



RAIL-BRIDGE INTERACTION ACCORDING TO UIC 774-3: STAGED ANALYSIS USING A MULTI-NONLINEAR ELASTIC LINK MODEL

Tran Quoc Khanh¹, Vu Ba Duc², Ha Minh Duc², Phi Dinh Son², Nguyen Cong Thanh², Nguyen Thi Cam Nhung^{2,*}

¹Khang Nguyen Infrastructure Construction Investment Joint Stock Company, No 102 Nguyen Dinh Hoan Street, Hanoi, Vietnam

²University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 05/03/2026

Revised: 30/03/2026

Accepted: 13/04/2026

Published online: 15/04/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.3.2>

* *Corresponding author*

Email: ncnhung@utc.edu.vn; Tel: +84947610939

Abstract. The rail-bridge interaction simulation method for Continuous Welded Rail (CWR) is developed based on the UIC 774-3 standard, employing a multilinear elastic link model to represent the coupling between the rail and the ballast layer through the rail fastening system. Two analytical approaches are implemented: (1) Separate Nonlinear Analysis and (2) Staged Analysis, aimed at simulating the actual state of the bridge-rail system under the combined effects of thermal loading, train loading (comprising braking and traction forces), and variations in ballast stiffness. The benchmark models prescribed by UIC 774-3 are adopted to validate the proposed structural analysis framework. The results demonstrate that the Staged Analysis method accurately captures the cumulative nature of thermal deformation and the evolution of ballast stiffness, yielding discrepancies of less than 5% relative to the standard reference values. In contrast, the Separate Nonlinear Analysis tends to overestimate the longitudinal stress in the rail, particularly when thermal and train loads act simultaneously at the same location along the rail. This study confirms the effectiveness and suitability of the multilinear elastic link model for simulating rail-bridge interaction, and further underscores the necessity of adopting a staged analysis procedure to accurately represent the progressive development of internal forces in the rail for modern railway infrastructure.

Keywords: UIC 774-3; Continuous Welded Rail (CWR); rail-bridge interaction; multilinear elastic link model.

@ 2026 University of Transport and Communications



PHÂN TÍCH TƯƠNG TÁC RAY-CẦU THEO TIÊU CHUẨN CỦA LIÊN MINH ĐƯỜNG SẮT QUỐC TẾ (UIC 774-3) SỬ DỤNG LIÊN KẾT ĐÀN HỒI ĐA TUYẾN TÍNH

Trần Quốc Khánh¹, Vũ Bá Đức², Hà Minh Đức², Phí Đình Sơn², Nguyễn Công
Thành², Nguyễn Thị Cẩm Nhung^{2,*}

¹Công ty cổ phần đầu tư và Xây dựng hạ tầng Khang Nguyên, Số 102 Nguyễn Đình Hoàn, Hà Nội, Việt Nam.

²Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 05/03/2026

Ngày nhận bài sửa: 30/03/2026

Ngày chấp nhận đăng: 13/04/2026

Ngày xuất bản Online: 15/04/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.3.2>

* Tác giả liên hệ

Email: ncnhung@utc.edu.vn; Tel: +84947610939

Tóm tắt. Phương pháp mô phỏng tương tác ray-cầu đối với đường ray hàn liên tục (Continuous Welded Rail-CWR) dựa trên tiêu chuẩn UIC774-3 và mô hình liên kết đàn hồi đa tuyến tính dùng để mô phỏng liên kết giữa ray và lớp đá ba lát thông qua hệ kẹp ray. Hai phương pháp phân tích gồm: (1) phân tích phi tuyến riêng biệt (Separate Nonlinear Analysis) và (2) phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) được thực hiện để mô phỏng trạng thái thực của hệ cầu-ray trong quá trình chịu tải nhiệt, tải đoàn tàu (tăng tốc và giảm tốc) và sự thay đổi độ cứng của lớp ba-lát. Các mô hình thử nghiệm theo UIC774-3 được sử dụng để kiểm chứng mô hình phân tích kết cấu. Kết quả chỉ ra rằng phương pháp phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) mô phỏng đúng bản chất tích lũy biến dạng do nhiệt và sự thay đổi độ cứng của lớp đá ba lát, cho sai số nhỏ hơn 5% so với giá trị tiêu chuẩn. Trong khi đó, phương pháp phân tích phi tuyến (Separate nonlinear analysis) có xu hướng đánh giá cao ứng suất dọc trong ray, đặc biệt khi tải nhiệt và tải tàu cùng tác động lên cùng vị trí ray. Nghiên cứu khẳng định tính hiệu quả của việc sử dụng liên kết đàn hồi đa tuyến tính là phù hợp để mô phỏng tương tác ray-cầu, đồng thời việc phân tích theo giai đoạn là cần thiết để phản ánh đúng sự phát triển của nội lực trong ray đối với các công trình đường sắt hiện đại

Từ khóa: UIC 774-3; Ray hàn liền (CWR); Tương tác Ray và Cầu; Mô hình liên kết đàn hồi đa tuyến tính.

@ 2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, sự phát triển của các tuyến đường sắt đô thị và đường sắt tốc độ cao đặt ra yêu cầu ngày càng cao về độ tin cậy và an toàn của kết cấu cầu [1], [2]. Các công trình cầu đường sắt hiện đại thường chịu tác động đồng thời của tải trọng động đoàn tàu, nhiệt độ, độ lún và biến dạng hình học tích lũy theo thời gian [3], [4]. Tương tác giữa đường ray và cầu (Rail-Structure Interaction-RSI) là vấn đề quan trọng trong thiết kế cầu đường sắt hiện đại, đặc biệt đối với hệ thống đường ray hàn liên tục (CWR). Do các thanh ray liên tục không có khe hở giãn nở, các biến dạng do nhiệt, tải trọng đoàn tàu và sự dịch chuyển của kết cấu cầu đều truyền vào ray. Nếu không được kiểm soát, tương tác này có thể dẫn đến: (1) Ứng suất kéo vượt giới hạn trong ray \rightarrow gãy ray; (2) Ứng suất nén vượt giới hạn \rightarrow phình ray (Mất ổn định hình học của ray, bục ray); (3) Phá hoại lớp đá ba lát; (4) Mất ổn định tại đầu cầu và giảm an toàn chạy tàu.

Trong các cầu đường sắt hiện đại, nhất là cầu liên tục bê tông cốt thép hoặc dầm thép liên hợp bản bê tông, chuyển vị nhiệt của dầm và độ võng do hoạt tải tạo ra biến dạng tương đối đáng kể tại vị trí liên kết giữa ray và lớp ba lát [5]. Khi sự chênh lệch biến dạng này bị cản trở bởi lớp ba lát, các lực dọc trong ray có thể tăng lên gấp nhiều lần trạng thái tự do, đặc biệt khi tải nhiệt và tải trọng đoàn tàu tác dụng đồng thời.

Một trong những thách thức lớn nhất của phân tích tương tác ray-cầu là mô phỏng đúng ứng xử đàn hồi đa tuyến của ray và lớp ba lát, do ba lát có hai trạng thái cơ bản: (i) Unloaded state - khi không có tàu: độ cứng cản chuyển vị dọc tương đối nhỏ và (ii) Loaded state- khi có đoàn tàu: lớp ba lát bị nén chặt \rightarrow độ cứng cản chuyển vị dọc tăng lên đáng kể [6], [7]. Vì vậy mô hình ba lát tuyến tính thường đánh giá sai nội lực trong ray. Khuyến nghị UIC 774-3 cho phép sử dụng đường cong đàn hồi đa tuyến tính để mô phỏng sự biến đổi độ cứng này.

Tương tác ray-cầu đã được nghiên cứu từ những năm 1970 khi ray hàn liên (CWR) bắt đầu được sử dụng rộng rãi trên các tuyến đường sắt tốc độ cao [8]. Các nghiên cứu kinh điển tập trung vào: cơ chế phát sinh lực dọc trong ray [9], ổn định phương dọc của CWR [10] và ứng xử ma sát-phi tuyến của lớp ba lát [11]. Những công trình này cho thấy: ứng suất dọc trong ray chủ yếu phát sinh từ sự khác biệt chuyển vị giữa ray và cầu, trong đó lớp ba lát đóng vai trò quan trọng nhất trong việc quyết định biên độ lực dọc trong ray.

Các nghiên cứu sau năm 2000 tập trung vào mô hình ballast phi tuyến, vì ballast có tính ma sát trượt và phụ thuộc vào mức độ nén chặt. Một số hướng tiếp cận tiêu biểu bao gồm: mô hình bilinear (Song tuyến) hoặc trilinear (Đa tuyến) mô phỏng quan hệ lực-chuyển vị dọc [12]; mô hình ma sát Coulomb cải tiến tích hợp ứng xử suy giảm (degradation) khi tàu chạy nhiều lần [13] và mô hình liên kết phi tuyến trong phần mềm phân tử hữu hạn (FEA) cho kết cấu cầu dài [14]. Các kết quả đều chỉ ra rằng không thể sử dụng độ cứng lớp ba lát không đổi để mô phỏng ứng xử thực tế của CWR.

