

Phát triển phương pháp xác định tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cáp sử dụng đáp ứng trở kháng và mạng nơ-ron nhân tạo

Lưu Trần Hữu Tín, Hồ Đức Duy*

Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

Ngày nhận bài 17/8/2020; ngày chuyển phản biện 20/8/2020; ngày nhận phản biện 21/9/2020; ngày chấp nhận đăng 5/10/2020

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, một phương pháp xác định tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cáp của kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước sử dụng đáp ứng trở kháng kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo được phát triển. Trước tiên, cơ sở lý thuyết về đáp ứng trở kháng, phương pháp chẩn đoán sự xuất hiện và mức độ của tổn hao ứng suất trước được giới thiệu. Trong đó, sự xuất hiện của tổn hao ứng suất trước được xác định bằng chỉ số đánh giá MAPD (Mean Absolute Percentage Deviation). Sau đó, mức độ của tổn hao ứng suất trước được xác định bằng mạng nơ-ron nhân tạo. Tính khả thi của phương pháp kiến nghị được kiểm chứng thông qua mô phỏng số cho vùng neo cáp với nhiều mức độ tổn hao khác nhau. Độ tin cậy mô phỏng số của đáp ứng trở kháng được đánh giá bằng cách so sánh với kết quả thực nghiệm. Cuối cùng, sự xuất hiện và mức độ của tổn hao ứng suất trước được xác định chính xác bằng phương pháp kiến nghị. Các kết quả từ nghiên cứu cho thấy phương pháp kiến nghị đạt được hiệu quả cao trong việc xác định tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cáp.

Từ khóa: mạng nơ-ron nhân tạo, theo dõi và chẩn đoán kết cấu, tổn hao ứng suất trước, trở kháng, vùng neo cáp.

Chỉ số phân loại: 2.1

Giới thiệu

Trong thế kỷ vừa qua, lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring - SHM) ngày càng được quan tâm, chú trọng, nhằm sớm phát hiện các hư hỏng và kịp thời đưa ra các giải pháp xử lý, đảm bảo an toàn và tuổi thọ của các công trình xây dựng. Nhiều phương pháp chẩn đoán kết cấu đã được nghiên cứu và ứng dụng. Trong đó, phương pháp chẩn đoán sử dụng đáp ứng trở kháng cơ - điện là một phương pháp mới và có tính hiệu quả cao khi có thể phát hiện kịp thời những hư hỏng từ lúc mới hình thành mà không gây phá hủy kết cấu [1]. Phương pháp trở kháng lần đầu tiên được giới thiệu bởi Liang và cộng sự vào năm 1994 [2]. Sau đó, phương pháp này đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như cơ khí, hàng không, xây dựng và trên rất nhiều loại kết cấu khác nhau như: kết cấu dàn [3], kết cấu tấm mỏng [4], kết cấu thép [5], kết cấu bê tông [6], vùng neo của dầm bê tông ứng suất trước [7], kết cấu bê tông có gia cường FRP [8].

Hiện nay, cùng với sự bùng nổ của cuộc cách mạng công nghiệp 4.0, các thuật ngữ về trí tuệ nhân tạo đang dần trở nên phổ biến và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực của đời sống. Trong đó, mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Networks - ANNs) là một mô hình toán học được xây dựng dựa trên ý tưởng của mạng nơ-ron sinh học. Mạng ANNs

bao gồm nhóm các nơ-ron nhân tạo (nút) được nối với nhau và thông tin trong mạng được xử lý bằng cách truyền theo các kết nối và tính giá trị mới tại các nút. Thông qua quá trình học hỏi và huấn luyện, mạng ANNs có khả năng lưu giữ những kinh nghiệm, hiểu biết, tri thức và sử dụng những tri thức đó trong việc dự đoán các dữ liệu chưa biết [9]. Tại Việt Nam, việc ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong lĩnh vực xây dựng vẫn còn khiêm tốn. Mạng ANNs đã được ứng dụng trong một số nghiên cứu như phát hiện hư hỏng trong dầm giản đơn [10], dự đoán sức chịu tải tới hạn của cầu kiện thép chữ Y [11].

