



Si₃N₄ katkılı Al7075 matrisli kompozitlerin mikroyapısının ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of microstructure and tribological properties of Si₃N₄ reinforced Al7075 matrix composites

Aleyna Taşkın¹ , Elif Işık² , Mahmut Can Şenel^{3*} 

^{1,3} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55020, Samsun Türkiye

² Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 58010, Sivas, Türkiye

Öz

Yapılan bu çalışmada toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında Si₃N₄ ilave edilerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozitlere yoğunluk, Vickers sertliği, aşınma ve sürtünme testleri uygulanmıştır. Ayrıca kompozitlerin mikroyapılarını incelemek amacıyla XRD, SEM ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak en yüksek deneysel yoğunluk (2.65 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (205 HV), en düşük aşınma oranı (0.00018 mm³/(Nm)), en düşük kütle kaybı (0.0025 g) ve en düşük sürtünme katsayısı (0.38) değerleri Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %12 Si₃N₄ katkı oranında takviye partiküllerinin topraklanmasından dolayı kompozitin tribolojik özellikleri kötüleşmiştir. Sonuç olarak Al7075 matrise %9 Si₃N₄ katkısının kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Al7075 alaşımı, Si₃N₄, Kompozit, Toz Metalürjisi

1 Giriş

Uçak ve uzay sanayi başta olmak üzere ticari uygulamalarda hafif ve yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Kompozitler, daha iyi özelliklere sahip yeni malzeme elde etmek amacıyla farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Kompozit malzemeler; metal matrisli kompozitler (MMK), seramik matrisli kompozitler (SMK) ve polimer matrisli kompozitler (PMK) olmak üzere temelde üç gruba ayrılmaktadır. MMK matris malzemesi metal veya metal alaşımı olan kompozitlerdir. 1970'lerden beri uygulamalarda kullanılan MMK yapılar düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve gelişmiş tribolojik özellikleri ile dikkat çekmektedir. İnşaat, denizcilik, otomotiv, elektrik-elektronik, uçak ve uzay sanayinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1], [2]. MMK yapılarda matris malzemesi olarak genellikle alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg) ve alaşımları tercih edilmektedir. Alüminyum ve alaşımları hafif olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluğa sahip olmaları gibi

Abstract

In this study, composite materials were fabricated by Si₃N₄ reinforcement (1, 3, 6, 9, and 12wt.%) to the Al7075 matrix using the powder metallurgy and hot-pressing methods. Density, Vickers hardness, wear, and friction tests were applied to the fabricated composites. In addition, XRD, SEM, and SEM-EDX analyses were performed to examine the microstructures of the composites. As a result, the highest experimental density (2.65 g/cm³), the highest Vickers hardness (205 HV), the lowest wear rate (0.00018 mm³/(Nm)), the lowest mass loss (0.0025 g), and the lowest friction coefficient (0.38) values were obtained in the Al7075-9% Si₃N₄ composite. However, the tribological properties of the composite deteriorated due to the agglomeration of the reinforcement particles at the 12wt.% Si₃N₄ content. As a result, it was determined that 9% Si₃N₄ addition to the Al7075 matrix improved the tribological properties of the composite.

Keywords: Al7075 alloy, Si₃N₄, Composite, Powder Metallurgy

nedenlerden dolayı metal matrisli kompozitlerde sıklıkla matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmiş şekillendirme yöntemleri, düşük üretim maliyeti ve gelişmiş tribolojik özellikleri alüminyum matrisli kompozitlere olan ilgiyi artırmıştır [3]. Alüminyum alaşımları arasında 7075 serisi yüksek ağırlık/yoğunluk oranı, yüksek mukavemeti ve yüksek aşınma dayanımından dolayı dikkat çekmektedir. Bu özelliklerinden dolayı Al7075 alaşımı; uçakların gövde ve kanatlarında, otomobillerde, spor malzemelerinde ve denizcilik sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4].

Al7075 matrisli kompozitlerde; dayanımın, sertliğin ve aşınma direncinin artması takviye elemanının özelliklerine bağlıdır. Silisyum nitrür (Si₃N₄), bor karbür (B₄C), alümina (Al₂O₃) ve zirkonya (ZrO₂) seramik malzemeleri Al7075 matris için sıklıkla tercih edilen takviye elemanlarıdır. Özellikle Si₃N₄; yüksek sertliği, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir [5].

Kullanım alanı oldukça geniş olan kompozit malzemeler farklı yöntemler (karıştırmalı döküm, sıvı infiltrasyon, toz

metalürjisi, ekstrüzyon vb.) ile üretilebilmektedir. Bu yöntemler arasından toz metalürjisi (TM); yüksek yüzey kalitesinde, yüksek mukavemetli ve karmaşık yapıya parça üretimi gibi avantajlara sahiptir. Toz metalürjisi yönteminde toz halindeki malzemeler karıştırılarak uygun basınç altında şekillendirme amacıyla sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırılan tozlara belirli sıcaklık ve basınç altında sinterleme işlemi uygulanarak dayanım kazandırılır. Sonrasında ikincil işlemler yapılarak yüksek kalitede parça üretimi gerçekleştirilmiş olur [6].

