

Phương pháp tạo tải trọng tàu cao tốc trong mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng dao động nền theo miền thời gian

A method for defining high speed train loads in time - domain FEM models

Phạm Ngọc Thạch

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Email liên hệ: thach.pham@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Bài báo trình bày phương pháp tạo tải trọng tàu cao tốc trong mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng dao động nền theo miền thời gian. Phương pháp này giả định bánh tiếp xúc lý tưởng với ray và các bánh tác dụng tải lên ray dưới dạng một đoàn tải trọng di động. Các tải di động được truyền xuống mặt ba lát dưới dạng một chuỗi các tải trọng tập trung tương đương có thời gian xuất hiện nối tiếp nhau phụ thuộc vào vận tốc tàu. Để kiểm chứng phương pháp, tác giả trình bày kết quả so sánh dao động nền giữa mô phỏng số và lời giải giải tích cho trường hợp hệ ray đường sắt đặt trên nền đất đồng nhất chịu tác dụng của một tải trọng di động ở vận tốc cao.

Từ khóa: Dao động nền; tải trọng tàu; phần tử hữu hạn.

Abstract:

This paper presents a method for defining high speed train loads in finite element models to simulate train-induced ground vibrations in time-domain. The method assumes that wheel/rail contact is perfect and that the wheel loads act on the rails as moving forces. These moving forces are then transferred to the ballast surface as a series of equivalent concentrated forces that appear successively depending on the train speed. To verify the presented method, we compare numerical and analytical solution for a case of a track resting on an elastic half space subjected to an axle force moving at a high speed.

Keywords: Ground vibration; train load; finite element method (FEM).

1. Giới thiệu

Để đánh giá độ an toàn của một thiết kế nền móng đường sắt, người thiết kế cần dự báo được dao động nền sinh ra do tàu chạy ở các vận tốc cao. Có hai cách tiếp cận bài toán bằng mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH): Mô phỏng theo miền tần số và mô phỏng theo miền thời gian [1][2][3]. Cách tiếp cận theo miền tần số thuận lợi trong việc mô hình hóa tải trọng di động, tuy nhiên hạn chế trong việc xét đến các mô hình phức tạp về mặt hình học và vật liệu (ví dụ như móng trên nền đất yếu, móng trên nền đất được gia cố,...) [1][2]. Ngược lại, cách tiếp cận theo miền thời gian thuận lợi trong việc

tạo ra các mô hình phức tạp về mặt hình học và vật liệu, nhưng khó khăn trong việc tạo ra đoàn tải trọng di động có vị trí điểm đặt lực thay đổi liên tục theo thời gian [1][3]. Ngay cả khi có sự hỗ trợ của các phần mềm mô phỏng PTHH theo miền thời gian (ví dụ như Abaqus hoặc Ansys), đây vẫn là một nhiệm vụ không đơn giản vì các phần mềm này không được tích hợp sẵn các mô hình tải trọng đoàn tàu di động trên một mô hình PTHH ba chiều. Bài báo trình bày một phương pháp tạo tải trọng tàu cao tốc trong mô hình PTHH để mô phỏng dao động nền theo miền thời gian. Nội dung được trình bày gồm:

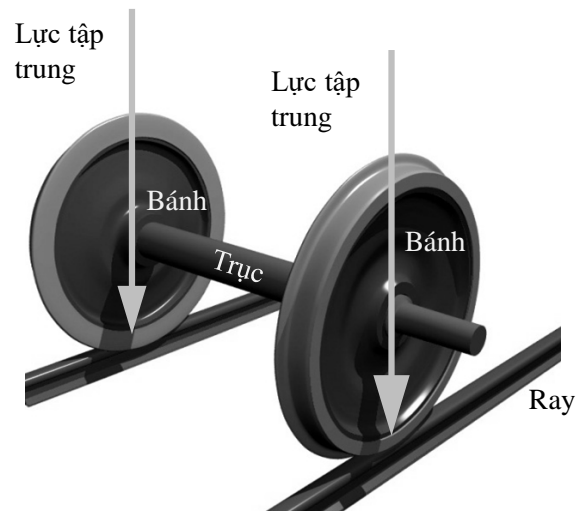
- (i) Các đặc điểm chính của tải trọng di động do tàu;
- (ii) Cách tạo tải trọng đoàn tàu trong một mô hình PTHH;
- (iii) So sánh kết quả mô phỏng số với kết quả giải tích để kiểm chứng phương pháp được trình bày.

