

Investigation of Abrasive Wear Behaviour of Functional Grade Al₃Ti Reinforced Aluminium Matrix Composites by Taguchi Approach

Ömer SAVAŞ^{1*}, Muhammed Soner BAŞER²

¹Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

²Ambarlı Liman Başkanlığı, İstanbul, TÜRKİYE

Keywords:

*Abrasive wear,
Al₃Ti,
Functionally
graded composite,
Taguchi technique*

Abstract

In this study, it was aimed to investigate the abrasive wear behavior of functionally graded Al₃Ti reinforced aluminum matrix composites. Abrasion tests were performed with Pin-on-Disk test method and Taguchi experimental method was used in the tests. Wear parameters, reinforcement ratio, matrix type, abrasive sanding type, load, sliding distance and speed factors were selected and the factors were determined as four and two levels. Test recipes were prepared according to L₁₆(2²4⁴) orthogonal series. The results showed that the wear losses of the composites increased with increasing load, sliding distance and speed, and wear losses of composites decreased with adding Al₃Ti particles to matrix. It has been found that the most effective factor on wear losses is the abrasive type factor and it is followed by the reinforcement ratio factor.

Alüminyum Ana Yapılı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al₃Ti Takviyeli Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışlarının Taguchi Yaklaşımı İle İncelenmesi

Anahtar Kelimeler:

*Abrasif aşınma,
Al₃Ti,
Fonksiyonel
derecelendirilmiş
kompozit,
Taguchi tekniği*

Özet

Bu çalışmada alüminyum ana yapıları fonksiyonel derecelendirilmiş Al₃Ti takviyeli kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Aşınma testleri Pin-Disk test yöntemi ile yapılmıştır ve testlerde Taguchi deneysel yöntemi kullanılmıştır. Aşınma faktörleri olarak takviye oranı, matris tipi, aşındırıcı zımpara tipi, yük, kayma mesafesi ve kayma hız faktörleri seçilmiş ve faktörler dört ve iki seviyeli olarak belirlenmiştir. Deney reçeteleri L₁₆(2²4⁴) ortogonal serisine göre hazırlanmıştır. Sonuçlar, artan yük, kayma hızı ve kayma mesafesine bağlı olarak kompozitlerin aşınma miktarı arttığı ve matrise ilave edilen Al₃Ti partikülleri ile kompozitlerin aşınma miktarlarının önemli oranda azaldığını göstermiştir. Aşınma üzerine en etkili faktörün aşındırıcı zımpara tipinin olduğu ve onu takviye oranı faktörünün izlediği tespit edilmiştir.

1 GİRİŞ

Makine parçalarının hasar analizlerinden, hasarlarının %75'inin sürtünen yüzeyler arasında oluşan aşınmalar sonucu olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı düşük ve aşınma mukavemeti yüksek malzemeler seçmek, aşınma problemini önlemenin yollarından birisidir. Bu istenilen özelliklerde malzeme arayışları metal matrisli kompozitleri (MMK) gündeme getirmiştir [1]–[3].

Metal matris kompozit malzemeler, en az biri metal ve diğeri takviye malzemesi olmak üzere iki veya daha fazla farklı malzemenin birleşimi ile elde edilen yeni bir malzeme grubudur. MMK'ler ile ilgili çalışmalar 1950'lerin sonunda başlamış ve halen üzerinde ARGE çalışmaları devam etmektedir. MMK malzemelerin özellikle mukavemetlerinin yüksek yoğunluklarının düşük olması sebebiyle otomotiv, havacılık, uzay endüstrisi gibi sektörlerin yanında elektronik sanayisinde de tercih edilen malzemeler haline gelmiştir [4], [5].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) küçük termal gerilmeler ve gerilme dalgalarının sönümleme özelliklerinin geleneksel kompozitlere göre daha iyi olması onların popülerliğini artırmıştır. FDM'ler, son yirmi yıl süresince, havacılık, makine, elektronik, optik, kimyasal, biyomedikal, nükleer ve inşaat endüstrilerinde birçok alanda tercih edilgiyi göze çarpmaktadır. Uygulama alanlarına örnek verilecek olursak, dizel motorlarda ısı kaybını engellemek için motorlarda sıcak bölgelerde çalışan malzemeler için soğutma gereksinimini azaltmak için, ısı bariyeri olarak, insansız hava aracı ve nükleer kıyafetlerde, savunma sanayiinde zırh, endüstriyel alanlarda tıraş makinelerinin bıçaklarında ve birçok alanda daha farklı amaçlar için kullanılmaktadır [6], [7].

