

CHẨN ĐOÁN SỰ SUY GIẢM ĐỘ CỨNG TRONG KẾT CẤU DẦM THÔNG QUA DỮ LIỆU ĐƯỜNG ẢNH HƯỞNG CỦA CHUYỂN VỊ

Đặng Ngọc Thúy Vy^{a,b,c}, Hồ Đức Duy^{a,b}, Hà Minh Tuấn^{d,*}

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh,
268 đường Lý Thường Kiệt, Quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bĐại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cCông ty TNHH Tư vấn Xây dựng Meinhardt (Việt Nam),
19 Đặng Tất, Tân Định, Quận 1, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^dViện Công nghệ Việt - Nhật, Trường Đại học Công nghệ TP. Hồ Chí Minh,
475A Điện Biên Phủ, Phường 25, Quận Bình Thạnh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 29/3/2023, Sửa xong 27/4/2023, Chấp nhận đăng 11/5/2023

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày về việc chẩn đoán sức khỏe kết cấu của dầm chịu tải trọng di động thông qua dữ liệu đường ảnh hưởng của chuyển vị. Ứng xử của một kết cấu dầm đồng chất dài 2,2 m chịu tải trọng di động được tính toán dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn. Đánh giá tình trạng hư hỏng bao gồm chẩn đoán sự xuất hiện, vị trí và mức độ suy giảm độ cứng. Dữ liệu chuyển vị của dầm ở trạng thái chuẩn và trạng thái hư hỏng được truy xuất từ mô hình tính toán. Sau đó, hai chỉ số Root Mean Square Deviation (RMSD), và Mean Absolute Percentage Deviation (MAPD) được tính toán để đánh giá sự tương quan giữa hai đường ảnh hưởng chuyển vị dầm ở hai trạng thái khảo sát, từ đó xác định sự xuất hiện và vị trí của hư hỏng. Với mục đích chẩn đoán được mức độ suy giảm độ cứng, hai chỉ số trên được đề xuất cải tiến thông qua các bước chuẩn hóa, vẽ biểu đồ, khoanh vùng hư hỏng, và xác định ngưỡng hư hỏng. Kết quả của các kịch bản khảo sát trong nghiên cứu này đều có độ chính xác giữa thực tế và chẩn đoán là trên 90% và sự đồng thuận đều ở mức trung bình hoặc tốt.

Từ khóa: chẩn đoán sức khỏe kết cấu; đường ảnh hưởng chuyển vị; suy giảm độ cứng; dầm.

DETECTING STIFFNESS DETERIORATION IN BEAM-TYPE STRUCTURES THROUGH DISPLACEMENT INFLUENCE LINE DATA

Abstract

This study aimed to evaluate the structural health of beam-type structures exposed to moving loads using displacement influence line data. Initially, the behavior of a 2.2 m long beam exposed to a moving load is estimated using the finite element method in order to analyze the degradation of the beam on three levels: appearance, location, and degree of stiffness reduction. For assessment, the displacement data of the beam in the presumed non-damaged condition (standard state) and the state to be evaluated for damage are received from the computational model. Root Mean Square Deviation (RMSD) and Mean Absolute Percentage Deviation (MAPD) indices were calculated to investigate the correlation between two influence lines of beam displacement in the two states of data collection. These indicators aid in determining the presence and location of damage, as demonstrated by the findings of this study. In addition, for the purpose of defining the severity of deterioration, it is suggested to improve the RMSD and MAPD indices through standardization, charting, damage zoning, and threshold calculation. In this investigation, the assessment In this investigation, the assessment scenarios demonstrated an overall fact-to-diagnosis accuracy of greater than 90%, with a consensus ranging from moderate to very good.

Keywords: structural health monitoring; displacement influence line; reduction in stiffness; beam-type structures.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(3V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(3V)-04) © 20223 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hm.tuan@hutech.edu.vn (Tuấn, H. M.)

1. Giới thiệu

Khoa học công nghệ trong ngành xây dựng đã và đang phát triển mạnh mẽ. Các công trình lớn như nhà cao tầng, cầu treo, sân vận động và nhà máy ngày càng được xây dựng với quy mô lớn hơn. Một trong các loại công trình có công năng quan trọng trong việc vận hành hàng hóa trên khắp thế giới là dạng nhà kho phân loại phục vụ công tác logistics trong ngành quản lý chuỗi cung ứng. Việc quan sát và theo dõi chất lượng kết cấu của các công trình này là rất cần thiết để đảm bảo chức năng sử dụng của chúng. Các sự cố dầm bị hư hại trong các nhà máy, nhà kho nếu xảy ra sẽ dẫn đến các hậu quả nghiêm trọng bởi các dầm này không chỉ chịu tải trọng tĩnh từ hàng hóa mà còn chịu tải động do hệ thống thiết bị, đặc biệt là các xe vận chuyển, xe nâng. Bảo trì liên tục các kết cấu của công trình là công tác thiết yếu để đảm bảo an toàn và kéo dài tuổi thọ của chúng.

Rytter [1] đề xuất ba cấp bậc đánh giá hư hỏng vào năm 1993 bao gồm chẩn đoán sự xuất hiện hư hỏng, vị trí hư hỏng và mức độ hư hỏng. Nói cách khác, mục tiêu của các phương pháp chẩn đoán hư hỏng là xác định được sự hư hỏng đã xảy ra, vị trí và mức độ nghiêm trọng. Hai nhóm đối tượng nghiên cứu chính của lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu là ứng xử động học và ứng xử tĩnh học của kết cấu cần chẩn đoán. Về mặt nghiên cứu ứng xử động học, một số phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu dầm dựa trên các đặc trưng dao động đã được nghiên cứu và phát triển hiện nay bao gồm: Phương pháp dựa trên sự thay đổi của tần số (frequency change - based damage detection method), dạng dao động (modal assurance criterion), độ cong dạng dao động (mode shape curvature - based damage detection method), độ cứng và tần số (stiffness, frequency change - based damage detection method), năng lượng biến dạng (modal strain energy - based damage detection method),... Các ví dụ về nghiên cứu thông qua những phương pháp đã nêu như Adams và cs. [2] đã đánh giá tần số của dầm thông qua việc áp tải trọng động cho thí nghiệm uốn ba điểm vào năm 1978. Một năm sau, Cawley và Adams [3] đã sử dụng tần số tự nhiên để dự đoán khuyết tật cho cầu kiện tám nhôm phẳng. Năm 1991, Pandey và cs. [4] nghiên cứu về độ cong dạng dao động trong dầm công-xôn, kết quả cho thấy sự thay đổi độ cong dạng dao động tỷ lệ thuận với mức độ hư hỏng của kết cấu. Stubbs và cs. [5] trình bày một phương pháp dựa trên việc giảm năng lượng biến dạng của dạng dao động (từ kết quả đo dạng dao động) giữa hai mô hình kết cấu có nhiều bậc tự do vào năm 1995. Một phương pháp dựa vào năng lượng biến dạng để xác định vị trí và ước tính mức độ hư hỏng trong kết cấu dầm với một vài tần số và dạng dao động được Kim và cs. [6] đề xuất năm 2003. Yazdanpanah và Seyedpoor [7] đã đưa ra một chỉ số để chẩn đoán vị trí hư hỏng bên trong kết cấu dầm bằng cách sử dụng độ cong đường chuyển vị vào năm 2013. Hai năm sau, Cha và Buyukozturk [8] đề xuất một phương pháp chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu sử dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu dựa trên sự thay đổi của năng lượng biến dạng trong kết cấu. Năm 2019, Khatir và cs. [9] trình bày bài toán chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng qua hai bước cho kết cấu dầm. Tác giả đưa ra phương pháp chẩn đoán vị trí hư hỏng dựa vào chỉ tiêu đánh giá hư hỏng có tên normalized modal strain energy indicator (nMSEDI). Sau ba năm, Feng và Liang [10] đã phát triển công nghệ dựa trên hiệu ứng áp điện để chẩn đoán sức khỏe kết cấu. Vẫn trong năm đó, nhóm nghiên cứu Li và cs. [11] đã giới thiệu phương án tích hợp hệ thống cảm biến sợi quang, cảm biến điện áp, định vị toàn cầu để chẩn đoán sức khỏe kết cấu cầu Zhijiang (Hangzhou, Trung Quốc).

Bên cạnh các đặc trưng về động học của kết cấu, các đặc trưng tĩnh học cũng có thể thu được chính xác và nhanh chóng từ những công cụ hỗ trợ ít tốn kém về chi phí. Các phương pháp phát hiện ra sự hư hại dựa trên thông số tĩnh đã thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu trong những năm qua. Từ năm 1982, Sheena và cs. [12] giới thiệu phương pháp phân tích dựa vào việc giảm độ lệch giữa thực tế và đối tượng phân tích ma trận độ cứng để đo được chuyển vị giảm xuống. Sanayei và Onipede [13] đã đề xuất một phương pháp chính xác để tính các thông số của phần tử kết cấu từ

các dữ liệu thí nghiệm tĩnh vào năm 1991, ví dụ như việc áp dụng tải tĩnh và đo chuyển vị. Hai năm sau, Banan và cs. [14] đã đề nghị một phương pháp dựa vào việc xác định các thông số hư hại của mỗi phần tử từ chuyển vị do tải trọng tĩnh cho trước. Phương pháp mô tả sự thay đổi của chuyển vị tĩnh với bậc tự do định trước bằng cách giảm thiểu sự chênh lệch giữa véc-tơ tải của kết cấu có phá hoại và không phá hoại của Bakhtiari Nejad và cs. [15] vào năm 2005. Abdo [16] đã thí nghiệm khảo sát các thông số bằng cách sử dụng đường cong chuyển vị để xác định vị trí hư hỏng vào năm 2012, kết quả cho thấy rằng sự thay đổi của đường cong chuyển vị có thể được sử dụng là một chỉ số hữu hiệu, thậm chí có khả năng chỉ ra vị trí của phần tử bị giảm một lượng nhỏ độ cứng. Năm 2017, Ha và Fukada [17] đã giới thiệu chỉ số dựa trên chuyển vị (DBI) như một phương pháp xác định hư hỏng sử dụng sự thay đổi hình dạng chuyển vị để phát hiện hư hỏng kết cấu của mô hình dầm bê tông ứng suất trước (PC). Tuy nhiên, DBI chỉ sử dụng dữ liệu đầu vào có được từ tải trọng tĩnh và không xét đến tải trọng động. Hai năm sau, Won và cs. [18] thực hiện giám sát chuyển vị bằng máy biến áp vi sai biến đổi tuyến tính (linear variable differential transformer - LVDT) để đánh giá hư hỏng dầm; Ono và cs. [19] đã đề xuất phương pháp phát hiện hư hỏng cho bản bê tông cốt thép của cầu đường bộ bằng đường ảnh hưởng của chuyển vị. Cũng trong năm này, đường ảnh hưởng của chuyển vị tiếp tục được Maki và cs. [20] nghiên cứu để đánh giá sự suy giảm độ cứng của dầm cầu bê tông cốt thép liên hợp ở khu vực miền núi. Gần đây, Zhang và cs. [21] đã công bố phương pháp giám sát chuyển vị kết cấu dựa trên vùng nhận dạng kết hợp hệ thống mạng nơ-ron vào năm 2021.

