



# Phân tích động lực học cầu đường sắt tốc độ cao có xét tới ảnh hưởng của nền đá ballast

■ **TS. NGUYỄN VĂN ĐĂNG; TS. LÊ NGUYỄN KHƯƠNG<sup>(\*)</sup>; TS. PHÙNG BÁ THẮNG**

*Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải*

■ **ThS. ĐINH TRUNG THƯ**

*Công ty Cổ phần Tư vấn Xây dựng công trình Thăng Long*

Email: <sup>(\*)</sup>khuongln@utt.edu.vn

**TÓM TẮT:** Trong hệ thống kết cấu chịu lực của đường sắt, lớp đá ballast đóng vai trò quan trọng, giúp phân tán tải trọng và triệt tiêu các tác động từ nền đường lên phương tiện, nhờ đó mà đoàn tàu di chuyển êm thuận hơn. Điều này có ý nghĩa đặc biệt khi nền dưới đường ray có độ cứng cao như là cầu bê tông cốt thép. Bài báo tập trung nghiên cứu những ảnh hưởng của nền đá ballast tới ứng xử động lực học cầu đường sắt tốc độ cao qua 3 phương án mô phỏng tương tác, thể hiện mối quan hệ giữa kết cấu đường ray và cầu, áp dụng phân tích 3 cầu có khẩu độ 23,5 m, 21 m và 5,75 m. Kết quả đạt được thể hiện sự thay đổi về chuyển vị và gia tốc lớn nhất xuất hiện trên cầu khi áp dụng các phương pháp mô hình khác nhau.

**TỪ KHÓA:** Đá ballast, ảnh hưởng của nền đá ballast, động lực học, cầu đường sắt tốc độ cao.

**ABSTRACT:** The ballast layer plays a crucial role in the railway's structural system, helping to distribute the weight and remove impacts from the roadbed on the vehicle to make the train operate more smoothly. This is especially important when the roadbed is highly stiff, like a reinforcement concrete bridge. This paper focuses on analysing three high-speed railway bridges with span of 23.5 m, 21 m and 5.75 m to better understand how ballast affects the dynamics behavior of high-speed rail through three interactive simulation alternatives. The results obtained using various modeling techniques can indicate the change in displacement and acceleration when the train crosses the bridges.

**KEYWORDS:** Ballast railway, influence of ballast railway, dynamics, high-speed railway bridge.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong tính toán đường sắt tốc độ cao nói chung và cầu đường sắt tốc độ cao nói riêng, chuyển vị do nguyên nhân dao động có thể lớn hơn đáng kể chuyển vị do tải trọng tĩnh [1]. Những dao động này có thể gây hư hỏng các kết cấu đỡ và ảnh hưởng nghiêm trọng đến sự thoải mái và an toàn của hành khách. Có nhiều nguyên nhân tác động tới ứng xử động lực học của kết cấu tổng thể khi tàu chạy qua, trong đó phải

kể tới các giả thuyết về độ cứng của kết cấu, liên kết giữa các thành phần kết cấu, tải trọng và vận tốc tác dụng của tải trọng. Bài báo sẽ tập trung phân tích ảnh hưởng của giả thuyết liên quan tới sự phân bố của tải trọng qua nền đá ballast và ảnh hưởng của độ cứng nền đá ballast lên ứng xử tổng thể của cầu.

Để phân tích bài toán trên, sử dụng mô hình mô phỏng ứng xử của hệ tàu - kết cấu chịu lực (đường ray và nền ballast) gần với thực tế nhất là một dầm dài hữu hạn hoặc vô hạn được đặt trên nền đồng nhất tuyến tính, nền không đồng nhất đàn hồi tuyến tính hoặc nền phi tuyến chịu hệ dao động chuyển động với vận tốc là hằng số hoặc biến thiên theo thời [2, 3]. Tùy thuộc vào sự tương tác giữa kết cấu và nền ballast mà lựa chọn mô hình nền ballast phù hợp vì mô hình nền có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử tổng thể của hệ kết cấu.

