Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi / Research Article

Ağır Hizmet Araçlarında Fren Disklerinin Kompozisyonunda Silisyum ve Bakır Elementlerinin Arttırılmasının Balata Aşınmasına Etkisi

The Effect of Increasing Silicon and Copper Elements in the Composition of Brake Discs on Pad Wear in Heavy-Duty Vehicles

Zehra Çınarcık[1*], Özgün Cem Yılmaz[2], Bora Güntay[3]

[1] Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş, Ürün Tasarım ve Geliştirme, zehra.cinarcik@egefren.com.tr
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1775-3425

[2] Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş., Ürün Tasarım ve Geliştirme, cem.yilmaz@egefren.com.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1222-7718

[3] Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş., Ürün Tasarım ve Geliştirme, bora.guntay@egefren.com.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8526-3285

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12.11.2025
Revizyon 09.01.2026
Kabul 06.04.2026
Online 25.06.2026

Anahtar Kelimeler:

Si, Cu, Ağır ticari araç fren disk mikroyapısı, Termal iletkenlik, Homojen grafit lamelleri, Grafit boyutu

ÖZ

Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan gri dökme demir fren disklerinin malzeme kompozisyonunun balata aşınma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle silisyum (Si) ve bakır (Cu) elementlerinin oranlarındaki artışın, balata aşınmasını azaltmadaki rolü değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, referans kompozisyona sahip bir fren diski (Numune 1) kullanılarak, ISO 26866 standardına uygun şekilde atalet dinamometresi testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda, balatalarda beklenenden yüksek aşınma oranları gözlemlenmiştir. Yapılan mikroyapı analizleri, bu aşınmanın, grafit lamellerin kısa ve ince morfolojisinden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Bu durumu iyileştirmek amacıyla, artırılmış Si ve Cu içeriğine sahip yeni bir fren diski (Numune 2) üretilmiş ve aynı test prosedürüne tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler, yeni disk ile gerçekleştirilen testlerde balata aşınmasının, test limiti değerine göre yaklaşık %26, referans numuneye göre ise yaklaşık %40 oranında azaldığını göstermiştir. Mikroyapı incelemeleri, yeni disk örneğinde daha kalın ve uzun grafit yapılarının oluştuğunu, bunun da Si ve Cu oranlarındaki artışla ilişkili olduğunu doğrulamıştır. Elde edilen bulgular, yüksek Si ve Cu içeriğine sahip gri dökme demir disklerin daha stabil bir sürtünme davranışı sergilediğini ve balata aşınmasını önemli düzeyde azalttığını göstermektedir. Bu çalışma, ağır ticari araçlarda fren sistemlerinin dayanıklılığını artırmaya yönelik malzeme parametrelerinin iyileştirilmesi ve mühendislik tasarımlarına önemli katkılar sağlamaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12.11.2025
Received in revised form 09.01.2026
Accepted 06.04.2026
Available online 25.06.2026

Keywords:

Si, Cu, Microstructure of heavy commercial vehicle brake disc, Thermal conductivity, Homogeneous graphite lamellar, Graphite size

ABSTRACT

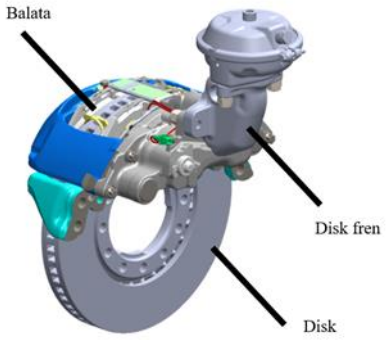
In this study, the effect of the material composition of gray cast iron brake discs used in heavy commercial vehicles on brake pad wear performance was investigated. In particular, the role of increased proportions of silicon (Si) and copper (Cu) in reducing pad wear was evaluated. In the first stage of the study, a reference composition brake disc (Sample 1) was tested using an inertia dynamometer in accordance with the ISO 26866 standard. The tests revealed higher than expected wear rates on the pads. Microstructural analyses indicated that this excessive wear was caused by the short and thin morphology of the graphite lamellae. To address this issue, a new brake disc (Sample 2) with increased Si and Cu contents was produced and subjected to the same testing procedure. The results showed that, compared to the reference sample, pad wear decreased by approximately 40%, and by around 26% relative to the test limit value. Microstructural examinations confirmed that the new disc contained thicker and longer graphite structures, which were associated with the higher Si and Cu levels. The findings demonstrate that gray cast iron discs with elevated Si and Cu contents exhibit more stable friction behavior and significantly reduce pad wear. This study makes significant contributions to engineering designs and the improvement of material parameters aimed at enhancing the durability of brake systems in heavy commercial vehicles.

Doi: 10.24012/dumf.1822206

* Sorumlu Yazar

Giriş

Fren sistemleri, kara taşıtlarının sürüş güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir [1]. Ağır ticari araçlarda (kamyon, otobüs, çekici vb.) frenleme işlemi, aracın hareket enerjisinin (kinetik enerji) sürtünme yoluyla ısıya dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, disk fren düzenekleri, bir fren diski (rotor) ve fren balatasından oluşmaktadır. Fren uygulandığında, balata üzerine uygulanan kuvvet, balatanın diske doğru itilmesine neden olur ve bu süreç, disk ile balata arasında kayma sürtünmesine dayalı bir temasın oluşmasını sağlar. Sürtünme nedeniyle gerçekleşen enerji dönüşümü sırasında, fren balatası ve disk arasında aşınmalar meydana gelir ve bu süreç yüksek sıcaklıkların oluşmasına yol açmaktadır [2-4].



