

Al7075-B₄C Kompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin ve Mikroyapısının İncelenmesi

Aleyna TAŞKIN¹, Elif IŞIK², Mahmut Can ŞENEL^{3*}

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55020, Samsun

²Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 58010, Sivas

³Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55020, Samsun

¹<https://orcid.org/0000-0002-8308-9957>

²<https://orcid.org/0000-0001-8289-9512>

³<https://orcid.org/0000-0001-7897-1366>

*Sorumlu yazar: mahmutcan.senel@omu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 26.11.2024

Kabul tarihi: 23.02.2025

Online Yayınlanma: 16.06.2025

Anahtar Kelimeler:

Al7075

B₄C

Toz metalürjisi

Sıcak presleme

Aşınma

ÖZ

Bu çalışmada; Al7075 matrisli B₄C takviyeli kompozitler toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleri ile üretilmiştir. Al7075 matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 oranlarında B₄C ilave edilmiştir. Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunluğu, Vickers sertliği, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek deneysel yoğunluk (2,63 g/cm³), Vickers sertliği (226 HV) ile en düşük aşınma oranı ((0,000091 mm³/(Nm))), kütle kaybı (0,0012 g) ve sürtünme katsayısı (0,4) Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir. Al7075 alaşımına kıyasla bu kompozitte yoğunluk ve sertlik değeri sırasıyla %1,54 ve %76,6 oranında artmıştır. Bu artış kompozitin tribolojik özelliklerinin gelişmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca yapılan mikroyapı analizleri ile bu kompozitte mikroyapının daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda Al7075 alaşımına belirli katkı oranında (ağırlıkça %30) B₄C ilave edildiğinde kompozitin mikroyapısının ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir.

Investigation of Tribological Properties and Microstructure of Al7075-B₄C Composites

Research Article

Article History:

Received: 26.11.2024

Accepted: 23.02.2025

Published online: 16.06.2025

Keywords:

Al7075

B₄C

Powder metallurgy

Hot pressing

Wear

ABSTRACT

In this study, B₄C reinforced Al7075 matrix composites were produced by the powder metallurgy and hot-pressing methods. B₄C was added to the Al7075 matrix at the rates of 1, 3, 6, 9, 12, 15 and 30wt.%. The experimental density, Vickers hardness, wear rate and friction coefficient of the produced composites were determined. According to the results obtained, the highest experimental density (2.63 g/cm³), Vickers hardness (226 HV) and the lowest wear rate ((0.000091 mm³/(Nm))), mass loss (0.0012 g) and friction coefficient (0.4) were obtained in Al7075-30B₄C composite. Compared to Al7075 alloy, the density and hardness values of this composite increased by 1.54% and 76.6%, respectively. This increase contributed to the improvement of the tribological properties of the composite. In addition, the microstructural analyses showed that the microstructure was denser in this composite. As a result of the study, it was determined that when B₄C was added to Al7075 alloy at a certain reinforcement ratio (30wt.%), the microstructure and tribological properties of the composite were improved.

1. Giriş

Kompozit malzemeler; üstün özellikler elde etmek amacıyla en az iki malzemenin birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde bir araya getirilmesi ile meydana gelmektedir. Matris ve takviye elemanından oluşan kompozit malzemeler; yüksek mukavemet ve gelişmiş tribolojik özellikleri nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler arasında alüminyum matrisli kompozitlere olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bunun sebebi; alüminyum esaslı kompozitlerin yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, yüksek aşınma direnci ve düşük yoğunluğa sahip olmasıdır (Al Njjar ve ark., 2024). Alüminyum alaşımları arasında saf alüminyumla kıyaslandığında en yüksek dayanıma, korozyon direncine, aşınma direncine 7xxx serisi alaşımlardan olan Al7075 sahiptir. Al7075 alaşımı; düşük ağırlık/mukavemet oranı, düşük yoğunluk, yüksek korozyon ve sürünme direnci ile havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok alanda tercih edilmektedir (Singh ve Sethuraman, 2024). Bu nedenle Al7075 alaşımı, kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek ve malzeme ömrünü uzatmak amacıyla bir takım takviye elemanları kullanılmaktadır. Al7075 matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak; bor karbür (B₄C), silisyum nitrür (Si₃N₄), silisyum karbür (SiC), zirkonyum oksit (ZrO₂) gibi mukavemet artırıcı seramik malzemeler tercih edilmektedir (Sadhu ve ark., 2023).

B₄C; mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerinden dolayı zırhlar, kesici takımlar ve yüksek aşınma direnci gerektiren malzemelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Cheng ve ark., 2017). Bor karbür, seramik malzemeler arasında elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert malzeme olup Mohs sertlik skalasında 9 ile 10 arasında bulunmaktadır (Görmez, 2024; Pul, 2024). Yüksek sertliği, düşük yoğunluğu ve mükemmel tribolojik özellikleri ile kompozitlerin kalitesini geliştirmek için ideal bir takviye elemanıdır (Zhao ve ark., 2016). Özellikle metal matrisli kompozitlerde, mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Hynes ve ark., 2020).

Al matrisli kompozitlerin üretiminde karıştırmalı döküm, sıvı infiltrasyon, eklemeli imalat, toz metalürjisi vb. birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasından toz metalürjisi yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Düşük enerji tüketimi, düşük üretim sıcaklığı ve çeşitli malzemelerin kullanılabilirliği bu avantajlara örnek olarak verilebilmektedir. Toz metalürjisi yönteminde matris ve takviye tozları belirli oranlarda karıştırılarak presleme işlemi ile şekillendirilmektedir. Ardından sıkıştırılan tozlara ısıtma işlemi uygulanarak mukavemet kazandırılmaktadır. Sonrasında ikincil işlemler uygulanarak üretim tamamlanmaktadır (Akgümüş ve ark., 2024).

Literatürde Al matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Baradeswaran ve Perumal tarafından yapılan çalışmada, karıştırma döküm yöntemi kullanılarak Al7075-B₄C kompozitleri üretilmiştir. Kompozitlerde katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertlik, çekme ve basma dayanımının arttığı belirlenmiştir. En yüksek Brinel

