



THE POTENTIAL APPLICATION OF ARTIFICIAL RABBITS OPTIMIZATION ALGORITHM IN DIAGNOSING DAMAGES IN SUSPENSION FOOTBRIDGE

Nguyen Ngoc Lan¹, Nguyen Huu Quyet², Nguyen Thanh Toan^{1*}

¹University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

²DX Laboratory, The University of Transportation and Communications Limited Company, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 04/07/2023

Revised: 07/08/2023

Accepted: 16/08/2023

Published online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.6>

* *Corresponding author*

Email: nttoan@utc.edu.vn; Tel: +84912175955

Abstract. Detecting damage in transportation infrastructure structures is particularly important to ensure safety and structural integrity. Using optimal algorithms in structural health monitoring has shown promising results in recent years. Among them, the artificial rabbits optimization (ARO) algorithm is one of the newest optimal algorithms applied to many optimization problems, including structural health monitoring. This article introduces the potential of ARO in diagnosing damage to suspension footbridge. A finite element model of the bridge will be built, and scenarios of damage will be simulated. The results show that ARO is effective in identifying damage in structures and its performance is equivalent to other optimal algorithms such as the teaching-learning-based optimization algorithm (TLBO), the cuckoo search algorithm (CS), the genetic algorithm (GA), and the swarm optimization algorithm (PSO). Moreover, ARO demonstrates superiority in terms of accuracy and computation time.

Keywords: artificial rabbit optimization algorithm, diagnosing damages, suspension footbridge.

@ 2023 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG ÁP DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU THỎ NHÂN TẠO TRONG CHẨN ĐOÁN HƯ HỒNG CẦU TREO DÂY VÕNG DÂN SINH

Nguyễn Ngọc Lâm¹, Nguyễn Hữu Quyết², Nguyễn Thanh Toàn^{1*}

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Phòng Nghiên cứu DX, Công ty TNHH Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 04/07/2023

Ngày nhận bài sửa: 07/08/2023

Ngày chấp nhận đăng: 16/08/2023

Ngày xuất bản Online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.6>

* Tác giả liên hệ

Email: nttoan@utc.edu.vn; Tel: +84912175955

Tóm tắt. Công tác giám sát sức khỏe kết cấu các công trình giao thông nói chung và công trình cầu nói riêng đã và đang ngày một trở nên quan trọng trong công tác duy tu, bảo trì nhằm đảm bảo an toàn và tính toàn vẹn của kết cấu. Trong những năm gần đây, việc ứng dụng các thuật toán tối ưu trong công tác giám sát sức khỏe kết cấu đã cho thấy kết quả đáng khích lệ với độ chính xác và tính hiệu quả cao. Trong số đó, thuật toán tối ưu thỏ nhân tạo (ARO) là một trong những thuật toán tối ưu mới nhất đã được áp dụng hiệu quả cho nhiều lĩnh vực, tuy nhiên khả năng áp dụng của thuật toán này cho công tác giám sát sức khỏe kết cấu vẫn chưa được kiểm chứng. Bài báo này giới thiệu tiềm năng của thuật toán ARO trong công tác chẩn đoán hư hỏng của cầu treo dây võng dân sinh Na Xá (Nghệ An). Các kết quả cho thấy rằng thuật toán ARO hiệu quả trong việc xác định các hư hỏng trong kết cấu và hiệu suất của nó tương đương hoặc tốt hơn so với các thuật toán tối ưu khác như thuật toán tối ưu dạy-học (TLBO), thuật toán tìm kiếm chim cú-cu (CS), thuật toán di truyền (GA), thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO). ARO cũng cho thấy sự vượt trội hơn về thời gian tính toán, do vậy khả năng ứng dụng của thuật toán ARO cho công tác chẩn đoán hư hỏng của kết cấu công trình là hoàn toàn khả thi và có nhiều tiềm năng phát triển.

Từ khóa: thuật toán tối ưu hóa thỏ nhân tạo, chẩn đoán hư hỏng, cầu treo dân sinh.

@ 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các thuật toán tối ưu hóa siêu mô phỏng (metaheuristic) đã được chứng minh là một

phương pháp tiếp cận triển vọng để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa phức tạp trong nhiều lĩnh vực, bao gồm cả giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring - SHM). SHM là một công cụ được phát triển nhằm đảm bảo an toàn và tính toàn vẹn của các kết cấu bằng cách phát hiện và xác định các hư hỏng hoặc khuyết tật trong kết cấu [1-4]. Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống cho việc phát hiện và xác định tổn thương đòi hỏi thời gian tính toán đáng kể và không luôn đáng tin cậy. Bằng cách khám phá không gian giải pháp lớn và tìm kiếm các giải pháp tối ưu, các thuật toán tối ưu hóa có thể xác định sự xuất hiện, vị trí và mức độ nghiêm trọng của các hư hỏng trong các kết cấu với độ chính xác cao. Việc áp dụng các thuật toán này trong hệ thống giám sát sức khỏe kết cấu là một lĩnh vực nghiên cứu đang được quan tâm với những kết quả triển vọng và tiềm năng cho sự phát triển trong tương lai.