Trong những năm gần đây ở Việt Nam, nhiều nghiên cứu về phương pháp chẩn đoán hư hỏng của kết cấu cũng đã được công bố và đăng trên các tạp chí và hội nghị khoa học. Về các phương pháp sử dụng các thông số động lực học, Hồ và cs. [22] đã nghiên cứu dự đoán lực căng trước của bê tông ứng suất trước bằng đặc trưng dao động và phương pháp đồng nhất vào năm 2012. Một năm sau, Phương pháp sử dụng trở kháng để dò tìm hư hỏng trên dầm cũng được Nguyễn và cs. [23] thực hiện và cho kết quả thực nghiệm trên dầm nhôm công-xôn. Hồ và cs. [24] trình bày phương pháp chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu dầm với các điều kiện biên khác nhau, sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng được kiến nghị và áp dụng thành công cho bài toán dầm đơn giản và bài toán dầm công-xôn vào năm 2018. Hai năm sau, Cao và cs. [25] đề xuất một phương pháp chẩn đoán hư hỏng về cả vị trí và mức độ của hư hỏng cho kết cấu tấm thông qua quy trình chẩn đoán hai bước. Tiếp tục trong năm đó, Cao và cs. [26] tiếp tục phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm. Bên cạnh những nghiên cứu trên ứng xử động học của kết cấu một số nghiên cứu sử dụng ứng xử tĩnh học của kết cấu được phát triển. Năm 2011, Trần và cs. [27] trình bày các kết quả kiểm tra thực nghiệm để khẳng định phương pháp xác định vị trí, độ sâu vết suy giảm độ cứng của dầm có một hoặc nhiều vết suy giảm độ cứng bằng phân tích Wavelet các chuyển vị tĩnh hoàn toàn có thể dùng trong thực tế. Các kết quả nghiên cứu nhận được là cơ sở cho việc xây dựng một phương pháp đơn giản và hiệu quả để xác định vết suy giảm độ cứng trong các kết cấu hệ thanh. Có thể nói trong những năm gần đây tại Việt Nam, các nghiên cứu về chẩn đoán sức khỏe kết cấu cũng được chú trọng.

Nghiên cứu này dựa trên đường ảnh hưởng của chuyển vị để đánh giá sự suy giảm độ cứng của dầm đồng chất. Các chỉ số đánh giá hư hỏng không chỉ tập trung vào những thay đổi trong đường ảnh hưởng chuyển vị để chẩn đoán sự xuất hiện và vị trí của hư hỏng mà còn từ các chỉ số này phát triển phương pháp cải tiến nhằm xác định bề rộng vùng suy giảm độ cứng, đồng nghĩa với đánh giá mức độ hư hỏng. Đầu tiên, các chỉ số chẩn đoán sử dụng các đường ảnh hưởng chuyển vị làm dữ liệu đầu vào được khảo sát trong kịch bản dầm có hư hỏng giả định giữa nhịp. Sau đó, vị trí cũng như mức độ suy giảm độ cứng được thay đổi để khảo sát sự hiệu quả của phương pháp trong việc chẩn đoán hư hỏng. Ngoài ra, bộ ba chỉ số A , B , C [28] và chỉ số K [29] cũng được tính toán để đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán. Phương pháp phát hiện và xác định vị trí hư hỏng dựa trên đường

ảnh hưởng của chuyển vị.

2. Phương pháp chẩn đoán

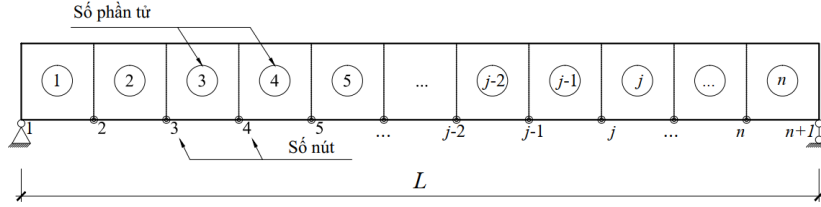
2.1. Đường ảnh hưởng của chuyển vị

Đường biểu thị các giá trị của một đại lượng bất kỳ (phản lực, mô-men, lực cắt, lực dọc hoặc chuyển vị) tại một vị trí nào đó khi một tải trọng tập trung bằng đơn vị có phương và chiều không đổi di chuyển trên kết cấu gọi là đường ảnh hưởng. Chuyển vị nút tại điểm j (Hình 1) của dầm chịu tải trọng di động P_k dịch chuyển theo tọa độ x_k (Hình 2) ở trạng thái ban đầu và trạng thái hư hỏng lần lượt được cho bởi phương trình sau:

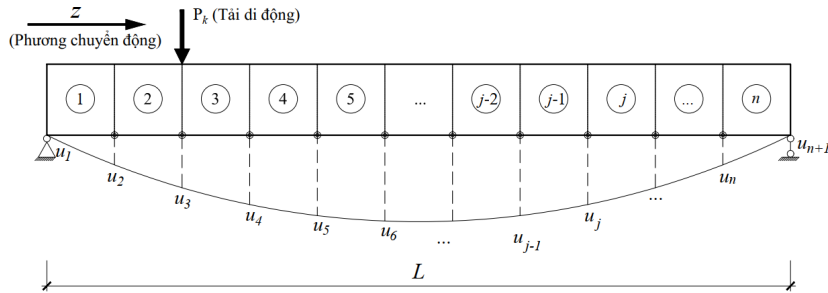
$$IF_j^i = [x_k, u_{jk}^i] = [(x_1, u_{j1}^i), (x_2, u_{j2}^i), \dots, (x_{n+1}, u_{j(n+1)}^i)] \quad (1)$$

$$IF_j^d = [x_k, u_{jk}^d] = [(x_1, u_{j1}^d), (x_2, u_{j2}^d), \dots, (x_{n+1}, u_{j(n+1)}^d)] \quad (2)$$

trong đó x_k là tọa độ điểm đặt lực của tải di động P_k ; $u_{jk}^i, u_{jk}^d (j, k = 1 \rightarrow n+1)$ lần lượt là chuyển vị nút của dầm trạng thái ban đầu và trạng thái hư hỏng.



Hình 1. Minh họa dầm đơn giản và vị trí đo đạc



Hình 2. Minh họa đường ảnh hưởng của chuyển vị tại vị trí trung điểm của dầm

2.2. Chỉ số Root Mean Square Deviation (RMSD)

Root Mean Square Deviation (RMSD) là một chỉ số thống kê được sử dụng để đánh giá sự khác biệt giữa các giá trị dữ liệu ở hai trạng thái khác nhau. RMSD được tính bằng cách lấy căn bậc hai của trung bình bình phương độ lệch giữa các giá trị dữ liệu bình thường và giá trị chẩn đoán. Năm 1995, Sun và cs. [30] sử dụng RMSD giữa giá trị hai giai đoạn trước và sau khi hư hỏng xảy ra để đánh giá sự hư hỏng trong kết cấu hệ giàn thép. Năm 2016, Liang và cs. [31] dùng chỉ số RMSD nhận xét hư hỏng trượt giữa bê tông và kết cấu thép trong kết cấu bê tông thép liên hợp. Nghiên cứu này sử dụng đường ảnh hưởng của chuyển vị của dầm làm dữ liệu đầu vào để tính toán chỉ số RMSD. Do đó, chỉ số RMSD được tính theo công thức như sau:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [u_{jk}^d - u_{jk}^i]^2}{\sum_{j=1}^n [u_{jk}^i]^2}} \quad (3)$$

trong đó $u_{jk}^i, u_{jk}^d (j, k = 1 \rightarrow n + 1)$ lần lượt là chuyển vị nút của dầm trạng thái ban đầu và trạng thái hư hỏng; n là số lần đo chuyển vị tại điểm đang xét. Khi $\text{RMSD} = 0$, kết cấu không có hư hỏng tại vị trí đang xét. Với $\text{RMSD} > 0$, kết cấu có hư hỏng tại vị trí đang xét. RMSD càng nhỏ thì sự khác biệt giữa các giá trị dữ liệu và giá trị dự đoán càng ít, và mô hình dự đoán càng chính xác.

2.3. Chỉ số Mean Absolute Percentage Deviation (MAPD)

Giurgiutui và cs. [32] đã sử dụng một phương pháp thống kê chỉ số hư hỏng là trị tuyệt đối tỷ lệ độ lệch trung bình (Mean Absolute Percentage Deviation - MAPD) để đánh giá sự hư hỏng trong tấm tròn nhôm vào năm 2002. Tiếp đó năm 2017, Li và cs. [33] đã sử dụng chỉ số MAPD để đánh giá sự hư hỏng tách lớp khi sử dụng vật liệu FRP thay cho cốt thép trong kết cấu BTCT. Trong nghiên cứu này, chỉ số MAPD giữa hai giá trị và ($i = 1, 2, 3, , n$) trước và sau hư hỏng được xác định như sau:

$$\text{MAPD} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{u_{jk}^d - u_{jk}^i}{[u_{jk}^i]} \right| \quad (4)$$

trong đó $u_{jk}^i, u_{jk}^d (j, k = 1 \rightarrow n + 1)$ lần lượt là chuyển vị nút của dầm trạng thái ban đầu và trạng thái hư hỏng; n là số lần đo chuyển vị tại điểm đang xét. Khi $\text{MAPD} = 0$, kết cấu không có hư hỏng tại điểm đang xét. Với kết quả $\text{MAPD} > 0$, kết cấu có hư hỏng tại điểm đang xét.

