

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ KẾT CẤU ĐĨA PHANH THEO PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ THỰC NGHIỆM

RESEARCH ON OPTIMIZING BRAKE DISC STRUCTURE BASED ON DESIGN OF EXPERIMENTS CONCEPT

Tổng Minh Hải¹, Nguyễn Giang Nam², Trần Trọng Đạt², Trương Đặng Việt Thắng^{2,*}

¹Trường Cao đẳng Công nghiệp Nam Định

²Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email: thang.truongdangviet@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống phanh đĩa dùng ma sát để chuyển động năng của xe thành nhiệt, vì vậy đĩa phanh cần vừa chịu nhiệt tốt, vừa đảm bảo độ bền trong thời gian dài. Nghiên cứu này phân tích nhiệt sinh ra khi phanh trên ba vật liệu: gang xám, thép không gỉ và nhôm, sử dụng mô hình 3D và mô phỏng tính toán. Để tối ưu hóa thiết kế, công cụ tham số, thiết kế thử nghiệm được thực hiện và phân tích độ nhạy được áp dụng. Điều chỉnh các tham số thiết kế như độ dày đĩa, hình dạng cánh tản nhiệt và quán tính quay giúp đạt cấu hình đĩa tối ưu về nhiệt độ và khối lượng. Nghiên cứu xem xét các đường dẫn dẫn nhiệt, hiệu ứng đối lưu và bức xạ, nhằm hiểu rõ sự phân bố gradient nhiệt và ứng suất. Đánh giá có hệ thống xác định sự kết hợp vật liệu-hình học tốt nhất, cân bằng tính chất nhiệt-cơ học, tăng độ tin cậy và giảm chi phí bảo trì. Kết quả cho thấy thép hợp kim vượt trội về tản nhiệt và trọng lượng. Nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng của vật liệu phù hợp cho hiệu suất phanh và độ tin cậy, cung cấp hướng dẫn cho kỹ sư và nhà sản xuất trong ngành ô tô.

Từ khóa: Tối ưu hóa; Đĩa phanh; Thiết kế thực nghiệm; Phân tích nhiệt; Giảm khối lượng.

ABSTRACT

Disc brake systems utilize friction to convert a vehicle's kinetic energy into thermal energy, necessitating brake discs with high thermal resistance and long-term durability. This study investigates the heat generated during braking across three materials: gray cast iron, stainless steel, and aluminum, employing 3D modeling and computational simulations. For design optimization, parametric tools, design of experiments (DoE), and sensitivity analysis were implemented. Adjustments to design parameters, such as disc thickness, vane geometry, and rotational inertia, facilitated the attainment of optimal disc configurations concerning temperature regulation and mass reduction. The research considered conductive pathways within the rotor and convective and radiative effects to elucidate thermal gradient and stress distributions. A systematic evaluation identified the most promising material-geometry combination, balancing thermal and mechanical properties to enhance system reliability and minimize maintenance costs. The results highlighted the superior thermal dissipation and lower overall weight of 45 steel. This study emphasizes the significance of material selection for robust braking performance and mechanical reliability, providing valuable insights for engineers and manufacturers in the automotive industry.

Keywords: Optimization; Brake disc; Design of experiments; Thermal analysis; Mass reduction. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đĩa phanh là một thành phần quan trọng trong hệ thống phanh ô tô, thực hiện nhiệm vụ chuyển đổi động năng thành nhiệt năng thông qua ma sát với má phanh trong quá trình giảm tốc. Ngành ô tô ngày càng chú trọng hơn tới an toàn, hiệu suất và phát triển bền vững, do đó việc cải tiến thiết kế đĩa phanh trở thành hướng nghiên cứu đáng quan tâm. Một trong những thách thức lớn hiện nay là vừa phải cải thiện khả năng tản nhiệt, vừa giảm được khối lượng đĩa phanh. Điều này đặc biệt cần thiết với các loại xe tốc độ cao và xe điện, vì hệ thống phanh của chúng thường xuyên chịu nhiệt độ rất cao và phải đáp ứng yêu cầu nghiêm ngặt về trọng lượng.

