

Yüksek Fırın Baca Tozu ile Güçlendirilmiş Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerin Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Hüsamettin KUŞ^{1*}, İlker SUGÖZÜ², Adem AVCU³

¹Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Mersin, Turkey

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Mersin, Türkiye

³Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Adana, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/02/2025
Düzeltilme: 26/03/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Metal matrisli kompozit
fren balatası
Endüstriyel atık
Yüksek fırın baca tozu
Fren performansı

Article Info

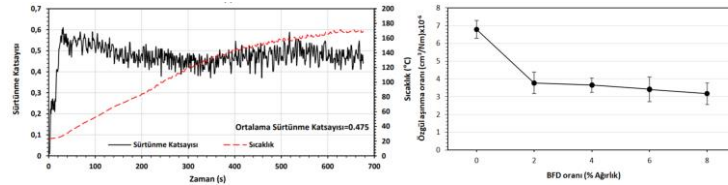
Research article
Received: 19/02/2025
Revision: 26/03/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Metal matrix composite
brake pad
Industrial waste
Blast furnace dust
Braking performance

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada endüstriyel bir atık ürün olan yüksek fırın baca tozu (BFD) takviyeli bronz matrisli fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen kompozit fren balata numunelerin tribolojik, mekanik ve fiziksel performansları incelenmiştir. / In this study, bronze matrix brake pad samples reinforced with BFD, an industrial waste product, were produced. The tribological, mechanical and physical performances of the produced composite brake pad samples were investigated.



Şekil A: Fren balata numunelerinin sürtünme katsayısı (BFD-6) ve özgül aşınma oran değerleri / Figure A: Coefficient of friction (BFD-6) and specific wear rate values of brake pad samples

Önemli noktalar (Highlights)

- Hem fren performans özelliklerini geliştirmek hem de üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla fren balata üretiminde takviye elemanı olarak BFD kullanılmıştır. / BFD was used as a reinforcement element in brake pad production in order to both improve brake performance properties and reduce production costs.
- BFD'nin fren balatası malzemesinde takviye elemanı olarak kullanılması, çevre dostu, düşük maliyetli ve düşük karbon ayak izine sahip fren balata örneklerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. / Usage of BFD as a reinforcement element in brake pad material contributed to the development of environmentally friendly, low-cost, and low-carbon footprint brake pad samples.
- BFD'nin ilavesi herhangi bir maliyet artışına yol açmaksızın bronz matrisli fren balata numunesinin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma direncinde gelişme sağlamıştır. / The reinforcement of BFD improved the average friction coefficient and wear resistance of the bronze matrix brake pad sample without increasing its cost.

Amaç (Aim): Bu çalışma, BFD'nin, bronz matrisli fren balata malzemesi üretiminde takviye elemanı olarak kullanılabilirliğini ve bu kullanımın fren performans özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. / This study aims to evaluate the usability of BFD as a reinforcing element in the production of bronze matrix brake pad material and the effects of this use on brake performance properties.

Özgünlük (Originality): Bronz matrisli fren balatası malzemesinin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla takviye elemanı olarak BFD kullanımının araştırılması. / Investigation of the use of BFD as a reinforcement element to improve the physical, mechanical and tribological properties of bronze matrix brake pad material.

Bulgular (Results): BFD'nin fren balatalarında fren performans özelliklerinin gelişimine katkı sağladığı belirlenmiştir. / It was determined that BFD contributed to the improvement of brake performance characteristics in brake pads.

Sonuç (Conclusion): Bronz matrisli fren balata üretiminde takviye elemanı olarak BFD kullanılmasıyla, herhangi bir maliyet artışı olmaksızın temel fren performans özelliklerinin iyileştirilebileceği belirlenmiştir. / It was determined that by using BFD as a reinforcement element in the production of bronze matrix brake pads, basic brake performance properties can be improved without any cost increase.



Yüksek Fırın Baca Tozu ile Güçlendirilmiş Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerin Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Hüsamettin KUŞ^{1*} , İlker SUGÖZÜ² , Adem AVCU³

¹Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mersin, Turkey

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Mersin, Türkiye

³Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Adana, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/02/2025
Düzeltilme: 26/03/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Metal matrisli kompozit
Fren balatası
Endüstriyel atık
Yüksek fırın baca tozu
Fren performansı

Öz

Bu çalışma, endüstriyel atık bir malzeme olan yüksek fırın baca tozunun (BFD) metal matrisli kompozit fren balatalarında takviye elemanı olarak kullanılabilirliğini ve BFD takviyesinin fren balatasının tribolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ilk aşamada sıcak presleme yöntemi kullanılarak referans numune olarak adlandırılan bronz matrisli kompozit fren balata numunesi üretildi. İkinci aşamada, referans bronz matrisli fren balata numunesine ağırlıkça farklı oranlarda (%2, %4, %6 ve %8) BFD takviye edilerek yeni fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma dayanımı (TRS), ortalama sürtünme katsayısı, sürtünme katsayı kararlılığı ve özgül aşınma oranı değerleri belirlenmiştir. Üretilen numunelerin mikro yapısı ve aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) kullanılarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, BFD takviye oranı artışına bağlı olarak üretilen numunelerin yoğunluğunun azaldığını, buna karşın sertliğinin ise arttığını göstermiştir. Üretilen numuneler arasında en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.475 ile BFD-6 numunesinde belirlenmiştir. Ayrıca, artan BFD oranı ile birlikte numunelerin aşınma direncinde belirgin bir iyileşme tespit edilmiştir. Özellikle BFD-8 numunesinin, referans numuneyle kıyasla yaklaşık %53.31 oranında daha düşük özgül aşınma değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, BFD'nin fren performans kalitesinden ödün vermeden düşük maliyetli bir fren balata malzemesi geliştirilmesinde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Investigation of Physical, Mechanical and Tribological Properties of Bronze Matrix Brake Pad Materials Reinforced with Blast Furnace Dust

Article Info

Research article
Received: 19/02/2025
Revision: 26/03/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Metal matrix composite
Brake pad
Industrial waste
Blast furnace dust
Braking performance

Abstract

This study aims to investigate the usability of Blast Furnace Dust (BFD), an industrial waste material, as a reinforcing element in metal matrix composite brake pads and the effects of BFD reinforcement on the brake pad's tribological, physical, and mechanical properties. For this purpose, the initial step produced a bronze matrix composite brake pad sample, called a reference sample, using the hot pressing method. In the second step, new brake pad samples were produced by reinforcing the reference bronze matrix brake pad sample with different BFD weight percentages (2%, 4%, 6%, and 8%). The density, hardness, transverse rupture strength (TRS), average friction coefficient, friction coefficient stability, and specific wear rate values of the produced samples were determined. Microstructure and wear surfaces of produced samples were characterized by using a scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The results obtained showed that the density of the produced specimens decreased with the increase in BFD reinforcement ratio, while the hardness increased. The highest average coefficient of friction value among the produced samples was determined in BFD-6 sample with 0.475. In addition, a significant improvement in the wear resistance of the samples was determined with increasing BFD ratio. In particular, the BFD-8 sample was determined to have a specific wear value approximately 53.31% lower than the reference sample. The obtained findings showed that BFD can be considered as an alternative source for the development of a low-cost brake pad material without compromising the brake performance quality.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fren balataları, hareket halindeki bir otomobilin güvenli bir şekilde durdurulması için kullanılan sürtünme elemanlarından biridir. Fren balataları, hareket halindeki bir taşıtı yavaşlatmak veya durdurmak için frenleme esnasında fren diski üzerinde sürtünme kuvveti oluşturarak, kinetik enerjiyi ısıya dönüştürürler. Genel olarak taşıtlarda seramik, metal ve polimer matrisli kompozit fren balataları kullanılmaktadır. Polimer matrisli fren balataları düşük frenleme enerjisine maruz kalan araçlarda tercih edilirken, orta ve yüksek düzey frenleme enerjisine maruz kalan araçlarda metal veya seramik matrisli fren balataları tercih edilmektedir. Seramik matrisli fren balataları yüksek üretim maliyetleri nedeniyle daha çok uçak, yüksek hızlı tren gibi yüksek düzey frenleme enerjisine maruz kalan taşıtlarda kullanılmaktadır. Metal matrisli fren balataları ise seramik matrisli fren balatalarına kıyasla daha düşük üretim maliyeti nedeniyle daha geniş bir kullanım alanına sahiptir [1]. Metal matrisli kompozit fren balataları yüksek sürtünme kararlılığı, yüksek aşınma direnci, yüksek ısı transferi, yüksek mukavemeti ve yüksek sertlik gibi özelliklerinden dolayı özellikle ağır vasıta ve yüksek performanslı taşıtların fren sistemlerinde tercih edilmektedir [2].

Metal matrisli kompozit fren balataları, metal bir matris, katı yağlayıcılar, takviyeler ve aşındırıcılar olmak üzere çeşitli bileşenlerin karışımından oluşan bir kompozit malzemedir [3]. Metal matrisli kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak yüksek ısı iletkenliği, üstün korozyon direnci, yüksek erime noktası, yüksek yorulma mukavemeti, iyi bir aşınma direnci ve basit üretim süreçleri gibi özellikleri nedeniyle çoğunlukla bakır ve alaşımları kullanılmaktadır [4], [5]. Sürtünme kararlılığını arttırmak, aşınma oranını düzenlemek ve gürültü oluşumunu azaltmak için fren balata malzemesi üretiminde matris malzemeye katı yağlayıcı olarak grafit, molibden disülfür gibi malzemeler ilave edilmektedir [6]. Metal matrisli fren balata malzemelerinde kritik bir bileşen olan abrasifler ise sürtünme katsayısı artışı sağlamak ve fren diski üzerinde oluşan sürtünme filmlerini temizlemek için kullanılmaktadır [7]. Literatürde metal matrisli fren balata malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek için alümina (Al_2O_3) [8], demir oksit (Fe_2O_3) [9], silisyum karbür (SiC) [10], silika (SiO_2) [11], titanyum karbür (TiC) [12], zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$) [13], titanyum nitrür (TiN) [14] ve titanyum diborür (TiB_2) [15] gibi seramik malzemeler abrasif bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Ancak, kullanılan bu geleneksel seramik takviye elemanlarının yüksek maliyetleri

metal matrisli kompozit malzeme üretiminde yaygın kullanımının önünde bir engel teşkil etmektedir [16]. Ayrıca, dünyada hızla artan rekabet ortamı üretici firmaları kaliteden taviz vermeden daha uygun maliyetli ürünler üretme konusunda zorlamaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, tarımsal ve endüstriyel süreçlerin sonucunda bir yan ürün olarak oluşan atık malzemeler bir çözüm olarak düşünülmektedir. Endüstriyel ve tarımsal atık malzemelerin uygun fiyatı, düşük yoğunluğu, üretiminde yoğun enerji kullanımı gerektiren geleneksel sentetik takviye elemanlarına kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olmaları son yıllarda bu atıkların metal matrisli kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanımını hızla artırmaktadır [17]. Ayrıca metal matrisli kompozit malzeme üretiminde endüstriyel ve tarımsal atık malzemelerin takviye elemanı olarak kullanımı, üretim maliyetlerini etkili bir şekilde düşürmenin yanı sıra üretimde doğal kaynaklara olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir bir çevreye önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Metal matrisli fren balata malzemesi üretiminde takviye elemanı olarak endüstriyel ve tarımsal atık ürünlerin kullanımı rekabetin yoğun bir şekilde yaşandığı fren balata sektöründe oldukça yenilikçi bir çözüm olarak görülmektedir. Fakat endüstriyel ve tarımsal atık malzemeler doğası gereği birbirinden farklı kimyasal içeriklere ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu nedenle fren performansı açısından balata üretiminde en uygun atık ürününün ve takviye oranının belirlenmesi oldukça hayati bir konudur.