2.4. Chuẩn hóa các chỉ số

Giá trị chuẩn hóa được sử dụng để cải tiến các chỉ số RMSD và MAPD, và được biểu diễn dưới dạng biểu đồ đường và kết hợp với ngưỡng hư hỏng để tìm ra bề rộng vùng suy giảm độ cứng. Xem toàn bộ các chỉ số chưa chuẩn hóa (chỉ số thuần) là tập hợp X như các giá trị ngẫu nhiên với phân phối chuẩn, ta có:

$$Z_j^X = \frac{X_j - \mu[X_j]}{\sigma[X_j]} \quad (5)$$

trong đó $X_j (j = 1 \rightarrow n + 1)$ là giá trị từng phần tử của tập hợp X ; $\mu[X_j]$ là giá trị trung bình của tập hợp X ; $\sigma[X_j]$ là độ lệch chuẩn của tập hợp X . Định vị hư hỏng được thực hiện sau khi có cảnh báo hư hỏng xuất hiện. Z_j^X sẽ được so sánh với ngưỡng hư hỏng Z_o .

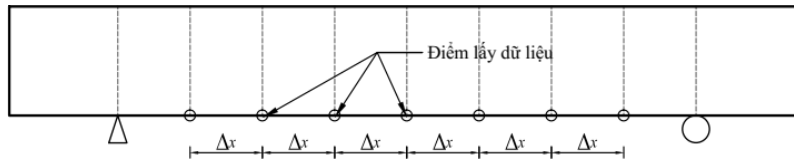
2.5. Khoanh vùng nghi vấn hư hỏng

Trước tiên, điểm khoanh vùng trước (KVT) và khoanh vùng sau (KVS) của vùng nghi vấn có hư hỏng được xác định dựa trên sự thay đổi đột ngột của các chỉ số thuần. Thứ tự trước sau của điểm khoanh vùng phụ thuộc và chiều chuyển động của lực đơn vị. Sự thay đổi đột ngột của chỉ số thuần được xác định dựa trên độ dốc của đường nối các chỉ số thuần, biểu thị bằng công thức (6):

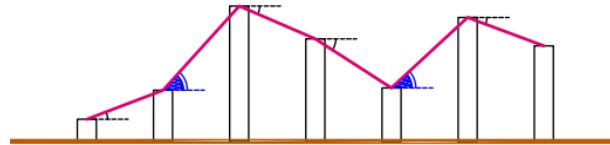
$$\Delta_{i,i+1} = \frac{X_{i+1} - X_i}{\Delta x} \quad (6)$$

trong đó X_i, X_{i+1} lần lượt là giá trị chỉ số thuần tại vị trí lấy điểm dữ liệu thứ i và $i + 1$; Δx là khoảng cách giữa hai vị trí lấy điểm dữ liệu (Hình 3).

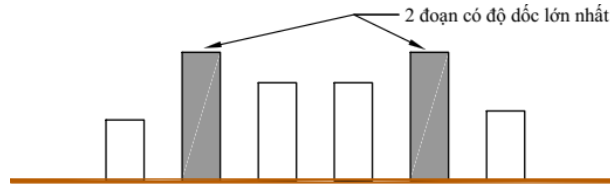
Điểm KVT và KVS được chọn sơ bộ thuộc hai đoạn độ dốc lớn nhất khi so sánh tất cả giá trị độ dốc đã xác định. Thêm vào đó, việc xác định điểm KVT và KVS không chỉ dựa trên đoạn có độ dốc lớn nhất mà còn kể đến độ dốc của các đoạn liền trước KVT và liền sau KVS. Nếu độ lớn độ dốc của các đoạn liền kề này lớn hơn 1/3 giá trị độ dốc lớn nhất thì đoạn đấy được tính thuộc khoanh vùng chứa hư hỏng. Nếu độ dốc của các đoạn lân cận không đáp ứng được điều kiện trên, thì KVT và KVS sẽ được xác định dựa trên hai đoạn có độ dốc lớn nhất đã xét.



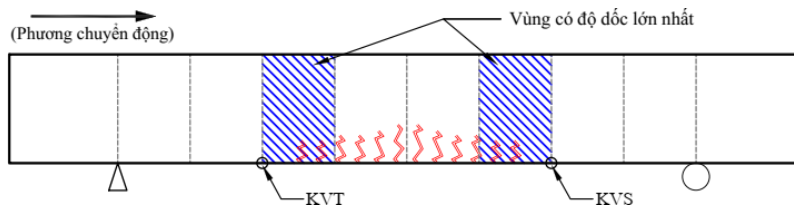
(a) Mô tả tọa độ và khoảng cách lấy dữ liệu



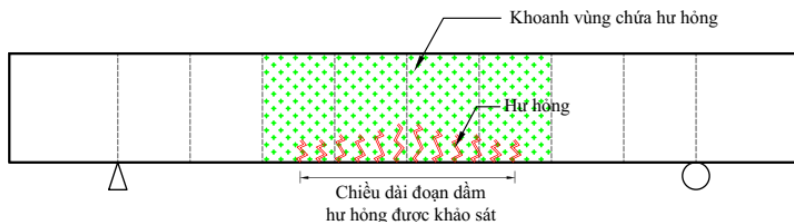
(b) Biểu đồ chỉ số thuần



(c) Biểu đồ độ dốc



(d) Xác định vùng có độ dốc lớn nhất, KVT và KVS

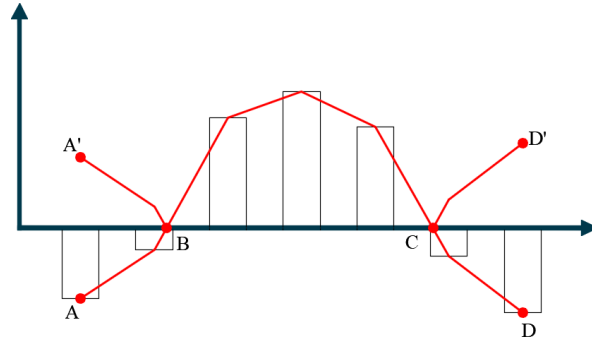


(e) Xác định khoanh vùng hư hỏng

Hình 3. Các bước khoanh vùng chứa hư hỏng

2.6. Biểu đồ chẩn đoán

Các chỉ số thuần được chuẩn hóa dựa trên công thức (5) dùng cho việc chẩn đoán mức độ hư hỏng. Biểu đồ chỉ số chuẩn hóa được thể hiện bằng cách nối các điểm giá trị chỉ số chuẩn hóa tạo thành đường thẳng liên mạch. Sau đó, các phần đường thẳng mang giá trị âm được lấy đối xứng qua trục hoành của biểu đồ để tạo thành đường chuẩn hóa chẩn đoán (Hình 4). Theo Hình 4, phần âm của giá trị chuẩn hóa thuộc đoạn AB và CD, phần dương của giá trị chuẩn hóa thuộc đoạn BC, phần trị tuyệt đối của giá trị chuẩn hóa thuộc đoạn A'BCD'.



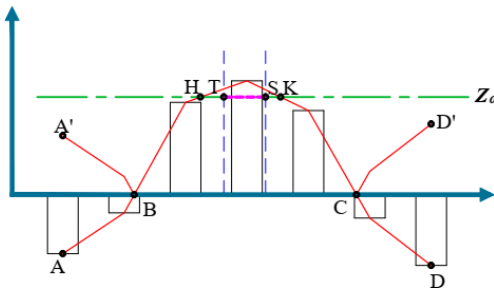
Hình 4. Minh họa thành phần giá trị trong biểu đồ chuẩn hóa

2.7. Ngưỡng hư hỏng

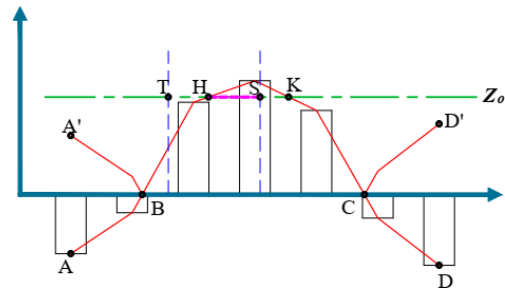
Trong nghiên cứu này, ngưỡng hư hỏng (Z_o) được đề xuất là hiệu của giá trị chuẩn hóa lớn nhất và độ lệch chuẩn của các giá trị chuẩn hóa dương, và được xác định theo công thức (7):

$$Z_o = \max(Z_j) - \text{std}(Z_j^+) \quad (7)$$

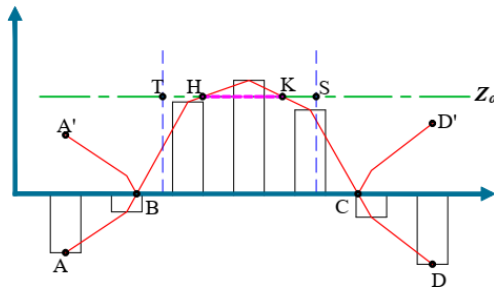
trong đó Z_o là ngưỡng hư hỏng; $\max(Z_j)$ là giá lớn nhất chỉ số chuẩn hóa trong khoảng vùng hư hỏng (thuộc đoạn ABCD trong Hình 4); $\text{std}(Z_j^+)$ là độ lệch chuẩn của các chỉ số chuẩn hóa dương (thuộc đoạn BC trong Hình 4). Ngưỡng hư hỏng lúc này được thể hiện là đường thẳng song song với trục hoành có tung độ Z_o . Dựa vào số điểm giao của đường ngưỡng hư hỏng và đường chuẩn hóa chẵn đoán nằm trong vùng nghi vấn có hư hỏng, chiều dài đoạn dầm giả định suy giảm độ cứng được xác định theo bốn trường hợp sau. Với trường hợp Hình 5(a), giao điểm của ngưỡng hư hỏng và đường chuẩn hóa chẵn đoán nằm ngoài vùng nghi vấn hư hỏng, chiều dài đoạn dầm suy giảm độ cứng là



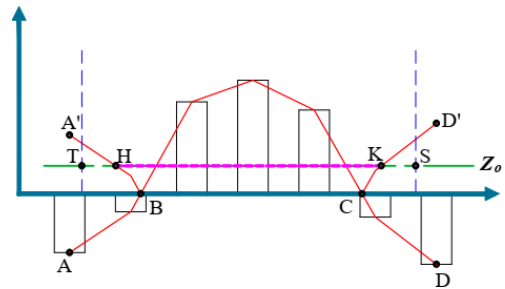
(a) Không có điểm giao



(b) Có 1 điểm giao



(c) Có 2 điểm giao



(d) Có hơn 2 điểm giao

Hình 5. Các trường hợp xét số điểm giao nằm trong vùng nghi vấn hư hỏng

khoảng cách giữa hai điểm KVT và KVS. Với trường hợp chỉ có 1 điểm giao nằm trong vùng nghi vấn (Hình 5(b)), chiều dài đoạn dầm suy giảm độ cứng là khoảng cách giữa điểm giao nằm trong vùng nghi vấn (điểm H) và giao điểm (điểm S) giữa đường ngưỡng hư hỏng và đường khoanh vùng (KVT hoặc KVS) gần nhất với điểm giao còn lại của đường ngưỡng hư hỏng và đường chuẩn hóa chẩn đoán nằm ngoài vùng nghi vấn (điểm K). Với trường hợp có hai điểm giao nằm trong vùng nghi vấn (Hình 5(c)), chiều dài đoạn dầm suy giảm độ cứng là khoảng cách giữa 2 giao điểm của đường ngưỡng hư hỏng và đường chuẩn hóa chẩn đoán (điểm H và K). Với trường hợp Hình 5(d), khi số giao điểm nhiều hơn 2, chiều dài đoạn dầm suy giảm độ cứng được xét bởi 2 điểm giao giữa đường ngưỡng hư hỏng và đường chuẩn hóa chẩn đoán có khoảng cách xa nhất.