Khuyến nghị UIC 774-3 [15] là tài liệu được sử dụng rộng rãi nhất để đánh giá tương tác ray-cầu. Tiêu chuẩn này khuyến nghị mô phỏng ứng xử của lớp ba lát bằng đường đàn hồi song tuyến (bilinear stiffness) với hai trạng thái khác nhau, gồm unloaded khi không có đoàn tàu tác dụng và loaded khi lớp ba lát bị nén chặt dưới tải trọng tàu. Ngoài ra, UIC đề xuất hệ thống các mô hình kiểm chứng chuẩn, trong đó phổ biến nhất là E1-3 (Đoàn tàu di chuyển từ từ hướng có gối cố định sang hướng có gối di động) và E4-6 (Đoàn tàu chuyển động từ hướng có gối di động sang gối cố định), nhằm đối chiếu độ chính xác của mô hình phân tích với sai số cho phép trong khoảng $\pm 10\%$. UIC 774-3, nhấn mạnh rằng tương tác ray-cầu cần được coi là trạng thái giới hạn sử dụng (SLS) đối với cầu và trạng thái giới hạn cường độ (ULS) đối với ray, đòi hỏi phải mô phỏng chính xác biến dạng tương đối giữa ray và kết cấu cầu.

Nhiều nghiên cứu đã áp dụng hoặc mở rộng bộ tiêu chuẩn này trong các bài toán tương tác ray-cầu. Zhai và các cộng sự [16] đã trình bày một tổng quan rất chi tiết về mô hình tương tác động tàu-đường-cầu, nhấn mạnh vai trò của mô hình kết cấu đường và đặc biệt là mô hình tương tác track-bridge trong việc dự đoán chính xác ứng xử động của hệ thống. Strauss và cộng sự [17] đã phát triển mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến cho tương tác CWR-cầu, trong đó độ cứng liên kết dọc giữa ray và kết cấu cầu được hiệu chỉnh theo kết quả đo đạc hiện trường, cho thấy cần xem xét rõ sự thay đổi độ cứng khi cầu chịu nhiệt và khi có đoàn tàu chạy qua. Ở góc độ mô hình hóa lớp ba lát, Tahiri [11] đã phân tích phi tuyến ảnh hưởng của lớp ba lát và liên kết ba lát-mặt cầu đến cộng hưởng tàu-cầu, chứng minh rằng giả thiết lớp ba-lát tuyến tính có thể dẫn đến đánh giá sai biên độ đáp ứng và nội lực trong cầu. Hou và đồng nghiệp [18] đề xuất và kiểm chứng một mô hình tàu-đường-cầu với điều kiện tựa phi tuyến tại vùng tiếp giáp cầu-nền đắp, trong đó sự phi tuyến của liên kết ba lát được mô tả bằng các phần tử đàn hồi-cản phi tuyến, cho kết quả phù hợp tốt với đo đạc thực địa. Gần đây, König và Adam [19] xây dựng mô hình tương tác động có xét riêng tương tác dọc track-bridge trên cầu tốc độ cao, xem xét hiệu ứng mềm dẻo và phi tuyến của lớp ba lát trong cả phương đứng và phương dọc, qua đó khẳng định tầm quan trọng của việc mô hình hóa chính xác độ cứng dọc của lớp ba lát khi đánh giá ứng suất dọc trong ray hàn liên tục.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào ứng xử của CWR và tương tác ray-cầu, vẫn tồn tại những khoảng trống đáng kể trong lĩnh vực này [20]. Trước hết, các công trình hiện nay hầu như chưa thực hiện so sánh trực tiếp giữa hai phương pháp phân tích riêng biệt (Separate Analysis) và phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) trên cùng một mô hình kiểm chứng chuẩn theo UIC, dẫn đến sự thiếu nhất quán khi đánh giá mức độ chính xác của từng phương pháp. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của sự thay đổi độ cứng của lớp ba lát từ trạng thái không tải (unloaded) sang có tải (loaded), đây yếu tố được xem là then chốt trong tiêu chuẩn UIC774-3 là chưa được phân tích sâu để xác định sai số và mức độ nhạy của mô hình. Hơn nữa, các phân tích thực nghiệm dựa trên các trường hợp thực nghiệm E1-3 và E 4-6 của UIC tại Việt Nam gần như chưa xuất hiện, làm giảm khả năng đối chiếu kết quả mô phỏng với tiêu chuẩn gốc và cản trở việc xây dựng các hướng dẫn thiết kế phù hợp với điều kiện Việt Nam. Những khoảng trống này cho thấy sự cần thiết của các nghiên cứu tập trung vào mô hình hóa lớp ba lát phi tuyến, đánh giá chi tiết từng phương pháp phân tích và thực hiện các bài kiểm chứng tiêu chuẩn để nâng cao độ tin cậy trong thiết kế cầu đường sắt hiện đại [21].

Nghiên cứu này thông qua mô hình kiểm chứng UIC774-3 (E1-3 và E4-6) đánh giá hiệu quả của phương pháp phân tích theo giai đoạn sử dụng liên kết đàn hồi đa tuyến tính (Multi-Nonlinear Elastic Link) trong mô phỏng tương tác ray-cầu. Các đóng góp chính của nghiên cứu này bao gồm: (1). Xây dựng mô hình tương tác ray-cầu theo UIC774-3 với liên kết đàn hồi đa tuyến tính phản ánh đúng ứng xử của lớp ba lát; (2). So sánh hai phương pháp phân tích: riêng rẽ và theo giai đoạn → chỉ ra sai số và mức độ phù hợp với tiêu chuẩn UIC; (3). Thực hiện đầy đủ hai bài kiểm chứng chuẩn E1-3 và E4-6, đánh giá độ tin cậy của mô hình.; (4). Khẳng định rằng phương pháp phân tích theo giai đoạn cho sai số nhỏ hơn 5%, đảm bảo yêu cầu UIC là $\pm 10\%$.

Đề xuất phương pháp mô hình hóa phù hợp cho các dự án đường sắt Việt Nam trong tương lai.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Lý thuyết về tương tác ray – cầu theo UIC774-3

Theo tiêu chuẩn UIC 774-3, tương tác ray-cầu trong hệ đường ray hàn liên tục (CWR)

chủ yếu phát sinh từ sự chênh lệch biến dạng dọc giữa ray và kết cấu nhịp khi chịu tác động của nhiệt độ, tải trọng đoàn tàu và chuyển vị hình học của cầu. Do CWR không có khe co giãn, sự giãn nở của ray bị kìm hãm bởi lớp ba lát và các liên kết, dẫn đến nội lực dọc tăng đáng kể. Ứng suất nhiệt trong ray được xác định theo quan hệ tuyến tính:

$$\sigma_T = E_r \alpha_r \Delta T \quad (1)$$

Trong đó E_r là mô đun đàn hồi của ray, α_r là hệ số giãn nở nhiệt và ΔT là độ biến thiên nhiệt độ. Quan hệ này cho thấy biên độ nhiệt độ là yếu tố chi phối nội lực trong ray, phù hợp với các kết quả thực nghiệm khi ứng suất nhiệt có thể chiếm đến 70–80% tổng nội lực dọc. Bên cạnh nhiệt độ, tải trọng dọc do phanh hoặc tăng tốc của đoàn tàu cũng tạo ra lực nén hoặc kéo truyền xuống ray. UIC quy định lực phanh phân bố đều với cường độ chuẩn $q_b=20\text{kN/m}$. Lực tổng tác dụng lên ray trên chiều dài đoàn tàu L được tính bởi:

$$F_b = q_b L \quad (2)$$

Lực này được truyền qua hệ bánh xe-ray-ba lát, vì vậy mức độ phân bố nội lực giữa ray và kết cấu cầu phụ thuộc vào độ cứng dọc của lớp ba lát. Khi lớp ba lát bị nén chặt dưới tải tàu, độ cứng tăng lên đáng kể, làm thay đổi phân bố lực trong hệ. Ngoài ra, tải trọng thẳng đứng của đoàn tàu tạo ra độ võng nhịp và góc xoay tại gối cầu, từ đó sinh ra chuyển vị dọc tại đầu dầm. Thành phần chuyển vị gây lực dọc này có thể được xấp xỉ bằng:

$$\Delta u = h\theta \quad (3)$$

Với h là chiều cao từ trục dầm đến ray và θ là góc xoay đầu nhịp.