Literatürde Al matrisli Si_3N_4 takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Mistry ve Gohil tarafından yapılan çalışmada, Al7075 matrisli Si_3N_4 takviyeli kompozitler elektromanyetik karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Al7075 matrisle ağırlıkça %4, 8 ve 12 katkı oranlarında Si_3N_4 ilave edilmiştir. Yürütülen testler sonucunda, en yüksek sertlik değeri 203 HV olarak Al7075-%12 Si_3N_4 kompozitte elde edilmiştir. Bunun sebebinin takviye elemanın yapıdaki deformasyonu azaltması olabileceği belirtilmiştir. En yüksek çekme dayanımına (329 MPa) ise Al7075-%8 Si_3N_4 kompozitte ulaşılmıştır. Ancak ağırlıkça %8 katkı oranından sonra takviye partiküllerinin topaklanmasından dolayı çekme dayanımı 312 MPa'a düşmüştür. Kütle kaybının ağırlıkça %4, 8 ve 12 katkı oranlarında sırasıyla %11.6, %24.6 ve %37.2 oranında azaldığı belirtilmiştir [7]. Kumar vd., karıştırılmalı döküm yöntemini kullanarak Al6063 alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10) Si_3N_4 takviye ederek kompozit yapılar üretilmiştir. Üretilen kompozitlere mekanik testler uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda en yüksek değerler %10 Si_3N_4 katkı oranında elde edilmiştir. Al6063-%10 Si_3N_4 kompozitte sertlik, yoğunluk ve çekme dayanımı Al6063 alaşımına kıyasla sırasıyla %86, %1.7 ve %77 oranında artmıştır. Bunun sebebi; Si_3N_4 partiküllerinin yüksek sertliğine, yüksek yoğunluğuna ve matris içerisindeki dağılımına bağlanmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre takviye oranının artmasıyla aşınmaya karşı direncin artarak kütle kaybının azaldığı tespit edilmiştir [8]. Mohanavel vd. çalışmalarında karıştırılmalı döküm metoduyla Al6351 matrisli Si_3N_4 takviyeli (ağırlıkça %1, 2 ve 3 katkı oranında) kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SEM, XRD ve EDX analizi sonuçlarına göre Si_3N_4 takviyesinin matris içerisindeki varlığı doğrulanmış ve katkı malzemelerinin homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan mekanik testlerin sonuçlarına göre en yüksek mikro sertlik (94 HV) ve çekme dayanımı (13 MPa) Al6351-%3 Si_3N_4 kompozit yapıda elde edilmiştir. 15, 25 ve 35 N yüklemde yapılan aşınma testlerinde, en düşük aşınma oranı ağırlıkça %3 Si_3N_4 takviyesinde elde edilmiştir. Sonuç olarak takviye oranının artmasının kompozitin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir [9]. Ramu vd. çalışmalarında, karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al6061 alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2, 3 ve 4) Si_3N_4 takviyesi yaparak kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen kompozit yapılar 3 geçişli eş kanallı açısız presleme işlemi (EKAP) uygulanarak mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek yoğunluk (2.84

g/cm^3) ve sertlik değeri (85 HB) %4 Si_3N_4 katkılı kompozit yapıda EKAP işlemi sonrası elde edilmiştir. EKAP işlemi sonrası boşlukların ve kusurların en aza indirilmesinden dolayı yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Yapılan aşınma testlerine göre EKAP işlemi tekrar sayısının ve takviye oranının artmasıyla kompozitlerin aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak EKAP işleminin ve artan katkı oranının üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir [10]. Smart vd., Al7075 matrisli TaC (ağırlıkça %0.25, 0.5, 0.75 ve 1 katkı oranlarında), Si_3N_4 (ağırlıkça %2, 4, 6 ve 8 katkı oranlarında) ve Ti (ağırlıkça %0.5, 1, 1.5 ve 2 katkı oranlarında) takviyeli kompozitleri karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Takviye oranının kompozitlerin mikroyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kompozitlerin SEM analizlerine göre, TaC/ Si_3N_4 /Ti takviyelerinin Al7075 matris içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek yoğunluk (3.09 g/cm^3), en yüksek basma dayanımı (394 MPa), en yüksek korozyon direnci ve en düşük aşınma oranı (20 N yüklemde, 3 m/s kayma hızında, 120°C sıcaklıkta) Al7075-1TaC-8 Si_3N_4 -2Ti kompozit yapıda elde edilmiştir. Sonuç olarak, takviye oranı arttıkça kompozitlerin mekanik özelliklerinde ve aşınma davranışlarında iyileşme olduğu belirtilmiştir [11].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme işlemleri kullanılarak üretilen yüksek aşınma dayanımına ve gelişmiş tribolojik özelliklere sahip Al7075- Si_3N_4 kompozitlerin üretimi ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışmada ise, Al7075 matrisli Si_3N_4 takviyeli (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında) kompozit yapılar toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme işlemi ile üretilmiştir. Kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde Si_3N_4 katkı oranının ve sıcak presleme işleminin etkisi incelenmiştir. Böylece üretilen kompozitlerin deneysel yoğunluğu, sertliği, kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

Yapılan bu çalışmada matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı, takviye elemanı olarak ise Si_3N_4 tozları kullanılmıştır.

Tablo 1. Al7075 alaşımının ve Si_3N_4 'ün belirli özellikleri [12]

