

Xác định vị trí và độ lớn của hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng năng lượng biến dạng

Lê Thanh Cao¹, Hồ Đức Duy^{2,3,*}, Trần Mạnh Hùng^{2,3}, Lưu Trần Hữu Tín^{2,3,4}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang, Khánh Hòa, Việt Nam

²Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁴Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Tiền Giang, Đồng Tháp, Việt Nam

Liên hệ

Hồ Đức Duy, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 26-3-2025
- Ngày sửa đổi: 08-1-2026
- Ngày chấp nhận: 18-3-2026
- Ngày đăng: xx-xx-2026

DOI:



Bản quyền

© ĐHQG TP.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, việc theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu (Structural health monitoring: SHM) đang phải đối mặt với thách thức trong việc phát triển các phương pháp tiên tiến và hiệu quả để xác định hư hỏng và giải quyết các vấn đề trong kỹ thuật. Trong nghiên cứu này, một phương pháp bao gồm hai bước để xác định vị trí và mức độ của hư hỏng cho kết cấu tấm được giới thiệu. Bước một sử dụng chỉ tiêu đánh giá "modal strain energy equivalence index: MSEEI" để xác định vị trí của hư hỏng. Giá trị năng lượng biến dạng được tính toán theo phương pháp trực tiếp từ mô hình phần tử hữu hạn sử dụng phần tử 9 nút cho kết cấu tấm. Một ngưỡng hư hỏng thích hợp được đề xuất để giảm bớt các ẩn số cho bước chẩn đoán tiếp theo. Bước 2 sử dụng thuật toán di truyền để cực tiểu hóa hàm mục tiêu được xây dựng dựa trên giá trị năng lượng biến dạng. Hàm mục tiêu có biến số là vectơ mức độ suy giảm độ cứng (đại diện cho mức độ hư hỏng) của các phần tử có khả năng xảy ra hư hỏng đã ghi nhận được từ bước một. Tính khả thi của phương pháp được kiểm chứng thông qua bài toán tấm nhôm với kích bản hư hỏng đa dạng. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp kiến nghị có khả năng chẩn đoán chính xác vị trí và độ lớn của hư hỏng trong kết cấu tấm.

Từ khoá: chẩn đoán hư hỏng, kết cấu tấm, năng lượng biến dạng, thuật toán di truyền, dao động.

GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, các kỹ thuật theo dõi sức khỏe kết cấu công trình (structural health monitoring: SHM) đã và đang được áp dụng để đưa ra các cảnh báo về sự xuất hiện hư hỏng từ những tín hiệu (đáp ứng) ghi nhận được trong kết cấu, nhận dạng vị trí và độ lớn của hư hỏng trong kết cấu và đánh giá được ảnh hưởng của hư hỏng đến toàn bộ kết cấu. Với khả năng đo lường linh hoạt, chi phí hợp lý, sử dụng kỹ thuật không phá hủy, cũng như tính khả thi của việc theo dõi sức khỏe kết cấu thực tế, các phương pháp dựa trên dao động của kết cấu trở thành một trong những phương pháp hiệu quả và phổ biến nhất trong lĩnh vực SHM¹. Ở một số quốc gia phát triển, các công trình công cộng và trọng điểm gần như đã bảo hòa về số lượng; do vậy, công tác đánh giá tình trạng và chẩn đoán hư hỏng là rất cần thiết. Đối với các kết cấu hạ tầng có tuổi thọ sử dụng lâu, việc theo dõi sức khỏe kết cấu là một điều kiện bắt buộc. Trong lĩnh vực xây dựng, kết cấu tấm là một kết cấu được sử dụng rất phổ biến. Kết cấu tấm được dùng làm các mái che, sàn, tường. Trong thực tế, hư hỏng ở kết cấu tấm có thể xảy ra ở nhiều dạng khác nhau. Một số dạng phổ biến có thể được đề cập như sau: phần tử trong kết cấu chịu lực quá giới hạn dẫn đến bị nứt, làm cho độ cứng của phần tử bị suy giảm; vật liệu bị tác động của

môi trường xung quanh làm giảm cường độ và đặc tính ban đầu của vật liệu (ví dụ như ăn mòn, bị sự cố do tác động của con người); kết cấu bị khuyết tật trong quá trình thi công. Khi đó, kết cấu cần được đánh giá lại khả năng chịu lực để đưa ra biện pháp gia cố nếu cần.

Năng lượng biến dạng là một chỉ tiêu có độ nhạy cao với sự thay đổi của độ cứng kết cấu nên được áp dụng trong bài toán chẩn đoán hư hỏng kết cấu; vì trạng thái hư hỏng của một phần tử nào đó được xem như là sự suy giảm về độ cứng của phần tử đó. Shi và cộng sự² đã đề xuất phương pháp xác định vị trí và mức độ của hư hỏng dựa trên sự chênh lệch năng lượng biến dạng của kết cấu cho kết cấu khung thép phẳng một nhịp, hai tầng. Hu và Wu³ đã kiểm chứng thực nghiệm phương pháp năng lượng biến dạng để phát hiện vết nứt bề mặt trong tấm nhôm mỏng với điều kiện biên tự do. Seyedpoor⁴ đã đề xuất phương pháp chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng qua hai bước cho kết cấu dàn phẳng. Fu và cộng sự⁵ đã trình bày phương pháp chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng của kết cấu tấm bằng hai bước. Bước thứ nhất chẩn đoán vị trí hư hỏng bằng chỉ tiêu "modal strain energy change ratio: MSECR"; bước thứ hai thực hiện cập nhật mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) để xác định mức độ hư hỏng. Cha và Buyukozturk⁶ đã đề xuất

Trích dẫn bài báo này: Cao L T, Đức Duy H, Mạnh Hùng T, Hữu Tín L T. **Xác định vị trí và độ lớn của hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng năng lượng biến dạng.** *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.* 2026; 9(x):xxxx-xxxx.

phương pháp chẩn đoán vị trí và mức độ của hư hỏng trong kết cấu khung không gian sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng và thuật toán di truyền. Dinh và cộng sự⁷ đã chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng của kết cấu tấm thông qua hai bước. Trong bước thứ nhất, chỉ số “normalized modal strain energy-based damage index (nMSEBI)” đã được sử dụng để chẩn đoán vị trí hư hỏng. Trong bước thứ hai, thuật toán Jaya được sử dụng với hai hàm mục tiêu là dựa vào “modal flexibility change” và “mode shape change” để xác định mức độ hư hỏng. Khatir và cộng sự⁸ đã trình bày bài toán chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng qua hai bước cho kết cấu dầm. Phương pháp chẩn đoán vị trí hư hỏng đã dựa vào chỉ tiêu “normalized modal strain energy indicator: nMSEDI”. Thuật toán tối ưu hóa dựa trên dạy và học (teaching-learning-based optimization: TLBO) đã được sử dụng để chẩn đoán mức độ hư hỏng. Le và cộng sự⁹ đã phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để phát hiện hư hỏng trong các kết cấu dạng tấm có các điều kiện biên khác nhau. Le và cộng sự¹⁰ đã trình bày một cải tiến cho phương pháp năng lượng biến dạng để xác định hư hỏng trong kết cấu tấm. Một quy trình định vị hư hỏng dựa trên hai bước, bao gồm một bước tổng thể và một bước cục bộ, đã được đề xuất nhằm tăng độ chính xác của kết quả chẩn đoán. Trần và cộng sự¹¹ đã sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng để phát hiện và xác định chính xác vị trí hư hỏng trong dầm bê tông cốt thép có gia cường tấm FRP đối với cả các hư hỏng giả định và hư hỏng thực tế theo các cấp tải trọng tác dụng.

