



Karıştırmalı Döküm Yöntemiyle Üretilen SiC Katkılı Al6013 Matrisli Kompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of Tribological Properties of SiC-Reinforced Al6013 Matrix Composites Produced by Stir Casting Method

Mahmut Can ŞENEL¹, Ahmet MERCAN²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye
• mahmutcan.senel@hotmail.com • ORCID > 0000-0001-7897-1366

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye
• ahmet.mercan@hotmail.com • ORCID > 0009-0005-7960-5567

Makale Bilgisi/Article Information

Makale Türü/Article Types: Araştırma Makalesi/Research Article

Geliş Tarihi/Received: 25 Kasım/November 2025

Kabul Tarihi/Accepted: 31 Aralık/December 2025

Yıl/Year: 2025 | **Cilt-Volume:** 6 | **Sayı-Issue:** 1 | **Sayfa/Pages:** 21-35

Atıf/Cite as: Şenel, M.C., Mercan, A. "Karıştırmalı Döküm Yöntemiyle Üretilen SiC Katkılı Al6013 Matrisli Kompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması" Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 6(1), Aralık 2025: 21-35.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mahmut Can ŞENEL

KARIŞTIRMALI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN SiC KATKILI AL6013 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu çalışmada, azot gazı altında karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6013-SiC kompozitler üretilmiştir. Hurda Al6013 matris malzemesine ağırlıkça %5, 10 ve 15 takviye oranlarında SiC ilave edilerek üretilen kompozitlerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, kütle kaybı, aşınma oranı ve mikro yapıları incelenmiştir. Al6013-SiC kompozitler arasında en düşük gözeneklilik oranı (%5,35), en yüksek Vickers sertliği (169 ± 3 HV), en düşük kütle kaybı (1,1 mg) ve aşınma oranı ($0,84 \times 10^{-7}$ mm³/Nm) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilmiştir. SEM analizlerinde %15 SiC takviye oranında SiC partiküllerinin topaklandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak belirli oranlarda SiC takviyesinin (%10'a kadar) Al6013 matris malzemesinin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al6013 Alaşımı, Kompozit, Silisyum Karbür, Karıştırmalı Döküm.



INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SiC-REINFORCED AL6013 MATRIX COMPOSITES PRODUCED BY STIR CASTING METHOD

ABSTRACT

In this study, Al6013-SiC composites were produced by the stir casting method under nitrogen gas. The density, porosity, Vickers hardness, mass loss, wear rate, and microstructure of the composites were investigated which was produced by adding SiC to scrap Al6013 matrix material at reinforcement rates of 5, 10, and 15 wt%. Among Al6013-SiC composites, the lowest porosity (5.35%), the highest Vickers hardness (169 ± 3 HV), the lowest mass loss (1.1 mg), and wear rate (0.840×10^{-7} mm³/Nm) were obtained in the Al6013-10%SiC composite. SEM analysis observed that SiC particles agglomerated at a 15% SiC reinforcement rate. Consequently, it was determined that SiC reinforcement at certain rates (up to 10%) improved the tribological properties of the Al6013 matrix material.

Keywords: Al6013 Alloy, Composite, Silicon Carbide, Stir Casting.

Öne Çıkanlar

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen silisyum karbür takviyeli Al6013 matrisli kompozitlerin tribolojik özellikleri ve mikro yapıları bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Yürütülen testler neticesinde; ağırlıkça %10'a kadar silisyum karbür takviyesinde kompozitin tribolojik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir.



1. GİRİŞ

Teknolojideki hızlı gelişme ve buna paralel daha üstün performansa sahip malzeme ihtiyacı, geleneksel malzemelerin dışında alternatif yeni malzemelerin üretimini zorunlu kılmıştır. Bu malzemelerden biri de kompozit malzemelerdir [1]. Kompozit malzemeler, daha dayanıklı ve dirençli yeni bir malzeme üretilmesi amacıyla en az iki farklı malzemenin makro düzeyde birleştirilmesi ile elde edilir. Kompozit malzeme genel olarak matris ve takviye olarak adlandırılan iki fazdan oluşmakta olup geleneksel malzemelere kıyasla öne çıkan birçok avantajı barındırmaktadır. Özellikle hafif olmalarının yanı sıra yüksek dayanıma sahip olmaları kompozit malzemelerin en belirgin özellikleridir [2]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda alüminyum matrisli kompozit malzemeler; hafif olmalarının yanında mekanik dayanımı ve aşınma direncinin yüksek olması nedeniyle otomotiv, havacılık ve uzay sektörleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak sıklıkla SiC, Al₂O₃, TiC, TiB₂ ve B₄C gibi seramik malzemeler kullanılmaktadır [3]

Matris malzeme olarak tercih edilen Al6013 alaşımı, Al-Mg-Si-Cu esaslı, 6xxx serisine ait yüksek dayanımlı ve yaşlandırma ile sertleşebilen bir alüminyum alaşımdır. Yüksek özgül dayanıma, iyi yorulma direncine, yüksek korozyon direncine ve kolay işlenebilirliğe sahip bir malzemedir. Bu üstün özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sanayinde (uçak gövde panelleri, kanat yapısal elemanları), savunma sanayinde (hafif zırh ve yapısal bileşenler, yüksek mukavemetli taşıyıcı parçalar), otomotiv sanayinde (şasi elemanları, yapısal profiller) kullanılmaktadır [4]. Takviye elemanı olarak kullanılan SiC, kovalent bağ yapısına sahip, çok yüksek sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık gösteren ileri bir seramik malzemedir. Hem yapısal seramik hem de yarı iletken olarak kullanılmaktadır. SiC, oksidasyon ve korozyona karşı dirence, düşük termal genleşmeye, mükemmel termal şok direncine, yüksek elektriksel dayanıma, yüksek basma dayanımına ve yüksek aşınma ve erozyon direncine sahiptir [5].

