y. H., & Kilickap, E. (2017). Investigation of microstructure, hardness values and compressive strengths of SiC/Al composites in different reinforcing rates produced by PM Method [Konferans sunumu]. 8th International Advanced Technologies Symposium-IATS'17, Elazığ-Turkey, (pp. 473–478).
- Çelik, Y. H., & Kilickap, E. (2019). Hardness and wear behaviours of Al matrix composites and hybrid composites reinforced with B₄C and SiC. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57(9), 613-622. <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00023-w>
- Çelik, Y. H., & Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B₄C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2218-2224. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.06.002>
- Çelik, Y. H., Kılıçkap, E., & Yenigün, B. (2018). TM yöntemi ile üretilmiş Al matrisli kompozitlerde presleme basıncının ve B₄C oranının sertlik ve aşınma davranışı üzerine etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 33-40.
- Channi, A. S., & Channi, M. K. (2025). Advances in AMC: A review of processing techniques, mechanical performance and wear properties. *International Journal of Innovations in Science, Engineering and Management*, 256-261. <https://doi.org/10.69968/ijisem.2025v4i1256-261>
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering* (3rd edition). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>
- Chouhan, M., Thakur, L., & Kumar, P. (2024). Parametric optimization and impact behaviour of AA7075/SiC FGM fabricated by hot compaction powder metallurgy process. *Materials Today Communications*, 38, 107833. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107833>
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials* (third edition). Cambridge university press.
- Çolak, N. Y., & Turhan, H. (2016). Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al-Si/B₄C kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 259-266.

- Demir, M. E., & Okumuş, M. (2024). Investigation of microhardness, microstructural, tribological, and thermal properties of Al7075/TiO₂/kaoline hybrid metal matrix composites produced by powder metallurgy process. *Advanced Engineering Materials*, 26(24), 2401343. <https://doi.org/10.1002/adem.202401343>
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., & Kalkanli, A. (2022). The effect of rolling and aging on mechanical and tribological properties in B₄C particle reinforced Al7075 matrix composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(12), 16187-16208. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06891-6>
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., Kilickap, E., & Kalkanli, A. (2023). The effect of B₄C reinforcements on the microstructure, mechanical properties, and wear behavior of AA7075 alloy matrix produced by squeeze casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(6), 2574-2584. <https://doi.org/10.1177/09544089221139095>
- Deshpande, M., Waikar, R., Gondil, R., Murty, S. V. S. N., & Mahata, T. S. (2016). *Processing of carbon fiber reinforced aluminium (7075) metal matrix composite*. In International conference on renewable energy and materials for sustainability.
- Dewidar, M. M., Yoon, H. C., & Lim, J. K. (2006). Mechanical properties of metals for biomedical applications using powder metallurgy process: a review. *Metals and Materials International*, 12(3), 193-206.
- Erturun, V., & Karamiş, M. B. (2016). Effects of reciprocating extrusion process on mechanical properties of AA 6061/SiC composites. *Transactions of nonferrous metals society of china*, 26(2), 328-338. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64123-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64123-7)
- Fang, Z., Nic Chormaic, S., Wang, S., Wang, X., Yu, J., Jiang, Y., Qiu, J., & Wang, P. (2017). Bismuth-doped glass microsphere lasers. *Photonics Research*, 5(6), 740-744. <https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000740>
- Fekiač, J. J., Krbata, M., Kohutiar, M., Janík, R., Kakošová, L., Breznická, A., Eckert, A., & Mikuš, P. (2025). Comprehensive review: Optimization of epoxy composites, Mechanical properties, & technological trends. *Polymers*, 17(3), 271. <https://doi.org/10.3390/polym17030271>
- Gangadhar, T. G., & Girish, D. P. (2021). Comparative mechanical properties studies on heat & unheat treated Al7075 alloy hybrid composites. *Resource-Efficient Technologies*, (1), 17-38. <https://doi.org/10.18799/24056529/2021/1/281>
- Geçkinli, E. (1992). *İleri teknoloji malzemeleri* (1. Baskı). İstanbul Teknik Üniversitesi Basımevi, 288s, İstanbul.
- German R. M. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing: The processes, materials, products, properties, and applications*. Metal powder industries federation, Princeton, USA, isbn 0-9762057-1-8.

- Gill, R. S., Samra, P. S., & Kumar, A. (2022). Effect of different types of reinforcement on tribological properties of aluminium metal matrix composites (MMCs)—A review of recent studies. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3094-3101. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.211>
- Gökçe, A. (2020). Toz metalurjisi yöntemiyle Mg-Sn alaşımı üretimi ve karakterizasyonu. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(1), 112-119.
