



INFLUENCE OF TRAIN SPEED ON GROUND VIBRATIONS DUE TO HIGH-SPEED TRAIN

Pham Ngoc Thach

Hochiminh City University of Transport, No 2 Vo Oanh Street, Hochiminh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 22/12/2023

Revised: 01/05/2024

Accepted: 28/05/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.6>

* *Corresponding author*

Email: thach.pham@ut.edu.vn

Abstract. Vietnam is planning to build a North-South high-speed railway with a train speed of 350 km/h. When a train runs at a high speed, it generates ground vibrations. If the vibration amplitude is large, it can affect the operational safety of the train. Therefore, the influence of train speed on ground vibrations is an important issue that received a research attention. This paper presents a study on the influence of train speed on ground vibrations generated by a high-speed train. The considered train speed ranges from 72 km/h to 360 km/h. The method used is a three-dimensional finite element simulation in the time domain. The study result shows that when the train speed is less than 108 km/h, the ground displacement field behaves quasi-statically. Whereas, when the train speed is greater than 108 km/h, the ground displacement field behaves dynamically. The displacement amplitude generally increases with increasing train speed. Especially when the train speed approaches the critical speed of the system (252 km/h), the displacement amplitude reaches a maximum value.

Keywords: Ground vibration, high-speed railway, train load, train speed

@ 2024 University of Transport and Communications



ẢNH HƯỞNG CỦA VẬN TỐC TÀU ĐẾN DAO ĐỘNG NỀN ĐƯỜNG SẮT DO TẢI TRỌNG TÀU CAO TỐC

Phạm Ngọc Thạch

Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh, Số 2 Võ Oanh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 22/12/2023

Ngày nhận bài sửa: 01/05/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/05/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.6>

* Tác giả liên hệ

Email: thach.pham@ut.edu.vn

Tóm tắt. Việt Nam đang có kế hoạch xây dựng đường sắt cao tốc Bắc-Nam với tốc độ có thể lên tới 350 km/h. Khi tàu chạy với tốc độ càng cao, dao động nền do tàu sinh ra có biên độ càng lớn và có thể ảnh hưởng đến sự an toàn vận hành của tàu. Do vậy, các vấn đề liên quan đến dao động nền do tải trọng tàu cao tốc, cụ thể hơn là vấn đề ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động nền, trở thành chủ đề quan trọng cần nhận được sự quan tâm nghiên cứu. Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động của một nền nhiều lớp do tải trọng tàu cao tốc. Vận tốc tàu được khảo sát nằm trong khoảng 72 km/h đến 360 km/h. Phương pháp nghiên cứu được sử dụng là mô phỏng phần tử hữu hạn theo miền thời gian. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng khi vận tốc tàu nhỏ hơn hoặc bằng 108 km/h, trường chuyển vị mặt nền có dạng “giả tĩnh”, nghĩa là chuyển vị nền sinh ra bởi đoàn tàu đang chạy có dạng giống như chuyển vị nền tĩnh sinh ra bởi đoàn tàu đang đứng yên. Khi vận tốc tàu lớn hơn 108 km/h, biên độ dao động nền tăng theo vận tốc tàu và tàu sinh ra sóng lan truyền ra môi trường xung quanh. Đặc biệt, khi vận tốc tàu bằng với vận tốc tới hạn của hệ (252 km/h), biên độ dao động nền đạt giá trị cực đại.

Từ khóa: Dao động nền, đường sắt cao tốc, tải trọng tàu, vận tốc tàu

@2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống đường sắt ở Việt Nam đang phục vụ cho tàu vận hành với tốc độ trung bình dưới 100 km/h. Tốc độ này được coi là thấp nếu so với tốc độ của các con tàu cao tốc trên thế

giới hiện nay. Khi tàu chạy với tốc độ thấp, dao động nền do tàu sinh ra thường có biên độ không lớn, do vậy ít ảnh hưởng đến sự an toàn vận hành của đoàn tàu [1-4]. Vì lý do này, trong nước có ít nghiên cứu được thực hiện về dao động nền đường sắt do tải trọng tàu cao tốc. Phần lớn các nghiên cứu trong nước tập trung vào dao động của kết cấu tầng trên đường sắt và sử dụng mô hình “dầm trên nền đàn hồi” cho nền đất [5-8], nghĩa là giả định toàn bộ nền đất có ứng xử tương đương với một hệ lò xo đàn hồi có độ cứng chỉ phụ thuộc vào một hệ số nền. Có thể nhận thấy rằng giả thiết quá đơn giản này không còn phù hợp đối với các nghiên cứu về dao động nền, ví dụ như: ảnh hưởng của dao động nền đến sự an toàn vận hành của tàu cao tốc; hiệu quả của các giải pháp gia cố nền đối với việc giảm biên độ dao động nền; ảnh hưởng của sóng dao động nền đến các công trình xung quanh.

Việt Nam đang có kế hoạch xây dựng đường sắt cao tốc Bắc-Nam với tốc độ có thể lên tới 350 km/h. Nhiều nghiên cứu trên thế giới [1, 9-14] đã chỉ ra rằng khi tàu chạy với tốc độ càng cao, dao động nền do tàu sinh ra có biên độ càng lớn và có thể ảnh hưởng đến sự an toàn vận hành của tàu. Do vậy, các vấn đề liên quan đến dao động nền do tải trọng tàu cao tốc, cụ thể hơn là vấn đề ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động nền, trở thành chủ đề quan trọng cần nhận được sự quan tâm nghiên cứu trong nước. Gần đây, bằng cách tiếp cận mô phỏng số trên phần mềm phân tử hữu hạn, [15] đã khảo sát các đặc trưng cơ bản của dao động nền do tải trọng tàu cao tốc; Nghiên cứu tập trung vào hình dạng của trường sóng mặt và hiện tượng vận tốc tới hạn. Mặc dù [15] đã minh họa khái niệm và cách xác định vận tốc tới hạn, nhưng nghiên cứu này có hạn chế là chưa phân tích chi tiết những đặc điểm của phản ứng giả tĩnh, phản ứng động và cực đại của nền đất.

Bài báo này trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động của một nền nhiều lớp dưới tác dụng của tải trọng tàu cao tốc. Đầu tiên tác giả trình bày số liệu địa chất, tải trọng tàu cao tốc và phương pháp mô phỏng. Sau đó, tác giả trình bày kết quả mô phỏng dao động nền cho các trường hợp vận tốc tàu từ thấp đến cao, với vận tốc tối đa là 360 km/h. Các kết quả được thảo luận tập trung vào các vấn đề sau: Quan hệ giữa vận tốc tàu với phản ứng giả tĩnh, phản ứng động và cực đại của nền đất; Các đặc điểm của phản ứng giả tĩnh của nền khi tàu chạy ở vận tốc thấp, phản ứng động của nền khi tàu chạy ở vận tốc cao và phản ứng cực đại của nền khi tàu chạy ở vận tốc tới hạn.

