

# PHÂN TÍCH LỰC CẢN LĂN TRÊN BÁNH XE LỐP HƠI BẰNG MÔ PHỎNG

## ANALYSIS OF ROLLING RESISTANCE OF A PNEUMATIC TIRE BY SIMULATION

Ngô Quang Tạo<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Thanh Quang<sup>1</sup>,  
Vũ Hải Quân<sup>1</sup>, Lê Hồng Quân<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/hu1h5804.2025.332>

### TÓM TẮT

Ngoài đặc tính cản nhớt đàn hồi của vật liệu cao su trong thân lốp xe còn có cả kiểu dạng vân hoa vấu lốp sẽ làm tổn thất năng lượng biến dạng trong lốp và ảnh hưởng đến lực cản lăn của xe ô tô. Bài báo trình bày nội dung bước đầu nghiên cứu đánh giá loại tổn thất này tại bề mặt tương tác giữa lốp xe và mặt đường để phân tích lực cản lăn trong quá trình lốp lăn. Phương pháp nghiên cứu của nghiên cứu là phân tích mô hình lốp 3-D và mô phỏng số trong phần mềm Ansys Workbench trong trường hợp cấu trúc tĩnh (Static Structure) và động học (Transient Structure), động lực học (Explicit Dynamics) đã đưa ra kết quả đánh giá năng lượng tiêu hao của lốp và lực cản lăn trên đường.

**Từ khóa:** Lốp, năng lượng tiêu hao, lực cản lăn.

### ABSTRACT

In addition to the elastic viscous resistance of the rubber material in the tire body, there is also a lug pattern that will lose deformation energy in the tire and affect the rolling resistance of the vehicle. The article presents the initial content of research to evaluate this type of loss at the interaction surface between the tire and the road surface to analyze the rolling resistance during the tire rolling process. The research method of the study is 3-D tire model analysis and numerical simulation in Ansys Workbench software in the case of static structure (Static Structure) and kinetics (Transient Structure), dynamics (Explicit Dynamics). The results of assessing tire energy consumption and rolling resistance on the road.

**Keywords:** Tyre, deformation energy, rolling resistance.

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: quangtaoauto@gmail.com

Ngày nhận bài: 02/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 08/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

### 1. GIỚI THIỆU

Trong ngành ô tô, việc giảm mức tiêu thụ nhiên liệu ngày càng trở thành vấn đề quan trọng. Những lực cản

khi xe chuyển động đều ảnh hưởng đến mức tiêu hao nhiên liệu của xe. Lực cản lăn làm tiêu hao 10 - 33% năng lượng tại ở bề mặt tương tác giữa lốp với mặt đường tùy thuộc vào cấu trúc lốp và tải trọng trên trục nên việc phát triển lốp hiệu quả sẽ cải thiện mức tiêu thụ nhiên liệu của xe [1, 2]. Còn theo phân tích thực nghiệm, khoảng 10% năng lượng bị tiêu tán, đây được coi là nguồn chính gây ra lực cản lăn [3, 4]. Có nhiều nghiên cứu phân tích thiết kế lốp, ngay trong các hãng chế tạo cũng có những nghiên cứu chuyên sâu dựa trên các kết quả kinh nghiệm thu được từ khách hàng. Trong nghiên cứu phát triển, sử dụng công cụ phần tử hữu hạn FEM cho phép trực tiếp phân tích trên mô hình lốp 3D là phương pháp khả thi. Khi phân tích động học bánh xe, kết quả đã thu được các chu kỳ biến dạng và tổn thất năng lượng tại bề mặt tiếp xúc lốp với mặt đường [5, 6]. Do đặc tính trễ nhớt đàn hồi của các thành phần cao su đã gây ra các biến dạng theo chu kỳ làm thay đổi lực cản lăn của lốp trong khi xe chuyển động [7]. Hầu hết các phương pháp số đã được sử dụng để tính toán tổn thất từ đặc tính trễ và lực cản lăn đều có điểm chung là tính gần đúng [8]. Ứng dụng toán học với chuỗi Fourier cũng được sử dụng để tính gần đúng các chu kỳ biến dạng của lốp [9]. Trong thí nghiệm, các phép đo thực nghiệm lực cản lăn cho thấy lực cản lăn thay đổi theo sự phức tạp của điều kiện vận hành [10].