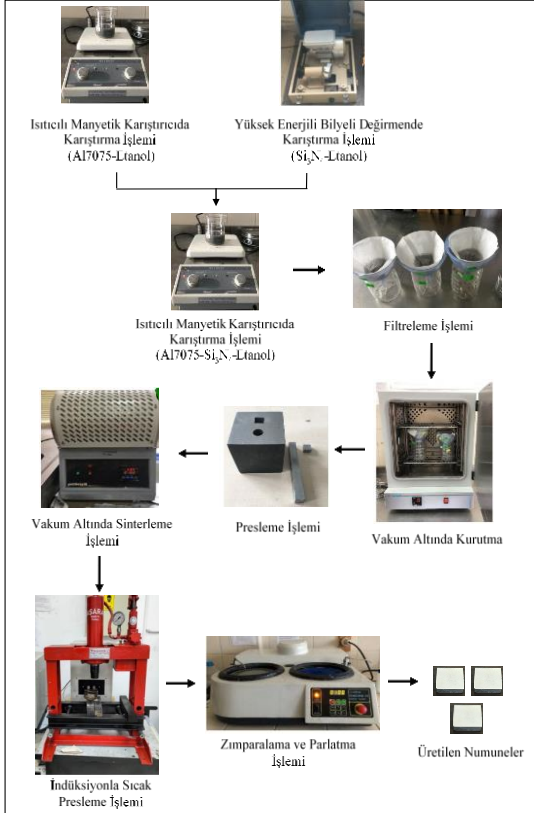
Özellik	Al7075	Si_3N_4
Sertlik (HV)	68	1450
Yoğunluk (g/cm^3)	2.81	3.17
Elastisite Modülü (GPa)	7.7	310
Ergime Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	635	1800
Termal İletkenlik ($\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$)	167	29

Al7075 alüminyum alaşımı ve Si_3N_4 tozları sırasıyla Nanografi Teknoloji (Türkiye) ve Ube Industry (Japonya)

firmasından temin edilmiştir. Al7075 alaşım tozu ~10 µm tanecik boyutuna ve 2.81 g/cm³ teorik yoğunluğa, Si₃N₄ tozu ise 0.8 µm partikül boyutuna ve 3.25 g/cm³ teorik yoğunluğa sahiptir. Al7075 alaşımının ve Si₃N₄'ün belirli özellikleri **Tablo 1**'de verilmiştir.

2.2 Yöntem

Yapılan bu çalışmada, Al7075-Si₃N₄ kompozitleri toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir (**Şekil 1**).



Şekil 1. Al7075-Si₃N₄ kompozit malzemelerin üretim aşamaları

Al7075 alaşım tozu manyetik karıştırıcıda etanol içinde karıştırılmış (400 dev/dk hızda, 20 dk süresince) ve eş zamanlı olarak Si₃N₄ tozu yüksek enerjili bilyeli değirmende paslanmaz çelik hazne içerisinde ve zirkon bilyeler ile birlikte öğütülmüştür (1200 dev/dk hızda, 60 dk süresince). Daha sonra, Si₃N₄-etanol karışımı Al7075-etanol karışımına eklenmiş ve manyetik karıştırıcıda 20 dk süresince karıştırılmıştır. Karışım, etanolün uzaklaştırılarak katı partiküllerin kalması amacıyla filtrelenmiştir. Filtrelenen toz karışım, nemin uzaklaştırılması için etüv fırında (45°C sıcaklıkta, 16 saat süresince) sürekli vakum altında kurutulmuştur. Ardından, tozlar şekillendirmek amacıyla hidrolik pres makinesinde 800 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan tozlara mukavemet kazandırmak amacıyla sinterleme (600°C sıcaklıkta, 60 dk süresince) ve indüksiyonla sıcak presleme (500°C sıcaklıkta, 30 sn bekleme süresince) işlemi uygulanmıştır. Numuneler farklı (600, 1200 ve 2500) grit boyutlarına sahip SiC su zımparaları

ile zımparalanarak yüzeylerindeki pürüzler giderilmiştir. Son olarak, numunelerin yüzeyi elmas solüsyon ile parlatılarak mikroyapı analizleri ve testler gerçekleştirilmiştir.

2.3 Mikroyapı analizleri

Çalışmada kullanılan Al7075 ve Si₃N₄ tozların yüzey morfolojisini, numunelerin kırık yüzey görüntülerini ve element dağılım haritalarını incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için Jeol marka JSM-7001F model SEM cihazı kullanılmıştır. Si₃N₄ partiküllerinin Al7075 içerisindeki dağılımını görüntüleyebilmek için SEM cihazı kullanılarak enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) analizi yapılmıştır. Ayrıca kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin faz analizlerini belirlemek amacıyla Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım (XRD) cihazı kullanılmıştır.

2.4 Yürütülen testler

Üretilen numunelerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır (**Denklem (1)**). Her numuneden en az 5 ölçüm alınmış ve ortalaması hesaplanarak deneysel yoğunluk değeri belirlenmiştir. İlk olarak numunelerin sudaki asılı kütlesi (m_A), suya doymuş kütlesi (m_D) ve kuru kütleleri (m_K) ölçülmüştür. Suyun yoğunluğu ise 1 g/cm³ alınarak numunelerin deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{su} \quad (1)$$

Numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_T) **Denklem (2)** kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemdeki ρ_M ve ρ_{TK} sırasıyla Al7075 (2.81 g/cm³) ve Si₃N₄'ün (3.25 g/cm³) teorik yoğunluklarını ifade etmektedir. %M ve %TK ise sırasıyla Al7075 ve Si₃N₄'ün ağırlıkça katkı oranıdır [12], [13].

$$\rho_T = (\%M \times \rho_M) + (\%TK \times \rho_{TK}) \quad (2)$$

Üretilen numunelerin sertlik değerleri Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Zımparalanıp parlatılan numunelerin yüzeyine Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı (HV1000B) kullanılarak 1.961 N yük (15 s süresince) uygulanmıştır. Numune yüzeyinde oluşan kare tabanlı piramitin köşegen uzunlukları ölçülmüştür ve **Denklem (3)** kullanılarak kompozitlerin Vickers sertlik değerleri belirlenmiştir. Burada P numune yüzeyine uygulanan yük, d ise ortalama köşegen uzunluğunu ifade etmektedir.

