



## Al 6061/B<sub>4</sub>C/GNP hibrit kompozitlerde B<sub>4</sub>C ve GNP takviye miktarlarının abrasif aşınma davranışına etkisi

### The effect of B<sub>4</sub>C and GNP reinforcement amounts on abrasive wear behavior in Al 6061/B<sub>4</sub>C/GNP hybrid composites

Muharrem Pul<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

#### Öz

Bu deneysel çalışmada aşınma davranışlarının incelemek amacıyla, vorteks yöntemi kullanılarak Al 6061 matrisli B<sub>4</sub>C ve GNP takviyeli hibrit kompozitler üretilmiştir. Daha sonra pin-on disk yöntemiyle, aşındırıcı zımpara kullanılarak abrasif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C kompozit numunelerin sertlik değerlerini ve aşınma dayanımları yükselmiştir. GNP oranının artmasıyla, sertlik değerleri ve aşınma kayıplarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum grafenin kuru yağlayıcı özelliği ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca kompozit yapı içerisindeki takviye topraklanmasına bağlı olarak oluşan porozitenin mekanik özellikler üzerinde olumsuz yönde etki yaptığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, deneyler sırasında kompozit yapı içerisinde kopan B<sub>4</sub>C parçacıklarının, zımparayla birlikte ikinci bir aşındırıcı gibi davranarak, aşınma kayıplarının artmasında etkili olduğu değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hibrit kompozit, Al 6061, B<sub>4</sub>C, GNP, Abrasif aşınma

#### 1 Giriş

Günümüz teknolojisinde kullanılan mühendislik malzemelerinin yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, hafiflik, yüksek korozyon dayanımı, yüksek aşınma direnci, ve ekonomiklik gibi özellikleri bir arada taşınması istenmektedir. Mevcut monolitik malzemelerin bu özelliklerin tümünü karşılaması çok zordur. Bu sebepten dolayı son yıllarda kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Kompozit malzemeler neredeyse tüm endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle havacılık, savunma, otomotiv, spor aletleri, marine, tıp ve inşaat sektöründe çok farklı özelliklerde kompozit malzemeler her geçen gün giderek artan miktarlarda kullanılmaktadır. Kompozitler genel olarak metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olmak üzere üç ana grupta toplanmıştır. Metal matrisli kompozitler temel malzemeyi metalin oluşturduğu ve içerisine genellikle seramik özellik taşıyan malzemelerin ilave edildiği kompozit türüdür. Temel matrise ikiden fazla malzemenin takviye edildiği kompozitler ise hibrit olarak adlandırılmaktadırlar. Matris malzemesi takviye elemanlarını bir arada tutan ve kompozit yapının esas özelliğini taşır. Takviye elemanları ise kompozit yapıya

#### Abstract

In this experimental study, B<sub>4</sub>C and GNP reinforced hybrid composites with Al 6061 matrix were produced using the vortex method to examine the wear behavior. Then, abrasive wear tests were carried out using the pin-on disc method, using abrasive sandpaper. According to the test results, the hardness values and wear resistance of the B<sub>4</sub>C composite samples in the structure increased. The hardness values and wear losses decreased with the increase of the GNP ratio. This situation has been associated with the dry lubricating property of graphene. In addition, it was evaluated that the porosity formed due to agglomeration of the reinforcement in the composite structure had a negative effect on the mechanical properties. In addition, it was evaluated that the B<sub>4</sub>C particles, which were separated from the composite structure during the experiments, acted as a second abrasive together with the sandpaper and were effective in increasing the wear losses.

**Keywords:** Hybrid composite, Al 6061, B<sub>4</sub>C, GNP, Abrasive wear

daha yüksek ve gelişmiş teknik özellikler kazandırmakla görevlidir.

Metal matrisli kompozitlerde alüminyum, magnezyum ve çinko en popüler malzemelerdir [1]. Bu matris malzemelerinin tercih edilmesindeki en önemli sebep, üstün mekanik özelliklerinin yanında düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Alüminyum alaşımları, özellikle havacılık, otomotiv, denizcilik ve yapısal uygulamalar alanında, hafiflik, iyi ısıl iletkenlik ve korozyonun büyük ölçüde gerekli olduğu çeşitli ileri mühendislik uygulamalarında kullanılan matris malzemelerdir. Ancak düşük aşınma direncine sahip olması alüminyum alaşımlarının önemli bir dezavantajdır [2]. Dolayısıyla yüksek performanslı tribolojik uygulamalarda alüminyum ve alaşımlarının kullanımı sınırlanmaktadır. Ancak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, SiC, B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> gibi sert takviye partikülleri içeren alüminyum matrisli kompozitler (AMK'ler), geleneksel alüminyum alaşımlarına göre daha iyi aşınma direncine sahiptir [3]. Yapılan çalışmalarda özellikle kuru kayma koşulları altında, AMC içerisindeki SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC ve B<sub>4</sub>C gibi seramik partiküllerin, alüminyum matristedeki plastik deformasyon miktarını sınırlayan etki yaptığı ve aşınma dayanımını arttırmak için kullanıldığı ifade edilmektedir [4]. Ancak

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mpul@kku.edu.tr (M. Pul)

Geliş / Received: 08.07.2022 Kabul / Accepted: 19.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1142512

takviye fazının oranı, şekli, boyutu ve türü, bu tür malzemelerin direncini artırmak için oldukça önemlidir. Takviye fazının özellikleri, üretilen AMK'lerin kullanım amacı ile doğrudan ilişkilidir. Çoğu sürtünmeye maruz kalan AMK'ler başta otomotiv sanayi olmak üzere makine parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [5].

Alüminyum matrisli ve seramik takviyeli kompozitler (AMK), monolitik malzemelere göre daha üstün teknik özellikler gösterse de her geçen gün artan teknolojik ihtiyaçlar karşısında bazı uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Bu ihtiyaçlar nedeniyle, hibrit metal matrisli kompozitler üzerine, yapılan araştırmalar son zamanlarda ilgi çekmekte ve giderek artmaktadır [6]. Özellikle otomotiv endüstrisi ve diğer yapısal uygulamalarda kullanılmak üzere  $Al_2O_3$ , TiC,  $TiB_2$ ,  $B_4C$ , TiN,  $Si_3N_4$ , grafit ve endüstriyel atık gibi çeşitli partikül takviyeli alüminyum bazlı hibrit kompozitler, çeşitli potansiyel uygulamalar için tasarlanmış ve geliştirilmiştir [7]. Yapılan çalışmalarda ikinci takviye elemanı olarak kullanılan malzemelerde daha çok grafit, grafen, karbon nanotüp gibi nano malzemelerin tercih edildiği görülmektedir [8-10]. Özellikle tribolojik performansın geliştirilmesi istenen uygulamalarda grafen partiküllerinin katı yağlayıcı olarak hareket ettiği ve içinde bulunduğu kompozit malzemenin kendi kendini yağlayan özelliğe olduğu bildirilmektedir. Nanometrik partiküllerle takviye edilen kompozitlerin, daha kaba partiküllerle takviye edilenlerden daha üstün olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle, nano parçacıklar içeren hibrit kompozitler, yeni nesil AMK'ler olarak kabul edilmektedir [3].