Thuật toán di truyền (genetic algorithm: GA) là một thuật toán được ứng dụng phổ biến trong bài toán tối ưu. Thuật toán này được xây dựng dựa trên sự mô phỏng của sự chọn lọc và sinh tồn của các cá thể trong tự nhiên để tìm ra cá thể có đặc điểm tốt nhất; từ đó ứng dụng trong bài toán tối ưu để tìm biến số cho kết quả tốt nhất đối với hàm mục tiêu đề ra. Chou và Ghaboussi¹² đã sử dụng thuật toán di truyền để giải quyết bài toán chẩn đoán sự tồn tại, vị trí và mức độ của hư hỏng cho kết cấu dầm phẳng. Raich và Liszkai¹³ đã sử dụng cách mã hóa đoạn gen mới trong thuật toán di truyền để chẩn đoán hư hỏng dựa trên hàm phản ứng của tần số dao động cho kết cấu phẳng. Jung và cộng sự¹⁴ đã sử dụng các số liệu đo đặc tính như chỉ số đánh giá hư hỏng và sử dụng tối ưu với hàm đa mục tiêu như phương pháp chẩn đoán vị trí hư hỏng. Kết cấu được tác giả áp dụng cho nghiên cứu này là kết cấu dầm phẳng. Silva và cộng sự¹⁵ đã sử dụng thuật toán di truyền để tìm ra các cấu kiện bị ảnh hưởng nhất khi kết cấu cầu xảy ra hư hỏng. Hou và cộng sự¹⁶ đã đề xuất thuật toán di truyền cho việc xác định vị trí của các cảm biến để chẩn đoán thường

xuyên các hư hỏng xảy ra với các mô hình tính toán là dầm công xôn và khung phẳng ba tầng. Bạch và cộng sự¹⁷ đã phát triển một quy trình hai bước để chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng trong kết cấu khung thép phẳng với độ chính xác cao. Trong bước một, vị trí hư hỏng của phần tử được xác định thông qua chỉ số hư hỏng dựa trên sự chênh lệch giá trị năng lượng biến dạng của phần tử trước và sau khi xuất hiện hư hỏng. Trong bước hai, mức độ hư hỏng của phần tử được xác định thông qua thuật toán di truyền. Như vậy, một vài nghiên cứu đã sử dụng thuật toán di truyền để chẩn đoán hư hỏng cho nhiều dạng kết cấu khác nhau. Tuy nhiên, thuật toán di truyền vẫn chưa được ứng dụng rộng rãi trong chẩn đoán hư hỏng của kết cấu tấm.

Mục tiêu chính của bài báo này là giới thiệu phương pháp chẩn đoán về vị trí và mức độ của hư hỏng cho kết cấu tấm nhôm sử dụng kết hợp phương pháp năng lượng biến dạng và thuật toán di truyền. Một mô hình PTHH của kết cấu tấm được xây dựng để xác định tần số dao động và dạng dao động nhằm làm cơ sở dữ liệu cho việc phát triển phương pháp chẩn đoán. Trong mô hình PTHH, phần tử đẳng tham số 9 nút (nine-node quadrilateral element: Q9) được sử dụng nhằm nâng cao tính hiệu quả của phương pháp. Ở bước thứ nhất, kết cấu tấm ở trạng thái trước và sau khi hư hỏng được mô phỏng và phân tích dao động tự do theo phương pháp PTHH. Tại đây, chỉ tiêu đánh giá “modal strain energy equivalence index: MSEEI” được sử dụng để chẩn đoán vị trí hư hỏng; và một ngưỡng hư hỏng thích hợp được đề xuất. Ở bước thứ hai, kết cấu tấm được chẩn đoán mức độ hư hỏng bằng cách áp dụng thuật toán di truyền. Các phần tử được cảnh báo là hư hỏng ở bước một được sử dụng để xây dựng các ẩn số mức độ suy giảm độ cứng (đại diện cho mức độ hư hỏng) cho thuật toán di truyền. Hai hàm mục tiêu dựa trên năng lượng biến dạng được đề xuất.

PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài toán chẩn đoán hư hỏng là bài toán ngược trong kết cấu, tức là đi xác định độ cứng của các phần tử trong kết cấu đã tồn tại. Trong phương pháp đề xuất, thông số đầu vào được sử dụng là dạng dao động của kết cấu. Trong thực tế, dạng dao động có được từ việc phân tích dữ liệu đo đặc dao động từ các cảm biến gia tốc được gắn trên kết cấu cần chẩn đoán. Trong nghiên cứu này, trạng thái hư hỏng của kết cấu được giả định và xem như đó là một “kịch bản” cần chẩn đoán; được sử dụng để kiểm chứng tính khả thi của phương pháp đề xuất. Trạng thái giả định đó được mô phỏng và dạng dao động của kết cấu được phân tích dựa trên phương pháp PTHH. Theo tỉ lệ giữa kích

thước nhíp và chiều dày có thể chia kết cấu tấm thành hai loại là tấm mỏng (lý thuyết tấm Kirchhoff) và tấm dày (lý thuyết tấm Mindlin). So với lý thuyết tấm Kirchhoff, lý thuyết tấm Mindlin có kể thêm thành phần biến dạng góc xoay do giả thiết các đoạn thẳng vuông góc mặt trung bình không còn vuông nữa và đã xoay đi một góc đúng bằng biến dạng trượt trung bình gây ra bởi lực cắt. Trong thực tế, tấm có nhiều kích thước khác nhau. Do đó, lý thuyết tấm Mindlin được sử dụng trong nghiên cứu này nhằm đảm bảo tính tổng quát.

Phương pháp năng lượng biến dạng

Trong nghiên cứu này, phần tử tứ giác có 9 nút được sử dụng cho mô hình PTHH để phân tích dao động tự do cho kết cấu tấm. Từ đó, năng lượng biến dạng của phần tử được xác định. Với dạng dao động thứ i, phần tử thứ j, biểu thức năng lượng biến dạng được biểu diễn như sau:

$$MSE_{ij}^h = \Phi_i^{hT} K_j \Phi_i^h \tag{1}$$

$$MSE_{ij}^d = \Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^d \tag{2}$$

trong đó MSE_{ij}^h, MSE_{ij}^d lần lượt là năng lượng biến dạng của phần tử thứ j ở dạng dao động thứ i tương ứng với trạng thái chưa hư hỏng và trạng thái hư hỏng; Φ_i^h, Φ_i^d là dạng dao động thứ i trong hệ tọa độ tổng thể tương ứng với trạng thái chưa hư hỏng và trạng thái hư hỏng; K_j là ma trận độ cứng phần tử thứ j trong hệ tọa độ tổng thể.

Khi kết cấu xảy ra hư hỏng, độ cứng của phần tử giảm; điều này dẫn đến giá trị năng lượng biến dạng của phần tử đó có sự chênh lệch so với khi không xảy ra hư hỏng. Dựa vào sự thay đổi của giá trị năng lượng biến dạng, chỉ số MSEEI¹⁸ được sử dụng để xác định vị trí của hư hỏng xảy ra trong kết cấu. Biểu thức tính toán của chỉ tiêu MSEEI như sau:

$$MSEEI_j = \max \left\{ 0; \frac{MSE_j^d - \sqrt{MSE_j^h \times MSE_j^d}}{MSE_j^d} \right\} \tag{3}$$

trong đó MSE_j^h và MSE_j^d là tổng năng lượng biến dạng của phần tử thứ j lấy đối với m dạng dao động đang xét. Phần tử không hư hỏng cho giá trị MSEEI bằng “0” và phần tử có hư hỏng cho giá trị MSEEI lớn hơn “0”.

Trong biểu đồ chỉ số hư hỏng của toàn tấm, có những phần tử chưa hư hỏng nhưng có chỉ số MSEEI lớn hơn “0”. Đây là hiện tượng nhiễu trong kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng trong tấm. Do đó, một khái niệm gọi là ngưỡng hư hỏng β_0 được giới thiệu trong

nghiên cứu này. Ngưỡng hư hỏng được tính bằng tỷ lệ phần trăm so với chỉ số hư hỏng lớn nhất trên toàn tấm. Khi chỉ số hư hỏng lớn hơn hoặc bằng ngưỡng hư hỏng, phần tử được xác định là hư hỏng; ngược lại, phần tử được xác định là không hư hỏng. Tùy vào mức độ hư hỏng cũng như sự phân bố của biểu đồ chỉ số hư hỏng, giá trị của ngưỡng hư hỏng thích hợp được lựa chọn. Ở mức độ nhiễu trong đo đạc và tính toán thường không vượt quá 5%, ngưỡng $\beta_0 = 0.05\beta_{max}, 0.10\beta_{max}$ có thể loại bỏ được sai số này và các giá trị ngưỡng hư hỏng quá lớn có thể làm cho các vị trí hư hỏng thật sự không được cảnh báo. Vì vậy, để khảo sát ảnh hưởng của ngưỡng hư hỏng, trong nghiên cứu này, phần tử hư hỏng được chẩn đoán bằng cách sử dụng các ngưỡng kiến nghị lần lượt là $\beta_0 = 0.05\beta_{max}, 0.10\beta_{max}, 0.15\beta_{max}, 0.20\beta_{max}$, với β_{max} là giá trị lớn nhất của chỉ số hư hỏng.

