

Atf İçin: Şenel, M.C. ve Şenbaş, T. (2024). Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Aşınma ve Sürtünme Davranışının Araştırılması. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(3), 1240-1252.

To Cite: Şenel, M.C. & Şenbaş, T. (2024). Investigation of Wear and Friction Behavior of Carbon Nanotube Reinforced Al6061 Matrix Composites. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(3), 1240-1252.

Karbon Nanotüp Takviyeli Al6061 Matrisli Kompozitlerin Aşınma ve Sürtünme Davranışının Araştırılması

Mahmut Can ŞENEL^{1*}, Tülin ŞENBAŞ¹

Öne Çıkanlar:

- Belli bir orana kadar (ağırlıkça %0,1) karbon nanotüp katkısı Al6061 matrisli kompozitin aşınma direncini artırmıştır
- Karbon nanotüpün katı yağlayıcılık özelliği sayesinde kompozit yapıda sürtünme düşmüştür

Anahtar Kelimeler:

- Karbon nanotüp
- Al6061 alaşımı
- Aşınma
- Sürtünme
- Kompozit

ÖZET:

Yürütülen çalışma kapsamında, toz metalürjisi ve sıcak preslemeyle üretilen karbon nanotüp katkılı (ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5) Al6061 esaslı kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışı araştırılmıştır. Üretim süreci; tozların karıştırılması, filtreleme, kurutma, presleme, sinterleme ve sıcak presleme işlem adımlarından oluşmaktadır. Üretilen numunelerin aşınma ve sürtünme özellikleri pin-on disk aşınma test düzeneği yardımıyla incelenmiştir. Numunelerin aşınmış ve kırık yüzeyleri, taramalı elektron mikroskopuyla analiz edilmiştir. Yürütülen testler neticesinde en yüksek sertlik değeri (118 HV), minimum aşınma oranı ($5.1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve minimum kütle kaybı (0.0033 g) Al6061-%0.1 karbon nanotüp kompozit yapıda elde edilmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla Al6061-%0.1 karbon nanotüp kompozitin sertliğinin %10.2 ve aşınma oranının %17.6 oranında iyileştiği tespit edilmiştir. Karbon nanotüp katkısının ağırlıkça %0.1 oranına kadar Al6061 matrisli kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.1'in üzerindeki katkı oranlarında ise karbon nanotüpün kümelenmesi sebebiyle kompozitin sertliği ve aşınma oranı düşmüştür.

Investigation of Wear and Friction Behavior of Carbon Nanotube Reinforced Al6061 Matrix Composites

Highlights:

- Carbon nanotube contribution up to a certain amount (0.1wt.%) increased the wear resistance of Al6061 matrix composite
- Friction decreased in the composite structure thanks to the solid lubricating property of carbon nanotube

Keywords:

- Carbon nanotube
- Al6061 alloy
- Wear
- Friction
- Composite

ABSTRACT:

In the present study, wear and friction behavior of Al6061-based composites reinforced with carbon nanotube (0.1, 0.3, 0.5wt.%) fabricated via the powder metallurgy and hot-pressing were investigated. Production process consists of the process steps of mixing powders, filtering, drying, pressing, sintering and hot pressing. The wear and friction behavior of the produced samples were examined with the help of a pin-on-disc wear test device. The worn and fracture surfaces of the samples were researched by scanning electron microscopy. As a result of the tests conducted, the highest hardness value (118 HV), minimum wear rate ($5.1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$), and minimum mass loss (0.0033 g) were obtained in the Al6061-0.1% carbon nanotube composite structure. It was determined that the hardness and wear rate of the Al6061-0.1% carbon nanotube improved by 10.2% and 17.6% compared to the Al6061 alloy. It has been determined that carbon nanotube reinforcement up to 0.1wt.% amount improves the tribological properties of Al6061 matrix composite. Hardness and wear rate of the composite were decreased due to the clustering of carbon nanotube after 0.1wt.% reinforcement ratio.

¹Mahmut Can ŞENEL ([Orcid ID: 0000-0001-7897-1366](https://orcid.org/0000-0001-7897-1366)), Tülin ŞENBAŞ ([Orcid ID: 0009-0006-7676-2660](https://orcid.org/0009-0006-7676-2660)), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mahmut Can ŞENEL, e-mail: mahmutcan.senel@omu.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler dikkate alındığında ileri teknolojik malzemelerin geliştirilmesi üzerine yapılan Ar-Ge faaliyetleri her geçen gün artmaktadır. Özellikle metal, seramik veya polimer esaslı malzemelerden istenen performanslar günümüz şartlarında yeterli olmamaktadır. Bu sebeple de kompozit malzemeler üzerine yoğun araştırma çalışmaları yürütülmektedir (Chawla, 2006).

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla materyalin üstün olan özelliklerini tek bir malzeme içerisinde birleştirmek amacıyla üretilen yeni bir malzeme türüdür. Bu tür malzemeler matris malzeme ve takviye elemanlarından oluşmaktadır. Matris malzeme, takviye elemanlarının dağılımını kontrol ederek onları bir arada tutmaktadır. Ayrıca kompozit malzemenin boyutunu ve şeklini de matris malzeme korumaktadır. Takviye elemanı ise kompozit malzemelerin dağılmış fazını oluşturmada olup kompozit malzemeye gelen yükün önemli bir kısmını taşımaktadır. Bu sayede malzemenin sertliğinin, dayanımının ve ısıl direncinin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Kompozitler takviye elemanının şekline göre tabakalı, parçacık takviyeli ve elyaf takviyeli; ana malzemeye göre ise seramik, metal ve polimer matrisli kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir (Şahin, 2006; Erdoğan, 2005).

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, en az biri metal olan iki veya daha fazla malzemenin sistematik birleşimiyle üretilen malzemelerdir. Bu tür kompozitlerde matris malzeme olarak titanyum, magnezyum, bakır, alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise; seramik (B_4C , SiC , Si_3N_4 , vb.) veya karbon esaslı bir malzeme (karbon nanotüp (KNT), grafen nanotabaka (GNT), fulleren, vb.) tercih edilmektedir. MMK malzemelerin geleneksel malzemelere kıyasla; daha üstün dayanıma, aşınma direncine, korozyon direncine ve ısıl iletkenliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bu sebeple de MMK'leuçak gövdelerinde, fren disklerinde, süspansiyon parçalarında, rüzgâr türbinlerinde, güneş panellerinde, golf sopalarında ve tenis raketlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Erdoğan, 2005; Macke et al., 2012).

Matris malzeme olarak kullanılan Al6061 alaşımı, içerisinde Al, Mg, Si, Zn, Cu, Cr gibi elementleri içeren saf alüminyuma kıyasla daha iyi mukavemet-ağırlık oranına, korozyon ve oksidasyon direncine sahip en çok tercih edilen alüminyum alaşımlarından biridir. Bu sebeple uçak ve helikopterlerin gövde ve kanat parçalarında, gemilerin gövde ve güverte parçalarında, köprülerin ve binaların yapısal parçalarında, bisiklet, motosiklet ve diğer spor malzemelerinde kullanılmaktadır (Pul, 2010; Şahin, 2014; Koli et al., 2012). Takviye malzeme olarak kullanılan KNT, karbon atomlarının altıgen formda düzenlenmesiyle oluşan silindirik yapıya sahip bir malzemedir. Bu sıradışı yapı da KNT'ye yüksek mukavemet ve esneklik kazandırmaktadır. Sahip olduğu bu üstün özellikler KNT'nin; yapısal malzemelerde, elektronik endüstrisinde, yakıt hücrelerinde ve sensör teknolojisinde kullanımını sağlamaktadır (Topçu, 2018).

