Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2021, 15 (7V): 1–12

NGHIÊN CỨU PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA KẾT CẤU CẦU ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC

Phạm Duy Hòa[a], Trần Việt Hùng[a,*], Phùng Bá Thắng[b], Nguyễn Thị Nguyệt Hằng[a]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,*
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam
[b]*Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải,*
54 đường Triều Khúc, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 27/10/2021, Sửa xong 09/11/2021, Chấp nhận đăng 10/11/2021

Tóm tắt

Với yêu cầu khai thác ở tốc độ cao (trên 200 km/h) so với cầu đường sắt thông thường, việc phân tích tính toán thiết kế cầu cho đường sắt cao tốc đòi hỏi những yêu cầu mới, đặc biệt là yêu cầu về dao động của kết cấu cầu nhằm đảm bảo sự êm thuận cũng như an toàn của đoàn tàu khi chạy qua. Việc phân tích tính toán kết cấu cầu ở các trạng thái tĩnh không đủ để đảm bảo các yêu cầu khai thác trong nhiều trường hợp. Khi đó, phân tích động lực học của kết cấu cầu đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong tính toán và thiết kế kết cấu cầu đường sắt cao tốc. Bài báo này trình bày một số phương pháp phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc được áp dụng theo tiêu chuẩn Eurocode (bộ tiêu chuẩn được tham khảo chính của tiêu chuẩn thiết kế cầu đường sắt của Việt Nam đang được biên soạn) trong đó tập trung vào trình bày phương pháp phân tích trực tiếp theo lịch sử thời gian (time history analysis). Phương pháp này sau đó được áp dụng vào một ví dụ tính toán cụ thể là một kết cấu cầu đường sắt cao tốc đang được đề xuất cho dự án đường sắt cao tốc Bắc Nam. Các kết quả phân tích tính toán trình bày trong nghiên cứu này có thể là tài liệu tham khảo hữu ích khi phân tích động lực học cho các công trình cầu đường sắt cao tốc sắp được triển khai tại Việt Nam.

Từ khoá: cầu đường sắt cao tốc; phân tích động lực học; phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian; phần tử hữu hạn; Eurocode.

RESEARCH ON THE DYNAMIC RESPONSE OF HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGES

Abstract

With high-speed operation (more than 200 km/h) compared to a regular railway bridge, the design of high-speed railway bridge requires strict criteria, of which bridge vibration due to the need for train stability and passenger comfort is one of the most important ones. Static structural analysis is not sufficient to meet operational requirements in many cases. Therefore, the dynamic analysis is necessary, even playing a particularly important role in the calculation and design for the high-speed railway bridge structures. This paper presents some methods for dynamic analyses of high-speed railway bridge structure using Eurocodes (the main reference standards for Vietnam's railway bridge design standard which being developed) and focuses on the time history analysis method to analyze the dynamic behavior of the high-speed railway bridge structure under passing train excitation. This analysis method is then applied to an example for analyzing a HSR bridge structure proposed by the TEDI - TRICC - TEDISOUTH joint venture consulting for the North-South high-speed railway project. The results from this computational analysis can be served as useful references when analyzing the dynamics of HSR bridges in Vietnam.

Keywords: high-speed rail bridge; dynamic analysis; time history analysis; FEM; Eurocodes.

https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-01 © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

[*]Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* hungtv@nuce.edu.vn (Hùng, T. V.)

1. Giới thiệu

Xây dựng đường sắt cao tốc là một giải pháp đảm bảo sự đi lại của người dân giữa các đô thị lớn của nhiều quốc gia trên thế giới. Hiện nay, hệ thống đường sắt cao tốc đã và đang được xây dựng ở trên 20 trên quốc gia trên thế giới và nhiều nước khác cũng đang lên kế hoạch xây dựng và phát triển hệ thống đường sắt cao tốc của mình trong đó có Việt Nam. Ở các tuyến đường sắt cao tốc, công trình cầu chiếm một tỷ trọng đáng kể chiều dài toàn tuyến, chẳng hạn ở tuyến Kyushu Shinkansen ở Nhật Bản là 64%, tuyến Bắc Kinh-Hongkong và Thượng Hải-Côn Minh tỷ lệ này là 70%. Trong các kết cấu cầu được sử dụng cho đường sắt cao tốc, kết cấu cầu bêtông dự ứng lực giản đơn nhịp nhỏ và vừa chiếm một tỷ trọng rất lớn, như ở tuyến Bắc Kinh-Thượng Hải, 90% công trình cầu có kết cấu nhịp giản đơn [1].

Kể từ khi những cây cầu đường sắt đầu tiên được xây dựng, các nghiên cứu về ảnh hưởng động lực học của kết cấu cầu chịu tải trọng di chuyển đã được tiến hành. Sự quan tâm đến ứng xử động của công trình cầu càng được tăng lên trong những năm gần đây, do sự ra đời của đường sắt cao tốc. Dưới tác dụng của tải trọng ở tốc độ rất cao, các hiệu ứng động của tải trọng đối với kết cấu cầu có giá trị lớn hơn và phức tạp hơn. Theo định nghĩa của Hiệp hội đường sắt quốc tế (UIC) hệ thống đường sắt cao tốc có tốc độ khai thác tối thiểu là 250 km/h hoặc ít nhất là trên 200 km/h [2].