Để làm rõ ảnh hưởng của nền đá ballast tới ứng xử động lực học của cầu, trong nghiên cứu này, 4 phương án mô hình đường ray được sử dụng:

- Phương án 0 (Mô hình 0): Chỉ mô phỏng dầm cầu với tiết diện tương đương xác định dựa vào tần số dao động đầu tiên của cầu.

- Phương án 1 (Mô hình I): Chỉ mô phỏng đường ray + nền đá ballast.

- Phương án 2 (Mô hình II): Có xét tới liên kết giữa đường ray và tà vẹt, nền đá ballast được mô phỏng bởi các lò xo có độ cứng theo phương đứng.

- Phương án 3 (Mô hình III): Đây là mô hình đầy đủ, có xét tới liên kết giữa đường ray-tà vẹt, tà vẹt-ballast và ballast-bản mặt cầu.

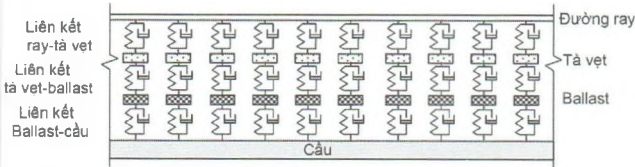
Do nhu cầu thực tế về tải trọng và vận tốc khai thác toàn tuyến, một số cây cầu trên tuyến đường sắt nổi Linz và Wels ở Áo cần được đánh giá lại [6] nhằm xem xét tăng tốc độ tàu lên đến 200 km/h. Mặc dù dự án đã được thực hiện cách đây hơn 20 năm nhưng các số liệu đo đạc thực tế vẫn có nhiều giá trị cho các nghiên cứu trong thời gian vừa qua. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu lựa chọn 3 trong tổng số 6 cây cầu có khẩu độ nằm trong khoảng 5,75 đến 23,5 m được khảo sát bởi Rebelo và cộng sự [7], nhằm áp dụng và đánh giá ảnh hưởng của các giả thuyết mô hình tới ứng xử động lực học của cầu đường sắt tốc độ cao.

## 2. LỰA CHỌN MÔ HÌNH VÀ CÔNG CỤ TÍNH TOÁN

### 2.1. Mô hình hệ kết cấu ray-tà vẹt-nền đá ballast-cầu

Mô hình hệ kết cấu "ray-tà vẹt-nền đá ballast-cầu" mô phỏng đầy đủ nhất liên kết giữa các thành phần chịu lực

phía trên bản mặt cầu, cho phép xem xét ảnh hưởng của tất cả các thành phần chịu lực bao gồm đường ray, tà vẹt, nền đá ballast và cầu. Liên kết giữa các thành phần được mô phỏng bằng các phần tử lò xo có độ cứng và thành phần cản nhớt xác định, như được thể hiện trong *Hình 2.1*.



**Hình 2.1: Mô hình hệ kết cấu: ray-tà vẹt-nền đá ballast-cầu**

Các đặc trưng cơ lý của các thành phần liên kết trong mô hình trên như độ cứng và cản nhớt của liên kết ray-tà vẹt, liên kết tà vẹt-ballast và liên kết ballast-cầu có thể tham khảo từ các nghiên cứu đã được công bố trong nước và trên thế giới như [2, 4].

**2.2. Mô hình tải trọng sử dụng cho nghiên cứu**

Trong nghiên cứu này, tải trọng thiết kế HSLM-A theo tiêu chuẩn Eurocode [2] bao gồm 10 mô hình tải trọng (từ A1 đến A10) với số lượng toa tàu, chiều dài toa xe, khoảng cách trục bánh và tải trọng trục khác nhau được sử dụng.

**2.3. Lựa chọn chương trình tính toán**

Dựa trên nền mã nguồn mở Cast3M, phần mềm KD-Railway đã được phát triển [8] cho phép người dùng tính toán động lực học cầu đường sắt tốc độ cao theo phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng nguyên lý xếp chồng dạng dao động (modal superposition dynamic analysis). Đây là kỹ thuật tính toán hiệu quả để đánh giá phản ứng động của kết cấu làm việc ở trạng thái đàn hồi tuyến tính chịu tác động của tải trọng thay đổi theo thời gian. Phương pháp này cho phép phân tích ứng xử động của hệ kết cấu nhiều bậc tự do đơn lẻ theo một trong hai quy trình thường dùng: dạng dao động theo thời gian (Transient Modal Dynamic Analysis - TMDA) cho kết quả chi tiết theo lịch sử thời gian và phổ phản ứng (Modal Response Spectrum Analysis - MRSA) cho phản ứng động lớn nhất trong khoảng thời gian tác dụng.

