



# BOR DERGISI

## JOURNAL OF BORON

<https://dergipark.org.tr/boron>



## Toz metalurjisi ile üretilen hegzagonal bor nitrür takviyeli AZ91 magnezyum kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi

Cevher Kürşat Macit<sup>1,\*</sup>, Turan Gürgeç<sup>2</sup>, Muhammet Gökhan Albayrak<sup>3</sup>, Cihan Özel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

<sup>2</sup>Firat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

<sup>3</sup>Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Geçmişi:

İlk gönderi 19 Mart 2023  
Kabul 19 Nisan 2023  
Online 30 Haziran 2023

#### Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1267756

#### Anahtar kelimeler:

AZ91 Magnezyum alaşımı  
Hegzagonal bor nitrür  
Kompozit  
Toz metalurjisi  
Triboloji

### ÖZET

Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımı ve AZ91 alaşımına ağırlıkça %10 hegzagonal bor nitrür (hBN) nanoparçacıkları takviye edilerek homojen kompozit malzemeler üretilmiştir. Hazırlanan tozlar, soğuk presleme yöntemiyle 400 MPa basınç ile preslenmesi ve 590°C sıcaklıkta argon atmosferinde sinterlenmiştir. Numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizleri ile incelenmiştir. Numunelerin 20 saniye yükleme süresinde 5 farklı noktadan sertlik değerleri alınmış ve bu sertlik değerlerinin ortalaması alınarak ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Aşınma testleri pin-on-disk deney cihazında farklı yük değerlerinde (5 N, 10 N ve 15 N) toplam 300 m kayma mesafesinde, 50 mm/sn kayma hızında ve kuru şartlarda yapılmıştır. Sürtünme katsayısı değerleri ile aşınma sonucundaki ağırlık kayıpları incelenmiştir. AZ91 kompozitinin sertlik değeri 62 HB iken hBN takviyesiyle 93 HB olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, yapılan aşınma deneylerinde hBN katkısıyla aşınma direnci 10 kat daha fazla bir kompozit elde edilmiştir. Özetle, hBN katkısının metal matrisli malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu yönde etkileme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

## Investigation of tribological properties of hexagonal boron nitride reinforced AZ91 magnesium composites produced by powder metallurgy

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received March 19, 2023  
Accepted April 19, 2023  
Available online July 30, 2023

#### Research Article

DOI: 10.30728/boron.1267756

#### Keywords:

AZ91 Magnesium alloy  
Hexagonal boron nitride  
Wear  
Powder metallurgy  
Microstructure

### ABSTRACT

In this study, homogeneous composite materials were produced by supplementing AZ91 magnesium alloy and AZ91 alloy with 10% by weight hexagonal boron nitride (hBN) nanoparticles. The prepared powders were pressed by cold pressing method with 400 MPa pressure and sintered at 590°C in argon atmosphere. Microstructures of the samples were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray (EDX) analysis. The hardness values of the samples were taken from 5 different points during the 20 second loading time and the average hardness values were determined by taking the average of these hardness values. Wear tests were carried out in a pin-on-disc test device at different load values (5 N, 10 N and 15 N) at a total sliding distance of 300 m, at a sliding speed of 50 mm/sec and in dry conditions. The friction coefficient values and the weight losses as a result of wear were examined. The hardness value of AZ91 composite was 62 HB, while it was measured as 93 HB with hBN reinforcement. Similarly, in the wear tests, a composite with 10 times higher wear resistance was obtained with hBN additive. In summary, it has been observed that hBN additive has the potential to positively affect the mechanical and tribological properties of metal matrix materials.

### 1. Giriş (Introduction)

Magnezyum (Mg) özellikle düşük yoğunluğu ve yüksek spesifik dayanımı nedeniyle 21. yüzyılda ve ilerleyen yıllarda daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Mg matrisli kompozitler, diğer metal

matrisli kompozitlere göre daha hafif olmaları, yüksek özgül mukavemetleri ve sertlikleri nedeniyle geniş çapta çalışmalarda tercih edilmektedir [1-3]. Hafif metal kompozitler sınıfında oldukları için havacılık ve otomobil endüstrileri için yapısal malzemeler olarak büyük potansiyel sunmaktadır. Mg ve alaşımlarının

\*Corresponding author: macitkursatcevher@gmail.com

olumlu özelliklerinin yanında olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi metal matrisli diğer kompozit malzemelere göre daha üstün mekanik özellikleri sağlayamamasıdır. Bu sebeple hala araştırmacılar magnezyum alaşımları üzerinde çalışmaları sürdürmektedir. Endüstriyel uygulamalarda hafif mühendislik malzemelerine olan talep sürekli artmaktadır. Mg ve alaşımlarının özelliklerinin iyileştirilmesi için uygulanan imalat yöntemlerinden birisi de mg esaslı kompozit malzeme üretilmesidir. Mg esaslı kompozit malzeme üretiminde magnezyumun kristal kafes yapısı nedeniyle haddeleme ve ekstrüzyon gibi geleneksel yöntemlerle şekillendirilebilirliğinin kısıtlı olması bu alaşımların farklı yöntemlerle şekillendirilmesi konusunda çalışmalar yapılmasını gerekli hale getirmiştir [4,5]. Farklı üretim yöntemleri ile bu zorlukların üstesinden gelmek mümkündür. Bunun için kullanılacak yöntemlerden biri Toz Metalurjisi (TM) ile üretimdir. TM yöntemi partikül haline getirilmiş olan metal veya alaşımların basınç altında şekillendirilmesi ve ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta tutulması ve birleştirilmesi esasına dayanır [6]. TM yöntemi diğer geleneksel imalat yöntemlerine göre nispeten daha yeni bir üretim yöntemidir ve üreticilerin enerji ve hammadde giderlerinden büyük miktarda tasarruf etmesini sağlar [7].