AMK'ler çok farklı teknikler ile üretilmektedirler. Üretim yöntemleri arasında karıştırmalı döküm, alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesi için ilgi çekici bir işleme yöntemidir. Karıştırmalı döküm genellikle, önemli arayüz reaksiyonuna neden olabilen uzun süreli sıvı takviye temasını içerir. Bu yöntemde oksit yüzdesi %4'e kadar artırılarak kompozit yapının sertlik artırılabilir [11]. Karıştırmalı döküm işlemi, eriyiğe karışma performansı nedeniyle, metal matrisin takviye partiküllerini en iyi şekilde ıslatarak matris-takviye bağlanmasını sağlar. Son araştırmalarda karıştırma hızı, karıştırma süresi, erimiş metalin sıcaklığı, kalıbın ön ısıtma sıcaklığı ve parçacıkların tutarlı birleşmesi gibi uygun parametrelerin seçilmesiyle iyi ıslatma ve standartlaştırılmış karıştırmanın gerçekleştirilebileceği belirtmektedir [12]. Ayrıca kompozit üretim yöntemleri arasında karıştırmalı döküm diğer yöntemlere göre nispeten ucuz ve uygulanabilirliği yüksek olduğu için tercih edilmektedir.

Bu deneysel çalışmada takviye elemanı olarak kullanılan ve karbür seramikler grubunda yer alan  $B_4C$ , elmas ve CBN'den sonra en sert üçüncü malzeme olarak bilinmektedir. Özellikle savunma sanayiinde koruyucu zırh plakalarında, ulaştırma sektöründeki fren balatalarında, havacılık ve savunma sektöründe yüksek aşınma dayanımı istenen parçaların yapımında tercih edilmektedir. Dolayısıyla yapılan çalışmada alüminyum gibi yumuşak ve sünek bir metalle bir araya getirilen  $B_4C$ 'ün oluşturduğu kompozit malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği davranışın incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak Al 6061 matrisli,

$B_4C$  ve nano grafen plaka (GNP) takviyeli hibrit kompozitler, farklı takviye oranlarında üretilmiştir. Üretilen Kompozit malzemelerin abrasif aşınma deneyleri, sertlik ve porozite ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler mikroskop görüntüleriyle birlikte değerlendirilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

Bu deneysel çalışmada kimyasal bileşimi % 0.7 Fe, 0.40-0.80 Si, % 0.60-1.10 Cu, %0.15 Mn, %0.25 Zn, %0.04-0.35 Cr olan Al 6061 alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak, hibrit kompozit yapıyı oluşturmak için  $B_4C$  (Borkarbür) ve GNP (nano grafen plaka) takviye elemanları olarak kullanılmıştır. Hibrit kompozit numunelerin üretimi karıştırmalı döküm (vorteks) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozitlerin üretilmesinde kullanılan malzemelere ait bazı teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel malzemelerin teknik özellikleri

| Al 6061        |                        |
|----------------|------------------------|
| Yoğunluk       | 2.70 g/cm <sup>3</sup> |
| Sertlik        | 120 HKN                |
| Erime Derecesi | 650°C                  |
| Çekme Dayanımı | 310 MPa                |
| $B_4C$         |                        |
| Yoğunluk       | 2.52 g/cm <sup>3</sup> |
| Sertlik        | 276 HKN                |
| Erime Derecesi | 2650°C                 |
| Tane Boyutu    | 40-60 µm               |
| GNP            |                        |
| Yoğunluk       | 1.19 g/cm <sup>3</sup> |
| Çekme Dayanımı | 130 GPa                |
| Erime Derecesi | 3600°C                 |
| Tane Boyutu    | 5 nm -18 µm            |

İlk etapta külçe Al 6061 matris malzemesi karıştırmalı döküm ünitesindeki potaya konularak 750°C'de eritme işlemi yapılmıştır. Alüminyum ile  $B_4C$  arasındaki ıslatmayı iyileştirmek amacıyla %1 ağırlık oranındaki saf magnezyum (Mg) pota içerisine eklenmiştir. Daha sonra sıvı haldeki Al 6061 matris malzemesi için 900 rpm hızda karıştırma işlemi başlatılarak ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş olan takviye elemanları  $B_4C$  ve GNP kontrollü olarak pota içerisine ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi 10 min süreyle devam ettirilerek tamamlanmış ve kompozit sıvı karışım çelik kalıplara dökülmüştür. Bu işlemler tüm takviye oranındaki kompozit malzemeler için ayrı ayrı tekrarlanarak 13 farklı kompozit deneysel numunesi üretimi tamamlanmıştır. Hibrit kompozitlerin üretimine esas olan deneysel tasarımı ve kullanılan matris malzemesi Al 6061 ile takviye elemanları  $B_4C$  ve GNP'nin ağırlıkça karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Üretimi tamamlanan kompozit malzemelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla dijital mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri çekilmiştir. Üretilen kompozit numunelerden yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü ve abrasif aşınma deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra üretilen tüm kompozit numunelerin deneysel yoğunluğu 0.001 g hassasiyetindeki elektronik terazi ile belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Hibrit kompozit karışım oranları

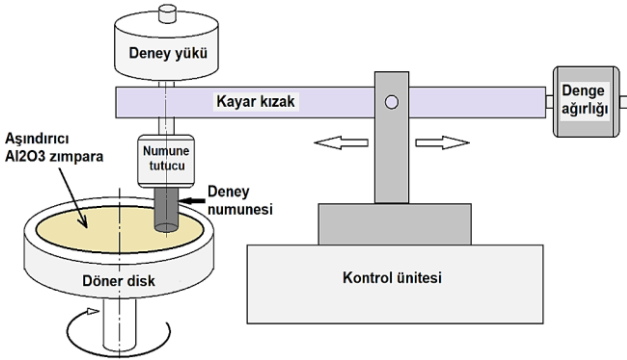
| Numune | % wt Al                     | % wt B <sub>4</sub> C | % wt GNP |      |
|--------|-----------------------------|-----------------------|----------|------|
|        |                             |                       |          | 6061 |
| 1      | Al 6061                     | 100                   | -        | -    |
| 2      | 5 B <sub>4</sub> C          | 95                    | 5        | -    |
| 3      | 7 B <sub>4</sub> C          | 93                    | 7        | -    |
| 4      | 10 B <sub>4</sub> C         | 90                    | 10       | -    |
| 5      | 5 B <sub>4</sub> C+0,5 GNP  | 94,5                  | 5        | 0,5  |
| 6      | 5 B <sub>4</sub> C+1,0 GNP  | 94                    | 5        | 1,0  |
| 7      | 5 B <sub>4</sub> C+2,0 GNP  | 93                    | 5        | 2,0  |
| 8      | 7 B <sub>4</sub> C+0,5 GNP  | 92,5                  | 7        | 0,5  |
| 9      | 7 B <sub>4</sub> C+1,0 GNP  | 92                    | 7        | 1,0  |
| 10     | 7 B <sub>4</sub> C+2,0 GNP  | 91                    | 7        | 2,0  |
| 11     | 10 B <sub>4</sub> C+0,5 GNP | 89,5                  | 10       | 0,5  |
| 12     | 10 B <sub>4</sub> C+1,0 GNP | 89                    | 10       | 1,0  |
| 13     | 10 B <sub>4</sub> C+2,0 GNP | 88                    | 10       | 2,0  |

Deney numunelerinin teorik yoğunluğu karışım kuralına göre Eşitlik 1'e kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_{th} = \rho_m V_m + \rho_r V_r \quad (1)$$

$\rho_m$  matrisin yoğunluğu,  $V_m$  matrisin hacim oranı,  $\rho_r$  donatı yoğunluğu ve  $V_r$  donatının hacim oranıdır.