Một số các nghiên cứu tiêu biểu về việc ứng dụng thành công các thuật toán tối ưu hóa trong việc chẩn đoán hư hỏng có thể kể đến như: Hoa và cộng sự đã xây dựng mạng nơ ron nhân tạo và cải thiện các tham số huấn luyện trong thuật toán tìm kiếm chim cú cu áp dụng trong kết cấu cầu dầm [1]. Jung-Huai Chou đã thực hiện các phép đo về chuyển vị tại một bài bác tự do, sử dụng thuật toán tối ưu tiến hóa (Genetic Algorithm-GA) để xác định chuyển vị tại các bậc tự do chưa được đo còn lại và trả lời cho câu hỏi về sự tồn tại, vị trí và mức độ của hư hỏng trong kết cấu [6]. Wei đã cải tiến thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization-PSO) và áp dụng cho ba cấu trúc khác nhau, bao gồm dầm, giàn và tấm. Kết quả cho thấy phương pháp này hiệu quả và hiệu quả để xác định thiệt hại cấu trúc khi xem xét các nhiễu [7]. Nghiên cứu của Samir đã đề xuất kết hợp thuật toán tối ưu dạy-học (Teaching-Learning-Based Optimization-TLBO) với thuật toán PSO và mạng nơ ron nhân tạo (ANN) trong việc xác định các hư hỏng trong dầm thép. Phương pháp đã cho thấy các kết quả khả quan với các trường hợp giả định [8].

Ngày nay, với sự tiến bộ của khoa học công nghệ, các nhà khoa học đã nhận thấy rằng các thuật toán trước đó tồn tại một số nhược điểm về sự cấu tạo của các công thức cũng như yêu cầu về các tham số tính toán. Với mục tiêu đơn giản hóa các thuật toán, tiết kiệm thời gian tính toán cũng như lấy cảm hứng từ tự nhiên, thì thuật toán tối ưu thỏ nhân tạo (Artificial Rabbits Optimization - ARO) [5] đã được nghiên cứu đề xuất. Phương thức hoạt động của thuật toán cũng như mức độ hiệu quả khi được áp dụng trong công tác chẩn đoán hư hỏng kết cấu, cụ thể là câu treo dây võng sẽ được trình bày ở những nội dung tiếp theo của bài báo. Các kết quả này sẽ được đánh giá so sánh với các thuật toán tối ưu khác như: CS, TLBO, GA và PSO để xác định tính khả thi cũng như mức độ hiệu quả của thuật toán ARO.

2. THUẬT TOÁN TỐI ƯU THỎ NHÂN TẠO (ARO)

Trong tự nhiên, hầu hết các loài đều có những kỹ năng hoặc điều kiện sinh tồn khác nhau, điều này dẫn đến những điểm khác biệt giữa con mồi và động vật săn mồi. Tương tự như tất cả các loài sinh vật khác trong hệ sinh thái tự nhiên, thỏ cũng phải tiến hóa để sinh tồn, đặc biệt là về hành vi kiếm ăn và lẩn trốn động vật săn mồi. Trong tự nhiên, với tầm nhìn rộng và được quan sát từ các vị trí trên cao nên thỏ có thể dễ dàng xác định khu vực có dồi dào ăn. Với khả năng đào hang rất giỏi thì chiến lược để tránh được các loài săn mồi đầu tiên là chúng sẽ đào rất nhiều hang quanh khu vực tổ của chúng và chỉ chọn ngẫu nhiên một hang để trú ẩn, điều này tạo sự khó khăn cho các loài động vật săn mồi khi chọn được chính xác được hang mà thỏ đang ẩn nấp. Bên cạnh đó, thỏ có cơ thể gọn nhẹ với 2 chân trước ngắn và chân sau dài với cơ khỏe nên việc chạy thoát khỏi các loài săn mồi cũng sẽ nhanh hơn. Hơn nữa, khi đang chạy trốn thì thỏ cũng có thể đột ngột dừng lại hoặc chuyển hướng khác hay thậm chí là quay ngược lại để tạo sự bất ngờ cho các loài săn mồi.

Thuật toán tối ưu hóa tổ nhân tạo do Wang (2022) [9] đề xuất đã mô hình hóa hành vi của thỏ, bao gồm cả quá trình kiếm ăn và lẩn trốn khỏi những kẻ săn mồi nhằm phục vụ giải các bài toán tối ưu. Các hoạt động tìm kiếm được thể hiện thông qua hai hành vi chính như sau:

Hành vi 1 - Tìm kiếm thức ăn: Thỏ chỉ kiếm ăn (chủ yếu là cỏ, thân cây mềm và lá cây) ở những khu vực cách xa hang của chúng để tránh bị các loài săn mồi khác rình rập. Như vậy, mỗi cá thể thỏ sẽ tạo ra một hệ thống không gian thức ăn riêng, điều này gây ra những khó khăn nhất định cho những loài động vật săn mồi khác khi săn tìm thỏ. Mô hình toán học về đường đi kiếm ăn của thỏ được đề xuất như công thức (1) sau đây:

$$\vec{p}_i(t+1) = \vec{k}_j(t) + L.m.(\vec{k}_i(t) - \vec{k}_j(t)) + \text{round}(0,5 + (0,05 + r).a_1) \quad (1)$$

$$i, j = 1, \dots, n \text{ và } i \neq j$$

Với $\vec{p}_i(t+1)$, $\vec{k}_i(t)$ và $\vec{k}_j(t)$ lần lượt là vị trí của thỏ thứ i tại thời điểm $(t+1)$, (t) và của chú thỏ thứ j tại thời điểm (t) ; n là số lượng dân số của thỏ; L thể hiện quãng đường thỏ di chuyển với véc-tơ hướng di chuyển là m ; r là tham số ngẫu nhiên từ 0 đến 1 và giá trị phân phối chuẩn a_1 .

