

**Demiryolu Araçlarının Kompozit Fren Bloklarında Islak Koşullarda Ortaya Çıkan Fren Zayıflaması Problemi Karşısında Vulkasil Kullanımının İncelenmesi**Abdülkadir ÜNAL^{*1}, Ozan DEMIRDALMIŞ²¹ *İstanbul Teknik Üniversitesi, İleri Araç Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul, Türkiye*² *Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye***unalabdul@itu.edu.tr**(Alınış/Received: 26.12.2025, Kabul/Accepted: 14.02.2026, Yayımlama/Published: 14.02.2026)*

Öz: Fren balataları üzerine yapılan araştırmalar genellikle kuru koşullar üzerine yoğunlaşsa da, gerçek işletme şartlarında maruz kalınan ıslak koşullar sürtünme katsayısında ciddi düşüşlere ve trafik emniyetini tehdit eden fren zayıflamasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, kuru koşullarda yüksek performans gösteren ancak ıslak koşullarda performans kaybı yaşayan K tipi kompozit fren bloğu bileşimine Vulkasil S takviyesi yapılarak bu problemin giderilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen numuneler laboratuvar ortamında fiziksel ve mekanik testlere tabi tutulmuş, atalet tipi dinamometre testleriyle sürtünme performansı değerlendirilmiştir; elde edilen bulgular gerçek demiryolu koşullarında gerçekleştirilen saha testleriyle doğrulanmıştır. Deneyisel sonuçlar, Vulkasil S içermeyen fren bloklarında ıslak koşullar altında sürtünme katsayısının yaklaşık %20 oranında azaldığını, Vulkasil S takviyeli bloklarda ise bu düşüşün sadece %5 seviyesinde kalarak istikrarlı bir frenleme performansı sağlandığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Vulkasil S, Blok balata, Sürtünme katsayısı, Fren zayıflaması, Yük vagonu

Investigation of the Use of Vulkasil Against Brake Weakening Problem Occurring Under Wet Conditions in Composite Brake Blocks of Railway Vehicles

Abstract: While research on brake blocks typically focuses on dry conditions, the wet conditions encountered in actual operation cause significant reductions in the coefficient of friction, leading to brake fade that jeopardizes railway operational safety. This study aims to mitigate this issue by reinforcing a K-type composite brake block composition, which performs well in dry conditions but suffers performance loss in wet conditions, with Vulkasil S. The developed specimens underwent physical and mechanical testing in a laboratory setting, were additionally evaluated using an inertia-type dynamometer, and the findings were validated through field tests under real railway conditions. Experimental results demonstrated that the coefficient of friction for brake blocks without Vulkasil S decreased by approximately 20% under wet conditions, whereas Vulkasil S-reinforced blocks limited this reduction to just 5%, thereby ensuring stable braking performance.

Keywords: Vulkasil S, Brake block, Coefficient of friction, Brake fade, Freight wagon

1. Giriş

Fren sürtünme elemanlarına yönelik literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı, genellikle idealize edilmiş kuru koşullar altında gerçekleştirilmektedir. Buna karşın, gerçek işletme şartlarında fren pabuçlarının maruz kaldığı ıslak koşullar, sürtünme katsayısında ani düşüşlere yol açarak trafik emniyeti açısından hayati bir risk oluşturmaktadır.

Demiryolu araçlarına has bir süreç olan frenleme, trafik emniyetine olan doğrudan etkisi nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Mekanik, ısı, pnömatik ve elektriksel birçok fenomenin eş zamanlı gerçekleştiği bu süreç, doğası gereği oldukça karmaşık bir yapı sergilemektedir [1]. Bu sistemlerin temel emniyet kriteri; hız, değişen çevresel koşullar ve yükselen sıcaklıklardan

Atıf için/Cite as: A. Ünal, O. Demirdalmış, "Demiryolu araçlarının kompozit fren bloklarında ıslak koşullarda ortaya çıkan fren zayıflaması problemi karşısında vulkasil kullanımının incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 24, no. 1840189, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1840189

bağımsız olarak yüksek ve stabil bir sürtünme katsayısını garanti edebilmeleridir [2]. Frenleme kapasitesi ise tren ağırlığı, işletme hızı, fren donanımının tasarımı ve termal etkiler gibi temel parametreler tarafından şekillenmektedir [3]. Bu noktada, sürtünme çiftleri için uygun malzeme seçimi, frenleme performansını doğrudan belirleyen sürtünme karakteristiklerinin istenilen aralıkta tutulmasını sağlar [4]. Nitekim fren sürtünme malzemelerinin; kararlı sürtünme katsayısı, düşük aşınma oranı, korozyon direnci ve maliyet etkinliği gibi çok yönlü gereksinimleri karşılaması beklenmektedir [5]. Ayrıca sürtünme katsayısı, yalnızca işletme parametrelerine değil, frenleme esnasında oluşan titreşimlere de bağlıdır. Söz konusu titreşimler, fren pabuçlarının yüzeyden anlık olarak ayrılmasına neden olarak frenleme sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir [6].

Hizmet ömrünü uzatmak ve frenleme karakteristiklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilen kompozit fren pabuçları, günümüzde geleneksel dökme demir blokları büyük ölçüde ikame etmiştir [7]. Bu yaygın kullanımın temelinde, kompozit yapıların konvansiyonel malzemelere kıyasla sunduğu üstün fiziksel, mekanik ve ısıl özellikler yatmaktadır [8]. Kompozit teknolojisi, çok sayıda farklı hammaddenin kullanımına imkân tanıdığından, geniş bir yelpazede farklı bileşimler elde etmek mümkündür [9]. Ancak optimum performans için gerekli olan hammadde seçimi, halen büyük oranda tecrübe ve bilgi birikimine dayalı olarak yürütülmektedir [10]. Kompozit fren pabuçlarını oluşturan bu bileşenler literatürde beş ana kategoride sınıflandırılmaktadır; yapısal malzemeler, bağlayıcılar, abrasifler, dolgular ve yağlayıcılar [11].

