

Investigation of Heavy-duty Vehicle Brake Disc Cooling Behavior

 İbrahim Can GÜLERYÜZ *  Barış YILMAZ 

Ege Fren Inc., Department of Product Design and Development, 35060, Pınarbaşı/İZMİR

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 01/06/2020

Revision: 24/09/2020

Accepted: 09/11/2020

Highlights

- Ventilation Vane Design and Analysis of Brake Disc
- CFD and Cooldown Period Analysis

Keywords

 Ventilated Brake Disc
 CFD Analysis
 Transient Thermal
 Analysis
 Inertia Dynamometer
 Heavy-duty Vehicle

In this study, computational fluid dynamics (CFD) and transient thermal analyses of heavy-duty ventilated brake discs are performed for the determination of the cooling behavior of different ventilation vane geometries. Results showed that the ventilation vane geometry has crucial influence on the average convective heat transfer coefficient and the cooldown period of the heavy-duty brake discs.

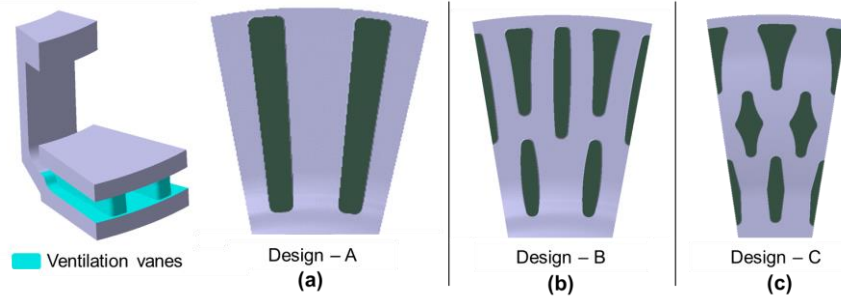


Figure A. Ventilation vane geometries used in the numerical investigation: (a) Straight vane (Design-A), (b) Proposed vane design (Design-B), (c) Vane design used in heavy commercial brake disc (Design-C)

Purpose: In this study, a validated simulation procedure is aimed for the examination of the effect of different ventilation vane geometries on the cooling performance of ventilated brake discs.

Theory and Methods: Firstly, the convective heat transfer coefficients are calculated for a standard (non-anticoning) ventilated brake disc by CFD analyses and they are verified by comparing with the experimental results. After ensuring the reliability of CFD analysis, the transient thermal analyses of an anticoning heavy-duty disc with straight ventilation vanes are carried out to achieve the cooldown period results. The thermal analysis parameters are verified by using the experimental cooldown period results. Furthermore, CFD and transient thermal analyses are conducted for the determination of the influence of ventilation vane geometry on the cooling performance of the brake discs.

Results: The results have shown that the correlation between numerical and experimental average convective heat transfer coefficients and cooldown periods is achieved by over 95 %. Furthermore, the proposed ventilation vane geometry provides the improvement in the average convective heat transfer coefficient by 18.5 % and the cooldown period by 23.5 %. The CFD and transient thermal analysis results are presented and compared in Section 4.

Conclusion: The simulation process used in the study showed that a considerable correlation has been achieved. Therefore, the proposed approach can be used as the main tool for the ventilation vane development projects of heavy-duty brake disc. On the other hand, those results cannot present the conditions on the vehicle due to wheel cavity and the vehicle bodywork. Therefore, further research should be conducted on vehicle level in consideration of cross-flow and vehicle package constraints. The proposed approach within scope of this study can guide for the further research to be carried out on the vehicle level.



Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi

İbrahim Can GÜLERYÜZ * Barış YILMAZ

Ege Fren San. ve Tic. A.Ş., Ürün Tasarımı ve Geliştirme Bölümü, 35060, Pınarbaşı/İZMİR

Öz

Bu çalışmada, ağır hizmet araçlarında kullanılan havalandırılmalı fren disklerinin farklı havalandırma kanatçığı geometrileri için soğuma davranışı incelenmiştir. İlk aşamada, deneysel taşınım katsayısı değerleri farklı dönüş hızları için bilinen, standart (konikleşme engelleyici olmayan) ağır hizmet aracı fren diskinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak hesaplanan ortalama taşınım katsayısı değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak HAD analizi değişkenleri doğrulanmıştır. Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki korelasyon % 99.9 olarak hesaplanmıştır. İkinci aşamada, konikleşme engelleyici düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı fren diskinin (referans) soğuma başarımı sayısal olarak incelenmiştir. Referans fren diskinin soğuma süresi değerleri, farklı araç hızları için atalet dinamometresi deneyleri ile elde edilmiştir. Referans havalandırılmalı fren diskinin ortalama taşınım katsayısı, HAD analizleri ile hesaplanmıştır. Zamana bağlı disk sıcaklıklarını ve soğuma sürelerini elde etmek için taşınım ve ısıtım etkileri göz önünde bulundurularak referans fren diskinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel soğuma süresi sonuçları karşılaştırılarak, termal analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Doğrulama sonucunda, sayısal ve deneysel soğuma süreleri arasında % 97.9'a varan bir korelasyon elde edilmiştir. Yeni bir havalandırma kanatçığı geometrisi önerilerek, konikleşme engelleyici fren disk geometrisine uyarlanmıştır. Yeni kanatçık geometrisine sahip diskin HAD ve termal analizleri gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans fren disk ve ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren disk ile karşılaştırılmıştır. Önerilen fren disk tasarımı ile referans havalandırılmalı fren disk tasarımı karşılaştırıldığında, ortalama taşınım katsayısında % 18.5 artış ve soğuma süresinde % 23.5 iyileşme elde edilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/06/2020
Düzeltilme: 24/09/2020
Kabul: 09/11/2020

Anahtar Kelimeler

Havalandırılmalı Fren Diski
HAD Analizi
Zamana Bağlı Termal Analiz
Atalet Dinamometresi
Ağır Hizmet Aracı

Keywords

Ventilated Brake Disc
CFD Analysis
Transient Thermal Analysis
Inertia Dynamometer
Heavy-duty Vehicle