Kompozit malzemeler; karıştırmalı döküm, sıvı metal infiltrasyonu veya toz metalürjisi gibi yöntemlerle üretilebilmektedir. Toz metalürjisi (TM) yöntemi, diğer üretim yöntemlerine kıyasla; yüksek malzeme kullanım oranı, yüksek üretim hızı, karmaşık şekilli parçaların imalatı ve yüksek mukavemetli parça üretimi gibi avantajlara sahiptir. Bu avantajları sayesinde TM yöntemi, otomotiv, havacılık, savunma, enerji ve inşaat gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Demir, 2022). TM üretim yöntemi; karıştırma, presleme, sinterleme ve ikincil işlem (sıcak presleme, dövme, haddeleme, ekstrüzyon vb.) adımlarından oluşmaktadır. Tozların karıştırılması işlemi için yüksek enerjili bilyalı değirmen veya mekanik karıştırıcı gibi çeşitli karıştırma ekipmanları kullanılmaktadır. Bu sayede toz karışımları belli bir sürede ve karıştırma hızında karıştırılarak homojen karışım elde edilebilmektedir. Sonrasında ise sıcak izostatik presleme, soğuk izostatik presleme veya hidrolik presle

tozlar sıkıştırılarak ham numuneler üretilmektedir. Numunelere yoğunluk kazandırmak ve mikroyapıdaki gözenekliliği azaltmak için numuneler belli bir sıcaklıkta ve sürede vakum altında veya koruyucu gaz atmosferinde sinterlenmektedir. Sinterlenen numunelere ikincil işlem (sıcak presleme, ekstrüzyon, haddeleme, vb.) uygulanarak numunelerin dayanımı arttırılmaktadır (German, 2005; Şenel ve ark., 2017). Bu çalışma kapsamında ikincil işlem olarak indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır.

Literatürde yapılmış çalışmalar incelendiğinde; karbon nanotüp katkılı alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği birtakım çalışmaların yapıldığı görülmüştür (Sridhar&Narayanan, 2009; Mansoor&Shadid, 2016). Omid ve ark. yaptıkları çalışmada mekanik öğütme ve ekstrüzyon yöntemiyle üretilen Al6061 alaşımının ve Al6061-%1.25KNT mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. En yüksek sertlik değeri ve aşınma direnci Al6061-%1.25KNT kompozit yapıda tespit edilmiştir. Aşınma testlerinde düşük yükleme durumlarında abrasif aşınma mekanizmasının, yüksek yükleme durumlarında ise adhesif aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirtilmiştir (Omid et al., 2009). Preethi ve ark. yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %1-2 oranlarında KNT katkılı Al6061 matrisli kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üreterek numunelerin mikroyapılarını taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelemiştir. Analizler sonucunda; karbon nanotüplerin matrisle iyi dağıldığını gözlemlemiştir. KNT takviyesiyle kompozitin aşınma direncinin ve sertliğinin arttığını tespit etmişlerdir (Preethi et al., 2023). Mohammed ve Chen yaptıkları çalışmada, alüminyum esaslı karbon nanotüp katkılı kompozitlerin KNT ve Al arasında gözlenen arayüz mekanizmalarını analiz etmişlerdir. Sonuç olarak kompozitin dayanımını arttırmak için karbon nanotüpün etkili bir takviye malzemesi olduğunu ve mikro yapıda karbon nanotüpün homojen dağıtılmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir (Mohammed&Chen, 2019). Shivaramu ve ark., alüminyum-silisyum alaşımına ağırlıkça %0.25-1 oranında KNT takviyesi yaparak toz metalürjisi yöntemiyle kompozitler üretmişlerdir. Aşınma karakteristikleri incelendikten sonra kayma mesafesi 500 m'den 1000 m'ye arttırıldığında aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca maksimum aşınma direnci ağırlıkça %0.75KNT eklenmiş kompozit yapıda elde edilmiştir (Shivaramu et al., 2020).

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında; karbon nanotüp katkılı alüminyum esaslı kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmaların olduğu görülebilmektedir. Tüm bu çalışmalardan farklı olarak yürütülen mevcut çalışmada, üretim prosesi olarak indüksiyon altında sıcak presleme ve toz metalürjisi yöntemleri birlikte uygulanmıştır. Bu sayede, numune yüzeyinde oksidasyon oluşumuna fırsat vermeden hızlı bir üretim prosesiyle yüksek aşınma direncine sahip numuneler üretilebilmiştir.

Yürütülen çalışmada, toz metalürjisi ve indüksiyon altında sıcak presleme yöntemiyle ilk defa karbon nanotüp katkılı Al6061 matrisli kompozitlerin üretimi gerçekleştirilerek numunelerin sertliği, yoğunluğu, aşınma oranı, kütle kaybı, faz yapısı ve mikro yapısı incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