Yapısal güçlendirme elemanı olarak çelik, bakır, alüminyum gibi metalik liflerin yanı sıra karbon, cam, kevlar ve aramid lifleri, tek başlarına veya hibrit kombinasyonlar halinde tercih edilmektedir [12]. Kompozit yapının bütünlüğünü ve matrisin kohezyonunu sağlama görevi bağlayıcılara aittir [13]. Sürtünme ve aşınma performansını optimize etmek amacıyla bileşime abrasifler eklenirken [14]; ısıl bozunmayı minimize etmek ve arayüzdeki aşınmayı kontrol altında tutmak için yağlayıcılar kullanılmaktadır [15]. Son olarak, üretim maliyetlerini düşürmek ve malzemenin işlenebilirliğini artırmak amacıyla dolgu maddelerinden yararlanılır [16]. Bu kapsamda mika, vermikülit, potasyum titanat ve kauçuk, literatürde en sık karşılaşılan dolgu malzemeleri arasında yer almaktadır [17].

Sürtünme elemanlarında meydana gelen aşırı ısıl yüklenme, sürtünme katsayısında kararsızlığa ve elemanların hızla aşınmasına yol açmaktadır [18]. Literatürde 'fren zayıflaması' (brake fade) olarak tanımlanan bu fenomen, fren mesafesini uzatarak emniyeti tehdit eder. Benzer bir performans kaybı mekanizması, ıslak zemin koşullarında da kendini göstermektedir. Konuyla ilgili literatür incelendiğinde; Wang ve ark. [19], ıslak koşullardaki sürtünme katsayısının kuru duruma kıyasla %30'a varan oranlarda düştüğünü tespit etmiştir. Zhuan ve ark. [20] ise yürüttükleri karşılaştırmalı testlerde, ıslak koşulların sürtünme performansını belirgin şekilde baskıladığını doğrulamıştır. Mekanizmayı daha derinlemesine inceleyen Blau ve McLaughlin [21], ticari araç pabuçlarında su filminin yalnızca sürtünme katsayısını düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda temas yüzeyindeki transfer filminin yapısal karakteristiğini de değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Sürtünme elemanlarının karakteristik özelliklerini tayin etmek amacıyla literatürde çeşitli ampirik yöntemler kullanılmaktadır [22]. Bu yöntemler arasında öne çıkan dinamometre testleri, özellikle sürtünme çiftlerinin davranışlarını analiz etmek amacıyla yaygın olarak tercih edilmektedir [23]. Diğer test tekniklerine kıyasla dinamometre ile gerçekleştirilen çalışmalar, gerçek frenleme koşullarını ve operasyonel dinamikleri yüksek hassasiyetle simüle edebilme yeteneği sayesinde sahaya çok daha yakın ve gerçekçi sonuçlar sunmaktadır [24].

Trafik emniyetinin sürdürülebilirliği açısından fren pabuçlarının, yalnızca ideal kuru koşullarda değil, ıslak zeminlerde de benzer frenleme karakteristiğini koruması elzemdir. Demiryolu

standartlarında bu beklenti somut bir kriterle tanımlanmış olup; Uluslararası Demiryolları Birliği'nin (UIC) 541-4 nolu düzenlemesi, ıslak ve kuru koşullar arasındaki sürtünme katsayısı farkının maksimum %15 seviyesinde kalmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmanın odak noktasını, söz konusu gerekliliği karşılamak potansiyeli taşıyan ve özellikle kauçuk esaslı pabuçların vulkanizasyon sürecinde mekanik mukavemet ile hidrofobik direnci artıran yenilikçi bir takviye ajanı olan Vulkasil S oluşturmaktadır. Bu doğrultuda çalışma, Vulkasil S takviyesinin K tipi kompozit fren bloklarının ıslak ve kuru koşullardaki performansı üzerindeki etkinliğini, malzemenin mekanik özellikleri ve aşınma direnci üzerinden analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın özgünlüğünü pekiştirmek ve laboratuvar ölçeğinde elde edilen verilerin güvenilirliğini teyit etmek adına, geliştirilen bloklar gerçek demiryolu koşullarında saha testlerine tabi tutulmuş ve elde edilen bulgular laboratuvar sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. Metot

2.1. Blok balataların üretimi

Çalışma kapsamında, NBR kauçuk esaslı iki farklı blok balata bileşimi hazırlanmıştır. Referans grup olarak belirlenen ve Vulkasil S içermeyen birinci karışım; ağırlıkça %40 dolgu malzemesi, %25 lif, %5 aşındırıcı (abrazif), %2 katı yağlayıcı ve %28 bağlayıcıdan oluşmaktadır. İkinci karışım ise dolgu malzemesi oranı %35'e düşürülerek, kalan %5'lik kısım Vulkasil S ilavesi ile ikame edilmiştir.

Yapıya dahil edilen Vulkasil S; DPG gibi hızlandırıcıların yanı sıra hidroksil grupları ve trietanolamin ile di-sikloheksilamin gibi bazik azot içeren bileşikler kapsayan, takviye edici özelliğe sahip ekonomik bir silika dolgusudur [25].

Gerçek demiryolu işletme koşullarında kullanılmak üzere tasarlanan K tipi fren blokları, Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) 541-4 standardında tanımlanan 2xBgu (her taşıyıcıda çift sürtünme elemanı içeren konfigürasyon) geometrik normlarına uygun olarak imal edilmiştir.

Blok balata formülasyonunu oluşturan hammaddeler, laboratuvar tipi mikser yardımıyla 5 dakika süreyle karıştırılarak homojenize edilmiştir. Numunelerin hacimsel büyüklüğü dikkate alınarak, üretim sürecinde soğuk ön presleme yöntemi tercih edilmiştir. Bu aşamada, hassas terazi ile belirlenen gramajda tartılan karışım ön pres kalıbına yerleştirilmiştir. Ön şekillendirme işleminin ardından sıcak preste nihai formunu alan bloklar, kürleşme reaksiyonunu tamamlamak amacıyla laboratuvar tipi fırında 8 saat süreyle kürleme işlemine tabi tutulmuştur.