Investigation of Heavy-duty Vehicle Brake Disc Cooling Behavior

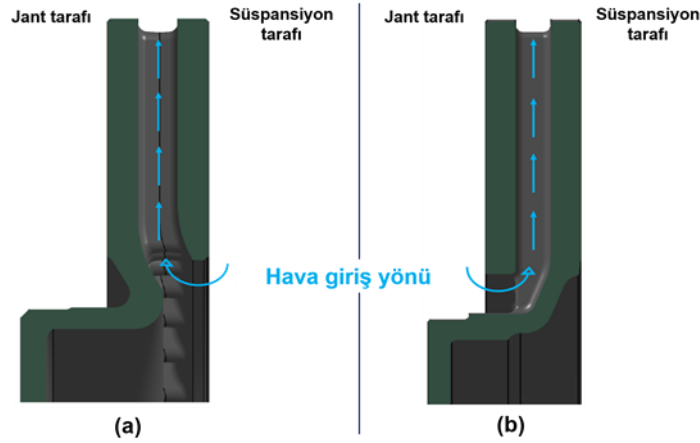
Abstract

In this study, cooling behavior of ventilated brake disc which is used in heavy-duty vehicles was investigated for different ventilation vane geometries. In the first stage, computational fluid dynamics (CFD) analyses were conducted on a standard (non-anticoning) heavy-duty brake disc whose experimental convective heat transfer coefficients are known different rotational speeds. The CFD analysis parameters are verified by comparing the numerically calculated average convective heat transfer coefficient values with the experimental results. The correlation between numerical and experimental average convective heat transfer coefficients was calculated as 99.9 %. In the second stage, the cooling performance of anticoning heavy-duty disc (reference) with straight ventilation vanes were investigated numerically. The cooldown period values of reference brake disc were measured by inertia dynamometer experiments for different vehicle speeds. Average convective heat transfer coefficient of reference ventilated brake disc was calculated by CFD analyses. To obtain time dependent disc temperatures and cooldown periods, transient thermal analyses of reference brake disc were conducted by consideration of convection and radiation effects. The thermal analysis parameters are verified by comparing the numerical and experimental cooldown period results. As a result of the verification, a correlation between numerical and experimental cooldown periods was obtained up to 97.9 %. A new ventilation vane geometry was proposed and adopted to anticoning brake disc geometry. The CFD and thermal analyses of disc with new ventilation vane geometry were carried out and the average convective heat transfer coefficient and cooldown duration results were compared with the reference brake disc and another brake disc used in heavy commercial vehicles. In comparison of the proposed brake disc design with the reference ventilated brake disc design the average convective heat transfer coefficient was increased by 18.5 % and the cooldown period was improved by 23.5 %.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yol taşıtlarının frenlemesi sonucunda açığa çıkan yüksek ısının sistemden hızlı ve homojen bir şekilde uzaklaştırılması amacıyla disk frenli taşıtlarda havalandırma kanallı fren diskleri tercih edilmektedir. Havalandırma kanallı fren diskleri, havalandırma kanatçığı bulunmayan konvansiyonel dolu fren disklerine göre daha hafif olmalarının yanı sıra, daha fazla taşınım yüzeyine sahiptirler. Bu sayede dolu fren disklerine göre daha etkin ısı transferi karakteristiği sergilemektedirler. Havalandırma fren diskleri binek, hafif ticari ve birçok ağır hizmet aracında geniş bir uygulama alanına sahiptir [1].

Havalandırma fren disklerinde, havalandırma kanallarının açıldığı yön (hava giriş yönü) göz önünde bulundurularak iki farklı tasarım söz konusudur. Birincisinde havalandırma kanalları süspansiyon yönüne açılırken (Şekil 1(a)), diğerinde jant içerisine (Şekil 1(b)) açılmaktadır. Havalandırma kanallarının jant içerisine açıldığı tasarımlar, kanalların süspansiyon yönüne açıldığı tasarımlara göre daha rijit ve daha düşük konikleşme sergilerler [2]. Bu nedenle, bu tasarımlar konikleşme engelleyici havalandırma fren diskleri olarak isimlendirilirken; havalandırma kanallarının süspansiyon yönüne açılan tasarımlar standart (konikleşme engelleyici olmayan) havalandırma fren diskleri olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1. (a) Standart, (b) konikleşme engelleyici havalandırma fren diskleri

Frenleme sonucu açığa çıkan yüksek ısının sistemden hızlı bir şekilde uzaklaştırılmadığı ve homojen olarak dağıtılamadığı durumlarda fren diskinde çarpılma, çatlak ve hasar oluşumu ve buna bağlı ses ve titreşim problemleri, fren diski ve balatalarda erken ve düzensiz aşınma sorunları ve dingil ucundaki rulmanlarda hasar görülebilir. Bu nedenle, fren disklerinde ısı transferinin iyileştirilmesi için havalandırma kanatçıklarının optimizasyonu aktif bir araştırma alanı olmaktadır. Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğunu binek ve yüksek performans taşıtı havalandırma fren diskleri üzerine gerçekleştirilen sayısal ve deneysel çalışmalar oluşturmaktadır [1], [3]-[17]. Ayrıca literatürde hızlı trenlerde kullanılan havalandırma fren disklerinin soğuma başarımlarının incelendiği çalışmalara rastlanmaktadır [18], [19]. Ağır hizmet araçları ile ilgili yer bulan az sayıdaki çalışma [20]-[25] tarafından gerçekleştirilmiştir.