sertliği (200 BHN), çekme dayanımı (300 MPa) ve basma dayanımı (330 MPa) Al7075-20B₄C kompozitte elde edilmiştir. En iyi tribolojik özellikler ise Al7075-10B₄C kompozitte tespit edilmiştir. Bu kompozitte aşınma oranının Al7075 alaşımının %11'i kadar olduğu ifade edilmiştir (Baradeswaran ve Perumal, 2013). Raksha ve ark., karıştırılmalı döküm yöntemini kullanarak Al2011 matrise farklı oranlarda (%2, 4 ve 6) B₄C ilave ederek Al2011-B₄C kompozitleri üretmişlerdir. En iyi mekanik özellikler %6 bor karbür katkı oranında elde edilmiştir. Sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımında Al2011 alaşımına kıyasla sırasıyla %50, %34,6 ve %32,3 oranlarında artış meydana gelmiştir. Sonuç olarak bor karbür katkı oranının Al2011 matrisli kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir (Raksha ve ark., 2023). Gök ve ark. yaptıkları çalışmada toz metalürjisi ile üretilen Al esaslı Al₂O₃ (alümina), SiC (silisyum karbür), B₄C ve MgO (magnezyum oksit) takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. Elde ettikleri kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde sinterleme parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sinterleme süresi ve sıcaklığının artması ile kompozitlerin yoğunluğunun arttığı ve yapıdaki gözenek oranının azaldığı belirlenmiştir. SiC ve B₄C'nin üstün mukavemet ve sertlik özelliklerinden dolayı yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanımının uygun olduğunu vurgulamışlardır (Gök ve ark., 2024). Doğan ve Mutlu tarafından yapılan çalışmada toz metalürjisi yöntemi kullanılarak Al2024 matrise ağırlıkça %7, %10, %15 ve %20 oranlarında B₄C takviye edilerek kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sırasında üç farklı (550°C, 575°C ve 595°C) sinterleme sıcaklığı kullanılmış ve üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. En yüksek eğme dayanımı (85,09 MPa) Al2024-10B₄C kompozitte 595°C sinterleme sıcaklığında elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri (71,73 HB) ise Al2024-20B₄C kompozitte 595°C sinterleme sıcaklığında tespit edilmiştir. Bor karbürün kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ancak %10 katkı oranı üzerinde eklenmesi durumunda yapıda gözenek oluşumuna sebep olarak eğme dayanımının azalmasına neden olduğu belirtilmiştir (Doğan ve Mutlu, 2023). Srinivas ve ark. Al6061 matrise ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında B₄C ve SiC ilave etmişlerdir. Toz metalürjisi ile ürettikleri kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde katkı oranı ve sinterleme sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. En yüksek sertlik değeri ve aşınma direnci Al6061-6SiC-2B₄C kompozitte elde edilmiştir. Kompozitlere uygulanan farklı sinterleme sıcaklıkları (800°C, 825°C ve 850°C) sonucunda en iyi özellikler 850°C sinterleme sıcaklığında belirlenmiştir (Srinivas ve ark., 2024). Kantheti ve ark. yaptıkları çalışmada Al7075 matrisli grafit (Gr, ağırlıkça %4, 5 ve 6) ve bor karbür (ağırlıkça %4, 5 ve 6) takviyeli kompozitleri üretmişlerdir. Üretim yöntemi olarak karıştırılmalı döküm yöntemini tercih etmişlerdir. Yürütülen testler sonucunda en yüksek sertlik, darbe dayanımı, çekme dayanımı ve akma dayanımı Al7075-6Gr-4B₄C kompozitte elde edilmiştir. Bu kompozitte Al7075 alaşımına kıyasla sertlik, darbe dayanımı, çekme dayanımı ve akma dayanımı sırasıyla %18, %110, %88,24 ve %85,31 oranlarında artış göstermiştir. Farklı yükler (20, 40, 60, 80 ve 100 N) altında uygulanan aşınma test sonuçlarına göre en düşük aşınma oranı Al7075-5Gr-5B₄C kompozitte belirlenmiştir. Sonuçlar, belirli bir katkı oranına kadar grafit ve bor karbürün Al7075 matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir (Kantheti ve ark., 2024).

Ramesh ve ark. yaptıkları çalışmada zirkonyum diborür (ZrB_2) ve B_4C takviyeli Al2014 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Al2014 matrise ağırlıkça %5, 10, 15 ZrB_2 ve %5 B_4C takviye ederek katkı oranının kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Al2014-15 ZrB_2 -5 B_4C kompozitin sertlik ve çekme dayanımında Al2014 alaşımına kıyasla %31,86 ve %44,1 oranında artış belirlenmiştir. Aşınma testleri sonucunda en yüksek aşınma direnci aynı kompozitte elde edilmiştir (Ramesh ve ark., 2024).

Literatür çalışmaları incelendiğinde farklı yöntemlerle üretilen Al matrisli B_4C takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak toz metalürjisi ve indüksiyon altında sıcak presleme yöntemleri ile üretilen Al7075 matrisli B_4C takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Geleneksel sinterleme işlemleri yüksek enerji maliyetine neden olurken, alternatif sinterleme yöntemleri bu sorunu çözmek için geliştirilmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme kısa sürede ve tane büyümesi olmaksızın istenilen sinterleme sıcaklıklarına ulaşmayı sağlamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri ile Al7075- B_4C kompozitleri üretilerek bor karbür katkı oranının kompozitin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı, takviye elemanı olarak ise B_4C tozu kullanılmıştır. Al7075 alaşım tozu ve B_4C tozu, Nanografi (Türkiye) firmasından satın alınmıştır. Al7075 alaşımı, yüksek dayanım, yüksek elektrik iletkenliği, düşük hafiflik gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir (Kumar ve ark., 2024). Çinko elementinin yoğun olduğu Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir (Ahmad ve ark., 2024). Al7075 alaşım tozu ~10 μm tane boyutuna, 2,81 g/cm³ yoğunluğa ve 221 MPa çekme dayanımına sahiptir. B_4C tozu ise yüksek sertlik, yüksek darbe dayanımı ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı takviye malzemesi olarak seçilmiştir (Karakoç ve ark., 2024). B_4C tozu; ~44 μm tane boyutuna, 2,52 g/cm³ yoğunluğa, 155-162 MPa çekme dayanımına sahiptir. Al7075 ve B_4C ’ye ait genel özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Ahmad ve ark., 2024)

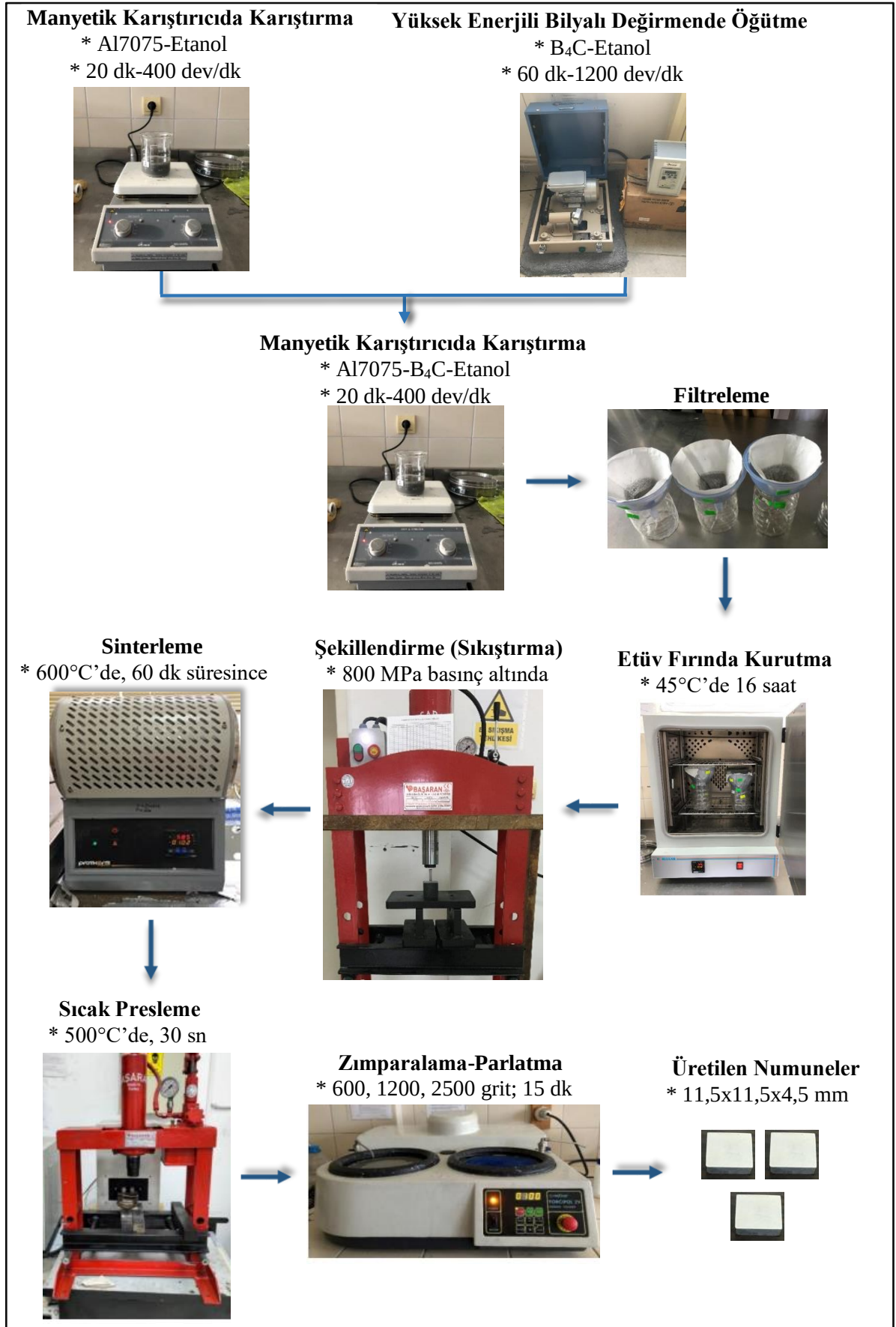
Zn	Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Diğer	Al
5,10-6,10	1,20-2	2,10-2,90	0,40	0,30	0,50	0,18-0,28	0,20	0,15	Kalan

