



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Ağır hizmet taşıtı bütünleşik fren diski ve poyra çiftinin soğuma süresinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi

Numerical and experimental investigation of cooldown period of heavy-duty integrated brake disc and hub pair

Yazar(lar) (Author(s)): İbrahim Can GÜLERYÜZ¹, Özgün Cem YILMAZ²

ORCID¹: 0000-0002-2002-6684

ORCID²: 0000-0002-1222-7718

To cite to this article: Güleryüz İ.C., Yılmaz Ö.C., “Ağır hizmet taşıtı bütünleşik fren diski ve poyra çiftinin soğuma süresinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 27(2): 469-477, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Güleryüz İ.C., Yılmaz Ö.C., “Ağır hizmet taşıtı bütünleşik fren diski ve poyra çiftinin soğuma süresinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(2): 469-477, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1104489

Ağır Hizmet Taşıtı Bütünleşik Fren Diski ve Poyra Çiftinin Soğuma Süresinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi

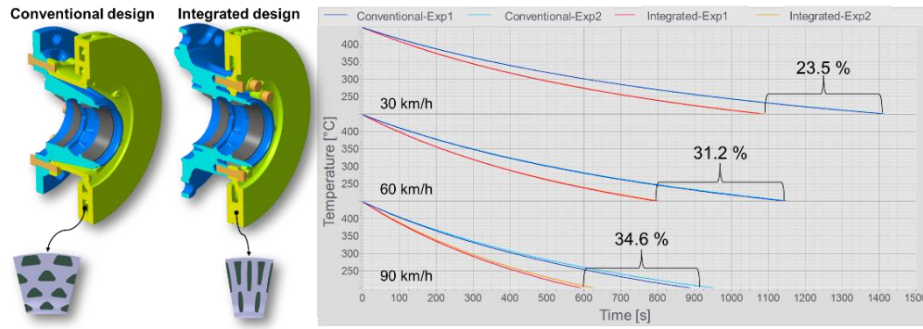
Numerical and Experimental Investigation of Cooldown Period of Heavy-duty Integrated Brake Disc and Hub Pair

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bütünleşik fren disk ve poyra çifti soğuma performansı / Cooldown performance of integrated brake disc and hub pair
- ❖ Fren disk soğuma süresi deneylerinin atalet dinamometresi üzerinde gerçekleştirilmesi / Performing brake disc cooldown period experiments on inertia dynamometer
- ❖ Zamana bağlı termal analizler ile fren disk soğuma süresinin hesaplanması / Calculation of brake disc cooldown period by transient thermal analyses

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Geleneksel ve bütünleşik fren disk ve poyra çiftlerine ait soğuma süresi deney sonuçları karşılaştırılmıştır. / Cooldown period experiment results of conventional and integrated brake disc and hub pairs are compared.



Şekil. Deneysel soğuma süresi sonuçları / Figure. Experimental cooldown period results

Amaç (Aim)

Farklı fren disk ve poyra tasarımlarının fren disk soğuma süresi üzerindeki etkisinin araştırılması için doğrulanmış bir simülasyon prosedürü amaçlanmaktadır. / A validated simulation procedure is aimed for the investigation of the effect of different brake disc and hub designs on the cooldown period of brake discs.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Zamana bağlı termal analizler ile geleneksel ve bütünleşik fren disk ve poyra çiftlerinin soğuma süreleri farklı taşıt hızları için hesaplanarak, atalet dinamometresi deneyleri ile doğrulanmıştır. / Cooldown periods of conventional and integrated brake disc and hub pairs are calculated by transient thermal analyses for different vehicle speeds and validated by inertia dynamometer experiments.

Özgünlük (Originality)

Hem geleneksel hem de bütünleşik fren disk ve poyra tasarımları üzerinde doğrulanmış bir simülasyon prosedürü geliştirilmiştir. / A validated simulation procedure has been developed on both conventional and integrated brake disc and hub designs.

Bulgular (Findings)

Geleneksel fren tasarımına göre bütünleşik tasarım ile soğuma süresinde % 29,8 iyileşme elde edilmiştir. / The cooldown period was improved by 29.8 % for the integrated design compared to the conventional design.

Sonuç (Conclusion)

Her iki fren disk ve poyra çiftine ait sayısal ve deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. / The numerical and experimental results of both brake disc and hub pairs are compatible with each other.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Ağır Hizmet Aracı Bütünleşik Fren Diski ve Poyra Çiftinin Soğuma Süresinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

İbrahim Can GÜLERYÜZ*, Özgün Cem YILMAZ

*Ürün Tasarım ve Geliştirme Bölümü, Ege Fren San. ve Tic. A.Ş., Türkiye
(Geliş/Received : 18.04.2022 ; Kabul/Accepted : 13.08.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 23.10.2022)

ÖZ

Bu çalışmada, geleneksel ağır hizmet aracı fren disk ve poyra çiftine göre ağırlık ve maliyet avantajı sağlayan bütünleşik fren disk ve poyra çiftinin soğuma süresi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. İlk aşamada, havalandırılmalı fren disk ve poyra çiftlerinin atalet dinamometresi üzerinde soğuma süresi deneyleri farklı taşıt hızları için gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, atalet dinamometresi üzerinde gerçekleştirilen soğuma süresi deneylerinin sınır koşulları göz önünde bulundurularak, fren disk ve poyra çiftlerinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel soğuma süresi sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak, sayısal çalışma doğrulanmıştır. Geleneksel fren disk ve poyra çiftine göre bütünleşik fren disk ve poyra çifti ile soğuma süresinde % 29,8 iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca, geleneksel tasarıma göre fren disk ve poyra çifti toplam ağırlık indirilmesi 10 kg (% 15,2) olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bütünleşik fren disk ve tekerlek poyrası, havalandırılmalı fren disk, zamana bağlı termal analiz, atalet dinamometresi, ağır hizmet taşıtı.

Numerical and Experimental Investigation of Cooldown Period of Heavy-duty Integrated Brake Disc and Hub Pair

ABSTRACT

In this study, the cooldown period of the integrated brake disc and hub pair, which provides weight and cost advantage compared to the traditional heavy-duty brake disc and hub pair, was investigated numerically and experimentally. In the first stage, cooldown period experiments of ventilated brake disc and wheel hub pairs on an inertia dynamometer were carried out for different vehicle speeds. In the second stage, transient thermal analyses of brake disc and hub pairs were carried out, in consideration of the boundary conditions of the cooldown period experiments performed on an inertia dynamometer. The numerical study was validated by comparing the experimental cooldown period results with the numerical results. The cooldown period was improved by 29.8 % for the integrated brake disc and hub pair compared to the conventional brake disc and hub pair. In addition, total weight reduction in brake disc and hub pair was achieved by 10 kg (15.2 %) according to the conventional design.

