



OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi,
OMU Journal of Engineering Sciences and Technology

e-ISSN: 2791-8858 OMUIFD, September 2022, 2(2): 171-184

Kuru Sürtünme Altında Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ Nanokompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Comparison of Tribological Properties of Al-SiO₂ and
Al-ZrO₂ Nanocomposites Under Dry Friction

Mahmut Can ŞENEL¹, Muzaffer ÜSTÜN²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun
• mahmutcan.senel@omu.edu.tr • ORCID > 0000-0001-7897-1366

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun
• ustunmuzafferkaan@gmail.com • ORCID > 0000-0003-3419-2816

Makale Bilgisi / Article Information

Makale Türü / Article Types: Araştırma Makalesi / Research Article

Geliş Tarihi / Received: 01 Nisan / April 2022

Kabul Tarihi / Accepted: 04 Ağustos / August 2022

Yıl / Year: 2022 | **Cilt – Volume:** 2 | **Sayı – Issue:** 2 | **Sayfa / Pages:** 171-184

Atıf/Cite as: Şenel, M., C., Üstün, M. "Kuru Sürtünme Altında Al-SiO₂ Ve Al-ZrO₂ Nanokompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması" Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 2(2), Eylül 2022: 171-184.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mahmut Can ŞENEL

KURU SÜRTÜNME ALTINDA Al-SiO₂ VE Al-ZrO₂ NANOKOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZ:

Bu çalışmada, silisyum dioksit (SiO₂) veya zirkonyum dioksit (ZrO₂) nanopartikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özellikleri ve mikro yapıları araştırılmıştır. Üretilen numunelerin faz yapıları ve mikro yapıları; X-ışını kırınımı cihazıyla ve taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiştir. Aşınma testleri pin-on disk aşınma test düzeneğinde, 5 N yük altında, 200 dev/dk dönüş hızında ve 20 dk süresince gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre; minimum aşınma oranı (0.00359, 0.00361) ve minimum kütle kaybı (12 mg, 13 mg) Al-%6SiO₂ ve Al-%9ZrO₂ kompozitte elde edilmiştir. 440C paslanmaz çelik diske karşı en düşük sürtünme katsayısı ise sırasıyla Al-%9SiO₂ (0.40) ve Al-%12ZrO₂ (0.44) kompozitte tespit edilmiştir. Aynı katkı oranında SiO₂ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerdeki aşınma oranının ve sürtünme katsayısının ZrO₂ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Sürtünme, Silisyum Dioksit, Zirkonyum Dioksit, Alüminyum.



COMPARISON OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Al-SiO₂ AND Al-ZrO₂ NANOCOMPOSITES UNDER DRY FRICTION

ABSTRACT

In this study, tribological properties and microstructures of silicon dioxide (SiO₂) or zirconium dioxide (ZrO₂) nanoparticle reinforced aluminum matrix composites were investigated. The produced samples' phase structures and microstructures were examined by the X-ray diffraction device and scanning electron microscope. Wear tests were carried out via a pin-on-disc wear test unit at a 200 rpm rotational speed under a 5 N load for 20 minutes. According to the test results, minimum wear rate (0.00359, 0.00361) and minimum mass loss (12 mg, 13 mg) were obtained at Al-6%SiO₂ and Al-9%ZrO₂ composite, respectively. The lowest friction coefficient against 440C stainless steel disc was found at Al-9%SiO₂ (0.40) and Al-12%ZrO₂ (0.44) composite, respectively. It was determined that the wear rate and friction coefficient of SiO₂ reinforced aluminum matrix composites were lower than those of ZrO₂ reinforced aluminum matrix composites for the same reinforcement ratio.

Keywords: Wear, Friction, Silicon Dioxide, Zirconium Dioxide, Aluminum.



Öne Çıkanlar

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen nano zirkonyum dioksit veya nano silisyum dioksit takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özellikleri ve mikro yapıları karşılaştırmalı olarak ilk kez bu çalışmada incelenmiştir. Yürütülen testler neticesinde; aynı takviye oranında Al-SiO₂ kompozitlerin tribolojik özelliklerinin (kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı) Al-ZrO₂ kompozitlere kıyasla daha üstün olduğu tespit edilmiştir.

1. GİRİŞ

Metalik parçaların üretiminde bilinen en eski ve modern üretim yöntemi olan toz metalürjisi yöntemi, teknolojinin gelişmesi ile havacılık ve uzay sektörü başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem, toz halinde bulunan maddelerin birtakım işlemler sonucunda yararlı mühendislik malzemelerine dönüşmesini sağlamaktadır. Uygulama alanı oldukça geniş olan toz metalürjisi yöntemi, karmaşık ve hassas parça imalatına imkân sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle farklı özelliklere sahip malzemeler üretilebilmekte olup bunlardan önemli bir kısmı da kompozit malzemeler sınıfına girmektedir [1].