Vai trò quan trọng của độ cứng của lớp đá ba lát k_b thể hiện rõ trong công thức tính lực dọc tương ứng truyền vào ray:

$$F_v = k_b \Delta u \quad (4)$$

Một trong các đặc trưng cơ học quan trọng nhất của tương tác ray-cầu là phi tuyến của lớp ba lát. Lớp ba lát không có độ cứng không đổi mà thay đổi theo điều kiện tải: thấp khi không có tàu (unloaded) và cao khi đoàn tàu tác dụng (loaded). Đặc tính phi tuyến này có thể biểu diễn bằng mô hình đàn hồi song tuyến:

$$F(u) = \begin{cases} k_u u, & |u| \leq u_y \\ F_y + k_l (u - u_y), & |u| > u_y \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó $F_y=k_u u_y$ là lực tại điểm chuyển trạng thái; k_u và k_l lần lượt là độ cứng không tải và có tải, còn u_y là biến dạng tại điểm chuyển trạng thái. Khi chuyển vị dọc của ray u còn nhỏ hơn một giá trị ngưỡng u_y , phản lực trong lớp ba lát tăng theo độ cứng nhỏ k_u ; khi vượt qua mức này, lớp ba lát chuyển sang chế độ nén chặt (loaded) với độ cứng lớn hơn k_l .

Mô hình song tuyến cho phép mô phỏng chính xác hiện tượng lớp ba lát bị nén chặt khi đoàn tàu đi qua, đồng thời phù hợp với khuyến nghị của UIC 774-3. Do sự tồn tại của biến dạng tích lũy, các mô hình phân tích theo giai đoạn trở nên cần thiết để mô phỏng đúng trình tự tác động: nhiệt độ gây biến dạng trước, sau đó tải trọng tàu mới tác dụng lên hệ kết cấu đã bị biến dạng sẵn. Điều này tạo ra khác biệt lớn so với phương pháp phân tích riêng biệt, khi giả định các tải trọng độc lập và chỉ cộng chồng kết quả. Khi xét theo giai đoạn, trạng thái biến dạng ban đầu u_T do nhiệt độ được giữ lại, và lực dọc tổng hợp trong ray được hình thành từ cả ba thành phần chính:

$$\sigma_{total} = \sigma_T + \sigma_b + \sigma_v \quad (6)$$

qua đó phản ánh đúng bản chất tương tác phi tuyến giữa ray, lớp ba lát và cầu.

2.2. Ứng xử phi tuyến của lớp ba lát và mô hình liên kết đa tuyến tính

Lớp ba lát đóng vai trò quan trọng nhất trong việc quyết định mức độ tương tác dọc giữa ray và kết cấu cầu. Khác với các liên kết đàn hồi tuyến tính truyền thống, ba lát có bản chất phi tuyến, phụ thuộc phần nhiều vào trạng thái tải trọng của đường ray. Khi không có đoàn tàu tác dụng, lớp ba lát chỉ tiếp xúc nhẹ với đáy ray và có độ cứng dọc nhỏ; nhưng khi đoàn tàu chạy qua, tải trọng bánh xe làm lớp ba lát nén chặt lại, dẫn đến sự tăng đáng kể độ cứng và sức kháng dọc. Hiện tượng thay đổi độ cứng này được UIC774-3 mô tả thông qua hai trạng thái làm việc: Không tải và có tải.

Ứng xử phi tuyến của lớp ba lát thường được mô tả bằng quan hệ lực-chuyển vị dạng song tuyến (bilinear) như thể hiện trong phương trình (5). Trong bài toán tương tác ray-cầu, lớp ba lát còn đóng vai trò ràng buộc biên dạng tương đối giữa ray và cầu. Nếu ký hiệu Δu là chuyển vị tương đối dọc giữa ray và kết cấu nhịp, lực dọc do lớp ba lát truyền vào ray có thể xấp xỉ theo:

$$F_b = k_{eff} \Delta u \quad (7)$$

Trong đó k_{eff} là độ cứng lớp ba lát tương ứng với từng trạng thái trong quá trình phân tích. Việc giá trị k_{eff} thay đổi theo tải trọng khiến hệ phương trình cân bằng lực dọc của ray trở thành bài toán phi tuyến, đặc biệt khi đoàn tàu dịch chuyển trên cầu và liên tục làm lớp ba lát chuyển qua lại giữa các trạng thái.

Trong mô phỏng bằng phần mềm Midas Civil sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn, ứng xử phi tuyến này được biểu diễn thông qua liên kết đàn hồi đa tuyến tính (Multi-Nonlinear Elastic Link). Liên kết loại này cho phép khai báo toàn bộ đường cong lực-chuyển vị của lớp ba lát, từ trạng thái không tải đến có tải, và tự động cập nhật độ cứng theo từng bước tải. Điều này đặc biệt quan trọng khi phân tích theo giai đoạn, bởi lớp ba lát ban đầu làm việc ở độ cứng nhỏ trong giai đoạn chịu tải nhiệt, nhưng chuyển sang độ cứng lớn khi đoàn tàu chạy qua. Sự thay đổi độ cứng theo trình tự này có ảnh hưởng trực tiếp đến lực dọc trong ray, là yếu tố mà phương pháp phân tích riêng biệt không thể mô tả chính xác.

Mô hình liên kết đàn hồi đa tuyến tính không chỉ tái hiện đúng bản chất phi tuyến của lớp ba lát mà còn giúp mô phỏng chính xác quá trình chuyển trạng thái của vật liệu dưới tác động của tàu và nhiệt độ, qua đó nâng cao độ tin cậy của mô phỏng tương tác ray-cầu theo Khuyến nghị UIC 774-3.

2.3. Hai phương pháp phân tích theo UIC 774-3

Trong đánh giá tương tác ray-cầu theo Khuyến nghị UIC 774-3, hai phương pháp phân tích thường được sử dụng là phân tích phi tuyến riêng biệt (Separate Nonlinear Analysis) và phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis). Mặc dù cả hai phương pháp đều dựa trên cùng một cơ sở lý thuyết về cân bằng lực dọc và tương thích biến dạng giữa ray và cầu, cách thức mô phỏng trình tự tác động và ứng xử của lớp ba lát lại khác nhau đáng kể, dẫn đến sự chênh lệch rõ rệt về kết quả nội lực trong ray.

Trong phân tích riêng biệt, mỗi loại tải trọng bao gồm nhiệt độ, lực phanh và tải trọng thẳng đứng của đoàn tàu được áp dụng lên mô hình ở các lần phân tích độc lập. Ứng suất hoặc lực dọc trong ray thu được từ từng phân tích riêng lẻ sau đó được cộng chồng theo nguyên lý tuyến tính để ước tính phản ứng tổng cộng. Phương pháp này giả định rằng lớp ba lát làm việc với một độ cứng không đổi và không xét đến biến dạng tích lũy xuất hiện trước khi các tải trọng tiếp theo được áp dụng. Điều này dẫn đến sự sai khác so với trạng thái thực tế của hệ kết cấu, bởi biến dạng nhiệt trong ray thường xuất hiện trước và gây ra một trường biến dạng sơ cấp. Khi tải trọng tàu tác dụng sau đó, lớp ba lát không còn ở trạng thái ban đầu mà đã bị biến

dạng trước. Tuy nhiên, phương pháp phân tích riêng biệt lại không mô phỏng được trạng thái này. Do đó, nội lực tổng cộng được tính toán theo cách cộng chồng tuyến tính có xu hướng đánh giá cao ứng suất trong ray, đặc biệt trong các trường hợp mà tải nhiệt và tải tàu cùng tác dụng lên cùng một vị trí trong cùng thời điểm.