Keywords: Integrated brake disc and wheel hub, ventilated brake disc, transient thermal analysis, inertia dynamometer, heavy-duty vehicle.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Taşıt kütlesinin azaltılmasına yönelik çalışmalar, CO₂ emisyonunun, yakıt sarfiyatının ve taşıt maliyetinin indirgenmesinde önemli bir rol oynadığı için otomotiv alanında birçok çalışmanın odak noktası olmaktadır. Ağır hizmet taşıtlarında yaylanmayan taşıt kütlesini oluşturan aks ve dingil ucu bileşenlerinin kütlesini azaltmak ve maliyet avantajı elde edilmesi amacıyla bütünleşik fren disk ve poyra çifti çözümlerinin geleneksel fren disk ve poyra tasarımlarının yerini aldığı görülmektedir.

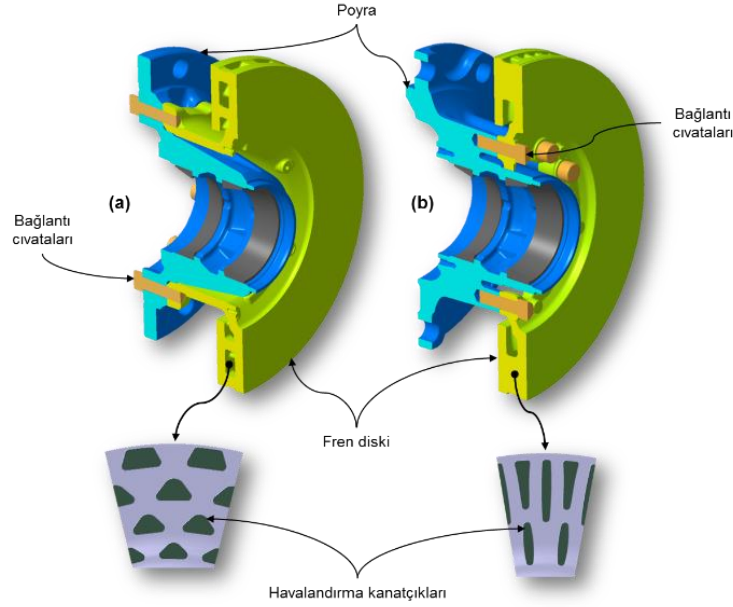
Ağır ticari taşıtlarda kullanılan geleneksel fren disk ve poyra çiftinin bağlantısı, fren disk ile bu disk ile uyumlu

poyranın civatalar ile tespit edilmesine dayanmaktadır. Bu tasarımlarda, fren disk üzerindeki bağlantı flanş poyra üzerindeki bağlantı ara yüzüne kadar uzatılmaktadır. Bütünleşik fren disk ve poyra tasarımlarında, disk ile poyra arasındaki bağlantı ara yüzü fren diskine yaklaştırılarak, fren disk kütlesi azaltılmakta; poyra üzerindeki bağlantı ara yüzü fren diskine doğru uzatılmaktadır. Poyra malzemesi fren torkunu taşımaya daha uygun olduğu için poyra üzerindeki bağlantı ara yüzü fren disk bağlantı flanşına doğru uzatılırken daha düşük cidar kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir (Şekil 1). Fren diskinden malzeme çıkarıldığı için fren disk kütlesi azaltılırken, poyra tarafında gerçekleştirilen ince cidarlı yapı sayesinde poyra kütlesinde büyük bir artış söz konusu değildir. Bu sayede, bütünleşik fren disk ve

*Sorumlu Yazar : (Corresponding Author)
e-posta : can.guleryuz@egefren.com.tr

poyra tasarımlarında geleneksel tasarımlara göre ağırlık ve maliyet avantajı sağlanmaktadır. Geleneksel tasarıma göre fren diskü kütlelerinde gerçekleşen düşüş, fren diskü ısıl kapasitesinin azalmasına neden olduğu için bu tasarımların fren diskü soğuma süresine etkisinin sayısal ve deneysel olarak araştırılması gereklidir.

Öncelikli olarak geleneksel ve bütünleşik fren diskü ve poyra tasarımlarının HAD analizlerini farklı havalandırma kanatçığı geometrileri için gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayıları elde edilmiştir. Taşınım, iletim ve ışınım etkileri göz önünde bulundurularak, fren diskü soğuma süresinin ve tekerlek poyrası rulman sıcaklığının elde edilmesi için zamana



Şekil 1. (a) Geleneksel, (b) bütünleşik fren diskü ve poyra çifti ((a) Conventional, (b) integrated brake disc and hub pair)

Bilimsel yazındaki çalışmaların çoğunluğunda binek veya yüksek performans taşıtlı havalandırma fren disklerinin soğuma başarımları sayısal ve deneysel olarak ele alınmıştır [1-14]. Ağır hizmet taşıtları ile ilgili bilimsel yazında yer bulan az sayıda çalışma, geleneksel havalandırma fren diskü tasarımlarının soğuma başarımlarının analitik, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve deneysel yöntemler ile incelenmesine dayalıdır [15-20]. Gülerüyüz ve Yılmaz geleneksel havalandırma ağır hizmet aracı fren disklerinin HAD ve zamana bağlı termal analizlerini, havalandırma kanatçığı geometrisinin soğuma süresine etkisini araştırmak için gerçekleştirmiştir. Galindo Lopez ve Tirovic'in çalışmasında [16] raporlanan farklı hızlardaki deneysel ortalama taşınım katsayıları göz önünde bulundurularak, sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve HAD analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Zamana bağlı termal analiz değişkenlerinin doğrulanması amacıyla farklı taşıtlı hızları için atalet dinamometresi soğuma süresi deney sonuçları göz önünde bulundurulmuştur. HAD ve zamana bağlı termal analiz değişkenleri doğrulandıktan sonra, farklı havalandırma kanatçığına sahip geleneksel fren diskü tasarımları için sayısal çalışma karşılaştırmalı olarak tekrarlanmıştır [21].