Demir çelik üretim sürecinde ortaya çıkan BFD, katı bir endüstriyel atık üründür. İstatistiklere göre, yüksek fırın çıkış gazından ayrılan ortalama baca tozu miktarı, üretilen sıcak metal tonu başına yaklaşık 28 kg olarak tahmin edilmektedir [18]. Türkiye’de demir çelik üretim sürecinde atık bir ürün olarak ortaya çıkan yıllık BFD miktarı 375.000-425.000 tondur [19]. BFD temel olarak demir oksitler (%20-40), yanmamış karbon (~%20) ve küçük oranlarda kalsiyum, alüminyum ve silisyum oksit gibi değerli bileşenler içerir. Ancak, bugüne kadar atık ürün olarak elde edilen BFD’nin çeşitli alanlarda kullanım oranının %20’den az olduğu bildirilmiştir [18]. BFD’nin büyük bir kısmı doğrudan demir çelik tesislerindeki depolama sahalarına katı atık olarak dökülmekte ve buralarda biriktirilmektedir. Bu durum ise çok fazla arazi kaybına, ciddi çevre kirliliğine ve kaynak israfına neden olmaktadır. Bu atık ürünler uygun bir şekilde bertaraf edilmezse su, atmosfer ve toprak kirliliğine neden olabilir, ekolojik döngüleri bozabilir ve çevresel tehlikeler oluşturabilir [20]. BFD karbon ve demir açısından zengin olmasına rağmen, küçük tane boyutu, çinko ve kurşun içeriği onun yüksek

fırın da doğrudan geri dönüştürülmesini imkânsız hale getirir. Yüksek fırın şarjında artan çinko miktarı yüksek fırında operasyonel sorunlara neden olabilir [21]. Bundan dolayı bu tozlara özel bir işlem yapılmaksızın geri dönüşümleri ve depolama sahalarından imhaları oldukça güç olmaktadır. Ayrıca BFD çimento, inşaat ve sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılan diğer bir demir çelik atığı olan cüruf ile karşılaştırıldığında inşaat sektöründe de istenilen düzeyde kullanılamamaktadır [22]. BFD'nin geri dönüştürülmesin de karşılan problemler ve inşaat sektöründe istenilen düzeyde kullanılamaması BFD için alternatif bir değerlendirme alanın bulunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu atık malzemelerin takviye elemanı olarak kompozit malzeme üretiminde kullanımı yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilebilir. BFD'nin sahip olduğu grafit ve demir oksit gibi bileşenler dikkate alındığında günümüzde fren balata malzemesi üretiminde kullanılmakta olan bileşenlerin bir karışımı olduğu görülmektedir. BFD'nin metal matrisli kompozit fren balata üretiminde takviye elemanı olarak kullanılması durumunda içeriğinde bulunan demir oksitin abrasif bir bileşen, yanmamış karbonun ise bir katı yağlayıcı olarak görev yapabileceği düşünülmektedir. Hem abrasif bir bileşen hem de katı yağlayıcı içeren BFD, sahip olduğu bu özellikleri nedeniyle fren balata üretiminde maliyet artışına neden olmaksızın balata performansını arttıracak bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, BFD'nin metal matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde bir takviye elemanı olarak değerlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik yönünden de önemli bir katkı sağlayacaktır.

Literatürde kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak BFD'nin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Bülbül [23] elastomer esaslı kauçuk malzemelere ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) BFD, odun külü, rejenere kauçuk ve pirinç kabuğu gibi farklı dolgu malzemeleri ilave ederek kompozit malzemeler üretmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin aşınma, sertlik ve bazı mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmalar sonucunda, %10 BFD takviyeli elastomer kompozit malzemenin üretilen diğer kompozit malzemelere göre daha düşük aşınma miktarına ve daha yüksek bir kopma mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kayılı ve arkadaşları [19] %100 LDPE (düşük yoğunluklu polietilen) ile %50 BFD takviyeli LDPE esaslı kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Elde etmiş oldukları bulgularda BFD ile güçlendirilmiş numunenin sürtünme katsayısı, aşınma kaybı ve çekme dayanımı değerleri %100 LDPE

malzemesine göre azalmıştır. Kayılı ve arkadaşları [22] yapmış olduğu bir başka çalışmada ağırlıkça farklı oranlarda (% 0, % 10, % 15, % 22.5, % 33.75, % 50.625) BFD dolgulu LDPE esaslı 6 farklı kompozit malzeme üretmişlerdir. Gerçekleştirilen testler neticesinde, üretilen kompozit malzemelerde %10 BFD takviyeli numunenin en yüksek sürtünme katsayı değerine sahip olduğu, fakat bu takviye oranından sonra artan takviye oranına bağlı olarak sürtünme katsayı değerlerinin azalmaya başladığını belirlemişlerdir. Üretilen numunelerin aşınma kaybı incelendiğinde artan BFD takviye oranına bağlı olarak aşınma direncinin geliştiğini ifade etmişlerdir.

Literatürde, endüstriyel bir atık malzeme olan BFD'nin kompozit fren balata malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili yapılmış az sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Ayrıca, yapılmış çalışmaların çoğunlukla polimer matrisli fren balata malzemelerine odaklandığı, metal matrisli fren balata malzemelerinde takviye elemanı olarak BFD'nin kullanımını ve üretilen fren balata malzemelerin mekanik, fiziksel ve tribolojik özellikleri üzerine BFD'nin etkilerini araştıran yeterli sayıda çalışma olmadığı dikkati çekmektedir. Bu çalışma literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, günümüzde artan çevresel kaygılar, artan hammadde ve üretim maliyetleri, göz önünde bulundurulduğunda BFD'nin kompozit malzeme üretiminde değerlendirilmesi hususunda yapılacak çalışmalar oldukça önemli bir hale gelmektedir. Bu çalışmada takviye elemanı olarak bronz matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde BFD'nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı oranlarda (%2, %4, %6 ve %8) BFD takviyeli bronz matrisli kompozit fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin sertlik, yoğunluk, TRS, sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme katsayı kararlılık değerleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, bronz matrisli fren balata malzemesine ilave edilen BFD'nin sürtünme katsayısı artışına ve aşınma direncinin gelişmesine pozitif katkı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, BFD takviyeli fren balata numunelerin ortalama sürtünme katsayı değerlerinin otomobil fren balatalarından arzu edilen (0.3-0.6)[24] değerleri arasında olması BFD'nin otomotiv ve farklı sektörlerin ihtiyaç duyduğu yüksek katma değere sahip kompozit malzeme geliştirilmesinde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilebileceğinin göstergesidir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1 Fren Balata Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Brake Pad Samples)

Bu çalışmada kompozit fren balata malzemelerin üretilmesinde matris malzemesi olarak bronz ($\text{CuSn}_6\text{Zn}_6\text{Pb}_3$), matrisi güçlendirmek için demir tozu, katı yağlayıcı olarak grafit tozu, birincil takviye elemanı olarak uçucu kül ve ikincil takviye elemanı olarak da BFD tozları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan uçucu kül İskenderun Sugözü Termik Santralinden, BFD tozu ise Karabük Demir Çelik Fabrikasından atık olarak temin edilmiştir. Şekil 1'de çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri, Tablo 1'de de parçacık boyut analiz sonuçları verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, bronzun karmaşık bir şekle (Şekil 1(a)), demir tozunun gözenekli bir yapıya (Şekil 1(b)), grafitin pul formuna (Şekil 1(c)), uçucu kül parçacıklarının dairesel bir şekle (Şekil 1(d)), yüksek fırın baca tozunun ise keskin köşe ve kenarlara sahip olduğu (Şekil 1(e)) belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek fırın baca tozunun temel olarak demir oksit ve karbon olmak üzere iki farklı bileşenden oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 1(e)'de verilen SEM resminde bu bileşenlerden karbonun daha koyu bir renge, demir oksitin ise daha açık bir renge sahip olduğu görülmektedir. BFD'nin kimyasal içeriği ile ilgili yapılan çalışmalarda, BFD

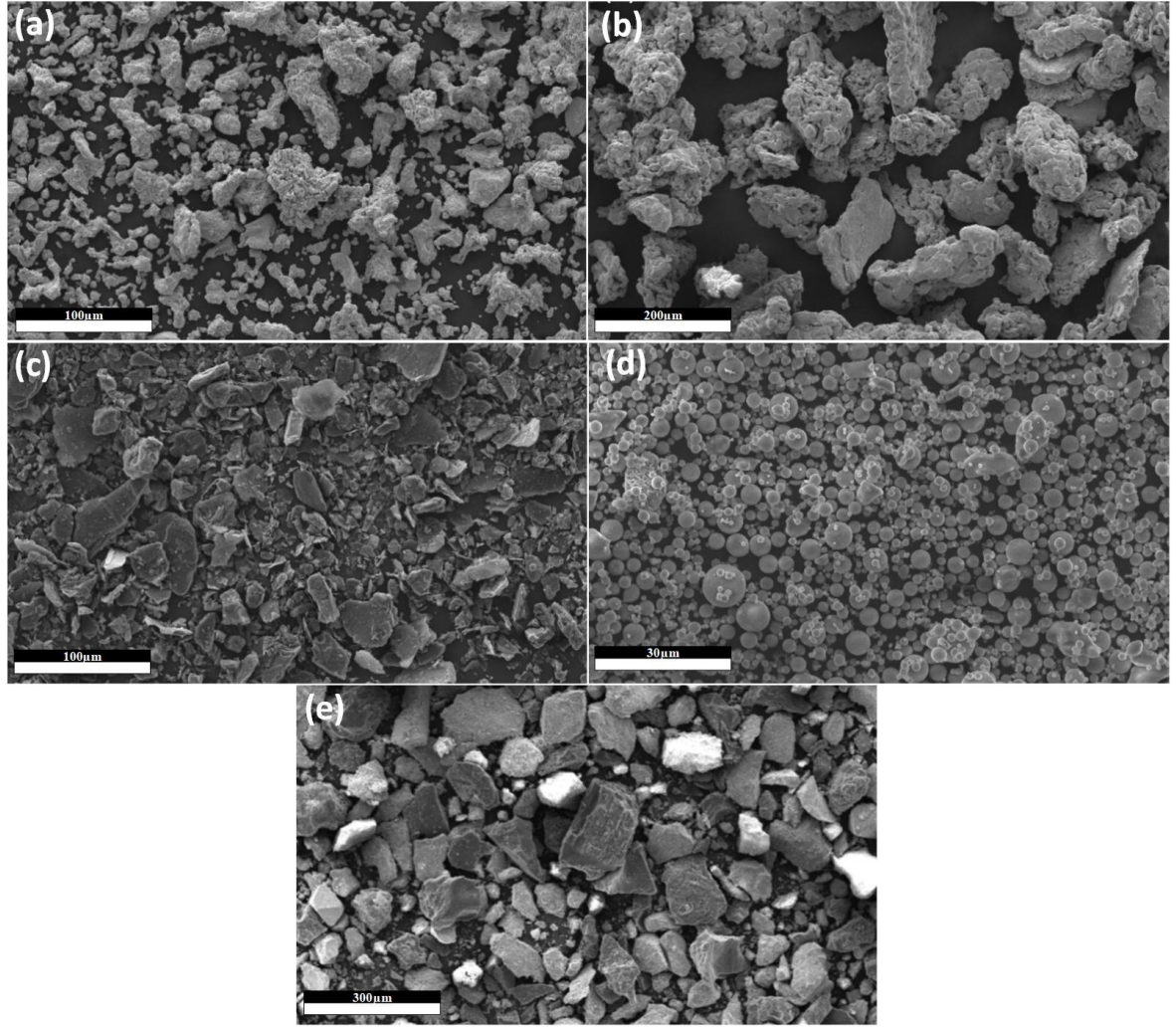
bileşiminde bulunan karbonun hem amorf hem de grafit formunda bulunabileceği bildirilmiştir [18]. Bir başka çalışmada, Zhong ve arkadaşları [25] XRD, XPS FTIR ve Raman spektroskopisi gibi teknikler kullanarak BFD'de bulunan karbonun karakterizasyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda BFD'de bulunan karbonun yaklaşık % 49,56 oranında grafit yapısında bir karbondan oluştuğunu ifade etmişlerdir. Şekil 2'de bu çalışmada kullanılan BFD parçacığının SEM resmi ve EDS analiz sonuçları sunulmuştur. SEM resmi incelendiğinde BFD bileşiminde bulunan karbon ve demir oksit parçacıklarının varlığı net bir şekilde görülmektedir. EDS analiz sonucu, 1 ile işaretlenen parçacığının karbon (grafit) 2 ile işaretlenen parçacığının ise demir oksit bileşiği olduğunu doğrulamaktadır. Yüksek fırın baca tozu X-ışını floresans spektrometrisi (Axios Advanced Panalytical, İngiltere) kullanılarak belirlenen kimyasal bileşimi Tablo 2'de sunulmuştur. Bu analiz sonuçlarına göre BFD'nin temel olarak demir oksit (% 61.380), silisyum dioksit (% 8.025) ve kalsiyum oksitten (% 5.151) oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 2'de verilen EDS analiz sonuçları ile örtüşmektedir. Balata üretiminde kullanılan diğer bir takviye elemanı olan uçucu külün de temel olarak silisyum dioksit (% 59.787), alüminyum oksit (% 21.034) ve demir oksit (% 7.824) bileşiklerinden oluştuğu Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 1. Fren balata numune üretiminde kullanılan tozların boyut dağılımları (Size distributions of powders used in brake pad sample production)

