



## AĞIR ARAÇ FREN DİSKİNİN SONLU ELEMANLAR İLE TERMO-MEKANİK ANALİZİ

Recep Kadir SİVRİ<sup>1</sup>, İbrahim KELEŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Amasya University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, 05100, Amasya, Türkiye

<sup>2</sup>Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 55420, Samsun, Türkiye

**Özet:** Bugünlerde özellikle otomobil teknolojisinde çok hızlı gelişmeler olmaktadır. Hem otomobil hem de ağır vasıta araçları olan otobüs ve kamyonlarda disk fren sistemi aracın tekerleğin dönüşünü yavaşlatan ve durduran sistemlerdir. Araçları durdurmak için frenleme yapıldığında bir ısı meydana gelmekte ve sistem atmosfere açık olması sebebiyle kolayca dağılabilmektedir. Üreticiler bu durumu kısa ömürlü ve ağır çelik diskler ile aşmaya çalışmaktadır. Gerçek bir otobüs fren tertibatında farklı malzemelerden yapılmış disk fren rotor diskinin geçici termal ve yapısal analizi FEM tabanlı ANSYS yazılımı öğrenci lisansı yardımıyla frenleme koşulları altındaki termomekanik davranışını analiz etmektedir. Disk freninde oluşan gerilme ve gerinimleri analiz etmek için bazı sınır şartları uygulandıktan sonra diskte meydana gelen deformasyon, kesme gerilmesi, elastik gerinim ve eşdeğer gerilme değerleri şekilleri alınmıştır. Tasarım açısından farklı malzemeler kullanılarak disk fren tertibatını dayanım karşılaştırması yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** : Fren disk, Sonlu elemanlar analizi, Termal gerilme, Yapısal, Ağır araç

### Finite Element Thermo-Mechanical Analysis of Heavy Vehicle Brake Disc

**Abstract:** Nowadays, there are very rapid developments especially in automobile technology. In buses and trucks, which are both automobiles and heavy-duty vehicles, the disc brake system is a system that slows down and stops the vehicle's wheel rotation. When braking to stop the vehicles, a heat is generated and the system can easily disperse because it is open to the atmosphere. Manufacturers try to overcome this situation with short-lived and heavy steel discs. Transient thermal and structural analysis of disc brake rotor disc made of different materials in a real bus brake assembly is to analyze the thermomechanical behavior under braking conditions with the help of FEM based ANSYS software student license. In order to analyze the stresses and strains occurring in the disc brake, after applying some boundary conditions, the deformation, shear stress, elastic strain and equivalent stress values of the disc were taken. The strength comparison of the disc brake system was made by using different materials in terms of design.

**Keywords:** Brake disc, Finite element analysis, Thermal stress, Structural, Heavy vehicle

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 55420, Samsun, Türkiye

E mail: ibrahim.keles@samsun.edu.tr (I. KELEŞ)

Recep Kadir SİVRİ <https://orcid.org/0000-0001-9320-3859>

İbrahim KELEŞ <https://orcid.org/0000-0001-8252-2635>

**Gönderi:** 16 Kasım 2022

**Kabul:** 20 Aralık 2022

**Yayınlanma:** 01 Ocak 2023

**Received:** November 16, 2022

**Accepted:** December 20, 2022

**Published:** January 01, 2023

**Cite as:** Sivri RK, Keleş İ. 2023. Finite element thermo-mechanical analysis of heavy vehicle brake disc. BSJ Eng Sci, 6(1): 44-52.

### 1. Giriş

Günümüzün büyüyen otomotiv sektöründe araçların seyir halindeki güvenliği açısından en önemli makine elemanlarından bir tanesi fren sistemleridir. İyi bir fren sistemi hem güvenlik açısından hem de özellikle yarış araçlarında rekabet üstünlüğü sağlayacaktır. Bir aracın tekerleğinin dönüşünü yavaşlatarak aracında hızında azalmaya yol açan ve durması istendiğinde de durmasını sağlayarak sürüş kontrolünü sağlayan sisteme fren sistemi denir. Frenler genellikle tek diskli (metalik) ve çok diskli (karbon) frenler olarak kullanım amacına uygun kullanılırlar. Tekerleği durdurmak için tekerleğe ve aksa bağlanan dönen disk, sabit tutulan fren kaliperleri ve asbest, seramik, karbon vb. gibi malzemelerden yapılmış fren balataları içerir (Nathi ve ark., 2012; Shaik ve Srinivas, 2012; Sarip, 2013). Tekerleği yavaşlatmak için, fren kaliperine monte edilen fren balataları şeklindeki sürtünme malzemesi diskin her

iki tarafına mekanik, hidrolik, pnömatik veya elektromanyetik olarak zorlanır. Sürtünme, diskin ve bağlı tekerleğin yavaşlamasına veya durmasına neden olur. Fren disk sağlam gövdede ise ısı transfer hızı düşüktür ( Papinniemi ve ark., 2007; Kuciej, 2011; Reddy ve ark., 2013). Tekerleğin yavaşlamasına sebep olan sürtünme kuvveti neticesinde kinetik enerji ısı enerjisine dönüşerek ısıya dönüşen mekanik enerji kaymalı sürtünmeye tabi balata ve diskte sıcaklığın artmasına neden olur (Mahmoudi ve ark., 2015). Karbon-Karbon kompozit ve homojen disk fren için termoelastik temas problemini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Choi ve Lee tarafından incelenmiştir (Choi ve Lee, 2004). Yazarlar çalışmalarında, sürtünme malzemesi özelliklerinin sürtünme yüzeylerinin temas oranı üzerindeki etkilerini araştırarak en büyük etkinin termal genleşme katsayısı ve elastik modülü olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca çalışmalarında ortotropik disk