### 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

#### 2.1. Kết cấu lốp

Bánh xe bao gồm lốp cao su, vành và đĩa bánh xe. Các thông số của bánh xe chủ yếu được xác định bởi tốc độ và khả năng chịu tải của nó. Các yêu cầu chính của bánh xe là độ bền mỏi cao, khả năng chịu tải cao và tuổi thọ dài [11].

Ngày nay, lốp radial phổ biến được sử dụng và chế tạo từ các lớp vật liệu tổng hợp khác nhau như nylon, cáp

thép và cao su. Cấu trúc lốp được phân thành hai nhóm chính là: 1) Lớp thân và ta lông (khối gai) chống mài mòn, đây là hai bộ phận cao su chính, chịu được tải trọng bên trong và bên ngoài và cung cấp lực kéo cần thiết ở mép đầu ta lông; 2) Một số lớp đai thép hoặc ni lông, vành tanh xếp theo chu vi làm cứng mặt gai và tăng cường độ bền cho thân thịt hoặc thân lốp và ngăn ngừa biến dạng quá mức của cao su, hình 1.



Hình 1. Cấu tạo lốp Radial

## 2.2. Cơ sở khoa học nghiên cứu

Do đặc tính nhớt đàn hồi của các hợp chất cao su, biến dạng tuần hoàn và biến dạng dao động khi lốp lăn dẫn đến tổn thất năng lượng [12]. Khi đó lực cản lăn của lốp là tỷ số tổn thất  $\Phi_w$  và quãng đường di chuyển của bánh xe trong một vòng quay theo phương trình (1), [13, 14].

$$P_f = \frac{W}{2\pi r_L} \tag{1}$$

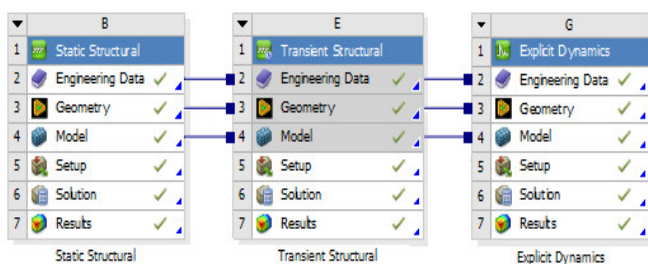
Trong đó:  $P_f$  là lực cản lăn;  $W$  là năng lượng tổn thất và  $r_L$  là bán kính lăn của lốp.

Các giả thiết sử dụng trong mô phỏng: Vật liệu lõi bố thép trong lốp là đồng nhất, đẳng hướng; Mặt đường và vành la-răng cứng tuyệt đối; Hệ số ma sát giữa mặt đường và lốp xe có giá trị 0,1 và không đổi; Bỏ qua sự dao động của lực ma sát giữa mặt đường và lốp xe [15, 16].

Các điều kiện biên sử dụng trong mô phỏng được áp dụng theo [15, 16].

## 3. MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

### 3.1. Phần mềm mô phỏng



Hình 2. Các mô đun mô phỏng trong Ansys Workbench

Sử dụng công cụ mô phỏng phần tử hữu hạn trong phần mềm Ansys Workbench phiên bản 2022R1 để phân tích, hình 2 [20].

Các mô đun mô phỏng thực hiện ba bài toán:

(1) Static Structural: Phân tích cấu trúc tĩnh của mô hình lốp - đĩa la răng - mặt đường được lắp ráp thành cụm cứng để xác định các chuyển vị, ứng suất, biến dạng và nội lực do tải trọng đối chậm theo thời gian gây ra, lực quán tính và giảm chấn không xuất hiện hoặc vô cùng nhỏ nên có thể coi bằng không và bỏ qua. Các tải bao gồm: Các lực và áp suất bên ngoài do trọng lượng xe đặt lên cụm bánh xe theo chiều thẳng đứng và mô men quay bánh xe; Lực quán tính ở trạng thái ổn định (gia tốc trọng trường hoặc gia tốc quay); Chuyển vị khác không; Nhiệt độ (xuất hiện trong thành phần cao su và bề mặt tiếp xúc của lốp với mặt đường).