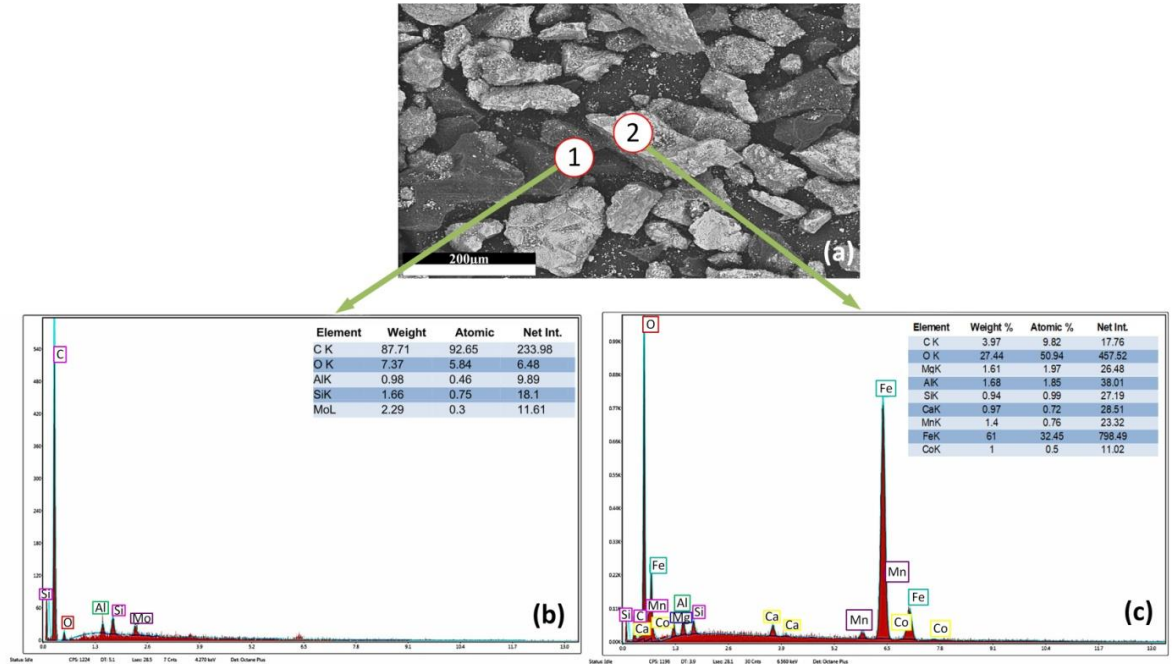
Parçacıklar	D10 (μm)	D50 (μm)	D90(μm)
Bronz	15.1	63.9	255
Demir	30.9	86.5	155
Grafit	9.25	35.3	105
Uçucu kül	2.69	17.4	71.6
BFD	36.3	114	213

Tablo 2. BFD ve uçucu külün kimyasal analiz sonucu (Chemical analysis result of BFD and fly ash)

Bileşenler	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Na_2O	MgO	SO_3	K_2O	LOI
Uçucu kül	7.824	2.229	59.787	21.034	0.839	1.080	2.189	0.369	2.364	1.680
BFD	61.380	5.151	8.025	3.311	0.095	0.000	1.282	0.084	0.310	18.08



Şekil 1. Fren balata üretiminde kullanılan tozların SEM resimleri (a) Bronz, (b) Demir (c) Grafit, (d) Uçucu Kül, (e) BFD tozu (SEM images of powders used in brake pad production (a) Bronze, (b) Iron (c) Graphite, (d) Fly Ash, (e) BFD powder)



Şekil 2. Yüksek fırın baca tozunun a) SEM resmi b) 1 numaralı noktanın EDS analiz sonucu c) 2 numaralı noktanın EDS analiz sonucu (a) SEM picture of blast furnace flue dust b) EDS analysis result of point number 1 c) EDS analysis result of point number 2)

2.2. Fren Balata Numunelerinin Üretilmesi

(Production of Brake Pad Samples)

Fren balata numunelerinin üretim, test ve analiz aşamaları Şekil 3'de gösterilmiştir. Bronz matrisli fren balata malzemesi olarak ağırlıkça %68 bronz ($\text{CuSn}_6\text{Zn}_6\text{Pb}_3$), %15 demir, %12 uçucu kül ve %5 grafitten oluşan formülasyon referans malzeme olarak belirlenmiştir. Bu malzeme BFD-0 olarak kodlanmıştır. BFD-0 malzemesinin sertlik, yoğunluk, TRS, ortalama sürtünme katsayı değeri, zamana bağlı sürtünme katsayı ve disk yüzey sıcaklık değişimleri, sürtünme kararlılığı ve özgül aşınma oranı gibi özellikleri yazarlar tarafından yapılan daha önceki bir çalışmadan alınmıştır [26]. Daha sonra bu temel formülasyona takviye elemanı olarak ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranında BFD ilave edilerek 4 farklı yeni fren balata formülasyonu geliştirilmiştir. Çalışma içerisinde bu formülasyonlar ilave edilen BFD takviye oranına göre sırasıyla BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 olarak kodlanmıştır. Fren balata numunesi üretiminde takviye elemanı olarak kullanılmak üzere temin edilen BFD tozu ilk olarak seramik havanda öğütülmüştür. Öğütme işleminin ardından BFD Şekil 3'de görülen titreşimli elek sallama (JeoTest, JG-036/1) cihazı yardımı ile elenerek, balata üretiminde kullanılmak üzere 150 µm altı boyutuna sahip tozlar seçilmiştir. Bu işlemin ardından tozlar her bir formülasyonu oluşturan oranlara göre hassas bir terazi kullanılarak tartılmış ve ardından homojen bir karışım elde etmek amacıyla mekanik bir karıştırıcı yardımı ile 40 d/dk dönme hızında, 90 dk. boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem sonrasında hazırlanan her bir formülasyona ait toz karışımları 800 C° sıcaklık ve 40 MPa basınç altında grafit kalıplar içinde 5 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sonunda

25×25×8 mm³ boyutlarında aşınma test numuneleri ve 40×10×10 mm³ boyutlarında üç nokta eğme test numuneleri üretilmiştir (Şekil 4).

2.2 Fren Balata Numunelerinin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Physical Properties of Brake Pad Samples)

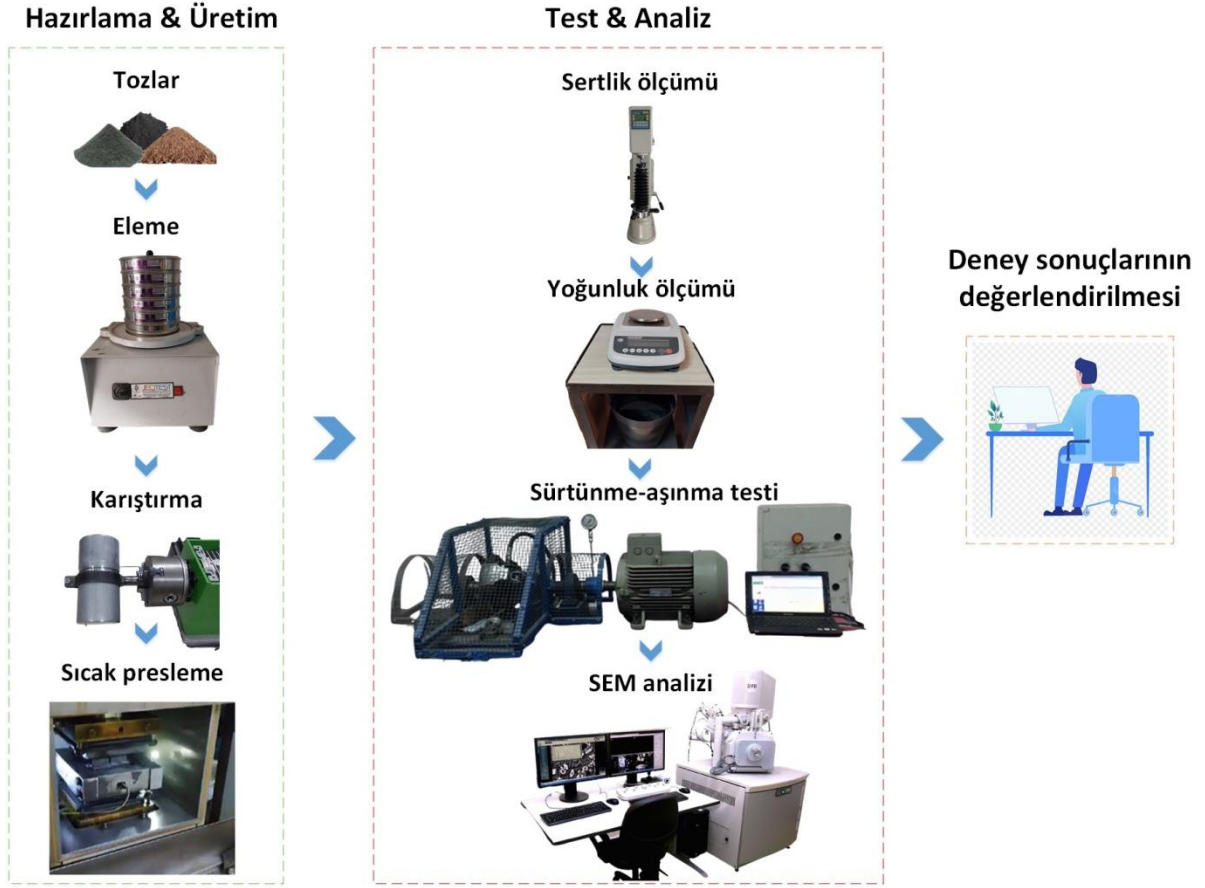
Üretilen fren balata numunelerin sertlik değerleri Bulut Makine sertlik ölçme cihazı (Digirock-RB model) kullanılarak Rockwell HRM cinsinden belirlenmiştir. Sertlik değerlerinin belirlenmesinde 100 kgf uygulama yükü ve ¼ inç çapında bilye kullanılmıştır. Her bir numuneden en az 5 ölçüm değeri alınmış olup, bu değerlerinin ortalaması numunenin sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, fren balata numunelerinin yoğunluk değerleri Denklem (1) kullanılarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir [27]. Yoğunluk ölçüm sonuçları 3 defa tekrarlanmış ve bu tekrarların ortalaması hesaplanmıştır.

$$\rho_d = \frac{m_k}{m_k - m_y} \quad (1)$$

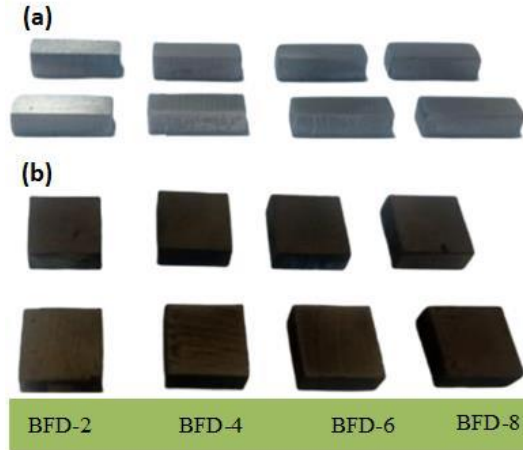
Burada, ρ_d numunenin deneysel yoğunluğunu, m_k kuru ağırlığını ve m_y ise yaş ağırlığını ifade etmektedir.

2.3 Fren Balata Numunelerinin TRS Özelliğinin Belirlenmesi (Determination of TRS Properties of Brake Pad Samples)

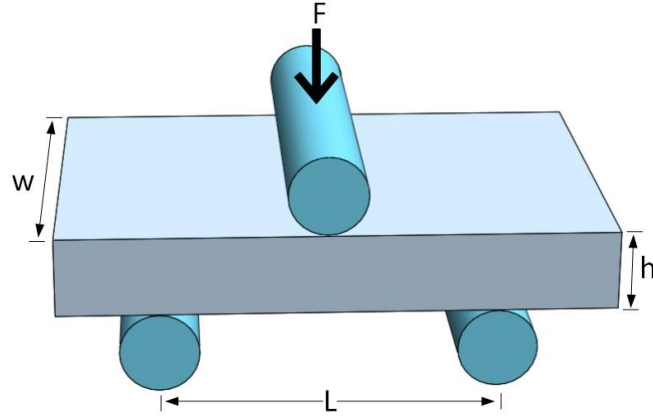
Üretilen fren balata numunelerinin üç nokta eğme testi, 50 kN yük kapasiteli JK-001 model Jeotest marka basma test cihazı ile dakikada 1 mm çene hızında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyleri Şekil 5'te şematik resmi verilen test düzeneği kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3. Deneysel çalışma akış diyagramı (Experimental study flow diagram)



Şekil 4. Üretilen fren balata test numuneleri (a) Üç nokta eğme test numuneleri (b) Aşınma test numuneleri (Produced brake pad test samples (a) Three-point bending test specimens, (b) friction wear test specimens)



Şekil 5. Üç nokta eğme test düzeneği (Three point bending test rig)

Fren balata numunelerinin TRS mukavemet değerleri Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır [28]. Burada σ_T TRS mukavemetini (MPa), F uygulanan yükü (N), l iki destek arası mesafeyi (mm), b numunenin genişliğini (mm) ve h numunenin yüksekliğini (mm) belirtmektedir.

$$\sigma_T = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (2)$$

2.4 Fren Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Tribological Properties of Brake Pad Samples)

Fren balata numunelerinin sürtünme-aşınma deneyleri özel olarak tasarlanmış bilgisayar kontrollü tam ölçekli fren test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test cihazı ile ilgili detaylı bilgiler Sugözü [29], [30] tarafından yapılan farklı çalışmalarda rapor edilmiştir. Sürtünme-aşınma testlerinde karşı malzeme olarak 250 Hv sertliğe sahip standart hava soğutmalı gri dökme demirden yapılmış fren diski kullanılmıştır. Üretilen fren balata numunelerin fren testi 1.05 MPa frenleme yükü, 616 dev/dak disk dönme hızı ve 660 saniye boyunca kuru kayma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Fren testi esnasında, disk yüzey sıcaklık değişimi temassız kızılötesi termometre ile sürtünme katsayısı değişimi ise fren test cihazında bulunan ve 981 N ölçüm kapasitesine sahip bir yük sensörü aracılığıyla ölçülmüştür. Numunelerin aşınma miktarını belirlemek amacıyla fren balata numunelerinin ağırlıkları fren testi öncesi ve sonrası hassas bir terazi yardımıyla ölçülmüş ve aradaki ağırlık farkı aşınma miktarı olarak belirlenmiştir. Numunelerin özgül aşınma oranı TSE 555 (1992) standartlarına göre (V_s) Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır [29].

$$V_s = \frac{1}{2\pi R} \frac{m_1 - m_2}{\rho f_s} \quad (3)$$

Burada m_1 (gram) numunenin aşınma testi öncesi ağırlığını, m_2 (gram) numunenin aşınma testi sonrası ağırlığını, R (mm) fren balatasının merkezi ile diskin merkezi arasındaki mesafesini, ρ (g/cm³) yoğunluğu, f_s (N) ortalama sürtünme kuvvetini ve n ise diskin toplam tur sayısını ifade etmektedir.