Gülerüyüz ve Karadeniz ağır hizmet taşıtlarında geleneksel ve bütünleşik fren diskü ve poyra tasarımlarının fren diskü soğuma süresine ve tekerlek poyrası rulman sıcaklığına olan etkilerini incelemiştirlerdir.

bağlı termal analizler gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde sayısal olarak elde edilen ortalama taşınım katsayıları zamana bağlı termal analiz modellerine sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Gülerüyüz ve Yılmaz'ın çalışmasında [21] belirlenen HAD analiz değişkenleri referans alınarak, zamana bağlı termal analiz değişkenleri geleneksel fren diskü ve poyra çiftinin atalet dinamometresi deneyleri ile doğrulanmıştır [22].

Bu çalışmada, ağır hizmet taşıtlarında 22,5" jant ölçüsü ile uyumlu disk frenler ile beraber kullanılan geleneksel havalandırma fren diskü ve poyra çifti tasarımı ile bütünleşik havalandırma fren diskü ve poyra çifti tasarımının fren diskü soğuma süresi üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Geleneksel ve bütünleşik fren diskü ve poyra çiftlerinin soğuma eğrileri atalet dinamometresi üzerinde farklı taşıtlı hızları için gerçekleştirilen soğuma süresi deneyleri ile elde edilmiştir. Deneylerin iki ayrı fren diskü ve poyra çifti üzerinde yapılması ile bu çalışma kapsamında geliştirilen zamana bağlı termal analiz modelinin genel geçerliliğinin araştırılmasına olanak sağlamıştır. İlk aşamada, geleneksel fren diskü ve poyra çiftinin atalet dinamometresi üzerinde soğuma süresi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Soğuma süresi deneylerinin sınır koşulları göz önünde bulundurularak, geleneksel fren diskü ve poyra çiftinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiş olup, termal analiz değişkenleri sayısal ve deneysel soğuma eğrilerinin birbiri ile örtüşmesi sağlanarak belirlenmiştir. İkinci aşamada bütünleşik fren

diski ve poyra çiftinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilerek, sayısal sonuçların bütünleşik fren diski ve poyra çiftine ait deneysel sonuçlar ile doğrulanması sağlanmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak, geleneksel ve bütünleşik tasarımlar fren diskleri soğuma süresi açısından değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada iki farklı fren diski ve poyra çifti ile fren diski soğuma süresi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Termal analiz değişkenlerini belirleyebilmek amacıyla geleneksel fren diski ve poyra çiftinin fren diski soğuma süresi deneyleri (Deney-1) gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçları kullanılarak termal analiz sınır koşulları ve değişkenleri ayarlanmıştır. Daha sonra analiz modelinin doğrulanması için bütünleşik fren diski ve poyra çiftinin fren diski soğuma süresi deneyleri (Deney-2) gerçekleştirilmiştir. Deneylerin iki ayrı fren diski ve poyra çifti üzerinde yapılması ile bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen zamana bağlı termal analizlerin genel geçerliliği test edilmiştir.

Deney-1, ağır hizmet taşıtlarında 22,5" jant ölçüsü ile uyumlu disk frenler ile birlikte kullanılan $\phi 430$ mm çapında ve 45 mm kalınlığında havalandırma kanatçıklı geleneksel fren diski ve bu disk ile uyumlu tekerlek poyrası ile atalet dinamometresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Havalandırma kanatçığı profili elmas şeklinde olup, geleneksel fren diski ve poyra çifti Şekil 1(a)'da verilmektedir.

Deney 2, geleneksel fren diski ve poyra çiftinin yerini alacak şekilde tasarlanan bütünleşik havalandırma kanatçıklı fren diski ve bu disk ile uyumlu tekerlek poyrası ile atalet dinamometresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tasarıma ait fren diskinin havalandırma kanatçıkları taşınım yüzey alanını ve taşınım ile ısı transferini arttıracak şekilde ardışık olarak sıralanmış kısa ve uzun kanatçıklardan meydana gelmektedir (Şekil 1(b)). Geleneksel ve bütünleşik fren diski ve poyra çiftine ait özellikler Çizelge 1'de özetlenmektedir.

Soğuma süresi deneylerinde sıcaklık ölçümlerini almak için imc CRONOSflex veri toplama sistemi, 8 adet temaslı (rubbing) termokupl ve 4 adet K-tipi termokupl kullanılmaktadır. Temaslı termokupl fren diski yüzeylerindeki sıcaklık ölçümü için; K-tipi termokupl ise ortam sıcaklığının ölçülmesi için kullanılmaktadır. 3'er adet temaslı termokupl fren diski üzerindeki iç ve dış balata sürtünme yüzeylerini 3 eşit parçaya ayıracak şekilde (t1 – t6); 1'er adet temaslı termokupl iç ve dış sürtünme halkalarının dış çaplarına temas edecek şekilde (t7, t8) konumlandırılmıştır. K-tipi termokupl yerleşimleri 1 adedi havalandırma kanatçıklarının hava girişine (k1), 1 adedi havalandırma kanatçıklarının hava çıkışına (k2) konumlandırılmış olup, diğer 2 adet termokupl atalet dinamometresi kabin içerisindeki ortam sıcaklığı ve kabin dışı ortam sıcaklıklarının ölçümü için (k3, k4) konumlandırılmıştır (Şekil 2). Tüm sensörler

veri toplama sistemindeki analog girişlere bağlanmakta olup, veri toplama frekansı 100 Hz olarak ayarlanmıştır.

Karayolları trafik yönetmeliğine göre, N2 ve N3 grubu ağır hizmet taşıtları (kamyon, çekici grubu) için otoyollarda uyulması gereken yasal hız limiti 90 km/h olarak ifade edilmektedir [23]. Yasal hız limitleri, genel hizmet koşulları, taşıt üreticileri ve ticari taşıtlara yönelik fren üreticisi firmaların deney prosedürleri göz önünde bulundurularak; atalet dinamometresi soğuma süresi deneyleri 90, 60 ve 30 km/h taşıt hızları için gerçekleştirilmektedir [21].