Tablo 2. Al7075 ve B_4C ’ye ait genel özellikler

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HV)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Elastisite Modülü (GPa)
Al7075	2,81	68	221	635	71,7
B_4C	2,52	2700-3500	155-162	2400	290-450

2.2. Metot

Toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleri kullanılarak üretilen Al7075 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerin üretim aşamaları Şekil 1’de verilmiştir. İlk olarak Al7075 alaşım tozu etanol ile birlikte ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 20 dk süresince 400 dev/dk hızda karıştırılmıştır. B₄C takviye malzemesi ise etanol içerisinde yüksek enerjili bilyeli değirmende 60 dk süresince 1200 dev/dk hızda öğütülmüştür. Sonrasında iki karışım birleştirilerek homojen bir kıvam elde etmek amacıyla manyetik karıştırıcıda 20 dk süresince 400 dev/dk hızda karıştırılmıştır. Ardından karışımdan etanolün uzaklaştırılması amacıyla filtreleme işlemi yapılmıştır. Karışım içerisinde kalan nemi uzaklaştırmak için etüv fırın kullanılarak sürekli vakum altında 45°C’de 16 saat süresince kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutulan toz karışım 800 MPa basınç altında hidrolik pres makinesinde şekillendirilmiştir. Elde edilen ham numunelerin mukavemet kazanması amacıyla 600°C’de 60 dk süresince sinterleme ve 500°C’de 30 sn süresince indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır (Gaylan ve ark., 2023; Şenel ve Demir, 2023). Ardından numune yüzeylerinin pürüzsüz olması için 600, 1200, 2500 gritlik su zımparaları kullanılarak 15 dk boyunca zımparalama işlemi yapılmıştır. Son olarak numune yüzeyleri elmas solüsyon ile elmas çuha kullanılarak 15 dk boyunca parlatılmıştır. Bu üretim aşamaları sonucunda elde edilen numunelerin tribolojik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir.



Şekil 1. Al7075-B₄C kompozit numunelerin üretim aşamaları

Çalışma kapsamında Al7075 ve B₄C tozlarının tane boyutlarını doğrulamak amacıyla Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazı kullanılmıştır. Tozların mikroyapılarını, kompozitlerin kırık yüzey görüntülerini ve aşınmış yüzeyleri incelemek için SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için Jeol marka JSM-7001F model SEM cihazı kullanılmıştır. Ardından, numunelerin faz analizi Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) Eşitlik 1’de verilen Arşimet presibi ile belirlenmiştir. Eşitlikte yer alan m_A numunelerin sudaki asılı kütlelerini, m_D numunelerin suya doymuş kütlelerini ve m_K kuru kütlelerini temsil etmektedir. ρ_{su} ise suyun yoğunluğunu ifade etmekte olup 1 g/cm³ alınarak hesaplama yapılmıştır.

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

Numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_K) Eşitlik 2 kullanılarak belirlenmiştir. Eşitlikte yer alan ρ_M ve %M matris malzemesi olan Al7075 alaşımının teorik yoğunluğunu ve ağırlıkça katkı oranını ifade etmektedir. ρ_{TK} ve %TK ise takviye elemanı olan B₄C’nin teorik yoğunluğunu ve ağırlıkça katkı oranını temsil etmektedir.

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

Numunelerin gözeneklilik oranı (%G) ise Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır. Gözeneklilik oranı kompozitlerin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu parametre yapı içerisindeki boşluk miktarını temsil etmektedir (Karakoç, 2020). Gözeneklilik oranı yüksek olan malzemenin dayanımı düşük olmaktadır. Bu nedenle gözeneklilik oranının yüksek olması kompozit malzemenin dayanımı açısından istenmeyen bir durumdur.

$$\%G = (1 - (\rho_D / \rho_K)) \times 100 \quad (3)$$

Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri (HV) ASTM E384 standardı esas alınıp mikro Vickers sertlik ölçme cihazı (HV1000B) kullanılarak belirlenmiştir (Altunbaş, 2023). Numune yüzeyine 1,961 N’luk yük (P) 15 s boyunca uygulanmıştır. Numune yüzeyindeki kare tabanlı piramitin ortalama köşegen uzunluğu (d) ölçülerek Eşitlik 4 ile kompozitin sertlik değeri tespit edilmiştir. Her numuneden 7 ölçüm alınarak ortalama Vickers sertliği değeri hesaplanmıştır (Bai ve ark., 2019; Şenel ve ark., 2024).

$$HV = \frac{1,8544 \times P}{d^2} \quad (4)$$

Kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri (aşınma oranı, kütle kaybı ve sürtünme katsayısı) Şekil 2’de gösterilen GUNT marka TM260 model pin-on disk aşınma test cihazı ile ASTM G99-05 standardı esas alınarak belirlenmiştir (Arık, 2019). Aşınma testleri 200 dev/dk hızda, 1000 m kayma mesafesinde

ve 5-10 N yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Böylelikle aşınma yükünün kompozit malzeme üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 2. Aşınma test cihazı görüntüsü

İlk olarak numunelerin test sırasında ne kadar aşınmaya maruz kaldığını ifade eden aşınma oranı (W) belirlenmiştir (Eşitlik 5). Herhangi bir malzemenin aşınma oranının düşük olması, aşınmaya karşı direncinin yüksek olduğunu ve bu malzemenin aşındırıcı ortamlarda kullanılabileceğini göstermektedir.

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

Eşitlikte ΔV aşınma hacmini, F uygulanan yükü ve L kayma mesafesini temsil etmektedir. Aşınma hacmi (ΔV) ise Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte yer alan m_i ve m_s sırasıyla aşınma öncesi ve aşınma sonrası numune kütlesini temsil etmektedir. ρ_D ise deneysel yoğunluğu ifade etmektedir (Kumar ve ark., 2024).