Kompozit malzeme; birden fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzeme toplamak amacıyla geliştirilmiş yeni bir malzeme türüdür. Kompozit malzemeler ana (matris) malzeme ve takviye elemanından oluşur. Kompozit malzemeler ana malzemeye göre; seramik, metal ve polimer matrisli kompozitler şeklinde sınıflandırılmaktadır [2]. Metal matrisli kompozit malzemelerde en fazla kullanım alanı bulan malzeme sınıfı ise alüminyum esaslı kompozitlerdir. Bu kompozit malzemeler; hafif olmaları, aşınma direncinin ve mekanik dayanımının yüksek olması sebebiyle uzay ve otomotiv sektörleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan takviye elemanları B₄C, SiO₂, ZrO₂, Al₂O₃ ve SiC'dir [3, 4]. Bu çalışma kapsamında, matris malzeme olarak alüminyum, takviye elemanları olarak SiO₂/ZrO₂ tercih edilmiştir.

Günümüzde SiO₂ veya ZrO₂ takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelenmesine yönelik bir takım bilimsel çalışmaların yayımlandığı bilinmektedir [5-11]. Gül ve Şenel [5] yaptıkları çalışmada, Al₁₀Si alaşımına vakum infiltrasyon yöntemiyle 120 ve 80 µm boyutlara sahip SiO₂ partikülleri takviye ederek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Islatılabilirliği desteklemek adına Al10Si alaşımına %5 Mg ilave edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; takviye parçacık boyutunun artmasıyla kompozitlerin aşınma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Mokhnache vd. [6] yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %3, %6 ve %9 SiO₂ takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre; SiO₂ katkı oranının artmasıyla alüminyum esaslı kompo-

zitin aşınma direncinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Rajasekar vd. [7] çalışmalarında, ısıtılma işlemi Al6061-ZrO₂ kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Matris malzemesine 700, 750 ve 800°C gibi çeşitli ergime sıcaklıklarında %5, 6 ve 7 hacimsel oranda ZrO₂ ve %4 hacimsel oranda uçucu kül partikülleri eklenmiştir. Kompozitlerin metalürjik özelliklerini iyileştirmek için kompozitler farklı sürelerde ısıtılma işlemi tabii tutulmuştur. Deneysel sonuçlara göre minimum aşınma oranına; 700°C ergime sıcaklığında, 120 dk sinterleme süresinde ve hacimce %5ZrO₂ katkılı alüminyum esaslı kompozitte ulaşılmıştır. Shreyas vd. [8] yaptıkları çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al₂O₃ ve ZrO₂ partiküllerle takviye edilmiş Al6061 esaslı kompozitlerin aşınmasını araştırmışlardır. Kompozit yapıda Al₂O₃ katkısı ağırlıkça %2.5 oranında sabit tutulmuş ve ağırlıkça %1, 2, 3 ve 4 oranlarında ZrO₂ katkısı yapılmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre; Al₂O₃ ve ZrO₂ ilavesiyle alüminyum esaslı kompozitin sürtünmeden kaynaklı hasarının azaldığını tespit etmişlerdir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; Al-SiO₂ veya Al-ZrO₂ kompozitlerin tribolojik özelliklerinin araştırılmasına yönelik çalışmaların olduğu görülmüştür. Buna karşın; toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ kompozitlerin tribolojik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, ZrO₂ veya SiO₂ nanopartikül katkı oranının (ağırlıkça %1-12) alüminyum esaslı kompozitlerin tribolojik özelliklerine (kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı) ve mikro yapılarına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

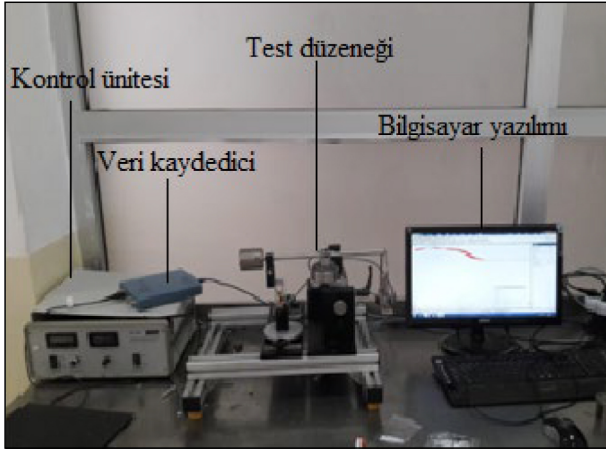
2. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle Al-SiO₂ veya Al-ZrO₂ kompozitler üretilmiştir. Takviye elemanı olarak silisyum dioksit tozu (yoğunluk: ~2.65 g/cm³, saflık derecesi: %98, ortalama partikül boyutu: ~400 nm) veya zirkonyum dioksit tozu (yoğunluk: ~5.67 g/cm³, saflık derecesi: %98, ortalama partikül boyutu: ~70 nm) kullanılmıştır. Matris yapıyı ise alüminyum tozları oluşturmuştur. Kullanılan alüminyum tozlarının teorik yoğunluğu ~2.7 g/cm³, saflık derecesi %99 ve ortalama partikül boyutu ~10 µm'dir. Saf alüminyum tozu Alfa Aesar (ABD) firmasından, SiO₂ tozu Sigma-Aldrich (ABD) firmasından ve ZrO₂ tozu Merck (ABD) firmasından temin edilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemiyle numune üretimi için öncelikle topaklanma oluşumunu önlemek amacıyla SiO₂/ZrO₂ partiküller etanol içerisinde 3 saat süresince ultrasonik dağıtıcıyla dağıtılmıştır. Eş zamanlı olarak alüminyum partikülleri etanol içerisinde mekanik olarak karıştırılmıştır. Yüksek enerjili bilyalı değirmen haznesine aktarılan Al-SiO₂/ZrO₂-etanol karışımı 3 saat süresince değirmende karıştırılmıştır. Karışım daha sonra filtrelenip etüv içerisinde vakum altında 16 saat süresince kurutulmuştur. Kurutulan toz karışımı, 10×10×5 mm boyutların-