frenlerin, uniform ve yumuşak basınç dağılımları nedeniyle izotropik disk frenlere göre daha iyi fren performansı sağlayabildiği görülmüştür. Sarkar ve arkadaşları konveksiyon ve radyasyon parametreleri göz önünde bulundurularak disk üzerindeki sıcaklık dağılımını statik termal analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak araştırılmıştır (Sarkar ve ark., 2014). Sonlu elemanlar analizine dayalı olarak yapılan analizde araç hızındaki artışla birlikte sıcaklığın Alüminyum metal matriksi (AMM) kompozit için gri dökme demir (GCI)'ye kıyasla daha az olduğu sonucuna varılabilmektedir. Havalandırmalı disk fren sistemine sahip binek araçların disk fren rotorunu sonlu eleman analizi ile Zaid ve diğerleri tarafından bir çalışma sunulmuştur (Zaid ve ark., 2009). Çalışmalarında yazarlar disk fren rotoru üzerindeki ısı ve sıcaklık dağılımıyla ilgili frenleme sırasında aşırı ısınma nedeniyle fren pabuçları çalışmayı durdurur, en kötü senaryoda eriyebilir ve bu nedenle malzeme seçimi, ısı dağılım oranı ve fren bırakma süresi gibi faktörler, disk frenlerin performansını optimize etmek için önemli kriterler olduğu sonucuna varmışlardır. Fren disklerinin termal analizinin sonlu eleman yöntemleri ile literatürde çok sayıda makalenin konusudur. Havalandırmalı ve içi dolu disklerin ısı transferi (Belhocine ve Bouchetara, 2012; Belhocine ve ark., 2014; Zhou ve ark., 2020) ile frenleme esnasında ve hemen sonrasında meydana gelen sıcaklık davranışları karşılaştırılmıştır (Mačuzić ve ark., 2015). Verilen frenleme koşulları için sayısal simülasyon, radyal havalandırmalı frenleme aşamasında diskin soğutulmasında çok önemli bir rol oynadığı, analizden elde edilen farklı sonuçlar karşılaştırıldığında, havalandırmalı fren diskinin ısının dağıldığı ek yüzeyler içerdiğinden daha iyi bir çözüm olduğu sonucuna varılabilir. Parabolik ısı denklemini kullanarak disk fren sistemlerindeki termal davranış hem sayısal hem de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak karşılaştırılarak sonuçlar elde edilmiştir (Satope ve ark., 2017). Farklı malzemeler için çeşitli tasarım modelleri üzerinde yapılan bu çalışmadan, dökme demir için maksimum sıcaklık artışının paslanmaz çeliğe kıyasla çok daha az olduğunu gözlemlenerek ve bu nedenle termal analiz temelinde, disk fren üretimi için dökme demir en çok tercih edilen malzeme olduğu, ancak dökme demir disk fren nemle temas ettiğinde paslanma gibi bir dezavantaja sahiptir ve bu nedenle iki tekerlekli araçta kullanılamaz ve bu nedenle paslanmaz çelik tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Kompozit ve demir malzemelerden yapılmış dolu ve havalandırmalı fren disklerinin tekrarlanan frenlemelere maruz bırakılarak ısının bu süredeki sıcaklık değişimini karşılaştırılmaları olarak ortaya koyulmuştur (Chandana ve Reddy, 2017). Yazarlar geçici analizden, havalandırmalı kompozit diskin, katı diskten daha fazla ısı yayarak tekrarlanan frenleme koşullarında Dökme Demir diske göre daha iyi bir performansla sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Fren disklerinde yapılan yapısal değişimler ve diskin tekrarlanan frenlemeler ile kırılma oluşumundaki

sıcaklık değişimleri de araştırmacılar tarafından ele alınmışlardır (Grzes 2019; Jian ve ak., 2020; Manjunath ve Suresh, 2013). Bu çalışmalardan şu sonuçlara varılabilir; tekli ve çoklu frenleme sırasında sürtünme katsayısının ortalama değerini, tutarlılığını ve salınımlarının ortalama değerini tahmin etmeyi sağlayan elde edilen sonuçlar, verilen sürtünme çiftinin malzemelerinin özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesinde önemli bir unsurdur. Hem deney hem de simülasyon koşulunda, havalandırmalı disklerin yüzeylerine giren ısı borularının, havalandırmalı disklerin yüzey sıcaklığının sıcaklık homojenliğini ve ısı dağılımını etkili bir şekilde iyileştirebileceği gösterilmiştir. Farklı sıcaklık artışı, sapma ve gerilim alanı sonuçlarının karşılaştırılması, havalandırmalı dökme demir diskte katı diske göre sırasıyla sıcaklık, gerilim ve deformasyonda azalma olduğunu göstermektedir. Bu çalışmaların tümü, sıcaklık farklılıkları yüzlerce santigrat dereceye ulaştığında termal enerji geri kazanımı için önemli bir potansiyel olduğunu göstermektedir. Sowjanya ve Suresh (2013) farklı kompozit malzemelerden yapılmış katı modelleme programı kullanarak modellenen fren diskinin statik analizini Ansys yazılım programını kullanarak analizini yapmışlardır. Havalandırmalı tip disk frenin mevcut uygulama için mümkün olan en iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Disk fren rotorunun yapısal analizi için paslanmaz çelik en iyi malzeme olduğu tespit edilmiştir. Özel bir aracın ön fren diskinde statik ve modal simülasyon analizi yapmak için sonlu elemanlar yöntemi Chu ve ark. (1982) tarafından uygulanmıştır. Çalışmalarında statik analizde rijitlik gereksinimlerinin karşılandığı, ancak fren sesinin fenomene eğilimli olduğu sonucuna varılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar fren performansını farklı yük koşulları altında değişken fren basınçları uygulanarak fren diskinin yapısal ve tasarımı Saheb (2020) tarafından sunulmuştur. Yazar çalışmasında fren sistemine dahil olan parametrelerden fren pedalının oranları değiştirilerek fren performansını çok küçük parçaların dahi etkilediğini vurgulamıştır. Yadav ve ark. (2020), disk fren sisteminin fren performansını iyileştirmek için bir tasarım aracı sağlamıştır. Yazarlar, havalandırmalı tip disk frenin kendi uygulamaları için mümkün olan en iyi olduğu sonucuna vardılar. Havalandırmalı diskin, kullanım ömrü maliyetini iyileştirmek ve motor sporlarının çok önemli bir noktası olan araç ağırlığını birkaç kilogram azaltmak için modern ulaşım araçlarında kullanılabileceğini belirttiler. Anil Babu Seelam ve Krishanmurthy (Seelam ve ark., 2021), iki farklı malzeme (paslanmaz çelik ve gri dökme demir) ile 17 inçlik bir rotor disk üzerinde yapısal ve termal analiz gerçekleştirmiştir. Daha iyi termal kararlılığa sahip olduğu için yüksek hızlı araçlardaki diskler için daha iyi bir seçenek olarak gri dökme demiri önermişlerdir. Suo ve Shi (2022) deneysel testten fren diskinin termal elastik-plastik yapısal ilişkisini elde ettiler ve farklı frenleme koşulları altında fren diskinin gerilim-gerinim-tepki ilişkisi sıralı bağlantı yöntemine dayalı sayısal

