

PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA TẢI TRỌNG XE THAY ĐỔI NGẪU NHIÊN THU THẬP TỪ DỮ LIỆU THỰC TẾ ĐẾN DAO ĐỘNG CỦA CẦU SÔNG QUY

ANALYSIS OF THE IMPACT OF RANDOMLY CHANGING VEHICLE LOADS COLLECTED FROM ACTUAL DATA ON THE VIBRATION OF SONG QUY BRIDGE

Nguyễn Thị Kim Loan^{1*}, Nguyễn Xuân Toàn¹, Đặng Công Thuật¹, Nguyễn Duy Thảo¹, Trần Văn Đức²

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

²Đại học Duy Tân, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ntkloan@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 22/11/2024; Sửa bài / Revised: 26/01/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 05/02/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.488

Tóm tắt - Nghiên cứu này tập trung phân tích dao động và hệ số động lực (HSDL) của cầu dầm giản đơn dưới tác động của tải trọng xe thay đổi theo thời gian. Dữ liệu thực nghiệm được thu thập từ Khu Quản Lý Đường Bộ IV, nơi thường xuyên xảy ra tình trạng xe quá tải, và nghiên cứu được áp dụng tại cầu Sông Quy trên tuyến cao tốc Phan Thiết - Dầu Giây. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, HSDL chịu ảnh hưởng lớn từ các yếu tố tải trọng ngẫu nhiên, với đặc điểm phức tạp và không tuân theo các phân phối chuẩn thông thường. Hơn nữa, giá trị HSDL có xu hướng tăng cao khi tải trọng xe vượt quá giới hạn, vượt cả các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành như AASHTO và TCVN 11823-2017. Sự gia tăng HSDL và tải trọng bất thường làm tăng rủi ro cho độ bền kết cấu, đẩy nhanh tốc độ suy giảm khả năng chịu lực của cầu trong quá trình khai thác.

Từ khóa - Hệ số động lực; tải trọng thay đổi ngẫu nhiên; xe quá tải; dao động; cầu Sông Quy

1. Đặt vấn đề

Phân tích cầu chịu tải trọng động đã trở thành một lĩnh vực quan trọng, đáp ứng nhu cầu thực tiễn trong ngành giao thông vận tải. Đây là chủ đề nhận được sự quan tâm lớn từ các nhà nghiên cứu cả trong và ngoài nước. Dao động của cầu dưới tác động của tải trọng xe di động phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm vận tốc xe, điều kiện bề mặt đường, và mô hình tương tác giữa tải trọng và kết cấu cầu. Các yếu tố này thường được đánh giá đồng thời để hiểu rõ hơn về sự ảnh hưởng của tải trọng động đến tuổi thọ và hiệu suất của kết cấu cầu. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay về dao động cầu vẫn còn hạn chế trong việc xem xét tác động của các yếu tố ngẫu nhiên như tải trọng thay đổi hoặc các điều kiện không dự đoán trước. Các nghiên cứu ban đầu thường tập trung vào mô hình cầu chịu tải trọng đơn giản. Một ví dụ điển hình là Timoshenko [1], người tiên phong trong lĩnh vực nghiên cứu dao động kết cấu cầu chịu tải trọng xe. Trong công trình nghiên cứu của mình, tác giả đã đề cập đến dao động cưỡng bức của hệ dầm một nhịp có tiết diện không đổi, dưới sự tác dụng của một lực tập trung có cường độ biến đổi điều hòa và di chuyển với vận tốc không đổi. Từ đó, đã có rất nhiều công bố liên quan đến lĩnh vực này với mô hình tiền định có thể kể đến như [2 - 7], ...

Abstract - The focus of this study is on analyzing the dynamic response and dynamic impact factor (DIF) of a simple girder bridge under vehicular live loads with randomly varying loads. The load data were collected from the Road Management Area IV, with a particular emphasis on overloaded vehicles. The bridge selected for analysis is the Song Quy bridge, located on the highway connecting Phan Thiet - Dau Giay. The analysis results indicate that, the probability distribution of the random DIF is highly complex, and there is no correlation between the probability distribution of vehicular loads and DIF. The DIF in the region of overloaded traffic increases, exceeding the limits prescribed by both the AASHTO and TCVN 11823-2017. The simultaneous increase in DIF and vehicular load poses significant risks to the bridge structure during its operational phase, accelerating the degradation of the bridge's load-bearing capacity.

Key words - Dynamic impact factor; randomly varying loads; overloaded vehicles; vibration; Song Quy bridge

Phần lớn các nghiên cứu trên có các thông số đầu vào tiền định, nên chưa phản ánh đúng sự biến động theo thực tế mang tính ngẫu nhiên. Trong thực tế, nhiều tác động của lực kích thích lên công trình cầu mang tính ngẫu nhiên như hoạt tải gió, mưa, hoạt tải xe, động đất... Trong đó, hoạt tải xe là tải trọng tác động trực tiếp, liên tục và thường xuyên, luôn biến đổi theo cả không gian và thời gian. Phân tích dao động của cầu dựa trên mô hình tương tác giữa cầu và xe theo quan điểm ngẫu nhiên đã thu hút sự chú ý của nhiều nhà khoa học trên toàn thế giới. Một số nhà nghiên cứu đã tiếp cận vấn đề này từ các góc nhìn khác nhau về sự ngẫu nhiên của tải trọng để mô phỏng công trình cầu chịu tác động của hoạt tải xe thông qua các mô hình tính toán khác nhau. Silvio Sorrentino [8] đã nghiên cứu phân tích trên dầm đơn giản chịu tải bởi chuỗi các lực tập trung xuất hiện ngẫu nhiên di chuyển cùng hướng, với tốc độ ngẫu nhiên liên tục, và biên độ ngẫu nhiên. Soheil S. Eshkevari và cộng sự [9] đã mô hình hóa sự tương tác giữa cầu và phương tiện di chuyển khi xem xét các cầu có nhịp trung bình đến nhịp dài chịu tải trọng giao thông ngẫu nhiên. P. A. Montenegro và cộng sự [10] đã nghiên cứu một phương pháp để đánh giá HSDL của công trình cầu dựa trên cấu hình bất thường dựa trên hàm phân phối xác suất. Y. Shao và cộng sự [11] trình bày một phương pháp mô phỏng số tương tác