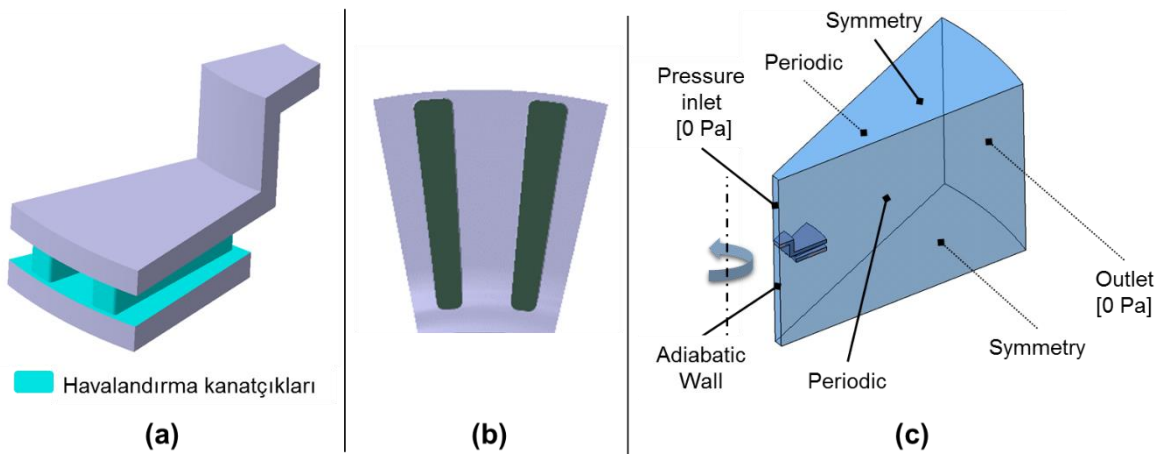
Voller ve diğ. farklı disk dönüş hızları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri ile referans aldıkları Ø434 mm dış çap ölçüsüne sahip, standart ve düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı fren diski için ortalama taşınım katsayılarını sayısal olarak hesaplamışlardır. Deneysel çalışmada, yüzey sıcaklığı 100°C'ye çıkarılmış fren diskinin sabit dönüş hızı için soğuma eğrilerini elde etmiştir. Deneysel çalışma, 100 – 800 d/dk aralığındaki dönüş hızları için tekrarlanmıştır. Soğuma eğrilerinden yola çıkılarak elde edilen deneysel taşınım katsayıları sayısal sonuçların doğrulamasında kullanılmıştır [20]. Galindo-Lopez ve Tirovic çalışmalarında, Voller ve diğ.'in deneysel çalışmasında elde ettiği ortalama taşınım katsayısı sonuçlarını kullanarak, önermiş oldukları HAD analizi değişkenlerini doğrulamıştır. Sonrasında referans alınan standart, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diskinin ardışık kanatçıklarının arasına ilave bir kanatçık yerleştirerek, bu kanatçığın havalandırma kanalındaki farklı pozisyonlarının taşınım katsayısına olan etkisi incelenmiştir [21]. Diğer çalışmalarda, durağan ortam havasında, hareketsiz haldeki havalandırma fren diskinin (havalandırma kanallarının açık ve kapalı olduğu durumlar için) doğal

taşınım analitik, sayısal ve deneysel olarak ele alınarak, ortalama taşınım katsayıları arasındaki ilişki araştırılmıştır [23], [24].

Literatürde ağır hizmet aracı fren diskleri ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların hiçbirinde atalet dinamometresi ile gerçekleştirilen sürtünme çifti devreye alma deneylerinden soğuma süresi deneyleri ile ilgili doğrulama çalışması yer almadığı gibi, farklı havalandırma kanatçıklarının fren diski soğuma süresine etkisi doğrudan araştırılmamıştır. Bu çalışmada, ağır hizmet araçlarında kullanılan 22.5" jant ölçüsüne uygun disk fren ile beraber kullanılmakta olan $\varnothing 430$ mm dış çap ölçüsüne sahip konikleşme engelleyici havalandırma fren diskinin soğuma süresinin iyileştirilmesi için yeni bir havalandırma kanatçığı tasarımı önerilmektedir. Bu amaçla, farklı dönüş hızları için deneysel taşınım katsayısı değerleri bilinen standart, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diskinin HAD analizleri gerçekleştirilerek, HAD analizi parametreleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Atalet dinamometresi deneyleri ile farklı araç hızları için soğuma süresi değerleri bilinen konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diski referans alınmıştır. Doğrulan HAD analizi değişkenleri ile referans fren diskinin HAD analizleri gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Fren diski soğuma mekanizmasına en büyük katkı taşınım ile gerçekleşen ısı transferi ile meydana gelmektedir. Havalandırma kanatçıkları etrafındaki hava akışı ve taşınım yüzeyleri taşınım ile olan ısı transferinin iyileştirilmesinde rol oynamaktadır [20], [21]. Bu çalışmada taşınım ile olan ısı transferinin farklı fren diskleri için karşılaştırılabilmesi için birim yüzey alanında, birim sıcaklık farkında ve birim sürede gerçekleşen ısı transferinin ifadesi olan taşınım katsayısı göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, fren diski ortalama taşınım katsayısı soğuma süresinin hesaplandığı termal analizlerde disk taşınım yüzeylerine sınır koşulu olarak tanımlandığı için önemlidir. Referans fren diskinin HAD analizlerinden elde edilen ortalama taşınım katsayısı kullanılarak bu diskin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak elde edilen soğuma eğrileri ve soğuma süreleri atalet dinamometre deneyi sonuçları ile karşılaştırılarak termal analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Yeni bir kanatçık geometrisi önerilerek, bu diske ait HAD ve termal analizler tekrarlanmış, ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans fren diski ve ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diski ile karşılaştırılmıştır.

2. HAD MODELİNİN DOĞRULANMASI (VERIFICATION OF CFD MODEL)

Bu bölümde, HAD analizi parametrelerinin doğrulanması için literatürde farklı dönüş hızları için deneysel taşınım katsayısı değerleri bilinen standart ve düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diski referans alınmıştır [21]. Referans alınan fren diski $\varnothing 434$ mm dış çap ölçüsüne ve 45 mm kalınlığına ve eş boşluklu 30 adet düz havalandırma kanatçığına sahiptir (Şekil 2). Literatürdeki durağan ortam havasında dönen disk problemlerinde olduğu gibi bu problemde de dönele simetri kabulü yapılmıştır [6], [9], [11], [12]. Böylece ihtiyaç duyulan hesaplama gücü ciddi oranda azaltılmıştır. HAD analizleri için oluşturulan 24° disk dilimi modeli Şekil 2(b)'de paylaşılmaktadır.



