



## RUTTING SIMULATION OF FLEXIBLE PAVEMENTS CONSIDER VISCO-PLASTIC MATERIAL MODEL AND LOADING METHOD

Lê Nguyễn Khương\*

University of Transport Technology, No 54 Trieu Khuc Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 9/12/2020

Revised: 29/12/2020

Accepted: 8/1/2021

Published online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.8>

\* *Corresponding author*

Email: [khuongln@utt.edu.vn](mailto:khuongln@utt.edu.vn)

**Abstract.** During the past two decades, Finite Element Method (FEM) was successfully used to simulate nonlinear behaviors of pavement structures that could not be modelled using the simpler multi-layer elastic theory. The paper summarizes the research results on the simulating of the degradation of asphalt pavement based on Cast3M open-source software using the Generalized Drucker – Prager (GD-P) material model in which the variation of the temperature and loading method applied on the model are considered. The use of different model options (2D plane strain and 3D) and load methods allows the research team to evaluate the effect of the model on the calculation result as well as the total calculation time, thereby giving some recommendations for the simulation and rutting prediction by the finite element method. The research results presented in the paper are in the plan of developing tools to evaluate and predict the deterioration states of asphalt pavement structures by finite element method, using Cast3M open-source and the nonlinear materials with viscous elasticity and viscous plasticity behaviors.

**Keywords:** Rutting asphalt; Finite Element Method; Viscoelastic and Viscoplastic material model; Generalized Drucker–Prager, Cast3M

© 2021 University of Transport and Communications



## MÔ PHỎNG ĐỘ SÂU HẦN LÚN VỆT BÁNH XE CỦA MẶT ĐƯỜNG BÊ TÔNG NHỰA CÓ XÉT TỚI TÍNH ĐÀN DẼO NHỚT CỦA MÔ HÌNH VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP GIA TẢI

Lê Nguyên Khương\*

Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, Số 54 Triều Khúc, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 9/12/2020

Ngày nhận bài sửa: 29/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 8/1/2021

Ngày xuất bản Online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.8>

\* Tác giả liên hệ

Email: khuongln@utt.edu.vn

**Tóm tắt.** Trong hai thập kỷ qua, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là công cụ hiệu quả giúp mô phỏng các ứng xử phi tuyến của kết cấu mặt đường nhựa mà lý thuyết đàn hồi nhiều lớp chưa giải quyết được. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, mô phỏng sự xuống cấp của mặt đường bê tông nhựa dựa trên phần mềm mã nguồn mở Cast3M có sử dụng mô hình vật liệu Generalized Drucker–Prager (GD-P) trong đó các đặc tính cơ học của vật liệu, nhiệt độ môi trường và phương pháp gia tải trên mô hình được xét tới. Kết quả thu được là độ sâu hần lún vệt bánh xe, các ứng suất và biến dạng dư dưới tác dụng của tải trọng trùng phục. Việc sử dụng hai phương án mô phỏng 2D biến dạng phẳng và 3D và các phương pháp gia tải khác nhau cho phép đánh giá ảnh hưởng của dạng mô hình tới kết quả tính cũng như tổng thời gian tính toán, từ đó đưa ra được một số khuyến cáo cho việc mô phỏng, kiểm tra và dự báo chiều sâu lún vệt bánh xe theo phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả nghiên cứu trình bày trong bài báo nằm trong mục tiêu phát triển công cụ đánh giá và dự báo các trạng thái hư hỏng của kết cấu mặt đường nhựa theo phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng mã nguồn mở Cast3M và các mô hình vật liệu phi tuyến có xét tới ứng xử đàn nhớt và đàn dẻo nhớt.

**Từ khóa:** Độ sâu hần lún vệt bánh xe, phần tử hữu hạn, mô hình vật liệu đàn nhớt và dẻo nhớt, mô hình Drucker–Prager, Cast3M.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện tượng lún vệt bánh xe (LVBX) là một dạng hư hỏng kết cấu áo đường bê tông nhựa (BTN) phổ biến ở Việt Nam và nhiều nước trên thế giới. Nguyên nhân chủ yếu là do tải trọng khai thác lớn hơn tải trọng thiết kế và do vật liệu bê tông nhựa bị biến dạng không hồi phục dưới tác dụng trùng phục của tải trọng xe cộ. Dưới thời tiết nắng nóng, nhiệt độ mặt đường có thể đạt tới 60°C, vượt qua ngưỡng nhiệt hóa mềm của phần lớn các loại nhựa đường dùng để chế tạo bê tông nhựa hiện nay, làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu áo đường, gây ra các dạng phá hoại bao gồm hiện tượng hằn lún vệt bánh xe. Để đánh giá sự xuống cấp của kết cấu áo đường, chúng ta có thể nghiên cứu thông qua khả năng kháng hằn lún của bê tông nhựa. Theo nhiều nghiên cứu đã chứng minh [1-3], tính chính xác của phương pháp đánh giá sẽ được đảm bảo và sát với thực tế khi những yếu tố ảnh hưởng tới biến dạng mặt đường được kể tới như mặt độ và tải trọng tác dụng; áp suất, độ căng của lốp xe; loại lốp xe và nhiệt độ môi trường.

Ngoài các phương pháp thực nghiệm trong phòng thí nghiệm hoặc ngoài hiện trường [4] [5, 6], hai phương pháp thông dụng khác được dùng trong dự báo độ sâu LVBX là phương pháp giải tích và phương pháp mô phỏng số. Phương pháp thứ nhất sử dụng lý thuyết đàn hồi để phân tích ứng suất phân bố trong kết cấu áo đường và sử dụng mô hình giải tích để dự tính độ sâu vệt hằn bánh xe. Các mô hình giải tích này được gọi là các hàm chuyển, giúp kết nối giữa kết quả phân tích ứng suất và biến dạng với những hư hỏng của mặt đường. Các phương pháp điển hình như phương pháp của Shell được phát triển năm 1978 và phương pháp của viện Asphalt Institute được phát triển năm 1982. Phương pháp của viện Asphalt Institute được ứng dụng rộng rãi trong các tiêu chuẩn thiết kế như AASHTO của Mỹ (AASHTO T324, 2004), IRC: 37-2012 của Ấn Độ (IRC 37, 2012). Các thông số của mô hình được xác định và hiệu chuẩn thông qua các số liệu đo đạc thực tế trên các đường thử tiêu chuẩn vốn phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện giao thông, điều kiện thời tiết tại đường thử của nước sở tại.

