

## Aşındırıcı Türü ve Boyutunun Otomotiv Fren Balatalarının Sürtünme-Aşınma Performansına Etkisi

### *Effect of Abrasive Type and Size on the Friction-Wear Performance of Automotive Brake Friction Materials*

**Bülent ÖZTÜRK\***

*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon*

• Geliş tarihi / Received: 19.09.2017 • Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 12.04.2018 • Kabul tarihi / Accepted: 16.04.2018

#### **Öz**

Bu çalışmada, aşındırıcı türü ve tane boyutunun otomotiv fren balatalarının sürtünme-aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numune üretiminde farklı tür ve boyut aralıklarına sahip  $Al_2O_3$ , SiC ve  $B_4C$  seramik tozlar kullanılmıştır. Numunelerin sürtünme ve aşınma davranışları, Chase tipi deney cihazında SAE J661 test prosedürüne uygun olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, en yüksek sürtünme katsayısının  $Al_2O_3$  içeren A63 kodlu numunede 0,61, en düşük sürtünme katsayısının ise SiC içeren S63 kodlu numunede 0,489 olduğu görülmüştür.  $B_4C$  içeren B90 kodlu numune en fazla aşınma direnci sergilemiştir. Artan aşındırıcı tane boyutuyla numunelerin sürtünme katsayıları artarken özgül aşınma miktarları azalmıştır. Numunelerin aşınma davranışlarının ve mekanizmalarının ortaya konulması amacıyla da numune aşınma yüzeyleri ve aşınma parçacıkları taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Aşındırıcı türü ve boyutu, Fren balatası, Sürtünme-aşınma

#### **Abstract**

*This study investigated the effects of abrasive type and particle size on the friction-wear characteristics of automotive brake friction materials. The  $Al_2O_3$ , SiC and  $B_4C$  ceramic powders with different type and particle size were used as abrasive. Friction tests were performed on a Chase friction material testing machine according to the brake lining quality test procedure as per SAE J661. The composites were contained typical ingredients for commercial brake friction materials. The results showed that the highest and the lowest friction coefficients were recorded as 0.61 and 0.489 for  $Al_2O_3$  containing A63 and SiC containing S63 coded samples. The B90 coded composite containing  $B_4C$  showed the highest wear resistance. The friction coefficient of the composites increased and the specific wear rate decreased with increasing abrasive particle sizes. In order to reveal the wear behavior and mechanism, the worn surfaces of the composites as well as wear debris were examined under scanning electron microscopy.*

**Keywords:** Abrasive type and size, Friction materials, Friction-wear

\* Bülent ÖZTÜRK; bozturk@ktu.edu.tr; Tel: (0462) 377 35 77; orcid.org/0000-0002-8836-572X

## 1. Giriş

Bir fren sisteminin ana fonksiyonu hareket halindeki bir aracı güvenli bir şekilde yavaşlatmak veya tamamen durdurmaaktır. Bu esnada aracın kinetik enerjisi, disk ve balata arasında oluşan sürtünme işi tarafından ısıya dönüştürülür (Ji vd., 2017; Bijwe, 1997).

Araç fren sistemlerinde kullanılan balatalar (sürtünme malzemeleri) değişken sıcaklık, hız, basınç ve çevre koşullarında kararlı ve yüksek sürtünme katsayısına, iyi bir aşınma direncine, yeterli dayanıma ve frenleme sırasında ses ve titreşim oluşturmama gibi özelliklere sahip olması gerekir (Satapathy ve Bijwe, 2005; Kim vd., 2001; Cai vd., 2015a; Öztürk vd., 2013). Balataların frenleme sırasındaki ortaya koyduğu performansları ise kendilerini oluşturan bileşenlere bağlıdır. Günümüzde fren balatalarının üretiminde yüzlerce farklı çeşit bileşen kullanılmaktadır. Kullanılan bu bileşenler genel olarak dört ana gruba ayrılır. Bunlar; bağlayıcı malzemeler, takviye ediciler (güçlendiriciler), dolgu malzemeleri ve sürtünme ayarlayıcılar (düzenleyiciler) şeklindedir. Bağlayıcı malzemeler, balatayı oluşturan bileşenleri bir arada tutmak ve kararlı bir matris oluşturmak amacıyla kullanılırlar. Bağlayıcı olarak en sık kullanılan bileşen ise fenol-formaldehit reçinesidir ve sönümlemeyi arttırmak amacıyla balatalarda lastik tozu ile birlikte kullanılır. Takviye ediciler farklı tür elyaflar olup, balataya istenen mekanik dayanım, termal kararlılık, aşınma direnci ve sürtünme sağlarlar. Takviye edici malzemeler olarak genellikle cam yünü, taş (kaya) yünü, çelik yünü, seramik ve aramid (Kevlar) elyaflar tek başına veya farklı kombinasyonlarda birlikte bir arada kullanılırlar. Dolgu malzemesi, öncelikle maliyeti azaltmak amacıyla balatada boşluk doldurucu olarak görev yaparlar. Mika, talk, vermikülit ve barit en çok kullanılan dolgu malzemeleridir. Sürtünme düzenleyiciler, balatanın sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılırlar. Düzenleyiciler, yağlayıcı ve aşındırıcılar olmak üzere iki kısma ayrılır. Yağlayıcılar, balatalarda yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını stabilize etme, aşınma miktarını kontrol etme, gürültüyü azaltma ve titreşim sönümlüme amacıyla kullanılmaktadır. Aşındırıcılar, balataya yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı sağlamak için katılırlar. Balataların üretiminde farklı tür ve boyut aralığına sahip seramik esaslı aşındırıcılar kullanılmaktadır (Bijwe, 1997; Singh vd., 2017; Gurunath ve Bijwe, 2007; Cai, vd., 2015b). Aşındırıcı malzemeler, balata malzemesinin sürtünme

katsayısını arttırdığı gibi karşı yüzeyin aşınmasını da arttırır. Aşındırıcılar, genellikle 7-9 Mohs sertlik değerine sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, frenleme esnasında balatanın yüzeyinde meydana gelen sürtünme filmi ortadan kaldırırlar. Balata malzemesinde aşındırıcı olarak genellikle alüminyum oksit, silisyum karbür, zirkonyum oksit, zirkonyum silikat ve bor karbür kullanılmaktadır (Chan ve Stachowiak, 2004).

Kim ve arkadaşları, SiC, ZrSiO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> ve MgO içeren farklı aşındırıcıların balata malzemelerinin sürtünme performansına etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan aşındırıcıların numunelerin sürtünme performansına, aşınma miktarına ve stick-slip (kay-dur) mekanizmasında önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Maksimum ve minimum sürtünme katsayılarının sırasıyla SiC ve MgO içeren numunelerde olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, SiC içeren numunenin frenleme esnasında mikro kesme davranışı göstererek şiddetli stick-slip olayı ve yüksek ses meydana getirdiği de belirtilmiştir (Kim vd., 2011). Diğer bir çalışmada Lee ve bir grup araştırmacı, ince ve iri taneli ZrSiO<sub>4</sub> ve SiO<sub>2</sub> içeren dört farklı numunenin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. SiO<sub>2</sub> içeren numunenin sürtünme katsayısının her iki tane boyutunda da, ZrSiO<sub>4</sub> içeren numuneye göre daha yüksek olduğu bulunmuştur (Lee vd., 2010). Boz ve Kurt fren balatalarının sürtünme performansına ZrSiO<sub>4</sub> aşındırıcı parçacığın etkisini araştırmışlardır. Çalışmada aşındırıcı parçacık oranı %0-6 aralığında sabit tutulmuştur. En yüksek sürtünme katsayısı %5-6 aşındırıcı içeren numunede elde edilirken, en yüksek aşınma oranı ise aşındırıcı içermeyen numunede elde edilmiştir (Boz ve Kurt, 2007). Diğer bir çalışmada Cho ve arkadaşları, ortalama 1µm, 6 µm, 75 µm ve 150 µm boyutlarına sahip ZrSiO<sub>4</sub> parçacık kullanarak üretilen balata malzemesinin tribolojik özelliklerine aşındırıcı boyutunun etkisini ortaya koymuşlardır. İri taneli zirkon içeren numunenin temas yüzeyinde oluşan kararlı sürtünme filmi sayesinde en iyi sürtünme ve en düşük aşınma sergilediği görülmüştür. Bununla birlikte, nispeten ince taneli zirkon içeren numunelerin ise geçici sürtünme filmi nedeniyle şiddetli aşınma ve zayıf sürtünme performansı gösterdiği belirtilmiştir (Cho vd., 2008). Tomasek ve bir grup araştırmacı, farklı oranlarda (%0, 3,4, 5,6, 9 ve 14,6) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin numunelerin sürtünme ve aşınma davranışına etkisini belirlemişlerdir. Çalışmalarında en iyi sürtünme ve aşınma performansının %5,6 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren numunede olduğunu tespit etmişlerdir (Tomasek vd., 2009). Etemadi

