Đánh giá tình trạng hư hỏng của dầm T bê tông thông qua thuật toán tối ưu ngẫu nhiên kết hợp với dữ liệu đo dao động

■ **TS. HỒ VIỆT LONG; TS. HỒ VĨNH HẠ; TS. VŨ VĂN TOẢN; TS. HỒ XUÂN BA(*)**
Phân hiệu tại TP. Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: (*)bahx_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT: Hiện nay, việc xác định tình trạng hư hỏng của dầm chủ yếu dựa vào công tác quan trắc trực tiếp tại hiện trường. Quá trình này thường tốn nhiều thời gian và kinh phí, góp phần tạo nên khó khăn trong việc đánh giá tình trạng kết cấu. Kết quả thu được thường phụ thuộc vào tính chủ quan, kinh nghiệm của người đánh giá. Do đó, một giải pháp đánh giá có tính khách quan, đơn giản với độ chính xác cao là rất cần thiết để đưa ra quyết định về công tác duy tu, bảo dưỡng một cách chính xác và kịp thời. Bài báo giới thiệu một phương pháp tận dụng khả năng tìm kiếm toàn cục của các thuật toán tối ưu kết hợp với kết quả đo dao động để xác định tình trạng hư hỏng trong dầm T bê tông. Thông qua việc thu thập các thay đổi trong tần số dao động, thuật toán tối ưu sẽ xác định hư hỏng trong dầm T. Tính hiệu quả của giải pháp đề xuất được kiểm chứng bằng mô hình số của dầm T với các kịch bản hư hỏng khác nhau thông qua giả thiết suy giảm độ cứng. Thuật toán tối ưu được sử dụng trong nghiên cứu này là động vật săn mồi biển và loài linh trưởng. Kết quả thu được góp phần khẳng định tính khả thi của việc kết hợp thuật toán tối ưu và dữ liệu đo dao động trong việc xác định hư hỏng trong dầm.

TỪ KHÓA: Tần số, thuật toán tối ưu, ngẫu nhiên, MPA, AGTO.

ABSTRACT: Currently, the identification of damage conditions in beams relies mainly on visual monitoring on-site. This process is often time-consuming and costly, contributing to challenges in assessing the structural condition. Obtained results are susceptible to subjectivity and depend heavily on observers' experience. Consequently, there is a need for an objective, straightforward and highly accurate assessment method to facilitate precise and timely decision-making for maintenance and repair activities. This article introduces a method that takes advantage of the global search ability of optimization algorithms combined with vibration data to determine failure conditions in a concrete T-beam. By collecting changes in the frequency of the girder, the optimization algorithm determines damages in the T-girder. The efficiency of the proposed solution is verified through numerical models of the girder with different damage scenarios by means of stiffness reduction. The optimiation algorithms used in this current study are marine predators algorithm and artificial gorilla troops optimizer. The findings contribute to affirming the feasibility of integrating optimization algorithms and vibration measurement data in determining damages in a girder.

KEYWORDS: Frequency, optimization algorithm, stochastic, MPA, AGTO.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sau một thời gian đưa vào khai thác, dưới tác dụng của ngoại lực và thời tiết, hư hỏng trong kết cấu công trình, bao gồm công trình cầu là không thể tránh khỏi. Sự hiện diện của hư hỏng có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng làm việc, xuống cấp của công trình.

Hiện nay, việc phát hiện một số khuyết tật, hư hỏng trong kết cấu thường được thực hiện thông qua công tác kiểm tra bằng mắt thường. Tuy nhiên, sẽ rất khó phát hiện những hư hỏng nằm bên trong kết cấu, không nhìn thấy được hoặc không tiếp cận được [1]. Công tác kiểm tra này cũng đòi hỏi nhiều thời gian, nỗ lực và kinh nghiệm của người khảo sát. Do đó, cần phải có một giải pháp đơn giản, chính xác và tin cậy hơn trong việc cảnh báo hư hỏng trong kết cấu. Việc sớm phát hiện hư hỏng sẽ duy trì được khả năng làm việc của công trình thông qua việc đưa ra những quyết định đúng đắn, kịp thời về công tác duy tu bảo dưỡng công trình.

