

CHẨN ĐOÁN HƯ HỎNG TRONG KẾT CẤU TẦM SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP NĂNG LƯỢNG BIẾN DẠNG KẾT HỢP VỚI THUẬT TOÁN DI TRUYỀN

Lê Thanh Cao^{a,b,c}, Bạch Văn Sỹ^c, Hồ Đức Duy^{a,b,*}

^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 TP. Hồ Chí Minh, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang, 2 đường Nguyễn Đình Chiểu,
quận Vĩnh Thọ, TP. Nha Trang, Khánh Hòa, Việt Nam

Nhận ngày 06/07/2020, Sửa xong 01/09/2020, Chấp nhận đăng 07/09/2020

Tóm tắt

Bài báo này 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. Trong bước thứ nhất, chỉ tiêu dựa vào sự thay đổi của năng lượng biến dạng “Modal Strain Energy Damage Index – MSEDİ” được sử dụng để chẩn đoán vị trí của hư hỏng. Giá trị năng lượng biến dạng được xác định từ kết quả phân tích dao động của kết cấu tấm ở hai trạng thái trước và sau khi xuất hiện hư hỏng. Trong bước thứ hai, thuật toán di truyền được sử dụng để cực tiểu hóa hàm mục tiêu với biến số là véc-tơ mức độ suy giảm chiều dày của các phần tử có khả năng xảy ra hư hỏng đã được cảnh báo từ bước thứ nhất. Hàm mục tiêu được sử dụng cũng dựa trên giá trị năng lượng biến dạng. Tính hiệu quả của phương pháp đề xuất được khảo sát và đánh giá thông qua bài toán tấm với các kịch bản hư hỏng khác nhau. Kết quả phân tích cho thấy, phương pháp đề xuất có khả năng chẩn đoán chính xác sự xuất hiện, vị trí và độ lớn của hư hỏng trong kết cấu tấm.

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

STRUCTURAL DAMAGE DETECTION IN PLATES USING MODAL STRAIN ENERGY METHOD AND GENETIC ALGORITHM

Abstract

This study proposes a two-stage method using modal strain energy and genetic algorithm (GA) to identify the location and the extent of damage in plate-like structures. In the first stage, a criteria based on the change in modal strain energy namely Modal Strain Energy Damage Index (MSEDİ) is utilized to determine the damage's location. The modal strain energy is determined by using the modal analysis of plate-like structures in both states, before and after the occurrence of damages. In the second stage, the GA is employed to minimize the objective function with the variables relating to the vector of thickness reduction of the potential damaged elements, which are the result of the previous stage. The objective function is also based on modal strain energy. The effectiveness of the proposed method is analyzed and evaluated by numerical simulations for a plate with various damaged scenarios. The results show that the proposed method has the capability of exactly identifying the occurrence, the location and the severity of damages in plate-like structure.

Keywords: damage detection; vibration; plate-like structure; modal strain energy; genetic algorithm.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(4V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(4V)-02) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hoducduy@hcmut.edu.vn (Duy, H. Đ.)

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán kết cấu (Structural Health Monitoring: SHM) đã và đang đóng một vai trò rất quan trọng đối với sự an toàn, tuổi thọ và sự hoạt động bền vững của kết cấu công trình xây dựng. Việc phát triển các phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu, đặc biệt là các phương pháp sử dụng các đáp ứng dao động từ kết cấu, nhận được quan tâm của rất nhiều nhà nghiên cứu. Trong đó, phương pháp năng lượng biến dạng (Modal Strain Energy: MSE) đã chứng tỏ là một trong những phương pháp có tính hiệu quả cao cho việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu [1].

Stubbs, và cs. đã áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu dạng dầm [2]. Sau đó, Cornwell, và cs. [3] đã nghiên cứu mở rộng phương pháp năng lượng biến dạng cho kết cấu dạng tấm. Hu và Wu [4] đã kiểm chứng phương pháp năng lượng biến dạng với việc sử dụng kết quả dao động thực nghiệm để chẩn đoán vết nứt trên bề mặt của tấm nhôm mỏng, đẳng hướng, với điều kiện biên tự do. Lê và Hồ [5] đã phát triển phương pháp năng lượng biến dạng cho bài toán tấm mỏng với các điều kiện biên khác nhau. Fu, và cs. đã thiết lập một quy trình hai bước sử dụng kết hợp phương pháp năng lượng biến dạng và phân tích độ nhạy đáp ứng để chẩn đoán cho kết cấu tấm sử dụng vật liệu đồng nhất đẳng hướng [6].

Trong lĩnh vực kết cấu, thuật toán tối ưu được áp dụng cho việc cập nhật mô hình tính toán để giải quyết bài toán tối ưu hóa thiết kế về mặt kết cấu và chẩn đoán hư hỏng. Dinh, và cs. [7] đã trình bày một phương pháp chẩn đoán hai bước dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng và thuật toán Jaya để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm. Samir, và cs. [8] đã giới thiệu một phương pháp chẩn đoán hai bước cho kết cấu dầm dựa vào năng lượng biến dạng chuẩn hóa và thuật toán tối ưu dựa vào dạy vào học (Teaching-Learning-Based Optimization: TLBO). Hung, và cs. [9] đã phát triển một thuật toán học sâu hỗn hợp cho việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu.