Soğuma süresi deneyleri; ısıtma ve soğuma fazları olarak isimlendirilen ve birbirini takip eden iki farklı aşamadan meydana gelmektedir. Deneyin ilk aşaması olan ısıtma fazında, fren diski yüzey sıcaklığı 550°C 'ye ulaşana kadar disk dönüş hızı 60 km/h'den 30 km/h'ye yavaşlayacak şekilde 3 m/s^2 yavaşlama ivmesi ile ardışık frenlemeler gerçekleştirilmektedir. Bunu takip eden soğuma fazında, frenleme ortadan kaldırılarak belirlenen taşıt hızlarına (90, 60 ve 30 km/h) karşılık gelen sabit disk dönüş hızları için döndürülmektedir. Deney süresinin optimizasyonu ve bu sayede deney maliyetlerinin iyileştirilmesi amacıyla soğuma süresi deneyleri fren diski sıcaklığı 200°C 'nin altına düşüncüye kadar devam ettirmektedir. Soğuma süresi deneyleri belirlenen her bir hız kademesi için 2'ser kez tekrarlanmış olup, soğuma süresi deneyleri tek bir fren diski ve poyra çifti için 12 adımdan meydana gelmektedir (Çizelge 2). Deney-1 ve Deney-2 için aynı deney düzeni ve deney prosedürü kullanılarak soğuma süresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Geleneksel ve bütünleşik fren diski ve poyra çiftlerine ait özellikler (Properties of conventional and integrated brake disc pairs)

Özellik	Geleneksel	Bütünleşik
Disk dış çapı [mm]	430	430
Disk iç çapı [mm]	257	257
Disk iç/dış sürtünme yüzeyi kalınlığı [mm]	14,0	13,1/14,0
Havalandırma kanalı yüksekliği [mm]	16,9	17,9
Havalandırma kanatçığı yüzey alanı [m ²]	0,2299	0,2556 (% 11,2)
Disk ıslak yüzey alanı [m ²]	0,4749	0,5070 (% 6,8)
Toplam disk yüzey alanı [m ²]	0,6738	0,5913 (% -23,6)
Disk ağırlığı [kg]	33,0	25,9 (% -23,6)
Poyra ağırlığı [kg]	31,8	29,8 (% -6,3)
Toplam ağırlık [kg]	65,7	55,7 (% -15,2)



Şekil 2. Soğuma süresi deney düzeni (Cooldown period test setup)

(Analiz-1) gerçekleştirilmiştir. Deney-1 sonuçları göz önünde bulundurularak, zamana bağlı termal analiz değişkenleri ve sınır koşulları ayarlanmıştır. Daha sonra analiz modelinin doğrulanması için Deney-2 kapsamında kullanılan bütünlük fren diski ve poyra çiftinin fren diski soğuma süresi analizleri (Analiz-2) gerçekleştirilmiştir.

Soğuma sürelerinin sayısal olarak hesabı için analizler Ansys Mechanical yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup; zamana bağlı termal analizlerde taşınım, iletim ve ışıma etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 1(a)'da verilen geleneksel fren diski ve poyra çiftinin simetrisi göz önünde bulundurularak, $27,69^\circ$ dilim model sayısal modele (Analiz-1) dâhil edilmiştir (Şekil 3). Şekil 1(b)'de verilen bütünlük fren diski ve poyra çiftinin soğuma süresi analizlerine (Analiz-2) ait sayısal model ve sınır koşulları Şekil 4'de verilmektedir. Sonlu elemanlar ağ yapısı için tüm yüzeylere 3 mm eleman boyutu tanımlanmıştır. Analiz-1 için tetrahedral yapıdaki sonlu elemanlar ağı yaklaşık 124.000 düğüm ve 72.000 elemandan; Analiz-2 için yaklaşık 1.506.000 düğüm ve 870.000 elemandan oluşmaktadır. Fren diski malzemesi GG15 (EN-GJL-150) lamel grafitli dökme demir; poyra malzemesi GGG50 (EN-GJS-500) küresel grafitli dökme demir tercih edilmiştir. Disk – poyra bağlantı civatalarının malzemesi olarak yapısal çelik seçilmiştir. ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 2. Soğuma süresi deney prosedürü (I: ısıtma fazı, S: soğuma fazı) (Cooldown period test procedure (I: heating phase, S: cooling phase))

Adım	Program	Başlangıç hızı - V_0 [km/h]	Bitiş hızı - V_1 [km/h]	Yavaşlama ivmesi - a [m/s ²]	Başlangıç sıcaklığı - T_0 [°C]	Bitiş sıcaklığı - T_1 [°C]
1	I-0	60	30	3	T_{ortam}	550
2	S-90-1	90	90	-	550	200
3	I-1	60	30	3	200	550
4	S-90-2	90	90	-	550	200
5	I-1	60	30	3	200	550
6	S-60-1	60	60	-	550	200
7	I-1	60	30	3	200	550
8	S-60-2	60	60	-	550	200
9	I-1	60	30	3	200	550
10	S-30-1	30	30	-	550	200
11	I-1	60	30	3	200	550
12	S-30-2	30	30	-	550	200

3. SAYISAL ÇALIŞMA (NUMERICAL STUDY)

Bu kısımda, deneysel çalışmaya paralel olarak, iki ayrı fren diski ve poyra çiftinin ait zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak termal analiz değişkenlerini belirleyebilmek amacıyla geleneksel fren diski ve poyra çiftinin fren diski soğuma süresi analizleri

Güleryüz ve Karadeniz'in çalışmasında [22] geleneksel ve bütünlük fren diski ve poyra çiftleri için 90, 60 ve 30 km/h taşıt hızlarına karşılık gelen dönüş hızları için hesaplatılan yerel taşınım katsayısı sonuçları bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen zamana bağlı termal analizlerde sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Her bir

taşıt hızı için referans alınan taşınım katsayıları Çizelge 4’de verilmektedir.

Çizelge 3. Malzeme özellikleri (Material properties)

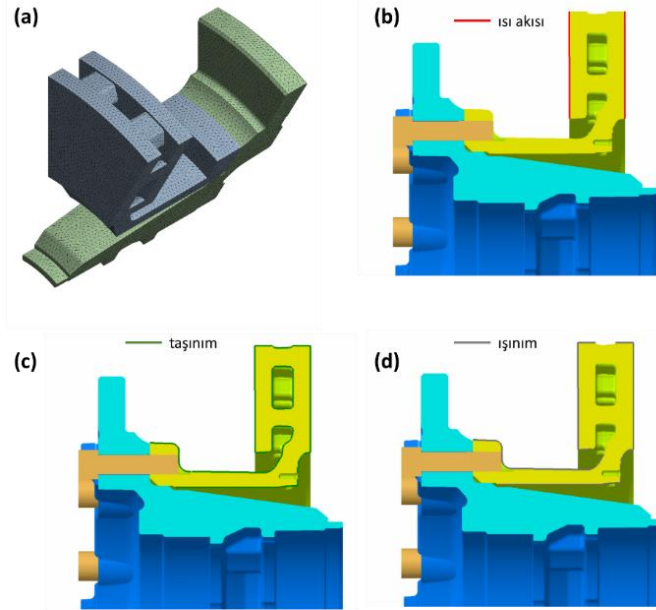
	GG15	GGG50	Yapısal çelik
Yoğunluk [kg/m ³]	7050	7200	7100
Termal iletkenlik [W/(m.°K)]	50,5	32,3	48,0
Özgül ısı [J/(kg.°K)]	445	506	470