Günümüzde SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelenmesine yönelik literatürde birtakım çalışmaların olduğu görülmüştür. Ayvaz çalışmasında sürtünmeli karıştırma yöntemiyle üretilen SiC ve Al₂O₃

katkılı Al6082 matrisli kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Al6082 alaşımına kıyasla SiC/n-Al₂O₃ takviyeli hibrit kompozitlerinin sertliğinin %44,2 ve aşınma direncinin %68,5 oranında daha iyi olduğu tespit edilmiştir [6]. Mohammad ve ark. çalışmalarında, toz metalurjisi yöntemiyle farklı oranlarda katkılanmış (%2 ve %4 Al₂O₃, SiO₂, SiC ve TiO₂) ve (%2 ve %4 Al₂O₃, TiO₂ ve SiC, SiO₂) Al6061 matrisli hibrit kompozitleri üretilip mekanik özelliklerini ve aşınma davranışını incelemiştir. En yüksek sertlik (95 HV) ve aşınma oranı (13×10^{-6} mm³/(Nm)) Al6061-%2SiC-%2SiO₂ kompozitte elde edilmiştir [7]. Bhat ve ark. çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al6061-%5SiC kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. SiC katkısıyla ve uygulanan yükteki artışla kompozitin daha az aşındığını tespit etmiştir [8]. Sujan vd. çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen SiC ve Al₂O₃ (ağırlıkça %5, 10 ve 15) takviyeli A356 döküm alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. SiC takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme dayanımı (310,5 MPa) ve sertlik (90 HB) %15SiC takviye oranında elde edilmiştir. Al₂O₃ takviyeli kompozitlerde ise en yüksek çekme dayanımı (282,9 MPa) ve sertlik (82 HB) %15Al₂O₃ takviye oranında elde edilmiştir [9]. Pavani ve Venkaiah yaptıkları çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında SiC parçacıklarını Al6063-%1Mg alüminyum alaşımına takviye ederek kompozit malzemeler üretmişlerdir. En yüksek Brinell ve Rockwell sertlik değerlerine (97,5 HB-27,5 HRC) %15 SiC takviye oranında ulaşılmıştır. Yapılan darbe testlerinde ise en yüksek darbe dayanımı (18 Nm) %15 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir [10]. Atla ve Kaujala yaptıkları çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle Al7075 matrisli ağırlıkça %5 ve 10 oranında grafit ve ağırlıkça %5 oranında SiC takviyeli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en yüksek yoğunluk (2,93 g/cm³) ve sertlik değeri (77 HV) ağırlıkça %5 SiC takviye oranında elde edilmiştir. 5 N yük, 1000 m kayma mesafesi ve 1,5 m/s hızda yapılan aşınma testleri sonucunda en düşük kütle kaybı (0,00918 g) ve sürtünme katsayısı (0,1053) %5SiC-%5grafit takviye oranında elde edilmiştir [11]. Şenel vd. yapmış oldukları çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça %0-30 oranında SiC ve ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında grafit takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitler üretmişlerdir. Test sonuçlarına göre; en yüksek sertlik değeri (85 HV) %30SiC-%0,5grafen takviye oranında elde edilmiştir. SiC partiküllerinin yüksek sertliğinin sertlik değerindeki artışı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca %30SiC-%0,1grafen takviye oranında en yüksek basma dayanımı (271 MPa) elde edilmiştir [12]. Yılmaz tarafından yapılan çalışmada, atık alüminyum içecek kutularından elde ettiği matris malzemesine karıştırmalı döküm yöntemi kullanarak ağırlıkça %0,05, 0,15, 0,30, 0,45, 0,60 ve 0,75 oranlarında grafit ve ağırlıkça %1 ve 9 oranlarında SiC takviyesi yaparak hibrit kompozit malzemeler üretmiştir. Kompozitlere uygulanan testler sonucunda en yüksek sertlik (75,66 HV) %9SiC-%0,3grafen takviye oranında, en yüksek çekme dayanımı (178,56 MPa) %1SiC-%0,45grafen takviye oranında elde edilmiştir. Aşınma testinde ise en düşük aşınma oranı ($2,29 \times 10^{-5}$ mm³/Nm) %9SiC-%0,75grafen takviye oranında elde edilmiştir [13].

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada ilk kez hurda Al6013 alaşımına belirli oranlarda (ağırlıkça %5, 10, 15) SiC katkısı yapılarak karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al6013-SiC kompozitler üretilip tribolojik özellikleri ve mikro-yapısı incelenmiştir. Bu çalışmayla alüminyum hurdanın geri kazanımı sağlanarak hurda malzeme katma değerli bir kompozit haline getirilmiştir.

Bu çalışmada, azot gazı altında karıştırılmalı döküm yöntemiyle hurda Al6013 alaşımına belirli oranlarda SiC tozu katılarak Al6013 alaşımının aşınma direncinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Al6013-SiC kompozitler üretilerek en iyi aşınma direnci ve mekanik özelliklere sahip optimum SiC katkı oranı belirlenmiştir. Üretilen Al6013-SiC kompozitlerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, aşınma oranı, kütle kaybı ve mikro yapısı incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmada, azot gazı altında karıştırılmalı döküm yöntemiyle SiC tozları ve hurda Al6013 alaşımı kullanılarak alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan Al6013 alaşımı hurda olarak Aksu Makine Sanayi Ticaret Ltd. Şti (Samsun, Türkiye) firmasından satın alınmıştır. Al6013 alaşımının teorik yoğunluğunun $2,72 \text{ g/cm}^3$, termal iletkenliğinin $150 \text{ W/(m}^\circ\text{K)}$, akma dayanımının 350 MPa , çekme dayanımının 400 MPa ve elastisite modülünün 71 GPa olduğu görülebilmektedir. Al6013 alaşımı içeriğinde; ağırlıkça %96 Al, %0,8 Si, %0,8 Cu, %1 Mg, %0,4 Fe, %0,5 Mn, %0,1 Cr, %0,25 Zn ve %0,1 Ti içermektedir [14]. Bu çalışmada, takviye malzemesi olarak kullanılan SiC tozu %99 saflığa, $66 \mu\text{m}$ tanecik boyutuna sahip olup Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. (Ankara, Türkiye) şirketinden satın alınmıştır. Silisyum karbürün teorik yoğunluğu $3,21 \text{ g/cm}^3$, elastisite modülü 410 GPa ve termal iletkenliği $126 \text{ W/(m}^\circ\text{K)}$ 'dir [15].