Trong các công cụ tối ưu thì thuật toán di truyền (Genetic Algorithm: GA) được ứng dụng rất phổ biến trong các bài toán tối ưu. Thuật toán này được xây dựng dựa trên cơ sở mô phỏng sự chọn lọc và sự sinh tồn của các cá thể trong tự nhiên để tìm ra cá thể có đặc điểm tốt nhất. Từ đó, thuật toán được ứng dụng trong bài toán tối ưu để tìm biến số cho kết quả tốt nhất đối với hàm mục tiêu đề ra. Friswell, và cs. [10] đã áp dụng thuật toán di truyền để chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng trên kết cấu dầm công xôn và kết cấu tấm công xôn. Trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu được sử dụng là tần số và dạng dao động. Chou và Ghaboussi [11] 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. Thông số được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm chuyển vị tĩnh tính toán và đo đạc được trên kết cấu thực tế.

Đối với các nghiên cứu đã thực hiện, việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm đã được áp dụng thành công. Kết quả chẩn đoán đã xác định được cả thông tin về vị trí, hình dạng và mức độ của hư hỏng. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện tại đang sử dụng véc-tơ các thành phần chuyển vị nút để xác định giá trị năng lượng biến dạng của phần tử. Từ đó, các chỉ số hư hỏng được dẫn xuất từ giá trị năng lượng biến dạng này. Điều này chỉ có ý nghĩa về mặt lý thuyết chứ không khả thi cho việc triển khai ứng dụng trong thực tiễn vì phải đo đạc quá nhiều dữ liệu về chuyển vị nút. Đặc biệt là rất khó khăn để xác định các thành phần chuyển vị xoay của nút khi kết cấu tấm dao động.

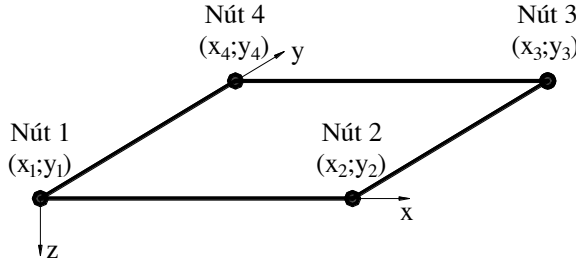
Trong bài báo này, phương pháp năng lượng biến dạng được cải tiến nhằm giảm bớt dữ liệu phân tích nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả chẩn đoán. Phương pháp cải tiến này chỉ sử dụng duy nhất thành phần chuyển vị đứng của nút trong kết cấu tấm. Trong thực tiễn, khi kết cấu dao động, thành phần chuyển vị đứng tại nút dễ dàng được xác định thông qua việc đo gia tốc tại nút tương ứng kết hợp với các phương pháp phân tích dao động. Một quy trình chẩn đoán bao gồm hai bước sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền được đề xuất để chẩn đoán sự xuất

hiện, vị trí và mức độ hư hỏng trong kết cấu tấm.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích dao động tự do cho tấm

Thông số dạng dao động của kết cấu tấm của trạng thái trước và trạng thái sau khi xuất hiện hư hỏng là dữ liệu đầu vào của phương pháp năng lượng biến dạng. Trong nghiên cứu này, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để phân tích dao động tự do cho kết cấu tấm. Phần tử tứ giác đẳng tham số bốn nút, ký hiệu là phần tử Q4, được sử dụng để mô phỏng cho kết cấu tấm. Trong hệ tọa độ vuông góc tổng thể xyz , phần tử Q4 có bốn nút, với tọa độ các nút là (x_i, y_i) như trong Hình 1.



Hình 1. Phần tử tứ giác đẳng tham số 4 nút trong hệ tọa độ tổng thể xyz

Khi thiết lập ma trận độ cứng và ma trận khối lượng của phần tử xuất hiện các tích phân hai lớp. Để xấp xỉ các tích phân hai lớp này, hệ tọa độ tổng thể xyz được chuyển sang hệ tọa độ tự nhiên $\xi\eta$. Phần tử chuẩn trong hệ tọa độ tự nhiên là một hình vuông có tọa độ bốn nút lần lượt là $(-1, -1), (1, -1), (1, 1), (-1, 1)$. Trong hệ tọa độ tự nhiên $\xi\eta$, thay vì tính tích phân trên toàn miền phần tử, tích phân sẽ được tính dựa vào các điểm Gauss.

Mỗi nút có 5 thành phần chuyển vị $(u_i \ v_i \ w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi})$. Trong đó: $(u_i \ v_i \ w_i)$ lần lượt là 3 thành phần chuyển vị thẳng theo phương x, y và z của nút thứ i ; $(\theta_{xi} \ \theta_{yi})$ lần lượt là thành phần chuyển vị xoay của nút thứ i quanh trục x và trục y .