daki paslanmaz çelik kalıp içerisinde tek eksenli presle 700 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Presleme neticesinde üretilen ham numuneler vakum altında 3 saat süresince ve 630 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında numunelere kaba ve ince zımparalama işlemleri uygulanıp numuneler elmas solüsyonla parlatılmıştır. Böylece, numuneler yoğunluk/sertlik ölçümleri ve aşınma testleri için hazır hale getirilmiştir.

Üretilen numunelerin deneysel yoğunluğu ve sertliği Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında yer alan Arşimet yoğunluk ölçüm kitiyle ve mikro Vickers sertlik ölçme cihazıyla belirlenmiştir. Sertlik ölçümü için numune yüzeyinin rastgele 7 (yedi) noktasından ölçüm alınmış olup yük 15 s süresince ve 200 g olarak uygulanmıştır. Bu sertlik verilerinin ortalaması alınarak numunenin ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Mikro yapı ve faz yapısı analizi için OMÜ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi'nde yer alan taramalı elektron mikroskopuyla (Jeol JSM 7001F) ve X-ışını kırınımı cihazıyla (Rigaku Smartlab) gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan GUNT TM260 Triboloji Eğitim setinden faydalanılmıştır (Şekil 1). Bu sette yer alan pin-on disk deney modülü kullanılarak numunelerin kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme kuvveti belirlenmiştir. Elde edilen sürtünme kuvveti verileri, PICO 4424 veri kaydedicisi ve yazılımı ile saniyede bir bilgisayara aktarılmıştır. Aşınma testlerinde karşı disk olarak 440C paslanmaz çelik disk kullanılmıştır.



Şekil 1. Aşınma testlerinde kullanılan triboloji eğitim seti

Aşınma testlerinde; test süresi 20 dk, disk yarıçapı 20 mm ve aşındırıcı disk dönüş hızı 200 dev/dk olup kayma mesafesi (L) 500 m olarak hesaplanmıştır. Numunelere ait kütle kaybı (Δm), deneysel yoğunluk (ρ_D), kayma mesafesi (L) ve uygulanan yük (P) dikkate alınarak aşınma oranı (W) Denklem (1)'deki gibi hesaplanabilmektedir. Aşınma oranı, numuneye ait birim yük ve birim kayma mesafesindeki hacimsel aşınma (ΔV) miktarı olarak da tanımlanabilmektedir [12].

$$W = \Delta V / (L \times P) = \Delta m / (\rho_D \times L \times P) \quad (1)$$

Numunelerdeki hacimsel aşınma miktarı (ΔV) numunenin sertliğiyle ters orantılı olarak değişmektedir. Bu değişim Archard eşitliğiyle (Denklem (2)) ifade edilebilmektedir [12, 13]:

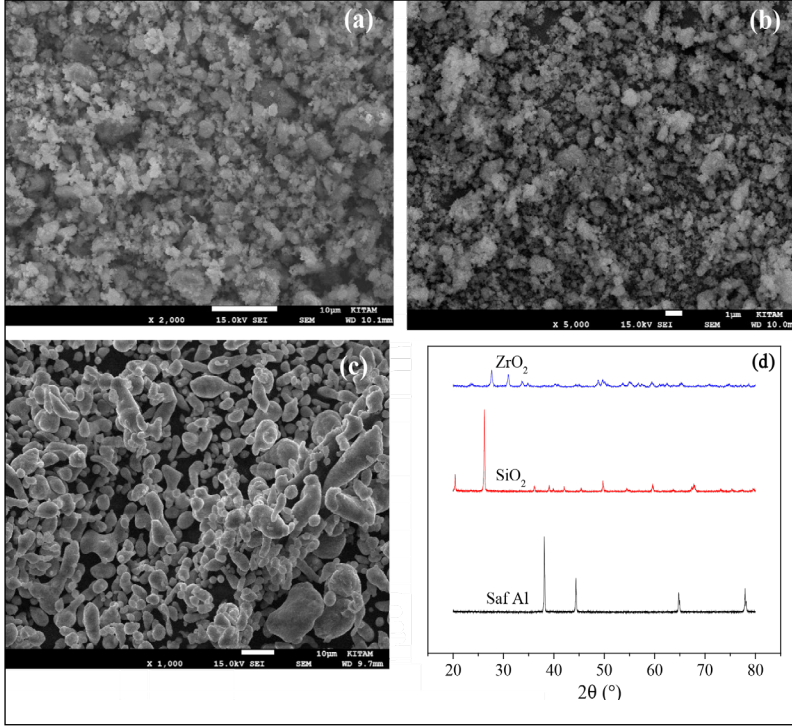
$$\Delta V = P \times \mu \times L / H \quad (2)$$