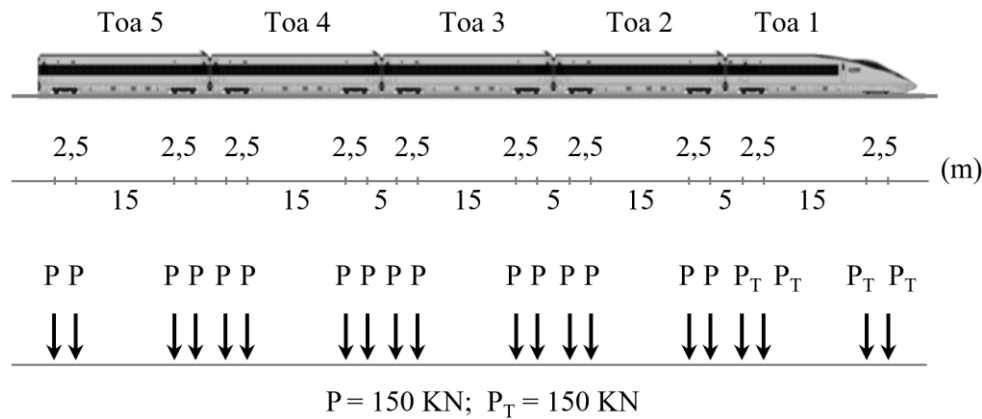
2. TẢI TRỌNG TÀU CAO TỐC VÀ SỐ LIỆU ĐỊA CHẤT

2.1. Tải trọng tàu cao tốc

Theo [16], tải trọng từ bánh tàu tác dụng lên ray gồm 2 thành phần chính: (1) Thành phần P_t do tĩnh tải của tàu phân phối lên mỗi bánh; (2) Thành phần P_d do tương tác động giữa bánh và ray; thành phần này được sinh ra chủ yếu bởi dao động uốn của trục bánh và khung toa tàu và bởi khuyết tật của bánh và ray [9]. Đối với các tuyến đường sắt cao tốc, do yêu cầu chất lượng của bề mặt tiếp xúc giữa ray và bánh rất cao nên ảnh hưởng của khuyết tật bánh và ray không lớn, do vậy thành phần P_d chiếm tỷ lệ nhỏ so với thành phần P_t . Từ kết quả đo thực nghiệm trên một đoàn tàu cao tốc Shinkansen, nghiên cứu [11] đã chỉ ra rằng thành phần P_d chiếm khoảng 10% tổng tải trọng. Qua đó có thể nhận thấy P_t là nguồn chính gây ra dao động nền. Để đơn giản hóa trong tính toán dao động nền, nhiều nghiên cứu đã giả định bỏ qua ảnh hưởng của thành phần P_d và xấp xỉ tải trọng tàu như là các tải trọng tập trung di động có vị trí tương ứng với vị trí các trục bánh tàu, nghĩa là chỉ xét thành phần P_t . Các nghiên cứu [4, 14, 17-20] đã áp dụng giả thiết này và kết quả cho thấy rằng dao động nền từ mô phỏng số phù hợp với dao động nền được đo đạc tại hiện trường. Như vậy, mặc dù giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của thành phần P_d là một điểm hạn chế khi mô tả tải trọng tàu, tuy nhiên giả thiết này

có cơ sở khoa học và có thể được áp dụng trong nghiên cứu dao động nền đường sắt do tải trọng tàu cao tốc.

Trong nghiên cứu này, tác giả áp dụng giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của thành phần P_d và mô tả tải trọng tàu như là các tải tập trung di động có vị trí tương ứng với vị trí các trục bánh của một đoàn tàu Shinkansen (Hình 1). Số toa tàu được giả định là 5 toa. Theo [21], tải trọng tàu ứng với 5 toa là đủ để đại diện cho một đoàn tàu dài có số toa nhiều hơn 5. Mỗi toa có 4 trục bánh. Khoảng cách giữa các trục bánh và giá trị tải trọng trên mỗi trục được trình bày trên hình 1.



Hình 1. Tải trọng tàu cao tốc.

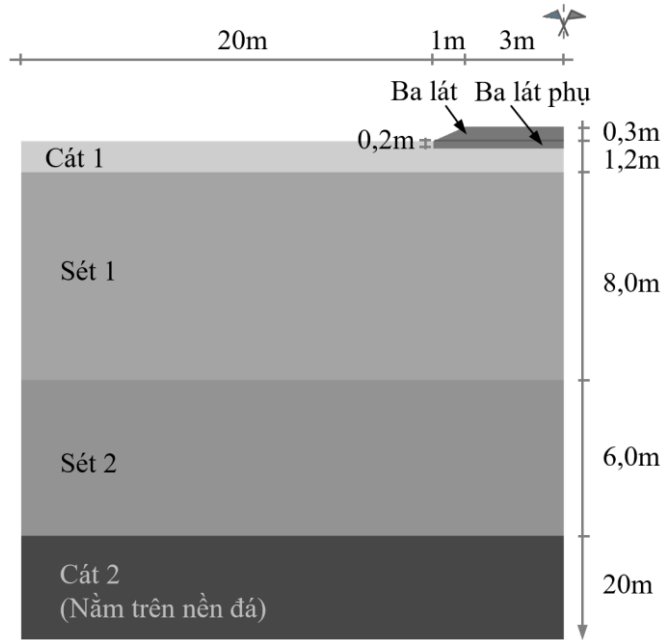
2.2. Số liệu địa chất

Hình 2 trình bày mặt cắt địa chất được giả định trong nghiên cứu. Nền có nhiều lớp, gồm các lớp ba lát, lớp cát pha, hai lớp sét và lớp cát. Các vật liệu được giả định có ứng xử đàn hồi và các tham số vật liệu được cho trong bảng 1. Trong đó, ρ là khối lượng riêng, V_S là vận tốc sóng cắt, và V_R là vận tốc sóng Rayleigh [22]. Ghi chú, trong bài toán tĩnh, các tham số đàn hồi thường được sử dụng là mô đun đàn hồi và hệ số Poisson; ngược lại, trong bài toán truyền sóng, các tham số đàn hồi thường được sử dụng là các vận tốc truyền sóng (sóng cắt, sóng nén và sóng Rayleigh) và khối lượng riêng của vật liệu [17, 20, 23].

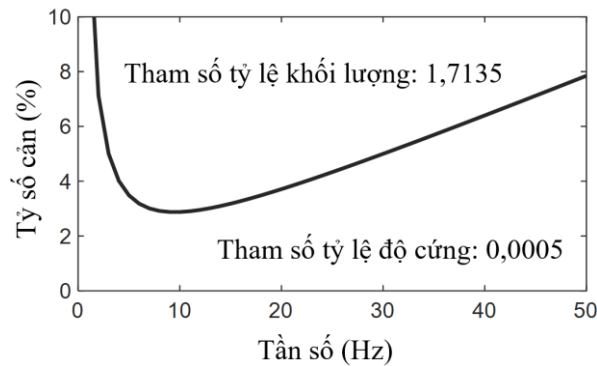
Các cơ cấu tiêu tán năng lượng trong hệ được đặc trưng bằng mô hình cản Rayleigh [24]. Mô hình này giả định ma trận cản nhớt tỷ lệ với ma trận độ cứng và ma trận khối lượng thông qua hai tham số α và β . Theo [15], hai tham số này được chọn để cho ra tỷ số cản trung bình khoảng 5%. Dựa vào đó, tác giả chọn $\alpha = 0,0005$ và $\beta = 1,7135$. Các giá trị này cho ra tỷ số cản từ 3% đến 6% trong phạm vi tần số từ 3 Hz đến 40 Hz như trên hình 3.

Bảng 1. Tham số vật liệu.

Vật liệu	V_S (m/s)	V_R (m/s)	ρ (kg/m ³)
Ba lát và ba lát phụ	210	194,8	2000
Cát 1	63	58,5	1900
Sét 1	60	55,7	1800
Sét 2	87	80,7	1800
Cát 2	98	90,9	1850



Hình 2. Mặt cắt địa chất.