3. Phương pháp đánh giá độ chính xác của chẩn đoán

3.1. Bộ chỉ số A, B, C

Vào năm 2023, Hà và cs. [28] đã dùng bộ chỉ số A, B, C nhằm đánh giá độ chính xác cũng như hiệu quả của phương pháp độ cong đường biến dạng. Áp dụng cho nghiên cứu này, ba chỉ số A, B, C được sử dụng để đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán. Trong đó A, B, C lần lượt là độ chính xác phần tử suy giảm độ cứng, độ chính xác vùng không suy giảm và độ chính xác tổng thể, và được định nghĩa như sau:

Độ chính xác vùng suy giảm độ cứng: A là tỉ số giữa chiều dài đoạn dầm suy giảm độ cứng chẩn đoán nằm trong đoạn dầm suy giảm độ cứng giả định với chiều dài đoạn suy giảm độ cứng giả định.

Độ chính xác vùng không suy giảm độ cứng: Ngoài việc đánh giá độ chính xác của phương pháp chẩn đoán cho vùng suy giảm độ cứng, cần phải đánh giá cho cả vùng không suy giảm độ cứng và toàn bộ chiều dài dầm. Độ chính xác cho vùng không suy giảm B là tỉ số giữa chiều dài vùng không suy giảm độ cứng chẩn đoán với chiều dài vùng không suy giảm độ cứng giả định.

Độ chính xác tổng thể: Mang tính đánh giá chung cho tổng thể toàn bộ chiều dài dầm. Độ chính xác tổng thể C được đề xuất với ý nghĩa bằng tổng độ chính xác chẩn đoán vùng suy giảm độ cứng và vùng không suy giảm độ cứng nhân với trọng số của mỗi vùng. Trọng số của mỗi vùng (suy giảm độ cứng, không suy giảm độ cứng) là tỉ số giữa chiều dài vùng suy giảm độ cứng hoặc không suy giảm độ cứng thực tế với chiều dài toàn bộ dầm, và được tính như sau: Độ chính xác vùng suy giảm độ cứng, chỉ số A:

$$A = \frac{L_{pred,in}}{L_{crack}} \times 100\% \quad (8)$$

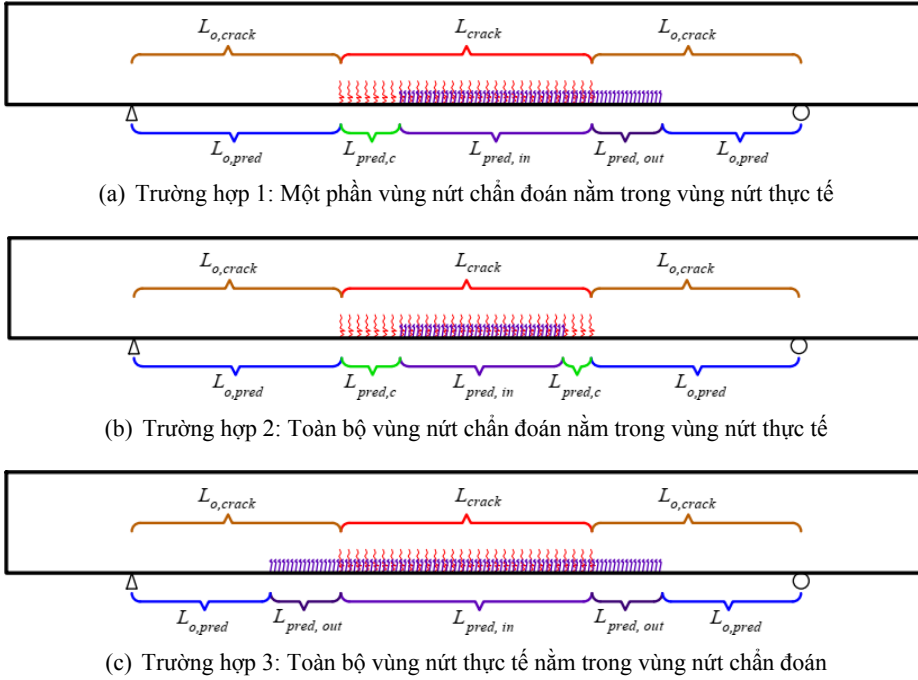
Độ chính xác vùng không suy giảm độ cứng, chỉ số B:

$$B = \frac{L_{o,pred}}{L_{o,crack}} \times 100\% \quad (9)$$

Độ chính xác tổng thể, chỉ số C:

$$C = A \times \frac{L_{crack}}{L} + B \times \frac{L_{o,crack}}{L} \quad (10)$$

trong đó $L_{pred,in}$ là chiều dài vùng suy giảm độ cứng chẩn đoán nằm trong vùng suy giảm độ cứng thực tế; L_{crack} là chiều dài vùng suy giảm độ cứng thực tế; $L_{o,pred}$ là chiều dài vùng không suy giảm độ cứng chẩn đoán (đã loại bỏ vùng suy giảm độ cứng chẩn đoán nằm ngoài phạm vi vùng suy giảm độ cứng thực tế); $L_{pred,out}$ là chiều dài vùng suy giảm độ cứng chẩn đoán nằm ngoài vùng suy giảm độ cứng thực tế; $L_{o,crack}$ là chiều dài vùng không suy giảm độ cứng thực tế. Đặc biệt với trường hợp 2 (Hình 6(b)), độ chính xác vùng không suy giảm độ cứng chỉ số $B = 100\%$ khi $L_{pred,out} = 0$ và $L_{o,pred} = L_{o,crack}$. Và với trường hợp 3 (Hình 6(c)), độ chính xác vùng suy giảm độ cứng chỉ số $A = 100\%$ khi $L_{pred,in} = L_{crack}$.



Ghi chú:

Đoạn dầm hư hỏng được khảo sát

Đoạn dầm hư hỏng chẩn đoán

Hình 6. Các trường hợp đánh giá chỉ số A, B, C ứng với các vị trí khả thi của bề rộng vùng suy giảm độ cứng chẩn đoán

3.2. Chỉ số K (Cohen's Kappa Coefficient)

Bên cạnh ba chỉ số trên, nghiên cứu này giới thiệu chỉ số K từ thống kê Cohen's Kappa công bố trong Cohen [29] giúp đo đặc độ đồng thuận giữa các thành phần định tính. Chỉ số K dùng để đánh giá mức độ thống nhất của kết quả chẩn đoán và thực tế. Sự kiện (“xảy ra” hoặc “không xảy ra”) được hiểu là tính chất của phần tử (“có hư hỏng” hoặc “không hư hỏng”) trong mô hình chẩn đoán của nghiên cứu này. Khi phần tử bị hư hỏng (do suy giảm độ cứng) nghĩa là sự kiện xảy ra, ngược lại phần tử vẫn nguyên vẹn (không suy giảm độ cứng) là sự kiện không xảy ra.

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (11)$$

trong đó K là chỉ số Kappa; P_o là tỷ lệ quan sát hai dữ liệu đều cho kết quả giống nhau (cả hai cùng hư hỏng hoặc không hư hỏng); P_e là tỷ lệ giống nhau ngẫu nhiên. Chỉ số K luôn nhỏ hơn hoặc bằng 1. Giá trị nhỏ hơn hoặc bằng 0 cho biết rằng trình phân loại là vô dụng, không có cách chuẩn hóa nào để diễn giải các giá trị của nó. Landis và Koch [34] cung cấp một cách để mô tả các giá trị như Bảng 1.

Việc xác định P_o được thực hiện theo nhiều phương pháp khác nhau tùy thuộc vào mục đích đánh giá của nghiên cứu. Trước đó, Goodman và Kruskal [35] đề xuất P_o là giá trị trung bình của hai dữ liệu. Tuy nhiên trong nghiên cứu này, tỷ lệ quan sát hai dữ liệu được đánh giá theo một phương pháp khác, được gọi là ma trận nhầm lẫn (confusion matrix). Ma trận nhầm lẫn là đồ thị trực quan của hai yếu tố khảo sát và trông giống như một cấu trúc giống bảng. Hình 7 trình bày tần suất của 4 tổ hợp: TP (true positive), TN (true positive), FP (false positive) và FN (false negative). True (đúng) chỉ sự

Bảng 1. Phân loại đánh giá chỉ số K

Nhỏ hơn 0,2	Đồng thuận thấp
Từ 0,2 đến 0,4	Đồng thuận dưới trung bình
Từ 0,4 đến 0,6	Đồng thuận trung bình, vừa phải
Từ 0,6 đến 0,8	Đồng thuận tốt
Từ 0,8 đến 1,0	Đồng thuận rất tốt

tương hợp, khi kết quả phân loại phù hợp với giá trị thực tế. False (sai) chỉ sự bất xứng hay nhầm lẫn, khi mô hình phân loại nhầm so với thực tế.