$$\Delta V = (m_i - m_s) / \rho_D \quad (6)$$

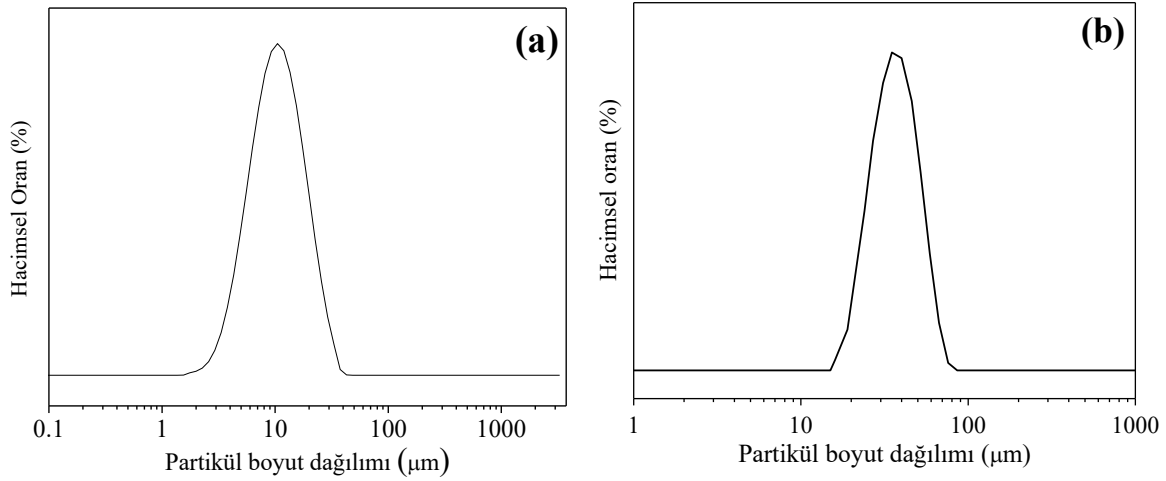
Kayma mesafesi (L) ise test sırasında alınan yolu belirtmekte ve Eşitlik 7 ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte r kullanılan aşındırıcı diskin yarıçapı (20 mm), n diskin dönme hızı (200 dev/dk) ve t test süresidir (40 dk) (Şenel ve ark., 2024).

$$L = 2\pi \times r \times n \times t \quad (7)$$

3. Bulgular ve Tartışma

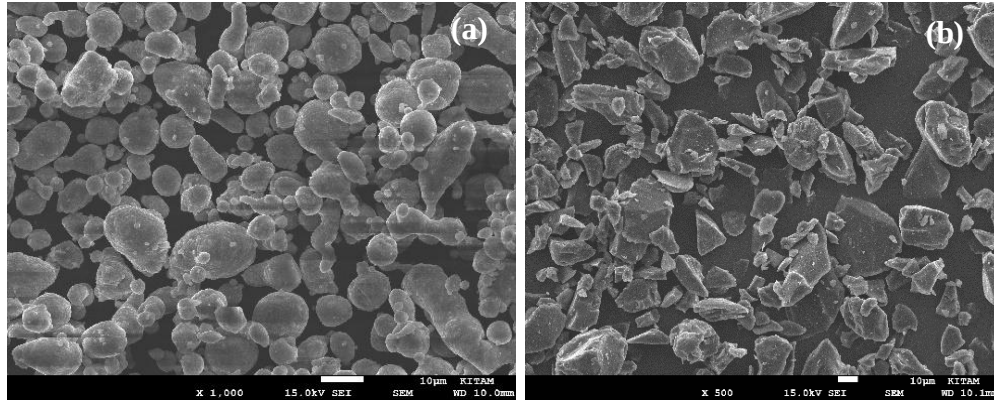
3.1. Tozların Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında Al7075 ve B₄C tozlarının partikül boyut dağılımı Şekil 3'te verilmiştir. Tane boyutu ölçüm analizine göre Al7075 alaşım partiküllerinin d₅₀≈10 µm ortalama tane boyutunda olduğu belirlenirken; B₄C partiküllerinin ise d₅₀≈44 µm ortalama tane boyutunda olduğu tespit edilmiştir.



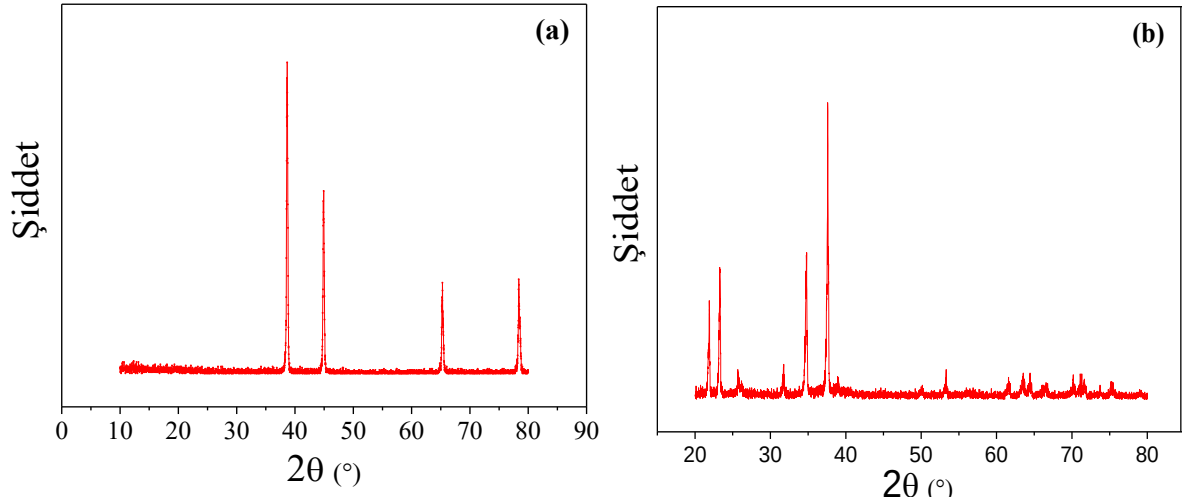
Şekil 3. Al7075 (a) ve B₄C (b) tozlarına ait tane boyutu dağılımı

Matris ve takviye malzemesi olarak kullanılan tozların mikroyapıları, üretilen kompozitlerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle Al7075 ve B₄C tozlarının mikroyapılarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen SEM analizi sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; Al7075 alaşım tozunun küresel bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu küresel yapısı sayesinde Al7075 tozu üretim sırasında homojenliği artırmaktadır. B₄C tozunun ise keskin kenarlı bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4. Al7075 (a) ve B₄C (b) tozlarına ait SEM görüntüleri

Şekil 5'te Al7075 alaşımı ve B₄C tozlarının XRD ile gerçekleştirilen faz analizleri verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde; Al7075 alaşımına ait karakteristik kırınım açılarının yaklaşık olarak $2\theta = \sim 38^\circ$, 45° , 66° ve 78° olduğu belirlenmiştir. Bu açılar, Al7075 alaşımının temel kristal yapısını temsil etmektedir. Takviye elemanı olan bor karbür tozunun faz analizine bakıldığında ise kırınım açılarının yaklaşık olarak $2\theta = \sim 22^\circ$, 23° , 26° , 32° , 35° , 38° , 39° , 50° , 54° , 62° , 64° , 67° , 72° , 74° , 75° ve 78° olduğu tespit edilmiştir. Bu geniş aralık kullanılan takviye elemanının faz çeşitliliğini göstermektedir. Yapılan XRD analizleri, üretilen kompozit malzemelerin kristal yapısının ve fazlarının belirlenmesi açısından önemlidir. Kompozitin genel özelliklerini iyileştirebilmek için matris malzemesi ve takviye elemanının faz yapılarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi kritik bir işlemdir.