Hành vi 2 – Lựa chọn vị trí ẩn nấp ngẫu nhiên: Trong khu vực ẩn nấp, thỏ sẽ tạo ra hỏa mù đánh lừa các động vật săn mồi bằng cách đào một số hang khác tương tự xung quanh hang của chúng và lựa chọn ngẫu nhiên nơi ẩn nấp. Điều này giúp tăng thêm xác suất sống sót cho thỏ trước móng vuốt của những loài động vật săn mồi. Dựa trên đặc tính về khả năng lựa chọn vị trí ẩn nấp ngẫu nhiên này của loài thỏ, hành vi thứ hai được mô phỏng theo công thức (2):

$$\vec{b}_{i,j}(t) = \vec{k}_i(t) + H.g.\vec{k}_i(t), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

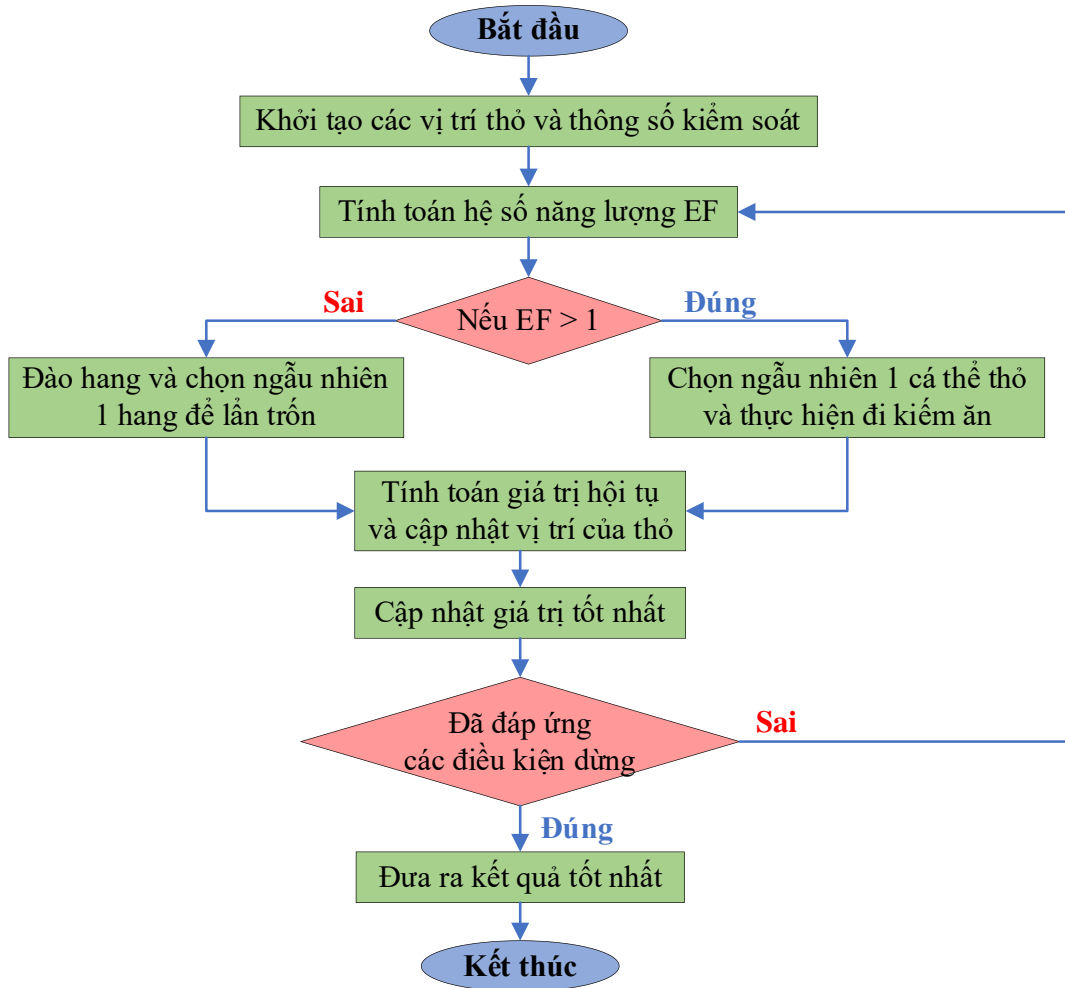
Trong đó: H là tham số che giấu, trong suốt quá trình lặp giảm tuyến tính từ 1 đến $1/T$ với một nhiễu loạn ngẫu nhiên; $\vec{b}_{i,j}(t)$ là một hang được chọn ngẫu nhiên để trốn tránh nguy hiểm và g là tham số ẩn cần tìm. Sau khi thỏ sống sót sau cả hai giai đoạn tìm kiếm thức ăn và ẩn nấp ngẫu nhiên khỏi nguy hiểm. Vị trí của con thỏ thứ i được tính toán theo công thức (3) là:

$$\vec{k}_i(t+1) = \begin{cases} \vec{k}_i(t) & f(\vec{k}_i(t)) \leq f(\vec{p}_i(t+1)) \\ \vec{p}_i(t+1) & f(\vec{k}_i(t)) > f(\vec{p}_i(t+1)) \end{cases} \quad (3)$$

Kiểm soát năng lượng: Trong chuỗi thức ăn, thỏ nằm ở vị trí thấp nên có nhiều loài săn mồi hơn. Việc thoát khỏi nguy hiểm sẽ ảnh hưởng tương đối lớn đến năng lượng của thỏ, vì thế việc kiểm soát năng lượng còn lại trong mỗi chú thỏ là việc cần thiết để sinh tồn tốt hơn. Việc kiểm soát năng lượng giúp cho thỏ lựa chọn một trong hai hành vi trên với hiệu quả tối ưu nhất. Một yếu tố quan trọng trong ARO là hệ số năng lượng (energy factor - EF).

$$EF(t) = 4 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \ln \frac{1}{r}; r \in [0: 1] \quad (4)$$

Tùy theo giá trị của EF mà thuật toán sẽ hoạt động theo hành vi 1 hoặc 2. Theo công thức (4) nếu $EF(t) > 1$ sẽ theo hướng khảo sát thăm dò, còn $EF(t) \leq 1$ sẽ lẩn trốn. Thuật toán cũng giống như việc thực hiện lặp đi lặp lại các hành trình, từ đó cân bằng các quy trình để đạt hiệu quả tốt nhất. Sơ đồ khối của thuật toán cũng được thể hiện trong hình Hình 1 :



Hình 1. Sơ đồ khối phương thức hoạt động của thuật toán ARO.

3. ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN ARO TRONG PHÁT HIỆN HƯ HỎNG KẾT CẤU CẦU TREO NA XÁ

3.1. Giới thiệu chung về cầu treo dân sinh Na Xá

Cầu treo dây võng dân sinh Na Xá nằm tại xã Châu Hoàn, huyện Quỳnh Châu, tỉnh Nghệ An. Cầu được khởi công xây dựng vào tháng 8/2008 và hoàn thành đưa vào sử dụng từ tháng 5/2009 với mục đích phục vụ chủ yếu cho nhu cầu đi lại của người dân địa phương với tải trọng chính là xe máy, xe thồ, gia súc và người đi bộ. Một số thông số kỹ thuật cơ bản trong Bảng 1:

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của cầu Na Xá.

Đặc điểm	Chi tiết	Đặc điểm	Chi tiết
Khổ cầu B	$1,5+2\times 0,08=1,66\text{m}$	Dầm ngang	thép hình I200
Quy trình thiết kế	22TCN 18-79	Dầm dọc	thép hình I150
Chiều dài toàn cầu	$L_c = 125,83\text{m}$	Hệ giằng gió	thép tròn D20
Chiều dài nhịp chính	$L_n = 78\text{m}$	Cáp chống lắc ngang	thép tròn D21,5
Cáp chủ	D56mm	Mố cầu	Bê tông cốt thép
Bản mặt cầu	Thép tấm	Tháp cầu	Các loại thép tổ hợp



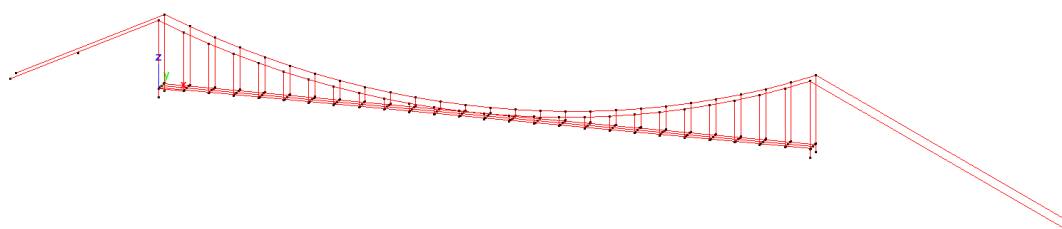
Hình 2. Cầu treo Na Xá – Nghệ An.



Hình 3. Tháp cầu.