Şekil 2. (a) Standart fren diski, (b) düz havalandırma kanatçığı, (c) HAD analizleri için hazırlanan sayısal model

Dilim disk modeli disk çapının 10 katı çapındaki ve 5 katı yüksekliğindeki kontrol hacmi ile eş merkezli olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu problemde sadece fren diskinin sabit sıcaklıktaki yüzeylerinde zorlamalı taşınım (dış akış) çözümleneceği için dilim fren diski katı modeli onu çevreleyen kontrol hacminden çıkarılarak, disk katı modeli sayısal modele dâhil edilmemiştir. Sayısal ağ yapısı yaklaşık 398.000 düğüm noktası ve 1.089.000 elemandan oluşmakta olup, sınır tabaka için ilk hücre yüksekliği 0.1 mm ve katman sayısı 10 olarak tanımlanmıştır. HAD analizleri için Ansys Fluent yazılımı kullanılmış olup, HAD analizleri için oluşturulan fren diski sayısal modeli Şekil 2(c)'de verilmiştir. Deneyler durağan ortam havasında gerçekleştirildiği için basınç girişi (pressure inlet) ve basınç çıkışı (pressure outlet) ile belirtilen sınır koşullarına 0 Pa tanımlanmıştır. Kontrol hacminde disk dönme eksenine dik üst ve alt yüzeylere simetri (symmetry), sayısal modelin dönel simetrik olduğunu belirtmek için periyodik (periodic) sınır koşulları tanımlanmıştır. Kontrol hacmi hava olup, havanın 20°C'deki termofiziksel özellikleri tanımlanmıştır. Isı transferi çözümlenmesi için enerji denklemleri etkinleştirilmiş olup, türbülans etkileri için benzer problemler için önerilen SST k-omega türbülans modeli seçilmiştir [24], [26]. Havalandırma fren diski soğuma mekanizması santrifüj fan, pompa ve türbin mantığına dayandığı için Karadeniz ve Gülyüz'ün çapraz akış türbinleri üzerine gerçekleştirdiği sayısal çalışmadaki çözücü ayarları referans alınmıştır [26]. Havaya ait kaldırma tesiri ve ışınlam etkileri ihmal edilmiştir. Galindo-Lopez ve Tirovic'in deneysel çalışmalarında ortalama taşınım katsayılarını 100°C disk yüzey sıcaklığı için 100 – 800 d/dk aralığındaki farklı dönüş hızları için hesaplamışlardır [21]. Bu nedenle HAD analizleri 200, 400 ve 800 d/dk dönüş hızları ve 100°C disk yüzey sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir.

HAD analizleri sonucunda, her bir dönüş hızı için sayısal olarak hesaplatılan ortalama taşınım katsayıları, Galindo-Lopez ve Tirovic'in deneysel çalışması sonucunda elde ettiği değerler karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmektedir [21].

Tablo 1. Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayılarının karşılaştırılması

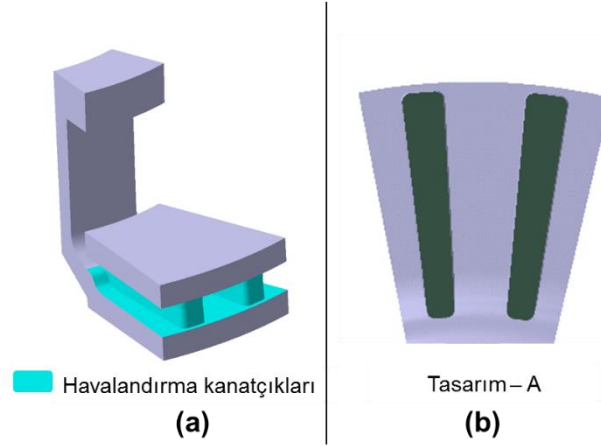
n [d/dk]	h_{conv} (Deney) [W/m ² K]	h_{conv} (Sim) [W/m ² K]	Fark [%]
200	15.3	15.1	%-1.0
400	25.3	25.8	%2.2
800	45.2	45.7	%1.1

3. SOĞUMA SÜRESİ ANALİZLERİ VE SİSTEM İYİLEŞTİRMELERİ (COOLING TIME ANALYSES AND SYSTEM IMPROVEMENTS)

Soğuma süresi analizleri için konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı fren diski ve bu diske ait farklı araç hızları için atalet dinamometresi deneyleri ile elde edilen soğuma süresi sonuçları referans alınmıştır. Önceki bölümde doğrulanmış HAD analizi değişkenleri ile referans fren diskinin HAD analizleri gerçekleştirilerek, ortalama taşınım katsayısı hesaplanmıştır. HAD analizlerinden elde edilen ortalama taşınım katsayısı kullanılarak referans fren diskinin zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak elde edilen soğuma süreleri atalet dinamometresi deney sonuçları ile karşılaştırılarak termal analiz değişkenleri doğrulanmıştır. Sistem iyileştirmeleri başlığı altında yeni bir kanatçık geometrisi önerilerek, bu diskin HAD ve termal analizler tekrarlanmış, ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans fren diski ve ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diski ile karşılaştırılmak üzere hesaplanmıştır.

Termal analiz modelinin doğrulanması için referans alınan konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı fren diski Ø430 mm dış çap ölçüsüne, 45 mm kalınlığına ve eş boşluklu 30 adet düz havalandırma kanatçığına sahiptir (Şekil 3(a)-(b)). Bu tasarım "Tasarım-A" olarak isimlendirilmiştir. Disk simetrisi göz önünde bulundurularak, 24° disk dilimi modeli sayısal modele dâhil edilmiştir. Karayolları trafik yönetmeliğine göre, kamyon ve çekici grubu ağır hizmet araçları (N2 ve N3 grubu) için otoyollarda uyulması gereken yasal hız sınırı 90 km/h olarak belirtilmektedir [27]. Bu nedenle, atalet dinamometresi üzerinde gerçekleştirilen soğuma süresi deneyleri bu araçlar için belirlenen genel hizmet koşulları, bu araçların yasal hız sınırı, araç üreticileri ve ticari araçlara yönelik fren üreticisi firmaların deney prosedürleri

göz önünde bulundurularak; 30, 60 ve 90 km/h araç hızları için gerçekleştirilmektedir. Referans fren diskinin HAD analizleri doğrulanmış analiz değişkenleri ile bu araç hızlarına karşılık gelen dönüş hızları ve 100°C disk yüzey sıcaklığı için önceki bölümde detayları paylaşılan sistematik izlenerek gerçekleştirilmiştir. Her bir araç hızı için sayısal olarak hesaplatılan ortalama taşınım katsayıları Tablo 4’de verilmektedir.