Şekil 1. Fren sistemi

Ağır ticari araç fren disklerinin üretiminde en yaygın olarak tercih edilen malzeme gri dökme demirdir (GDD, lamel grafitli dökme demir). Bu malzeme, düşük maliyetinin yanı sıra yüksek ısıl iletkenliği, aşınma ve ısıl yorulma direnci, titreşim sönümleme yeteneği ve mekanik dayanımı gibi avantajları nedeniyle fren disklerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır [1, 3]. Lamel grafitli dökme demirler, tipik olarak %3–4 arasında karbon (C) ve %1–2 arasında silisyum (Si) içeriğine sahip olan standart bileşim aralıklarına sahiptir. Mikro yapının kontrolü ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla, mangan (Mn), bakır (Cu) ve fosfor (P) gibi katkı elementleri sınırlı oranlarda bu alaşıma eklenmektedir.

Si, lamel grafitli dökme demirde grafit oluşumunu teşvik eden başlıca element olarak öne çıkmaktadır. Si içeriğinin artırılması, dökme demirin faz diyagramında karbon eşdeğerini yükselterek ötektik dönüşüm noktasını sola kaydırmakta ve grafit oluşumunu desteklemektedir. Bu etkileşim, özellikle Cu gibi diğer alaşım elementlerinin grafit oluşumu üzerindeki sınırlayıcı etkilerini dengeleyerek, malzemenin gerekli ısıl ve mekanik performansını sağlamaktadır [6, 7]. Si ve Cu'nun birlikte kullanımı, fren diskinin tribolojik performansında önemli avantajlar sunmaktadır. Si'nin grafit oluşumunu düzenleyici etkisi ile Cu'nun perlit oranını artırıcı rolü birleştiğinde, hem iyi bir ısı iletkenliği hem de yüksek aşınma direnci sağlanabilmektedir [3, 8].

Fren sistemlerinde güvenli ve etkili yavaşlama, balata ile disk arasındaki temas yüzeyinde kararlı bir sürtünme katsayısının oluşmasına bağlıdır [3, 5]. Bu sürtünme, aracın kinetik enerjisini ısıya dönüştürerek yüzey sıcaklıklarını kısa sürede 400–600 °C aralığına yükseltmektedir. Sınırlı temas alanı nedeniyle balata ve diskte yüksek basınç ve sıcaklıklar oluşmakta; bu da ısıl gerilim, oksidasyon ve mikro çatlak gibi olumsuz etkiler yaratmaktadır [1]. Bu nedenle, balatanın ve diskin mikroyapısı ile yüzey pürüzlülüğü, tribolojik davranış açısından büyük öneme sahiptir [11].

Gri dökme demir disklerde, grafit lamelleri sürtünme sırasında katı yağlayıcı gibi davranarak yüzeydeki metal temasını kısmen azaltmaktadır. Si ve Cu gibi alaşım elementleri ise grafit morfolojisini ve matris sertliğini değiştirerek, sürtünme yüzeyinde oksitlenmeyi, aşırı plastik deformasyonu ve mikro çatlak oluşumunu engellemeye katkı sağlamaktadır [5, 12].

Fren balataları, sürtünme sırasında kademeli olarak aşınan sarf malzemelerdir ve kalınlıkları kritik seviyeye ulaştığında güvenli frenleme sağlamak için değiştirilmektedir. Bu nedenle, balata ve disk aşınmasının azaltılması yalnızca bakım maliyetlerini ve malzeme kaybını düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda balata ve diskten kaynaklanan partikül emisyonlarını da azaltarak çevresel fayda sağlamaktadır.[10].

Literatürde yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, Si ve Cu oranlarının iyileştirilmesiyle frenleme sırasında balata aşınmasının belirgin şekilde azaltılabileceğini ve tribolojik davranışın iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Son yıllarda, gri dökme demir fren disklerinin mikroyapısal özelliklerin geliştirilmesi ve tribolojik davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla çok sayıda deneysel ve teorik çalışma yayımlanmıştır [1-3]. Mevcut araştırmaların büyük bir kısmı, farklı alaşım elementlerinin disk ömrü, aşınma direnci ve sürtünme karakteristiği üzerindeki etkilerini analiz etmekte ve özellikle laboratuvar ölçeğinde yapılan sürtünme testleri ile mikroyapı karakterizasyonlarına odaklanmaktadır [8-12].

Singhal ve arkadaşları çalışmalarında (2020), gri dökme demire Si ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. SEM ile yapılan mikroyapı analizleri ve çekme-sertlik testlerine göre, Si oranı arttıkça yumuşak grafit lamellerinin hacmi ve tane boyutunun büyüdüğünü; bunun da sertlik ve çekme dayanımını azalttığını göstermişlerdir [3].

Musa ve arkadaşlarının çalışmasında (2016), farklı Cu içeriklerine (0%-1,1%) sahip gri dökme demirlerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Hazırlanan numuneler ASTM E23 darbe testi standardına göre test edilmiştir. Test sonuçları, Cu oranının artmasıyla grafit lamellerinin kalınlaştığını ve darbe dayanımının arttığını göstermiş; özellikle %1,1 Cu içeren alaşımın titreşim sönümleme uygulamaları için ideal olduğu ortaya konmuştur [8].

Tonolini ve arkadaşları (2023), gri dökme demir fren disklerinde niobyum (Nb) oranının malzemenin aşınma direncine etkisini pin-on-disc (PoD) aşınma testleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında, %0,3 Nb eklenmesinin en yüksek aşınma direncini sağladığını tespit etmişlerdir [9].

Bununla birlikte, ağır ticari araçlar için geliştirilen büyük çaplı disklerin, gerçek servis koşullarına yakın test rejimleri ve endüstriyel atalet dinamometreleri kullanılarak değerlendirilmesi nadiren ele alınmaktadır. Literatürde, Si ve Cu gibi yaygın alaşım elementlerinin birlikte iyileştirilmesi ve bunların balata aşınması, yüzeydeki mikro çatlak oluşumu ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri konusunda özgün, kapsamlı ve karşılaştırmalı çalışmalar bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın hedefi, Si ve Cu oranları ayarlanmış iki farklı gri dökme demir disk kompozisyonunun, ağır ticari araçlar için endüstriyel ölçekte üretilmesi ve ISO 26866 standardına uygun atalet dinamometresi testleriyle balata aşınması açısından karşılaştırılmasıdır. Ayrıca, elde edilen bulgular mikroyapı analizleriyle birleştirilerek, sürtünme yüzeyinde oluşan değişimlerin balata ömrüne ve sistem performansına etkisi incelenmektedir.