Mg ve alaşımlarının TM yöntemiyle üretilmesi esnasında çözülmesi gereken bazı temel zorluklar bulunmaktadır. Mg ve alaşımlarının TM ile üretimindeki temel zorluk, Mg ve alaşımların oksijenle reaksiyona girmesi çok kolay olduğundan tozların yüzeyinde oluşması muhtemel ince magnezyum oksit (MgO) tabakası, sinterlenme sırasında difüzyonu önlemekte, tozlar arasında zayıf ve kırılabilir tane sınırlarının oluşmasına dolayısıyla düşük mekanik özelliklere neden olmaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla Mg ve alaşımlarının toz metalurjisindeki bütün aşamaları sırasında numunelerin argon gazı akışı ile oksitlenmeden korunması gerekmektedir [8-10]. Magnezyumun endüstriyel anlamda geniş kullanım alanı bulmasının önündeki diğer engeller ise düşük dayanım özelliği, şekillendirilebilirliği, korozyon ve aşınma dayanımının oldukça düşük olmasıdır [11]. Mg ve alaşımlarına farklı takviyeler katılarak üretilen kompozit malzemelerde mekanik, aşınma ve mikroyapı özelliklerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [2,3,12-19].

Hegzagonal bor nitrür (hBN), bor nitrürün (BN) kristal yapılarından biridir ve geniş bir sıcaklık aralığında mükemmel katı yağlama kabiliyetine sahiptir [20]. Grafit ve molibden disülfid gibi, hBN de bor ve nitrojen atomları arasında güçlü bir kovalent bağa sahip altıgen tabaka katmanlarından oluşan katmanlı bir yapıya sahiptir. Levha katmanları, zayıf Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulur. Bu yapı, kuvvet katmanlara paralel uygulandığında kesmeye izin verir. Böylece beklenen sürtünme azalmasını sağlar ve çok verimli yağlama sağlar. hBN ilavesiyle bakır ve nikel bazlı kendi kendini yağlayan kompozitlerin oda ve yüksek sıcaklıklardaki tribolojik özellikleri üzerine

birçok çalışma yapılmıştır. hBN içeren sinterlenmiş kompozitlerin temel matristen daha düşük bir sürtünme katsayısı verdiği ve hBN takviyeli numunelerde yüksek sertlik değerleri bulunmuştur [21-23].

Magnezyum alaşımları ve hBN takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Yan ve ark., yapmış oldukları çalışmada, saf magnezyum tozuna çinko takviyesinin kompozit numunenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [24]. Rashad ve ark. çalışmalarında saf magnezyum tozuna alüminyum ve kalay takviyeli kompozitler toz metalurjisi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin saf magnezyum tozuna göre alüminyum ve kalay takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür [25]. Lingaraju ve ark., AZ91 magnezyum alaşımına TiC, B<sub>4</sub>C ve hBN takviyeleriyle nano kompozitler üretmiştir. Üretilen nanokompozitlerin takviyesiz AZ91 alaşımına göre daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip oldukları gösterilmiştir [26]. Mahathanabodee ve ark., yapmış oldukları çalışmada, 316L paslanmaz çeliğine hBN ve MoS<sub>2</sub> takviyeleri eklenerek kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin aşınma direncini artırırken sürtünmeyi azaltma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür [27].

Bu çalışmada, hBN nanoparçacıkları ile takviye edilen AZ91 magnezyum alaşımlı matris kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimlerinin daha önce yapılmadığı görülmüştür. Çalışmada ilk olarak hBN nanoparçacıkları ile AZ91 magnezyum alaşımının homojen bir şekilde karışımları yapılmıştır. Numunelerin mikroyapısı, mikrosertliği ve 3 farklı yük altındaki aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## 2. Malzemeler ve Yöntemler (Materials and Methods)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada kullanılan %99,95 saflık ve 44 µm parçacık boyutuna sahip AZ91 alaşımı ve %99,85 saflık ve 65-75 nm parçacık boyutuna sahip hBN, Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. AZ91 alaşımının kimyasal analizi Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** AZ91 alaşımının kimyasal analizi (Chemical analysis of AZ91 alloy).

Element	İçerik (%)	Element	İçerik (%)
Al	11,34	Fe	0,0214
Ag	0,0004	La	<0,0010
Ca	0,0009	Mn	0,0043
Cu	<0,0002	Nd	<0,0020
Mg	87,24	Ni	<0,0001
Zr	0,0046	Y	<0,0050
Pb	0,0022	Si	0,848
Pr	<0,0005	Sn	0,0046
Zn	1,301	Ti	0,0017