Bốn phương án mô phỏng có xét tới liên kết giữa bản mặt cầu, nền đá và đường ray để cập trong nghiên cứu này đã được tích hợp trong phiên bản 1.2 của phần mềm KD-Railway.

**3. BÀI TOÁN ÁP DỤNG**

**3.1. Lựa chọn kết cấu cầu**

Bài báo xem xét 3 cầu dầm nhịp ngắn số hiệu B01, B08 và B11 dạng bê tông cốt thép dự ứng lực, đây là 3 cầu đường sắt tốc độ cao trong tổng số 6 cây cầu được đề cập tới trong nghiên cứu thực nghiệm của Rebelo và cộng sự [7].

**Bảng 3.1. Kích thước hình học của 3 bản mặt cầu [7]**

Số hiệu cầu	Khẩu độ L(m)	Chiều rộng bản W(m)	Chiều cao cạnh trái của bản H <sub>L</sub> (m)	Chiều cao bụng bản H(m)	Chiều cao cạnh phải bản H <sub>R</sub> (m)	Góc α (độ)
B01	23,5	5,14	0,92	1,14	0,91	90
B08	21	4,23	1,05	1,15	1,05	90
B11	5,75	4,44	0,4	0,4	0,4	90

Đặc điểm hình học của 3 cầu trong nghiên cứu thực nghiệm của Rebelo và cộng sự [7] được tóm tắt trong *Bảng 3.1*. Độ dày trung bình của nền đá ballast là 0,60 m, thay đổi trong khoảng từ 0,55 m đến 0,65 m tùy thuộc vào độ dày của bản.

Đặc tính cơ học của vật liệu và liên kết giữa các thành phần trong 3 phương án mô hình được tham khảo [2, 4] và tổng hợp trong *Bảng 3.2*.

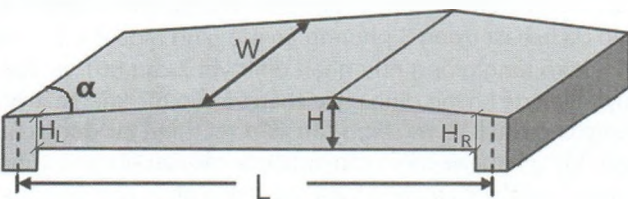
**Bảng 3.2. Đặc trưng cơ lý của các thành phần kết cấu chịu lực [2, 4]**

	Mô hình I	Mô hình II	Mô hình III
<b>Đường ray UIC60</b>			
Mô-đun đàn hồi E <sub>r</sub> (N m <sup>-2</sup> )	210E+ 09		
Khối lượng riêng (kg m <sup>-3</sup> )	7850		
Mô-men kháng uốn EI (Nm <sup>2</sup> )	3055E+ 08		
Tiết diện A <sub>r</sub> (m <sup>2</sup> )	76.9E - 04		
<b>Liên kết đường ray và tà vẹt</b>			
Vertical stiffness K <sub>rv</sub> (N m <sup>-1</sup> )	-	300E+ 06	500E+ 06
Vertical damping C <sub>rv</sub> (N s m <sup>-1</sup> )	-	80E+ 03	200E+ 03
<b>Tà vẹt</b>			
Khối lượng M <sub>t</sub> (kg)	-	300	290
Khoảng cách tà vẹt d <sub>t</sub> (m)	-	0.6	0.6
<b>Nền đá ballast</b>			
Độ cứng theo phương đứng K <sub>bv</sub> (N m <sup>-1</sup> )	104E+ 06	120E+ 06	-
Hệ số cản nhớt theo phương đứng C <sub>bv</sub> (N s m <sup>-1</sup> )	50E+ 03	114E+ 03	-
Độ cứng theo phương ngang K <sub>bh</sub> (N m <sup>-1</sup> )	104E+ 05	-	-
Hệ số cản nhớt theo phương ngang C <sub>bh</sub> (N s m <sup>-1</sup> )	50E+ 03	-	-
Độ cứng liên kết tà vẹt-ballast K <sub>bt</sub> (N m <sup>-1</sup> )	-	-	538E+ 06
Hệ số cản nhớt liên kết tà vẹt-ballast C <sub>bt</sub> (N s m <sup>-1</sup> )	-	-	120E+ 03
Khối lượng M <sub>b</sub> (kg)	-	-	412
Độ cứng liên kết ballast-cầu K <sub>bb</sub> (N m <sup>-1</sup> )	-	-	1000E+ 06
Hệ số cản nhớt ballast-cầu C <sub>bb</sub> (N s m <sup>-1</sup> )	-	-	50E+ 03