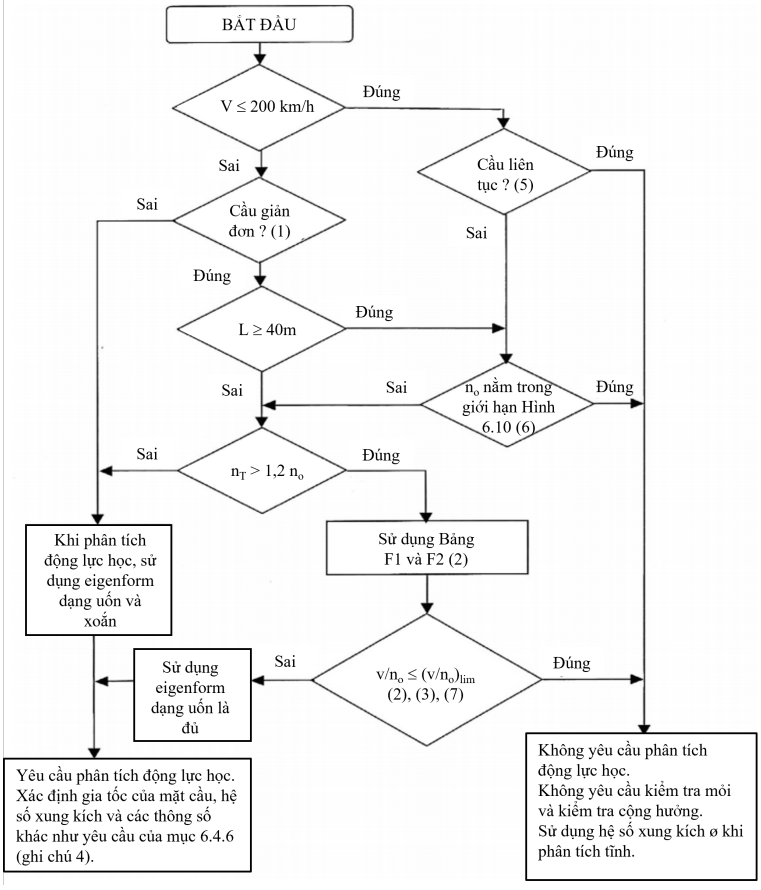
Do yêu cầu khai thác ở tốc độ cao (trên 200 km/h), các phân tích tính toán kết cấu cầu ở các trạng thái tĩnh là không đủ để đảm bảo các yêu cầu khai thác trong nhiều trường hợp. Khi đó, phân tích động lực học của kết cấu cầu là cần thiết, thậm chí đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong tính toán và thiết kế kết cấu cầu đường sắt cao tốc nhằm đảm bảo sự êm thuận cũng như an toàn của đoàn tàu [3]. Thông thường khi thiết kế cầu đường sắt, các hiệu ứng động lực học thường được xem xét bằng cách đưa vào các hệ số khuếch đại động lực học (hay còn gọi là hệ số xung kích), được quy định trong tiêu chuẩn thiết kế cầu. Trên thực tế, ứng xử của kết cấu cầu đường sắt do tải trọng chuyển động phụ thuộc vào chiều dài nhịp, khối lượng kết cấu, độ cứng và giảm chấn, tải trọng trục của đoàn tàu, khoảng cách giữa các trục, chiều dài toa tàu, và tốc độ của đoàn tàu. Các hệ số động lực thường là một hàm của tần số tự nhiên hoặc chiều dài nhịp của cầu, và cho biết các tác động tĩnh phải được tăng thêm bao nhiêu lần để có thể xem xét như tải trọng động. Phương pháp phân tích truyền thống này không những dẫn đến các thiết kế thận trọng và tốn kém cho một số cây cầu, mà còn có thể đánh giá thấp các hiệu ứng động đối với những cây cầu khác đặc biệt với các cầu đường sắt cao tốc. Hơn nữa, các yếu tố khuếch đại động lực không thể tính đến mức gia tốc rung và nguy cơ cộng hưởng của kết cấu cầu [4].

Với đường sắt cao tốc, do khai thác ở tốc độ cao (trên 200 km/h), tần số tác động của đoàn tàu gần với tần số dao động riêng của công trình. Nguy cơ xảy ra hiện tượng cộng hưởng là hiện hữu cần phải được xem xét, phân tích và khống chế. Ngay cả khi di chuyển ở các tốc độ thấp hơn, gia tốc rung của kết cấu cũng có thể đạt đến các giá trị không thể chấp nhận được. Trong trường hợp với cầu đường sắt có sử dụng đá ballast, gia tốc rung lớn có nguy cơ gây mất ổn định cho nền đá ballast. Để đảm bảo ổn định của nền đá ballast và đảm bảo tiếp xúc giữa bánh của đoàn tàu với cầu, một điều hết sức quan trọng là phải đảm bảo rằng gia tốc rung tối đa của cầu phải được duy trì dưới $0{,}35g$ [5, 6]. Trong thiết kế thực tế, tiêu chí gia tốc rung giới hạn này thường sẽ là yếu tố quyết định.

Theo tiêu chuẩn Eurocodes (bộ tiêu chuẩn được tham khảo chính của tiêu chuẩn thiết kế cầu đường sắt của Việt Nam đang được biên soạn), khi tính toán thiết kế cầu đường sắt cao tốc, việc xác định xem kết cấu cầu có cần thiết phải phân tích động lực học hay không được tiến hành theo sơ đồ Hình 1 [7].

Trên Hình 1, V là tốc độ tối đa của đoàn tàu (km/h); L là chiều dài nhịp (m); n_o là tần số dao động uốn tự nhiên đầu tiên của cầu (Hz); n_T là tần số dao động xoắn tự nhiên đầu tiên của cầu (Hz); v là

vận tốc danh định tối đa (m/s); $(v/n_o)_{\lim}$ là giới hạn theo Phụ lục F – Tiêu chuẩn EN 1991-2:2003.



Hình 1. Sơ đồ kiểm tra sự cần thiết phải tiến hành phân tích động lực – Eurocodes (EN 1991-2-6.4.4)

Khi phân tích động lực học được xác định là cần thiết, phân tích được tiến hành với các thông số đặc trưng của chính các đoàn tàu thực tế dự tính sẽ được đưa vào sử dụng hoặc mô hình các đoàn tàu HSLM với các tuyến đường sắt cao tốc có xét đến khả năng kết nối giao thông quốc tế [7, 8].

Bài báo này trình bày một số phương pháp phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc được áp dụng theo tiêu chuẩn Eurocodes trong đó tập trung vào trình bày phương pháp phân tích trực tiếp theo lịch sử thời gian (time history analysis) để phân tích ứng xử động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc khi có đoàn tàu chạy qua. Phương pháp phân tích này sau đó được áp dụng vào một ví dụ tính toán cụ thể là một kết cấu cầu đường sắt cao tốc đang được liên danh tư vấn TEDI – TRICC - TEDISOUTH đề xuất cho dự án đường sắt cao tốc Bắc Nam. Các kết quả phân tích tính toán có thể được sử dụng làm tài liệu tham khảo hữu ích khi phân tích động lực học cho các công trình cầu đường sắt cao tốc tại Việt Nam.