Trong lĩnh vực xây dựng, kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước được sử dụng rất phổ biến. Đối với loại kết cấu này, tổn hao ứng suất trước là một mục tiêu rất quan trọng cần được theo dõi và chẩn đoán nhằm đảm bảo độ an toàn cho kết cấu. Từ những nhu cầu thực tế đặt ra và kế thừa các nghiên cứu trước, mục tiêu chính của bài báo này là phát triển một phương pháp chẩn đoán tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cáp của kết cấu bê tông cốt thép ứng suất trước sử dụng đáp ứng trở kháng kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo. Đầu tiên, cơ sở lý thuyết về đáp ứng trở kháng và phương pháp chẩn đoán tổn hao ứng suất trước được trình bày. Tiếp theo, một mô phỏng số cho vùng neo cáp với nhiều mức độ tổn hao khác nhau được thực hiện bằng phần

* Tác giả liên hệ: Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

Development of prestress-loss identification method in the cable-anchorage system using impedance responses and artificial neural networks

Tran Huu Tin Luu, Duc Duy Ho*

Faculty of Civil Engineering,
Ho Chi Minh city University of Technology,
Vietnam National University Ho Chi Minh city

Received 17 August 2020; accepted 5 October 2020

Abstract:

In this paper, a method for identifying the loss of prestressing force (prestress-loss) in the cable-anchorage system of prestressed concrete structures using the impedance responses and artificial neural networks (ANNs) is developed. First, theories of impedance responses and damage detection methods for diagnosing the occurrence and the severity of prestress-loss are presented. In which, the occurrence of prestress-loss is determined by MAPD (Mean Absolute Percentage Deviation) index. Then, the severity of the prestress-loss is determined by ANNs. The feasibility of the developed method is verified by numerical simulations for a real cable-anchorage system with different levels of prestress-loss. The reliability of the numerical simulations for impedance responses is evaluated by comparison to experimental results. Finally, the occurrence and severity of the prestress-loss are exactly identified by the proposed method. The results of this study show that the proposed method is highly effective in determining the prestress-loss in the cable-anchorage system.

Keywords: artificial neural networks, cable-anchorage system, impedance response, prestress-loss, structural health monitoring.

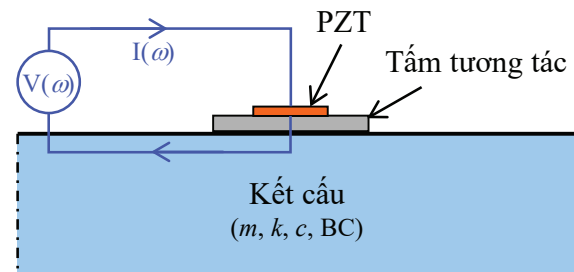
Classification number: 2.1

mềm ANSYS. Độ tin cậy của đáp ứng trở kháng mô phỏng được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm. Cuối cùng, sự xuất hiện và mức độ của tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cáp được chẩn đoán chính xác khi sử dụng phương pháp kiến nghị.

Đáp ứng trở kháng và phương pháp chẩn đoán tổn hao ứng suất trước

Đáp ứng trở kháng cơ - điện

Kết cấu cần chẩn đoán được miêu tả bằng các đặc trưng như là khối lượng (m), độ cứng (k), hệ số cản (c) và điều kiện biên (BC) tương ứng. Cảm biến PZT được làm từ vật liệu áp điện được miêu tả như một mạch điện điều hòa với hiệu điện thế và cường độ dòng điện. Trong một số nghiên cứu gần đây [1], tầm tương tác làm từ vật liệu nhôm được sử dụng nhằm làm tăng độ nhạy của đáp ứng trở kháng đo được từ PZT khi các đặc trưng của kết cấu thay đổi. Hình 1 thể hiện sự tương tác cơ - điện giữa cảm biến PZT, tấm tương tác và kết cấu.



Hình 1. Sự tương tác cơ - điện giữa cảm biến PZT, tấm tương tác và kết cấu.