(2) Transient Structural: Thực hiện phân tích cấu trúc theo lịch sử thời gian để xác định phản ứng động của kết cấu dưới tác động của tải trọng theo thời gian. Kết quả xác định các chuyển vị, biến dạng, ứng suất và lực thay đổi có xét đến hiệu ứng quán tính hoặc giảm chấn.

(3) Explicit Dynamics: Thực hiện đồng thời nhiều mô phỏng động khác nhau, bao gồm mô hình hóa phi tuyến tính của mô hình bao gồm kết cấu kim loại, phi kim loại và khí nén trong lốp và tương tác của chúng với nhau.

### 3.2. Kết cấu mô hình lốp - đĩa la răng - mặt đường

Để so sánh tường minh kết quả, nghiên cứu lựa chọn hai loại lốp có hình dáng và bề mặt lăn gần giống nhau là lốp xe đua F1 và lốp xe con Toyota Camry. Thông số hình học của các lốp gồm:

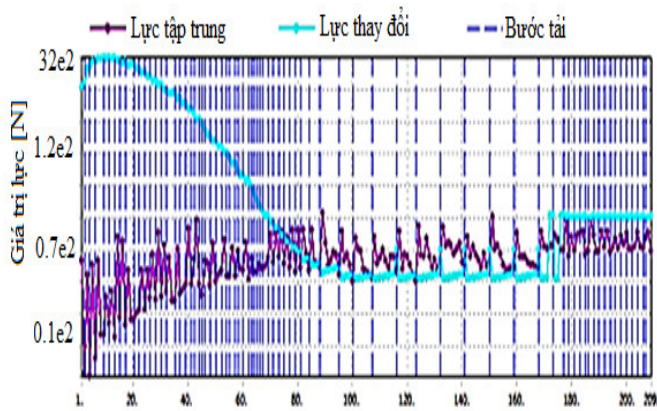
- Lốp xe đua F1: 405/670-R13, bề rộng mặt lốp 405mm, đường kính lốp 670mm, bán kính lăn 335mm.
- Lốp xe con Toyota Camry: 235/45R18 bề rộng mặt lốp 235mm, đường kính la răng 18 inch (457mm), đường kính lốp 563mm, bán kính lăn 281mm.

Lốp xe có vật liệu hỗn hợp ký hiệu Rubber, butyl (IIR, 30 - 50% carbon black) gồm cao su tự nhiên cùng vật liệu butyl hòa trộn các bon đen theo tỷ lệ 30 - 50%. Đĩa la răng có cấu tạo từ thép các bon. Mặt đường có cấu tạo vật liệu lốp bề mặt bằng bê tông asphalt. Bảng 1 là thông số vật liệu của bánh xe, la răng và mặt đường.

Tải trọng trên các lốp được lấy như nhau để đạt mục đích tham chiếu so sánh kết quả mô phỏng. Tải trọng trên lốp, áp suất, độ lệch tĩnh tương đương, nhiệt độ, sự tiêu tán năng lượng biến dạng của lốp xe liên quan đến vùng tiếp xúc của lốp xe với mặt đường. Biểu đồ tải trọng nêu trên hình 3.

Bảng 1. Vật liệu của bánh xe và mặt đường [17]

	Lớp cao su Rubber, butyl	Mặt đường Concrete, asphalt	Vành đĩa Structural Steel
Density (kg/mm <sup>3</sup> )	1,158E-06	2,482e-06	7,85E-06
Young's Modulus (MPa)	5,612	22360	2,00E+05
Poisson's Ratio	0,4992	0,355	0,3
Bulk Modulus (MPa)	1169,2	25701	1,67E+05
Shear Modulus (MPa)	1,8717	8250,9	76923
Tensile Ultimate Strength (MPa)	8,524	0,1732	460
Tensile Yield Strength (MPa)	8,524	0,1732	250