Trong quá trình phanh, lượng nhiệt đáng kể được sinh ra tại giao diện giữa đĩa và má phanh. Nếu không được tản nhiệt hiệu quả, lượng nhiệt này có thể dẫn đến hiện tượng mất phanh (brake fade), nứt nhiệt và tăng độ mài mòn, làm ảnh hưởng đến hiệu suất và an toàn của hệ thống phanh [1], [5]. Vật liệu đĩa truyền thống như gang xám, mặc dù hiệu quả chi phí và bền, lại nặng và có hiệu suất nhiệt hạn chế [2]. Do đó, ngày càng có sự quan tâm đến các vật liệu thay thế như vật liệu composite carbon-carbon, vật liệu composite nền kim loại (MMCs) và carbon-silicon carbide (C/SiC), mang lại các tính chất nhiệt và cơ học vượt trội với trọng lượng giảm [3], [10].

Những tiến bộ gần đây trong các công cụ tính toán như Phân tích Phần tử Hữu hạn (FEA) và Động lực học Chất lỏng Tính toán (CFD) đã cách mạng hóa phương pháp tiếp cận thiết kế đĩa phanh, cho phép mô phỏng chi tiết về hành vi nhiệt, phân bố ứng suất và luồng không khí cho các kết cấu thông gió [1], [4], [8]. Hơn nữa, các kỹ thuật như tối ưu hóa topo

và thiết kế tạo sinh cho phép các cấu hình kết cấu sáng tạo, giảm thiểu việc sử dụng vật liệu trong khi vẫn giữ được tính toàn vẹn cơ học [4], [12].

Nghiên cứu này tập trung tối ưu hóa kết cấu đĩa phanh, tập trung dựa vào các cơ chế tản nhiệt, phương pháp mô phỏng, đổi mới vật liệu và thiết kế thực nghiệm. Mục tiêu là tổng hợp kiến thức hiện tại và xác định các hướng đi cho nghiên cứu trong tương lai nhằm đạt được các mục tiêu kép về hiệu suất nhiệt và giảm trọng lượng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phương pháp thiết kế thực nghiệm (Design of Experiments - DoE) là một công cụ mạnh mẽ trong kỹ thuật và khoa học, được sử dụng để tối ưu hóa quá trình, đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào lên đầu ra, và giảm thiểu số lượng thí nghiệm cần thiết. Khi kết hợp với phần mềm Ansys OptiSLang, DoE trở thành một phương pháp hiệu quả để phân tích và tối ưu hóa các mô hình kỹ thuật phức tạp. Trong thiết kế đĩa phanh, DoE kết hợp với Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) và các thuật toán tối ưu hóa trong ANSYS OptiSLang, cho phép khám phá không gian thiết kế một cách hiệu quả và tìm ra cấu hình tối ưu nhằm cân bằng giữa hiệu suất tản nhiệt, độ bền cơ học, và giảm khối lượng.

DoE dựa trên việc xây dựng một tập hợp các thí nghiệm có hệ thống nhằm xác định mối quan hệ giữa các biến đầu vào (factors) và đầu ra (responses). Một trong những mô hình phổ biến nhất là mô hình hồi quy tuyến tính [13], có dạng:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (1)$$

Trong đó:

- y : Biến đầu ra (response);
- x_1, x_2 : Các biến đầu vào (factors), như nhiệt độ, áp suất;
- β_0 : Hằng số (intercept);
- β_1, β_2 : Hệ số hồi quy biểu thị ảnh hưởng của từng biến đầu vào;
- β_{12} : Hệ số tương tác giữa x_1 và x_2 ;
- ϵ : Sai số ngẫu nhiên.

