

Đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp nước tới hiện tượng trượt thủy lực của tàu bay trên mặt đường cất hạ cánh

■ **KS. NGUYỄN HỮU LÂM⁽¹⁾; TS. NGUYỄN VĂN HIẾU⁽²⁾; PGS. TS. HOÀNG QUỐC LONG**

Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: ⁽¹⁾nguyenhuulam1995@lqdtu.edu.vn; ⁽²⁾hieunv@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT: Trượt thủy lực là một dạng trơn trượt nguy hiểm, xảy ra khi có xuất hiện lớp nước trên bề mặt đường, khiến bánh xe trượt trên bề mặt hoặc không còn tiếp xúc trực tiếp với mặt đường. Đối với các phương tiện di chuyển với tốc độ cao như tàu bay trong quá trình cất hạ cánh (CHC) trên đường băng, nguy cơ xảy ra trượt thủy lực là rất lớn. Trên cơ sở sử dụng phân tích CFD bằng phần mềm mô phỏng Ansys Fluent, bài báo tính toán mối quan hệ giữa chiều dày và áp suất tĩnh của lớp nước giữa bánh tàu bay với mặt đường CHC cho 3 loại tàu bay ATR72, A321-200, A350-900, từ đó đánh giá ảnh hưởng chiều dày lớp nước tới khả năng xảy ra trượt thủy lực của tàu bay trong quá trình hạ cánh-hãm đà.

TỪ KHÓA: Trượt thủy lực, Ansys Fluent, CFD, hãm trượt tàu bay.

ABSTRACT: Hydroplaning is one of the most dangerous accidents, occurs during taking off on a puddle or flooded runway when the inertial forces in the fluid film are sufficient to completely separate the aircraft tires from the pavement surface. For vehicles moving at high speeds such as aircraft during take-off on the runway, the risk of hydroplaning is very high. Based on the use of CFD analysis with Ansys Fluent simulation software, the article calculates the relationship between the thickness and static pressure of the water film between the aircraft wheel and the runway surface for 3 aircrafts: ATR72, A321-200, A350-900, thereby evaluating the effect of water film thickness on the possibility of hydroplaning during landing and braking.

KEYWORDS: Hydroplaning, Ansys Fluent, CFD, Skid-resistant of aircraft.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi trời mưa, mặt đường CHC chuyển từ dạng khô sang ướt và có thể xuất hiện một lớp nước mỏng. Lớp nước này

có thể gây ra hiện tượng trượt thủy lực, dẫn đến nguy hiểm cho quá trình chuyển động của tàu bay. Hiện tượng trượt thủy lực được hiểu là khi bánh tàu bay không còn tiếp xúc trực tiếp với mặt đường mà bị ngăn cách bởi lớp nước ở giữa, ảnh hưởng đến khả năng kiểm soát điều khiển tàu bay của người lái.



Hình 1.1: Tàu bay trượt ra khỏi đường CHC tại sân bay Tân Sơn Nhất năm 2020 (Ảnh: Báo Tuổi trẻ)

Thông thường, để tàu bay và ô tô di chuyển trên mặt đường thì luôn tồn tại lực ma sát giữa bánh xe và mặt đường, phụ thuộc vào hệ số ma sát và tải trọng bánh xe. Khi mặt đường xuất hiện lớp nước, sự ma sát giữa bánh xe và mặt đường chuyển từ ma sát khô sang ma sát ướt với hệ số ma sát giảm mạnh. Khi lớp nước trên mặt đường đạt đến một chiều dày nhất định kết hợp với vận tốc chuyển động của tàu bay đạt đến một vận tốc giới hạn, khiến cho áp suất của lớp nước dưới bánh xe lớn hơn áp suất bánh hơi, từ đó nâng bánh xe lên khỏi mặt đường.

Trượt thủy lực là một hiện tượng vật lý phức tạp, phụ thuộc vào nhiều yếu tố như tương tác bánh xe-mặt đường, biến dạng bánh lốp, áp suất bánh hơi, chiều dày lớp nước, vận tốc chuyển động, hệ số ma sát... Bài báo sẽ tập trung đi sâu vào phân tích mối quan hệ giữa chiều dày lớp nước và nguy cơ xảy ra trượt thủy lực.

2. CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN VIỆC XẢY RA TRƯỢT THỦY LỰC TRONG QUÁ TRÌNH CHC CỦA TÀU BAY

2.1. Chiều dày lớp nước trên bề mặt đường CHC

Việt Nam nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới, lượng mưa trung bình hằng năm từ 1.500 đến 2.000 m, với số lượng hàng trăm cơn mưa, là một trong những khu vực có lượng mưa lớn trên thế giới. Cường độ mưa và thời gian mưa quyết định việc hình thành và phát triển chiều dày lớp nước trên bề mặt đường. Chiều dày lớp nước được xác định bởi công thức thực nghiệm của Gallaway and Rose (1979) [3]:

$$t_x = \left(\frac{0.01485 MTD^{0.11} L_x^{0.43} I^{0.59}}{S^{0.2}} \right) - MTD \tag{1}$$

Trong đó:

t_x - Chiều dày lớp nước tại điểm x tính từ đỉnh mái dốc mặt đường, mm;

L_x - Chiều dài dòng chảy, tức khoảng cách từ đỉnh (tim đường) đến điểm tính toán, m;

I - Cường độ mưa, mm/h;

S - Độ dốc ngang mặt đường;

MTD - Độ nhám mặt đường, mm.

Chiều dày lớp nước càng lớn thì càng hạn chế vận tốc di chuyển. Theo hướng dẫn của ICAO [2], chiều dày lớp nước tối đa cho phép trên bề mặt đường CHC là 3 mm.

2.2. Áp suất bánh hơi

Áp suất bánh hơi là một trong những yếu tố quan trọng nhất trong phân tích trượt thủy lực. Các nghiên cứu thực nghiệm của Cơ quan Hàng không vũ trụ Hoa Kỳ đưa ra công thức thực nghiệm tính toán vận tốc giới hạn trượt thủy lực [4]:

$$v_p = 6.36 \sqrt{p} \tag{2}$$

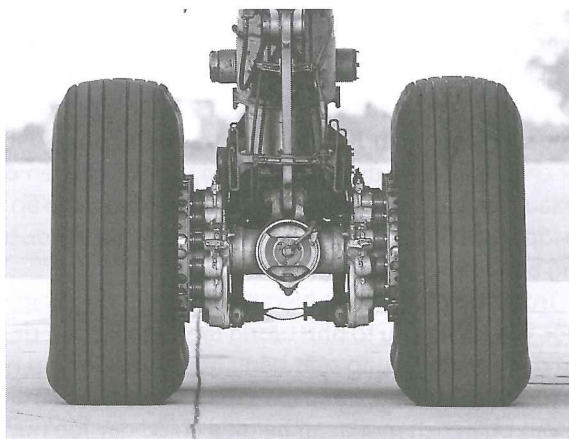
Trong đó:

v_p - Vận tốc tối thiểu gây trượt thủy lực (km/h);

p - Áp suất bánh hơi (kPa).

2.3. Rãnh gai trên bề mặt lốp

Các nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra 2 ảnh hưởng quan trọng của đặc điểm rãnh gai trên bánh lốp đến trượt thủy lực [4]. Một là, bánh xe có rãnh gai lốp có vận tốc trượt thủy lực giới hạn cao hơn so với bánh lốp trơn nhẵn; hai là rãnh gai bánh lốp giúp giảm thiểu chiều dày lớp nước giới hạn xảy ra trượt thủy lực. Sự mất lực dính bám khi phanh cũng sẽ hạn chế hơn, kể cả khi chiều dày lớp nước lớn hơn chiều sâu của rãnh gai.