3.2. Mô hình phần tử hữu hạn

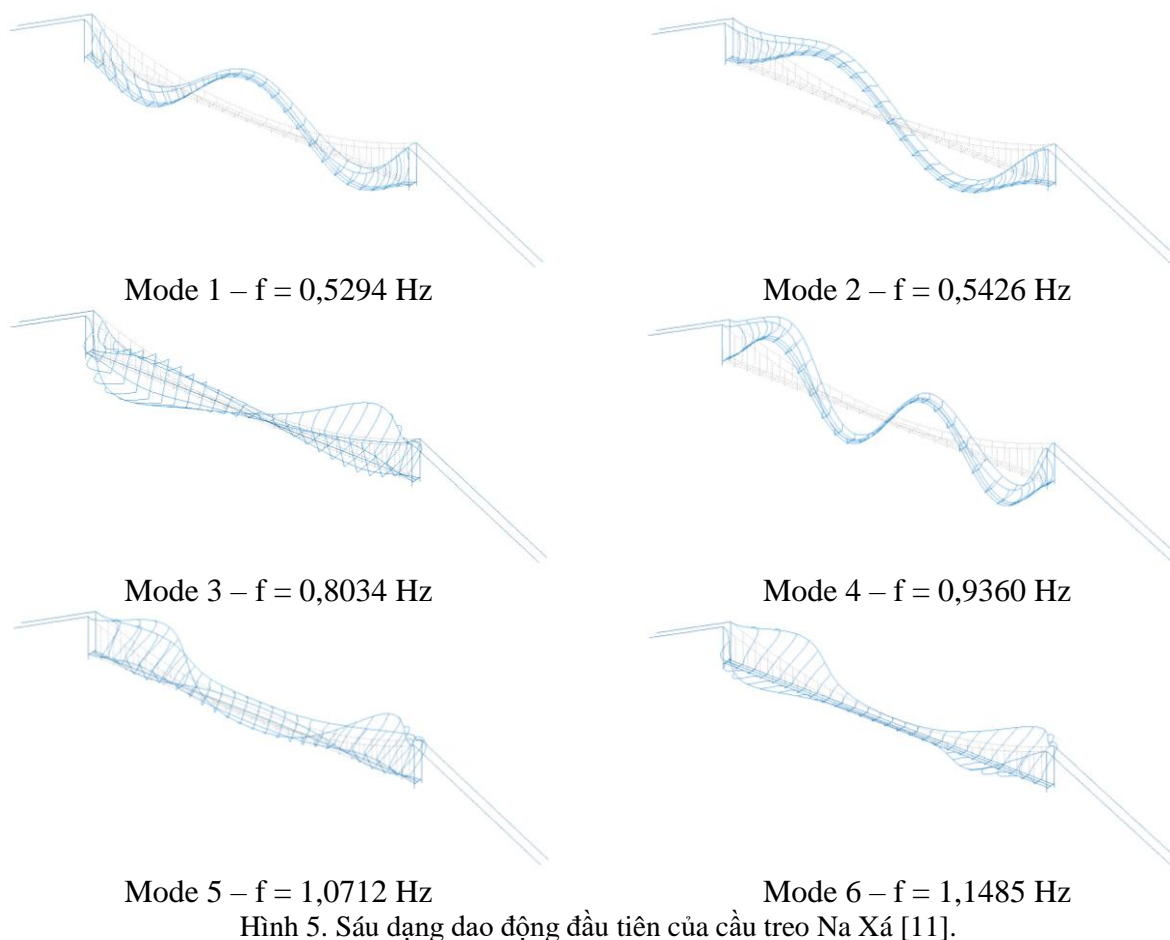
Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn của cầu treo dây võng dân sinh bằng bộ công cụ StaBIL [10] trên nền tảng chương trình Matlab. Các số liệu mô hình đã được cập nhật dựa trên kết quả đo dao động tổng thể của kết cấu bằng các cảm biến gia tốc có độ nhạy cao [11]. Một số thông tin về mô hình được liệt kê trong Bảng 2:



Hình 4. Mô hình cầu.

Bảng 2. Mô hình phần tử hữu hạn.

Đặc điểm về mô hình	Giá trị
Số nút (Đại diện cho các giao điểm)	198
Số phần tử (Đại diện cho các phần tử của kết cấu như dầm dọc, dầm ngang, cáp treo dây võng, thanh treo, tháp cầu.)	300
Mô-đun đàn hồi của thép (GPa)	$E = 210$
Hệ số Poát-xông	$\nu = 0,3$
Trọng lượng riêng (kg/m^3)	$p = 7850$



Hình 5. Sáu dạng dao động đầu tiên của cầu treo Na Xá [11].