$$HV = 1.8544 \times (F/d^2) \quad (3)$$

Kompozitlerin tribolojik özellikleri GUNT marka TM260 model pin-on disk aşınma test cihazıyla belirlenmiştir. Test düzeneğindeki aşındırıcı disk malzemesi AISI 304 paslanmaz çelik olup 50 HRC sertliğe sahiptir. Aşınma testleri 5-10 N yüklemde, 200 dev/dk kayma hızında ve 1000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aşınma oranı (W) **Denklem (4)** ile

hesaplanmaktadır. Denklemde ΔV aşınma hacmini, F uygulanan yükü, L ise kayma mesafesini ifade etmektedir. Aşınma oranı (W), aşınma hacminin uygulanan yüke ve kayma mesafesine bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$W = \Delta V / (F \times L) \quad (4)$$

Aşınma hacmi, Denklem (5) ile belirlenmektedir. Bu denklemde m_i aşınma öncesi numune kütlesi, m_s aşınma sonrası numune kütlesi, ρ_D ise deneysel yoğunluktur.

$$\Delta V = (m_i - m_s) / \rho_D \quad (5)$$

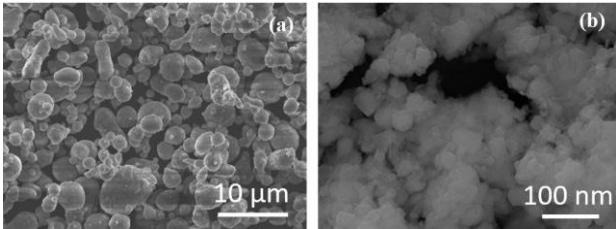
Kayma mesafesi ise Denklem (6) kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklemde R aşındırıcı diskin yarıçapı (20 mm), n diskin dönme hızı (200 dev/dk), t ise test süresidir (40 dk). Bu denkleme göre kayma mesafesi 1000 m olarak belirlenmiştir [14].

$$L = 2\pi \times r \times n \times t \quad (6)$$

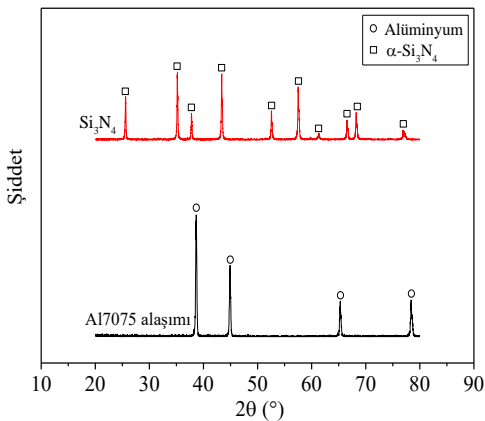
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Tozların mikroyapı analizleri

Şekil 2’de Al7075 alaşımının ve Si₃N₄ tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 2a incelendiğinde, Al7075 tozunun (JCPDS kart no:89-4184) yaklaşık 10 µm tanecik boyutuna ve küresel bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan, Şekil 2b, Si₃N₄ partiküllerinin (JCPDS Card No. 73-1210) küresel olmayan düzensiz bir yapıya ve yaklaşık 0.8 µm tanecik boyutuna sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 2. Al7075 alaşım (a) ve Si₃N₄ (b) tozlarına ait SEM görüntüleri



Şekil 3. Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozlarının XRD analizi

Şekil 3’te Al7075 alaşımı ve Si₃N₄ tozlarının XRD örgü desenleri sunulmuştur. Şekil üzerinde yapılan incelemelerde, Al7075 alaşımının difraksiyon açılarının $2\theta \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ$ ve 78° olarak belirlendiği gözlemlenmiştir. Si₃N₄ takviye malzemesinin difraksiyon açıları ise $2\theta \sim 26^\circ, 35^\circ, 38^\circ, 43^\circ, 53^\circ, 57^\circ, 61^\circ, 67^\circ, 69^\circ, 77^\circ$ olduğu saptanmıştır. Bu analiz, üretilen kompozit numunelerin XRD faz yapılarının analizi açısından önem arz etmektedir.

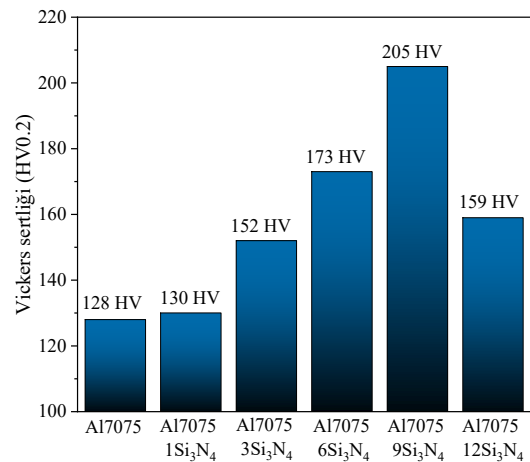
3.2 Yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin takviye oranına bağlı olarak deneysel yoğunluk değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Tabloya göre en düşük yoğunluk 2.59 g/cm³ olarak Al7075 alaşımında belirlenmiştir. En yüksek yoğunluk değeri (2.65 g/cm³) ise Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte yoğunluk değeri Al7075 alaşımına kıyasla %2.3 oranında artış göstermiştir. Bu artışın, uygulanan sıcak presleme işlemindeki sıcaklık ve basıncın etkisiyle yapıdaki gözeneklilik oranının azalmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ancak takviye elemanının kümeleşmesinden dolayı Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitte yoğunluk değerinin 2.61 g/cm³’e düştüğü belirlenmiştir. Bu düşüş, Si₃N₄ ve alüminyumun termal genleşme katsayılarının çok farklı olmasından ve bu farkın gözenekliliğe yol açmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 2. Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin deneysel yoğunlukları

Malzeme	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)
Al7075	2.59
Al7075-1Si ₃ N ₄	2.60
Al7075-3Si ₃ N ₄	2.62
Al7075-6Si ₃ N ₄	2.63
Al7075-9Si ₃ N ₄	2.65
Al7075-12Si ₃ N ₄	2.61

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin Si₃N₄ katkı oranına bağlı olarak Vickers sertlik değerleri Şekil 4’te verilmiştir.