		Thực tế (True Class)		
		Có hư hỏng (Positive)	Không hư hỏng (Negative)	Tổng
Chuẩn đoán (Predicted Class)	Có hư hỏng (Positive)	a (TP)	b (FP)	a+b
	Không hư hỏng (Negative)	c (FN)	d (TN)	c+d
	Tổng	a+c	b+d	N

Hình 7. Minh họa mô hình ma trận nhầm lẫn áp dụng cho nghiên cứu

Theo mô hình ma trận nhầm lẫn, tỷ lệ quan sát hai dữ liệu cho kết quả giống nhau P_o và tỷ lệ phù hợp mong muốn P_e được xác định như sau:

$$P_o = \frac{a + d}{N} \quad (12)$$

$$P_e = \frac{P_e^{(Y)} + P_e^{(N)}}{N} \quad (13)$$

Với:

$$P_e^{(Y)} = \frac{(a + b) \times (a + c)}{N} \quad (14)$$

$$P_e^{(N)} = \frac{(c + d) \times (b + d)}{N} \quad (15)$$

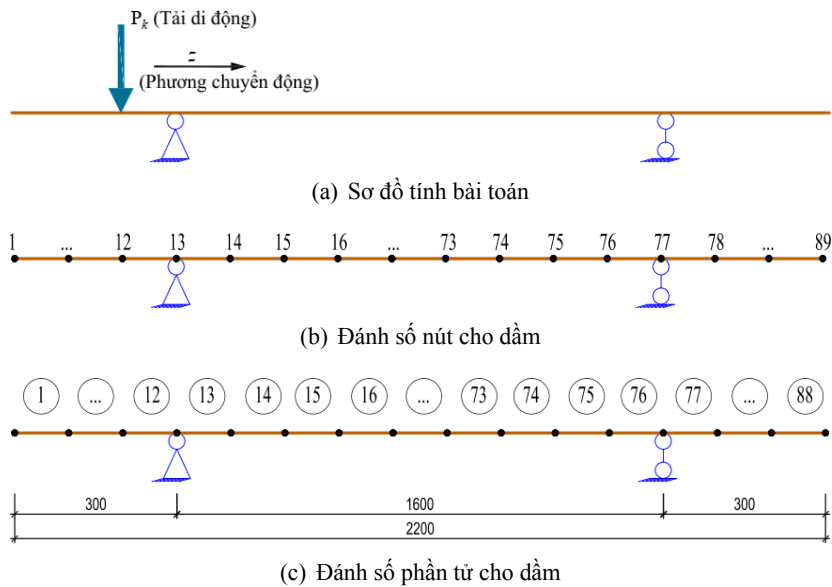
trong đó $P_e^{(Y)}$ là tỷ lệ đồng thuận ngẫu nhiên cho sự kiện “xảy ra” là có hư hỏng; $P_e^{(N)}$ là tỷ lệ đồng thuận ngẫu nhiên cho sự kiện “không xảy ra” là không hư hỏng.

4. Bài toán áp dụng và phân tích kết quả chẩn đoán

Đối tượng khảo sát trong nghiên cứu này là dầm đồng chất có mặt cắt tiết diện 200×300 mm, dài 2,2 m, khoảng cách hai gối tựa là $L = 1,6$ m bằng phần mềm SAP2000 gồm 88 phần tử dài 25 mm, chịu tải di động từ trái sang phải của dầm (Hình 8). Bảng 2 thể hiện thông số vật liệu bê tông của dầm đồng chất.

Bảng 2. Thông số về vật liệu

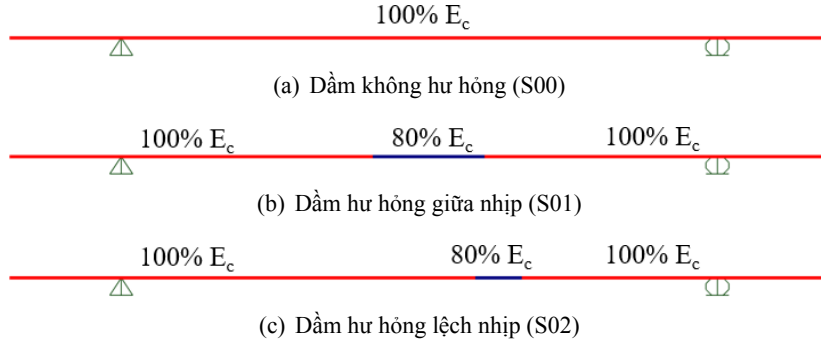
Cường độ chịu nén của bê tông	35,81 (MPa)
Mô-đun đàn hồi của bê tông	28,43 (GPa)
Khối lượng riêng của bê tông	2500 (kg/m ³)
Hệ số Poisson của bê tông	0,167



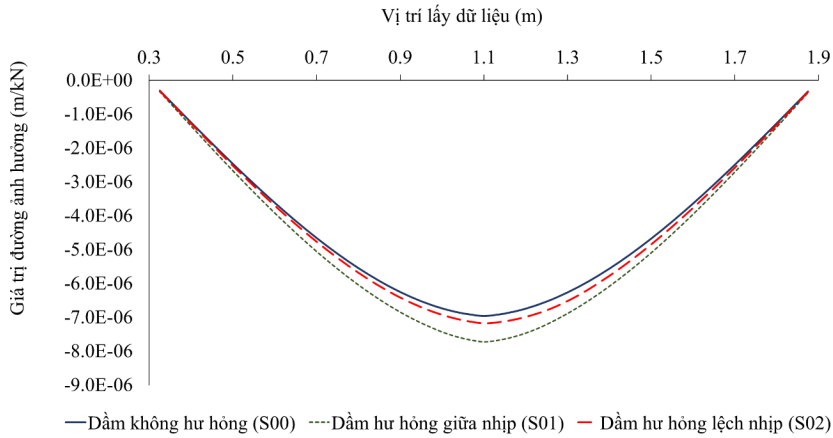
Hình 8. Sơ đồ tính bài toán dầm đơn giản

Hai kịch bản hư hỏng được giả định để khảo sát sự hiệu quả của phương pháp chẩn đoán. Hư hỏng được giả định bằng cách giảm độ cứng tại một hoặc nhiều phần tử. Cụ thể, kịch bản S01 (hư hỏng giữa nhịp) được mô tả bằng cách thay thế các phần tử (PT) từ PT40 đến PT49 với độ cứng giảm đi 20% so với ban đầu (Hình 9(b)). Để đánh giá hiệu quả của phương pháp đối với hư hỏng lệch nhịp, kịch bản S02 được giả định bằng cách thay thế các phần tử từ PT51 đến PT55 với độ cứng giảm đi tương tự kịch bản S01.

Giá trị đường ảnh hưởng của chuyển vị được lấy tại những điểm có tọa độ 0,5 m, 0,7 m, 0,9 m, 1,1 m, 1,3 m, 1,5 m so với đầu dầm. Hay nói cách khác, các điểm lấy dữ liệu được chọn có khoảng cách là $L/8 = 0,2$ m. Kết quả dữ liệu đường ảnh hưởng của một kịch bản bất kỳ là tập hợp nhiều đường cong thu được từ việc đo đạc ở các vị trí khác nhau. Hình 10 thể hiện đường ảnh hưởng của chuyển vị tại vị trí 1,1 m của dầm ở ba trạng thái khác nhau. Trong đó S00 mô tả đường ảnh hưởng chuyển vị của dầm ở trạng thái khỏe mạnh (trạng thái ban đầu).



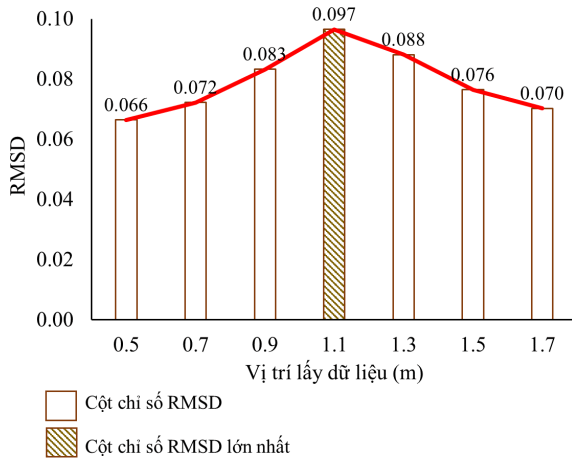
Hình 9. Mô tả hư hỏng bài toán dầm đơn giản phân tử thanh



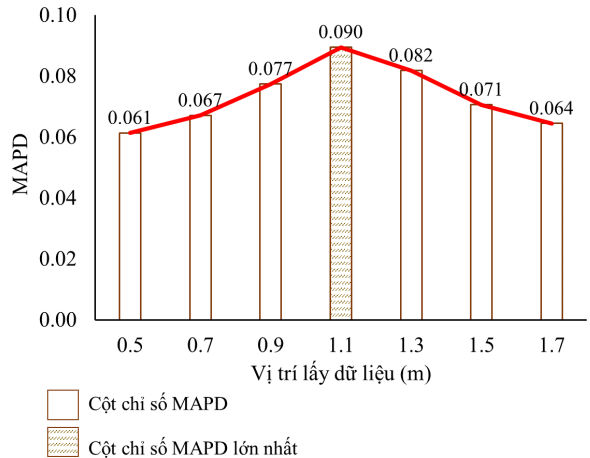
Hình 10. Đường ảnh hưởng chuyển vị tại vị trí 1.1m của dầm ở các trạng thái ban đầu và có hư hỏng

4.1. Kết quả chẩn đoán với chỉ số thuần

Hình 11 và Hình 12 lần lượt thể hiện kết quả tính toán chỉ số RMSD và MAPD của trường hợp S01 với hư hỏng được giả định tại vị trí giữa nhịp. Dựa vào Hình 11 và Hình 12, kết quả tính toán chỉ số RMSD, MAPD dâng cao tại các phần tử giả định có hư hỏng và có xu hướng giảm dần khi đi xa vùng hư hỏng. Suy ra, chỉ số RMSD và MAPD có thể chẩn đoán được vị trí của các phần tử giả định hư hỏng. Tuy vậy, biểu đồ chẩn đoán sử dụng chỉ số thuần (RMSD và MAPD) chưa thể hiện được