Mục tiêu của DoE là xác định các giá trị β thông qua việc thực hiện một số lượng giới hạn các thí nghiệm được thiết kế cẩn thận, thay vì thử tất cả các tổ hợp có thể. Một quy trình cơ bản bao gồm: Xác định biến đầu vào và đầu ra, người dùng định nghĩa các tham số cần nghiên cứu (ví dụ: chiều dài, góc nghiêng) và kết quả mong muốn (ví dụ: ứng suất tối đa); Chọn thiết kế thí nghiệm: OptiSLang hỗ trợ nhiều phương pháp như Full Factorial, Central Composite Design (CCD), hoặc Latin Hypercube Sampling (LHS). Ví dụ, với CCD, số lượng thí nghiệm được tính bằng: $N = 2^k + 2k + n_c$, trong đó k là số biến đầu vào, n_c là số điểm trung tâm bổ sung; Chạy mô phỏng: OptiSLang tự động gửi các tổ hợp tham số đến Ansys Workbench, thực hiện mô phỏng và thu thập dữ liệu đầu ra; Phân tích kết quả: Phần mềm xây dựng bề mặt phản hồi (response surface) dựa trên dữ liệu. DoE sẽ xây dựng một mô hình xấp xỉ cho hàm $f(x)$ bằng cách lấy mẫu thiết kế thông minh từ không gian thiết kế được gọi là mô hình bề mặt phản hồi (Response Surface Model).

Mô hình $\hat{y}$ dùng để thay thế mô phỏng thực tế, giúp giảm thời gian và tài nguyên tính toán. Phân tích độ nhạy và xây dựng mô hình thay thế sau khi có dữ liệu mô phỏng, OptiSLang sẽ tạo mô hình thay thế và thực hiện phân tích độ nhạy S_i của biến đầu vào x_i :

$$S_i = \frac{Var_{x_i} [E_{x \sim i}(y | x_i)]}{Var(y)} \quad (2)$$

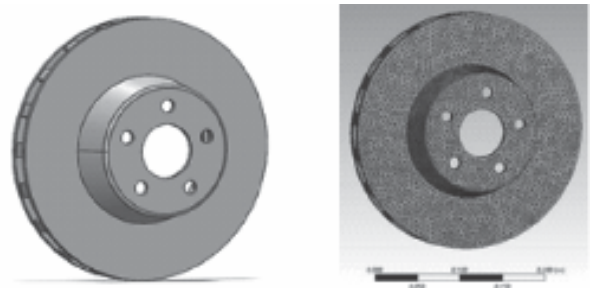
Trong đó:

- $Var(y)$ là phương sai tổng thể của đầu ra;
- $x \sim i$ là tất cả các biến trừ x_i ;
- S_i cho biết mức độ ảnh hưởng của x_i tới biến đầu ra.

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH

3.1. Mô hình CAD và FEA

Mô hình CAD (Computer-Aided Design) của đĩa phanh ô tô được xây dựng nhằm mô phỏng chính xác hình học thực tế, đồng thời cho phép thay đổi các tham số thiết kế để phục vụ phân tích tối ưu hóa.



Hình 1. Mô hình CAD và FEA đĩa phanh ô tô con.

Mô hình phân tử hữu hạn (Finite Element Model - FEM) được phát triển trong Ansys Workbench để mô phỏng quá trình truyền nhiệt của đĩa phanh trong điều kiện phanh thực tế. Lưới phân tử hữu hạn được tạo bằng cách sử dụng các phần tử tetrahedron và hexahedron, với kích thước lưới nhỏ hơn ở vùng gần lỗ thông gió và bề mặt tiếp xúc nhiệt để tăng độ chính xác. Đĩa phanh được gán các thuộc tính vật liệu khác nhau (gang xám, thép hợp kim, hoặc composite gốm), với các tham số hình học theo Bảng 1 và thông số vật liệu theo Bảng 2.



Bảng 1. Tham số hình học đĩa phanh ô tô

Thông số	Giá trị
Đường kính ngoài	300 mm
Độ dày đĩa	25 mm
Đường kính trong	160 mm
Số lượng lỗ thông gió	30 lỗ
Đường kính lỗ thông gió	10 mm

Bảng 2. Tham số các vật liệu sử dụng trong mô phỏng

Thông số	Gang xám (Gray Cast Iron)	Thép hợp kim (Alloy Steel)	Composite gốm (Ceramic)	Đơn vị
Độ dẫn nhiệt (k)	50	40	100	W/m.K
Nhiệt dung riêng (c)	500	460	800	J/kg.K
Mật độ (ρ)	7200	7850	3200	kg/m ³
Nhiệt độ nóng chảy	1220	1450	2200	°C
Độ giãn nở nhiệt (α)	11×10^{-6}	12×10^{-6}	4×10^{-6}	/K