Az sayıda deneme ile bir süreci veya bir sistemi iyileştirmek için tercih edilen Taguchi yöntemi 1950'lerde Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Ürün kalitesi, müşteri memnuniyeti, üretim öncesi planlama için etkili bir tasarım yöntemidir [8], [9].

Al₃Ti partiküllerinin dayanımlarının yüksek ve yoğunluklarının düşük (3,4 g/cm³) olmasının yanında in-situ tekniği ile matris içerisinde kendiliğinden oluşması, MMK'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılan SiC ve Al₃O₂ partiküllerine alternatif teşkil etmektedir [10], [11].

Önceki çalışmalarda in-situ (yerinde reaksiyon) üretim tekniği kullanılarak, Al₃Ti/Al kompozitlerin TiO₂ partikülleri, K₂TiF₆ tuzları ve Ti tozlarının ilavesi ile başarı bir şekilde üretilebildiğini görülmektedir. [12]–[14]. Alüminyum ana yapı Al₃Ti takviyeli kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, matris içerisine ilave edilen Al₃Ti partikülleri ile kompozitlerin sertlik ve aşınma direnci gibi birçok özelliğini geliştirdiği rapor edilmiştir [15] [16].

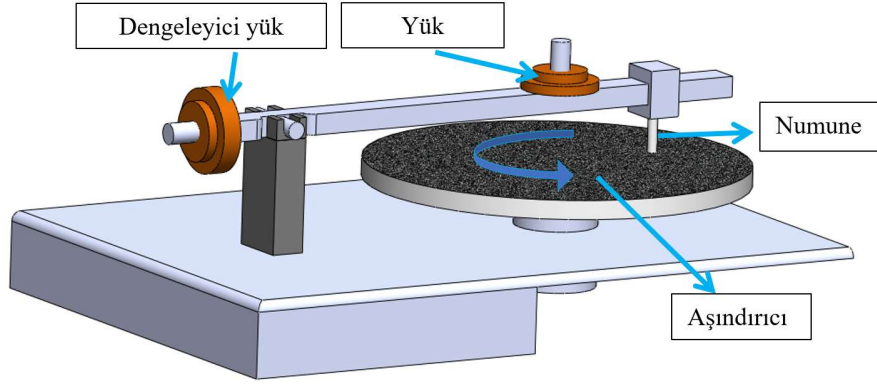
Shimaa El-Hadad [17], Yoshimi Watanabe [18] ve arkadaşları alüminyum ana yapı Al₃Ti takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitleri, savurma döküm yöntemi ile ürettiklerini rapor etmişleridir. Yaptıkları çalışmada kompozitlerinin mikro yapı özelliklerinin savurma yönünde değiştiği ve bu değişime bağlı olarak kompozitlerin sertliklerinin ve aşınma dirençlerinin önemli oranda değiştiği rapor edilmiştir.

Önceki yapılan çalışmalarda savurma döküm tekniği ile üretilen Al₃Ti takviyeli kompozitlerin abrasif aşınma davranışı ile ilgili çok az çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada savurma döküm tekniği kullanılarak Al₃Ti/Al ve Al₃Ti/Al-Cu kompozitleri üretilmiş ve kompozitlerin abrasif aşınma davranışları, takviye oranı, matris tipi, aşındırıcı zımpara tipi, yük, kayma mesafesi ve kayma hızı gibi birçok test faktörleri dikkate alınarak Taguchi deneysel tasarımı ile incelenmiştir.

2 MATERYAL VE METOT

Savurma döküm tekniği ile Al₃Ti takviyeli kompozitlerinin üretimlerinde yaklaşık 75 g Al-20Ti master alaşımı 175 g saf alüminyum yaklaşık %3 Ti içerecek şekilde 1200 °C'de çözeltiye alınmıştır. Al₃Ti partiküllerinin oluşması için çözelti 900 °C'ye kadar havada soğutulmuş ve bu sıcaklıkta savurma döküm mekanizmasına alınarak 1200 rpm dönme hızında katılaşmaya kadar çevrilmiştir. Bu şekilde saf alüminyum matrisli Al₃Ti fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler üretilmiştir. Al-Cu matrisli kompozitlerinin üretimi ise aynı şekilde 1200 °C'de hazırlanmış Al-Ti çözeltisi içerisine %5 oranında %99,99 safiyette bakır çubuklarla alaşımlandırılmıştır. Bu sayede aynı koşullarda iki farklı tip matris alaşımli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme üretilebilmiştir. Kompozitlerin üretiminde 25 mm genişinde, 35 mm yüksekliğinde, 160 mm uzunluğunda ve 1 mm kalınlığında çelik pota kullanılmıştır. Potanın iç yüzeyleri sıvı alüminyum ile reaksiyona girmesin diye spreyci bor nitrür (BN) boya ile kaplanmıştır. Üretilen kompozit optik görüntü analizleri için metalografik tekniklerle harılanan numuneler Olympus optik mikroskopu ile analiz edilmiştir. Üretilen kompozitlerin yoğunluklarının belirlenmesinde Arşimet tekniğinden faydalanılmıştır. Kompozitlerin yoğunlukları yoğunluk sonuçlarına göre karışımlar kuralı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Kompozitlerin aşınma testlerinde abrasif aşınma tekniği ile yapılmıştır. Abrasif aşınma deneylerinde 6 x 8 x 15 mm ölçülerindeki numuneler, kompozitlerin zengin ve fakir bölgelerinin temsil edecek şekilde ayrı ayrı alınmıştır. Kompozitlerin abrasif aşınma değerlerini almak için Şekil 1'da görülen pin-disk yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1. Aşınma test cihazı şematik görüntüsü