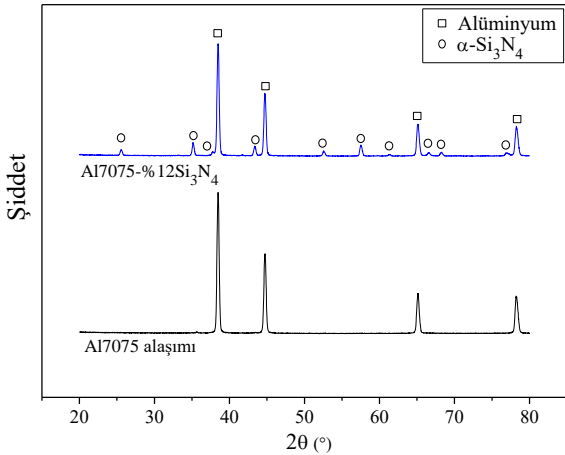


Şekil 4. Al7075 alaşımıyla Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin Vickers sertlik değerleri

Şekil incelendiğinde, en yüksek sertlik değeri (205 HV) %9 Si₃N₄ katkı oranında elde edilmiştir. Takviye partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak %12 Si₃N₄ katkı oranında partiküllerin farklı bölgelerde bir araya gelerek muhtemel toplanmasından dolayı sertlik değerinde azalma tespit edilmiştir [7, 15-16].

3.3 Kompozitlerin mikroyapı analizleri

Üretilen kompozitlerin mikroyapısını incelemek amacıyla XRD, SEM ve SEM-EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Al7075 alaşımına ve Al7075-%12 Si₃N₄ kompozite ait XRD örgü desenleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil üzerindeki □ sembolü alüminyum, o sembolü ise α-Si₃N₄'ü temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde Al ve α-Si₃N₄ pikleri görülmektedir. Si₃N₄; 1420°C sıcaklığın altında α-Si₃N₄ yapıdadır [17]. Üretilen kompozit numunelere 600°C sıcaklıkta sinterleme ve 500°C sıcaklıkta sıcak presleme işlemi uygulandığından dolayı XRD analizinde Al ve α-Si₃N₄ yapı tespit edilmiştir. Ayrıca XRD analizinde herhangi bir ikincil faz oluşumuna rastlanılmamıştır.

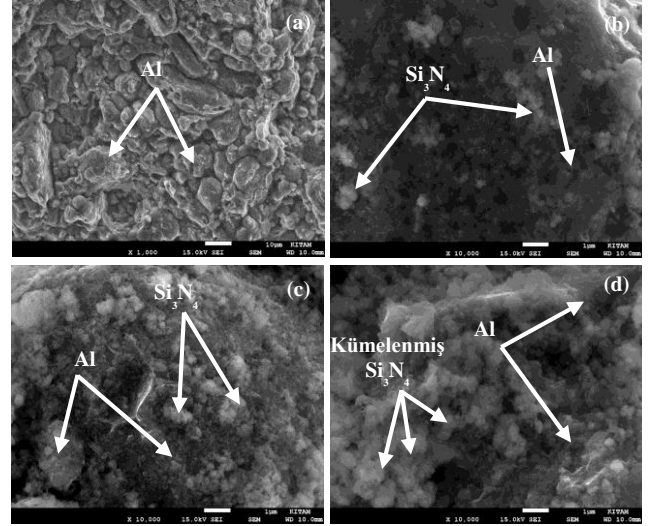


Şekil 5. Al7075 alaşımına ve Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitlere ait XRD örgü desenleri

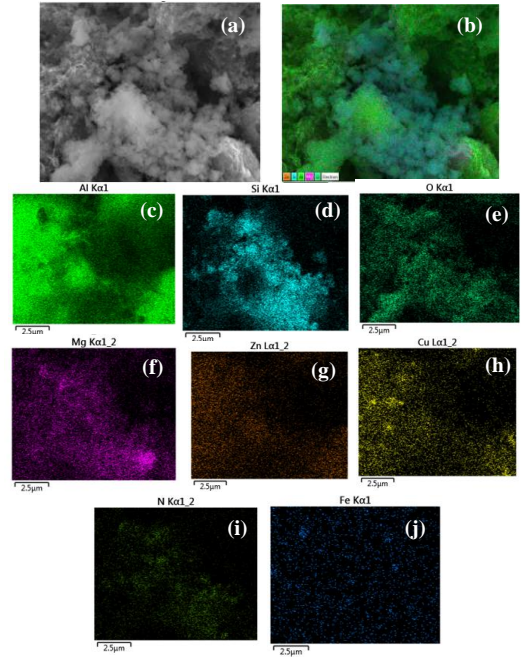
Şekil 6'da Al7075 alaşımı, Al7075-%3 Si₃N₄, Al7075-%9 Si₃N₄ ve Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil incelendiğinde en yoğun mikroyapının Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapıya ait olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu kompozitte takviye partikülleri homojene yakın bir dağılım sergilemiştir [7, 9]. Si₃N₄ partiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği ve böylece tane büyümesine engel olduğu belirlenmiştir [18]. Bu nedenle deneysel yoğunluk ve sertlik sonuçlarında en iyi değerler Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak Si₃N₄ katkı oranı %12 olduğunda partiküllerin toplanıldığı gözlenmiştir. Bu nedenle sertlik değeri Al7075-%12 Si₃N₄ kompozit yapıda azalmıştır. Böylelikle test sonuçları SEM görüntüleri ile doğrulanabilmiştir.