- Güleryüz, L. F., Ozan, S., İpek, R., & Uzunsoy, D. (2012). Production of B₄Cp reinforced magnesium metal matrix composites by powder metallurgy. *Usak University Journal of Material Sciences*, 1(1), 51-58.
- Guo, G., Alam, S., & Peel, L. D. (2022). An investigation of deformation and failure mechanisms of fiber-reinforced composites in layered composite armor. *Composite Structures*, 281, 115125. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115125>
- Haque, S., Rahman, M. A., Shaikh, R. R., Sirajudeen, N., Kamaludeen, M. B., & Sahu, O. (2022). Effect of powder metallurgy process parameters on tribology and micro hardness of Al6063-nano Al₂O₃ MMCs. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1030-1037. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.255>
- Harris, B. (1999). *Engineering composite materials*. The Institute of Materials, 194p, London, England.
- HG, P. K., & Xavier, A. (2018). Processing of graphene/CNT-metal powder. *Powder Technology*, 45. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76897>
- Ibrahim, M. A., Sahin, Y., Gidado, A. Y., & Said, M. T. (2019). Mechanical properties of aluminium matrix composite including SiC/Al₂O₃ by powder metallurgy-a review. *GSI*, 7(3), 23-38.
- Iyer, A. K. (2015). *Characterization of Composite Dust generated during Milling of Uni-Directional and Random fiber composites*. [Published doctoral dissertation]. University of Washington.
- Jayappa, K., Anil, K. C., & Khan, Z. A. (2023). Enhancing wear resistance in Al-7075 composites through conventional mixing and casting techniques. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 7935-7945. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.171>
- Kamaraj, M., & Ramesh, A. (2015). Effect of squeeze pressure on mechanical properties of LM6 aluminium alloy matrix hybrid composites. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(14), 6051-6058.
- Kanthavel, K., Sumesh, K. R., & Saravanakumar, P. (2016). Study of tribological properties on Al/Al₂O₃/MoS₂ hybrid composite processed by powder metallurgy. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.024>

- Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Ceramic matrix composites for aero engine applications—A review. *Applied Sciences*, 13(5), 3017. <https://doi.org/10.3390/app13053017>
- Karcı, A. (2009). *Uçak yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı*. [Yayınlanmış doktora tezi]. Anadolu Üniversitesi.
- Krishnan, P. K., Christy, J. V., Arunachalam, R., Mourad, A. H. I., Muraliraja, R., Al-Maharbi, M., Murali, V., & Chandra, M. M. (2019). Production of aluminum alloy-based metal matrix composites using scrap aluminum alloy and waste materials: Influence on microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 1047-1061. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.115>
- Kumar, A., Vichare, O., Debnath, K., & Paswan, M. (2021). Fabrication methods of metal matrix composites (MMCs). *Materials Today: Proceedings*, 46, 6840-6846. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.432>
- Kumar, B. P., & Birru, A. K. (2017). Microstructure and mechanical properties of aluminium metal matrix composites with addition of bamboo leaf ash by stir casting method. *Transactions of nonferrous metals society of china*, 27(12), 2555-2572. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60284-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60284-X)
- Kumar, N., Sharma, A., Manoj, M. K., & Ahn, B. (2023). Taguchi optimization of tribological properties and corrosion behavior of self-lubricating Al–Mg–Si/MoS₂ composite processed by powder metallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 1185-1197. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.215>
- Li, C. D., Duan, Z. C., Chen, Q., Chen, Z. F., Boafu, F. E., Wu, W. P., & Zhou, J. M. (2013). The effect of drying condition of glassfibre core material on the thermal conductivity of vacuum insulation panel. *Materials & Design*, 50, 1030-1037. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.021>
- Li, C., Chen, Z., Zhu, J., Liu, Y., Jiang, Y., Guan, T., Li, B., & Lin, L. (2012). Mechanical properties and microstructure of 3D orthogonal quartz fiber reinforced silica composites fabricated by silicasol-infiltration-sintering. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.022>
- Li, S. H., & Chao, C. G. (2004). Effects of carbon fiber/Al interface on mechanical properties of carbon-fiber-reinforced aluminum-matrix composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35(7), 2153-2160. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0163-z>
- Li, S., Kondoh, K., Imai, H., Chen, B., Jia, L., Umeda, J., & Fu, Y. (2016). Strengthening behavior of in situ-synthesized (TiC–TiB)/Ti composites by powder metallurgy and hot extrusion. *Materials & Design*, 95, 127-132. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.092>

- Liu, L., Li, W., Tang, Y., Shen, B., & Hu, W. (2009). Friction and wear properties of short carbon fiber reinforced aluminum matrix composites. *Wear*, 266(7-8), 733-738. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.08.009>
- Ma, W., & Elkin, R. (2022). *Sandwich structural composites: Theory and practice*. CRC Press.