Aşınma analizi, 30, 60, 90 ve 120 metre kayma mesafelerinde, 180, 320, 600 ve 1000 gritlik aşındırıcı zımpara üzerinde, 1,1, 3,3, 5,5 ve 7,69 m/s kayma hızlarında ve 1, 2, 3 ve 4 N yükler altında Taguchi yaklaşımına göre yapılmıştır. Aşınma testleri için ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Ağırlık kayıpları test numunelerinin aşınma öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülerek elde edilmiştir. Deneylerinin güvenilirliğini artırmak için her aşınma testi en az üç kez tekrarlanmıştır. Alüminyum matris ve Al-Cu matrisli Al₃Ti takviyeli kompozitlerden alınan aşınma test materyalleri ayrı ayrı 8'er deney yapılmıştır. Yapılan bu 8 deneyden 4'ü Al₃Ti ile güçlendirilen ve diğer 4'ü partikül içermeyen Al ve Al-Cu bölgelerinden yapılmıştır. Abrasif aşınma testleri için seçilmiş faktör ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi kompozitlerin aşınma davranışlarının analizlerinin belirlenmesinden 6 faktör seçilmiştir. Bunlardan takviye ve matris faktörleri iki seviyeli, zımpara tipi, kayma mesafesi, kayma hızı ve yük faktörleri 4 seviyeli olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Aşınma Deneyleri için seçilen faktör ve onların seviye değerleri

Kolan	Faktör	Faktör Seviyesi			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
A	Takviye oranı, %	%0	%20		
B	Matris tipi	Saf Al	Al-Cu		
C	Aşındırıcı Zımpara tipi	320 Grid	600 Grid	1000 Grid	1500 Grid
D	Yük, N	1	2	3	4
E	Kayma mesafesi, m	30	60	90	120
F	Kayma hızı, m/s	1,1	3,3	5,5	7,69

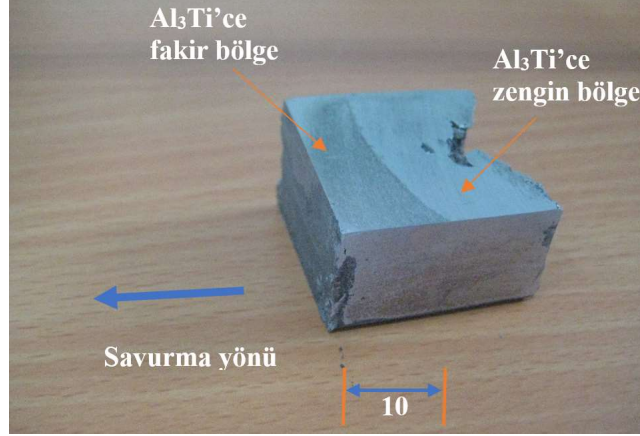
Aşınma testlerinde Tablo 1'de verilen faktör ve seviyelerine uygun L₁₆(2²⁴) ortogonal serisi seçilmiştir. Tablo 1'e göre hazırlanmış L₁₆(2²⁴) ortogonal serisi Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Aşınma deneyleri için seçilen L₁₆(2²⁴) ortogonal serisi ve deney reçeteleri