Sertlik ölçümlerinde *Brinell* yöntemi kullanılmıştır. Sertlik değerleri her numunenin 5 ayrı bölgesinden yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Abrasif aşınma deneylerinde pin on disk yöntemi kullanılmış olup, aşındırıcı olarak 240 mesh tane boyutundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zımpara kağıdı kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada esas amaç kompozit yapı içerisindeki takviye elemanlarının aşınma davranışı üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu sebepten abrasif aşınma deneylerinde sabit tük ve sabit kayma hızının kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak kayma mesafesinde iki farklı mesafenin kullanılması kararlaştırılmıştır. Buna göre abrasif aşınma deneyleri 40 N sabit yük altında, 1,0 ms<sup>-1</sup> aşınma hızında 100 m ve 200 m aşınma mesafelerinde yapılmıştır. Abrasif aşınma deney düzeneğinin şematik gösterilişi Şekil 1'de verilmiştir.

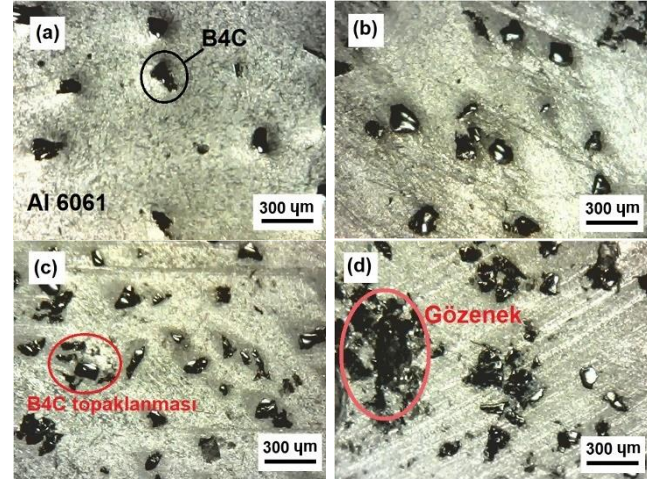


Şekil 1. Pin-on disk abrasif aşınma deney düzeneğinin şematik gösterilişi

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Mikroyapılar

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B<sub>4</sub>C/GNP takviyeli kompozitlerin mikroyapılarının ve takviye dağılımını incelemek amacıyla çekilen dijital mikroskop görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.

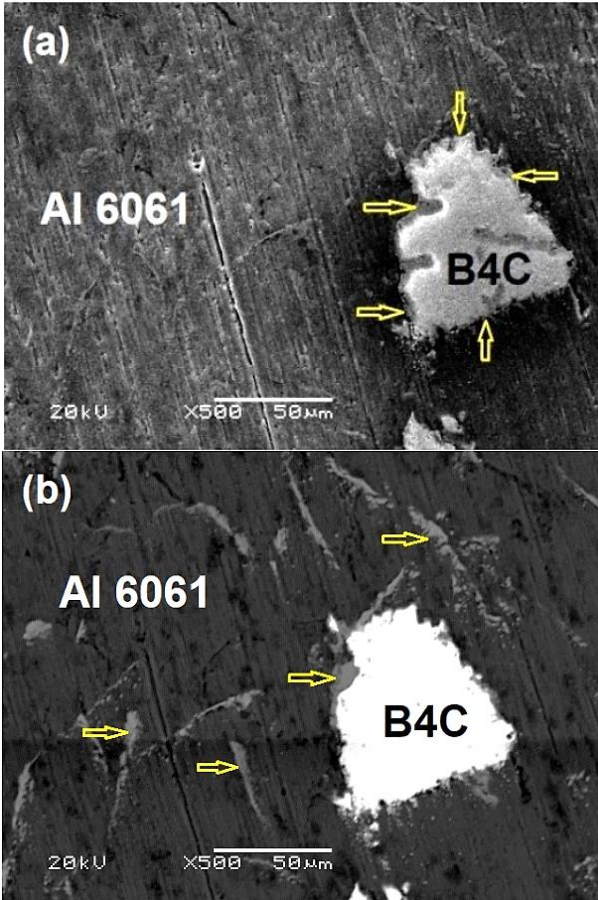


Şekil 2. Al 6061/B<sub>4</sub>C kompozitlerin mikroyapıları (a) %5 B<sub>4</sub>C takviyeli, (b) %7 B<sub>4</sub>C takviyeli, (c) %10 B<sub>4</sub>C takviyeli

Şekil 2'de yer alan dijital mikroskop görüntülerine bakıldığında kompozit yapı içerisindeki takviye elemanı B<sub>4</sub>C parçacıklarının dağılımı görülmektedir. B<sub>4</sub>C takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin giderek iyileştiği söylenebilir. Ancak Al 6061 matris malzemesi içerisindeki B<sub>4</sub>C parçacıklarının miktarındaki artışla birlikte yer yer takviye topaklanmalarının meydana geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 2-c). Takviye topaklanması aynı zamanda kompozit yapı içerisinde gözeke bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 2-d). B<sub>4</sub>C takviye topaklanmasının bu tür parçacık takviyeli kompozitlerde meydana gelen yapısal durum olduğu literatürde yer almaktadır [13]. AMK malzemelerin üretiminde kullanılan karıştırmalı döküm yönteminin bazı avantajlarının yanında, düşük yapısal homojenite ve düzensiz takviye dağılımı gibi bazı dezavantajları da olmaktadır. Özellikle karıştırma sırasında ve potadan kalıplara dökülmesi sırasında sıvı matris içerisindeki takviye parçacıklarının belli bir yöne doğru hareket etmesi sebebiyle yığılma veya topaklanma oluşmaktadır.

Topaklanmanın daha çok küçük B<sub>4</sub>C partiküllerinin bir araya gelmesiyle oluştuğu dikkat çekmektedir. Kompozit yapıyı oluşturan takviye elemanı B<sub>4</sub>C partiküllerinin eşit boyutta olmaması ve boyut aralığının geniş olması nedeniyle küçük B<sub>4</sub>C partiküllerinin sıvı matris içerisinde daha kolay sürüklenerek bir araya geldiği ve gözenekli bölgeleri oluşturduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca partikül boyutunun küçülmesiyle birlikte partikül toplam yüzey alanı artmakta olup gözenekliliğin artmasında ayrıca etki yapmaktadır [14]. Literatürde yer alan ve farklı partikül boyutlarının etkisinin incelendiği çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir [15]. Bu malzeme davranışı aynı zamanda kompozit yapı içerisinde gözenekli bölgelerin oluşmasına neden olarak kompozit yapının mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Takviye partiküllerinin homojen olmayan dağılımı, ıslanabilirlik, gözeneklilik ve eriyik ile takviye arasındaki kimyasal afinite, karıştırmalı döküm uygulamasında karşılaşılan önemli zorluklardır. Parçacıkların düzgün olmayan dağılımı, takviye parçacıkları

ile matris alaşımı eriyiği arasındaki yoğunluk farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Parçacıkların bir matris içinde düzgün dağılımı aynı zamanda dökme hızından, dökme sıcaklığından ve döküm yolluğunun biçiminden de etkilenir [16]. Kompozit yapıdaki gözeneklilik sertlik ölçümlerinde, çekme veya eğme deneylerinde kararsız veya sıradışı test sonuçlarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu tür metal matrisli ve seramik esaslı partikül takviyeli kompozitlerde karşılaşılan en önemli zorluklardan birisi de matris-takviye arasındaki düşük ıslatmadır. Yetersiz veya hiç olmayan ıslatma sonucunda kompozit yapının mekanik özelliklerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Islanabilirlik, sıvı eriyiğin katı bir yüzey üzerinde yayılma yeteneğidir. Düşük ıslanabilirliğe katkıda bulunan nedenlerden bazıları, yüzey alanının partiküllerin ortalama çapına oranının yüksek olmasıdır. Karıştırma, hidrojen oluşumu ve büzülme sırasında gaz sıkışması nedeniyle gözeneklilik ortaya çıkar [16]. Takviye ve matris malzemesinin yüzey enerjisi ve seramik parçacıkların yüzey temizliği, matris malzemesi ile takviye fazı arasındaki ıslanabilirliği etkileyen iki önemli faktördür. Ayrıca B<sub>4</sub>C takviye partikülleri yüzeyinde oluşabilecek sert oksit tabakasının temizlenerek ıslatmanın iyileştirilebileceği rapor edilmektedir [17]. Şekil 3'te B<sub>4</sub>C takviye elemanı ile Al 6061 matris malzemesi arayüzünü incelemek üzere çekilen SEM ve BSE görüntüleri verilmiştir.