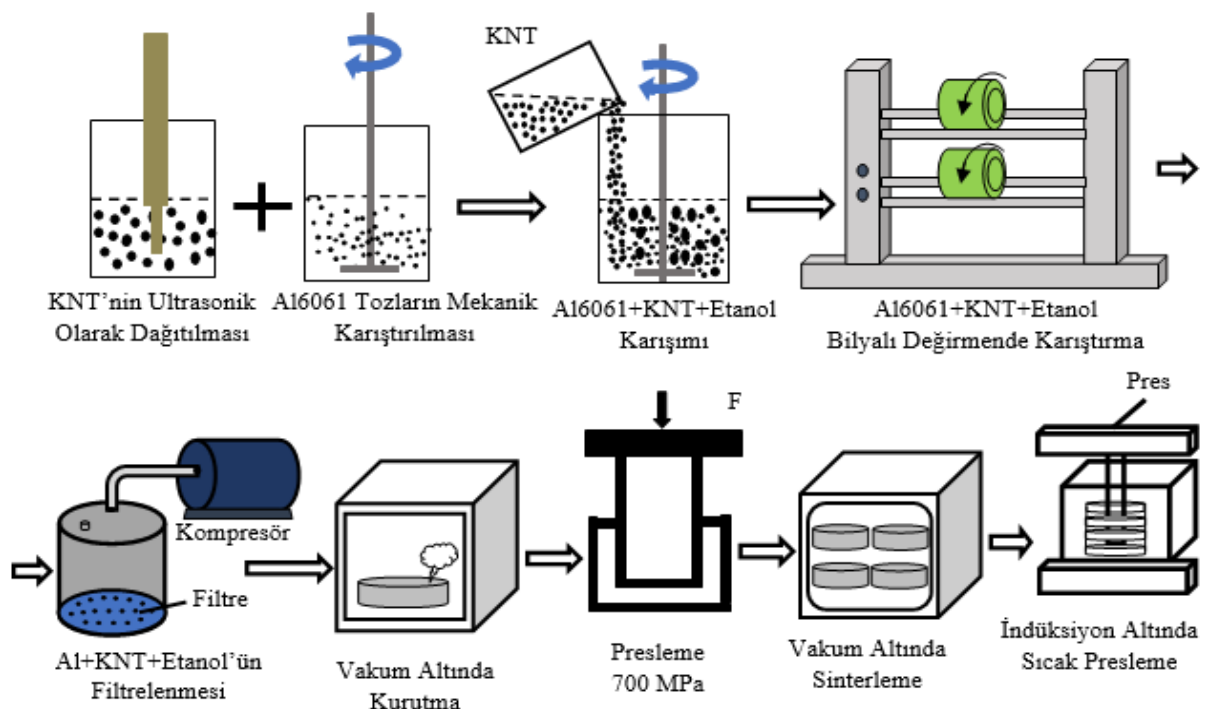
Bu çalışma kapsamında, Al6061 matrisli karbon nanotüp katkılı kompozitler sıcak presleme ve toz metalürjisi yöntemleriyle üretilmiştir. Matris elemanı olarak Al6061 alaşım tozu, takviye elemanı olarak çok duvarlı karbon nanotüp tozu kullanılmıştır. Kullanılan Al6061 alaşım tozu ortalama 10 µm tanecik boyutuna, %98 saflık derecesine sahip olup Nanografi firmasından temin edilmiştir. Takviye elemanı olarak tercih edilen karbon nanotüp tozu ise %96 saflığa, 48-68 nm dış çapa ve çok duvarlı bir yapıya sahip olup Nanografi firmasından satın alınmıştır. Ticari olarak temin edilen tozlara ait diğer özellikler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Üretimde kullanılan tozların özellikleri

Tozlar	Safılık (%)	Morfolojisi	Çap	Yoğunluğu (g/cm ³)
Al6061 alaşım	%98	Küresel	10 µm	2.7
Karbon nanotüp	%96	Silindirik	48-68 nm	1.9

Metot

Al6061 esaslı karbon nanotüp katkılı kompozitler sıcak presleme ve toz metalürjisi yöntemleriyle bu çalışma kapsamında üretilmiştir (Şekil 1). Öncelikle Al6061 alaşım tozu etil alkol içerisinde 1 saat süresince mekanik olarak karıştırılmış ve eş zamanlı olarak karbon nanotüp tozu etil alkol içerisinde ultrasonik dağıtıcıyla dağıtılmıştır. Sonrasında Al6061-etanol karışımı karbon nanotüp-etanol karışımına eklenip mekanik karıştırıcıyla 30 dk süresince karıştırıldı. Homojen bir karışım elde etmek amacıyla Al6061-KNT-etanol karışımı, yüksek enerjili bilyalı değirmene aktarılarak 15 dk süresince 600 dev/dk hızda karıştırılmıştır. Bilyalı değirmende karıştırma haznesine, hacimce 1/3 oranında karışım ve 1/3 oranında zirkon bilya eklenerek karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karışım içerisinden etil alkolü ayırtmak için karışım filtrelenip vakum altında etüvde 45°C sıcaklıkta 16 saat süresince kurutulmuştur. Kurutma sonrası toz karışımı paslanmaz çelik kalıp içerisinde 700 MPa basınç altında tek eksenli presle sıkıştırılmıştır. Preslenmiş numuneler 10×10×6 mm boyutlarındadır. Sonrasında ham numuneler 600°C sıcaklıkta 60 dk boyunca sürekli vakum altında sinterlenmiştir. Numunelere ikincil işlem olarak indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Sıcak presleme işlemi için hidrolik pres ve indüksiyonla ısıtma makinesi eş zamanlı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İndüksiyonla ısıtma makinesinde ısıtma süresi 40 sn, bekleme süresi 30 sn ve soğutma süresi 10 sn olarak belirlenmiştir. Bu aşamadaki presleme basıncı 25 MPa olup sıcaklık 500 °C olarak ayarlanmıştır. Bu işlemle daha yoğun bir mikro yapıya ve daha üstün mekanik, tribolojik özelliklere sahip kompozit malzeme üretiminin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Numunelerin yüzeyindeki oksit tabakayı uzaklaştırmak amacıyla numuneler sırasıyla 240, 1200, 2400 gritlik zımpara kağıtlarıyla 5 dk süresince zımparalanmıştır. Numunelere sertlik ve aşınma testleri uygulayabilmek için numune yüzeylerinin parlatılması gerekmektedir. Parlatma işlemi, elmas çuha üzerine elmas solüsyon sıkılıp numunelerin çuha üzerinde 30 dk süresince parlatılmasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin üretimine ait akış şeması

Numunelerin sertlik ölçümü için mikro Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Numune üst yüzeyinden minimum sekiz sertlik ölçümünün ortalaması alınıp ortalama sertlik değeri tespit edilmiştir. Sertlik ölçümü 15 sn süresince 200 gf yük altında gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk ölçümü için Arşimet yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak deneysel yoğunluk değeri belirlenmiştir.

Numunelerin deneysel yoğunluğu (ρ_D) Eşitlik 1'den hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte; m_A kompozit malzemelerin suyun içindeki asılı kütlelerini, m_K kurumuş haldeki kütlelerini, m_D suya doymuş kütlelerini ve ρ_{su} suyun yoğunluğunu ifade etmektedir (Şenel&Gürbüz, 2020).

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

Numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_T), Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlikte ρ_M matris malzemesi olarak kullanılan Al6061 alaşımının yoğunluğunu (2.7 g/cm^3), %M matris malzemesinin ağırlıkça takviye oranını, (ρ_{TK}) takviye elemanı olarak kullanılan karbon nanotüpün yoğunluğunu (1.9 g/cm^3) ve %TK ise takviye elemanının ağırlıkça katkı oranını göstermektedir.

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

Toz metalürjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen ürünler için çok önemli bir parametre olan bağıl yoğunluk ($\% \rho_D$) Eşitlik 3'den hesaplanabilmektedir (Şenel&Gürbüz, 2020).

$$\% \rho_D = (\rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (3)$$

Numunelerin gözeneklilik oranı (%G) Eşitlik 4 yardımıyla tespit edilebilmektedir (Şenel&Gürbüz, 2020).

$$\%G = (1 - (\rho_D / \rho_T)) \times 100 \quad (4)$$

Numunelerin aşınma ve sürtünme davranışını incelemek için pin-on-disk aşınma test düzeneği kullanılmıştır. Aşınma testlerinde abrasif aşınmanın etkin olduğunu ifade edebiliriz. Aşınma testlerinde aşındırıcı disk olarak 20 mm yarıçapa ve 50 HRC sertliğe sahip 440C paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Aşınma testleri kuru şartlar altında 5 N yükte gerçekleştirilmiştir. Aşınma test düzeneğinden elde edilen sürtünme kuvveti verileri, kuvvet sensörü ve PICO 4424 veri kaydedicisi aracılığıyla saniyede bir olmak üzere bilgisayara aktarılmıştır. Sürtünme kuvveti verileri uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı verisine dönüştürülmüş ve bu sayede her bir numune için test süresince (20 dk) 1200 sürtünme katsayısı verisi elde edilmiştir. Aşınma testleri neticesinde numunelerin kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı verilerine ulaşılmıştır.