2. Đặc điểm của tải trọng di động do tàu

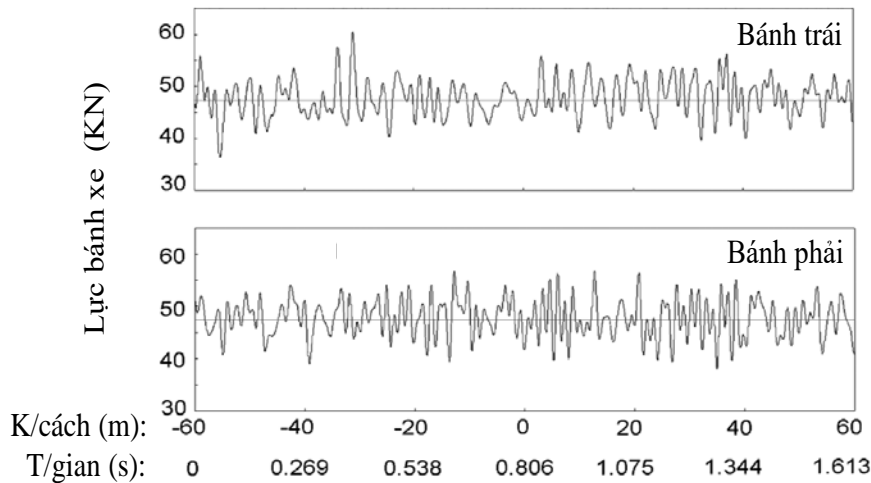
Tàu gây dao động nền thông qua lực tác dụng của bánh xe lên ray. Đây là lực tập trung di động như trên hình 1 và có dạng biến thiên như hình 2. Hình 2 được nhóm nghiên cứu [4] lập ra bằng cách lắp các thiết bị cảm ứng (strain gauge) vào bánh của một đoàn tàu Shinkanshen chạy ở vận tốc 268 km/h. Hình 2 cho thấy hai thành phần cơ bản của lực bánh xe tác dụng lên ray: (i) Thành phần trung bình $P_{t.binh}$ có giá trị khoảng 48 kN; giá trị này cân bằng với trọng lượng đoàn tàu phân phối lên các bánh xe; (ii) thành phần $P_{b.thien}$ biến thiên quanh giá trị trung bình với biên độ tương đối nhỏ khoảng ± 5 KN. Theo đó, dao động nền do một đoàn tàu có thể được hiểu là tổ hợp của của hai thành phần: Thành phần phụ thuộc vận tốc tàu do $P_{t.binh}$ gây ra và thành phần bởi khuyết tật ray và bánh, nghĩa là do $P_{b.thien}$ gây ra. Khi

bánh tiếp xúc lý tưởng với ray, dao động nền chỉ được gây ra bởi $P_{t.binh}$. Khi tồn tại khuyết tật giữa ray và bánh, cả $P_{t.binh}$ và $P_{b.thien}$ cùng gây dao động nền.

Mặc dù $P_{b.thien}$ luôn tồn tại, tuy nhiên nhiều nghiên cứu cho thấy: Đối với các tuyến đường sắt cao tốc, yêu cầu về chất lượng bề mặt tiếp xúc giữa ray và bánh rất cao, khi đó $P_{t.binh}$ gây dao động nền vượt trội so với $P_{b.thien}$ [3][5][6]. Chính vì vậy giả thiết đơn giản hóa “bánh tiếp xúc lý tưởng với ray” vẫn được sử dụng phổ biến trong nhiều nghiên cứu tập trung vào dao động nền do tàu cao tốc.



Hình 1. Minh họa lực truyền từ bánh xe lên ray.



Hình 2. Dạng biến thiên của lực bánh xe tác dụng lên ray [4].