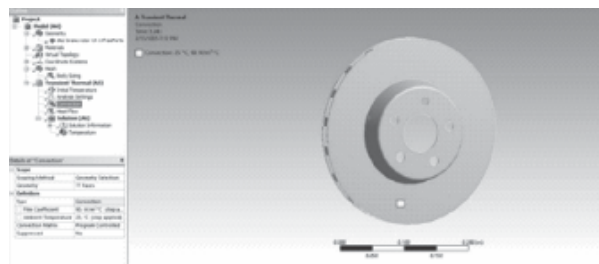
3.2. Điều kiện biên và ràng buộc

Xác định điều kiện biên (Boundary Conditions): Tải nhiệt (Heat Generation) được thiết lập tại vùng tiếp xúc giữa má phanh và đĩa phanh, trọng phanh dựa trên công thức tính năng lượng sinh. Hệ số truyền nhiệt đối lưu (Convection) được áp dụng cho các bề mặt ngoài để mô phỏng quá trình tản nhiệt qua môi trường không khí. Điều kiện nhiệt ban đầu xác định nhiệt độ ban đầu của hệ thống (thường là nhiệt độ môi trường). Dòng nhiệt sinh ra từ ma sát tại đĩa phanh:

$$q = \frac{Q}{i.A.t} \quad (3)$$

Trong đó, Q là động năng ban đầu (J); i là số lượng phanh đĩa, t là thời gian phanh (s).

Thiết lập thông số phân tích nhiệt theo thời gian (Transient Thermal Analysis) xác định khoảng thời gian phân tích và bước thời gian để theo dõi sự thay đổi nhiệt độ theo từng giai đoạn. Thiết lập phương pháp giải quyết bài toán để đảm bảo độ chính xác và tốc độ tính toán phù hợp. Thiết lập điều kiện biên và ràng buộc cho phanh đĩa được thực hiện trong môi trường mô phỏng được minh họa qua Hình 2.



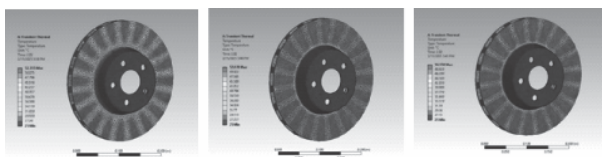
Hình 2. Thiết lập điều kiện biên và ràng buộc của mô hình đĩa phanh

3.3. Xác định mục tiêu và các biến

Mục tiêu: Tối ưu hóa hiệu suất tản nhiệt của đĩa phanh, được đánh giá qua nhiệt độ tối đa (T_{max}) trên đĩa phanh trong quá trình phanh (giảm T_{max} để tăng hiệu suất tản nhiệt). Biến đầu vào (Factors): Hình học: Độ dày đĩa (t); Vật liệu: Loại vật liệu gang xám, thép hợp kim, composite gồm được đặc trưng bởi độ dẫn nhiệt (k), nhiệt dung riêng (c), và mật độ (ρ). Biến đầu ra (Response): Nhiệt độ tối đa (T_{max} trên đĩa phanh).

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phân tích nhiệt tạm thời (Transient Thermal) của đĩa phanh ô tô 7 chỗ đã được thực hiện trong Ansys Workbench để đánh giá hiệu suất tản nhiệt của ba vật liệu: gang xám (gray cast iron), thép hợp kim (alloy steel), và composite gốm (ceramic). Mô phỏng giả định khối lượng xe toàn tải là 2200 kg, với vận tốc ban đầu lần lượt là 50 km/h (13,89 m/s) và 80 km/h (22,22 m/s), giảm đều về 0 trong thời gian phanh tương ứng là 3 giây và 4 giây qua Hình 3 cho trường hợp vận tốc 50km/h.