Hình 3. Các tham số mô hình cản Rayleigh.

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

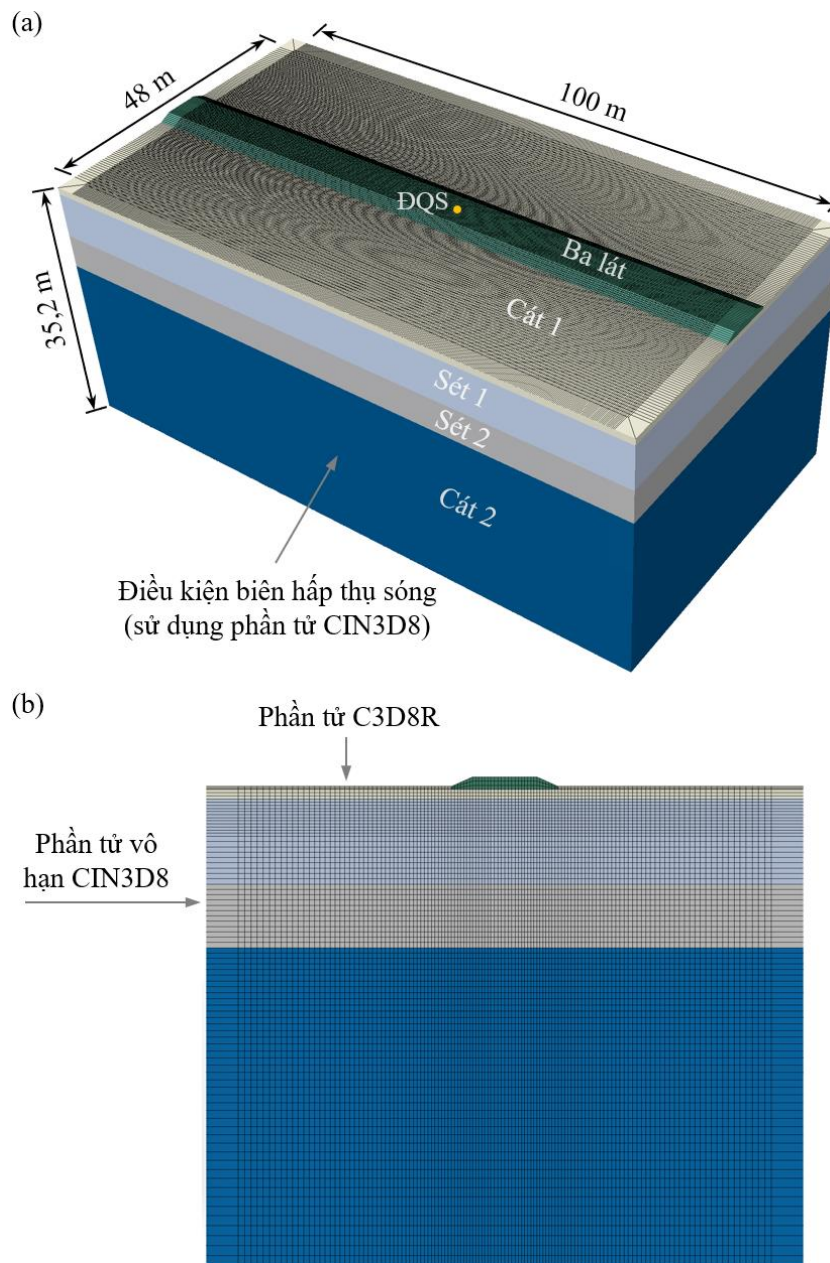
Trong nghiên cứu này, dao động nền do tải trọng tàu cao tốc được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Trình tự thực hiện được tóm tắt như sau: (1) xây dựng mô hình PTHH cho hệ ba lát và các lớp đất; (2) đưa đoàn tải trọng di động vào mô hình PTHH bằng phương pháp được trình bày trong [16]; (3) giải hệ phương trình chuyển động tìm dao động nền. Để trợ giúp quá trình mô phỏng, tác giả sử dụng phần mềm ABAQUS [25].

Loại phần tử được áp dụng cho ba lát và nền đất là phần tử khối liên tục ba chiều C3D8R [25]. Phần tử này có 8 nút, trường chuyển vị tuyến tính và dùng thuật toán tích phân thu gọn cho lực cản và nội lực tại nút phần tử [26]. Tại các biên xung quanh mô hình, tác giả áp dụng phần tử vô hạn CIN3D8 [25]. Phần tử vô hạn có khả năng hấp thụ các sóng tới, từ đó hạn chế được hiện tượng phản xạ sóng ảnh hưởng xấu đến kết quả mô phỏng [15, 23, 27]. Dưới đáy mô hình, điều kiện biên ngàm được áp dụng để mô tả nền đá cứng.

Kích thước mô hình là 100 m x 48 m x 35,2 m (hình 4). Mô hình có 4592700 phần tử hữu hạn và 93312 phần tử vô hạn. Có thể nhận thấy rằng mô hình có số lượng phần tử rất lớn do

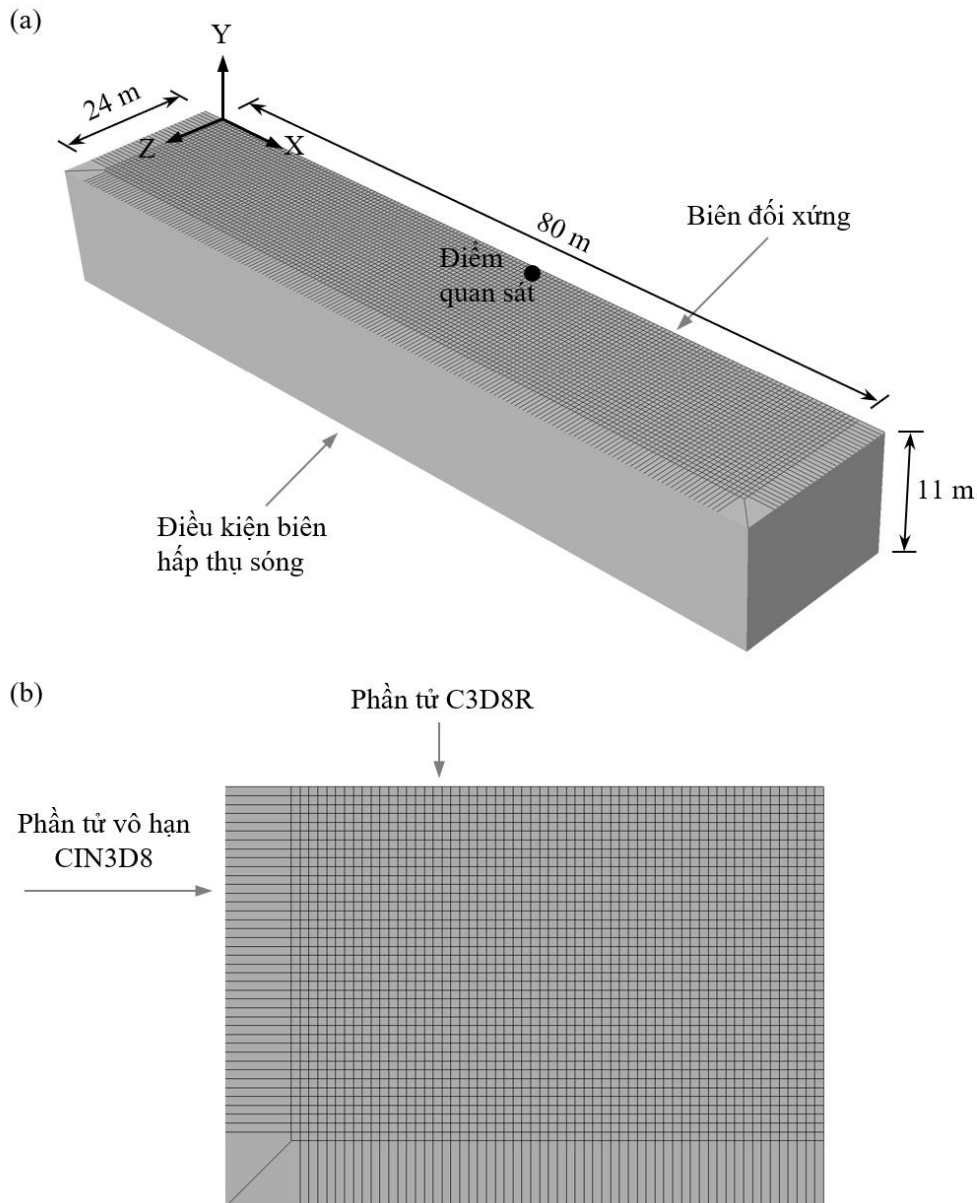
kích thước của phần tử được chọn khá nhỏ. Điều này là cần thiết vì theo [28], sóng dao động nền do tải trọng tàu sinh ra là cộng tác dụng của nhiều con sóng riêng (generalized modal waves) có bước sóng khác nhau. Kích thước của phần tử phải nhỏ để mô phỏng đủ tốt các sóng riêng có bước sóng ngắn, từ đó mới đảm bảo độ chính xác của sóng dao động nền do tải trọng tàu.