- Mahdavi, S., & Akhlaghi, F. (2011). Effect of the graphite content on the tribological behavior of Al/Gr and Al/30SiC/Gr composites processed by in situ powder metallurgy (IPM) method. *Tribology Letters*, 44(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11249-011-9818-2>
- Mahmud, M. Z. A., Rabbi, S. F., Islam, M. D., & Hossain, N. (2025). Synthesis and applications of natural fiber-reinforced epoxy composites: A comprehensive review. *SPE Polymers*, 6(1), e10161. <https://doi.org/10.1002/pls2.10161>
- Manikandan, M., & Karthikeyan, A. (2014). A study on wear behaviour of aluminium matrix composites with ceramic reinforcements. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 22(1), 128-133. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.22.01.21833
- Matykiewicz, D., & Skórczewska, K. (2022). Characteristics and application of eugenol in the production of epoxy and thermosetting resin composites: A review. *Materials*, 15(14), 4824. <https://doi.org/10.3390/ma15144824>
- Mehrer, H. (2007). *Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. J. M. S. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37-49. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
- Miranda Campos, B., Bourbigot, S., Fontaine, G., & Bonnet, F. (2022). Thermoplastic matrix-based composites produced by resin transfer molding: A review. *Polymer Composites*, 43(5), 2485-2506. <https://doi.org/10.1002/pc.26575>
- Miyajima, T., & Iwai, Y. (2003). Effects of reinforcements on sliding wear behavior of aluminum matrix composites. *Wear*, 255(1-6), 606-616. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00066-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00066-8)
- Molnárová, O., Málek, P., Veselý, J., Minárik, P., Lukáč, F., Chráska, T., Novák, P., & Průša, F. (2018). The influence of milling and spark plasma sintering on the microstructure and properties of the Al7075 alloy. *Materials*, 11(4), 547. <https://doi.org/10.3390/ma11040547>
- Munnur, H., Nagesh, S. N., Siddaraju, C., Rajesh, M. N., & Rajanna, S. (2021). Characterization & tribological behaviour of aluminium metal matrix composites—A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2570-2574. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.060>

- Nayak, K. C., Rane, K. K., Date, P. P., & Srivatsan, T. S. (2022). Synthesis of an aluminum alloy metal matrix composite using powder metallurgy: role of sintering parameters. *Applied Sciences*, 12(17), 8843. <https://doi.org/10.3390/app12178843>
- Nourbakhsh, S., Liang, F. L., & Margolin, H. (1990). Interaction of Al₂O₃-ZrO₂ fibers with a Ti-Al matrix during pressure casting. *Metallurgical Transactions A*, 21(1), 213-219.
- Okumuş, M., & Bülbül, B. (2022). Study of microstructural, mechanical, thermal and tribological properties of graphene oxide reinforced Al-10Ni metal matrix composites prepared by mechanical alloying method. *Wear*, 510, 204511. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204511>
- Oladele, I. O., Omotosho, T. F., & Adediran, A. A. (2020). Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications. *International Journal of Polymer Science*, 2020(1), 8834518. <https://doi.org/10.1155/2020/8834518>
- Ozturk, F., Cobanoglu, M., & Ece, R. E. (2024). Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(9), 3084-3116. <https://doi.org/10.1177/08927057231222820>
- Özyürek, D., Tunçay, T., & Kaya, H. (2014). The effects of T5 and T6 heat treatments on wear behaviour of AA6063 alloy. *High Temperature Materials and Processes*, 33(3), 231-237. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0060>
- Padmavathi, K. R., & Ramakrishnan, R. (2014). Tribological behaviour of aluminium hybrid metal matrix composite. *Procedia Engineering*, 97, 660-667. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.295>
- Panda, A., Dobránsky, J., Jančík, M., Pandova, I., & Kačalová, M. (2018). Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies. *Metallurgija*, 57(4), 353-356.