Thuật toán di truyền

Trong tính toán, sự hư hỏng của kết cấu có thể xem như là sự giảm độ cứng của kết cấu; do vậy, hư hỏng của một phần tử có thể được mô phỏng bằng cách giảm độ cứng của phần tử đó. Độ giảm giá trị độ cứng tương ứng với mức độ hư hỏng trên phần tử thứ j được mô tả qua biểu thức sau:

$$(K)_j^s = (1 - \alpha_j) (K)_j^o \tag{4}$$

trong đó $(K)_j^o, (K)_j^s$ lần lượt là ma trận độ cứng của phần tử j ở trạng thái không hư hỏng và trạng thái có hư hỏng; α_j là phần trăm giảm của giá trị độ cứng đối với phần tử thứ j. Từ đó, độ giảm độ cứng tương ứng với các phần tử có khả năng xảy ra hư hỏng được biểu diễn thông qua vector phần trăm độ giảm như sau:

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\} \tag{5}$$

trong đó k là số phần tử hư hỏng trong tấm. Vector α trong công thức (5) thể hiện mức độ hư hỏng của các phần tử cần chẩn đoán.

Hàm mục tiêu được xây dựng bằng cách thiết lập một hàm mà giá trị của hàm đó tiến về giá trị “0” khi giá trị của biến số trong hàm đó tiến về nghiệm cần tìm. Biến số ở đây là vector độ giảm độ cứng α^s tương ứng với các phần tử có hư hỏng và nghiệm cần tìm là vector độ giảm độ cứng thực tế của các phần tử có hư hỏng đó. Trong nghiên cứu này, một hàm mục tiêu sử dụng giá trị năng lượng biến dạng của kết cấu tấm được thiết lập như sau:

$$OF(\alpha^s) = \min_{\alpha^s} \left(\sum_{i=1}^m \left| \frac{MSE_i^d - MSE_i^s(\alpha^s)}{MSE_i^d} \right| \right) \tag{6}$$

trong đó α^s là biến tương ứng với mức độ hư hỏng của phần tử; MSE_i^d là tổng năng lượng biến dạng của dạng

dao động thứ i cho trạng thái hư hỏng; $MSE_i^s(\alpha^s)$ là tổng năng lượng biến dạng của dạng dao động thứ i cho trạng thái với mức độ hư hỏng được giả định. Trong nghiên cứu này, thuật toán di truyền được dùng như một công cụ tối ưu, nhiệm vụ của thuật toán là tìm ra biến số α^s cho giá trị cực tiểu hàm mục tiêu (tương ứng với công thức (6)). Vectơ α^s nào cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn được xem là tốt hơn. Cận của biến số (bound constraints) được lấy dựa theo phạm vi của mức độ hư hỏng có thể xảy ra, cụ thể như sau: $\alpha^s \in (0; 1]$. Số cá thể của quần thể (population size) được chọn bằng 200 cá thể. Số thế hệ (vòng lặp) tối thiểu để xét điều kiện dừng (stall generation): thuật toán sẽ bắt buộc chạy tối thiểu số vòng lặp này trước khi kiểm tra điều kiện dừng, lấy giá trị bằng “1”. Thuật toán sẽ dừng khi đạt một trong hai điều kiện sau. Số vòng lặp tối đa (max generation): thuật toán sẽ dừng khi số vòng lặp đạt giá trị 100. Giới hạn của độ thích nghi (fitness limit): khi giá trị của độ thích nghi (hàm mục tiêu) đạt đến giá trị bé hơn hoặc bằng 0.001 thì xem như chấp nhận kết quả thuật toán và thuật toán dừng.

Lưu đồ thuật toán

Nghiên cứu này kiến nghị một quy trình để chẩn đoán vị trí và mức độ của hư hỏng cho kết cấu tấm. Lưu đồ của quy trình chẩn đoán kiến nghị được thể hiện như Hình 1.

BÀI TOÁN PHÂN TÍCH

Một tấm nhôm có kích thước 246×246×2 mm, điều kiện biên tự do, được chọn theo nghiên cứu thực nghiệm³. Tấm có các đặc trưng vật liệu như sau: khối lượng riêng 2735 kg/m³, mô đun đàn hồi 70 GPa, hệ số Poát xông 0.33. Trong mô hình PTHH, tấm được chia thành 12 phần tử cho mỗi cạnh; mỗi phần tử có kích thước 20.5×20.5 mm (Hình 2). Kết quả phân tích dao động của tấm được tổng hợp trong Hình 3. Kết quả phân tích từ nghiên cứu này cho tần số dao động và dạng dao động phù hợp với³. Điều này chứng tỏ kết quả phân tích theo phương pháp PTHH của nghiên cứu này là đáng tin cậy. Từ đó, các kích bản hư hỏng được đưa ra để khảo sát tính khả thi của phương pháp chẩn đoán kiến nghị (Bảng 1). Các kích bản hư hỏng này có tính ngẫu nhiên: KB1 có một vị trí hư hỏng ở giữa tấm (phần tử 41) với mức độ 10%; KB2 có một vị trí hư hỏng ở biên tấm (phần tử 84) với mức độ 20%; KB3 có hai vị trí hư hỏng đồng thời (phần tử 41 và phần tử 84) với mức độ lần lượt là 20% và 10%.

KẾT QUẢ CHẨN ĐOÁN VÀ THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu này, vị trí của hư hỏng được xác định dựa vào chỉ số MSEEI; mức độ của hư hỏng

Bảng 1: Kích bản hư hỏng khảo sát

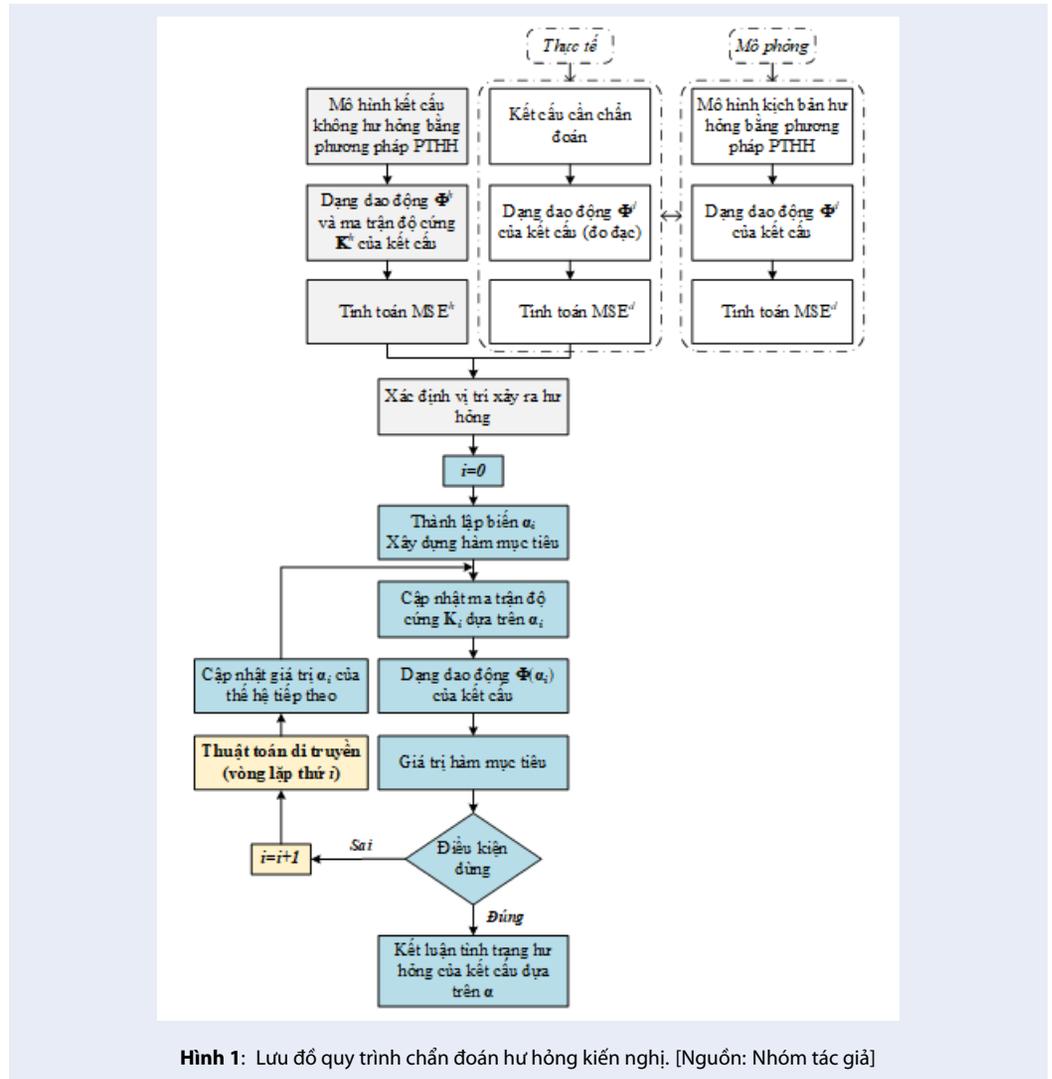
Kích bản	Phần tử hư hỏng	Mức độ hư hỏng (%)
KB1	41	10
KB2	84	20
KB3	41; 84	20; 10

[Nguồn: Nhóm tác giả]

được xác định dựa vào thuật toán di truyền. Kết quả chẩn đoán được phân tích khi sử dụng từng dạng dao động riêng lẻ (mode 1, mode 2, mode 3) và đặc biệt là có đề xuất sử dụng dạng dao động kết hợp (mode 1+2+3). Khi sử dụng một chỉ số MSEEI để xác định vị trí của hư hỏng, số phần tử được cảnh báo hư hỏng thường nhiều hơn so với số phần tử hư hỏng thực tế. Để giảm bớt số phần tử cảnh báo hư hỏng, giảm các ẩn phải tính toán khi áp dụng thuật toán di truyền, lần lượt các ngưỡng hư hỏng là $\beta_0 = 0.05\beta_{max}, 0.10\beta_{max}, 0.15\beta_{max}, 0.20\beta_{max}$ được khảo sát.