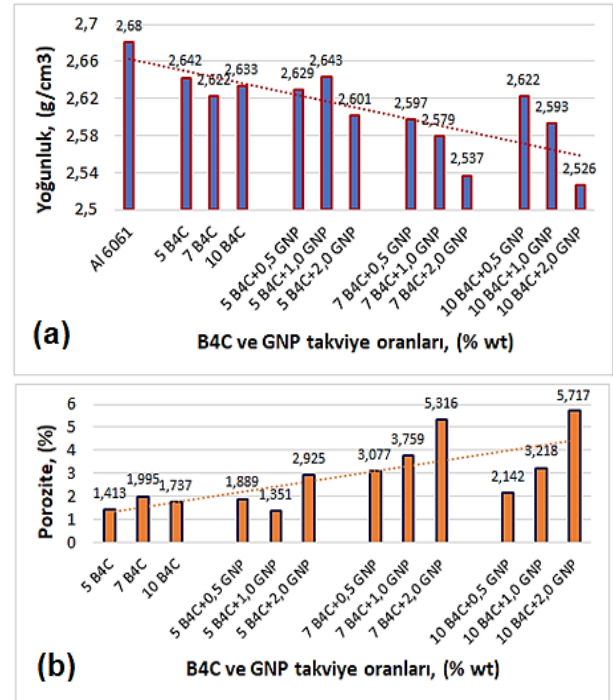


Şekil 3. Matris-takviye ara yüzeyi (a) SEM görüntüsü, (BSE) görüntüsü

Şekil 3'teki görüntüler incelendiğinde, Al 6061 matris ile B<sub>4</sub>C takviye elemanı arasında iyi sayılabilecek bir ıslatmanın olduğu söylenebilir. Zira matris-takviye arayüzünde gözle görünür seviyede boşluk veya çatlak oluşmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 3-a). Karıştırmalı döküm işlemi sırasında sıvı alüminyum içerisine Mg eklenmesi ile matris-takviye arasındaki ıslatmanın iyileştirildiği değerlendirilmektedir. Literatürdeki çalışmada magnezyum ilavesinin, katının yüzey enerjisini arttırdığı, sıvı matris alaşımının yüzey gerilimini azalttığı ve parçacık matrisinde katı-sıvı ara yüzey enerjisini azaltarak ıslatmayı arttırdığı ifade edilmektedir. Aynı çalışmada Mg ilavesinin ağırlıkça %1'in üzerine çıkarılması halinde kompozit bulamacın vizkozitesinin artacağı, bununla parçacık dağılımını zorlaştıracak rapor edilmektedir [18]. Ancak kompozit yapıyı oluşturan malzemelerin çok farklı termal davranışları sebebiyle, soğuma sırasında ara yüzeyde meydana gelen dislokasyonların daha açık renkte alüminyum fazlarını ve oksit tabakalarını oluşturduğu ifade edilebilir (Şekil 3-b).

### 3.2 Yoğunluk ve porozite

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B<sub>4</sub>C/GNP takviyeli kompozitlerin yoğunluk ölçümleri ve buna göre belirlenen porozite miktarlarına ait grafikler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. (a) Al 6061/B<sub>4</sub>C+GNP kompozitlerin yoğunluğu, (b) Al 6061/B<sub>4</sub>C+GNP kompozitlerin porozite miktarı

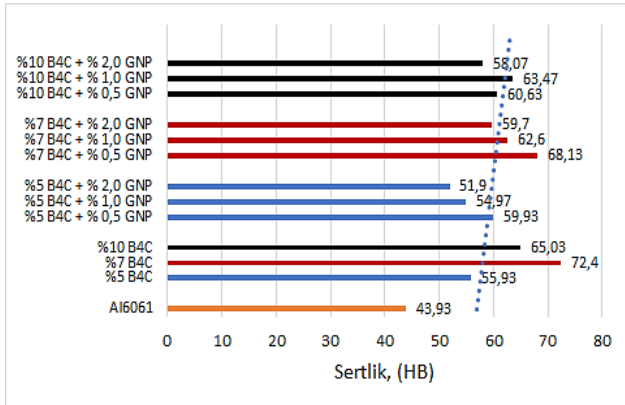
Şekil 4'teki grafiklere birlikte bakıldığında iki grafik arasındaki değerlerde ters orantı olduğu, yoğunluk düşerken porozitenin (gözeneklilik) yükseldiği dikkat çekmektedir. Kompozit yapı içerisinde oluşabilen gözeneklilik, yoğunlukla doğrudan ilişkilidir [19]. Bu beklenen bir malzeme davranışı olup literatürde benzer çalışmalarda benzer sonuçlar ifade edilmektedir [14, 15, 20, 21].

Kompozit yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C oranının artmasıyla yoğunluk değerleri azalırken, gözenek miktarlarının artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Literatürdeki bir çalışmada, artan B<sub>4</sub>C hacim fraksiyonu ile artan miktarda gözeneklilik görüldüğü ve B<sub>4</sub>C yüzey temas alanı arttıkça, gözenekliliğinde artış gösterdiği belirtilmiştir. Bu durum B<sub>4</sub>C partikül bölgelerindeki gözenek çekirdeklenmesine ve daha fazla partikül kümelenmesi nedeniyle engellenen sıvı metal akışına atfedilmiştir [19].

Grafiklerde göze çarpan diğer önemli husus ise hibrit yapının oluşmasının sağlayan GNP oranının artmasıyla gözenek miktarlarının önemli ölçüde yükselmiş olmasıdır. Yapı içerisine takviye edilen GNP yoğunluk değerlerini azaltırken aynı zamanda poroziteyi arttırmıştır. Literatürdeki çalışmada, grafen Al ile daha az ıslanabilirliğe sahip olduğundan ve daha büyük fraktal yüzeylere yol açan nanoparçacıkların topaklanmasından dolayı, kompozitin gözenek miktarını yükseldiği rapor edilmektedir [22].