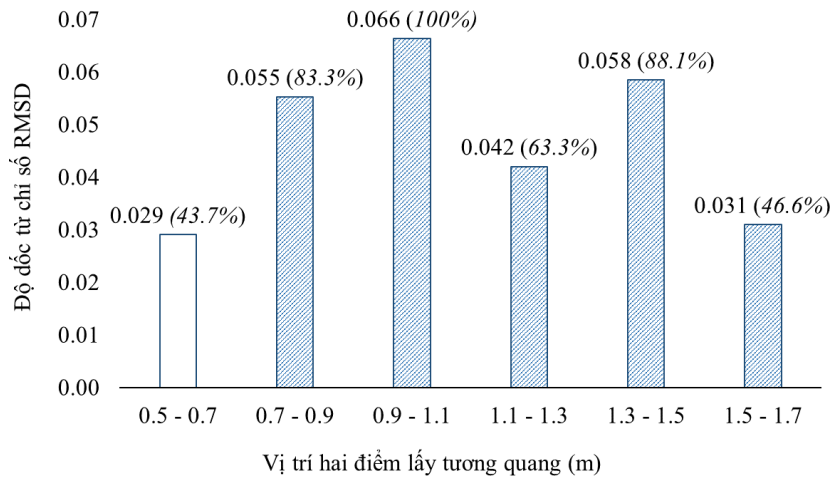
Hình 11. Biểu đồ chỉ số RMSD (S01)



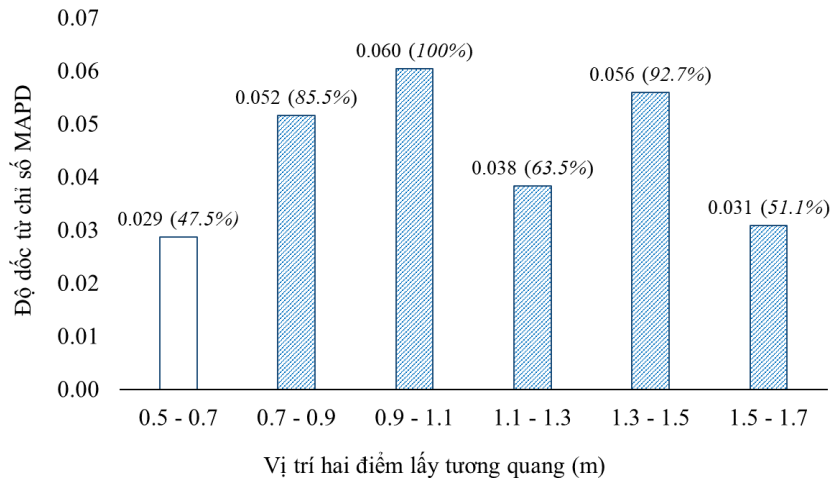
Hình 12. Biểu đồ chỉ số MAPD (S01)

chiều dài của vùng giả định hư hỏng (hay mức độ hư hỏng trong nghiên cứu này), do đó, phương pháp cần có những nghiên cứu cải tiến.

Khoanh vùng hư hỏng được xác định bằng công thức (6) với $\Delta x = 0,2$ m. Theo Hình 13, cột (0,9 – 1,1) và cột (1,3 – 1,5) là hai cột có giá trị độ dốc lớn nhất. Thêm vào đó, các cột liền kề hai cột này gồm cột (0,7 – 0,9) và cột (1,5 – 1,7) có giá trị độ dốc lớn hơn 1/3 lần ($\approx 33,3\%$) giá trị độ dốc của cột lớn nhất. Do đó, khoanh vùng hư hỏng được mở rộng thêm ra hai cột liền kề này và vùng nghi vẫn có hư hỏng được xác định thuộc đoạn dầm từ 0,7 m đến 1,7 m. Đối với chỉ số MAPD (Hình 14), việc khoanh vùng hư hỏng cũng cho kết quả tương tự.



Hình 13. Biểu đồ độ dốc chỉ số RMSD (S01)



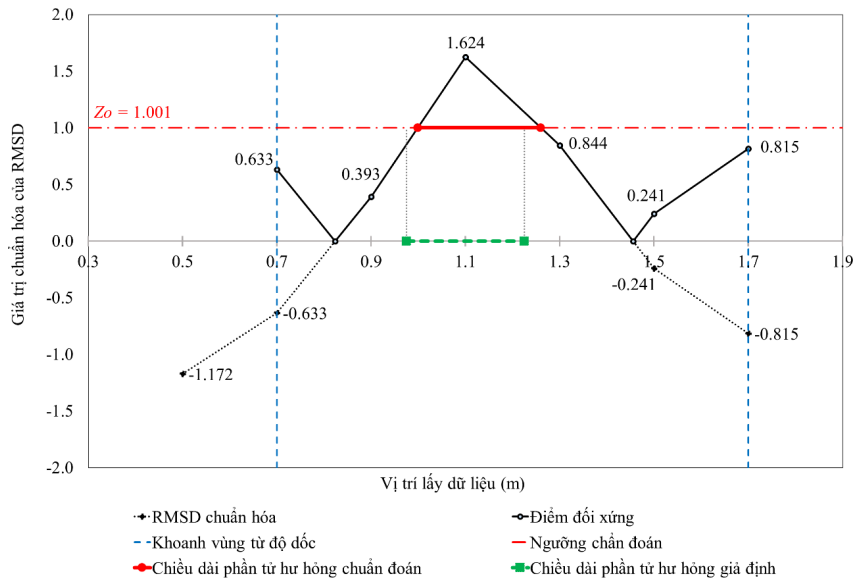
Hình 14. Biểu đồ độ dốc chỉ số MAPD (S01)

4.2. Kết quả chẩn đoán bằng phương pháp cải tiến

Giá trị chuẩn hóa các chỉ số RMSD và MAPD được xác định theo công thức (5) và thể hiện ở Bảng 3. Tiếp đó, biểu đồ chuẩn hóa chẩn đoán được xác định bằng việc nối các điểm giá trị chuẩn hóa và lấy trị tuyệt đối của phần âm thuộc vùng nghi vẫn có hư hỏng (đoạn dầm từ 0,7 m đến 1,7 m). Sau đó, ngưỡng hư hỏng được tính toán theo công thức (7). Với $\max(Z_j) = 1,624$ và $\text{std}(Z_j^+) = 0,623$, ngưỡng hư hỏng của chỉ số chuẩn hóa RMSD là $Z_o = 1,001$. Tương tự, với $\max(Z_j) = 1,607$ và $\text{std}(Z_j^+) = 0,602$, $Z_o = 1,005$ là ngưỡng hư hỏng của biểu đồ chẩn đoán với chỉ số chuẩn hóa MAPD.

Bảng 3. Giá trị chuẩn hóa các chỉ số của kích bản S01

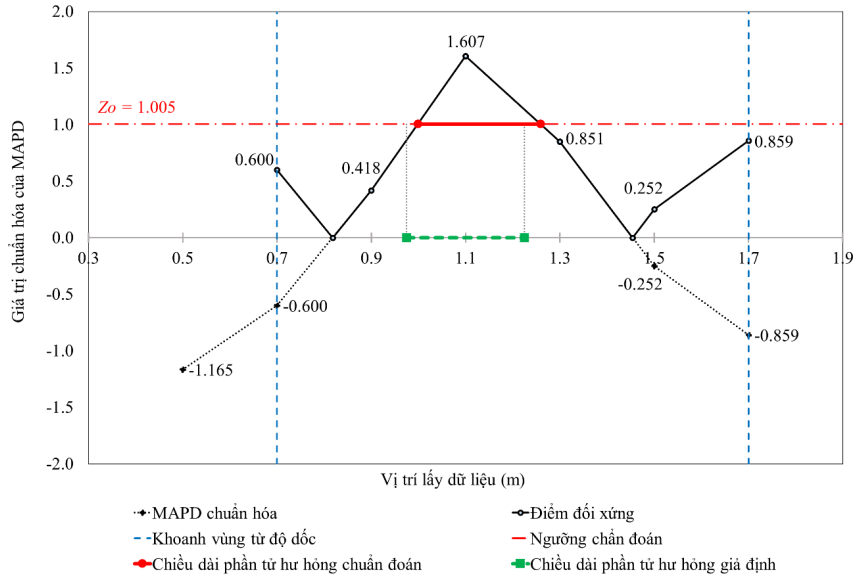
Vị trí (m)	RMSD chuẩn hóa	MAPD chuẩn hóa
0,5	-1,172	-1,165
0,7	-0,633	-0,600
0,9	0,393	0,418
1,1	1,624	1,607
1,3	0,844	0,851
1,5	-0,241	-0,252
1,7	-0,815	-0,859



Hình 15. Kết quả chẩn đoán bề rộng vùng nứt dựa trên chỉ số RMSD (S01)

Hình 15 thể hiện kết quả chẩn đoán bằng chỉ số RMSD chuẩn hóa. Dựa vào biểu đồ này, đường ngưỡng Z_o cắt ngang đường chuẩn hóa chẩn đoán tại 2 điểm nằm trong khoanh vùng nghi vấn hư hỏng (đoạn dầm từ 0,7 m đến 1,7 m). Khoảng cách hai giao điểm cũng chính là đoạn dầm hư hỏng chẩn đoán được, kết quả cho thấy đoạn dầm này dài $L_{pred} = 261$ mm (với $L_{pred,in} = 226$ mm và $L_{pred,out} = 35$ mm) lệch 4,2% so với chiều dài đoạn dầm hư hỏng giả định $L_{crack} = 250$ mm. Chiều dài vùng không suy giảm độ cứng chẩn đoán (đã loại bỏ vùng suy giảm độ cứng chẩn đoán nằm ngoài phạm vi vùng suy giảm độ cứng thực tế) $L_{o,pred} = 1315$ mm, chiều dài vùng không suy giảm độ cứng thực tế $L_{o,crack} = 1350$ mm. Đánh giá bằng bộ chỉ số A, B, C theo công thức (8), (9), (10) cho kết quả thu được giá trị $A = 90,5\%$, $B = 97,4\%$, $C = 96,3\%$. Áp dụng mô hình ma trận nhầm lẫn cho kết quả chẩn đoán dựa trên chỉ số RMSD của kích bản S01, giá trị a, b, c, d, N lần lượt được xác định là 226 mm, 35 mm, 24 mm, 1315 mm, 1600 mm. Tỷ lệ quan sát hai dữ liệu cho kết quả giống nhau $P_o = 0,963$, tỷ lệ đồng thuận ngẫu nhiên cho sự kiện “xảy ra” là có hư hỏng $P_e^{(Y)} = 40,8$, tỷ lệ đồng thuận ngẫu nhiên cho sự kiện “không xảy ra” là không hư hỏng $P_e^{(N)} = 1129,9$, tỷ lệ phù hợp mong muốn $P_e = 0,732$. Lúc này, chỉ số $K = 0,864$ thể hiện sự đồng thuận tốt.