Kütle kaybı (Δm), Eşitlik 5'den hesaplanmakta olup malzemenin aşınma öncesi kütlelerinden (m_i) aşınma sonrası kütlesi (m_s) çıkarılarak elde edilmektedir.

$$\Delta m = m_i - m_s \quad (5)$$

Aşınma testlerinde test süresi (t) 20 dk, diskin dönüş hızı (n) 200 dev/dk ve disk yarıçapı (r) 20 mm olup kayma mesafesi (L) Eşitlik 6'dan yaklaşık 500 m olarak hesaplanmaktadır (Şenel et al., 2018).

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

Aşınma oranını (W) tespit etmek amacıyla kayma mesafesi (L), numunelere uygulanan yük (F), kütle kaybı (Δm) ve deneysel yoğunluk (ρ_D) değerlerinin bilinmesi gerekmektedir (Eşitlik 7) (Şenel et al., 2018).

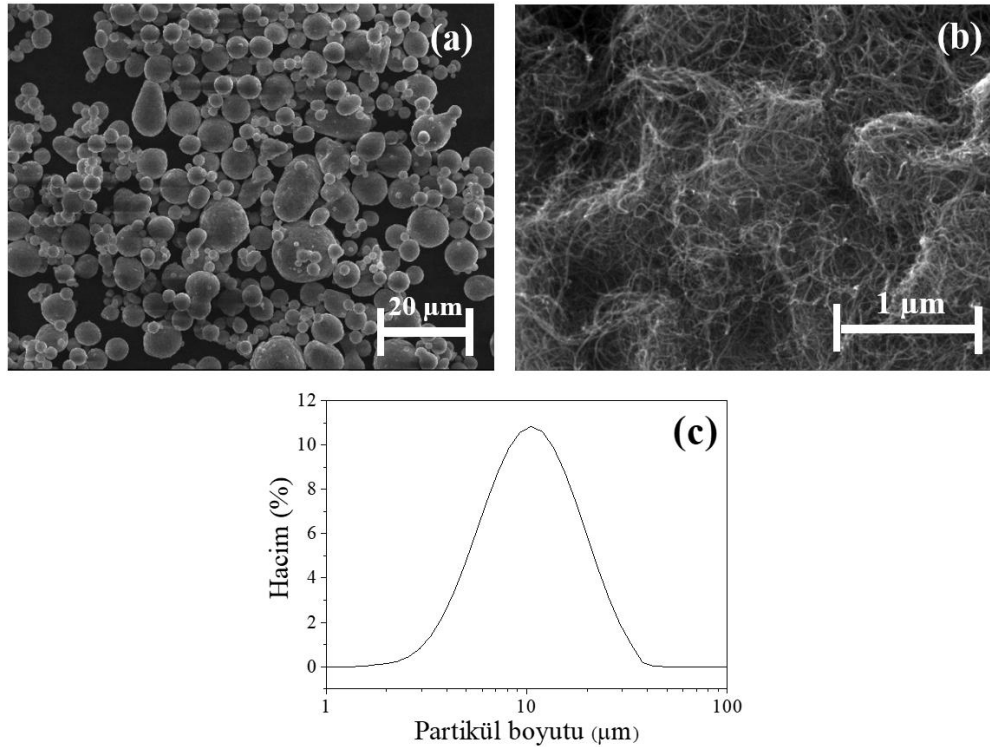
$$W = \Delta m / (\rho_D F L) \quad (7)$$

Temin edilen tozların tane boyut dağılımı için tane boyut ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer 3000) kullanılmıştır. Üretilen numunelerin faz yapısı X-ışını kırınımı (XRD) cihazıyla (Rigaku Smartlab), kırılmış yüzey ve aşınmış yüzey görüntüleri ise taramalı elektron mikroskopuyla (SEM, Jeol JSM-7001F) incelenmiştir. SEM cihazında yer alan Enerji Dağılımı X-Işını (EDX) dedektörü kullanılarak numuneye ait element dağılım haritaları elde edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

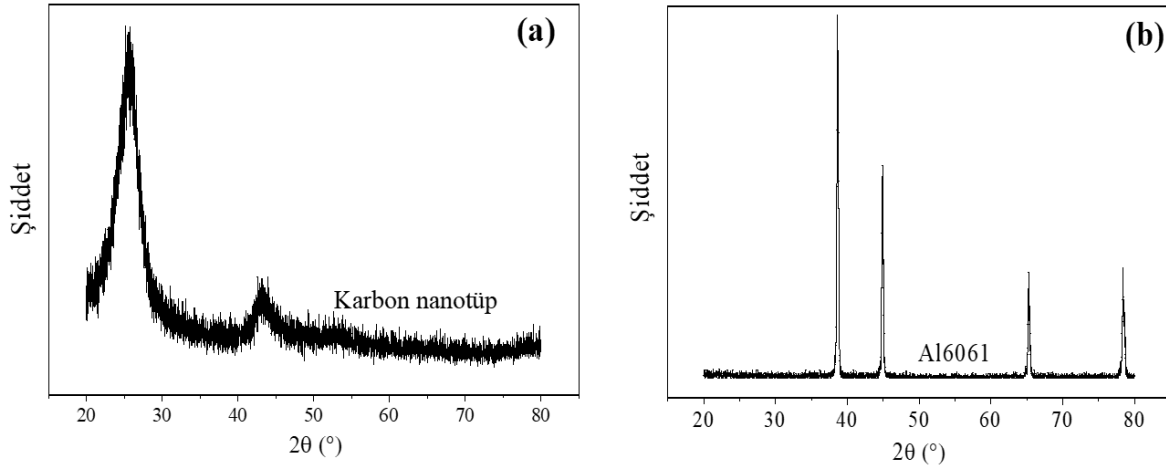
Tozların Analizi

Bu bölümde, ticari olarak temin edilen tozların XRD faz analizleri, SEM görüntüleri ve tane boyut analizleri değerlendirilmiştir. Tozların SEM görüntüleri ve Al6061 alaşım tozunun tanecik boyut dağılımı Şekil 2’de verilmiştir. 1000 büyütme SEM görüntüsünden Al6061 alaşım tozunun küresel yakın bir formda olduğu ve 20 µm altı bir ortalama tanecik boyutuna sahip olduğu görülebilmektedir (Şekil 2a). 30000 büyütme SEM görüntüsünden karbon nanotüp tozlarının ise silindirik bir formda ve mikron altı bir uzunlukta olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2b). Partikül boyut dağılımı analizinden; Al6061 alaşım tozlarının ortalama tanecik boyutunun 10 µm olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2c).



