





Tren Setlerinin Fren Disklerinde Meydana Gelen Aşınma Problemine Karşı Kompozit Balata Kompozisyonlarında Nitril Kauçuk Kullanımının Etkilerinin Araştırılması

Abdülkadir ÜNAL^{*1}, Ozan DEMİRDALMIŞ²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

*unalabdul@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 21.08.2024, Kabul/Accepted: 16.09.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Fren balataları ve fren diskleri belirli bir ömrü olan ve sürekli değiştirilmesi gereken sarf malzemelerdir. Bu nedenle tren setlerinin fren sistemlerinde kullanılan sürtünme çiftlerinin birbirleriyle uyumlu çalışmasının yanı sıra az aşınmaları ve böylece servis ömürlerinin uzaması arzu edilmektedir. Bu çalışmada dinamometre testleri sırasında fren disklerinde çatlamaya neden olan bir fren balatası kompozisyonuna nitril kauçuk ilavesi yapılmıştır. Daha sonra nitril kauçuk içeren ve içermeyen balataların karakteristiğinin belirlenmesi için balatalar fiziksel ve mekanik olarak bir dizi teste tabi tutulmuştur. Elde edilen deneysel sonuçlar balata kompozisyonuna kauçuk ilavesiyle birlikte balatada sertlik oranının düştüğünü, böylece balatanın fren diskine ilk alışma sürecinin kısaldığı ve disklerde meydana gelen aşınma miktarının azaldığını göstermiştir. Mekanik test sonuçları ise kauçuk içeren fren balatalarının sürtünme katsayılarının daha stabil hale gelerek seyir güvenliğini artırdığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nitril Kauçuk, Fren Balatası, Fren Diski, Sürtünme Katsayısı

Investigation of the Effects of Using Nitrile Rubber in Composite Brake Pad Compositions Against the Wear Problem Occurring in Brake Discs of Train Sets

Abstract: Brake pads and brake discs are consumables that have a limited lifespan and need to be replaced continuously. For this reason, it is desirable that the friction pairs used in the brake systems of train sets work in harmony with each other and wear less, thus extending their service life. In this study, nitrile rubber was added to a brake pad composition that caused cracking in brake discs during dynamometer tests. The pads were then subjected to a series of physical and mechanical tests to determine the characteristics of the pads with and without nitrile rubber. The experimental results obtained showed that the hardness of the pad decreased with the addition of rubber to the pad composition and thus the bedding period of the pads to the brake disc is shortened and amount of wear on the discs decreased. The mechanical test results showed that the friction coefficients of the rubber-containing brake pads became more stable and increased the safety of driving.

Keywords: Nitrile Rubber, Brake Pad, Brake Disc, Coefficient of Friction

1. Giriş

Demiryolu araçlarında fren sistemi trafik güvenliği açısından son derece önemlidir. Bu nedenle fren sistemini oluşturan komponentlerin birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışmaları ve bunun yanı sıra ekonomik olmaları gerekmektedir. Fren sisteminin en önemli parçalarından olan fren diski ve balatalar aracın sahip olduğu kinetik enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürür ve ısı enerjisi atmosfere atılır. Sürtünme sırasındaki fiziksel etkilerden ve termal şoklardan dolayı sürtünme çiftleri aşınır ve zamanla değiştirilmesi gerekir. Ancak bu etkileşim süresince sürtünme çiftlerinde kırılma, çatlama ve benzeri durumların meydana gelmemesi ve sürtünme çiftlerinin servis ömürlerinin uzaması fren balata tasarımcıları için öncelikli konulardan birisidir.

Atıf için/Cite as: A. Ünal, O. Demirdalınış, "Tren setlerinin fren disklerinde meydana gelen aşınma problemine karşı kompozit balata kompozisyonlarında nitril kauçuk kullanımının etkilerinin araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 61-71, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1536926

Demiryolu araçlarında frenleme süreci çok karmaşıktır. Bu karmaşıklık, frenleme sırasında; mekanik, termal, pnömatik, elektriksel vb. birçok farklı olayın meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır [1]. Demiryolu araçlarında talep edilen hızın artmasıyla birlikte var olan karmaşıklık her geçen gün daha da artmaktadır [2]. Bu talebin doğal bir sonucu olarak fren balatalarının daha verimli ve daha dayanıklı olması gerekmiş ve tren setlerinde kompozit fren balataları kullanılmaya başlanılmıştır [3]. Demiryolu araçlarının güvenliğini sağlamak için fren balatalarının uygun ve sabit sürtünme katsayısına, mükemmel aşınma direncine, yüksek ısı dirence, yeterli mekanik mukavemete ve fren diskiyle iyi uyuma sahip olması zorunludur [4]