Kết quả chẩn đoán cho KB1

Kết quả xác định vị trí của hư hỏng cho KB1 với các ngưỡng hư hỏng khảo sát được thể hiện trong Hình 4. Hình 5 thể hiện số phần tử cảnh báo hư hỏng với các ngưỡng hư hỏng khác nhau cho KB1. Khi ngưỡng hư hỏng càng lớn, số phần tử có chỉ số MSEEI lớn hơn “0” càng giảm. Đối với ngưỡng hư hỏng $\beta_0 = 0.05\beta_{max}$, số phần tử cảnh báo giảm đáng kể. Khi sử dụng mode 3, ngưỡng hư hỏng $\beta_0 = 0.05\beta_{max}$ loại bỏ hầu hết các phần tử bị nhiễu. Đối với ngưỡng hư hỏng $\beta_0 = 0.10\beta_{max}$, xấp xỉ 50% số phần tử cảnh báo do nhiễu bị loại bỏ. Đối với mức ngưỡng hư hỏng $\beta_0 = 0.15\beta_{max}$ và $\beta_0 = 0.20\beta_{max}$, số phần tử cảnh báo do hư hỏng giảm đi đáng kể, đặc biệt là ở mode 1 và mode 2. Các biểu đồ cho thấy các phần tử cảnh báo hư hỏng có xu hướng tập trung quanh khu vực phần tử hư hỏng thực tế. Để thực hiện tiếp bước chẩn đoán mức độ hư hỏng bằng thuật toán di truyền, ngưỡng hư hỏng $\beta_0 = 0.20\beta_{max}$ được áp dụng nhằm giảm bớt các phần tử không thuộc khu vực tập trung các phần tử có chỉ số hư hỏng lớn; điều này giúp làm giảm số ẩn và tiết kiệm thời gian phân tích. Kết quả xác định mức độ của hư hỏng cho KB1 được tổng hợp trong Bảng 2. Thuật toán kiến nghị xác định chính xác mức độ hư hỏng cho phần tử 41, sai số 1%-6%. Các phần tử 19, 28, 29 bị chẩn đoán nhầm ở bước thứ nhất được xác định có mức độ hư hỏng nhỏ hơn 0.2%. Điều này chứng tỏ phương pháp kiến nghị xác định chính xác vị trí và mức độ của hư hỏng trong kết cấu tấm.

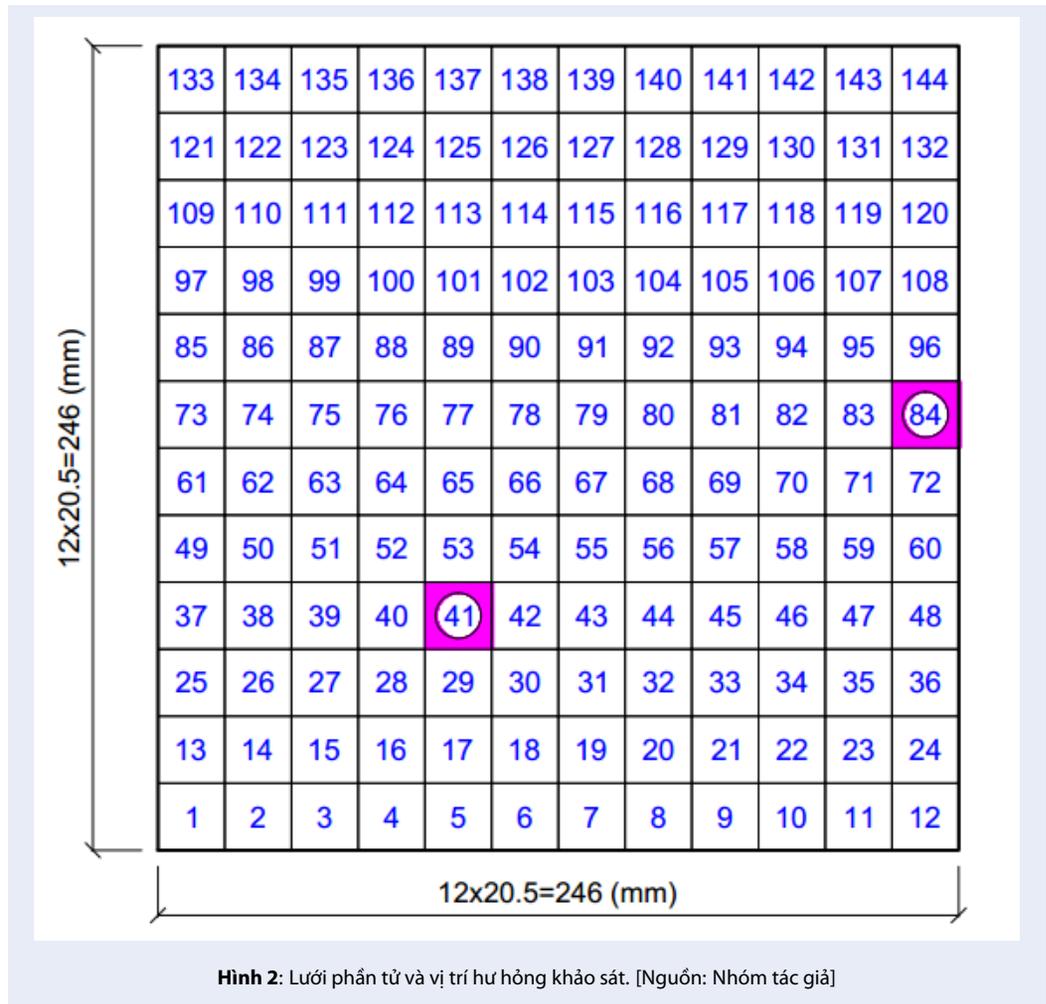


Hình 1: Lưu đồ quy trình chẩn đoán hư hỏng kiến nghị. [Nguồn: Nhóm tác giả]

Bảng 2: Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng cho KB1

Mode 1			Mode 2			Mode 3			Mode 1+2+3		
Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)
19	0	0.02	29	0	0.19	41	10	10.11	41	10	9.37
28	0	0.17	41	10	9.87	-	-	-	-	-	-
41	10	9.82	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[Nguồn: Nhóm tác giả]