¹ The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Nguyen Thi Kim Loan, Nguyen Xuan Toan, Dang Cong Thuat, Nguyen Duy Thao)

² Duy Tan University, Vietnam (Tran Van Duc)

cầu xe cho cầu treo nhịp dài dưới tác động tải lưu lượng ngẫu nhiên trong phạm vi tuyến tính. Robert Eberle và cộng sự [12] đã tiến hành khảo sát dao động của công trình cầu có kết cấu dầm bất thường về cấu trúc và phương pháp đánh giá sự xuống cấp của kết cấu. A. Aloisio, R. Alaggio [13] đã so sánh ba phương pháp để dự đoán phản ứng của cầu khi có xe di chuyển. Phương pháp đầu tiên biểu diễn xe như một tải trọng di chuyển tập trung, trong khi phương pháp thứ hai và thứ ba mô phỏng xe bằng cách sử dụng các mô hình một bậc tự do và hai bậc tự do tương ứng. Tác giả sử dụng phương pháp mô phỏng Monte Carlo để tìm phân phối xác suất phù hợp, so sánh phản ứng dịch chuyển của cầu trong ba kịch bản độ nhám và xem xét vận tốc thay đổi và đặc điểm của xe. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa xét đến ảnh hưởng của tải trọng thay đổi theo thực tế đến phản ứng của cầu.

Hoạt tải xe di chuyển trên cầu sẽ tạo ra một phản ứng động cho các kết cấu của cầu. Nguyên nhân là do sự rung động của xe khi di chuyển dẫn đến sự thay đổi khối lượng xe tương tác với cầu. Để định lượng được phản ứng trực tiếp của tải trọng động, các thông số kỹ thuật được sử dụng cái gọi là HSĐL, và HSĐL có thể được xác định như sau:

$$(1 + IM) = \frac{D_{dmax}}{D_{tmax}}$$

Trong đó, D_{dmax} là giá trị lớn nhất của nội lực động hoặc chuyển vị động; D_{tmax} là giá trị lớn nhất của nội lực tĩnh hoặc chuyển vị tĩnh (các giá trị này được lấy tại cùng một vị trí trên cầu).

Để xem xét các yếu tố tác động khác nhau đối với công trình cầu trên đường cao tốc ở một số quốc gia trên thế giới đã được thể hiện trong nghiên cứu của tác giả GangaRao [14]. Qua một số nghiên cứu đã công bố cho thấy, HSĐL của các công trình cầu khác nhau thì giá trị tính toán được cũng khác nhau, và một số ý kiến cho rằng nên xem xét cụ thể HSĐL dựa vào các phản ứng dao động của công trình cầu [15 - 17]. Deng [18] đã tiến hành một đánh giá tài liệu quy mô lớn về việc sử dụng HSĐL trong một số quốc gia. Kết quả thu được tương ứng với mã cầu của mỗi quốc gia thì việc tính toán các HSĐL cũng khác nhau. Sự khác biệt này phụ thuộc vào các yếu tố như chiều dài nhịp, tần số uốn, tải trọng, cấu hình và hệ thống treo xe... Sự khác biệt giữa các biểu thức thực nghiệm được đề xuất trong các tiêu chuẩn thiết kế cầu khác nhau cho thấy, việc xác định HSĐL vẫn là một chủ đề quan trọng trong thiết kế tính toán công trình cầu.

Trên thế giới, một số quốc gia phát triển đã áp dụng nhiều công nghệ hiện đại trong xây dựng cầu cũng như sử dụng vật liệu tiên tiến để có thể đáp ứng với sự biến động ngẫu nhiên của tải trọng xe chạy qua cầu. Ngoài ra, với sự hỗ trợ của hệ thống giám sát thường xuyên cung cấp chính xác dữ liệu về tải trọng cũng như trạng thái của cầu theo thời gian thực để giúp các kỹ sư có thể phát hiện sớm các sự cố kết cấu và kịp thời đưa ra các phương pháp xử lý kết cấu phù hợp. Tại Việt Nam, sự gia tăng nhanh chóng về số lượng và trọng lượng của các phương tiện giao thông đã tạo ra những thách thức lớn cho ngành xây dựng cầu ở nước ta. Trong bối cảnh đô thị hóa và phát triển kinh tế mạnh mẽ, tải trọng xe chạy qua cầu không chỉ tăng lên mà còn có sự phân bố đồng đều trên xe, gây nhiều bất lợi lớn đối với kết cấu cầu. Thêm vào đó, các yếu tố ngẫu nhiên như sự thay đổi về tải trọng, tốc độ di chuyển sẽ gây thêm nhiều khó khăn trong thiết kế cầu. Trong

thực tế, tải trọng xe qua cầu là một đại lượng mang tính ngẫu nhiên vì phụ thuộc vào chủng loại xe và loại hàng hóa được chuyên chở trên xe. Sự ngẫu nhiên của tải trọng này làm cho việc phân tích và dự đoán trở nên khó khăn, vì các phương pháp phân tích theo mô hình tiền định truyền thống sẽ không thể xử lý đầy đủ các yếu tố ngẫu nhiên. Bên cạnh đó, việc thu thập dữ liệu thực tế về tải trọng và dao động của cầu còn hạn chế, đặc biệt là ở các nước đang phát triển như Việt Nam. Cho nên hầu hết các nghiên cứu đều dựa vào dữ liệu mô phỏng hoặc dữ liệu từ các điều kiện không điển hình, không phản ánh đúng thực tế tình trạng giao thông và tải trọng tại nước ta. Việc thiếu dữ liệu thực tế đầy đủ về các tác động của xe quá tải lên cầu làm giảm khả năng kiểm chứng và hiệu chỉnh các mô hình phân tích kết cấu. Ngoài ra, hiện có rất ít nghiên cứu chi tiết về tải trọng xe ngẫu nhiên, trong bối cảnh thực tiễn tại Việt Nam, nơi tình trạng xe quá tải diễn ra phổ biến. Sự thiếu hụt này tạo ra một khoảng trống lớn trong lĩnh vực nghiên cứu, đòi hỏi những nỗ lực đáng kể để thu thập và áp dụng hiệu quả dữ liệu ngẫu nhiên từ thực tế. Bài báo này sẽ trình bày phương pháp thu thập, xử lý các số liệu tải trọng xe thực tế của Khu quản lý đường bộ IV (QLĐB IV), từ đó ứng dụng vào phân tích dao động và HSĐL của cầu dầm giản đơn đó là cầu Sông Quy thuộc tuyến đường cao tốc Phan Thiết - Dầu Giây.