Şekil 2. Tozlara ait SEM görüntüleri: (a) Al6061 alaşım, (b) karbon nanotüp tozları; (c) Al6061 alaşım tozlarına ait partikül boyut dağılımı

Şekil 3’de karbon nanotüp ve Al6061 alaşım tozlarına ait XRD faz analizleri sunulmuştur. Bu analizler değerlendirildiğinde; karbon nanotüpün kırınım açısının 27° ve Al6061 alaşım tozunun kırınım açılarının 38°, 45°, 65°, 78° olduğu gözlemlenmiştir. Bu analizlerle ticari olarak temin edilen tozların karbon nanotüp ve alüminyum tozu olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca üretilen kompozitlerdeki faz yapılarının tespiti için de bu analizler önem arz etmektedir.



Şekil 3. X-ışını kırınımı faz analiz sonuçları: (a) karbon nanotüp ve (b) Al6061 alaşım tozları

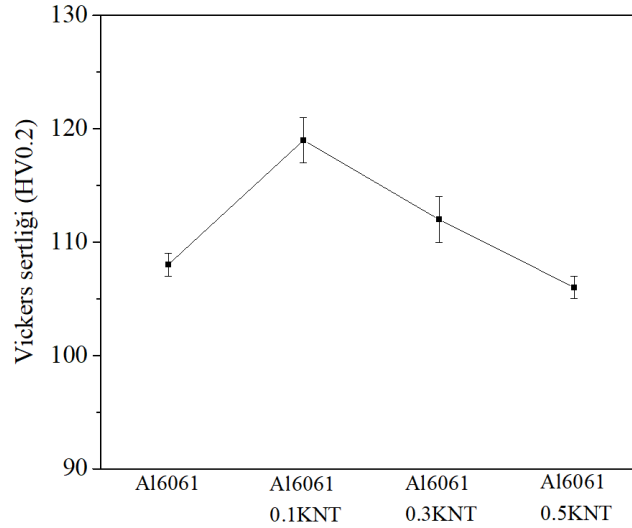
Sertlik ve Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Karbon nanotüp katkıli Al6061 matrisli kompozitlerin yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Sinterleme öncesi Al6061 alaşımının yoğunluk ve gözeneklilik oranı sırasıyla; 2.55 g/cm³ ve %6.3 iken; sinterleme ve sıcak preslemenin etkisiyle Al6061 alaşımının yoğunluğu 2.59 g/cm³ ve gözeneklilik oranı ise %4,9 olarak belirlenmiştir. En yüksek yoğunluk (2.60 g/cm³), bağıl yoğunluk (%95.3) ve en düşük gözeneklilik oranı (%4.7) sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş Al6061-%0.1KNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Hem sinterlemenin hem de sıcak preslemenin numunelerin gözeneklilik oranını düşürmede etkili olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %0.3 ve %0.5 KNT katkıli Al6061 matrisli kompozit yapılarda ise KNT’nin muhtemel topaklanması sebebiyle yoğunluğun ve bağıl yoğunluğun düştüğü görülmüştür. Sinterleme ile sıcak presleme işlemlerinin ve karbon nanotüp katkısının (ağırlıkça %0.1’e kadar) kompozitin yoğunluğunu ve gözenekliliğini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 2. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri

	Sinterleme Öncesi			Sinterleme Sonrası			Sinterleme ve Sıcak Presleme Sonrası		
	Yoğunluk (g/cm ³)	Bağıl yoğunluk (%)	Gözeneklilik oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Bağıl yoğunluk (%)	Gözeneklilik oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Bağıl yoğunluk (%)	Gözeneklilik oranı (%)
Al6061	2.55	93.8	6.3	2.57	94.5	5.5	2.59	95.1	4.9
Al6061 0.1KNT	2.56	94.1	5.9	2.57	94.5	5.4	2.60	95.3	4.7
Al6061 0.3KNT	2.53	93	6.9	2.55	93.8	6.2	2.56	94.1	5.9
Al6061 0.5KNT	2.50	91.9	8	2.51	92.3	6.8	2.53	93.6	6.4

Karbon nanotüp katkıli Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertlikleri Şekil 4’de verilmiştir. Yürütülen testler ışığında; Al6061 alaşımının sertliği 108±1 HV iken; Al6061-%0.1KNT kompozitin sertliği 119±2 HV’ye yükselmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla Al6061-%0.1KNT kompozitin sertliğinin %10 oranında arttığı görülmüştür. Bu artış dağılım sertleşmesi mekanizmasına dayanmaktadır. Matris yapı içerisine matristen daha sert ince yapıli tanecikler eklenmesi durumunda kompozitin sertliği artmaktadır. Ağırlıkça %0.1’in üzerinde KNT katkısında ise sertliğin hızla düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, karbon nanotüpün üst üste istiflenmesinden ve birbiri üzerinde kolay kaymasından kaynaklandığı öngörülmektedir.



Şekil 4. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertlik değerleri

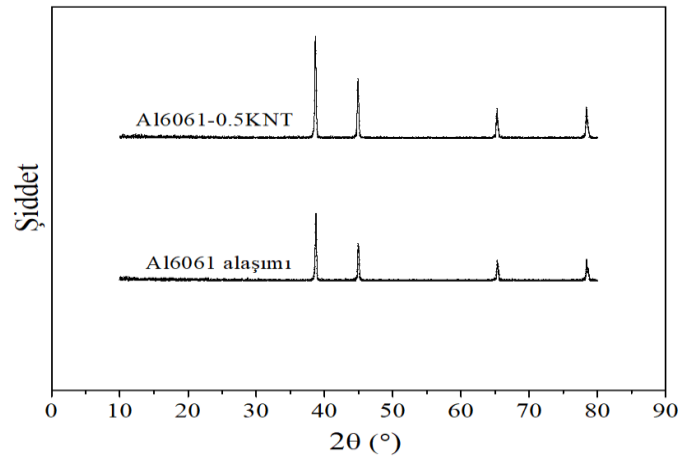
Kompozit yapıların sertliği (H_c), Eşitlik 8’de sunulan dislokasyon yoğunluk mekanizması ile iyileştirilebilmektedir. Kompozitlerde dislokasyon yoğunluğunun artması dislokasyonların hareketini kısıtlamakta ve malzemenin şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç artmaktadır. Böylece, kompozitin sertliği artmaktadır (Dieter, 1961).

$$H_c = Gb\alpha\sqrt{\rho} + h\sqrt{td} \quad (8)$$

Bu eşitlikte α , h , G malzeme sabitlerini, ρ dislokasyon yoğunluğunu ve b Burger vektörünü ifade etmektedir.