Hệ phương trình chuyển động được giải bằng phương pháp sai phân trung tâm nửa bước (half-step central difference method) [25]. Theo [26, 28, 29], phương pháp này phù hợp cho những bài toán dao động và truyền sóng có kích thước mô hình lớn. Số gia thời gian (time increment) được chọn là $7,5 \times 10^{-5}$ s. Giá trị này đủ nhỏ để thỏa điều kiện ổn định số của phương pháp sai phân và đảm bảo độ chính xác của kết quả tính toán dao động.

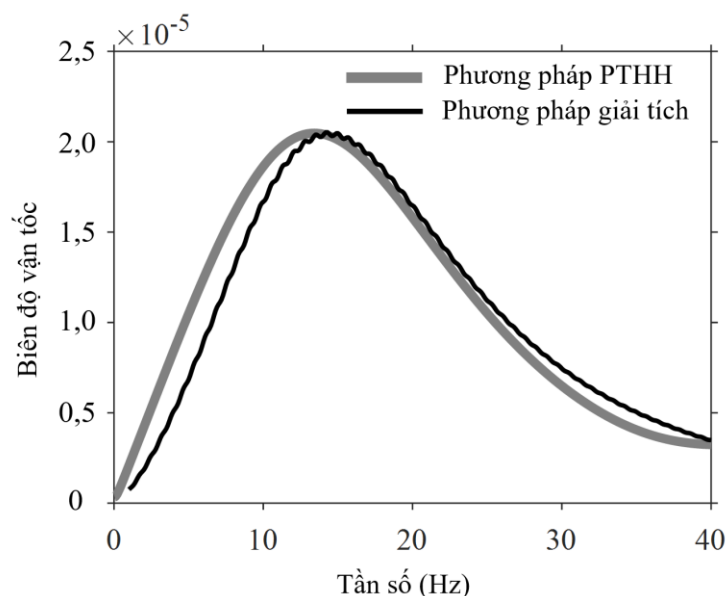


Hình 4. (a) Mô hình phần tử hữu hạn; (b) Mặt cắt ngang mô hình.

Để kiểm chứng phương pháp mô phỏng, tác giả xét bài toán tải trọng di động trên ray được đặt trên nền đàn hồi đồng nhất. Tải trọng có dạng tải đơn vị và di động với vận tốc 60 m/s. Nền có các đặc trưng vật liệu: khối lượng riêng 1800 kg/m^3 , vận tốc sóng cắt $V_S = 65 \text{ m/s}$ và vận tốc sóng Rayleigh $V_R = 60,3 \text{ m/s}$. Bài toán được giải bằng hai phương pháp: mô phỏng PTHH và giải tích. Mô hình PTHH của bài toán được trình bày trên hình 5. Phương pháp giải tích được đề xuất bởi Krylov [9]. Dựa trên lý thuyết hãm Green, Krylov đã phát triển lời giải giải tích của dao động nền cho trường hợp tải trọng tập trung di động ray được đặt trên bán không gian đàn hồi. Hình 6 trình bày kết quả dao động tại điểm quan sát (xem hình 5) từ hai phương pháp. So sánh hai biểu đồ trên hình 6 cho thấy rằng kết quả từ mô phỏng PTHH sát với kết quả từ phương pháp giải tích trong toàn bộ phạm vi tần số quan trọng, qua đó kiểm chứng được độ tin cậy của phương pháp mô phỏng được áp dụng trong nghiên cứu này.



Hình 5. Bài toán kiểm chứng: (a) Mô hình PTHH; (b) Mặt cắt ngang mô hình.

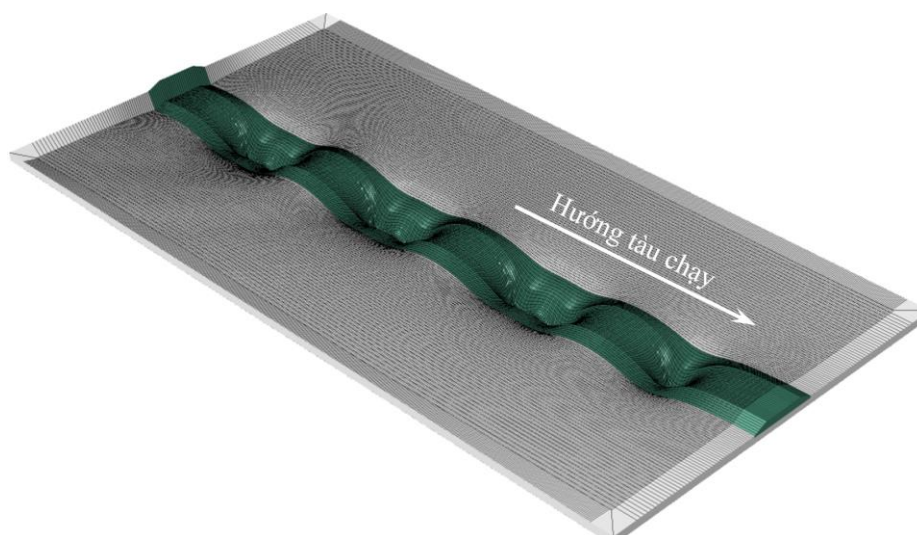


Hình 6. Phổ biên độ dao động mặt nền.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Phản ứng “giả tĩnh” của nền khi tàu chạy ở vận tốc thấp

Hình 7 trình bày kết quả mô phỏng trường chuyển vị mặt nền (được phóng đại 1000 lần) tại một thời điểm khi tàu chạy với vận tốc 72 km/h. Có thể nhận thấy rằng tàu gây ra chuyển vị nền tại các vị trí tải trọng trục bánh, tuy nhiên không có sự xuất hiện của sóng trên mặt nền.