2.2. Yöntem

Bu çalışmada, karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al6013 matris içerisine ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında SiC takviyesi yapılarak alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin üretim ve analiz süreci; tartım, ergitme, karıştırma, döküm, numunelerin kesimi, zımparalama-parlatma, mekanik testler, aşınma testleri ve mikroyapı analizlerinden oluşmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde ilk aşamada hurda Al6013 alaşımı ile ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında SiC tozunun tartılmıştır. SiC tozları, takviye oranlarına göre tartıldıktan sonra homojen bir yapı elde etmek ve topaklanmaların önüne geçmek amacıyla 400 d/dk 'da 60 dk süre-since tozların karıştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında tozları nemden arındırmak ve ıslatma kabiliyetini artırmak amacıyla Protherm PTF 12/20/250

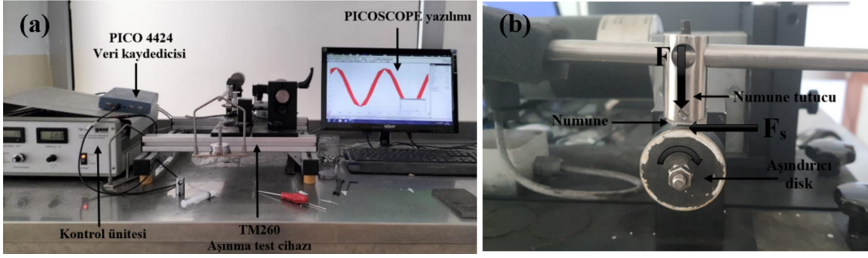
marka tüp fırında 350°C sıcaklıkta ve 90 dakika süresince tozların ön ısıtılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Tozlara uygulanan ön ısıtma işleminin ardından ergitme işlemi, Protherm marka fırında gerçekleştirilmiştir. Al6013 alaşımı yarı eriyik hale geldiğinde ön ısıtma uygulanan tozlar 4 g/dk hızla ilave edilerek karıştırılmaya başlanmıştır. Ergitme işlemi, 800°C'de grafit pota içinde azot gazı altında yapılmıştır. Ergitme işleminin ardından grafit pota, maşa yardımıyla fırın içerisinden alınmış ve içerisindeki eriyik 350°C'de ön ısıtmaya tabi tutulmuş çelik kalıba dökülerek eriyiğin katılaşması için beklenmiştir. Eriyik katılaştıktan sonra üretimi sona ermiş olan kompozit malzeme, çelik kalıp içerisinden çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Hazırlanan külçelerden test ve analiz işlemlerinde kullanılmak üzere uygun boyutlarda numuneler kesilmiştir. Bu işlem için Metkon Metacut 302 marka metalografik numune kesme cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada, yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü, aşınma testleri ve analizler için 20×10×5 mm boyutlarında numuneler kesilmiştir. Numune yüzeyindeki oksitlenmiş tabakayı uzaklaştırmak ve pürüzleri gidermek amacıyla 600'lük, 1200'lük ve 2000'lik SiC su zımparaları kullanılarak numunelere zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra kadife çuha üzerine bir alümina solüsyon sıkılarak numunenin yüzeyi belirli bir süre parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri 250 mm teker çapında 50-600 dev/dk dönüş hızına sahip Metkon Forcipol 2V marka metal zımparalama ve parlatma cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin SEM analizi, 10-1.000.000 aralığında büyütme oranına sahip Jeol marka JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Numunelerin XRD analizi, Rigaku marka SmartLab model X-ışını kırınım cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin deneysel yoğunluklarını belirlemek amacıyla Arşimet terazisi kullanılmıştır. Numunelerin deneysel yoğunluğu (ρ_D), Denklem (1)'den faydalanılarak belirlenmiştir. Burada, m_b su içindeki asılı kütlesi, m_c suya doymuş kütlesi, m_a kuru kütlesi ve ρ_{su} ise suyun yoğunluğudur [1].

$$\rho_D = [m_a / (m_c - m_b)] \times \rho_{su} \quad (1)$$

Numunelerin sertlik değerinin belirlenmesinde TMTeck marka HV-1000B model Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Numunelere 1,961 N (0,2 kgf) değerinde bir yük 15 s boyunca uygulanmıştır. Bu şekilde numune yüzeyinden alınan beş farklı sertlik ölçümünün ortalaması alınarak sertlik değeri belirlenmiştir.