Một trong những phương pháp chẩn đoán hư hỏng không phá hủy đó là phương pháp chẩn đoán dựa trên đặc trưng động như tần số dao động, hình thái dao động của kết cấu. Những đặc trưng này sẽ thay đổi khi có sự hiện diện của hư hỏng trong kết cấu. Nhờ đó, có thể đưa ra được kết luận về tình trạng của kết cấu dựa vào sự thay đổi đặc trưng động này. Ưu điểm của phương pháp này là đơn giản triển khai, kinh phí hợp lý và không cản trở giao thông trong quá

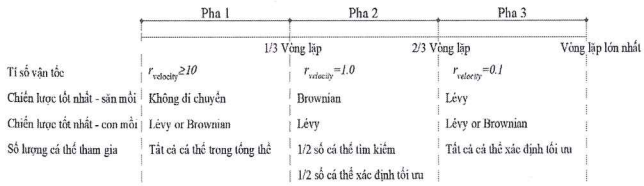
trình thu thập dữ liệu. Do đó, phương pháp này đã và đang trở thành một giải pháp tiềm năng, nhận được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu, quản lý trong việc chẩn đoán sức khỏe kết cấu.

Để phát huy tính vượt trội của phương pháp này, các nhà nghiên cứu đã kết hợp dữ liệu đo dao động với các thuật toán tối ưu, không chỉ phát hiện có hay không có hư hỏng, mà còn có thể xác định vị trí và mức độ hư hỏng tương ứng [2-3]. Trong đó, nhóm thuật toán tối ưu ngẫu nhiên thể hiện khả năng cao trong việc xác định giá trị tối ưu toàn cục thay vì mắc kẹt tại điểm tối ưu cục bộ. Vì vậy, hai thuật toán tối ưu ngẫu nhiên được khảo sát trong nghiên cứu này bao gồm thuật toán động vật săn mồi biển (MPA) [4], thuật toán loài linh trưởng (AGTO) [5]. Đây đều là những thuật toán mới, được chứng minh tính hiệu quả trong việc ứng dụng vào các bài toán kỹ thuật so với các thuật toán nổi tiếng như thuật toán bầy đàn, di truyền hay luyện kim. Tính khả thi của các thuật toán tiếp tục được đánh giá trong bài toán chẩn đoán sức khỏe công trình.

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

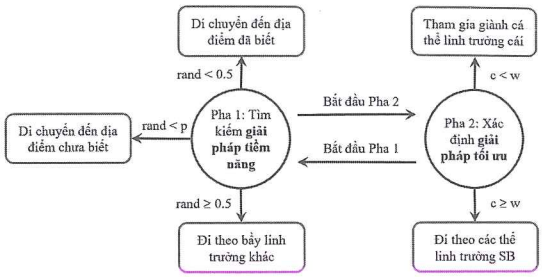
2.1. Thuật toán tối ưu

- Thuật toán động vật săn mồi biển (MPA): Dựa trên sự chuyển đổi linh hoạt giữa hai chiến lược di chuyển Brownian and Lévy. Sự chuyển đổi này nhằm tối ưu chiến lược tìm kiếm thức ăn tối ưu cho động vật săn mồi. Quá trình tối ưu này gồm 3 pha *(Hình 2.1)*. Pha 1: Chiếm 1/3 tổng số vòng lặp, toàn bộ cá thể trong tập tổng thể tham gia vào quá trình tìm kiếm giải pháp tiềm năng. Pha 2: Chiếm 1/3 tổng số vòng lặp, một nửa số cá thể sẽ tham gia tìm kiếm giải pháp tiềm năng, một nửa số cá thể còn lại tham gia xác định giải pháp tối ưu. Trong pha cuối, 1/3 tổng số vòng lặp sẽ được sử dụng để xác định giải pháp tối ưu.