D.No	Takviye oranı, %	Matris	Abrasif aşındırıcı zımpara tipi	Yük, N	Kayma mesafesi, m	Kayma hızı, m/s
1	0	Al	320 Grid	1,00	30	1,10
2	0	Al-Cu	320 Grid	2,00	60	3,30
3	20	Al	320 Grid	3,00	90	5,50
4	20	Al-Cu	320 Grid	4,00	120	7,69
5	20	Al-Cu	600 Grid	1,00	60	5,50
6	20	Al	600 Grid	2,00	30	7,69
7	0	Al-Cu	600 Grid	3,00	120	1,10
8	0	Al	600 Grid	4,00	90	3,30
9	0	Al-Cu	1000 Grid	1,00	90	7,69
10	0	Al	1000 Grid	2,00	120	5,50
11	20	Al-Cu	1000 Grid	3,00	30	3,30
12	20	Al	1000 Grid	4,00	60	1,10
13	20	Al	1500 Grid	1,00	120	3,30
14	20	Al-Cu	1500 Grid	2,00	90	1,10
15	0	Al	1500 Grid	3,00	60	7,69
16	0	Al-Cu	1500 Grid	4,00	30	5,50

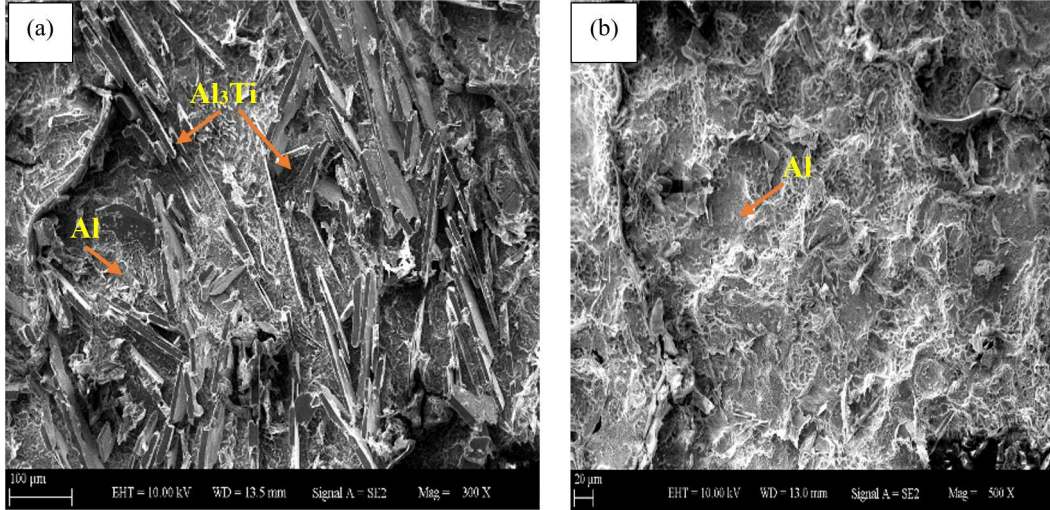
3 BULGULAR

Üretilen, Al₃Ti takviyeli alüminyum matris kompozite ait bir makro yapı görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. Fotoğrafta üretilen kompozitin Al₃Ti partikülleri ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş iki farklı bölgeye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 2’de Al₃Ti ile güçlendirilmiş bölgelerin kompozitin dış kısımlarında yaklaşık 10 mm genişliğinde olduğu görülmektedir. Bu iki bölge Al₃Ti’ce zengin ve fakir bölge olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2. Savurma işlemi sonrasında üretilen Al₃Ti takviyeli kompozite ait makro yapı görüntüsü

Şekil 3(a) ve 3(b)’ de Al₃Ti’ce fakir ve zengin bölgelerin %10 HCl çözeltisi ile 30 saniye derin dağlanması sonrasında alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 3(b)’ de ise Al₃Ti’ce fakir bölgede takviye fazının yer almadığı görülmektedir. Şekil 3(a)’da zengin bölgede Al₃Ti partiküllerinin aslında pul şeklinde yani fleyk şeklinde olduğu ve ara bileşiklerin olmadığı görülmektedir. Aynı zamanda şekilde takviye fazı olan Al₃Ti partiküllerinin savurma yönünde yönelmiş ve homojen bir dağılıma sahip olduğu dikkati çekmektedir. Bunun yanında Şekil 3(a) ve 3(b)’de %10 HCl çözeltisi içerisinde Al matrisinin olduğu ve Al₃Ti fleyklerinin ise hiç çözünmediği görülmektedir.



Şekil 3. %10 HCl çözeltisi ile derin dağlanmış (a) zengin ve (b) fakir Bölgelere ait SEM görüntüsü

Yapılan yoğunluk ölçümler neticesinde, Al₃Ti’ce zengin olan bölgelerin yoğunlukları alüminyum matrisli kompozit için 2,85 g/cm³, Al-Cu matrisli kompoziti için 2,93 g/cm³ olarak bulunmuştur. Fakir bölgelerde ise alüminyum ve Al-Cu matrisli kompozit için sırasıyla 2,72 ve 2,82 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alınarak karışımlar kuralına göre hesaplanan Al₃Ti takviye oranının her iki kompozit için de yaklaşık %20 olduğu görülmüştür.