Bölüm 2’de detayları verilen atalet dinamometresi deney prosedürüne göre, soğuma süresi deneyleri ısıtma ve

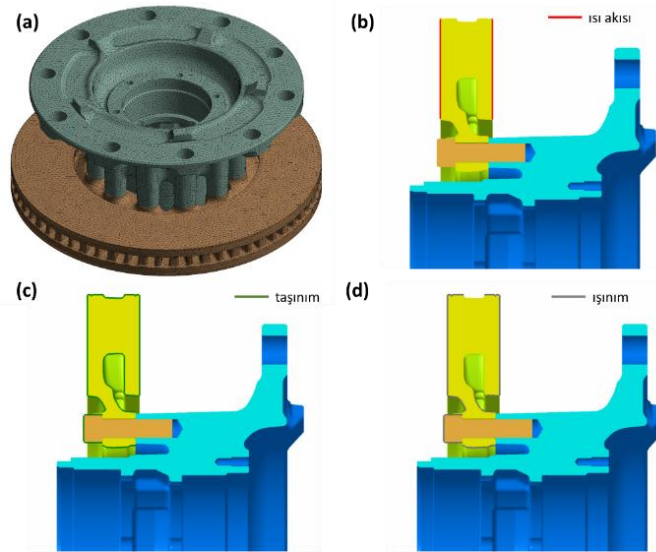
soğuma fazları olarak isimlendirilen ve birbirini takip eden iki farklı aşamadan meydana gelmektedir. Isıtma fazında, balataların fren diski üzerinde süpürdüğü sürtünme yüzeylerine tekrarlı fren uygulamaları için ısı akısı tanımlanmış olup, Denklem (1)’e göre elde edilir.

$$q = 0.5 \frac{m(V_0^2 - V_1^2)}{t_d A_s} \quad (1)$$

Burada, m aks yükünü, V₀ fren uygulaması öncesindeki (başlangıç) taşıt hızını, V₁ frenleme bitişindeki taşıt hızını, A_s balataların disk üzerinde süpürdüğü toplam sürtünme yüzeyini ve t_d yavaşlama (frenleme) süresini belirtmektedir. Her bir fren uygulamasının başlangıcında ulaşılan maksimum ısı akısı değeri 2,4 W/mm² olup, fren



Şekil 3. Analiz-1 (a) sonlu elemanlar ağı, sınır koşulları: (b) ısı akısı, (c) taşınım katsayısı, (d) ışınım (Analysis-1 (a) finite element mesh, boundary conditions: (b) heat flux, (c) convective heat transfer coefficient, (d) radiation)



Şekil 4. Analiz-2 (a) sonlu elemanlar ağı, sınır koşulları: (b) ısı akısı, (c) taşınım katsayısı, (d) ışınım (Analysis-2 (a) finite element mesh, boundary conditions: (b) heat flux, (c) convective heat transfer coefficient, (d) radiation)

Çizelge 4. Disk taşınım katsayıları (Convective heat transfer coefficient of disc) [22]

V [km/h]	90		60		30	
Taşınım katsayıları [W/m ² K]	Geleneksel	Bütünleşik	Geleneksel	Bütünleşik	Geleneksel	Bütünleşik
Havalandırma kanatçıkları, h_{duct}	22,8	35,9 (↑ % 57,5)	15,7	25,0 (↑ % 59,2)	8,3	13,4 (↑ % 61,4)
Disk ıslak alanı, h_{wetted}	21,5	31,2 (↑ % 45,1)	14,8	22,0 (↑ % 48,6)	8,2	12,2 (↑ % 48,8)
Ortalama taşınım katsayısı, h_{disc}	18,9	32,7 (↑ % 73,0)	13,2	23,2 (↑ % 75,8)	7,5	13,1 (↑ % 74,7)

Çizelge 5. Temas direnci değerleri (Contact resistance values) [22]

Temas bölgesi tanımı		h_{cond} [W/m ² K]
Disk üzerinde civata oturma yüzeyleri	Civata kafaları	56318
Disk üzerinde poyra oturma yüzeyleri	Poyra üzerinde disk oturma yüzeyleri	23533
Poyra üzerinde bağlantı delikleri	Cıvatalar üzerindeki dişli bölge	7011

uygulanmasının sonunda sifıra düşmektedir. Taşıt hızlanma süreci boyunca ısı akısı sıfır olarak uygulanmaktadır. Atalet dinamometresi deneylerinde, ısıtma fazında fren diski yüzey sıcaklığı 550 °C'ye ulaşana kadar tekrarlı fren uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Geleneksel fren diski ve poyra çiftinde ortalama 15 kez fren uygulanması ile bu sıcaklığa ulaşılmaktadır (Deney-1); bütünleşik fren diski ve poyra çiftinde ortalama 17 kez fren uygulanması ile istenilen sıcaklığa ulaşılmaktadır (Deney-2). Bu nedenle, ısıtma fazına ait toplam analiz süresi Analiz-1 için 735 s, Analiz-2 için 833 s olarak belirlenmiştir. Isıtma fazında zaman adımı 0,25 s olarak tanımlanmıştır. Deney-1 ve Deney-2'de, dinamometre ortalama kabin iç sıcaklığı 48 °C olarak ölçülmüştür. Bu nedenle, başlangıç ve ortam sıcaklığı 48 °C olarak tanımlanmıştır. Taşınım modellemesi için 60 km/h için elde edilen yerel taşınım katsayıları disk yüzeylerine uygulanmıştır. Soğuma fazında, ısıtma fazının son zaman adımındaki sıcaklık dağılımı başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Soğuma fazındaki zaman adımı 10 s ve toplam analiz süresi 2500 s olarak girilmiştir. Taşınım modellemesi için, 90, 60 ve 30 km/h için referans alınan yerel taşınım katsayıları disk yüzeylerine tanımlanmıştır (Çizelge 4).