hesaplama kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışmalarında, elastik plastik sonlu elemanlar yöntemi, yüzeyde daha iyi bir ısı ve gerilim dağılımı elde etmek için farklı frenleme koşullarında fren diskinin sıcaklık alanı ve gerilim alanı dağılımını belirlemişlerdir. Seo ve ark. (2021), disk malzemesinin fren emisyonu üzerindeki etkilerini araştırmak için fren emisyon testleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçları, fren emisyonlarının disk sertliğinden ve balata yüzeyine aktarılan demirden büyük ölçüde etkilendiğini ve aktarılan demir, balata yüzeyindeki plakaların kohezyon kuvvetinin azalması nedeniyle fren emisyonlarını artırdığını göstermektedir. Sainath ve ark. (2021), sonlu elemanlar kullanarak disk frenlerin sabit durum termal analizini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarını, Karbon-Karbon kompozit, Paslanmaz çelik ve Dökme demir disk frenlerin termo elastik davranışını belirleyerek, yapısal analizden Von miss gerilmelerini ve nodal gerilme dağılımını hesaplayarak ve mevcut sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bhat ve ark. (Bhat ve ark., 2021), deformasyonu azaltmak ve termal özellikleri geliştirmek için daha önceki araştırmacılara dayanan yeni bir tasarım ve malzeme kombinasyonunu analizini yapmışlardır. Çalışmalarında, alüminyum, dökme demir ve silisyum karbür malzeme kombinasyonuna dayalı modelin, temas bölgesindeki yuvaların giderek artan alanının daha iyi ısı dağılımına yardımcı olacağı sonucuna varmışlardır.

Yukarıdaki literatür incelemesi, çeşitli disk frenleri için FEM kullanılarak statik ve termal analizin gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, farklı malzemelerden yapılarak üretilen otobüs, kamyon gibi ağır vasıta araçları için bir analizin yapılmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle bu çalışmada farklı malzeme için otobüs fren diski için termal karakteristiğini belirlemek amacıyla, FEM tabanlı ANSYS yazılımı öğrenci lisans ile kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.'de gösterildiği gibi bir otobüsün yaygın olarak kullanılan fren tertibatı verilmiştir.



Şekil 1. Şehir içi alçak tabanlı otobüse ait arka fren diski.

## 2. Tasarım Hususları ve Hesaplama

Taşıtların kazalarının önlenmesi açısından, taşıtların fren performansı belirlemek için fren sistemi ile ilgili bazı verilere sahip olmamız gerekir. Bu veriler görecelidir ve uygulamaya göre değişir. 27,77 m/s (100 km/s) hızla hareket eden taşıt için rotor model ısı akısı hesaplanmıştır ve hesaplama prosedürü için gerekli parametreler Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Hesaplama prosedürü için gerekli parametreler

Araç Kütlesi	10000 kg
Başlangıç hızı (u)	27,77 m/s (100 kmph)
Fren uygulaması sonunda taşıt hızı (v)	0 m/s
Fren rotor çapı	426 mm
Her iki tarafta %30 aks ağırlığı dağılımı ( $\gamma$ )	0,3
Diskin emdiği kinetik enerjinin yüzdesi (%90) (k)	0,9
Yer çekiminden kaynaklanan ivme (g)	9,81 m/s <sup>2</sup>
Kuru kaplama için sürtünme katsayısı ( $\mu$ )	0,7

Kinetik enerji Limpert (1999) tarafından aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Frenleme sırasında üretilen enerji formülü (Denklem 1);

$$K.E = k \frac{1}{2} \gamma \frac{m(u-v)^2}{2} = 517920,75 \text{ J} \quad (1)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Durma mesafesini hesaplamak için (Denklem 2);

$$d = \frac{u^2}{2\mu g} = 56,18 \text{ m} \quad (2)$$

Yavaşlama süresini hesaplamak için (Denklem 3);

$$v = u + at \text{ ise } t = 4 \text{ s} \quad (3)$$

Fren Gücü: Sürekli frenleme sırasındaki fren gücü, enerjinin zamana göre farklılaşmasıyla elde edilir (Denklem 4);

$$P_b = K \cdot \frac{E}{t} = 32366,25 \quad (4)$$

Isı Akısının (Q) Hesaplaması: Isı Akısı, birim alan başına birim zamanda, bir yüzeyden veya yüzeye aktarılan ısı miktarı olarak tanımlanır (Denklem 5);

$$Q = \frac{P_b}{A} = 227,08 \frac{W}{m^2} \quad (5)$$

Fren bileşenlerinin balataları ve diski arasındaki temas alanı, sürtünme nedeniyle ısı üretir. Bu iki kayar

gövdenin ara yüzündeki ısı üretiminin hesaplanması için, "hareket sırasında aracın kinetik enerjisinin, araç durduktan sonra yayılan ısıya eşit olduğunu belirten

enerjinin korunumu yasası" temelinde iki yöntem önerilmektedir. Hesaplamalarda benimsenen malzeme özellikleri ve parametreler Tablo 2'de gösterildiği gibidir.

**Tablo 2.** Paslanmaz çelik (SS), Dökme demir (CI) ve Alüminyum (Al) için malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	SS	CI	Al
Termal iletkenlik (w/mk)	60,5	52	148,62
Yoğunluk $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7200	2770
Öz ısı, c (J/kg °C)	434	447	875
Termal Genleşme, $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /k)	16,3	11	23
Elastisite Modülü, E (GPa)	200	110	71
Sürtünme Katsayısı, $\mu$	0,42	0,15	1,4
Isı transfer katsayısı h(w/km <sup>2</sup> )	50	0,55	239
Operasyon şartları			
Açısal hız (rad/s)	50	50	50
Durma zamanı, Sec	10	10	10
Hava basıncı, P (MPa)	1	1	1

Tek duraklı sıcaklık artışı  $T_{maks}$ , tek frenleme koşulundan kaynaklanan sıcaklık artışıdır (Denklem 6);

$$T_{maks} = \frac{0,527 \times q \times \sqrt{t}}{\sqrt{\rho \cdot c \cdot k}} + T_{ortam} \quad (6)$$

N'inci fren uygulamasından sonraki bağıl fren sıcaklığı, bağıntı kullanılarak hesaplanabilir (Denklem 7);

$$T_{roa} - T_i = \frac{\left[ 1 - e^{\frac{(-nhAt_c)}{(\rho cv)}} \right] [\Delta t]}{1 - e^{\frac{(-hAt_c)}{(\rho cv)}}} \quad (7)$$