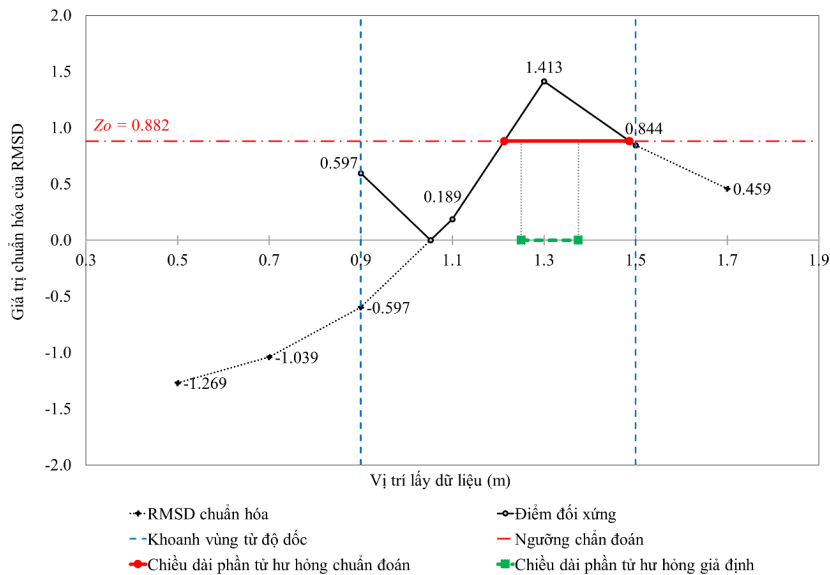
Hình 16 thể hiện kết quả chẩn đoán bằng chỉ số MAPD chuẩn hóa. Tương tự, đoạn dầm hư hỏng chẩn đoán có chiều dài là 260 mm, lệch 4,0% so với chiều dài giả định là 250 mm. Kết quả các chỉ số đánh giá lần lượt là $A = 90,5\%$, $B = 97,5\%$, $C = 96,4\%$ và chỉ số $K = 0,865$ cũng thể hiện sự đồng



Hình 16. Kết quả chẩn đoán bề rộng vùng nứt dựa trên chỉ số MAPD (S01)

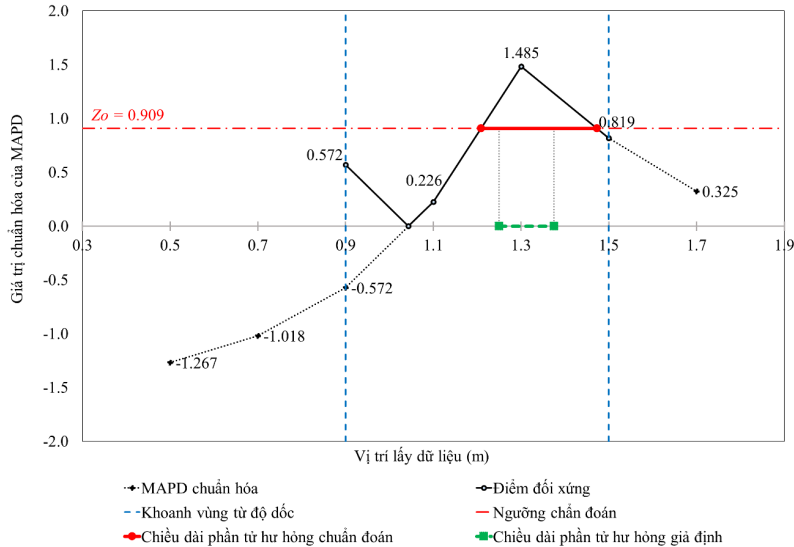
thuận tốt. Khi so sánh kết quả chẩn đoán ở trường hợp S01, kết quả chẩn đoán L_{pred} của chỉ số RMSD và MAPD gần như nhau (chênh lệch 0,16%). Độ chính xác tổng thể C (RMSD = 96,3%, MAPD = 96,4%) cho thấy kết quả chẩn đoán rất gần với thực tế. Bên cạnh đó, so sánh bằng phân loại chỉ số K thì cả hai chỉ số đều nằm ở mức “đồng thuận rất tốt” ($\geq 0,8$).

Kết quả chẩn đoán với hư hỏng được giả định lệch nhịp S02 khi áp dụng chỉ số chuẩn hóa RMSD và MAPD được lần lượt thể hiện ở Hình 17 và Hình 18. Kết quả chẩn đoán cho thấy rằng chỉ số chuẩn hóa RMSD và MAPD cũng chẩn đoán được chiều dài đoạn dầm có hư hỏng. Cụ thể khi so với chiều dài suy giảm độ cứng giả định là 125 mm, kết quả chẩn đoán bằng chỉ số chuẩn hóa RMSD xác định đoạn dầm hư hỏng có chiều dài là 273 mm, lệch 54,2%, tương tự kết quả chẩn đoán bằng chỉ số chuẩn hóa MAPD xác định đoạn dầm hư hỏng có chiều dài là 264 mm, lệch 52,7%. Độ chính xác của phương



Hình 17. Kết quả chẩn đoán bề rộng vùng nứt dựa trên chỉ số RMSD (S02)

pháp chẩn đoán cũng được xác định dựa trên chỉ số A, B, C và K . Kết quả cho thấy đối với phương pháp tính dựa theo chỉ số chuẩn hóa RMSD là $A = 100\%$, $B = 90,0\%$, $C = 90,7\%$ và chỉ số $K = 0,583$ ở mức đồng thuận trung bình, tương tự cho chỉ số chuẩn hóa MAPD là $A = 100\%$, $B = 90,5\%$, $C = 91,3\%$ và chỉ số $K = 0,599$ ở mức đồng thuận trung bình.



Hình 18. Kết quả chẩn đoán bề rộng vùng nứt dựa trên chỉ số MAPD (S02)

Dựa vào Bảng 4 xét cho trường hợp hư hỏng lệch nhịp (S02), phương pháp sử dụng chỉ số chuẩn hóa RMSD và MAPD cho kết quả độ chính xác tổng thể C lần lượt là $90,7\%$ và $91,3\%$, cho thấy hiệu quả của phương pháp ở mức khá tốt. Tuy vậy chỉ số K cũng trong trường hợp trên lại cho kết quả đánh giá chỉ ở mức trung bình, giá trị ứng với chỉ số chuẩn hoá RMSD, MAPD lần lượt là $0,583$ và $0,599$.

Bảng 4. Giá trị chỉ số đánh giá độ chính xác cho 3 trường hợp khảo sát

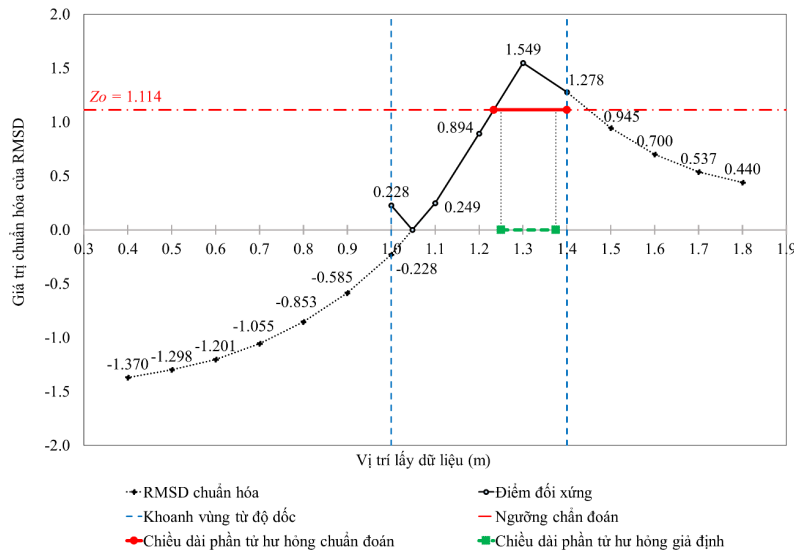
Trường hợp	RMSD				MAPD			
	A	B	C	K	A	B	C	K
S01	90,5%	97,4%	96,3%	0,864	90,5%	97,5%	96,4%	0,865
S02	100%	90,0%	90,7%	0,583	100%	90,5%	91,3%	0,599
S02 (15 điểm)	100%	97,2%	97,4%	0,844	100%	96,7%	97,0%	0,821

4.3. Ảnh hưởng của số lượng điểm lấy dữ liệu đến phương pháp chẩn đoán

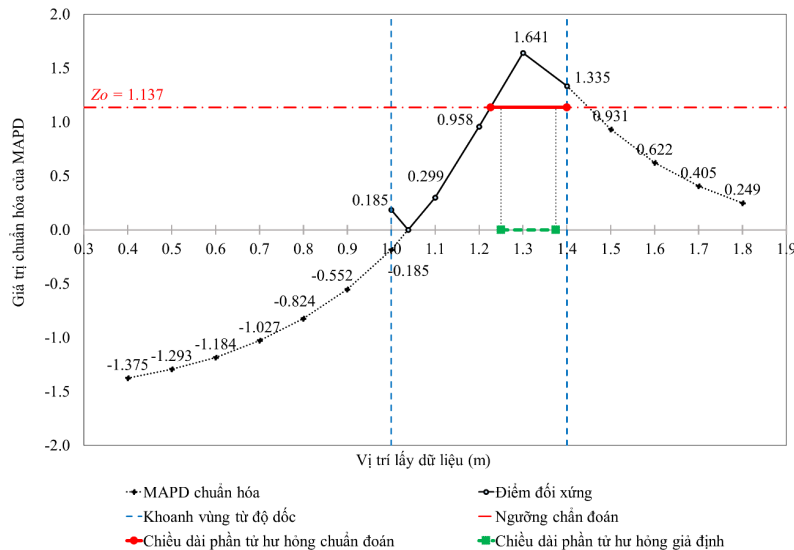
Dựa vào kết quả khảo sát dầm bị suy giảm độ cứng tại vị trí giữa nhịp và lệch nhịp, phương pháp đã chứng minh hiệu quả chẩn đoán mức độ hư hỏng giả định nhưng đối với trường hợp lệch nhịp kết quả vẫn chưa khả quan vì mức độ đồng thuận của chỉ số K vẫn ở mức trung bình. Nhằm mục đích mở rộng nghiên cứu và cải thiện độ chính xác của trường hợp trên, nghiên cứu thực hiện khảo sát kích bản lệch nhịp được tăng điểm thu thập dữ liệu đường ảnh hưởng từ 7 điểm lên 15 điểm, khi này $\Delta x = L/16 = 0,1$ m.