Demiryolu sektöründe balatalar üzerine yapılan araştırmalar kompozit malzemelerden yapılmış fren balatalarının, dökme demir muadillerine kıyasla sürtünme katsayısı için daha yüksek bir değer ve iyileştirilmiş aşınma direnci sağlayabileceğini göstermiştir [5]. Ancak, daha iyi performans sunan yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesi halen devam eden bir araştırma alanıdır [6]. Fren balataları geleneksel olarak diğer bazı bileşiklerle birlikte bir polimer matris içine gömülü asbest liflerinden oluşmaktaydı ancak asbest, kanserojen doğası nedeniyle yasaklandı [7]. Araştırmalar, özellikle asbestin zararlı etkilerinin ortaya çıkması ve kullanımının yasaklanmasının ardından insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyen alternatif sürtünme malzemelerine olan ilginin arttığını göstermektedir [8].

Kompozit fren balatasını oluşturan malzemelerin hangi oranda veya hangi miktarda karıştırılarak en uygun sürtünme karakterizasyonunu sağlayacağını bulmak genellikle deneysel yöntemlere dayanmaktadır [9]. Deneysel yöntemler arasında dinamometre testleri en güvenilir ve verimli deney yöntemi olarak kabul edilmektedir [10].

Fren balata kompozisyonları bağlayıcılar, takviye malzemeleri, katı yağlayıcılar, aşındırıcılar ve dolgu malzemeleri olmak üzere beş ana malzemedan oluşmaktadır [11]. Takviye malzemeleri balatanın mekanik mukavemetini artırmak için kullanılır. Takviye malzemeleri arasında mineral elyaf, karbon elyaf, cam elyaf, çelik elyaf ve seramik elyaflar bulunur [12].

Katı yağlayıcılar, özellikle yüksek sıcaklıklarda kararlı sürtünme ve aşınma özelliklerini kontrol etmek için kullanılan grafit ve metal sülfürler gibi malzemelerdir. Fren balatası için alternatif malzemeler kullanmanın amaçları, sürtünme özelliklerini korurken ve balata aşınma oranını azaltırken fren balatası malzeme formülasyonunda potansiyel olarak tahrip edici bileşenlerin kullanımını azaltmaktır [13].

Aşındırıcılar, disk-balata arayüzünde yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı sağlamak için kullanılırlar [14]. Bakır, fren balatalarının temel aşındırıcılarından birisidir ve fren balatalarının tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri, bakır içeriği ile güçlü bir şekilde ilişkilidir [15]. Ancak fren balatası formüllerinde bakır kullanımı son zamanlarda önemli tartışmaların konusu haline gelmiştir; bunun başlıca nedeni bakır ve diğer ağır metallerin potansiyel olarak toksik etkileridir [16]. Amerika Birleşik Devletleri aşınma döküntülerindeki bakır toksisitesi nedeniyle sürtünme malzemelerindeki bakır içeriğini azaltmak için bir mevzuat çıkarmıştır. Bu nedenle, istenen triboloji performansına da sahip olan bakır içermeyen sürtünme malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [17].

Dolgu malzemeleri esas olarak fren balatası üretiminde fren üretilebilirliğini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek için ve fonksiyonel değiştiriciler olarak kullanılır. Fren balatası malzemesinin performansını iyileştirmek veya optimize etmek için genellikle az miktarda dolgu maddesi eklenir [18].

Bağlayıcılar tüm malzemeleri bir arada tutar [19]. Bağlayıcı olarak genellikle reçineler kullanılır [20]. Çok az reçine balatanın dayanıklılığını azaltırken, çok fazla reçine yüksek sıcaklıklarda

sürtünme katsayısını düşürebilir ve sertliği önemli ölçüde artırabilir [21]. Kauçuk parçacıklarının balata kompozisyonuna dahil edilmesi, reçine bazlı sürtünme malzemelerinin esnekliğini ve sönümleme özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir [22].

Doğal veya yapay kauçuk bazlı otomotiv balataları üzerine yapılan araştırmalar farklı kauçuk türlerinin farklı balata malzemeleriyle farklı özellikler ortaya koyduğunu göstermektedir. Saffar ve Sucai [23] yaptıkları çalışmada, stiren-bütadien kauçuk (SBR) içeren balataların mekanik özelliklerinde ve sürtünme katsayılarında iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. Chang vd. [24] kauçuk parçacıklarının boyutlarının sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri üzerinde etkisini incelemiş ve küçük kauçuk parçacıkların aşınma oranını artırırken sürtünme dengesizliğini daha da kötüleştirdiği sonucuna varmışlardır. Liu vd. [25] nano toz kauçuklar üzerine yaptığı çalışmada balata kompozisyonuna nano-toz kauçuk ilavesinin balatanın sürtünme karakterizasyonu üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Tamayo vd. [26] geri dönüştürülmüş lastik kauçuk parçacıkları ile sürdürülebilir fren balataları üzerinde çalışmalar yapmış ve kauçuğun fren balatalarının ömrünü artırdığı sonucuna varmıştır.