Fren balata numunelerinin sürtünme katsayı kararlılığı da Denklem (4) kullanılarak belirlenmiştir [31]. Her bir numune için sürtünme katsayı kararlılık değeri sürtünme-aşınma test süresince elde edilen sürtünme katsayı verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Sürtünme katsayısı kararlılık değerinin 100'e olabildiğince yakın olması fren balatalarından arzu edilen bir özelliktir [32], [33].

$$FS = \left(\frac{\mu_{ave}}{\mu_{max}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Burada, FS sürtünme katsayı kararlılığı (%), μ_{ave} ortalama sürtünme katsayısı ve μ_{max} maximum sürtünme katsayısıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Yüksek Fırın Baca Tozu Takviyeli Fren Balata Numunelerinin Mikroyapı Analizi (Microstructure Analysis of Blast Furnace Flue Dust Reinforced Brake Pad Samples)

Şekil 6, farklı oranlarda BFD içeren numunelerin mikroyapı resimlerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Fren balata numunesinin bileşenlerinden olan demir, grafit ve uçucu kül parçacıkları matris içerisinde uniform olarak dağılmıştır (Şekil 6(a)-(d)). Buna karşın balata numunesinin diğer bir bileşeni olan BFD, % 4 takviye oranının üzerinde ve özellikle % 8 takviye oranında matris içerisinde belirli bölgelerde kümelenmiştir (Şekil 6(c),(d)). EDS analiz sonucu mikroyapıda 1 ile gösterilen noktanın bronz, 2 ile gösterilen noktanın BFD'nin demir oksit bileşiği, 3

numaralı noktanın uçucu kül, 4 numaralı noktanın grafit, 5 numaralı noktanın BFD'nin diğer bileşeni olan grafit ve 6 numaralı noktanın demir olduğunu kanıtlamaktadır (Şekil 6(a)-(d)). Fren balata üretiminde matrise katı yağlayıcı olarak ilave edilen pul şeklinde grafit parçacıkları genel olarak levha şeklinde tane sınırlarına yerleşmişlerdir. EDS analiz sonucu pul şeklindeki grafit parçacıkların çoğunun karbondan oluştuğunu göstermiştir. Buna karşın BFD kaynaklı grafit parçacıkların keskin köşeli bir forma sahip olduğu (Şekil 6(c)) ve temel olarak yüksek oranda karbon ile düşük oranda oksijen içerdiği belirlenmiştir. BFD'nin diğer bileşeni bir demir oksit bileşimi olup bu hematit olarak ifade edilir [22]. BFD'nin demir oksit bileşeninin EDS analizinde tespit edilen demir ve oksijen içeriği bu durumu kanıtlamaktadır. Buna karşın balata üretiminde matrise güçlendirici bir bileşen olarak ilave edilen demir parçacıklarında herhangi bir oksijen içeriğine rastlanılmamıştır. Yüksek sıcaklıkta oluşan BFD, maruz kaldığı sıcaklık nedeniyle okside olmaktadır. Bu durum BFD'nin hem demir oksit hem de grafit bileşeninde belirlenen oksijen içeriği ile doğrulanmaktadır. Mikro yapı incelemesi kümelenmemiş BFD parçacıkların (hem grafit hem de demir oksit) matris ile iyi bir ara yüzey bağı oluşturduğunu göstermiştir (Şekil 6(a)-(c)). Bu durum üretilen numunelerin gelişmiş bir mekanik ve aşınma özelliklerine sahip olması için oldukça önemlidir. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve aşınma özelliklerini araştıran çalışmalar takviye elemanın matris içerisinde uniform olarak dağılması ve matris ile güçlü bir arayüzey bağı oluşturmalarının mekanik ve aşınma özellikleri geliştirebileceğini göstermektedir [34].

3.2. Fren Balata Numunelerinin Yoğunluk Değerleri (Density Values of Brake Pad Samples)

Tablo 3'te üretilen fren balata malzemelerin deneysel, teorik ve bağıl yoğunluk değerlerini göstermektedir. Yüksek fırın baca tozu takviyeli fren balata malzemelerin deneysel yoğunlukları Arşimet yöntemi kullanılarak belirlenmiş, teorik ve bağıl yoğunluk değerleri ise hesaplanmıştır. BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 numunelerin yoğunluk değerleri sırasıyla 5.91, 5.68, 5.61, 5.59 ve 5.49 g/cm³ olarak belirlenmiş olup BFD oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi Şekil 7'de görülmektedir. İlave edilen BFD oranına bağlı olarak fren balata numunelerin yoğunluk değeri azalmıştır. Bu durumun BFD içerisinde bulunan grafitten kaynaklandığı düşünülmektedir. BFD temel olarak demir oksit ve grafit karışımıdır. Grafitin bronza göre sahip olduğu daha düşük yoğunluk değeri artan BFD oranına bağlı olarak

yoğunluk değerinin azalmasına neden olmuştur. Matrise göre daha düşük yoğunluk değerine sahip bir takviye elemanın matrise ilavesi ile gerçekleşen yoğunluk değeri düşüşü birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [35]. BFD-0 numunesinin bağıl yoğunluk değeri % 78.27 iken BFD-8 numunesinin bağıl yoğunluk değeri % 75.82 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu iki değer birbirine oldukça yakındır. Bu durum, numunelerinin üretiminde belirlenen sinterleme parametrelerinin uygun olduğunun bir göstergesidir. Benzer sonuçlar Okay ve Islak [36] tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir.

3.3. Fren Balata Numunelerinin Sertlik Değerleri (Hardness Values of Brake Pad Samples)

Üretilen fren balata malzemelerin sertlik değerleri Şekil 8'de görülmektedir. Üretilen BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 numunelerin sertlik değerlerinin sırası ile 102.5, 102.6, 103.3, 104.8 ve 108.4 HRM olduğu belirlenmiştir. Artan BFD oranına bağlı olarak numunelerin sertlik değeri artmıştır. Bu durum BFD'nin matrise göre daha yüksek sertliğe sahip demir oksit bileşeninin dislokasyon hareketine bir engel oluşturmaya atfedilmektedir [35], [37]. Bilindiği gibi zorlaştırılan veya engellenen dislokasyon hareketi malzemenin sertlik değerini artırır. Çalışma kapsamında üretilen numunelerde artan BFD takviye oranına bağlı olarak matris içerisindeki demir oksit parçacıkları da artar. Matris içerisinde artan bu demir oksit parçacıkları da Orawan mekanizması etkisi ile dislokasyon hareketlerini engelleyerek sertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Yumuşak bir matrise, sert bir takviye elemanı ilavesinin üretilen numunenin sertlik değerini arttırdığı literatürdeki diğer çalışmalarda da rapor edilmiştir [38], [39].

3.4. Fren Balata Numunelerinin TRS Sonuçları (TRS Results of Brake Pad Samples)

Şekil 9'da matrise ilave edilen BFD oranına bağlı olarak üretilen fren balata numunelerin TRS değerlerindeki değişim görülmektedir. BFD-0 numunesinin TRS değeri 102.138 MPa iken BFD-2 ve BFD-4 numunesinin TRS değerleri sırasıyla 139.97 ve 143.09 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak %4 BFD ilavesinden sonra, BFD-6 ve BFD-8 numunelerin TRS değerleri sırasıyla 129.75 ve 122.64 MPa değerine düşmüştür. % 4 BFD oranından sonra TRS değerlerinin azalma eğilimi göstermesi BFD'nin matris içerisinde bölgesel kümelenmesinden kaynaklanan kusurlara atfedilmiştir. BFD takviyeli tüm numunelerin TRS değerleri BFD-0 numunesine göre daha yüksektir. BFD takviyeli numunelerin TRS değeri BFD-0

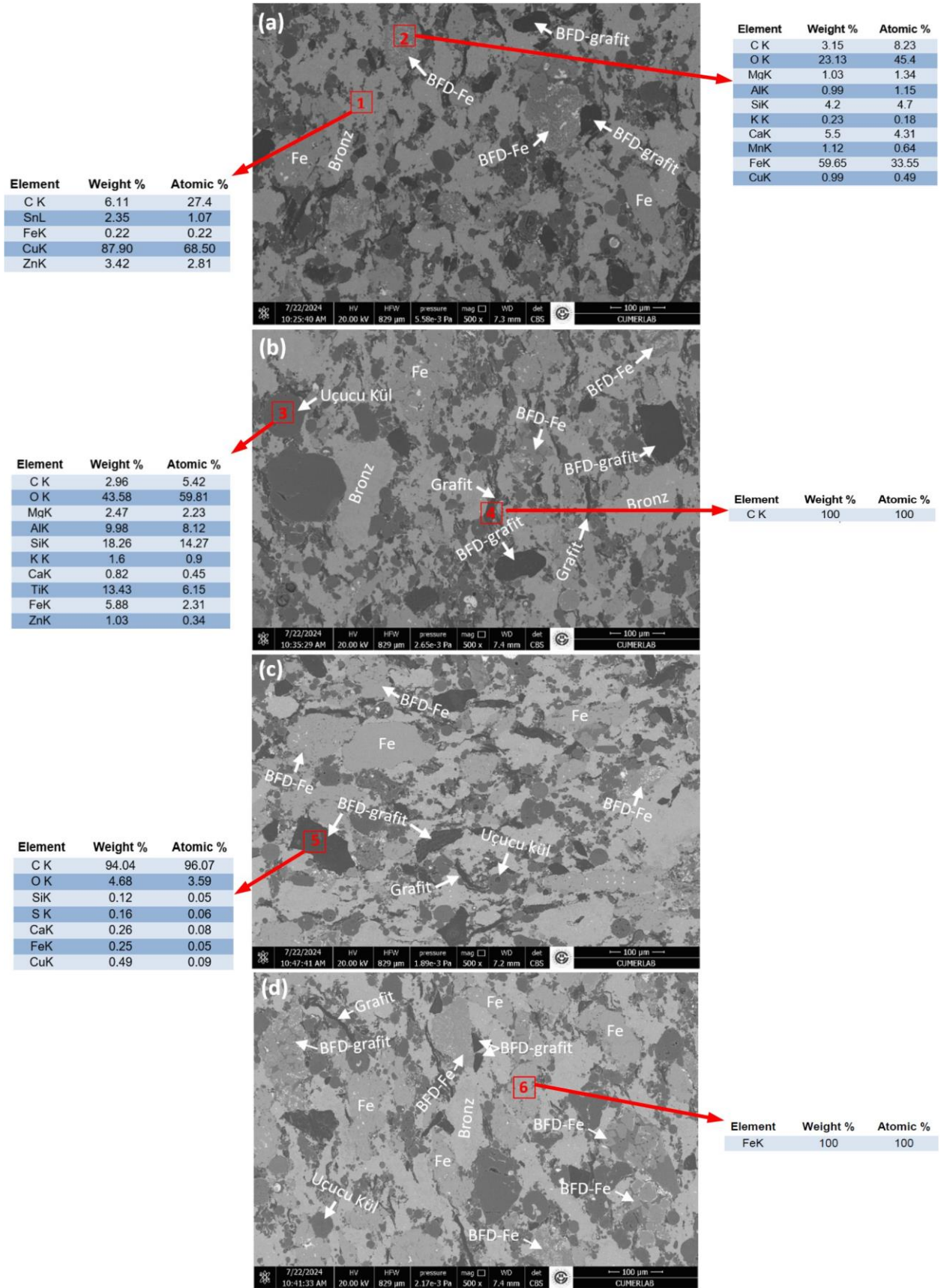
numunesin TRS değerine göre en az % 20 en çok da % 40 oranında artmıştır. Bu durum ilave edilen BFD'nin üretilen kompozit malzemelerin eğme dayanımını geliştirmede etkili olduğunu göstermiştir.