Şekil 5. Al7075 alaşım (a) ve B₄C (b) tozlarına ait XRD örgü desenleri

3.2. Yoğunluk ve Sertlik Sonuçları

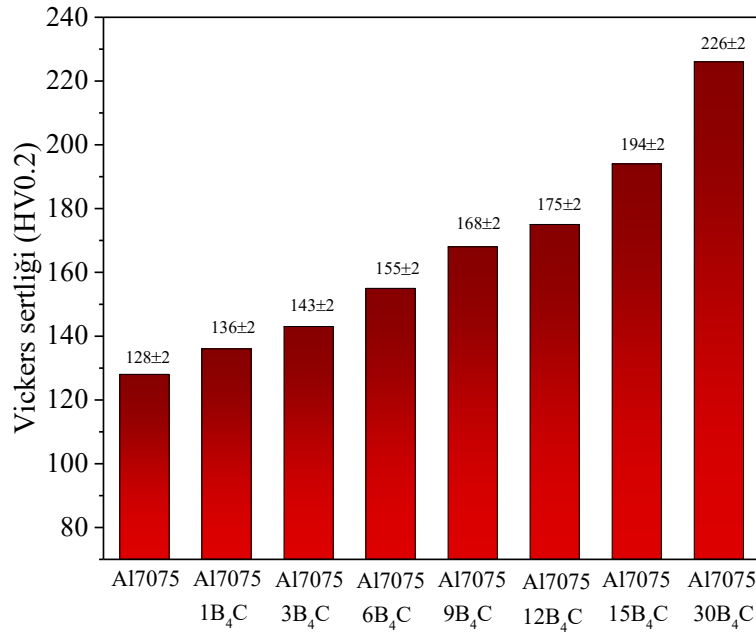
Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlerin deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri Tablo 3'te verilmiştir. En yüksek yoğunluk (2,63 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%0,5) %30 B₄C katkı oranında elde edilmiştir. Çalışmada ağırlıkça %30'dan daha fazla B₄C takviyesi yapılmamıştır. Bunun sebebi, minimum takviye oranı ile yüksek mekanik ve tribolojik özelliklere sahip kompozit malzeme üretebilmektir. Ayrıca takviye oranının %30'u geçmesi durumunda bor karbür partikülleri yapı içerisinde homojen dağılmayabilmektedir. Bu durum da üretilen malzemenin özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle Al7075 matrise ilave edilebilecek maksimum bor karbür katkı oranı %30'dur (Lee ve ark., 2021; Şenel ve ark., 2022).

Tablo 3 incelendiğinde; bor karbür katkı oranının artmasıyla kompozitin yoğunluk değerinin arttığı ve gözeneklilik oranının azaldığı görülmektedir. Bu durum bor karbür katkısının, kompozitin genel özellikleri üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır (Çelik ve Seçilmiş, 2017). Bor karbür, yüksek yoğunluğa sahip bir malzeme olduğundan dolayı katkı oranının artmasıyla kompozit yapının yoğunluğunu artırmıştır. Ayrıca sıcak presleme işlemi sırasında sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulanması ile yapı içerisindeki taneler birbirlerine yaklaşarak taneler arası boşlukların kapanmasına yol açmıştır. Böylece kompozitin gözeneklilik oranı, hem bor karbür katkı oranının artırılması hem de sıcak presleme işleminin uygulanması ile azalmıştır.

Tablo 3. Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlerin deneysel yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri

Malzeme	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik Oranı (%)
Al7075	2,59	9,7
Al7075-1B ₄ C	2,6	7,4
Al7075-3B ₄ C	2,61	6,6
Al7075-6B ₄ C	2,61	6
Al7075-9B ₄ C	2,62	5,1
Al7075-12B ₄ C	2,62	4,5
Al7075-15B ₄ C	2,63	3,6
Al7075-30B ₄ C	2,63	0,5

Şekil 6’da Al7075 ve Al7075-B₄C kompozitlerin katkı oranına bağlı olarak Vickers sertlik değerleri verilmiştir. En yüksek sertlik değeri (226 HV) Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir. Bu kompozitte sertlik değeri Al7075 alaşımının sertlik değerine kıyasla (128 HV) %76,6 oranında artmıştır. Şekil 6 incelendiğinde bor karbür katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertlik değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir (Topcu ve ark., 2009). Bu durum yüksek sertliğe sahip olan bor karbür partiküllerinin kompozitin sertliğini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu sert partiküller yapı içerisinde dislokasyon hareketine engel olarak kompozitin dayanımını artırmıştır. Dislokasyon hareketinin kısıtlanması malzemenin plastik deformasyona karşı direncini artırmaktadır. Böylelikle malzemenin dayanımında artış meydana gelmektedir.



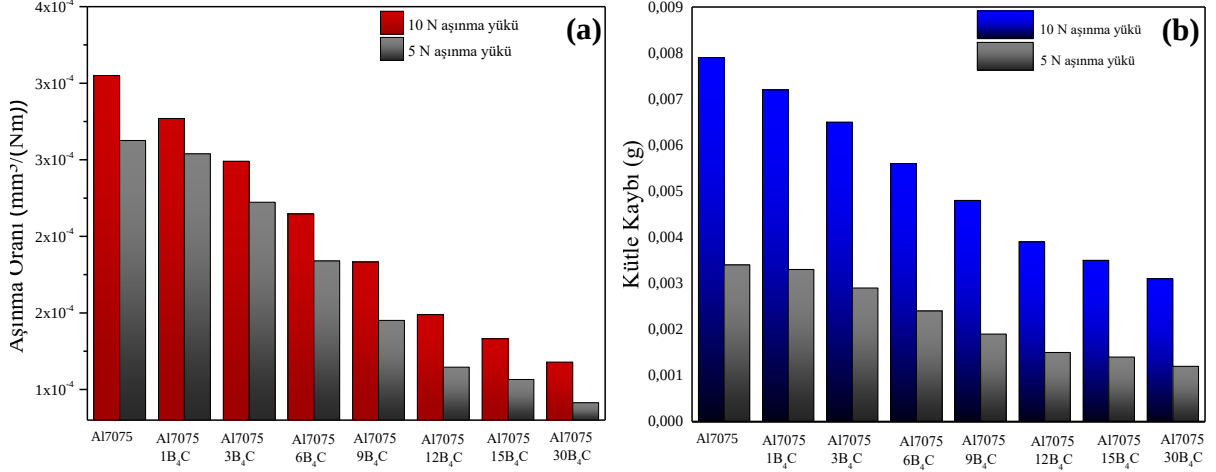
Şekil 6. Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlerin Vickers sertlik değerleri

3.3. Tribolojik Test Sonuçları

Üretilen Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlerin aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde uygulanan yükün artmasıyla aşınma oranı ve kütle kaybı artmıştır. Çünkü yükün artması ile numune ve aşındırıcı disk arasındaki temas alanı genişlemekte ve daha fazla aşınma meydana gelmektedir. En yüksek aşınma oranı (0,00031 (mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0,0079 g) Al7075 alaşımında 10 N yüklemde belirlenmiştir. En düşük aşınma oranı (0,000091 (mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0,0012 g) ise Al7075-30B₄C kompozitte 5 N yüklemde elde edilmiştir. Takviye elemanının yüksek sertlik özelliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitin aşınma oranı ve kütle kaybı azalmıştır. Bundan dolayı bor karbürün Al7075 matrisli kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Baradeswaran ve Perumal, 2013). Kompozitler arasında en yüksek sertlik değeri %30 B₄C katkısında elde edilmiştir. Bu nedenle en düşük aşınma oranı da Al7075-30B₄C kompozitte tespit edilmiştir. Bu durum Archard eşitliği ile açıklanabilmektedir (Eşitlik 8). Eşitlikte yer alan F aşınma sırasında uygulanan yükü, L kayma mesafesini ve H sertliği ifade etmektedir. Archard

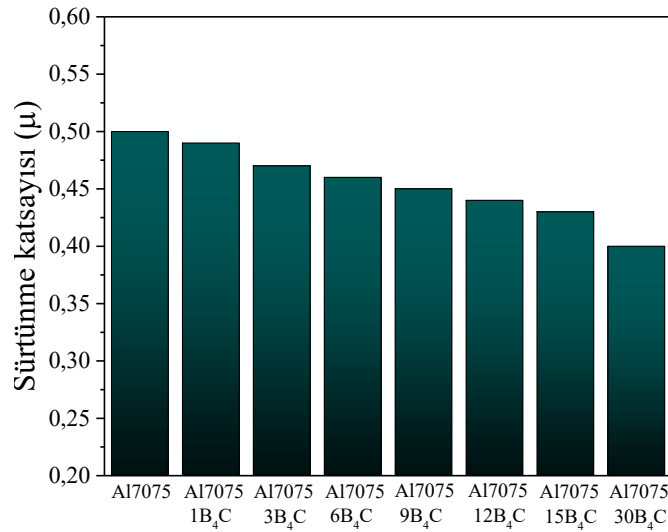
eşitliğine göre sertlik ve aşınma oranı ters orantılıdır. Başka bir ifadeyle sertliği yüksek olan bir malzemenin aşınma oranı daha düşüktür (Valizade ve Farhat, 2024).