Bu eşitlikte; H numunenin sertliğini ve μ ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Toz Partiküllerinin Analizi

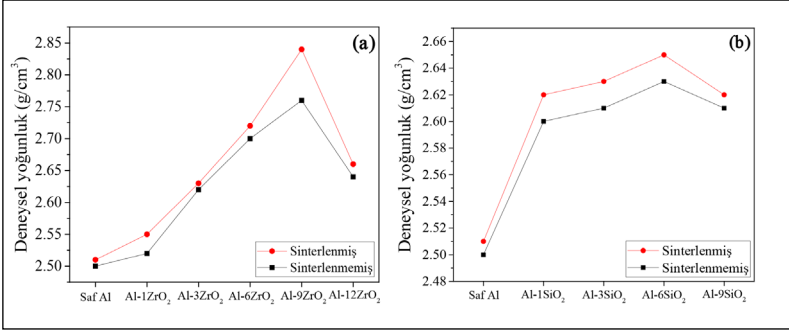
Kompozit yapıda takviye elemanı olarak tercih edilen silisyum dioksit (SiO_2) tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. SEM görüntüsünden SiO_2 tozlarının düzensiz bir morfolojide ve 1 μm 'den daha küçük bir boyutta olduğu görülmüştür. Zirkonyum dioksit tozlarının ise 100 nm'den daha küçük bir boyutta ve düzensiz formda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2b). Matris yapıda ana malzeme olarak kullanılan saf alüminyum tozları 20 μm 'den daha küçük boyutta ve süngerimsi formdadır (Şekil 2c). Temin edilen tozlara ait XRD faz eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. Kırınım desenlerinden; zirkonyum dioksitin ($2\theta \sim 20.2^\circ, 27.1^\circ, 36.5^\circ, 39^\circ, 49.6^\circ, 54.2^\circ, 59.3^\circ, 67.8^\circ, 73.4^\circ, 75^\circ, 79.1^\circ$), silisyum dioksitin ($2\theta \sim 28.2^\circ, 31.5^\circ, 33.8^\circ, 38.5^\circ, 41.2^\circ, 45.4^\circ, 50.1^\circ, 56.3^\circ, 59.8^\circ, 62.7^\circ, 65.4^\circ, 71.2^\circ, 74.8^\circ, 78.3^\circ$) ve saf alüminyumun ($2\theta \sim 38.8^\circ, 45.2^\circ, 65.3^\circ, 77.8^\circ$) kırınım açıları görülebilmektedir. Tozlara ait bu faz analizleri, temin edilen tozların saf alüminyum, silisyum dioksit ve zirkonyum dioksit olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 2. Tozların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri: (a) SiO₂, (b) ZrO₂, (c) Saf Al ve (d) XRD faz analizleri

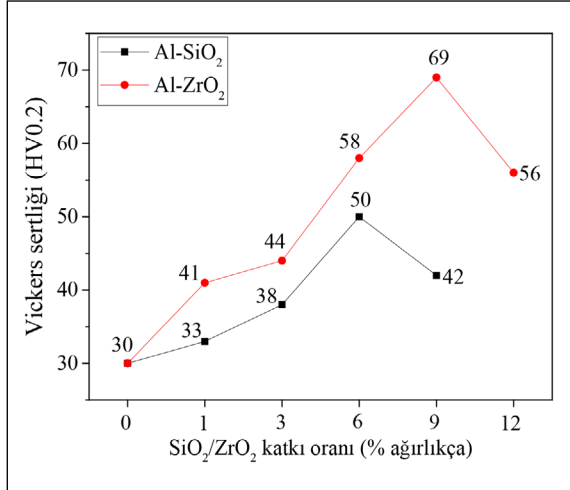
3.2. Numunelerin Yoğunluk ve Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Analizi

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-ZrO₂ ve Al-SiO₂ nanokompozitlerin deneysel yoğunluk ölçüm sonuçları Şekil 3'de verilmiştir. Şekillerden sinterlemenin etkisiyle deneysel yoğunluğun arttığı tespit edilmiştir. Al-ZrO₂ kompozit yapılar içerisinde ise en yüksek deneysel yoğunluk (2.84 g/cm³) Al-%9 ZrO₂ kompozitte belirlenmiştir (Şekil 3a). Al-SiO₂ kompozitler arasında maksimum yoğunluk (2.65 g/cm³) Al-%6 SiO₂ kompozitte elde edilmiştir (Şekil 3b). Ağırlıkça %6 SiO₂ ve %9 ZrO₂ katkı oranından sonra muhtemel topaklanma etkisiyle Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlerin yoğunluklarının düştüğü tespit edilmiştir. Aynı katkı oranında Al-ZrO₂ kompozitin yoğunluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiş olup bu durum zirkonyum dioksitin yüksek teorik yoğunluğundan (5.67 g/cm³) kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. (a) Al-ZrO₂ ve (b) Al-SiO₂ nanokompozitlerin deneysel yoğunluğu