Một cách tiếp cận chính xác hơn là phân tích theo giai đoạn, cho phép mô phỏng đúng trình tự thực tế mà hệ cầu-ray phải chịu tải. Trong bước đầu tiên, mô hình được áp dụng tải nhiệt để xác định biến dạng và nội lực ban đầu trong khi lớp ba lát vẫn ở trạng thái không tải. Biến dạng nhiệt này được duy trì như điều kiện ban đầu của hệ khi bước sang giai đoạn tiếp theo. Điều này có thể mô tả thông qua mô hình tương thích biến dạng:

$$u_{total} = u_T + u_{train} \quad (8)$$

Trong đó u_T là biến dạng do nhiệt và u_{train} là biến dạng bổ sung do tải tàu. Ở giai đoạn kế tiếp, khi đoàn tàu đi qua, lớp ba lát được chuyển sang trạng thái có tải với độ cứng lớn hơn, dẫn đến sự thay đổi quan hệ lực- chuyển vị và phân phối lại lực dọc trong ray. Nhờ mô phỏng chính xác sự chuyển trạng thái này, phương pháp phân tích theo giai đoạn cho phép phản ánh đúng bản chất phi tuyến của lớp ba lát khi chịu tác động lặp lại. Nội lực tổng cộng trong ray theo phương pháp phân tích theo giai đoạn được xác định bằng:

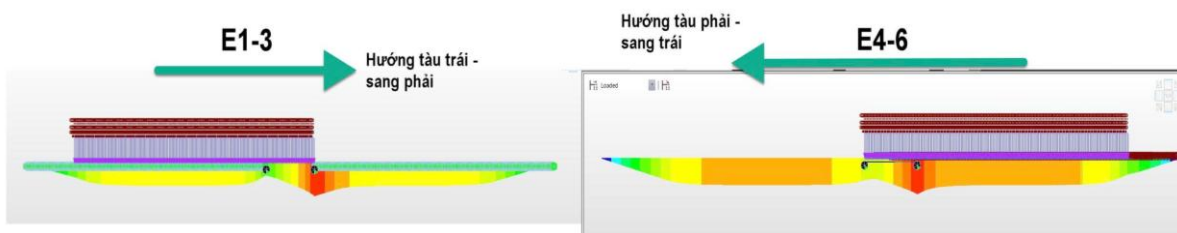
$$\sigma_{total} = \sigma_T + \sigma_b + \sigma_v \quad (9)$$

Trong đó σ_T , σ_b và σ_v lần lượt là ứng suất do nhiệt, lực phanh và tải trọng thẳng đứng của đoàn tàu. Khác với phương pháp phân tích riêng biệt, sự cộng dồn này không phải phép cộng tuyến tính đơn thuần, mà bao gồm cả ảnh hưởng của trạng thái biến dạng ban đầu và thay đổi độ cứng của lớp ba lát theo từng giai đoạn.

Nhờ mô phỏng được quá trình tích lũy biến dạng và sự thay đổi độ cứng của lớp ba lát, phương pháp phân tích theo giai đoạn thường cho kết quả gần sát nhất với các giá trị tham chiếu trong khuyến nghị UIC 774-3, với sai số thường chỉ trong khoảng 3–5%. Trong khi đó, phương pháp phân tích riêng biệt có xu hướng sai khác lớn hơn, đặc biệt trong các trường hợp kết hợp tải trọng do nhiệt và tải trọng tàu. Vì vậy, đối với các cầu dài hoặc các tuyến đường sắt tốc độ cao, phương pháp phân tích theo giai đoạn được xem là phương pháp phù hợp và đáng tin cậy hơn để mô phỏng tương tác ray-cầu.

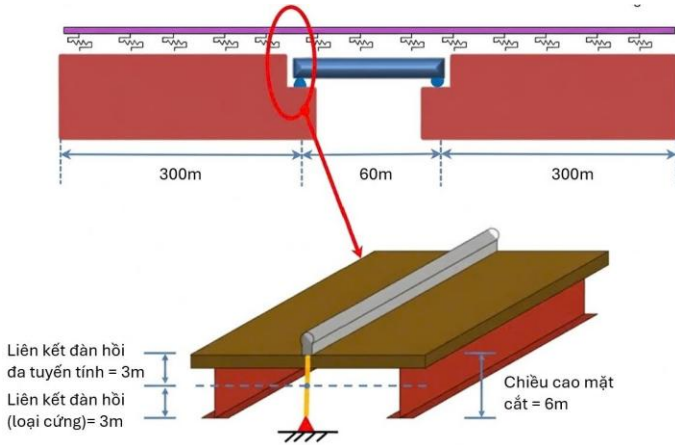
3. MÔ HÌNH KIỂM CHỨNG E1-3 VÀ E4-6 THEO KHUYẾN NGHỊ UIC 774-3

Để đánh giá độ chính xác của mô hình phân tích tương tác ray-cầu và kiểm chứng khả năng mô phỏng theo khuyến nghị UIC 774-3, nghiên cứu sử dụng hai nhóm kịch bản chuẩn là E1-3 (Đoàn tàu chuyển động từ hướng có gố cố định sang hướng có gố di động) và E4-6 (Đoàn tàu chuyển động từ hướng có gố di động sang gố cố định), tương ứng với hai hướng chuyển động của đoàn tàu qua cầu nhằm đánh giá sự khác biệt trong phân bố lực dọc khi tải trọng thay đổi vị trí tương đối giữa ray và kết cấu cầu (Hình 1). Đây là các mô hình kiểm chứng được UIC khuyến nghị nhằm xem xét sai số nội lực dọc trong ray, với mức sai số cho phép khoảng $\pm 10\%$ so với giá trị chuẩn.

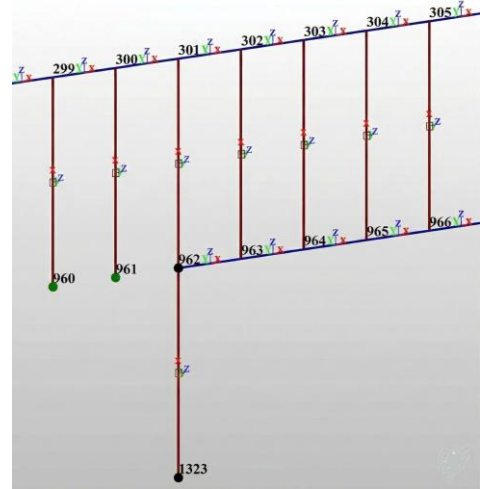


Hình 1. Sơ đồ tải trọng và hướng di chuyển của hoạt tải E1-3 và E4-6.

Mô hình hệ cầu-ray-nền đất được xây dựng với tổng chiều dài 660m, gồm hai đoạn đường ray trên nền đất dài 300m mỗi bên và một nhịp cầu dài 60m ở giữa. Ray được mô phỏng bằng phần tử thanh, liên kết với mặt cầu thông qua Rigid Links cao khoảng 3m, thể hiện đúng vị trí tương quan giữa tim ray và dầm cầu. Dầm cầu sử dụng đặc trưng tiết diện Deck Type 1 (Hình 2).

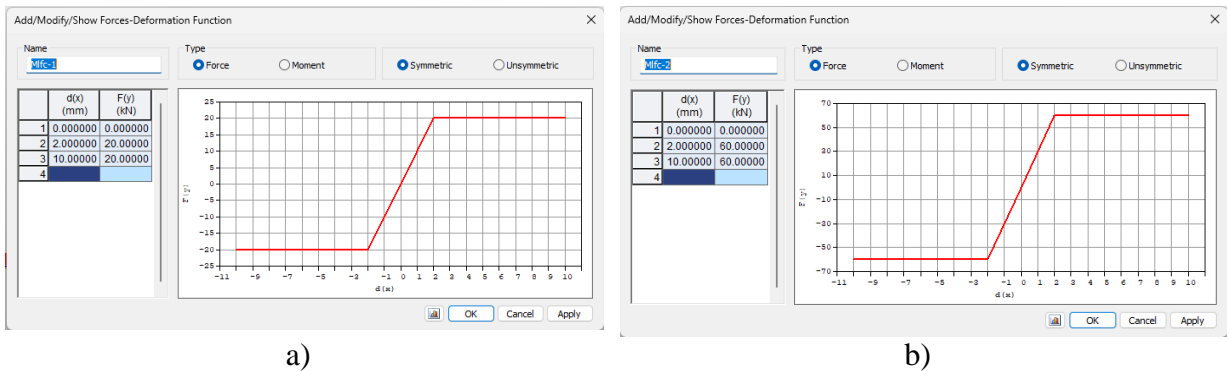


Hình 2. Đặc trưng hình học và cơ học của dầm cầu Deck Type 1



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn ray-cầu-nền đất.

Phần mềm sử dụng phân tích kết cấu là phiên bản Midas Civil 2025 (Full Version) có bản quyền với số PID (Product ID MUENCIV0002237). Sơ đồ tải trọng là ray có chiều dài 960 được đặt trên nền đường thông qua liên kết đàn hồi phương đứng có độ cứng đàn hồi 10^8 kN/m đặt cách nhau 1m, và độ cứng chống chuyển vị dọc đa tuyến tính khi có tải và không có tải như trình bày bên dưới. Tải trọng đoàn tàu theo phương đứng có cường độ 80 kN/m cho chiều dài 300m, lực hãm 20kN/m. Kích thước phần tử khi mô hình tính toán được lựa chọn có chiều dài 1m.