Dưới sự phát triển của khoa học kỹ thuật và sự hỗ trợ của máy tính, mô phỏng số theo phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) ngày được sử dụng rộng rãi trong tính toán, thiết kế kết cấu công trình trong đó có mặt đường nhựa. Độ phức tạp cũng như tính chính xác của mô hình ngày được cải thiện qua việc sử dụng các mô hình tải trọng phức tạp và các mô hình vật liệu có xét tới tính đàn nhót (viscoelastic) [7-10] hay kết hợp cả tính đàn hồi–nhót và dẻo–nhót (viscoplastic) trong quá trình khai thác [11-15]. Việc đánh giá và dự báo hư hỏng của kết cấu áo đường mềm bằng phương pháp PTHH cho kết quả ngày một chính xác hơn và tốt hơn phương pháp thí nghiệm khi xét tới tính kinh tế và công nghệ đo, tuy nhiên, việc thực hành phương pháp này chưa được thông dụng do tính phức tạp trong việc xây dựng và sử dụng mô hình. Hiện tại, các mô hình vật liệu phi tuyến được phát triển độc lập và sử dụng chính trong nghiên cứu, không có nhiều khuyến cáo trong việc xây dựng và sử dụng mô hình cho các công trình thực tế.

Mục tiêu của tác giả là phát triển công cụ mô phỏng số theo phương pháp phần tử hữu hạn trên mã nguồn mở Cast3M có khả năng dự báo độ lún vệt hằn bánh xe có xét tới các yếu tố như tải trọng, nhiệt độ môi trường và các thông số vật liệu mặt đường. Song song với việc phát triển và tích hợp các mô hình vật liệu phi tuyến, nghiên cứu còn tập trung đánh giá và đề xuất các giải pháp mô hình, giúp các kỹ sư thực hành lựa chọn được mô hình phù hợp cho

mỗi mục tiêu khác nhau. Trong bài báo này, tác giả sẽ trình bày kết quả mô phỏng có khảo sát các yếu tố như loại phần tử, phương pháp áp dụng tải trọng lên mô hình và nhiệt độ, từ đó đưa ra một số kiến nghị liên quan. Mô hình vật liệu đàn dẻo nhớt Drucker-Prager được phát triển và xây dựng trong mã nguồn mở Cast3M [16] sẽ được sử dụng trong nghiên cứu này. Tham số đầu vào của mô hình được xác định theo các công thức có trong một số nghiên cứu điển hình [3], [17].

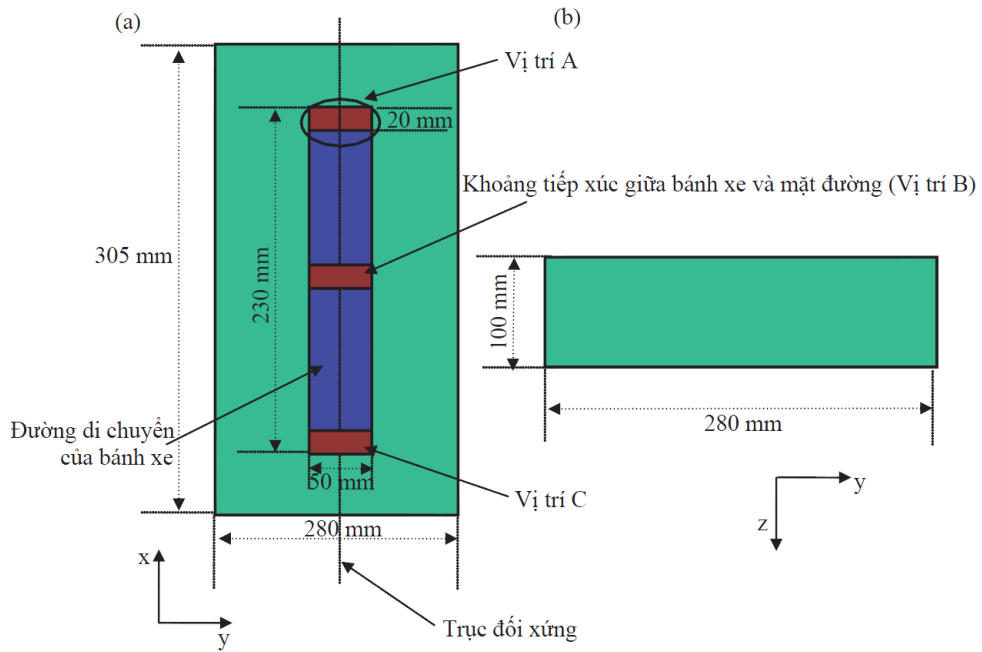
## 2. KÍCH THƯỚC MẪU THỬ VÀ MÔ HÌNH TẢI TRỌNG

Hình 1 thể hiện mẫu thử nghiệm lún vệt bánh xe theo tiêu chuẩn Pháp [18] bao gồm một tấm bê tông nhựa có kích thước tương ứng là  $305 \times 280 \times 100\text{mm}^3$  theo chiều dài, chiều rộng và chiều cao. Một tải trọng bánh xe được áp dụng ở giữa tấm theo chiều rộng và di chuyển qua lại dọc theo chiều dài của tấm. Bánh xe di chuyển với tốc độ 40 lần/phút trên đường đi của bánh xe có chiều dài 230 mm, tương đương với tốc độ 0,55 km/h. Khu vực tải bánh xe được giả định là một hình chữ nhật với kích thước lần lượt là  $20 \times 50\text{mm}^2$  theo chiều rộng và chiều dài. Tải được áp dụng như một bước tải trong mỗi chu kỳ tải. Theo tính chất đối xứng của điều kiện tải bánh xe và hình học của tấm, mô hình FE có thể được giảm xuống một nửa tấm bằng cách hạn chế hướng ngang trên cạnh dọc của mô hình.

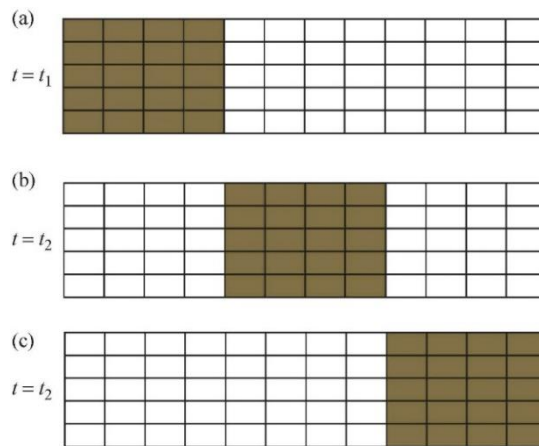
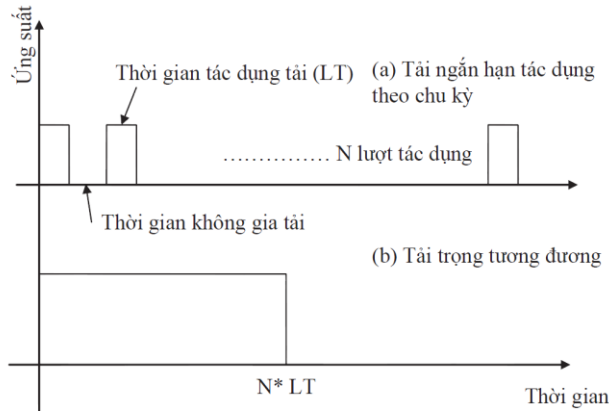
Phương án mô hình tải trọng được phân thành hai loại chính: (1) thời gian tác dụng: tải dạng tải xung, tải tương đương và tải di chuyển và (2) khu vực gia tải: áp dụng tải trên một vị trí tiếp xúc giữa bánh xe và mặt đường hoặc trên toàn bộ đường dẫn bánh xe. Kết hợp các loại tải trọng đó, nhóm nghiên cứu xây dựng 7 mô hình tải trọng trong đó có 2 phương án chất tải cho mô hình 2D và 5 phương án chất tải cho mô hình 3D. Mục tiêu của việc mô phỏng các kích bản gia tải này là xác định sự hiệu quả của mỗi mô hình về độ chính xác và tổng thời gian tính toán. Chi tiết về các mô hình tải trọng được mô tả trên Hình 3.