Bu çalışmada Uluslararası Demiryolu Birliğinin (UIC) 541-3 numaralı ve Fren Balatalarının Sertifikalandırılması için Genel Şartlar isimli standardına uygun olarak kauçuk içermeyen bir balata imal edilmiş ve balata gerçek boyutlu bir dinamometre cihazında test edilmiştir. Kauçuk içermeyen balata testi tamamlayamadan parçalanmış ve diske zarar vermiştir. Daha sonra balata kompozisyonuna nitril kauçuk eklenmiş ve dinamometre testleri tekrar edilmiştir. Testler sonrasında yapılan incelemede hem balata hem de diskte hasar meydana gelmediği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma demiryolu disk fren balataları arasında yapılan az sayıdaki çalışmalardan biri olması yanı sıra hem balatanın hem de diskin aşınmasına odaklanması açısından önemlidir.

2. Metot

2.1. Disk balataların prototiplerinin üretilmesi

Disk balatalar UIC 541-3'te tanımlanan UIC 200 boyutlarında imal edilmiştir. Balataların imalat prosesi Şekil 1'de verilmiştir. İlk önce karışımı oluşturan malzemeler Şekil 1-a'da verilen laboratuvar tipi bir mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra karışım Şekil 1-b'de verilen hassas bir terazide tartılmış ve Şekil 1-c'de verilen pres gözlerine belirli ağırlıklarda konulmuştur. Pres 600 ton kapasiteye sahip olup kalıp göz sayısı 4 adettir. Her bir balata parçasının yüzey alanı 100 cm²'dir. Presleme basıncı 300 kgf/cm²'dir. Disk balatalar için Denklem 1 kullanılarak pres basıncı (P) 100 bar olarak hesaplanmıştır.

$$P = \frac{\text{Kalıp göz sayısı} * \text{Balata yüzey alanı} * \text{Presleme basıncı}}{\text{Pres silindir kesit alanı}} \quad (1)$$

Presleme işlemi sıcak pres olarak 150 °C'de yapılmıştır. Presleme işleminden sonra balatalar Şekil 1-d'de verilen fırında 4 saat fırınlanmıştır.



Şekil 1. Disk balataların imalat prosesi a) Laboratuvar tipi mikser b) Laboratuvar tipi hassas terazi c) Sıcak pres d) Fırın

2.2. Fiziksel davranış analizi

Sıcak presleme yöntemi ile elde edilen ve Şekil 2’de verilen balatalara proses akışı içerisinde yer alan taşlama operasyonu uygulanmıştır. Taşlama işlemi balatanın kalınlık değerini tolerans değeri içerisinde yer alması ve yüzey paralellliğini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Üretilen balataların fiziksel davranışını öğrenebilmek için sertlik testi, termogravimetrik analiz, yoğunluk testi gibi testler yapılmıştır. Sertlik testi Qness markasının Q750M modeli kullanılarak ölçülmüştür. Beş farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Ölçümler SAE J2654 standardına göre HRB (Rockwell) cinsinden ölçülmüştür.

Numunelerin yoğunluğu, AND GF-600 marka hassas teraziye bir yoğunluk kiti eklenerek ölçülmüştür. Ölçümler, ASTM D792 standardına uygun olarak Arşimet prensibi kapsamında gerçekleştirilmiştir.



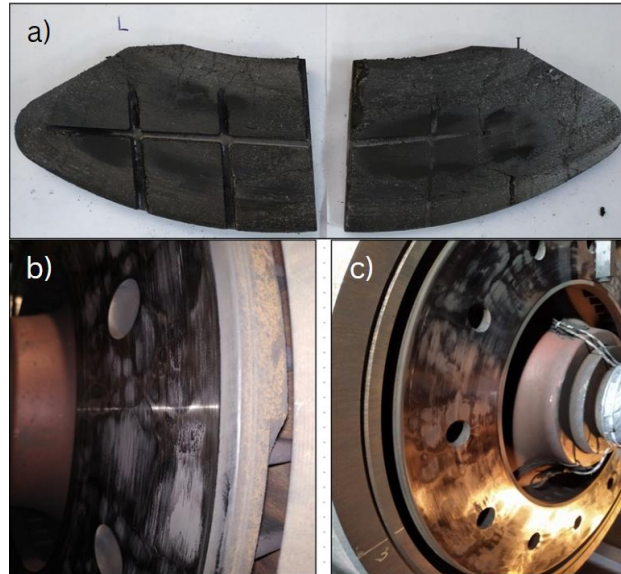
Şekil 2. Prototip imalatı yapılan fren diski