Tablo 3’de, L₁₆ ortogonal serisinin sunduğu reçetelere göre yapılan aşınma deney sonuçları verilmiştir. Tablo 3’de alınan üç adet ağırlık kayıpları, onların ortalamaları ve Denklem 1’e göre hesaplanan S/N oranları görülmektedir. Tabloda En düşük ağırlık kaybının 11. deneyde ortalama 0,0015 gr, en yüksek ağırlık değerli ise 4. deneyde ortalama 0,0988 gr olarak ölçülmüştür. Ayrıca tabloda kompozitlerinin ağırlık kayıplarının 0,0015-0,1229 gr arasında değişim gösterdiği dikkati çekmektedir.

Tablo 3. L₁₆(2²4⁴) ortogonal serisinin önerdiği reçetelere göre alınan ağırlık kayıpları ölçümleri, ortalaması ve sinyal/gürültü (S/N) oranlar

D. No	1. ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	Ort.	S/N
1	0,0089	0,0087	0,0083	0,00860	41,31
2	0,0361	0,0330	0,0370	0,03537	29,02
3	0,0485	0,0371	0,0357	0,04043	27,78
4	0,1229	0,1014	0,0723	0,09887	19,91
5	0,0043	0,0050	0,0031	0,00413	47,52
6	0,0079	0,0066	0,0073	0,00727	42,75
7	0,0196	0,0166	0,0089	0,01501	36,10
8	0,0252	0,0208	0,0214	0,02243	32,95
9	0,0342	0,0290	0,0304	0,03120	30,09
10	0,0193	0,0137	0,0105	0,01448	36,52
11	0,0019	0,0015	0,0014	0,00159	55,90
12	0,0058	0,0021	0,0025	0,00347	48,31
13	0,0585	0,0700	0,0655	0,06467	23,76
14	0,0237	0,0075	0,0131	0,01477	35,80
15	0,0950	0,0959	0,0927	0,09450	20,49
16	0,0560	0,0614	0,0589	0,05877	24,61

Yapılan çalışmada ağırlık kayıplarının küçük olmasını istediğinden dolayı sinyal/gürültü oranının hesaplanmasında “en küçük en iyidir” kalite karakteristiği seçilmiştir.

$$S/N = -\log\left(\frac{1}{n} \sum_i y_i^2\right) \quad (1)$$

Burada, y_i : performans karakteristiğinin, i : gözlem değeri, n : denemede test sayısı ve y : gözlem değerlerinin ortalamasını göstermektedir.

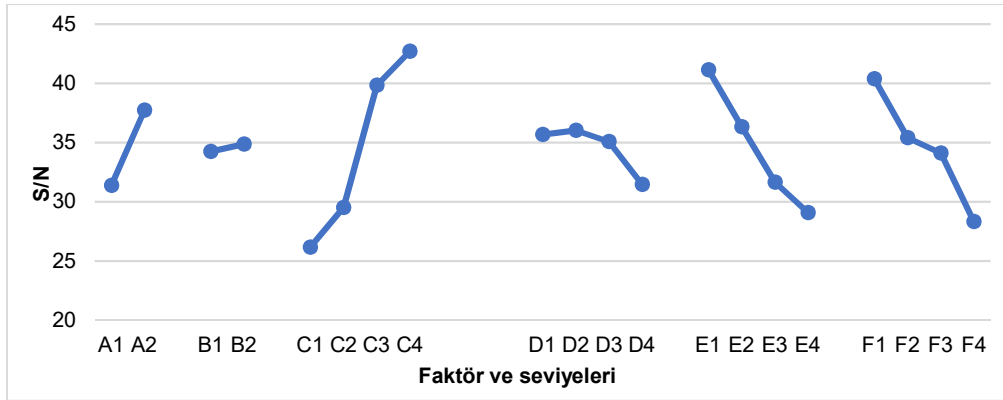
Tablo 4’de Tablo 3’de görülen S/N oranları dikkate alınarak hazırlanmış varyans analizi (ANOVA) sonuçları görülmektedir. ANOVA tablosunda % 90 güven düzeyi için ($F_{(hesap)} > F_{(tablo)}$) olan faktörler) takviye fazı, aşındırıcı tipi, kayma mesafesi ve uygulanan yükün, ağırlık kayıpları üzerine önemli oranda etkili olduğunu göstermektedir. Buna karşın matris ve yük faktörlerinin $F_{(hesap)}$ değerleri $F_{(tablo)}$ değerlerinden düşük olduğu için aşınma kayıpları üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bunun yanında Tablo 4’de ağırlık kayıpları üzerine en etkili faktörün 12,21 $F_{(hesap)}$ değeri ile Aşındırıcı tipinin onu sarasıyla 7,72 $F_{(tablo)}$ değeri ile takviye oranı, 5,46 $F_{(tablo)}$ ile kayma mesafesi, 4,74 $F_{(tablo)}$ oranı ile kayma hızı faktörünün izlediği görülmektedir. Tabloda * işareti ile belirtilen matris ve yük faktörlerinin etkisi düşük olduğu için “pooling” yapılarak hesaplara dâhil edilmemiştir.