## 2.1. Yöntemler (Methods)

### 2.2.1. Numunelerin üretilmesi (Production of samples)

AZ91 magnezyum alaşımının hava ile temasının kesilmesi ve numunelerin argon gazı atmosferinde hava ile teması olmayan bir ortamda karıştırılmıştır (glove box). hBN nanoparçacıkları bir beherde 30 ml metanole eklenmiş ve 30 dk süresince ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Diğer bir beherde, ağırlıkça yüzde (ağ. %) 90 olacak şekilde hazırlanan AZ91 tozları eklenmiş ve 30 dakika ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesinde literatüre göre en uygun ağırlıkça % oranlar baz alınmıştır [28,29]. hBN nanoparçacığı magnezyum karışımına eklenmiş ve 30 dakika daha ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Tanecik boyutları birbirine yakın seçilen tozların homojen bir şekilde karışmaları tamamlanmıştır. Karıştırma işlemi tamamlanan nanoparçacıkların süzülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Süzülen nanoparçacıklar havasız ortam içerisinde kurutulmuştur. Son işlem basamağı olarak kurutulma işlemi tamamlanan AZ91-hBN nanoparçacıkları tekrar bir karıştırma işleminden geçirilerek manyetik karıştırıcıda 500 rpm'de 4 saat süreyle karıştırıldı [30]. Üretilen numunelerdeki ağırlıkça kullanılan numune miktarları ve numunelerin adlandırılması Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Numunelerin adlandırılması ve ağırlıkça katkı miktarları (Identification of the samples and additive amounts by weight).

	AZ91	hBN
AZ91	%100	-
AZ91-hBN	%90	%10

Üretimleri tamamlanan numunelerin presleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Presleme işleminde kalıba 400 MPa'lık bir basınç uygulanarak numuneler oluşturulmuştur. Kalıba tozların yerleşimi esnasında numunelerin kalıptan daha rahat bir şekilde çıkartılabilmesi için kalıbın içerisi  $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$  (Çinko stearat) ile yağlanmıştır. TM'si üretim parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** TM yöntemi ile üretilen hBN takviyeli ve takviyesiz AZ91 numunelerinin üretim parametreleri (Production parameters of hBN reinforced and non-reinforced AZ91 samples produced by powder metallurgy method).

	Presleme Basıncı	Sinterleme		
		Sıcaklığı (°C)	Ortamı	Süresi (sa)
AZ91	400 MPa	590	Argon	8
AZ91-hBN	400 MPa	590	Argon	8

Presleme işlemleri tamamlanan numunelerin sinterleme işlemi azot ortamında fırında gerçekleştirilmiştir.

Sinterleme sonrasındaki numunelerin görüntüleri ise Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Sinterleme işlemi tamamlanan numuneler (Samples with completed sinterings).

### 2.2.2. Numunelerin zımparalanması ve parlatılması (Sanding and polishing of specimens)

Üretimi, preslemesi ve sinterlenmesi tamamlanan numunelerin mikroyapılarının daha net bir şekilde incelenmesi için zımparalama işlemi sırasıyla 100, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 lük SiC zımpara kağıtları üzerinde ve daha sonra 3 µm'lik elmas pasta kullanılarak çuha ile parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.3. Numunelerin mikroyapılarının incelenmesi (Investigation of microstructures of samples)

Üretimi, preslemesi, sinterlenmesi, zımparalanması ve parlatılması tamamlanan numunelerin mikroyapılarının incelenmesi için Zeiss EVO MA10 markalı SEM cihazı kullanılarak SEM ve EDX analizleri yapılmıştır.

### 2.2.4. Numunelerin sertlik deneylerinin yapılması (Hardness tests of samples)

Sertlik deneylerinde Rockwell-B cinsinden sertlik değerleri incelendi. Numunelerin 5 farklı noktasından sertlik değerleri alındı ve bu sertlik değerlerinin ortalaması alınarak ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik deneyinde 1/16 inç batıcı uç kullanılarak 100 kg yük uygulanarak 20 sn süreyle sertlik deneyleri yapılmıştır.

### 2.2.5. Numunelerin aşınma deneylerinin yapılması ve sürtünme katsayılarının belirlenmesi (Abrasion tests of samples and determination of friction coefficient)

Numunelerde aşınma testleri, pin-on-disk aşınma test cihazıyla 3 farklı yük altında (5N, 10N, 15N) 50 mm/sn kayma hızında ve 300 metre kayma mesafesinde gerçekleştirildi. Toplam 300 metre kayma mesafesinde 50 metrede bir kompozitlerin ağırlık kayıpları  $10^{-5}$  hassasiyet değerine sahip terazide ölçüldü ve ölçülen değerler kayıt altına alınarak mesafeye göre her numune için ağırlık kaybı grafikleri oluşturulmuştur. Aşınma deneylerindeki diğer işlem olan sürtünme katsayılarının belirlenmesi için her bir numune 300

metre kayma mesafesi boyunca aşındırılmış ve aşınma test cihazında kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri kayıt altına alınmıştır. Kayıt altına alınan sürtünme katsayısı değerleri bilgisayara aktararak sürtünme katsayısı grafikleri çıkarılmıştır.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

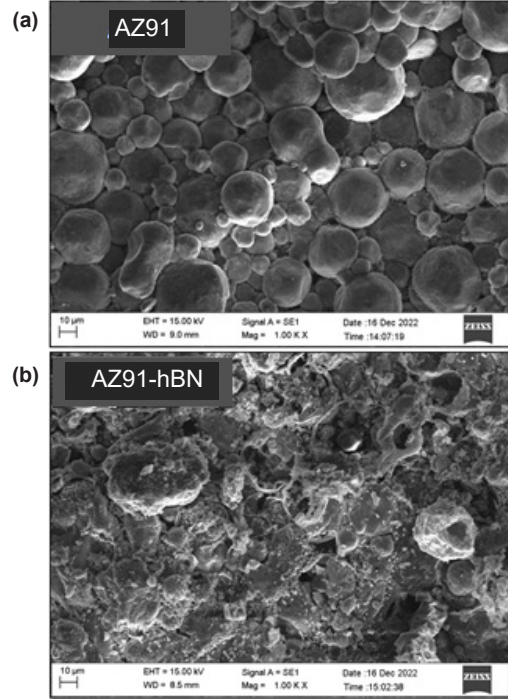
#### 3.1. Mikroyapı (Microstructure)