$$\Delta V = F \times \mu \times \frac{L}{H} \quad (8)$$



Şekil 7. Al7075 ve Al7075-B₄C kompozitlerin (a) aşınma oranı ve (b) kütle kaybı değerleri

Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlere ait sürtünme katsayıları Şekil 8’de verilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı (0,5) aşındırıcı disk (paslanmaz çelik) ile Al7075 alaşımı arasında belirlenmiştir. Bu durum aşınmanın Al7075 alaşımında daha fazla olduğunu doğrulamaktadır. En düşük sürtünme katsayısı (0,4) ise Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir. Bunun sebebi takviye partiküllerinin kompozitin aşınma direncini iyileştirmesi ve buna bağlı olarak kompozit ile aşındırıcı disk arasında sürtünmenin azalmasıdır.

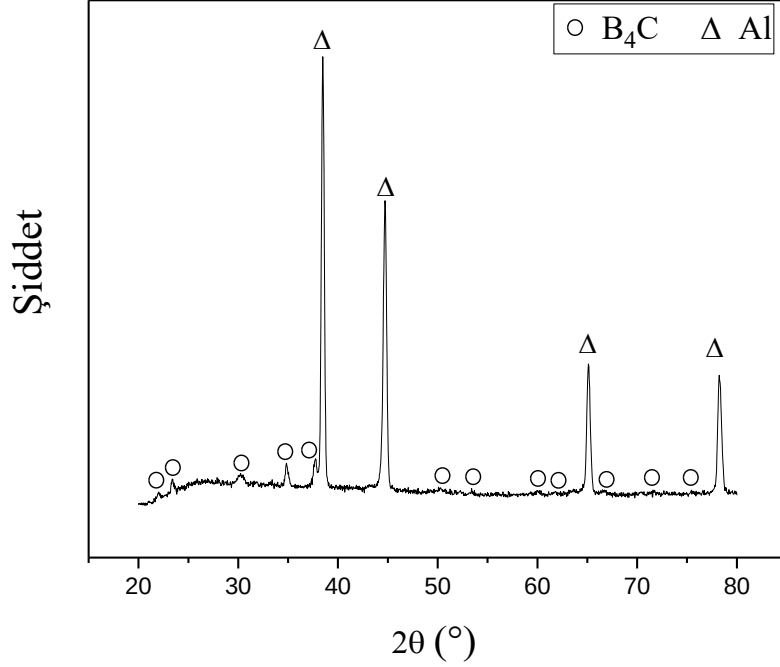


Şekil 8. Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri

3.4. Kompozitlerin Karakterizasyonu

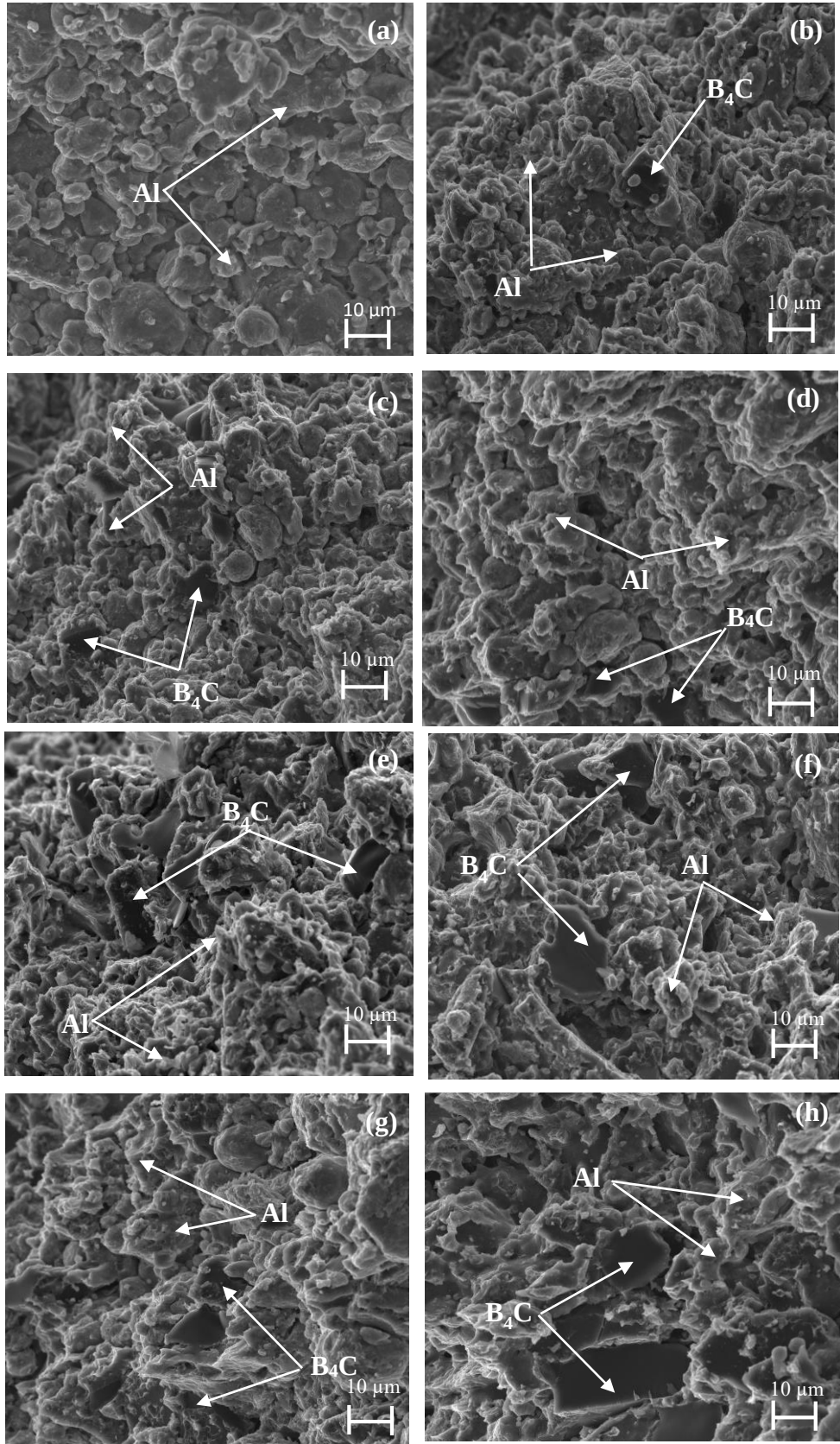
Al7075-30B₄C kompozitin X-ışını kırınım analiz sonuçları Şekil 9’da verilmiştir. Bu analiz ile kompozit içerisindeki fazlar belirlenmiştir. Şekilde alüminyum fazı “Δ” sembolüyle, bor karbür fazı “○” sembolü

ile ifade edilmiştir. XRD analizi incelendiğinde tüm fazların yalnızca alüminyum ve bor karbürü ait olduğu görülmektedir. Bu durum kompozit içerisinde Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı anlamına gelmektedir. İkincil fazlar sert ve kırılgan yapılarından dolayı malzemenin yapısal bütünlüğünü bozarak mekanik ve tribolojik özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Ancak yapılan çalışmada doğru üretim parametreleri seçilerek ikincil faz oluşumu önlenmiştir.