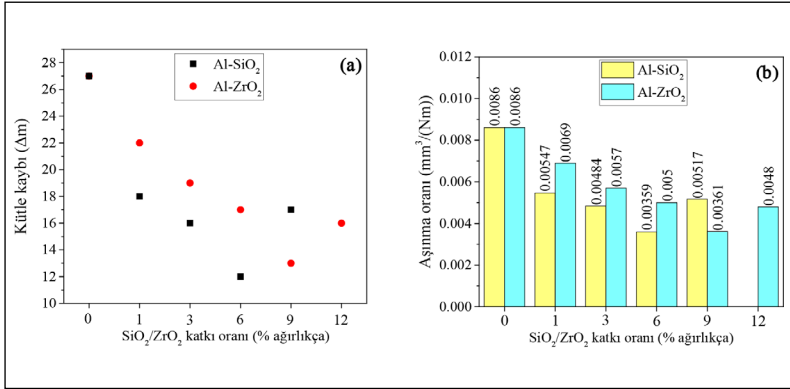
Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlerin Vickers sertliği Şekil 4'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kompozitlerin Vickers sertlik değerleri incelendiğinde; en yüksek sertlik değeri Al-%6 SiO₂ (50 HV) ve Al-%9 ZrO₂ (69 HV) kompozitte elde edilmiştir. Saf alüminyuma kıyasla Al-%6 SiO₂ kompozitin sertliği %66.7 ve Al-%9 ZrO₂ kompozitin sertliği %130 oranında artmıştır. Ağırlıkça %6 SiO₂ ve %9 ZrO₂ katkı oranından sonra kompozitlerin sertliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Aynı katkı oranında Al-ZrO₂ nanokompozitlerin sertliğinin Al-SiO₂ kompozitlerin sertliğine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, katkı elemanı olan ZrO₂'nin SiO₂'ye kıyasla daha sert bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlerin Vickers sertlik değerleri

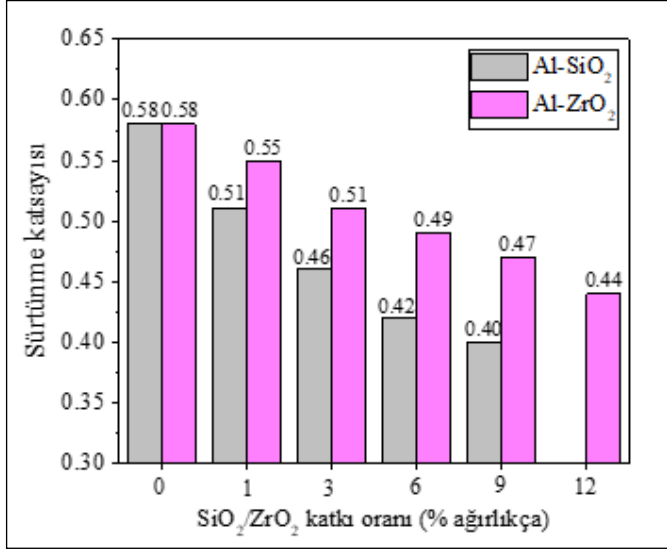
3.3. Numunelerin Kütle Kaybı, Aşınma Oranı ve Sürtünme Katsayısı Analizi

Bu bölümde, kuru şartlarda gerçekleştirilen aşınma testleri (5 N yük altında ve 200 dev/dk dönüş hızında) neticesinde saf alüminyum, Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlerin kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değişimi incelenmiştir. Şekil 5'de Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlerin kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere belli bir silisyum dioksit ve zirkonyum dioksit katkı oranına (%6 SiO₂ ve %9 ZrO₂) kadar numunelerdeki kütle kaybının ve aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5a). Paslanmaz çelik diske karşı saf alüminyumun aşınma oranı 0.0086 mm³/(Nm) iken; Al-%6 SiO₂ kompozitin 0.00359 mm³/(Nm) ve Al-%9 ZrO₂ kompozitin 0.00361 mm³/(Nm) olarak tespit edilmiştir (Şekil 5b). Bu durum, ZrO₂/SiO₂ partiküllerinin sert seramik yapısından kaynaklanmaktadır. Aynı katkı oranında Al-SiO₂ kompozitlerdeki kütle kaybının ve aşınma oranının Al-ZrO₂ kompozitlere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Aşınma test sonuçlarının Archard eşitliğini (Denklem (2)) doğruladığı görülmüştür. Diğer bir ifadeyle maksimum sertliğin elde edildiği kompozit yapılarında (Al-%6 SiO₂ ve Al-%9 ZrO₂) minimum aşınma oranı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Al-ZrO₂ ve Al-SiO₂ nanokompozitlerin (a) kütle kaybı ve (b) aşınma oranı değerleri