3. Tạo tải trọng tàu trong mô hình PTHH

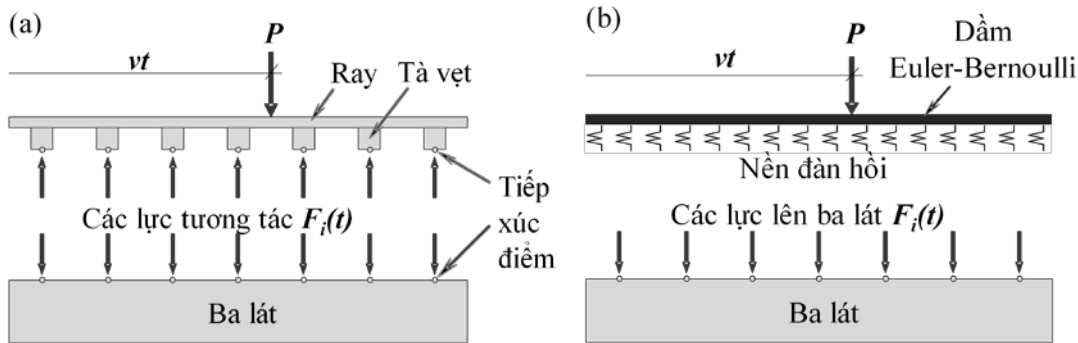
Phương pháp này giả định bánh tiếp xúc lý tưởng với ray và các bánh tác dụng tải lên ray dưới dạng một đoàn tải trọng di động. Các tải di động được truyền xuống mặt ba lát dưới dạng

một chuỗi các tải trọng tập trung tương đương dựa theo nghiên cứu lý thuyết của Krylov [6]. Cơ cấu truyền tải được hiểu như sau: Có thể hình dung hệ được tạo thành bởi hai kết cấu trên và dưới như hình 3a. Hai kết cấu này nối với

nhau bởi các nút tại mặt tiếp xúc tà vẹt / ba lát và chúng truyền lực tương tác $F_i(t)$. Đối với kết cấu bên trên thì các lực $F_i(t)$ giữ vai trò cân bằng tải di động P ; đối với kết cấu bên dưới thì các lực $F_i(t)$ giữ vai trò giống như các tải trọng tập trung tác dụng lên mặt ba lát. Tại mỗi thời điểm, vị trí của tải P được xác định và kết cấu bên trên được xấp xỉ bằng mô hình dầm Euler-Bernoulli trên nền đàn hồi chịu tải tập trung như hình 3b. Lời giải của bài toán cho ra chuyển vị

dầm và áp lực dầm phân bố lên nền đàn hồi. Áp lực dầm sau đó được tập trung về các vị trí tà vẹt trong phạm vi đường võng dầm.

Quá trình trên được thực hiện cho từng thời điểm tiếp theo khi tải trọng P di động với vận tốc V , như vậy thu được hàm lực $F_i(t)$ tại tất cả tiếp xúc điểm. Các lực $F_i(t)$ này được đưa vào trong mô hình PTHH như là các lực tập trung tại những nút phân tử có vị trí tương ứng với các vị trí tiếp xúc tà vẹt / ba lát.



Hình 3. Minh họa cơ cấu truyền tải trọng.

Sau đây là các bước tạo tải trọng di động trong một mô hình PTHH.

3.1. Trường hợp một tải trọng di động

Bước 1: Chọn gốc O , đây là xuất phát điểm của tải di động P . Vị trí của P tại một thời điểm sẽ là Vt . Ở đây V là vận tốc di động và t là thời gian.

Bước 2: Đối với mỗi tà vẹt, ta định nghĩa biến phụ thuộc thời gian $x = x_s - Vt$, với x_s là khoảng cách giữa gốc O và tà vẹt đang xét. Lúc này, chuyển vị của dầm $w(x)$ tại vị trí tà vẹt được xác định theo phương trình (1).

Bước 3: Thay phương trình (1) vào (2) sẽ thu được hàm lực $F(t)$ của tà vẹt đang xét.

$$w(x) = \frac{P\beta}{2\alpha} \exp(-\beta|x|) [\cos(\beta x) + \sin(\beta|x|)] \quad (1)$$

$$F(t) = P \frac{2d}{x_o} \left(\frac{w(x)}{w_{\max}} \right) \quad (2)$$

Trong đó:

P : Tải trọng di động;

$x = x_s - Vt$;

$$\beta = \sqrt[4]{\alpha/(4EI)};$$

w_{\max} : Giá trị lớn nhất của $w(x)$;

α : Hệ số đặc trưng cho độ cứng của nền đàn hồi. Theo [6], α phụ thuộc vào độ cứng của lớp ba lát, nền đất và tấm đệm giữa ray và tà vẹt;

