



# AlB<sub>2</sub> Borür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Abrasif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma

Erman İnci<sup>1\*</sup>, Ömer Savaş<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-8586-4523)

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0001-7454-1457)

(İlk Geliş Tarihi 21 Nisan 2020 ve Kabul Tarihi 31 Ağustos 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.724381)

**ATIF/REFERENCE:** İnci, E. & Savaş, Ö. (2020). AlB<sub>2</sub> Matrisli Kompozitlerin Abrasif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 873-880.

## Öz

Bu çalışmada AlB<sub>2</sub> takviyeli metal matrisli kompozitlerin farklı test koşulları altında abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Üretilen kompozit malzemelere aşınma testleri uygulanırken Taguchi deneysel yönteminden faydalanılmıştır. Aşınma testleri için matris tipi, takviye oranı, aşındırıcı zımpara tipi, yük ve kayma hızı faktörleri ele alınmış ve deney reçeteleri L<sub>8</sub> (2<sup>5</sup>) ortogonal serisi baz alınarak hazırlanmıştır. Üretilen kompozitlerin aşınma özellikleri ağırlık kayıpları dikkate alınarak analiz edilmiştir. Deneyler sonucunda aşındırıcı zımpara tipinin aşınma üzerine en etkili faktör olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte artan yüklerle birlikte aşınma miktarlarının arttığı ve matrise ilave edilen AlB<sub>2</sub> parçacıklarının artışıyla birlikte aşınma miktarının azaldığı saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Abrasif aşınma, AlB<sub>2</sub>, Metal matrisli kompozitler.

## An Experimental Study on Investigation of Abrasive Properties of AlB<sub>2</sub> Borid Reinforced Aluminium Matrix Composites

### Abstract

In this study, it is aimed to investigate the abrasive wear behavior of AlB<sub>2</sub> reinforced metal matrix composites under different test conditions. When applying abrasion tests to the composite materials produced, Taguchi experimental method was used. For wear tests, matrix type, reinforcement ratio, abrasive sanding type, load and shear rate factors are discussed and test recipes are prepared base on L<sub>8</sub> (2<sup>5</sup>) orthogonal series. The wear amounts of the produced composites, were analyzed taking into consideration the weight loses. As a result of the experiments, it was concluded that the abrasive sanding type is the most effective factor on wear. However, it was found that the amount of wear increased with increasing load and the amount of wear decreased with the increase of AlB<sub>2</sub> particules added to matrix.

**Keywords:** Abrasive wear, AlB<sub>2</sub>, Metal matrix composites.

### 1. Giriş

Aşınma, iki karşı yüzeyin göreceli hareketi esnasında yüzeyler arasında meydana gelen ve yüzeylerin bozulmasıyla endüstriyel operasyonlarda yıkıcı etkisi olan bir olgudur (Mohan, Prakash, ve Pathak, 2002). Aşınma probleminin önüne geçmek için düşük sürtünme katsayılı ve yüksek aşınma dirençli malzemelere ihtiyaç doğmuştur (P. Sharma, Khanduja, ve Sharma, 2014).

Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları, iyi mekanik özellikleri ve korozyona karşı dirençleriyle otomotiv ve hava-uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılır (K. Das, S. Das, ve S. Das, 2007; S. C. Sharma, 2001). Alüminyum alaşımlarının aşınma dirençlerinin görece düşük olması kullanımlarını tribolojik olarak sınırlamaktadır (Das vd., 2007).

\* Sorumlu Yazar: Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0002-8586-4523, [ermaninci.93@gmail.com](mailto:ermaninci.93@gmail.com)

Sünek ve sert alüminyum matrisin aşınmaya dayanıklı ve güçlü seramik parçacıklarla karıştırılması ile ihtiyaca göre uyarlanabilir özelliğe sahip bir malzeme oluşturmak için kompozit üretimi ortaya çıkmıştır (M.A. Taha, 2001). Yüksek dayanım, sertlik ve aşınma dirençleri sebebiyle alüminyum matrisli kompozitler tekil yapı malzemelerin yerini aldı (Miracle, 2005). Sert seramik parçacıklarıyla takviye edilmiş alüminyum alaşımlar alüminyum matrisli kompozitler olarak bilinir. Alüminyum matrisli kompozitler düşük yoğunluk, yüksek sertlik, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, iyi korozyon ve aşınma dirençleri gibi özellikleri sebebiyle otomotiv, hava araçları ve deniz endüstrisi gibi düşük ağırlık ve sağlamlığın birlikte ihtiyaç duyulduğu alanlarda uygulanma potansiyeline sahiptir (Dinaharan ve Murugan, 2012; Miracle, 2005; Rosso, 2006).

Alüminyum matrisli kompozitlerin günümüzde en önemli malzeme olarak anılmasının ve uygulamalarının hızla artmasının sebebi geleneksel alüminyum alaşımlara karşı sahip oldukları düşük yoğunluk, aşınmaya karşı direnç ve özgül dayanımlarıdır (Liu, Wang, Xiao, Ma, ve Liu, 2010). Alüminyum matrisli kompozitler için takviye parçacıkları olarak  $Al_2O_3$ ,  $TiB_2$ ,  $TiC$ ,  $ZrC$  ve  $ZrB_2$  gibi in-situ seramik bileşimlerinin kullanımı yaygındır (H. G. Zhu, Ai, Min, Wu, ve Wang, 2010).