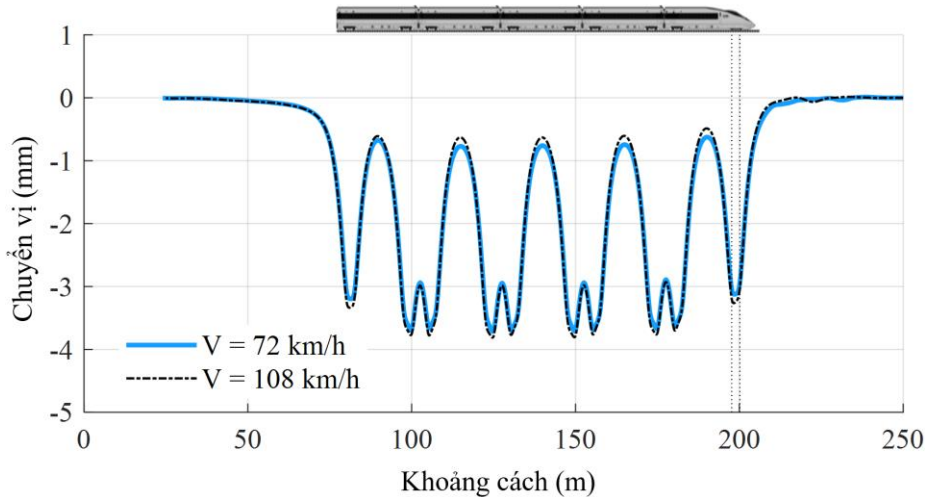


Hình 7. Trường chuyển vị mặt nền khi $V = 72$ km/h.

Để quan sát rõ hơn dạng chuyển vị nền phía dưới đoàn tàu, hình 8 trình bày chuyển vị mặt ba lát dọc theo chiều dài tàu (di chuyển cùng tàu). Ghi chú, mỗi biểu đồ chuyển vị trên hình 8 được xác định bằng cách sau: Đầu tiên, xác định lịch sử chuyển vị $\Delta(t)$ tại điểm quan sát được ký hiệu ĐQS trên hình 4a; Sau đó, chuyển đổi $\Delta(t)$ qua tọa độ không gian $\Delta(d)$ bằng quan hệ $d = -Vt$, với V là vận tốc tàu và d là khoảng cách dọc theo tuyến đường sắt. Có thể nhận thấy trên hình 8 rằng biểu đồ chuyển vị có tính đối xứng; dạng chuyển vị dưới mỗi toa

trung tự nhau; phía sau đuôi tàu, chuyển vị tắt dần mà không biến thiên tăng giảm. Những đặc điểm vừa nêu (từ hình 7 và 8) chứng tỏ rằng chuyển vị mặt nền có dạng “giả tĩnh”, nghĩa là chuyển vị nền được sinh ra bởi đoàn tàu đang chạy có dạng giống như chuyển vị nền tĩnh được sinh ra bởi đoàn tàu đang đứng yên.

Chuyển vị mặt ba lát trong trường hợp vận tốc tàu 108 km/h cũng được trình bày trên hình 8. So sánh 2 trường hợp vận tốc tàu 72 km/h và 108 km/h cho thấy rằng chuyển vị biến thiên giống nhau và có giá trị gần như bằng nhau. Như vậy, mặc dù vận tốc tàu đã tăng lên 108 km/h nhưng trường chuyển vị vẫn có dạng giả tĩnh giống như trong trường hợp vận tốc tàu 72 km/h.



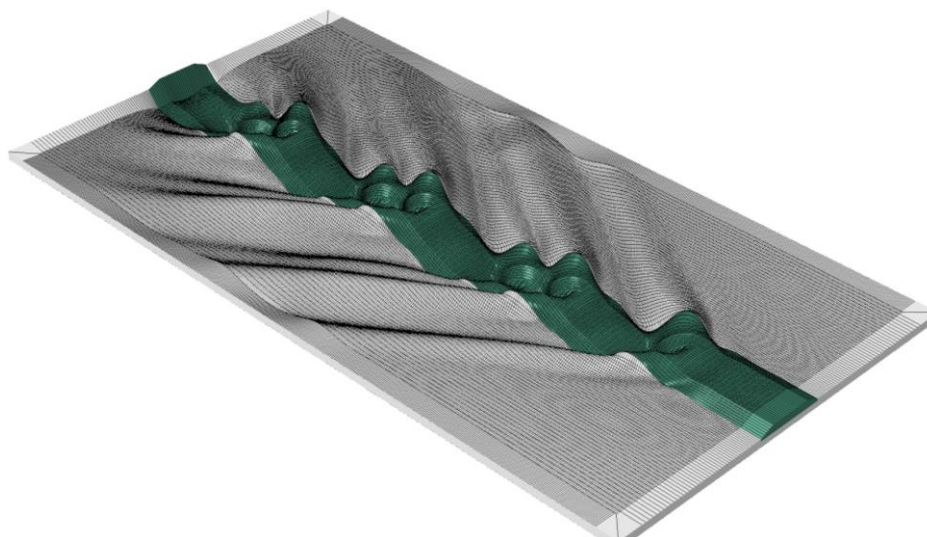
Hình 8. Chuyển vị mặt ba lát dọc theo chiều dài tàu khi $V = 72$ km/h và 108 km/h.

4.2. Phản ứng động của nền khi tàu chạy ở vận tốc cao

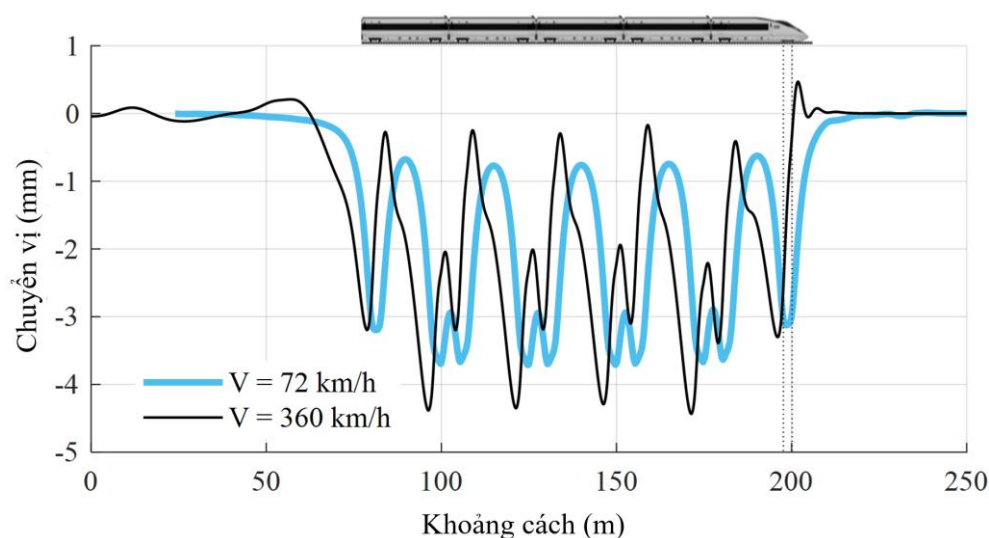
Hình 9 trình bày trường chuyển vị mặt nền (được phóng đại 1000 lần) tại một thời điểm khi tàu chạy với vận tốc 360 km/h. Có thể nhận thấy rằng mặt nền có ứng xử động và tàu sinh ra sóng lan truyền ra môi trường xung quanh. Đây chính là điểm khác biệt cơ bản khi so sánh với trường chuyển vị giả tĩnh được sinh ra khi tàu chạy ở vận tốc thấp (hình 7).