Şekil 3. (a) Konikleşme engelleyici fren diski, (b) düz havalandırma kanatçığı (Tasarım-A)

Fren diski soğuma sürelerinin sayısal olarak hesaplanması için zamana bağlı termal analizler Ansys Mechanical yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Termal analiz geometrisi olarak Şekil 3(a)’da verilen 24° disk dilimi modeli göz önünde bulundurulmuştur. Sonlu elemanlar ağı için tüm yüzeylere 3 mm eleman boyutu tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ağ yapısı yaklaşık 72.000 düğüm noktası ve 41.000 elemandan oluşmaktadır. Fren diski malzemesi olarak GG15 (EN-GJL-150) lamel grafitli dökme demir; yüksek ısı sığasına, yüksek termal iletkenliğe sahip ve düşük maliyetli olduğu için ağır hizmet araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, fren diski malzemesi olarak GG15 (EN-GJL-150) lamel grafitli dökme demir tercih edilmiştir. GG15 malzemesi için ANSYS malzeme kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. GG15 (EN-GJL-150) malzeme özellikleri

Parametre	Değeri
Yoğunluk [g/cm^3]	7.15
Termal iletkenlik katsayısı [$W/(m.K)$]	48
Özgül ısı [$J/(kg.K)$]	470

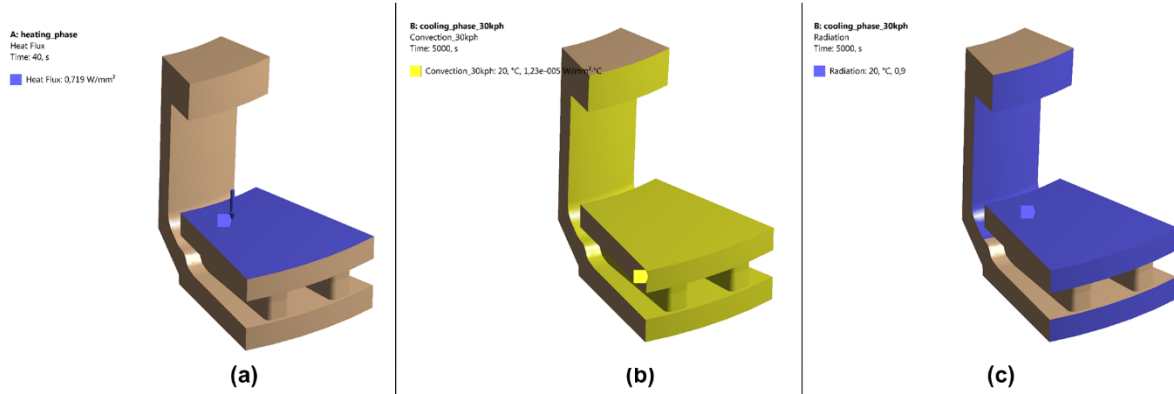
Atalet dinamometresi soğuma süresi deneyleri sırasıyla ısıtma ve soğuma fazları olarak adlandırılan ve birbirini takip eden iki aşamadan oluşmaktadır. Deneyin ilk aşamasında (ısıtma fazı), 2800 Nm’lik sabit frenleme torku 40 saniye süresince 85 km/h araç hızına karşılık gelen sabit dönüş hızı için uygulanmaktadır. Bunu takip eden soğuma fazında, frenleme torku kaldırılarak belirlenen araç hızlarına (30, 60 ve 90 km/h) karşılık gelen sabit disk dönüş hızları için fren diski sıcaklığı 50°C’ye düşüncüye kadar döndürülmekte ve soğuma eğrileri elde edilmektedir. Bu nedenle zamana bağlı termal analizler birbirini takip eden iki aşama için modellenmiştir. Ağır hizmet araçları atalet dinamometresi fren diski çatlak testi prosedüründe, 22.5” disk frenler için belirtilen sınır koşullarına göre, soğuma süresi deneylerine ait ısıtma fazı sınır koşulları (tork, süre, hız ve düşme sıcaklığı) belirlenmiştir. Bu sayede ısıtma fazı sonunda fren diski sürtünme yüzeylerindeki maksimum sıcaklığın 450 °C’nin üzerine çıkması sağlanabilmektedir.

Isıtma fazında, balataların disk üzerinde süpürdüğü sürtünme yüzeylerine, 0.719 W/mm² değerindeki sabit ısı akısı 40 saniye süresince uygulanmıştır (Şekil 4(a)). Isı akısı (q), Denklem 1’de verilen frenleme torku (T_b), disk dönüş hızı (ω_d) ve sürtünme yüzey alanı (A_s) arasındaki bağıntı ile hesaplanmaktadır. Isıtma

fazında, zaman adımı 1 s için toplam analiz süresi 40 s olarak tanımlanmıştır. Frenleme torku 85 km/h araç hızına karşılık gelen sabit dönüş hızında uygulandığı için bu hızdaki ortalama taşınım katsayısı lineer interpolasyonla hesaplanarak, Şekil 4(b)'de sarı ile belirtilen taşınım yüzeylerine tanımlanmıştır. 85 km/h araç hızına karşılık gelen dönüş hızı için ortalama taşınım katsayısı 27.1 W/m²K olarak hesaplanmıştır.

$$q = \frac{T_b \cdot \omega_d}{A_s} \quad 1$$

Soğuma fazında, zaman adımı 10 s olarak tanımlanmış olup, soğuma süresi deneyleri için belirlenen araç hızlarında HAD analizleri ile Tasarım-A için hesaplanan ortalama taşınım katsayısı değerleri (Tablo 4) taşınım yüzeylerine analiz süresince sabit olarak girilmiştir. Deneyler atalet dinamometresinin çevresel modunda, dinamometre kabineye disk dönüş eksenine dik doğrultuda 2.78 m/s hızına ve 20°C sıcaklığa sahip hava verilerek gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle termal analizlerin her iki aşamasında da ortam sıcaklığı 20°C olarak tanımlanmıştır. Isıtma fazında başlangıç sıcaklığı olarak ortam sıcaklığı tanımlanırken; soğuma fazında, ısıtma fazının son zaman adımıdaki (40. s) diske ait homojen olmayan sıcaklık dağılımı başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Voller ve diğ.'in 20 – 600 °C aralığı için gerçekleştirdikleri fren diski sıcaklık ölçümleri göz önünde bulundurularak, ışıınım modellemesi için yayma oranı 0.9 olarak referans alınmıştır [20]. Her iki fazda, Şekil 4(c)'de mavi belirtilen ışıınım yüzeylerine yayma oranı olarak 0.9 ve arka plan sıcaklığı 20°C (ortam sıcaklığı) olarak tanımlanmıştır. İletim ile ısı transferi ve dinamometre çevresel modu kaynaklı çapraz akış ihmal edilmiştir. Zamana bağlı termal analizler 30, 60 ve 90 km/h araç hızları için gerçekleştirilerek, fren diski sürtünme yüzeylerindeki maksimum sıcaklığın 450°C'den 50°C'ye düşme (soğuma) süreleri hesaplanmıştır. Sayısal olarak elde edilen soğuma süreleri, atalet dinamometresi deneyleriyle elde edilen soğuma süreleri ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3'de verilmektedir.