### 3.3 Sertlikler

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B<sub>4</sub>C/GNP takviyeli kompozitlerin Brinell yöntemiyle yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen değerlere göre oluşturulan grafik Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Al 6061/B<sub>4</sub>C+GNP kompozitlerin sertliği

Şekil 5'te yer alan grafiğe bakıldığında, saf Al 6061 malzemeye göre tüm kompozit malzemelerin sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Kompozit malzemeler içinde en yüksek sertlik değeri sade %7 B<sub>4</sub>C takviyeli numunede 72,4 HB olarak ölçülürken, en düşük sertlik değeri sade %5 B<sub>4</sub>C takviyeli numunede ölçülmüştür. Kompozit yapı içerisinde çok sert fazda bulunan B<sub>4</sub>C partikülleri kompozitin sertlik değerini yükseltmiştir. Kompozit yapının sertliğindeki artış, esas olarak B<sub>4</sub>C parçacıkların termal genleşme katsayısının (CTE) Al 6061 alaşımından daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, katılma işlemi sırasında parçacık-matris ara yüzeyinde çok büyük miktarda dislokasyon oluşur ve bu da alüminyum matrisin sertliğini artırır. Parçacık-matris ara yüzünün miktarı ne kadar yüksekse yani kompozit yapı içerisindeki takviye miktarı ne kadar fazlaysa, dislokasyonlardan kaynaklanan sertleşme de o kadar fazla olmaktadır [21]. Literatürdeki benzer çalışmada, Al2024 matris alaşımına göre MMK'lerin sertliğinin daha yüksek

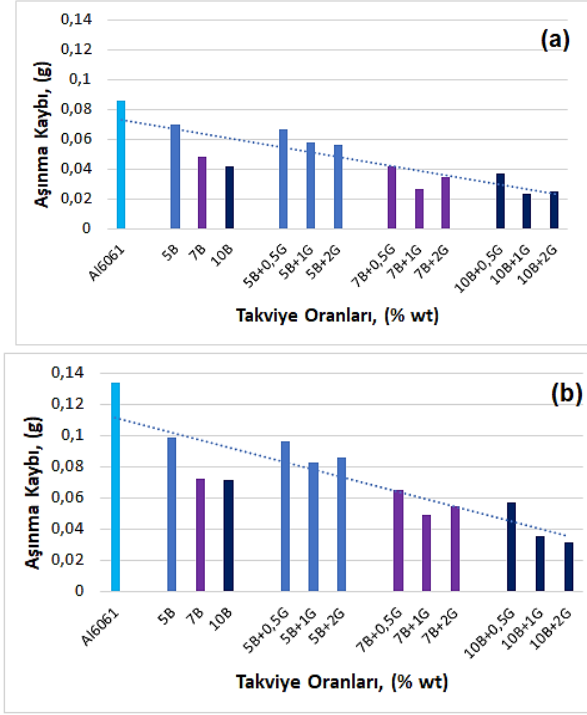
olduğu ve B<sub>4</sub>C partiküllerinin eklenmesiyle sertliğin arttığı ifade edilmektedir [13]. Literatür araştırıldığında benzer sonuçların rapor edildiği çok sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir [14-16, 23, 24]. Ancak en yüksek takviye oranı olan %10 B<sub>4</sub>C takviyeli numunenin sertliği %7 B<sub>4</sub>C takviyeli numuneden daha az değerde gerçekleşmiştir. Normal şartlarda kompozit yapı içerisindeki sert takviye fazının oranını artmasına bağlı olarak sertlik değerinin de %7 takviyeli numuneye göre daha yüksek çıkması beklenirken durum böyle olmamıştır. Bu sıra dışı sertlik davranışına kompozit yapı içerisindeki yüksek gözenekliliğin sebep olduğu değerlendirilmektedir. B<sub>4</sub>C takviye oranını %10' yükselmesiyle yapı içerisindeki topaklanmaya bağlı olarak daha fazla gözenekli bölgelerin oluştuğu mikroyapı değerlendirmesinde ifade edilmişti. Dolayısıyla artan gözenek kompozit yapının yoğunluğunu azaltarak beraberinde sertlik değerinin de azalmasına neden olmuştur. Kompozit içerisindeki B<sub>4</sub>C takviye oranının belli bir değere kadar çıkmasıyla sertlik değerini giderek yükselttiği, ancak belli bir değerden sonra B<sub>4</sub>C oranı yükselmeye devam ettiğinde sertlik değerinin düşmeye başladığı çalışmalar literatürde yer almaktadır [17, 25].

İkinci eleman olarak GNP'nin takviye edildiği hibrit kompozitlerde de benzer sertlik davranışı meydana gelmiş olup en yüksek sertlik değerleri %7 B<sub>4</sub>C+GNP takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. Bu değerler sertlik ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Hibrit kompozitler içerisindeki GNP takviye oranının %0,5'ten %2,0'ye çıkmasına bağlı olarak, her takviye oranında kendi içerisinde sertlik değerleri azalma eğilimine girmiştir. Benzer sonuç literatürdeki bir çalışmanın sonuçlarında ifade edilmiştir [18]. Yumuşak bir dispersoid olan grafit, kompozitin sertliğine olumlu katkıda bulunmadığından, sertlikteki bu azalma beklenebilir. Etkili bir katı yağlayıcı olan grafit, malzemeyi sertlik test cihazının probuna bağlı olarak daha kolay deforme edilebilir hale getirir. Bu da sertlik değerinin düşük ölçülmesine neden olur [21]. Burada grafenin yağlayıcı etkisiyle birlikte, kompozit yapı üzerindeki yumuşatıcı etkisinin de ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

### 3.4 Abrasif aşınmalar

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B<sub>4</sub>C/GNP takviyeli kompozitlerin pin-on disk yöntemiyle 100 m ve 200 m kayma mesafelerinde yapılan abrasif aşınma deneylerinden elde edilen aşınma kaybı değerlerine göre oluşturulan grafikler Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6'daki grafiklere bakıldığında, B<sub>4</sub>C/GNP takviyeli kompozit malzemelerin aşınma kayıplarının takviyesiz Al 6061 alaşımına göre oldukça azaldığı ilk olarak göze çarpmaktadır. Elmas ve kübik bor nitrid (CBN)'den sonra en sert üçüncü malzeme olarak bilinen B<sub>4</sub>C takviye elemanı partiküllerin, kompozit yapının aşınma dayanımını arttırdığı kesin olarak ifade edilebilir. Literatür araştırıldığında, alüminyum esaslı ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve aşınma davranışlarının incelendiği pek çok çalışmada benzer sonuçlara işaret edildiği görülmektedir [3, 20, 26, 27].

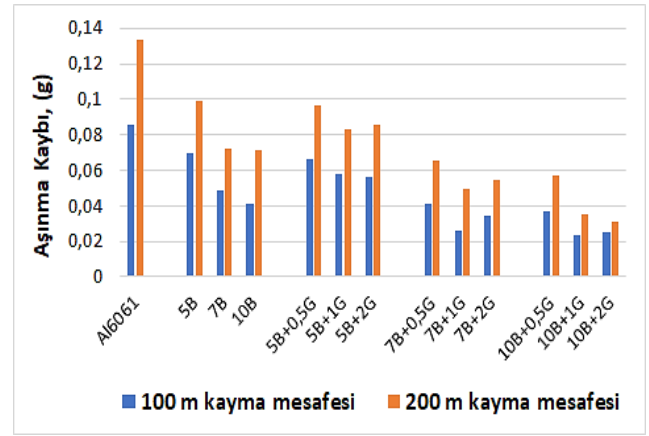


Şekil 6. Al 6061/B<sub>4</sub>C+GNP kompozitlerin abrasif aşınmaları (a) 100 m kayma mesafesi, (b) 200 m kayma mesafesi

Şekil 6 incelenmeye devam edildiğinde, hibrit kompozit içerisinde bulunan GNP takviye elemanın aşınmayı azaltıcı etkisi de dikkat çeken diğer önemli husustur.