Isınım modellemesi için her iki fazda, disk dış yüzeylerine yayma oranı 0,2 ve arka plan sıcaklığı olarak ortam sıcaklığı (48 °C) tanımlanmıştır. Fren diski ile poyra arasındaki iletimin modellenmesi için Gülerüz ve Karadeniz'in [22] çalışmasında fren diski ve poyra çiftleri için ampirik olarak hesaplanan temas direnci değerleri referans alınmıştır (Çizelge 5). Diğer aks parçaları ile ilişkili iletim, taşınım ve ısınım etkileri ihmal edilmiştir. Yukarıda verilen sınır koşulları ve termal analiz değişkenleri dikkate alınarak; zamana bağlı termal analizler 90, 60 ve 30 km/h taşıt hızları için gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR (RESULTS)

Bu kısımda, deneysel ve sayısal olarak elde edilen soğuma süresi sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunun için soğuma süresi deneylerinde disk sürtünme ve alın yüzeylerinden temaslı termokupl ($t_1 - t_8$) ile toplanan sıcaklık verilerinin ortalaması alınarak, 450 °C'den 200 °C'ye soğuma eğrileri ve soğuma süreleri geleneksel ve bütünleşik fren diski ve poyra çifti için elde edilmiştir (Şekil 5, Çizelge 6). Sayısal soğuma eğrileri ve soğuma süreleri her iki fren diski ve poyra çifti için zamana bağlı termal analizlerin soğuma fazında, temaslı termokupl ile ölçüm alınan yüzey sıcaklıklarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Soğuma süresi deneylerinde, fren diski havalandırma kanatçıklarının hava girişine ve hava çıkışına konumlandırılan termokupllardan (k_1, k_2) alınan hava giriş ve çıkış sıcaklık verileri (T_{in}, T_{out}) Şekil 6'da soğuma süresi deneylerinin 5. ve 6. test adımları (I-1 ve S-60-1) için verilmektedir.

Geleneksel fren diski ve poyra çiftine ait sayısal ve deneysel soğuma süresi sonuçları (Analiz 1 – Deney 1) karşılaştırıldığında; 60 ve 90 km/h taşıt hızı için sonuçların birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. 30 km/h taşıt hızı için sayısal sonuçların deneysel sonuçların % 34,8 oranında üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Buna karşılık, lineer regresyon modeli kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel olarak hesaplanan R^2 değeri % 99,98 olarak elde edilmektedir.

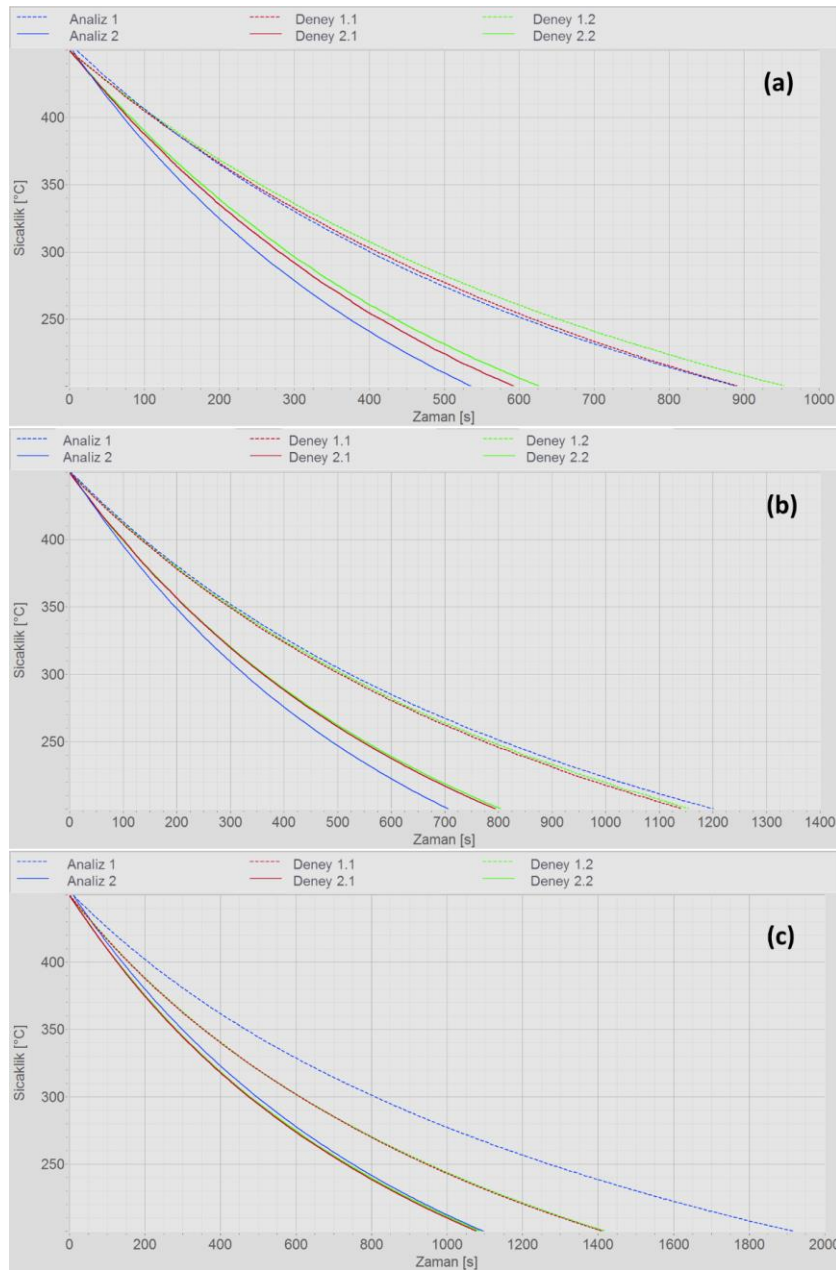
Bütünleşik fren diski ve poyra çiftine ait sayısal ve deneysel sonuçlar (Analiz 2 – Deney 2) incelendiğinde; yüksek hızlarda (90 ve 60 km/h) sayısal sonuçların deneysel sonuçların % 12,1-12,9 oranında altında kaldığı görülmektedir. Bu hızlar için R^2 değeri % 99,92-99,95