ve arkadaşları, nano boyutlu  $Al_2O_3$  parçacıklarının numunelerin sürtünme katsayısını düşürdüğünü, aşınma dayanımını arttırdığını ifade etmişlerdir (Eemadi vd., 2014). Ma ve diğerleri,  $ZrSiO_4$ ' ın fren balatalarının performansına etkisini incelemişler ve  $ZrSiO_4$ ' ün sürtünme katsayısını arttırdığını belirtmişlerdir (Ma vd., 2008). Diğer bir çalışmada Sun ve diğerleri,  $SiO_2$  parçacık boyutunun polimer esaslı fren balatalarının performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 5 farklı boyutta  $SiO_2$  parçacık (10  $\mu m$ , 80  $\mu m$ , 180-700  $\mu m$ , 700  $\mu m$ -2 mm ve 3 mm) kullanılmıştır. Parçacık boyutunun artmasıyla birlikte sürtünme katsayısı artmış daha sonra ise düşmüştür. En yüksek sürtünme katsayısı 80  $\mu m$  aşındırıcı parçacık boyutuna sahip numunede elde edilmiştir (Sun vd., 2018). Sürtünme malzemelerinin fiziksel ve tribolojik özelliklerine farklı whiskerslerin (potasyum titanat, magnezyum borat ve kalsiyum sülfat) etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada Zhu vd., potasyum titanatın aşınma direncini en fazla geliştirdiği buna karşılık kalsiyum sülfatın en yüksek sürtünme katsayısı ortaya koyduğunu ifade etmişlerdir (Zhu, 2011).

Literatürde aşındırıcı konusu ile ilgili yapılan çalışmalar daha ziyade farklı tür aşındırıcıların balataların performansına etkisi şeklindedir. Ancak bu çalışmalarda, aşındırıcı boyutunun balataların sürtünme ve aşınma performansına etkisi incelenmemiştir. Yapılan bu çalışma ile

hem aşındırıcı türünün hem de aşındırıcı boyutunun balatanın performansına etkisi ortaya konmuştur.

## 2. Deneysel Çalışmalar

### 2.1. Balata Numunesi Üretimi

Balata numunesi üretiminde bağlayıcı olarak fenolik reçine, takviye malzemesi olarak Kevlar ve Lapinus RB220 elyafı, dolgu olarak vermikülit, kalsiyum karbonat ve bronz, yağlayıcı olarak ise h-BN kullanılmıştır. Aşındırıcı olarak farklı tür ve boyut aralığına sahip seramik tozlar kullanılmıştır. Numune kodları ve numune üretiminde kullanılan bileşenlerin hacim oranları Tablo 1' de verilmiştir. Üretimde aşındırıcı türü ve aşındırıcı boyutu değişken olarak alınıp balatayı oluşturan diğer bileşenler sabit tutulmuştur. Balata numuneleri üç grup (A, S ve B şeklinde) halinde üretilmiştir. Aşındırıcı olarak partikül şeklinde, A grubu numunelerde  $Al_2O_3$ , S grubu numunelerde SiC ve B grubu numunelerde  $B_4C$  seramik tozları kullanılmıştır. Belirlenen oranlarda hazırlanan karışım yüksek hızlı bir mixer içerisinde 3-4 dakika karıştırılmıştır. Karışımlar 25 MPa basınç ve 150 °C sıcaklıkta 15 dakika süreyle preslenmiştir. Presleme işleminin ardından sertleşmenin tamamlanması için numuneler fırında 180 °C sıcaklıkta 5 saat boyunca kütleme işlemine tabi tutulmuştur.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan balata malzemesinin bileşen ve oranları

Gruplar	Numuneler	Kompozisyon (% hacimsel olarak)							
		Ort. tane boyutu ( $\square m$ )	Aşındırıcılar			Reçine	Elyaf	Yağlayıcı	Dolgu M.
			$Al_2O_3$	SiC	$B_4C$				
A	A25	23	5	-	-	25	27	5	38
	A63	60	5	-	-	25	27	5	38
S	S63	53	-	5	-	25	27	5	38
	S90	85	-	5	-	25	27	5	38
B	B25	22	-	-	5	25	27	5	38
	B90	85	-	-	5	25	27	5	38
	B180	145	-	-	5	25	27	5	38

### 2.2. Test Düzenegi

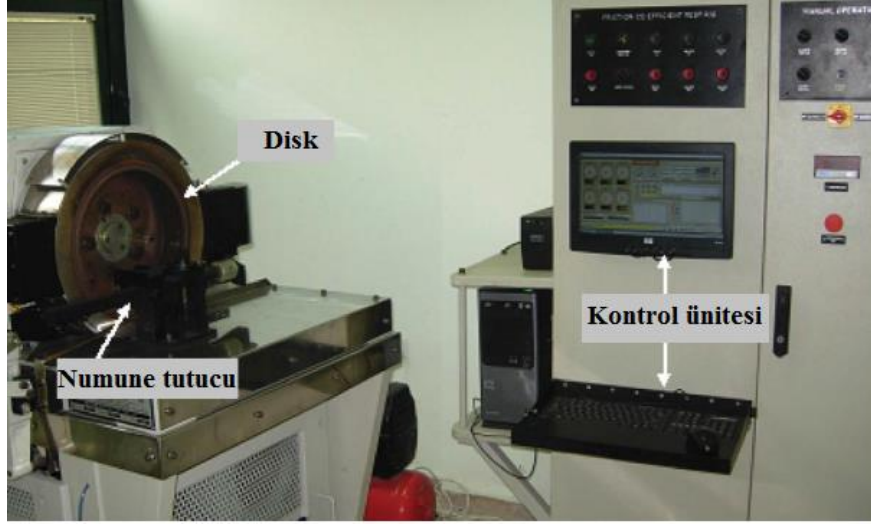
Numunelerin sürtünme ve aşınma davranışları Chase tipi test cihazında SAE J661 test prosedürüne uygun olarak tespit edilmiştir. Testler için kullanılan cihazın resmi Şekil 1'de gösterilmiştir. Cihaz temel olarak 3 ana kısımdan

oluşmuş olup bunlar numune tutucusu, disk ve kontrol birimi şeklindedir. Test cihazında 25 mm x 25 mm x 7 mm boyutlarına sahip balata numuneleri kullanılmıştır.

Sürtünme ve aşınma testinin uygulama aşamaları ve işlem basamakları Tablo 2' de verilmiştir.

Numune üzerine uygulanan yük pnömatik bir sistem tarafından sağlanmaktadır. Uygulanan yük ve disk (tambur) devir sayısı, yanma ve düzenleme aşamaları hariç sırasıyla 670 N ve 411 dev/dk şeklindedir. Test süresince disk sıcaklığı,

diskin çevresine yerleştirilmiş rezistanslar ve hava soğutma sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edilmekte ve böylece istenen sıcaklıklara ayarlanmaktadır. Test sonuçları, sürtünme-aşınma test cihazına bağlı bir bilgisayardan alınmaktadır.