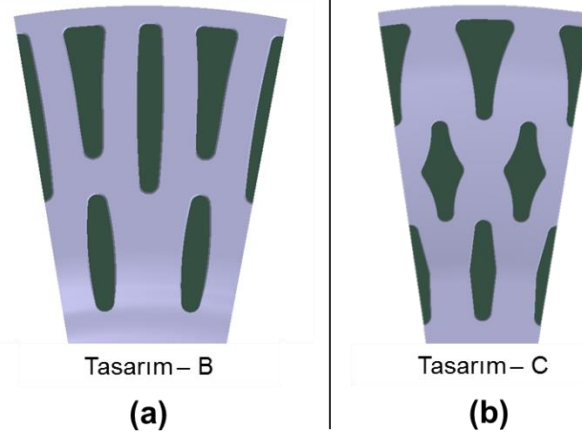
Şekil 4. Termal analiz sınır koşulları: (a) ısı akısı, (b) taşınım katsayısı, (c) ışıınım

Tablo 3. Sayısal ve deneysel soğuma sürelerinin karşılaştırılması (Tasarım-A).

V	$t_{cooling}$ (Deney)	$t_{cooling}$ (Sim)	Fark	Korelasyon
[km/h]	[s]	[s]	[%]	[%]
30	2435.5	3020	%-24.0	%96.6
60	1919.0	2090	%-8.9	%97.9
90	1531.7	1620	%-5.8	%97.8

Sistem iyileştirmesi olarak Şekil 5(a)'da verilen havalandırma kanatçığı geometrisi (Tasarım-B), referans alınan konikleşme engelleyici fren diskine uygulanarak, yukarıda detayları verilen simülasyon sistematiği izlenerek HAD ve zamana bağlı termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yeni kanatçık profili ile

kanatçıklarının öncü ve arka kısımlarında yüksek hızlı hava akışının bir sonucu olarak, fren diski taşınım katsayısında önemli bir artış elde edilmesi hedeflenmektedir. Ortalama taşınım katsayısındaki artış ile beraber fren diski soğuma süresi testlerinde soğuma periyodu önemli miktarda azalması beklenmektedir. Yeni kanatçık profili ile elde edilen sayısal ortalama taşınım katsayısı ve soğuma süresi sonuçları referans konikleşme engelleyici fren diski (Tasarım-A) ve ağır ticari araçlarda kullanılmakta olan havalandırma fren diski (Tasarım-C) ile karşılaştırılmıştır [28]. Bunun için havalandırma kanatçığı geometrisi Şekil 5(b)'de verilen ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diskinin de HAD ve zamana bağlı termal analizleri doğrulanmış simülasyon değişkenleri ile gerçekleştirilmiştir.

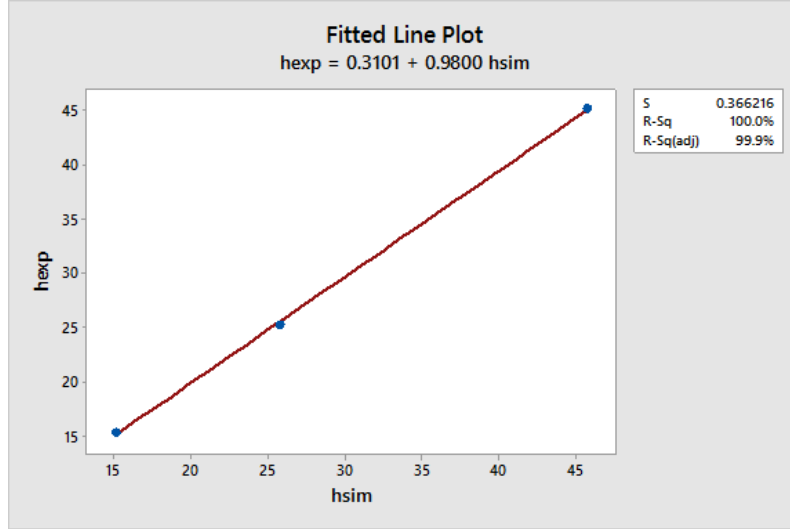


Şekil 5. (a) Önerilen havalandırma kanatçığı (Tasarım-B), (b) ağır ticari araçlarda kullanılan fren diskine ait havalandırma kanatçığı (Tasarım-C)

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

HAD analiz parametreleri, literatürde farklı dönüş hızları için deneysel taşınım katsayısı değerleri bilinen standart, düz havalandırma kanatçıklı ağır hizmet aracı diski için 200, 400 ve 800 d/dk dönüş hızlarında maksimum % 2.2 fark ile doğrulanmıştır (Tablo 1). Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları ve lineer regresyon modeli kullanılarak Minitab yazılımı ile istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki korelasyon % 99.9 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Sayısal olarak hesaplanan ortalama taşınım katsayılarının gerçek duruma çok uygun sonuç verdiği açıkça görülmektedir.