Alüminyum matrisli kompozitlerin daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasında takviye parçaları ve matris arasındaki ara yüzeyin önemli bir etkisi vardır (Tjong ve Ma, 2000). Takviye parçacıklarının temiz bir ara yüz ve yüksek bir bağlama kuvveti oluşturması için, matris içinde homojen bir dağılıma sahip olması ve matris tarafından iletilebilmesi gerekir (Emamy, Mahta, ve Rasizadeh, 2006; H. Zhu, Wang, Ge, Xu, ve Yuan, 2008).

Taguchi yöntemi, Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen ve deney sayısını azaltarak kaliteyi artırmak için tercih edilen bir yöntemdir (P. J. Ross & Ross, n.d.). Farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasında en iyi birleşimi tespit etmek adına Taguchi yöntemi, oldukça faydalı bir yöntemdir. Bu yöntem bazı araştırmacılar tarafından malzemelerin aşınma davranışlarını incelemek için kullanılmıştır. Örneğin, Mahapatra ve Patnaik (2009), Sidhartha ve Gupta (2012), Radhika, Subramanian ve Prasad (2011) çalışmalarında daha düşük ağırlık kaybının tahmini için Taguchi yöntemini başarılı bir şekilde kullanmışlardır. Savaş ve ark. Fonksiyonel derecelendirilmiş  $Al_3Ti/Al$  kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarını Taguchi yaklaşımı ile incelemişlerdir. Çalışmada üretilen kompozitlerinin abrasif aşınma davranışları üzerine etkili faktörlerin, takviye oranının, aşındırıcı tipinin, kayma hızı ve kayma mesafesinin olduğunu rapor etmişler ve aşınma üzerine en etkili faktörün aşındırıcı tipi olduğu ve onu sırası ile takviye oranı, kayma hızı ve kayma mesafesi faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir (Savaş ve Başer, 2019).

Singh, Mondal ve Das (2006) çalışmalarında, tüm test koşullarında kompozitlerin aşınma dirençlerinin alüminyum alaşımlarından daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Tjong ve Lau (2014) kompozit içerisindeki takviye parçacıkları oranının artışıyla birlikte aşınmaya karşı dirençte çarpıcı biçimde artış olduğunu gösterdiler. Savaş ve ark. Fonksiyonel derecelendirilmiş  $TiB_2$  takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarını araştırmaya yönelik olarak yaptıkları çalışmada, artan yük ve kayma hızı ile kompozitlerin ağırlık kayıplarının arttığını ve artan takviye oran ile ağırlık kayıplarının önemli oranda azaldığını rapor etmişlerdir (SAVAŞ & Demirok, 2019).

Nachimuthu Radhika ve ark (Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016) fonksiyonel derecelendirilmiş  $AlB_2/Al$  kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada yük, kayma mesafesi ve abrasif aşındırıcı tipinin ( $SiC$  ve  $Al_2O_3$ ) gibi deney parametrelerinin kompozitlerin aşınma davranışı üzerine etkisi irdelenmiştir. Aşınma test sonuçları alüminyum matris içerisinde artan  $AlB_2$  takviye oranı ile aşınma hızının azaldığı ve  $SiC$  partiküllerinin görece olarak daha çok aşındırıcı özelliğe sahip olduğunu göstermiştir.

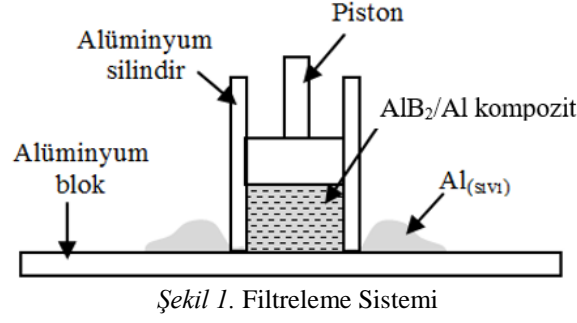
Fıçıcı ve ark. (Fıçıcı, 2016) (Fıçıcı, Koksall, Kayıkcı ve Savaş, 2011) (Koksall, Fıçıcı, Kayıkcı, ve Savaş, 2012)  $AlB_2/Al$  kompozitlerinin aşınma davranışlarını araştırmaya yönelik olarak yaptıkları çalışmada alüminyum matris içerisinde artan  $AlB_2$  takviye oranı ile aşınma direncinin arttığını rapor etmişlerdir.

Bu çalışmanın hedefi farklı test koşullarında saf Al matrisli ve Al-Cu alaşım matrisli kompozitlerin abrasif aşınma dirençlerinin araştırılması ve matris tipi, takviye oranı, aşındırıcı zımpara tipi, yük ve kayma hızı gibi parametrelerin abrasif aşınma davranışı üzerine etkisinin incelenmesidir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kompozitlerin Üretimi ve Özellikleri