**3.2. Các kết quả khảo sát**

**3.2.1. Cầu B01**

Biểu đồ bao chuyển vị và gia tốc thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm cầu B01 chịu tác động của tàu HSLM A1 và HSLM A10 di chuyển trong dải vận tốc 100 - 300 km/h, tính theo 4 phương án mô hình Model 0, Model I, Model II và Model III thể hiện trên *Hình 3.2*. So sánh kết quả giữa 4 phương án mô hình, nhận thấy chuyển vị và gia tốc trong cả hai trường hợp tải trọng đều có giá trị lớn nhất khi sử dụng mô hình Model 0 và đạt giá trị nhỏ nhất khi sử dụng mô hình Model III. Kết quả này chứng minh việc mô phỏng liên kết giữa các thành phần chịu lực của kết cấu phần trên bao gồm ray-tà vẹt-nền ballast có ảnh hưởng tới kết quả phân tích động lực học của cầu, đặc biệt là biên độ chuyển vị và gia tốc tại các vận tốc

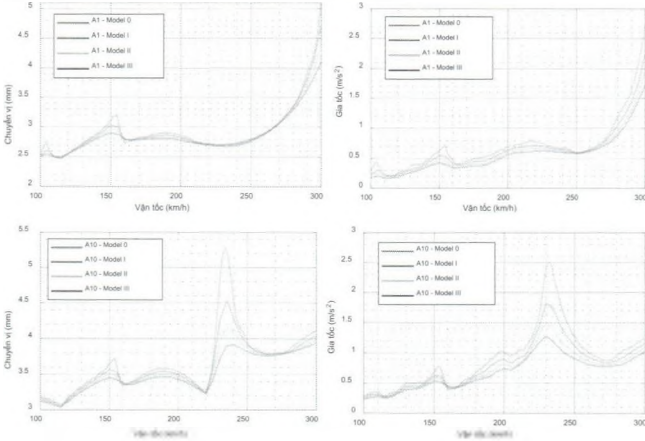


**Hình 3.1: Dạng hình học của cầu dạng bản [7]**



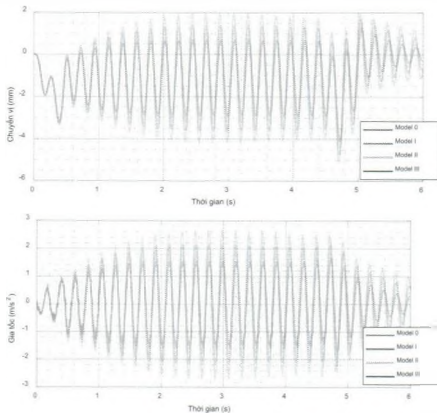


khai thác gây ra hiện tượng cộng hưởng, ví dụ vận tốc  $v = 300$  km/h đối với mô hình HSLM A1 và  $v = 235$  km/h với mô hình HSLM A10. Tại các vận tốc không xảy ra cộng hưởng, sự sai khác về biên độ dao động tính theo 4 mô hình là không rõ rệt, ví dụ với vận tốc  $v = 250$  km/h đối với tải trọng HSLM A1 và  $v = 280$  km/h đối với tải trọng HSLM A10.