Hình 2.1: Rãnh gai trên bề mặt lốp tàu bay

2.4. Tải trọng của tàu bay

Các nghiên cứu chỉ ra tải trọng của tàu bay có ảnh hưởng tương đối nhỏ tới trượt thủy lực [4]. Điều này giải thích do bánh tàu bay có cấu trúc đàn hồi, tải trọng tàu bay truyền xuống càng sẽ làm thay đổi diện tích tiếp xúc giữa bánh tàu bay và mặt đường, do đó áp suất bánh hơi không thay đổi nhiều. Nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, khi tải trọng tàu bay tăng đến giá trị tối đa thì áp suất bánh hơi tăng từ 3 - 4%, tương ứng vận tốc giới hạn trượt thủy lực giảm khoảng 2% [1].

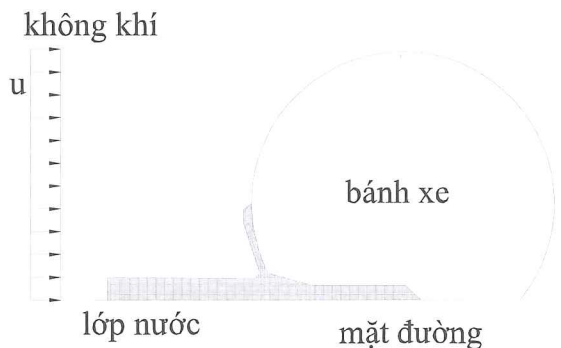
2.5. Các đặc điểm của mặt đường CHC

Các đặc điểm của mặt đường CHC ảnh hưởng đến hiện tượng trượt thủy lực bao gồm: Chiều rộng, độ dốc dọc, độ dốc ngang, nhám mặt đường. Trong đó, các đặc điểm hình học như bề rộng và độ dốc mặt đường sẽ ảnh hưởng đến việc thoát nước bề mặt và quyết định chiều dày lớp nước trên mặt đường. Độ nhám trên bề mặt được chia thành 2 loại: Độ nhám thô (macrotecture) và độ nhám mịn (microtexture). Độ nhám ảnh hưởng đến việc thoát nước bề mặt cũng như khả năng phanh hãm của tàu bay.