3.3. Áp dụng thuật toán tối ưu thô nhân tạo

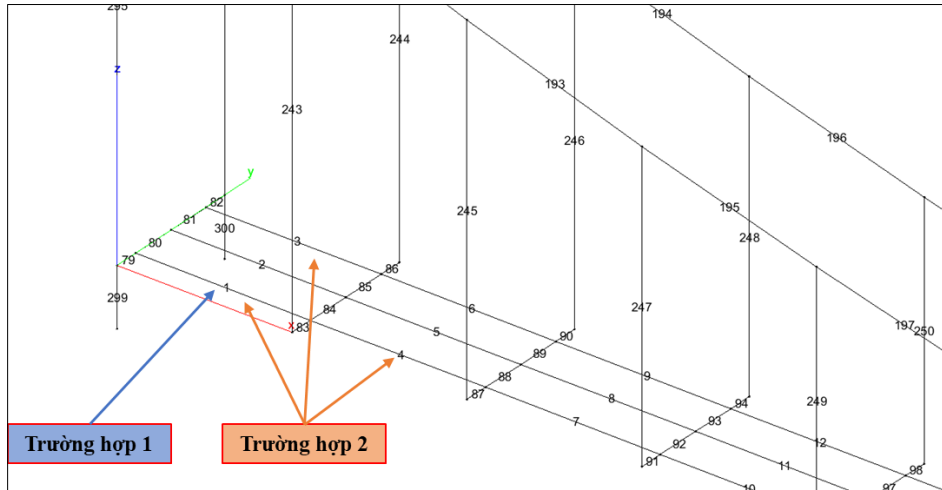
Nhằm đánh giá khả năng ứng dụng của thuật toán ARO trong việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu, các trường hợp hư hỏng đã được đưa vào mô hình phần tử hữu hạn cầu treo bằng cách thay đổi độ cứng của những phần tử hư hỏng giả định, tương đương với việc thay đổi các giá trị mô-đun đàn hồi của chúng. Hai trường hợp hư hỏng giả định được đề xuất như sau:

Trường hợp 1 (hư hỏng tại 1 vị trí): mô-đun đàn hồi của phần tử thứ nhất suy giảm 26%.

Trường hợp 2 (hư hỏng tại nhiều vị trí): mô-đun đàn hồi của phần tử phần tử thứ nhất, thứ ba và thứ tư suy giảm lần lượt là 31%, 26% và 13%. Tần số hư hỏng trong các trường hợp đã được tổng hợp trong Bảng 3:

Bảng 3. Tần số dao động riêng.

Dạng dao động	Tần số dao động (Hz)		
	Mô hình không hư hỏng	Trường hợp 1	Trường hợp 2
1	0,5294	0,5292	0,5288
2	0,5426	0,5425	0,5422
3	0,8034	0,8032	0,8031
4	0,9360	0,9357	0,9352
5	1,0712	1,0710	1,0706
6	1,1485	1,1485	1,1485

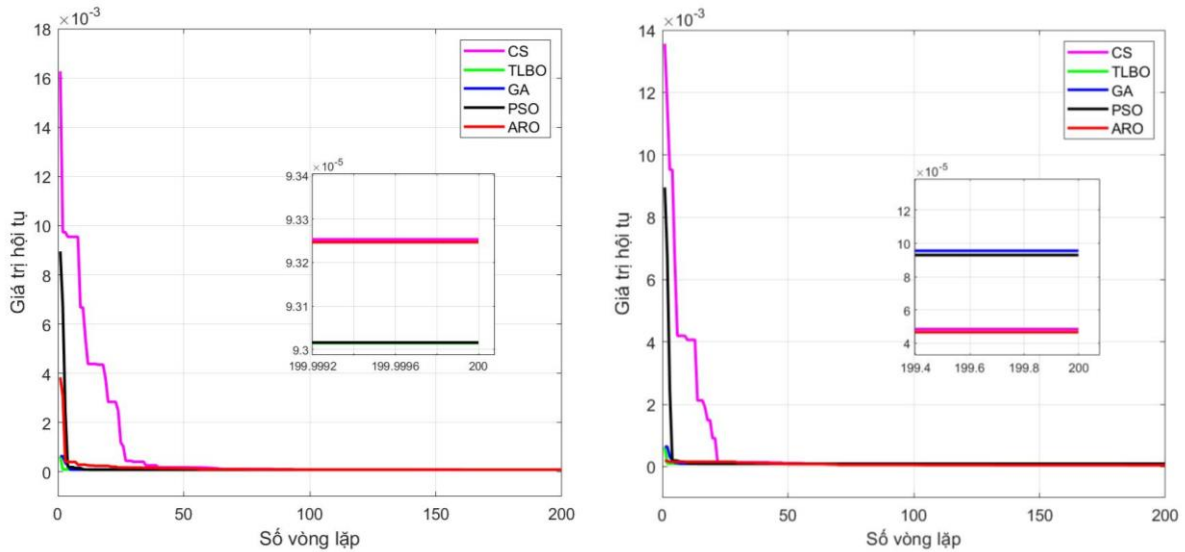


Hình 6. Vị trí phần tử hư hỏng giả định.

Hàm mục tiêu ưu của thuật toán được xác định dựa trên sự thay đổi của các tần số dao động tự nhiên của kết cấu. Tần số dao động là thông số có độ nhạy cao với những sự thay đổi về ứng xử động của kết cấu cũng như các hư hỏng xuất hiện trong kết cấu. Hàm mục tiêu đề xuất OF có dạng như sau:

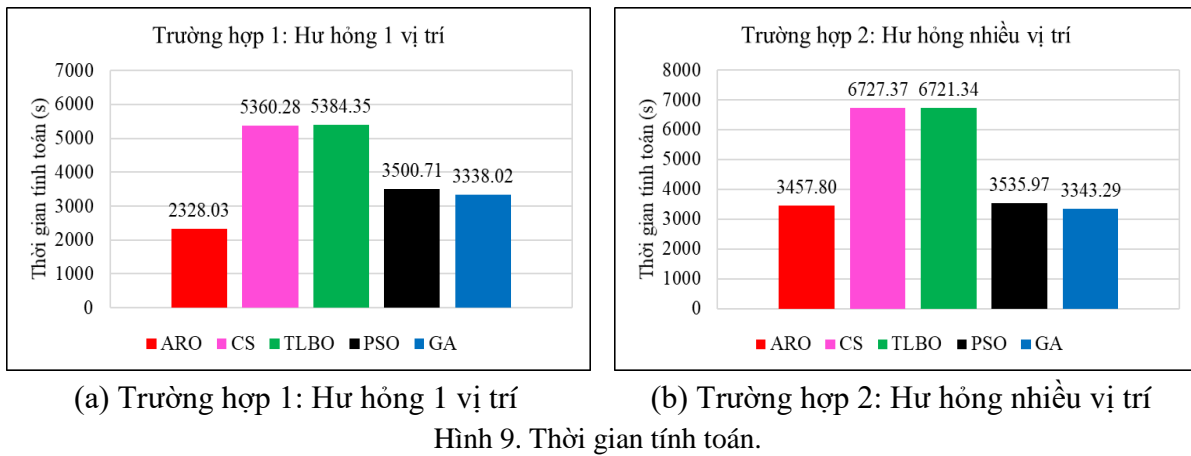
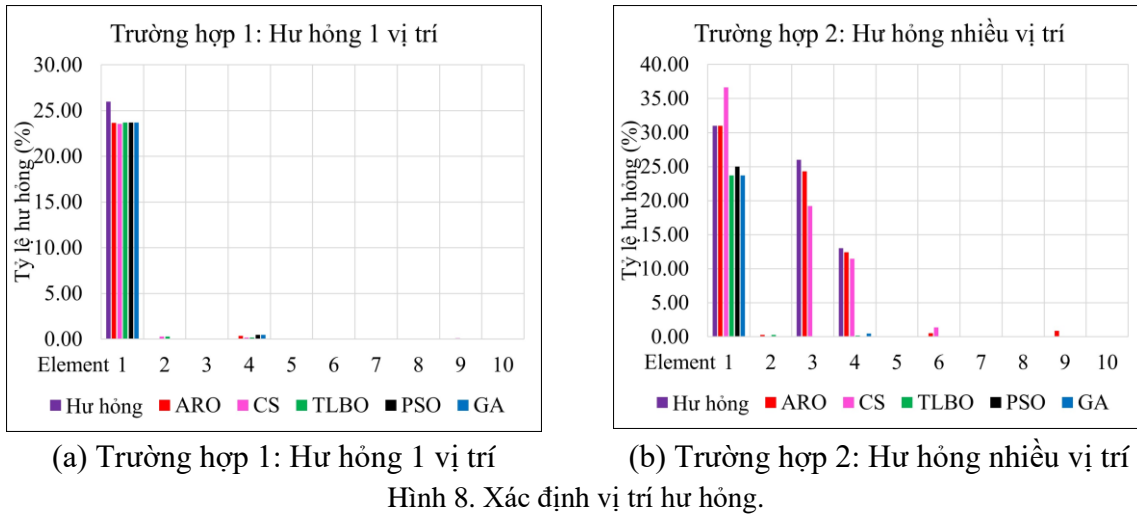
$$OF = \sum_{i=1}^{f=6} \frac{\omega_i^2}{\tilde{\omega}_i^2} = \sum_{i=1}^{f=6} (\omega_i - \tilde{\omega}_i)^2 / \tilde{\omega}_i^2 \quad (5)$$

Trong đó: $f = 6$ là số tần số dao động tự nhiên tương ứng của kết cấu, ω_i là tần số dao động tự nhiên được mô phỏng ban đầu và $\tilde{\omega}_i$ là tần số dao động tự nhiên tương ứng sau khi hư hỏng xuất hiện trong kết cấu. Ngoài ra, nhằm thể hiện mức độ hiệu quả về thời gian tính toán và độ chính xác của thuật toán ARO, một số thuật toán tối ưu hóa phổ biến như thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO), thuật toán di truyền (GA), thuật toán dạy-học (TLBO), thuật toán tìm kiếm chim cú-cu (CS) cũng được áp dụng so sánh. Các kết quả so sánh của những thuật toán đề xuất với các thông số tối ưu hóa giống nhau như số lượng không gian tìm kiếm là $nPop = 200$ và số vòng lặp là $nIter = 300$. Cấu hình máy tính được sử dụng trong quá trình tính toán là 12th Intel® Core™ i7-12700F 32GB RAM, NVIDIA GeForce 3060 RTX.



(a) Trường hợp 1: Hư hỏng 1 vị trí (b) Trường hợp 2: Hư hỏng nhiều vị trí

Hình 7. Biểu đồ hội tụ.



Trong trường hợp 1, kết cấu chỉ có 1 phần tử hư hỏng, tất cả các thuật toán đều có kết quả với độ chính xác tương đối cao về vị trí và mức độ tại vòng lặp thứ 100 và ổn định đến hết quá trình tính toán. Về thời gian tính toán, ARO vượt trội hơn tất cả các thuật toán còn lại khi chỉ mất khoảng 2300 giây trong các lần chạy.