2.3. Mekanik davranış analizi

Balataların mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla gerçek boyutlu bir dinamometre cihazı kullanılarak balatalar UIC 541-3 standardının B2 ve C2 Enerji Klası Test Programına göre test edilmiştir. Bu test programı toplamda 173 frenden oluşmaktadır. Test programına başlamadan önce balataların disklere alışması için yapılan ve yataklama freni adı verilen fren uygulaması yapılmaktadır. Yataklama işleminin tamamlanabilmesi için balata temas yüzeyinin en az %85'inin diske alışması gerekmektedir. Bu amaçla fren diski sprej boya ile boyanır ve boyanın en az %85'inin silinmesi durumunda yataklama frenlerine son verilir. Bu enerji sınıfı test prosedüründe aynı zamanda ıslak ve kuru koşullar için ayrı ayrı fren prosedürü bulunmaktadır. Farklı sıcaklıklarda farklı kuvvetlerde 50 km/h, 80 km/h, 120 km/h, 140 km/h ve 200 km/h hızlarda frenleme yapılarak sürtünme katsayısı değerleri ve sıcaklık değerleri ölçülmektedir.

3. Bulgular

Kauçuk içermeyen karışım toplamda 173 frenden oluşan testin 106. fren uygulamasında Şekil 3'te gösterildiği gibi çatlamıştır. Test sonrası, karışım üzerinde çalışılarak formülasyonda yer alan demir oksit'in belirli bölgelerde disk yüzeyinde sıvanmalara yol açtığı ve bunun sonucunda sürtünme katsayısında değişimlere ve vibrasyona sebep olduğu görülmüştür. Bu sürtünme katsayısı değişimi neticesinde balatada kılcak çatlaklar oluşmuş ve ıslak test sonrası bu çatlakların derinleştiği düşünülmektedir.



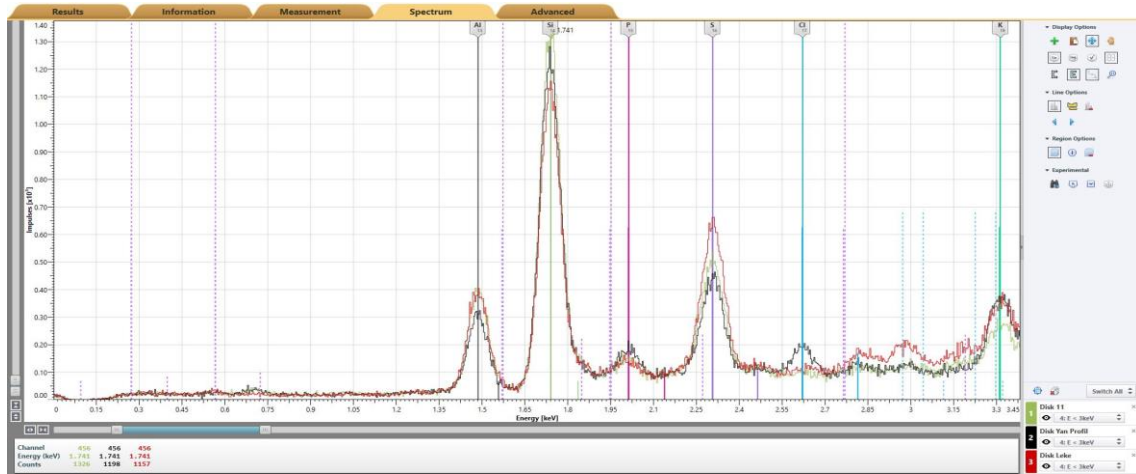
Şekil 3. 106. fren sonrası disk ve balata a) balatada meydana gelen çatlak b) disk'in yakın görüntüsü c) disk'in uzak görüntüsü

Test sonrası yüzeyinde ağır lekelenme görülen disklerin birinden Şekil 4'te verilen parçalar kesilmiştir. Kesilen disk parçalarının balata ile temas edilen yüzeylerindeki lekelenme görülen ve görülmeyen kısımlara XRF analizleri yapılmıştır. Ayrıca diskin yan kesit yüzeyi de XRF cihazının dedektör ve tüpü arasındaki kartezyen geometriyi tamamlayacak şekilde yerleştirilerek, hiç kullanılmamış disk ve test yapılmamış disk arasındaki farklılıklar tespit edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle XRF analizleri, daha sonra parçanın lekelenme görülen ve lekelenme görülmeyen kısmından 1*2 cm numuneler çıkarılarak SEM-EDS analizleri yapılarak sürtünme yüzeyinde diske malzeme geçişleri incelenmiş ve sürtünme katsayısında kararsızlığa sebep olduğu görülen lekelenmelerin nedeni anlaşılmasına çalışılmıştır.