Şekil 1. Sürtünme-aşınma test cihazı (Chase tipi)

Tablo 2. Sürtünme ve aşınma testi uygulama aşamaları

Blok	Disk devir sayısı (devir/dk)	Disk sıcaklığı (°C)			Uygulanan yük (N)	Yükleme		Yük kaldırma		Çevrim sayısı
		Min.	Mak.	Artış		Dak.	Sn.	Dak.	Sn.	
Yanma	308	-	93	-	450	20	-	-	-	1
Düzenleme	205	82	93	-	230	5	-	-	-	1
1.Alıştırma	411	82	104	-	670	-	10	-	20	20
1.Yorma	411	82	289	28	670	10	-	-	-	1
1.Toparlama	411	261	93	56	670	-	10	-	-	1
Aşınma	411	193	204	-	670	-	20	-	10	100
2.Yorma	411	82	345	28	670	10	-	-	-	1
2.Toparlama	411	317	93	56	670	-	10	-	-	1
2.Alıştırma	411	82	104	-	670	-	10	-	20	20

Sürtünme ve aşınma deneyleri yanma (burnish), düzenleme (reset), 1.alıştırma (baseline I), 1.yorma (fade I), 1.toparlama (recovery I), aşınma (wear), 2.yorma (fade II), 2.toparlama (recovery II) ve 2.alıştırma (baseline II) kısımlarından oluşmaktadır. Numune özgül aşınma değerleri, denklem (1) de verilen formülle hesaplanmıştır (Vishwanath vd., 1991).

$$\dot{W}_s = \Delta m / \rho \cdot F_n \cdot L \quad (1)$$

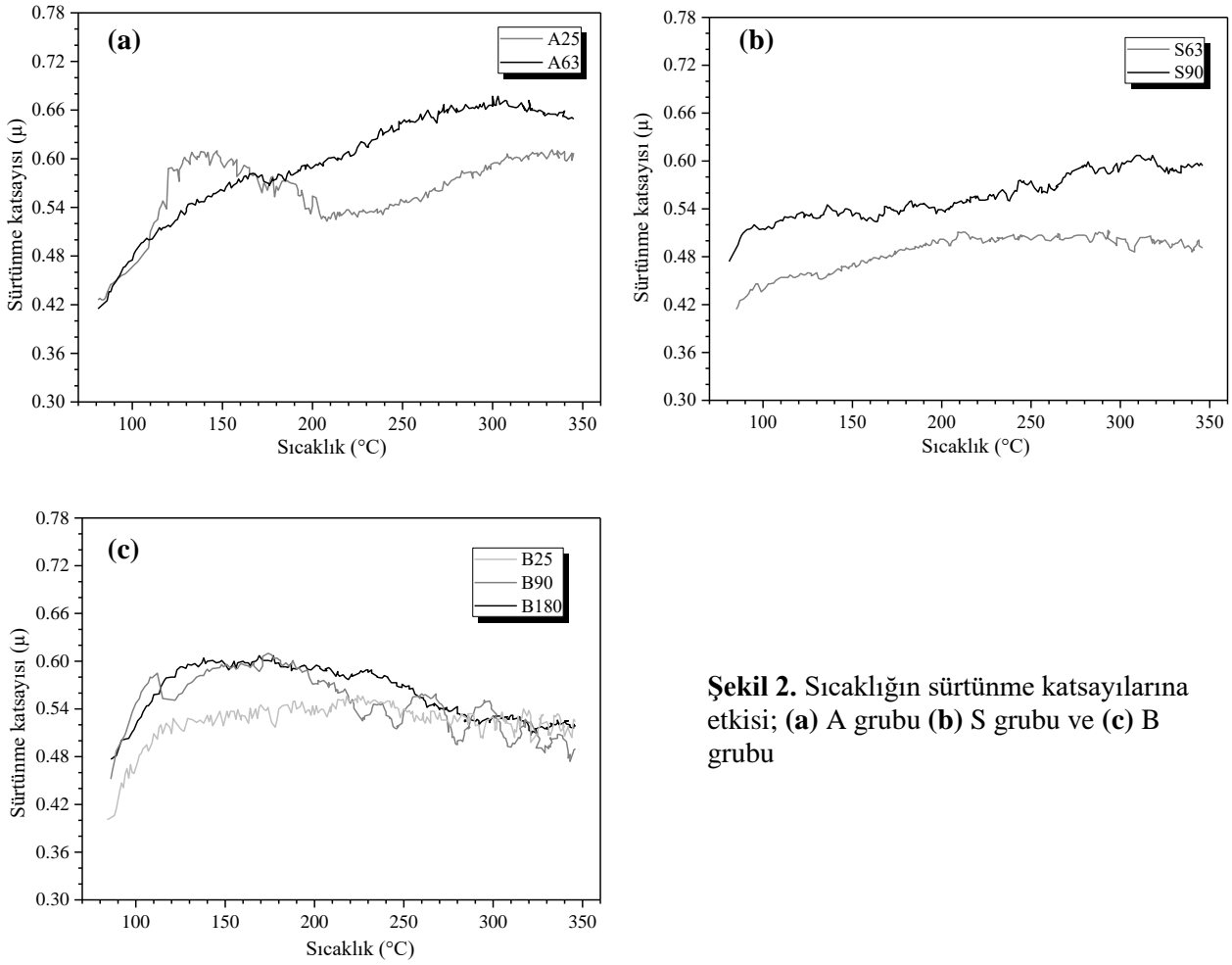
Burada;  $\dot{W}_s$  özgül aşınma miktarı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ),  $\Delta m$  numune ağırlık kaybı (mg),  $\rho$  yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$F_n$  uygulanan yük (N), L kat edilen toplam yol ( $\text{m}$ )'dir. Aşınma yüzeylerin ve aşınma parçacıkların analizi Zeiss Evo LS10 model taramalı elektron mikroskopunda, aşınma parçacıkların boyut analizi ise Malvern Mastersizer 2000 cihazında yapılmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Sürtünme Performansı

A, S ve B grubu numunelerin sürtünme katsayılarına disk sıcaklığının etkisi sırasıyla Şekil 2 (a-c)' de gösterilmiştir. Burada disk devir sayısı 411 d/dk ve uygulanan yük 670 N şeklindedir.



**Şekil 2.** Sıcaklığın sürtünme katsayılarına etkisi; (a) A grubu (b) S grubu ve (c) B grubu

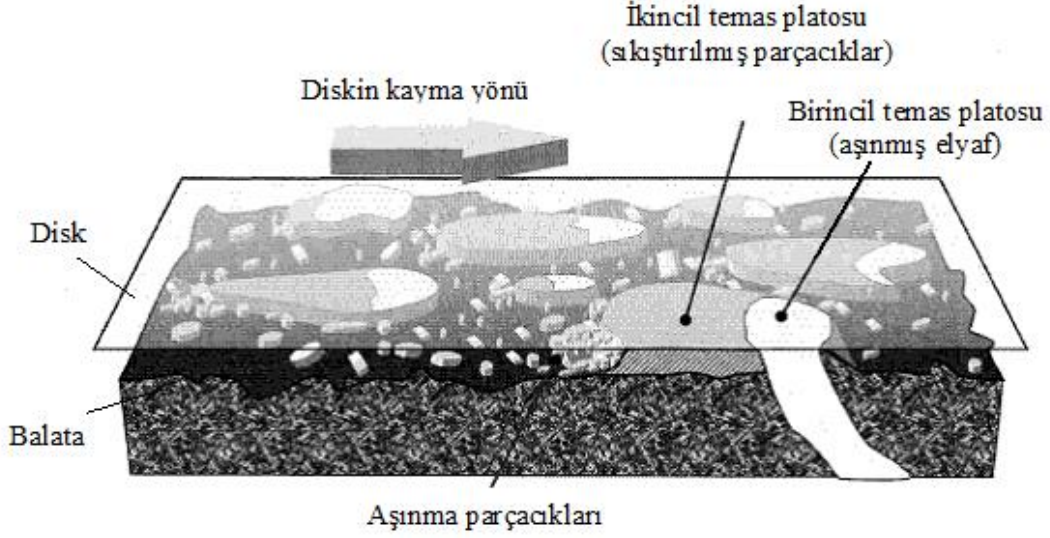
Şekil 2(a)' da görüldüğü gibi A25 kodlu numunenin sürtünme katsayısı deney başlangıcından 140 °C disk sıcaklığına kadar sürekli bir artış göstermiş daha sonra artan disk sıcaklığı birlikte bir miktar düşmüştür. Sürtünme katsayısı 200 °C disk sıcaklığından deney sonuna kadar tekrar yükselmiştir. A25 kodlu numunenin deney başlangıcındaki sürtünme katsayısı yaklaşık 0,42 iken bu değer deney sonucunda 0,60 olarak elde edilmiştir. Nispeten daha iri taneli  $Al_2O_3$  içeren A63 kodlu numunenin sürtünme katsayısı test başlangıcında yaklaşık 0,42 iken bu değer disk sıcaklığının 300°C'ye artmasıyla birlikte 0,66 değerine ulaşmış olup, deney sonucunda bu değer 0,65 olarak elde edilmiştir. S63 kodlu numunenin sürtünme katsayısı 210 °C disk sıcaklığına kadar sürekli bir artış göstermiş daha sonra deney sonuna kadar sürtünme katsayısı yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Diğer taraftan S90 kodlu numunenin sürtünme katsayısı deneyin başlamasıyla birlikte sürekli bir artış göstermiş ve bu durum deney sonuna kadar devam etmiştir. S63 ve S90 kodlu numunelerin deney başlangıcındaki sürtünme katsayıları sırasıyla yaklaşık 0,41 ve 0,47 iken deney sonucunda bu