Çalışmanın materyal ve metot bölümünde, test edilen numune diskler tanıtılmış, üretim metodunda yapılan iyileştirici önlemler açıklanmış, numunelerin geometrik yapısı ve malzeme kompozisyonları tanımlanmıştır. Ayrıca, saha kullanımını temsil eden atalet dinamometresi test ünitesinin yapısı ve test koşullarının sınır şartları tanıtılmış ve inceleme yöntemi açıklanmıştır. Bulgular bölümünde ise, numunelerin detaylı incelemesi ve karşılaştırılması yapılmıştır.

Materyal ve metot

Bu çalışmada, gri dökme demir fren disklerinin mikroyapı ve tribolojik davranışlarını analiz edebilmek amacıyla iki farklı kimyasal kompozisyona sahip numune disk hazırlanmıştır. Mevcut imalat yöntemiyle üretilen disk Numune 1, malzeme kompozisyonunda değişiklik yapılarak üretilen disk ise Numune 2 olarak adlandırılmıştır. Çalışmada, disklerin geometrik ve malzeme özellikleri tanıtılmış, Numune 2 üretiminde yapılan element oranı değişiklikleri açıklanmış ve iki numune arasındaki farklar vurgulanmıştır. Ayrıca, test düzeneği, test koşulları, inceleme yöntemleri ve kullanılan parametreler hakkında detaylı bilgiler paylaşılmıştır.

Numune tanıtımı

Fren diskleri Şekil 2'de gösterildiği gibi, 22,5" jant ölçüsüne uygun, Ø430 mm dış çap ve 45 mm kalınlık ölçüsüne sahip havalandırmalı disklerdir. Diskler, EN-GJL-150 eşdeğeri GDD malzemeden üretilmiş olup, yaklaşık %3,2 C, %1,5–2,0 Si, %0,5 Mn ve %0,3 Cu içeren standart bir kimyasal kompozisyona sahiptir [8]. İki numune arasındaki temel fark, silisyum (Si) ve bakır (Cu) oranlarının kontrollü şekilde değiştirilmesidir. Numunelerin spektrometre ile ölçülen kompozisyonları Tablo 1'de gösterilmiştir. Numune 1'in kompozisyonunda %1,63 Si ve %0,81 Cu bulunurken, Numune 2'nin malzeme kompozisyonunda bu oranlar %1,89 Si ve %0,85 Cu'dur. Ergitme ve döküm işlemlerinde, C, Mn, Cr, Mo gibi diğer elementlerin oranları sabit tutulmuş, yalnızca Si ve Cu oranları değiştirilmiştir.



Şekil 2. Fren diski

Tablo 1. Malzeme kompozisyonları

	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Cu	% Mo
EN-GJL-150	3,20 - 3,50	1,80 - 2,40	0,40 - 0,80	0,15 - 0,50	0,50 - 1,00	Max 0,10
Numune 1	3,39	1,63	0,53	0,18	0,81	0,001
Numune 2	3,29	1,89	0,53	0,18	0,85	0,001

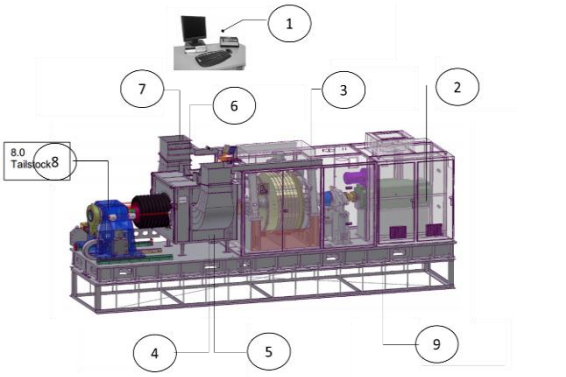
Deneysel Çalışma

Balata aşınma performansının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, iki farklı tip gri dökme demir disk üzerinde ISO 26866:2009 standardına uygun aşınma testleri gerçekleştirilmiştir [13]. Testlerde, ağır ticari araçlarda kullanılan 430 mm çapında diskler ve uygun boyutlu balata setleri, endüstriyel bir atalet dinamometresi üzerinde kullanılmıştır. Testler için aynı üreticide imal edilmiş ve aynı üretim partisinden seçilmiş numune balatalar kullanılmıştır.

Atalet dinamometresinin temel işlevi, test edilen fren sistemine, aracın gerçek sürüş koşullarındaki kinetik

enerjisine eşdeğer bir atalet momenti uygulamaktır. Ağır ticari araçlara yönelik testlerde, simüle edilecek aks yüküne karşılık gelen atalet momenti, volan setlerinin uygun kombinasyonlarıyla hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Bu doğrultuda, standartta belirtilen 1389 (% ±5) kgm² değerine en yakın olan 1392,5 kgm² atalet momenti seçilmiştir.