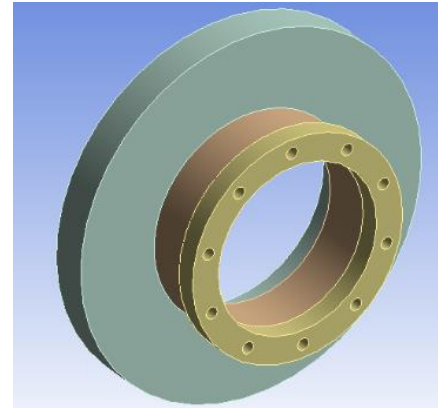
Ani sıcaklık artışlarından bir diskin yüzeyinde gelişen sıkıştırma gerilmeleri (Denklem 8);

$$\sigma = \frac{E}{1 - \nu} \alpha \Delta T \quad (8)$$

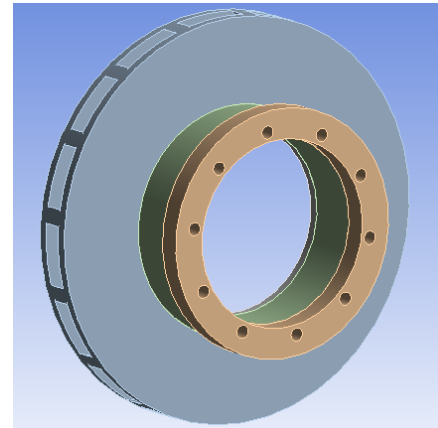
### 3. Sonlu Elemanlar Modellemesi

Sonlu elemanlar yöntemi, çok çeşitli mühendislik problemlerinin sayısal çözümleri için güçlü bir araç haline gelmiştir. Yüksek hızlı elektronik dijital bilgisayarların artan kullanımı ve mühendislik analizi için sayısal yöntemlere artan vurgu ile eş zamanlı olarak geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde analiz tipini ve sınır koşullar ve yük tipleri belirlenerek yükleri uygular ve sonlu eleman çözümünü başlatır. ANSYS Workbench programının kendi malzeme kütüphanesinde sıklıkla kullanılan malzemeler bulunmaktadır. Tasarlayacağımız modele uygun malzeme kütüphaneden çağrılarak seçimi yapılır. Daha sonra Workbench programının "Design Modeler" ya da "Space Claim" bölümleri kullanılarak model oluşturulur veya Workbench ile uyumlu çalışan diğer programlarda tasarlanıp model Workbench programına aktarılabilir. Workbench, bu görev modülleri arasındaki bilgi akışı üzerinde gelişmiş birlikte çalışabilirlik ve kontrol sağlar. Büyük modelleri verimli bir şekilde yönetmek için çeşitli araçlar ve teknikler dahil edilmiştir. Ağaç filtreleme gibi

ağaç Nesneleri etiketleme, bağlantılar çalışma sayfası, nesne üretici, alt modelleme. Veriler, 2B kaba modelden [Tam Model] bir 3B alt modele aktarılabilir. Katı geometrili yapısal ve termal analiz türleri için alt modelleme mevcuttur. Şekil 2'de gösterilen boyutlar için yapılan disk frenin sonlu eleman modeli, disklerin iç yarıçapı, dış yarıçapı ve flanş kalınlıkları, dökme demir, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımli için her iki durumda da katı ve havalandırılmalı disk için sırasıyla 0,21, 0,43 ve 0,045 m'dir.



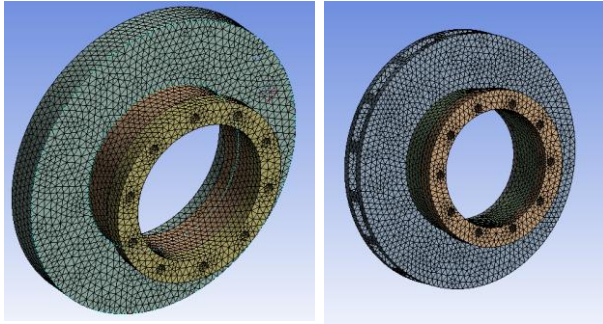
Durum I



Durum II

**Şekil 2.** Şehir içi alçak tabanlı otobüsün havalandırılmalı ve havalandırılmaz arka fren diskine ait FEM modeli.

Ağ yapısı(meshleme) ayrıntıları Workbench'teki amacı, mesh oluşturma sürecini basitleştirecek, sağlam, kullanımı kolay meshleme araçları sağlamaktır. Kullanılan model, sonlu elemanlar olarak bilinen birkaç küçük parçaya bölünmelidir. Model bir dizi ayrı parçaya bölündüğünden, basit bir ifadeyle, bir sonlu eleman analizini gerçekleştirmek için matematiksel bir ağ veya "ağ" gereklidir. Oluşturulan bir sonlu eleman ağ modeli Şekil 3'te gösterilmektedir. Modelin ağı için kullanılan elemanlar 8 düğümlü dört yüzlü üç boyutlu elemanlar olup, her bir model için Element sayısı 55614, Node sayısı 93279 seçilerek meshleme yapılmıştır.



Şekil 3. Havalandırmalı ve havalandırmaz disk için FEA Modeli meshleme.