değerler sırasıyla 0,48 ve 0,59 olarak bulunmuştur (Şekil 2(b)). B grubu numunelerde (Şekil 2(c)) ise en ince boyutta  $B_4C$  içeren B25 numunesinin sürtünme katsayısı deney başlangıcından 180 °C disk sıcaklığına kadar yükselmiş ve artan test süresiyle birlikte deney sonuna kadar sabit kalmıştır. Diğer taraftan B90 ve en büyük boyutta  $B_4C$  içeren B180 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı ise deneyin başlamasıyla birlikte 180 °C disk sıcaklığına kadar artmış ancak artan sıcaklıkla birlikte deney sonuna kadar sürekli olarak azalmıştır. B25, B90 ve B180 kodlu numunelerin deney başlangıcındaki sürtünme katsayıları yaklaşık 0,40, 0,45 ve 0,48 iken deney sonucunda bu değerler sırasıyla 0,52, 0,49 ve 0,52 olarak elde edilmiştir.

A, S ve B grubu numunelerin sürtünme katsayıları deney başlangıcıyla birlikte artan sıcaklıkla artmıştır. Bunun nedeni numune yüzeyinde temas platolarının oluşması ve buna bağlı olarak numune ve karşı yüzey arasındaki gerçek temas alanının artmasıdır. Platolar, birincil plato ve ikincil plato olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 3). Yüksek aşınma direncine ve yüksek mukavemete sahip birincil

platolar genellikle elyaflardan ve aşındırıcı parçacıklardan meydana gelir. Bu parçacıklar, balatanın aşınan kısmı üzerinde engeller oluşturarak ikincil platoların oluşmasına önemli oranda katkı sağlarlar (Eriksson ve Jacobson, 2000; Neis vd., 2017). Deneyin başlangıç

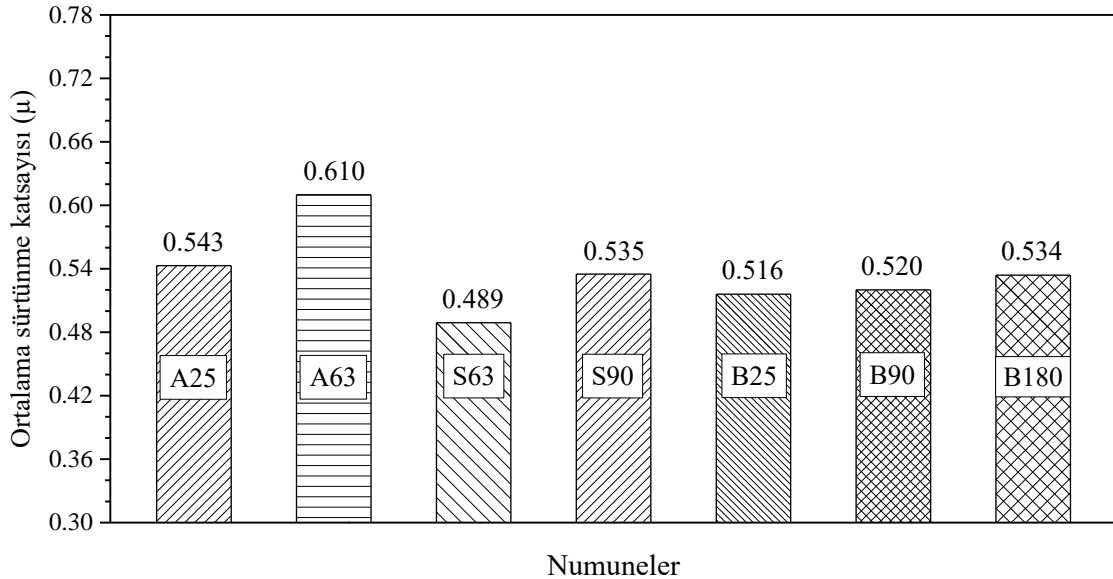
aşamasında sürtünme, genellikle matris ve karşı yüzey (disk) şeklinde olur. Ancak artan zaman ve sürtünme ısıyla matriste aşınma meydana gelerek elyaflar numune yüzeyine çıkar. Bunun sonucunda sürtünme büyük oranda elyaf ve disk arasında meydana gelir.



Şekil 3. Balata ve disk arasındaki temas durumunun şematik gösterimi (Eriksson ve Jacobson, 2000).

A, S ve B grubu numunelerin sürtünme katsayılarının ortalama değerleri Şekil 4’ de verilmiştir. Numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının hesaplanmasında Tablo 2’ de verilen 10 farklı sürtünme katsayısının aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Bunun için sıcaklıklar ise 1.toparlama 204 ve 149 °C, 2.yorma 232, 260, 288, 316 ve 343 °C ve 2.toparlama 260, 204 ve

149 °C şeklindedir. Şekil 4’ de görüldüğü gibi bütün numune grupları için ortalama sürtünme katsayısı artan aşındırıcı boyutu ile artmıştır. Bu artış en fazla A grubu numunelerde meydana gelmiştir (%12,33). Diğer taraftan aynı aşındırıcı boyutu göz önüne alındığında A grubu numunelerinin en yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görülür (Şekil 4).

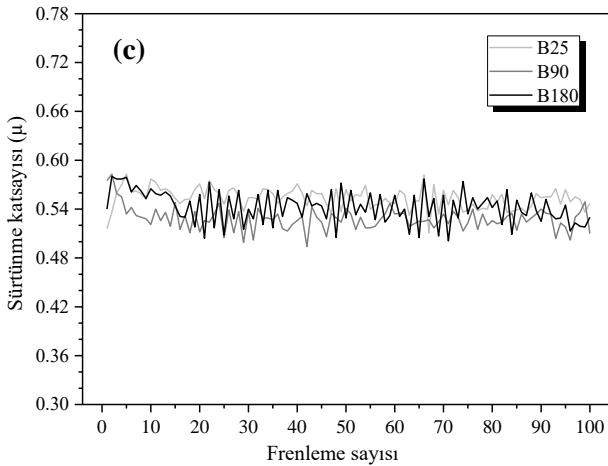
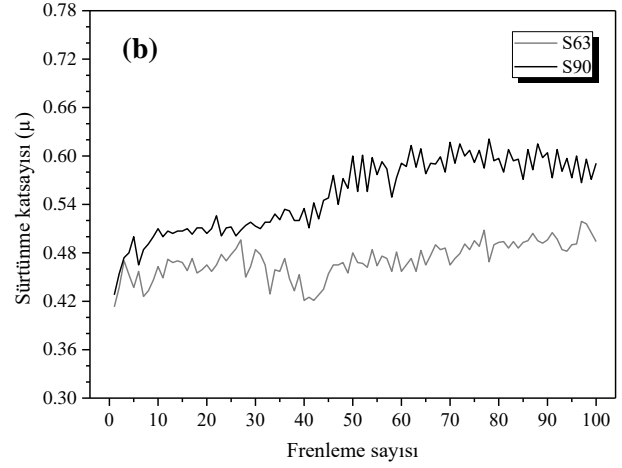
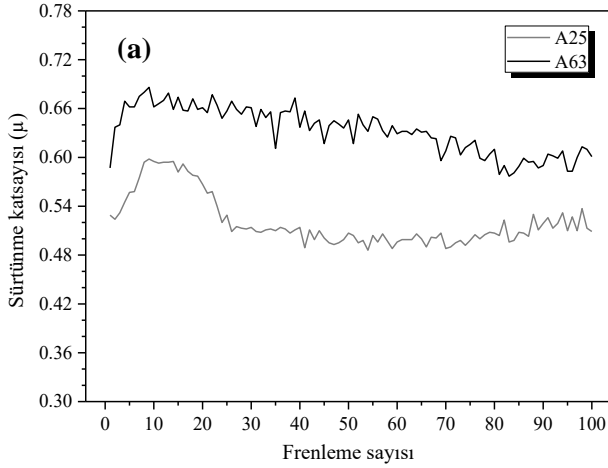


Şekil 4. Numunelerin ortalama sürtünme katsayılarındaki değişim.