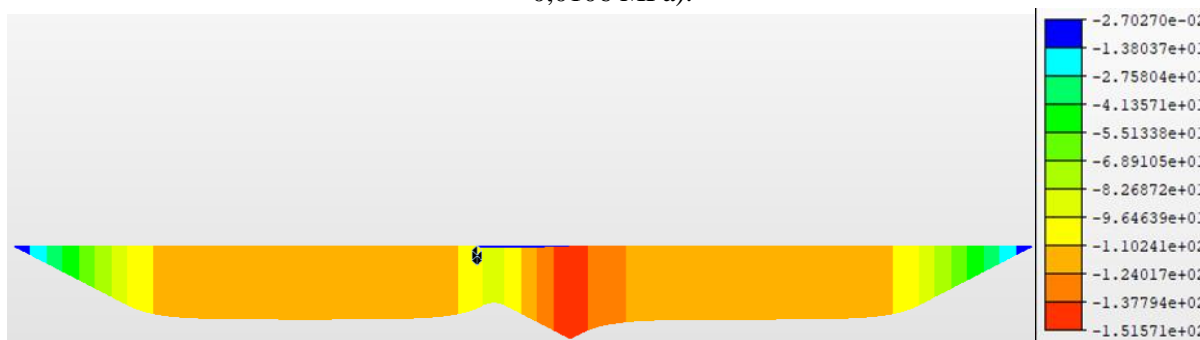
Hình 4. Đường cong lực-chuyển vị cho hệ kẹp ray và lớp ba lát: (a) khi chưa có hoạt tải tàu tác dụng; (b) khi có hoạt tải tàu tác dụng.

Lớp ba lát được mô phỏng bằng các phần tử liên kết đa tuyến tính, phản ánh đúng hai trạng thái không tải và có tải với độ cứng tương ứng là 20 kN/m và 60 kN/m. Việc chuyển đổi độ cứng theo giai đoạn là yếu tố then chốt giúp mô hình thể hiện được bản chất phi tuyến của lớp ba lát. Trong khi đó, nền đất hai bên được mô tả bằng liên kết đàn hồi để bảo đảm phản lực chống dịch chuyển dọc của ray phù hợp với thực tế. Trong cả hai nhóm, tải trọng đoàn tàu được mô phỏng bằng tải trọng thẳng đứng phân bố đều 80kN/m trên chiều dài 300m và tải

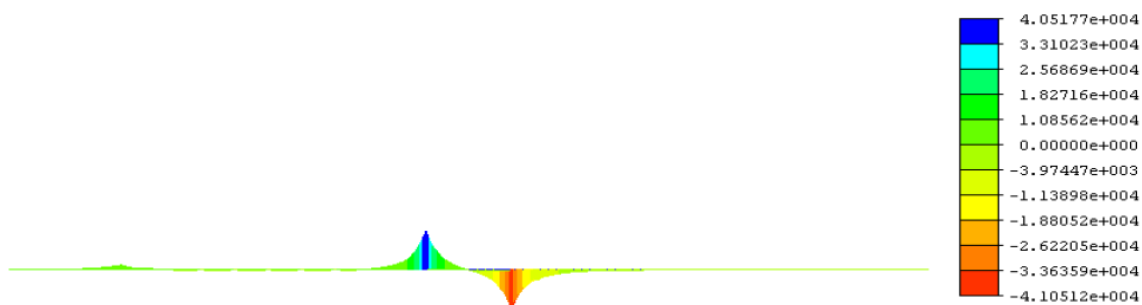
trọng phanh 20kN/m, di chuyển theo từng bước 10m để ghi nhận sự thay đổi liên tục của nội lực trong ray.



Hình 5. Ứng suất dọc trong ray do tải trọng nhiệt độ trong ray (lớn nhất = -119,7 MPa; nhỏ nhất = 0,0106 MPa).



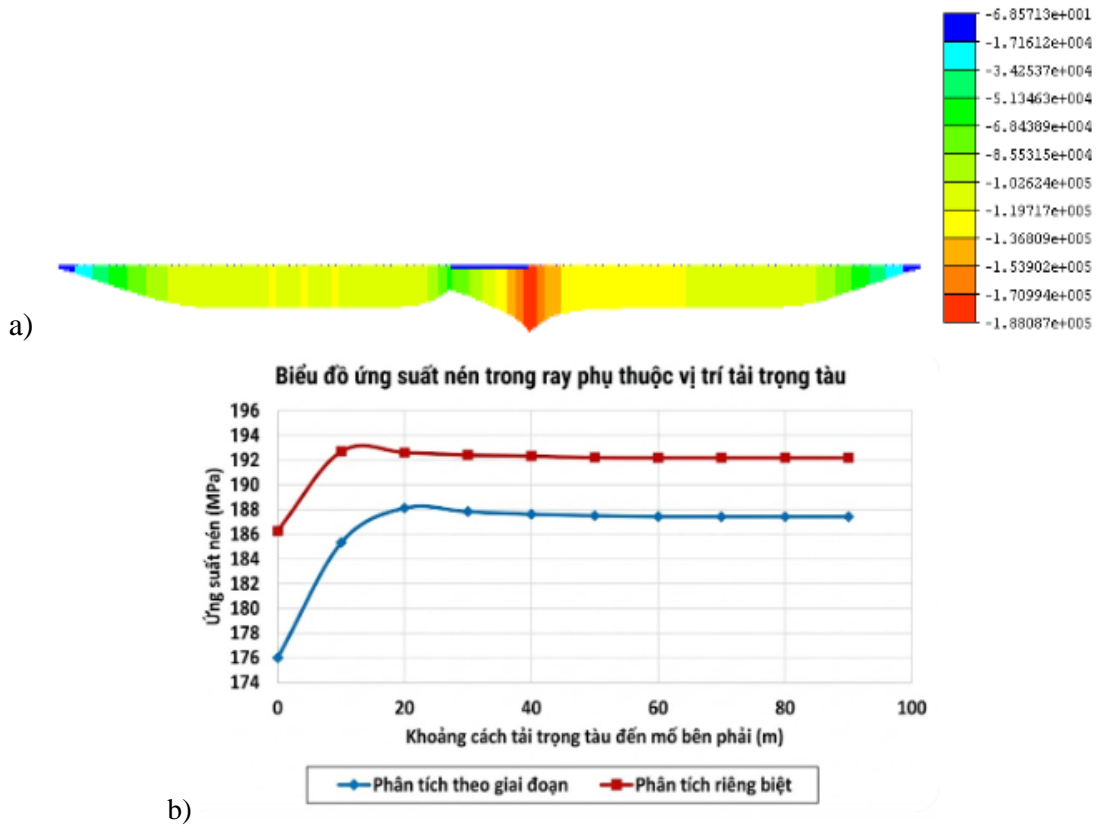
Hình 6. Ứng suất dọc trong ray khi tải nhiệt độ đồng thời cả ray và dầm (lớn nhất = -151,157 MPa; nhỏ nhất = -0,027 MPa).



Hình 7. Ứng suất dọc trong ray do hoạt tải thẳng đứng và hãm phanh (Nén -41,05MPa).

Ray sử dụng cho mô hình phân tích là một kết cấu thông thường với các tham số kết cấu ray: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$: Mô đun đàn hồi của vật liệu thép; $\nu = 0,3$: Hệ số Poisson; $\alpha = 1,14 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$: Hệ số giãn nở nhiệt; $A = 0,0153389 \text{ m}^2$: Diện tích mặt cắt ngang; $I_{yy} = 6,0726 \times 10^{-5} \text{ m}^4$: Mô men quán tính quanh trục y ; $I_{zz} = 1,02091 \times 10^{-6} \text{ m}^4$: Mô men quán tính quanh trục z ; $I_{xx} = 4,33934 \times 10^{-6} \text{ m}^4$: Mô men quán tính xoắn; $A_{sy} = 6,4723 \times 10^{-3} \text{ m}^2$: Diện tích chịu cắt theo phương y ; $A_{sz} = 1,27397 \times 10^{-2} \text{ m}^2$: Diện tích chịu cắt theo phương z .

Mỗi trường hợp được chạy theo cả hai phương pháp phân tích riêng biệt và theo giai đoạn để đánh giá khả năng của các mô hình trong việc tái hiện giá trị tham chiếu của UIC. Kết quả thu được từ từng bước dịch chuyển của tải trọng được so sánh với giá trị chuẩn (benchmark) do UIC 774-3 cung cấp, trong đó ứng suất dọc lớn nhất tại ray được coi là đại lượng chính để đánh giá độ chính xác. Nhờ đó, mô hình không chỉ kiểm chứng được tính đúng đắn của cấu hình phân tích mà còn cho phép xác định mức độ sai lệch của từng phương pháp và đánh giá hiệu quả của mô hình liên kết ba lát phi tuyến.