3. MÔ PHỎNG SỐ ĐÁNH GIÁ NGUY CƠ XẢY RA TRƯỢT THỦY LỰC

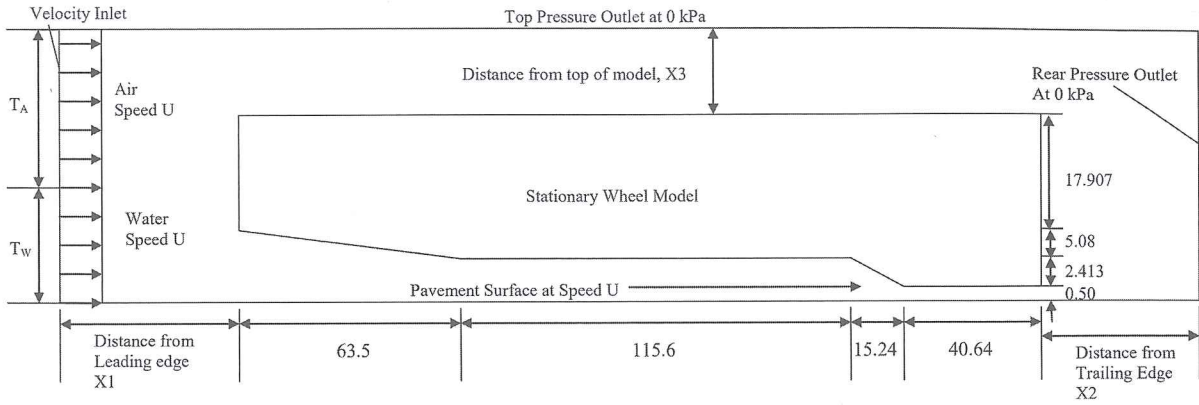
3.1. Mô hình toán

Trước đây đã có nhiều nghiên cứu về hiện tượng trượt thủy lực có xét đến các quan hệ về vận tốc giới hạn trượt thủy lực, chiều dày lớp nước trên mặt đường và áp suất bánh hơi. Những nghiên cứu đầu tiên của Horne & Dreher [4]; Yeager & Tuttle; Browne là các nghiên cứu thực nghiệm, chưa phản ánh hết các bản chất cơ học của hiện tượng. Với sự phát triển của máy tính, nhiều nhà khoa học đã phát triển mô hình mô phỏng số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn Zmindak & Grajciar; Okano & Koishi [10], tuy nhiên dòng chảy trong các mô hình này là giả sử dòng chảy tầng dẫn đến kết quả sai khác nhiều so với các nghiên cứu thực nghiệm. Năm 2006, Ghim Ping Ong và các cộng sự đã đề xuất mô hình sử dụng dòng chảy rối được áp dụng rộng rãi cho các nghiên cứu sau này.



Hình 3.1: Mô hình mô tả phân tích trượt thủy lực

Mô hình phân tích coi bánh tàu bay đứng yên, không khí và lớp nước chuyển động với vận tốc u (m/s) theo phương nằm ngang, hướng về phía bánh. Hiện tượng trượt thủy lực được coi là xảy ra khi áp suất tĩnh của lớp nước bằng với áp lực bánh xe lên mặt đường, hay lực nâng thủy động cân bằng với tải trọng tàu bay.



Hình 3.2: Mô hình mô phỏng số

3.2. Cơ sở lý thuyết

Bài toán mô phỏng dựa trên các định luật cơ bản của dòng chảy rối, bao gồm:

- Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{3}$$

Trong đó:

ρ - Khối lượng riêng của chất lưu;

u - Vector vận tốc.

- Hệ phương trình Navie-Stokes ở dạng bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z$$

Trong đó: $f_{x(y,z)}$ - Lực khối trên mỗi đơn vị khối lượng.

- Phương trình k-ε:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k u) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon u) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Các giá trị hằng số được lấy như sau:

$$C_{1\epsilon} = 0,09; \sigma_k = 1,00; \sigma_\epsilon = 1,30; \sigma_{1\epsilon} = 1,44 \text{ và } \sigma_{2\epsilon} = 1,92.$$

3.3. Thông số đầu vào và khai báo tính toán mô phỏng

- Các thông số về hình học: Các kích thước hình học của mô hình được mô tả trong Hình 3.2. Sự biến dạng theo mặt cắt dọc của bánh xe được lấy theo mô hình của Browne (1971).

- Điều kiện biên: Đầu vào (inlet) của mô hình gồm 2 phần: Không khí (inlet air) và lớp nước (inlet water). Chiều rộng của phần lớp nước lấy các giá trị 2; 3; 5; 10 mm. Vận tốc của đầu vào lấy theo vận tốc hạ cánh của từng loại tàu bay.

Về đầu ra của mô hình gồm outlet top (trên bề mặt) outlet rear (phần phía sau bánh). Trong đó, outlet top lấy bằng áp suất không khí, outlet rear lấy bằng 0 Mpa.

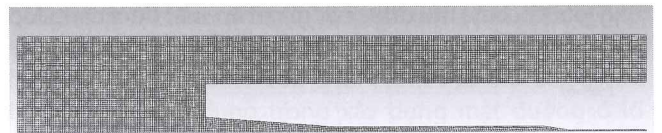
- Thông số vật liệu:

Các thông số vật liệu được khai báo trong mô hình có các thông số như sau:

Bảng 3.1. Bảng thông số vật liệu đầu vào

Vật liệu	Khối lượng riêng (kg/m ³)	Độ nhớt tuyệt đối (Ns/m ²)	Độ nhớt động học (m ² /s)
1. Không khí (air)	1,204	1,82 x 10 ⁻⁵	1,51 x 10 ⁻⁵
2. Nước (water)	998,2	1,002 x 10 ⁻³	1,004 x 10 ⁻⁶

- Chia lưới tính toán trong Ansys Fluent: Xây dựng mô hình phân tích 2D, phương pháp chia lưới tứ giác Quadrilaterals, kích thước lưới 1 mm.