Numunelerin mikroyapılarında AZ91 matris yapı içerisinde dağılım sergileyen takviye elemanı parçacık tayini için SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. SEM analizleri sonucunda alınan saf AZ91 ve hBN katkılı kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir. SEM analizlerinde hBN katkı miktarının AZ91 magnezyum alaşımı üzerinde olduğu görülmüştür.

Kompozit numunelerin EDX analizleri sonucunda AZ91 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimine benzer sonuçlar alınmıştır [31]. hBN takviyesiyle EDX analizinde B ve N'nin olduğu gözlemlenmiştir. EDX analiz sonuçları Şekil 3'te ve oluşan ağırlıkça katkı miktarları Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.** EDX analiz sonuçlarında numunelerin ağırlıkça katkı miktarları (Additive amounts by weight of samples in EDX analysis results).

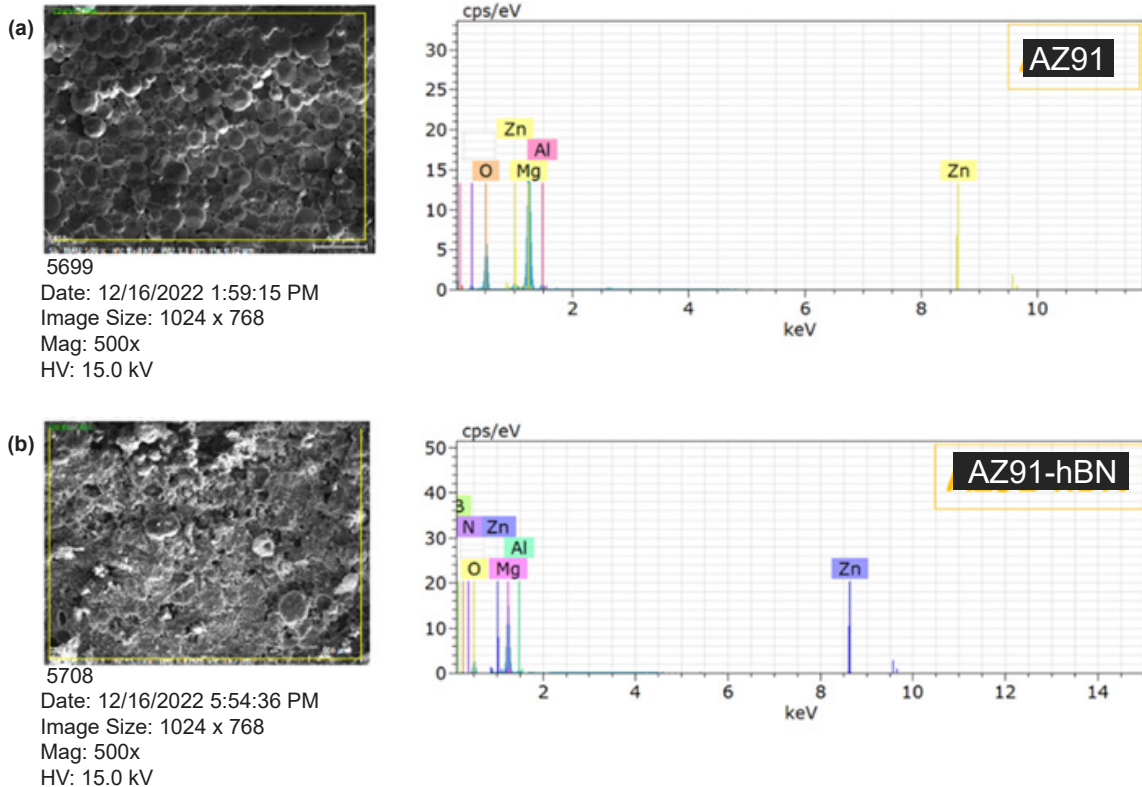
Numune	Mg	O	Al	Zn	C	N	B
AZ91	77,21	14,09	6,37	0,55	1,78	-	-
AZ91-hBN	69,27	12,65	6,01	0,46	2,56	2,39	6,66



**Şekil 2.** Numunelerin mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of samples).

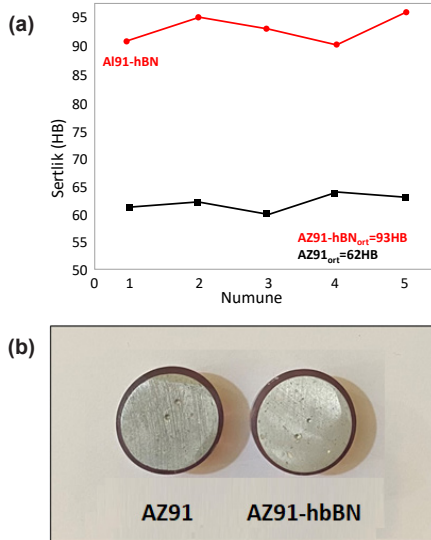
#### 3.2. Sertlik (Hardness)