Hình 10 trình bày biểu đồ chuyển vị mặt ba lát dọc theo chiều dài tàu (di chuyển cùng tàu). So sánh hai trường hợp vận tốc tàu 360 km/h và 72 km/h cho thấy rằng chúng có dạng biến thiên chuyển vị rất khác nhau. Khi tàu chạy ở vận tốc cao, tải trọng tàu kích thích các hiệu ứng động, từ đó làm cho biên độ chuyển vị lớn hơn đáng kể so với biên độ chuyển vị khi tàu chạy ở vận tốc thấp. Biểu đồ chuyển vị có tính đối xứng khi vận tốc tàu thấp và không còn tính đối xứng khi vận tốc tàu cao. Khi tàu chạy ở vận tốc cao, phía sau đuôi tàu, chuyển vị biến thiên tăng giảm trước khi tắt hẳn, ngược lại điều này không xảy ra khi vận tốc tàu thấp.

Bên cạnh đó, quan sát biểu đồ chuyển vị khi vận tốc tàu 72 km/h trên hình 10, tại vị trí hai trục bánh trước của toa đầu tiên, các đỉnh chuyển vị có vị trí gần như trùng với vị trí các trục bánh của tàu, nghĩa là tàu di chuyển cùng pha với trường chuyển vị nền bên dưới tàu. Ngược lại, khi tàu chạy với vận tốc 360 km/h, tại vị trí hai trục bánh trước của toa đầu tiên, các đỉnh chuyển vị có vị trí chậm phía sau so với các trục bánh của tàu, nghĩa là tàu nhanh pha hơn so với trường chuyển vị nền bên dưới tàu. Hiện tượng này có thể được giải thích dựa theo nghiên cứu lý thuyết [30]: khi tải trọng di động có vận tốc lớn hơn vận tốc sóng Rayleigh riêng (specific Rayleigh wave) của nền đất thì tải trọng di chuyển nhanh pha hơn so với trường chuyển vị nền được tạo ra bên dưới tải trọng di động.



Hình 9. Trường chuyển vị mặt nền khi $V = 360$ km/h.

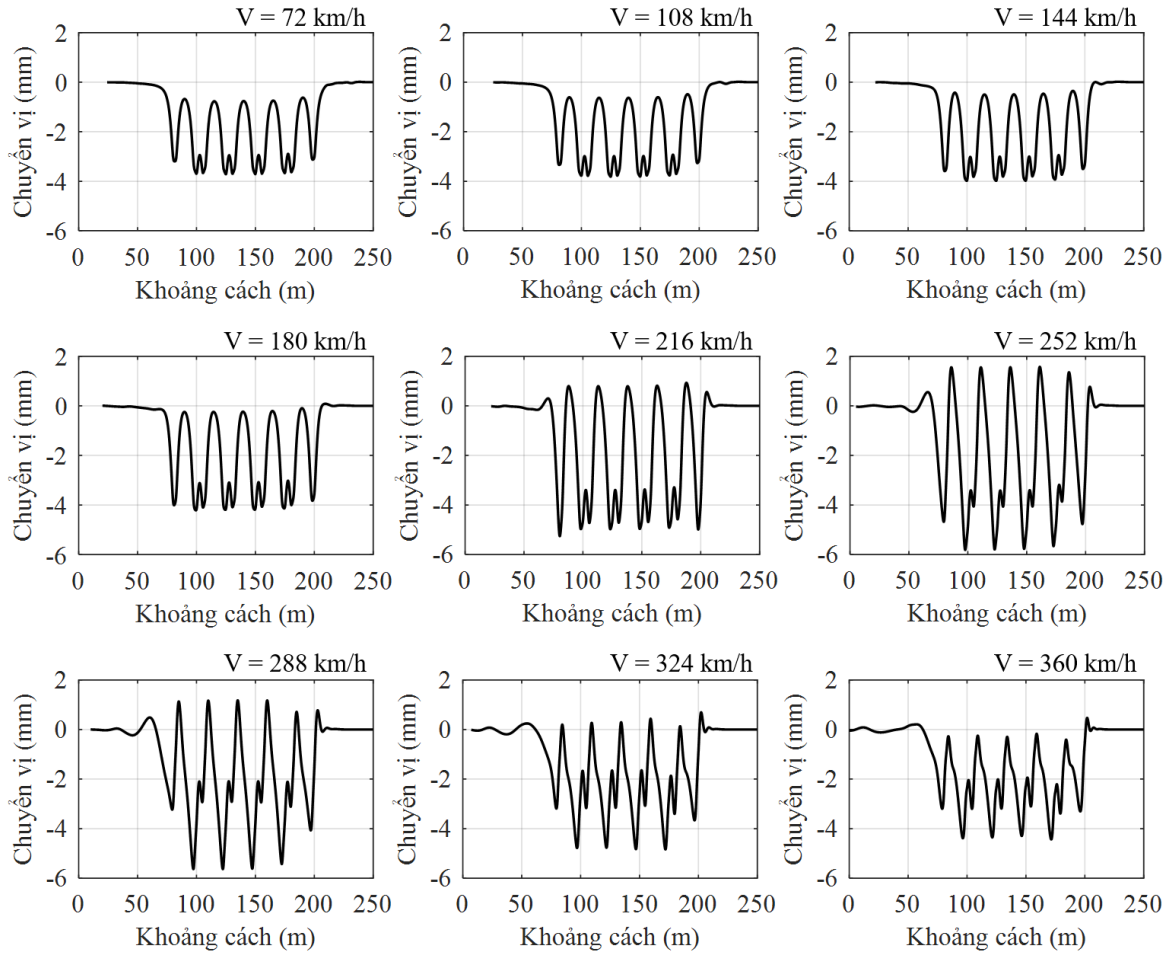


Hình 10. Chuyển vị mặt ba lát dọc theo chiều dài tàu khi $V = 72$ km/h và 360 km/h.

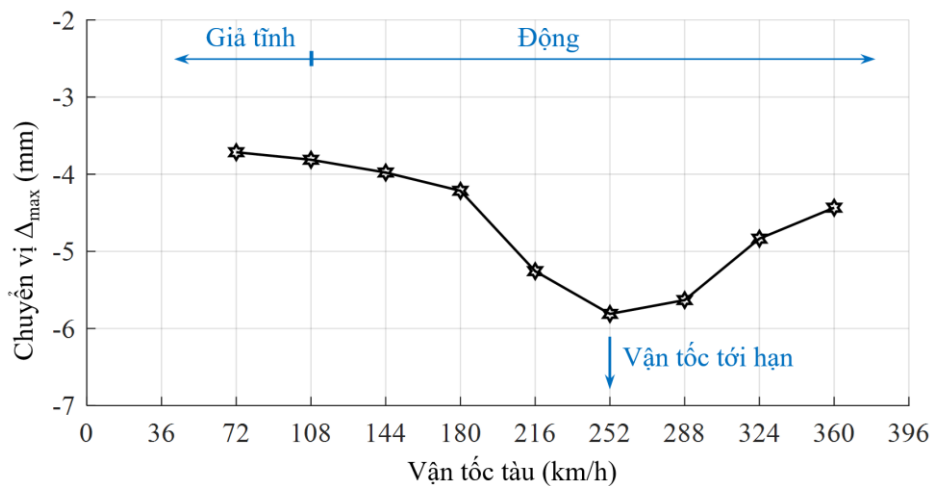
4.3. Dao động nền cực đại khi tàu chạy ở vận tốc tới hạn