Şekil 4. Dinamometre testleri sonrası lekeli diskten alınan numuneler

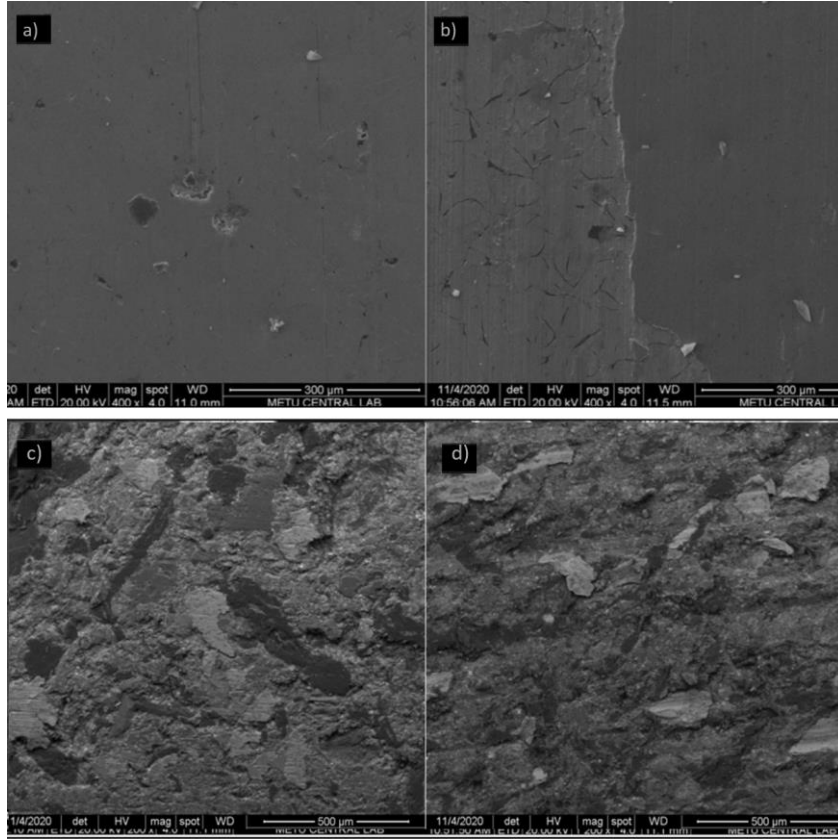
Şekil 5'te verilen XRF spektrum karşılaştırmalarına göre; Al, Si, S, K, Ca, Ti, Zn ve Sb içerikli malzemelerin disk yüzeyine geçiş göstererek sürtünme filmi oluşumunda aktif rol oynadığı görülmüştür. Bu malzemelerden Ca, Zn ve S sayımlarının lekelenmiş yüzeylerde daha fazla olduğu görülmüştür. Fe, Cr ve Mn test sonrası yüzeylerdeki sayımlarında; yan profile göre azalma görülmüştür.



Şekil 5. Test sonrası disk yüzeyi-lekeli kısım-yan profil XRF spektrumları karşılaştırmaları-3-6 keV

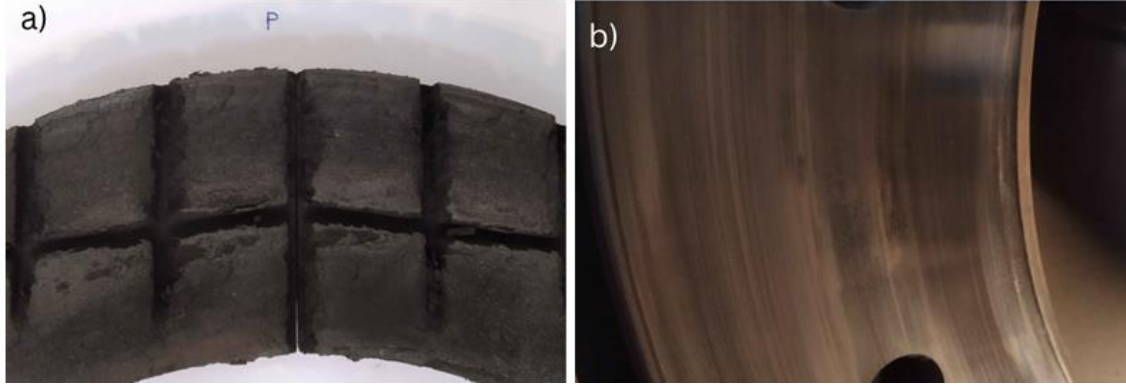
Balata arasında oluşan sürtünme filminin, test sırasında sıcaklıkların da yükselmesi nedeniyle disk yüzeyinde laminar faz değişimlerine neden olduğu; bu nedenle disk yüzeyinde mikro düzeyde oluşan sertlik farklılıklarının sürtünme katsayısındaki değişimleri tetiklediği değerlendirilmiştir.