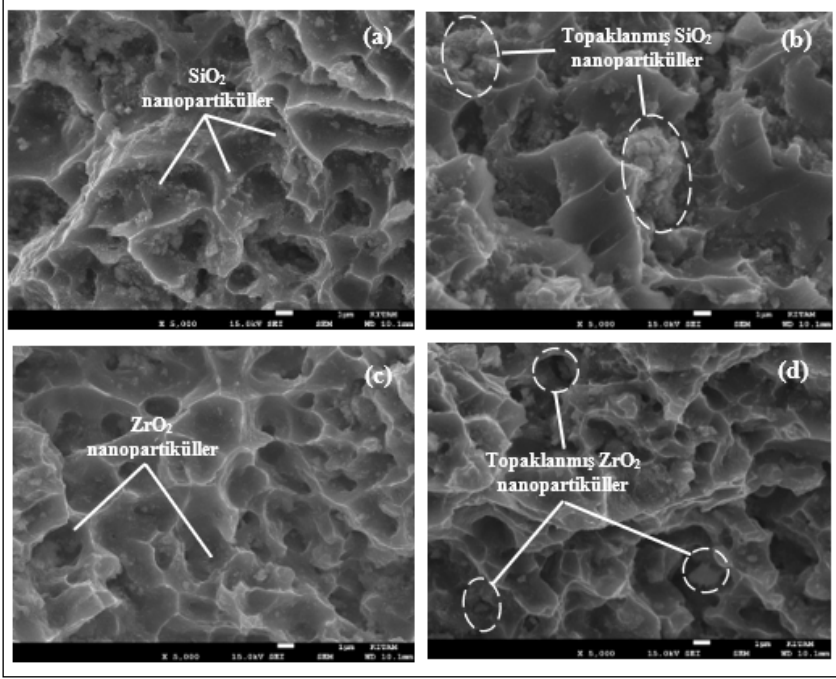
Aşınma testleri neticesinde en yüksek sürtünme katsayısı ($\mu=0.58$) paslanmaz çelik disk ile saf alüminyum arasında tespit edilirken; minimum sürtünme katsayıları Al-%9 SiO₂ ($\mu=0.40$) ve Al-%12 ZrO₂ ($\mu=0.44$) nanokompozitlerde tespit edilmiştir (Şekil 6). Şekilden seramik katkı oranının artmasıyla sürtünme katsayısının düştüğü görülebilmektedir. Aynı katkı oranında kullanılan silisyum dioksit partiküllerinin sürtünme katsayısını azaltmada zirkonyum dioksit partiküllere kıyasla daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Al-ZrO₂ ve Al-SiO₂ nanokompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri

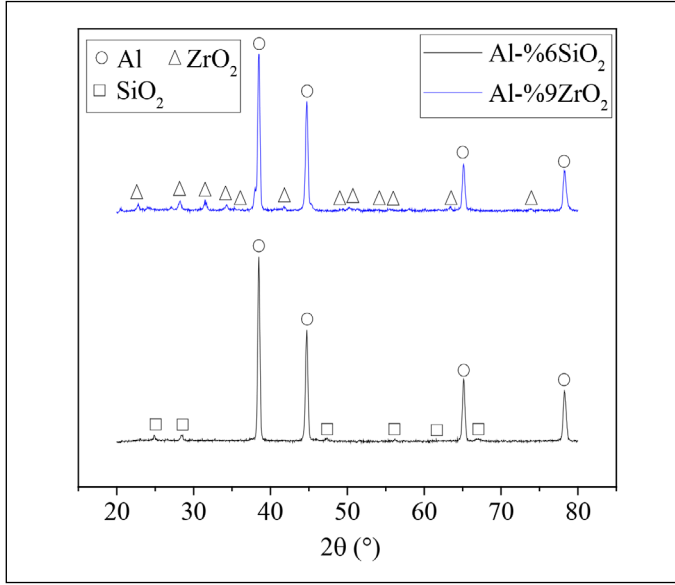
3.4. Numunelerin Mikroyapı ve Faz Yapısı Analizi

Saf alüminyum, Al-%6 SiO₂, Al-%9 SiO₂, Al-%9 ZrO₂ ve Al-%12 ZrO₂ kompozit numunelere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekildeki tüm kırık yüzey numunelerinin boyun vererek iyi bir şekilde sinterlendiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça %6 SiO₂ veya %9 ZrO₂ nanopartikül katkılı alüminyum esaslı kompozit yapılarda SiO₂ veya ZrO₂ partiküllerin homojene yakın bir dağılım sergilediği görülmüştür (Şekil 7a, 7c). Özellikle alüminyum matrise %9 SiO₂ veya %12 ZrO₂ katkısında ise topaklanmış nanopartiküller tespit edilmiştir (Şekil 7b, 7d). Bu topaklanma etkisiyle de kompozitlerin tribolojik özelliklerinin bozulduğu öngörülmektedir.



Şekil 7. Numunelere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al-%6 SiO₂, (b) Al-%9 SiO₂, (c) Al-%9 ZrO₂, (d) Al-%12 ZrO₂ kompozit