Hình 11 trình bày kết quả chuyển vị mặt ba lát cho 9 trường hợp vận tốc tàu từ 72 km/h đến 360 km/h. Trong mỗi trường hợp, giá trị lớn nhất của chuyển vị (Δ_{\max}) được ghi lại. Sau đó các giá trị này được tổng hợp trên hình 12 dưới dạng quan hệ giữa Δ_{\max} và vận tốc tàu. Hình 12 thể hiện khá rõ vùng phản ứng giả tĩnh khi tàu chạy ở vận tốc 72 km/h và 108 km/h. Tiếp theo là vùng phản ứng động khi vận tốc tàu lớn hơn 108 km/h. Khi vận tốc tàu tăng, Δ_{\max} tăng. Tuy nhiên, Δ_{\max} không tăng đơn điệu mà đạt giá trị cực đại (5,8 mm) tại vận tốc 252 km/h và giảm dần khi vận tốc tàu lớn hơn 252 km/h. Vận tốc tàu mà làm cho Δ_{\max} đạt giá trị cực đại chính là vận tốc tới hạn (V_{TH}), nghĩa là hệ đang xét có $V_{TH} = 252$ km/h.

Để quan sát rõ hơn dao động nền được sinh ra khi tàu chạy ở vận tốc tới hạn, hình 13 trình bày trường chuyển vị mặt nền tại một thời điểm (được phóng đại 1000 lần). Có thể nhận thấy rằng tải trọng tàu sinh ra sóng lan truyền ra môi trường xung quanh. So sánh trường sóng trên hình 13 và hình 9 cho thấy rằng sóng được sinh ra bởi tàu có $V = V_{TH} = 252$ km/h có biên độ lớn hơn đáng kể so với biên độ sóng được sinh ra bởi tàu có $V = 360$ km/h.



Hình 11. Chuyển vị mặt ba lát dọc theo chiều dài tàu, các trường hợp $V = 72$ km/h đến 360 km/h.



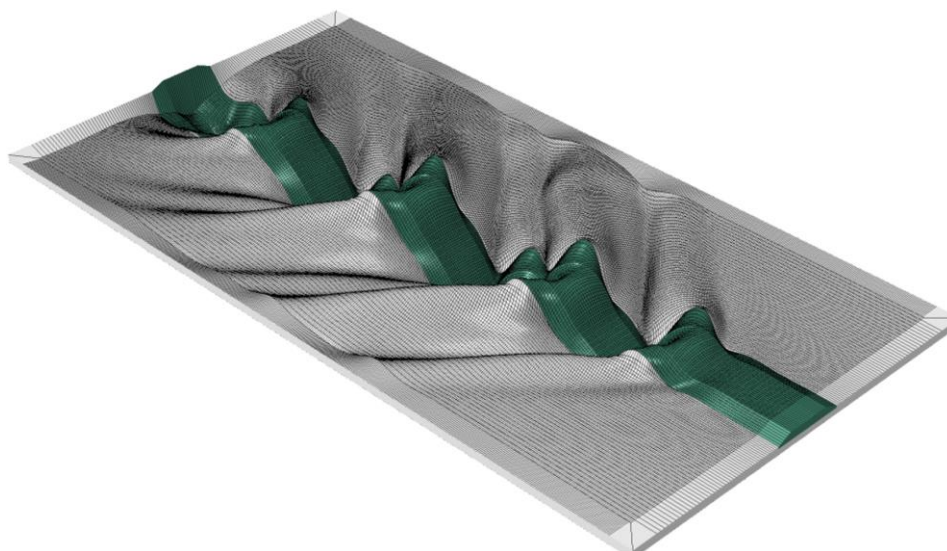
Hình 12. Quan hệ giữa chuyển vị Δ_{max} và vận tốc tàu.

Hiện tượng vận tốc tới hạn có thể được giải thích như sau: Theo lý thuyết truyền sóng trong nền đàn hồi do tải trọng di động, một hệ có tính chất phân tán vật liệu sẽ bị chi phối bởi một vài dạng sóng tổng quát và chúng có các vận tốc truyền sóng riêng. Khi tải trọng di động có vận tốc sát với vận tốc truyền sóng riêng của hệ thì dao động sẽ bị khuếch đại lên cực trị

[3]. Hệ đang khảo sát được tạo thành bởi nhiều lớp vật liệu khác nhau nên hệ có tính chất phân tán vật liệu và bị kiểm soát bởi một dạng sóng tổng quát có vận tốc truyền sóng riêng khoảng 252 km/h. Khi tàu chạy với vận tốc gần với vận tốc sóng riêng này thì biên độ dao động nền được khuếch đại lên cực trị như quan sát trên hình 12 và 13.

Trong nghiên cứu này, với điều kiện địa chất như trên hình 2, tác giả đã xác định được vận tốc tới hạn là 252 km/h. Trong một nghiên cứu khác, [31] đã phân tích dao động của một nền đắp (embankment) đặt trên nền nhiều lớp dưới tác dụng của tải trọng tàu X2000. Nền đất gồm có lớp sét yếu dày 3 m và bên dưới là lớp sét biển có độ cứng tăng dần theo độ sâu. [31] đã xác định được vận tốc tới hạn là 235 km/h. Ngoài ra, [32] đã phân tích dao động của một nền đắp đặt trên nền đất yếu dưới tác dụng của tải trọng tàu cao tốc. Nền đất yếu là sét bùn và có chiều dày 11,3 m. [32] đã xác định được 2 vận tốc tới hạn là 72 km/h và 216 km/h. Các trường hợp nghiên cứu trên cho thấy rằng vận tốc tới hạn phụ thuộc mạnh vào tính chất và chiều dày của các lớp đất. Các hiện trường có mặt cắt địa chất khác nhau sẽ cho ra vận tốc tới hạn khác nhau.

Dao động nền cực đại khi vận tốc tàu gần với vận tốc tới hạn làm nảy sinh vấn đề về an toàn vận hành của tàu, nghĩa là có nguy cơ tàu bị trật khỏi ray. Với một điều kiện địa chất cho trước, để có một thiết kế nền đường sắt an toàn thì vận tốc tới hạn và dao động nền cực đại cần được dự báo và đánh giá. Nếu biên độ dao động nền lớn quá mức và/hoặc vận tốc tới hạn của hệ thấp hơn so với vận tốc thiết kế của tàu thì người thiết kế cần đưa ra một giải pháp phù hợp, ví dụ như: gia cố nền đất, sử dụng cầu cạn, v.v. hoặc đưa ra cảnh báo về hạn chế tốc độ khi tàu chạy qua khu vực này.



Hình 13. Trường chuyển vị mặt nền khi $V = 252$ km/h (vận tốc tới hạn).

5. KẾT LUẬN

Khi vận tốc tàu thấp ($V \leq 108$ km/h), tải trọng tàu gây ra chuyển vị nền, tuy nhiên không có sự xuất hiện của sóng trên mặt nền. Trường chuyển vị mặt nền có dạng “giả tĩnh”, nghĩa là chuyển vị nền được sinh ra bởi tải trọng tàu đang di động có dạng giống như chuyển vị nền tĩnh được sinh ra bởi tải trọng tàu đang đứng yên. Ngược lại, khi vận tốc tàu cao ($V > 108$ km/h), tải trọng tàu kích thích các hiệu ứng động, từ đó làm cho biên độ chuyển vị tăng lên đáng kể, đồng thời sinh ra sóng dao động lan truyền ra môi trường xung quanh.