Numunelerin sertlik değerleri Rockwell-B sertliğinde bulunmuştur ve bulunan değerler brinell (HB) cinsine çevrilmiştir. Yapılan sertlik deneylerinde saf AZ91 değerinin sertlik değeri literatür değerlerine benzer



**Şekil 3.** Numunelerin EDX analiz sonuçları (EDX analysis results of samples).

değerler çıktığı görülmüştür [30]. Sertlik deneylerinde hBN katkı miktarının AZ91-hBN numunelerinin sertliğini daha da artırdığı görülmüştür [31-36]. Numunelerin 5 farklı noktasından alınan sertlik değerleri ve ortalama sertlik değerleri ve bakalıte alınan, mikroyapıları ve sertlikleri incelenen kompozit numuneler Şekil 4'te gösterilmiştir.



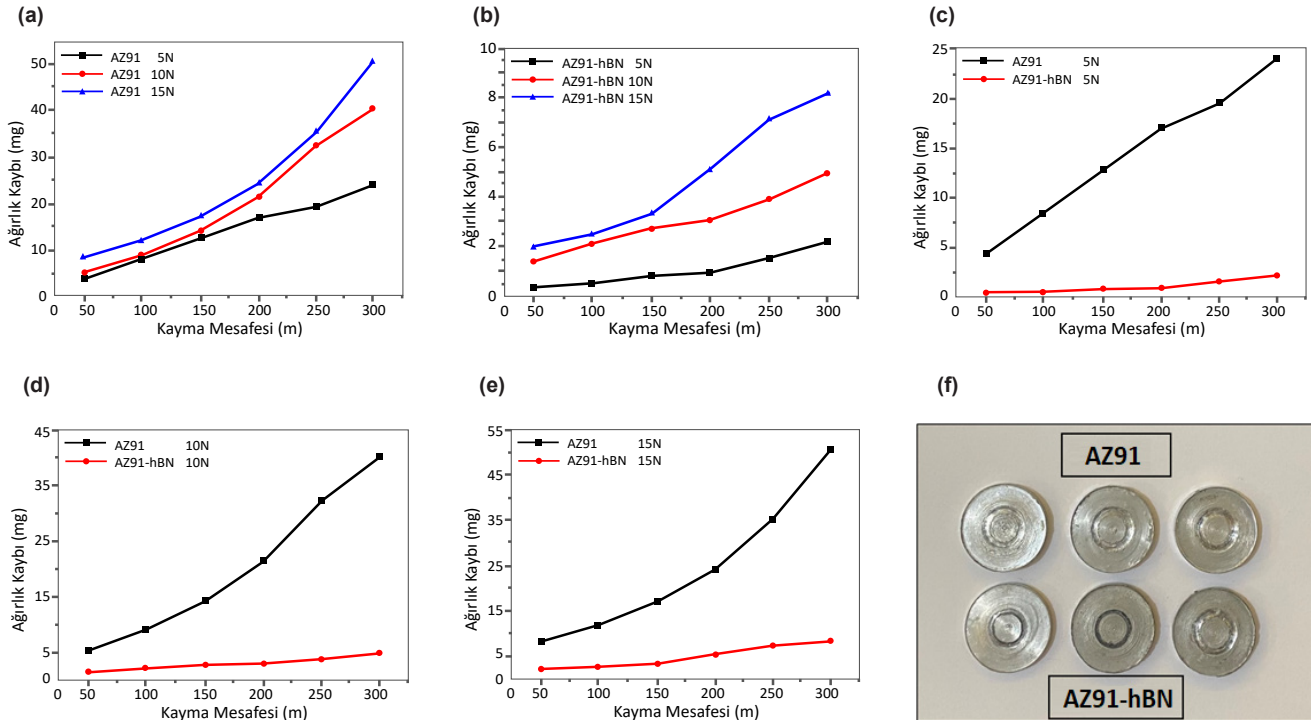
Şekil 4. a). 91 matrisli kompozitlerin sertlik değerleri, b). Mikroyapıları ve sertlikleri incelenen numuneler (a. Hardness values of AZ91 matrix composites, b). Samples whose microstructures and hardness were examined).