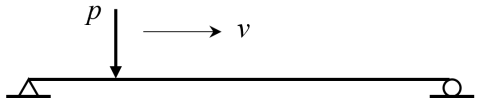
2. Một số phương pháp phân tích động lực học áp dụng cho cầu đường sắt cao tốc

2.1. Mô hình tải trọng đoàn tàu

Tương tác giữa cầu và đoàn tàu di chuyển qua cầu là một bài toán động lực học tương tác, phi tuyến. Thông thường, khi chỉ quan tâm đến ứng xử động của công trình cầu, để đơn giản trong phân

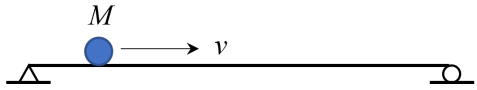
tích tính toán, đoàn tàu được mô hình như một đoàn tải trọng di động (*moving loads model*) hoặc đoàn khối lượng di động (*moving masses model*) [4].

Mô hình tải trọng di động là loại mô hình đơn giản và thường được áp dụng trong tính toán phân tích rung động của cầu do hoạt tải gây ra. Trong mô hình này, tác dụng của tải trọng hoạt tải lên công trình được mô phỏng như các lực di động (*moving loads*) di chuyển qua cầu (Hình 2). Với mô hình này, các đặc trưng động lực học cơ bản của cầu gây ra bởi chuyển động của hoạt tải có thể được xác định với mức độ chính xác vừa đủ. Một số những nghiên cứu ban đầu về mô hình tải trọng di động có thể kể đến như Timoshenko [9]; Jeffcot [10]; Frỳba [11]. Tuy nhiên, trong mô hình này ảnh hưởng tương tác (*interaction*) giữa cầu và hoạt tải đã bị bỏ qua. Vì vậy, mô hình tải trọng di động chỉ phù hợp với trường hợp khối lượng của hoạt tải là tương đối nhỏ so với kết cấu cầu, và khi chỉ quan tâm đến ứng xử động của công trình cầu mà không quan tâm xem xét đến ứng xử của đoàn tàu khi chạy qua.



Hình 2. Mô hình tải trọng di động

Với những trường hợp không thể coi lực quán tính của đoàn tàu là nhỏ, mô hình khối lượng di động (*moving masses model*) (Hình 3) thường được áp dụng thay cho mô hình tải trọng di động. Với mô hình này, lực quán tính được xác định cả ở kết cấu cầu và đoàn tàu trong phân tích dao động của kết cấu. Tác dụng quán tính của cả dầm và phương tiện chuyển động đã được nghiên cứu sớm nhất vào năm 1929 bởi Jeffcott [10], sau đó được tiếp tục nghiên cứu bởi Ting và cs. [12], Sadiku và Leipholz [13], và Stanisic [14]. Tuy nhiên, trong mô hình này ảnh hưởng tương tác giữa đoàn tàu và cầu cũng chưa được xem xét đến.



Hình 3. Mô hình khối lượng di động

Phạm vi của bài báo này chỉ đề cập đến phương pháp phân tích dao động của công trình cầu dưới tác dụng của đoàn tàu chạy qua sử dụng mô hình tải trọng di chuyển.

2.2. Phương pháp hệ số động lực (dynamic load allowance)

Phương pháp phổ biến được áp dụng trong phân tích kết cấu cầu đường bộ và đường sắt nói chung là phương pháp pháp hệ động lực (*dynamic load allowance*). Với phương pháp này, kết cấu cầu được tiến hành phân tích xác định các ứng xử dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu tĩnh được đặt tại các vị trí bất lợi nhất trên đường ảnh hưởng. Kết quả được nhân với một hệ số phóng đại động thường được gọi là hệ số động lực hay hệ số xung kích. Phương pháp này đơn giản và thuận tiện trong quá trình tính toán nên thường được áp dụng trong phân tích tính toán kết cấu cầu dưới tác dụng của hoạt tải. Tuy nhiên nhược điểm của nó là không phân tích được ảnh hưởng của hiện tượng cộng hưởng dao động của cầu dưới tác dụng của tàu đường sắt cao tốc. Do vậy, trong nhiều trường hợp việc áp dụng phương pháp phân tích hệ số động lực học không đủ đảm bảo an toàn cũng như điều kiện khai thác.

2.3. Phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian (time history analysis)

Phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian là một phương pháp số được sử dụng để tìm ra lời giải cho phương trình cân bằng động lực học khi kết cấu chịu tải trọng động. Phương pháp này đưa ra các ứng xử của kết cấu (như chuyển vị, gia tốc, nội lực, v.v.) trong một khoảng thời gian nhất định dựa trên các đặc tính động lực học của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng.

Phương trình cân bằng động lực học tổng quát trong phân tích theo lịch sử thời gian được thể hiện như sau:

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = p(t)$$

trong đó, $[M]$ là ma trận độ cứng; $[C]$ là ma trận giảm chấn; $[K]$ là ma trận độ cứng của kết cấu; $p(t)$ là vectơ tải trọng động của đoàn tàu; và $u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t)$ lần lượt là chuyển vị, vận tốc, và gia tốc rung của kết cấu.

Để xác định được các ứng xử của kết cấu, mục tiêu là giải được hệ phương trình vi phân của hệ nhiều bậc tự do trên với các điều kiện ban đầu:

$$u = u(0) \quad \text{và} \quad \dot{u} = \dot{u}(0) \quad \text{tại thời điểm } t = 0$$

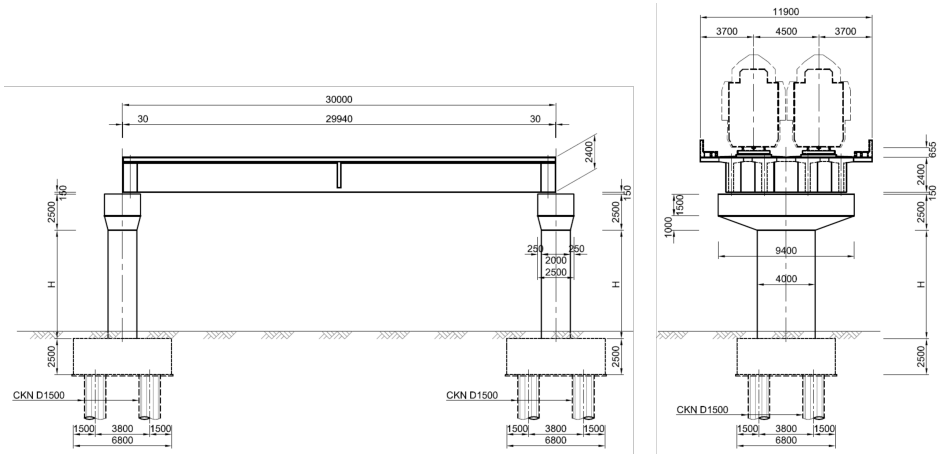
Khoảng thời gian được chia nhỏ thành các bước thời gian (*time steps*), thông thường là cách đều nhau một khoảng Δt đủ nhỏ. Tải trọng di động của đoàn tàu tác động lên công trình $p(t)$ được xác định một cách rời rạc tại các thời điểm $t_i = i\Delta t$ và được ký hiệu tương ứng là $p_i = p(t_i)$. Các ứng xử của kết cấu tại cùng thời điểm t_i sẽ được xác định và ký hiệu tương ứng là $u_i = u(t_i), \dot{u}_i = \dot{u}(t_i)$, và $\ddot{u}_i = \ddot{u}(t_i)$.