Mô hình tải trọng theo thời gian được mô tả trên Hình 2 (Hình bên trái): Phương án 1: tải trọng lặp theo dạng tải xung kích với thời gian gia tải là 0.109 giây và sau đó tải được loại bỏ trong 0.109 giây. Tổng số chu kỳ tải được mô phỏng trong điều này trường hợp là 10000 chu kỳ. Phương án 2 là chế độ tải tương đương. Theo phương án này, thời gian gia tải tương đương bằng cách tích lũy thời gian tải từ tất cả các chu kỳ tải. Tải trọng sẽ được áp dụng trong một chu kỳ tải duy nhất và dỡ hoặc nghỉ được bỏ qua. Ưu điểm của mô hình tải này là chỉ áp dụng một bước tải thay vì áp dụng số lượng lớn các bước tải, và do đó giảm đáng kể thời gian tính toán.

Cuối cùng là phương án gia tải số 7 thể hiện trên Hình 2 (Hình bên phải) là dạng tải di chuyển trong đó chuyển động của bánh xe được mô phỏng bằng cách áp dụng tải bánh xe trên các nhóm phần tử trên vùng tiếp xúc giữa bánh xe và mặt đường. Ở đầu đường dẫn (vị trí A - Hình 1), tải trọng phân bố trên khu vực tô đậm trong  $0.109 \text{ s} = t_2 - t_1$ , và sau đó di chuyển về phía trước tới vùng phần tử tiếp theo trong khoảng thời gian là  $0.109 \text{ s} = t_3 - t_2$ , sau đó di chuyển đến một bộ phần tử khác cho đến khi đạt được đến cuối đường dẫn bánh xe (vị trí C - Hình 1). Chế độ tải này là chế độ gia tải sát thực tế nhất so với các chế độ tải đã nói ở trên do có xét tới hiệu ứng động của tải di chuyển.



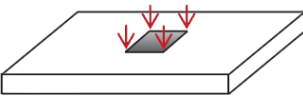
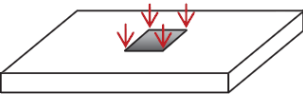


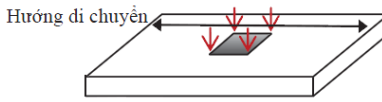


Hình 1. Kích thước mẫu thí nghiệm.



Hình 2. Hình bên trái: Phương án chất tải theo thời gian; Hình bên phải: Chất tải theo đường di chuyển của bánh xe.

Với cách gia tải theo 7 phương án trên Hình 3, chúng ta sẽ nghiên cứu và so sánh về tính chính xác cũng như tổng thời gian tính toán giữa các phương án. Cũng cần nhấn mạnh rằng, việc so sánh định tính các thay đổi trong kết quả bằng cách sử dụng các phương án gia tải đơn giản hóa này có tầm quan trọng trong việc quyết định khi nào nên sử dụng giải pháp nào, và điều này chắc chắn phụ thuộc vào vấn đề và mục tiêu của từng nghiên cứu.

Phương án	Phương án gia tải trên mô hình	Diện tích tiếp xúc	Miêu tả phương án gia tải trên mô hình
1 (2D)	Tải xung ngắn hạn (2D)	Một bánh xe	
2 (2D)	Tải tương đương (2D)	Một bánh xe	
3 (3D)	Tải xung ngắn hạn	Một bánh xe	
4 (3D)	Tải tương đương	Một bánh xe	
5 (3D)	Tải xung ngắn hạn	Dài bánh xe	
6 (3D)	Tải tương đương	Dài bánh xe	
7 (3D)	Tải trọng di động	Một bánh xe	

Hình 3. Các phương án gia tải cho mô hình.

### 3. MÔ HÌNH VẬT LIỆU

Một cách khái quát, biến dạng của mặt đường mềm khi chịu tải trọng lưu thông của xe cộ là tổng của biến dạng có thể phục hồi và biến dạng vĩnh viễn. Biến dạng vĩnh cửu (biến dạng dư) nhỏ hơn nhiều so với biến dạng có thể phục hồi và khi số lần lặp tải tăng lên, biến dạng dẻo do mỗi lần lặp tải giảm. Sự biến dạng của vật liệu là kết quả của ba cơ chế: cơ chế cố kết (sự thay đổi hình dạng và độ nén của các hạt); cơ chế biến dạng đặc trưng bởi sự uốn cong, trượt và lăn của các hạt; và sự nghiền nát và phá vỡ các hạt xảy ra khi tải trọng tác dụng vượt quá cường độ của các hạt. Các mô hình tính toán hần lún cần xét tới cường độ của tải trọng, số lần lặp lại tải trọng, thành phần kết cấu và các đặc tính cơ lý của mặt đường.