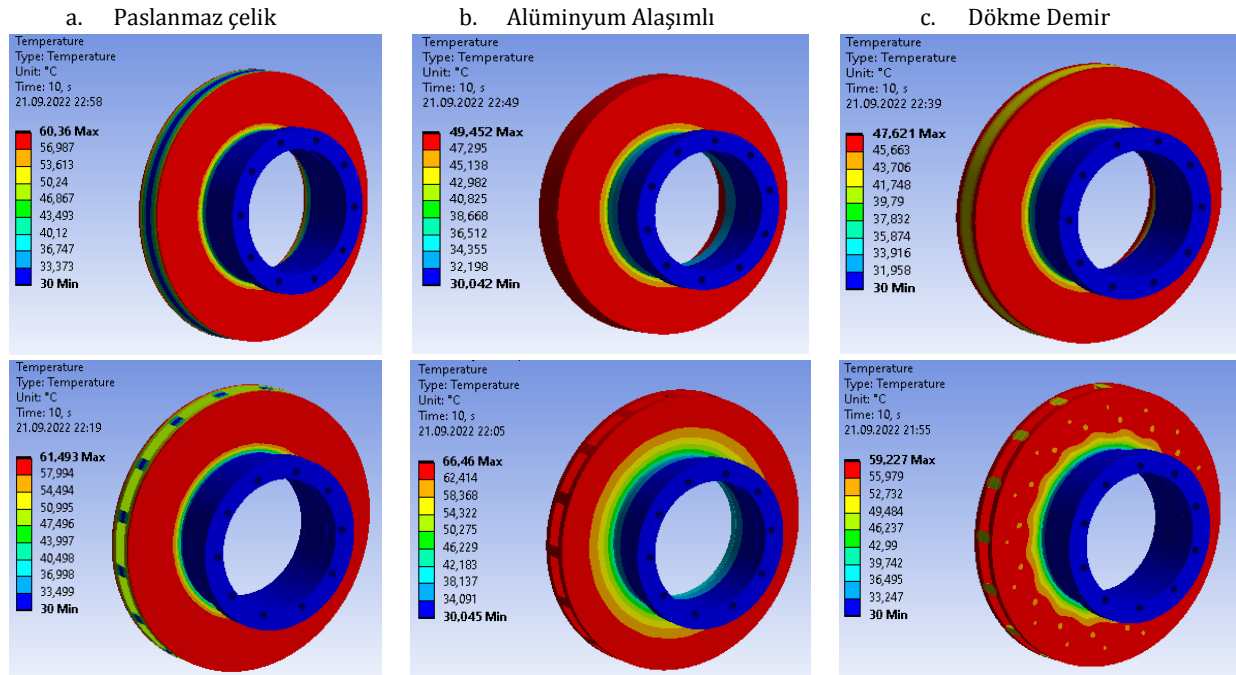
Sınır koşulları, simülasyon modu seçilerek ve malzemelerin fiziksel özellikleri ve simülasyonun

başlangıç koşulları tanımlanarak ANSYS Workbench modülüne tanıtılır. Bu çalışmada, ANSYS kullanılarak frenleme için ısı akısı değeri uygulanarak her üç diskteki sıcaklık değişimini araştırmak için bir geçici termal analiz yapılacaktır. Daha fazla yapısal analiz, termal analiz birleştirilerek gerçekleştirilir.

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Mevcut modelleri doğrulamak için, 10 saniye boyunca sabit hava basıncı  $P = 1\text{Mpa}$  ve açısal hız  $w = 80\text{ rad/s}$  (sürekli fren uygulaması) çalışma koşulu için disk frenin bir geçici termal analiz davranışı gerçekleştirilmiştir. Hava basıncı ve açısal hız sabit tutulduğu varsayılmıştır. FEM çözümlerinden elde edilen sonuçlar, modelin hem geçici termal hem de yapısal davranışı için verilmiştir. Mevcut sınır şartları üç farklı malzemenin havalandırmalı ve katı(havalandırmaz) disk fren analizi yapılmıştır. Sonuçları doğrulamak için katı disk durum I ve havalandırmalı disk durum II karşılaştırmaları yapılır. Şekil 4'de üç farklı malzeme için yapılan analiz sonucunda disk için frenleme sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.

Kullanılan malzemelere göre en yüksek sıcaklığın hem katı hem de havalandırmalı diskte alüminyum malzemesi için maksimum sıcaklık değerlerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca dizayn açısından bakıldığında da her üç malzeme için katı disklerdeki sıcaklık dağılımları havalandırmalı disklerdeki sıcaklık değerlerinden düşük olduğu görülmüştür.



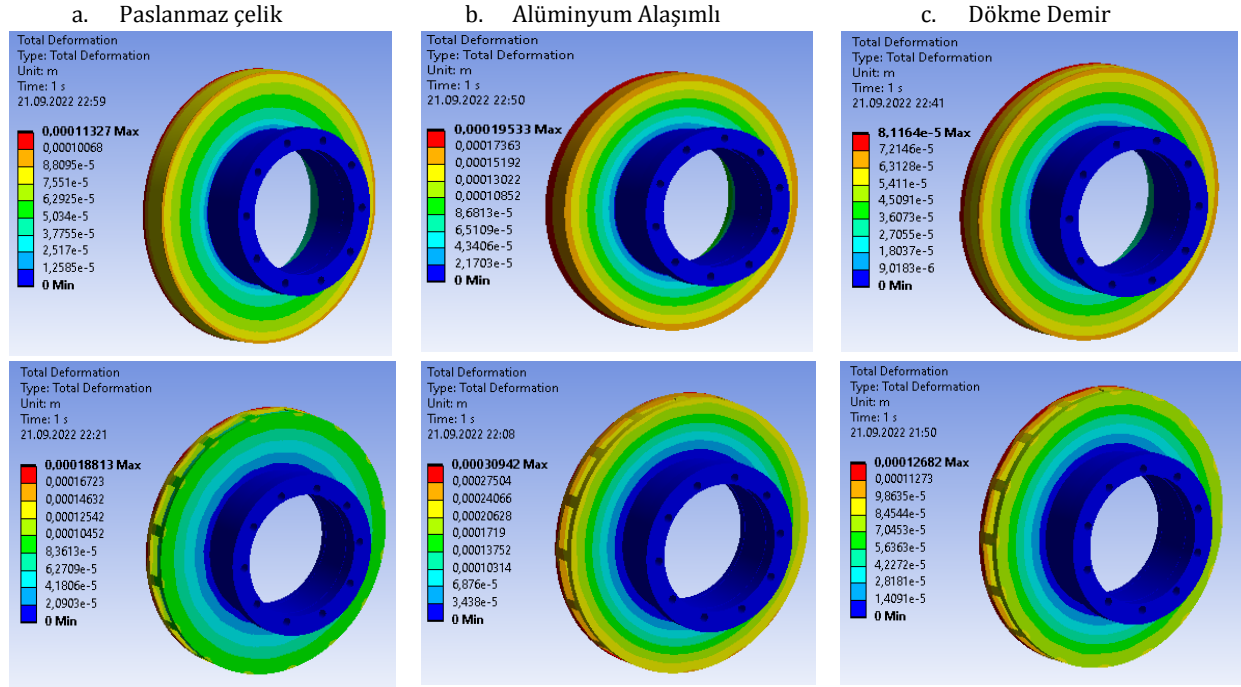
Şekil 4. Farklı malzemelerden yapılmış katı ve havalandırmalı disk için frenleme sıcaklık dağılımı.