Chu trình phân tích theo lịch sử thời gian được tiến hành lần lượt từ các bước $i = 0, 1, 2, 3, \ldots$ để xác định các ứng xử của kết cấu tại các bước $i = 1, 2, 3, 4, \ldots$ Chính vì vậy, các ứng xử của kết cấu tại thời điểm ban đầu tương ứng với $i = 0$ là cần thiết để bắt đầu chu trình phân tích tính toán. Các ứng xử của kết cấu ở bước $i + 1$ sẽ được xác định từ các ứng xử ở bước i trước đó [15, 16].

Đây cũng là phương pháp phân tích động lực học được chấp thuận áp dụng trong các tiêu chuẩn thiết kế cầu đường sắt cao tốc trong đó có tiêu chuẩn Eurocodes.

3. Ví dụ áp dụng phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian

Ví dụ được áp dụng trong phân tích động lực học là một kết cấu cầu đường sắt cao tốc đang được liên danh tư vấn TEDI – TRICC - TEDISOUTH đề xuất cho dự án đường sắt cao tốc Bắc Nam – Giai đoạn nghiên cứu tiền khả thi. Cầu có kết cấu nhịp giản đơn gồm 4 dầm chữ T bê tông cốt thép (BTCT) dự ứng lực (DƯL) nhịp $L = 30$ m có mặt đứng và mặt cắt ngang được thể hiện trên Hình 4.



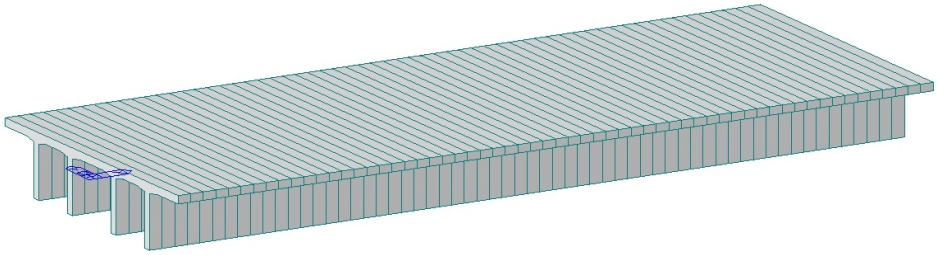
Hình 4. Kết cấu điển hình cầu cạn dầm T nhịp 30 m – Dự án đường sắt tốc độ cao trục Bắc Nam (giai đoạn Nghiên cứu tiền khả thi) [17]

Cầu được thiết kế với bề rộng 11,9 m, có 2 làn đường sắt cao tốc khổ 1,435 m và tốc độ thiết kế $V = 350$ km/h.

Cho đến thời điểm soạn thảo bài báo này, dự án mới đang ở giai đoạn nghiên cứu tiền khả thi, nhóm tác giả chưa tìm được thông tin và tài liệu nào liên quan đến việc phân tích động lực học của kết cầu cạn này. Các kết quả phân tích và nghiên cứu của ví dụ này là các phân tích độc lập của nhóm tác giả, không liên quan đến dự án đường sắt tốc độ cao trục Bắc Nam.

3.1. Mô hình kết cấu cầu

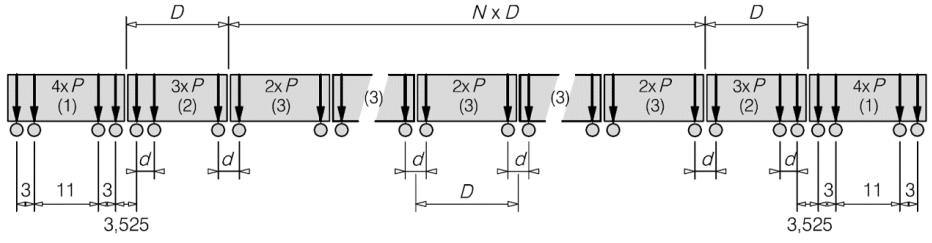
Kết cấu cầu được mô hình bằng phương pháp phần tử hữu hạn và sử dụng phần mềm Midas/Civil 2019 (v1.1) để mô phỏng và phân tích kết cấu. Kết cấu nhịp được mô hình bằng các phần tử thanh (frames) trong không gian với chiều dài mỗi thanh bằng 0,5 m. Tiết diện của phần tử thanh được sử dụng là toàn bộ tiết diện của dầm chủ và bản mặt cầu. Gối cầu được mô hình bằng các gối giản đơn. Mô hình kết cấu trong phần mềm Midas/Civil được thể hiện ở Hình 5. Các đặc tính khối lượng của kết cấu nhịp được phân bố đều và đặt tại các điểm nút của phần tử thanh. Khối lượng của phần đá ballast được phân bố đều và đặt tại tâm của đường ray. Khối lượng thể tích của phần đá ballast được lấy bằng $\gamma = 17$ kN/m^3, và chiều dày lớp ballast được lấy bằng 0,6 m.



Hình 5. Mô hình phần tử hữu hạn kết cấu cầu dầm T nhịp 30 m – Dự án đường sắt tốc độ cao trục Bắc Nam (giai đoạn Nghiên cứu tiền khả thi)

3.2. Mô hình đoàn tàu

Theo tiêu chuẩn Eurocodes, phân tích động lực học của cầu đường sắt cao tốc với tốc độ $V > 200$ km/h được thực hiện với các thông số đặc trưng của chính các đoàn tàu thực tế dự tính sẽ được đưa vào sử dụng hoặc mô hình các đoàn tàu HSLM với các tuyến đường sắt cao tốc có xét đến khả năng kết nối giao thông quốc tế. Với cầu có kết cấu nhịp giản đơn và chiều dài $L > 7$ m, phân tích động lực học có thể được tiến hành với 10 mô hình đoàn tàu HSLM-A bao gồm từ A1 đến A10 với các thông số như thể hiện ở Hình 6 và Bảng 1.