Khi tăng số điểm lấy dữ liệu, vùng nghi vấn hư hỏng được giới hạn ngắn lại đồng thời chiều dài phần tử suy giảm độ cứng chẩn đoán cũng giảm xuống gần với giả định hơn (Hình 19 và Hình 20), các chỉ số đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán A, B, C lần K đều tăng. Do đó, khi lấy nhiều

điểm dữ liệu hơn kết quả chẩn đoán sẽ càng ngày càng chính xác hơn. Chỉ số C lần lượt đạt 97,4% và 97,0% ứng với chỉ số RMSD và MAPD, tức là tăng thêm 6,7% và 5,7% so với kết quả có được khi chỉ sử dụng 7 điểm lấy dữ liệu. Bên cạnh đó, chỉ số K cũng thay đổi từ đồng thuận trung bình thành đồng thuận tốt. Nhận thấy khi tăng điểm lấy dữ liệu sẽ giúp kết quả chẩn đoán tốt hơn, nhưng thực tế số điểm lấy dữ liệu phụ thuộc vào tính kinh tế của dự án. Trong hai kịch bản khảo sát trên dù chỉ số K của kịch bản lệch nhịp thể hiện mức độ đồng thuận trung bình nhưng đều có giá trị gần cận trên của phân loại trung bình (tiến đến 0,6) cho thấy phương pháp có hiệu quả nhất định. Vì thế, 7 điểm dữ liệu đường ảnh hưởng của chuyển vị vẫn phù hợp với phương pháp đề xuất.



Hình 19. Kết quả chẩn đoán bề rộng vùng nứt dựa trên chỉ số RMSD (S02-1)



Hình 20. Kết quả chẩn đoán bề rộng vùng nứt dựa trên chỉ số MAPD (S02-1)

5. Kết luận

Nghiên cứu này đề xuất phương pháp chẩn đoán hư hỏng cho dầm đơn giản đồng chất sử dụng đường ảnh hưởng của chuyển vị. Kết quả dựa trên hai trường hợp khảo sát được tổng hợp như sau:

- Chỉ số thuần của RMSD và MAPD có thể được sử dụng để xác định vị trí hư hỏng. Tuy nhiên, kết quả dựa trên các chỉ số thuần này vẫn chưa thể kết luận được mức độ hư hỏng;

- Phương pháp cải tiến sử dụng các chỉ số chuẩn hóa của RMSD và MAPD có khả năng chẩn đoán mức độ hư hỏng với độ chính xác cao;

- Từ biểu đồ chẩn đoán nhận thấy những dữ liệu được lấy gần đoạn dầm hư hỏng có giá trị thay đổi nhạy cảm hơn so với các điểm ở xa hơn. Do đó, nếu sử dụng số lượng điểm dữ liệu hợp lý bằng cách đặt chúng gần khu vực nghi vấn hư hỏng trước đó có thể sẽ giúp tăng độ chính xác của kết quả chẩn đoán;

- Khi tăng số lượng điểm lấy đường ảnh hưởng chuyển vị, phương pháp cải tiến cho kết quả chẩn đoán chính xác hơn;

- Kết quả cho thấy, phương pháp đánh giá độ chính xác bằng ma trận nhầm lẫn (confusion matrix) kết hợp với chỉ số K cho kết quả khắt khe hơn bộ chỉ số A, B, C trong việc đánh giá độ chính xác của mức độ hư hỏng chẩn đoán.

Tương lai, nghiên cứu có thể tiếp tục phát triển để tăng độ chính xác bằng cách thay đổi vùng khoan vùng hư hỏng và từ đó xác định ngưỡng hư hỏng chuẩn xác hơn. Bên cạnh đó việc xem xét số lượng điểm dữ liệu thu thập hợp lý có thể nghiên cứu thông qua sự tương quan với vật liệu, kích thước, hoặc liên kết của cấu kiện.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất của Trường Đại học Bách Khoa (ĐHBK), ĐHQG-HCM cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Rytter, A. Vibrational based inspection of civil engineering structures. *Fract. Dyn., Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University*.
- [2] Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J., Stone, B. J. (1978). [A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures](#). *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20(2):93–100.
- [3] Cawley, P., Adams, R. D. (1979). [The location of defects in structures from measurements of natural frequencies](#). *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 14(2):49–57.
- [4] Pandey, A. K., Biswas, M., Samman, M. M. (1991). [Damage detection from changes in curvature mode shapes](#). *Journal of Sound and Vibration*, 145(2):321–332.
- [5] Stubbs, N., Kim, J. T., Farrar, C. R. (1995). Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm. *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference (IMAC XIII)*, 182:210–218.
- [6] Kim, J.-T., Ryu, Y.-S., Cho, H.-M., Stubbs, N. (2003). [Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method](#). *Engineering Structures*, 25(1):57–67.
- [7] Wang, J., Qiao, P. (2008). [On irregularity-based damage detection method for cracked beams](#). *International Journal of Solids and Structures*, 45(2):688–704.
- [8] Cha, Y.-J., Buyukozturk, O. (2015). [Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization](#). *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(5):347–358.
- [9] Khatir, S., Wahab, M. A., Boutchicha, D., Khatir, T. (2019). [Structural health monitoring using modal strain energy damage indicator coupled with teaching-learning-based optimization algorithm and isogeometric analysis](#). *Journal of Sound and Vibration*, 448:230–246.
- [10] Feng, Q., Liang, Y. (2023). [Development of piezoelectric-based technology for application in civil structural health monitoring](#). *Earthquake Research Advances*, 3(2):100154.
- [11] He, Z., Li, W., Salehi, H., Zhang, H., Zhou, H., Jiao, P. (2022). [Integrated structural health monitoring in bridge engineering](#). *Automation in Construction*, 136:104168.
- [12] Sheena, Z., Zalmanovich, A., Unger, A. (1982). *Theoretical stiffness matrix correction by using static test results*.

- [13] Sanayei, M., Onipede, O. (1991). [Damage assessment of structures using static test data](#). *AIAA Journal*, 29(7):1174–1179.
- [14] Banan, M. R., Banan, M. R., Hjelmstad, K. D. (1994). [Parameter estimation of structures from static response. I. Computational aspects](#). *Journal of Structural Engineering*, 120(11):3243–3258.
- [15] Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A., Esfandiari, A. (2005). [A structural damage detection method using static noisy data](#). *Engineering Structures*, 27(12):1784–1793.
- [16] Abdo, M. A.-B. (2012). [Parametric study of using only static response in structural damage detection](#). *Engineering Structures*, 34:124–131.
- [17] Ha, T. M., Fukada, S. (2017). [Nondestructive damage detection in deteriorated girders using changes in nodal displacement](#). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(3):385–403.
- [18] Won, J., Park, J.-W., Park, K., Yoon, H., Moon, D.-S. (2019). [Non-target structural displacement measurement using reference frame-based deepflow](#). *Sensors*, 19(13):2992.
- [19] Ono, R., Ha, T. M., Fukada, S. (2019). [Analytical study on damage detection method using displacement influence lines of road bridge slab](#). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9(4):565–577.
- [20] Maki, Y., Ha, T. M., Fukada, S., Torii, K., Ono, R. (2019). [Stiffness evaluation and current status of a degraded road bridge slab located in a mountainous area](#). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(1):62–78.
- [21] Zhang, Y., Liu, P., Zhao, X. (2021). [Structural displacement monitoring based on mask regions with convolutional neural network](#). *Construction and Building Materials*, 267:120923.
- [22] Ho, D.-D., Kim, J.-T., Stubbs, N., Park, W.-S. (2012). [Prestress-force estimation in PSC girder using modal parameters and system identification](#). *Advances in Structural Engineering*, 15(6):997–1012.
- [23] Nguyen, K. D., Ho, D. D., Kim, J. T. (2013). [Damage detection in beam-type structures via PZT's dual piezoelectric responses](#). *Smart Structures and Systems*, 11(2):217–240.
- [24] Hồ, T. C., Lê, T. C., Lê, Q. H., Nguyễn, M. T. A. (2018). Phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu dầm với các điều kiện biên khác nhau. *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*.
- [25] Cao, L. T., Sỹ, B. V., Duy, H. Đ. (2020). [Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCVXD) - ĐHXD*, 14(4V):16–28.
- [26] Cao, L. T., Phương, H. V., Nhân, V. P., , Duy, H. Đ. (2020). [Phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm](#).
- [27] Trần, V. L., Nguyễn, T. H. (2011). Kiểm tra thực nghiệm phương pháp xác định vết nứt trong dầm chịu uốn bằng phân tích wavelet của các chuyển vị tĩnh. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*.
- [28] Ho, D. D., Ha, T. M., Tran, T. D., Nguyen, V. T., Dang, N. T. V., Truong, T. D. N. (2023). [Chẩn đoán vùng nứt trong dầm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng sử dụng phương pháp độ cong đường biến dạng](#). *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*.
- [29] Cohen, J. (1960). [A coefficient of agreement for nominal scales](#). *Educational and Psychological Measurement*, 20(1):37–46.
- [30] Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C., Rogers, C. A. (1995). [Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator](#). *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 6(1):134–139.
- [31] Liang, Y., Li, D., Parvasi, S. M., Kong, Q., Lim, I., Song, G. (2016). [Bond-slip detection of concrete-encased composite structure using electro-mechanical impedance technique](#). *Smart Materials and Structures*, 25(9):095003.
- [32] Giurgiutiu, V., Zagari, A., Bao, J. J. (2002). [Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring](#). *Structural Health Monitoring*, 1(1):41–61.
- [33] Li, W., Fan, S., Ho, S. C. M., Wu, J., Song, G. (2017). [Interfacial debonding detection in fiber-reinforced polymer rebar-reinforced concrete using electro-mechanical impedance technique](#). *Structural Health Monitoring*, 17(3):461–471.
- [34] Landis, J. R., Koch, G. G. (1977). [The measurement of observer agreement for categorical data](#). *Biometrics*, 33(1):159.
- [35] Goodman, L. A., Kruskal, W. H. (1954). [Measures of association for cross classifications](#). *Journal of the American Statistical Association*, 49(268):732.