Şekil 10 üretilen fren balata malzemelerin kırık yüzey SEM resimlerini göstermektedir. Bilindiği gibi BFD temel olarak grafit ve demir oksit gibi iki farklı bileşenin karışımıdır. BFD-2 ve BFD-4 numunelerinde matrisine uygulanan yük, bronz ile BFD ara yüzeyinde oluşan güçlü bağ yapısı aracılığı ile BFD parçacıklarına aktarılır ve numunelerin yük taşıma özellikleri gelişir. BFD'nin hem grafit hem de demir oksit bileşeninin matris ile oluşturduğu boşluksuz yapı iyi bir arayüzey bağının kanıtı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 10(a)-(d)). Benzer tespitler birçok araştırmacı tarafından yürütülen çalışmalarda da rapor edilmiştir [39]. Buna bağlı olarak da BFD-2 ve BFD-4 numunelerin TRS değerleri BFD-0 numunesinin TRS değerine göre artış göstermiştir. BFD-2 ve BFD-4 numunelerindeki BFD bileşenleri Şekil 11'de verilen EDS analiz sonucu ile tanımlanmıştır. Bu sonuçlara göre 1 rakamı ile gösterilen noktadaki BFD bileşeninin grafit, 2 rakamı ile gösterilen

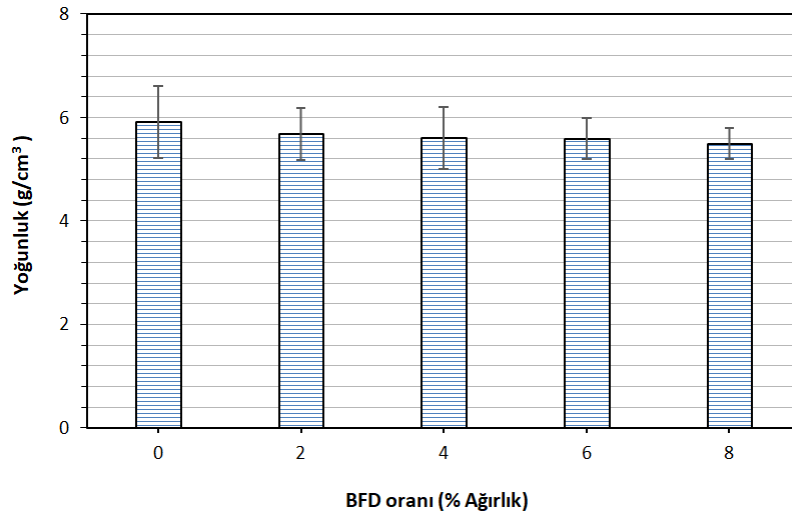
noktadaki BFD bileşeninin de demir oksit olduğu belirlenmiştir (Şekil 10(a),(b)). Parçacık-matris ara yüzünde meydana gelen ayrılma, homojen olmayan parçacık dağılımı, matris kusurları ve parçacık kırılması gibi birçok farklı mekanizmanın parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin çapraz kırılma davranışı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Matrise ilave edilen takviye parçacıkların matriste homojen dağılırarak kusursuz bir arayüzey bağı oluşturmaları, matrise uygulanan yükün takviye parçacıklara aktarılmasını sağlar. Bu durum, numunenin TRS değerlerinin gelişmesine olumlu katkı sağlar [40]. Fakat, ilave edilen BFD oranının % 6 ve % 8 olması ile BFD matris içerisinde kümelenme eğilimi göstermiştir (Şekil 10(e),(f)). BFD-6 ve BFD-8 numunelerinde artan takviye oranına bağlı olarak oluşan parçacık kümelenmesi de bu noktalarda bölgesel gerilme yoğunlaşmasına neden olur. Bunun sonucunda üç nokta eğme testinde yüksek gerilmeye maruz kalan bu parçacıklarda önce çatlak oluşumu başlar ve bunun ardından da kırılma gerçekleşir (Şekil 10(f)). Çatlayan ve ardından kırılan BFD'nin, BFD-6 ve BFD-8 numunelerinde yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkileyerek TRS değerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. Üretilen fren balata numunelerin teorik, deneysel ve bağıl yoğunluk değerleri (Theoretical, experimental and relative density values of the produced brake pad samples)

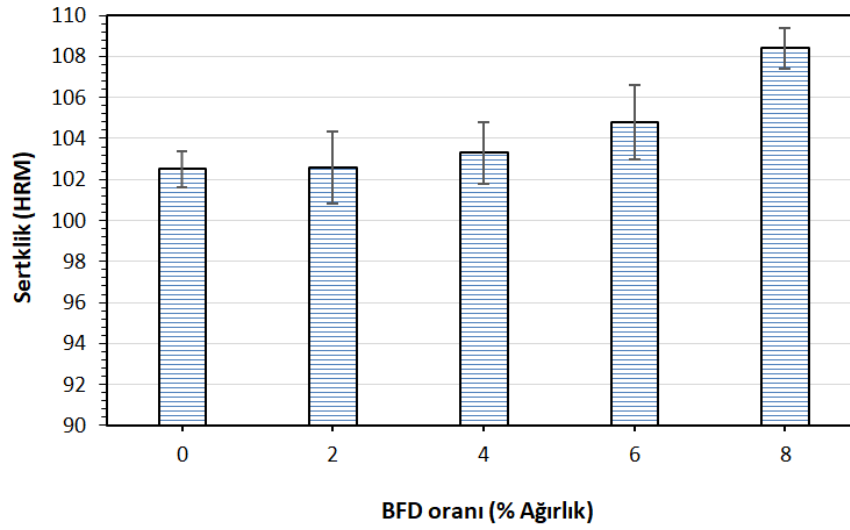
Yüksek fırın baca toz oranı (%)	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel yoğunluk (g/cm ³)	Bağıl yoğunluk (%)
BFD-0	7.55	5.91	78.27
BFD-2	7.46	5.68	76.13
BFD-4	7.39	5.61	76.04
BFD-6	7.31	5.59	75.92
BFD-8	7.24	5.49	75.82



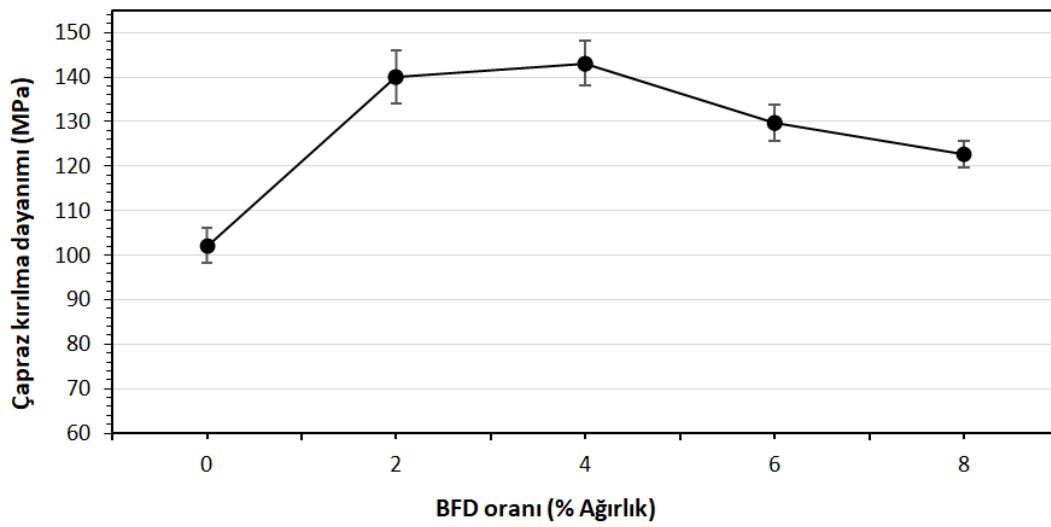
Şekil 6. Fren balata numunelerin BSE görüntüleri ve EDS analiz sonuçları: (a) BFD-2 (b) BFD-4, (c) BFD-6, (d) BFD-8 (BSE images and EDS analysis results of brake pad samples: (a) BFD-2 (b) BFD-4, (c) BFD-6, (d) BFD-8)



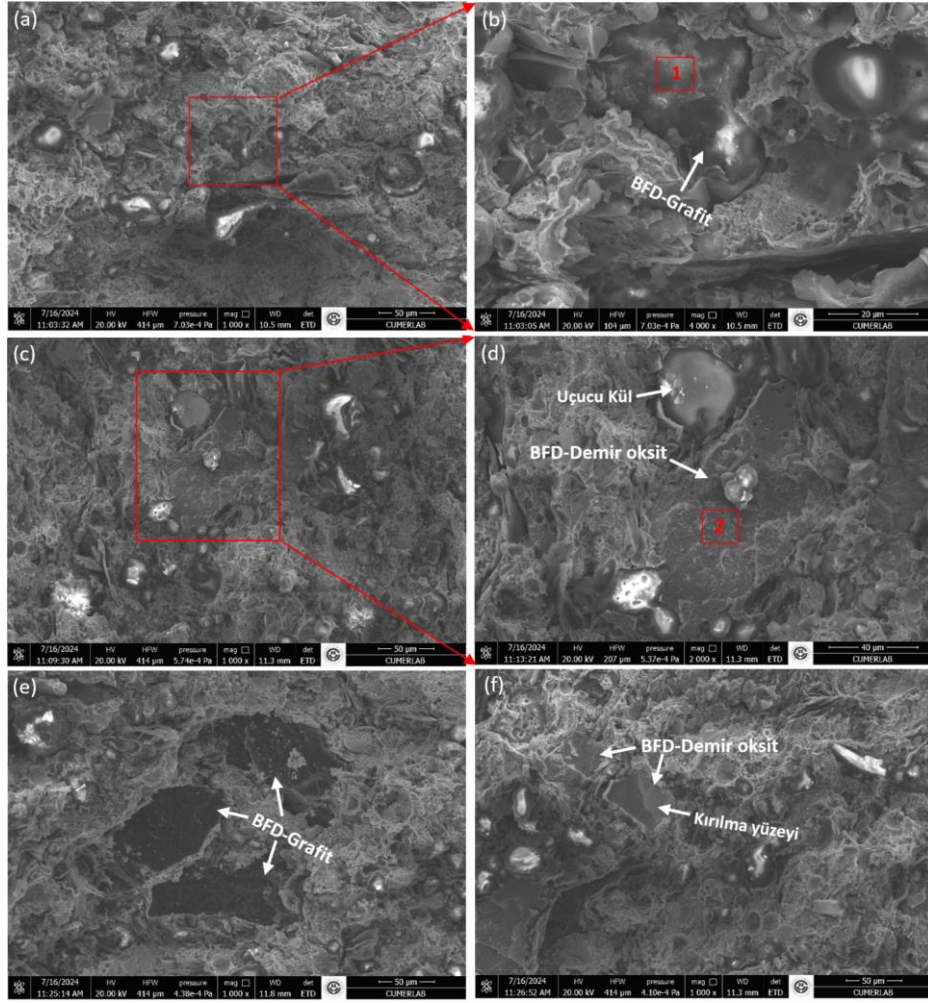
Şekil 7. Üretilen fren balata numunelerin yoğunluk değerleri (Density values of the produced brake pad samples)



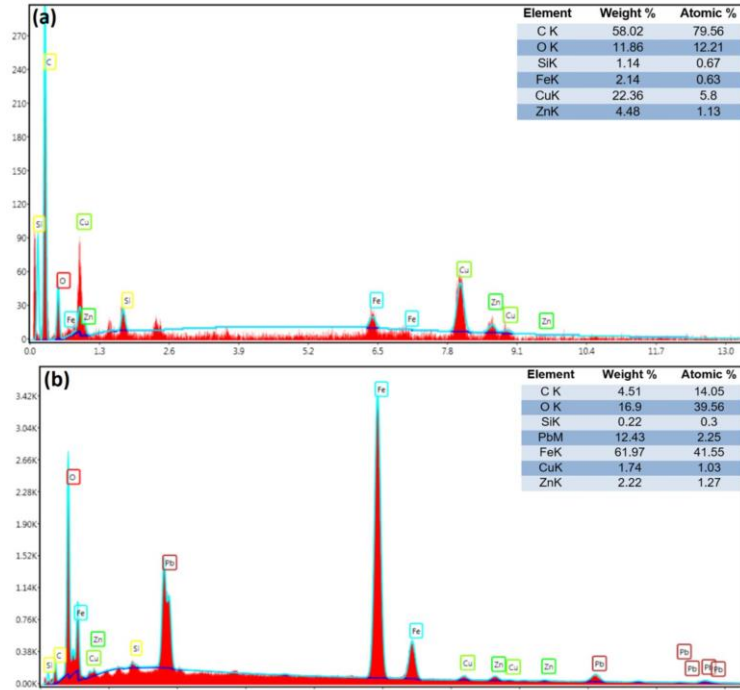
Şekil 8. Üretilen fren balata numunelerin sertlik değerleri (Hardness values of the produced brake pad samples)



Şekil 9. Üretilen fren balata numunelerin TRS değerleri (TRS values of the produced brake pad samples)



Şekil 10. Üretilen fren balata numunelerinin kırık yüzeylerine ait SEM resimleri (a)-(b) % 2, (c)-(d) %4, (e) % 6, (f) % 8 BFD (SEM images of the fracture surfaces of the brake pad samples produced (a)-(b) 2%, (c)-(d) 4%, (e) 6%, (f) 8% BFD)



Şekil 11. Şekil 10’da verilen SEM resmindeki (a) 1, (b) 2 noktasının EDS analiz sonucu (EDS analysis result of point (a) 1, (b) 2 in the SEM image given in Figure 10)

3.5. Fren Balatası Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Performansı (Friction-Wear Performance of Brake Pad Materials)