Hình 3.3: Chia lưới tính toán

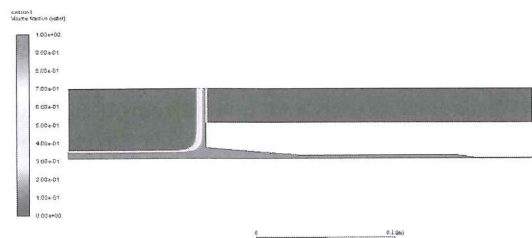
- Thông số tàu bay:

Bài báo phân tích mô hình toán cho 3 loại tàu bay khai thác phổ biến ở Việt Nam với các mức tải trọng khác nhau là ATR-72, A321-200 và A350-900. Vận tốc lớn nhất của tàu bay chạy trong quá trình hạ cánh-hãm đã được sử dụng để phân tích khả năng xảy ra trượt thủy lực, được khai báo trong mô hình là vận tốc của lớp nước và không khí tại đầu vào (inlet). Giá trị áp suất bánh hơi dùng để so sánh với áp lực tĩnh của lớp nước dưới bánh xe.

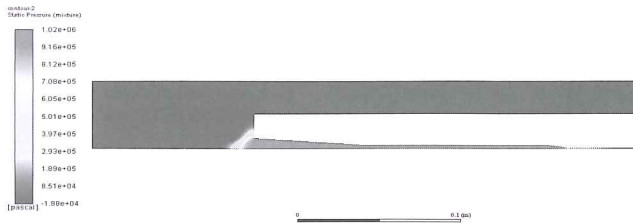
Bảng 3.2. Các tham số khai thác của tàu bay

Loại tàu bay	Tải trọng CHC lớn nhất (kg)	Vận tốc hạ cánh (km/h)	Vận tốc hạ cánh (m/s)	Áp suất bánh hơi (kPa)
ATR-72	22.700	180	50	848,1
A321-200	93.500	220	61,1	1.282,4
A350-900	275.000	260	72,2	1.660

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ



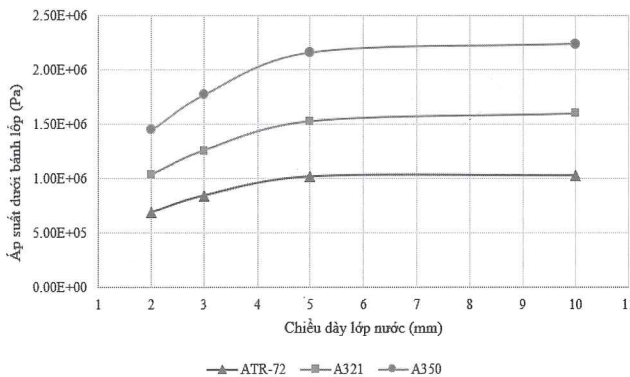
Hình 4.1: Dòng chảy của nước khi tiếp xúc với bánh xe



Hình 4.2: Áp suất hình thành trong mô hình

Theo biểu đồ Hình 4.1 nhận thấy, khi mô phỏng mô hình hệ bánh tàu bay - mặt đường - lớp nước - không khí, một phần lớp nước bị văng do tương tác với bánh tàu bay, phần còn lại của lớp nước di chuyển vào khe hở giữa bánh xe và mặt đường, thành phần này chính là thành phần gây ra hiện tượng trượt thủy lực. Do ảnh hưởng của lớp nước này, áp suất tác động lên bánh tàu bay phụ thuộc vào vận tốc dòng nước (tương đương vận chuyển động bánh tàu bay) và kích thước hình học của khe hở. Khi dòng chảy ổn định, áp suất đạt giá trị cực đại và không thay đổi theo thời gian (Hình 4.2).