Her üç grup numunelerin sürtünme katsayılarına frenleme çevriminin (1 çevrim, 20 sn yükleme ve 10 sn yüksüz kısımdan oluşur) etkisi Şekil 5 (a-c)'de ifade edilmiştir.

Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi, A25 ve A63 kodlu numunelerin ilk on çevrimdeki (frenleme sayısı) sürtünme katsayıları sürekli bir artış göstermiştir. Sürtünme katsayısı bu çevrimden sonra A25 kodlu numunede artan çevrimle birlikte otuzuncu frenlemeye kadar bir düşüş göstermiş ancak bu değer üzerindeki çevrimlerde sürtünme katsayısı hemen hemen sabit kalmıştır. A63 kodlu numunede ise onuncu frenlemeden sonraki artan çevrimlerde sürtünme katsayısı sürekli olarak azalmış, bu azalma deney sonuna kadar devam

etmiştir. Deney sonunda A25 ve A63 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0,51 ve 0,60 olarak bulunmuştur. Şekil 5(b)'de ise S63 ve S90 kodlu numunelerin sürtünme katsayıları deneyin başlamasıyla birlikte sürekli olarak artmış ve bu artış deney sonuna kadar devam etmiştir. Deney sonunda sürtünme katsayısı S63 kodlu numune için yaklaşık 0,50 olurken S90 kodlu numunede 0,59 olduğu görülmüştür. B grubu numunelerin sürtünme katsayıları frenleme sayısı ile belirgin bir değişim göstermemiştir. Her üç numune için (B25, B90 ve B180 kodlu) sürtünme katsayısı, artan frenleme ile birlikte deney başlangıcından deney sonuna kadar yaklaşık olarak sabit kalmıştır (Şekil 5c).

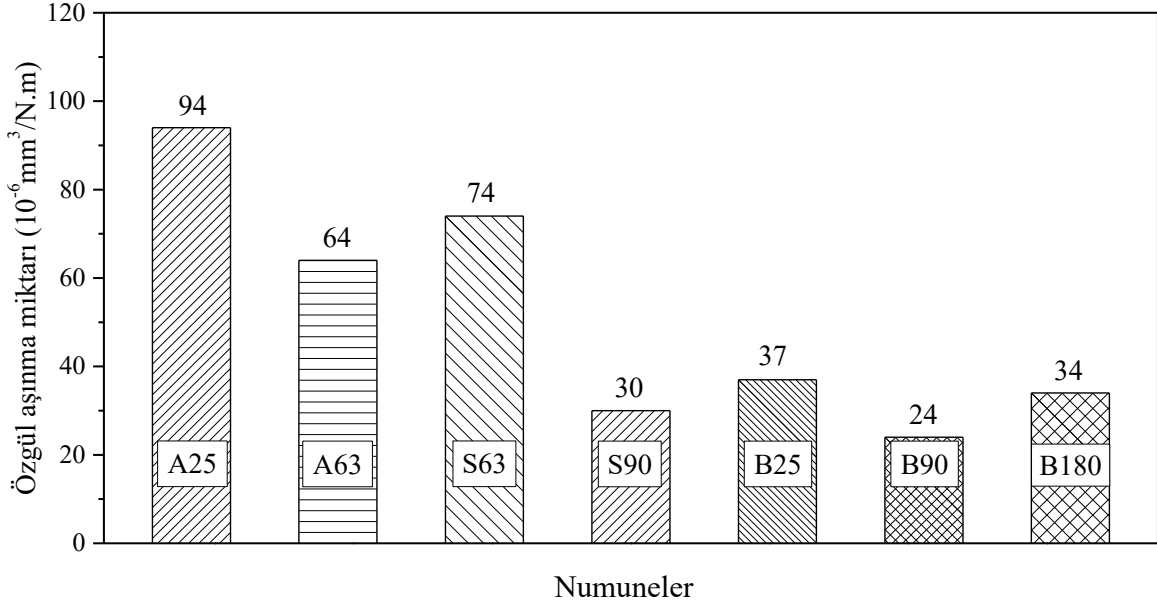


**Şekil 5.** Frenleme sayısının sürtünme katsayısına etkisi; (a) A grubu (b) S grubu; ve (c) B grubu

### 3.2. Aşınma Miktarı

Balatalarda meydana gelen aşınma sıcaklık, kayma hızı, uygulanan yük, çevre koşulları ve numune ve karşı yüzey (disk) arasındaki etkileşim gibi birçok faktöre bağlıdır (Kim ve Jang, 2000; Öztürk vd., 2007). Numunelerin özgül aşınma değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekilden

görülebileceği üzere, aynı aşındırıcı boyutuna sahip S63 ve A63 kodlu numuneler karşılaştırıldığında S63 kodlu numune daha yüksek aşınma değerine sahiptir. Diğer taraftan, A grubu numunelerin aşınma değeri sonuçları ise B grubu numunelere göre daha yüksek olup, aynı aşındırıcı boyutunda B grubu numuneler (A25'e kıyasla B25 ve S90'a kıyasla B90) en düşük özgül aşınmaya sahiptir.



Şekil 6. Numunelerin özgül aşınma miktarlarındaki değişim.

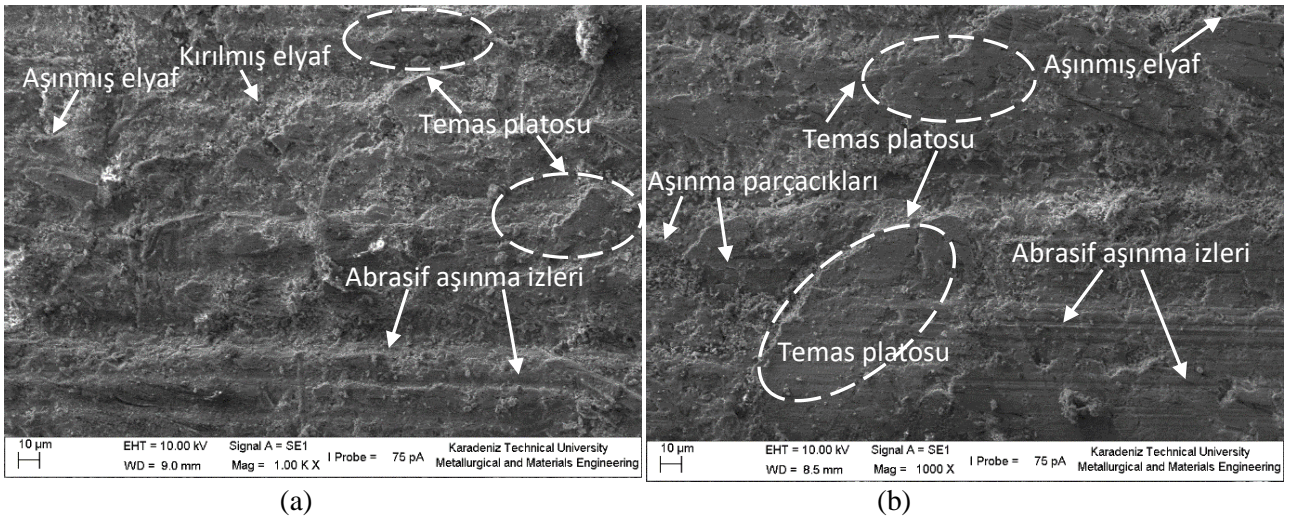
### 3.3. Aşınma Yüzeylerinin ve Aşınma Parçacıklarının SEM Analizi