Phương pháp dự đoán về sự hư hỏng của mặt đường đã được phát triển theo kinh nghiệm bởi mối tương quan giữa lý thuyết đàn hồi đa lớp và các thử nghiệm thực địa như thử nghiệm trên đường AASHO (1962). Đối với các mô hình đã tồn tại, hầu hết các nghiên cứu sử dụng

mối tương quan giữa các biến dạng và sự lặp lại của tải trọng. Phương trình thể hiện mối tương quan giữa biến dạng thẳng đứng và số (N) lặp lại tải trọng trực đơn tương đương được sử dụng rộng rãi. Những kiểu mô hình này giả định rằng việc tạo rãnh có thể được giảm thiểu bằng cách giới hạn số lượng biến dạng nén thẳng đứng [19]. Trong nghiên cứu của Tseng và các cộng sự [20], các biến dạng thẳng đứng được tính toán ở giữa mỗi lớp sử dụng chương trình phần tử hữu hạn và biến dạng dư tổng thể được lấy bằng tổng của biến dạng dư của tất cả các lớp cấu thành. Đối với tải trọng trực đơn, biến dạng dư tổng  $\delta_a$ , được cho bởi công thức:

$$\delta_a = \sum_{i=1}^n \left\{ \left( \frac{\varepsilon_{oi}}{\varepsilon_{ri}} \right) e^{-\left(\frac{\rho_i}{N}\right)^{\beta_i}} \int_{h_{i-1}}^{h_i} \varepsilon_v(Z) dz \right\} \quad (1)$$

Trong đó  $\delta_a$  biến dạng dư cần tính,  $\varepsilon_v$  biến dạng đàn hồi thẳng đứng,  $h$  độ dày của lớp,  $\varepsilon_r$  là biến dạng đàn hồi được áp dụng trong thử nghiệm trong phòng thí nghiệm để thu được các tính chất vật liệu,  $\varepsilon_0$ ,  $\beta$  và  $\rho$  tùy thuộc vào hàm lượng nước, ứng suất phá hủy và ứng suất khối. Mô hình của Tseng và các cộng sự [20] đã được sửa đổi trong AASHTO (2002) để bao gồm một yếu tố hiệu chuẩn có xét tới mối quan hệ giữa số lần lặp tải với bộ ba tham số là mô đun đàn hồi, ứng suất phá hủy, hàm lượng nhựa đường và nhiệt độ phụ thuộc chính vào cấp phối và thành phần vật liệu.

Xét trên khía cạnh vật lý, các thí nghiệm cho thấy phản ứng biến dạng của vật liệu nhựa đường có thể bị phân thành biến dạng có thể phục hồi (đàn nhót - viscoelastic) và không thể phục hồi (dẻo nhót - viscoplastic), các biến dạng này phụ thuộc vào nhiệt độ, ứng suất và tốc độ biến dạng [21]. Để dự đoán biến dạng có thể phục hồi, Huang và cộng sự [8], Masad và cộng sự [9] đã phát triển mô hình đàn nhót phi tuyến (non linear viscoelastic) của Schapery [7] để mô tả ứng xử đàn nhót phi tuyến của hỗn hợp bê tông nhựa và chất kết dính. Một số nghiên cứu khác [9], [22], [23] cũng đã sử dụng mô hình đàn nhót phi tuyến của Schapery để phân tích dự đoán phản ứng nhót của vật liệu nhựa đường trong đó Masad và cộng sự [9] đã phát triển một quy trình có hệ thống để mô tả và phân tách các biến dạng có thể phục hồi (đàn nhót) và không thể phục hồi (dẻo nhót - viscoplastic) bằng cách phân tích các thử nghiệm thử nghiệm từ biến lặp đi lặp lại theo mô hình của Schapery.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng mô hình vật liệu Generalized Drucker–Prager (GD-P) được phát triển và tích hợp trong mã nguồn mở Cast3M. Mô hình GD-P được xây dựng dựa trên ứng suất kéo căng có xét tới tính dị hướng của vật liệu. Mô hình này đã được xây dựng và áp dụng bởi các nghiên cứu trước đây [21], [24] trong đó biến dạng của các lớp mặt đường nhựa được mô tả theo 4 giai đoạn:  $\delta = \delta^e + \delta^p + \delta^{ve} + \delta^{vp}$  trong đó  $\delta^e$  là biến dạng đàn hồi, ứng suất và tần suất gia tải,  $\delta^p$  là biến dạng dẻo,  $\delta^{ve}$  là biến dạng đàn nhót,  $\delta^{vp}$  là biến dạng dẻo nhót. Trong phạm vi của bài báo này, ảnh hưởng của các tham số đầu vào của mô hình vật liệu như mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén, ứng suất chảy dẻo, vv... chưa được khảo sát mà chỉ lấy các giá trị có tính vật lý và được khuyến cáo theo tiêu chuẩn hoặc các

ngiên cứu trước đó. Ví dụ, mô-đun đàn hồi của bê tông nhựa ở 30°C, 60°C lần lượt là 420MPa và 300 MPa (22TCN 211-06, 2006), hệ số Poisson  $\nu = 0.35$ . Các tham số khác như năng lượng tiềm năng (potential energy parameter)  $N, \beta, \dot{\Gamma}$ , các tham số xác định diện tích mặt chảy dẻo của vật liệu (yield surface parameter)  $\alpha, d, \sigma$ , các tham số phục hồi độ cứng (hardening function parameter)  $\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$  được quy đổi và tính toán dựa theo các công thức và quy trình đề xuất bởi Al-Khateeb và công sự [17], [24].

Tham số định nghĩa mô hình GD-P được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số mô hình Drucker–Prager được sử dụng trong nghiên cứu.

Tham số mô hình	Ứng với nhiệt độ 60°C	Ứng với nhiệt độ 30°C
$\alpha$	0.15	0.25
$d$	0.8	0.9
$\beta$	0.25	0.25
$\dot{\Gamma}$	$5 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$
$N$	2.0	2.0
$\kappa_0$	35 kPa	35 kPa
$\kappa_1$	400 kPa	600 kPa
$\kappa_2$	290	290

Sau khi lựa chọn được bộ tham số đầu vào cho mô hình đàn dẻo nhớt như trên, nghiên cứu tập trung xem xét tác động của các giả định tải đơn giản khác nhau như được liệt kê trong Hình 3 và ảnh hưởng của nhiệt độ tới độ lún vệt hằn bánh xe.

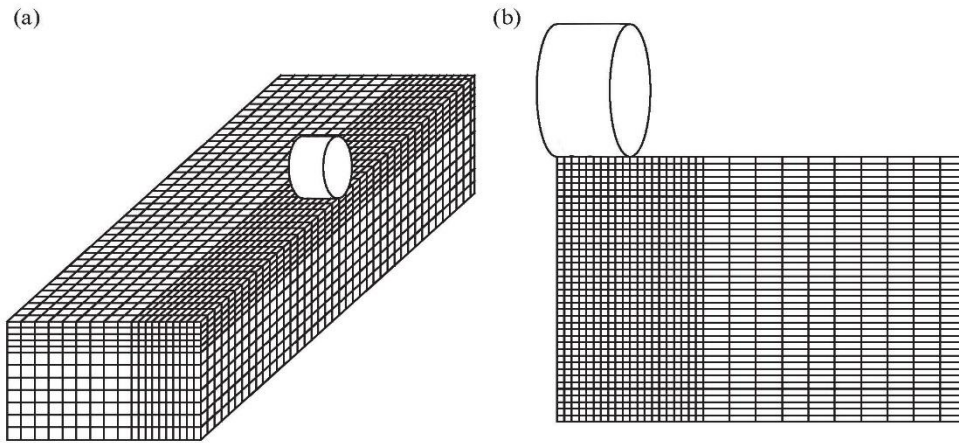
#### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mô hình phần tử hữu hạn 3D và 2D được thể hiện trong Hình 4. Các điều kiện biên trong cả hai mô hình FE 2D và 3D được áp đặt sao cho hướng ngang ở phía đối diện của ranh giới đối xứng được cố định, trong khi đáy của tấm được cố định theo hướng dọc và thẳng đứng. Các loại phần tử được sử dụng trong mô phỏng là phần tử QUA4 (4 nút) cho mô hình 2D và phần tử CUB8 (tám nút) cho mô hình 3D.