2. Tạo bộ dữ liệu ngẫu nhiên từ dữ liệu thu thập thực tế

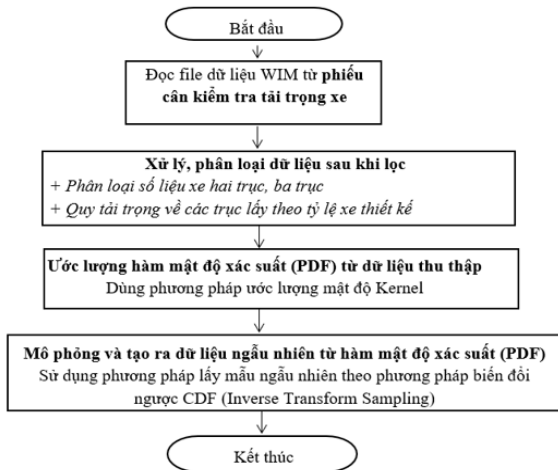
2.1. Phương pháp khớp hàm mật độ xác suất và mô phỏng dữ liệu ngẫu nhiên

Khu QLĐB IV là một trong những đơn vị chịu trách nhiệm giám sát và quản lý các tuyến đường trọng điểm tại Việt Nam, nhằm đảm bảo an toàn cho giao thông trên toàn mạng lưới. Để hoàn thành nhiệm vụ này, Khu QLĐB IV thường xuyên tiến hành thu thập và phân tích dữ liệu tải trọng của các phương tiện di chuyển trên các tuyến đường lớn. Quy trình thu thập bao gồm việc cài đặt các thiết bị cảm biến hiện đại để đo đạc và ghi nhận tải trọng của các phương tiện qua các trạm cân tự động trên những tuyến đường quan trọng. Dữ liệu tải trọng được sử dụng để phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến cầu, chẳng hạn như tải trọng bất thường từ các phương tiện di chuyển qua cầu. Trong nhiều trường hợp, tải trọng không chỉ phụ thuộc vào thiết kế cầu mà còn bị chi phối bởi các yếu tố ngẫu nhiên, chẳng hạn như loại xe, tốc độ và tình trạng đường. Các nghiên cứu thường áp dụng phương pháp Monte Carlo để mô phỏng dữ liệu ngẫu nhiên, cung cấp cái nhìn rõ ràng hơn về hành vi dao động của kết cấu dưới tải trọng thực tế. Ngoài ra, các thông tin từ trạm cân và cảm biến giúp nhận diện tình trạng phân bố tải trọng không đồng đều hoặc các hiện tượng như xe quá tải. Việc này không chỉ hỗ trợ trong công tác đánh giá khả năng chịu lực của cầu mà còn đóng vai trò quan trọng trong công tác bảo trì và sửa chữa cầu đường, góp phần kéo dài tuổi thọ của hệ thống giao thông. Hơn nữa, thông tin về tải trọng của các xe quá tải có thể được thu thập thông qua các cuộc khảo sát thống kê mở rộng. Dữ liệu thực nghiệm này được ghi nhận liên tục trong khoảng thời gian từ năm 2018 đến năm 2021 tại Khu QLĐB IV.

Trong nghiên cứu này, dữ liệu động được thu thập từ Khu QLĐB IV. Các tải trọng từ Khu QLĐB IV được hiểu là vượt quá mức cho phép và cần được phân tích kỹ lưỡng. Để đánh giá mật độ xác suất (Probability Density Function - PDF) của biến được dẫn xuất từ dữ liệu thực nghiệm, các

phương pháp thử nghiệm khác nhau đã được áp dụng. Cụ thể, phương pháp ước lượng mật độ sử dụng hạt nhân (Kernel Density Estimation - KDE) đã được triển khai. Đây là một phương pháp hiệu quả, thông qua việc nhân rộng điểm dữ liệu liên quan để tạo ra một hàm mật độ liên tục. Phương pháp này cung cấp cái nhìn rõ ràng về phân phối mật độ xác suất của dữ liệu thực tế mà không yêu cầu phải giả định hình thái phân phối ban đầu. Ước lượng mật độ này đã được minh chứng là một công cụ mạnh mẽ để phân tích dữ liệu một cách chính xác [19].

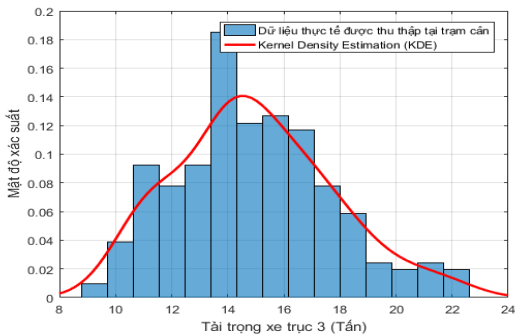
Sơ đồ khối mô phỏng số liệu thực nghiệm bằng phương pháp Monte-Carlo dựa vào dữ liệu đã được tác giả ghi nhận tại trạm cân như sau:



Hình 1. Sơ đồ khối chương trình tạo bộ dữ liệu ngẫu nhiên

2.2. Bộ dữ liệu tải trọng xe của Khu QLDB IV

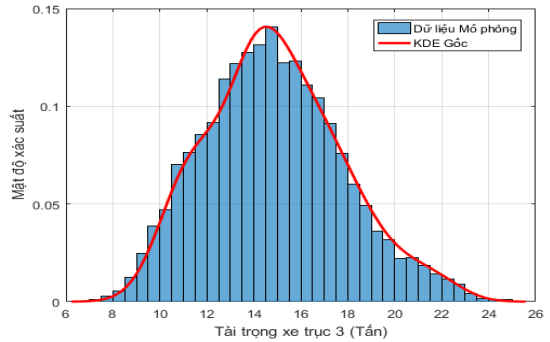
Kết quả thu được khi tính toán hàm mật độ xác suất (PDF) từ dữ liệu thu thập được từ Khu QLDB IV thể hiện trong Hình 2.