2.2. Fiziksel davranış analizi

Geliştirilen kompozit fren bloklarının malzeme karakterizasyonunu sağlamak ve üretim kalitesini doğrulamak amacıyla; sertlik, yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik testlerinden oluşan kapsamlı bir fiziksel analiz süreci yürütülmüştür. Malzemenin iç yapısındaki boşluk oranı ve bileşen dağılımı hakkında önemli veriler sunan yoğunluk tayini, ASTM D792 standardı esas alınarak Arşimet prensibi yöntemine göre, yoğunluk kiti entegre edilmiş AND GR-200 hassas terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yüzey özelliklerini belirlemek adına yapılan sertlik testlerinde ise Mitutoyo marka ölçüm cihazı kullanılmıştır; bu aşamada, malzemenin homojenliğini teyit etmek amacıyla numune yüzeyinin beş farklı noktasından ölçüm alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalaması raporlanmıştır. Fren endüstrisinde hem tasarım parametresi hem de imalat kalite göstergesi olarak kabul edilen sıkıştırılabilirlik değeri [26]; uygulanan spesifik bir basma yükü altında malzeme kalınlığındaki oransal azalmayı ifade etmektedir [27]. Bu bağlamda, frenleme koşullarını simüle etmek üzere

testler 160 bar hidrolik basınca karşılık gelen 8,74 MPa'lık yüzey basıncı altında uygulanmış ve tekrarlanılabilirliği artırmak adına beş tekrarın ortalaması esas alınmıştır.

2.3. Sürtünme performansı analizi

Mekanik performans analizleri, 166 kgm² maksimum atalet kapasitesine ve 2200 dev/dak volan hızına sahip ESAM marka atalet tipi dinamometre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cihaz, ıslak zemin koşullarını laboratuvar ortamında simüle edebilmek amacıyla, "UIC 548 Brakes - Requirements of friction test benches for the international certification of brake pads and brake blocks" standardı esas alınarak revize edilmiştir. Test protokolü olarak, Avrupa Demiryolu Ajansı'nın (ERA) ERA/TD/2013-02/INT kodlu teknik dokümanında tanımlanan dinamik sürtünme katsayısı programı referans alınmış; bu kapsamda 1–50 ve 52–95 numaralı frenleme senaryoları uygulanmıştır. İzlenen prosedürün özeti Tablo 1'de sunulmuştur. Asıl ölçümlere geçilmeden önce, blok ve disk yüzeyleri arasında tam uyumu sağlamak adına 50 çevrimlik bir yataklama (alıştırma) frenlemesi icra edilmiştir.

Tablo 1. Dinamometre test prosedürü [28]

Fren uygulama numarası	Başlangıç hızı (km/h)	Başlangıç sıcaklığı (°C)	Açıklama
1-3-5	90	50-60	Soğuma süresinin ardından kuru koşullarda tam durmaya kadar yapılan frenleme uygulamaları
2-4-6	120	50-60	
7 to 26	90	20-100	Koşullandırma duruşları
27-31-35-39-43-47	90	50-60	Soğuma süresinin ardından, kuru koşullarda tam duruşa kadar gerçekleştirilen frenleme uygulamaları
28-32-36-40-44-48	30	50-60	
29-33-37-41-45-49	120	50-60	
30-34-38-42-46-50	60	50-60	
52-56-60-64-68-72-76-80-84-88-92	90	20-30	Soğuma süresinin ardından, ıslak koşullarda tam duruşa kadar gerçekleştirilen frenleme uygulamaları
53-57-61-65-69-73-77-81-85-89-93	30	20-30	
54-58-62-66-70-74-78-82-86-90-94	120	20-30	
55-59-63-67-71-75-79-83-87-91-95	60	20-30	

2.4. Saha testleri

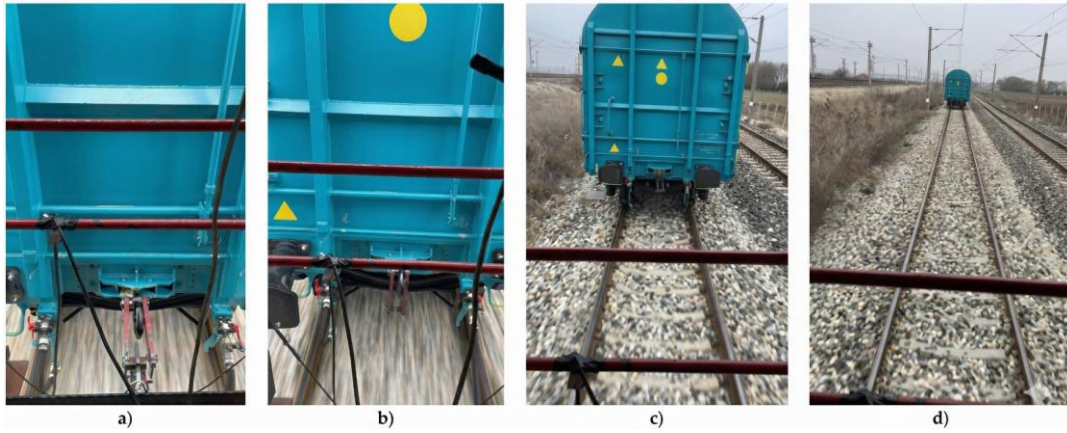
Saha testlerinde kullanılan tren dizisi veri toplama hassasiyeti gözetilerek özel olarak konfigüre edilmiştir. Bu dizi; cer gücünü sağlayan ana lokomotif, ölçüm ekibinin verileri anlık olarak izleyebildiği ve 'breakaway' (ayrılma) mekanizmasının kontrol edildiği bir pulman vagon ve test numunelerinin (fren bloklarının) monte edildiği Rılms tipi bir yük vagonundan oluşmaktadır. Bu çalışmada saha doğrulama kapsamı, WSP donanımı bulunmayan yük vagonu işletme koşulları ile sınırlı tutulmuş; WSP kontrollü araçlar çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Dinamik fren (slip) testleri İnönü–Çukurhisar (+288/+270 km) kesiminde 2023 yılının Temmuz ayında yapılmıştır. Test hattı, standardın gerektirdiği şekilde kurpsuz ve deversiz bir doğrultuda seçilmiş; ölçüm bölgesinin ortalama hat eğimi +0,26% olarak raporlanmıştır. Test öncesi hazırlık aşamasında fren blokları test gününden önce vagona monte edilmiş; temas yüzeyi oluşumunu ve yataklamayı desteklemek amacıyla kontrollü sürüş gerçekleştirilerek blokların temas paterni doğrulanmıştır (minimum %85 temas alanı). Saha testleri boyunca, tüm testlere yeni (aşınmamış profil) tekerleklerle başlanmış ve bu durum raporlanmıştır. Çevresel koşullar test sırasında

izlenmiş; anemometre ile hava durumu kayıt altına alınmış ve tekerlek/sürtünme elemanı sıcaklıkları lazer termometre ile test öncesinde kontrol edilmiştir. Başlangıç koşullarının tutarlılığını sağlamak adına her test koşusu öncesinde tekerlek sıcaklığının 100°C'nin altında ve ortalama sıcaklığın 60°C'nin altında olmasına dikkat edilmiştir.