Đáp ứng trở kháng cơ - điện của hệ là một hàm số kết hợp giữa trở kháng cơ của kết cấu $Z_s(\omega)$ và trở kháng điện của cảm biến PZT $Z_a(\omega)$ được diễn tả bằng công thức sau [1]:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \left(i\omega \frac{w_a l_a}{t_a} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{1}{Z_a(\omega)/Z_s(\omega)+1} d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E \right) \right)^{-1} \quad (1)$$

trong đó: $\bar{Y}_{11}^E = (1 + i\eta)Y_{11}^E$ là mô đun đàn hồi của PZT khi điện trường bằng 0; $\bar{\epsilon}_{33}^T = (1 - i\delta)\epsilon_{33}^T$ là hằng số điện dung của PZT khi ứng suất bằng 0; d_{31} là hằng số áp điện của PZT khi ứng suất bằng 0; w_a, l_a, t_a lần lượt là chiều rộng, chiều dài và chiều dày của cảm biến PZT; η và δ lần lượt là hệ số mất mát cản và hệ số mất mát điện môi của PZT.

Đáp ứng trở kháng cơ của kết cấu $Z_s(\omega)$ là một hàm số phụ thuộc vào các đặc trưng động lực học (như khối lượng, độ cứng, hệ số cản) và điều kiện biên. Do đó, bất kỳ sự thay đổi nào trong các đặc trưng động lực học và điều kiện biên (được xem là hư hỏng) đều có thể dẫn đến sự thay đổi trong đáp ứng trở kháng cơ - điện $Z(\omega)$; và ngược lại có thể sử dụng sự thay đổi của đáp ứng trở kháng cơ - điện để đánh giá hư hỏng trong kết cấu. Theo công thức (1), khi kết cấu

xuất hiện hư hỏng, đáp ứng trở kháng cơ $Z_c(\omega)$ của kết cấu sẽ thay đổi và làm thay đổi đáp ứng trở kháng cơ - điện $Z(\omega)$. Hư hỏng trong kết cấu được phát hiện khi có sự sai lệch của hai đáp ứng trở kháng ở hai khoảng thời điểm khảo sát khác nhau. Đối với hư hỏng của kết cấu, phần thực của đáp ứng trở kháng nhạy hơn so với phần ảo; cho nên, phần thực thường được sử dụng trong các phương pháp chẩn đoán hư hỏng [12].

Phương pháp chẩn đoán

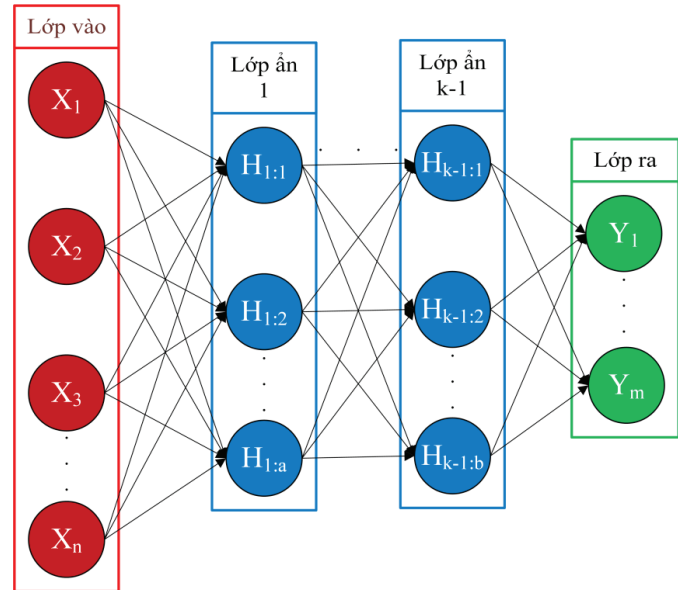
Sự hư hỏng của kết cấu được thể hiện bằng sự thay đổi của đáp ứng trở kháng. Sự thay đổi này được định lượng thông qua các chỉ số đánh giá. Trong nghiên cứu này, một phương pháp bao gồm hai bước để chẩn đoán sự xuất hiện và mức độ của tổn hao ứng suất trước được phát triển. Trong bước một, chỉ số MAPD (Mean Absolute Percentage Deviation) [13] được sử dụng để đánh giá sự thay đổi giữa hai trạng thái trước và sau khi xuất hiện tổn hao ứng suất trước:

$$MAPD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z^*(\omega_i) - Z(\omega_i)}{Z(\omega_i)} \right| \quad (2)$$

trong đó: $Z(\omega_i)$ và $Z^*(\omega_i)$ là đáp ứng trở kháng của hai trạng thái được khảo sát, trước và sau khi xuất hiện tổn hao ứng suất trước, tương ứng với tần số thứ i ; n là số điểm tần số trong miền khảo sát. Nếu giá trị MAPD lớn hơn 0 thì kết cấu có xuất hiện tổn hao và ngược lại nếu giá trị bằng 0 thì kết cấu không xuất hiện tổn hao.

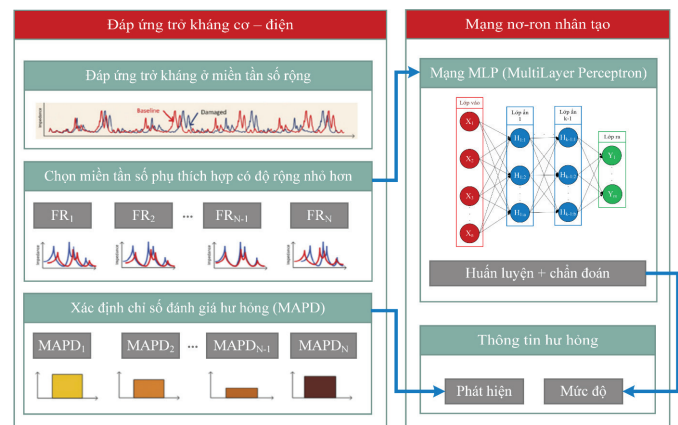
Từ kết quả của bước 1, sự xuất hiện của tổn hao ứng suất trước được xác định. Trong bước hai, mạng ANNs MLP (MultiLayer Perceptron) được triển khai để chẩn đoán mức độ của tổn hao ứng suất trước. Khi có tổn hao ứng suất trước xảy ra, đáp ứng trở kháng sẽ thay đổi không theo quy luật tuyến tính. Mục đích của mạng ANNs là tìm ra hàm phi tuyến có thể xấp xỉ quy luật thay đổi của đáp ứng trở kháng thông qua quá trình huấn luyện và điều chỉnh các trọng số liên kết. Một mạng MLP tổng quát (hình 2) là mạng có k lớp (không tính lớp vào), trong đó có $k-1$ lớp ẩn và một lớp ra (lớp thứ k). Mỗi nơ-ron liên kết với tất cả các nơ-ron ở lớp trước đó với các trọng số (W) riêng. Đầu ra của nơ-ron ở lớp trước là đầu vào của nơ-ron thuộc lớp liền sau đó [9]. Nguyên lý hoạt động của mạng ANNs MLP như sau: các nơ-ron ở lớp ẩn thứ nhất sẽ nhận dữ liệu từ lớp vào và xử lý bằng cách tính tổng trọng số, gửi tới hàm truyền rồi xuất kết quả ra (là kết quả của hàm truyền); kết quả này sẽ được truyền tới các nơ-ron thuộc lớp ẩn thứ hai (nếu có); các nơ-ron tại đây tiếp nhận như là dữ liệu đầu vào, xử lý và gửi kết quả đến lớp ẩn kế tiếp; quá trình tiếp tục cho đến khi các nơ-ron thuộc lớp ra cho kết quả. Quá trình học của ANNs MLP thực ra là quá trình điều chỉnh các trọng số của các dữ liệu đầu vào để có được kết quả đầu ra mong muốn. Về bản chất, nhiệm vụ của một nơ-ron trong mạng có thể hiểu là có một tập các giá trị đầu vào X sẽ ánh xạ ra một tập các giá trị Y thông qua hàm truyền f như sau:

$$Y = f \left(\sum_{i=1}^n W_i X_i + W_0 \right) \quad (3)$$



Hình 2. Mô hình mạng ANNs MLP.