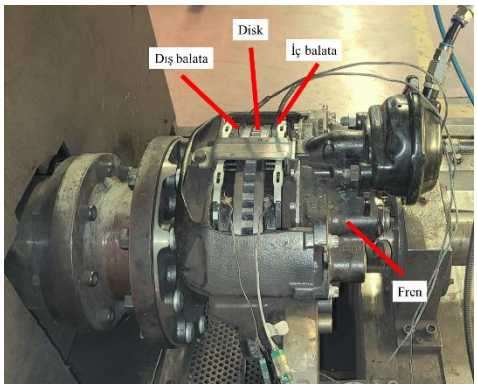
Şekil 3'de gösterildiği üzere, dinamometre dokuz ana bölümden oluşmaktadır. Motor (2) tarafından döndürülen atalet volanları (3), aracın yüklü ağırlığını temsil ederken, fren reaksiyon aparatına (8) yataklanmış dingil ucu parçaları üzerinden bağlanmıştır ve kapalı bir kabin (6) içinde çalışmaktadır. Frenleme torku, hat basıncı, sıcaklık ve devir hızı gibi veriler bir veri toplama ünitesi (5) ile kaydedilmiş; kabin içi sıcaklık ise havalandırma sistemi (7) yardımıyla şartlandırılmıştır. Basınçlı hava sistemi ve valf (4) aracılığıyla belirlenen sınır şartlarına uygun olarak frenleme yapılabilmektedir. Tüm düzenek, sönümleyici bir şasi (9) üzerine monte edilmiş ve bir kontrol bilgisayarı (1) üzerinden canlı olarak izlenmiştir.



Şekil 3. Link (Model 6900) Atalet dinamometresi test düzeneği; (1) Kontrol bilgisayarı, (2) Motor, (3) Atalet volanları, (4) Basınçlı hava sistemi ve valf, (5) Veri toplama ünitesi, (6) Kabin, (7) Havalandırma sistemi, (8) Reaksiyon aparatı, (9) Şasi [14]

ISO 26866 standardında tanımlandığı şekilde, testler balataların yataklama (bedding) süreci ile başlatılmış ve ardından farklı hız ve sıcaklık koşullarında yürütülen aşınma döngüleri uygulanmıştır. Frenleme basıncı, tüm test adımlarında 1,5 m/s² yavaşlama ivmesini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Döngüler, 60 km/h'den 10 km/h'ye ve 100 km/h'den 50 km/h'ye kadar gerçekleştirilen frenlemelerden oluşmaktadır.

Aşınma davranışının sıcaklık bağımlılığını incelemek amacıyla, testler kademeli olarak artırılan başlangıç sıcaklıklarında yürütülmüştür. Bu kapsamda, Tablo 2'de detayları verildiği şekilde 100, 200, 300, 400 ve 500 °C seviyelerinde frenleme adımları uygulanmış; her sıcaklık seviyesinde belirli sayıda 60 - 10 km/h ve 100 - 50 km/h frenleme döngüsü gerçekleştirilmiştir. Deneysel koşulların tutarlılığını sağlamak amacıyla, sıcaklık ölçümleri disk yüzeyinde balata temas alanının orta noktasından alınmıştır. Şekil 4'te atalet dinamometresi üzerindeki aşınma testi düzeni yer almaktır.



Şekil 4. Test düzeni

Tablo 2. Test adımları

Adım No	Uygulama Adedi	Yavaşlama İvmesi [m/s²]	Başlangıç / Bitiş Hızı [km/h]	Başlangıç Sıcaklığı [°C]
1	500	1,5	60 / 10	100
2	250		100 / 50	100
3	500		60 / 10	200
4	250		100 / 50	200
5	250		60 / 10	300
6	250		100 / 50	300
7	250		60 / 10	400
8	250		100 / 50	400
9	250		60 / 10	500
10	100		100 / 50	500

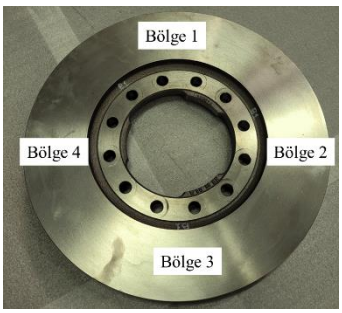
Bu yöntem sayesinde, farklı disk malzemelerinin balata aşınması üzerindeki etkileri kontrollü, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir koşullar altında değerlendirilmiştir.

Numuneleri incelemek için kullanılan metot

Metalografik ve mekanik incelemeler, her iki disk için test sonrasında gerçekleştirilmiştir. Çekme, sertlik ve mikroyapı özelliklerinin analiz edilebilmesi amacıyla disklerden numuneler çıkarılmıştır. Numuneler Şekil 5'te gösterildiği gibi, bakalit ile sıcak kalıplama yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu numuneler, optik mikroskop ve sertlik cihazı ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde, grafit dağılımı ve matris yapısı ASTM A247 (ISO 945-1:2019) standartlarına göre karakterize edilmiştir [15]. Çekme numuneleri ISO 6892-1 standardına göre [16], sertlik numuneleri ise DIN EN 1561 standardında [17] göre incelenmiştir. Sertlik ölçümleri Şekil 6'da gösterildiği gibi 4 farklı bölgeden yapılmıştır. Bu sayede, Numune 1 ve Numune 2 arasındaki temel mikroyapısal ve mekanik farklılıklar belirlenmiştir.



Şekil 5. Bakalit ile kalıplanmış numune

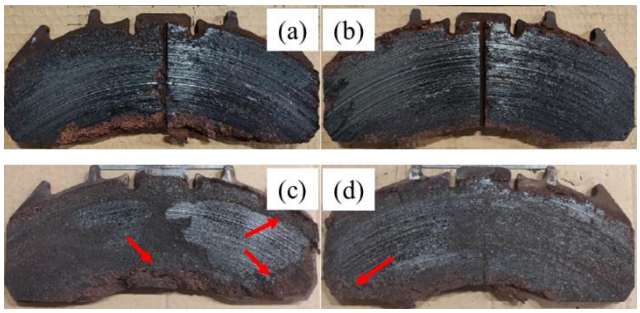


Şekil 6. Numuneler üzerinde sertlik ölçümü yapılan bölgeler

Bulgular ve tartışma

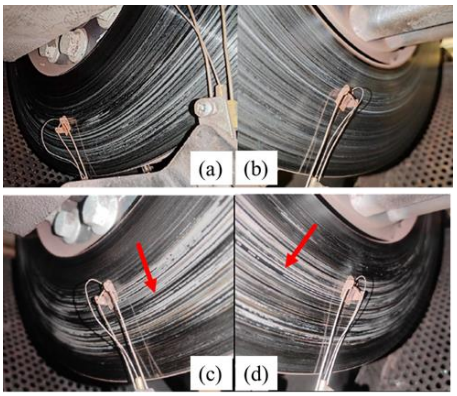
Bu bölümde, mevcut imalat yöntemi ile üretilen Numune 1 fren diski ve balata çifti ile Si ve Cu oranları artırılarak üretilen ve test edilen Numune 2 fren diski ve balata çiftine ilişkin inceleme bulguları sunulmuştur.