Şekil 12(a)-(e) farklı oranlarda BFD ile güçlendirilmiş fren balata numunelerin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sürtünme ara yüzey sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Artan BFD oranına bağlı olarak, BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6, ve BFD-8 numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.435, 0.461, 0.463, 0.475 ve 0.467 olmuştur (Şekil 12(a)-(e)). Elde edilen bu sonuçlar, tüm numuneler arasında en düşük ortalama sürtünme katsayı değerine 0.435 ile BFD-0 numunesinin, en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerine de 0.475 ile BFD-6 fren balata numunesinin sahip olduğunu göstermiştir. % 6 BFD oranına kadar fren balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değeri artmıştır. Bu durumun BFD'nin sahip olduğu Fe_2O_3 ve grafit gibi iki farklı bileşenin birlikte ancak farklı sürtünme mekanizmaları ile sürtünme katsayısı artışına yol açmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Fe_2O_3 oldukça sert bir bileşen olup sürtünme esnasında karşı yüzey üzerinde abrasif bir etki oluşturarak sürtünme katsayısı artışına katkı sağlar. Bunun yansıya BFD'nin diğer bileşeni olan granül grafit çoklu köşe ve kenarlara sahiptir. Grafitin sahip olduğu bu özellikler frenleme esnasında karşı yüzey üzerinde bir tutunma kuvveti oluşturarak %6 BFD oranına kadar sürtünme katsayısı artışına pozitif yönde bir katkı sağlamıştır. Zhang ve arkadaşları [41] yaptıkları bir çalışmada farklı oranlarda granül grafit içeren bakır matrisli fren balata malzemeleri üretmişler ve bunların sürtünme özelliklerini araştırmışlardır. Frenleme esnasında çoklu kenar ve köşelere sahip granül grafitin düzensiz şekli, karşı yüzeyle temas ettiğinde daha güçlü bir kavrama kuvveti oluşturarak ilave edilen granül grafit oranının artmasıyla sürtünme katsayısının artmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. BFD-8 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı değeri BFD-6 numunesinin ortalama sürtünme katsayısına göre bir miktar azalmıştır. BFD-8 numunesinin ortalama sürtünme katsayısının BFD-6 numunesine göre daha düşük olmasına yol açan temel etken 540. saniye ve 148 °C disk sıcaklığından sonra meydana gelen feyd olayıdır (Şekil 12(e)). Feyd olayı sürtünme katsayısının artan sıcaklığa bağlı olarak düşmesi olarak tanımlanan bir olgu olup sürtünme malzemelerinde gerçekleşmesi istenmeyen bir durumdur [42]. Feyd olayının meydana gelmesindeki temel faktörün, BFD-8 numunesinde BFD'nin belli bölgelerde oluşturduğu kümelenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Parçacık kümelenmesi sonucu kümelenen

parçacıklar matris tarafından yeterince çevrelenememekte ve bu durum da parçacık matris arayüzey bağını zayıflatmaktadır. BFD'nin grafit bileşenlerinin kümelenmesi zaten zayıf olan grafit matris arayüzey bağını daha da zayıflatır ve bu durum frenleme esnasında sürtünme arayüzünde artan sıcaklığın etkisiyle BFD'nin grafit bileşeninin matristen kopmasına neden olur. Kopan grafit parçacıkları da sürtünme ara yüzeyinde yağlayıcı bir film tabakası oluşturarak metal-metal teması azaltır. Bu durum, sürtünme testinin son aşamasında artan sürtünme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısını da azaltır (Şekil 12(a)). Diğer BFD-0, BFD-2, BFD-4 ve BFD-6 numunelerin sürtünme katsayılarında artan sürtünme ara yüzey sıcaklığına bağlı olarak belirgin bir düşüş gözlenmemiştir. Üretilen bir balata numunesinin otomobillerde fren balata malzemesi olarak kullanılabilmesi için 0.3-0.6 aralığında bir sürtünme katsayısı değerine sahip olması gerektiği rapor edilmiştir [24]. Bu açıdan değerlendirildiğinde üretilen tüm numunelerin rahatlıkla fren balata malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

BFD-0, BFD-2, BFD-4, BFD-6 ve BFD-8 numuneleri için sürtünme testinin sonunda ulaşılan maksimum disk yüzey sıcaklıkları sırası ile 184, 159, 163, 170 ve 164 °C olmuştur. Burada BFD takviyeli numunelerin BFD takviyesiz numuneye göre daha yüksek bir ortalama sürtünme katsayı değerine sahip olmasına rağmen testin sonunda ulaşılan maksimum disk yüzey sıcaklığının BFD takviyesiz numuneye göre daha düşük olması oldukça dikkat çekici bir durumdur. Genellikle yüksek sürtünme katsayısı yüksek sürtünme ara yüzey sıcaklığının bir nedeni olarak ifade edilmektedir. Ancak BFD takviyeli numunelerde tam olarak bu durum gerçekleşmemiştir. Bu durumun, BFD'nin bileşeni olan granül grafitin bir taraftan sürtünme katsayı artışına neden olurken diğer taraftan da yağlayıcı bir etki göstererek arayüzey sıcaklık artışını baskılamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İdeal bir fren balata malzemesi için farklı koşullarda (hız, sıcaklık, basınç vd.) gerçekleştirilen frenleme durumlarında sürtünme katsayı değişiminin minimum düzeyde olması istenir. Sürtünme katsayı kararlılığı olarak da ifade edilen bu durum tüm fren balata malzemelerinden talep edilen önemli özelliklerden birisidir [43]. Artan BFD takviye oranına bağlı olarak değişen sürtünme katsayı kararlılık değerleri Şekil 13'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde BFD-0 numunesinin sürtünme katsayı kararlılık değeri % 76,47 iken bu numuneye %2, %4, %6 ve %8 BFD ilave edildiğinde fren balata numunelerin

sürtünme katsayı kararlılık değerleri sırasıyla % 75.57, % 79.82, % 79.22 ve % 77.6 olmuştur. BFD-2 numunesi hariç diğer tüm BFD takviyeli numuneler BFD-0 numunesine göre daha yüksek bir sürtünme katsayı kararlılık değeri sergilemiştir. BFD takviyeli numunelerde BFD oranının % 2'den % 4'e artması ile sürtünme katsayı kararlılığı artmış ancak bu takviye oranından sonra artan BFD takviye oranı ile sürtünme katsayısı kararlılık değeri azalma eğilimi göstermiştir. Tüm numuneler arasında en yüksek sürtünme katsayı kararlılık değerini BFD-4 numunesi sergilemiştir. En yüksek sürtünme katsayı kararlılığının bu numunede görülmesi, numunenin aşınma yüzeyinde yoğun temas platoların oluşumu ile açıklanabilir. Benzer şekilde, Eriksson ve Jacobson [44] frenleme esnasında aşınma yüzeyinde oluşan temas platolarının sürtünme katsayı kararlılığını geliştirmede önemli katkı sağladığını ifade etmiştir.

Şekil 14, yüksek fırın baca tozu takviyeli fren balata numunelerin özgül aşınma oranlarını göstermektedir. Tüm numuneler arasında en düşük özgül aşınma oranını $3.17 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ ile BFD-8 numunesi, en yüksek özgül aşınma oranını ise $6.79 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ ile BFD-0 numunesi göstermiştir. Tüm numunelerin özgül aşınma değerleri incelendiğinde artan BFD takviye oranı ile numunelerin özgül aşınma değerlerinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük özgül aşınma oranı değerleri kıyaslandığında, BFD-8 numunesinin özgül aşınma oranı BFD-0 numunesinin özgül aşınma oranına göre yaklaşık %53.31 oranında azalmıştır. Bu durum fren balata numunelerine BFD ilavesinin, numunelerin aşınma dirençlerini geliştirmede önemli bir katkı sağladığını göstermektedir. BFD takviye oranının artması ile numunelerin artan aşınma dirençlerinin sürtünme esnasında aşınma yüzeyine çıkan BFD bileşenlerin aşınma yüzeyinde ikincil temas platolarının oluşması ve genişlemesi için gerekli çekirdeklenme noktalarını oluşturmaktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan ve genişleyen ikincil temas platoları da sürtünme çifti arasındaki metalik teması engelleyerek aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlamaktadır [41].

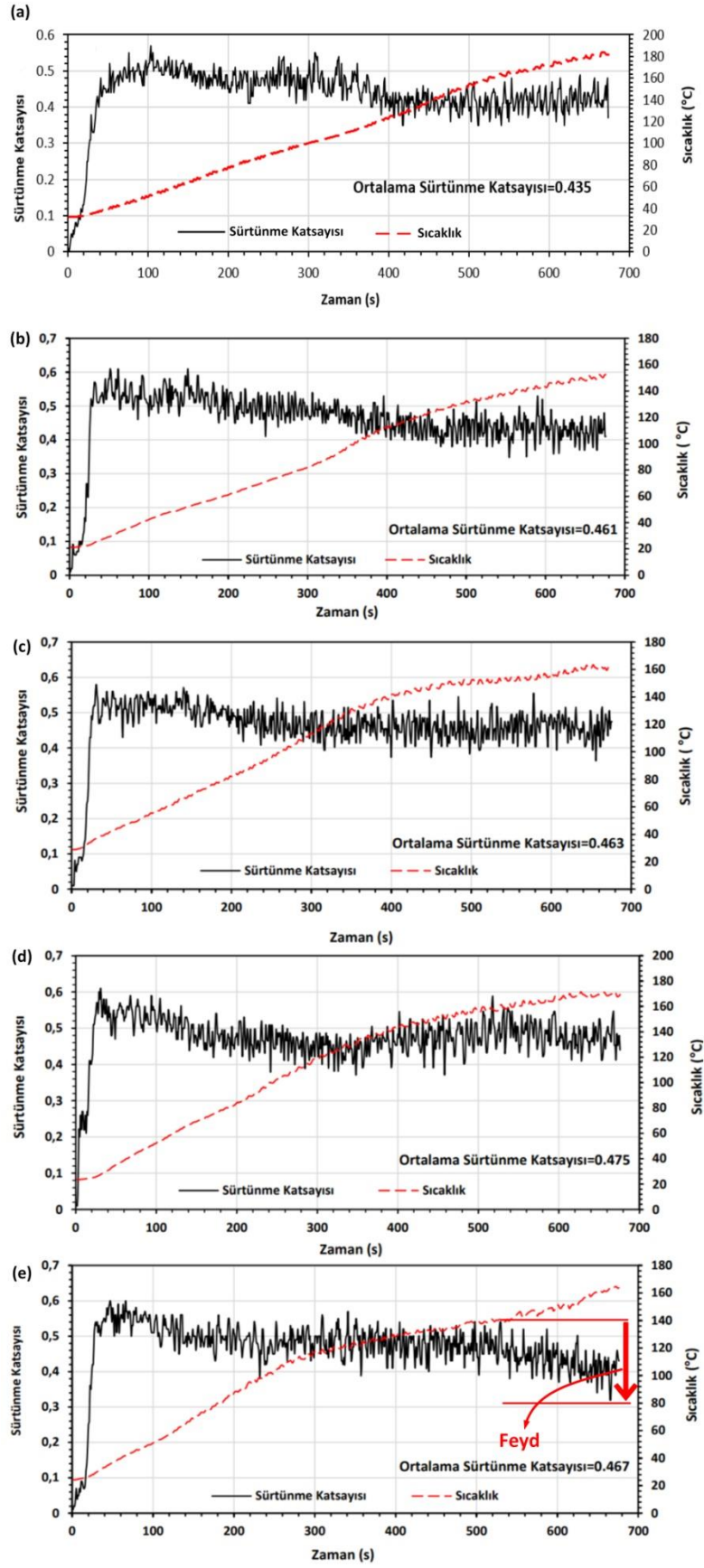
Şekil 15((a)-(d)) BFD-2, BFD-4, BDF-6 ve BFD-8 numunelerin aşınma yüzeylerine ait farklı büyütmelerdeki SEM resimlerini göstermektedir. BFD-2 numunesinin aşınma yüzeyinde delaminasyon aşınması sonucunda aşınma yüzeyinden pul şeklinde aşınma parçacıkların koptuğu görülmektedir. Sürtünme esnasında temas yüzeyinin altında başlayan mikro çatlaklar kayma doğrultusunda ilerler ve bu çatlaklar belirli bir