Şekil 7'de Al7075-12Si₃N₄ kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüleri verilmiştir. Burada Al, O, Mg, Zn, Cu ve Fe elementleri Al7075 alaşımının varlığını doğrulamaktadır. Si ve N elementleri ise Si₃N₄'ün yapı

içerisindeki varlığını göstermektedir. Şekil incelendiğinde açık mavi renkteki Si (Şekil 7d) elementinin toplanıldığı rahatlıkla görülebilmektedir. Bu durumun kompozitin özelliklerini olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 6. Al7075 alaşımına (a), Al7075-%3 Si₃N₄ (b), Al7075-%9 Si₃N₄ (c) ve Al7075-%12 Si₃N₄ (d) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

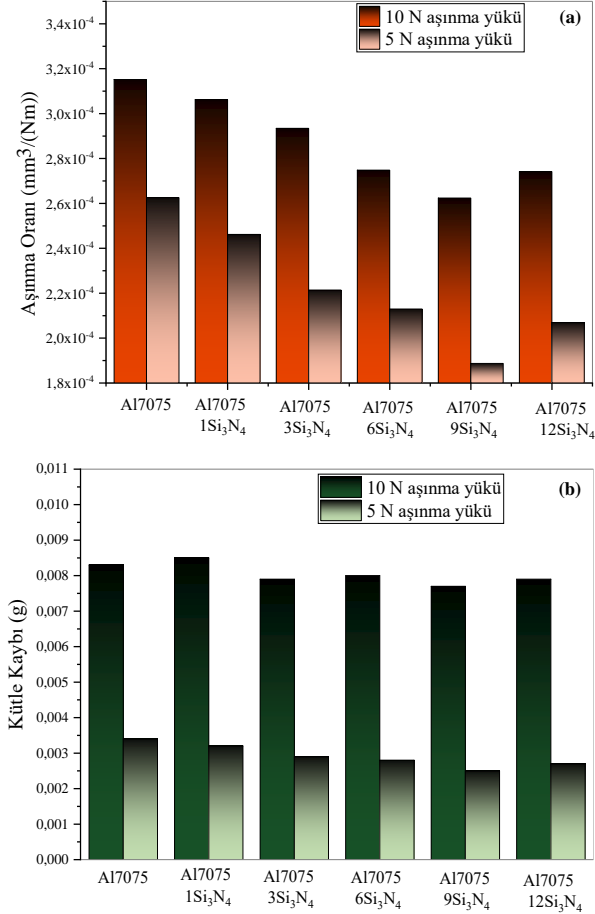


Şekil 7. Al7075-%12 Si₃N₄ kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritası (c-j)

3.4 Tribolojik test sonuçları

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin uygulanan yüke göre aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma oranı ve kütle kaybı değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu artışın sebebi, kompozit ile aşındırıcı disk arasındaki temas alanının artarak

yumuşak matris bölgesinin daha fazla aşınmasıdır. Si₃N₄ katkı oranının artmasıyla aşındırıcı disk, yüksek sertliğe sahip olan takviye partikülleri ile temas eder ve aşınma oranı azalır [19]. En düşük aşınma oranı (0.00018 mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0.0025 g) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte 5 N yüklemde elde edilmiştir.



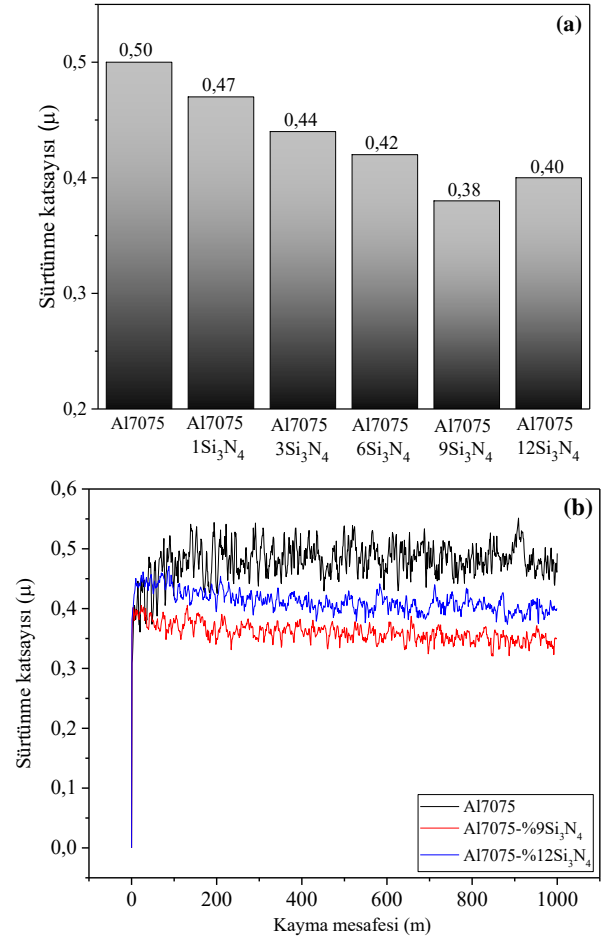
Şekil 8. Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri

Kompozit malzemedeki aşınma oranı ve sertlik arasındaki ilişki Archard eşitliği ile açıklanabilir (Denklem (7)). Bu denkleme göre, sertliği yüksek olan malzemenin aşınma oranı düşüktür. Denklemde μ sürtünme katsayısı, H ise malzemenin sertliğini ifade etmektedir. Yapılan bu çalışmada en yüksek sertlik (205 HV) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Bu nedenle en düşük aşınma oranına da (0.00018 mm³/(Nm)) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Archard eşitliği ile doğrulanmaktadır [20].

$$\Delta V = F \times \mu \times L/H \quad (7)$$

Şekil 9'da Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlere ait sürtünme katsayısı değerleri ile sürtünme katsayısı-kayma mesafesi eğrileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde, Al7075 matrise Si₃N₄ ilave edilmesiyle sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu düşüşün literatürle de uyumlu olduğu görülmüştür [21]. En yüksek ortalama

sürtünme katsayısı 0.5 olarak Al7075 alaşımında belirlenmiştir. En düşük ortalama sürtünme katsayısı (0.38) ise paslanmaz çelik diskle Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yüzey çifti arasında elde edilmiştir. Bu durum en iyi tribolojik özelliklerin Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda elde edildiğini doğrulamaktadır.

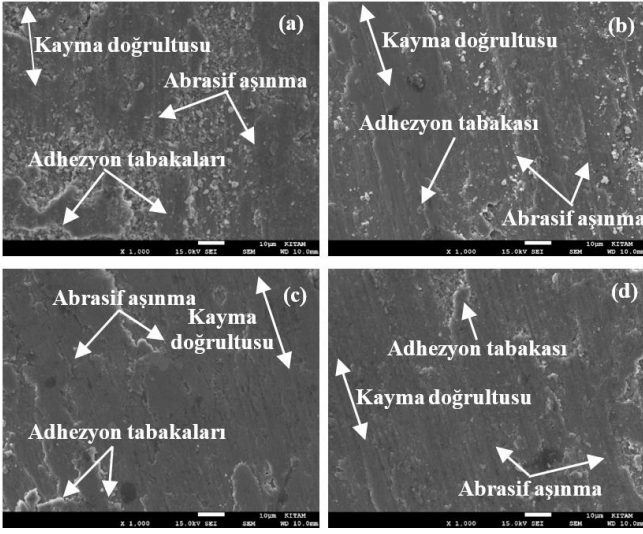


Şekil 9. Al7075-Si₃N₄ kompozitlere ait sürtünme katsayısı değerleri (a) ve sürtünme katsayısı-kayma mesafesi eğrileri (b)

3.5 Numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri

Al7075, Al7075-%9 Si₃N₄ ve Al7075-%12 Si₃N₄ kompozit yapılarına ait P=5 N yük altındaki aşınma izlerinin SEM görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde, numune yüzeylerinde aşınmadan dolayı oluklar ve çukurlar tespit edilmiştir [22]. Bu aşınma izlerinin kayma yönüne paralel olduğu görülmektedir. Ayrıca numune yüzeylerinde abrasif aşınma ve adhezyon mekanizmalarının etkili olduğu belirlenmiştir. En derin izler Şekil 10a'da gösterilen Al7075 alaşımında tespit edilmiştir. Çünkü aşındırıcı disk ile temas eden matris bölgesinde aşırı plastik deformasyon meydana gelmektedir. Ancak takviye miktarının artması ile sert partiküller aşındırıcı diske karşı bariyer görevi görür ve plastik deformasyon azalır. Böylelikle kompozitin aşınma direnci artmaktadır. Bu nedenle en küçük izler Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda

meydana gelmiştir. Sonuç olarak, numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri aşınma oranı ve kütle kaybı sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 10. Al7075 alaşımına (a), Al7075-%3 Si₃N₄ (b), Al7075-%9 Si₃N₄ (c) ve Al7075-%12 Si₃N₄ (d) kompozitlere ait aşınma görüntüleri (P=5 N yük altında)

4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapısı incelenerek deneysel yoğunluk, Vickers sertliği, aşınma oranı ve kütle kaybı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Yürütülen testler sonucunda, en yüksek deneysel yoğunluk 2.65 g/cm³ olarak Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte belirlenmiştir. Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitin deneysel yoğunluğu Al7075 alaşımına kıyasla %2.3 oranında artmıştır. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliği ve uygulanan ısıl işlemlerin etkisinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertliği artmıştır. En yüksek sertlik değeri (205 HV) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitte partiküllerin toplanmasından dolayı sertlik değeri azalmıştır.

- Mikroyapı analizlerine göre, Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda takviye partiküllerinin homojene yakın dağıldığı ve tane sınırlarına yerleştiği gözlemlenmiştir. Al7075-%12 Si₃N₄ kompozit yapıda ise Si₃N₄ partiküllerinin farklı bölgelerde bir araya gelerek kümelendiği tespit edilmiştir.

- Al7075-Si₃N₄ kompozitlere uygulanan aşınma test sonuçlarına göre en düşük aşınma oranı (0.00018 mm³/(Nm)), kütle kaybı (0.0025 g), sürtünme katsayısı (0.38) 5 N yükte Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla aşınma direnci artmıştır.

- Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ kompozit yapıların aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; en zayıf izler Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Al7075 matrise Si₃N₄ partiküllerinin takviye edilmesi ile aşınma izlerinin küçüldüğü belirlenmiştir.