Şekil 7-9' da A, S ve B grubu numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

Şekil 7(a)' da görüldüğü gibi, A25 kodlu numunenin yüzeyinde aşınmış, kırılmış ve ayrılmış elyaf parçacıklarının yanında az da olsa temas platoları mevcuttur. Deney sırasında ayrılan elyaf parçacıkları, diğer aşınmış sert parçacıklarla birleşerek numune yüzeyinde abrasif etki meydana getirirler. Kırılmış ve yüzeyden kopmuş olan elyaflar, karşı yüzeyin pürüzlülüğünü artırmakta bunun sonucunda numunede daha fazla aşınma meydana getirmektedir. Şekil 7(b)' de ise

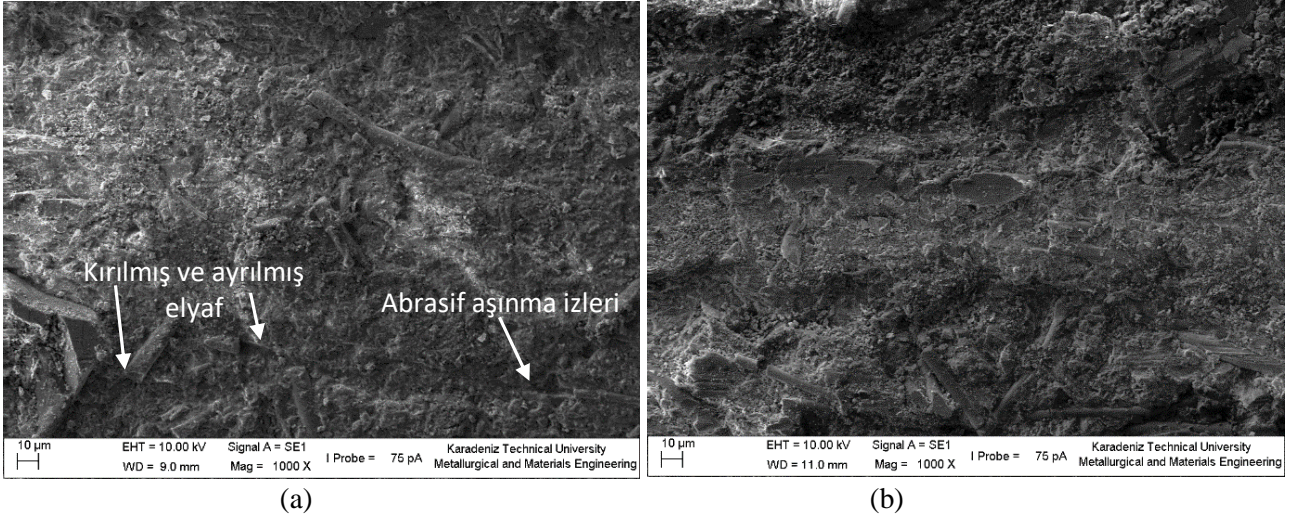
A63 kodlu numunenin aşınmış yüzey görüntüsü verilmiştir. Burada da Şekil 7(a)' ya benzer bir görüntü mevcut olmakla birlikte nispeten daha kalın ve daha geniş temas platolarının varlığı mevcuttur. Bu da numunede daha yüksek sürtünme katsayısının ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Şekil 8 (a-b), sırasıyla S63 ve S90 kodlu numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Her iki numunenin aşınma yüzeyleri yaklaşık olarak benzer karakter sergilemektedir. Numunelerin yüzeyinde kırılmış ve yüzeyden ayrılmış elyaflara ilaveten elyaf-matris aşınması ve balatayı oluşturan diğer bileşenlerin aşınması görülmektedir.



Şekil 7. A kodlu numunelerin aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü: (a) A25 ve (b) A63.

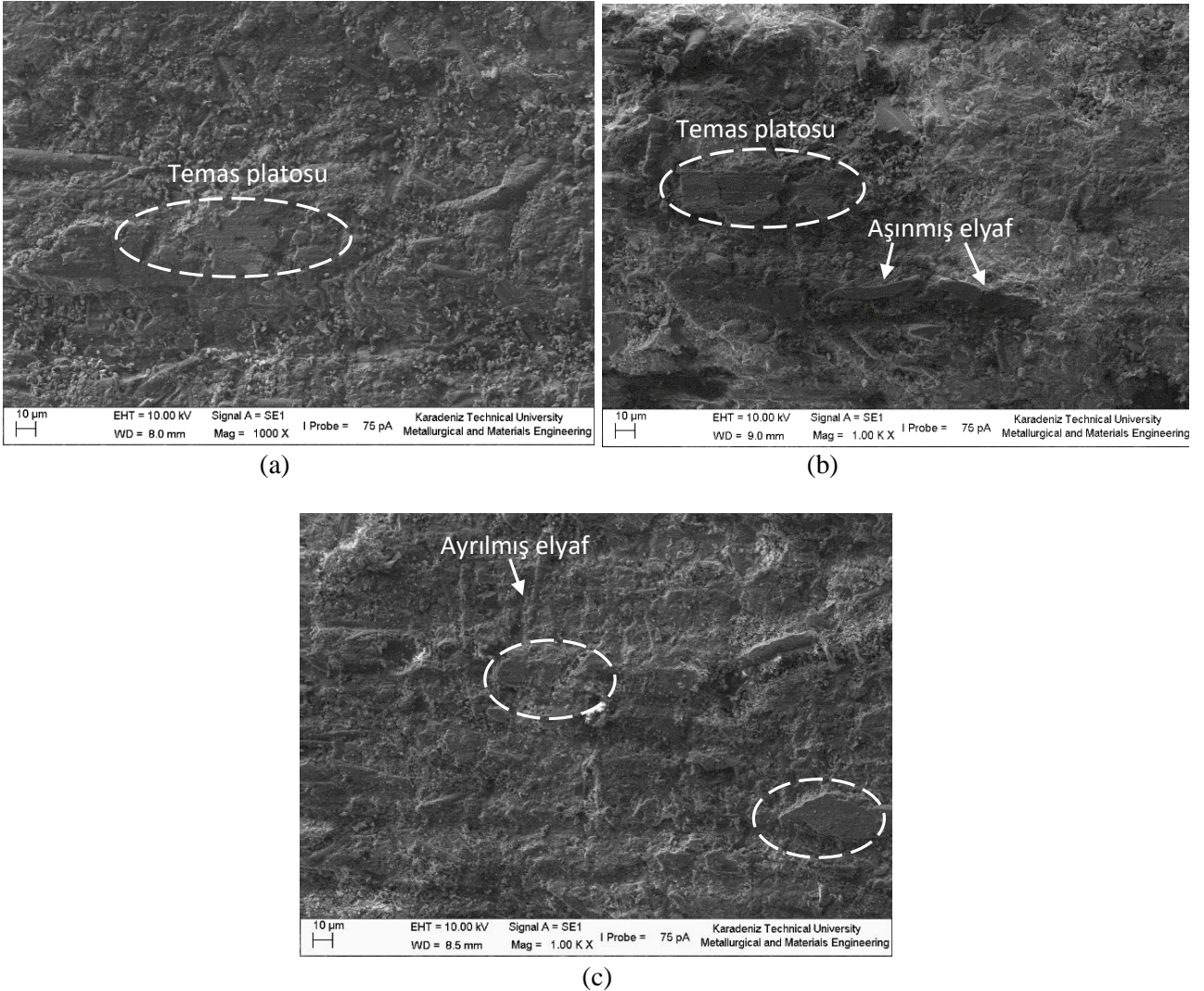




Şekil 8. S kodlu numunelerin aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü: (a) S63; ve (b) S90.