Khi vận tốc tàu thấp, tải trọng tàu di chuyển cùng pha với trường chuyển vị nền bên dưới tàu; Nghĩa là các đỉnh chuyển vị nền có vị trí trùng với vị trí các trục bánh của tàu. Khi tải trọng tàu có vận tốc lớn hơn vận tốc sóng Rayleigh riêng (specific Rayleigh wave) của nền, tải trọng tàu bắt đầu di chuyển nhanh pha so với trường chuyển vị nền bên dưới tàu; Nghĩa là các trục bánh của tàu có vị trí vượt lên phía trước so với vị trí của các đỉnh chuyển vị nền. Sự nhanh pha của tải trọng tàu so với trường chuyển vị nền càng tăng khi vận tốc tàu càng lớn.

Khi tàu chạy với vận tốc 252 km/h, biên độ chuyển vị nền đạt giá trị cực đại (5,8 mm). Vận tốc tàu mà làm cho biên độ dao động đạt giá trị cực đại chính là vận tốc tới hạn, nghĩa là hệ đang xét có vận tốc tới hạn là 252 km/h. Vận tốc tới hạn có ý nghĩa như sau: nếu tàu chạy qua khu vực địa chất đang xét với vận tốc 252 km/h, tải trọng tàu sẽ làm cho biên độ dao động nền đạt cực đại, từ đó có thể nảy sinh vấn đề về an toàn vận hành của đoàn tàu. Mặc khác, kết quả trong nghiên cứu này cùng với kết quả trong [31, 32] cho thấy rằng, vận tốc tới hạn phụ thuộc mạnh vào tính chất và chiều dày của các lớp đất. Các hiện trường có mặt cắt địa chất khác nhau sẽ cho ra vận tốc tới hạn khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. Krylov, Ground Vibrations from High-Speed Railways: Prediction and Mitigation, ICE Publishing, London, UK, 2019.
- [2]. C. Zhang, H. Kordestani, M. Shadabfar, A combined review of vibration control strategies for high speed trains and railway infrastructures: Challenges and solutions, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 42 (2023) 272-291. <https://doi.org/10.1177/14613484221128682>
- [3]. Y. Yang, H. Hung, Wave propagation for train-induced vibrations, World Scientific, Massachusetts, USA, 2009.
- [4]. A. Kaynia, C. Madshus, P. Zackrisson, Ground vibration from high-speed trains: Prediction and countermeasures, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126 (2000) 531-537. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:6\(531\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:6(531))
- [5]. N.X. Đại, Phân tích ứng xử động lực học kết cấu đường sắt không ballast qua mô hình 1 và 2 bậc tự do, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, 2 (2014) 10-18.
- [6]. L.V. Cừ, Động lực học đường sắt cao tốc và ứng dụng, NXB Xây dựng, Hà Nội, Việt Nam, 2016.
- [7]. P.D. Hòa, T.V. Hùng, P.B. Thắng, N.T.N Hằng, Nghiên cứu phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, 15 (2021) 1-12.
- [8]. N.H. Đình, V.T.P. Thảo, P.T. Thúy, Nghiên cứu dao động của đường ray xe lửa trên nền đàn hồi khi có tàu chạy, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Hàng Hải, 64 (2021) 41-44.
- [9]. V. Krylov, Generation of ground vibration boom by high-speed trains, in: V. Krylov (Ed), Noise and vibration from high-speed trains, Thomas Telford, London, UK, 251-284, 2001.
- [10]. C. He, H. Li, Q. Gong, S. Zhou, J. Ren, Modelling of critical speed of railway tracks on a multi-layered transversely isotropic saturated ground, Applied Mathematical Modelling, 121 (2023) 75-95. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.04.023>
- [11]. 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, 318 (2008) 830-849. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.04.053>
- [12]. P. Costa, R. Calcada, S. Cardoso, Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model, Soil dynamics and earthquake engineering, 32 (2012) 111-128. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.09.002>
- [13]. A. Kacimi, P. Woodward, O. Laghrouche, G. Medero, Time domain 3D finite element modeling of train-induced vibration at high speed, Computer and Structures, 118 (2013) 66-73.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.011>

[14]. H. Takemia, X. Bian, Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage, *Journal of Engineering Mechanics*, 131 (2005) 699-711. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:7\(699\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:7(699))

[15]. P.N. Thạch, Nghiên cứu các đặc trưng dao động nền do tàu cao tốc, *Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải*, 12 (2023) 1-7. [https://www.doi.org/10.55228/JTST.12\(4\).1-7](https://www.doi.org/10.55228/JTST.12(4).1-7)

[16]. P.N. Thạch, 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, *Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải*, 11 (2022) 1-6. [https://www.doi.org/10.55228/JTST.11\(2\).1-6](https://www.doi.org/10.55228/JTST.11(2).1-6)

[17]. L. Hall, Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 23 (2003) 403-413. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00209-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00209-9)

[18]. H. Takemia, Simulation of track-ground vibrations due to a high-speed train: the case of X-2000 at Ledsgard”, *Journal of sound and vibration*, 261 (2003) 503-526. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01007-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01007-6)

[19]. P. Costa, R. Calcada, A. Cardoso, A. Bodare, Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 221-235. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.11.002>

[20]. J. Shih, D. Thompson, A. Zervos, The influence of soil nonlinear properties on the track/ground vibration induced by trains running on soft ground, *Transportation Geotechnics*, 11 (2017) 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.03.001>

[21]. P. Thach, Influence of the number of train carriages on train-induced ground vibrations, *International Journal of GEOMATE*, 26 (2024) 60-67. <https://doi.org/10.21660/2024.114.4272>

[22]. B. Das, Z. Luo, *Principles of soil dynamics*, Cengage Learning, MA, USA, 2016.

[23]. P. Thach, H. Liu, G. Kong, Vibration Analysis of Pile-Supported Embankments under High-Speed Train Passage, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55 (2013) 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.006>

[24]. A. Chopra, *Dynamics of structures*, Prentice-Hall, London, UK, 2020.

[25]. Dassault Systèmes, *ABAQUS 6.14 theory manuals*, Providence, RI, USA, 2014.

[26]. T. Belytschko, W. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, *Nonlinear finite elements for continua and structures*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2014.

[27]. P. Bettess, *Infinite elements*, Penshaw Press, Sunderland, UK, 1992.

[28]. P. Thach, Chapter 11 Finite-element approach to train-induced vibrations of pile-supported embankments, in: V. Krylov (Ed), *Ground Vibrations from High-Speed Railways: Prediction and Mitigation*, ICE Publishing, London, UK, 319-336, 2019. <https://doi.org/10.1680/gvfhsr.63792.319>

[29]. D. Cook, S. Malkus, E. Plesha, J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons Inc., 2002.

[30]. J. Barber, Surface displacements due to a steadily moving point force, *Journal of Applied Mechanics*, 63 (1996) 245–51. <https://doi.org/10.1115/1.2788856>

[31]. C. Madshus, A. Kaynia, high-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed, *Journal of Sound and Vibration*, 231 (2000) 689-701. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2647>

[32]. P. Thach, H. Liu, G. Kong, Evaluation of PCC Pile Method in Mitigating Embankment Vibrations from a High-Speed Train, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (2013) 2225–2228. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000941](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000941)