Hình 6. Mô hình đoàn tàu HSLM-A [7]

Bảng 1. Các thông số mô hình đoàn tàu HSLM-A [7]

Đoàn tàu	Số toa giữa N	Chiều dài toa xe D [m]	Khoảng cách trục bánh d [m]	Tải trọng trục P [kN]
A1	18	18	2	170
A2	17	19	3.5	200
A3	16	20	2	180
A4	15	21	3	190
A5	14	22	2	170
A6	13	23	2	180
A7	13	24	2	190
A8	12	25	2.5	190
A9	11	26	2	210
A10	11	27	2	210

3.3. Kết quả phân tích động lực

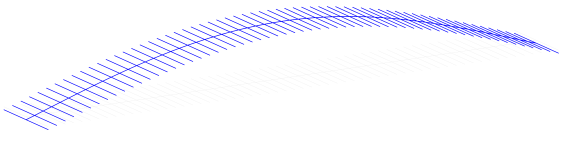
a. Phân tích trị riêng (Eigenvalue Analysis)

Trong quá trình tàu chạy qua, kết cấu cầu dao động cưỡng bức với tần số cưỡng bức do đoàn tàu gây ra. Sau khi đoàn tàu chạy qua, kết cấu cầu dao động tự do với tần số dao động riêng. Do đó, cần tiến hành phân tích trị riêng để xác định các tần số dao động riêng (natural frequencies), các mode dao động riêng (eigenmode shapes), và hệ số tham gia khối lượng của kết cấu (mass participantion factors) ứng với từng mode dao động. Các thông số này phụ thuộc vào dạng kết cấu, sự phân bố khối lượng, và mức độ chính xác yêu cầu cũng như khả năng tính toán. Sau khi phân tích, cần xác định tần số dao động uốn và xoắn đầu tiên của kết cấu nhịp để từ đó kiểm tra xem kết cấu cầu có cần tiến hành phân tích động lực học hay không.

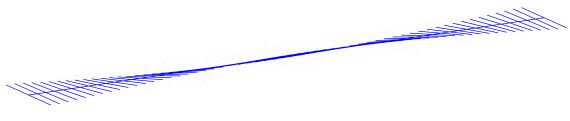
Kết quả phân tích trị riêng của 6 mode dao động đầu tiên được thể hiện trên Bảng 2 và Hình 7, trong đó mode thứ 1 là dạng dao động uốn dọc đầu tiên, mode thứ 2 là dạng dao động xoắn đầu tiên, và mode thứ 6 là dao động uốn ngang đầu tiên.

Bảng 2. Tần số dao động và hệ số tham gia khối lượng của 6 mode dao động đầu tiên

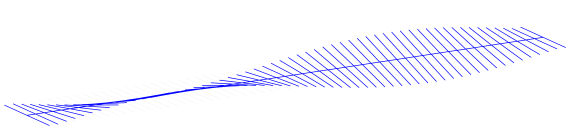
Mode No.	Tần số [Hz]	Hệ số tham gia khối lượng của kết cấu (*Mass participation factors*)					
		Dx (%)	Dy (%)	Dz (%)	Rx (%)	Ry (%)	Rz (%)
1	3.911	0	0	79,36	0	0,03	0
2	5.247	0	0	0	77,03	0	0
3	10.489	0	0	0	0	0	0
4	14.855	0	0	0	0	56,61	0
5	15.724	0	0	0	8,53	0	0
6	19.281	0	77	0	0	0	0,03



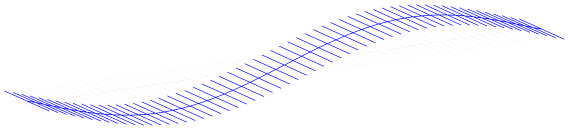
(a) Eigenmode 1, f_1 = 3.911 Hz



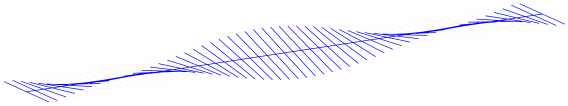
(b) Eigenmode 2, f_2 = 5.247 Hz



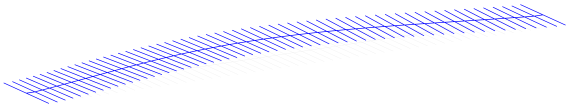
(c) Eigenmode 3, f_3 = 10.489 Hz



(d) Eigenmode 4, f_4 = 14.855 Hz



(e) Eigenmode 5, f_5 = 15.724 Hz



(f) Eigenmode 6, f_6 = 19.281 Hz

Hình 7. Sáu mode dao động đầu tiên của kết cấu nhịp

b. Kiểm tra yêu cầu phân tích động lực học

Việc xác định xem kết cấu cầu có cần thiết phải phân tích động lực học hay không được tiến hành theo sơ đồ trình bày ở Hình 1. Trình tự kiểm tra với các thông số của ví dụ cầu đường sắt cao tốc lần lượt như sau:

- Tốc độ khai thác tối đa V = 350 km/h > 200 km/h;
- Kết cấu nhịp giản đơn có L = 30 m < 40 m;
- n_T/n_0 = 1,35 > 1,2;
- v/n_0 = 24,86 > $(v/n_0)_{\text{lim}}$ = 18,33.