Sự hội tụ của mô hình đã được xem xét tới để có được kết quả hội tụ độc lập với mật độ lưới. Kết quả đạt được là với mô hình 2D, các phần tử có kích thước  $2.5 \times 2.5 \text{mm}^2$  được sử dụng bên dưới và gần với vị trí đặt tải, trong khi kích thước phần tử  $5 \times 5 \text{mm}^2$  được sử dụng cho khu vực cách xa đường tải. Đối với mô phỏng 3D, các phần tử  $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{mm}^3$  được sử dụng theo tải và gần với đường tải, trong khi kích thước phần tử tối đa là  $5 \times 5 \times 5 \text{mm}^3$  được sử dụng cho các khu vực cách xa đường tải. Mức tải là 770 kPa và được áp dụng trên đỉnh của lớp nhựa đường với các kịch bản tải khác nhau như được mô tả trong phần tiếp theo. Để đơn giản, hình dạng của tải được áp dụng được giả định là hình chữ nhật. Hơn nữa, tải trọng ma sát và tiếp tuyến từ tiếp xúc của bánh xe với bề mặt nhựa đường được bỏ qua trong nghiên

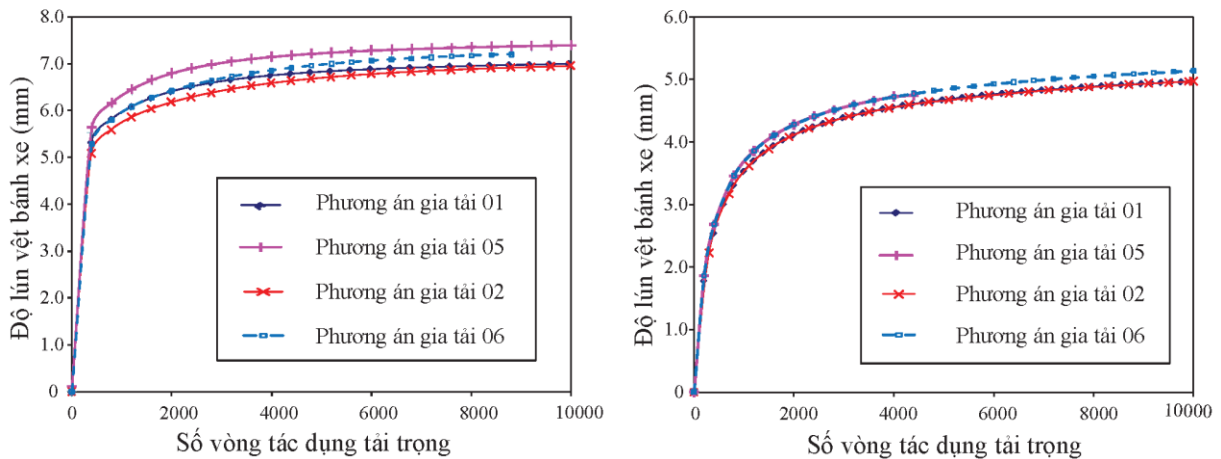


cứu này. Những hiệu ứng và hình dạng tải thực tế hơn sẽ được xem xét trong một nghiên cứu trong tương lai.



Hình 4. Mô hình phần tử hữu hạn của tấm mặt đường (a): Mô hình 3D; (b): Mô hình 2D.

Độ lún vết bánh xe được xác định theo số vòng tải tác dụng, ứng với các phương án gia tải khác nhau, ở nhiệt độ 60°C và 30°C được thể hiện trên Hình 5 và Hình 6. Cần nhắc lại là 7 phương án gia tải đã được miêu tả chi tiết trên Hình 3 được phân biệt bởi các yếu tố: gia tải trên mô hình 2D hoặc 3D; thời gian gia tải theo tải trọng xung lặp hoặc tải có thời gian tương đương với tổng thời gian gia tải lặp; diện tích tiếp xúc của tải trọng với nền đường.



Hình 5. Độ lún vết bánh xe tính toán theo các mô hình và phương án gia tải 01, 02, 05 và 06 với nhiệt độ môi trường tương ứng (Hình bên trái: 60°C; Hình bên phải: 30°C).

Hình 5 thể hiện độ lún vết bánh xe tính toán theo các phương án gia tải 01, 02 (mô hình 2D) và 05, 06 (mô hình 3D) với nhiệt độ môi trường tương ứng là 60°C và 30°C. Chúng ta nhận thấy là với cùng phương án gia tải và diện tích tiếp xúc thì kết cấu ở nhiệt độ cao hơn (60°C) cho biến dạng lớn hơn. Kết quả cũng chứng minh rằng phương pháp gia tải theo tải trọng xung lặp và tải tương đương cho kết quả giống nhau. Giá trị hần lún vết bánh xe sau 10000 vòng tải trọng được thể hiện trên Bảng 2 và Bảng 3. Từ kết quả này chúng ta có thể

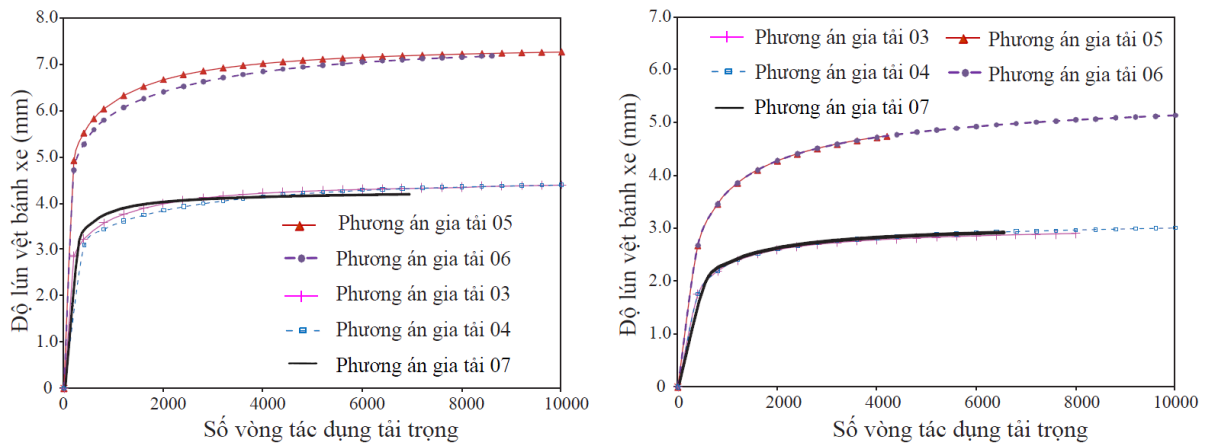
nhận thấy mô hình 3D cho kết quả thiên về an toàn hơn kết quả tính với mô hình 2D tuy nhiên thời gian tính toán với mô hình 2D là ít hơn đặc biệt với trường hợp tải trọng tương đương tính trên mô hình 2D.