Vagonun kinematik davranışlarını yüksek hassasiyetle izlemek amacıyla DS-IMU&GPS (Dewesoft) sistemi kullanılmıştır. Fren silindirlerindeki basınç değişimleri ve pnömatik tepki sürelerini milisaniye mertebesinde takip edebilmek için 0–6 bar aralığında çalışan Trafag basınç sensörleriyle ölçüm yapılmış; tüm sinyaller Dewesoft HD-STGS veri toplama ünitesiyle kayıt altına alınmıştır. Test prensibi, hareket halindeki diziden yük vagonunun mekanik olarak ayrılması ve ayrılma anında fren hortumlarının kopmasıyla oluşan basınç düşümü neticesinde vagonun otomatik acil frenlemeye geçmesi esasına dayanmaktadır; bu süreçte duruş mesafeleri hassas biçimde ölçülmüştür.

Şekil 1'de gösterilen test aşamaları, yük vagonunun hareket halindeki diziden mekanik olarak ayrılması prensibine dayanmaktadır. Ayrılma anında fren hortumlarının kopmasıyla birlikte düşen hava basıncı, vagonun otomatik olarak acil durum frenlemesine geçmesini sağlamakta ve bu esnada duruş mesafeleri hassas bir şekilde ölçülmektedir. Elde edilen verilerin istatistiksel güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlamak kritik önem taşıdığından; boş yük durumunda hem 100 km/s hem de 120 km/s hızlarında, tam yükte 100 km/s ve yarı yükte 120 km/s başlangıç hızlarında gerçekleştirilen her bir test seti, dört kez tekrarlanarak sonuçların tutarlılığı doğrulanmıştır. Tekrarlanabilirlik kapsamında, her senaryoda en az dört geçerli test elde edilmesi (veya tüm testlerin en az %70'inin geçerli olması) hedeflenmiş; başlangıç hız toleransı maksimum %4 ve başlangıç fren basıncı toleransı 0,2 bar ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 1. Yük vagonunun tren dizisinden ayrılması a) Kopma mekanizması devreye girmeden önce b) Vagonun tren dizisinden ayrılması c) Yük vagonunun frenlenmesi ve tren dizisinin yük vagonundan uzaklaşması d) Yük vagonunun durması

Saha testlerinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen verilerin değerlendirilmesi süreçlerinde UIC 544-1 standardı esas alınmıştır. Bu standart uyarınca, test anındaki nominal hıza karşılık gelen düzeltilmiş fren mesafesi S_{jcorr} , Denklem 1. kullanılarak hesaplanmıştır. Analizin devamında, tespit edilen bu duruş mesafesi verilerinden hareketle, fren bloklarında oluşan sürtünme kuvvetleri ve ortalama fren yavaşlaması aşağıda sunulan analitik bağıntılar yardımıyla türetilmiştir. Ayrıca, S_{jcorr} , ortalama fren yavaşlaması (adec) ve fren ağırlık yüzdesi (λ) değerleri WAG-TSI (UTP WAG) Tablo C.3'te verilen limitlerle karşılaştırılarak uygunluk kontrolü yapılmıştır.

$$S_{jcorr} = \frac{3,933 \times \rho \times v_{jnom}^2}{3,933 \times \rho \times v_{jmeas}^2 - i_m' \times s_{jmeas}} \times S_{jmeas} \quad (1)$$

S_{jmeas} : Test sırasında ölçülen fren mesafesi, V_{jnom} : Nominal başlangıç hızı, V_{jmeas} : Test sırasında ölçülen başlangıç hızı, ρ : Dönen kütlelerin atalet katsayısı

Fren blokları tarafından uygulanan toplam kuvvet (F_{dyn}) için Denklem 2. verilmiştir.

$$F_{dyn} = 2 \times (F_t \times i - 4F_R) \times \eta \quad (2)$$

F_t : Piston üzerindeki net kuvvet, i : Fren tertibatı oranı, F_R : Karşı kuvvet, η : Fren tertibatı verimi

Bir fren bloğu başına düşen kuvvet için Denklem 3. verilmiştir.

$$F_{1d} = \frac{F_{dyn}}{16} \quad (3)$$

Fren kuvveti (F_r) aracın kütlesi (m) ile aracın ivmesinin çarpımına eşittir. Fren kuvveti için Denklem 4. verilmiştir.

$$F_r = m \times a \quad (4)$$

Sürtünme katsayısı (μ) için Denklem 5. verilmiştir.

$$\mu = \frac{F_r}{F_{dyn}} \quad (5)$$

3. Bulgular

3.1. Fiziksel davranış analizinin sonuçları

Geliştirilen fren bloklarına ait sertlik, yoğunluk ve sıkıştırılabilirlik verileri Tablo 2’de özetlenmiştir. Tribolojik performansın kritik bir parametresi olan sertlik, sürtünme katsayısı üzerinde belirleyici bir role sahiptir; nitekim literatürdeki çeşitli çalışmalar, bu iki değişken arasında güçlü bir korelasyon olduğuna işaret etmektedir [30]. Özellikle fren sürtünme malzemeleri üzerine yapılan incelemeler, artan sertlik değerlerinin genellikle ortalama sürtünme katsayısını yükselttiğini ortaya koymaktadır [31]. Bununla birlikte, tribolojik etkileşimlerin karmaşık doğası gereği, bazı durumlarda daha yumuşak yapıların temas yüzey alanını artırarak sürtünme katsayısında artışa neden olabildiği de rapor edilmiştir [32].