Aşınma testleri, Gunt marka TM260 model aşınma deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Aşınma deney düzeneği; kontrol ünitesi, yükleme tertibatı, veri kaydedicisi, bilgisayar yazılımı, blok ve disk arasındaki aşınma deney setinden oluşmaktadır. Aşınma deney setinde; aşındırıcı disk olarak AISI 304 paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Testler; iki farklı yük (5 ve 10 N) altında 200 d/dk hızda, 40 dakika boyunca ve kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. (a) Aşınma deney düzeneği ve (b) blok-disk arasındaki aşınma deney seti

Numunelerin aşınma testi sonuçlarını karşılaştırmak için kütle kaybı, hacimsel aşınma, kayma mesafesi, aşınma oranı ve aşınma direnci parametreleri hesaplanmıştır. Kütle kaybı (Δm), Denklem (2)'de gösterildiği üzere malzemenin aşınmadan önceki kütlesinden (m_i) aşınmadan sonraki kütlesi (m_s) çıkarılarak elde edilmiştir.

$$\Delta m = m_i - m_s \quad (2)$$

Kütle kaybı hesaplandıktan sonra hacimsel aşınma (ΔV), Denklem (3)'de gösterildiği üzere kütle kaybının (Δm) numunelerin deneysel yoğunluğuna (ρ_D) bölünmesiyle elde edilmiştir [1].

$$\Delta V = \Delta m / \rho_D \quad (3)$$

Aşınma oranı hesabında kullanılacak olan kayma mesafesi (L), Denklem (4)'de gösterildiği üzere aşınma test süresi (t), aşındırıcı diskin yarıçapı (r) ve dönüş hızı (n) verileri kullanılarak hesaplanır. Bu çalışmada aşınma test süresi 40 dakika, aşındırıcı disk yarıçapı 20 mm ve dönüş hızı 200 d/dk'dır. Bu durumda kayma mesafesi yaklaşık 1000 m olarak hesaplanmıştır [1].

$$L = 2\pi r \times n \times t \quad (4)$$

Aşınma oranı (W), Denklem (5)'de gösterildiği üzere hacimsel aşınmanın (ΔV), uygulanan yük (F) ve kayma mesafesine (L) bölünmesiyle hesaplanmıştır. Üretilen kompozitlerin aşınma oranının düşük olması istenir [1].

$$W = \Delta V / (F \times L) \quad (5)$$

Aşınma oranının yanında dikkate alınması gereken bir diğer parametre ise aşınma direnci (W_R) olup Denklem (6) ile hesaplanmıştır. Bir malzemenin aşınma direnci ne kadar yüksek olursa aşınması da o kadar zor gerçekleşir [1].

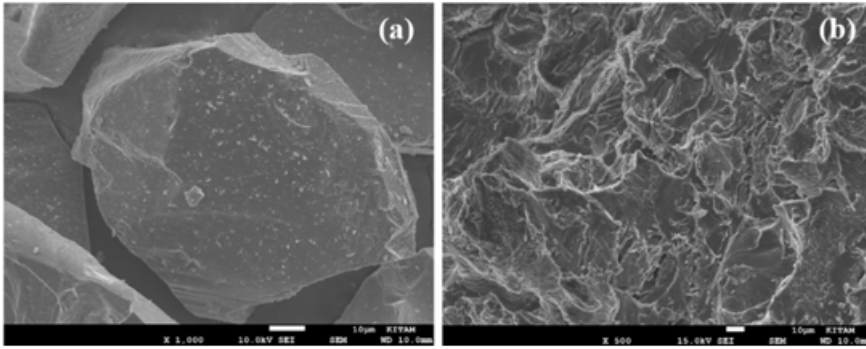
$$W_R = (1 / W) \quad (6)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan hurda Al6013 alaşımının ve SiC tozlarının mikro yapısı ve faz yapısı ile üretilen kompozit malzemelerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, kütle kaybı, aşınma oranı, aşınma izleri, mikro yapısı ve faz yapısı incelenmiştir.

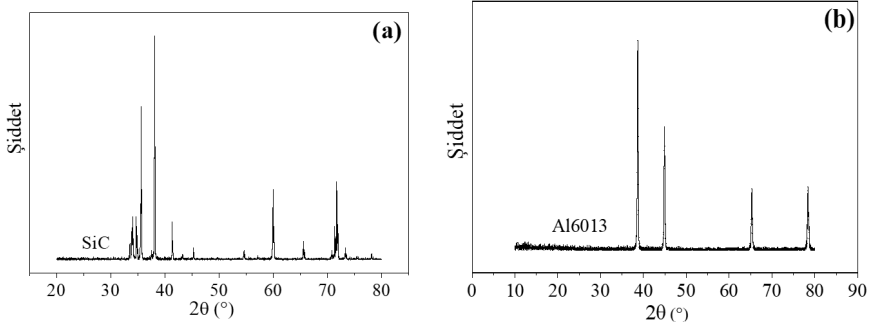
3.1. Hurda Al6013 Alaşımı ile SiC Tozlarının SEM ve XRD Analizleri

SiC tozlarının ve hurda Al6013 alaşımına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir. SiC tozlarına ait SEM görüntüsü incelendiğinde; partiküllerin keskin köşeli bir morfolojide olduğu ve ortalama partikül boyutunun 100 μm 'nin altında olduğu görülmüştür. Al6013 alaşımının SEM görüntüsü incelendiğinde ise mikro yapıda ortalama tane boyutunun 20 μm olduğu, mikroyapının çok taneli ve yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. (a) SiC tozlarına ve (b) hurda Al6013 alaşımına ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

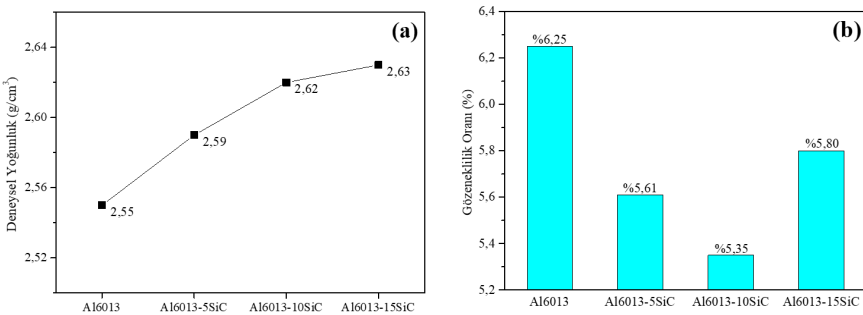
SiC tozlarının ve Al6013 alaşımının X-ışını kırınımı (XRD) faz analizi sonuçları Şekil 3'de sunulmuştur. SiC tozlarının (JCPDS kart no: 29-1129) kırınım açıları $2\theta = \sim 34^\circ, 35^\circ, 36^\circ, 38^\circ, 41^\circ, 60^\circ$ ve 72° iken; Al6013 alaşımının (JCPDS kart no: 89-4184) kırınım açıları $2\theta = \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ$ ve 78° olarak belirlenmiştir. Bu XRD analizleri sayesinde, kompozit yapı içerisindeki SiC partiküllerin varlığı doğrulanabilmektedir [16, 17].