Tablo 4. Sinyal gürültü oranlarına göre hazırlanan ANOVA tablosu

Kolon	Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı S	Serbeslik Derecesi f	Karalar Ortalaması	Teorik $F_{(hesap)}$	İstatiksel $F_{(tablo)}$
A	Takviye	160,22	1,00	160,22	7,72	5,59
B	*Matris	1,62	1,00	1,62	0,08	5,59
C	Aşındırıcı Zımpara tipi	760,47	3,00	253,49	12,21	4,35
D	*Yük	53,32	3,00	17,77	0,86	4,35
E	Kayma Mesafesi	340,02	3,00	113,34	5,46	4,35
F	Kayma hızı	295,32	3,00	98,44	4,74	4,35
	Toplam	1556,02	10,00	155,60		
	e	103,81	5,00	20,76		
	*pooling, ep					

Şekil 4’de faktör seviyelerinin ortalama S/N oranları alınarak hazırlanmış “Faktörlerin Grafikselsel Gösterimi” görülmektedir. Grafikte faktörlerinin en büyük seviyesi en düşük ağırlık kaybını için optimum deney faktör seviyelerini göstermektedir. Buna göre optimum faktörler seviyeleri; A2,B2,C4,D2,E1 ve F1 şeklindedir. Bu sonuç en düşük ağırlık kaybının Al-Cu matrisli kompozitin % 20 Al₃Ti ile güçlendirilmiş bölgelerinin, 30 m kayma mesafede ve 1,1 m/s kayma hızında, 1500 grid zımpara kademesinde ve 2 N yük altında yapılan aşınma deneylerinden elde edileceğini göstermektedir.

Şekil 5’de hazırlanan grafik S/N oranlarına dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu nedenle yüksek S/N oranı düşük ağırlık kaybını ifade etmektedir. Grafikte, C faktörünün seviyelerine bakıldığında aşındırıcı tipinin ağırlık kaybı üzerinde en fazla oranda etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. A1 ve A2 faktör seviyeleri olarak tanımlanan takviye oranının %0 dan %20’ ye yükselmesi durumu ele alındığında, aşınma kaybının önemli oranda düştüğü görülebilmektedir. Bu sonuç alüminyum matrise ilave edilen %20 oranındaki Al₃Ti partiküllerinin kompozitin aşınma miktarını önemli oranda düşürdüğünü göstermektedir. B1 (Al matris) ve B2 (Al-Cu matris) faktörü yani matris malzemesi dikkate alındığında ise matrise %5 oranında bakır ilavesini ağırlık kayıplarına etkisinin oldukça düşük oranlarda olduğu görülmektedir. D faktörünün etkisi de B faktörüne benzer şekilde aşınma üzerine etkisinin oldukça düşük olduğu dikkati çekmektedir. Kayma mesafesi ve kayma hızındaki artışın, ağırlık kaybını artırdığı ve dolayısıyla en düşük ağırlık kaybının E1 (30 m kayma mesafesi) ve F1 (1,1 m/s kayma hızı) seviyelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Faktör ve seviyelerin grafikselsel gösterimi

Tablo 5’de minimum ağırlık kaybının (aşınma miktarı) elde etmek için optimum faktör seviyeler kutu içerisinde işaretlenmiştir.

Tablo 5. En düşük ağırlık kaybı için önerilen optimum şartlar

Kolan	Faktör	Faktör Seviyesi			
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
A		%0	%20		
B	Matris Tipi	Saf Al	Al-Cu		
C	Aşındırıcı Zımpara tipi	320 Grid	600 Grid	1000 Grid	1500 Grid
D	Yük, N	1	2	3	4
E	Kayma Mesafesi, m	30	60	90	120
F	Kayma hızı, m/s	1,1	3,3	5,5	7,69

Taguchi yaklaşımına göre deneylerinin doğru yapıp yapılmadığını test etmek için optimum deney faktör seviyeleri dikkate alınarak doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Bu neden Tablo 5’de kırmızı kutu içerisindeki faktör seviyeleri dikkate alınarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Tablo 6’da Taguchi yaklaşımına göre S/N oranları ve ağırlık kayıpları için hesaplanan %0,05 güven düzeyine göre hesaplanan tahmini güven aralığı ve ortalama değerleri verilmiştir. Tabloda ayrıca doğrulama deneyi neticesinde elde edilen ortalama S/N oranları ve ağırlık kayıpları da görülmektedir.