Araştırmada kullanılacak olan kompozitlerin üretiminde Al-2B master alaşımı kullanılmıştır. Al-B faz diyagramı dikkate alındığında Al-2B master alaşımı içerisinde kararlı  $AlB_2$  ve kararsız  $AlB_{12}$  ve  $AlB_{12}$  gibi borür yapılarını içermesi mümkün görülmektedir (Carlson, 1990). Yapıda kararsız borür yapılarının  $AlB_2$  borür yapılarına dönüşmesi için Al-2B master alaşımı  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 6 saat boyunca fırın içerisinde bekletilmiştir. Bu sıcaklıkta hazırlanan " $Al_{(sıvı)} + AlB_{2(katı)}$ " çözeltisinin hem takviye oranını artırmak hem de nihai şekillerinin verilmesi amacı ile Savaş ve ark. (Savaş ve Kayıkcı, 2013) (Kayıkcı ve Savaş, 2015) yaptıkları tasarıma benzer şekilde, Şekil 1'de temsili görüntüsü verilen bir filtreleme sistemi tasarlanmıştır. Çelikten imal edilen filtreleme sistemi, " $Al_{(sıvı)} + AlB_{2(katı)}$ " karışımındaki sadece sıvı alüminyumun dışarı çıkmasını sağlayan 0.4 mm çapında tahliye delikleri açılmıştır. Şekilde görülen piston ile yarı-katı çözeltiye uygulanan basınç (yaklaşık 10Mpa) yardımı ile erimiş metalin deliklerden kontrollü bir şekilde dışarı çıkmasını sağlamaktadır. Bu şekilde hem kompozitin takviye %10 seviyesine çıkarılmış hem de çözelti sıkıştırılarak katılaştırılmıştır. Çelikten imal edilen filtreleme sisteminin sıvı alüminyum ile reaksiyona girmesini önlemek amacıyla sistemin iç yüzeyi sıvı bor nitrid sprey boya ile kaplanmıştır.



Şekil 1. Filtreleme Sistemi

Kompozitlerin matris alaşımı ile karşılaştırılmasının daha gerçekçi olması amacı ile %99,99 safiyete sahip saf alüminyum 900 °C'de ergitilmiş ve filtreleme sistemine açılan delikler kapatılarak aynı basınç altında katılaştırılmıştır. Kompozit üretiminde matris çeşitliğini sağlamak amacı ile 900 °C'de hazırlanan "Al<sub>(sıvı)</sub> + AlB<sub>2(katı)</sub>" çözeltisi ve saf alüminyuma içerisine %99,99 safiyete sahip bakır ilave edilerek sıvı alüminyum %5 oranında alaşımlanması sağlanmıştır.

Ağırlık kayıplarını ölçmek için hassas terazi kullanılmıştır. Hassas terazinin ölçüm hassasiyeti 0.00001 gramdır.

Kompozitlerin ve matris alaşımlarının yoğunlukları Arşimet tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Yapıda yalnızca AlB<sub>2</sub> borür yapıları içerdiği varsayılarak, üretilen kompozitlerin takviye oranları yoğunluk ölçümleri dikkate alınarak karışımlar kuralına göre hesaplanmıştır. Kompozit numunelerinin mikro yapısının incelenmesi için Olympus optik mikroskop kullanılmıştır.

## 2.2. Aşınma Deneyleeri

Kompozitlerin aşınma testleri abrasif aşınma tekniği ile yapılmıştır. Numuneler 6 mm çapında ve 20 mm boyunda silindirik yapıda hazırlanmıştır.

Kompozitlerin abrasif aşınma özelliklerinin belirlenmesinde matris tipi, takviye oranı, aşındırıcı ortam, yük ve kayma hızı olmak üzere 5 faktör dikkate alınmıştır. Seçilen her faktör iki seviyeli olarak belirlenmiştir. Aşınma testlerinde aşındırıcı medya olarak ortalama 46 ve 18 µm partikül boyutuna sahip 320 ve 1000 meşlik SiC su zımparaları seçilmiştir. Kayma hızı faktörü için 1 m/s ve 2,7 m/s kayma hızları, yük faktörü için 1 N ve 2 N'lük yükler seçilmiştir. Tablo 1'de aşınma testleri için belirlenen faktör ve seviye değerleri verilmiştir. Tablo 1'de verilen faktör ve seviyeleri dikkate alınarak Taguchi yaklaşımına göre L<sub>8</sub>(2<sup>5</sup>) ortogonal serisi seçilerek 8 adet deney reçetesi belirlenmiştir. Tablo 2'de belirlenen 8 adet deney reçetesi görülmektedir. Aşınma sonuçlarının analizinde ağırlık kaybı dikkate alınmıştır. Her bir deney reçetesi güvenilirliği artırmak amacı ile en az 3'er kez tekrarlanmıştır.