Şekil 3. (a) SiC tozlarının ve (b) Al6013 alaşımının XRD örgü desenleri

3.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

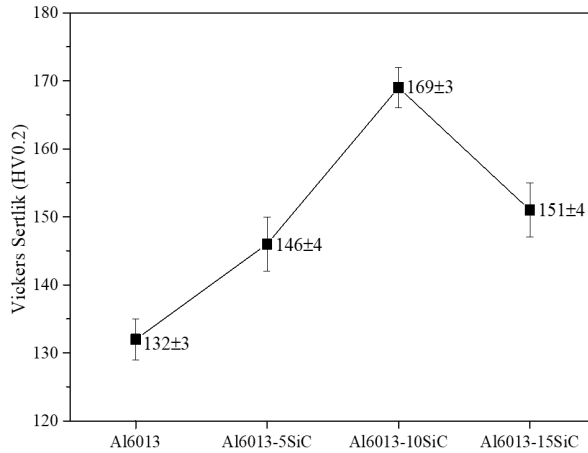
Al6013-SiC kompozitlerin SiC takviye oranına bağlı olarak yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerlerindeki değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Şekilden SiC katkı oranıyla yoğunluğun arttığı görülmüştür. Üretilen kompozitler arasında en yüksek yoğunluk ($2,63 \text{ g/cm}^3$) Al6013-%15SiC kompozitte elde edilmiştir. Bu durum, Al6013 alaşımının teorik yoğunluğuna ($2,72 \text{ g/cm}^3$) kıyasla daha yüksek teorik yoğunluğa sahip SiC partiküllerinin ($3,21 \text{ g/cm}^3$) yapıya eklenmesinden kaynaklanmaktadır. En yüksek gözeneklilik oranı (%6,25) Al6013 alaşımında, en düşük gözeneklilik oranı (%5,35) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilmiştir. Al6013-%15SiC kompozitte ise gözeneklilik oranının yükselişe geçerek %5,8 olduğu görülmüştür. Gözeneklilik oranındaki bu artış, elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle SiC partiküllerinin homojen dağılmayarak topaklanmasından ve gözenek oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Kompozit yapıda gözenekliliğin artması, etkin yük taşıyan kesit alanının azalmasına, plastik deformasyonun lokal olarak yoğunlaşmasına ve sertlik değerinde de muhtemel düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 4. Al6013-SiC kompozitlere ait (a) deneysel yoğunluk ve (b) gözeneklilik oranı

3.3. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SiC takviye oranına bağlı olarak Al6013-SiC kompozitlerin Vickers sertlikleri Şekil 5’de verilmiştir. Şekilden; en yüksek sertlik değeri (169 ± 3 HV) Al6013-%10SiC kompozitte ve en düşük sertlik değeri (132 ± 3 HV) Al6013 alaşımında elde edilmiştir. Al6013 alaşımına kıyasla Al6013-%10SiC kompozitin Vickers sertlik değerinin %28 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu artış, matris ile takviye elemanın termal genleşmelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu farklılık, arayüzeyde artık termal gerilmelerin oluşmasına yol açarak mikroyapıdaki dislokasyonların yoğunluğunu artırmaktadır. Dislokasyon yoğunluğundaki artış da sertliğin ve dayanımın artmasına neden olmaktadır. Takviye edilen SiC partiküllerinin Al6013 alaşımının sertliğini artırmasına karşın; ağırlıkça %15 SiC katkısında SiC partiküllerinin homojen dağılmaması nedeniyle kompozitin sertliğinin azaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle de bir sonraki bölümde Al6013-%15SiC kompozite ait SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