Quan hệ giữa các tọa độ vuông góc và tọa độ tự nhiên được cho bằng tổ hợp tuyến tính như sau:

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i x_i; \quad y = \sum_{i=1}^4 N_i y_i \quad (1)$$

trong đó (x_i, y_i) là tọa độ các nút của phần tử trong hệ tọa độ tổng thể ($i = 1, 2, 3, 4$).

Các hàm dạng N_i dùng để nội suy chuyển vị bên trong phần tử được cho dưới dạng tổng quát như sau:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) \quad (2)$$

Trong mỗi phần tử, trường chuyển vị có thể được xấp xỉ thông qua hàm dạng:

$$u^e = N^e d^e \quad (3)$$

trong đó $d^e = [u_i \ v_i \ w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi}]_{i=1,2,3,4}^T$ là véc-tơ chuyển vị nút của phần tử thứ e với 20 bậc tự do. Ma trận hàm dạng được biểu diễn như sau:

$$N^e_{(5 \times 20)} = \begin{bmatrix} N_1^e & N_2^e & N_3^e & N_4^e \\ (5 \times 5) & (5 \times 5) & (5 \times 5) & (5 \times 5) \end{bmatrix} \quad (4)$$

trong đó các thành phần hàm dạng được xác định theo công thức (2). Phương trình phân tích dao động tự do không cản của tấm:

$$M\ddot{d} + Kd = 0 \quad (5)$$

trong đó d và $\ddot{d}$ lần lượt là véc-tơ chuyển vị và véc-tơ gia tốc của tất cả các nút trong miền bài toán; K và M lần lượt là ma trận độ cứng tổng thể và ma trận khối lượng tổng thể ghép nối từ các ma trận phần tử, được xác định như sau:

$$K = \sum_1^{N_e} K^e_{20 \times 20} = \sum_1^{N_e} \int_{\Omega_e} (B^e)^T DB^e d\Omega = \sum_1^{N_e} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (B^e)^T DB^e \det |J| d\eta d\xi$$

$$M = \sum_1^{N_e} M^e_{20 \times 20} = \sum_1^{N_e} \int_{\Omega_e} (N^e)^T m N^e d\Omega = \sum_1^{N_e} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (N^e)^T m N^e \det |J| d\eta d\xi \quad (6)$$

trong đó $\sum_1^{N_e}$ là ký hiệu ghép nối ma trận phần tử vào ma trận tổng thể; $\det |J|$ là định thức của ma trận

Jacobi $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}$; $B^e_{8 \times 20} = [B^e_m \ B^e_b \ B^e_s]^T$ là ma trận tính biến dạng với các thành phần:

$$B^e_m = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^e_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N^e_i}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial N^e_i}{\partial y} & \frac{\partial N^e_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(3 \times 20)}; \quad B^e_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N^e_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N^e_i}{\partial y} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N^e_i}{\partial y} & \frac{\partial N^e_i}{\partial x} \end{bmatrix}_{(3 \times 20)}; \quad B^e_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial N^e_i}{\partial y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N^e_i}{\partial x} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(2 \times 20)}$$

$i=1,2,3,4$ $i=1,2,3,4$ $i=1,2,3,4$

(7)

m là ma trận khối lượng của phần tử:

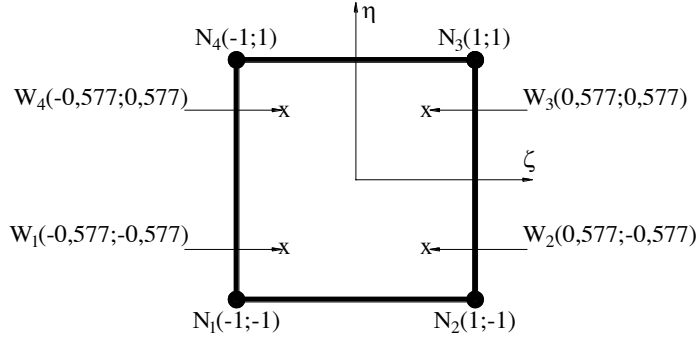
$$m = \begin{bmatrix} I_0 & 0 & 0 & I_1 & 0 \\ & I_0 & 0 & 0 & I_1 \\ & & I_0 & 0 & 0 \\ & & & I_2 & 0 \\ sym & & & & I_2 \end{bmatrix}; \quad (I_0, I_1, I_2) = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) (1, z, z^2) dz \quad (8)$$

Phương pháp tích phân số được sử dụng để xác định các ma trận độ cứng và ma trận khối lượng phần tử:

$$I = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta \approx \int_{-1}^1 \sum_1^n w_i f(\xi_i, \eta) d\eta \approx \sum_1^n w_j \sum_1^n w_i f(\xi_i, \eta_j) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j f(\xi_i, \eta_j) \quad (9)$$

Đối với phần tử 4 nút, độ cứng màng và độ cứng uốn của phần tử được xác định bằng việc sử dụng tích phân số 2×2 điểm Gauss. Trong khi đó, độ cứng cắt của phần tử được xác định bằng việc sử dụng tích phân số 1 điểm Gauss. Tọa độ 4 điểm Gauss và trọng số tương ứng được thể hiện trên Hình 2. Trường hợp 1 điểm Gauss, tọa độ nút (0, 0) và trọng số bằng 2.