### 3.3. Triboloji (Tribology)

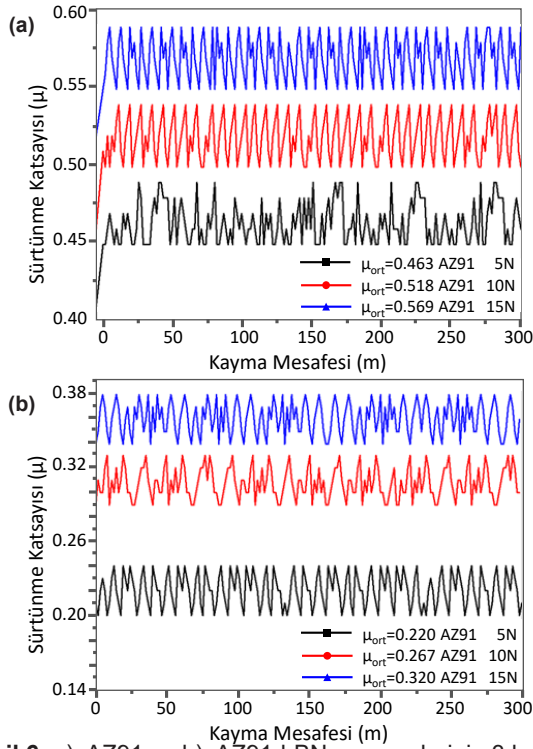
Aşınma deneylerinde 13 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. hBN katkılı numunelerin ağırlık kaybı miktarlarında saf AZ91'e göre daha iyi bir aşınma direnci gösterdiği görüldü. hBN takviyesiyle aşınma direncinde olumlu yönde etkilerin olduğu literatür çalışmalarında da görülmüştür (ağırlıkça %7,5 hBN [33], ağırlıkça %5-10 hBN [34], ağırlıkça %4 hBN [35], ağırlıkça %10, 15, 20 hBN [36]). Bu durumun hBN nanoparçacıklarının iyi bir yağlayıcı özelliği olması ve sertlik değerlerinin yüksek olması aşınma özelliklerini ve aşınma direncini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir [35,36]. 5 N, 10 N ve 15N yük altındaki aşınma ağırlık kayıpları ve aşınma deneyleri tamamlanan numunelerin son hali Şekil 5'te gösterilmiştir.

Kompozitlerde 3 farklı yük altında yeni numuneler için toplam 300 metre kayma mesafesinde meydana gelen sürtünme katsayısındaki değişimler Şekil 6'da gösterilmiştir. hBN katkısının sürtünme katsayısını düşürdüğü literatür çalışmalarında da görülmüştür [26,27,33-36]. Aşınma yüzeylerine uygulanan kuvvetin artmasıyla sürtünme katsayısında artış meydana gelmiştir.

Aşınma deneyleri tamamlanan kompozitlerin aşınma yüzeylerinin mikroyapılarının incelenmesi için SEM analizi uygulanmıştır. SEM analizleri



Şekil 5. a). AZ91, b). Z91-hBN kompozitinin 3 kuvvet altındaki aşınma ağırlık kaybı miktarları. Z91 ve AZ91-hBN kompozitinin 3 kuvvet altındaki c). 5N, d). 10N, e). 15N aşınma ağırlık kaybı miktarları. f). Mikroyapıları ve sertlikleri incelenen numuneler (Wear weight loss amounts of a). AZ91, b). AZ91-hBN composite under 3 forces. Wear weight loss amounts of AZ91 and AZ91-hBN composite under 3 forces c). 5N, d). 10N, e). 15N. f). Samples whose microstructures and hardness were examined).

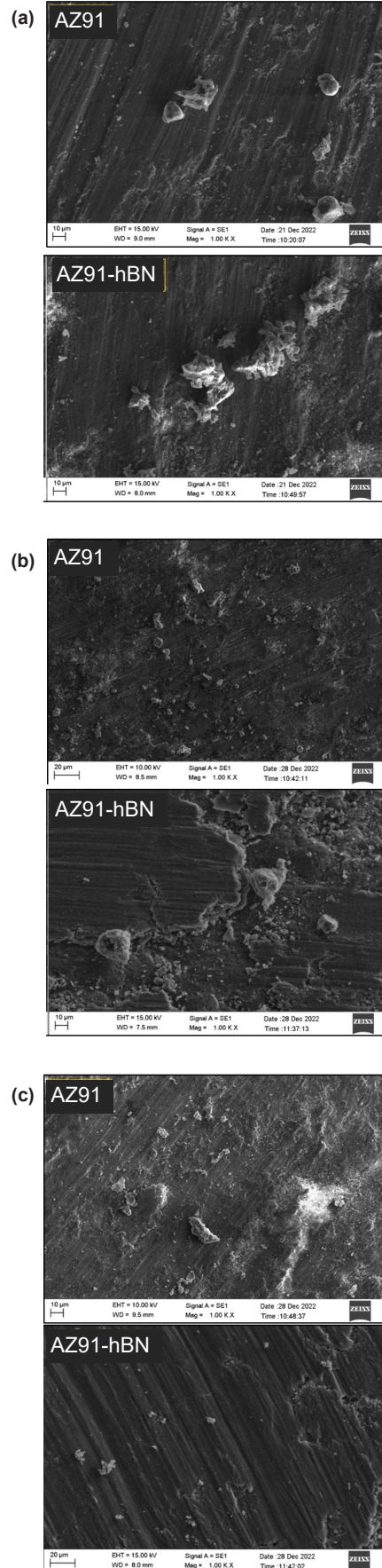


**Şekil 6.** a). AZ91 ve b). AZ91-hBN numunelerinin 3 kuvvet altındaki sürtünme katsayısı değerleri (a). AZ91 and b). AZ91-hBN samples friction coefficient values under 3 forces).