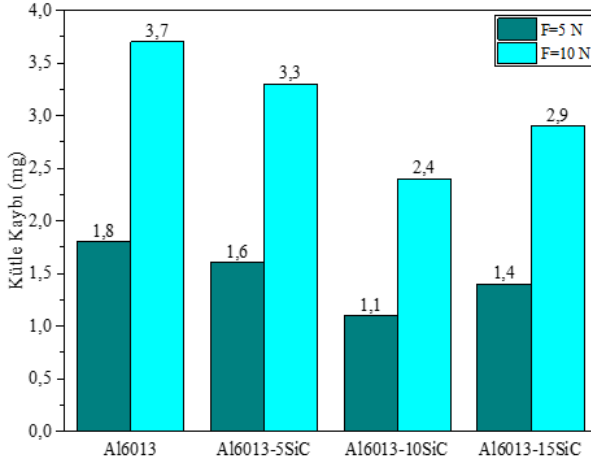


Şekil 5. Al6013-SiC kompozitlere ait Vickers sertlik değerleri

3.4. Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

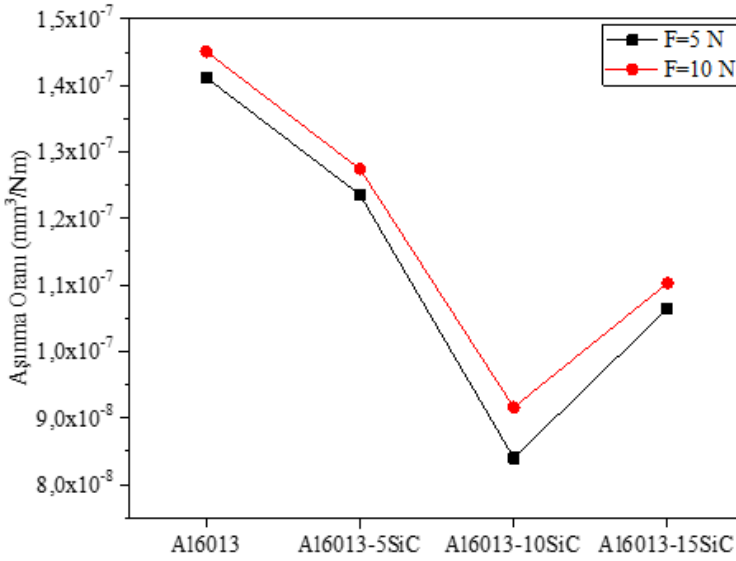
Al6013-SiC kompozitlerin farklı yükler (5 N ve 10 N) altında SiC takviye oranına bağlı olarak kütle kaybı değerlerindeki değişimi Şekil 6’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere her iki yük altında da en düşük kütle kayıpları (1,1-2,4 mg) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilirken; en yüksek kütle kayıpları (1,8-3,7 mg) Al6013 alaşımında elde edilmiştir. Takviye elemanı olarak mikro yapıya ilave edilen yüksek aşınma direncine sahip SiC partiküllerinin Al6013 alaşımının aşınma direncini artırdığı sonucuna varılmıştır. Silisyum karbür partiküllerin termal genleşme katsayısının alüminyumdan oldukça düşük olması, sürtünme kaynaklı sı-

caklık artışı durumunda matrisin yumuşamasını geciktirerek kompozit yapıdaki kütle kaybını ve aşınmayı azaltmaktadır. Ancak ağırlıkça %15 SiC takviye oranında Al ve SiC partiküllerinin termal genleşme katsayılarının çok farklı olması, gözenek oluşumuna ve sertlikte düşüşe sebep olmuştur. Bu sebeple de Al6013-%15SiC kompozitin kütle kaybı artmıştır. Ayrıca tüm kompozitlerde uygulanan yükün artmasıyla kütle kaybının da arttığı görülmüştür.



Şekil 6. Farklı yükler altında Al6013 alaşımı ve Al6013-SiC kompozitlere ait kütle kaybı değerleri

Al6013-SiC kompozitlerin farklı yükler (5 N ve 10 N) altında SiC takviye oranına bağlı olarak aşınma oranı değerlerindeki değişim Şekil 7’de verilmiştir. Her iki yük altında da en düşük aşınma oranları ($0,840 \times 10^{-7}$ - $0,916 \times 10^{-7}$ mm³/Nm) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilirken; en yüksek aşınma oranları ($1,41 \times 10^{-7}$ - $1,45 \times 10^{-7}$ mm³/Nm) Al6013 alaşımında elde edilmiştir. Takviye elemanı olarak mikro yapıya ilave edilen yüksek aşınma direncine sahip SiC partiküllerinin Al6013 alaşımının aşınma direncini artırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca homojene yakın bir dağılım sergileyen SiC partikülleri dislokasyonların hareketini zorlaştırarak yerel plastik deformasyonu sınırlamaktadır. Bu durum da kompozitin aşınma oranının azalmasına neden olmaktadır. Ancak ağırlıkça %15 SiC takviye oranında sertliğin düşmesiyle Al6013-%15SiC kompozitin aşınma oranında artış meydana gelmiştir. Ayrıca uygulanan yükün artmasıyla numunelerin aşınma oranının da arttığı görülmüştür. Al6013-%15SiC kompozit yapıda gözenekliliğin arttığı ve bu durumun sertlikte artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca gözenek oluşumuyla, yük transferinin zayıflaması ve gözenek kaynaklı gerilim yoğunlaşma bölgelerindeki malzeme kaybının artması sonucunda aşınma direnci zayıflamıştır.



Şekil 7. Farklı yükler altında Al6013 alaşımı ve Al6013-SiC kompozitlere ait aşınma oranı değerleri

Numunelerin hacimsel aşınma miktarının (ΔV); sürtünme katsayısı (μ), uygulanan yük (F) ve kayma mesafesiyle (L) doğru orantılı, sertlikle (H) ise ters orantılı olduğu Denklem (7)'de verilen Archard eşitliğiyle ifade edilmektedir [18].

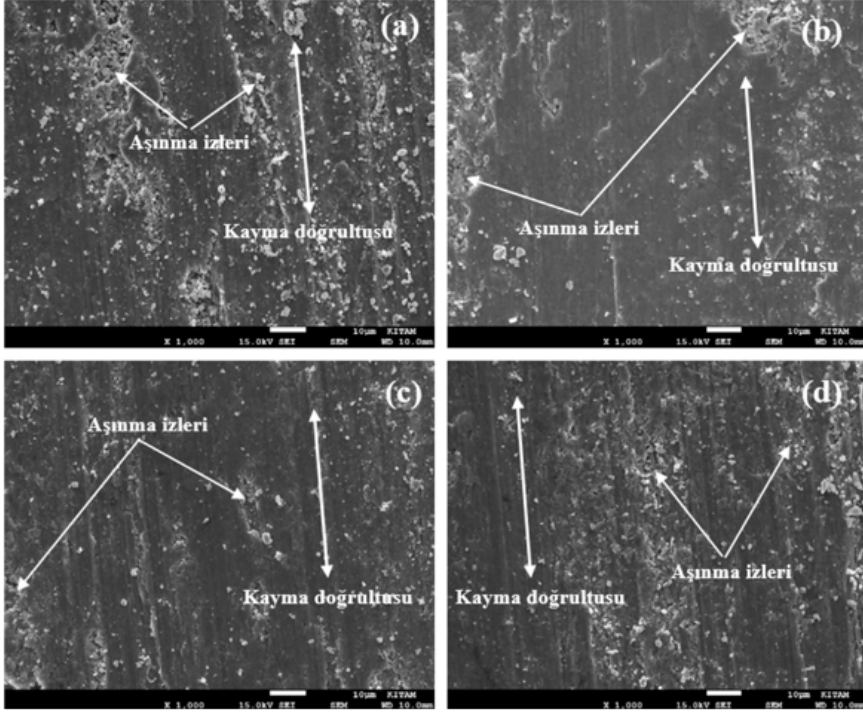
$$\Delta V = \mu \times F \times L / H \quad (7)$$