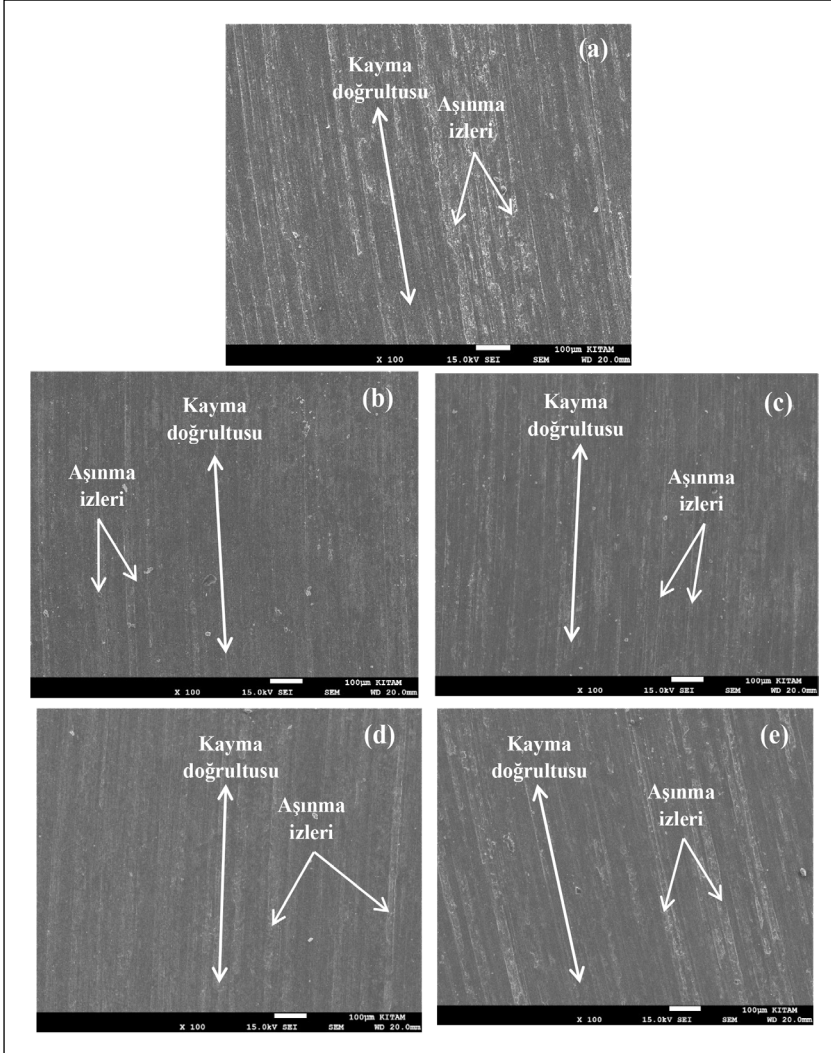
Şekil 8'de Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlere ait X-ışını kırınımı faz eğrileri verilmiştir. Al-%6 SiO₂ kompozit yapıdaki tüm fazların silisyum dioksit ve alüminyuma ait olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8). Benzer şekilde Al-%9 ZrO₂ kompozit yapıdaki tüm piklerin alüminyum veya ZrO₂ fazına ait olduğu görülmüştür. Kompozit yapılarda bazı kırınım açılarındaki pikler ise oldukça düşük SiO₂/ZrO₂ katkı oranı sebebiyle belirlenememiştir. Her iki kompozit yapıda da zirkonyum dioksit ve silisyum dioksitin varlığı doğrulanmış olup bu kompozit yapılarda herhangi bir ikincil faz (Al₄C₃ vb.) oluşumuna rastlanmamıştır.



Şekil 8. Al-6% SiO₂ ve Al-9% ZrO₂ nanokompozitlere ait XRD faz eğrileri

3.5. Aşınmış Yüzey Görüntülerinin Analizi

Saf alüminyum, Al-6% SiO₂, Al-9% SiO₂, Al-9% ZrO₂ ve Al-12% ZrO₂ nanokompozitlere ait aşınmış yüzey görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Aşınmış yüzeyler incelendiğinde, tüm yüzeylerde abrasif aşınmanın olduğu görülmektedir. Seramik katkısıyla (SiO₂/ZrO₂) birlikte kompozit numunelerdeki aşınmış yüzeylerdeki kanal genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. En fazla aşınmanın olduğu numune yüzeyinin saf alüminyum olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9a). Minimum aşınmanın gerçekleştiği yüzeylerin ise Al-6% SiO₂ ve Al-9% ZrO₂ kompozitler (Şekil 9b, 9d) olduğu görülmüştür. Zirkonyum dioksit katkılı alüminyum esaslı kompozitlerin yüzeyinde gerçekleşen aşınmanın silisyum dioksit katkılı alüminyum esaslı kompozitlere kıyasla daha fazla olduğu belirlenmiştir. %12 ZrO₂ veya %9 SiO₂ katkılı alüminyum esaslı kompozit yapıda (Şekil 9c, 9e) ise muhtemel topaklanma etkisiyle aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, üniform dağılmış SiO₂ veya ZrO₂ partiküllerin kompozit numunelerin yüzeyindeki aşınmayı azaltmada önemli olduğu belirlenmiştir. Aşınmış yüzey görüntüleriyle aşınma test sonuçları (kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri) karşılaştırıldığında birbiriyle tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 9. Numunelere ait SEM aşınmış yüzey görüntüleri: (a) Saf Al, (b) Al-%6 SiO₂, (c) Al-%9 SiO₂, (d) Al-%9 ZrO₂, (e) Al-%12 ZrO₂ nanokompozit