Phương trình (5) được giải theo phương pháp trị riêng; nghiệm của phương trình là các tần số dao động (trị riêng) và các dạng dao động (véc-tơ riêng) tương ứng.



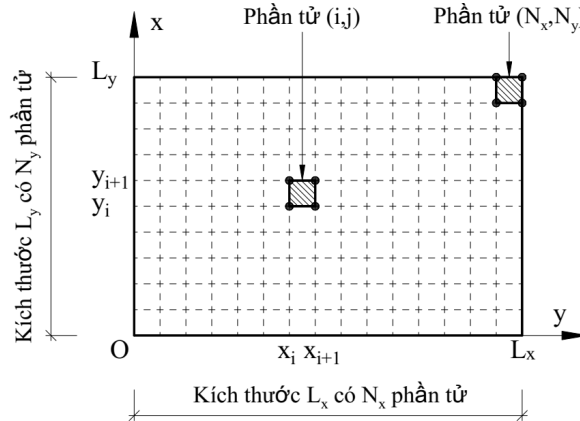
Hình 2. Phần tử chuẩn trong hệ tọa độ tự nhiên

2.2. Phương pháp năng lượng biến dạng

Xét một tấm mỏng dao động tự do không cản, được chia thành các vùng con như Hình 3. Tương ứng với một dạng dao động thứ k , $\phi_k(x, y)$, năng lượng biến dạng dao động của vùng con (i, j) được xác định như sau [3]:

$$MSE_{k,ij} = \frac{D_{ij}}{2} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (10)$$

trong đó: D_{ij} là độ cứng chống uốn của vùng con (i, j) ; ν là hệ số Poát xông.



Hình 3. Sơ đồ kết cấu tấm tổng thể

Năng lượng biến dạng tổng cộng của toàn bộ tấm:

$$MSE_k = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} MSE_{k,ij} \quad (11)$$

Năng lượng biến dạng phân đoạn của vùng con thứ (i, j) được xác định như sau:

$$F_{k,ij} = \frac{MSE_{k,ij}}{MSE_k} \quad \text{với} \quad \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} F_{k,ij} = 1 \quad (12)$$

Xét m dạng dao động, trong tính toán, chỉ số hư hỏng trong vùng con (i, j) được định nghĩa là:

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \quad (13)$$

trong đó: ký hiệu “*” đại diện cho kết cấu ở trạng thái sau khi xuất hiện hư hỏng. Chỉ số hư hỏng sau khi chuẩn hóa được xác định như sau:

$$MSEDI_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (14)$$

trong đó $\bar{\beta}_{ij}, \alpha_{ij}$ lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của các chỉ số hư hỏng.

Giá trị $MSEDI_{ij}$ được sử dụng để chẩn đoán vị trí phần tử (i, j) xuất hiện hư hỏng trong kết cấu tấm. Trong công thức tính năng lượng biến dạng, công thức (10), xuất hiện giá trị đạo hàm bậc hai của dạng dao động theo hai biến x và y . Phương pháp sai phân trung tâm được sử dụng để xác định các giá trị này [5].

2.3. Thuật toán di truyền

Trong việc mô phỏng kết cấu tấm, sự hư hỏng được định nghĩa là sự giảm độ cứng của kết cấu thông qua việc giảm chiều dày của các phần tử tương ứng. Độ giảm chiều dày tương ứng với mức độ hư hỏng trên phần tử thứ j được mô tả qua công thức sau:

$$t_j^s = (1 - \alpha_j) t_j^0 \quad (15)$$

trong đó t_j^0, t_j^s lần lượt là chiều dày của phần tử thứ j ở trạng thái không hư hỏng và trạng thái có hư hỏng, α_j là độ suy giảm (%) của chiều dày đối với phần tử thứ j .