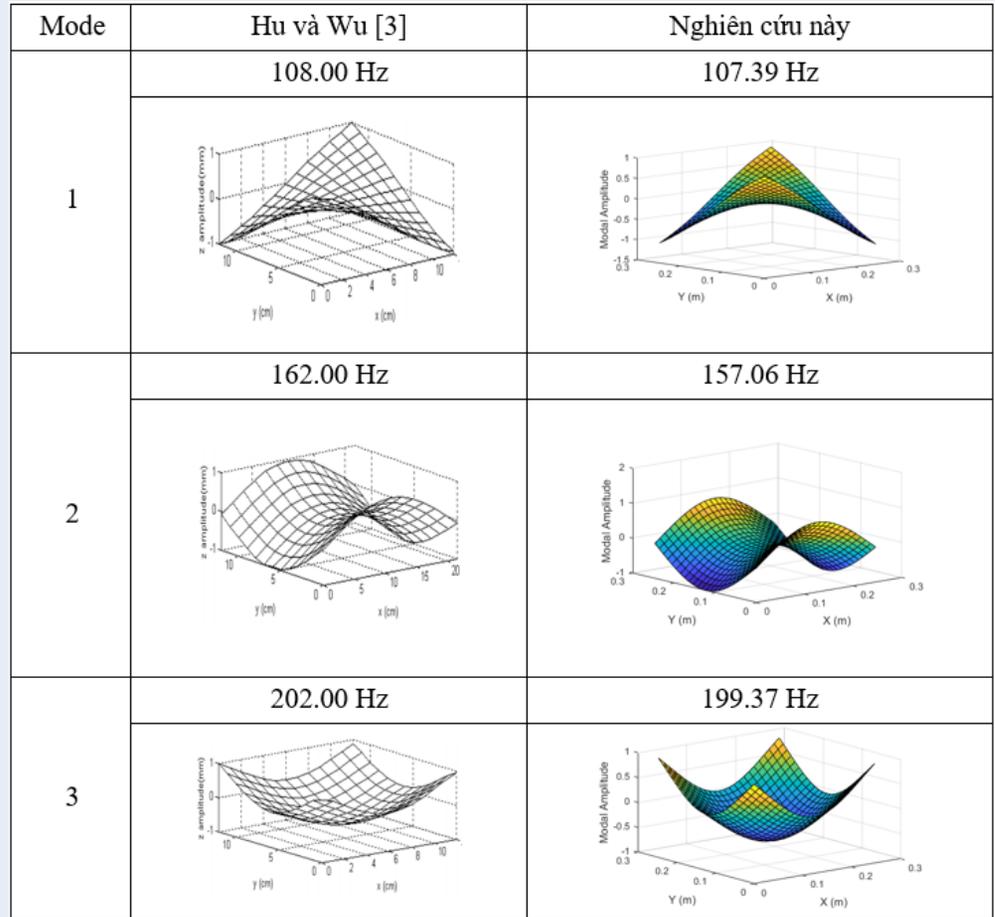
Kết quả chẩn đoán cho KB2

Trong KB2, phần tử hư hỏng được xét ở biên của tấm (phần tử 84) với mức độ hư hỏng là 20%. Phần tử hư hỏng được thay đổi vị trí để đánh giá sự phù hợp của từng dạng dao động đến vị trí hư hỏng, các ảnh hưởng của ngưỡng hư hỏng và độ chính xác của thuật toán di truyền trong việc chẩn đoán mức độ hư hỏng cho tấm tại các vị trí hư hỏng khác nhau. Kết quả xác định vị trí của hư hỏng cho KB2 với các ngưỡng hư hỏng khảo sát được thể hiện trong Hình 6. Hình 7 thể hiện số phần tử cảnh báo hư hỏng với các ngưỡng hư hỏng khác nhau cho KB2. Khi áp dụng ngưỡng hư hỏng thì mode 1 cho kết quả loại bỏ được nhiều phần tử hơn mode 2 và mode 3. Đối với mode 2 và mode 3, có tồn tại các phần tử bị nhiễu mà giá trị của chỉ số có độ lớn đáng kể so với phần tử hư hỏng. Vì vậy, mode 1 là phù hợp nhất trong các mode khảo sát để chẩn đoán khi phần tử hư hỏng nằm ở biên tấm. Kết quả xác định mức độ của hư hỏng cho KB2 được tổng hợp trong Bảng 3. Thuật toán kiến nghị có khả năng xác

định chính xác mức độ hư hỏng cho phần tử 84, sai số 1.5%-3.5%.

Kết quả chẩn đoán cho KB3

Trong KB3, tấm có hư hỏng ở hai vị trí đồng thời, phần tử 41 với mức độ hư hỏng là 20% và phần tử 84 với mức độ hư hỏng là 10%. Kết quả xác định vị trí của hư hỏng cho KB3 với các ngưỡng hư hỏng khảo sát được thể hiện trong Hình 8. Các biểu đồ cho thấy các phần tử hư hỏng dự đoán tập trung ở hai khu vực xung quanh phần tử hư hỏng thực tế. Hình 9 thể hiện số phần tử cảnh báo hư hỏng với các ngưỡng hư hỏng khác nhau cho KB3. Kết quả xác định mức độ của hư hỏng cho KB3 được tổng hợp trong Bảng 4. Thuật toán kiến nghị vẫn có khả năng xác định chính xác mức độ hư hỏng khi tấm có hai vị trí hư hỏng đồng thời. Đối với phần tử 41, kết quả chẩn đoán có sai số lần lượt là 14.5% cho mode 1, 2.5% cho mode 2, 2.5% cho mode 3 và 6.0% cho mode 1+2+3. Đối với phần tử 84, kết quả chẩn đoán có sai số lần lượt là 2.0% cho



Hình 3: Tần số dao động và dạng dao động của tấm chứa hư hỏng. [Nguồn: Nhóm tác giả]

Bảng 3: Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng cho KB2. [Nguồn: Nhóm tác giả]

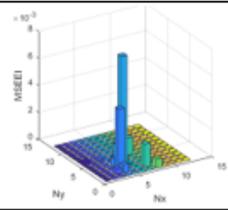
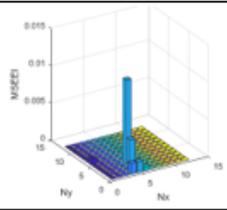
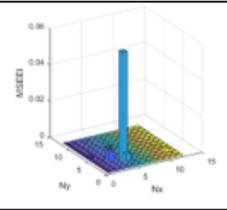
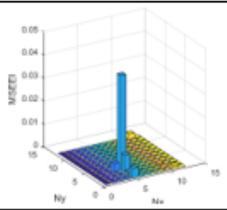
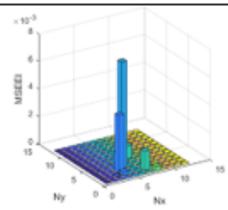
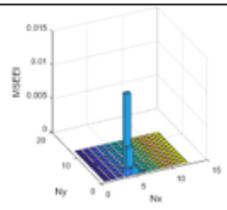
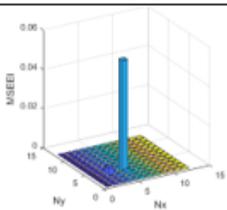
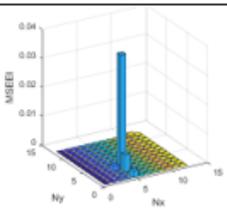
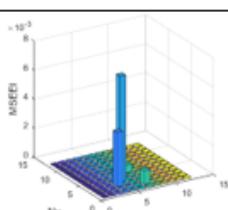
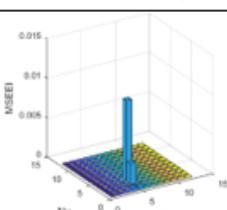
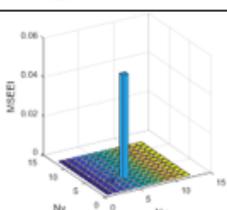
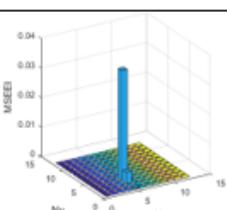
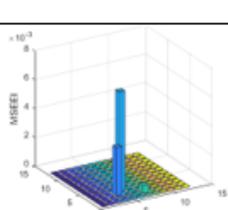
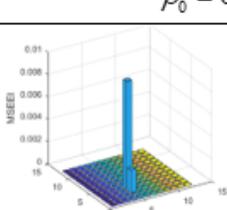
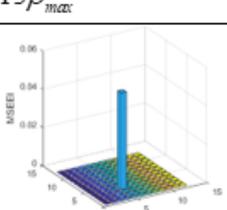
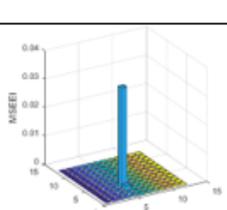
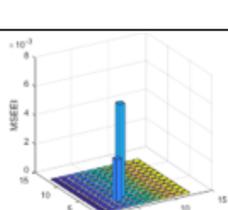
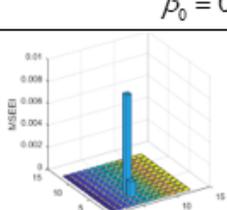
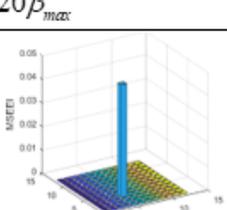
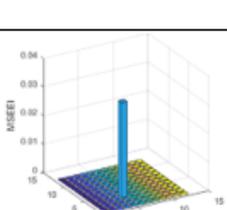
Mode 1			Mode 2			Mode 3			Mode 1+2+3		
Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)
83	0	3.6	83	0	1.7	83	0	0.8	83	0	1.1
84	20	19.3	84	20	19.6	84	20	19.7	84	20	19.5

mode 1, 9.0% cho mode 2, 6.0% cho mode 3 và 21% cho mode 1+2+3. Như vậy, mode 3 cho kết quả chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng tốt nhất đối với KB3.