Bor karbür ilavesi kompozitlerin hem mukavemetini hem de aşınma direncini artırır, ancak B<sub>4</sub>C'nin tek başına daha yüksek miktarlarda eklenmesi kompoziti kırılmalı hale getirir ve işlemeyi zorlaştırır. Bu dezavantajı azaltmak amacıyla B<sub>4</sub>C'ün yanına ikinci bir eleman olarak takviye edilen grafen ile kompozitlerde mukavemet azalması probleminin üstesinden gelmek amaçlanmıştır. Bu durum hibrit kompozitlerin ortaya çıkmasıyla yol açmıştır. Hibrit kompozitler, alüminyum alaşımına kıyasla daha iyi aşınma özellikleri sergiler [28]. Bu çalışmada da %5, %7, %10 B<sub>4</sub>C takviyenin yanında yapı içerisine ilave edilen GNP'nın oranı arttıkça aşınma kayıplarının da azalma başladığı grafiklerdeki eğilim çizgisinden de anlaşılmaktadır. Literatürdeki çalışmada grafit ağırlık yüzdesindeki artışla birlikte kompozitin aşınma direnci de arttığı ifade edilmiştir [16]. Bunun en önemli sebebinin grafenin katı yağlayıcı özelliği göstererek, deneyler sırasında sürtünme katsayısını azaltıp beraberinde aşınma kayıplarının azalmasını sağlamasıdır. Literatürdeki çalışmada 6061 alüminyum alaşımının tribolojik davranışı, katı yağlayıcı olarak grafit parçacıklarının eklenmesiyle iyileştiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada Al-Gr kompozitinin sürtünme katsayısının da grafit parçacıklarının eklenmesiyle azaldığı ve baz alaşımdan 2.5 kat daha düşük bir değer kaydettiği rapor edilmiştir [29]. Grafit ve grafen birbiriyle ilişkili karbon esaslı malzemelerdir. Çok sayıdaki grafen tabakası bir araya gelerek grafiti oluşturmaktadır. Veya grafitten alınan bir tabaka ile grafen oluşturulmaktadır. Dolayısıyla yapılan

çalışmalarda hem grafit hem de benzer amaçlar için kullanılmaktadır. Her iki malzemede bir karbon allotropudur ve aşınma deneyleri sırasında teması azaltan veya kısmen önleyen bir tribolojik tabaka oluşturarak aşınmayı azaltıcı etki yapar. Yapılan bir çalışmada, Gr partiküllerinin kompozitlerin aşınma direncini önemli ölçüde iyileştiren ince bir yağlayıcı film oluşturduğu rapor edilmiştir [18]. Literatürde yer alan ve aynı takviye elemanları kullanılan alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin aşınma davranışlarının incelendiği çalışmalarda, benzer sonuçlar ifade edilmiştir [15, 17]. Yapılan bu çalışmada aynı yük ve aşınma hızı ile iki farklı aşınma mesafesi uygulanmıştır. Şekil 7'de 100 m ve 200 m mesafede yapılan abrasif aşınma deneylerinde elde edilen aşınma kayıpları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



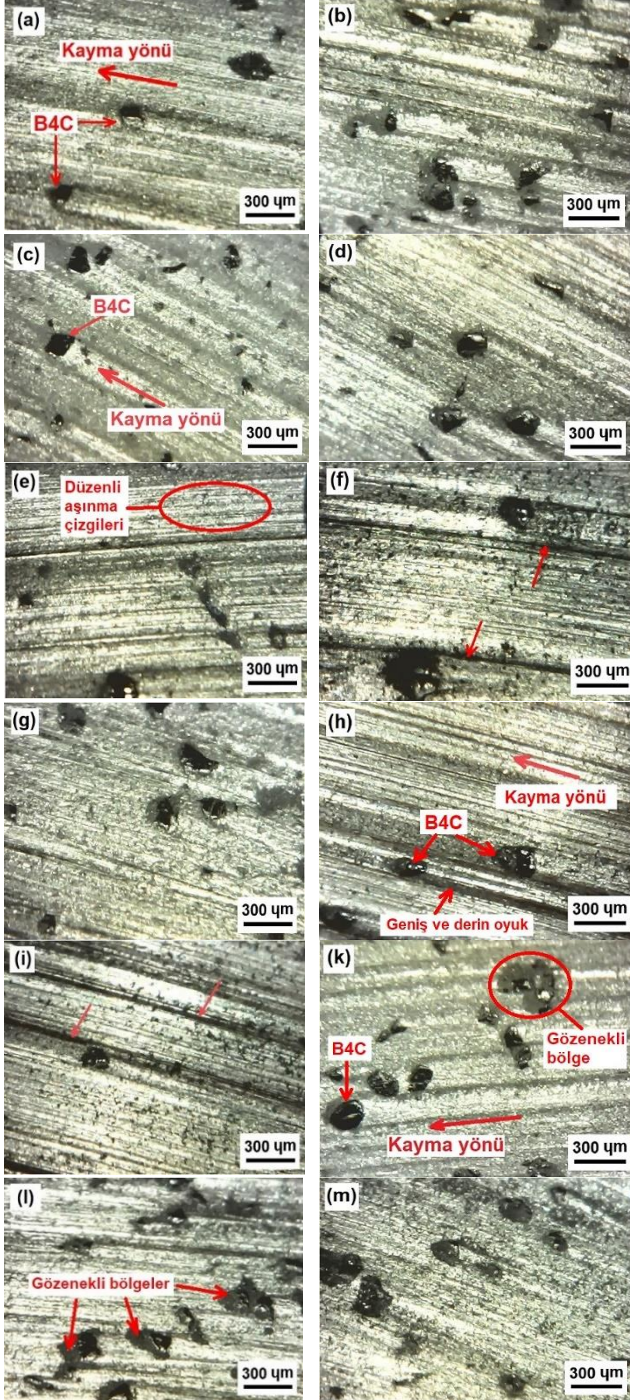
Şekil 7. Al 6061/B<sub>4</sub>C+GNP kompozitlerin abrasif aşınmaları

Abrasif aşınma deneylerinde 100 m ve 200 m olmak üzere iki farklı kayma mesafesi uygulanmıştır. Ancak kayma/aşınma mesafesinin %100 artmasına rağmen aşınma kayıpları aynı oranda artış göstermemiştir. Aşınma mesafesinin dolayısıyla da süresinin artmasıyla numune yüzeyindeki sürtünmeye bağlı sıcaklığın artmasıyla birlikte yumuşak fazdaki alüminyum matrisin daha da yumuşayarak malzeme yüzeyindeki aşınma yarıklarına ve koparak ayrılan B<sub>4</sub>C takviyelerin geride bıraktığı boşluklara sıvandırdığı değerlendirilmektedir. Böylece aşındırıcı zımpara tanelerinin yüzeyden kaldırdığı ve çok ince talaş formundaki alüminyum partiküllerin bir kısmı uzaklaşmadan tekrar yüzeye yapışarak aşınma kayıplarının daha az ölçülmesine neden olduğu kanaatine varılmıştır. Aşınma kayıplarının artan sürtünme mesafesine bağlı olarak aynı oranda artmamasının ikinci önemli sebebi ise, uygulanan deney yöntemi ve aşındırıcı olarak zımpara kağıdının kullanılmasıdır. Aşınma deneylerinin her birinde yeni ve hiç kullanılmamış zımpara kağıdı kullanılmıştır. Ancak aşınma deneyleri sırasında kompozit malzemeden koparak ayrılan alüminyum matris malzemesi ve takviye elemanlarının yanında, aynı zamanda zımpara kağıdındaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> taneciklerinin de bir kısmı kopmakta veya aşınmaktadır. Bu durumda zımpara kağıdı üzerinde yapılan deneydeki süre uzadıkça, zımpara kağıdı körelmekte ve aşındırma performansı giderek azalmaktadır. Dolayısıyla aşınma

mesafesi yani süresinin artışıyla aynı oranda aşınma kaybı meydana gelmemektedir.