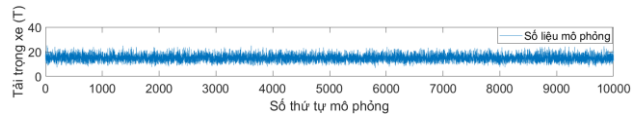
Hình 2. Quy luật phân bố xác suất của tải trọng trục

Thông qua thuật toán trên, một bộ dữ liệu ngẫu nhiên gồm 10000 lần giá trị của tải trọng xe trục 3 từ năm 2018 đến 2021 đã được thiết lập và minh họa như trong Hình 3.

Kết quả cho thấy, dữ liệu thu thập được phản ánh một cách chính xác mức độ phù hợp với tải trọng của xe trên trục thứ ba. Điều này nhấn mạnh sự hiệu quả và độ tin cậy của thuật toán tạo số liệu ngẫu nhiên đã được áp dụng. Bộ dữ liệu được sinh ngẫu nhiên này được sử dụng làm cơ sở để tiến hành các phân tích thống kê và mô phỏng, liên quan đến tải trọng trục thứ ba của xe trong giai đoạn từ năm 2018 đến năm 2021. Các kết quả cụ thể về tải trọng ngẫu nhiên của xe được minh họa ở Hình 4.



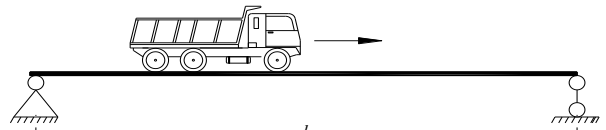
Hình 3. Bộ dữ liệu tải trọng xe của Khu QLDB IV



Hình 4. Thể hiện ngẫu nhiên của tải trọng xe

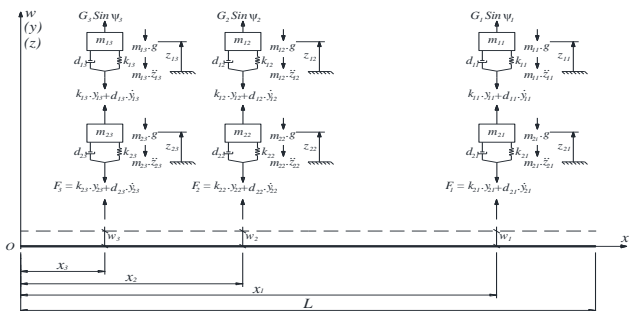
3. Mô hình phân tích động lực học cầu và xe

Trong nghiên cứu này, cấu trúc cầu được phân tích là một cây cầu có kết cấu dầm đơn giản với một nhịp và tiết diện chữ I, chịu tác động từ tải trọng xe di chuyển trên cầu. Mô hình hóa kết cấu cầu bao gồm các phần tử dạng thanh (dầm) và hoạt tải xe được giả lập dưới dạng trục xe. Tải trọng di động được giả định với tốc độ đồng đều, không xảy ra hiện tượng va chạm giữa các tải trọng, và các tải không rời khỏi bề mặt dầm, vôn được coi là mặt phẳng. Phân tích dao động được thực hiện theo mô hình Euler, dựa trên các yếu tố tác động lực giữa tải trọng và trục xe, trong khi phần tử dầm được mô tả chi tiết như minh họa Hình 5.



Hình 5. Mô hình xe tải chạy trên cầu

Mô hình phân tích động lực học cầu và xe 03 trục được thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Mô hình hoá các tải trọng trục xe

Cụ thể: $G.sin\psi_j$ là giá trị lực kích thích điều hòa do tác động của động cơ đến trục xe thứ j ; m_{1j} là khối lượng bao gồm phần thân xe và hàng hóa tác dụng lên trục j ; m_{2j} là khối lượng riêng của trục j . Các tham số k_{1j} và d_{1j} lần lượt biểu thị độ cứng và đặc tính giảm chấn của hệ thống treo xe, trong khi k_{2j} , d_{2j} biểu thị các tham số tương tự nhưng đối với lớp xe. L đại diện cho chiều dài của kết cấu dầm; $w_j(x_j, t)$ mô tả sự chuyển vị của dầm tại vị trí tương ứng với trục j tại thời điểm cụ thể; z_{1j} là chuyển vị đứng giữa khung xe và trục xe

thứ j ; z_{2j} là chuyển vị đứng liên quan tới trục xe thứ j ; y_{1j} đại diện cho chuyển vị tương đối giữa khung xe và trục i ; y_{2j} là chuyển vị tương đối giữa trục j và dầm. Cuối cùng, x_j biểu thị vị trí của trục thứ j tại thời điểm t , với $j = 1, 2, 3$.

Bằng cách áp dụng nguyên lý D'Alembert, phương trình cân bằng động lực học cho khối lượng m_{1j} và m_{2j} được thiết lập như sau:

$$\begin{aligned} m_{1j}\ddot{z}_{1j} + d_{1j}\dot{z}_{1j} + k_{1j}z_{1j} - d_{1j}\dot{z}_{2j} - k_{1j}z_{2j} \\ = G_j \sin \Psi_j - m_{1j}g \\ m_{2j}\ddot{z}_{2j} + (d_{1j} + d_{2j})\dot{z}_{2j} + (k_{1j} + k_{2j})z_{2j} - d_{1j}\dot{z}_{1j} \\ - k_{1j}z_{1j} = -m_{2j}g + d_{2j}\dot{w}_j + k_{2j}w_j \end{aligned} \quad (1)$$

Theo tài liệu [20], giả thuyết đặt ra rằng kết cấu dầm chịu các biến dạng nhỏ và vật liệu làm việc trong phạm vi đàn hồi tuân theo định luật Hooke. Trong trường hợp này, phương trình dao động của dầm, với tiết diện không đổi khi chịu tác động uốn, được sử dụng để phân tích tải trọng phân bố $p(x, z, t)$, bao gồm các yếu tố ảnh hưởng như ma sát bên trong và bên ngoài của dầm. Phương trình này được biểu diễn dưới dạng:

$$EJ_d \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \theta \frac{\partial^5 w}{\partial x^4 \partial t} \right) + \rho F_d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial w}{\partial t} = p(x, z, t) \quad (2)$$

Trong đó: EJ_d là độ cứng của kết cấu dầm; ρF_d là trọng lượng của dầm; θ và β : Các hệ số ma sát bên trong và bên ngoài của kết cấu; w là chuyển vị của dầm tại vị trí đang xét.