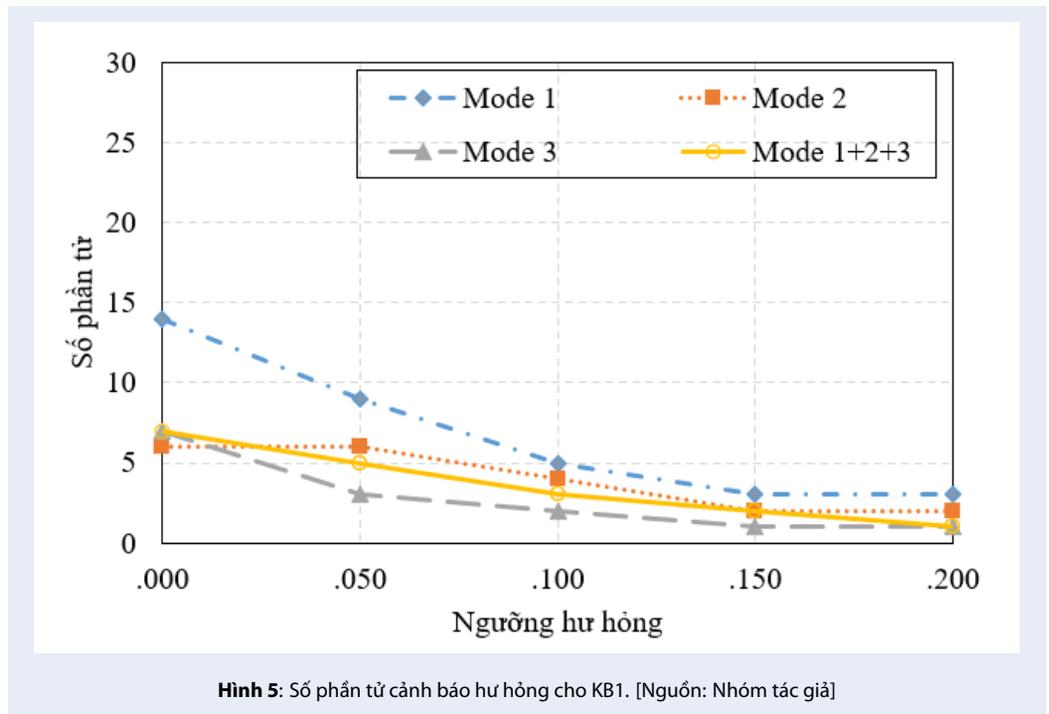
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo này đã giới thiệu một phương pháp năng lượng biến dạng có hai bước cho việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm. Trong bước một, chỉ số MSEEI đã được sử dụng để cảnh báo vị trí hư hỏng trong tấm. Trong bước hai, thuật toán di truyền đã

được sử dụng để xác định mức độ hư hỏng của các phần tử được cảnh báo. Chỉ số MSEEI có hiệu quả cao trong việc định vị vị trí của hư hỏng; đặc biệt là khi kết hợp với ngưỡng hư hỏng thích hợp. Ngưỡng hư hỏng còn giúp làm giảm bớt số ẩn của thuật toán di truyền, làm tăng độ chính xác và giảm thời gian phân tích. Mỗi vị trí hư hỏng có độ nhạy khác nhau với các dạng dao động. Vì vậy, việc sử dụng kết hợp các dạng dao động là cần thiết. Thuật toán di truyền, có hàm mục tiêu dựa trên giá trị năng lượng biến dạng,

Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1+2+3
Không áp dụng ngưỡng hư hỏng			
			
14 phần tử	6 phần tử	7 phần tử	7 phần tử
$\beta_0 = 0.05\beta_{max}$			
			
9 phần tử	6 phần tử	3 phần tử	5 phần tử
$\beta_0 = 0.10\beta_{max}$			
			
5 phần tử	4 phần tử	2 phần tử	3 phần tử
$\beta_0 = 0.15\beta_{max}$			
			
3 phần tử	2 phần tử	1 phần tử	2 phần tử
$\beta_0 = 0.20\beta_{max}$			
			
3 phần tử	2 phần tử	1 phần tử	1 phần tử

Hình 4: Vị trí và số phần tử cảnh báo hư hỏng cho KB1. [Nguồn: Nhóm tác giả]



Bảng 4: Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng cho KB3. [Nguồn: Nhóm tác giả]

Mode 1			Mode 2			Mode 3			Mode 1+2+3		
Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)	Phần tử	Giá định (%)	Chẩn đoán (%)
28	0	1.2	29	0	0.5	41	20	20.5	41	20	18.8
41	20	17.1	41	20	20.5	84	10	9.4	84	10	7.9
84	10	9.8	83	0	1.1	-	-	-	-	-	-
-	-	-	84	10	9.1	-	-	-	-	-	-

cho kết quả có độ chính xác cao trong việc chẩn đoán mức độ hư hỏng trong kết cấu tấm.

Nghiên cứu này tập trung vào việc hoàn thiện phương pháp chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng đặc trưng dao động và thuật toán di truyền. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung giải quyết các vấn đề về sự phù hợp giữa mô hình kết cấu thực tế với mô hình PTHH, cũng như các kỹ thuật đo đạc nhằm thu được các đặc trưng dao động của kết cấu một cách chính xác với chi phí hợp lý. Ngoài ra, việc khảo sát ảnh hưởng của các mức độ nhiễu khác nhau đến kết quả chẩn đoán cần được xem xét. Đồng thời, một số kỹ thuật cần được đề xuất để khử nhiễu nhằm nâng cao độ chính xác của kết quả chẩn đoán hư hỏng.

LỜI CẢM ƠN

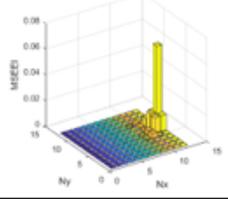
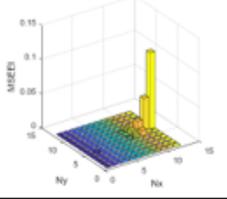
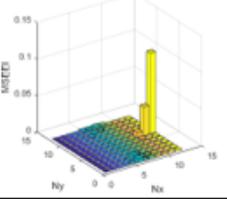
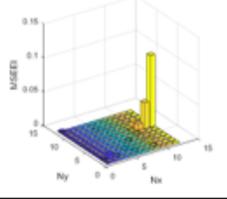
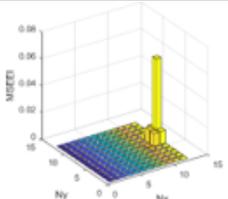
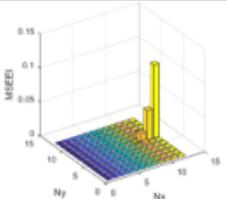
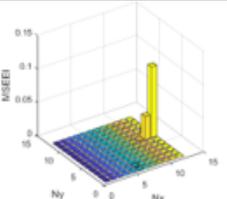
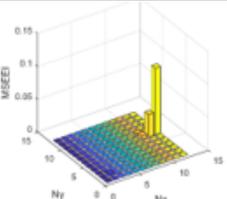
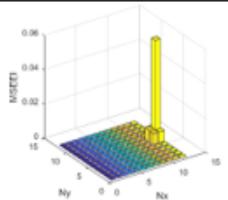
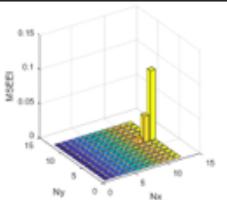
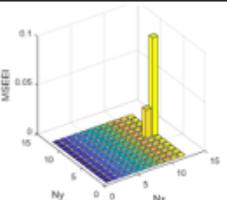
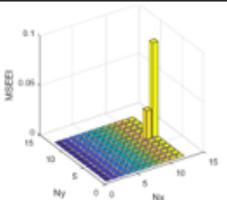
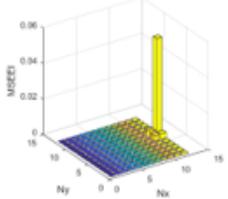
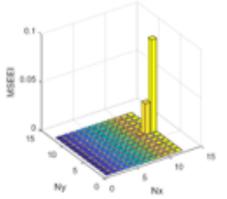
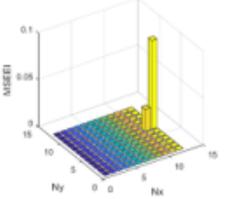
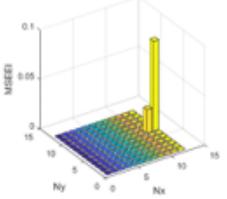
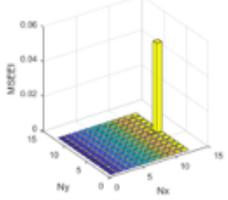
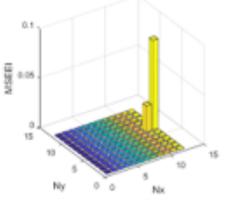
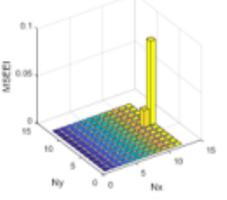
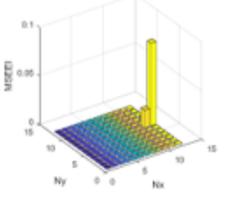
Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số DS2025-20-06.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