Dinamometre üzerinde gerçekleştirilen aşınma testlerinin ardından, fren diskleri ve beraber çalışan balataların görsel incelemesi yapılmıştır. Şekil 7'de sunulan test sonrası görüntülerde, Numune 2 ile birlikte kullanılan balatalarının daha homojen bir aşınma profili sergilediği ve köşelerdeki kırılmaların belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Numune 1'e kıyasla balata yüzeyinde daha az ısı kaynaklı hasar ve termal çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, disk malzemesi kompozisyonundaki iyileştirmelerin, balata aşınması ve dayanıklılığı üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Numune 2 ile çalışan balatalar: (a) iç balata, (b) dış balata; Numune 1 ile çalışan balatalar: (c) iç balata, (d) dış balata

Numune 1 ve Numune 2 disklerinin çalışma yüzeyleri görsel olarak incelenmiş ve numunelerin görselleri Şekil 13'de verilmiştir. Her iki numunede de disk yüzeyinde çalışma ve aşınma izleri bulunmasına karşın, Şekil 8'de kırmızı oklar ile gösterilen bu izlerin Numune 2'de, Numune 1'e göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Numune 2'nin yüzeyinde, Numune 1'e kıyasla daha az ısı kaynaklı renk değişimleri ve oksidasyon gözlemlenmiştir. Bu durum, Si–Cu oranının arttırılmasının disk üzerinde daha homojen bir ısıl dağılım sağladığını göstermektedir [18, 19].



Şekil 8. Test sonu Numune 2: (a) iç balata sürtünme yüzeyi, (b) dış balata sürtünme yüzeyi; Numune 1: (c) iç balata sürtünme yüzeyi, (d) dış balata sürtünme yüzeyi

Tablo 3'te, Numune 1 fren diski ile yapılan dinamometre testi boyunca her test adımı sonrasında balata kalınlığı ölçülerek elde edilen balata aşınma miktarları verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, test sonu balata aşınma değerlerinin, kabul edilebilir balata aşınma limitine kıyasla yaklaşık %23 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Numune 1 balata aşınma miktarları

Sıcaklık [°C]	Kabul Edilebilir Balata Aşınma Limiti [mm]	Numune 1 Balata Aşınma Miktarı [mm]	Fark [%]

100	1,50	1,01	-%33
200	1,50	0,99	-%34
300	2,00	2,76	%38
400	7,00	9,72	%39
500	10,00	12,61	%26
Toplam Aşınma Miktarı [mm]	22,00	27,09	%23

Her test adımı sonunda ölçülen Numune 2 fren diski ile birlikte çalışan balatalara ait aşınma değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen toplam aşınma miktarı 16,32 mm olup, bu değer kabul edilebilir toplam balata aşınma limitinden (22,00 mm) %26 daha düşüktür.

Tablo 4. Numune 2 balata aşınma miktarları

Sıcaklık [°C]	Kabul Edilebilir Balata Aşınma Limiti [mm]	Numune 2 Balata Aşınma Miktarı [mm]	Fark [%]
100	1,50	1,75	%17
200	1,50	1,22	-%19
300	2,00	2,37	%19
400	7,00	4,29	-%39
500	10,00	6,69	-%33
Toplam Aşınma Miktarı [mm]	22,00	16,32	-%26

Ayrıca, Tablo 5'te Numune 1 ve Numune 2 fren diski testlerine ait balata aşınma değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu karşılaştırmada, bazı düşük sıcaklık test adımlarında Numune 2 testindeki balata aşınma miktarının daha yüksek olduğu görülmekle birlikte, özellikle yüksek sıcaklık adımlarında (400 °C ve 500 °C) Numune 2 testi balatalarının aşınma miktarının Numune 1 testine göre yaklaşık %50 civarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Toplam aşınma miktarları dikkate alındığında ise, Numune 2 testinin balata aşınmasının Numune 1'e kıyasla %40 oranında daha az olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, Si-Cu miktarının arttırılmasının balata aşınmasını azaltmada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Numune 1 ve Numune 2 balata aşınma miktarı karşılaştırma

Sıcaklık [°C]	Başlangıç / Bitiş Hızı [km/h]	Numune 1 Balata Aşınma Miktarı [mm]	Numune 2 Balata Aşınma Miktarı [mm]	Fark [%]
100	60 / 10	0,36	0,33	-%8
	100 / 50	0,65	1,42	%118
200	60 / 10	0,31	0,34	%10
	100 / 50	0,68	0,88	%29
300	60 / 10	0,56	0,25	-%55
	100 / 50	2,2	2,12	-%4
400	60 / 10	1,18	0,61	-%48
	100 / 50	8,54	3,68	-%57
500	60 / 10	4,44	1,37	-%69
	100 / 50	8,17	5,32	-%35
Toplam Aşınma Miktarı [mm]	-	27,09	16,32	-%40

Balata aşınmasında görülen iyileştirmeye karşın Numune 1 ve Numune 2 disklerinde kayda değer bir aşınma farkı görülmediği Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Numunelerin disk aşınma miktarları

Disk Aşınma [mm]		
Numune 1	Numune 2	Fark
0,28	0,32	0,04

Numune 1 ve 2'ye ait sertlik ve çekme testi sonuçları Tablo 7'de karşılaştırılmıştır. Si-Cu değişikliği sonucunda sertlik değeri %2,5 artarken, çekme değerinin %4,1 düştüğü görülmüştür.