Hình 3. Tải trọng trong mô phỏng

### 3.3. Phân tích kết quả

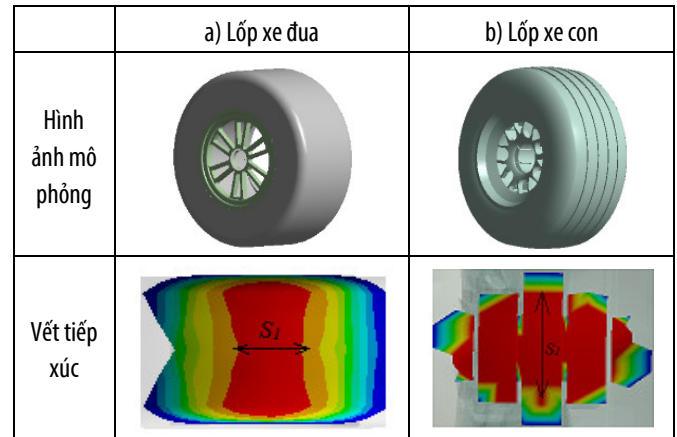
#### 3.3.1. Vết tiếp xúc của bánh xe với mặt đường

Vết tiếp xúc của lốp với mặt đường phụ thuộc vào loại mặt đường bê tông hay nhựa asphalt do sự phân bố nhiệt, hệ số cản lăn, hệ số đàn hồi và sự rung động của lốp [18, 19]. Chiều dài vết tiếp xúc (Sliding distance)  $s_l$  tính gần đúng bằng chiều dài trượt dọc của lốp và được tính bằng phương trình (2):

$$s_l = 1 - \frac{v_c}{v_f} \quad (2)$$

Ở đó:  $v_c$  là vận tốc của xe,  $v_f$  là vận tốc của bánh xe.

Trong mô phỏng, thời gian máy tính chạy là 70 (s) cho mỗi mô đun. Trên hình ảnh nhận được, ta có thể quan sát trực tiếp kết quả bằng phổ màu, trên đó các vết tiếp xúc thể hiện đúng kiểu vấu lốp (hình 4). Loại lốp có bề mặt phẳng sử dụng cho các loại xe đua F1 tốc độ rất cao trên 200km/h (hình 4a). Loại lốp có rãnh thẳng theo chu vi lốp sử dụng cho các loại xe con, xe thương mại, xe bus, xe vận tải và vận tốc xe thường trong khoảng 60 đến dưới 200km/h (hình 4b).



Hình 4. Hình ảnh mô phỏng và vết tiếp xúc trên mặt đường

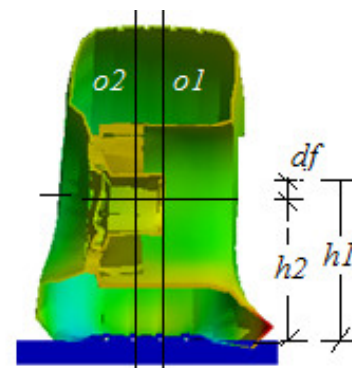
#### 3.3.2. Năng lượng biến dạng tương đương

Dựa trên mô hình Mooney-Rivlin phi tuyến tính [15, 16], các ứng suất và biến dạng cục bộ trong miền khảo sát của lốp được bơm căng và chịu tải được sử dụng để đánh giá năng lượng biến dạng theo phương trình (3), với những vị trí tiêu tán năng lượng lớn nhất là: Thành bên chiếm 80 - 95%, trên bề mặt tiếp xúc với đường chiếm đến 15 % và do lực cản khí động của lốp chiếm đến 5 % [13, 14].

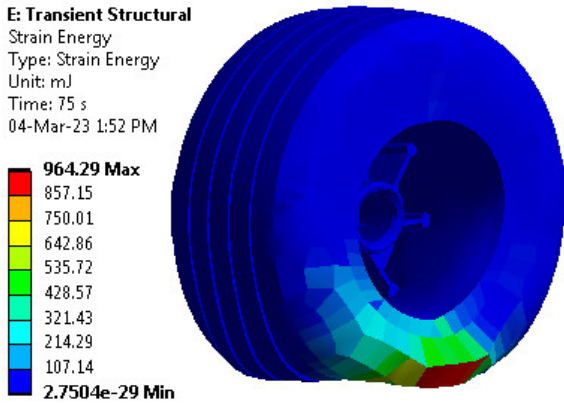
$$\sigma = 2 \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left( C_{01} + \frac{C_{10}}{\lambda} \right) \quad (3)$$

Ở đó,  $\sigma$  là biến dạng tương đương (Strain Equivalent Von-mises);  $C_{01}$  và  $C_{10}$  là các hệ số Mooney-Rivlin.