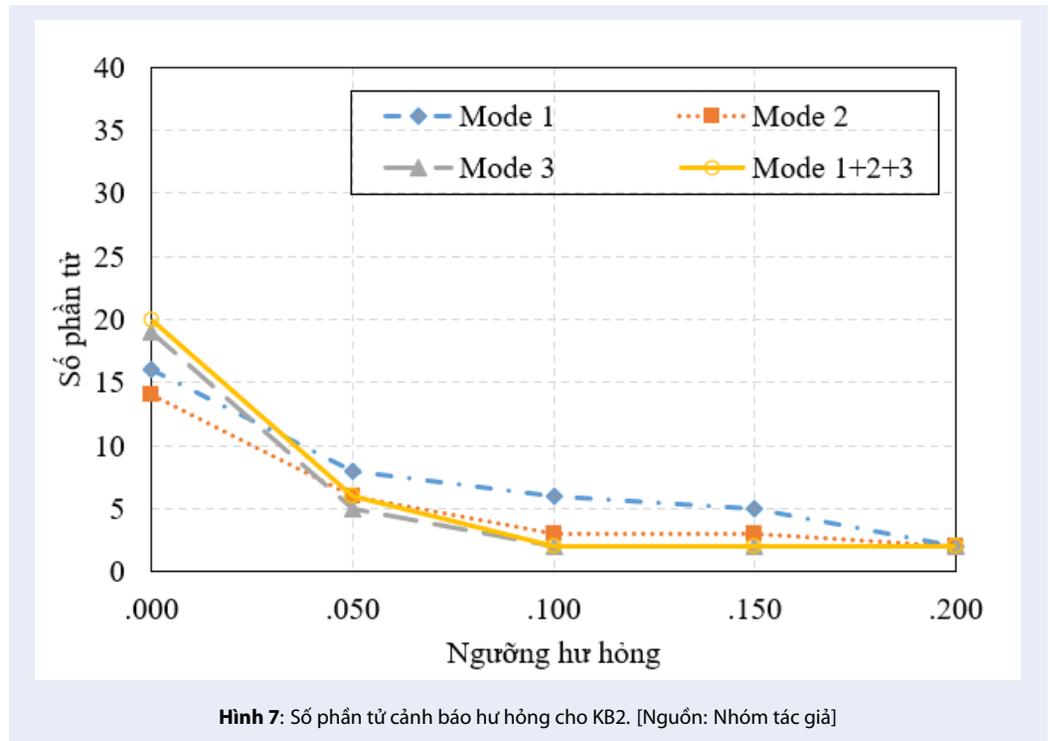
Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Lê Thanh Cao, Trần Mạnh Hùng, Lưu Trần Hữu Tín đã thực hiện mô hình, lập trình tính toán, phân tích kết quả và viết bản thảo bài báo. Hồ Đức Duy đã đưa ra ý tưởng nghiên cứu, chỉnh sửa và hoàn thiện bản thảo bài báo.

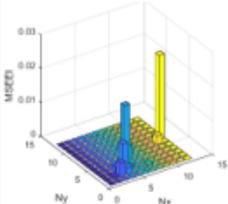
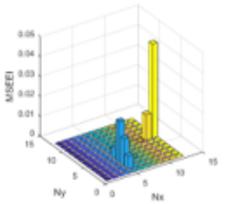
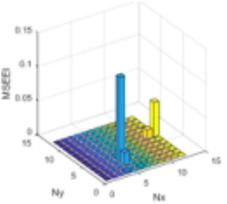
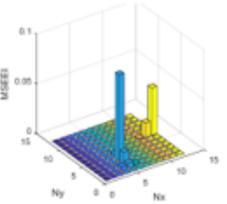
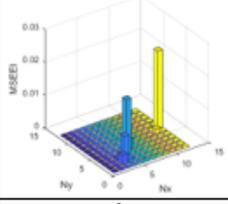
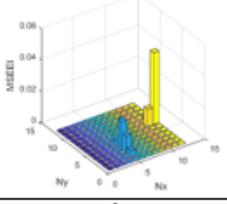
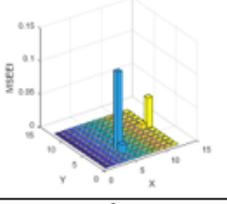
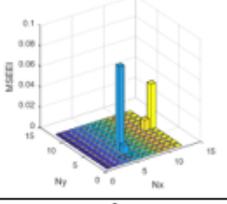
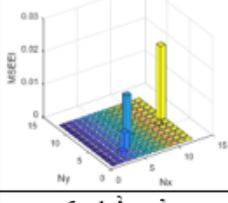
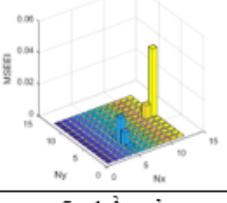
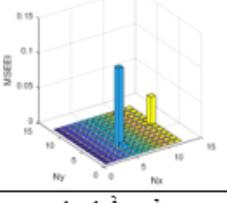
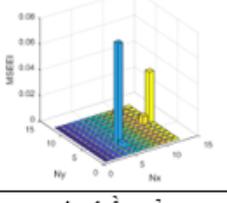
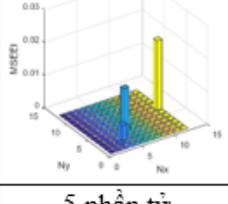
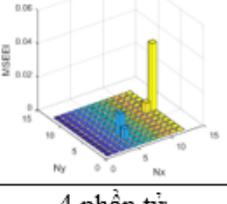
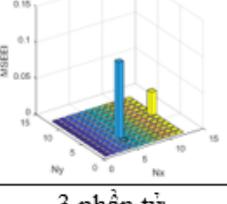
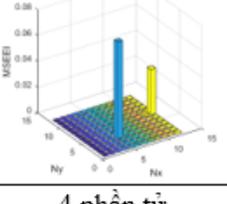
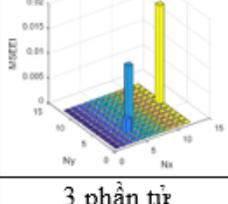
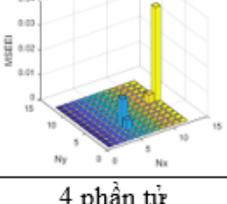
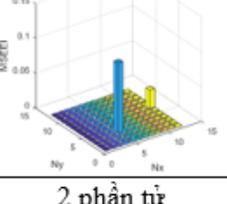
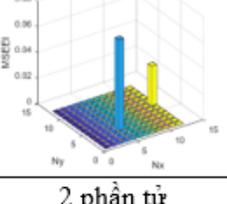
Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1+2+3
Không áp dụng ngưỡng hư hỏng			
			
16 phần tử	14 phần tử	19 phần tử	20 phần tử
$\beta_0 = 0.05\beta_{max}$			
			
8 phần tử	6 phần tử	5 phần tử	6 phần tử
$\beta_0 = 0.10\beta_{max}$			
			
6 phần tử	3 phần tử	2 phần tử	2 phần tử
$\beta_0 = 0.15\beta_{max}$			
			
5 phần tử	3 phần tử	2 phần tử	2 phần tử
$\beta_0 = 0.20\beta_{max}$			
			
2 phần tử	2 phần tử	2 phần tử	2 phần tử

Hình 6: Vị trí và số phần tử cảnh báo hư hỏng cho KB2. [Nguồn: Nhóm tác giả]