Malzeme ömrü açısından değerlendirildiğinde ise özgül aşınma miktarının, ortalama sürtünme kuvveti ve malzeme yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir [33]. Genel bir kural olarak, yoğunluk ve sertlikteki artış, malzemenin aşınma direncini pozitif yönde etkilemektedir [34]. Bu bağlamda ideal bir fren bloğu tasarımı; minimum aşınma ve etkin güç aktarımı için yeterli rijitliği sağlarken, aynı zamanda disk yüzeyine optimum tutunmayı garanti edecek elastikiyeti de bünyesinde barındıran hassas bir dengeyi gerektirmektedir [35].

Tablo 2’deki veriler analiz edildiğinde, Vulkasil S takviyeli kompozit yapının referans numuneye kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine ve daha düşük aşınma oranlarına sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu iyileşme, formülasyona eklenen Vulkasil S takviyesinin üretim sürecindeki sıcaklık ve basınç altında matriste daha yoğun bir çapraz bağlanmayı tetiklemesine atfedilebilir. Matris yapısında gerçekleşen bu güçlendirilmiş çapraz bağlanma, malzemenin mekanik direncini artırmış; buna bağlı olarak da operasyonel koşullar altındaki ortalama aşınma miktarında belirgin bir azalma sağlanmıştır.

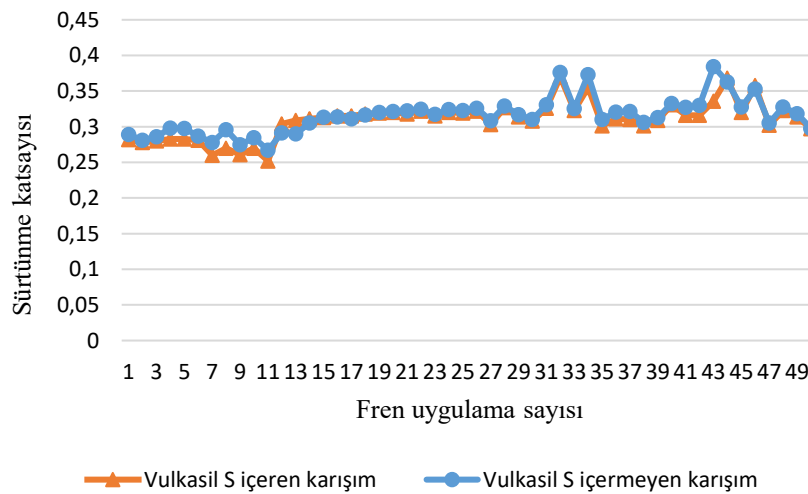
Tablo 2. Sertlik, yoğunluk ve aşınma sonuçları

	Sertlik (Shore D)	Yoğunluk gr/cm ³	Aşınma mm
Vulkasil S-içeren balata	60 Shore D	1,7985	0,25 mm
Vulkasil S-içermeyen balata	55 Shore D	1,7469	0,29 mm

3.2. Sürtünme performansı analizi sonuçları

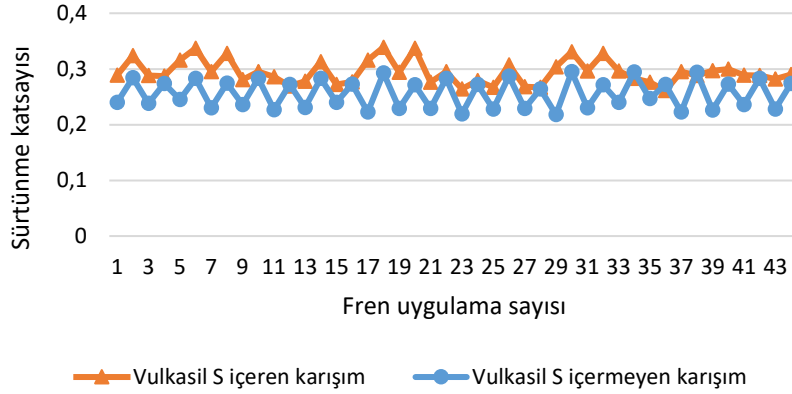
Emniyetli bir frenleme performansı için, kuru ve ıslak operasyonel koşullarda elde edilen sürtünme katsayıları arasındaki sapmanın %15 sınırını aşmaması kritik bir kriter olarak kabul edilmektedir [37]. Sürtünme davranışı, uygulanan fren kuvveti ve başlangıç hızı parametrelerine bağlı olarak irdelendiğinde; literatürdeki genel eğilim, ıslak koşulların sürtünme katsayısında düşüşe neden olduğu yönündedir [38]. Bu fenomenin temel mekanizması, suyun temas yüzeyindeki aşınma artıklarını (debris) uzaklaştırarak yüzeyi sürekli rejenere etmesi ile açıklanmaktadır [39]. Konuya mekanistik açıdan yaklaşan Blau ve McLaughlin [40], kuru koşullarda malzeme karakteristiğinin, ıslak koşullarda ise akışkanlar dinamiğinin dominant faktör olduğunu vurgulamıştır. Öte yandan El-Tayeb ve Liew [41], farklı malzeme kompozisyonlarının ıslak zemin performansında ciddi varyasyonlar yarattığını rapor etmiştir. Mevcut çalışmada yürütülen dinamometre testleri de bu bulguları destekler niteliktedir. Gözlemlenen bu davranışın, disk ile blok arayüzünde oluşan sıvı filminin, hidrodinamik bir yastık oluşturacak kritik hacme ulaşmadan ortamdaki hızla tahliye edilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Bunun yanı sıra, ortamdaki suyun aşınma artıkları (debris) ile girdiği etkileşim, temas yüzeyinde farklı karakterde bir tribo-film tabakası oluşturarak sürtünme dinamiğini değiştirmektedir. Kuru zemin koşullarında gerçekleştirilen ilk 50 frenleme çevrimine ait deneysel veriler Şekil 2’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında; Vulkasil S katkılı fren bloklarının, katkısız referans numunelere göre nispeten daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu, ancak genel performans eğilimi açısından iki grubun birbirine oldukça yakın seyrettiği görülmektedir.