Çizelge 6. 450 °C'den 200 °C'ye soğuma süreleri – t_{cooldown} [s] (Cooldown period results from 450 °C to 200 °C – t_{cooldown} [s])

v [km/h]	Geleneksel fren disk & poyra çifti					Bütünleşik fren disk & poyra çifti				
	Deney-1.1	Deney-1.2	Deney-1 Ortalama	Analiz-1	R ² (Fark)	Deney-2.1	Deney-2.2	Deney-2 Ortalama	Analiz-2	R ² (Fark)
90	882	945	913	870	% 99,97 (% -4,8)	580	614	597 (↓% 34,6)	520 (↓% 40,2)	% 99,95 (% -12,9)
60	1134	1147	1141	1190	% 99,99 (% 4,3)	781	790	785 (↓% 31,2)	690 (↓% 42,0)	% 99,92 (% -12,1)
30	1406	1414	1410	1900	% 99,98 (% 34,8)	1074	1083	1079 (↓% 23,5)	1080 (↓% 43,2)	% 99,96 (% 0,1)

aralığında hesaplanmaktadır. 30 km/h taşıt hızı için sayısal ve deneysel sonuçlar oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Fren disk soğuma süresi üzerinde etkili parametreler; yüzey alanı, ortalama taşınım katsayısı ve ısı kapasitedir. Önerilen bütünleşik fren disk ve poyra çifti ile geleneksel tasarıma göre fren disk ıslak alanı için her üç

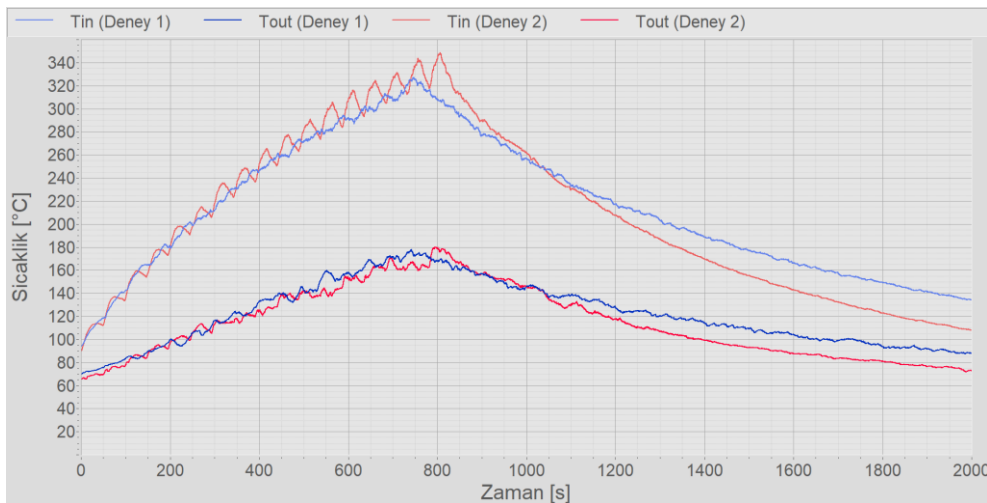
**Şekil 5.** 450 °C'den 200 °C'ye sayısal ve deneysel soğuma eğrileri: (a) 90 km/h, (b) 60 km/h, (c) 30 km/h (Numerical and experimental cooldown period curves from 450 °C to 200 °C: (a) 90 km/h, (b) 60 km/h, (c) 30 km/h)

hızdaki değerlerin ortalaması alınarak ortalama taşınım katsayısında elde edilen artış % 47,5'dir. Geleneksel tipe göre bütünleşik fren diski ağırlığı % 23,6 daha hafif olup, disk ıslak yüzey alanı % 6,8 daha fazladır. Geleneksel tasarıma göre, önerilen bütünleşik fren diskinde, disk ağırlığındaki % 23,6 azalmaya karşılık, taşınım katsayısında % 47,5 artış meydana gelmektedir. Bunun sonucunda, geleneksel fren diskine göre sayısal olarak hesaplanan ortalama soğuma süresinin % 41,8 oranında iyileştiği görülmektedir. Deneysel soğuma süresindeki iyileşme miktarı % 29,8 olarak elde edilmektedir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farkların nedenleri; doğal taşınım, diğer yüzeylerden fren diskine olan ısıtım ve fren diski-poyra dışındaki parçalara olan ısıl iletim etkilerinin sayısal modele dâhil edilmemesidir. Geleneksel ve bütünleşik fren diski ve poyra çiftlerinin sayısal ve deneysel soğuma süresi sonuçları üzerinden istatistiksel olarak hesaplanan R^2 değerleri göz önüne alındığında; gerçekleştirilen kabuller doğrultusunda, tüm taşıt hızları için yüksek bir doğrulama elde edildiği söylenebilmektedir. Ayrıca, Şekil 6'da verilen deneysel hava giriş ve çıkış sıcaklıkları (T_{in} , T_{out}) incelendiğinde; önerilen bütünleşik fren diskinin havalandırma kanatçıklarından dış ortama atılan hava sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Atalet dinamometresi deneylerinin ısıtma fazında, fren diski yüzey sıcaklığının $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşması için geleneksel fren diski ve poyra çiftinde ortalama 15 kez fren uygulanması gerekirken (Deney-1); bütünleşik fren diski ve poyra çiftinde ortalama 17 kez fren uygulanması ile istenilen sıcaklığa ulaşılmıştır (Deney-2). Buna göre, önerilen bütünleşik diskin yüzey sıcaklığının aynı değere çıkarılması için sisteme daha fazla ısı girdisinde bulunulması gerekmektedir. Buna paralel olarak önerilen tasarımın geleneksel tasarıma göre havalandırma kanatçıklarından birim zamanda daha fazla ısı atıldığı için havalandırma kanatçıklarından dış ortama atılan hava sıcaklıkları daha yüksek olmaktadır. Önerilen bütünleşik fren diskinin ısıl kapasitesinin daha az olmasına karşılık (disk ağırlığı % 23,6 daha hafif), havalandırma kanatçıklarına ait yüzey