Tablo 1. Aşınma Deneyleeri İçin Seçilen Faktör ve Seviye Değerleri

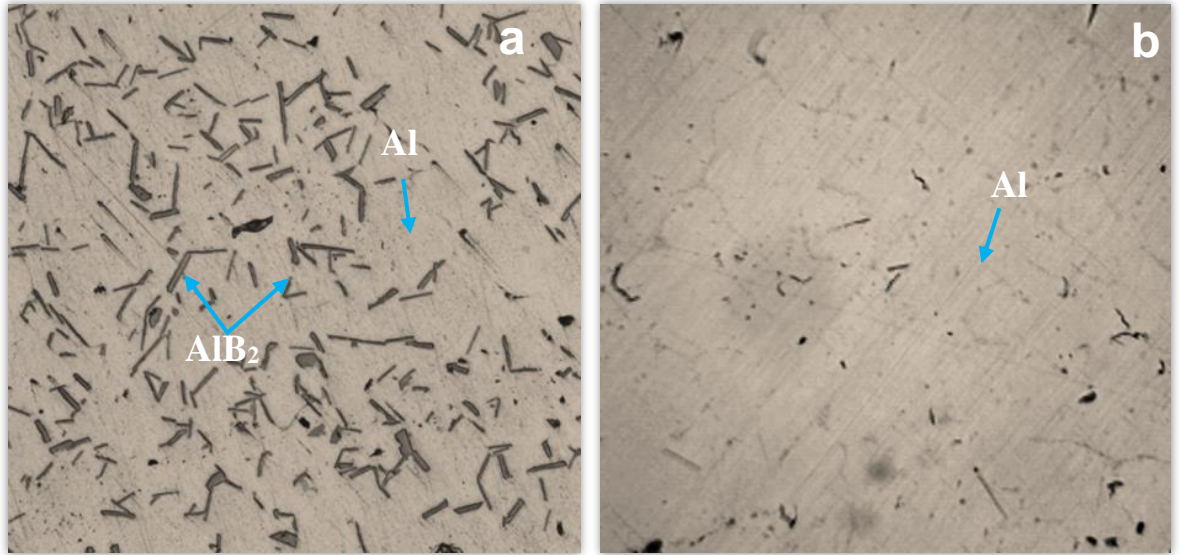
Kolon	Faktör	Faktör Seviyesi	
		1. Seviye	2. Seviye
A	Matris tipi	Saf Al	Al-Cu
B	Takviye oranı, %	0	10
C	Aşındırıcı medya, µm	46	18
D	Yük, N	1	2
E	Kayma hızı, m/s	1	2,7

Tablo 2. Aşınma Deneyleri İçin Seçilen  $L_8(2^5)$  Ortogonal Serisi ve Deney Reçeteleri

Deney no	Matris tipi	Takviye oranı, %	Aşındırıcı Medya, $\mu\text{m}$	Yük, N	Kayma hızı, m/s
1	Al	0	18	1	2,7
2	Al	0	46	2	1
3	Al	10	18	2	1
4	Al	10	46	1	2,7
5	Al-Cu	0	18	2	2,7
6	Al-Cu	0	46	1	1
7	Al-Cu	10	18	1	1
8	Al-Cu	10	46	2	2,7

### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Üretilen  $\text{AlB}_2$  takviyeli alüminyum matris kompozite ve matris alaşımına ait bir mikro yapı görüntüsü Şekil 2(a)-(b)'de sırası ile verilmiştir. Şekil 2(a)'da alüminyum matris içerisinde yaklaşık 20  $\mu\text{m}$  uzunluğunda  $\text{AlB}_2$  borür yapıları görülmektedir. Ayrıca mikro yapıda  $\text{AlB}_2$  yapılarının homojen dağılıma sahip olduğu ve matris ve takviye fazı arasında ara bileşiklerin olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.a) %10  $\text{AlB}_2$  takviyeli alüminyum matris kompozit, b) Saf alüminyum matris

Tablo 3'te üretilen % 10 takviye oranına sahip  $\text{AlB}_2/\text{Al}$  ve  $\text{AlB}_2/\text{Al-Cu}$  kompozit ve saf Al ve Al-Cu matris alaşımlarının ortalama Brinell sertlik sonuçları görülmektedir.

Tablo 3'te kompozit malzemelerinin sertlik değerlerinin matris alaşımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca tabloda  $\text{AlB}_2/\text{Al-Cu}$  kompozitinin sertlik değerinin  $\text{AlB}_2/\text{Al}$  kompozitinden daha yüksek olduğu dikkati çekmektedir. Tabloda en düşük sertlik değeri ortalama 25,8 HB ile saf alüminyum matriste iken en yüksek sertlik değeri ortalama 92 HB ile  $\text{AlB}_2/\text{Al-Cu}$  kompozitinde olduğu görülmektedir. Matrise göre kompozitlerin sertlik değerinin daha yüksek olmasının nedeni matris içerisindeki %10 oranındaki  $\text{AlB}_2$  borür yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 3. Üretilen Kompozit ve Matris Alaşımlarının Ortalama Sertlik Değerleri

Malzeme	Sertlik, HB
Saf Al matris	25,86
Al-Cu matris	73,02
% 10 AlB <sub>2</sub> /Al kompozit	54,85
% 10 AlB <sub>2</sub> /Al-Cu kompozit	92,15

Tablo 4'te L<sub>8</sub>(2<sup>5</sup>) ortogonal serisinin sunduğu reçetelere göre yapılan aşınma deney sonuçları, onların ortalamaları ve “en küçük en iyidir” kalite karakteristiğine göre hesaplanan S/N oranları verilmiştir. Tabloda göreceğimiz üzere en yüksek ağırlık kaybının 2 numaralı deneyde ortalama 0,1235 gr, en düşük ağırlık kaybının ise 7 numaralı deneyde ortalama 0,012 gr olarak ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonucunda, ağırlık kayıplarının 0,012 – 0,1235 gr arasında değişim gösterdiğini görmekteyiz.