B25, B90 ve B180 kodlu numunelerin aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 9 (a-c)' de verilmiştir. Her üç numune yüzeyinde birincil ve

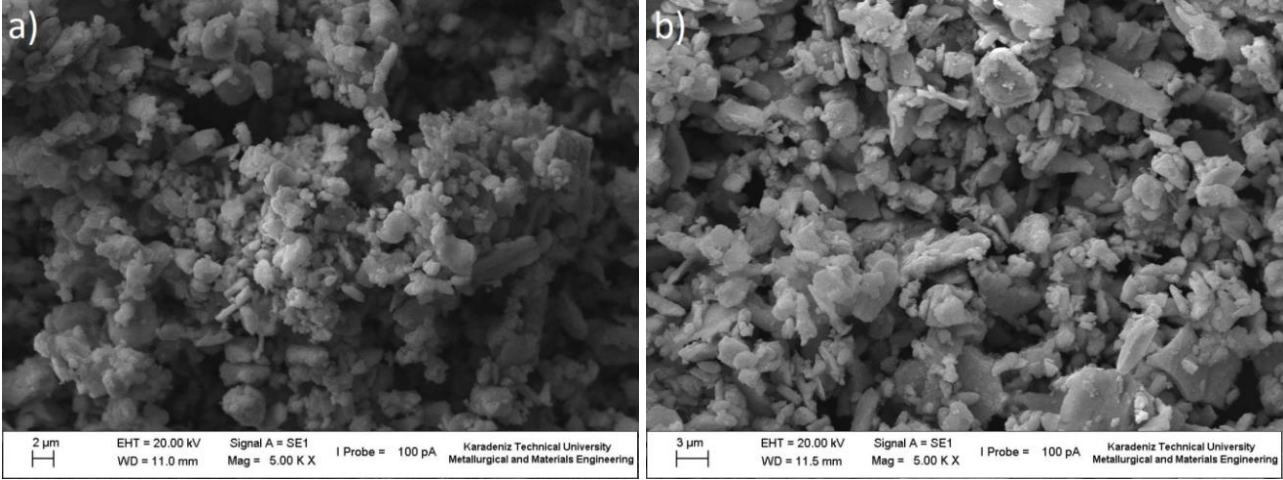
ikincil temas platolarına ilave olarak aşınmış ve kopmuş elyaflar ve aşınmış diğer bileşenler görülmektedir.



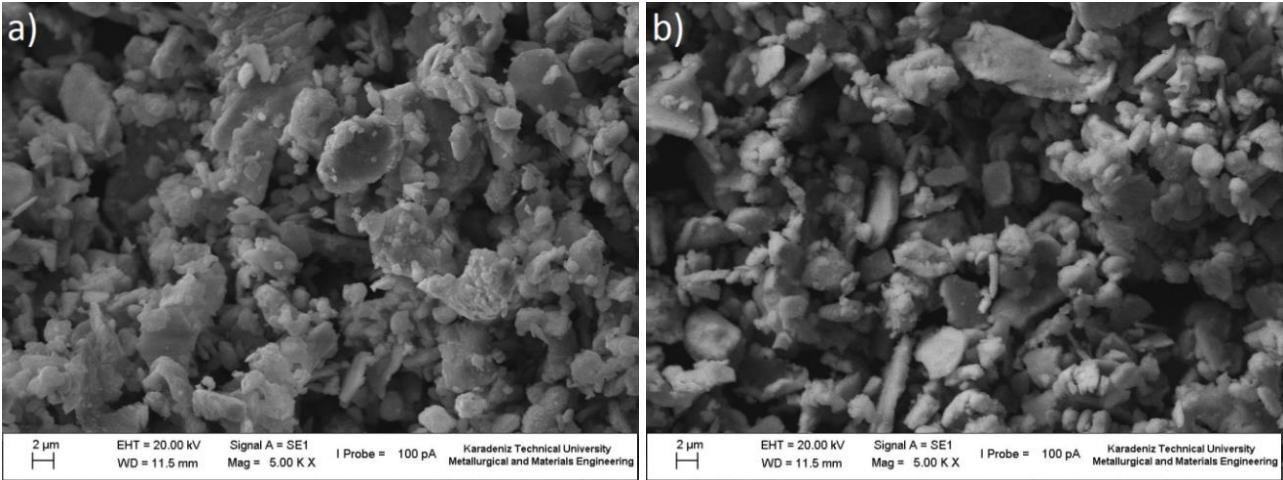
Şekil 9. B kodlu numunelerin aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü: (a) B25; (b) B90; ve (c) B180.

Şekil 10-12' de aşınma testi sırasında oluşan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma parçacıklarının incelenmesi, aşınma mekanizmalarının ortaya konması ve ayrıca balata ve disk arasındaki yüzey etkileşimi açısından önemlidir (Mosleh vd., 2004). Aşınma parçacıkları, bozunmuş ve balata numunesinden ayrılmış matris ve dolgu bileşenleri, kırılmış ve kopmuş elyaflar ve karşı yüzeyden gelen aşınmış

bileşenlerden oluşur. Şekilde görüleceği üzere, daha ince boyutta aşındırıcı içeren numunelerde, çoğunlukla daha fazla küresel yapıda ve az miktarda plaka şeklinde aşınma parçacıkları oluşurken (Şekil 10a, 11a ve 12a), daha iri aşındırıcı içeren numuneler ise çoğunlukla daha fazla plaka ve daha az oranda küresel formda aşınma parçacıkları ortaya koyarlar (Şekil 10b, 11b-c ve 12b).



Şekil 10. A kodlu numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü: (a) A25 ve (b) A63.



Şekil 11. S kodlu numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü: (a) S63 ve (b) S90.

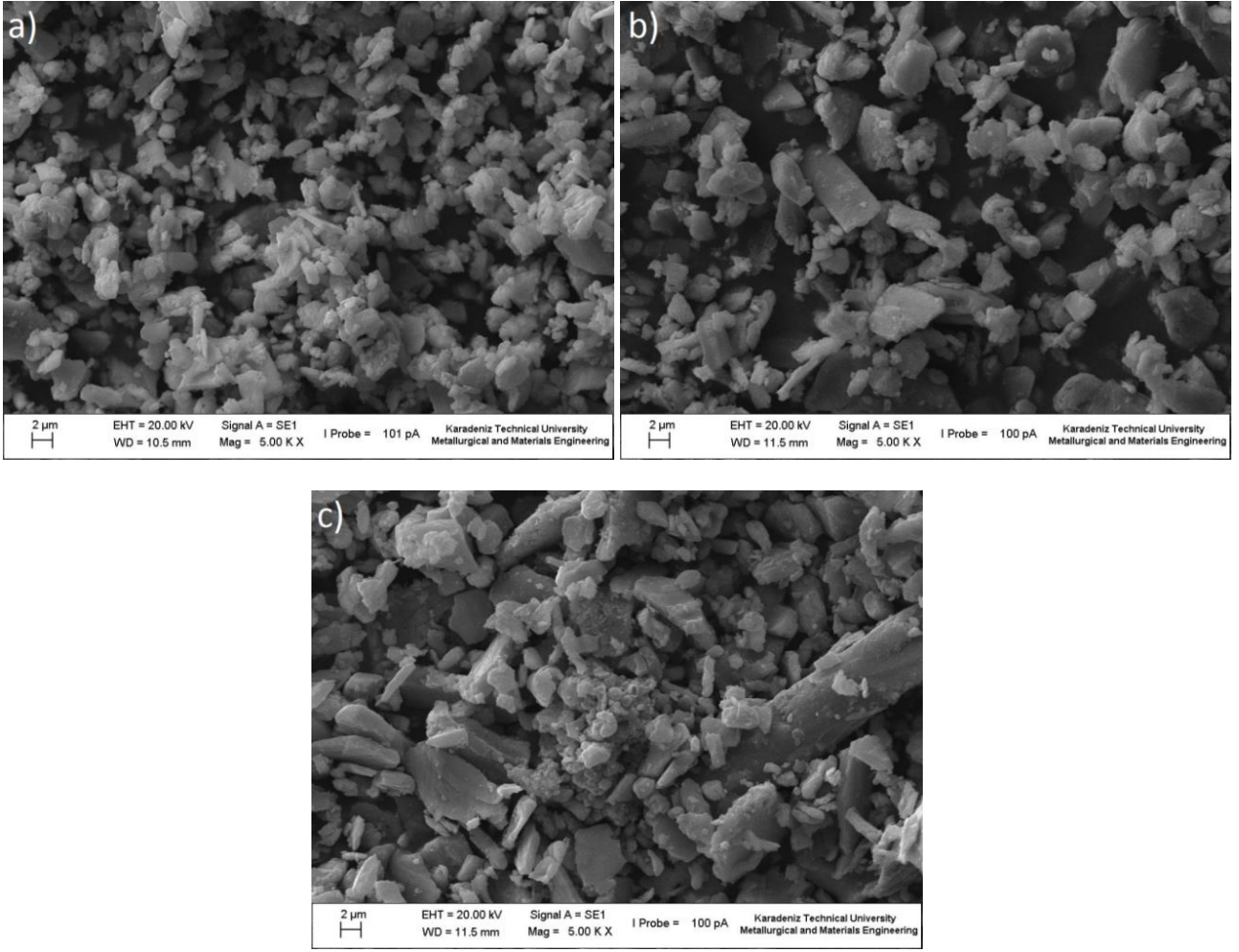
Tablo 3' de aşınma parçacıklarının ortalama boyutları verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi artan aşındırıcı tane boyutu ile aşınma parçacıklarının ortalama boyutu artmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Çalışmada aşındırıcı türü ve tane boyutunun balataların sürtünme-aşınma performanslarına etkisi tespit edilmiştir. Sürtünme-aşınma davranışları Chase tipi sürtünme-aşınma test