Kết luận: Phân tích động lực học là cần thiết để xác định gia tốc trên mặt cầu và hệ số xung kích với mô hình đoàn tàu HSLM-A (theo Điều 6.4.6 - Ghi chú 4 – EN 1991-2:2003 [7]).

c. Phân tích theo lịch sử thời gian (time history analysis)

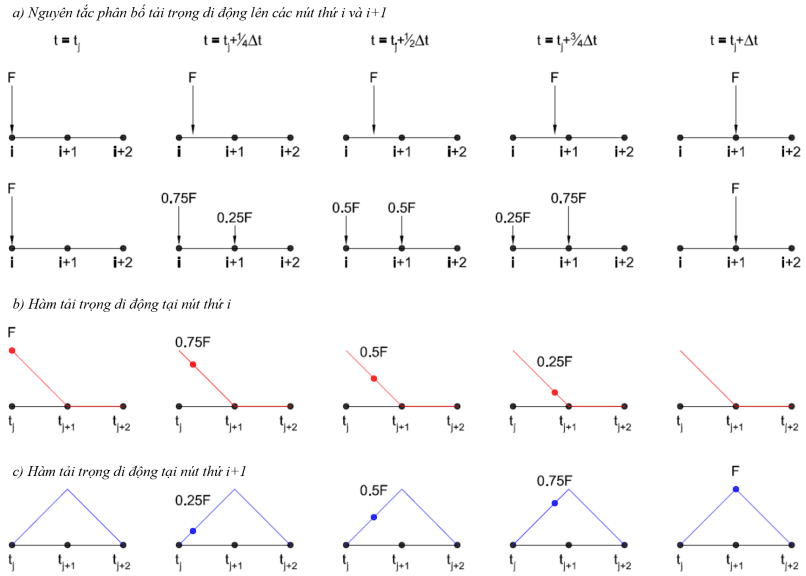
Theo tiêu chuẩn Eurocodes [7] khi tiến hành phân tích động theo lịch sử thời gian, tác động của tải trọng đoàn tàu tác dụng lên mô hình có thể áp dụng mô hình tải trọng tập trung di động và được mô hình thành các chuỗi tải trọng thay đổi theo thời gian đặt tại các điểm nút ở vị trí tâm đường ray. Các hàm lực tác dụng lên các điểm nút sẽ được xây dựng với các giá trị tương ứng với thời gian, vận tốc chuyển động và khoảng cách giữa hai nút liên tục trên mô hình.

Nguyên tắc xây dựng hàm tải trọng trên một nút thứ i của mô hình khi trục bánh xe di chuyển trên 2 phần tử có chứa nút i sẽ chuyển thành 2 lực theo tỷ lệ giữa khoảng cách của điểm đặt lực tới nút chia cho chiều dài phần tử mà tải trọng đang di chuyển qua. Nguyên tắc xây dựng hàm tải trọng tác dụng lên 2 nút thứ i và $i+1$ của mô hình được mô tả trên Hình 8. Ví dụ về hàm tải trọng tác dụng lên hai nút 1 ở vị trí đầu dầm và nút 10 ở cách nút 1 là 5 m trong mô hình được thể hiện trên Hình 9. Giá trị biên độ của tải trọng được lấy bằng tải trọng trục bánh xe.

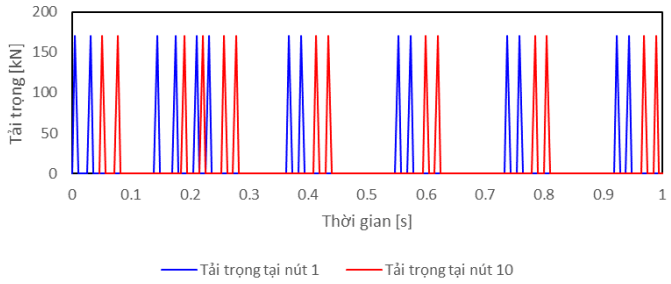
Để tiến hành phân tích động học của cầu đường sắt bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phương pháp phân tích theo lịch sử thời gian, hai thông số quan trọng có ảnh hưởng đến kết quả phân tích của mô hình là bước thời gian Δt và hệ số cản nhớt áp dụng cho mô hình. Hệ số cản nhớt theo tiêu chuẩn Eurocodes [7] có thể giả thiết = 1,0% với cầu bê tông cốt thép ứng suất trước có nhịp lớn hơn 20 m. Bước thời gian Δt thông thường càng nhỏ sẽ cho kết quả tính toán chính xác hơn, tuy nhiên thời gian tính sẽ lâu hơn. Theo khuyến cáo của Viện nghiên cứu đường sắt Châu Âu (ERRI) [18], giá trị này nên lấy nhỏ hơn giá trị nhỏ nhất trong 4 đại lượng:

$$h_1 = 1/(8f_{\max}); \quad h_2 = L_{\min}/(200v); \quad h_3 = L_{\min}/(4nv); \quad h_4 = 0{,}001 \text{ s}$$

trong đó f_{max} là tần số dao động lớn nhất được sử dụng trong phân tích theo mode dao động (modal analysis), n là số mode dao động được sử dụng trong phân tích, v là vận tốc của đoàn tàu. Trong ví dụ này sử dụng bước thời gian Δt = 0,001 s trong phân tích tính toán.



Hình 8. Nguyên tắc thiết lập hàm tải trọng theo thời gian cho các nút thứ i và $i + 1$ [19]

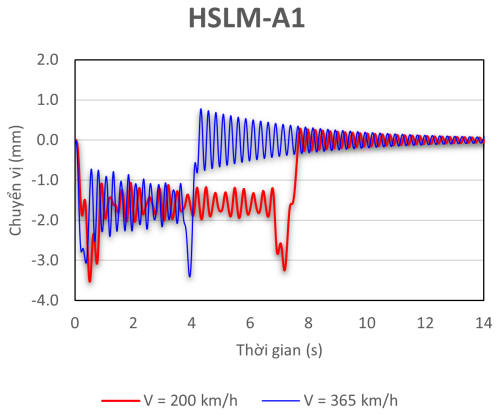


Hình 9. Minh họa xây dựng hàm tải trọng tác dụng lên nút 1 và nút 10 với vận tốc v = 350 km/h trong 1 s đầu tiên

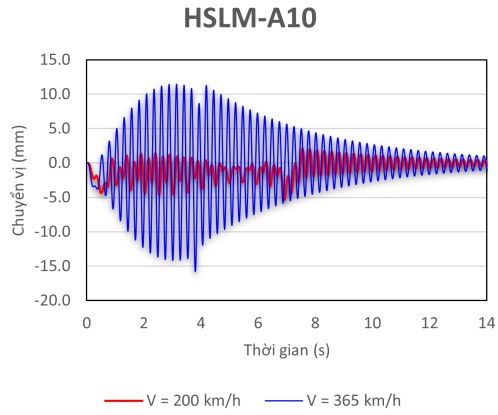
Hệ số cản nhớt có ảnh hưởng lớn đến việc tính toán chuyển vị và gia tốc cực đại của mặt cầu. Theo tiêu chuẩn Eurocodes EN 1991-2:2003 Bảng 6.6, với kết cấu cầu bê tông cốt thép dự ứng lực có nhịp L = 30 m, hệ số cản nhớt được lấy ζ = 1,0%.