Diskleri kendi kategorilerinde değerlendirildiğinde ise katı diskler için en yüksek sıcaklığın paslanmaz çelik için, havalandırmalı diskte ise alüminyum malzemesinde en yüksek sıcaklığın olduğu tespit edilmiştir. Aşırı

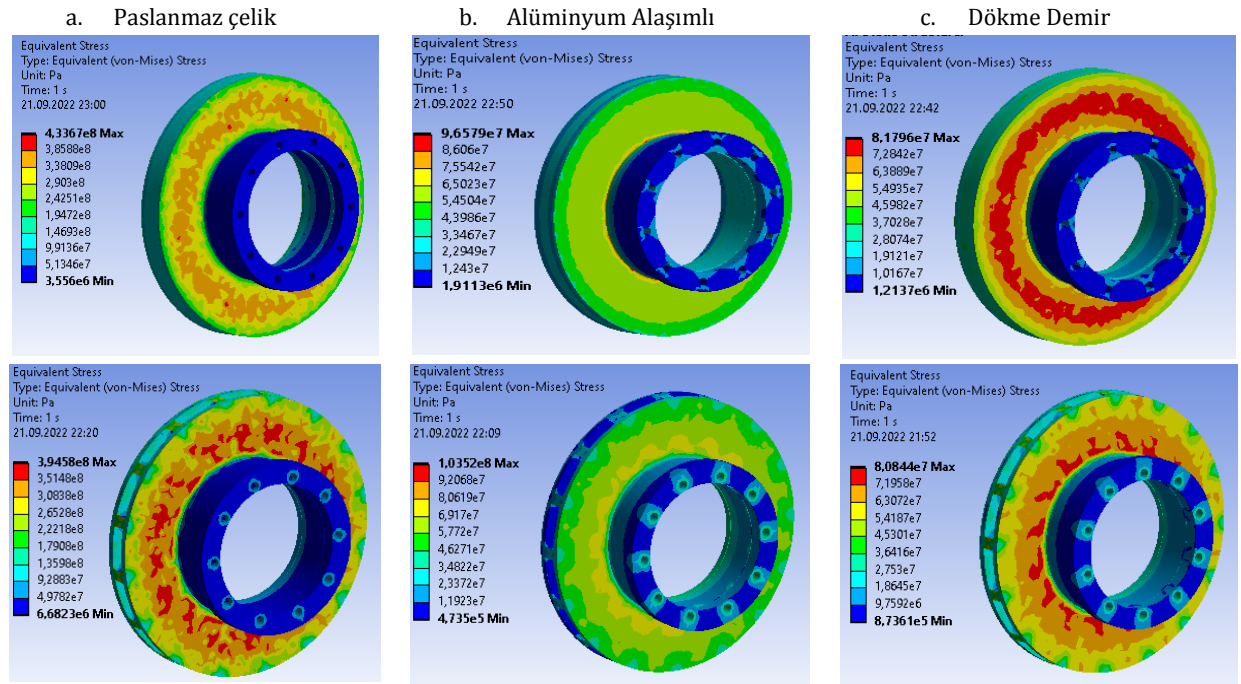
sıcaklıklar uygulandığında yapı genişleyebileceğinden ve sıcaklık her yerde sabit olmadığından sıcaklık simülasyon sonuçları dökme demir ve paslanmaz çelik alüminyuma kıyasla daha düşük bir sıcaklık aralığına sahip olduğunu

göstermiştir. Paslanmaz çelik, Alüminyum ve dökme demir malzemelerinden yapılmış katı ve havalandırılmalı disk için toplam deformasyonları Şekil 5’de verilmiştir. Katı ve havalandırılmalı disk için yapılan analiz neticesinde en yüksek deformasyonu alüminyumda meydana gelmektedir. Havalandırılmalı ve katı disk olarak kıyaslanma yapıldığında havalandırılmalı diskte daha fazla

deformasyon olduğu görülmektedir. Disk katı olarak alındığında alüminyum> paslanmaz çelik> dökme demir şeklinde bir deformasyon sıralaması mevcuttur. Havalandırılmalı diskte de aynı davranış ve sıralama sergilenmektedir.



Şekil 5. Farklı malzemelerden yapılmış katı ve havalandırılmalı disk için toplam deformasyon.



Şekil 6. Farklı malzemelerden yapılmış katı ve havalandırılmalı disk için eşdeğer gerilme.

Yapılan simülasyon sonucunda alüminyum malzemesinden yapılan diskte diğer iki malzemeye kıyasla önemli ölçüde daha fazla deformasyon oluştuğu

tespit edilmiştir. Şekil 6’da farklı malzemelerden yapılmış katı ve havalandırılmalı disk için eşdeğer gerilme değerlerini göstermektedir.

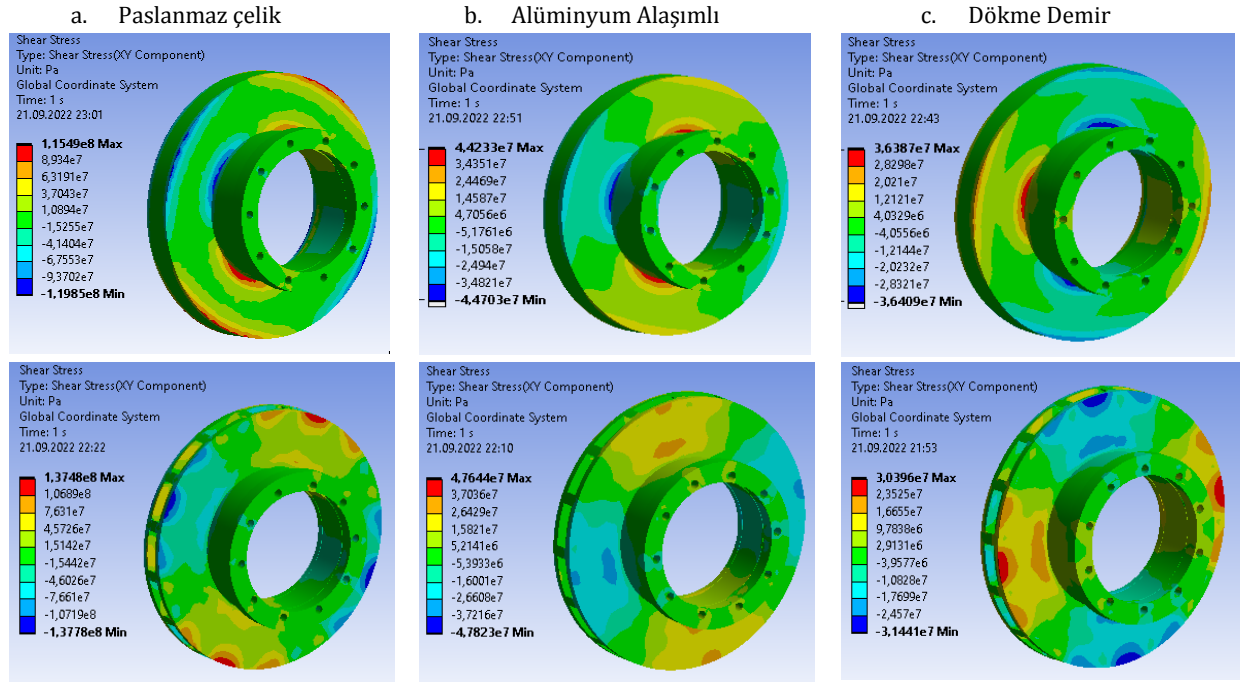
Katı ve havalandırmalı disk için yapılan analiz sonucunda paslanmaz çelikteki eşdeğer gerilme miktarının en yüksek olduğu daha sonra alüminyum ve dökme demir sırası ile devam etmektedir. Katı disk ve havalandırmalı disk olarak incelendiğinde paslanmaz çelik ve dökme demir malzemeleri için eşdeğer gerilme değerleri katı disklerde maksimum değerlerinin daha yüksek olduğu görülmeye karşın alüminyum malzemesi için havalandırmalı disk için eşdeğer gerilme değerlerinin maksimum değerleri çok daha fazladır. Analizler sonucu en yüksek eşdeğer gerilmesinin disk üzerindeki etkisi paslanmaz çeliğe ait disk malzemesinin elastiklik modülünün diğer iki malzemeye oranla çok daha yüksek olma sebebiyle ilişkilendirilebilir.