Tablo 6. Tahmini güven aralığı

Nicelik	S/N oranı	Aşınma Kaybı
Optimum şartlar	A ₂ B ₂ C ₄ D ₂ E ₁ F ₁	A ₂ B ₂ C ₄ D ₂ E ₁ F ₁
Ortalama değer, μ	58,29	0,00120
$\alpha=0,05$ için güven aralığı	52,26 < μ < 64,31	0,00061 < μ < 0,00245
Doğrulama Deneyi	57	0,00120

Tablo 6'da optimum deney şartları altında yapılan deney sonucunda ortalama ağırlık kaybı değerlerinin $12,0 \times 10^{-4}$ ve S/N oranı 58,29 dB değerinde olması gerektiğini göstermektedir. Tablo 6'te optimum deney şartlarına göre yapılacak doğrulama deneyinde alınan ağırlık kaybı değerlerinin $6,10 \times 10^{-4}$ ile $24,5 \times 10^{-4}$ arasında olması gerekmektedir. Doğrulama deneyi sonucunda S/N oranlarının 57 dB ve ortalama ağırlık kaybının 0,00120 gr olarak bulunmuştur. Tabloda alınan bu değerlerin tahmini güven aralığında olduğu görülmektedir. Bu sonuç yapılan aşınma deneylerinin doğru yapıldığını ve kontrol altına alınamayan bir faktörün olmadığını göstermektedir.

Aşınma testleri sonucunda kompozitlerinin ağırlık kayıpları üzerine en etkili faktörün aşındırıcı zımpara tipinin olduğu görülmektedir (Şekil 5 A faktörü). Sonuçlarda artan zımpara kademesine bağlı olarak aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Yani artan aşındırıcı partikül boyutu ile aşınma miktarı artmıştır. Yapılan önceki çalışmalarda artan aşındırıcı partikül boyutu ile aşınan yüzeylere aşındırıcı partiküllerinin penetrasyonun arttığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada buna benzer şekilde artan aşındırıcı partikül boyutu ile aşınma miktarının artmıştır. Bunun nedeni büyük kütleli partiküllerinin aşınan yüzeylere daha fazla penetre olmasına neden olarak aşınma miktarının orantılı olarak yükseltmiştir. Yine sonuçlarda artan yüklerle birlikte aşınma miktarının arttığı görülmektedir (Şekil 5 faktör D). Bunun muhtemel nedeni artan yüklerle birlikte aşındırıcı partiküllerin penetrasyonu artmış ve aşınma miktarı orantılı olarak artmıştır. Artan kayma hızı birlikte aşınma miktarının artmasının muhtemel nedeni, aşınan yüzeylerin sürtünmeden ısınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5 F faktörü). Bunlara ek olarak çalışmada matris içerisinde artan Al₃Ti miktarı ile ağırlık kayıplarının önemli oranda düştüğü görülmektedir (Şekil 5 A faktörü). Bunun muhtemel nedeni Al₃Ti partiküllerinin matrisin sertlik değerini artırmasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucu olarak yüksek sertlik değeri aşındırıcı partiküllerin aşınan yüzeylere penetrasyonunu azaltarak daha az ağırlık kaybına neden olmuştur.

4 SONUÇLAR

Bu çalışmada Taguchi yöntemi ile alüminyum ana yapıları Al₃Ti takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin aşınma özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda alınan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