Từ đó, độ giảm chiều dày tương ứng với các phần tử có khả năng xảy ra hư hỏng được biểu diễn thông qua véc-tơ như sau:

$$\alpha = \{\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_k\} \quad (16)$$

Véc-tơ α trong công thức (16) thể hiện mức độ hư hỏng của các phần tử cần chẩn đoán. Trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu, dựa vào giá trị năng lượng biến dạng của kết cấu, được thể hiện như sau:

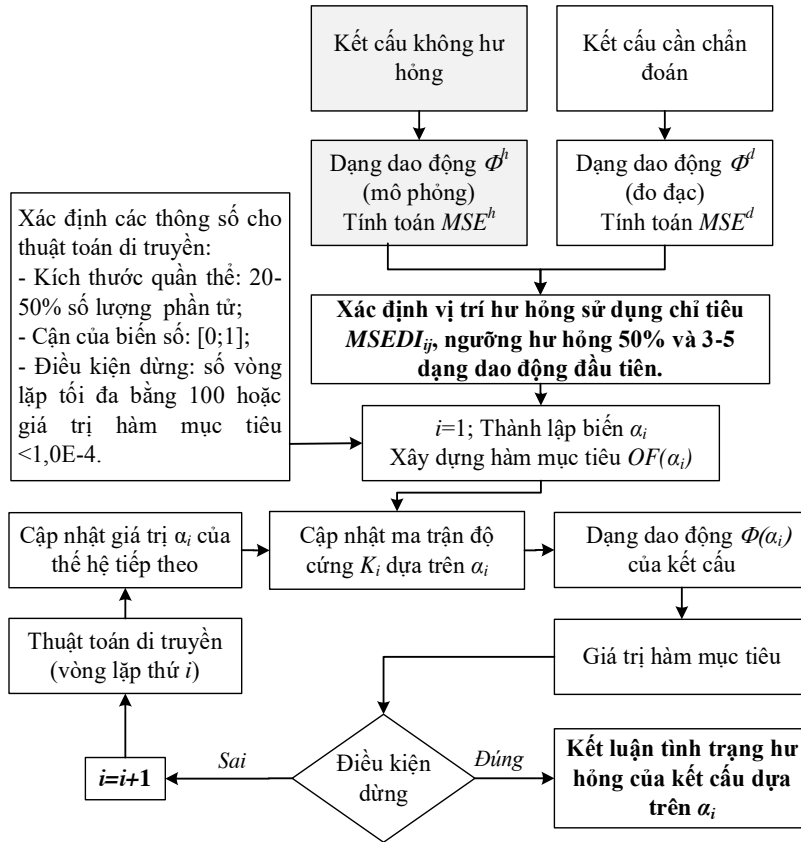
$$OF(\alpha^s) = \min_{\alpha^s} \left(\sum_{i=1}^m \left| \frac{MSE_i^d - MSE_i^s(\alpha^s)}{MSE_i^d} \right| \right) \quad (17)$$

trong đó α^s là biến số tương ứng với độ suy giảm chiều dày của phần tử; MSE_i^d là năng lượng biến dạng toàn tấm của dạng dao động thứ i ứng với trạng thái hư hỏng cần chẩn đoán và $MSE_i^s(\alpha^s)$ là năng lượng biến dạng toàn tấm của dạng dao động thứ i ứng với mức độ hư hỏng giả định α^s .

Trong nghiên cứu này, thuật toán di truyền được sử dụng như một công cụ tối ưu. Mục tiêu của thuật toán là tìm ra biến số α^s cho giá trị cực tiểu của hàm mục tiêu, tương ứng với công thức (17). Véc-tơ α^s nào cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn được xem là chẩn đoán chính xác hơn.

2.4. Lưu đồ thuật toán

Dựa trên cơ sở lý thuyết của phương pháp năng lượng biến dạng và thuật toán di truyền, một quy trình chẩn đoán hư hỏng gồm hai bước được đề xuất trong nghiên cứu này. Bước một sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán vị trí của hư hỏng. Bước hai sử dụng thuật toán di truyền để chẩn đoán độ lớn của hư hỏng. Lưu đồ của quy trình chẩn đoán đề xuất được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Lưu đồ của quy trình chẩn đoán hư hỏng đề xuất

3. Bài toán phân tích

3.1. Thiết lập bài toán

Tấm nhôm có kích thước cạnh dài là 300 mm, cạnh ngắn là 200 mm, chiều dày là 4 mm, có bốn biên liên kết ngàm, được chia thành 30 phần tử theo phương ngang và 20 phần tử theo phương đứng như Hình 5. Vật liệu tấm có các thông số: khối lượng riêng $\rho = 2710 \text{ kg/m}^3$, mô đun đàn hồi $E = 68,9 \text{ GPa}$, hệ số Poát xống $\nu = 0,33$. Các thông số của bài toán được lấy theo nghiên cứu của Kumar và Reddy (2016) [12]. Trong nghiên cứu này, phần tử hư hỏng được xem xét là phần tử số 410 với mức độ hư hỏng là 10% của sự suy giảm chiều dày của phần tử.

3.2. Kết quả phân tích dao động tự do

Phần mềm MATLAB được sử dụng để mô phỏng và phân tích dao động tự do cho kết cấu tấm được khảo sát ở cả hai trạng thái trước và sau khi xuất hiện phần tử hư hỏng. Phần tử tứ giác đẳng tham số bốn nút được sử dụng để mô phỏng tấm theo lý thuyết tấm Mindlin. Bảng 1 và Bảng 2 thể hiện năm tần số và dạng dao động uốn đầu tiên cho trạng thái trước khi kết cấu tấm xuất hiện phần tử hư hỏng. Các giá trị tần số dao động này được so sánh với kết quả của nghiên cứu [12] và phần mềm SAP2000. Kết quả phân tích từ nghiên cứu này rất phù hợp với kết quả phân tích từ nghiên cứu [12] và phần mềm SAP2000. Độ chênh lệch của các giá trị tần số dao động là rất nhỏ, khoảng 0,1 ~ 0,8%.