Hình 2.1: Quá trình tối ưu trong MPA

- Thuật toán loài linh trưởng (AGTO) được truyền cảm hứng từ cuộc sống của loài linh trưởng. Một cá thể linh trưởng đực trưởng thành (SB) chịu trách nhiệm dẫn dắt đàn của nó tìm kiếm thức ăn, ra quyết định cho đàn di chuyển và đảm bảo tính an toàn của bầy. Thuật toán AGTO gồm 2 pha, tìm kiếm giải pháp tiềm năng và xác định giải pháp tối ưu, được diễn giải thông qua một cơ chế toán học *(Hình 2.2)*. Cá thể linh trưởng đực này đại diện cho giải pháp tối ưu. Trong thuật toán AGTO, 5 toán tử giúp vận hành quá trình tối ưu. 3 toán tử phục vụ cho quá trình tìm kiếm pháp tiềm năng và 2 toán tử sử dụng trong việc xác định giải pháp tối ưu, nhằm mục đích đảm bảo sự cân bằng giữa quá trình tìm kiếm giải pháp tiềm năng và xác định giải pháp tối ưu.



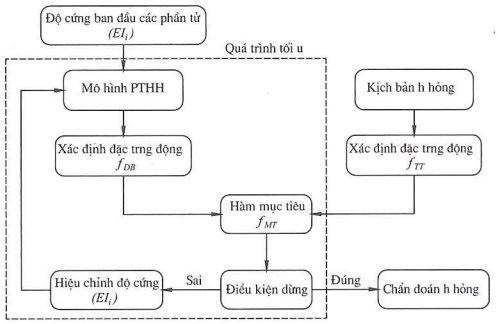
Hình 2.2: Quá trình tối ưu trong AGTO

2.2. Phương pháp xác định tình trạng hư hỏng dựa trên dao động và thuật toán tối ưu

Ý tưởng chính của cách tiếp cận này là giải bài toán cập nhật mô hình, tận dụng khả năng tối ưu toàn cục của các thuật toán MPA, AGTO. Hàm mục tiêu f_{MT} dựa trên tần số dao động, được xác định theo công thức sau:

$$f_{MT} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(f_{DB}^{i} - f_{TT}^{i}\right)^{2}}{N}} \quad (1)$$

Trong đó: N - Số tần số dao động được sử dụng; f^{i}_{BD}, f^{i}_{TT} - Tần số dao động dự báo và thực tế của mốt dao động thứ *i*.



Hình 2.3: Chẩn đoán hư hỏng bằng phương pháp đề xuất

Hình 2.3 giới thiệu trình tự của việc chẩn đoán hư hỏng của phương pháp đề xuất. Theo đó, hàm mục tiêu f_{MT} giữa trạng thái hư hỏng thực tế và trạng dự báo được thiết lập theo công thức (1). Trong nghiên cứu này, hư hỏng của dầm được giả thiết thông qua việc suy giảm độ cứng (*EI*). Thuật toán tối ưu có nhiệm vụ xác định giá trị nhỏ nhất của hàm mục tiêu bằng việc thay đổi giá trị biến khảo sát (ở đây là độ cứng *EI*) trong một phạm vi định sẵn. Thông thường, mức độ giảm độ cứng khảo sát trong phạm vi từ 0 - 100%. Với 0% tương đương kết cấu không bị hư hỏng và 100% tương ứng với kết cấu bị hư hỏng hoàn toàn. Khi chưa thỏa mãn điều kiện dừng lặp, các giá trị mới của biến khảo sát sẽ tiếp tục được đưa vào mô hình số để tính toán lại giá trị của các đặc trưng động.