Yapılan çalışmada numuneler arasında en yüksek Vickers sertliği (169 ± 3 HV) ve en düşük aşınma oranı ($0,840 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Archard eşitliğini doğrular niteliktedir.

3.5. Aşınma İzlerinin Taramalı Elektron Mikroskobuyla İncelenmesi

Al6013 alaşımı, Al6013-%5SiC, Al6013-%10SiC ve Al6013-%15SiC kompozitlerin 5 N yük altındaki aşınma izleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Aşınma izleri incelendiğinde numunelerde abrasif aşınma meydana geldiği gözlemlenmiş ve bu aşınma izlerinin aşınma test sonuçlarını doğrular nitelikte olduğu görülmüştür. Yapılan incelemelerde en fazla aşınmanın Al6013 alaşımında, en az aşınmanın ise Al6013-%10SiC kompozitinde olduğu gözlemlenmiştir. SiC'ün sert yapısı aşınmayı zorlaştırarak kompozitin aşınma direncini artırmıştır. Ancak %15 SiC takviye oranında kompozitteki aşınmanın arttığı görülmüştür. Bu durumun SiC partiküllerinin homojen dağılmayıp belirli noktalarda toplanmasıyla sertlikte

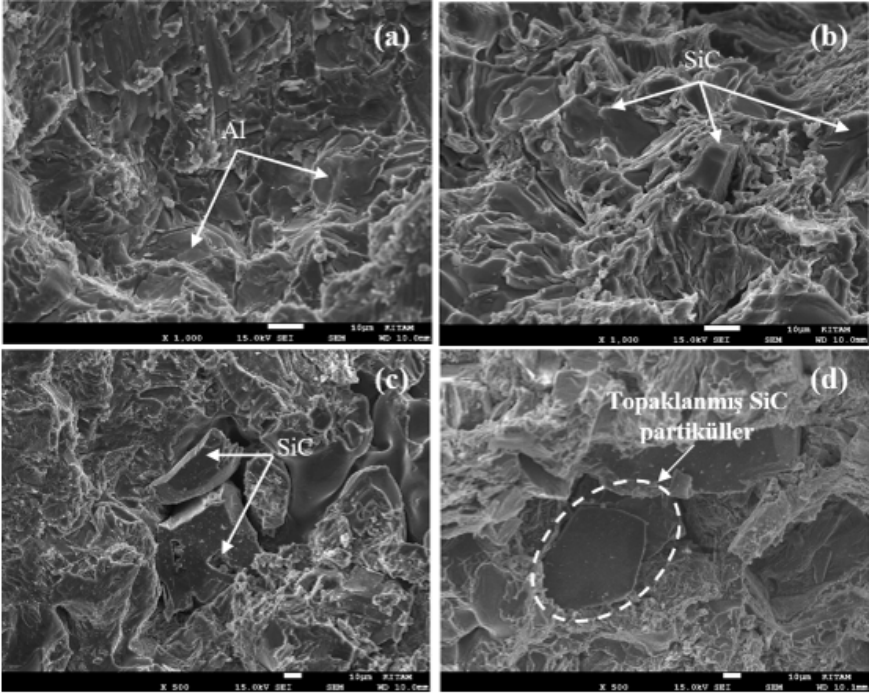
yaşanan düşüşten kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca sertlikteki düşüş, yetersiz ısıtma ve zayıf arayüzey bağları nedeniyle de gerçekleşebilmektedir. Bu durum, sünek matristen sert takviye fazına etkili yük aktarımını sınırlamaktadır.



Şekil 8. (a) Al6013 alaşımı, (b) Al6013-%5SiC, (c) Al6013-%10SiC ve (d) Al6013-%15SiC kompozitlere ait aşınma izleri

3.6. Kırık Yüzey SEM ve SEM- EDX Görüntülerinin Analizi

Şekil 9 Al6013 alaşımı, Al6013-%5SiC, Al6013-%10SiC ve Al6013-%15SiC kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden; Al6013-%10SiC kompozit yapıda SiC partiküllerinin Al6013 alaşımı içinde homojene yakın dağıldığı, Al6013-%15SiC kompozit yapıda ise SiC partikül yoğunluğunun artarak gözeneklerin oluşmasına sebep olmuştur. Bu durum, SiC partikülleri arasındaki çekim kuvvetlerinin ve elektrostatik etkileşimlerin artarak toplanmaya neden olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 9. (a) Al6013 alaşımı, (b) Al6013-%5SiC, (c) Al6013-%10SiC ve (d) Al6013-%15SiC kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, azot gazı altında karıştırmalı döküm yöntemiyle matris malzemesi olarak kullanılan hurda Al6013 alaşımına ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında SiC takviyesi yapılarak Al6013-SiC kompozitleri üretilmiştir. Üretilen bu kompozitlerin deneysel yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği, kütle kaybı, aşınma oranı ve mikro yapıları incelenerek elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- SiC takviyeli Al6013 matrisli kompozitler arasında en yüksek deneysel yoğunluk ($2,63 \text{ g/cm}^3$) Al6013-%15SiC kompozitinde elde edilirken; en düşük gözeneklilik oranı (%5,35) ve en yüksek Vickers sertliği ($169 \pm 3 \text{ HV}$) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilmiştir. Al6013-%10SiC kompoziti Al6013 alaşımıyla kıyaslandığında gözeneklilik oranının %14,4 azaldığı ve Vickers sertlik değerinin %28 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ancak ağırlıkça %15 SiC takviye oranında SiC partiküllerinin topaklanması sebebiyle gözeneklilik oranının arttığı ve Vickers sertliğinin azaldığı görülmüştür.