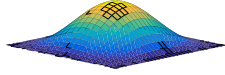
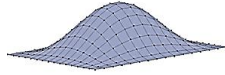
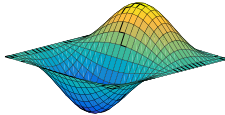
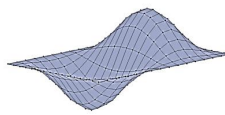
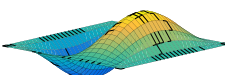
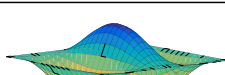
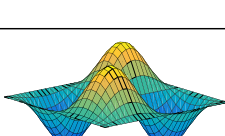
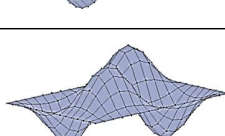
571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600
541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570
511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450
391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420
361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390
331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360
301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330
271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Hình 5. Lưới phần tử 30×20 của tấm nhôm và vị trí phần tử hư hỏng 410

Bảng 1. Kết quả so sánh tần số dao động (Hz)

Dạng dao động	1	2	3	4	5
Nghiên cứu này	661,9	1020,7	1629,4	1632,8	1955,4
Nghiên cứu [12]	660,3	1018,8	1615,9	1624,4	1947,2
SAP2000	661,4	1019,2	1619,3	1624,6	1945,7

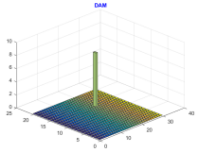
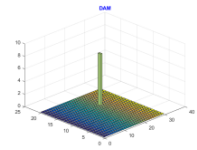
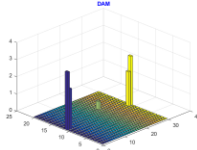
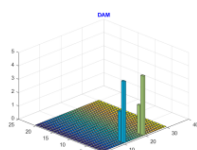
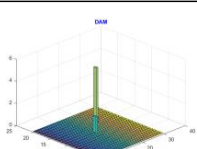
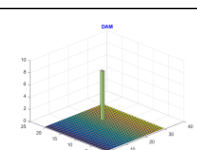
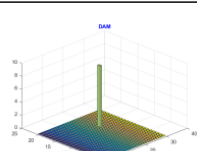
Bảng 2. Dạng dao động cho trạng thái trước khi xuất hiện hư hỏng

Dạng dao động	Kết quả phân tích MATLAB	Kết quả phân tích SAP2000
1		
2		
3		
4		
5		

3.3. Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng

Ở bước một, chỉ tiêu cảnh báo MSEDI được sử dụng để giải quyết bài toán chẩn đoán vị trí hư hỏng. Ngưỡng hư hỏng được chọn là 50% nhằm loại bỏ ảnh hưởng của hiện tượng nhiễu [5]. Điểm khác biệt trong nghiên cứu này so với các nghiên cứu trước đó là trong thuật toán tính năng lượng biến

Bảng 3. Khả năng chẩn đoán vị trí hư hỏng khi sử dụng các dạng dao động khác nhau

Dạng dao động	Biểu đồ chỉ số hư hỏng	Phần tử hư hỏng chẩn đoán từ biểu đồ	Khả năng chẩn đoán phần tử 410
1		410	Có
2		410	Có
3		301, 302, 329, 330, 410	Có
4		11, 20, 41, 50	Không
5		315, 410	Có
1+2+3		410	Có
1+2+3+4+5		410	Có

dạng chỉ sử dụng duy nhất thành phần chuyển vị đứng của dạng dao động. Bài toán được khảo sát và đánh giá hiệu quả chẩn đoán của các dạng dao động sử dụng. Chỉ tiêu MSED1 được tính toán với các trường hợp sử dụng riêng từng dạng dao động, từ dạng dao động 1 đến dạng dao động 5, sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên và sử dụng kết hợp năm dạng dao động đầu tiên. Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng được thể hiện ở Bảng 3.

Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng của phần tử 410 trong kết cấu tám cho thấy: Dạng dao động 1 và dạng dao động 2 có khả năng chẩn đoán vị trí hư hỏng tốt nhất; dạng dao động 3 và dạng dao động 5 chẩn đoán được vị trí hư hỏng nhưng bị nhiễu; trong khi đó, dạng dao động 4 không chẩn đoán được vị trí hư hỏng. Như vậy, khả năng chuẩn đoán vị trí hư hỏng của các dạng dao động là không giống nhau, có dạng dao động chẩn đoán tốt, có dạng dao động chẩn đoán được vị trí hư hỏng nhưng có một số phần tử bị nhiễu; thậm chí có dạng dao động chẩn đoán sai vị trí hư hỏng. Tuy nhiên, việc sử dụng kết hợp ba hoặc năm dạng dao động đều chẩn đoán được tốt vị trí hư hỏng. Đây là một kết quả rất quan trọng, giúp thuật toán chẩn đoán ổn định, đáng tin cậy mà không phụ thuộc vào từng dạng dao động hoặc từng vị trí hư hỏng.