Tablo 4. L<sub>8</sub> Ortogonal Serisinin Önerdiği Reçetelere Ağırlık Kayıpları Ölçümleri, Ortalamaları ve Sinyal / Gürültü (S/N) Oranları

D. No	1. ölçüm, g	2. ölçüm, g	3. ölçüm, g	Ort.	S/N
1	0,03535	0,03231	0,03623	0,03463	29,21
2	0,15352	0,12668	0,09030	0,12350	18,17
3	0,02743	0,02271	0,02336	0,02450	32,22
4	0,05488	0,04200	0,04040	0,04576	26,79
5	0,03220	0,01025	0,01785	0,02010	33,94
6	0,04292	0,04703	0,04505	0,04500	26,94
7	0,01235	0,01209	0,01157	0,01200	38,42
8	0,04322	0,05169	0,04840	0,04777	26,42

Tablo 4'te görülen S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış ANOVA tablosu Tablo 5'te gösterilmektedir. ANOVA tablosunda % 95 güven düzeyi için ( $F_{(hesap)} > F_{(tablo)}$ ) olan faktörler) matris tipi, takviye oranı ve aşındırıcı medya, ağırlık kayıpları üzerinde büyük ölçüde bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan yük ve kayma hızı faktörlerinin ağırlık kaybı üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte ANNOVA tablosu bize ağırlık kayıplarına en etkili faktörün 57,58  $F_{(hesap)}$  değeri ile aşındırıcı medya olduğunu göstermekte ve aşındırıcı medyayı sırasıyla 17,09  $F_{(hesap)}$  değeri ile matris tipi ve 11,12  $F_{(hesap)}$  değeri ile takviye oranının takip ettiğini görmekteyiz. Tabloda kayma hızı faktörü, ağırlık kaybına etkisi düşük olduğu için “pooling” yapılarak hesaba dâhil edilmemiştir ve \* işareti ile belirtilmiştir.

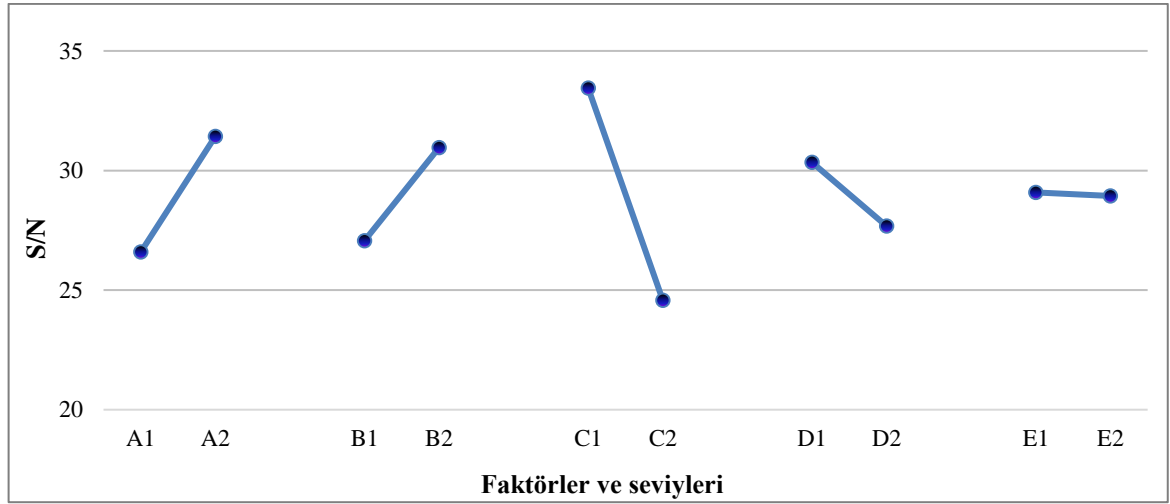
Tablo 5. Sinyal / Gürültü Oranlarına Göre Hazırlanan ANNOVA Tablosu

Kolon	Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı S	Serbestlik Derecesi f	Kareler Ortalaması	Teorik F $F_{(hesap)}$	İstatiksel F $F_{(tablo)}$
A	Matris tipi	46,67	1	46,67	17,09	10,1 (%95 için)
B	Takviye oranı	30,38	1	30,38	11,12	10,1 (%95 için)
C	Aşındırıcı ortam	157,28	1	157,28	57,58	10,1 (%95 için)
D	Yük	14,09	1	14,09	5,16	5,54 (%90 için)
E	*Kayma hızı	0,05	1	0,05	0,02	5,54 (%90 için)
	Toplam	248,42	4	62,1		
	e	8,19	3	2,73		
	*pooling, ep					

Şekil 3'te faktör seviyelerinin S/N oranları temel alınarak hazırlanmış olan “Faktör ve seviyelerinin grafik üzerinde gösterimi” görülmektedir. Grafikte faktörlerden büyük olan değer en düşük ağırlık kaybının elde edildiği optimum deney faktör seviyeleridir. Bu e-ISSN: 2148-2683

grafik sonucunda optimum faktör seviyeleri; A2, B2, C1, D1 ve E1 olarak gözükmektedir. Bu sonuç da en düşük ağırlık kaybının Al-Cu matrisli ve %10 AIB<sub>2</sub> ile güçlendirilen kompozitin 18 µm partikül boyuruna sahip aşındırıcı medya ortamında 1 N yük altında ve 1 m/s hızla yapılan deney reçetesi ile elde edileceğini göstermektedir.