### 3.5 Yüzey morfolojisi

Abrasif aşınma deneyine tabi tutulan kompozit numunelerin yüzey hasarını ve aşınma davranışını gözlemek amacıyla çekilen dijital mikroskop görüntüleri Şekil 8’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 8. Hibrit kompozitlerin aşınmış yüzeylerine ait dijital mikroskop görüntüleri; (a) %5 B<sub>4</sub>C, (b) %7 B<sub>4</sub>C, (c) %10 B<sub>4</sub>C - (d) %5 B<sub>4</sub>C+%0,5 GNP, (e) %5 B<sub>4</sub>C+%1,0 GNP, (f) %5 B<sub>4</sub>C+%2,0 GNP - (g) %7 B<sub>4</sub>C+%0,5 GNP,

(h) %7 B<sub>4</sub>C+%1,0 GNP, (i) %7 B<sub>4</sub>C+%2,0 GNP - (k) %10 B<sub>4</sub>C+%0,5 GNP, (l) %10 B<sub>4</sub>C+%1,0 GNP, (m) %10 B<sub>4</sub>C+%2,0 GNP

Kompozit yapıdaki abrasif aşınma davranışını daha iyi görebilmek için aşınma miktarı daha fazla olan ve 200 m mesafede yapılan aşınma deneyi numunelerinin yüzey görüntüleri seçilmiştir.

Şekil 8’deki aşınmış yüzey görüntülerine bakıldığında aşınma çizgileri veya oyuklarının varlığıyla birlikte kompozit yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C takviye partikülleri de göze çarpmaktadır. Aşınma deneyleri sırasında uygulanan yük ve sürtünme kuvvetinin etkisiyle alüminyum matris içerisinden kopan B<sub>4</sub>C taneciklerinin derin aşınma oyuklarına yol açtığı anlaşılmaktadır (Şekil 8-h, 8-k). Ayrıca deneyler sırasında yerinden oynayan ancak kompozit yapıdan ayrılmayan bazı B<sub>4</sub>C tanelerinin etrafında oluşan gözenekli bölgelerde dikkat çekmektedir (Şekil 8-k, 8-l). Hibrit kompozit yapı içerisindeki GNP oranının artmasıyla aşınmış yüzey görüntülerinin koyulaştığı anlaşılmaktadır. GNP oranının %2’ye çıktığı hibrit numunelerin yüzeylerindeki aşınma çizgilerinin renginin diğerlerine göre daha koyu ve siyaha yakın olduğu görülmektedir. Bu durumu, deneyleri sırasındaki sürtünme ve aşınma yükünün etkisiyle grafitin yüzeye sıvanması ve boyaması olarak değerlendirmek mümkündür (Şekil 8-f, 8-i).

Hibrit kompozit yüzeyler incelenmeye devam edildiğinde, aşınma hasarını ifade eden çizgi veya oyukların oluşmasında aşındırıcı zımpara tanelerinin etkisi de çok net olarak anlaşılmaktadır. Yüzey üzerindeki düzenli ve aynı formdaki aşınma çizgilerinin zımpara üzerindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı taneleri tarafından oluşturulduğu ifade edilebilir (Şekil 8-e). Yapılan bu abrasif aşınma deneyinde asıl aşındırıcı etkenin zımpara olduğu, bunun yanında kompozit yapı içerisinde yer alan çok sert fazdaki B<sub>4</sub>C takviye taneciklerinin de koparak yüzeyi çizdiği ve ikinci bir aşındırma etkisi yarattığı değerlendirilmektedir. Dolayısıyla meydana gelen ana aşınma mekanizmasının mikro kesme, mikro sabanlama (ploughing) ve mikro çizme etkileriyle oluşan plastik deformasyon olduğu anlaşılmaktadır [30]. Hibrit yapı içerisindeki grafitin yağlayıcı etkisiyle yüzeyden ayrılan alüminyum talaşlarının doğrudan yüzeye temasın bir miktar önlendiği ve bunun sabanlama etkisini azalttığı da literatürde rapor edilmektedir [18]. Ayrıca yapı içerisindeki grafitin aşınma deneylerindeki sürtünme katsayısını azalttığı ve aşınma direncini arttırdığı ifade edilmektedir [29, 31, 32].

### 4 Sonuçlar

Al 6061 matrisli, B<sub>4</sub>C ve GNP takviyeli hibrit kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarının araştırıldığı çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Hibrit kompozit malzemeler başarılı olarak üretilmiş olmasına rağmen yapı içerisinde yer yer takviye topraklanması ve buna bağlı olarak oluşan gözenekli bölgeler gözlenmiştir. Bu tür kompozit yapılarda yer yer matris ve takviye malzemeleri arasındaki çok farklı termal özellikler nedeniyle matris-takviye ara yüzeyinde ıslatma zorlukları yaşanabilmektedir.

B<sub>4</sub>C oranının artmasına bağlı olarak kompozit yapının yoğunluk değerleri azalırken, gözenekli bölgeler ve porozite miktarı artış göstermiştir. Yoğunluk-porozite ilişkisinde ters orantı oluşmuştur.

B<sub>4</sub>C takviye elemanının ilave edilmesiyle birlikte, saf Al 6061 malzemeye göre tüm kompozit numunelerin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ancak %10 B<sub>4</sub>C takviyeli numunenin sertlik değeri %7 B<sub>4</sub>C takviyeli numuneye göre bir miktar azalmıştır. Bu sıra dışı mekanik davranış, artan B<sub>4</sub>C takviye fazıyla birlikte kompozit yapıdaki gözenekli bölgelerin daha fazla artış göstermesi ve gözenekliliğin sertlik ölçümünde daha baskın olması ile açıklanmıştır.

Hibrit yapı içerisindeki GNP oranının artmasına bağlı olarak tüm B<sub>4</sub>C takviye oranlarındaki numunelerde kendi içerisinde sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum grafenin yağlayıcı etkisiyle birlikte, hibrit yapı üzerinde yumuşatıcı etki yapmasına atfedilmiştir.

B<sub>4</sub>C takviye elemanının ilave edilmesiyle birlikte, saf Al 6061 malzemeye göre tüm kompozit numunelerin aşınma dayanımları artmıştır. Aynı şekilde, hibrit yapı içerisindeki GNP oranının artmasına bağlı olarak tüm B<sub>4</sub>C takviye oranındaki numunelerde kendi içerisinde aşınma direnci yükselmiştir. Bu durum grafenin kuru yağlayıcı etkisine atfedilmiştir.

Aşınma deney mesafesi ve süresinin iki kat arttırılmasına rağmen aşınma kayıplarında aynı oranda artış olmamıştır. Bu durum artan aşınma süresiyle birlikte, aşınma yüzeyindeki sürtünme nedeniyle artan sıcaklığına bağlı olarak alüminyum matris malzemesinin yüzeye sıvanmasına bağlanmıştır. Ayrıca kullanılan aşındırıcı zımpara üzerindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> taneciklerinin giderek körelmesi ve daha az sabanlama yapabilmesi de aşınma kayıplarını azaltan başka bir sebep olarak değerlendirilmiştir.