büyükliğe ulaştığında delaminasyon aşınması meydana gelir. Buna bağlı olarak da aşınma yüzeyinden pul şeklinde aşınma parçacıkları ayrılır. Aşınma yüzeyinden kopan bu pul şeklindeki aşınma parçacıkları da kesme gerilmesinin etkisi ile sürtünme arayüzeyinde parçalanarak küçük ve eş eksenli aşınma parçacıklarına dönüşmektedir. Bu aşınma parçacıkları da, ikincil temas platosu oluşum sürecine iki farklı şekilde dahil olmaktadır. Birinci durumda aşınma parçacıkları BFD'nin etrafında birikmekte ve ardından sürtünme arayüzeyinde oluşan sıcaklık ve temas basıncının etkisi ile sinterlenerek ikincil temas platolarına dönüşmektedir. İkinci durumda ise aşınma parçacıkları daha önce oluşmuş olan ikincil temas platolarının arkasında birikmekte ve bu platoların büyümesine katkı sağlamaktadır (Şekil 15(a)). BFD-4 numunesinin aşınma yüzeyi oldukça pürüzsüz bir karakter göstermiştir. Fakat fren balata numunesinin sürtünme-aşınma testleri sırasında aşınma yüzeyinde oluşan aşınma parçacıkları BFD'nin grafit bileşeni arkasında birikerek ikincil temas platoları üzerinde tekrar sıkıştırılmış tabaka olarak da ifade edilen yeni bir temas tabakası oluşturmuştur (Şekil 15(b)). BFD-6 numunesinin aşınma yüzeyinde, BFD arkasında geniş ikincil temas platoların olduğu Şekil 15(c)'de görülmektedir. Bu ikincil temas platolarının oluşumunda önemli bir görev üstlenen BFD parçacıkları, takviye oranının artmasına bağlı olarak kümelenme eğilimi göstermiştir. Kümelenme oluşumu nedeniyle parçacıklar matris tarafından yeterince çevrelenememekte ve bu da parçacık matris ara yüzeyinde kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sürtünme ara yüzeyinde artan sıcaklığın neden olduğu matris yumuşaması, parçacık kümelenmesinden dolayı zayıf bir ara yüzey bağ dayanımına sahip olan BFD parçacıklarının daha kolay bir şekilde matristen ayrılmasına neden olur. Birincil temas platosu görevi gören bu parçacıkların sürtünme arayüzeyinden ayrılması ile birincil temas platosu etrafında oluşan ikincil temas platoları da bozulmaktadır. Bozulan ikincil temas platoları da aşınma yüzeyinde çukurların oluşmasına neden olmaktadır. Ancak sürtünme yüzeyinden kopan ikincil temas platoları sürtünme ara yüzeyinde parçalanarak daha küçük aşınma parçacıklarına dönüşmektedir. Bu aşınma parçacıkları da oluşan çukurlarda birikerek ikincil temas platolarının tekrar oluşup büyümesi için katkı sağlamaktadır. Sürtünme ara yüzeyinde gerçekleşen bu sürecin BFD-6 numunesinin aşınma direncinin gelişmesine olumlu yönde katkı sağladığı düşünülmektedir (Şekil 15(c)). BFD-8 fren balata numunesi sürtünme yüzeyinde oluşan çukurlarda ise daha fazla miktarda küçük ve eş eksenli aşınma parçacıklarının

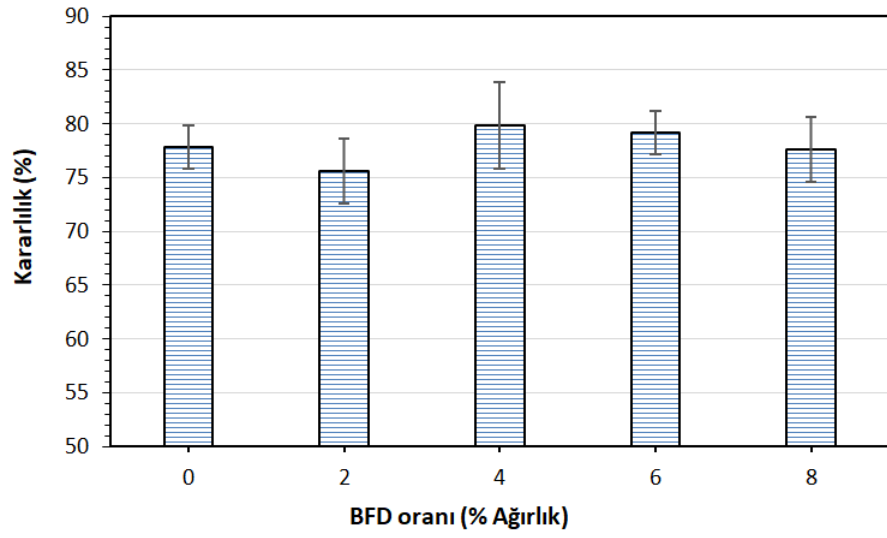
biriktiği Şekil 15(d)'de görülebilmektedir. Biriken bu küçük aşınma parçacıkları de ikincil temas platosunun büyümesine katkı sağlayarak BFD-8 numunesinin aşınma direncinin gelişmesine neden olmuştur. Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sürtünme yüzeyinde oluşan çukurların nanometreden birkaç mikron boyutuna kadar olan aşınma parçacıklarını depoladığını rapor etmişlerdir [41].

Şekil 16, BFD-6 ve BFD-8 fren balata malzemelerin aşınma yüzeylerinde kare ile gösterilen bölgelerin EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde, BFD-6 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan ikincil temas platosunda belirlenen demir oranı BFD-8 numunesininkinden daha yüksektir. Bu durumun, BFD-6 numunesinin karşı disk üzerinde daha yoğun bir abrasif etki göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu abrasif etki nedeniyle karşı disk malzemesinden BFD-6 numunesine doğru daha fazla oranda demir transferi gerçekleşmiştir. Tüm numuneler arasında BFD-6 numunesinin en yüksek sürtünme katsayı

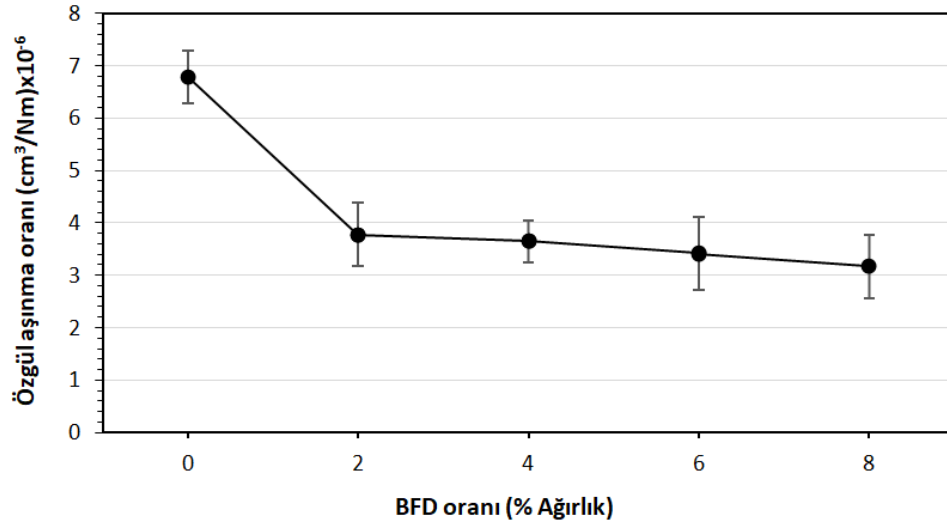
değerine sahip olması EDS analiz sonucunda belirlenen yüksek demir içeriği sonucu ile örtüşmektedir.



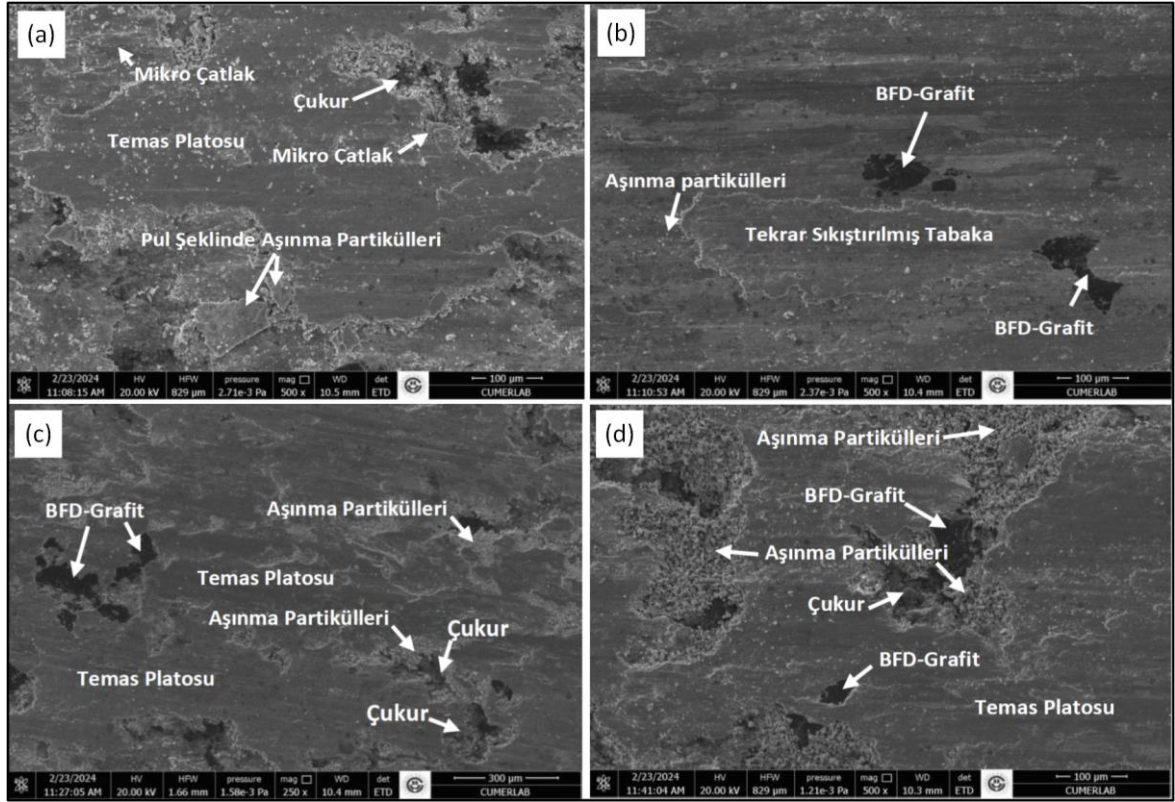
Şekil 12. Üretilen fren balata numunelerinin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve disk yüzey sıcaklık değişimleri (a) BFD-0, (b) BFD-2, (c) BFD-4, (d) BFD-6, (e) BFD-8 (Time dependent friction coefficient and disc surface temperature changes of the produced brake pad samples (a) BFD-0, (b) BFD-2, (c) BFD-4, (d) BFD-6, (e) BFD-8)



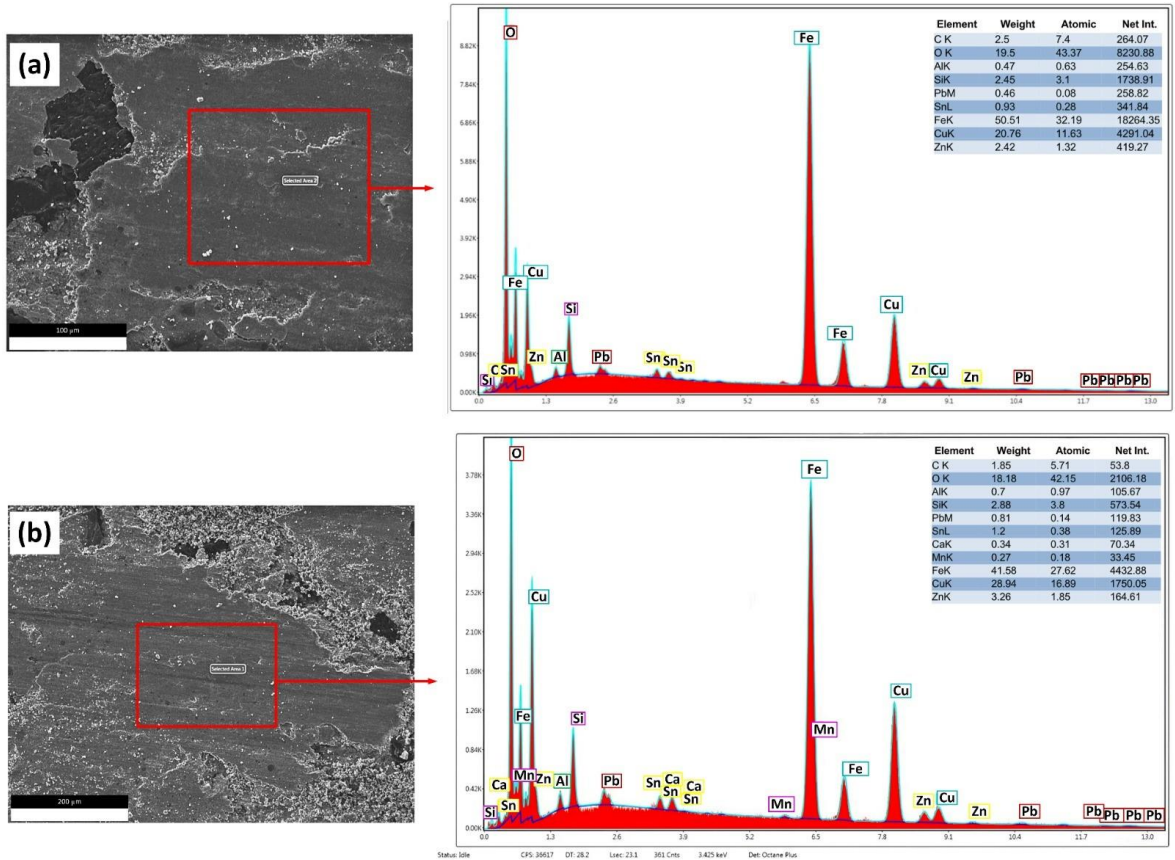
Şekil 13. Üretilen fren balata numunelerin sürtünme katsayı kararlılık değerleri (Friction coefficient stability values of produced brake pad samples)