Bảng 2. Độ lún vết hằn bánh xe sau 10000 vòng tác dụng tải trọng ở nhiệt độ môi trường 60°C.

Phương án gia tải	Dạng mô hình	Dạng tải trọng	Độ lún vết hằn bánh xe sau 10000 vòng tác dụng của tải trọng (mm)	Thời gian chạy mô hình tính (s)
01	2D	Xung lập	6.83	680
02	2D	Tương đương	6.81	98
05	3D	Xung lập	7.16	1807
06	3D	Tương đương	6.96	356

Bảng 3. Độ lún vết hằn bánh xe sau 10000 vòng tác dụng tải trọng ở nhiệt độ môi trường 30°C.

Phương án gia tải	Dạng mô hình	Dạng tải trọng	Độ lún vết hằn bánh xe sau 10000 vòng tác dụng của tải trọng (mm)	Thời gian chạy mô hình tính (s)
01	2D	Xung lập	4.89	580
02	2D	Tương đương	4.87	62
05	3D	Xung lập	5.12	1507
06	3D	Tương đương	5.06	269



Hình 6. Độ lún vết bánh xe tính toán theo các mô hình và phương án gia tải 03, 04, 05, 06 và 07 với nhiệt độ môi trường tương ứng (Hình bên trái: 60°C; Hình bên phải: 30°C).

Hình 6 thể hiện độ lún vệt bánh xe tính toán theo các phương án gia tải 03, 04, 05, 06 và 07. Đây là các phương án gia tải trên mô hình 3D với nhiệt độ môi trường tương ứng là 60°C và 30°C. Các đường đồ thị một lần nữa chứng minh rằng phương pháp gia tải theo tải trọng xung lạp và tải tương đương cho kết quả giống nhau. Sự sai khác về giá trị lún vệt bánh xe được thể hiện rõ trong trường hợp gia tải theo phương án 05 và 06 cho kết quả lớn hơn phương án gia tải 03, 04 và 07. Điều này được giải thích bởi phương án gia tải 03, 04 và 07 có diện tích đặt tải là 5x2 cm<sup>2</sup>, nhỏ hơn diện tích đặt tải của các phương án 01, 02, 05, 06 là toàn bộ chiều dài tám mặt đường với diện tích đặt tải là 5x23 cm<sup>2</sup>. Kết quả này thể hiện rõ được vai trò của dải tiếp xúc giữa tải trọng và bề mặt đường. Giá trị hần lún vệt bánh xe sau 10000 vòng tải trọng được tính toán và thể hiện trên Bảng 4 và Bảng 5.

Một điều đáng lưu ý tiếp theo là phương án gia tải 03, 04 và 07 cho kết quả sát nhau trong khi phương án gia tải 07 được coi là phương án gia tải sát với thực tế nhất. Chương trình tính cho phương án gia tải 07 là lớn nhất, vì vậy trong mô hình, với điều kiện ảnh hưởng của vận tốc là không lớn, chúng ta nên dùng các mô hình gia tải tương đương 03, 04 là đủ để dự báo được hần lún vệt bánh xe của kết cấu.

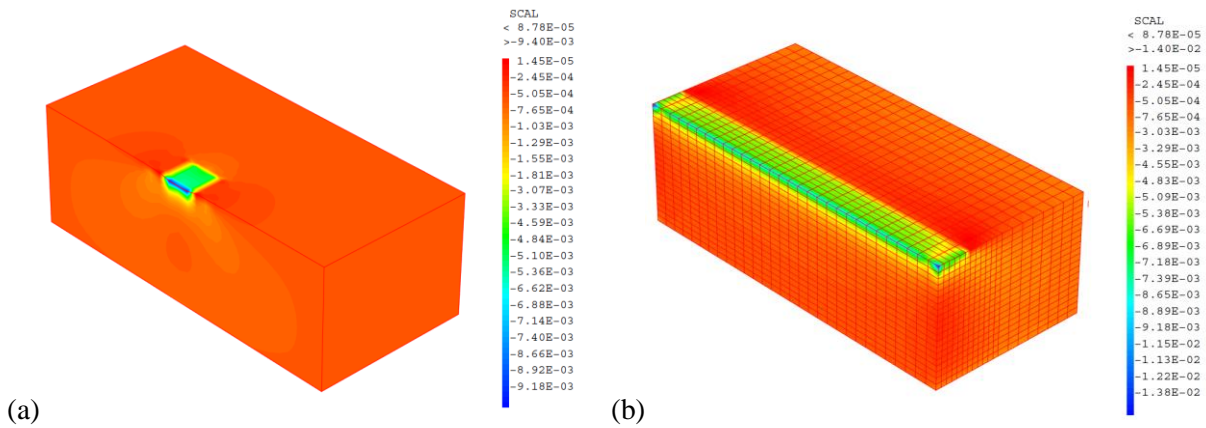
Bảng 4. Độ lún vệt hần bánh xe sau 10000 vòng tác dụng tải trọng ở nhiệt độ môi trường 60°C.

Phương án gia tải	Dạng mô hình	Dạng tải trọng	Độ lún vệt hần bánh xe sau 10000 vòng tác dụng của tải trọng (mm)	Thời gian chạy mô hình tính (s)
03	3D	Xung lạp	4.15	1460
04	3D	Tương đương	4.09	312
05	3D	Xung lạp	7.16	1807
06	3D	Tương đương	6.96	356

Bảng 5. Độ lún vệt hần bánh xe sau 10000 vòng tác dụng tải trọng ở nhiệt độ môi trường 30°C.