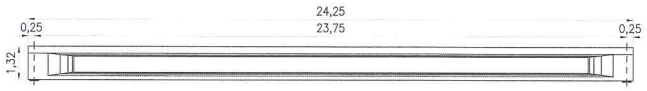
Khi $f_{MT} \rightarrow 0$, nghĩa là $f^{i}_{BD} \rightarrow f^{i}_{TT}$, hư hỏng dự báo sẽ tiến dần hư hỏng thực tế. Nói cách khác, với đặc trưng động đo đạc được ở một trạng thái bất kỳ (đã hư hỏng nhưng chưa biết vị trí hư hỏng, mức độ hư hỏng), thuật toán tối ưu sẽ xác định 1 tổ hợp các giá trị độ cứng EI_i nhằm thu được một mô hình số có đặc trưng động gần nhất với đặc trưng động đã đo đạc. Từ đó, đưa ra chẩn đoán về hư hỏng trong kết cấu.

3. CHẨN ĐOÁN TÌNH TRẠNG HƯ HỎNG

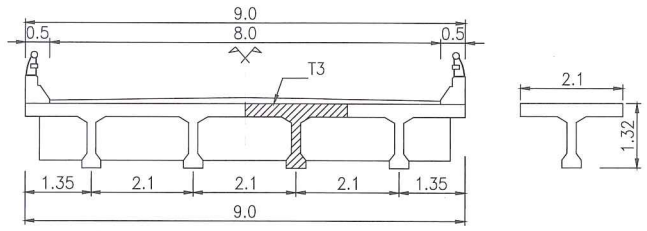
3.1. Mô tả kết cấu dầm T

Dầm T sử dụng trong nghiên cứu này được dựa trên hồ

sơ tăng cường sửa chữa cầu Đoan Hùng [6]. Kích thước của dầm được giới thiệu trong *Hình 3.1* và *Hình 3.2* (đơn vị m).

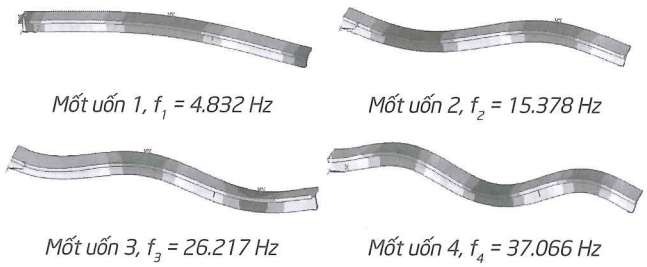


Hình 3.1: Kích thước dầm T



Hình 3.2: Mặt cắt ngang cầu và dầm T

Dầm được mô hình bằng phần tử khối, solid185, trong phần mềm ANSYS 17 [7]. Đặc trưng vật liệu sử dụng trong mô hình: Mô-đun đàn hồi $E_c = 3.6054\times10^4$ MPa, khối lượng riêng $\gamma_c = 2.600$ kg/m^3, hệ số poát xông $v_c = 0,2$.



Mốt uốn 1, $f_1 = 4.832$ Hz *Mốt uốn 2, $f_2 = 15.378$ Hz*

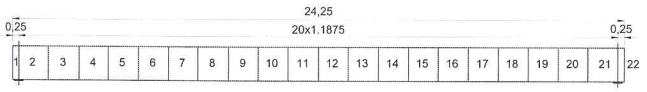
Mốt uốn 3, $f_3 = 26.217$ Hz *Mốt uốn 4, $f_4 = 37.066$ Hz*

Hình 3.3: Bốn mốt uốn thẳng đứng của dầm nguyên

Sử dụng phương pháp Block Lanczos phân tích ứng xử động của dầm T. Mười mốt dao động uốn theo phương thẳng đứng được dùng để chẩn đoán hư hỏng của dầm. *Hình 3.3* thể hiện một số mốt dao động của dầm.

3.2. Kịch bản hư hỏng trong dầm T

Dầm T được giả thiết chia thành 22 đoạn khác nhau *(Hình 3.4)*. Như đã đề cập, hư hỏng trong dầm được mô phỏng thông qua việc suy giảm độ cứng. Ngoài ra, giả thiết các đoạn dầm hư hỏng nằm trong khoảng từ 1 đến 11 để giảm thời gian tính toán với hai kịch bản hư hỏng được giới thiệu trong *Bảng 3.1*.