Şekil 3'te S/N oranları dikkate alınarak hazırlanan grafikte yüksek S/N oranı düşük ağırlık kaybını ifade etmektedir. Grafik incelendiği zaman ağırlık kaybı üzerinde en fazla etkiye sahip faktörün C faktörü yani aşındırıcı medya tipi olduğu görülmektedir. C1 olarak ifade edilen 18 µm aşındırıcı medya ortamında ağırlık kaybının düşük ve C2 olarak ifade edilen 48 µm'ük aşındırıcı medya ortamında ağırlık kaybının daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. A ve B faktörlerini incelediğimiz zaman matris tipinin A1 (Al) yerine A2 (Al-Cu) seçilmesinin ve B1 ve B2 faktör seviyeleri olarak tanımlanan AIB<sub>2</sub> takviye oranının %0'dan %10'a çıkarılmasının ağırlık kaybını önemli ölçüde azalttığı görülebilmektedir. Grafikte, yük faktörünün ağırlık kaybına etki değerinin matris tipi ve takviye oranının peşinden geldiğini görülmektedir. 1 N ve 2 N olan yük faktörü grafikte sırasıyla D1 ve D2 olarak tanımlanmıştır ve grafikte de açıkça görebildiğimiz gibi uygulanan yükün artışı ağırlık kaybının da artmasına sebep olmuştur. Son olarak hız faktörünün ise ağırlık kaybına ciddi bir etkiye sahip olmadığı grafik üzerindeki E1 (1 m/s) ve E2 (2,7 ms) ifadeleri ile görülebilmektedir.



Şekil 3. Faktör ve seviyelerinin grafik üzerinde gösterimi

Tablo 6'da en az ağırlık kaybını elde etmek için optimum faktörler işaretlenmiştir.

Tablo 6. Minimum Ağırlık Kaybı İçin Önerilen Optimum Deney Şartları

Kolon	Faktör	Faktör Seviyesi	
		1. Seviye	2. Seviye
A	Matris tipi	Saf Al	Al-Cu
B	Takviye oranı, %	0%	10%
C	Aşındırıcı medya	18 µm	48 µm
D	Yük, N	1	2
E	Kayma hızı, m/s	1 m/s	2,7 m/s

Taguchi yaklaşımına göre yaptığımız bu incelemede deneylerin doğru yapıp yapılmadığını test etmek için optimum deney şartlarında bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Tablo 6'da işaretli kutucuklardaki değerler ile bir doğrulama deneyi yapılmıştır. Taguchi yaklaşımına göre S/N oranları ve ağırlık kayıpları için %95 güven düzeyine göre hesaplanan tahmini güven aralığı ve ortalama değerleri verilmiştir. Ek olarak tabloda doğrulama deneyi sonucunda elde edilen S/N oranı ve ortalama ağırlık kaybı değerleri görülmektedir.

Tablo 7. Tahmini Güven Aralığı

Nicelik	S/N oranı	Ağırlık kaybı
Optimum şartlar	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> E <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> E <sub>2</sub>
Hesaplanan ortalama değer,	39,14 dB	0,0111 gr
$\alpha=0,05$ için hesaplanan güven aralığı	36,39 dB < $\mu$ < 41,89 dB	0,0080 gr< $\mu$ <0,0152 gr
Doğrulama deneyi	38,91 dB	0,0113 gr

Tablo 7’de optimum şartlar altında yapılan doğrulama deneyi neticesinde ortalama ağırlık kaybı değerinin 0,0111 gr ve S/N oranının 39,14 dB değerinde olması gerektiği görülmektedir. Tablo 7’de görüldüğü üzere yapılacak olan doğrulama deneyinde ağırlık kaybı değerinin 0,00804 gr ile 0,01516 gr arasında olması gerekmektedir. Yapılan doğrulama deneyi sonucunda S/N oranı 38,91 dB ve ağırlık kaybı 0,0113 gr olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonucun tabloda gösterilen güven aralığı değerlerinin içinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar yapılan deneylerde kontrol altına alınamayan bir faktörün olmadığına göstergesidir.

Çalışmalar neticesinde yapılan aşınma deneylerinin sonuçları göz önüne alındığında üretilen kompozit için aşınma ile ağırlık kaybına en fazla etki eden faktörün aşındırıcı medya ortamı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4 C faktörü). Yapılan önceki çalışmalarda da artan aşındırıcı partikül boyutunun artmasının aşınmayı arttırdığı rapor edilmiştir (Ficici, 2016) (Ficici & Koksal, 2016). Bu çalışmada da benzer şekilde aşındırıcı zımparadaki partikül boyunun büyümesiyle birlikte aşınma ve ağırlık kaybı miktarlarında artış olmuştur. Bunun muhtemel nedeni önceki çalışmalarda rapor edildiği gibi aşındırıcı partikül boyutunun artması aşınma yüzeylere daha fazla penetre olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Savaş, 2019).