Gang xám Thép 45 Hợp kim nhôm
Hình 3. Kết quả phân tích nhiệt phanh đĩa với vận tốc 50km/h

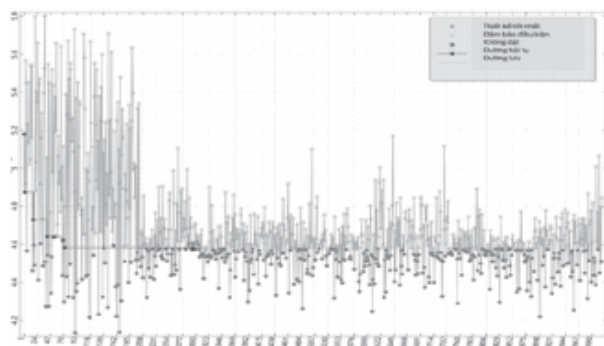
Quy trình tối ưu hóa trong OptiSLang bắt đầu bằng việc xác định các tham số thiết kế quan trọng trong CAD và CAE, bao gồm kích thước hình học, đặc tính vật liệu và điều kiện biên của mô hình. Sau đó, các mục tiêu tối ưu hóa được thiết lập, chẳng hạn như giảm

biến dạng, giảm khối lượng hoặc tăng độ bền. Quá trình tối ưu hóa đa mục tiêu được thực hiện trước để tìm ra tập hợp các giải pháp khả thi (Pareto Front), sau đó tối ưu hóa đơn mục tiêu giúp lựa chọn thiết kế tối ưu nhất theo tiêu chí ưu tiên. Kết quả tối ưu được áp dụng lại vào mô hình CAD và CAE để kiểm tra, xác thực, đảm bảo thiết kế cuối cùng đạt hiệu suất tối ưu theo các tiêu chí đã đặt ra ở Hình 4.



Hình 4. Quy trình tối ưu hóa

Sau khi tạo bề mặt phản hồi, phần mềm sử dụng thuật toán để tìm ra thiết kế tối ưu nhất theo các tiêu chí đặt ra. Nhờ bề mặt phản hồi, quá trình xử lý và khảo sát các điểm thiết kế diễn ra nhanh chóng mà không cần sử dụng bộ giải để thực hiện phân tích FEA cho từng điểm thiết kế theo Hình 5.



Hình 5. Kết quả thiết kế đĩa phanh theo DoE

Biểu đồ kết quả thiết kế thực nghiệm

hiển thị lịch sử của giá trị mục tiêu qua tất cả các thiết kế trong quá trình tối ưu hóa. Các điểm màu xanh lá biểu thị những thiết kế thỏa mãn tất cả các ràng buộc, trong khi các điểm màu đỏ đại diện cho những thiết kế vi phạm ràng buộc hoặc thất bại. Đường màu xanh dương thể hiện xu hướng hội tụ của quá trình tối ưu, cho thấy sự cải thiện dần dần của giá trị mục tiêu theo các thiết kế được đánh giá. Việc hiển thị lịch sử này giúp chúng ta quan sát được sự phân tán của các thiết kế, theo dõi tiến trình tối ưu và xác định xu hướng hội tụ về thiết kế tốt nhất. Qua biểu đồ này, ta thấy thiết kế 295 được phần mềm đánh giá là thiết kế tối ưu nhất theo các tiêu chí đã đề ra.

Đĩa phanh đề xuất có đường kính ngoài khoảng 280-320 mm giúp tăng diện tích tản nhiệt, với đường kính trong 140-170 mm bảo đảm vừa luồng khí vừa diện tích ma sát hữu ích. Độ dày đĩa khoảng 18-25 mm đủ mạnh để chịu nhiệt mà không quá nặng. Về vật liệu, gang xám phổ biến, giá thấp, tản nhiệt ở mức trung bình; thép hợp kim cho nhiệt độ tối đa giảm 22-36% so với gang xám trong mô phỏng; composite gồm siêu nhẹ, tản nhiệt vượt trội nhưng giá thành cao. Mục tiêu chung là cân bằng giữa độ bền cơ học, hiệu suất tản nhiệt và khối lượng để cải thiện tuổi thọ và an toàn phanh.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã áp dụng phương pháp Thiết kế Thực nghiệm (DoE) trong Ansys OptiSLang để tối ưu hóa kết cấu đĩa phanh ô tô con 7 chỗ, tập trung vào hiệu suất tản nhiệt với ba vật liệu: gang xám, thép hợp kim, và composite gồm, tại vận tốc ban đầu 50 km/h và 80 km/h. Kết quả mô phỏng nhiệt tạm thời cho thấy thép hợp kim đạt hiệu suất tối ưu, giảm nhiệt độ tối ưu từ 22-36% so với gang xám và composite gồm, và kích thước đĩa phanh có