Katı ve havalandırmalı olarak tasarlanan disklerin üç farklı malzeme için kesme gerilme dağılımları Şekil 7'de verilmektedir.

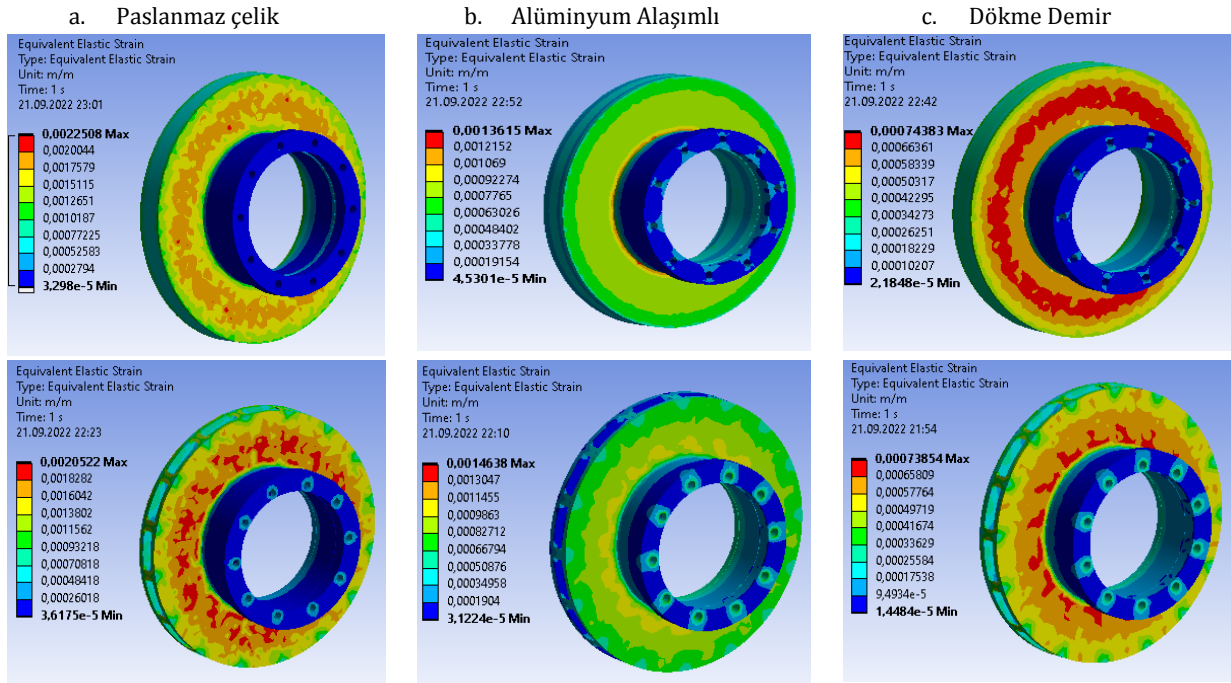
Katı ve havalandırmalı olarak tasarlanan disklerin üç farklı malzeme için kesme gerilme dağılımları Şekil 7'de verilmektedir. Paslanmaz çelikten yapılan disk hem katı hem de havalandırmalı olarak tasarlanan disklerde

kesme gerilmesi değerleri en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum alaşım ve dökme demirden yapılmış disklerde bakıldığında dökme demir katı diskte daha yüksek kesme gerilmesine sahipken alüminyum alaşım diskte ise havalandırmalı disk için kesme gerilmesi değerinin maksimum değeri daha yüksektir. Kesme gerilmesi malzeme özelliklerine göre farklılık göstermesinin ilk bakılması gereken parametre hızdır. Ancak burada hız sabit alındığından her bir malzemenin işlenebilirliği kıyaslandığında paslanmaz çelik de kesme gerilmesi diğer iki malzemeye göre daha büyük olmaktadır.

Eşdeğer elastik gerilme dağılımları Şekil 8'de gösterilmektedir. Her iki tasarım için meydana gelen eşdeğer elastik gerilme değerleri bütün malzemeler için birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Katı ve havalandırmalı disk olarak ele alındığında eşdeğer elastik gerilme değerinin maksimum değerleri sıralaması paslanmaz çelik, alüminyum alaşım ve dökme demir şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 7. Farklı malzemelerden yapılmış katı ve havalandırmalı disk için kesme gerilmesi.