sonucunda saf AZ91 kompozesindeki meydana gelen aşınma durumları ile hBN katkılı kompozit numunelerde meydana gelen numuneler arasında belirgin bir aşınmaya karşı gösterilen direncin arttığı gözlemlenmiştir. Bu duruma hBN katkısının sebep olduğu düşünülmektedir [27-32]. AZ91 alaşımına hBN takviyesinin aşınma direncini ve aşınma izlerini belirgin şekilde etkilemiştir. Aşınma kuvvetinin artmasıyla kompozit numunelerdeki aşınma izlerinin daha net bir şekilde görülmüştür. 5 N, 10 N ve 15 N yük altındaki aşınma yüzeylerinin 3 farklı büyüklükteki SEM görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmada AZ91 magnezyum ve alaşımı ve AZ91 alaşımına ağırlıkça %10 hBN nanoparçacıkları takviye edilerek homojen kompozit malzeme karışımları yapılmıştır. Soğuk presleme tekniği ile hazırlanan tozların preslenmesi ve argon atmosferinde sinterlemeleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin mikroyapı, sertlik, kuru ortam şartlarında aşınma ve sürtünme katsayısı özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan sentezlemeler ve üretimlerin sonucunda AZ91 magnezyum alaşımı ile birleşimi yapılan hBN nanoparçacıklarının AZ91 alaşımıyla birleştiği mikroyapı görüntüleri üzerinde görülmüştür. Yapılan aşınma deneylerinde hBN takviyesiyle aşınma sonucunda meydana gelen ağırlık kayıplarında azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu durumun hBN nanoparçacıklarının iyi bir yağlayıcı özelliği taşıdığından ve hBN nanoparçacıklarının



**Şekil 7.** AZ91 ve AZ91-hBN numunelerinin 3 kuvvet altındaki a) 5 N, b) 10 N ve c) 15 N aşınma yüzeyi SEM görüntüleri (SEM images of AZ91 and AZ91-hBN specimens under 3 forces a) 5 N, b) 10 N and c) 15 N wear surface).

sertlik değerlerinin yüksek olmasının aşınma özelliklerinde hBN katkısının aşınma direncini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir. Yapılan sertlik deneylerinde saf AZ91 değerinin sertlik değeri literatür değerlerine benzer değerler çıktığı görülmüştür. Sertlik deneylerinde hBN takviyesinin sertlik değerini belirgin şekilde arttığı görülmüştür.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, bu çalışmaya maddi katkıları ve destekleri için Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu'na (FUBAP MF.21.74) teşekkür eder.

### Kaynaklar (References)

- [1] Easton, M., Song, W. Q., & Abbott, T. (2006). A comparison of the deformation of magnesium alloys with aluminium and steel in tension, bending and buckling. *Materials & Design*, 27(10), 935-946. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.005>.
- [2] Bagheri, B., Abbasi, M., Abdollahzadeh, A., & Kokabi, A. H. (2020). A comparative study between friction stir processing and friction stir vibration processing to develop magnesium surface nanocomposites. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27, 1133-1146. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-1993-4>.
- [3] Bagheri, B., & Abbasi, M. (2020). Development of AZ91/SiC surface composite by FSP: Effect of vibration and process parameters on microstructure and mechanical characteristics. *Advances in Manufacturing*, 8(1), 82-96. <https://doi.org/10.1007/s40436-019-00288-9>.
- [4] Tandon, R., & Madan, D. (2014). Emerging applications using magnesium alloy powders: A feasibility study. In: Alderman, M., Manuel, M.V., Hort, N., & Neelameggham, N.R. (eds). *Magnesium Technology 2014*. (pp. 21-25). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48231-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48231-6_7). ISBN 9783319482316.
- [5] Burke, P., Kipouros, Y. G., Judge, W. D., & Kipouros, G. J. (2019). Surprises and pitfalls in the development of magnesium powder metallurgy alloys. *Magnesium and Its Alloys*. (pp. 337-373). CRC Press. ISBN 9781351045476.
- [6] Fenker, M., Balzer, M., & Kappl, H. (2014). Corrosion protection with hard coatings on steel: Past approaches and current research efforts. *Surface and Coatings Technology*, 257, 182-205. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.069>.
- [7] Gökçe, A., Fındık, F., & Kurt, A. O. (2011). Microstructural examination and properties of premixed Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy. *Materials Characterization*, 62(7), 730-735. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.04.021>.
- [8] Jabbari Taleghani, M. A. (2014). *Processing and properties of high performance 7075 Al and AZ91 Mg powder metallurgy alloys* [Doctoral dissertation, Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10016/20871>.
- [9] Aydoğmuş, T., Kelen, F., & Aydemir, E. (2020). Processing of AZ91 Magnesium Alloy via Hot Pressing Technique. *Bitlis Eren University Journal of Science*, 9(1), 277-287. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.555946>
- [10] Yuan, Q. H., Zeng, X. S., Liu, Y., Luo, L., Wu, J. B., Wang, Y. C., & Zhou, G. H. (2016). Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy reinforced by carbon nanotubes coated with MgO. *Carbon*, 96, 843-855. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.10.018>.
- [11] Nouri, M., & Li, D. Y. (2017). Maximizing the benefit of aluminumizing to AZ31 alloy by surface nanocrystallization for elevated resistance to wear and corrosive wear. *Tribology International*, 111, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.009>.
- [12] Dinaharan, I., Zhang, S., Chen, G., & Shi, Q. (2022). Assessment of Ti-6Al-4V particles as a reinforcement for AZ31 magnesium alloy-based composites to boost ductility incorporated through friction stir processing. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(4), 979-992. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.09.026>.
- [13] Bagheri, B., Abbasi, M., Abdollahzadeh, A., & Mirsalehi, S. E. (2020). Effect of second-phase particle size and presence of vibration on AZ91/SiC surface composite layer produced by FSP. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(4), 905-916. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65264-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65264-5).
- [14] Yu, W., Wang, X., Zhao, H., Ding, C., Huang, Z., Zhai, H., ... & Xiong, S. (2017). Microstructure, mechanical properties and fracture mechanism of Ti2AlC reinforced AZ91D composites fabricated by stir casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 702, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.231>.
- [15] Aatthisugan, I., Razal Rose, A., & Selwyn Jebadurai, D. (2017). Mechanical and wear behaviour of AZ91D magnesium matrix hybrid composite reinforced with boron carbide and graphite. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(1), 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.12.004>.
- [16] Meher, A., Mahapatra, M. M., Samal, P., & Vundavilli, P. R. (2020). Study on effect of TiB2 reinforcement on the microstructural and mechanical properties of magnesium RZ5 alloy based metal matrix composites. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(3), 780-792. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.12.004>.
- [17] Liu, P., Jiang, H., Cai, Z., Kang, Q., & Zhang, Y. (2016). The effect of Y, Ce and Gd on texture, recrystallization and mechanical property of Mg-Zn alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 4(3), 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.07.001>.
- [18] Wang, C. J., Kang, J. W., Deng, K. K., Nie, K. B., Liang, W., Li, W. G. (2020). Microstructure and mechanical properties of Mg-4Zn-xGd (x=0, 0.5, 1, 2) alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(2), 441-451. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.06.005>.
- [19] Song, J., She, J., Chen, D., & Pan, F. (2020). Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1), 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.003>.
- [20] Haubner, R., Herrmann, M., Lux, B., Petzow, G., Weissenbacher, R., & Wilhelm, M. (2003). *High performance non-oxide ceramics II* (Vol. 102). Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-45623-6>.
- [21] Tyagi, R., Xiong, D., & Li, J. (2011). Effect of load and sliding speed on friction and wear behavior of silver/h-BN containing Ni-base P/M composites. *Wear*, 270(7-8),