Hình 8 Mô hình E1-3. a) Ứng suất nén dọc trong ray do tải nhiệt và tàu (Max = -188,09Mpa); b) Ứng suất nén lớn nhất trong ray theo vị trí tàu khi di chuyển từng đoạn 10m

Ở phương pháp phân tích phi tuyến riêng biệt mỗi loại tải trọng bao gồm tải nhiệt, tải thẳng đứng của đoàn tàu và tải phanh dọc được áp dụng độc lập trong các mô hình phân tích riêng. Ứng suất dọc trong ray thu được từ từng trường hợp tải trọng sau đó được cộng chồng tuyến tính để suy ra ứng suất tổng hợp. Phương pháp này giả định hệ kết cấu luôn làm việc ở trạng thái đàn hồi và không xét đến ảnh hưởng của biến dạng tích lũy do tải nhiệt gây ra trước khi đoàn tàu đi vào cầu. Điều này đồng nghĩa với việc lớp ba lát luôn được coi là làm việc với một độ cứng cố định trong suốt quá trình phân tích, bất kể trạng thái có tải hoặc không tải. Do vậy, phương pháp phân tích riêng biệt thường cung cấp kết quả ở mức bảo toàn, nhưng có xu hướng đánh giá cao nội lực trong ray so với thực tế.

Trái lại, phương pháp phân tích theo giai đoạn mô phỏng đúng trình tự làm việc thực của hệ thống theo các giai đoạn liên tiếp. Ở giai đoạn đầu tiên, tải nhiệt được áp dụng để xác định biến dạng dọc ban đầu của ray khi lớp ba lát vẫn ở trạng thái không tải. Sau đó, biến dạng nhiệt này được giữ lại như một trạng thái ban đầu khi bước sang giai đoạn tiếp theo. Khi tải trọng đoàn tàu được áp dụng, lớp ba lát chuyển sang trạng thái có tải với độ cứng lớn hơn, phản ánh đúng khả năng nén chặt của vật liệu và thay đổi trong sức kháng dọc. Nhờ mô phỏng đầy đủ quá trình chuyển trạng thái của lớp ba lát cũng như tính đến biến dạng tích lũy phương pháp này cho phép tái hiện chính xác hơn tương tác dọc giữa ray và kết cấu cầu.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng (UIC774-3) cho thấy tải nhiệt là yếu tố chi phối ứng suất dọc trong ray hàn liên tục. Biên độ biến đổi nhiệt trong ray là $+50^{\circ}\text{C}$ cùng lúc trong kết cấu nhịp là $+35^{\circ}\text{C}$.

4.1 Mô hình E1-3

Khi chỉ xem xét ứng suất nén dọc trong ray do nhiệt độ của ray mà không xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ của kết cấu nhịp thì ứng suất nén lớn nhất trong ray là -119,7 MPa (Hình 5). Khi tiếp tục tăng nhiệt độ ray lên 50°C trong khi bản mặt cầu vẫn duy trì ở 35°C, ứng suất nén trong ray tăng mạnh, đạt giá trị cực đại khoảng -151,16 MPa (Hình 6). Kết quả này phù hợp với quan hệ tuyến tính $\sigma = E\alpha\Delta T$ và nằm trong phạm vi sai số cho phép của UIC 774-3. Đáng chú ý, ở giai đoạn chỉ có tải nhiệt, lớp ba lát làm việc ở trạng thái không tải với độ cứng thấp (20 kN/m), dẫn đến chuyển vị tương đối lớn giữa ray và cầu, qua đó làm tăng biên độ nội lực do nhiệt.

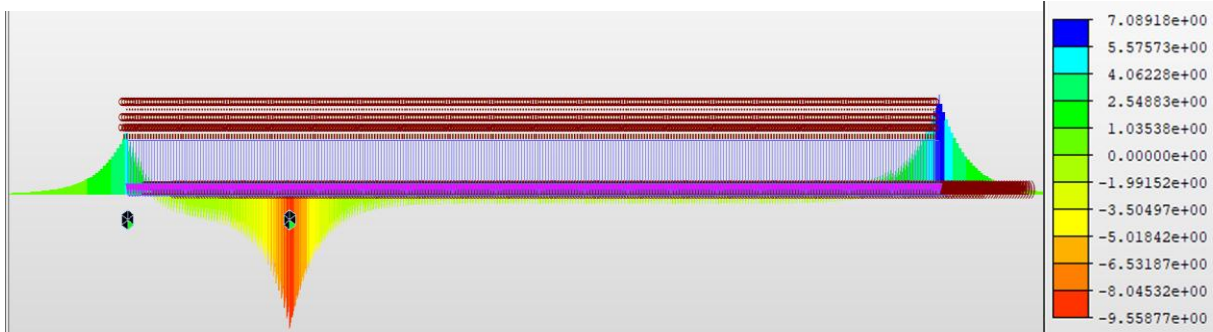
Trong phân tích riêng biệt (Separate Analysis), nội lực tổng hợp khi cộng tuyến tính ứng suất nhiệt (-151,157 MPa) và ứng suất do tải tàu là -41,05 MPa (Hình 7) cho giá trị khoảng -192,207 MPa. So với giá trị tham chiếu 182,4 MPa trong khuyến nghị UIC, với sai số 5,3%, nằm trong giới hạn sai số $\pm 10\%$ của tiêu chuẩn. Tuy nhiên, do phương pháp phân tích này không xét đến biến dạng tích lũy, nội lực có xu hướng bị đánh giá cao hơn thực tế

Khi phân tích theo giai đoạn, trong mô hình E1-3 đoàn tàu dịch chuyển từng bước theo hướng từ gối cố định sang phía gối di động xét tải trọng đoàn tàu tác dụng khi cầu và ray đã có biến dạng nhiệt độ. Ứng suất đạt giá trị lớn nhất khi đoàn tàu nằm cách mố trái khoảng 80 m và Ứng suất nén cực đại đạt -188,09 MPa (Hình 8).

4.2 Mô hình E4-6

Trong mô hình E4-6, tải trọng nhiệt giữ nguyên nhưng hướng đoàn tàu đổi chiều ngược lại. Kết quả mô phỏng cho thấy:

Ứng suất nén dọc trong ray do nhiệt độ của ray mà không xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ của kết cấu nhịp lớn nhất là -119,7 MPa (Hình 4) không phụ thuộc hướng chạy tàu. Khi xét tải nhiệt độ trong cả ray và dầm ứng suất nén trong ray đạt giá trị cực đại khoảng -151,157 MPa (Hình 5). Ứng suất nén trong ray do tải tàu là -9,559 MPa (Hình 9).



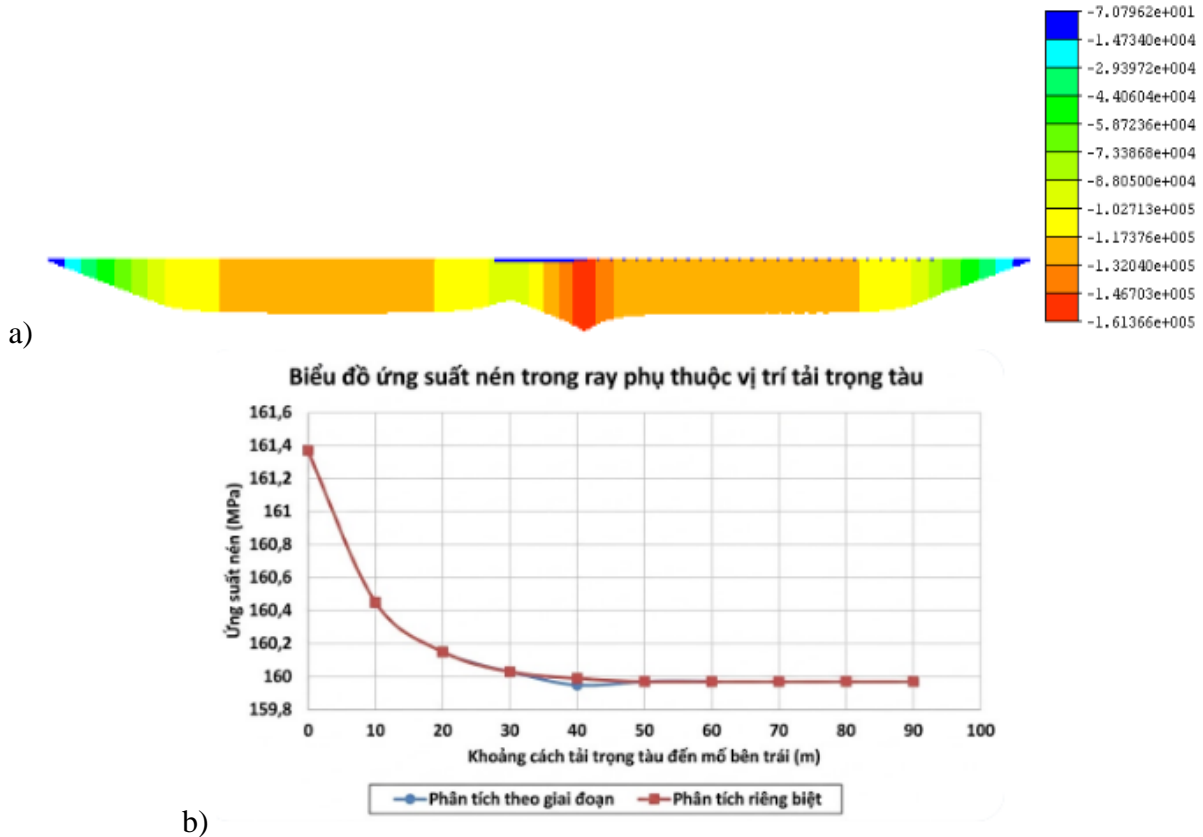
Hình 9. Ứng suất dọc trong ray do hoạt tải thẳng đứng và hãm phanh (Nén -9,559MPa)