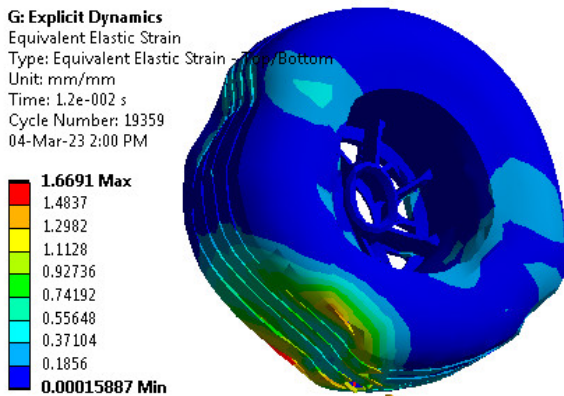
Quan sát trực tiếp kết quả mô phỏng trên hình 5, nhận thấy độ biến dạng tương đương, ứng suất tương đương khi lốp chịu tải thẳng đứng sẽ bị lệch khoảng  $\sigma_1 - \sigma_2$ , đường tâm lốp thay đổi đoạn  $d_f$  từ chiều cao  $h_1$  đến  $h_2$  khi phân tích tĩnh Static Structural, hình 5a. Phân tích động học cấu trúc nhận được kết quả năng lượng biến dạng cực đại 964,29MJ ở chu kỳ 75 (s) trong Transient Structural, hình 5b và biến dạng tương đương 1,6691 (mm) ở chu kỳ 1,2e-002 (s), hình 5c trong Explicit Dynamics.



a) Mô phỏng cấu trúc Static Structural



b) Mô phỏng cấu trúc Transient



c) Mô phỏng động lực học Explicit Dynamics

Hình 5. Kết quả hình ảnh của ba mô đun mô phỏng

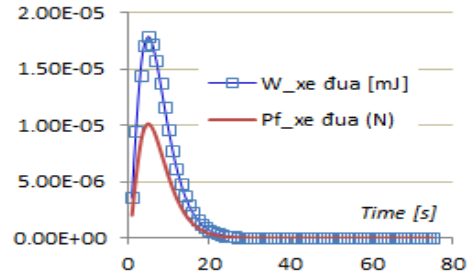
### 3.3.3. Lực cản lăn $P_f$

Từ phương trình (1) ở trên, lực cản lăn  $P_f$  thay đổi theo năng lượng biến dạng trong khoảng thời gian (t). Tổng thất W của năng lượng biến dạng được tính bằng phương trình (4) [19, 20].

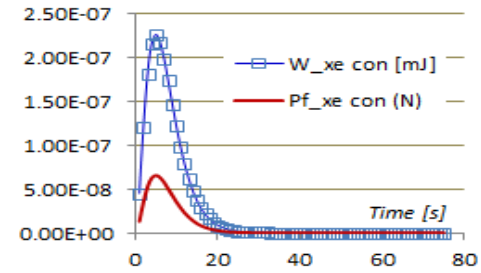
$$W = \int_0^{f_c} \int_0^t \sigma_{ij}(t) \frac{d\varepsilon_{ij}(t)}{dt} dt dV \quad (4)$$

Ở đây, V là thể tích lớp;  $f_c$  là tần số quay của lớp;  $\sigma_{ij}$  và  $\varepsilon_{ij}$  là các thành phần của ứng suất và biến dạng, các ứng suất và biến dạng cục bộ trong miền khảo sát cho lớp được bơm căng và chịu tải.

Ứng dụng mô phỏng ở mô đun Transient Structure nhận được kết quả tổn thất của năng lượng biến dạng theo lịch sử thời gian từ 0 đến 75 (s) với tải trọng thay đổi theo thời gian tương ứng trên hình (3) ở trên. Năng lượng biến dạng  $W_{xe\ đua}$  và lực cản lăn  $P_{f_{xe\ đua}}$  trên lớp xe đua là  $1,75E-05$  (mJ) và  $1,00E-05$  (N) tương ứng, trên lớp xe con có  $W_{xe\ con}$  là  $2,25E-07$  (mJ) và  $P_{f_{xe\ con}}$   $5,20E-08$  tương ứng (hình 6). Điều này là do lớp xe đua có bề mặt lớp phẳng nên diện tích tiếp xúc với mặt đường lớn hơn lớp có rãnh của xe con.