- 423-430. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.08.013>.
- [22] Chen, B., Bi, Q., Yang, J., Xia, Y., & Hao, J. (2008). Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites. *Tribology International*, 41(12), 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.014>.
- [23] Tyagi, R., Xiong, D. S., Li, J. L., & Dai, J. (2010). High-temperature friction and wear of Ag/h-BN-containing Ni-based composites against steel. *Tribology Letters*, 40, 181-186. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9655-8>.
- [24] Yan, Y., Cao, H., Kang, Y., Yu, K., Xiao, T., Luo, J., & Dai, Y. (2017). Effects of Zn concentration and heat treatment on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of as-extruded Mg-Zn alloys produced by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 693, 1277-1289. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.017>.
- [25] Rashad, M., Pan, F., Asif, M., & Tang, A. (2014). Powder metallurgy of Mg-1% Al-1% Sn alloy reinforced with low content of graphene nanoplatelets (GNPs). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4250-4255. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.028>.
- [26] Lingaraju, S. V., Mallikarjuna, C., Annappa, A. R., & Venkatesha, B. K. (2022). Processing, and characterization of AZ91D magnesium alloy reinforced nano TiC, B4C, and HBN composites. *Materials Today: Proceedings*, 54, 479-485. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.118>.
- [27] Mahathanabodee, S., Palathai, T., Raadnui, S., Tongsri, R., & Sombatsompop, N. (2014). Dry sliding wear behavior of SS316L composites containing h-BN and MoS2 solid lubricants. *Wear*, 316(1-2), 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.04.015>.
- [28] Baradeswaran, A., & Elaya Perumal, A. (2013). Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites. *Composites Part B: Engineering*, 54, 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.012>.
- [29] Sharma, P., Sharma, S., & Khanduja, D. (2015). Production and some properties of Si3N4 reinforced aluminium alloy composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(3), 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.07.002>.
- [30] Yuan, Q. H., Zeng, X. S., Liu, Y., Luo, L., Wu, J. B., Wang, Y. C., & Zhou, G. H. (2016). Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy reinforced by carbon nanotubes coated with MgO. *Carbon*, 96, 843-855. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.10.018>.
- [31] Yıldırım, M., & Özyürek, D. An investigation of wear behaviours of Mg matrix composites reinforced carbon nanotube produced by powder metallurgy method. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(3), 1-8. <https://doi.org/10.29137/umagd.1038336>.
- [32] Turan, M. E., Zengin, H., & Sun, Y. (2020). Dry sliding wear behavior of (MWCNT+GNPs) reinforced AZ91 magnesium matrix hybrid composites. *Metals and Materials International*, 26, 541-550. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00338-8>.
- [33] Loganathan, P., Gnanavelbabu, A., & Rajkumar, K. (2021). Investigation on mechanical and wear behaviour of AA2024/hBN composites synthesized via powder metallurgy routine. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7865-7870. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.503>.
- [34] Ayyanar, S., Gnanavelbabu, A., Rajkumar, K., & Loganathan, P. (2021). Studies on high temperature wear and friction behaviour of AA6061/B 4 C/hBN hybrid composites. *Metals and Materials International*, 27, 3040-3057. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00710-z>.
- [35] Tyagi, R., Xiong, D., & Li, J. (2011). Effect of load and sliding speed on friction and wear behavior of silver/h-BN containing Ni-base P/M composites. *Wear*, 270(7-8), 423-430. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.08.013>.
- [36] Mahathanabodee, S., Palathai, T., Raadnui, S., Tongsri, R., & Sombatsompop, N. (2013). Effects of hexagonal boron nitride and sintering temperature on mechanical and tribological properties of SS316L/h-BN composites. *Materials & Design*, 46, 588-597. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.038>.