d. Kết quả phân tích

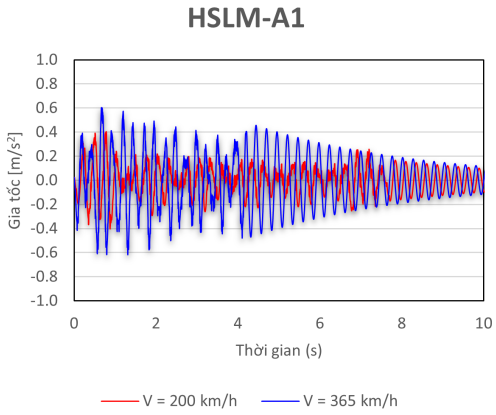
Phân tích động lực học được tiến hành với 10 đoàn tàu HSLM-A1÷A10. Với mỗi mô hình đoàn tàu, tiến hành phân tích ở các tốc độ khác nhau từ 140 km/h (xấp xỉ 40 m/s là tốc độ nhỏ nhất cần tiến hành phân tích động theo Eurocodes) đến 420 km/h (bằng 1,2 lần tốc độ thiết kế V_{tk} = 350 km/h theo Eurocodes) với các bước là 5 km/h. Một số kết quả phân tích dao động của cầu tại vị trí giữa nhịp dưới tác dụng của hoạt tải đoàn tàu HSLM-A1 và A10 được thể hiện trên Hình 10.



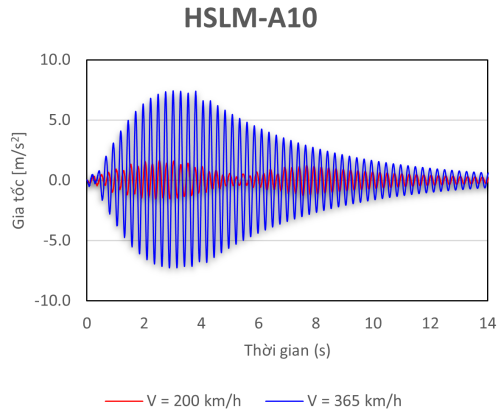
(a) Độ võng tại vị trí giữa nhịp



(b) Độ võng tại vị trí giữa nhịp



(c) Gia tốc tại vị trí giữa nhịp



(d) Gia tốc tại vị trí giữa nhịp

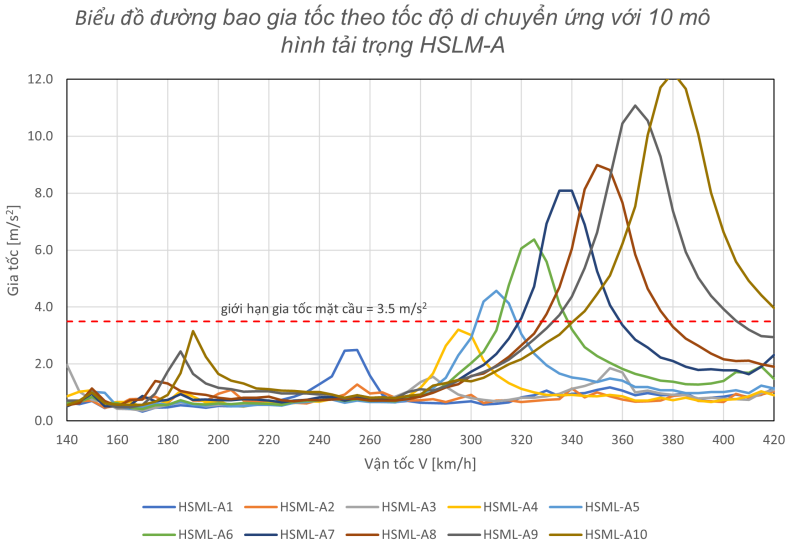
Hình 10. Gia tốc và Độ võng tại vị trí giữa nhịp dưới tác dụng của đoàn tàu HSLM-A1 và A10 chạy qua với vận tốc V = 200 km/h và 365 km/h

Qua kết quả phân tích, có thể thấy với các tốc độ khác nhau của đoàn tàu khi chạy qua, nếu không gây ra hiện tượng cộng hưởng, ứng xử dao động của kết cấu nhịp có thể chia làm 4 giai đoạn. Giai đoạn 1 khi các trục đầu tiên của đoàn tàu chạy vào cầu, chuyển vị tại giữa nhịp và gia tốc của mặt cầu đạt giá trị lớn. Giai đoạn 2 khi các toa tàu khác chạy tiếp vào cầu, kết cấu nhịp dao động ở gia tốc thấp hơn và chuyển vị cũng nhỏ hơn. Giai đoạn 3, khi toa cuối chạy qua cầu, ứng xử của kết cấu nhịp gần giống giai đoạn 1. Giai đoạn 4, sau khi toàn bộ các toa tàu chạy qua cầu, kết cấu tiếp tục dao động với chuyển vị và gia tốc giảm dần như hệ dao động tự do tắt dần.

Tuy nhiên, khi đoàn tàu chạy qua với tốc độ gần tốc độ nguy hiểm có khả năng gây nên dao động cộng hưởng với kết cấu nhịp, ứng xử của kết cấu có sự thay đổi rõ rệt. Giá trị chuyển vị và gia tốc của mặt cầu tăng dần từ khi toa tàu đầu tiên chạy vào cầu và đạt giá trị cực đại khi toa tàu cuối chạy vào cầu. Sau khi toàn bộ các toa tàu chạy qua cầu, kết cấu dao động tự do tắt dần.

Sau khi phân tích động, giá trị gia tốc cực đại theo phương đứng trên mặt cầu cần được kiểm tra so sánh với yêu cầu tới hạn nhằm đảm bảo ổn định cho nền đá ballast và đảm bảo cho bánh của đoàn

tàu luôn tiếp xúc với đường ray. Giá trị gia tốc mặt cầu tới hạn theo Tiêu chuẩn Eurocodes không vượt quá 3,5 m/s^2 với cầu sử dụng nền đá ballast. Kết quả đường bao gia tốc mặt cầu với các tốc độ tàu khác nhau của 10 đoàn tàu HSLM-A1 đến A10 được thể hiện trên Hình 11.