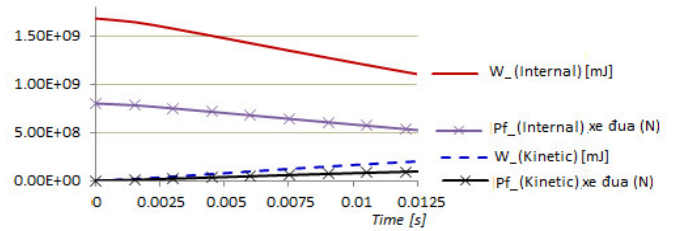


a) Trên xe đua

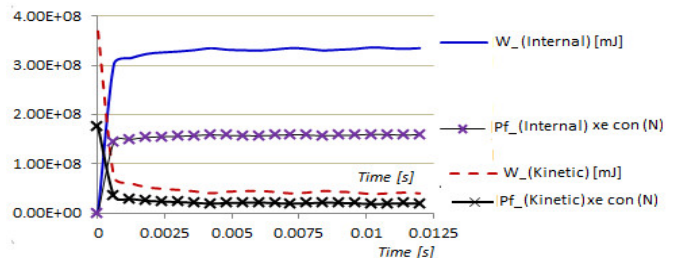


b) Trên xe con

Hình 6. Kết quả phân tích lực cản lăn trong mô đun Transient



a) Trên xe đua



b) Trên xe con

Hình 7. Kết quả phân tích lực cản lăn trong mô đun Explicit Dynamics

Phân tích động lực học Explicit Dynamics để xác định tổn thất của năng lượng biến dạng do nội lực trong phần thịt thân lớp  $W_{(Internal)}$  chủ yếu gây ra biến dạng nhiệt (ở đây được giới hạn chưa xét đến sự truyền nhiệt) sẽ giảm dần và  $W_{(Kinetic)}$  do ngoại lực gây ra sẽ tăng dần. Mỗi quan hệ của lực cản lăn tương ứng cũng có quan hệ theo phương trình (1) ở trên. Kết quả nhận được theo lịch sử thời gian từ 0 đến 0,0125 (s) với tải trọng thay đổi theo thời gian. Các giá trị cụ thể về xu hướng thay đổi của năng lượng biến dạng và lực cản lăn trên lớp xe đua trình bày trên hình 7a và trên lớp xe con trình bày trên hình 7b. Các giá trị này trên lớp xe đua cũng lớn hơn lớp xe con và cũng

do lốp xe đua có bề mặt lốp phẳng nên diện tích tiếp xúc với mặt đường lớn hơn lốp có rãnh của xe con.

#### 4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu cho thấy lực cản lăn thay đổi theo tổn hao của năng lượng biến dạng và khi biến dạng tăng dẫn đến lực cản lăn lớn hơn.

Sử dụng công cụ mô phỏng trong phần mềm Ansys Workbench đã được nhóm nghiên cứu khảo sát trạng thái tĩnh trong các mô đun Static Structure và khảo sát động lực học lốp trong mô đun Transient Structure và Explicit Dynamics để xác định giá trị và quy luật thay đổi của tổn thất năng lượng biến dạng trên hai lốp có cấu trúc bề mặt tương đối giống nhau nhưng khác nhau ở hoa vấu lốp. Trên lốp xe đua F1 bề mặt lốp phẳng có diện tích tiếp xúc với mặt đường lớn hơn lốp xe con bề mặt lốp có rãnh.

Các kết quả phân tích định lượng có thể được sử dụng trong thiết kế lốp với thời gian ngắn hơn để dự đoán hoặc cải thiện tốt hơn các đặc tính của lốp.