Phương trình tải trọng phân bố $p(x, z, t)$ có thể được hiệu chỉnh dựa trên điều khiển logic nhằm phản ánh tác động thực tế chính xác hơn.

$$\xi_j(t) = \begin{cases} 1 & \text{khi } t_j \leq t \leq t_j + T_j; \quad T_j = \frac{L}{v_j} \\ 0 & \text{khi } t < t_j \quad \& \quad t > t_j + T_j \end{cases} \quad (3)$$

Ta được:

$$p_j(x, z, t) = \xi_j(t) [G_j \sin \Psi_j - (m_{1j} + m_{2j})g - m_{1j}\ddot{z}_{1j} - m_{2j}\ddot{z}_{2j}] \delta(x - a_j) \quad (4)$$

Trong đó, $\delta(x - a_i)$ là hàm Delta-Dirac.

Kết hợp (1), (2), (3) và (4) ta có hệ phương trình vi phân dao động uốn của phần tử dầm chịu tải trọng di động như sau:

$$\begin{aligned} EJ_d \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \theta \frac{\partial^5 w}{\partial x^4 \partial t} \right) + \rho F_d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial w}{\partial t} = p(x, z, t) \\ p(x, z, t) = \sum_{j=1}^N \xi_j(t) [G_j \sin \Psi_j - (m_{1j} + m_{2j})g - m_{1j}\ddot{z}_{1j} \\ - m_{2j}\ddot{z}_{2j}] \delta(x - a_j) \\ m_{1j}\ddot{z}_{1j} + d_{1j}\dot{z}_{1j} + k_{1j}z_{1j} - d_{1j}\dot{z}_{2j} - k_{1j}z_{2j} \\ = G_j \sin \Psi_j - m_{1j}g \\ m_{2j}\ddot{z}_{2j} + (d_{1j} + d_{2j})\dot{z}_{2j} + (k_{1j} + k_{2j})z_{2j} - d_{1j}\dot{z}_{1j} \\ - k_{1j}z_{1j} = -m_{2j}g + d_{2j}\dot{w}_j + k_{2j}w_j \end{aligned} \quad (5)$$

Hệ phương trình vi phân (5) được biến đổi về dạng ma trận như dưới đây khi được kết hợp phương pháp Galerkin và lý thuyết Green:

$$M_e \ddot{q} + C_e \dot{q} + K_e q = f_e \quad (6)$$

Trong đó, M_e , C_e và K_e lần lượt là ma trận khối lượng, ma trận cản, và ma trận độ cứng của toàn hệ thống, bao gồm cả xe và phần tử dầm:

$$M_e = \begin{bmatrix} M_{ww} & M_{wz1} & M_{wz2} \\ 0 & M_{z1z1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{z2z2} \end{bmatrix}; \quad C_e = \begin{bmatrix} C_{ww} & 0 & 0 \\ 0 & C_{z1z1} & C_{z1z2} \\ C_{z2w} & C_{z2z1} & C_{z2z2} \end{bmatrix}$$

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{ww} & 0 & 0 \\ 0 & K_{z1z1} & K_{z1z2} \\ K_{z2w} & K_{z2z1} & K_{z2z2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó, $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{q\}$, $\{f_e\}$ lần lượt là vectơ gia tốc, vectơ vận tốc, vectơ chuyển vị, vectơ lực hỗn hợp.

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} W \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix}; \quad \{\dot{q}\} = \begin{Bmatrix} \dot{W} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix}; \quad \{q\} = \begin{Bmatrix} W \\ z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix}; \quad \{f_e\} = \begin{Bmatrix} F_w \\ F_{z1} \\ F_{z2} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$W = [u_1 \quad \phi_1 \quad u_2 \quad \phi_2]^T$ là vector độ dời nút của phần tử dầm trong hệ tọa độ địa phương. u_1, ϕ_1, u_2, ϕ_2 lần lượt là chuyển vị thẳng đứng, chuyển vị xoay trên nút trái và nút phải của phần tử dầm.

M_{ww}, C_{ww} và K_{ww} là các ma trận khối lượng, ma trận cản, và ma trận độ cứng của phần tử dầm. Các ma trận và véc tơ còn lại được tham khảo trong tài liệu [21].

Trong nghiên cứu này, các giá trị m_{1i} là biến ngẫu nhiên được xác định trên cơ sở số liệu thu thập từ các trạm cân xe.

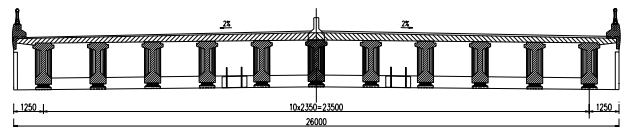
$$F_w = \sum_{j=1}^N [G_j \sin \Psi_j - (m_{1j} + m_{2j})g] P_j \quad (9)$$

$$F_{z1} = \begin{Bmatrix} G_1 \sin \Psi_1 - m_{11}g \\ \vdots \\ G_j \sin \Psi_j - m_{1j}g \\ \vdots \\ G_N \sin \Psi_N - m_{1N}g \end{Bmatrix}; \quad F_{z2} = \begin{Bmatrix} -m_{21}g \\ \vdots \\ -m_{2j}g \\ \vdots \\ -m_{2N}g \end{Bmatrix} \quad (10)$$

4. Kết quả phân tích của cầu Sông Quy

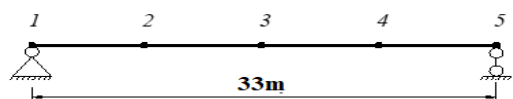
4.1. Mô hình cầu và xe phân tích

Phân tích tải trọng xe thay đổi ngẫu nhiên đã được thực hiện trên cầu Sông Quy, thuộc dự án cao tốc Phan Thiết – Dầu Giây. Cầu này là một công trình có kết cấu một nhịp, chiều dài tổng thể là 33 m. Mặt cắt ngang của cầu bao gồm 11 dầm bê tông cốt thép với tiết diện hình chữ I, được minh họa trong Hình 7.