Şekil 2. Kuru koşullardaki ilk 50 frenleme uygulaması

Islak zemin koşullarında yürütülen frenleme serisine ait test sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur. Veriler analiz edildiğinde; Vulkasil S takviyeli fren bloklarının, suyun sürtünme arayüzündeki olumsuz etkilerine karşı yüksek direnç gösterdiği ve sürtünme katsayısında anlamlı bir düşüş yaşanmaksızın kararlı bir performans sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 3. Islak koşullardaki ilk 50 frenleme uygulaması

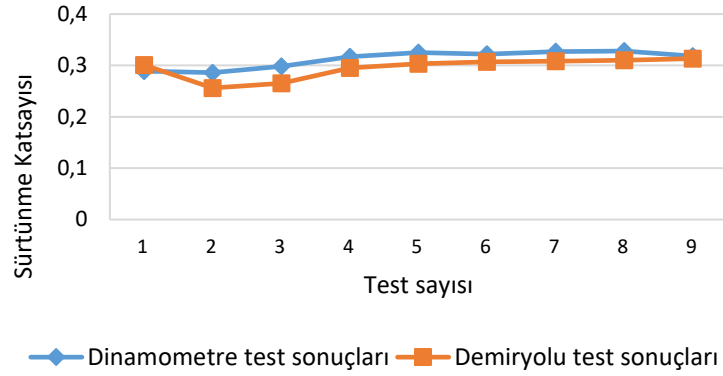
Deneyssel analizler sonucunda; kuru zemin koşullarında referans (Vulkasil içermeyen) numunenin ortalama sürtünme katsayısı 0,315, Vulkasil takviyeli numunenin ise 0,310 olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, Vulkasil kullanımının kuru sürtünme performansı üzerinde yalnızca ihmal edilebilir düzeyde marjinal bir düşüşe neden olduğunu göstermektedir. Ancak ıslak zemin koşullarına geçildiğinde iki kompozit arasındaki davranış farkı belirginleşmektedir. Referans numunenin ortalama sürtünme katsayısı 0,255'e gerileyerek, kuru performansa kıyasla yaklaşık %20 oranında bir kayıp yaşamıştır; bu değer, ilgili standartlarda izin verilen maksimum %15'lik sapma limitini aşmaktadır. Buna karşın, Vulkasil içeren kompozitin sürtünme katsayısı 0,295 seviyesinde tutunmuş ve performans kaybı yalnızca %5 ile sınırlı kalmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, formülasyona Vulkasil entegrasyonunun, ıslak zemin koşullarında sürtünme stabilitesini koruma ve performans düşüşünü minimize etme noktasında anlamlı bir iyileştirme sağladığını göstermektedir.

3.3. Demiryolu testleri sonuçları

Laboratuvar ölçekli dinamometre testleri, araç dinamiğini belirli bir seviyeye kadar simüle etme yeteneğine sahip olsa da; elde edilen verilerin güvenilirliğini ve genellenebilirliğini sağlamak adına, prototiplerin gerçek demiryolu operasyonel koşullarında sınanması metodolojik açıdan hayati önem taşımaktadır [42]. Özellikle gerçek bir demiryolu aracının frenleme mimarisi incelendiğinde; sistemin genellikle çoklu sürtünme bloğu konfigürasyonuna sahip olduğu ve frenleme momentinin, dönen karşı eleman ile bu çoklu blok yapısı arasındaki karmaşık tribolojik etkileşim sonucu üretildiği görülmektedir. Bu bağlamda, daha izole ve basitleştirilmiş koşullar sunan dinamometre düzeneklerinin, gerçek tren frenleme sürecinin tüm değişkenlerini yansıtmada noktasında doğal kısıtları bulunduğu göz ardı edilmemelidir [43].

Bu kısıtları analiz etmek amacıyla, laboratuvar ortamındaki dinamometre testlerinden ve sahada gerçekleştirilen gerçek demiryolu testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı profilleri Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Veriler irdelendiğinde; analitik hesaplamalarla sahadan

türetilen sürtünme katsayıları ile kontrollü laboratuvar ortamında kaydedilen değerlerin, karakter ve eğilim olarak birbirleriyle yüksek bir paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. İki farklı test disiplini arasında sağlanan bu uyum, laboratuvar verilerinin ölçeklenebilirliğini desteklemesi ve dinamometre test prosedürünün geçerliliğini (validasyonunu) doğrulaması açısından kritik bir bulgu niteliğindedir.



Şekil 4. 120 km/s hızda demiryolu ve dinamometre testlerinin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması

UTP/WAG Tablo C.3'e göre uygunluk değerlendirmesi kapsamında saha testlerinden elde edilen düzeltilmiş duruş mesafesi (S_{jcorr}), ortalama fren yavaşlaması (a_{dec}) ve fren ağırlık yüzdesi (λ) değerleri standardın kabul aralıkları ile karşılaştırılmıştır. Boş yük senaryosunda 100 km/s için $S_{jcorr}=391$ m, $a_{dec}=1,03$ m/s² ve $\lambda=122\%$ değerleri; 120 km/s için ise $S_{jcorr}=655$ m, $a_{dec}=0,93$ m/s² ve $\lambda=109\%$ değerleri ilgili limit aralıkları içinde kalmıştır. Aynı uygunluk kontrolü yarı ve tam yük senaryoları için de gerçekleştirilmiş ve Tablo C.3 kriterlerinin sağlandığı doğrulanmıştır.

4. Sonuç

Demiryolu taşımacılığında operasyonel emniyetin sürdürülebilirliği, fren bloklarının yalnızca ideal kuru koşullarda değil, ıslak ve değişken çevresel şartlar altında da performans stabilitesini korumasına bağlıdır. Mevcut literatür ve endüstriyel beklentiler, fren elemanlarının ıslak zeminlerde de yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı sergilemesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmanın temel amacı; kompozit fren bloklarına Vulkasil S takviyesi yaparak, ıslak ve kuru sürtünme performansları arasındaki 'histerezis' farkını minimize etmek ve nemli hava koşullarında oluşabilecek frenleme zafiyetlerini gidermektir.