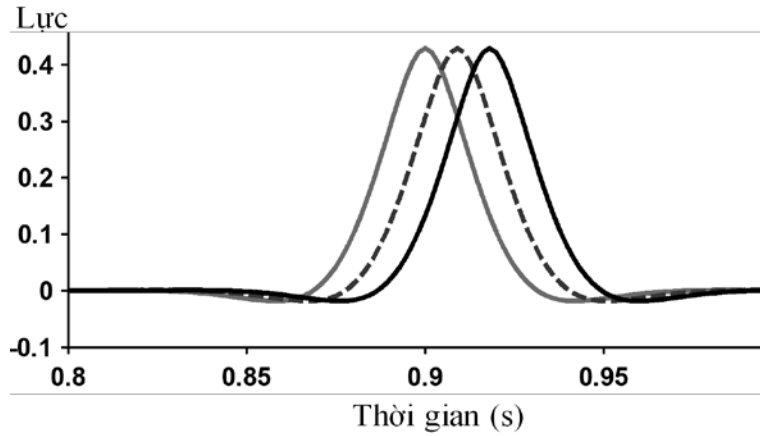
EI : Độ cứng uốn của dầm tương đương;

d : Khoảng cách giữa các tà vẹt;

$x_o = \pi/\beta$: Chiều dài đặc trưng của đường võng.

Bước 4: Lặp lại bước 2 và 3 cho các tà vẹt còn lại. Tập hợp tất cả các lực tà vẹt này cho ta mô hình mô tả cách mà tải trọng di động P tạo ra sóng lan truyền trong đất nền.

Hình 4 minh họa hàm lực $F(t)$ cho ba tà vẹt liên tiếp trong trường hợp một tải trọng đơn vị di động với vận tốc 60 m/s trên ray có $d = 0.54$ m, $\beta = 1.25 \text{ m}^{-1}$. Hình này cho thấy các lực có cùng một kiểu phân bố theo thời gian nhưng không xuất hiện đồng thời, mà xuất hiện nối tiếp nhau. Khoảng lệch thời gian Δt giữa hai hàm lực bằng với khoảng thời gian để tải trọng di chuyển qua hai tà vẹt liên tiếp.



Hình 4. Hàm lực $F(t)$ cho 3 tà vẹt liên tiếp.

3.2. Trường hợp một đoàn tàu

Một đoàn tàu gồm nhiều trục bánh xe. Mỗi trục bánh xe tương ứng với một tải trọng P_i trên hình 5 và cùng di động với vận tốc V . Hàm lực $F_{tàu}(t)$ cho mỗi tà vẹt là chồng chất của tất cả các hàm lực do các tải trọng di động P_i gây ra. Các bước thực hiện giống như trường hợp một tải trọng di động, riêng phương trình (2) được mở rộng như sau:

$$F_{tàu}(t) = \sum_{i=1}^n F(x + \Delta x_i, P_i) \quad (3)$$

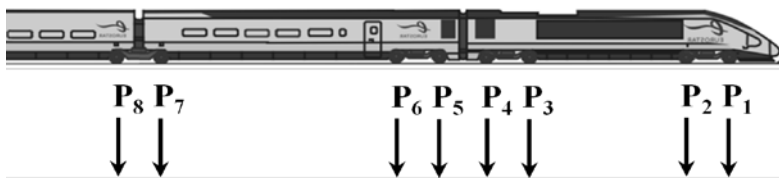
Trong đó:

n : Số trục bánh xe của đoàn tàu;

Δx_i : Khoảng cách giữa trục bánh thứ i^{th} và trục bánh đầu tiên. Khi $i = 1$ thì $\Delta x = 0$;

P_i : Trọng lượng tàu phân phối lên trục bánh thứ i^{th} ;

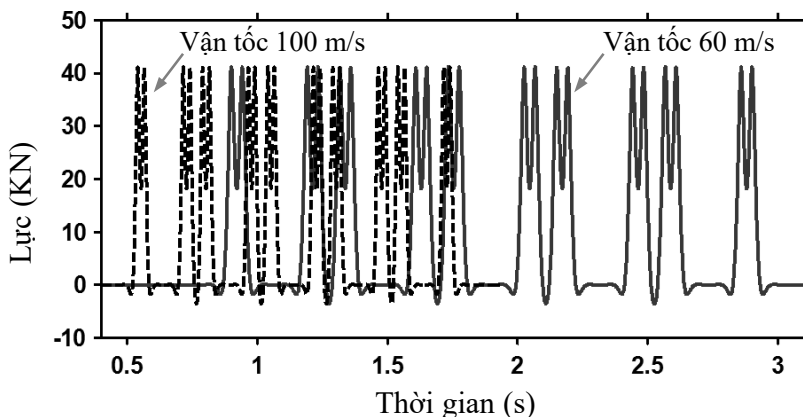
$F(x + \Delta x_i, P_i)$: Hàm lực của tà vẹt đang xét do trục bánh xe i^{th} gây ra, xác định theo (2).