Şekil 9. Al7075-30B₄C kompozite ait XRD grafiği

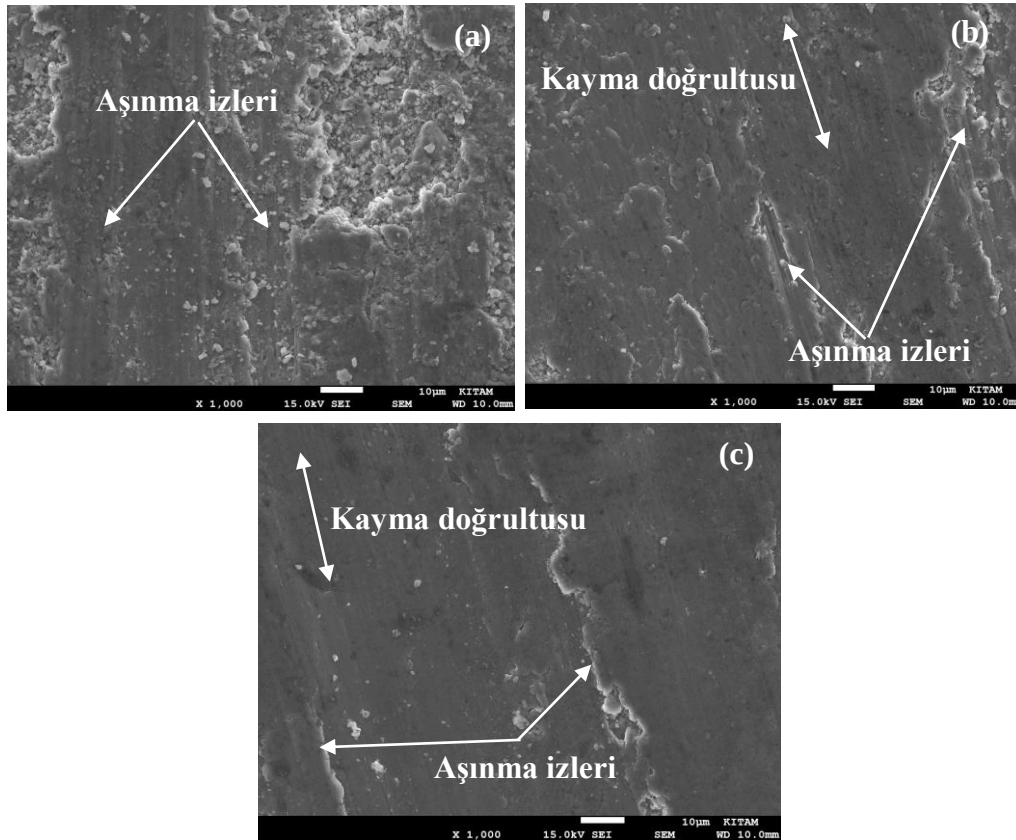
Al7075 alaşımı, Al7075-B₄C kompozitlere ait SEM görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde; bor karbür partiküllerinin matris yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Katkı oranının artmasıyla mikroyapıdaki gözenekliliğin azaldığı ve daha yoğun bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. Mikroyapı yoğunluğu kompozit malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerinin gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle en iyi mekanik ve tribolojik özellikler %30 B₄C katkısında elde edilmiştir. Ayrıca sıcak presleme işleminin etkisi ile taneler arasında boyun oluşumu tespit edilmiştir. Böylelikle taneler birbirine daha iyi bağlanmış ve kompozitin dayanımında artış meydana gelmiştir.



Şekil 10. Al7075 alaşımlına (a), Al7075-1B₄C (b), Al7075-3B₄C (c), Al7075-6B₄C (d), Al7075-9B₄C (e), Al7075-12B₄C (f), Al7075-15B₄C (g) ve Al7075-30B₄C (h) kompozitlere ait SEM görüntüleri

3.5. Aşınmış Yüzey Görüntüleri

Al7075 alaşımı ve Al7075-B₄C kompozitlere ait aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 11’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde; aşınma sırasında abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu görülmektedir. Abrasif aşınma mekanizması, aşındırıcı malzemenin sert partiküller veya pürüzlü yüzey ile yumuşak yüzeyi çizerek malzeme kaldırması ile meydana gelmektedir (Pul, 2025). Yumuşak yüzeyden malzeme kaldırılması ile oluk, çukur veya çizikler oluşmaktadır. Kompozitlere ait SEM görüntülerinde de oluk ve çizikler gözlemlenmiştir. Bu nedenle aşınma olayının abrasif aşınma mekanizması ile gerçekleştiği ifade edilebilmektedir. Ayrıca Al7075 alaşımına ait yüzey görüntüsünde aşınma izlerinin daha derin olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi; aşındırıcı diskin Al7075 alaşımına ait yumuşak yüzeyden, bor karbür takviyeli kompozitlere göre daha fazla malzeme kaldırmasıdır. Bu sebeple Al7075 alaşımında plastik deformasyon izleri daha belirgindir. Ancak bor karbür takviyesi ile malzemenin sertliği artmış ve aşınmaya karşı daha fazla direnç kazanmıştır. Bundan dolayı en zayıf aşınma izleri Al7075-30B₄C kompozitte elde edilmiştir. SEM görüntüleri mekanik ve tribolojik test sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 11. Al7075 alaşımına (a), Al7075-15B₄C (b) ve Al7075-30B₄C (c) kompozitlere ait aşınmış yüzey SEM görüntüleri

4. Sonuçlar

Yürütülen bu çalışmada Al7075 matrisli B₄C takviyeli (%1, 3, 6, 9, 12, 15 ve 30 katkı oranlarında) kompozitler toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Üretilen

kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Al7075-B₄C kompozitlere uygulanan testler sonucunda en yüksek yoğunluk (2,63 g/cm³) Al7075-30B₄C kompozitte belirlenmiştir. Bu kompozitte yoğunluk değeri Al7075 alaşımına kıyasla %1,54 oranında artmıştır. Al7075-3B₄C, Al7075-9B₄C ve Al7075-12B₄C kompozitlerde Al7075 alaşımına kıyasla yoğunluk değeri sırasıyla %0,77, %1,16 ve %1,16 oranında artmıştır. En yüksek artış %30 B₄C katkı oranında elde edilmiştir. Bu durum, bor karbür partiküllerinin yoğun yapısından ve taneler arasındaki gözenekliliği azaltan sıcak presleme işleminin etkisinden kaynaklanmaktadır.
- Al7075-B₄C kompozitleri arasında en yüksek sertlik değeri (226 HV) %30 B₄C katkı oranında tespit edilmiştir. Al7075 alaşımına kıyasla %30 B₄C katkı oranında sertlik değerlerinde %76,6 oranında artış meydana gelmiştir. Al7075-3B₄C, Al7075-9B₄C ve Al7075-12B₄C kompozitlerde Al7075 alaşımına kıyasla sertlik değeri sırasıyla %11,71, %31,25 ve %36,71 oranında artmıştır. En yüksek artış %30 B₄C katkı oranında elde edilmiştir. Sertlikteki bu artış, yüksek sertliğe sahip olan B₄C partiküllerinin dislokasyon hareketlerini kısıtlaması ve kompozitin plastik deformasyona karşı direncini artırmasından dolayıdır.
- Üretilen kompozitler arasında en düşük aşınma oranı (0,000091 mm³/(Nm)), en düşük kütle kaybı (0,0012 g) ve en düşük sürtünme katsayısı (0,4) Al7075-30B₄C kompozitte tespit edilmiştir. Takviye elemanının yüksek sertliğinin kompozitin aşınmaya karşı direncini artırdığı belirlenmiştir. Bu sert partiküller aşınmaya karşı etkili bir bariyer oluşturarak malzeme yüzeyinin deformasyonunu azaltmıştır.
- SEM görüntüleri incelendiğinde ise katkı oranının artırılmasından dolayı taneler arasındaki boşluğun azaldığı ve tanelerin birbirlerine daha iyi bağlandığı görülmektedir. Böylelikle kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği doğrulanmıştır.
- Bor karbür katkı oranındaki artış, Al7075 matrisli kompozitlerin hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini iyileştirmiştir. Ancak, %30'un üzerindeki katkı oranlarında homojenliğin azalarak kompozitin özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir. Bu nedenle, optimum katkı oranı %30 olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak Al7075 matrise ağırlıkça %30B₄C katkısı kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Gelişmiş özelliklere sahip olan Al7075-B₄C kompozitlerinin yüksek dayanım ve yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalar için ideal bir malzeme olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Ahmad S., Tian Y., Wahab A., Kumar R., Iqbal F., Dangi S., Alansari A., Prakash C., Kit C. Experimental studies on mechanical properties of Al-7075/TiO₂ metal matrix composite and its tribological behaviour. *Journal of Materials Research and Technology* 2024; 8539–8552.
- Akgümüş GD., Bayraktar C., Hoşkun M. A review on processing, mechanical and wear properties of Al matrix composites reinforced with Al₂O₃, SiC, B₄C and MgO by powder metallurgy method. *Journal of Materials Research and Technology* 2024; 1132–1150.
- Al Njjar A., Mazloun K., Sata A. Optimization of powder metallurgy parameters for improving the major properties of AA7075/SiC composites for aerospace applications. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2024; 1-14.
- Altuntaş, O. Taguchi based gray relational analysis of production parameters of Al7075/B₄C/GNP's hybrid composites. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 2023;11(3): 850-856.
- Arık H. Al-Si₃N₄ toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 2019; 7(4): 776-787.
- Bai S., Perevoshchikova N., Sha Y., Wu X. The effects of selective laser melting process parameters on relative density of the AlSi10Mg parts and suitable procedures of the archimedes method. *Applied Sciences* 2019; 9(3).
- Baradeswaran AEPA., Perumal AE. Influence of B₄C on the tribological and mechanical properties of Al 7075–B₄C composites. *Composites Part B: Engineering* 2013; 54: 146-152.
- Cheng C., Reddy KM., Hirata A., Fujita T., Chen M. Structure and mechanical properties of boron-rich boron carbides. *Journal of the European Ceramic Society* 2017; 37(15): 4514–4523.
- Çelik YH., Seçilmiş K. Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B₄C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology* 2017; 28(9): 2218-2224.
- Doğan H., Mutlu Y. Production of B₄C reinforced composite materials and investigation of their bending strength. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences* 2023; 9(2): 323-330.
- Gaylan Y., Avar B., Panigrahi M., Aygün B., Karabulut A. Effect of the B₄C content on microstructure, microhardness, corrosion, and neutron shielding properties of Al–B₄C composites. *Ceramics International* 2023; 49(3): 5479-5488.
- Gök DA., Bayraktar C., Hoşkun M. A review on processing, mechanical and wear properties of Al matrix composites reinforced with Al₂O₃, SiC, B₄C and MgO by powder metallurgy method. *Journal of Materials Research and Technology* 2024.
- Görmez AE. The production of B₄C reinforced metal matrix composite from waste AZ91 magnesium

- alloy using the ball milling method. *Journal of New Results in Science* 2024; 13(1): 36–46.
- Hynes NRJ., Raja S., Tharmaraj R., Pruncu CI., Dispinar D. Mechanical and tribological characteristics of boron carbide reinforcement of AA6061 matrix composite. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2020; 42(4): 1–11.
- Kantheti PR., Meena KL., Chekuri RBR. Experimental investigation on mechanical and tribological behavior features of gr/B₄C reinforced AA7075 alloy matrix using induction stir casting. *Cogent Engineering* 2024; 11(1).
- Karakoç H., Bilgin M., Karabulut, Ş. Study on the friction drilling behaviors and tribological properties of aluminum matrix composites. *Materials Today Communications* 2024; 38.
- Karakoç H. Toz metal Al7075/B₄C/Si₃N₄ kompozit malzemelerin üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi* 2020; 23(4): 1141-1151.
- Kumar JP., Smart DSR., Manova S., Akinwande AA., Kumar MS. Mechanical and tribological assessment of AA7075 reinforced Si₃N₄/TaC/Ti hybrid metal matrix composites processed through stir casting process. *Advances in Materials and Processing Technologies* 2024; 10(3): 2331–2353.
- Lee D., Kim J., Park B., Jo I., Lee SK., Kim Y., Lee SB., Cho S. Mechanical and thermal neutron absorbing properties of B₄C/aluminum alloy composites fabricated by stir casting and hot rolling process. *Metals* 2021; 11(3): 413.
- Pul M. Analysis of the effect of boron carbide amount on mechanical, thermal, and electrical properties of copper based boron carbide added composites. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2024; 1-13.
- Pul M. Magnezya takviyeli 7075 alüminyum alaşımı matrisli kompozitlerde üretim parametrelerinin abrasif aşınma davranışına etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2025; 27(79): 1-10.
- Raksha MS., Adaveesh B., Nagaral M., Boppana SB., Anjinappa C., Khan MS., Wahab MOA., Islam S., Bhardwaj V., Palavalasa RK., Khan MA., Razak A. Impact of boron carbide particles and weight percentage on the mechanical and wear characterization of Al2011 alloy metal composites. *ACS Omega* 2023; 8(26): 23763–23771.
- Ramesh BR., Rajendran C., Saiyathibrahim A., Rajkumar V. Influence of B₄C and ZrB₂ reinforcements on microstructural, mechanical and wear behaviour of AA 2014 aluminium matrix hybrid composites. *Defence Technology* 2024; 40: 242-254.
- Sadhu KK., Mandal N., Sahoo RR. SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review. *Journal of Manufacturing Processes* 2023; 10–43.
- Srinivas J., Kumar SB., Sekar SD., Sekar S., Jeevamalar J., Saravanan R., Anbuechezhiyan G. Effect of varying temperature on sintering SiC/B₄C reinforced Al6061 alloy composites using vacuum sintering method. *Materials Today: Proceedings* 2024.
- Şenel, MC., Demir M. Effect of induction heat treatment process and graphene/B₄C amount on the

- tribological and mechanical properties of Al6061 hybrid composites. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society 2023; 75(7): 2554-2568.
- Şenel MC., Kanca Y., Gürbüz M. Reciprocating sliding wear properties of sintered Al-B₄C composites. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 2022; 29(6): 1261-1269.
- Şenel MC., Taşkın A., Demir M., Gürbüz M. The effect of induction heat treatment on mechanical and tribological properties of Si₃N₄ and graphene reinforced Al6061 matrix composites. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2024; 39(3): 1567–1581.
- Singh NK., Sethuraman B. Development and characterization of aluminium AA7075 hybrid composite foams (AHCFs) using SiC and TiB₂ reinforcement. International Journal of Metalcasting 2024; 18(1): 212–227.
- Topcu I., Gulsoy HO., Kadioglu N., Gulluoglu AN. Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites. Journal of Alloys and Compounds 2009; 482(1-2): 516-521.
- Valizade N., Farhat Z. A review on abrasive wear of aluminum composites: mechanisms and influencing factors. Journal of Composites Science 2024; 8(4).
- Zhao Q., Yu L., Xi L., Ren L. Microstructure and dry-sliding wear behavior of B₄C ceramic particulate reinforced Al 5083 matrix composite. Metals 2016; 6(227): 1.