Hình 3.4: Phân chia đoạn dầm trong dầm T

Với mỗi kịch bản hư hỏng xác định được một tập các giá trị tần số dao động gọi là f^i_{TT}, đây được coi là giá trị tham chiếu, từ đó, quá trình tối ưu tìm ra 1 tập các giá trị tần số f^i_{BD} có sai số ít nhất so với f^i_{TT} để trả lời câu hỏi về vị trí và mức độ hư hỏng trong dầm.

Bảng 3.1. Kịch bản hư hỏng trong dầm T

Kịch bản	Ví trí	Mức độ hư hỏng	Vị trí	Mức độ hư hỏng
CS1	3	15%		
CS2	6	10%	9	20%

3.3. Đánh giá tình trạng hư hỏng

Các tham số của bài toán sử dụng trong nghiên cứu được giới thiệu trong *Bảng 3.2*. Kịch bản hư hỏng CS1 gồm 1 hư hỏng tại đoạn dầm 3 với độ cứng giảm 15%. Để so sánh tính hiệu quả, cả thuật toán MPA và AGTO đều dùng số cá thể 50 và số vòng lặp 50.

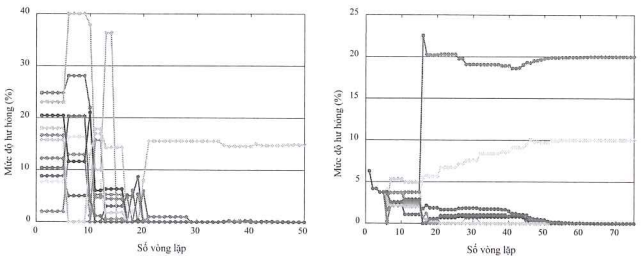
Bảng 3.2. Thông số đầu vào

Kịch bản	Số biến(*)	Mức độ hư hỏng khảo sát (**)	Số cá thể (***)		Số vòng lặp
			MPA	AGTO	
CS1	11	0% - 40%	50		50
CS2	11	0% - 40%	30	100	75

Ghi chú:

- (*) Số đoạn dầm giả thiết bị hư hỏng bằng việc giảm độ cứng;
- (**) Trong nghiên cứu này, giả thiết mỗi đoạn dầm hư hỏng trong khoảng (0 - 40)%;
- (***) Số giải pháp tiềm năng trong mỗi vòng lặp.

Trong vòng lặp đầu tiên, mỗi thuật toán có 50 cá thể tương ứng với 50 giải pháp tiềm năng. Mỗi giải pháp tiềm năng chứa thông tin ngẫu nhiên về vị trí hư hỏng (từ 1 - 11) và mức độ hư hỏng (từ 0 - 40%). Tương ứng với mỗi giải pháp này sẽ xác định tập các giá trị tần số dự báo f^i_{BD}. Từ đó, tính được hàm mục tiêu f_{MT} theo công thức (1). Sau mỗi vòng lặp sẽ tìm ra được f_{MT} nhỏ nhất, tương ứng với 1 cá thể chứa thông tin hư hỏng trong dầm sát với kịch bản hư hỏng nhất. Vòng lặp thứ 2 sẽ sử dụng cá thể này để tạo ra ngẫu nhiên 50 giải pháp tiềm năng khác nhau. Quá trình tối ưu được lặp lại và kết thúc sau 50 vòng lặp.