- Aşınma test sonuçları incelendiğinde, 5 N ve 10 N yük altında en düşük kütle kayıpları (1,1-2,4 mg) ve aşınma oranları ($0,84 \times 10^{-7}$ - $0,916 \times 10^{-7}$ mm³/(Nm)) Al6013-%10SiC kompozitte elde edilmiştir. Al6013-%10SiC kompoziti Al6013 alaşımıyla kıyaslandığında 5 N yük altında kütle kaybının %38,9 ve aşınma oranının %40,5 azaldığı, 10 N yük altında ise kütle kaybının %35,1 ve aşınma oranının %36,9 azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca numuneye uygulanan yükün artmasıyla kütle kayıpları ve aşınma oranlarının da arttığı belirlenmiştir.
- XRD faz analizlerinde, tüm fazların alüminyum ve SiC partiküllerine ait olduğu belirlenmiştir. Mikroyapıda Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil fazlara rastlanmamıştır. SEM analizlerinde, SiC partiküllerinin Al6013-%10SiC kompozit yapıda homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Ancak Al6013-%15SiC kompozit yapıda SiC partiküllerinin topraklandığı tespit edilmiştir.
- Yapılan ölçüm ve analizler sonucunda Al6013-SiC kompozitlerde en uygun SiC takviye oranı ağırlıkça %10 olarak belirlenmiştir.

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): MCŞ(%50), AM(%50)

Veri Toplanması (Data Acquisition): MCŞ(%50), AM(%50)

Veri Analizi (Data Analysis): MCŞ(%50), AM(%50)

Makalenin Yazımı (Writing Up): MCŞ(%50), AM(%50)

Makale Gönderimi ve Revizyonu (Submission and Revision): MCŞ(%50), AM(%50)

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

- [1] M.C. Şenel. Grafen-Seramik Tanecik Takviyeli Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretimi, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 2018.
- [2] Ü. Mahmutoglu. *İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen/Si₃N₄ Takviyeli Al2024 Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun 2021.
- [3] 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, 2022.
- [4] M.C. Şenel, A. Mercan, "Karıştırılmalı döküm yöntemiyle SiC takviyeli Al6013 esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 12, ss. 640-652, 2025
- [5] M.C. Şenel, M. Gürbüz, E. Koç, "Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites," Composites Part B-Engineering, c. 154, ss. 1-9, 2018.
- [6] S.İ. Ayvaz, "Investigation of microstructural and tribological properties of AA6082-SiC/n-Al₂O₃ hybrid surface composites produced by the friction stir process," Nanoscale and Nanostructured Materials and Coatings, c. 61, pp. 612-622, 2025.
- [7] H.B. Mohammed, I.M. Naemah, A.J.S. Jomah, "Mechanical properties and wear behaviour of Al 6061 matrix composites with hybrid reinforcements through powder metallurgy technique," Diyala Journal of Engineering Sciences, c. 16, pp. 191-202, 2025.
- [8] A. Bhat, G. Kakandikar, "Manufacture of silicon carbide reinforced aluminium 6061 metal matrix composites for enhanced sliding wear properties," Manufacturing Review, c. 24, 1-6, 2019.
- [9] D. Sujana, Z. Oo, M. Rahman, M. Maleque, C. K. Tan, "Physio-mechanical properties of aluminium metal matrix composites reinforced with Al₂O₃ and SiC," International Journal of Engineering and Applied Sciences, c. 6, pp. 288-291, 2012.
- [10] M.A. Pavani, M. Venkaiah, "Mechanical properties of stir casted Al6063-SiC metal matrix composite," Proceedings of International Conference on Recent Trends in Mechanical Engineering-2k15 (Necirtme-2k15), 2015.
- [11] S. Atla, P.L. Kaulaja, "Investigation of graphite effect on the mechanical and tribological properties of Al 7075-SiC-graphite hybrid metal matrix composites," Tribologia-Finnish Journal of Tribology, c. 37, s. 1, ss. 26-32, 2020.
- [12] M.C. Şenel, M. Gürbüz, E. Koç, "Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites," Composites Part B: Engineering, c. 154, ss.1-9, 2018.
- [13] Ö. Yılmaz. Atık Alüminyum İçecek Kutuları Kullanarak Grafen/SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 2019.
- [14] S. Aytekin. Al₂O₃ Nano Partikül Takviyeli Al Matrisli Kompozit Malzemenin Farklı Kaynak Akımları ve Türlerinde Oluşan Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerinin Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2021.
- [15] A.W. Weimer. Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis And Processing, Springer Science and Business Media, 2012.
- [16] T. Li, L. Xu L. Wang, L. Yang, Y. Qian, "Synthesis and characterization of 3C and 2H-SiC nanocrystals starting from SiO₂, C₂H₅OH and metallic Mg," Journal of Alloys and Compounds, c. 484, ss. 341-346, 2009.
- [17] A. Taşkın, E. Işık, M.C. Şenel, "Si₃N₄ katkılı Al7075 matrisli kompozitlerin mikroyapısının ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi," Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 14, ss. 482-489, 2025.
- [18] M.C. Şenel, M. Üstün, "Dry Sliding wear and friction behavior of graphene/ZrO₂ binary nanoparticles reinforced aluminum hybrid composites," Arabian Journal for Science and Engineering , c. 47, s. 7, ss. 9253-9269, 2022.