Aşınan yüzeylerde abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu görülmüştür. Aşındırıcı zımparayla birlikte kompozit yapı içerisinde kopan B<sub>4</sub>C partiküllerinin de ikinci bir aşındırıcı gibi davrandığı ve yüzeylerdeki deformasyonu arttırıcı etki yaptığı anlaşılmıştır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %7**

#### Kaynaklar

- [1] M. R. Prakash, R. Saravanan and M. Nagal, Fabrication and Wear Behavior of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-An Overvie IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 14 (1), 10-20, 2017. <https://doi.org/10.9790/1684-1401041020>
- [2] S. Mosleh-Shirazi, F. Akhlaghi, n and D.Y. Li, Effect of graphite content on the wear behavior of Al/2SiC/Gr hybrid nano-composites respectively in the ambient environment and an acidic solution. Tribology International, 103, 620-628, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.08.016>
- [3] R. İpek, Adhesive wear behaviour of B4C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B4C-

- Al/SiC). Journal of Materials Processing Technology, 162-163, 71-75, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.207>
- [4] M. Yıldırım and D. Özyürek, An Investigation of Wear Behaviors of AA7075 Al Hybrid Composites. High Temp. Mater. Proc. 37 (7), 619-624, 2018. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0016>.
- [5] Ajith Arul Daniela, S. Murugesana, Manojkumara and S. Sukkasamya, Dry Sliding Wear Behaviour of Aluminium 5059/SiC/MoS2 Hybrid Metal Matrix Composites. Materials Research, 20 (6), 1697-1706, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0009>
- [6] G. Pitchayapillai, P. Seenikannan, K. Raja and K. Chandrasekaran, Al6061 Hybrid Metal Matrix Composite Reinforced with Alumina and Molybdenum Disulphide. Advances in Materials Science and Engineering, ID 6127624, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6127624>).
- [7] L. Rajeshkumar, R. Kamalakannan, K. Arun Kumar and T. Abineesh, Dry Sliding Wear Behavior of AA2219 Reinforced with Magnesium Oxide and Graphite Hybrid Metal Matrix Composites. International Journal of Engineering Research & Technology, 6 (7), 2018.
- [8] S. Nallusamy and A. Karthikeyan, Analysis of Wear Resistance, Cracks and Hardness of Metal Matrix Composites with SiC Additives and Al2O3 as Reinforcement. Indian Journal of Science and Technology, 9 (35), 2016. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i35/100149>
- [9] M. Khan, R. U. Din, M. A. Basit, A. Wadood, S. W. Husain, S. Akhtar and R. E. Aune, Study of microstructure and mechanical behaviour of aluminium alloy hybrid composite with boron carbide and graphene nanoplatelets. Materials Chemistry and Physics, 271, 124936, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124936>
- [10] N. Kaushik and S. Singhaal, Mechanical and Metallurgical Examinations of Stir Cast Aluminum Matrix Composites: A Review Study. International Journal of Engineering and Technology, 9 (4), 3203-3217, 2017. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i4/170904135>
- [11] B. Bihari and A. K. Singh, An Overview on Different Processing Parameters in Particulate Reinforced Metal Matrix Composite Fabricated by Stir Casting Process, Int. Journal of Engineering Research and Application, 7 (1), 42-48, 2017. <https://doi.org/10.9790/9622-0701034248>
- [12] P. Jadhav, B. R. Sridhar, M. Nagal, M. Vijay Kumar, & Jayasheel. I. Harti, A Comparative Study On Microstructure And Mechanical Properties Of A356-B4C and A356-Graphite Composites, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 8(2), 273-282, 2018.
- [13] A. Canakci, F. Arslan and T. Varol, Physical and mechanical properties of stir-casting processed AA2024/B4Cp composites. Sci Eng Compos Mater.,



- 21(4), 505-515, 2014. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0118>
- [14] M. Nagaral, Attar S, H. N. Reddappa, V. Auradi, S. S. Kumar and S. Raghu, Mechanical Behavior of Al7025-B4C Particulate Reinforced Composites, *Journal of Applied Mechanical Engineering. J Appl Mech Eng.*, 4 (6), 1000186, 2015. <https://doi.org/10.4172/2168-9873.1000186>
- [15] R. Banchhor and P. S. Sahu, Effect of different reinforcement on mechanical properties of aluminium metal matrix composites. *Research Journal of Engineering*, 6 (7), 39-45, 2017.
- [16] G. Sivakaruna and P. S. Babu, A Survey On Effects Of Reinforcement On Aluminium Metal Matrix Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8 (9), 112-131, 2017.
- [17] R. S. Bhatia and Kudlipsingh, An Experimental Analysis of Aluminium Metal Matrix Composite using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B4C/Gr Particles. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8 (4), (Special Issue) 83-90, 2017.
- [18] P. Sharma, D. Khanduja and S. Sharma, Dry sliding wear investigation of Al6082/Gr metal matrix composites by response surface methodology. *Jmaterres technol*, 5 (1), 29-36, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.001>
- [19] 19. A. Mazahery, M. O. Shabani, E. Salahi, M. R. Rahimpour, A. A. Tofigh and M. Razavi, Hardness and tensile strength study on Al356-B4C composites, *Materials Science and Technology*. 28 (5), 634-638, 2012. <https://doi.org/10.1179/1743284710Y.0000000010>
- [20] A. Canakci and F. Arslan, Abrasive wear behaviour of B4C particle reinforced Al 2024 MMCs, *Int J Adv Manuf Technol*, 63, 785-795, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3931-8>
- [21] P. Jadhav, B. R. Sridhar, M. Nagaral, V. Kumar. M & Jayasheel. I. Harti, A Comparative Study On Microstructure And Mechanical Properties Of A356-B4C and A356-Graphite Composites, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8 (2), 273-282, 2018,
- [22] Arnav Shil, Sandipan Roy, P. S. Balaji, Jitendra Kumar Katiyar, Sumit Pramanik and Anuj Kumar Sharma, Experimental analysis of mechanical properties of stir casted aluminium-graphene nanocomposites IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 653, 012021, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/653/1/012021>
- [23] B. Rebba and N. Ramanaiah, Studies on Mechanical Properties of 2024 Al-B4C Composites, *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 4 (1), 42-46, 2014. <http://dx.doi.org/10.11127/ijammc.2014.03.06>
- [24] K. Ch. K. Kumar, T. N. Raju and Y. N. Laxmi, Studies on Al6061-B4c Metal Matrix Composites Fabricated By Stir Casting Process. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering, Special Issue*, 296-299, 2017.
- [25] E. S. Rao and N. Ramanaiah, Intermetallic-reinforced boron carbide (B4C) composites produced through stir casting processing, *Composite Materials : An International Journal*, 1 (2), 058-066, 2016.
- [26] A. Baradeswaran, S. C. Vettivel, A. E. Perumal, N. Selvakumar and R. F. Issac, Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B4C and graphite reinforced aluminium hybrid composites. *Materials and Design*, 63, 620-632, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.054>
- [27] A. Baradeswaran and A. E. Perumal, Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites, *Composites Part B: Engineering*, 54, 146-152, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.012>
- [28] T. Thirumalai, R. Subramanian, S. Kumaran, S. Dharmalingam and S. S. Ramakrishnan, Production and characterization of hybrid aluminum matrix composites reinforced with boron carbide (B4C) and graphite. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 73 (10), 667-670, 2014.
- [29] A. Baradeswaran and A. Elayaperumal, Effect of Graphite Content on Tribological behaviour of Aluminium alloy - Graphite Composite, *European Journal of Scientific Research*, 53 (2), 163-170, 2011.
- [30] M. Kök and K. Özdin, Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 301-309, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.02>
- [31] S. O. Adeosun, L. O. Osoba and O. O. Taiwo, Characteristics of Aluminum Hybrid Composites, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 8(7), 731-738, 2014.
- [32] C. Velmurugan, Experimental Study On The Wear Characteristics Of Heat Treated Aluminium Hybrid Composites. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(9), 191-200, 2017.