Phương án gia tải	Dạng mô hình	Dạng tải trọng	Độ lún vệt hần bánh xe sau 10000 vòng tác dụng của tải trọng (mm)	Thời gian chạy mô hình tính (s)
03	3D	Xung lạp	2.89	1240
04	3D	Tương đương	2.66	246
05	3D	Xung lạp	5.12	1507
06	3D	Tương đương	5.06	269

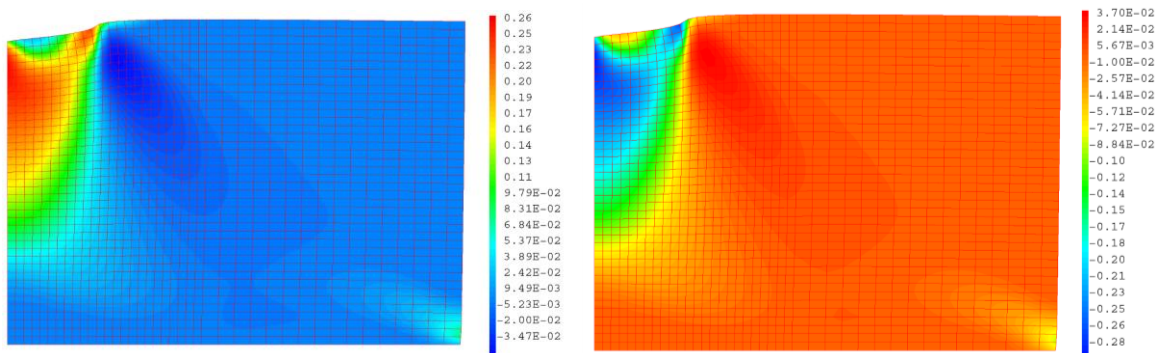
Hình 7 thể hiện kết quả chuyển vị thẳng đứng (hần lún vệt bánh xe) sau 10000 vòng tác dụng lực tính trên mô hình 3D theo phương án gia tải 04 và 06 cho trường hợp nhiệt độ môi trường là 60°C.



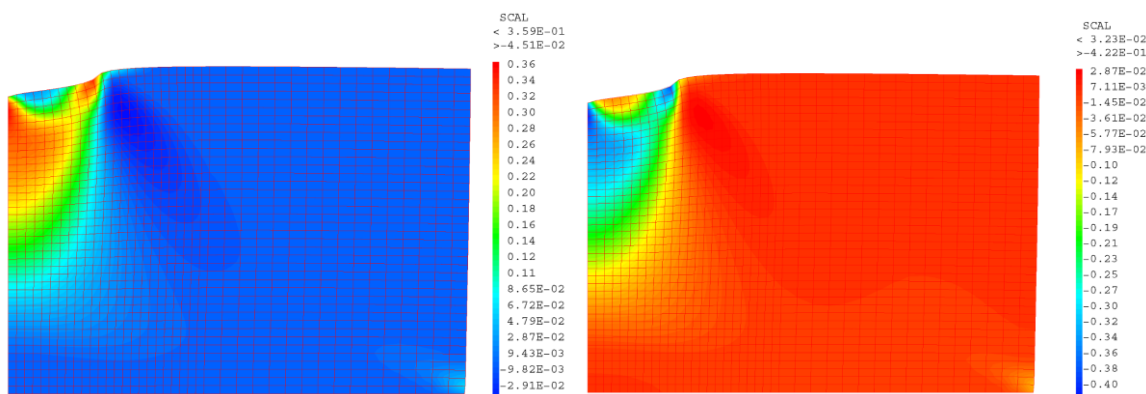
Hình 7. Độ lún vệt bánh xe sau 10000 vòng tác dụng lực tính theo: (a) mô hình 3D – phương án gia tải 04 và (b) mô hình 3D - phương án gia tải 06 – Trường hợp nhiệt độ môi trường là 60°.

Biến dạng đàn nhót theo hai phương sau khi gia tải 10000 lượt với mô hình 2D theo phương pháp gia tải 02 ứng với hai cấp nhiệt độ môi trường là 30°C và 60°C được thể hiện trên Hình 8 và Hình 9. Với cùng cấp tải trọng và phương án gia tải trên mô hình, biến dạng đàn nhót phụ thuộc vào nhiệt độ với giá trị biến dạng lớn hơn ứng với nhiệt độ môi trường cao hơn, điều này là hợp lý với thực tế.

Với các kết quả đạt được, chúng ta có thể kết luận là việc thay đổi thời gian gia tải (xung lặp hay tĩnh tương đương) có ảnh hưởng đáng kể đến thời gian tính toán nhưng không ảnh hưởng nhiều tới giá trị chuyển vị thẳng đứng của nền đường. Khuyến cáo sử dụng mô hình 2D cho phương án gia tải 02 để giảm thời gian tính toán, nếu kết quả biến dạng lớn nhất nằm trong giới hạn cho phép về chiều sâu LVBX thì chúng ta có thể kết luận kết cấu mặt đường đạt tiêu chuẩn chịu lực. Tuy nhiên, nếu kết quả thu được không thỏa mãn các điều kiện giới hạn biến dạng, chúng ta cần sử dụng các mô hình có phương án gia tải sát với thực tế hơn (ví dụ các mô hình 03, 04, 07) để có kết luận chính xác về khả năng chịu lực của lớp kết cấu bê tông nhựa.



Hình 8. Biến dạng đàn nhót theo hai phương sau khi gia tải 10000 lượt (Hình bên trái: Phương ngang) (Hình bên phải: Phương đứng) - Trường hợp nhiệt độ môi trường là 30°C.



Hình 9. Biến dạng đàn nhót theo hai phương sau khi gia tải 10000 lượt (Hình bên trái: Phương ngang) (Hình bên phải: Phương đứng) - Trường hợp nhiệt độ môi trường là 60°C.

## 5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu trình bày trong bài báo là bước đầu trong mục tiêu phát triển công cụ đánh giá và dự báo các trạng thái hư hỏng của kết cấu mặt đường nhựa theo phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng mã nguồn mở Cast3M và các mô hình vật liệu phi tuyến có xét tới tính đàn nhót và đàn dẻo nhót. Cần nhấn mạnh rằng, các mô hình số PTHH có khả năng mô tả được các hiện tượng như lún vệt bánh xe, biến dạng dư, từ biến, vv.. sẽ giúp tối ưu nhiều công đoạn trong công tác thiết kế, kiểm định và vận hành công trình. Kết quả mô phỏng có độ tin cậy cao sẽ là tiền đề tạo ra bộ số liệu lớn cho các thuật toán trí tuệ nhân tạo, hỗ trợ kiểm chứng các mô hình giản đơn đang được nhiều nhà khoa học quan tâm và phát triển trên thế giới.