1. Üretilen kompozitlerinin aşınma davranışları üzerine etkili faktörlerin takviye oranının, aşındırıcı tipinin, kayma hızı ve kayma mesafesi olduğu tespit edilmiştir. En etkili faktörün aşındırıcı tipi olduğu ve onu sırası ile takviye oranı, kayma hız ve kayma mesafesi faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.
2. Matrise ağırlıkça %20 oranında Al₃Ti ilavesinin hem Al₃Ti/Al hem de Al₃Ti/Al-Cu kompozitinde önemli oranda ağırlık kayıplarında azalmaya yol açtığı gözlenmiştir.
3. En düşük ağırlık kaybının elde edilmesi için önerilen optimum faktör seviyelerin A₂,B₂,C₄,D₂,E₁ ve F₁ şeklinde olduğu görülmüştür, en düşük ağırlık kaybın, Al-Cu matrisli % 20 Al₃Ti takviyeli kompozitin 30 m kayma mesafede ve 1,1 m/s kayma hızda, 1500 grid zımpara kademesi altında ve 2 N yük altında yapılan aşınma deneyleri neticesinde elde edileceği tespit edilmiştir.
4. Optimum deney şartlarına göre yapılacak doğrulama deneyinde alınan ağırlık kaybının $6,10 \times 10^{-4}$ ile $24,5 \times 10^{-4}$ gr güven arasında olması gerektiği belirlenmiştir. Optimum faktör seviyelerine göre yapılan doğrulama deneyi sonucunda ağırlık kaybı değerini $12,6 \times 10^{-4}$ gr olarak ölçülmüş.

Kaynakça

- [1] M. Rosso, "Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 175, no. 1–3, pp. 364–375, 2006.
- [2] P. Sharma, D. Khanduja, and S. Sharma, "Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 23, pp. 2192–2202, 2014.
- [3] S. V. Prasad and R. Asthana, "Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: Tribological

- considerations,” *Tribol. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 445–453, 2004.
- [4] Amitesh and V. C. Kale, “Aluminium Based Metal Matrix Composites for Aerospace Application: A Literature Review,” *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 6, pp. 2278–1684, 2015.
- [5] M. Toozandehjani, “Conventional and Advanced Composites in Aerospace Industry: Technologies Revisited,” *Am. J. Aerosp. Eng.*, vol. 5, no. 1, p. 9, 2019.
- [6] S. L. Pramod, S. R. Bakshi, and B. S. Murty, “Aluminum-Based Cast In Situ Composites: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 24, no. 6, pp. 2185–2207, 2015.
- [7] S. C. Tjong and Z. Y. Ma, “Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 29, no. 3, pp. 49–113, 2000.
- [8] Ross P.J. In: Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. New York: McGraw-Hill Inc.; 1988.
- [9] O. Savas, R. Kayikci, and S. Köksal, “Application of taguchi method to investigate the effect of some factors on in-situ formed flake structures of Al/AIB 2 composite,” *Adv. Compos. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 44–50, 2012.
- [10] N. Wei *et al.*, “Characterization and properties of intermetallic Al₃Ti alloy synthesized by reactive foil sintering in vacuum,” *J. Mater. Res.*, vol. 31, no. 17, pp. 2706–2713, 2016.
- [11] Z. Lu, N. Wei, P. Li, C. Guo, and F. Jiang, “Microstructure and mechanical properties of intermetallic Al₃Ti alloy with residual aluminum,” *Mater. Des.*, vol. 110, pp. 466–474, 2016.
- [12] V. Auradi and S. A. Kori, “Influence of reaction temperature for the manufacturing of Al-3Ti and Al-3B master alloys,” *J. Alloys Compd.*, vol. 453, no. 1–2, pp. 147–156, 2008.
- [13] K. Yamauchi, T. Kunimine, H. Sato, and Y. Watanabe, “Grain Refinement of Al₃Ti Dispersed Aluminum Matrix Composites by Reaction Centrifugal Mixed-Powder Method,” *Mater. Trans.*, vol. 56, no. 1, pp. 99–107, 2014.
- [14] M. Hosseinpouri, S. A. Mirmonsef, and M. Soltanieh, “Production of Al-Ti Master Alloy by Aluminothermic Reduction Technique,” *Can. Metall. Q.*, vol. 46, no. 2, pp. 139–143, 2014.
- [15] C. Tijun, L. Jian, and H. Yuan, “Casting fabrication of in Al₃Ti-Al composites and Their wear behaviors,” *China Foundry*, vol. 6, no. 4, pp. 319–327, 2009.
- [16] M. Nofar, H. R. Madaah Hosseini, and N. Kolagar-Daroonkolaie, “Fabrication of high wear resistant Al/Al₃Ti metal matrix composite by in situ hot press method,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 2, pp. 280–286, 2009.
- [17] S. El-Hadad, H. Sato, E. Miura-Fujiwara, and Y. Watanabe, “Fabrication of Al-Al₃Ti/Ti₃Al functionally graded materials under a centrifugal force,” *Materials (Basel)*, vol. 3, no. 9, pp. 4639–4656, 2010.
- [18] Y. Watanabe, Q. Zhou, H. Sato, T. Fujii, and T. Inamura, “Microstructures of Al-Al₃Ti functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle method and centrifugal in situ method,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 56, no. 1, pp. 0–11, 2017.