Termal analiz parametreleri atalet dinamometresi deneyi sonuçları bilinen konikleşme engelleyici, düz havalandırma kanatçıklı referans fren diski için 30, 60 ve 90 km/h araç hızlarına karşılık gelen disk dönüş hızları için doğrulanmıştır. Sayısal ve deneysel soğuma süreleri için hesaplanan maksimum fark miktarının 30 km/h araç hızında % 24.0 olduğu görülmektedir. 60 ve 90 km/h araç hızları için hesaplanan sayısal soğuma süreleri için fark miktarının sırasıyla % 8.9 ve % 5.8 olarak elde edilmektedir. Fark elde edilmesinde rol oynayan en büyük etmen sayısal çalışmada dinamometre çevresel modu kaynaklı çapraz akışın ihmal edilmesidir. Atalet dinamometresinin çevresel modu kaynaklı çapraz akış disk dönüş eksenine dik ve disk dönüş hızından bağımsız olarak, soğuma süresi deneyleri için sabit 2.78 m/s hızındadır.



Şekil 6. Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki istatistiksel korelasyon

Çapraz akışın ihmal edilmesinin bir sonucu olarak tüm dönüş hızları için sayısal soğuma süreleri deneysel sürelerin üstünde kalmaktadır. Disk dönüş hızı arttıkça çapraz akışın disk soğuması üzerindeki etkinliği azalmaktadır. Bunun bir sonucu olarak düşük dönüş hızı için hesaplanan fark miktarı diğer iki hıza göre daha yüksektir. İstatistiksel olarak hesaplanan minimum korelasyon 30 km/h araç hızında % 96.6'dır. Benzer şekilde 60 ve 90 km/h araç hızları için korelasyon yüzdesi sırasıyla % 97.9 ve % 97.8 olarak hesaplanmaktadır (Tablo 3). Her üç araç hızı için de yüksek korelasyon elde edildiği söylenebilmektedir.

Sistem iyileştirmeleri başlığı altında gerçekleştirilen karşılaştırmalı HAD ve zamana bağlı termal analizler sonucunda hesaplanan ortalama taşınım katsayısı ve 450°C'den 50°C'ye soğuma süresi sonuçları 30, 60 ve 90 km/h araç hızlarına karşılık gelen disk dönüş hızlarında her üç tasarım için Tablo 4'de incelenmiştir. Önerilen havalandırma kanatçığı geometrisi (Tasarım-B) ile referans alınan tasarıma (Tasarım-A) göre ortalama taşınım katsayısında her üç hızdaki değerlerin ortalaması alınarak elde edilen artış % 18.5'dir. Taşınım katsayısındaki % 18.5 artışa karşılık olarak, sayısal soğuma süresi Tasarım-A'ya göre ortalama % 23.3 azalma görülmektedir. Tasarım-C için sayısal olarak hesaplanan ortalama taşınım katsayısı değerleri her üç hız içinde Tasarım-A'nın üzerinde yer almaktadır. Buna paralel olarak Tasarım-C'ye ait soğuma süreleri her üç hızda da Tasarım-A'nın altında yer almaktadır. Önerilen tasarım ile referans tasarıma göre; Tasarım-C'nin ortalama taşınım katsayısında elde edilen iyileşmeden 1.56 kat daha fazla artış elde edilmektedir. Buna ek olarak, 450°C'den 50°C'ye Tasarım-B'nin soğuma süresindeki iyileşme; Tasarım-C ile sağlanandan 2.1 kat daha fazladır. Havalandırma kanatçığı tasarımının fren diski soğuma karakteristiği üzerindeki önemi açıkça görülmektedir.

Tablo 4. Sayısal ortalama taşınım katsayıları ve soğuma sürelerinin karşılaştırılması.

V [km/h]	h_{conv} [W/m ² K]			$t_{cooling}$ [s]		
	Tasarım-A (Referans)	Tasarım-B (Önerilen)	Tasarım-C	Tasarım-A (Referans)	Tasarım-B (Önerilen)	Tasarım-C
30	12.3	14.6 (↑%18.8)	13.6 (↑%10.2)	3020	2360 (↓%21.9)	2870 (↓%5.0)
60	20.1	23.9 (↑%18.8)	22.8 (↑%13.4)	2090	1600 (↓%23.4)	1920 (↓%8.1)
90	28.0	33.0 (↑%17.9)	31.3 (↑%11.9)	1620	1220 (↓%24.7)	1460 (↓%9.9)
Ortalama [%]	-	↑%18.5	↑%11.8	-	↓%23.5	↓%7.6