Elde edilen tribolojik bulgular, çalışılan parametre aralığında akışkanlar dinamiğinin beklendiği kadar belirleyici bir rol oynamadığını göstermiştir. Disk ile blok arayüzündeki sıvı tabakası, hidrodinamik bir yastık oluşturacak kritik hacme ulaşmadan temas bölgesinden tahliye edilmiştir. Ancak ortamdaki suyun aşınma artıkları (debris) ile etkileşimi, yüzeyde farklı karakteristikte bir tribo-film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısını modifiye etmiştir.

Metodolojik açıdan değerlendirildiğinde; dinamometre testleri gerçek yol koşullarını simüle etmede yetkin bir yöntem olsa da, nihai doğrulama için prototiplerin gerçek işletme şartlarında sınanması operasyonel emniyet açısından elzemdir. Bu bağlamda, sahada gerçekleştirilen testlerden elde edilen sürtünme katsayıları ile dinamometre verileri karşılaştırılmış ve sonuçların yüksek bir paralellik gösterdiği saptanmıştır. Saha testleri standartlar gereği yalnızca kuru koşullarda icra edilmiş olsa da, bu koşullarda sağlanan yüksek korelasyon, dinamometre test düzeneğinin geçerliliğini (validasyonunu) kanıtlamış ve dolaylı olarak ıslak test verilerinin de

geçerliliğini teyit etmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda, farklı hat eğimleri ve çevresel koşullar altında daha uzun süreli saha testleri gerçekleştirilmesi, ayrıca WSP donanımlı araçlarda ve farklı blok/tekerlek aşınma durumlarında performansın değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayii A.Ş. ve Kale Balata tarafından desteklenmiştir [118G039].

Kaynakça

- [1] C. Cruceanu, "Train braking," in *Reliability and Safety in Railway*, 2012, pp. 29–75, doi: 10.5772/37552.
- [2] C. Cruceanu and C. Camil, "Aspects regarding the braking capacity of composite brake shoes for railway vehicles," *Materiale Plastice*, vol. 56, no. 1, pp. 18–21, 2019, doi: 10.37358/MP.19.1.5115.
- [3] M. Günay, M. Korkmaz, and R. Ozmen, "An investigation on braking system used in railway vehicles," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, pp. 421–431, 2020, doi: 10.1016/j.jestech.2020.01.009.
- [4] W. Sawczuk, "The application of vibration accelerations in the assessment of average friction coefficient of a railway brake disc," *Measurement Science Review*, vol. 17, no. 3, pp. 125–134, 2017, doi: 10.1515/msr-2017-0016.
- [5] E. Akagündüz, A. Topuz, and M. Günes, "Effects of fly ash additive on the properties of railway composite disc brake linings," *Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 32, pp. 322–333, 2014.
- [6] W. Sawczuk, A. Canas, D. Ulbrich, and J. Kowalczyk, "Modelling the average and instantaneous friction coefficient of a disc brake on the basis of bench tests," *Materials*, vol. 14, no. 6, pp. 2–21, 2021, doi: 10.3390/ma14164766.
- [7] Composite Brake Blocks- General Conditions for Certifications and Use, 5th ed., UIC Leaflet 541-4, 2018.
- [8] M. Bulut, O. Ozbek, O. Bozkurt, and A. Erklig, "Effect of nano clay particle inclusion on axial and lateral buckling characteristics of basalt fiber reinforced composites," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37, no. 4, pp. 1985–1995, 2022, doi: 10.17341/gazimmfd.951024.
- [9] P. Blau, *Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives*, OAK Ridge National Laboratory Documents, USA, 2001, doi: 10.2172/788356.
- [10] W. Osterle, M. Griepentrog, T. Gross, and I. Urban, "Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes," *Wear*, vol. 251, pp. 1469–1476, 2001, doi: 10.1016/S0043-1648(01)00785-2.
- [11] D. Chan and G. Stachowiak, "Review of automotive brake friction materials," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, no. 3, pp. 953–966, 2004, doi: 10.1243/0954407041856773.
- [12] M. Eriksson, F. Bergman, and S. Jacobson, "On the nature of tribological contact in automotive brakes," *Wear*, vol. 252, pp. 26–36, 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(01)00849-3.
- [13] B. Rajan, M. Balaji, and K. Sathickbasha, "Influence of binder on thermomechanical and tribological performance in brake pad," *Tribology in Industry*, vol. 40, no. 4, pp. 654–669, 2018, doi: 10.24874/ti.2018.40.04.12.
- [14] T. Gomes, M. Soares, and C. Bergmann, "The size effect of silicon carbide particles on the wear of brake pad materials," in *Euro Brake*, 2020, pp. 1–6, doi: 10.46720/eb2020-fbr-024.
- [15] A. Eakambaram, M. Saibalaji, and P. Sethupathi, "Role of solid lubricants/sulfide mix in brake performance for automotive applications a review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, doi: 10.1177/09544089221110982.
- [16] I. Ezekiel, F. Inambao, and G. Adewumi, "Effects of fiber, filler and binders on automobile brake pad performance: A review," *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 10, pp. 135–150, 2019.
- [17] A. Unal, "Investigation of braking system and composite brake pads in train sets based on thermo-mechanical finite element analysis," Ph.D. dissertation, Marmara University, Turkey, 2022.