Trong phạm vi trình bày của bài báo, các yếu tố đầu vào như nhiệt độ, loại phần tử, và phương pháp áp tải trọng trên mô hình số đã được khảo sát, giúp tác giả đưa ra một số kết luận và kiến nghị sau:

- Việc sử dụng phương án gia tải tĩnh với thời gian gia tải tương đương với tổng thời gian gia tải theo phương án xung lặp là chấp nhận được khi mục tiêu đặt ra là xác định độ sâu hằn lún vệt bánh xe. Đặc biệt, với phương pháp gia tải này, thời gian tính toán của mô hình sẽ được giảm thiểu đáng kể;
- Mô hình 2D sử dụng giả thuyết biến dạng phẳng (plane strain) nên không xét tới các ảnh hưởng của ứng suất, biến dạng theo phương vuông góc. Mô hình 2D vì thế nên được sử dụng trong các bài toán thiết kế cần kết quả định lượng nhanh;
- Mô hình 3D thể hiện được bản chất và nguyên lý làm việc của kết cấu gần với thực tế nhưng cần thời gian xây dựng mô hình và tính toán lâu hơn. Mô hình 3D nên được sử dụng cho các bài toán mô phỏng mà ảnh hưởng của các yếu tố không gian là quan trọng như sự thay đổi về độ cứng của nền đường theo mặt cắt dọc ví dụ đoạn chuyển tiếp đường-cầu hay bài toán xét tới ma sát giữa bánh xe - mặt đường, vv...;

Mô hình trong bài báo hiện chỉ sử dụng một bộ số liệu đầu vào cho vật liệu đàn-dẻo-nhớt. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc khảo sát ảnh hưởng của các tham số đầu vào cho mô hình là cần thiết để lựa chọn bộ tham số phù hợp với bộ số liệu khảo sát và thí nghiệm cho mỗi công trình cụ thể. Ngoài ra, các yếu tố như áp lực lốp xe, mật độ tải trọng và ma sát giữa bánh xe với mặt đường tác động thế nào tới kết quả mô hình cũng cần được đánh giá.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W. Bekheet, K. Helali, T. J. Kazmierowski, L. Ningyuan, Integration of Preventive Maintenance in the Pavement Preservation Program: Ontario Experience, Transportation Research Circular, E-C078, (2005) 87-98.
- [2]. B. Ali, Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées: application à l'analyse de l'orniérage, Semantic Scholar Editor, 2006.
- [3]. J. Madjadoumbaye et al., Development of a New Approach to the Characterisation and Evaluation of Earth Road Degradation Parameters, Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 10 (2008) 1-16.
- [4]. L. G. Wiman, Accelerated Load Testing of Pavements: HVS-Nordic Tests at VTI Sweden 2003-2004, VTI Rapport, 544A, Art. VTI rapport 544A, 2006.
- [5]. A. Shenoy and P. Romero, Superpave Shear Tester as a Simple Standardized Measure to Evaluate Aggregate-Asphalt Mixture Performance, JTE, 29, (2001) 472-484. <https://doi.org/10.1520/JTE12277J>
- [6]. P. Edwards, N. Thom, P. R. Fleming, J. Williams, Testing of Unbound Materials in the Nottingham Asphalt Tester Springbox, Transportation Research Record, 1913 (2005) 32-40. <https://doi.org/10.1177/0361198105191300104>
- [7]. R. A. Schapery, On the characterization of nonlinear viscoelastic materials, Polymer Engineering & Science, 9 (1969) 295-310. <https://doi/10.1002/pen.760090410>
- [8]. C.-W. Huang, E. Masad, A. H. Muliana, H. Bahia, Nonlinearly viscoelastic analysis of asphalt mixes subjected to shear loading, Mech Time-Depend Mater, 11 (2007) 91-110. <https://doi.org/10.1007/s11043-007-9034-5>
- [9]. E. Masad, C.-W. Huang, G. Airey, A. Muliana, Nonlinear viscoelastic analysis of unaged and aged asphalt binders, Construction and Building Materials, 22 (2008) 2170-2179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.012>
- [10]. C. Wu, H. Wang et al., Prediction of Viscoelastic Pavement Responses under Moving Load and Nonuniform Tire Contact Stresses Using 2.5-D Finite Element Method, Mathematical Problems in Engineering, (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/1029089>
- [11]. P. Perzyna, Fundamental Problems in Viscoplasticity, Advances in Applied Mechanics, 9 (1966) 243-377. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70009-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70009-7)
- [12]. D.-W. Park, Simulation of rutting profiles using a viscoplastic model, KSCE J Civ Eng, 11 (2007) 151-156. <https://doi.org/10.1007/BF02823895>
- [13]. C.-W. Huang, R. K. Abu Al-Rub, E. A. Masad, D. N. Little, Three-Dimensional Simulations of Asphalt Pavement Permanent Deformation Using a Nonlinear Viscoelastic and Viscoplastic Model, Journal of Materials in Civil Engineering, 23 (2011) 56-68. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000022](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000022)

- [14]. M. K. Darabi et al., A modified viscoplastic model to predict the permanent deformation of asphaltic materials under cyclic-compression loading at high temperatures, *International Journal of Plasticity*, 35 (2012) 100–134. <https://doi.org/10.1016/j.iplas.2012.03.001>
- [15]. M. K. Darabi et al., A thermo-viscoelastic–viscoplastic–viscodamage constitutive model for asphaltic materials, *International Journal of Solids and Structures*, 48 (2011) 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.09.019>
- [16]. E. Le Fichoux, “Présentation Et Utilisation De Cast3m.” Support of CEA. <http://www-cast3m.cea.fr>, 2011, [Online]. <http://www-cast3m.cea.fr/>, ngày truy cập 19 tháng 10 năm 2020
- [17]. L. A. Al-Khateeb et al., Rutting Prediction of Flexible Pavements Using Finite Element Modeling, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 5 (2011) 173-190.
- [18]. J.-F. Corte, Design of Pavement Structures: The French Technical Guide, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1539 (1997) 116-124. <https://doi.org/10.1177/0361198196153900116>
- [19]. Kim Daehyeon, Salgado Rodrigo, Altschaeffl Adolph G., Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, 131 (2005) 732–743. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:10\(732\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:10(732))
- [20]. K.-H. Tseng, R. L. Lytton, Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials, Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements, (1989) 15-36. <https://doi.org/10.1520/STP24562S>
- [21]. G. R. Chehab et al., Characterization of asphalt concrete in uniaxial tension using a Visco-Elastoplastic continuum damage model, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72 (2003) 215-355.
- [22]. M. H. Sadd, Q. Dai, V. Parameswaran, and A. Shukla, Simulation of Asphalt Materials Using Finite Element Micromechanical Model with Damage Mechanics, *Transportation Research Record*, (2003) 86-95. <https://doi.org/10.3141/1832-11>
- [23]. S. Saadeh, E. Masad, On the relationship of microstructure properties of asphalt mixtures to their constitutive behaviour, *IJMSI*, 4 (2010) 186-214. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2010.035206>
- [24]. R. K. A. Al-Rub, E. Masad, C.-W. Huang, Improving the sustainability of asphalt pavements through developing a predictive model with fundamental material properties, *Texas Transportation Institute*, 2009. <https://trid.trb.org/view/913206> truy cập ngày 10 tháng 10 năm 2020.