chiều dày tốt nhất là 18mm. Phương pháp DoE, thông qua thiết kế Central Composite Design, đã xác định các tham số hình học độ dày và vật liệu chọn cho đĩa phanh ô tô. Việc tích hợp DoE với Ansys OptiSLang không chỉ giảm số lượng thí nghiệm cần thiết mà còn cung cấp bề mặt phản hồi chính xác để định hướng thiết kế tối ưu. Nghiên cứu này khẳng định hiệu quả của DoE trong tối ưu hóa kết cấu đĩa phanh, đồng thời mở ra hướng tiếp cận mới cho các phân tích đa mục tiêu, bao gồm độ bền và chi phí sản xuất, trong các nghiên cứu tương lai. ❖

Ngày nhận bài: **05/3/2025**

Ngày phản biện: **31/3/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Shailendra Pratap Gautam and et.al. (2015), “*Finite Element Analysis of Disc Brake using Ansys Workbench Software*”. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 4, April-2015, 1954.
- [2]. Bahulekar, Atharv & Shiralkar, Shaunak & Jomde, Amit & Shamkuwar, Sonal & Patane, Prashant & Shinde, Tarang & Dandin, Shahbaz (2024), “*Structural and Thermal Analysis of Brake Disc with Various Composites*”. 10.4271/2024-28-0066.
- [3]. Giddaluri, Ranjith & Mutra, Dr & Thriveni, Setty & Gowd, Harinath (2014), “*Design Analysis & Optimization of an Automotive Disc Brake*”. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS), Vol-1, Issue-3, pp. 24-29.
- [4]. Shinde, Anjali (2020), “*Design Analysis Topology Optimization of Passenger Car Disc Brake*”. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), Vol. 9, Issue 06, 10.17577/IJERTV9IS060752.
- [5]. Sumeet Satope, Akshaykumar Bote, Parikshit Patil, Arvind Yadav, Swapneel D. Rawool (2017), “*Review on Thermal Analysis of Disc Brake*”. IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology,

- Volume 3, Issue 11, April 2017, ISSN (online): 2349-6010.
- [6]. Sarip, Shamsul (2013), “*Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking – Finite Element Analysis*”. International Journal of Applied Physics and Mathematics, 52-58. DOI: 10.7763/IJAPM.2013.V3.173.
- [7]. Aditya Choudhary, Aditya Gujare, Shailendra Dayane, Pankaj Dhatrak (2023), “*Evaluation of thermo-mechanical properties of three different materials to improve the strength of disc brake rotor*”. Materials Today: Proceedings, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.028>.
- [8]. Kiran C. H. (2015), “*Numerical Simulation of Ventilated Disc Cooling effect*”. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics, Vol. 4, No. 1, January 2015.
- [9]. Park, Soojin & Lee, Kibum & Kim, Sunwoo & Kim, Jinho (2022), “*Brake-Disc Holes and Slit Shape Design to Improve Heat Dissipation Performance and Structural Stability*”. Applied Sciences. 12. 1171. 10.3390/app12031171.
- [10]. Jawahar, Hemanth (2021), “*The Mechanical & Thermal Properties of Various Brake Rotors Materials: A Review*”. International Journal Of Research In Aeronautical and Mechanical Engineering, Vol.9, Issue 11, pp. 84-115. DOI: 10.5281/zenodo.5735521.
- [11]. Sha, Zhihua & Lu, Jiacheng & Hao, Qiang & Yin, Jian & Liu, Yuchen & Zhang, Shengfang (2022), “*Numerical Simulation of Heat Production and Dissipation of Ventilated Brake Disc for High-Speed Trains under the Action of the Flow Field*”. Applied Sciences, 12(21), 10739; 10.3390/app122110739.
- [12]. Zhou, Junchao & Gao, Jianjie & Wang, Kaizhu & Liao, Ying (2018), “*Design Optimization of a Disc Brake Based on a Multi-Objective Optimization Algorithm and Analytic Hierarchy Process Method*”. Transactions of FAMENA. 42. 25-42. 10.21278/TOF.42403.
- [13]. Ansys (2024), “*Ansys OptiSLang Manual Help*”.