Trong phân tích riêng biệt, nội lực tổng hợp khi cộng tuyến tính ứng suất nhiệt (-151,16 MPa) và ứng suất do tải tàu (-9,559 MPa) cho giá trị khoảng -160,716 MPa. Khi phân tích theo giai đoạn xét tải trọng đoàn tàu tác dụng khi cầu và ray đã có biến dạng nhiệt độ ứng suất nén lớn nhất trong ray là -161,37 MPa (Hình 10).

Biểu đồ ứng suất theo vị trí tàu cho thấy xu hướng ứng suất tăng khi tàu tiến vào giữa nhịp, nơi độ võng cầu lớn nhất. Bên cạnh đó cũng cho thấy hướng chuyển động của tàu xuất phát từ phía gối cố định gây nên lực nén dọc trong ray lớn hơn khi tàu chuyển động theo hướng từ gối di động. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về tương tác hình học giữa ray và cầu.

4.3 So sánh tổng hợp các phương pháp phân tích

Bảng 1 và 2 thể hiện giá trị ứng suất nén lớn nhất trong ray khi xét 2 trường hợp tải trọng: Tải trọng do nhiệt độ chỉ trong ray và trường hợp tổng hợp tải trọng nhiệt đồng thời trong ray và dầm cùng lúc kết hợp với tải trọng do đoàn tàu (Lực thẳng đứng và lực hãm) theo 2 phương pháp phân tích riêng biệt và phân tích theo quá trình tương ứng với 2 trường hợp tải E1-2 và E4-6.



Hình 10. Mô hình E4-6; a) Ứng suất nén dọc trong ray do tải nhiệt và tàu (Max = -161,37 MPa); b) Ứng suất nén lớn nhất trong ray theo vị trí tàu khi di chuyển từng đoạn 10m

Bảng 1. Kết quả phân tích các trường hợp cho ứng suất nén lớn nhất trong ray theo mô hình E1-3

Loại tải trọng	Phân tích theo quá trình	Phân tích riêng biệt	Tiêu chuẩn UIC	So sánh
Nhiệt độ	-119,70 MPa	-119,70 MPa	-126 MPa	5%/5%
Ứng suất nén lớn nhất	-188,09 MPa	-192,14 MPa	-182,4 MPa	3,12%/5,34%

Bảng 2: Kết quả phân tích các trường hợp cho ứng suất nén lớn nhất trong ray theo mô hình E4-6

Loại tải trọng	Phân tích theo quá trình	Phân tích riêng biệt	Tiêu chuẩn UIC	So sánh
Nhiệt độ	-119,70 MPa	-119,70 MPa	-126,00 MPa	5,0%/ 5,0%
Ứng suất nén lớn nhất	-161,37 MPa	-160,716 MPa	-162,06 MPa	0,4% / 1,17%

Từ bảng so sánh có thể rút ra các kết luận: (1) Phân tích theo quá trình luôn cho kết quả gần hơn với giá trị chuẩn của UIC, với sai số thường nhỏ hơn 5%. (2) Phân tích riêng biệt

cho kết quả nội lực lớn do không xét đến biến dạng tích lũy và sự thay đổi độ cứng lớp ba lát. (3) Đối với cả hai hướng tàu, mô hình cho kết quả rất ổn định, chứng minh tính đúng đắn của mô hình liên kết đa tuyến tính trong việc mô phỏng ballast. (4) Sai số nhỏ cho thấy mô hình mô phỏng rất ổn định và không ít thay đổi theo hướng chuyển động của đoàn tàu. Điều này khẳng định tính chính xác của mô hình liên kết đa tuyến tính và quy trình phân tích theo Khuyến nghị UIC 774-3.

4.3. Phân tích nguyên nhân phương pháp phân tích theo giai đoạn chính xác hơn

Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp phân tích theo giai đoạn luôn cho sai số nhỏ nhất so với giá trị tham chiếu của UIC 774-3. Điểm khác biệt cơ bản giữa hai phương pháp không chỉ nằm ở cách đặt tải mà còn ở khả năng phản ánh sự tích lũy biến dạng, sự chuyển trạng thái trong lớp ba lát và sự tương tác hình học giữa ray và dầm cầu. Trước hết, phân tích theo giai đoạn mô phỏng đúng hiện tượng tích lũy biến dạng do nhiệt, vốn là nguồn gốc chủ đạo của nội lực dọc trong ray. Khi chỉ xét tải nhiệt, ray bị nén hoặc kéo tùy vào chênh lệch nhiệt độ giữa ray và kết cấu nhịp. Biến dạng này xuất hiện trước khi đoàn tàu chạy qua và đóng vai trò như một trạng thái ứng xử ban đầu của hệ. Khi tải tàu được tác dụng, ray không bắt đầu từ vị trí không biến dạng như trong phương pháp riêng biệt mà từ một vị trí đã tồn tại trường biến dạng nhất định. Điều này làm thay đổi đáng kể mức độ dịch chuyển tương đối giữa ray và cầu trong giai đoạn tàu đi qua, dẫn đến sự sai lệch nội lực nếu bỏ qua hiện tượng tích lũy. Nhờ duy trì biến dạng ban đầu, phân tích theo giai đoạn tái hiện đúng hơn cơ chế hình thành lực dọc thực tế trong ray.

Yếu tố thứ hai đóng vai trò quan trọng là sự thay đổi độ cứng của lớp ba lát theo trạng thái tải trọng. Trong thực tế, lớp ba lát có hai chế độ làm việc rõ rệt: mềm hơn khi ray chỉ chịu tác động nhiệt, và cứng hơn khi có tải tàu tác dụng lên. Phương pháp phân tích riêng biệt giả định lớp ba lát luôn làm việc ở một độ cứng cố định, do đó không phản ánh đúng sự thay đổi này. Điều này dẫn đến việc lực cản dọc trong lớp ba lát bị đánh giá chưa chính xác, đặc biệt trong giai đoạn có tàu, khi đó lớp ba lát thực tế trở nên nén chặt và có khả năng kháng dịch chuyển tốt hơn nhiều. Phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) khắc phục điểm này bằng cách chuyển lớp ba lát từ trạng thái không tải sang có tải đúng vào thời điểm tải tàu xuất hiện. Nhờ mô phỏng đầy đủ quá trình chuyển trạng thái, phương pháp này mô tả chính xác hơn phản lực dọc do ballast sinh ra và do đó cho kết quả nội lực gần với thực nghiệm hơn.

Ngoài các yếu tố trên, tương tác hình học giữa ray và dầm cầu dưới tải trọng đứng cũng tạo ra khác biệt rõ rệt giữa hai phương pháp. Khi đoàn tàu đi vào cầu, độ võng của dầm và góc xoay tại gối khiến ray bị kéo hoặc nén dọc theo kết cấu. Mức độ tác động của cơ chế này phụ thuộc vào trạng thái biến dạng ban đầu của ray và độ cứng tức thời của lớp ba lát. Phương pháp phân tích riêng biệt xem các tải trọng hoàn toàn độc lập, dẫn đến việc bỏ qua tương tác hình học có điều kiện, còn phương pháp phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) tính đến sự phụ thuộc theo thời gian giữa biến dạng nhiệt và biến dạng do tải tàu. Sự kết hợp giữa độ võng dầm và trạng thái biến dạng đã tồn tại trong ray khiến dự đoán của phương pháp phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) sát thực tế hơn.