Sonuç olarak Al7075 matrise belirli oranda (ağırlıkça %9) Si₃N₄ takviye edildiğinde kompozitin tribolojik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada üretilen yüksek aşınma dayanımına sahip Al7075-Si₃N₄ kompozitler, havacılık ve otomotiv başta olmak üzere birçok alanda kullanılan hafif ve gelişmiş tribolojik özelliklere sahip malzeme ihtiyacını karşılamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] S. A. Kumar, J. H. Vignesh, and S. P. Joshua, Investigating the effect of porosity on aluminium 7075 alloy reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) metal matrix composites through STIR casting process. *Materials Today: Proceedings*, 39, 414–419, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.690>.
- [2] V. V. B. Gurrappa, I., and Prasad, Corrosion characteristics of aluminium based metal matrix composites, *Journal of Materials Science & Technology*, 22, 115–122, 2006.
- [3] N. Ramadoss, K. Pazhanivel, A. Ganeshkumar, and M. Arivanandhan, Microstructural, mechanical and corrosion behaviour of B₄C/BN-reinforced Al7075 matrix hybrid composites. *International Journal of Metalcasting*, 17(1), 499–514, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00791-z>.
- [4] S. Devaganesh, P. K. D. Kumar, N. Venkatesh, and R. Balaji, Study on the mechanical and tribological performances of hybrid SiC-Al7075 metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3759–3766, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.002>.
- [5] S. Manghnani, D. Shekhawat, C. Goswami, T. K. Patnaik, and T. Singh, Mechanical and tribological characteristics of Si₃N₄ reinforced aluminium matrix composites: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4059–4064, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.440>.
- [6] N. H. Alharthi, S. M. Almotairy, and A. M. Almutairy, Frictional Behavior and Mechanical Performance of Al Reinforced with SiC via Novel Flake Powder Metallurgy. *Metals (Basel)*, 12(2), 2022. <https://doi.org/10.3390/met12020323>.
- [7] J. M. Mistry and P. P. Gohil, Experimental investigations on wear and friction behaviour of Si₃N₄ reinforced heat-treated aluminium matrix composites produced using electromagnetic stir casting process. *Composites Part B: Engineering*, 161, 190–204, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.074>.
- [8] G. B. V. Kumar, P. Prasad, N. Suresh, R. Pramod, and C. S. P. Rao, Assessment of mechanical and tribological characteristics of Silicon Nitride reinforced aluminum metal matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107138, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107138>.

- [9] V. Mohanavel, K. S. A. Ali, S. Prasath, T. Sathish, and M. Ravichandran, Microstructural and tribological characteristics of AA6351/Si₃N₄ composites manufactured by stir casting. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14662–14672, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.128>.
- [10] P. Ramu, R. H. K. Reddy, B. K. Kumar, T. Padmanathan, and M. V. Phanibhushana, Materials Today: Proceedings Investigation of wear characteristics of Al6061-Si₃N₄ composites subjected to strain hardening through Equal Channel Angular Pressing. *Materials Today: Proceedings*, 46, 790–794, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.765>.
- [11] D. S. R. Smart, J. P. Kumar, and C. Periasamy, Materials Today: Proceedings Microstructural, mechanical and wear characteristics of AA7075/TaC/Si₃N₄/Ti based hybrid metal matrix composite material. *Materials Today: Proceedings*, 43, 784–794, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.169>.
- [12] M. Şenel and Ü. Mahmutoğlu, Effect of induction heat treatment on the mechanical properties of Si₃N₄-graphene-reinforced Al2024 hybrid composites. *Bulletin of Materials Science*, 45(1), 1–17, 2022.
- [13] S. Bai, N. Perevoshchikova, Y. Sha, and X. Wu, Applied sciences the effects of selective laser melting process parameters on relative density of the AlSi10Mg parts and suitable procedures of the archimedes method. 2019, <https://doi.org/10.3390/app9030583>.
- [14] M. C. Şenel and M. Üstün, Dry sliding wear and friction behavior of graphene/ZrO₂ binary nanoparticles reinforced aluminum hybrid composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 9253–9269, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06661-4>.
- [15] M. C. Şenel, M. Gürbüz, E. Koç, Fabrication and characterization of SiC and Si₃N₄ reinforced aluminum matrix composites. *Universal Journal of Materials Science*, 5(4), 95, 2017.
- [16] Z. Ahmad, S. Khan, S. S. Hasan, Microstructural characterization and evaluation of mechanical properties of silicon nitride reinforced LM 25 composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 9129-9135, 2020.
- [17] V. V. Zakorzhevskii, I. P. Borovinskaya, Combustion synthesis of silicon nitride using ultrafine silicon powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 48, 375-380, 2009.
- [18] G. Anbuezhayan, B. Mohan, N. Senthilkumar, R. Pugazhenthii, Synthesis and characterization of silicon nitride reinforced Al–Mg–Zn alloy composites. *Metals and Materials International*, 27, 3058-3069, 2021.
- [19] R. K. Arya, R. Kumar, A. Telang, Influence of microstructure on tribological behaviors of Al6061 metal matrix composite reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) and silicon carbide (SiC) micro particles. *Silicon*, 15(9), 3987-4001, 2023.
- [20] W. Zhai, X. Shi, J. Yao, A. M. M. Ibrahim, Z. Xu, Q. Zhu, Y. Xiao, L. Chen, Q. Zhang, Investigation of mechanical and tribological behaviors of multilayer graphene reinforced Ni₃Al matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 70, 149-155, 2015.
- [21] P. P. Venkat, P. C. Naidu, L. P. Kumar, K. V. Babu, M. K. Prasad, M. V. Rao, Effect of Al₂O₃ particles on mechanical, microstructural and tribological characteristics of Al5052 metal matrix composite reinforced with Si₃N₄ particles. *Materials Today: Proceedings*, 91, 158-166, 2023.
- [22] D. Bhuvanesh, N. Radhika, A. V. Vidyapeetham, Experimental investigation on tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(5), 1295-1306, 2017.