- Pasha, S. K., Sharma, A., & Tambe, P. (2022). Mechanical properties and tribological behavior of Al7075 metal matrix composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1513-1521. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.10>
- Pugacheva, N. B., Michurov, N. S., & Bykova, T. M. (2016). Structure and properties of the Al/SiC composite material. *The Physics of Metals and Metallography*, 117(6), 634-640. <https://doi.org/10.1134/S0031918X16060119>
- Qu, S., Yang, Y., Yao, P., Li, L., Sun, Y., & Chu, D. (2025). Fiber reinforced ceramic matrix composites: from the controlled fabrication to precision machining. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 7(6), 062004. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/adeee1>
- 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(6), 359-366. <https://doi.org/10.1108/00368791211262499>
- Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., & reza Baharvandi, H. (2009). The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(14), 5387-5393. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.007>
- Rajmohan, T., Palanikumar, K., & Ranganathan, S. J. T. O. N. M. S. O. C. (2013). Evaluation of mechanical and wear properties of hybrid aluminium matrix composites. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 23(9), 2509-2517. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62762-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62762-4)
- Raju, K., & Balakrishnan, M. (2020). Dry sliding wear behavior of aluminum metal matrix composite reinforced with lithium and silicon nitride. *Silicon*, 12, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00793-8>
- Ranjan, R., & Bajpai, V. (2021). Graphene-based metal matrix nanocomposites: Recent development and challenges. *Journal of Composite Materials*, 55(17), 2369-2413. <https://doi.org/10.1177/0021998320988566>
- Rao, R. N., & Das, S. (2011). Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites. *Materials & Design*, 32(2), 1066-1071. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.047>
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., Hussain, S., Gou, J., & Mao, J. (2015). Improved strength and ductility of magnesium with addition of aluminum and graphene nanoplatelets (Al+GNPs) using semi powder metallurgy method. *Journal of Industrial and engineering chemistry*, 23, 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.08.024>
- Rashid, A. B., Haque, M., Islam, S. M., Uddin Labib, K. R., & Chowdhury, P. (2024). Breaking boundaries with ceramic matrix composites: A comprehensive overview of materials, manufacturing techniques, transformative applications, recent advancements, and future prospects. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2024(1), 2112358. <https://doi.org/10.1155/2024/2112358>
- Rohatgi, P. K., Gupta, N., & Daoud, A. (2008). Synthesis and processing of cast metal-matrix composites and their applications. In *Casting* (pp. 1149-1164). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.a0005339>
- Sahraeinejad, S. (2014). *Fabrication of surface metal matrix composites using friction stir processing* [Doctoral dissertation]. University of Waterloo.
- Sajan, S. S. P. S., & Selvaraj, D. P. (2021). A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5493-5498. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.034>
- Santhosh Kumar, B. S., & Girish, D. P. (2018, July). Friction and wear behaviour of tungsten carbide and E glass fibre reinforced Al7075 based hybrid composites.

- In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 390, No. 1, p. 012002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/390/1/012002>
- Saravanan, C., Subramanian, K., Anandakrishnan, V., & Sathish, S. (2018). Tribological behavior of AA7075-TiC composites by powder metallurgy. *Industrial Lubrication and Tribology*, 70(6), 1066-1071. <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2017-0312>
- Seçilmiş, K. (2017). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş farklı oranlarda B₄C takviyeli Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarının araştırılması*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Batman Üniversitesi.
- Seetharaman, S., & Gupta, M. (2021). Fundamentals of metal matrix composites. In: *Brabazon, Dermot (ed) Encyclopedia of Materials: Composites*. 1, (11–29). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00001-X>
- Seikh, Z., Sekh, M., Mandal, G., Sengupta, B., & Sinha, A. (2025). Metal matrix composites processed through powder metallurgy: a brief overview. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 106(1), 771-778. <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00651-6>
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Sharma, C., Dhakad, S. K., & Pinca-Bretotean, C. (2022). Polymer matrix composites: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2330-2333. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.592>
- Sharma, S. K., Saxena, K. K., Salem, K. H., Mohammed, K. A., Singh, R., & Prakash, C. (2024). Effects of various fabrication techniques on the mechanical characteristics of metal matrix composites: A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(2), 277-294. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2144276>
- Sharma, S., Goyal, A., Bharadwaj, P., Oza, A. D., & Pandey, A. (2023). Application of metal matrix composite fabricated by reinforcement materials—A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.287>
- Shen, M. Y., Guo, Z. H., & Liu, W. L. (2025). A critical study on interfacial modification and scalable processing of high-performance regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composites from waste CFRP. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(4), 297. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01382-2>
- Shetty, R., Hegde, A., Shetty SV, U. K., Nayak, R., Naik, N., & Nayak, M. (2022). Processing and mechanical characterisation of titanium metal matrix composites: a literature review. *Journal of Composites Science*, 6(12), 388. <https://doi.org/10.3390/jcs6120388>
- Shewmon, P. (2016). High diffusivity paths. In *Diffusion in Solids* (pp. 189-222). Cham: Springer International Publishing.