Şekil 14. Üretilen fren balata numunelerin özgül aşınma oranları (Specific wear rates of produced brake pad samples)



Şekil 15. Üretilen fren balata numunelerinin aşınma yüzeylerine ait SEM resimleri a) BFD-2 (500×) b) BFD-4 (500×) c) BFD-6 (250×) d) BFD-8 (500×) (SEM images of the wear surfaces of the produced brake pad samples a) BFD-2 (500×) b) BFD-4 (500×) c) BFD-6 (250×) d) BFD-8 (500×))



Şekil 16. Üretilen fren balata numunelerinin aşınma yüzeylerinde kırmızı kare ile gösterilen alanların EDS analiz sonuçları (a) BFD-6, (b) BFD-8 (EDS analysis results of the areas indicated with red squares on the wear surfaces of the produced brake pad samples (a) BFD-6, (b) BFD-8)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu araştırmada endüstriyel bir atık malzeme olan BFD'nin bronz matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde takviye elemanı olarak kullanılabilirliği ve üretilen fren balata numunelerinin fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda, sıcak presleme yöntemi kullanarak ağırlıkça farklı oranlarda (%2, %4, %6 ve %8) BFD takviyeli fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen fren balata numunelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme katsayı kararlılığı, TRS, ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1) BFD takviyeli fren balata numunelerin yoğunluk değerleri, ağırlıkça artan BFD takviye oranına bağlı olarak azalmış, sertlik değerleri ise artmıştır. Artan BFD oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin azalması, BFD'nin yoğunluk değerinin matrisi oluşturan bronzun yoğunluk değerinden daha düşük olmasından kaynaklanmıştır. Artan BFD takviye oranına bağlı olarak üretilen numunelerin sertlik değerlerinin artışı ise BFD'nin içeriğinde bulunan demir oksit bileşenin dislokasyon hareketini engellemesi nedeniyle gerçekleşmiştir.

2) %4 BFD takviye oranına kadar üretilen numunelerin TRS değerleri artış eğilimi gösterirken, bu takviye oranından sonra artan BFD takviye oranına bağlı olarak TRS değerleri azalmıştır. Bu durum %4 BFD takviye oranından sonra BFD parçacıklarının matris içerisinde kümelenme eğilimi göstermesinden kaynaklanmıştır.

3) Üretilen numunelerden elde edilen ortalama sürtünme katsayı değerlerinin, otomobillerde fren balata malzemesi olarak kullanım için gerekli olan 0.3-0.6 aralığında olduğu belirlenmiştir.

4) Artan BFD ilavesine bağlı olarak fren balata numunelerin aşınma yüzeyinde genişleyen ikincil temas platoları, sürtünme çifti arasındaki metal/metal teması engelleyerek numunelerin özgül aşınma oranlarının azalmasına katkı sağlamıştır.

Bu araştırma sonucunda elde edilen bulgular, bronz matrisli kompozit fren balata malzemesi üretiminde endüstriyel bir atık ürün olarak temin edilen BFD'nin test edilen ağırlık oranlarında herhangi bir fren performans kaybına neden olmaksızın kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bu çalışma fren balata üretiminde takviye elemanı olarak BFD kullanımıyla hem BFD'nin çevreye verdiği zararın ve hem de balata üretim maliyetinin azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2218 Ulusal Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı (Proje Numarası 122C219) kapsamında desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hüsamettin KUŞ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

İlker SUGÖZÜ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Adem AVCU: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Zhou, P. Yao, T. Gong, Y. Xiao, Effects of ZrO₂ crystal structure on the tribological properties of copper metal matrix composites, *Tribology International*, 138 (2019) 380-391.
- [2] C. Kar, B. Surekha, Effect of red mud and TiC on friction and wear characteristics of Al 7075 metal matrix composites, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20:1 (2019) 14-23.
- [3] K. I. Kim, H. Lee, J. Kim, K. H. Oh, K. T. Kim, *Wear Behavior of Commercial Copper-Based*

Aircraft Brake Pads Fabricated under Different SPS Conditions, *Crystals*, 11:11 (2021).

[4] F. S. Hamid, O. A. Elkady, A. R. S. Essa, A. El-Nikhaily, A. Elsayed, A. K. Eessaa, Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Bi-Modal Nanoparticle-Reinforced Cu-Matrix, *Crystals*, 11:9 (2021).

[5] R. Nithesh, N. Radhika, S. Shiam Sunder, Mechanical Properties and Adhesive Scuffing Wear Behavior of Stir Cast Cu-Sn-Ni/Si₃N₄ Composites, *Journal of Tribology*, 139:6 (2017).

[6] N. Yavuz, R. Ertan, Polimer Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, *Mühendis ve Makine*, 47:553 (2005) 24-30.

[7] S. H. Gawande, V. N. Raibhole, A. S. Banait, Study on Tribological Investigations of Alternative Automotive Brake Pad Materials, *J Bio Tribo Corros*, 6:3 (2020).

[8] M. Boz, A. Kurt, The effect of Al₂O₃ on the friction performance of automotive brake friction materials, *Tribology International*, 40:7 (2007) 1161-1169.

[9] M. Khafidh, F. P. Putera, R. Yotenka, D. F. Fitriyana, R. D. Widodo, R. Ismail, A. P. Irawan, T. Cionita, J. P. Siregar, N. H. Ismail, A Study on Characteristics of Brake Pad Composite Materials by Varying the Composition of Epoxy, Rice Husk, Al₂O₃, and Fe₂O₃, *AE*, 6:2 (2023) 303-319.

[10] G. Cui, J. Ren, Z. Lu, The Microstructure and Wear Characteristics of Cu-Fe Matrix Friction Material with Addition of SiC, *Tribol Lett*, 65:3 (2017).

[11] X. Xiong, J. Chen, P. Yao, S. Li, B. Huang, Friction and wear behaviors and mechanisms of Fe and SiO₂ in Cu-based P/M friction materials, *Wear*, 262:9-10 (2007) 1182-1186.

[12] T. Peng, Q. Yan, X. Zhang, Y. Zhuang, Role of titanium carbide and alumina on the friction increment for Cu-based metallic brake pads under different initial braking speeds, *Friction*, 9:6 (2020) 1543-1557.

[13] M. Boz, A. Kurt, Effect of ZrSiO₄ on the friction performance of automotive brake friction materials, *Journal of materials science & technology*, 23:6 (2007) 843-850.

[14] Yu-nan Tian, Z. Dou, L. Niu, T. Zhang, Effects of Titanium Nitride Particles on Copper Matrix-Graphite Composite Properties, *Russ. J. Non-ferrous Metals*, 61:3 (2020) 387-395.

[15] S. C. Tjong, K. C. Lau, Abrasive wear behavior of TiB₂ particle-reinforced copper matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, 282:1-2 (2000) 183-186.

[16] A. M. Desai, T. R. Paul, M. Mallik, Mechanical properties and wear behavior of fly ash particle reinforced Al matrix composites, *Mater. Res. Express*, 7:1 (2020).

[17] A. Bahrami, N. Soltani, M. I. Pech-Canul, C. A. Gutiérrez, Development of metal-matrix composites from industrial/agricultural waste materials and their derivatives, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46:2 (2015) 143-208.

[18] J. Xu, N. Wang, M. Chen, Z. Zhou, H. Yu, Comparative investigation on the reduction behavior of blast furnace dust particles during in-flight process in hydrogen-rich and carbon monoxide atmospheres, *Powder Technology*, 366 (2020) 709-721.

[19] M. T. Kayili, G. Çelebi, A. Gültaş, Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Hedefiyle Demir Çelik ve Plastik Endüstrisi Atıklarının Geri Kazanımı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33:2 (2018) 33-44.

[20] D. Zhao, J. Zhang, G. Wang, A. N. Conejo, R. Xu, H. Wang, J. Zhong, Structure Characteristics and Combustibility of Carbonaceous Materials from Blast Furnace Flue Dust, *Applied Thermal Engineering*, 108:5 (2016) 1168-1177.

[21] C. Lanzerstorfer, M. Kröpl, Air classification of blast furnace dust collected in a fabric filter for recycling to the sinter process, *Resources, Conservation and Recycling*, 86 (2014) 132-137.

[22] M. Tuna Kayili, G. Çelebi, A. Guldass, Morphological, mechanical, thermal and tribological properties of environmentally friendly construction materials: recycled LDPE composites filled by blast furnace dust, *Journal of Green Building*, 15:3 (2020) 159-175.

[23] Ş. Bülbül, Farklı inorganik ve organik dolguların nr/sbr tipi elastomer malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük, 2014.

[24] P. J. Blau, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, *Oak Ridge National Laboratory*, 2001.

- [25] Y. Zhong, X. Qiu, J. Gao, Z. Guo, Structural Characterization of Carbon in Blast Furnace Flue Dust and Its Reactivity in Combustion, *Energy Fuels*, 31:8 (2017) 8415-8422.
- [26] H. Kuş, A. Avcu, İ. Sugözü, Red Mud Ratio Effects on the Tribological Performance of Fly-Ash-Reinforced Bronze Matrix Brake Pad Material, *J. of Materi Eng and Perform*, (2024).
- [27] H. Çinici, H. Karakoç, Ö. Şahin, İ. Ovalı, Investigation of microstructure, mechanical, and tribological properties of SiC/h-BN/Gr hybrid reinforced Al6061 matrix composites produced by hot extrusion method, *Diamond and Related Materials*, 136 (2023).
- [28] J. Fischer, B. Stawarczyk, C. H. F. Hämmerle, Flexural strength of veneering ceramics for zirconia, *Journal of Dentistry*, 36:5 (2008) 316-321.
- [29] İ. Sugözü, B. Sugözü, Investigation of The Effect of Solid Lubricant Particle Sizes on Friction and Wear Properties in Friction Composites: An Experimental Case Study with Graphite, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5:3 (2021) 179-183.
- [30] İ. Sugözü, K. Kahya, Investigation of the Effect on Tribological Properties of the use of Pinus Brutia Cone as a Binder in Brake Pads, *European Mechanical Science*, 2:4 (2018) 115-118.
- [31] A. Avcu, H. Kuş, İ. Sugözü, Application of the MULTIMOORA Method to Evaluate Performance Results of Red Mud Reinforced Bronze Matrix Brake Pads, 8:4 (2024) 419-430. .
- [32] İ. Sugözü, B. Sugözü, Friction and Wear Properties of Automobile Brake Linings Containing Borax Powder with Different Grain Sizes, *International Journal of Automotive Science And Technology*, 5:3 (2021) 224-227.
- [33] J. Bijwe, N. Aranganathan, S. Sharma, N. Dureja, ve R. Kumar, Nano-abrasives in friction materials-influence on tribological properties, *Wear*, 296:1-2 (2012) 693-701.
- [34] S. Şap, Ü. A. Usca, M. Uzun, K. Giasin, D. Y. Pimenov, Development of the hardness, three-point bending, and wear behavior of self-lubricating Cu-5Gr/Al₂O₃-Cr₃C₂ hybrid composites, *Journal of Composite Materials*, 57:8 (2023) 1395-1409.
- [35] S. Islak, C. Özorak, N. M. E. Abouacha, U. Çalığülü, V. Koç, Ö. Küçük, The effects of the CNF ratio on the microstructure, corrosion, and mechanical properties of CNF-reinforced diamond cutting tool, *Diamond and Related Materials*, 119 (2021).
- [36] F. Okay, S. Islak, Microstructure and mechanical properties of aluminium matrix boron carbide and carbon nanofiber reinforced hybrid composites, *Sci Sintering*, 54:2 (2022)125-138, 2022.
- [37] H. Kus ve D. Altıparmak, Effect of glass powder on the friction performance of automotive brake lining materials, *Sci Sintering*, 55:2 (2023) 159-170.
- [38] K. E. Oksuz, Tribological behaviour of Al₂O₃-Al₂O₃ particle- reinforced composites produced by powder metallurgy method, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 19:2 (2013) 190-201.
- [39] H. Karakoç, Effect of SiC Particle Size on the Mechanical and Wear Behavior of Al₃Si₅ Metal Matrix Composites, *Silicon*, 15:15 (2023) 6729-6744.
- [40] K. P. Boyle, The role of particle cracking in dilatation during tensile straining of a cast and thermomechanically processed 6061 Al - 20 volume percent Al₂O₃ metal matrix composite, Naval postgraduate school, Mechanical engineering, 1996.
- [41] P. Zhang, L. Zhang, D. Wei, P. Wu, J. Cao, C. Shijia, X. Qu, K. Fu, Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train, *Wear*, (2019) 432-433.
- [42] J. Bijwe, M. Kumar, Optimization of steel wool contents in non-asbestos organic (NAO) friction composites for best combination of thermal conductivity and tribo-performance, *Wear*, 263: 7-12 (2007) 1243-1248.
- [43] M. H. Cho, J. Ju, S. J. Kim, H. Jang, Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials, *Wear*, 260:7-8 (2006) 855-860.
- [44] M. Eriksson, S. Jacobson, Tribological surfaces of organic brake pads, *Tribology International*, 33:12 (2000) 817-827.