cihazında SAE J661 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. En yüksek sürtünme katsayısı  $Al_2O_3$  içeren A63 kodlu numunede 0,61, en düşük sürtünme katsayısı ise SiC içeren S63 kodlu numunede 0,489 olarak bulunmuştur.
2. En iyi aşınma direnci  $B_4C$  içeren B90 kodlu numune göstermiştir.



Şekil 12. B kodlu numunelerin aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü: (a) B25, (b) B90 ve (c) B180

**Tablo 3.** Numune aşınma parçacıklarının ortalama boyutu

Aşınma parçacıklarının ortalama boyutu ( $\mu\text{m}$ )					
A Grubu		S Grubu		B Grubu	
A25	3,21	S63	4,57	B25	3,48
A63	5,28	S90	6,41	B90	5,64
				B180	8,29

- Aşındırıcı tane boyutunun artmasıyla numunelerin sürtünme katsayıları artmış buna karşılık özgül aşınma değerleri azalmıştır.
- Artan frenleme sayısı ile birlikte sürtünme katsayıları genellikle  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeren numunelerde düşmüş,  $\text{SiC}$  içeren numunelerde artmış ve  $\text{B}_4\text{C}$  içeren numunelerde ise değişmemiştir.
- Artan aşındırıcı tane boyutu ile aşınma parçacıklarının ortalama boyutu artmıştır.

### Kaynaklar

- Bijwe, J., 1997. Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos-Fiber Reinforced Friction Materials-A Review. *Polymer Composites*, 18(3), 378–396.
- Boz, M. ve Kurt, A., 2007. Effect of  $\text{ZrSiO}_4$  on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials. *Journal of Materials Science and Technology*, 23(6), 843–850.

- Cai, P., Li, Z., Wang, T. ve Wang, Q., 2015b. Effect of Aspect Ratios of Aramid Fiber on Mechanical and Tribological Behaviors of Friction Materials. *Tribology International*, 92, 109–116.
- Cai, P., Wang, Y., Wang, T. ve Wang, Q., 2015a. Effect of Resins on Thermal, Mechanical and Tribological Properties of Friction Materials. *Tribology International*, 87, 1–10.
- Chan, D. ve Stachowiak, G.W., 2004. Review of Automotive Brake Friction Materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218, 953–966.
- Cho, K.H., Jang, H., Hong, Y.S., Kim, S.J., Basch, R.H. ve Fasch, J.W., 2008. The Size Effect of Zircon Particles on the Friction Characteristics of Brake Lining Materials. *Wear*, 264, 291–297.
- Eriksson, M. ve Jacobson, S., 2000. Tribological Surfaces of Organic Brake Pads. *Tribology International*, 33, 817–827.
- Etemadi, H., Shojaei, A. ve Jahanmard, P., 2014. Effect of Alumina Nanoparticle on the Tribological Performance of Automotive Brake Friction Materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(2), 166–178.
- Gurunath, P.V. ve Bijwe J., 2007. Friction and Wear Studies on Brake-Pad Materials Based on Newly Developed Resin. *Wear*, 263, 1212–1219.
- Ji, Z., Jin H., Luo, W., Cheng, F., Chen, Y., Ren, Y., Wu, Y. ve Hou S., 2017. The Effect of Crystallinity of Potassium Titanate Whisker on the Tribological Behavior of NAO Friction Materials. *Tribology International*, 107, 213–220.
- Kim, S.J. ve Jang, H., 2000. Friction and Wear of Friction Materials Containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp. *Tribology International*, 33, 477–484.
- Kim, S.J., Cho, M.H., Lim, D.S. ve Jang, H., 2001. Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive Friction Material. *Wear*, 251, 1484–1491.
- Kim, S.S., Hwang, H.J., Shin, M.W. ve Jang, H., 2011. Friction and Vibration of Automotive Brake Pads Containing Different Abrasive Particles. *Wear*, 271, 1194–1202.
- Lee, E.J., Hwang, H.J., Lee, W.G., Cho, K.H. ve Jang, H., 2010. Morphology and Toughness of Abrasive Particles and Their Effects on the Friction and Wear of Friction Materials: A Case Study with Zircon and Quartz. *Tribology Letters*, 37, 637–644.
- Ma, Y., Martynkova, G.S., Valaskova, M., Matejka, V. ve Lu, Y., 2008. Effects of ZrSiO<sub>4</sub> in Non-Metallic Brake Friction Materials on Friction Performance. *Tribology International*, 41, 166–174.
- Mosleh, M., Blau, P.J. ve Dumitrescu, D., 2004. Characteristics and Morphology of Wear Particles from Laboratory Testing of Disk Brake Materials. *Wear*, 256, 1128–1134.
- Neis, P.D., Ferreira, N.F., Fekete, G., Matozo, L.T. ve Masotti D., 2017. Towards A Better Understanding of the Structures Existing on the Surface of Brake Pads. *Tribology International*, 105, 135–147.
- Öztürk, B., Arslan, F. ve Öztürk, S., 2007. Hot Wear Properties of Ceramic and Basalt Fiber Reinforced Hybrid Friction Materials. *Tribology International*, 40, 37–48.
- Öztürk, B., Öztürk, S. ve Adigüzel, A.A., 2013. Effect of Type and Relative Amount of Solid Lubricants and Abrasives on the Tribological Properties of Brake Friction Materials. *Tribology Transactions*, 56, 428–441.
- Satapathy, B.K. ve Bijwe, J., 2005. Fade and Recovery of Non-Asbestos Organic (NAO) Composite Friction Materials Based on Combinations of Rock Fibers and Organic Fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24, 563–576.
- Singh, T., Tiwari, A., Patnaik, A., Chauhan, R. ve Ali, S., 2017. Influence of Wollastonite Shape and Amount on Tribo-Performance of Nonasbestos Organic Brake Friction Composites. *Wear*, 386–387, 157–164.
- Sun, W., Zhou, W., Liu, J., Fu, X., Chen, G. ve Yao, S., 2018. The Size Effect of SiO<sub>2</sub> Particles on Friction Mechanisms of a Composite Friction Material. *Tribology Letters*, 35, 66–75.

Tomasek, V., Kratosova, G., Yun, R., Fan, Y. ve Lu, Y., 2009. Effects of Alumina in Nonmetallic Brake Friction Performance. *Journal of Material Science*, 44, 266-273.

Vishwanath, B., Verma, A.P. ve Rao, C.V.S.K., 1991. Effect of Fabric Geometry on Friction and Wear of Glass-Fibre-

Reinforced Composites. *Wear*, 145, 315–327.

Zhu, Z., Xu, L., ve Chen, G., 2011. Effect of Different Whiskers on the Physical and Tribological Properties of Non-metallic Friction Materials. *Materials Design*, 32, 54–61.