Hình 7. Mặt cắt ngang cầu Sông Quy

Sơ đồ kết cấu cầu được mô hình hóa như Hình 8.

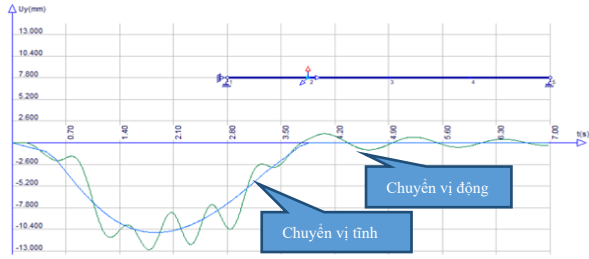


Hình 8. Mô hình kết cấu cầu Sông Quy

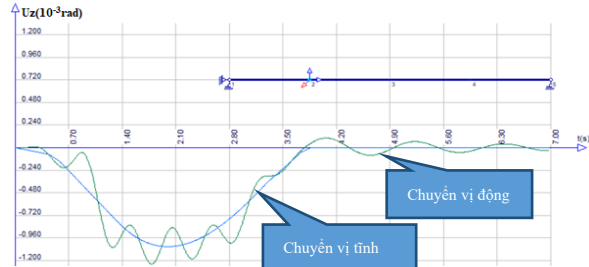
Các thông số kỹ thuật liên quan đến kết cấu cầu được xác định như sau: $E = 3647550,59 \text{ T/m}^2$; $J_d = 0,5213 \text{ m}^4$; $F_d = 1,085 \text{ m}^2$; $\rho F_d = 2,8 \text{ T/m}$, hệ số ma sát trong $\theta = 0,027$ và hệ số ma sát ngoài $\beta = 0,01$.

Về tải trọng xe qua cầu, ba trục xe được mô tả với các thông số như sau: khối lượng trục trước $m_{21} = 0,26 \text{ T}$; khối lượng hai trục sau $m_{22} = m_{23} = 0,87 \text{ T}$; độ cứng của nhíp trục trước $k_{11} = 120 \text{ T/m}$; độ cứng của nhíp hai trục sau $k_{12} = k_{13} = 260 \text{ T/m}$; độ cứng lớp trước của xe $k_{21} = 240 \text{ T/m}$, độ cứng lớp xe hai trục sau $k_{22} = k_{23} = 380 \text{ T/m}$; hệ số cản của nhíp trục trước $d_{11} = 0,7344 \text{ Ts/m}$; hệ số cản của nhíp hai trục sau $d_{12} = d_{13} = 0,3672 \text{ Ts/m}$; hệ số cản của lớp xe trục trước $d_{21} = 0,4 \text{ Ts/m}$; hệ số cản của lớp xe hai trục sau $d_{22} = d_{23} = 0,8 \text{ Ts/m}$. Ngoài ra, các giá trị tải trọng trục xe m_{11}, m_{12} và m_{13} và các giá trị ngẫu nhiên khác được lấy từ bộ dữ liệu các trạm cân.

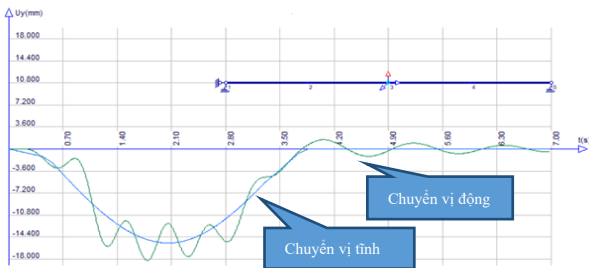
4.2. Kết quả phân tích động lực công trình cầu



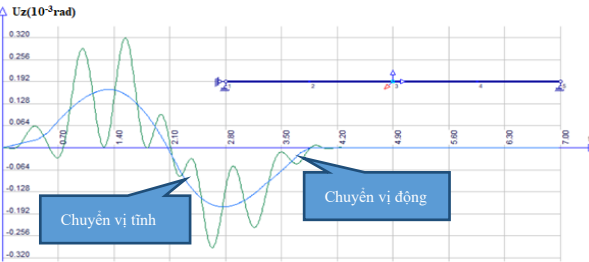
Hình 9. Biểu đồ dao động của chuyển vị U_y tại nút 2



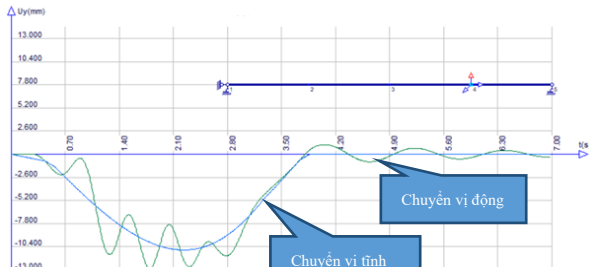
Hình 10. Biểu đồ dao động của chuyển vị U_z tại nút 2



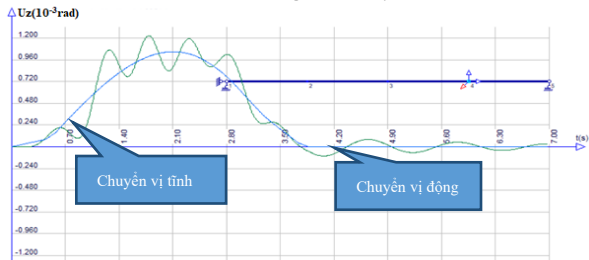
Hình 11. Biểu đồ dao động của chuyển vị U_y tại nút 3