**Hình 3.2: Biểu đồ bao chuyển vị và gia tốc thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm cầu B01 chịu tác động của tàu HSLM A1 và HSLM A10 di chuyển trong dải vận tốc 100 - 300 km/h**

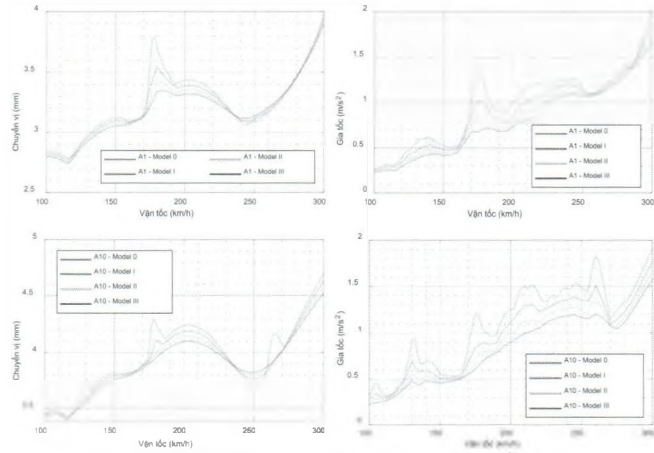
Cùng vận tốc di chuyển của mô hình tải trọng có thể gây ra cộng hưởng, phản ứng động lực học xác định theo 4 phương án mô phỏng có sự khác nhau rõ rệt, đặc biệt với giá trị gia tốc. Cụ thể, mô hình III cho kết quả chuyển vị lớn nhất là 4 mm trong khi giá trị này tính được theo mô hình 0 là 5 mm. Tương tự, giá trị gia tốc lớn nhất cho 2 phương án mô phỏng trên lần lượt là  $1,5\text{m/s}^2$  và  $2,8\text{m/s}^2$  (Hình 3.3).



**Hình 3.3: Chuyển vị và gia tốc dao động của cầu B01 theo 4 phương án mô hình ứng với trường hợp tàu HSLM A1 di chuyển với vận tốc 300 km/h qua cầu**

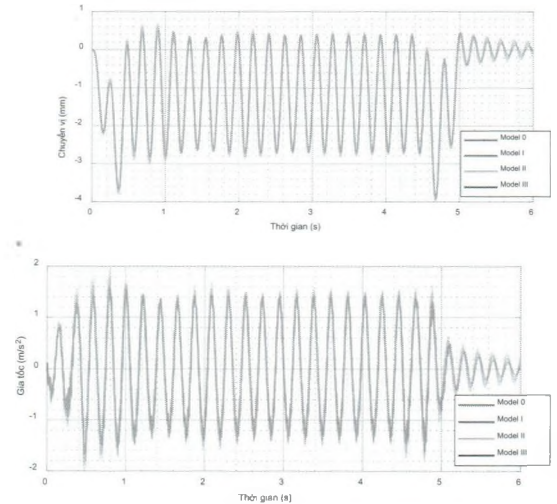
**3.2.2. Cầu B08**

Tương tự nhận định có được với cầu B01, tức chuyển vị và gia tốc tại mặt cắt giữa dầm trong cả hai trường hợp tải trọng HSLM A1 và HSLM A10 đều có giá trị lớn nhất khi sử dụng mô hình Model 0 và đạt giá trị nhỏ nhất khi sử dụng mô hình Model III (Hình 3.4). Kết quả này tiếp tục chứng minh việc mô phỏng liên kết giữa các thành phần chịu lực của kết cấu phần trên bao gồm ray-tà vệt-nền ballast có ảnh hưởng tới kết quả phân tích động lực học của cầu, đặc biệt là biên độ chuyển vị và gia tốc tại các vận tốc khai thác gây ra hiện tượng cộng hưởng.