Tablo 7. Numune 1 ve Numune 2 sertlik ve çekme testi karşılaştırması

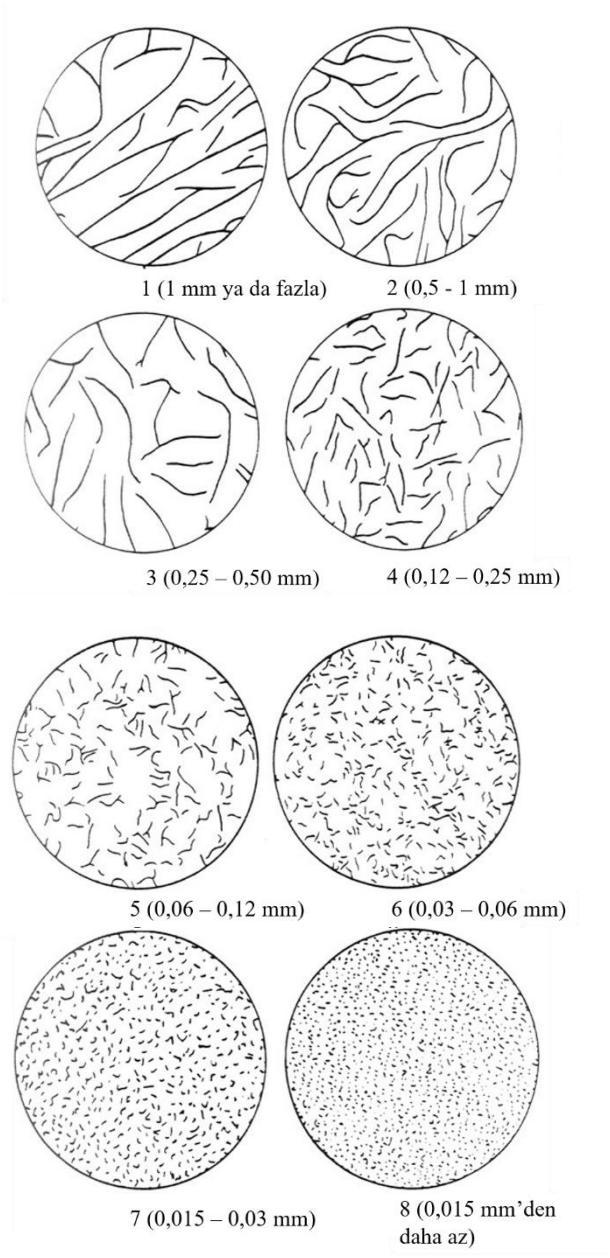
	Sertlik (160-200 HB)		
	Numune 1	Numune 2	Ortalama Fark [%]
Bölge 1	173	180	%2,5
Bölge 2	177	177	
Bölge 3	179	180	
Bölge 4	178	187	

	Çekme (min 130 Mpa)		
	Numune 1	Numune 2	Ortalama Fark [%]
	171	164	-%4,1

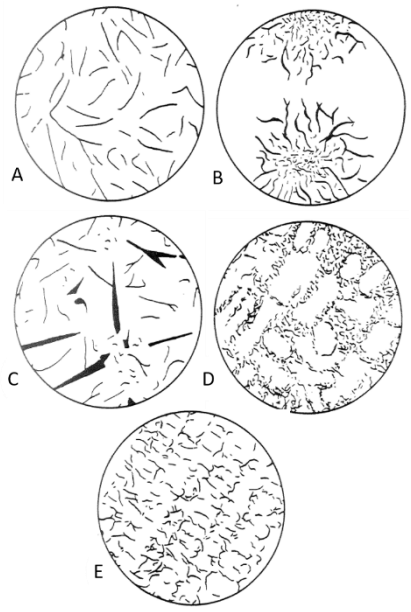
Numune 1 ve Numune 2'ye ait lamel boyutlarının ve morfolojik tiplerinin ISO 945-1 standardına uygun olarak bir şekilde sınıflandırılabilmesi amacıyla, mikroyapı görüntüleri standardın öngördüğü 100x büyütme oranında optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulan mikroyapı görüntüleri üzerinden gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarında, grafit lamel boyutları Şekil 9'da verilen standart referans şemaları ile karşılaştırılarak belirlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, Numune 1 matrisinde kısa ve ince grafit lamellerinin yoğun olduğu gözlenmiştir. Bu yapı Şekil 10'da gösterilen, ISO 945-1 standardına göre A–B tipinde ve boyut 4–6 aralığındaki

grafit lamellerine karşılık gelmektedir [15]. Bu tür grafit morfolojisi, termal iletkenliğin azalmasına neden olmakta; bu da frenleme sırasında diskin homojen olmayan şekilde ısınmasına ve termal gerilmelerin artmasına zemin hazırlamaktadır. Dolayısıyla, küçük tane boyutunun varlığı sertlik değerlerini artırmasına karşın, uzun vadede çatlak oluşumu, gevrek kırılma eğilimi ve termal yorulma direncinde zayıflamalara yol açabilmektedir [18, 19]. Tablo 8'de Numune 1 ve Numune 2'nin optik mikroskop ile ölçülen grafit lamel boyu sonuçları yer almaktadır. ISO 945-1 standardına göre lamel boylarına karşılık gelen sınıflandırma ise Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. ISO 945-1'e göre grafit lamel boyutları sınıfları (100x büyütme) [15]