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ nanokompozitlerin tribolojik özellikleri (kütle kaybı, aşınma oranı, sürtünme katsayısı) ve mikro yapıları incelenerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Aşınmış yüzeylere ait SEM incelemelerinden minimum abrasif aşınmanın Al-%6 SiO₂ kompozit yapıda olduğu tespit edilmiştir. Aynı ZrO₂/SiO₂ katkı oranında Al-SiO₂ kompozitlerin yüzeyinde gözlenen aşınmanın Al-ZrO₂ kompozitlere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir.
- Aşınma testleri neticesinde kuru şartlar altında saf alüminyum ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı 0.58 iken; Al-%12 ZrO₂ kompozitte sürtünme katsayısının 0.44'e, Al-%9 SiO₂ kompozitte ise 0.40'a düştüğü tespit edilmiştir. Alüminyum matrise ZrO₂ veya SiO₂ katkısıyla katkı elemanlarının sahip olduğu seramik yapı sebebiyle kompozitlerin sürtünme katsayısının düştüğü tespit edilmiştir.
- Aşınma test sonuçlarına göre minimum aşınma oranı ve kütle kaybı Al-%6 SiO₂ (12 mg, 0.00359 mm³/(Nm)) ve Al-%9 ZrO₂ (13 mg, 0.00361 mm³/(Nm)) kompozitte elde edilmiştir. Aynı katkı oranında Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ kompozitlere ait aşınma test sonuçları incelendiğinde, SiO₂ takviye elemanının ZrO₂'ye kıyasla alüminyum esaslı kompozitlerin tribolojik özelliklerini iyileştirmede daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, SEM ve XRD analizleri konusunda destekleri sebebiyle Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMÜ) Karadeniz İleri ve Teknoloji Araştırma Merkezi'ne teşekkür ederiz. Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından [PYO. MUH.1901.20.001] proje numarası ile desteklenmiştir.

Yazar Katkı Oranları

Çalışmanın Tasarlanması (Design of Study): Mahmut Can ŞENEL (%60), Muzaffer ÜSTÜN (%40)

Veri Toplanması (Data Acquisition): Mahmut Can ŞENEL (%50), Muzaffer ÜSTÜN (%50)

Veri Analizi (Data Analysis): Mahmut Can ŞENEL (%60), Muzaffer ÜSTÜN (%40)

Makalenin Yazımı (Writing Up): Mahmut Can ŞENEL (%60), Muzaffer ÜSTÜN (%40)

Makale Gönderimi ve Revizyonu (Submission and Revision): Mahmut Can ŞENEL (%60), Muzaffer ÜSTÜN (%40)

KAYNAKLAR

- [1] M. Demir. İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen ve/veya Si₃N₄/B₄C Takviyeli Al6061 Esaslı Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2022
- [2] Y Şahin. Kompozit Malzemelere Giriş, 2. Baskı, Ankara: Seçkin Yayınevi, 2006.
- [3] MC. Şenel, M. Gürbüz, E. Koç, "Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler," Mühendis ve Makine, c. 56, s. 669, ss. 36-47, 2015.
- [4] F. Kumdalı. Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [5] F. Gül, L. Şenel, "Takviye parçacık boyutunun SiO₂ takviyeli Al-Si kompozitlerin abrasiv aşınma davranışı üzerinde etkisi," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 14, s. 2, ss. 194-199, 2010.
- [6] E.Q. Mokhnache, G. Wang, L. Geng, "Wearing resistance of in-situ Al-based composites with different SiO₂/C/Al molar ratios fabricated by reaction hot pressing," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, c. 26, s. 4, ss. 917-923, 2020.
- [7] M. Rajasekar, U. Mohamed Faizal, S. Sudhagar, P. Vijayakumar, "Influence of heat treatment on tribological behavior of Al/ZrO₂/fly ash hybrid composite," Materials Today: Proceedings, c. 45, s. 2, ss. 774-779, 2020.
- [8] P.S. Shreyas, S. Mahesh, N. Rajanna, "Evaluating the tribological properties of aluminium based hybrid composites reinforced with Al₂O₃&ZrO₂ nano particles," Materials Today: Proceedings, c. 45, s. 1, ss. 429-433, 2021.
- [9] G.B. Veeresh Kumar, R. Pramod, C.G. Sekhar, G. P. Kumar, T. Bhanumurthy, "Investigation of physical, mechanical and tribological properties of Al6061-ZrO₂ nano-composites," Heliyon, c. 5, s. 11, ss. 1-8, 2019.
- [10] K. Sekar, G. Jayachandra, S. Aravindan, "Mechanical and welding properties of A6082-SiC-ZrO₂ hybrid composite fabricated by stir and squeeze casting," Materials Today: Proceedings, c. 5, s. 9(3), ss. 20268-20277, 2018.
- [11] R. Pandiyarajan, P. Maran, S. Marimuthu, K.C. Ganesh, "Mechanical and tribological behavior of the metal matrix composite AA6061/ZrO₂/C," Journal of Mechanical Science and Technology, c. 31, s. 10, ss. 4711-4717, 2017.
- [12] W. Zhai, X. Shi, J. Yao, AMM. Ibrahim, Z. Xiu, 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, c. 70, ss. 149-155, 2015.
- [13] R. Liu, DY. Li, "Modification of Archard's equation by taking account of elastic/pseudoelastic properties of materials," Wear, c. 251, s. 1-12, ss. 956-964, 2001.