- [18] F. Talati and S. Jalalifar, "Analysis of heat conduction in a disk brake system," *Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 1047–1059, 2009, doi: 10.1007/s00231-009-0476-y.
- [19] F. Wang, K. Gu, W. Wang, Q. Liu, and M. Zhu, "Study on braking tribological behaviours of brake shoe material under the wet condition," *Wear*, vol. 342, no. 10, pp. 262–269, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2015.09.003.
- [20] L. Zhuan, X. Peng, X. Xiang, and Z. Sh-hua, "Tribological characteristics of C/C-SiC braking composites under dry and wet conditions," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 18, pp. 1071–1075, 2008, doi: 10.1016/S1003-6326(08)60183-1.
- [21] P. Blau and J. McLaughlin, "Effects of water films and sliding speed on the frictional behaviour of truck disc brake materials," *Tribology International*, vol. 36, pp. 709–715, 2003, doi: 10.1016/S0301-679X(03)00026-4.
- [22] M. Kim, J. Kim, B. Goo, and N. Kim, "Comparative studies of the tread brake dynamometer between dry and wet conditions," in *Selected Topics in System Science and Simulation in Engineering*, 2010, pp. 479–483.
- [23] A. Sinha, G. Ischia, C. Menapace, and S. Gialanella, "Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials," *Atmosphere*, vol. 11, no. 10, 2020, doi: 10.3390/atmos11101102.
- [24] A. Tamayo, F. Rubio, and R. Aparicio, "Preparation and properties of sustainable brake pads with recycled end-of-life tire rubber particles," *Polymers*, vol. 13, no. 9, 2021, doi: 10.3390/polym13193371.
- [25] S. Din, "Application of feldspar filler on curing characteristics and physical properties of elastomeric materials," B.E. thesis, University Sains Malaysia, 2022.
- [26] E. Sendler, B. Greening, and C. Greening, "Continued study of the effect of humidity levels on the compressibility of automotive brake friction materials," *SAE International*, 2022, doi: 10.4271/2022-01-1164.
- [27] Y. Go, Y. Liu, C. Lu, S. Hu, and X. Song, "Effect of compressive strain of brake pads on brake noise," *Shock and Vibration*, 2020, doi: 10.1155/2020/8832363.
- [28] Technical Document Friction Elements for Wheel Tread Brakes for Freight Wagons, European Railway Agency, Interoperability Unit, 2015.
- [29] T. Cionita et al., "The influence of filler loading and alkaline treatment on the mechanical properties of palm kernel cake filler reinforced epoxy composites," *Polymers*, vol. 14, 2022, doi: 10.3390/polym14153063.
- [30] A. Unal and O. Demirdalmis, "The effects of using apricot kernell shell, an environmentally friendly material, in composite brake pads on friction performance," *Tribology International*, vol. 197, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109734.
- [31] B. Sugözü and İ. Sugözü, "Examination of the tribological properties of brake pads with different hardness characteristics," *Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology*, vol. 7, 2021, doi: 10.26579/jocrest.83.
- [32] Z. Stadler, K. Krnel, and T. Kosmac, "Friction behaviour of sintered metallic brake pads on a C/C-SiC composite brake disc," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, 2007, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.032.
- [33] B. Sugözü and B. Daghan, "Tribological properties of brake friction materials abrasives (Alumina, Silica, Zirconia)," *Nevşehir J. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 14–23, 2018, doi: 10.17100/nevbiltek.365160.
- [34] H. Yavuz and H. Bayrakceken, "Friction and wear characteristics of brake friction materials obtained from fiber and huntite blends," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 74, pp. 844–852, 2022, doi: 10.1108/ILT-03-2022-0079.
- [35] M. Makrahy, N. Ghazaly, and A. Moaaz, "Effect of compressibility of brake friction materials on vibration occurrence," *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Transport and Vehicle Engineering*, vol. 11, 2017, doi: 10.1999/1307-6892/10008209.
- [36] G. Akincioglu, S. Akincioglu, H. Öktem, and İ. Uygur, "Brake pad performance characteristic assessment methods," *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol. 5, pp. 67–78, 2021, doi: 10.30939/ijastech..848266.
- [37] Brakes – Brakes with composite brake blocks – General conditions for certification of composite brake blocks, 3rd ed., UIC CODE 541-4, May 2007.
- [38] P. Perez, D. Eldugue, D. Lopez, I. Sola, J. Yaben, and I. Claveria, "Full-scale dynamometer tests of composite railway brake shoes including latxa sheep wool fibers," *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134533.

- [39] N. El-Tayeb and K. Liew, “Effect of water spray on friction and wear behaviour of non-commercial and commercial brake pad materials,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 208, pp. 135–144, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.111.
- [40] P. Blau and J. McLaughlin, “Effects of water films and sliding speed on the frictional behaviour of truck disc brake materials,” *Tribology International*, vol. 36, pp. 709–715, 2003.
- [41] N. El-Tayeb and K. Liew, “On the dry and wet sliding performance of potentially new frictional brake pad materials for automotive industry,” *Wear*, vol. 266, pp. 275–287, 2009, doi: 10.1016/j.wear.2008.07.003.
- [42] A. Unal and N. Akkus, “Analytical and experimental investigation of composite pads created by using coke dust against the fading problem in railway vehicles,” *Institution of Mechanical Engineers Journal of Rail and Rapid Transit*, 2022, doi: 10.1177/09544097221100920.
- [43] Y. Wu, J. Mo, B. Tang, J. Xu, B. Huang, Z. Xiang, and Z. Zhou, “Tribological and dynamical analysis of a brake pad with multiple blocks for a high-speed train,” *Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Tribology*, pp. 1–18, 2019, doi: 10.1177/1350650119896456.

Özgeçmiş



Abdülkadir ÜNAL

İstanbul Teknik Üniversitesinde öğretim görevlisi doktor olarak çalışmaktadır. Aynı zamanda İTÜ İleri Araç Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezinde Müdür Yardımcısı olarak görev yapmaktadır. Doktora derecesini Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünden almıştır. Araştırma alanları: biyo-kompozit malzemeler, demiryolu araçları ve robotiktir.
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 çalışmanın hazırlanması sürecinde, yapay zekâ tabanlı araçlardan yalnızca yazım dili, dilbilgisi ve anlatımın iyileştirilmesi amacıyla yararlanılmıştır. Yapay zekâ araçları, literatür taraması, çalışmanın bilimsel içeriğinin oluşturulması, veri analizi, sonuçların elde edilmesi veya yorumlanması süreçlerinde kullanılmamıştır. Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Abdülkadir ÜNAL: Kavramsallaştırma, Yöntem, Kaynakların temini, Doğrulama, Yazım – Özgün taslağın hazırlanması. Ozan DEMİRDALMIŞ: Kavramsallaştırma, Yöntem, Kaynakların temini, Doğrulama.