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ağır hizmet aracı havalandırmalı fren diskinin soğuma karakteristiğinin belirlenmesi için yapılan sayısal analizler sonucunda hesaplanan ortalama taşınım katsayısı ve 450°C'den 50°C'ye soğuma süreleri literatürde ve hali hazırdaki deney sonuçları ile doğrulanarak sayısal modellemenin önemi ortaya koyulmuştur. Sayısal ve deneysel ortalama taşınım katsayıları arasındaki korelasyon % 99.9 olarak hesaplanmıştır. Karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilen HAD ve zamana bağlı termal analizlerle havalandırma kanatçığı tasarımının fren diski soğuma karakteristiği üzerindeki önemi vurgulanmıştır. Farklı araç hızları için gerçekleştirilen soğuma süresi analizleri ve deneyleri arasında % 97.9'a varan korelasyon elde edilmiştir. Önerilen fren diski tasarımı (Tasarım-B) ile referans havalandırmalı fren diskine göre, ortalama taşınım katsayısında % 18.5 artış ve soğuma süresinde % 23.5 iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca önerilen tasarımın soğuma süresindeki iyileşme; ağır ticari araçlarda kullanılan diğer bir fren diski tasarımı (Tasarım-C) ile sağlandan 2.1 kat daha fazladır. Sonuçlardan da görülebileceği üzere, havalandırma kanatçığı tasarımının fren diski soğuma karakteristiği üzerindeki önemi büyüktür. Bu çalışma kapsamında, ağır hizmet aracı fren disklerinin atalet dinamometresi ile soğuma süresi deneyleri sayısal olarak incelenerek doğrulandığı için literatüre anlamlı bir katkı sağlanmıştır. Diğer bir katkı ise, farklı havalandırma kanatçıklarının fren diski soğuma süresine etkisinin araştırılmasıdır. Bu çalışmada doğrulanan sayısal modelleme sistematığı ile farklı kanatçık tasarımlarının durağan ortam havasında diskin dönüşü ile havalandırma kanatçıkları etrafındaki hava akışının soğuma karakteristiğine olan etkisi karşılaştırmalı olarak hesaplanabilmektedir. Bu sayısal sonuçlar çapraz akış ve araç gövdesinin, aks ucu ve araç altı paketlemesinin etkilerini içermemektedir. Çapraz akış, araç gövdesi ve paketleme kısıtları göz önünde bulundurularak araç seviyesinde sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Çalışma kapsamında önerilen simülasyon sistematığı araç seviyesinde gerçekleştirilecek ileri çalışmalar için yol göstericidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, TÜBİTAK 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında "Ağır ticari araçlar için yüksek başarılı havalandırmalı fren diski ve poyra tasarımı" başlıklı ve 3190738 numaralı projesi kapsamında desteklenmektedir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve Ege Fren San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mew, T. (2015). Transient Thermal Response Of Solid, Pinned And Highly Porous Ventilated Brake Discs, Doktora Tezi, University of Witwatersrand, Johannesburg.
- [2] Thuresson, A. (2014). *Cfd And Design Analysis Of Brake Disc*. Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- [3] Gotowicki, P. F., Nigrelli, V., Mariotti, G. V., Aleksendric, D. and Duboka, C. Numerical And Experimental Analysis Of A Pegs-Wing Ventilated Disk Brake Rotor, With Pads And Cylinders. *In 10 th EAEC European Automotive Congress, 1-15*, (2005).
- [4] Stephens, A. (2006). *Aerodynamic Cooling Of Automotive Disc Brakes*. Yüksek Lisans Tezi, RMIT University, Melbourne.
- [5] Chi, Z. (2008). *Thermal Performance Analysis And Geometrical Optimization Of Automotive Brake Rotors*, Doktora Tezi, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa.
- [6] McPhee, A. D. and Johnson, D. A. Experimental Heat Transfer And Flow Analysis Of A Vented Brake Rotor. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(458-467), (2008).
- [7] Pulugundla, G. (2008). *Cfd Design Analysis Of Ventilated Disc Brakes*. Yüksek Lisans Tezi, Cranfield University, Cranfield.
- [8] Düzgün, M. and Yıldız, Y. Soğutma Kanallı Fren Disklerinin Frenleme Kuvvetlerine Ve Isı Değişimine Etkileri. *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 1-6, (2009).
- [9] Palmer, E., Mishra, R. and Fieldhouse, J. An Optimization Study Of A Multiple-Row Pin-Vented Brake Disc To Promote Brake Cooling Using Computational Fluid Dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(865-875), (2009).
- [10] Sarip, S. B. (2011). 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, Doktora Tezi, University of Bradford, Bradford.
- [11] Pevec, M., Potrc, I., Bombek, G. and Vranesevic, D. Prediction Of The Cooling Factors Of A Vehicle Brake Disc And Its Influence On The Results Of A Thermal Numerical Simulation. *International Journal of Automotive Technology*, 13(725-733), (2012).
- [12] Raj, K. T. R., Ramsai, R., Mathew, J. and Soniya, G. Numerical Investigation Of Fluid Flow And Heat Transfer Characteristics On The Aerodynamics Of Ventilated Disc Brake Rotor Using CFD. *Thermal Science*, 18(667-675), (2014).
- [13] Belhocine, A. and Bouchetara, M. Structural And Thermal Analysis Of Automotive Disc Brake Rotor. *Archive of Mechanical Engineering*, 61(89-113), (2014).
- [14] Belhocine, A., Cho, C. D., Nouby, M., Yi, Y. B. and Bakar, A. R. A. Thermal Analysis Of Both Ventilated And Full Disc Brake Rotors With Frictional Heat Generation. *Applied and Computational Mechanics*, 8(5-24), (2014).
- [15] Shinde, V. V., Sagar, C. D. and Baskar, P. Thermal And Structural Analysis Of Disc Brake For Different Cut Patterns. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 11(2231-5381), (2014).

- [16] Yan, H. B., Zhang, Q. C. and Lu, T. J. An X-Type Lattice Cored Ventilated Brake Disc With Enhanced Cooling Performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80(458-468), (2015).
- [17] Kiran, C. H. Numerical Stimulation Of Ventilated Disc Cooling Effect. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 4(257-270), (2015).
- [18] Jiang, L., Jiang, Y. L., Liang, Y. U., Nan, S. U. and Ding, Y. D. Thermal Analysis For Brake Disks Of Sic/6061 Al Alloy Co-Continuous Composite For CRH3 During Emergency Braking Considering Airflow Cooling. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(2783-2791), (2012).
- [19] Ghadimi, B., Kowsary, F. and Khorami, M. Thermal Analysis Of Locomotive Wheel-Mounted Brake Disc. *Applied Thermal Engineering*, 51(948-952), (2013).
- [20] Voller, G. P., Tirovic, M., Morris, R. and Gibbens, P. Analysis Of Automotive Disc Brake Cooling Characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(657-666), (2003).
- [21] Galindo-Lopez, C. H. and Tirovic, M. Understanding And Improving The Convective Cooling Of Brake Discs With Radial Vanes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222(1211-1229). (2008).
- [22] Tang, J., Bryant, D. and Qi, H. S. Coupled CFD And FE Thermal Mechanical Simulation Of Disc Brake. *Eurobrake Conference Proceedings*, (1-10), (2014).
- [23] Stevens, K. and Tirovic, M. Heat Dissipation From A Stationary Brake Disc, Part 1: Analytical Modelling And Experimental Investigations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(1707-1733), (2018).
- [24] Tirovic, M. and Stevens, K. Heat Dissipation From A Stationary Brake Disc, Part 2: CFD Modelling And Experimental Validations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(1898-1924), (2018).
- [25] Güleriyüz İ. C. and Yılmaz B. Investigation Of Flow And Thermomechanical Performance Of Ventilated Brake Discs Used In Heavy-Duty Vehicles, 2. *International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology Proceedings*, 529-536, (2019).
- [26] Karadeniz Z. H. and Güleriyüz İ. C. Çapraz Akışlı Rüzgar Türbini Başarımının İncelenmesi, 2. *İzmir Rüzgar Sempozyumu*, 87-96, (2015).
- [27] Müdürlüğü, Emniyet Genel. Karayolları trafik yönetmeliği. *Ankara: Resmi Gazete (23053 Mükerrer sayılı)* (2012).
- [28] Oberti, L. World Intellectual Property Organization Application No. WO2004/102028A1, (2004).