Şekil 8. Farklı malzemelerden yapılmış katı ve havalandırmalı disk için eşdeğer elastik gerinme.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, gerçek otobüse ait fren tertibatında Paslanmaz Çelik, Alüminyum Alaşımli ve Dökme Demirden yapılmış disk fren rotör diskinin geçici termal ve yapısal analizi sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Her üç malzeme için sıcaklık etkisini azaltmak için havalandırmalı disklerin kullanımının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Havalandırmalı ve katı disk olarak kıyaslanma yapıldığında havalandırmalı diskte daha fazla deformasyon olduğu ve malzeme olarak da alüminyum> paslanmaz çelik> dökme demir şeklinde bir deformasyon sıralaması mevcuttur.
- Eşdeğer gerilme bakımından değerlendirme de ise paslanmaz çelik, alüminyum ve dökme demir sırası ile devam etmektedir. Katı disk ve havalandırmalı disk olarak incelendiğinde alüminyum malzemesi için havalandırmalı disk için eşdeğer gerilme değerlerinin çok daha yüksek değerlere sahiptir.
- Paslanmaz çelikten yapılan disk hem katı hem de havalandırmalı olarak tasarlanan disklerde kesme gerilmesi değerleri en yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki tasarım için meydana gelen eşdeğer elastik gerinme değerleri bütün malzemeler için birbirlerine çok yakın çıkmıştır.
- Sonuç olarak, belirli bir ağır vasıta fren disklerinin tasarımında uygun malzemeyi, uygun boyut ve uygun şekil seçilir.

## Katkı Oranı Beyanı

Yazar(lar)ın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Tüm yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	R.K.S.	İ.K.
K	50	50
T	50	50
Y	50	50
VTI	50	50
VAY	50	50
KT	50	50
YZ	50	50
KI	50	50
GR	50	50
PY	50	50
FA	50	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

## Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

## Kaynaklar

- Belhocine A, Bouchetara M. 2012. Thermal analysis of a solid brake disc. *App Therm Eng*, 32: 59-67.
- Belhocine A, Cho CD, Nouby M, Yi YB, Abu Bakar AR. 2014. Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation. *App Comput Mech*, 8(1): 5-24.
- Bhat A, Pal B, Dandotiya D. 2021. Structural analysis of a two-wheeler disc brake. *Mater Sci Eng*, 1013: 12024.
- Chandana YVN, Purushotham Reddy KV. 2017. Transient thermal analysis of alsicp composite disc brake. *Int J Comput Eng Res*, 7(2): 29-33.



- Choi JH, Lee I. 2004. Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes. *Wear*, 257(1-2): 47-58.
- Chu HS, Chen CK, Weng CI. 1982. applications of fourier series technique to transient heat transfer problem. *Chem Eng Commun*, 16(1-6): 215-225.
- Grzes P. 2019. Maximum temperature of the disc during repeated braking applications. *Adv Mech Eng*, 11(3): 1687814019837826.
- Jian Q, Wang L, Shui Y. 2020. Thermal analysis of ventilated brake disc based on heat transfer enhancement of heat pipe. *Int J Ther Sci*, 155: 106356.
- Kuciej M. 2011. The comparable analysis of temperature distributions assessment in disc brake obtained using analytical method and FE model. *J KONES*, 18: 235-259.
- Limpert R. 1999. Brake design and safety. Society of Automotive Engineers Inc., Danvers, Massachusetts, US.
- Mačuzić S, Saveljić I, Lukić J, Glišović J, Filipović N. 2015. Thermal analysis of solid and vented disc brake during the braking process. *J Serbian Soc Comput Mech*, 9(2): 19-26.
- Mahmoudi T, Parvizi A, Poursaeidi E, Rahi A. 2015. Thermo-mechanical analysis of functionally graded wheel-mounted brake disk. *J Mech Sci Tech*, 29(10): 4197-4204.
- Manjunath TV, Suresh PM. 2013. Structural and thermal analysis of rotor disc of disc brake. *Int J Innov Res Sci Eng Tech*, 2(12): 7741-7749.
- Nathi GM, Charyulu TN, Gowtham K, Reddy PS. 2012. Coupled structural/thermal analysis of disc brake. *Int J Res Eng Tech*, 1(04): 539-553.
- Papinniemi A, Lai JCS, Zhao J. 2007. Disc brake squeal: progress and challenges. In *Proceeding of 14<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration*, Cairns, Australia, July 9-12, pp. 1-8.
- Reddy VC, Reddy MG, Gowd GH. 2013. Modeling and analysis of FSAE car disc brake using FEM. *Int J Emerg Tech Adv Eng*, 3(9): 383-389.
- Saheb SH. 2020. Design and Structural analysis of brake disc by varying brake pressure. *AIP Conference Proceedings*, 2259. DOI: 10.1063/5.0015678.
- Sainath A, Dehadray PM, Bharath P, Rao LB. 2021. The thermal and stress analysis of disc brake. *Mater Sci Eng*, 1128: 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/1128/1/012015.
- Sarip S. 2013. Design development of lightweight disc brake for regenerative braking-finite element analysis. *Int J App Phys Math*, 3(1): 52.
- Sarkar S, Rathod PP, Modi AJ. 2014. Research paper on modeling and simulation of disc brake to analyse temperature distribution using FEA. *Int J Sci Res Dev*, 2: 491-494.
- Satope S, Bote AK, Rawool SD. 2017. Thermal analysis of disc brake. *Int J Innov Res Sci Tech* 3(12): 68-73.
- Seelam AB, Hussain NAZ, Krishanmurthy SH. 2021. Design and analysis of disc brake system in high speed vehicles. *Int J Simul Multid Des Opt*, 12: 19.
- Seo H, Park J, Kim YC, Lee JJ, Jang H. 2021. Effect of disc materials on brake emission during moderate-temperature braking. *Tribol Int*, 163: 107185.
- Shaik AFB, Srinivas CL. 2012. Structural and thermal analysis of disc brake with and without crossdrilled rotor of race car. *Int J Adv Eng Res Stud*, 1(4): 39-43.
- Sowjanya K, Suresh S. 2013. Structural analysis of disc brake rotor. *Int J Comp Trends Techn*, 4(7): 2295-2298.
- Suo R, Shi X. 2022. Temperature field and stress field distribution of forged steel brake disc for high speed train. *Jordan J Mech Indust Eng*, 16(1): 113-121.
- Yadav A, Katwal A. 2020. Analysis of disc brake by modifying in design and material composition of disc. *Int Res J Eng Emerg Tech*, 11: 1-9.
- Zaid MA, Radzai MS, Ahmad R, Ridzuan MM, Nurfaizey AH, Afzanizam MMR. 2009. An investigation of disc brake rotor by finite element analysis. *J Adv Manuf Tech*, 3(2): 37-48.
- Zhou S, Guo Z, Bai X. 2020. Fatigue fracture analysis of brake disc bolts under continuous braking condition. *Eng Failure Analy*, 115: 104588.