3.4. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng

Ở bước hai, thuật toán di truyền được sử dụng để xác định chính xác mức độ của hư hỏng. Trong thuật toán di truyền, cận của biến số được lấy dựa theo phạm vi của mức độ hư hỏng có thể xảy ra, được lấy như sau: $\alpha^s \in [0; 1]$. Số cá thể của quần thể được lấy bằng 200 cá thể. Số thế hệ (vòng lặp) tối thiểu để xét điều kiện dừng 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: (1) Số vòng lặp tối đa thuật toán sẽ dừng khi số vòng lặp đạt giá trị này, thông thường lấy bằng 100; (2) Giới hạn của độ thích nghi khi giá trị của độ thích nghi (hàm mục tiêu) đạt đến giá trị bé hơn hoặc bằng giá trị này thì xem như chấp nhận kết quả thuật toán và thuật toán dừng. Trong nghiên cứu này, điều kiện dừng của thuật toán được chọn là giới hạn của độ thích nghi, với giá trị bằng 1,0E-4.

Để xem xét tính hiệu quả của của thuật toán chẩn đoán mức độ hư hỏng, khi điều kiện dừng thỏa mãn, hai giá trị sau được đề nghị đánh giá: (1) số vòng lặp đã thực hiện khi thuật toán kết thúc; (2) sai số chẩn đoán mức độ hư hỏng của phần tử khi thỏa mãn điều kiện dừng. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng và tính hiệu quả của phương pháp được liệt kê trong các Bảng 4 đến Bảng 9.

Bảng 4. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng khi sử dụng dạng dao động 1

Số vòng lặp	1	2	3
Độ giảm chiều dày (410)	0,084	0,084	0,100
Giá trị hàm mục tiêu	8,3E-04	8,3E-04	2,5E-05
Sai số chẩn đoán (%)	16,35	16,35	0,49

Bảng 5. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng khi sử dụng dạng dao động 2

Số vòng lặp	1
Độ giảm chiều dày (410)	0,099
Giá trị hàm mục tiêu	1,4E-05
Sai số chẩn đoán (%)	0,91

Bảng 6. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng khi sử dụng dạng dao động 3

Số vòng lặp	1	10	72
Độ giảm chiều dày (301)	0,286	0,073	0,073
Độ giảm chiều dày (302)	0,111	0,650	0,653
Độ giảm chiều dày (329)	0,220	0,167	0,171
Độ giảm chiều dày (330)	0,018	0,158	0,158
Độ giảm chiều dày (410)	0,187	0,424	0,425
Giá trị hàm mục tiêu	8,3E-04	8,3E-04	2,5E-05
Sai số chẩn đoán (%)	87,22	324,26	325,38

Bảng 7. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng khi sử dụng dạng dao động 5

Số vòng lặp	1	2	3
Độ giảm chiều dày (315)	0,181	0,213	0,211
Độ giảm chiều dày (410)	0,380	0,479	0,479
Giá trị hàm mục tiêu	7,8E-05	1,6E-05	3,8E-07
Sai số chẩn đoán (%)	279,90	378,72	378,70

Bảng 8. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng khi sử dụng dạng dao động 1+2+3

Số vòng lặp	1	3	5	6	7
Độ giảm chiều dày (410)	0,097	0,100	0,100	0,100	0,100
Giá trị hàm mục tiêu	8,8E-02	3,0E-03	2,8E-03	1,3E-04	1,4E-05
Sai số chẩn đoán (%)	2,99	0,10	0,09	0,00	0,00

Bảng 9. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng khi sử dụng dạng dao động 1+2+3+4+5

Số vòng lặp	1	3	5	7	8
Độ giảm chiều dày (410)	0,105	0,101	0,100	0,100	0,100
Giá trị hàm mục tiêu	7,0E-02	1,1E-02	2,7E-03	7,4E-04	2,0E-05
Sai số chẩn đoán (%)	4,88	0,80	0,19	0,05	0,00

Kết quả phân tích được thể hiện trong Bảng 4 đến Bảng 9 cho thấy: Dạng dao động 1 chẩn đoán chính xác mức độ hư hỏng của phần tử 410 chỉ sau ba lần lặp; Dạng dao động 2 chẩn đoán chính xác mức độ hư hỏng phần tử 410 chỉ sau một lần lặp; Dạng dao động 3 và dạng dao động 5 không chẩn đoán được mức độ hư hỏng dù giá trị hàm mục tiêu đã đạt. Như vậy, khi sử dụng các dạng dao động riêng lẻ, một số dạng dao động có khả năng không chẩn đoán được mức độ hư hỏng. Trong khi đó, khi sử dụng các dạng dao động kết hợp, thuật toán cho kết quả chẩn đoán chính xác sau sáu vòng lặp khi sử dụng ba dạng dao động đầu tiên và sau tám vòng lặp khi sử dụng năm dạng dao động đầu tiên.