Balata ve diske ait SEM görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Disk yüzeyine yapılan SEM-EDS analizleri ile; sürtünme filmi oluşumunda, aşındırıcı ve yağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin özellikle etkin olduğu tespit edilmiştir. Disk ve balata arasında oluşan sürtünme filminin, test sırasında sıcaklıkların da yükselmesi nedeniyle disk yüzeyinde laminar faz değişimlerine neden olduğu; bu nedenle disk yüzeyinde mikro düzeyde oluşan sertlik farklılıklarının sürtünme katsayısındaki değişimleri tetiklediği değerlendirilmiştir. SEM görüntülerinde, daha önce XRF spektrumlarıyla tespit edildiği üzere malzemelerin normal proses şartlarında homojen dağılımı ile ilgili bir sorun olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 6. SEM-EDS analizleri a) 300 µm disk yüzeyi lekesiz kısım b) 300 µm disk yüzeyi lekeli kısım c) 500 µm test öncesi balata yüzeyi d) 500 µm test sonrası balata yüzeyi

Kauçuk içeren balatalar toplamda 173 frenden oluşan dinamometre testini Şekil 7'de gösterildiği şekilde sorunsuz bir şekilde tamamlamıştır. Disk ve balata yüzeyinde herhangi bir çatlak veya kırık oluşmamıştır.



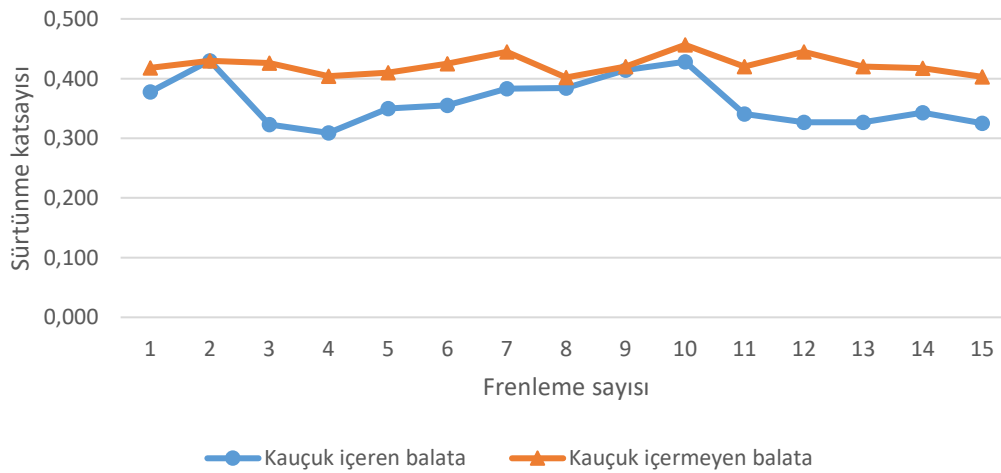
Şekil 7. Kauçuk içeren balata ile yapılan dinamometre sonrası alınan görüntü a) balata b) disk

Kauçuk içeren ve kauçuk içermeyen balataların fiziksel, mekanik aşınma ve dinamometre test sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Aşınma değerleri her iki balata için de 106. Frenlemeye kadar alınmıştır.