Khảo sát số được thực hiện với mỗi chiều dày lớp nước thay đổi tại các giá trị 2,0, 3,0, 5,0, 10,0 mm. Tính toán cho từng loại tàu bay bằng cách khai báo lại giá trị vận tốc của lớp nước và không khí (tương ứng với vận tốc hạ cánh của từng loại tàu bay) thu được các giá trị áp suất dưới bánh lốp tương ứng, kết quả thể hiện ở hình sau:



Hình 4.3: Mối quan hệ giữa chiều dày lớp nước và áp suất dưới bánh lốp

Theo đồ thị, đối với cả 3 loại tàu bay, khi chiều dày lớp nước tăng từ 2 đến 4 mm, áp suất dưới bánh lốp tăng nhanh rõ rệt, khi chiều dày lớp nước trên 4 mm áp suất này tăng có xu hướng chậm và tương đối ổn định. Hiện nay, ICAO khuyến cáo chiều dày lớp nước tối đa cho phép trên bề mặt đường CHC là 3,0 mm cho tất cả các loại tàu bay, giá trị chiều dày này trong tính toán mô phỏng có kết quả áp suất dưới bánh lốp sát với áp suất bánh hơi khai thác của từng loại tàu bay, cho thấy kết quả tính toán phù hợp với khuyến cáo của ICAO.

5. KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Các yếu tố như chiều dày lớp nước, vận tốc tàu bay, dạng lốp tàu bay, áp suất bánh hơi, tải trọng bánh tàu bay, độ nhám bề mặt đường là những yếu tố có ảnh hưởng đến điều kiện hãm trượt của tàu bay khi thực hiện CHC. Với điều

kiện vận tốc hạ cánh cố định thì chiều dày lớp nước phải giới hạn để tránh xảy ra hiện tượng trượt thủy lực.

Khi chiều dày lớp nước tăng từ 2 - 4 mm, áp suất dưới bánh lốp tăng nhanh và trượt thủy lực thường xảy ra trong phạm vi này. Khi chiều dày lớp nước trên 4 mm, áp suất gần như không tăng, khi chiều dày lớp nước tăng.

Để giảm thiểu hiện tượng trượt thủy lực, một giải pháp hữu hiệu là xẻ các rãnh ngang trên mặt đường, từ đó giảm thiểu chiều dày lớp nước trên bề mặt đường, giải pháp này được sử dụng rộng rãi trên thế giới và bước đầu đã áp dụng thành công tại các cảng hàng không, sân bay tại Việt Nam như: Nội Bài, Tân Sơn Nhất, Điện Biên.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Ong, G. P. and Fwa, T. F. (2006), *Transverse pavement grooving against hydroplaning. I: Simulation model*, J. Transp. Eng. 132 (6), 441-448.
- [2]. ICAO. (2022), *Annex 14 Aerodromes, Volume 1: Aerodromes Design and Operation*, International Civil Aviation Organization.
- [3]. Gallaway, B. M. and Rose, J. G. (1971), *The Effects of Rainfall Intensity, Pavement Cross Slope, Surface texture, and Drainage Length on Pavement Water Depths*, Research Report No. 138-5, Texas Transportation Institute.
- [4]. Horne, W. B. and Dreher, R. C. (1963), *Phenomena of pneumatic tire hydroplaning*, NASA TN D-2056, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C.
- [5]. Wallace, K. B. (1964), *Airfield pavement skidding characteristics*, University of Melbourne Press, Melbourne, Australia.
- [6]. Report No. DOT-FAARD- 82-77 (January, 1983), *Braking of an Aircraft Tire on Grooved and Porous Asphaltic Concrete*.
- [7]. Liu, Y. R., T. F. Fwa and Y. S. Choo. (2003), *Finite Element Modeling of Skid Resistance Test*, ASCE Journal of Transportation Engineering, vol.129, no.3, pp.316-321.
- [8]. Martin, C. S. (1966), *Hydrodynamics of Tire Hydroplaning*, Final Report, Project B-608, Georgia Institute of Technology.
- [9]. Moore, D. F. (1966), *Prediction of Skid-resistance Gradient and Drainage Characteristics for Pavements*, Highway Research Record 131, pp.181-203.
- [10]. Okano, T. and M. Koishi. (2000), *A New Computational Procedure to Predict Transient Hydroplaning on a Tire*, Presented in The 19th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, Ohio, USA.

Ngày nhận bài: 18/3/2024

Ngày nhận bài sửa: 27/3/2024

Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2024