Deney sonuçlarındaki bir diğer dikkat çekici husus matris içerisindeki takviye parçacıkları oranıdır. Takviye oranının artmasıyla beraber malzemenin aşınmaya karşı direncinin de ciddi ölçüde arttığı görülmüştür (Şekil 4 B faktörü). Literatür çalışmasında artan takviye oranıyla birlikte malzemenin sertliklerinin artırarak aşındırıcı partiküllerinin aşınan yüzeye doğru penetrasyonunu zorlaştırmasından dolayı kompozitlerin aşınma direncini artırdığını rapor etmişlerdir (Kumar, Chakraborty, Subramanya Sarma, & Murty, 2008; Kumar, Sarma, & Murty, 2007; Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016). Bu çalışmada da AIB<sub>2</sub> ile güçlendirilmiş malzemenin aşınmaya karşı direncinin arttığı önceki çalışmalara benzer şekilde görülmüştür. Bunun nedeni AIB<sub>2</sub> partiküllerinin matrisin sertlik değerini arttırmasıdır. Yine sonuçlarda matris tipindeki farklılığın aşınma direncine etkisinin olduğu görülmektedir. Matris tipi olarak Al yerine Al-Cu alaşımının kullanılması malzemenin aşınmaya karşı daha dirençli bir hal aldığı görülmüştür (Şekil 4 A faktörü). Yük faktörü ele alındığı zaman deney sonuçlarında artan yük miktarının aşınmayı arttırdığı görülmüştür (Şekil 4 D faktörü). Bu durumun muhtemel nedeni arttan yük ile birlikte aşındırıcı partiküllerin malzemeye penetrasyonunun artmasıdır (Ozdin, 2007)(Nachimuthu Radhika & Raghu, 2016)(Kumar et al., 2007)(N. Radhika & Raghu, 2018)(Ko, 2006).

## 4. Sonuç

Bu çalışmada alüminyum ana yapıya AIB<sub>2</sub> takviyeli metal matrisli kompozitlerin aşınma özelliklerinin Taguchi yöntemi ile araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde sunulmuştur;

1. Üretilen kompozitlerin aşınma davranışları üzerine etkili faktörlerin matris tipi, takviye oranı, aşındırıcı tipi ve yük olduğu tespit edilmiştir. En etkili faktörün aşındırıcı tipi olduğu ve onu sırası ile matris tipi, takviye oranı ve yük faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.
2. Matrise ağırlıkça %10 oranında AIB<sub>2</sub> takviyesinin hem AIB<sub>2</sub>/Al hem de AIB<sub>2</sub>/Al-Cu kompozitinde ağırlık kaybında dikkat çekici oranda azalmaya yol açtığı gözlenmiştir.
3. En düşük ağırlık kaybının elde edilmesi için önerilen optimum faktör seviyelerinin A<sub>2</sub>,B<sub>2</sub>,C<sub>1</sub>,D<sub>1</sub> ve E<sub>2</sub> şeklinde olduğu sonucuna varılmıştır. Al-Cu matrisli ve %10 AIB<sub>2</sub> takviyeli kompozitin 1000 grid aşındırıcı zımpara kademesi ve 1 N yük altında 1 m/s kayma hızıyla yapılan aşınma deneyleri neticesinde en düşük ağırlık kaybının elde edileceği tespit edilmiştir.
4. Optimum deney şartları altında yapılacak doğrulama deneyinde ağırlık kaybı değerinin 0,00804 gr ile 0,01516 gr arasında olması gerektiği belirlenmiştir ve yapılan doğrulama deneyinde ağırlık kaybı değeri 0,01134 gr olarak ölçülmüştür.

## Kaynakça

- Carlson, B. O. N. (1990). The Al-B ( Aluminum-Boron ) System, *11*(6), 2092.
- Das, S., Das, S., & Das, K. (2007). SCIENCE AND Abrasive wear of zircon sand and alumina reinforced Al – 4 . 5 wt % Cu alloy matrix composites – A comparative study, *67*, 746–751. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.05.001>
- Dinakaran, I., & Murugan, N. (2012). Effect of friction stir welding on microstructure , mechanical and wear properties of AA6061 / ZrB<sub>2</sub> in situ cast composites. *Materials Science & Engineering A*, *543*, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.085>