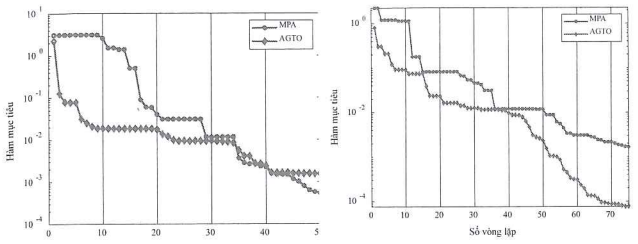


a) - CS1 - MPA *b) - CS2 - AGTO*

Hình 3.5: Sự tiến hóa của các biến khảo sát theo vòng lặp

Hình 3.5a cho thấy quá trình tối ưu được bắt đầu bằng các giá trị ngẫu nhiên về vị trí dầm và mức độ hư hỏng, sau đó tiến hóa dần về vị trí và mức hư hỏng giả thiết trong *Bảng 3.1*. Đoạn dầm không hư hỏng có mức độ hư hỏng tiến dần về 0%. Có thể thấy, chỉ có 1 biến tiệm cận giá trị 15%, đa phần các biến còn lại đã hội tụ về 0%. Kết quả này phù hợp với kịch bản CS1.

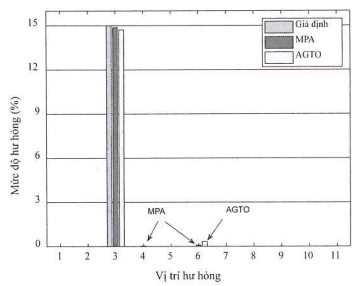
Với sự thay đổi của các biến khảo sát, giá trị của f_{MT} trong *Hình 3.6a* có xu hướng giảm dần, lần lượt là $1,55\times10^{-3}$ và $5,41\times10^{-4}$ với AGTO và MPA tại vòng lặp cuối cùng. Trong nghiên cứu này, MPA thể hiện khả năng tối ưu tốt hơn so với AGTO với cùng 1 điều kiện đầu vào. Điều này lý giải vì sao MPA có thể dự bảo vị trí và mức độ hư hỏng sát với kịch bản hư hỏng CS1 hơn so với AGTO *(Hình 3.7a)*. MPA dự báo vị trí số 3 hư hỏng 14,87%, một số vị trí khác cũng được dự báo hư hỏng nhưng với mức suy độ giảm độ cứng dưới 0,09%. AGTO dự báo đoạn dầm số 3 hư hỏng 14,72% và đoạn dầm số 6 hư hỏng 0,34%. Tuy nhiên, thời gian phân tích giá trị tối ưu của MPA lại gấp đôi so với AGTO, 9,6h so với 4,2h.



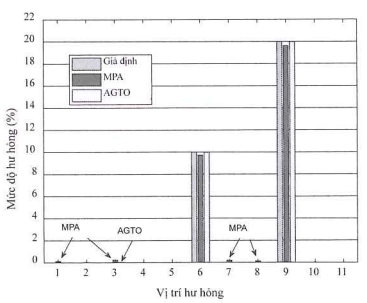
a) - CS1 b) - CS2

Hình 3.6: Đường cong hội tụ của hàm mục tiêu với các kịch bản hư hỏng

Trong kịch bản hư hỏng CS2, tính hiệu quả của MPA được khảo sát với số lượng cá thể ít hơn (30 cá thể) nhằm giảm thời gian phân tích, đồng thời trả lời câu hỏi liệu AGTO có thể cải thiện khả năng tối ưu khi số lượng cá thể tăng lên (100 cá thể - *Bảng 3.2*). Sự thay đổi của các biến khảo sát sử dụng AGTO được thể hiện trong *Hình 3.5b*. Tương tự, các biến khảo sát cũng được bắt đầu từ các giá trị ngẫu nhiên và tiến hóa dần đến giá trị giả định. Sau 75 vòng lặp, 2 biến tương ứng với 2 vị trí hư hỏng đã tiến gần đến mức độ hư hỏng 10% và 20%, các biến khác tiệm cận giá trị 0. Với số lượng cá thể nhiều hơn, AGTO đã cải thiện được khả năng tìm kiếm giá trị tối ưu của mình. Ngược lại, MPA có sự suy giảm nhất định về khả năng tìm kiếm giá trị tối ưu khi giảm số lượng cá thể. Theo *Hình 3.6b*, ở vòng lặp cuối cùng, giá trị của f_{MT} lần lượt với MPA và AGTO là $1{,}68\times10^{-3}$ và $7{,}65\times10^{-5}$. Do đó, trong kịch bản hư hỏng này, AGTO thể hiện khả năng dự báo chính xác hơn với 2 hư hỏng tại vị trí 6 và 9 là 9,98% và 19,98% so với 9,73% và 19,62% khi sử dụng MPA. Ngoài ra, do hạn chế về số lượng cá thể, MPA cũng đưa ra cảnh báo tại một số vị trí khác nhưng với mức hư hỏng không đáng kể, dưới 0,1%. Với sự thay đổi số lượng cá thể này, thời gian phân tích của MPA là 8h và AGTO là 12h.