Tablo 1. Kauçuk içeren ve kauçuk içermeyen balataların fiziksel ve mekanik değerleri

	Sertlik	Yoğunluk (gr/cm ³)	μ /min.	μ /maksimum	Aşınma (gr)
Kauçuk İçermeyen Balata	44 (HRR)	1,979	0,418	0,537	0,400
Kauçuk İçeren Balata	80 shore D	1,90	0,303	0,431	0,520

Tablo 1 incelendiğinde kauçuk ilavesiyle birlikte sertlik değerinin düştüğünü ve ancak shore değeri ile ölçülebildiği gözlemlenmektedir. Sertlik sürtünme katsayısını etkileyen bir faktördür. Sertliğin düşmesiyle birlikte sürtünme katsayısının da düşmesi beklenmektedir. Karışımlara kauçuk ilavesiyle birlikte sertliğin düştüğü ve bunun bir sonucu olarak da yine sürtünme katsayısında bir düşüş olduğu gözlemlenmektedir. Yine sertlik değerindeki azalmanın bir sonucu olarak balatalarda meydana gelen aşınma miktarı artmaktadır. Ancak sertliğin azalmasının olumlu bir sonucu olarak balatanın karşı malzemeye yani diske verdiği aşınma miktarı azalmaktadır. 140 km/h hızda yapılan frenlemeler sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları değerleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. 140 km/h hızda yapılan frenlemeler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 8’de verilen grafik incelendiğinde kauçuk içermeyen balatanın daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu ve daha stabil değerler verdiği görülmesine karşı disk ve balatada

meydana getirdiği aşınma ve hasar miktarı seyrüsefer güvenliği açısından kabul edilemez düzeydedir.

Balatalarda sertlik değerinin yanı sıra balataların yoğunluğu da önemli parametrelerden biridir. Balataya kauçuk ilavesiyle birlikte balatanın yoğunluğu bir miktar azalmıştır. Yoğunluğun azalmasıyla birlikte balatanın aşınma oranı artmıştır.

4. Sonuç

Kauçuk içermeyen, yüksek sürtünme katsayısına sahip bir demiryolu balatası gerçek boyutlu imal edilerek dinamometre testine tabi tutulmuştur. 173 fren den oluşan test prosedürünün 106. freninde balata kırılmış ve test sonlandırılmıştır. Disk gözle muayene edildiğinde diskte lekelenmeler ve çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Aynı karışıma fenolik reçine azaltılarak kauçuk ilavesi yapılmıştır. Kauçuk ilavesiyle birlikte sertlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Sertliğin azalmasıyla birlikte balatanın sürtünme katsayısı bir miktar düşmüş ve demiryolu balataları için arzu edilen değerlere gelmiştir. Kauçuk aynı zamanda fenolik reçine ile birlikte bağlayıcı görevi görse de balatalarda aşınma miktarı artmıştır. Fren balatalarında aşınma arzu edilen bir durum olmasa da balatanın diske karşı agresif olmaması ve diskte kırılmaya veya çatlamaya yol açmaması trafik güvenliği açısından son derece önemlidir. Sonuç olarak demiryolu fren balatalarına kauçuk ilavesi balatanın ömrünü azaltmaktadır. Ancak kauçuk ilavesi aynı zamanda balatanın daha yumuşak olmasına neden olmakta ve balatanın çatlamasını önlemektedir. Aynı zamanda balata kompozisyonuna kauçuk ilavesi diskin ömrünü artırmakta ve sürtünme katsayısını daha stabil hale getirmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmayı 118G031 numaralı 1007 KAMAG projesi kapsamında destekleyen TÜBİTAK, TÜRASAF ve KALE Balata AŞ'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] C. Cruceanu, C. Camil "Aspects Regarding the Braking Capacity of Composite Brake Shoes for Railway Vehicles," *Mater. Plast.*, vol. 56, pp. 29-75, 2019, doi: 10.5772/37552
- [2] R. Sharma, M. Dhingra, R. Pathak, "Braking System in Railway Vehicles," *IJERT*, vol. 4, no. 1, pp. 206-211, 2015.
- [3] A. Unal, "Investigation of braking system and composite brake pads in train sets based on thermo-mechanical finite element analysis," Doctoral Thesis, Marmara University, 2022.
- [4] J. Xiao, S. Xiao, J. Chen, and C. Zhang, "Wear mechanism of Cu- based brake pad for high-speed train braking at speed of 380 km/h," *Trib. Int.*, vol. 150, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106357
- [5] M. Muflikhun *et al.*, Sentanuhady, S. Raghu, "Comprehensive analysis and economic study of railway brake failure from metal-based and composites-based materials," *Forces in Mechanics*, vol. 12, 2023, doi: 10.1016/j.finmec.2023.100223
- [6] M. Khadif, F. Putera, and R. Yotenka, "A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al₂O₃ and Fe₂O₃," *AE*, vol.6, no. 2, 2023, doi: 10.31603/ae.9121
- [7] J. Agunsoye, S. Bello, and A. Bamigabiye, "Recycled ceramic composite for automobile brake pad application," *J. Phys. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 35-46, 2018, doi: 10.2478/jrp-2018-0004
- [8] A. Unal, O. Demirdalmis, "The effects of using apricot kernel shell, an environmentally friendly material, in composite brake pads on friction performance," *Trib. Int.*, vol. 197, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109734
- [9] A. Unal, N. Akkus, S. T. Kandil, "Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 134-144, Jan. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1027982