Với trường hợp kết cấu có nhiều vị trí hư hỏng hơn, đây cũng là bài toán phức tạp có thể gặp nhiều sai số trong quá trình tính toán. Có thể thấy rõ trong Hình và Hình , cả 3 thuật toán TLBO, PSO và GA đều mắc tại các vị trí tối ưu cục bộ, việc xác định hư hỏng trong kết cấu chỉ tại phần tử đầu tiên và không thay đổi từ lần lặp thứ 20 đến hết lần lặp cuối cùng. Ngược lại theo Hình , thuật toán ARO có độ hội tụ là tốt nhất so với các thuật toán còn lại. Ngoài ra, ARO cũng đã xác định phần tử hư hỏng và mức độ suy giảm mô đun đàn hồi của các vị trí hư hỏng trong kết cấu rất chính xác. Thuật toán CS mặc dù cũng đã có độ hội tụ khá tốt và xác định chính xác được vị trí hư hỏng, tuy nhiên đã gặp nhiều sai số về mức độ. Thuật toán ARO cũng cho thấy khả năng ưu việt trong thời gian tính toán khi có thời gian tính toán nhanh nhất trong số các thuật toán được so sánh để phát hiện ra các hư hỏng trong kết cấu cầu treo dây võng (Hình 9).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất áp dụng thuật toán tối ưu tổ hợp nhân tạo ARO trong việc xác định hư hỏng của kết cấu. Với những ưu điểm như thời gian tính toán nhanh với độ hội tụ và chính xác tốt,

thuật toán ARO đã đáp ứng được yêu cầu về sự chính xác trong việc phát hiện đúng vị trí cũng như mức độ của những trường hợp hư hỏng giả định của một kết cấu cầu treo dây võng dân sinh điển hình tại Việt Nam. Bên cạnh đó, ARO còn cho thấy sự vượt trội khi so sánh hiệu năng và thời gian tính toán với các thuật toán phổ biến trước đó như CS, TLBO, GA và PSO.

Kết quả của bài báo là tiền đề cho những nghiên cứu chuyên sâu hơn trong thời gian tới về những ứng dụng cũng như cải tiến của các thuật toán tối ưu mới được áp dụng cho các kết cấu phổ biến hiện nay. Qua đó, có thể phát triển những tiến bộ về khoa học và công nghệ trong lĩnh vực giám sát sức khỏe kết cấu công trình.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2023-KDN-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. P. Guru, R. Dugalam, B. Mohamed, A. Sandhu, Recent advancement of concrete dam health monitoring technology: A systematic literature review, *Structures*, 44 (2022) 766-784. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.021>
- [2]. G. M. Roberto, R. Sánchez-García, J. A. Escobar-Sanchez, L.M. Arenas-García, M.A. Mendoza-Salas, O. N. Rosales-González, Monitoring two cable-stayed bridges during load tests with fiber optics, *Structures*, 33 (2021) 4344-4358. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.026>
- [3]. S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, D. W. Shevitz, Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review, 1996. <https://doi.org/10.2172/249299>
- [4]. L.Sun, Z. Shang, Y. Xia, S. Bhowmick, S. Nagarajaiah, Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection, *Journal of Structural Engineering*, 5 (2020) 04020073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002535)
- [5]. H. Tran-Ngoc, S. Khatir, G. De Roeck, T. Bui-Tien, M. Abdel Wahab, An efficient artificial neural network for damage detection in bridges and beam-like structures by improving training parameters using cuckoo search algorithm. *Engineering Structures*, 199 (2019) 109637. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109637>
- [6]. J.-H. Chou, J. Ghaboussi, Genetic algorithm in structural damage detection, *Computers & Structures*, 79 (2001) 1335–1353. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00027-X)
- [7]. Z. Wei, J. Liu, Z. Lu, Structural damage detection using improved particle swarm optimization. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 26 (2018) 792–810. <https://doi.org/10.1080/17415977.2017.1347168>
- [8]. S. Khatir, T. Khatir, D. Boutchicha, C. Le -Thanh, H. Tran-Ngoc, T.Q. Bui, R. Capozucca, M. Abdel Wahab, An efficient hybrid TLBO-PSO-ANN for fast damage identification in steel beam structures using IGA, *Smart Structures and Systems*, 25 (2020) 605–617. <https://doi.org/10.12989/SSS.2020.25.5.605>
- [9]. L. Wang, Q. Cao, Z. Zhang, S. Mirjalili, W. Zhao, Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114 (2022) 105082. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105082>

- [10].S. François, M. Schevenels, D. Dooms, M. Jansen, J. Wambacq, G. Lombaert, G. Degrande, G. De Roeck, StabIl, An educational Matlab toolbox for static and dynamic structural analysis, *Comput Appl Eng Educ*, 29 (2021) 1372–1389. <https://doi.org/10.1002/cae.22391>.
- [11].L. Ngoc-Nguyen, H. Tran-Ngoc, S. Khatir et al., Damage assessment of suspension footbridge using vibration measurement data combined with a hybrid bee-genetic algorithm, *Sci Rep*, 12 (2022) 20143. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24445-6>