Hình 11. Biểu đồ đường bao gia tốc theo tốc độ di chuyển ứng với 10 mô hình tải trọng HSLM-A1 đến A10

Từ biểu đồ đường bao gia tốc mặt cầu (Hình 11) có thể thấy, với các đoàn tàu có chiều dài khoang cũng như khoảng cách các trục của giá chuyển hướng nhỏ gia tốc mặt cầu nhỏ hơn giá trị khuyến cáo của Tiêu chuẩn Eurocodes với mọi tốc độ của đoàn tàu từ 140 – 420 km/h. Với các đoàn tàu có chiều dài khoang lớn hơn (tàu A5-A10), khi tốc độ của đoàn tàu > 300 km/h hiện tượng cộng hưởng xảy ra làm cho gia tốc của mặt cầu tăng đột ngột và vượt qua giá trị gia tốc giới hạn khuyến cáo là 3,5 m/s^2. Khi đó, một số giải pháp có thể đưa ra như, tiến hành các phân tích động lực học chính xác hơn có xét đến tương tác giữa cầu và tàu (train-bridge interaction); hạn chế tốc độ thiết kế của đoàn tàu xuống dưới 250 km/h (khi đó $V_{\max} = 1{,}2V_{tke} = 300$ km/h); hoặc tăng độ cứng của kết cấu nhịp bằng cách như tăng chiều cao của dầm chủ để đưa vận tốc gây ra cộng hưởng ra ngoài phạm vi khai thác và thiết kế.

4. Kết luận

Bài báo trình bày một số phương pháp phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc được áp dụng theo tiêu chuẩn Eurocode (bộ tiêu chuẩn được tham khảo chính của tiêu chuẩn thiết kế cầu đường sắt của Việt Nam đang được biên soạn), trong đó tập trung vào trình bày phương pháp phân tích trực tiếp theo lịch sử thời gian (time history analysis) để phân tích ứng xử động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc khi có đoàn tàu chạy qua. Phương pháp phân tích này sau đó được áp dụng vào một ví dụ tính toán cụ thể là một kết cấu cầu đường sắt cao tốc đang được liên danh tư vấn TEDI – TRICC - TEDISOUTH đề xuất cho dự án đường sắt cao tốc Bắc Nam.

Qua kết quả phân tích, có thể thấy đối với đường sắt cao tốc, các thông số tải trọng, kích thước và tốc độ của đoàn tàu có ảnh hưởng lớn và trực tiếp đến dao động của kết cấu nhịp. Trong nhiều trường hợp, việc sử dụng phương pháp phân tích tĩnh kết hợp với hệ số xung kích không đảm bảo đưa ra được các giá trị bao cho các hiệu ứng cực đại trong kết cấu. Đặc biệt phương pháp phân tích tĩnh không

phản ảnh được ứng xử của kết cấu khi xảy hiện tượng cộng hưởng. Khi đó việc tiến hành phân tích dao động của công trình là bắt buộc.

Phương pháp phân tích động lực học theo lịch sử thời gian (time history analysis) được minh họa qua bài báo và áp dụng trong một ví dụ cụ thể cho thấy phương pháp này có khả năng phân tích ứng xử của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng di động của đoàn tàu; phân tích được ứng xử của kết cấu khi xảy ra hiện tượng cộng hưởng; từ đó giúp điều chỉnh thiết kế để đáp ứng các yêu cầu của tiêu chuẩn cũng như khai thác.

Tài liệu tham khảo

[1] Yan, B., Dai, G.-L., Hu, N. (2015). Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China. *China Engineering Structures*, 100:707–717.

[2] The International Union of Railways (UIC) (2018). *High Speed Rail: Fast Track to Sustainable Mobility*. UIC Passenger Department.

[3] Hùng, T. V., Sơn, V. T. (2020). Một số vấn đề mới trong tính toán thiết kế cầu nhịp nhỏ và vừa cho đường sắt cao tốc. *Tạp chí Giao thông vận tải*, (12):68–72.

[4] Yang, Y.-B., Wu, Y. S., Yao, Z. (2004). *Vehicle-bridge Interaction Dynamics: With Applications to High-speed Railways*. World Scientific.

[5] He, X., Wu, T., Zou, Y., Chen, Y. F., Guo, H., Yu, Z. (2017). Recent developments of high-speed railway bridges in China. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(12):1584–1595.

[6] Zhou, E., Hu, S., Ke, Z., Niu, B. (2012). Consideration for Development of High-Speed Rail Bridge Design Standards. *Proceeding of AREMA 2012 Annual Conference*.

[7] BS EN 1991-2:2003. *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. BSI (British Standards Institution)/CEN (European Committee for Standardization).

[8] BS EN 1990:2002. *Eurocode - Basis of structural design*. BSI (British Standards Institution)/CEN (European Committee for Standardization).

[9] Timoshenko, S. P. (1922). On the forced vibrations of bridges. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 43(257):1018–1019.

[10] Jeffcott, H. H. (1929). On the vibration of beams under the action of moving loads. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 8(48):66–97.

[11] Frỳba, L. (1972). *Vibration of solids and structures under moving loads*. Noordhoff International Publishing, Groningen, The Netherlands.

[12] Ting, E. C., Genin, J., Ginsberg, J. H. (1974). A general algorithm for moving mass problems. *Journal of Sound and Vibration*, 33(1):49–58.

[13] Sadiku, S., Leipholz, H. H. E. (1987). On the dynamics of elastic systems with moving concentrated masses. *Ingenieur-Archiv*, 57(3):223–242.

[14] Stanišić, M. M. (1985). On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses. *Ingenieur-Archiv*, 55(3):176–185.

[15] Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of structures. theory and applications to*. Pearson Prentice Hall.

[16] Gore, P., Gohil, N., Bharathi, S., Dhara, S., Jadhav, P. (2017). *Structural Analysis II*. MIDAS Research & Development Centre India.

[17] Liên danh tư vấn TEDI-TRICC-TEDIS (2019). *Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam*.

[18] ERRI D214 (e) (1999). *Ponts-Rails pour vitesses > 200 km/h; Final report - Part B: Proposition de fiche UIC 776-2R*. European Rail Research Institute (ERRI).

[19] Alfaras, P. (2018). *Dynamic Analysis of High Speed Rail Bridges (HS2)*.