- Shrivastava, S., Rajak, D. K., Joshi, T., Singh, D. K., & Mondal, D. P. (2024). Ceramic matrix composites: classifications, manufacturing, properties, and applications. *Ceramics*, 7(2), 652-679. <https://doi.org/10.3390/ceramics7020043>

- Si, H., Zhou, Q., Zhou, S., Zhang, J., Liu, W., Gao, G., Wang, Z., Hou, P., Qu, Y., & Li, G. (2023). Effect of interfacial stability on microstructure and properties of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites. *Surfaces and Interfaces*, 38, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102816>
- Singh, H., Brar, G. S., Kumar, H., & Aggarwal, V. (2021). A review on metal matrix composite for automobile applications. *Materials Today: Proceedings*, 43, 320-325. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.670>
- Singh, N., Belokar, R. M., & Walia, R. S. (2022). Fabrication and mechanical characterization of Al7075-T6/SiC/Gr/S-glass fiber particulate reinforced hybrid metal matrix composite using vacuum sealed stir casting technique. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(7), 1741-1750. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02549-x>
- Singh, R., & Kumar, A. (2022). A literature survey on effect of various types of reinforcement particles on the mechanical and tribological properties of aluminium alloy matrix hybrid nano composite. *Materials Today: Proceedings*, 56, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.068>
- Sumithra, G., Reddy, R. N., Kumar, G. D., Ojha, S., Jayachandra, G., & Raghavendra, G. (2023). Review on composite classification, manufacturing, and applications. *Materials Today: Proceedings*. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.637>
- 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), 1-7. <https://doi.org/10.35860/iarej.676152>
- 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(1), 180-195. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01006-9>
- Venumbaka, S. C. (2015). *Simulation and experimental studies of Al metal matrix composites reinforced with Fe₃Al intermetallic* [Master of technology in mechanical engineering]. National Institute of Technology, Rourkela-769008, Odisha, India.
- Vijayakumar, S., & Karunamoorthy, L. (2013). Wear characterization of aluminium metal matrix composites. *Advanced Composites Letters*, 22(4), 096369351302200401. <https://doi.org/10.1177/096369351302200401>
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z., & Zhang, D. (2012). Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites. *Scripta Materialia*, 66(8), 594-597. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.012>

- Wang, Y., & Zhang, J. (2023). A review of the friction and wear behavior of particle-reinforced aluminum matrix composites. *Lubricants*, 11(8), 317. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080317>
- Wu, J., Zhang, C., Meng, Q., Liu, B., Sun, Y., Wen, M., Ma, S., & He, L. (2021). Study on tensile properties of carbon fiber reinforced AA7075 composite at high temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 825, 141931. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141931>
- Yazıcıoğlu, O., & Borat, O. (2021). *İmalat yöntemleri: Nanoteknoloji – plastikler – toz metalürjisi – hızlı prototipleme* (3. Baskı). Seçkin Yayıncılık.
- Zamani, N. A. B. N., Iqbal, A. A., & Nuruzzaman, D. M. (2020). Tribo-mechanical characterisation of self-lubricating aluminium based hybrid metal matrix composite fabricated via powder metallurgy. *Materialia*, 14, 100936. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100936>
- Zhang, L., He, X. B., Qu, X. H., Duan, B. H., Lu, X., & Qin, M. L. (2008). Dry sliding wear properties of high volume fraction SiCp/Cu composites produced by pressureless infiltration. *Wear*, 265(11-12), 1848-1856. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.029>
- Zhiqiang, S., Di, Z., & Guobin, L. (2005). Evaluation of dry sliding wear behavior of silicon particles reinforced aluminum matrix composites. *Materials & design*, 26(5), 454-458. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.07.026>
- Zhu, J., Lai, Z., Yin, Z., Jeon, J., & Lee, S. (2001). Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials chemistry and physics*, 68(1-3), 130-135. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00355-2)
- Zhu, M., Shao, Y., Zhao, Y., Chua, B. W., Du, Z., & Gan, C. L. (2024). Interface engineering in CF/Al matrix composites for enhancement in mechanical strength and anti-corrosion properties. *Materials Characterization*, 212, 113990. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113990>