Numunelerin Mikroyapı ve Faz Analizleri

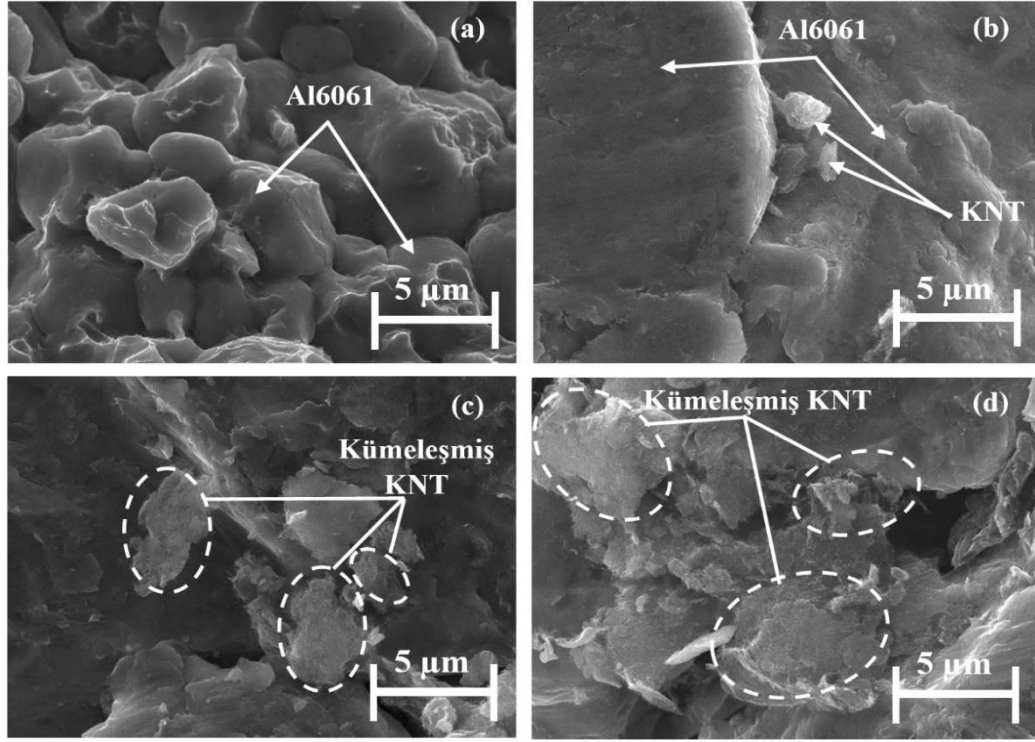
Şekil 5’de Al6061 alaşımına ve Al6061-%0.5KNT kompozite ait X-ışını dağılımı faz analizi sonuçları verilmiştir. Faz analizi sonuçlarına göre tüm piklerin ($2\theta=38^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 78^\circ$) alüminyuma ait olduğu görülmüştür. Al6061-%0.5KNT kompozit yapıda KNT’nin düşük katkı oranı (ağırlıkça %0.5) ve XRD cihazının düşük hassasiyeti sebebiyle karbon nanotüp pikine rastlanılmamıştır.



Şekil 5. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin XRD faz analizleri

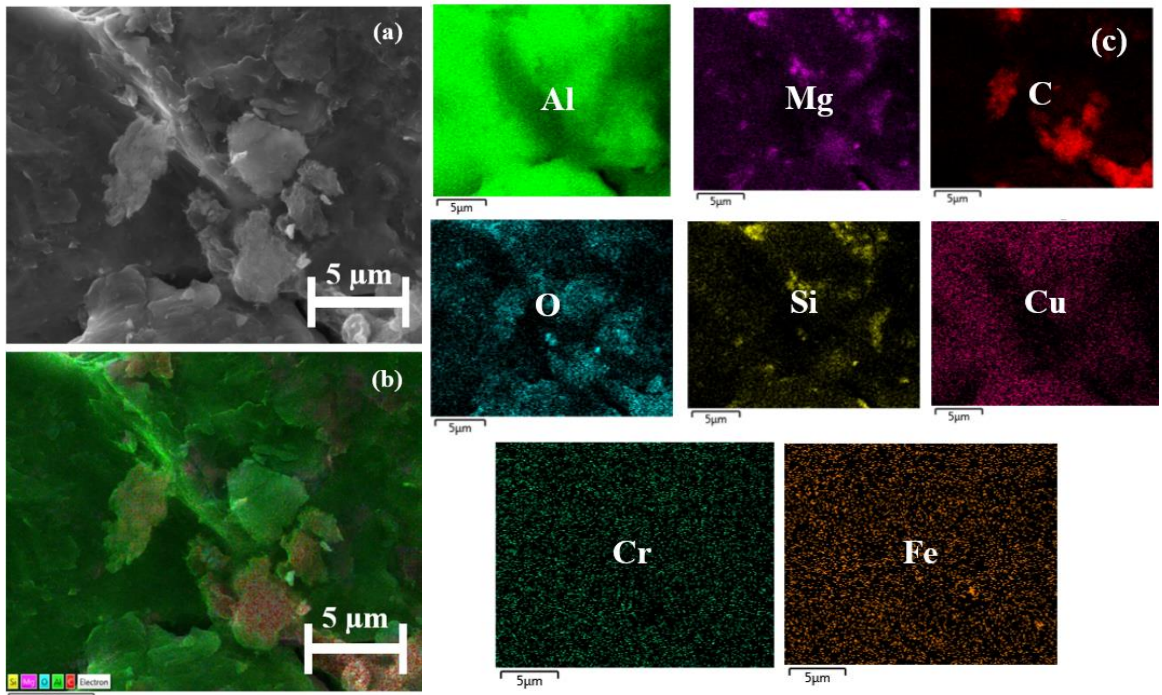
Al6061 alaşımına ve Al-KNT kompozitlere ait kırılmış yüzey SEM görüntüleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Kırılmış yüzey SEM görüntülerinden; özellikle alüminyum taneler arasında karbon nanotüp partiküllerin varlığı net bir şekilde görülebilmektedir. Mikroyapının oldukça yoğun olduğu ve numunelerin boyun vererek etkin bir şekilde sinterlendiği belirlenmiştir. Karbon nanotüp partiküllerin Al6061-%0.1KNT kompozit yapıda diğer kompozit yapılara kıyasla daha homojen bir dağılım sergilediği gözlenmiştir. Al6061-%0.5KNT ve Al6061-%0.3KNT kompozit yapılarda karbon

nanotüpün kümeleştiği ve bu sebeple de Al-KNT arasındaki arayüzey bağının zayıfladığı tespit edilmiştir. Bu durumun da kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.



Şekil 6. Numunelere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al6061 alaşımı, (b) Al6061-%0.1KNT, (c) Al-%0.3KNT, (d) Al6061-%0.5KNT kompozitler

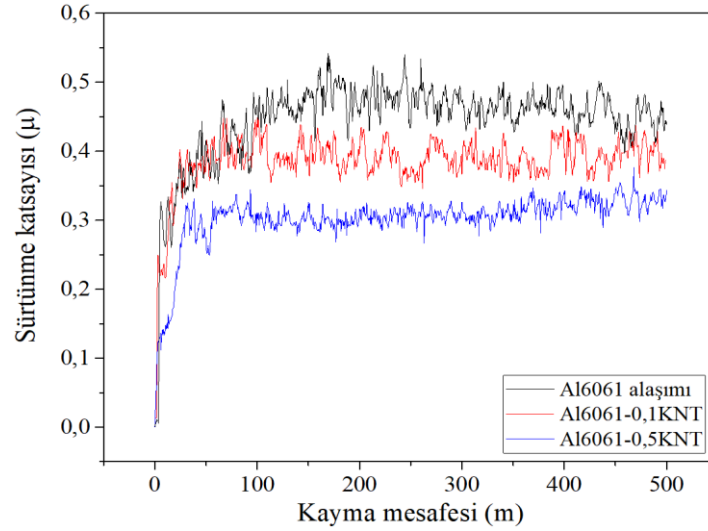
Şekil 7’de Al6061-%0.5KNT kompozit yapıya ait SEM-EDX görüntüsü sunulmuştur. Şekilden Al6061 alaşımına ait elementler olan Al yeşil renkte, Mg mor renkte, Si sarı renkte, Cu pembe renkte, Cr koyu yeşil renkte ve Fe kahverengi renkte gözlemlenmiştir. Kırmızı renkli karbon elementi dağılımı, karbon nanotüpün varlığını göstermektedir. Bu analizden topaklanmış karbon nanotüp partiküllerinin alüminyum tanecikleri arasındaki tane sınırlarında yer aldığı görülebilmektedir.