Hình 12. Biểu đồ dao động của chuyển vị U_z tại nút 3



Hình 13. Biểu đồ dao động của chuyển vị U_y tại nút 4



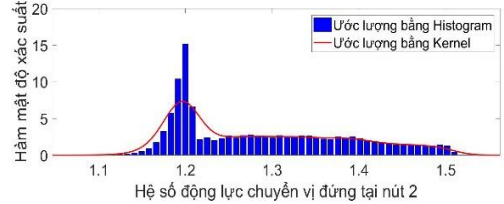
Hình 14. Biểu đồ dao động của chuyển vị U_z tại nút 4

Phương pháp phần tử hữu hạn và Runge-Kutta được sử dụng để nghiên cứu dao động của cầu Sông Quy. Kết quả thu được thể hiện phản ứng tĩnh và động của dầm dưới tác động từ tải trọng xe. Kết quả mô tả độ chuyển vị thẳng đứng U_y và chuyển vị xoay U_z tại các mặt cắt khác nhau của cầu, dựa trên bộ dữ liệu ngẫu nhiên đầu vào gồm $N=10000$ tổ hợp tải trọng. Các biểu đồ minh họa (Hình 9 đến Hình 14) phản ánh rõ tác động của tải trọng lên kết cấu cầu.

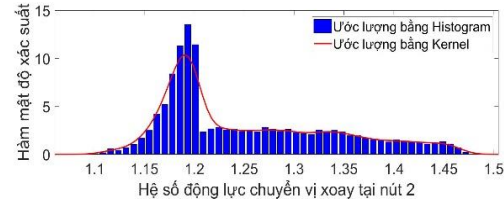
Kết quả phân tích cho thấy, giá trị chuyển vị động của dầm dao động đều quanh các giá trị chuyển vị tĩnh. Khi chịu tác động từ các lực cản, các chuyển vị động của dầm có xu hướng giảm dần theo thời gian và cuối cùng hội tụ về trạng thái cân bằng với chuyển vị tĩnh. Những kết quả này phù hợp với lý thuyết dao động của kết cấu khi xét đến các thông số cụ thể về cấu trúc và tải trọng.

4.3. Kết quả phân tích HSĐL công trình cầu

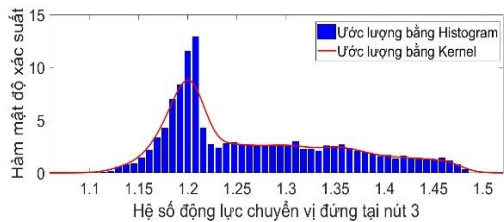
Kết quả HSĐL của công trình cầu dựa vào các chuyển vị xoay và chuyển vị đứng tại các vị trí xác định trên dầm khi chịu hoạt tải xe theo bộ dữ liệu từ Khu QLDB IV được thể hiện trên Hình 15-20.



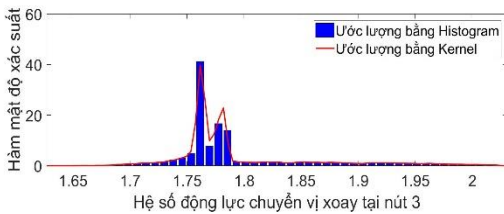
Hình 15. Phân phối xác suất của HSĐL U_y tại nút 2



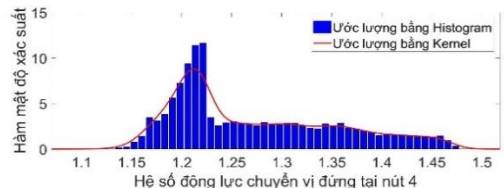
Hình 16. Phân phối xác suất của HSĐL U_z tại nút 2



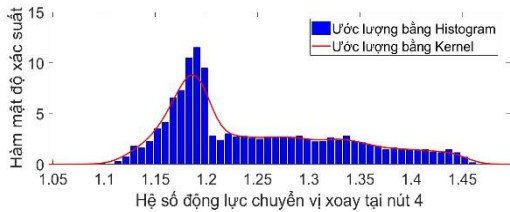
Hình 17. Phân phối xác suất của HSĐL U_y tại nút 3



Hình 18. Phân phối xác suất của HSĐL U_z tại nút 3



Hình 19. Phân phối xác suất của HSĐL U_y tại nút 4



Hình 20. Phân phối xác suất của HSDL U_z tại nút 4

Bảng 1 đã thống kê các giá trị trung bình, giá trị lớn nhất, nhỏ nhất và phương sai của HSDL của các chuyển vị U_y và U_z tại các nút 2, 3, 4.

Bảng 1. Thông số thống kê HSDL của chuyển vị

Các đặc trưng thống kê	HSDL của U_y			HSDL của U_z		
	Nút 2	Nút 3	Nút 4	Nút 2	Nút 3	Nút 4
Trung bình	1,300	1,290	1,295	1,285	1,829	1,270
Lớn nhất	1,520	1,490	1,490	1,480	2,025	1,460
Nhỏ nhất	1,080	1,090	1,100	1,090	1,632	1,080
Độ lệch chuẩn	0,440	0,400	0,390	0,390	0,393	0,380

Sau khi phân tích dao động của cầu dầm giản đơn, kết quả cho thấy, biểu đồ phân bố xác suất của HSDL mang tính ngẫu nhiên với cấu trúc phức tạp, không tuân theo các phân phối thông thường như phân phối chuẩn hay log-normal. Đặc biệt, không tìm thấy mối quan hệ xác suất rõ ràng giữa các biến ngẫu nhiên liên quan đến tải trọng xe và HSDL của cầu.