- [10] A. Unal, and N. Akkus, "Analytical and experimental investigation of composite pads created by using coke dust against the fading problem in railway vehicles," *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. F J. Rail Rapid Transit*, vol. 237, no. 2, 2022, doi: 10.1177/09544097221100920
- [11] S. Savetlana, A. Lubis, and L. Aditaya, "Fly ash/phenolic resin composite for brake pad application fabrication, materials and thermal properties," *Composites Theory and Practice*, vol. 20, 2020.
- [12] P. Menezes, P. Rohatgi, and M. Lovell, "Studies on the tribological behaviour of natural fiber reinforced polymer composite," *Green Tribology*, pp. 329-345, 2012
- [13] E. Oluwafemi *et all.*, "Biomass-based composites for brake pads: A review," *IJMET*, vol. 10, no. 3, pp. 920-943, 2019.
- [14] M. Eriksson, F. Bergman, and S. Jacobson, "On the nature of tribological contact in gutomotive brakes," *Wear*, vol. 256, pp. 26-36, 2002.
- [15] M. Kumar, J. Bijwe, "Role of different metallic fillers in non-asbestos organic friction composites for controlling sensitivy of coefficient of friction to load and speed," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 6, pp. 965-974, 2010.
- [16] G. Straffelini *et all.*, "Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment," *Environmental Pollution*, vol. 207, pp. 211-219, 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2015.09.024
- [17] L. Wei, Y. Chay, C. Cheung, and D. Jin, "Tribology performance, airborne particle emissions and brake squeal noise of copper-free friction materials," *Wear*, vol. 448, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203215
- [18] I. Ezekile, F. Inambao, and G. Adewumi, "Effects of fibre, fillers and binders on automobile brake pad performance: A review," *IJMET*, vol. 10, no. 6, pp. 135-150, 2019.
- [19] A. Borawski, "Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads-review," *Sci Eng Compos Mater*, vol. 27, pp. 374-396, 2020, doi: 10.1515/secm-2020-0041
- [20] G. Mieczkowski, "Stress fields at the tip of a sharp inclusion on the interface of a biomaterial," *Mech Compos Mater*, vol. 52, no. 5, pp. 601-610, 2016.
- [21] N. Dureja, N. Bijwe, P. Gurunath, "Role of type and amount of resin on performance behaviour of non-asbestos organic friction materials," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 4, pp. 489-497, 2009.
- [22] M. Eriksson and S. Jacobson, "Tribological surfaces of organic brake pads," *Tribol. Int.* vol. 33, pp. 817-827, 2000.
- [23] A. Saffar, A. Shojaei, "Effect of rubber component on the performance of brake friction materials," *Wear*, vol. 274, pp. 286-297, 2012, doi: 10.1016/j.wear.2011.09.012
- [24] Y. Chang *et all.*, "Size effect of tire rubber particles on tribological properties of brake friction materials," *Wear*, vol. 394, pp. 80-86, 2018, doi: 10.1016/j.wear.2017.10.004
- [25] Y. Liu *et all.*, "Application of nano powdered rubber in friction materials," *Wear*, vol. 261, pp. 225-229.
- [26] A. Tamayao *et all.*, "Preparation and properties of sustainable brake pads with recycled end of life tire rubber particles," *Polymers*, vol. 13, no. 19, doi: 10.3390/polym13193371

Özgeçmiş



Abdulkadir ÜNAL

İstanbul Teknik Üniversitesinde öğretim görevlisi doktor olarak çalışmaktadır. Doktora derecesini Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Araştırma alanları biyo-kompozit malzemeler, fren sürtünme malzemeleri ve demiryolu araçlarıdır.
E-posta: unalabdul@itu.edu.tr

**Ozan DEMİRDALMIŞ**

Kale Balata AŞ'de Ar-Ge Müdürü olarak görev yapmaktadır. Yüksek lisans derecesini Sakarya Üniversitesi'nden, lisans derecesini Yıldız Teknik Üniversitesi'nden almıştır. Araştırma alanları arasında otomotiv fren balataları, demiryolu fren balataları ve kompozit malzemeler bulunmaktadır.

E-posta: ozand@kalebalata.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Abdülkadir ÜNAL: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Ozan DEMİRDALMIŞ: Görselleştirme, İnceleme, gözden geçirme ve düzenleme.