Cuối cùng, sự khác biệt đáng chú ý giữa hai phương pháp thể hiện rõ ràng trong biểu đồ lực dọc và ứng suất khi tàu dịch chuyển dọc cầu. Trong. Phương pháp phân tích riêng biệt (Separate Analysis), lực dọc thường bị đánh giá cao hơn do giả định biến dạng độc lập và lớp ba lát làm việc tuyến tính. Ngược lại, phương pháp phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) cho hình dạng biểu đồ giống với đường cong chuẩn của UIC 774-3, với sai số nhỏ (3,12%–5,34%), chứng minh rằng mô hình đã mô phỏng chính xác tương tác phi tuyến giữa lớp ba lát, ray và kết cấu cầu.

Điều này khẳng định rằng trong các bài toán tương tác ray-cầu, đặc biệt đối với hệ ray hàn liên tục trên cầu dài hoặc cầu có độ cứng lớn, phương pháp phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) là phương pháp cần thiết để đạt được kết quả có độ tin cậy cao.

5. KẾT LUẬN

Các kết quả đã chỉ ra rằng tải nhiệt là yếu tố chi phối nội lực trong ray hàn liên tục, trong khi tải trọng đoàn tàu chủ yếu ảnh hưởng thông qua sự thay đổi độ cứng lớp ba lát và tương tác hình học giữa ray và kết cấu nhịp. Hơn nữa, sự biến thiên ứng suất trong ray theo vị trí đoàn tàu cho thấy nội lực lớn nhất thường xuất hiện tại vùng giữa nhịp, nơi độ võng cầu đạt giá trị lớn nhất. Điều này phù hợp với cơ chế tương tác hình học và củng cố thêm tính hợp lý của mô hình được xây dựng.

Từ các kết quả thu được, có thể khẳng định rằng phương pháp phân tích theo giai đoạn (Staged Analysis) nên được ưu tiên áp dụng trong phân tích tương tác ray-cầu do luôn cho kết quả gần hơn với giá trị chuẩn theo khuyến nghị UIC với sai số nhỏ hơn 5%, đặc biệt đối với các cầu dài, cầu cứng, hoặc các tuyến đường sắt tốc độ cao, nơi tương tác phi tuyến giữa ray và lớp ba lát đóng vai trò quan trọng.

Mô hình liên kết đa tuyến tính cho lớp ba lát chứng minh khả năng mô phỏng chính xác và ổn định, phản ánh độ cứng chống chuyển vị dọc được tăng lên khi có tải và không có tải phản ánh chính xác nội lực-ứng suất phát sinh trong ray, do đó có thể được xem là giải pháp thích hợp trong thiết kế và kiểm toán phù hợp với khuyến nghị của UIC Code 774-3 về tương tác ray-cầu.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Trước hết, mô hình hiện tại chưa xét đến tính không đồng nhất cũng như sự suy giảm độ cứng theo thời gian của lớp ba lát dưới tác dụng lặp lại của tải trọng đoàn tàu, trong khi đây là những yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử phi tuyến dài hạn của hệ ray-cầu. Bên cạnh đó, các tác động động lực học của đoàn tàu, đặc biệt trong điều kiện đường sắt tốc độ cao, chưa được xem xét nên chưa đánh giá đầy đủ các hiệu ứng phụ thuộc vận tốc và tương tác động giữa đoàn tàu- ray- cầu. Do đó, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc phát triển mô hình tương tác ray-cầu phi tuyến có xét đến hiệu ứng phụ thuộc thời gian, bao gồm sự suy giảm độ cứng và biến đổi đặc tính cơ học của lớp ba lát theo thời gian.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2026-GHA-04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Vũ Lê Văn, Quyết Nguyễn Hữu, Minh Trần Quang, Nhung Nguyễn Thị Cẩm, Xây dựng mô hình động lực học kết hợp tàu-ray dựa trên thực nghiệm phản ứng động của kết cấu ray thuộc tuyến đường sắt đô thị, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 74 (2023) 1075-1087. <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.9.5>.
- [2]. Baidurya Bhattacharya, Risk and reliability in bridges, Innovative Bridge Design Handbook (Second Edition), (2022) 155-193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823550-8.00010-X>.
- [3]. T.Q. Minh, Thuc Ngo Van, Huan X. Nguyen, Quyen Nguyen, Enhancing the Structural Health Monitoring (SHM) through data reconstruction: Integrating 1D convolutional neural networks (1DCNN) with bidirectional long short-term memory networks (Bi-LSTM), Engineering Structures, 340 (2025) 120767. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120767>.
- [4]. T.Q Minh, C. Matos Jose, S. Sousa Helder, Son Dang Ngoc, Thuc Ngo Van, Huan X. Nguyen, Quyen Nguyen, Data reconstruction leverages one-dimensional Convolutional Neural Networks (1DCNN) combined with Long Short-Term Memory (LSTM) networks for Structural

- Health Monitoring (SHM), Measurement, 235 (2025) 117810.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117810>
- [5]. Nhung Thi Cam Nguyen, An Thai Le, Hoang Nguyen Bui, Thuc Van Ngo, Huy Phan Bui, Minh Quang Tran, Determine train load and speed based on dynamic displacement results, Journal of Materials and Engineering Structures, 11 (2024) 543.
<https://revue.ummto.dz/index.php/JMES/article/view/3724>
- [6]. Emma Moliner, Pedro Museros, Reza Allahvirdizadeh, Track–bridge interaction effects in the acceleration and displacement response of high-speed railway bridges: Simplified vs refined modelling, Engineering Structures, 314 (2024) 118304.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118304>
- [7]. S. Neridu, V.D.K. Pasupuleti, P. Kalapatapu, Analysis of rail structure interaction in continuous welded rails on railway bridges: a parametric analysis, Innov. Infrastruct. Solut., 9 (2024) 367.
<https://doi.org/10.1007/s41062-024-01687-z>
- [8]. D. Ribeiro, Train–Track–Bridge Dynamic Interaction on a Bowstring-Arch Railway Bridge: Advanced Modeling and Experimental Validation, Sensors, 23 (2023) 171.
<https://doi.org/10.3390/s23010171>
- [9]. L-Y. Shao, The Longitudinal Force Measurement of CWR Tracks with Hetero-Cladding FBG Sensors: A Proof of Concept, Sensors, 16 (2016) 2184. <https://doi.org/10.3390/s16122184>
- [10]. V. Atapin, A. Bondarenko, Monitoring and Evaluation of the Lateral Stability of CWR Track, Journal of Failure Analysis and Prevention, 22 (2022) 319–332. <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01307-3>
- [11]. Mohamed Tahiri, Nonlinear analysis of the ballast influence on the train-bridge resonance of a simply supported railway bridge, Structures, 35 (2022) 303-313.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.020>
- [12]. Cheng Chen, Investigating geogrid-reinforced ballast: Experimental pull-out tests and discrete element modelling, Soils and Foundations, 54 (2014) 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.001>
- [13]. José Nuno Varandas, Dynamic response of ballasted High-Speed Railways: insights from experimental measurements and 3D nonlinear numerical modelling, Transportation Geotechnics, 52 (2025) 101549. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101549>
- [14]. Jean-Marc Battini, Mahir Ülker-Kaustell, A simple finite element to consider the non-linear influence of the ballast on vibrations of railway bridges, Engineering Structures, 33 (2011) 2597-2602.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.005>
- [15]. UIC, UIC 774 3 Code For Track Rail Interaction, 2001, [Online]. Available:
<https://www.scribd.com/document/81027669/UIC-774-3-Code-for-Track-Rail-Interaction-1>
- [16]. W. Zhai, Train–track–bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review, Vehicle System Dynamics, 57 (2019) 984–1027. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605085>
- [17]. A. Strauss, M. Šomodíková, D. Lehký, D. Novák, K. Bergmeister, Nonlinear finite element analysis of continuous welded rail–bridge interaction: monitoring-based calibration., Journal of Civil Engineering and Management, 24 (2018) 344-354. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.3050>
- [18]. W. Hou, E. Tutumluer, W. Li, A Validated Train-Track-Bridge Model with Nonlinear Support Conditions at Bridge Approaches, Infrastructures, 6 (2021) 59.
<https://doi.org/10.3390/infrastructures6040059>
- [19]. P. König, C. Adam, A model considering the longitudinal track–bridge interaction in ballasted railway bridges subjected to high-speed trains, Acta Mech, 235 (2024) 1395–1418.
<https://doi.org/10.1007/s00707-023-03605-3>
- [20]. Pavel Ryjáček, Miroslav Vokáč, Long-term monitoring of steel railway bridge interaction with continuous welded rail, Journal of Constructional Steel Research, 99 (2024) 176-186.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.009>
- [21]. Joelle Aoun, Venkata Dilip Kumar Pasupuleti, Prafulla Kalapatapu, Analysis of safe and effective next-generation rail signalling systems, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 162 (2024) 104573. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01687-z>