alanı % 11,2 ve bu bölgedeki ortalama taşınım katsayısı % 59,4 daha fazladır. Bu nedenle önerilen tasarımın havalandırma kanatçıklarının etkinliği daha yüksektir. Bunun sonucunda, geleneksel fren diski ve poyra çiftine göre bütünleşik fren diski ve poyra çifti ile soğuma süresinde % 29,8 iyileşme elde edilmektedir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, zamana bağlı termal analizler ile geleneksel ve bütünleşik fren diski ve poyra çiftlerinin soğuma süreleri farklı taşıt hızları için hesaplanarak, atalet dinamometresi deneyleri ile doğrulanmıştır. Geleneksel fren diski ve poyra çiftine ait sayısal ve deneysel sonuçlar için R^2 değeri % 99,97-99,99 olarak hesaplanırken; bütünleşik fren diski ve poyra çiftine ait sonuçlar için R^2 değeri % 99,92-99,96 olarak elde edilmiştir. İki farklı tasarım üzerinde gerçekleştirilen sayısal ve deneysel inceleme sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen bütünleşik fren diskinin ısıl kapasitesinin geleneksel tasarıma göre % 23,6 daha az olmasına karşılık, sahip olduğu havalandırma kanatçıklarına ait yüzey alanı % 11,2 ve bu bölgedeki ortalama taşınım katsayısı % 59,4 daha fazladır. Bunun sonucunda, önerilen tasarım ile geleneksel tasarıma göre soğuma süresinde ortalama % 29,8 iyileşme elde edilirken, tek bir dingil ucunda fren diski ve poyra toplam ağırlığı 10 kg (% 15,2) hafifletilmiştir. Bu çalışma kapsamında doğrulanan simülasyon sistematığı ile farklı fren diski ve poyra çiftlerinin fren diski soğuma süresine olan etkisi hesaplanabilmektedir. Bu çalışma, taşıt çizgisel hızı kaynaklı çapraz hava akışı, taşıt gövdesi ve dingil ucu paketlemesi etkilerini içermemektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında önerilen sayısal ve deneysel prosedür taşıt seviyesinde gerçekleştirilecek ileri çalışmalar için kılavuzluk sağlamaktadır.



Şekil 6. Fren diski havalandırma kanatçıklarının hava giriş ve çıkış sıcaklıkları (Air inlet and outlet temperatures of brake disc ventilation vanes)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Tübitak 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında “Ağır ticari araçlar için yüksek başarılı havalandırılmalı fren diski ve poyra tasarımı” başlıklı ve 3190738 numaralı projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Tübitak’a ve Ege Fren San. ve Tic. A.Ş.’ye teşekkürlerini sunar.

**ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)**

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Ibrahim Can GÜLERYÜZ: Soğuma süresi analizlerini gerçekleştirmiş, sonuçları analiz etmiş, makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

Özgün Cem YILMAZ: Soğuma süresi deneylerini gerçekleştirmiş, sonuçları analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gotowicki PF, Nigrelli V, Mariotti GV, et al., “Numerical and experimental analysis of a pegs-wing ventilated disk brake rotor, with pads and cylinders”, *10th EAEC European Automotive Congress*, Serbia, 1-15, (2005).
- [2] Stephens A, “Aerodynamic cooling of automotive disc brakes”, *Master’s Thesis*, RMIT University, (2006).
- [3] Chi Z, “Thermal performance analysis and geometrical optimization of automotive brake rotors”, *Doctoral Dissertation*, University of Ontario Institute of Technology, (2008).
- [4] McPhee AD, Johnson DA, “Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor”, *Int J Therm Sci*, 47(4), 458–467, (2008).
- [5] Pulugundla G, “CFD design analysis of ventilated disc brakes”, *Master’s Thesis*, Cranfield University of Engineering, (2008).
- [6] Palmer E, Mishra R, Fieldhouse J, “An optimization study of a multiple-row pin-vented brake disc to promote brake cooling using computational fluid Dynamics”, *Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering*, 223(7), 865–875, (2009).
- [7] Sarip SB, “Lightweight friction brakes for a road vehicle with regenerative braking. Design analysis and experimental investigation of the potential for mass reduction of friction brakes on a passenger car with regenerative braking”, *Doctoral Dissertation*, University of Bradford, (2012).
- [8] Pevce M, Potro I, Bombek G, et al., “Prediction of the cooling factors of a vehicle brake disc and its influence on the results of a thermal numerical simulation”, *Int J Automot Technol*, 13(5), 725–733, (2012).
- [9] Raj KT, Ramsai R, Mathew J, et al., “Numerical investigation of fluid flow and heat transfer characteristics on the aerodynamics of ventilated disc brake rotor using CFD”, *Therm Sci*, 18(2), 667–675, (2014).
- [10] Belhocine A, Bouchetara M, “Structural and thermal analysis of automotive disc brake rotor”, *Arch Mech Eng*, 61(1), 89–113, (2014).
- [11] Belhocine A, Cho CD, Nouby M, et al., “Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation”, *Appl Comput Mech*, 8, 5–24, (2014).
- [12] Shinde VV, Sagar CD, Baskar P, “Thermal and structural analysis of disc brake for different cut patterns”, *Int J Eng Trends Technol*, 11(2), 84–87, (2014).
- [13] Yan HB, Zhang QC, Lu TJ, “An X-type lattice cored ventilated brake disc with enhanced cooling performance”, *Int J Heat Mass Transf*, 80, 458–468, (2015).
- [14] Kiran CH, “Numerical stimulation of ventilated disc cooling effect”, *Int J Mech Eng Robot Res*, 4(1), 257, (2015).
- [15] Voller GP, Tirovic M, Morris R, et al., “Analysis of automotive disc brake cooling characteristics”, *Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering*, 217(8), 657–666, (2003).
- [16] Galindo-Lopez CH, Tirovic M, “Understanding and improving the convective cooling of brake discs with radial vanes”, *Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering*, 222(7), 1211–1229, (2008).
- [17] Mew T, “Transient thermal response of solid, pinned and highly porous ventilated brake discs”, *Doctoral Dissertation*, University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment, School of Civil and Environmental Engineering, (2014).
- [18] Tang J, Bryant D, Qi HS, “Coupled CFD and FE thermal mechanical simulation of disc brake”, *EuroBrake 2014*, France, (2014).
- [19] Stevens K, Tirovic M, “Heat dissipation from a stationary brake disc, part 1: analytical modelling and experimental investigations”, *Proc IMechE, Part C: J Mechanical Engineering Science*, 232(9), 1707–1733, (2018).
- [20] Tirovic M, Stevens K, “Heat dissipation from a stationary brake disc, part 2: CFD modelling and experimental validations”, *Proc IMechE, Part C: J Mechanical Engineering Science*, 232(10), 1898–1924, (2018).
- [21] Güleriyüz İC, Yılmaz B, “Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(4), 936-947, (2020).
- [22] Güleriyüz İC, Karadeniz ZH, “Transient thermal analyses of an integrated brake rotor and wheel hub for heavy duty vehicles”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, (2021).
- [23] Müdürlüğü, Emniyet Genel. “Karayolları trafik yönetmeliği, Ankara: Resmi Gazete (23053 Mükerrer sayılı)”, (2012).