- Emamy, M., Mahta, M., & Rasizadeh, J. (2006). SCIENCE AND Formation of TiB<sub>2</sub> particles during dissolution of TiAl<sub>3</sub> in Al – TiB<sub>2</sub> metal matrix composite using an in situ technique, *66*, 1063–1066. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.016>
- Ficici, F. (2016). The experimental optimization of abrasive wear resistance model for an in-situ AlB<sub>2</sub>/Al-4Cu metal matrix composite. *Industrial Lubrication and Tribology*, *68*(6), 632–639. <https://doi.org/10.1108/ILT-12-2015-0198>
- Ficici, F., & Koksall, S. (2016). Microstructural characterization and wear properties of in situ AlB<sub>2</sub>-reinforced Al-4Cu metal matrix composite. *Journal of Composite Materials*, *50*(12), 1685–1696. <https://doi.org/10.1177/0021998315595709>
- Ficici, F., Koksall, S., Kayikci, R., & Savas, O. (2011). Investigation of unlubricated sliding wear behaviours of in-situ AlB<sub>2</sub>/Al metal matrix composite. *Advanced Composites Letters*, *20*(4), 109–116.
- Gupta, K. (2012). Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials. *Materials and Design*, *35*, 467–479. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.010>
- Kayikci, R., & Savaş, Ö. (2015). Fabrication and properties of in-situ Al/AlB<sub>2</sub> composite reinforced with high aspect ratio borides. *Steel and Composite Structures*, *19*(3), 777–787. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.3.777>
- Ko, M. (2006). Abrasive wear of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced 2024 aluminium alloy composites fabricated by vortex method, *37*, 457–464. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.038>
- Koksall, S., Ficici, F., Kayikci, R., & Savas, O. (2012). Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB<sub>2</sub>/Al composite based on Taguchi's method. *Materials and Design*, *42*, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.048>
- Kumar, S., Chakraborty, M., Subramanya Sarma, V., & Murty, B. S. (2008). Tensile and wear behaviour of in situ Al-7Si/TiB<sub>2</sub> particulate composites. *Wear*, *265*(1–2), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.09.007>
- Kumar, S., Sarma, V. S., & Murty, B. S. (2007). Influence of in situ formed TiB<sub>2</sub> particles on the abrasive wear behaviour of Al-4Cu alloy. *Materials Science and Engineering A*, *465*(1–2), 160–164. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.117>
- Liu, Z. Y., Wang, Q. Z., Xiao, B. L., Ma, Z. Y., & Liu, Y. (2010). Experimental and modeling investigation on SiC<sub>p</sub> distribution in powder metallurgy processed SiC<sub>p</sub> / 2024 Al composites, *527*, 5582–5591. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.006>
- Mahapatra, S. S., & Patnaik, A. (2009). Study on mechanical and erosion wear behavior of hybrid composites using Taguchi experimental design. *Materials and Design*, *30*(8), 2791–2801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.037>
- Miracle, D. B. (2005). SCIENCE AND Metal matrix composites – From science to technological significance, *65*, 2526–2540. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>
- Mohan, S., Prakash, V., & Pathak, J. P. (2002). Wear characteristics of HSLA steel, *252*(June 2001), 16–25.
- Ozdin, K. (2007). Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles, *183*, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.021>
- Radhika, N., & Raghu, R. (2018). Effect of Centrifugal Speed in Abrasive Wear Behavior of Al-Si<sub>5</sub>Cu<sub>3</sub>/SiC Functionally Graded Composite Fabricated by Centrifugal Casting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, *71*(3), 715–726. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1204-9>
- Radhika, N., Subramanian, R., & Prasat, S. V. (2011). Tribological Behaviour of Aluminium / Alumina / Graphite Hybrid Metal Matrix Composite Using Taguchi 's Techniques, *10*(5), 427–443.
- Radhika, Nachimuthu, & Raghu, R. (2016). Effect of Abrasive Medium on Wear Behavior of Al/AlB<sub>2</sub> Functionally Graded Metal Matrix Composite. *Tribology Online*, *11*(3), 487–493. <https://doi.org/10.2474/trol.11.487>
- Ross, P. J., & Ross, P. J. (n.d.). Taguchi Techniques for Quality Engineering : Loss Function , Orthogonal Experiments , Parameter and Tolerance Design Orthogonal Experiments , Parameter and Tolerance Design.
- Rosso, M. (2006). Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties, *175*, 364–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038>
- Savaş, Ö. (2019). The production and properties of Al<sub>3</sub>Ti reinforced functionally graded aluminum matrix composites produced by the centrifugal casting method. *Materials Research Express*, *6*(12), 10–12. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab562c>
- Savaş, Ö., & Başer, M. S. (2019). Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Investigation of Abrasive Wear Behaviour of Functional Grade Al<sub>3</sub>Ti Reinforced Aluminium Matrix Composites by Taguchi Approach Al<sub>3</sub>Ti Reinforced Aluminium Matrix Composites by Taguchi Approach Al<sub>3</sub>Ti Reinforced Aluminium Matrix Composites by Taguchi Approach Al<sub>3</sub>Ti Reinforced Aluminium Matrix Composites by Taguchi Approach
- SAVAŞ, Ö., & Demirok, Ö. (2019). Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB<sub>2</sub>/Al Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *European Journal of Science and Technology*, *17*(7), 972–981. <https://doi.org/10.31590/ejosat.648682>
- Savaş, Ö., & Kayikci, R. (2013). Production and wear properties of metal matrix composites reinforced with boride particles. *Materials and Design*, *51*, 641–647. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.049>
- Sharma, P., Khanduja, D., & Sharma, S. (2014). Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites. <https://doi.org/10.1177/0731684414556012>
- Sharma, S. C. (2001). The sliding wear behavior of Al6061 – garnet particulate composites, *249*(June), 1036–1045.
- Singh, M., Mondal, D. P., & Das, S. (2006). Abrasive wear response of aluminium alloy – sillimanite particle reinforced composite under low stress condition, *419*, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.056>
- Taha, M. A. (2001). *Practicalization of cast metal matrix composites (MMCCs)*. *Materials & Design*, *22*(6), 431–441.
- Tjong, S. C., & Lau, K. C. (2014). Properties and abrasive wear of TiB<sub>2</sub> / Al-4 % Cu composites produced by hot isostatic pressing, *59*(1999), 2005–2013.
- Tjong, S. C., & Ma, Z. Y. (2000). Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites, *29*(July), 49–113.
- Zhu, H. G., Ai, Y. L., Min, J., Wu, Q., & Wang, H. Z. (2010). Dry sliding wear behavior of Al-based composites fabricated by exothermic dispersion reaction in an Al – ZrO<sub>2</sub> – C system. *Wear*, *268*(11–12), 1465–1471. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.023>
- Zhu, H., Wang, H., Ge, L., Xu, W., & Yuan, Y. (2008). Study of the microstructure and mechanical properties of composites fabricated by the reaction method in an Al – TiO<sub>2</sub> – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system, *478*, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.076>