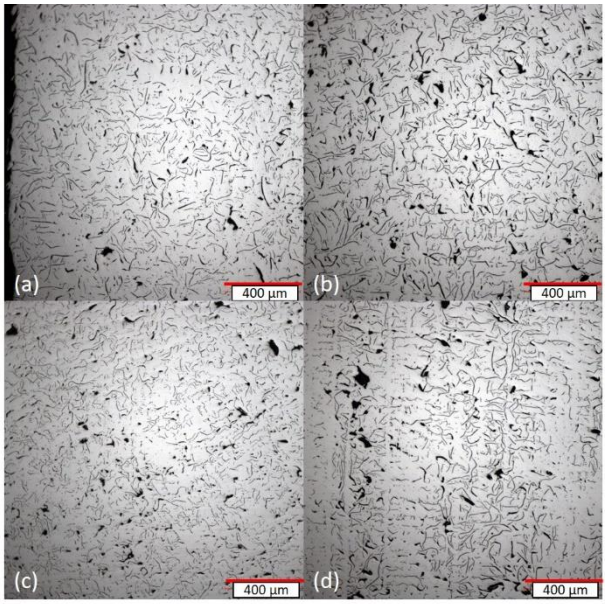


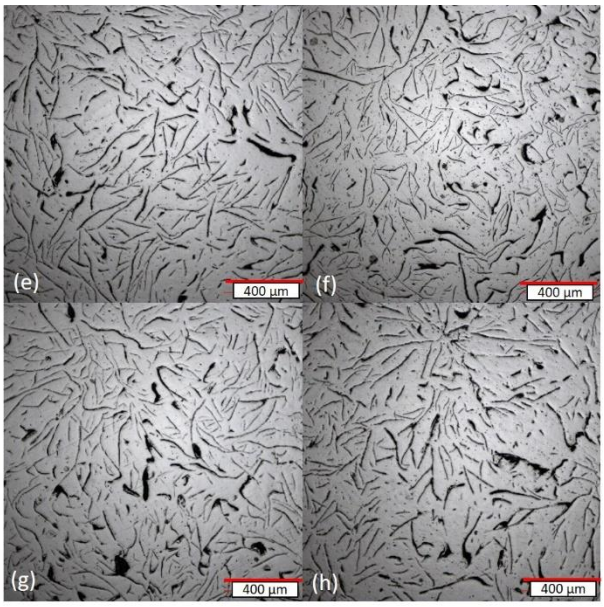
Şekil 10. ISO 945-1'e göre grafit tipleri [15]

Tablo 8. ISO 945-1'e göre grafit lamel boyutları

	Lamel Boyu [mm]	Lamel Boyutu
Numune 1	0,065	4 - 6
Numune 2	0,497	3 -5

İncelemeler sonucunda, uygulanan Si-Cu oranlarının arttırılması nedeniyle, ISO standardına göre Numune 2'de (boyut 3–5), Numune 1'e (boyut 4–6) kıyasla daha uzun ve kalın grafitlerin bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Cu artışı nedeniyle parça mikroyapısında perlit miktarının ve buna bağlı olarak sertliğin azalmadığı görülmüştür.





Şekil 11. Numune 1 - Mikroyapı görüntüleri; (a, b) İç balata sürtünme yüzeyi, (c, d) Dış balata sürtünme yüzeyi, Numune 2 - Mikroyapı görüntüleri; (e, f) İç balata sürtünme yüzeyi, (g, h) Dış balata sürtünme yüzeyi (100x büyütme)



Şekil 12. Dağlanmış mikroyapı görüntüsü (a) Numune 1, (b) Numune 2 (100x büyütme)

Literatürde, Si ilavesinin grafit morfolojisini düzenleyici, Cu'nun ise perlit miktarını artırarak sertlik ve aşınma direncine katkı sağladığı belirtilmektedir [20, 21]. Bu bulgular, Si ilavesinin grafit morfolojisini düzenleyici bir etkiye sahip olduğunu ve Cu'nun perlit miktarını artırarak malzemenin sertlik ve aşınma direncini geliştirdiğini ortaya koymaktadır [20, 21]. Zhang ve arkadaşları (1993) ve Hatate ve arkadaşları (2001) çalışmalarında, uzun ve düzenli grafitlerin malzemenin ısı iletkenliğini artırarak termal çatlaklara karşı direnci yükselttiğini ve sürtünme davranışını kararlı hale getirdiğini belirtmişlerdir [22, 23]. Numune 2'de gözlenen mikroyapısal değişimler Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir ve literatür bulgularını doğrular niteliktedir. Mikroyapısal iyileşmeler, balata aşınmasının azalmasına ve disk–balata temas yüzeylerinde ısı kaynaklı renk değişiminin sınırlı kalmasına katkı sağlamış olup, Si–Cu miktarının arttırılmasının hem mikroyapı hem de tribolojik performans üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir.

Çalışma sonucunda, Numune 1'in mikroyapısında gözlemlenen 4–6 boyutundaki lamel grafitler, fren diskinin dinamometre testlerinde yüksek balata aşınmasının temel nedeni olarak belirlenmiştir. Numune 2 fren diskinde Si ve Cu oranlarının artırılmasının, balata aşınmasını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiş ve bu iyileştirmenin olumlu etkileri dinamometre testleri ile doğrulanmıştır.

Sonuç

Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan gri dökme demir fren disklerinin malzeme kompozisyonunun balata aşınma performansına etkisi incelenmiş ve özellikle malzemedeki silisyum (Si) ve bakır (Cu) oranlarının arttırılmasının balata aşınmasını azaltmadaki rolü ortaya konmuştur.

Mevcut üretim oranlarındaki Si ve Cu kompozisyonuna sahip olan Numune 1 diskinin aşınma testi sonrasında, balatalardaki aşınma miktarının kabul edilebilir limitin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemeleri, bu yüksek aşınmanın, diskin malzemedeki grafit lamellerinin kısa ve ince (boyut 4-6) olmasından ve dolayısıyla düşük termal iletkenlikten kaynaklandığını ortaya koymuştur. Si ve Cu oranları kontrollü bir şekilde arttırılan Numune 2 diskinde ise, Numune 1'e kıyasla daha uzun ve kalın (boyut 3-5) grafit lamelleri gözlemlenmiştir.