Các kết quả nghiên cứu là bước đầu, nên có thể mở rộng bằng nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm để phân tích đánh giá tổn thất năng lượng biến dạng trong cả lốp và phân tích lực cản lăn ảnh hưởng đến tính kinh tế nhiên liệu của ô tô.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1.] V. Hublau, A. Barillier, "The Equations of the Rolling Resistance of a Tire Rolling on a Drum," *Tire Science and Technology*, 36 (2), 146-155, 2008.
- [2.] J. R. Cho, H. W. Lee, W. B. Jeong, K. M. Jeong, K. W. Kim, "Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire," *International Journal of Solids and Structures*, 50 (1), 86- 96, 2013.
- [3.] P. S. Pillai, "Effect of tyre overload and inflation pressure on rolling loss (resistance) and fuel consumption of automobile and truck/bus tires," *Indian Journal of Engineering & Material Science*, 11, 406-412, 2004.
- [4.] Y.J. Lin, S.J. Hwang, "Temperature prediction of rolling tires by computer simulation," *Mathematics and Computers in Simulation*, 67 (3), 2004, 235-249, 2004.
- [5.] J. Cho, K. Kim, H. Jeong, "Numerical investigation of tire standing wave using 3-D patterned tire model," *Journal of sound and vibration*, 305 (4) 2007, 795-807, 2007.
- [6.] J. R. Luchini, J. A. Popio, "Modeling Transient Rolling Resistance of Tires 3," *Tire Science and Technology*, 35 (2), 118-14, 2007.
- [7.] H. B. Pacejka, *Tyre and vehicle dynamics*. ButterworthHeinemann, ISBN 0, 7506 (5141), 2006.

[8.] J. R. Cho, H. W. Lee, W. B. Jeong, K. M. Jeong, K. W. Kim, "Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire," *International Journal of Solids and Structures*, 50 (1), 86- 96, 2013.

[9.] T. Ebbott, R. Hohman, J.P. Jeusette, V. Kerchman, "Tire temperature and rolling resistance prediction with finite element analysis," *Tire Science and Technology*, 27 (1), 2-21, 1999.

[10.] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*. Wiley, 2001.

[11.] U.Adler, *Automotive Handbook*, 10<sup>th</sup> Edition. Bosch, SAE Society of Automotive Engineers, 2018. ISBN-10: 0768095670; ISBN-13: 978-0768095678.

[12.] T. Ebbott, R. Hohman, J.P. Jeusette, V. Kerchman, "Tire temperature and rolling resistance prediction with finite element analysis," *Tire Science and Technology*, 27 (1), 2-21, 1999.

[13.] M. H. R. Ghoreishy, "A state of the art review of the finite element modelling of rolling tyres," *Iranian Polymer Journal*, 17 (8), 571-597, 2008.

[14.] N. Korunović, M. Trajanović, M. Stojković, 2007. Finite element model for steady-state rolling tire analysis. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics/Vol*, 1 (1), 63-79, 2007.

[15.] Nguyen T.C., Cong K.D.D., Dinh C.T., "Rolling Tires on the Flat Road: Thermo-Investigation with Changing Conditions through Numerical Simulation," *Appl. Sci.*, 13, 4834, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13084834> (SCIE)

[16.] Thanh Cong Nguyen, Khanh Duy Do Cong, Cong Truong Dinh, "Structural and thermal investigations of rolling tires in a flat road," *Transport and Communications Science Journal*, 74, 1, 47-57, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.1.5>

[17.] Nguyễn Thành Công, Nguyễn Quang Cường, Tạ Thị Thanh Huyền, Phạm Trung Dũng, Nguyễn Văn Hiệp, Vũ Tiến Đạt, Phạm Hải Nam, "Nghiên cứu xác định biến dạng của lốp bằng phần mềm ANSYS WORKBENCH," *Tạp chí Khoa học Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 59, 2B, 2023. DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.085>

[18.] D.Wang, A. Ueckermann, A. Schacht, M. Oeser, B. Steinauer, B. N. J. Persson, "Tire-Road Contact Stiffness," *Tribol Lett*, 56, 397-402, 2014. DOI 10.1007/s11249-014-0417-x, Springer

[19.] J. Aguilar-Martínez, L. Alvarez-Icaza, "Analysis of tire-road contact area in a control oriented test bed for dynamic friction models," *Journal of Applied Research and Technology*, 13, 4, 461-471, 2015.

[20.] [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/wb\\_sim/ds\\_transient\\_mechanical\\_analysis\\_type.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/wb_sim/ds_transient_mechanical_analysis_type.html).

#### AUTHORS INFORMATION

**Ngo Quang Tao, Nguyen Thanh Quang, Vu Hai Quan, Le Hong Quan**  
Hanoi University of Industry, Vietnam