Kết quả khảo sát sự hội tụ của thuật toán theo mức độ hư hỏng của phần tử được thể hiện trong Bảng 10. Thuật toán sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên và ngưỡng hư hỏng là 50%. Như vậy, thuật toán đề xuất có thể chẩn đoán được hư hỏng với các mức độ khác nhau. Với mức độ hư hỏng

nhỏ đến 3%, thuật toán vẫn cho kết quả chẩn đoán rất chính xác sau 12 vòng lặp. Khi mức độ hư hỏng nhỏ đến 1% thì thuật toán không chẩn đoán được chính xác sau 30 vòng lặp. Tuy nhiên, trong thực tế, các hư hỏng nhỏ hơn 1% thì xem như không có ảnh hưởng đến sự làm việc đến kết cấu nên có thể bỏ qua.

Bảng 10. Kết quả chẩn đoán với các mức độ hư hỏng khác nhau

Mức độ hư hỏng khảo sát	50%	10%	5%	3%	1%
Mức độ hư hỏng chẩn đoán	50,0%	10,0%	5,0%	3,0%	2,8%
Sai số chẩn đoán (%)	0,00%	0,00%	0,03%	0,01%	182,00%
Giá trị hàm mục tiêu	7,3E-05	1,9E-05	9,3E-05	1,2E-05	9,7E-02
Số vòng lặp	25	13	13	12	30

4. Kết luận

Trong bài báo này, một quy trình chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền đã được phát triển thành công. Quy trình chẩn đoán bao gồm hai bước có khả năng chẩn đoán chính xác cả sự xuất hiện, vị trí và mức độ của hư hỏng trong kết cấu tấm. Việc chỉ sử dụng duy nhất thành phần chuyển vị đứng của dạng dao động vẫn cho kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng chính xác. Điều này có ý nghĩa rất quan trọng trong việc giảm các dữ liệu chuyển vị đo đạc tại nút trên kết cấu cần chẩn đoán. Đồng thời, điều đó cũng giúp phương pháp chẩn đoán đề xuất có tính khả thi cao trong thực tiễn áp dụng.

Mỗi dạng dao động có độ nhạy với một vị trí hư hỏng nhất định. Tuy nhiên, đối với bài toán chẩn đoán ngược, không biết trước vị trí hư hỏng, việc xây dựng một thuật toán tổng quát, sử dụng kết hợp các dạng dao động, là rất cần thiết. Việc sử dụng kết hợp một vài dạng dao động đầu tiên là đủ để chẩn đoán chính xác sự xuất hiện, vị trí của hư hỏng ở bước một của thuật toán và mức độ của hư hỏng ở bước hai của thuật toán chỉ sau một số ít vòng lặp.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Nha Trang cho đề tài “Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng và thuật toán di truyền”, mã số TR2020-13-11.

Tài liệu tham khảo

- [1] Fan, W., Qiao, P. (2011). [Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study](#). *Structural Health Monitoring*, 10(1):83–111.
- [2] Stubbs, N., Kim, J.-T., Farrar, C. R. (1995). Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm. *Proceedings-SPIE the international society for optical engineering*, SPIE International Society for Optical, 210–218.
- [3] Cornwell, P., Doebling, S. W., Farrar, C. R. (1999). [Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures](#). *Journal of Sound and Vibration*, 224(2):359–374.
- [4] Hu, H. W., Wu, C. B. (2008). [Nondestructive damage detection of two dimensional plate structures using modal strain energy method](#). *Journal of Mechanics*, 24(4):319–332.

- [5] Lê, T. C., Hồ, Đ. D. (2015). Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng. *Tạp chí Xây dựng*, 6:100–105.
- [6] Fu, Y. Z., Liu, J. K., Wei, Z. T., Lu, Z. R. (2016). [A two-step approach for damage identification in plates](#). *Journal of Vibration and Control*, 22(13):3018–3031.
- [7] Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T. (2019). [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*, 27(2):166–189.
- [8] 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.
- [9] Hung, D. V., Hung, H. M., Anh, P. H., Thang, N. T. (2020). [Structural damage detection using hybrid deep learning algorithm](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 14(2): 53–64.
- [10] Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D. (1998). [A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures](#). *Computers & Structures*, 69(5):547–556.
- [11] Chou, J.-H., Ghaboussi, J. (2001). [Genetic algorithm in structural damage detection](#). *Computers & Structures*, 79(14):1335–1353.
- [12] Kumar, K. A., Reddy, D. M. (2016). [Application of frequency response curvature method for damage detection in beam and plate like structures](#). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149(1):012160.