Malzeme kompozisyonunda Si ve Cu oranı arttırılan Numune 2'nin aşınma testinin sonunda, balata aşınmasının kabul edilebilir aşınma limitinden yaklaşık %26, Numune 1'in balata aşınma miktarından ise yaklaşık %40 daha az olduğu görülmüştür. Bu sonuç, Si ve Cu oranının arttırılmasının balata aşınmasını önemli ölçüde azalttığını ve malzeme performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, ağır ticari araç fren disklerinin üretiminde, yüksek Si ve Cu içeren malzeme kompozisyonlarının kullanılması durumunda, disklerin ısıl iletkenliğinin homojen bir şekilde arttığını ve bu sayede balata aşınmasının önemli ölçüde azaldığını, buna karşın disk aşınmasını arttırmadığını göstermektedir. Si ve Cu elementlerinin arttırılması, fren sisteminin genel performansını iyileştirirken, bakım maliyetlerini de düşürme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, bu yaklaşım hem ekonomik hem de çevresel açıdan faydalar sağlayarak, daha güvenilir ve verimli bir fren sistemi kullanımını mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmanın devamı olarak, disk yüzeylerinin aşınma morfolojisinin malzeme kompozisyonu ile değişiminin araştırılması planlanmaktadır. Böylece düşük sıcaklıklarda görülen ve genel eğilime ters düşen, yüksek aşınma değerlerinin daha iyi açıklanması hedeflenmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yazar Katkıları

Zehra Çınarcık: Literatür araştırması, numune üretim süreçleri ve test sonu numunelerin incelenmesi kısmında katkısı olmuştur.

Özgün Cem Yılmaz: Verilerin toplanması, test sonunda veri analizi ve yorumlanması kısmında katkısı olmuştur.

Bora Güntay: Numune üretim süreçlerinde, çalışma konsepti ve tasarımı kısmında ve verilerin analizi kısmında katkısı olmuştur.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada sağladıkları test imkânları için Ege Fren San. ve Tic. AŞ'ye, numune hazırlık sürecindeki destekleri için Ertuğ Metal AŞ'ye teşekkür eder.

Kaynakça

[1] Borawski, Andrzej. "Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads–review." Science and Engineering of Composite Materials 27.1 (2020): 374-396.

[2] Voloacă, Ştefan, et al. "Motor Vehicle Brake Pad Wear—A Review." Vehicles 7.2 (2025): 52.

[3] Singhal, Prachi, and Kuldeep K. Saxena. "Effect of silicon addition on microstructure and mechanical properties of grey cast Iron: An overview." Materials Today: Proceedings 26 (2020): 1393-1401.

[4] Mulani, Shoaib Munir, et al. "A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system." Materials today: proceedings 56 (2022): 447-454.

[5] Boulifa, Iliasse, and Ali Hadji. "Study of the influence of alloying elements on the mechanical characteristics and wear behavior of a ductile cast iron." Fracture and Structural Integrity 15.56 (2021): 74-83.

[6] Milli Eğitim Bakanlığı, Gri (Esmer) dökme demir. Ankara, Türkiye: MEB Yayınları, (2011).

[7] Günen, Ali, Melik Çetin, and Tarkan Subaş. "Friction and Wear Behavior of High-Silicon Lamellar Graphite Cast Iron Truck Brake Discs." Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 38.4 (2023): 1023-1034.

[8] Musa, Zahraddeen. Effects of Copper Addıtıon and Sectıon Thıckness on Some Mechanıcal Propertıes and the Morphology of Graphıte Flakes in Grey Cast Iron. Diss. 2016.

[9] Tonolini, Pietro, et al. "Wear behavior of Nb alloyed gray cast iron for automotive brake disc application." Metals 13.2 (2023): 365.

[10] Grigoratos, Theodoros, and Giorgio Martini. "Brake wear particle emissions: a review. Environmental science and pollution research 22.4 (2015): 2491-2504.

[11] Xu, Zhuo, Guiquan Wang, and Yanxiang Li. "Thermal Cracking and Friction Performance of Two Kinds of Compacted Graphite Iron Brake Discs under Intensive Braking Conditions." Metals 14.3 (2024): 332.

[12] Cueva, G., et al. "Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors." Wear 255.7-12 (2003): 1256-1260.

[13] International Organization for Standardization. (2009). ISO 26866:2009 Road vehicles — Brake lining friction materials — Standard wear test procedure for commercial vehicles with air brakes.

[14] Çınarcık, Zehra, and Bora Güntay. "Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Fren

Disklerinde Mikroyapının Çatlak Dayanımına Etkisi." Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 12.4 (2024): 913-924.

[15] ASTM International, "ASTM A247: Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings," Annual Book of ASTM Standards, vol. 1, 1985.

[16] ISO, ISO 6892-1:2019 – Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.

[17] DIN, DIN EN 1561:2012-01 – Founding – Grey cast irons. Berlin, Germany: DIN, 2012.

[18] Song, Liang, et al. "Effects of silicon on mechanical properties and fracture toughness of heavy-section ductile cast iron." Metals 5.1 (2015): 150-161.

[19] Kutelu, B. J., O. O. Ogundeji, and R. T. Oluyori. "Microstructure Characteristic and Mechanical Properties of Copper Influenced Grey Cast Iron." Saudi J. Civ. Eng 8 (2024): 5-65.

[20] Agunsoye, J. O., et al. "The effect of copper addition on the mechanical and wear properties of grey cast iron." Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 2.5 (2014): 470-483.

[21] Ma, Xu, et al. "Effect of Cu addition on the braking performance of Fe–Si alloy-modified C/C–SiC brake materials." Wear 477 (2021): 203851.

[22] Zhang, Y., et al. "Investigation of tribological properties of brake shoe materials—phosphorous cast irons with different graphite morphologies." Wear 166.2 (1993): 179-186.

[23] Hatate, M., et al. "Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron." Wear 251.1-12 (2001): 885-889.