Şekil 7. Al6061-%0.5KNT kompozite ait (a) SEM, (b) SEM-EDX analizleri ve (c) element dağılım haritaları

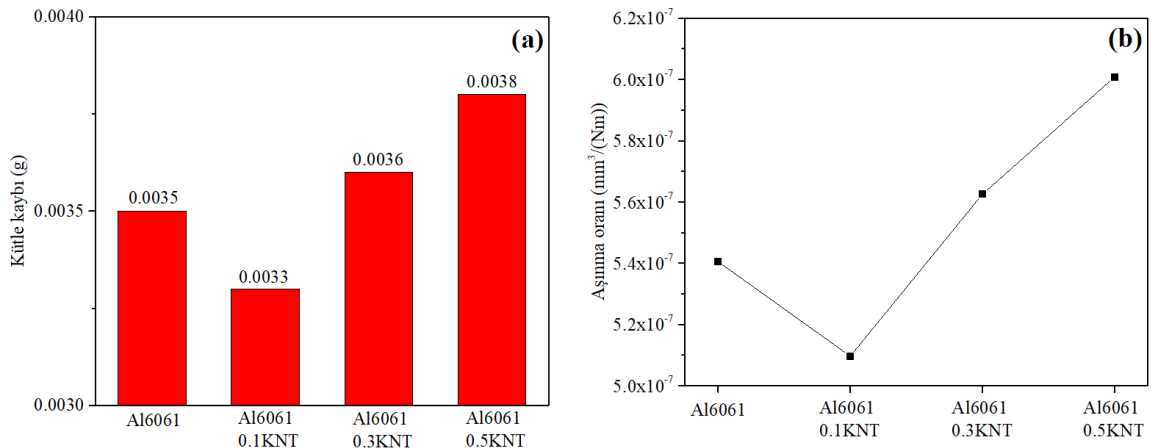
Numunelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışı

Bu bölümde, ağırlıkça %0.1-0.5KNT katkılı Al6061 matrisli kompozitlerin P=5 N yük altında kuru şartlarda gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma testi sonuçları incelenmiştir. Böylece üretilen numunelerin kütle kaybı, aşınma oranı, sürtünme katsayısı değişimleri ile aşınma izleri analiz edilmiştir. Üretilen numunelerle paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme durumunu incelemek için her bir numuneden saniyede bir sürtünme kuvveti verisi (1200 veri) alınarak sürtünme katsayısı eğrileri elde edilmiştir (Şekil 8). En yüksek sürtünme katsayısı (0.45) Al6061 alaşımı ile aşındırıcı disk arasında, en düşük sürtünme katsayısı (0.23) ise Al6061-0.5KNT kompozit ile aşındırıcı disk arasında tespit edilmiştir. Artan karbon nanotüp katkısıyla sürtünme katsayısının düştüğü belirlenmiştir. Bu durumun, karbon nanotübün katı yağlayıcılık özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



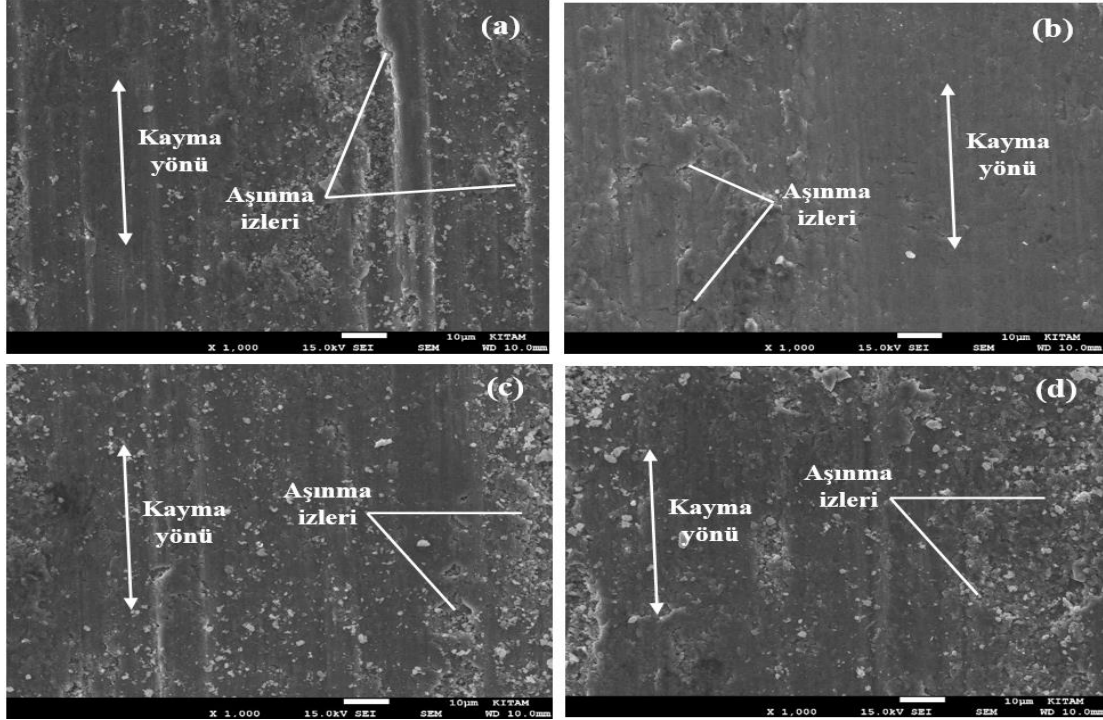
Şekil 8. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı eğrileri

Sinterlenmiş ve sıcak preslenmiş Al6061 alaşımının ve Al6061-KNT kompozitlerin kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri Şekil 9'da verilmiştir. En düşük aşınma oranı ($5.1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ve kütle kaybı (0.0033 g) Al6061-%0.1KNT kompozitte elde edilmiştir. En yüksek kütle kaybı (0.0038 g) ve aşınma oranı ($6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$) ise Al6061-%0,5KNT kompozitte belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.1'den daha fazla takviye oranında ise KNT partikülleri Al matris içerisinde üniform dağılmadığından matris malzemeler arasındaki bağı zayıflatmıştır. Ayrıca kompozit yapı içerisinde yer alan kümeleşmiş karbon nanotüpler deformasyon sırasında kolaylıkla hareket edebilmekte ve bu durum da plastik deformasyonu kolaylaştırmaktadır. Bu sebeple de Al6061-0.3KNT ve Al6061-0.5KNT kompozitlerdeki kütle kaybı ve aşınma oranı artmaktadır.