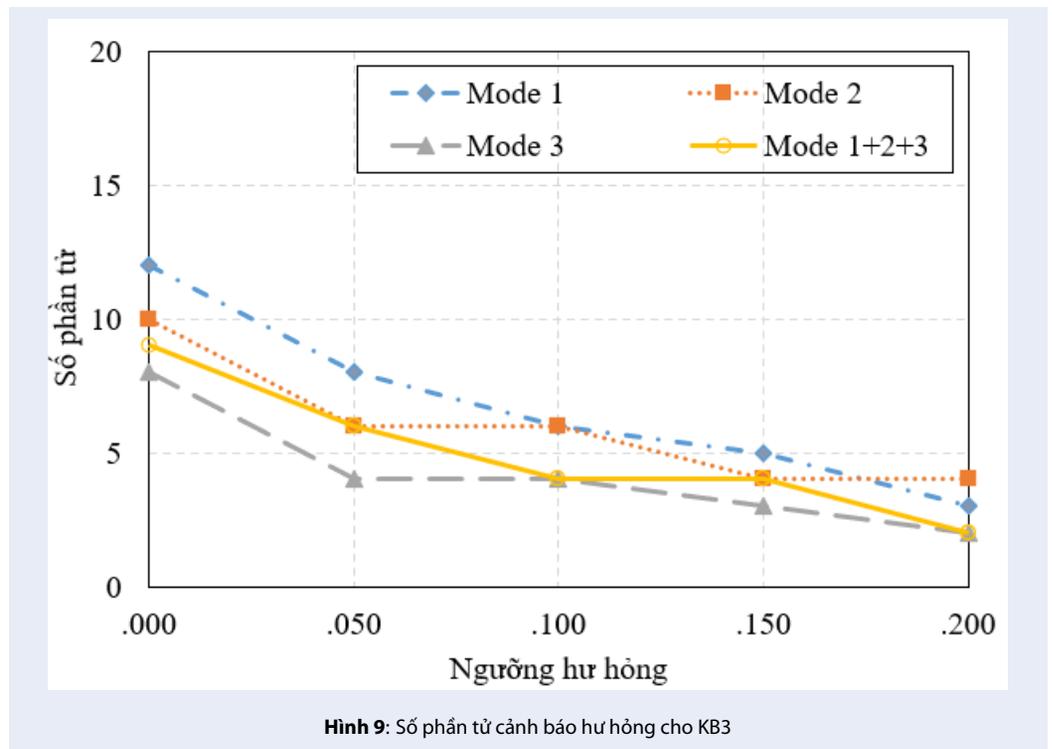


TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ren Y, Bareille O, Lin Z, Huang XR. Review of damage detection techniques in vibration-based structural health monitoring. *International Journal of Dynamics and Control*. 2025;13(99). Available from: <https://doi.org/10.1007/s40435-024-01578-2>.
- Shi ZY, Law SS, Zhang LM. Structural damage detection from modal strain energy change. *Journal of Engineering Mechanics*. 2000;126(12):1216–1223. Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:12\(1216\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1216)).
- Hu HW, Wu CB. Nondestructive damage detection of two-dimensional plate structures using modal strain energy method. *Journal of Mechanics*. 2008;24(4):319–332. Available from: <https://doi.org/10.1017/S1727719100002458>.
- Seyedpoor SM. A two-stage method for structural damage detection using a modal strain energy-based index and particle swarm optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2012;47(1):1–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2011.07.011>.
- Fu Y, Liu J, Wei Z, Lu Z. A two-step approach for damage identification in plates. *Journal of Vibration and Control*. 2014;22(13):3018–3031. Available from: <https://doi.org/10.1177/1077546314557689>.
- Cha YJ, Buyukozturk O. Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015;30(5):347–358. Available from: <https://doi.org/10.1111/mice.12122>.
- Dinh-Cong D, Vo-Duy T, Ho-Huu V, Nguyen-Thoi T. Damage assessment in plate-like structures using a two-stage method based on modal strain energy change and Jaya algorithm. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2018;27(2):166–189. Available from: <https://doi.org/10.1080/17415977.2018.1454445>.
- Khatir S, Wahab M, Boutchicha D, Khatir T. Structural health monitoring using modal strain energy damage indicator coupled with teaching-learning-based optimization algorithm and isogeometric analysis. *Journal of Sound and Vibration*. 2019;448:230–246. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.02.017>.
- Le TC, Ho DD, Huynh TC, Bach VS. Crack detection in plate-like structures using modal strain energy method considering various boundary conditions. *Shock and Vibration*. 2021; Available from: <https://doi.org/10.1155/2021/9963135>.
- Le TC, Ho DD, Nguyen CT, Huynh TC. Structural damage localization in plates using global and local modal strain energy method. *Advances in Civil Engineering*. 2022; Available from: <https://doi.org/10.1155/2022/4456439>.
- Trần MH, Phạm MN, Nguyễn HP, Đ N Trương T, Nguyễn CT, Hà MT, et al. Xác định vị trí hư hỏng trong dầm bê tông cốt thép có gia cường tấm FRP sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ - Kỹ thuật và Công nghệ*. 2022;5(2):1508–1519.
- Chou JH, Ghaboussi J. Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers & Structures*. 2001;79(14):1335–1353. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00027-X).
- Raich AM, Liszkai TR. Improving the performance of structural damage detection methods using advanced genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*. 2007;133(3):449–461. Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:3\(449\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:3(449)).
- Jung S, Ok S, Song J. Robust structural damage identification based on multi-objective optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2010;81(6):786–804. Available from: <https://doi.org/10.1002/nme.2726>.
- Silva M, Santos A, Figueiredo E, Santos R, Sales C, Costa JCWA. A novel unsupervised approach based on a genetic algorithm for structural damage detection in bridges. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2016;52:168–180. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.03.002>.
- Hou R, Xia Y, Xia Q, Zhou X. Genetic algorithm-based optimal sensor placement for L1-regularized damage detection. *Structural Control and Health Monitoring*. 2018;26(1):2274.

Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1+2+3
Không áp dụng ngưỡng hư hỏng			
			
12 phần tử	10 phần tử	8 phần tử	9 phần tử
$\beta_0 = 0.05\beta_{max}$			
			
8 phần tử	6 phần tử	4 phần tử	6 phần tử
$\beta_0 = 0.10\beta_{max}$			
			
6 phần tử	5 phần tử	4 phần tử	4 phần tử
$\beta_0 = 0.15\beta_{max}$			
			
5 phần tử	4 phần tử	3 phần tử	4 phần tử
$\beta_0 = 0.20\beta_{max}$			
			
3 phần tử	4 phần tử	2 phần tử	2 phần tử

Hình 8: Vị trí và số phần tử cảnh báo hư hỏng cho KB3. [Nguồn: Nhóm tác giả]



Available from: <https://doi.org/10.1002/stc.2274>.

17. Bạch VS, Lê TC, Đ D Hồ. Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu khung thép sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền. Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ - Kỹ thuật và Công nghệ. 2021;4:1254–1263. Available from: <https://doi.org/10.32508/stdjet.v4i4.904>.

18. Guo HY, Li ZL. Structural multi-damage identification based on modal strain energy equivalence index method. International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2014;14(7):1450028. Available from: <https://doi.org/10.1142/S021945541450028X>.

Modal strain energy-based identification of damage's location and severity in plate-like structures

Thanh-Cao Le¹, Duc-Duy Ho^{2,3,*}, Manh-Hung Tran^{2,3}, Tran-Huu-Tin Luu⁴



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Faculty of Civil Engineering, Nha Trang University, Khanh Hoa Province, Vietnam

²Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Vietnam

³Vietnam National University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

⁴Faculty of Engineering Technology, Tien Giang University, Dong Thap Province, Vietnam

Correspondence

Duc-Duy Ho, Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Vietnam

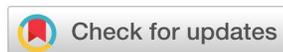
Vietnam National University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

History

- Received: 26-3-2025
- Revised: 08-1-2026
- Accepted: 18-3-2026
- Published Online: xx-xx-2026

DOI :



Copyright

© VNUHCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



ABSTRACT

In recent years, structural health monitoring (SHM) has faced the challenge of developing advanced and efficient damage identification methods for the solution of problems in engineering. In this paper, a two-stage method using modal strain energy to identify the location and the severity of damage in plate-like structures is presented. The first stage utilizes a modal strain energy equivalence index (MSEEI) to determine the damage's location. The modal strain energy is calculated by the direct method from the finite element model using the 9-node elements for plate structures. A suitable damage threshold is proposed to reduce the number of variables for the next stage. The second stage employs the genetic algorithm (GA) to minimize the objective function based on the modal strain energy. The objective function has the variables relating to the vector of stiffness reduction level (representing the severity of damage) of the damageable elements, which are the result of the previous stage. The feasibility of the method is verified through an aluminum plate problem with diverse damage scenarios. The results show that the presented method is capable of exactly identifying the location and the severity of damage in plate-like structures.

Key words: damage identification, plate, modal strain energy, genetic algorithm, vibration.

Cite this article : Le T, Ho D, Tran M, Luu T. **Modal strain energy-based identification of damage's location and severity in plate-like structures** . *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology* 2026; 9(1):xxxx-xxxx.