Hình 5. Tải trọng di động của một đoàn tàu.

Hình 6 minh họa hàm lực $F_{tàu}(t)$ cho một tà vẹt do một đoàn tàu ba toa chạy qua với vận tốc 60 m/s và 100 m/s. Các đỉnh nhọn tương ứng với các thời điểm mà trục bánh xe chạy qua tà vẹt

đang xét. Tập hợp tất cả các lực tà vẹt hình thành mô hình mô tả cách tải trọng đoàn tàu tạo ra sóng lan truyền trong đất nền.

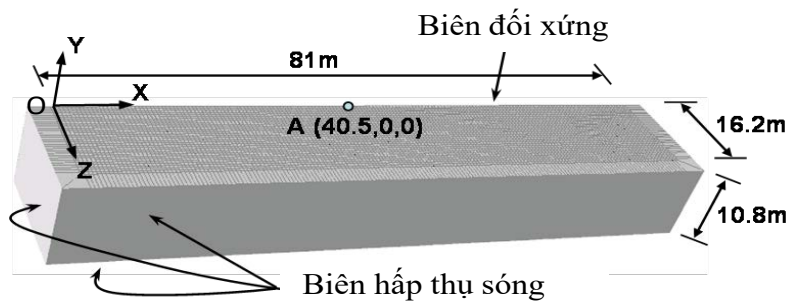


Hình 6. Hàm lực $F(t)$ cho một tà vẹt do tàu gây ra.

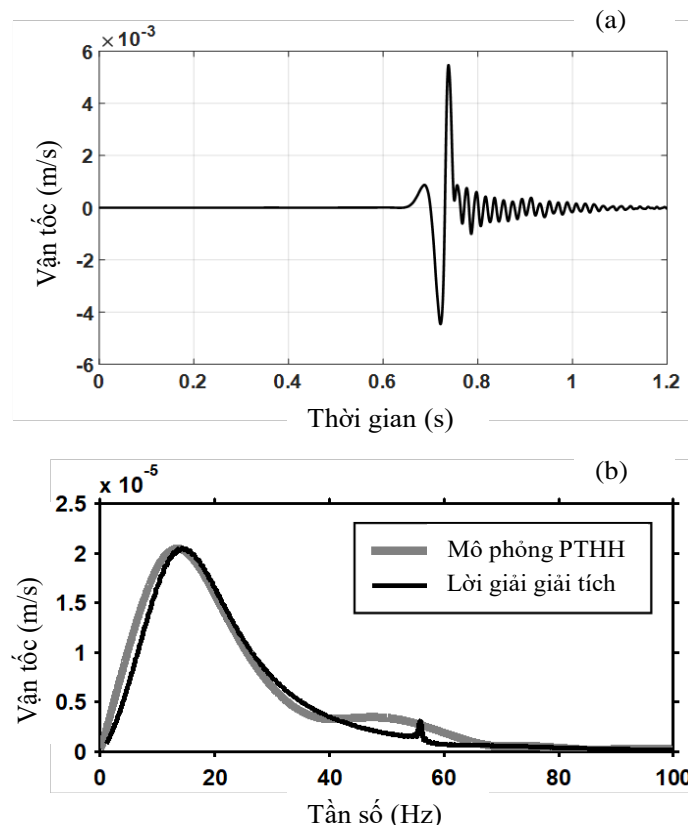
4. Kiểm chứng phương pháp

Để kiểm chứng phương pháp đã trình bày trong phần 3, tác giả so sánh dao động nền từ mô phỏng PTHH với dao động nền từ lời giải giải tích cho trường hợp hệ ray và tà vẹt đặt trên nền đàn hồi đồng nhất chịu tác dụng của một tải trọng di động ở vận tốc cao. Hệ ray và tà vẹt có $d = 0.54 \text{ m}$ và $\beta = 1.25 \text{ m}^{-1}$. Nền đàn hồi có khối lượng riêng $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, mô đun đàn hồi $E = 20 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ và hệ số Poisson $\nu = 0.3$. Tải trọng có dạng tải đơn vị di động trên ray với vận

tốc 60 m/s (216 km/h). Hình 7 trình bày mô hình PTHH của nền đất được tạo trong phần mềm Abaqus [7]. Mô hình có kích thước $81 \text{ m} \times 16.2 \text{ m} \times 10.8 \text{ m}$. Loại phần tử được dùng là phần tử khối 8 nút với kích thước cạnh trung bình là 0.25 m . Ở biên đối xứng, điều kiện ngăn chuyển vị theo phương Z được sử dụng. Ở các biên còn lại, điều kiện biên hấp thụ sóng [2] được sử dụng để chống phản xạ sóng. Tải trọng di động được đưa vào mô hình theo phương pháp đã trình bày trong phần 3.