**Hình 3.4: Biểu đồ bao chuyển vị và gia tốc thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm cầu B08 chịu tác động của tàu HSLM A1 và HSLM A10 di chuyển trong dải vận tốc 100 - 300 km/h**

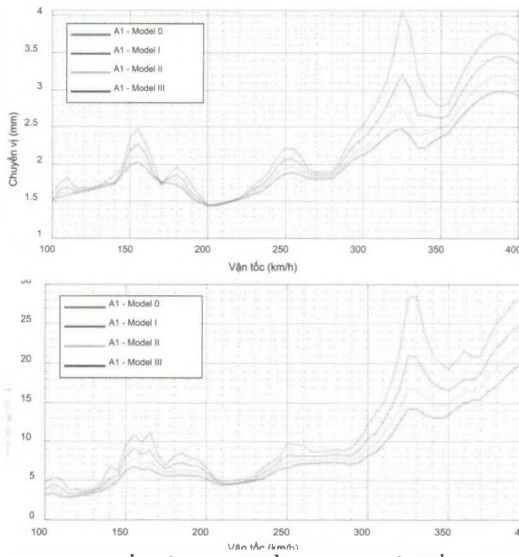
Hình 3.5 cho thấy có sự khác biệt so với cầu B01, tại cùng vận tốc di chuyển của tàu HSLM A1, phản ứng động lực học xác định theo 4 phương án mô phỏng không có sự khác nhau rõ rệt. Cụ thể, các mô hình đều cho kết quả chuyển vị lớn nhất là 4 mm và cho kết quả gia tốc có sự sai khác nhỏ từ  $1,8\text{m/s}^2$  đối với Model III và  $2,0\text{m/s}^2$  với Model 0. Điều này có thể được giải thích bởi kích thước bản của cầu B08 dầy hơn cầu B01, trong khi khẩu độ và bề rộng bản lại nhỏ hơn (Bảng 3.1).



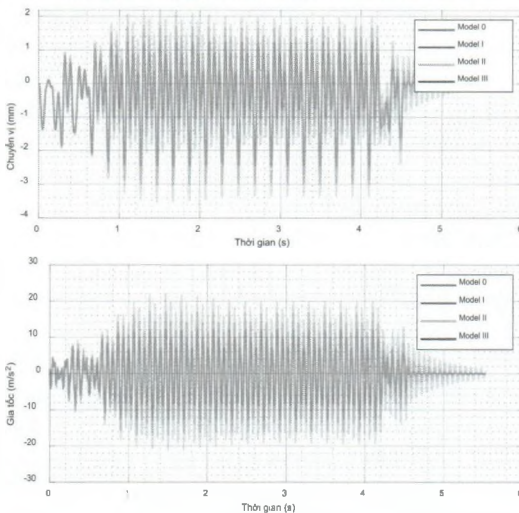
**Hình 3.5: Chuyển vị và gia tốc dao động của cầu B08 theo 4 phương án mô hình ứng với trường hợp tàu HSLM A1 di chuyển với vận tốc 300 km/h qua cầu**

**3.2.3. Cầu B11**

Khác với nhận định rút ra cho hai cầu B01 và B08, trường hợp của cầu B11 cho gia tốc dao động trong cả 4 phương án mô phỏng đều lớn hơn  $3,5\text{m/s}^2$  khi tàu HSLM A1 di chuyển với vận tốc trên 150 km/h (Hình 3.6). Mặc dù ảnh hưởng của nền đá ballast trong 3 phương án mô hình Model I, II, và III đều là rõ ràng giống như nhận định với 2 cầu B01 và B08, tuy nhiên để khẳng định chắc chắn về vận tốc khai thác áp dụng cho cầu B11, mô hình cần xem xét thêm tác động của độ cứng gối tựa và hệ số cản nhớt của các liên kết. Đây cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo, tập trung phân tích động lực học cho các cầu nhịp ngắn hơn 10 m.



**Hình 3.6: Biểu đồ bao chuyển vị và gia tốc thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm cầu B11 chịu tác động của tàu HSLM A1 di chuyển trong dải vận tốc 100 - 400 km/h**



**Hình 3.7: Chuyển vị và gia tốc dao động của cầu B11 theo 4 phương án mô hình ứng với trường hợp tàu HSLM A1 di chuyển với vận tốc 320 km/h qua cầu**