a) - CS1



b) - CS2

Hình 3.7: Kết quả chẩn đoán hư hỏng trong dầm T

Nhìn chung, cả hai thuật toán tối ưu để thể hiện khả năng xác định được chính xác vị trí hư hỏng với mức độ hư hỏng dự báo xấp xỉ với các kịch bản hư hỏng giả định ban đầu. Điều này cho thấy tiềm năng của việc ứng dụng thuật toán tối ưu kết hợp với dữ liệu đo dao động trong việc đánh giá sức khỏe kết cấu.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu chi tiết trình tự xác định hư hỏng trong một dầm T với các kịch bản khác nhau dựa vào việc xử lý đặc trưng động từ công tác đo dao động tổng thể. Một số nét chính trong nghiên cứu như sau:

- Trong nghiên cứu này, với cùng tham số đầu vào MPA tỏ ra vượt trội hơn so với AGTO về dự báo vị trí và mức độ hư hỏng, tuy nhiên lại đòi hỏi thời gian phân tích gấp 2 lần so với AGTO.

- AGTO có thể cải thiện khả năng tìm kiếm tối ưu toàn cục khi tăng số lượng cá thể và số lượng vòng lặp. Tuy việc giảm số lượng cá thể có ảnh hưởng đến khả năng tối ưu của MPA nhưng kết quả chẩn đoán là chấp nhận được nếu cân nhắc về khía cạnh thời gian.

Ngày nay, với sự phát triển mạnh mẽ của các thuật toán tối ưu, kết quả này góp phần mở ra hướng ứng dụng tiềm năng trong việc đánh giá hư hỏng trong kết cấu.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học GTVT trong Đề tài mã số T2023-PHII-007TĐ.

Tài liệu tham khảo

[1]. Hồ Xuân Ba, Hồ Việt Long (12/2022), *Đánh giá nhanh trạng thái kỹ thuật của kết cấu trụ cầu đang khai thác từ kết quả đo dao động*, Tạp chí GTVT, tr.39-43.

[2]. L. Ngoc-Nguyen et al., *Damage assessment of suspension footbridge using vibration measurement data combined with a hybrid bee-genetic algorithm*, Scientific Reports.

[3]. L. Nguyen Ngoc et al. (May, 2023), *Performance evaluation of the artificial hummingbird algorithm in the problem of structural damage identification*, vol.74, no.4, pp.413-427.

[4]. A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili and A. H. Gandomi (Aug., 2020), *Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic*, Expert Systems with Applications, vol.152, p.113377.

[5]. B. Abdollahzadeh, F. Soleimanian Gharehchopogh and S. Mirjalili (Oct., 2021), *Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems*, Int J Intell Syst, vol.36, no.10, pp.5887-5958.

[6]. Báo cáo khảo sát công trình (2019), *Sửa chữa cầu Đoan Hùng km111+812, QL2, tỉnh Phú Thọ*.

[7]. ANSYS, Inc. *Southpointe*, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, Release 17.2.

Ngày nhận bài: 12/3/2024
Ngày nhận bài sửa: 27/3/2024
Ngày chấp nhận đăng: 16/4/2024