Şekil 9. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin (a) kütle kaybı ve (b) aşınma oranı

Aşınma testleri neticesinde Al6061 alaşımına ve Al6061-KNT kompozitlere ait aşınma izleri Şekil 10'da sunulmuştur. Tüm aşınmış yüzeylerde abrasif aşınma izleri gözlenmiştir. Bu durum, aşındırıcı diskin sertliğinin tüm numunelerin sertliğinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Maksimum yüzey deformasyonu ve hasarı, Al6061 alaşımında görülmüş olup alaşımın yüzeyinde derin aşınma olukları tespit edilmiştir. Minimum aşınma ise Al6061-%0.1KNT kompozit yapıda görülmüştür. Bu durum, mikroyapı içerisinde karbon nanotüp partiküllerinin homojene yakın dağılmasından ve aşınma testi sürecinde iyi bir katı yağlayıcı olarak davranmasından kaynaklanmaktadır. Ağırlıkça %0.1 katkı oranına kadar karbon nanotübün aşınmayı azaltmada olumlu etkisinin olduğu, bu katkı oranından sonra ise muhtemel topaklanma etkisiyle aşınmayı olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 10. Numunelere ait aşınma izleri: (a) Al6061 alaşımı, (b) Al6061-%0.1KNT, (c) Al6061-%0.3KNT ve (d) Al6061-%0.5KNT kompozitler

SONUÇ

Yürütülen çalışmada, farklı takviye oranlarında (%0.1-0.5) üretilen karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin tribolojik özellikleri ve mikroyapısı araştırılmıştır. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Yürütülen mekanik ve fiziksel testler neticesinde; en yüksek yoğunluk, minimum gözeneklilik oranı ve maksimum sertlik değeri Al6061-%0,1KNT kompozitte ölçülmüştür. Özellikle homojene yakın dağılan KNT partiküllerin dislokasyonların hareketini engelleyerek mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir. Sıcak presleme ve sinterleme işlemlerinin numunelerin gözenekliliğinin azaltılmasında etkili işlemler olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.1 karbon nanotüp katkı oranından sonra ise kompozitin yoğunluğunun ve sertliğinin karbon nanotübün kümeleşmesi ve Al tanecikler arasındaki arayüzey bağının zayıflaması sebebiyle düştüğü öngörülmektedir.
- 2) Aşınma testleri incelendiğinde; minimum aşınma oranı ve kütle kaybı Al6061-%0.1 karbon nanotüp kompozit yapıda tespit edilmiştir. Bu katkı oranının üzerinde karbon nanotübün kümeleşmesi sebebiyle tribolojik özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Sürtünme verileri incelendiğinde ise minimum sürtünme katsayısı Al6061-%0.5 karbon nanotüp kompozit

yapıda tespit edilmiştir. Bu durum, karbon nanotüpün katı yağlayıcılık özelliğinden kaynaklanmaktadır. Aşınmış yüzey izleri değerlendirildiğinde, minimum aşınma ve plastik deformasyon izleri Al6061-%0.1KNT kompozit yapıda gözlenmiştir. Tüm numunelerde aşınma mekanizması olarak abrasif aşınmanın etkin olduğu tespit edilmiştir.

3) Al6061 alaşımıyla kıyaslandığında Al6061-%0.1 karbon nanotüp kompozitin sertliğinin (%10.2) ve aşınma oranının (%17.6) oranında iyileştiği belirlenmiştir.

4) Al6061-%0.1 karbon nanotüp kompozite ait kırık yüzey SEM ve SEM-EDX incelemelerinden; karbon nanotüpün tane sınırlarına yakın yerleştiği görülmüştür. Tane sınırlarında yer alan KNT'nin ısı işlem esnasında tane büyümesini engelleyerek kompozitlerin tribolojik ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.

5) Al6061 alaşım matrisine ağırlıkça belli bir orana kadar (%0.1) katı yağlayıcılık özelliğine sahip nano yapıları karbon nanotüp katkısının kompozitlerin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma PYO.MOH.1901.22.008 kodlu proje ile Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Chawla, K.K. (2006). *Composite materials*. New York: Springer.
- Demir, M. (2022). *İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen ve/veya Si₃N₄/B₄C Takviyeli Al6061 Esaslı Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Dieter, G.E. (1961). *Mechanical Metallurgy*, UK: McGraw-Hill.
- Erdoğan, M. (2005). *Çelik Takviyeli Alüminyum Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- German, R.M. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing*. New Jersey:Princeton University Press.
- Koli, D.K., Agnihotri, G. & Purohit, R. (2012). Advanced aluminium matrix composites: the critical need of automotive and aerospace engineering fields. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3032-3041.
- Macke, A., Schultz, B.F. & Rohatgi, P. (2012). Metal matrix composites offer the automotive industry an opportunity to reduce vehicle weight. improve performance. *Advanced Materials&Proceedings*, 170, 19-23.
- Mansoor, M. & Shahid, M. (2016). Carbon nanotube-reinforced aluminum composite produced by induction melting. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(4), 215-224.
- Mohammed, S.M.A.K. ve Chen, D.L. (2019). Carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. *Advanced Engineering Materials*, 1901176, 1-26.
- Omidi, M., Khodabandeh, A., Nategh, S. & Khakbiz, M. (2018). Microstructural and tribological properties of nanostructured Al6061-CNT produced by mechanical milling and extrusion. *Advanced Powder Technology*, 29(3), 543-554.

- Preethi, K., Raju, T.N., Shivappa, H.A., Shashidhar, S. & Nagral, M. (2023). Processing, microstructure, hardness and wear behavior of carbon nanotube particulates reinforced Al6061 alloy composites. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 449-453.
- Pul, M. (2010). *Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin Infiltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi* (Doktora Tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Shivaramu, H.T., Vignesh Nayak, U. & Umashankar, K.S. (2020). Dry sliding wear characteristics of multi-walled carbon nanotubes reinforced Al-Si (LM6) alloy nanocomposites produced by powder metallurgy technique. *Materials Research Express*, 7(4), 1-12.
- Sridhar, I. & Narayanan, K.R. (2009). Processing and characterization of MWCNT reinforced aluminum matrix composites, *Journal of Materials Science*, 44, 1750-1756.
- Şahin, İ. (2014). Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin matkap ile delinmesi konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 55(649), 9-16.
- Şahin, Y. (2006). *Kompozit malzemelere giriş*. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- Şenel, M.C., Gürbüz, M. & Koç, E., (2017). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 23(8), 974-978.
- Şenel M.C. & Gürbüz, M. (2021). Investigation on mechanical properties and microstructure of B₄C/graphene binary particles reinforced aluminum hybrid composites. *Metals and Materials International*, 27, 2438-2449.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. & Koç, E. (2018). Mechanical and tribological behaviors of aluminum matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(16), 1980-1989.
- Topcu, İ. (2018). Karbon nanotüp takviyeli alüminyum matrisli AlMg/KNT kompozitlerinin mekanik davranışlarının incelenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 99-109.