Nghiên cứu cũng cho thấy, đối với cầu dầm giản đơn, giá trị HSDL tại các vị trí gần đầu dầm (như nút 2) thấp hơn so với các vị trí nằm ở giữa hoặc cuối dầm (như nút 3 và nút 4). Điều này hợp lý bởi khi xe bắt đầu đi lên cầu, lực tác động ban đầu tạo dao động nhỏ hơn so với giai đoạn khi xe di chuyển vào các khu vực trung tâm của cầu. HSDL cũng có xu hướng tăng theo mức độ gia tăng tải trọng, điều này được phản ánh rõ trong dữ liệu từ Khu QLDB IV. Với giá trị HSDL lớn nhất đạt 1,33, kết quả này phù hợp với các tiêu chuẩn thiết kế cầu hiện hành, như tiêu chuẩn AASHTO (Mỹ) [22] và tiêu chuẩn quốc gia TCVN 11823-2017 [23].

5. Kết luận

Nghiên cứu đã thực hiện phân tích dao động và HSDL của cầu dầm giản đơn dưới tác động của tải trọng xe di động với tính chất thay đổi ngẫu nhiên. Các dữ liệu thực tế về tải trọng xe qua cầu được thu thập và xử lý từ Khu QLDB IV, trong đó có nhiều tải trọng vượt mức cho phép. Kết quả phân tích chỉ ra rằng, phân bố xác suất của HSDL mang tính phức tạp, không tuân theo các phân phối chuẩn thông thường. Giá trị HSDL lớn hơn so với tiêu chuẩn thiết kế hiện hành trong một số trường hợp.

Từ kết quả phân tích và biểu đồ, có thể nhận thấy, HSDL tăng khi tải trọng xe vượt ngưỡng, điều này tiềm ẩn rủi ro cao đối với độ an toàn của công trình cầu trong quá trình vận hành. Sự cộng hưởng từ các yếu tố này dẫn đến thay đổi trạng thái nội lực trong cầu, từ đó có thể làm giảm tuổi thọ của kết cấu. Vì vậy, để duy trì an toàn và kéo dài thời gian sử dụng công trình, cần có các quy định nghiêm ngặt hơn về tải trọng xe qua cầu, đặc biệt phải ngăn chặn tình trạng xe quá tải.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2024-02-32.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. P. Timoshenko, “On the forced vibration of bridges”, *Philos. Mag.*, vol. 43, no. 6, 1922.
- [2] R. K. Wen, “Dynamics response of beams traversed by two-axle loads”, *J. Eng. Mech. Div.*, vol. 86, no. 5, 1960.
- [3] L. Fryba, *Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads*, Third edition, 1999.
- [4] M. Fafard, M. Bennur, and M. Savard, “A general multi-axle vehicle model to study the bridge-vehicle interaction”, *Eng. Comput. (Swansea, Wales)*, vol. 14, no. 5, pp. 491–508, 1997.
- [5] S. G. M. Neves, A. F. M. Azevedo, and R. Calçada, “A direct method for analyzing the vertical vehicle-structure interaction”, *Eng. Struct.*, vol. 34, pp. 414–420, 2012.
- [6] W. Choi, I. Mohseni, J. Park, and J. Kang, “Development of Live Load Distribution Factor Equation for Concrete Multicell Box-Girder Bridges under Vehicle Loading”, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 2019.
- [7] J. A. Li and D. Feng, “A comparative study of vehicle-bridge interaction dynamics with 2D and 3D vehicle models”, *Eng. Struct.*, vol. 292, no. 2, p. 116493, 2023.
- [8] S. Sorrentino, “Power Spectral Density Response of Bridge-Like Structures Loaded by Stochastic Moving Forces”, *Shock Vib.*, vol. 2019, p. 10, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/1790480>.
- [9] S. Sadeghi Eshkevari, T. J. Matarazzo, and S. N. Pakzad, “Simplified vehicle-bridge interaction for medium to long-span bridges subject to random traffic load”, *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 10, no. 4, pp. 693–707, 2020.
- [10] P. A. Montenegro, J. M. Castro, R. Calçada, J. M. Soares, H. Coelho, and P. Pacheco, “Probabilistic numerical evaluation of dynamic load allowance factors in steel modular bridges using a vehicle-bridge interaction model”, *Eng. Struct.*, vol. 226, p. 111316, 2021.
- [11] Y. Shao, C. Miao, J. M. W. Brownjohn, and Y. Ding, “Vehicle-bridge interaction system for long-span suspension bridge under random traffic distribution”, *Structures*, vol. 44, no. 1, pp. 1070–1080, 2022.
- [12] R. Eberle and M. Oberguggenberger, “Vibrations of a Bridge with Random Structural Irregularities Under Random Traffic Load and a Probabilistic Structural Degradation Assessment Approach”, *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 1851–1865, 2023.
- [13] A. Aloisio and R. Alaggio, “Probabilistic Comparative Analysis of Vehicle-Bridge Interaction Models for Predicting Bridge Response under Moving Vehicles”, *J. Eng. Mech.*, vol. 150, no. 3, 2023.
- [14] G. HVS, “Impact factors for highway bridges”, *ASTM STP 1992*, vol. 11164, pp. 155–166, 1992.
- [15] T. Wang, D. Huang, and M. Shahawy, “Dynamic Behavior of Slant-Legged Rigid-Frame Highway Bridge”, *J. Struct. Eng.*, vol. 120, no. 3, pp. 885–902, 1994.
- [16] M. S. D. Huang and T. Wang, “Vibration of thin-walled box-girder bridges excited by vehicles”, *J. Struct. Eng.*, vol. 121, pp. 1330–1337, 1995.
- [17] B. M. Fafard, M. Laflamme, M. Savard, and M. Bennur, “Dynamic analysis of existing continuous bridge”, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 1998.
- [18] L. Deng, Y. Yu, Q. Zou, and C. S. Cai, “State-of-the-Art Review of Dynamic Impact Factors of Highway Bridges”, *J. Bridg. Eng.*, vol. 20, no. 5, p. 04014080, 2015.
- [19] D. W. Scott, *Multivariate density estimation: Theory, practice, and visualization*. John Wiley & Sons, 2015.
- [20] R. W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of structures*. McGraw-Hill, Inc. Singapore, 1993.
- [21] O. Zienkiewicz, R. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method*, Sixth edition, 2005.
- [22] AASHTOLRFD, *Bridge design specifications*, Washington, DC, 2012.
- [23] Ministry of Transport, *National Standard TCVN 11823:2017 on Road Bridge Design*, 2017.