Hình 3.7 mô tả chuyển vị và gia tốc dao động theo lịch sử thời gian tại mặt cắt giữa cầu B11 theo 4 phương án mô hình ứng với trường hợp tàu HSLM A1 di chuyển với vận tốc 320 km/h qua cầu. Khác với cầu B08, tại cùng vận tốc di chuyển của tàu HSLM A1, phản ứng động lực học xác định theo 4 phương án mô phỏng có sự khác nhau rõ rệt. Cụ thể, mô hình III cho kết quả chuyển vị lớn nhất là 2,4 mm, trong khi giá trị này tính được theo mô hình 0 là 3,6 mm. Tương tự, giá trị gia tốc lớn nhất cho 2 phương án mô phỏng trên lần lượt là 10 m/s<sup>2</sup> và 22 m/s<sup>2</sup>. Kết quả nhận được là phù hợp với các nhận định liên quan tới giá trị gia tốc của các nghiên cứu trước đó [7] khi khẳng định giá trị gia tốc thẳng đứng khi tàu chạy có khẩu độ ngắn có thể lên đến 20 m/s<sup>2</sup>.

**4. KẾT LUẬN**

Mặc dù các phương pháp tính và các vấn đề liên quan tới động lực học cầu đường sắt tốc độ cao đã được nhiều nghiên cứu trên thế giới quan tâm, phát triển từ 20 năm

trước, nhưng tới nay, việc áp dụng và tính toán cho các công trình cụ thể vẫn gặp một số khó khăn nhất định liên quan tới kỹ thuật mô phỏng, các giả thuyết tính toán và thời gian tính toán. Việc hiểu bản chất của phương pháp tính, nắm rõ ảnh hưởng của tham số đầu vào tới kết quả tính cho phép người kỹ sư đưa ra những quyết định đúng đắn và hiệu quả trong quá trình xây dựng mô hình.

Để kiểm tra ảnh hưởng của phương án mô hình hóa nền đá ballast lên ứng xử động lực học của cầu, 4 phương án mô hình được sử dụng để tính toán động lực học của 3 cầu dầm có nhịp lần lượt là 23,5 m, 21 m và 5,75 m dạng bê tông cốt thép dự ứng lực. Từ các kết quả khảo sát có thể khẳng định, việc mô hình các liên kết giữa ray, tà vẹt và nền đá qua các độ cứng thực tế giúp tìm được kết quả phân tích thực tế hơn, việc lựa chọn phương án thiết kế vì thế không bị thiên về “quá an toàn” như phương án mô phỏng thông thường theo Model 0.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài KHCN cấp Bộ GTVT, mã số DT223032.

**Tài liệu tham khảo**

[1]. A. V. Metrikine, S. N. Verichev and J. Blaauwendraad (Feb., 2005), *Stability of a two-mass oscillator moving on a beam supported by a visco-elastic half-space*, International Journal of Solids and Structures, vol.42, no.3, pp.1187-1207, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.03.006.

[2]. C. Rigueiro, C. Rebelo, and S. da Silva L (2010), *Influence of ballast models in the dynamic response of railway viaducts*, J Sound Vib, vol.329, no.null, p.3030.

[3]. W. Zhai and CB. Cai (2002), *Train/track/bridge dynamic interactions: simulation and applications*, Veh Syst Dyn, vol.37, no.null, p.653.

[4]. P. Alves Costa, R. Calçada and A. Silva Cardoso (Jan. 2012), *Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.32, no.1, pp.111-128, doi: 10.1016/j.soildyn.2011.09.002.

[5]. W. Zhai and CB. Cai (2002), *Train/track/bridge dynamic interactions: simulation and applications*, Veh Syst Dyn, vol.37, no.null, p.653.

[6]. ERRI Specialists' Committee D214 (1999), *Rail Bridges for Speeds > 200km/h, Final Report: Part A Synthesis of the Results of D214 Research*, European Rail Research Institute.

[7]. C. Rebelo, L. da Silva and C. Rigueiro (2008), *Dynamic behaviour of twin single-span ballasted railway viaducts-field measurements and modal identification*, Eng Struct, vol.30, no.null, p.2460.

[8]. L.-N. Khuong and N. Van Dang (2022), *KD-Railway 1.0 - A structural dynamics software for high-speed rail bridge based on open source Cast3m platform*, Journal of Science and Transport Technology.

**Ngày nhận bài: 18/11/2022**

**Ngày chấp nhận đăng: 05/12/2022**

**Người phản biện: TS. Nguyễn Thanh Hưng  
TS. Nguyễn Thị Thanh Xuân**