Hình 7. Mô hình phần tử hữu hạn.



Hình 8. Vận tốc dao động tại điểm quan sát.

Hình 8a trình bày kết quả dao động tại điểm quan sát (điểm A trên hình 7) từ phân tích PTHH. Kết quả được chuyển về miền tần số bằng phương pháp biến đổi FFT (Fast Fourier

Transform) [8] và được trình bày trên hình 8b. Tại hình 8b, lời giải theo miền tần số bằng phương pháp giải tích của Krylov [6] cũng được trình bày. Lời giải giải tích cho thấy biên độ

trong phạm vi tần số 0÷40 Hz đóng góp chính vào dao động tại điểm quan sát. So sánh hai đường trên hình 8 chỉ ra rằng mô hình PTHH cho kết quả rất sát với lời giải giải tích trong toàn bộ phạm vi tần số quan trọng (0÷40 Hz), qua đó chứng tỏ được độ tin cậy của phương pháp được trình bày.

5. Kết luận

Tạo tải trọng di động trong mô hình PTHH là một nhiệm vụ không đơn giản, nhất là khi mô phỏng theo miền thời gian. Phương pháp được trình bày trong bài báo đã giúp đơn giản hóa quá trình tạo tải trọng tàu di động để phục vụ mô phỏng dao động nền theo miền thời gian. Kết quả kiểm chứng trong phần 4 cho thấy phương pháp đủ tin cậy. Bên cạnh đó, một trong những ưu điểm của cách tiếp cận bằng PTHH theo miền thời gian khá thuận lợi trong việc tạo ra các mô hình phức tạp về mặt hình học và vật liệu. Do đó, nếu kết hợp phương pháp trong bài báo với một phần mềm PTHH (ví dụ như Abaqus [7]), người thiết kế sẽ có được một công cụ mô phỏng, nó có thể giúp nghiên cứu các đặc trưng dao động nền do tàu cao tốc hoặc nghiên cứu hiệu quả giảm giao động của các giải pháp xử lý nền khi tàu đi qua khu vực nền đất yếu.

Tài liệu tham khảo

[1] V. V. Krylov; “Ground Vibrations from High Speed Railways: Prediction and Mitigation”. London, UK: ICE publishing, 2019.

- [2] Y. B. Yang, H. H. Hung; “Wave propagation for train-induced vibrations”. Danvers, MA, USA: World scientific, 2009.
- [3] L. Hall; "Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models". Soil dynamics and earthquake engineering, 2003; 23:403-413. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00209-9.
- [4] M. Katou, T. Matsuoka, O. Yoshioka, Y. Sanadac, T. Miyoshi; "Numerical simulation study of ground vibrations using forces from wheels of a running high-speed train". Journal of Sound and Vibration, 2008; 318(4-5):830 – 849. DOI: 10.1016/j.jsv.2008.04.053.
- [5] A. M. Kaynia, C. Madshus, P. Zackrisson; “Ground vibration from high-speed trains: Prediction and countermeasures”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000; 126(6):531–537. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:6(531).
- [6] V. V. Krylov; “Chapter 9: Generation of ground vibration boom by high-speed trains”; in Noise and vibration from high-speed trains. London, UK: Thomas Telford; 2001; pp. 251-284.
- [7] Dassault Systèmes Simulia Corp.; “Abaqus theory manuals”. Providence, RI, USA, 2016.
- [8] P. V. O’neil; “Chapter 15: The Fourier integral and Fourier transforms” in Advanced Engineering Mathematics. Toronto, Canada: Thomson; 2007; pp.637-700.

Ngày nhận bài: 25/03/2022

Ngày chuyển phản biện: 29/03/2022

Ngày hoàn thành sửa bài: 19/04/2022

Ngày chấp nhận đăng: 26/04/2022