Hình 3 thể hiện sơ đồ chẩn đoán tổn hao ứng suất trước sử dụng kết hợp đáp ứng trở kháng cơ - điện và mạng nơ-ron nhân tạo. Đầu tiên, theo dõi đáp ứng trở kháng trong miền tần số rộng, thông thường là 10~100 kHz. Tiếp theo, chọn miền tần số phụ thích hợp có độ rộng nhỏ hơn trong miền tần số rộng đã khảo sát; miền tần số phụ thích hợp là miền tần số có độ nhạy cao với tổn hao. Sau đó, chỉ số đánh giá MAPD được xác định trong miền tần số phụ để có thể phát hiện được sự xuất hiện của tổn hao. Cuối cùng, đáp ứng trở kháng trong miền tần số phụ của các trường hợp đã phát hiện tổn hao được dùng làm tập dữ liệu đầu vào cho việc chẩn đoán mức độ tổn hao trong mạng ANNs MLP.

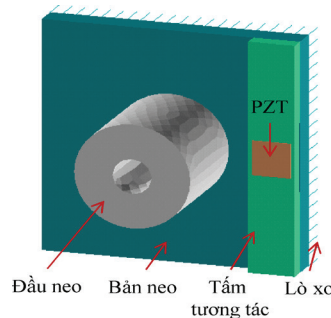
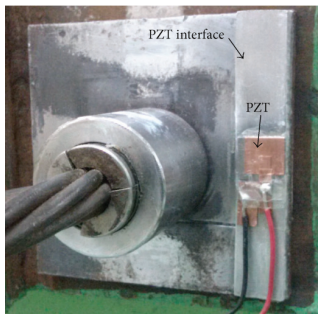


Hình 3. Sơ đồ chẩn đoán hư hỏng sử dụng kết hợp đáp ứng trở kháng cơ - điện và mạng nơ-ron nhân tạo.

Bài toán phân tích

Thiết lập bài toán

Một vùng neo cáp của dầm bê tông cốt thép ứng suất trước được chọn để mô phỏng trong nghiên cứu này. Chi tiết thực tế của vùng neo cáp được thể hiện trên hình 4 [7]. Trong đó, tấm tương tác bằng nhôm có kích thước 100×18×6 mm, bị khuyết lỗ 30×18×1 mm được đặt lên bản neo bằng thép có kích thước 100×100×10 mm. Đầu neo bằng thép có đường kính ngoài D=45 mm, đường kính trong d=15,2 mm. Cảm biến PZT-5A có kích thước 15×15×0,51 mm được dán lên trên tấm tương tác. Điện áp được kích thích điều hòa với hiệu điện thế 1 V. Đặc trưng của các vật liệu sử dụng trong mô phỏng được lấy theo tài liệu [14]. Các trường hợp tổn hao ứng suất trước khảo sát được liệt kê ở bảng 1. Trong đó, 4 trường hợp huấn luyện được lấy theo tài liệu [14]; và 4 trường hợp cần chẩn đoán được đặt ra trong nghiên cứu này.



Hình 4. Mô hình thực nghiệm vùng neo cáp [7]. **Hình 5.** Mô hình phần tử hữu hạn vùng neo cáp.

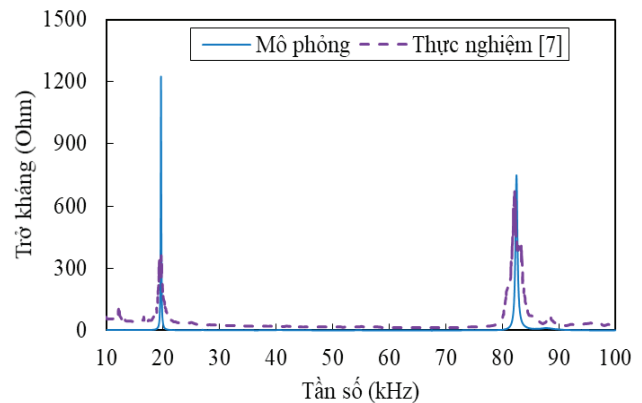
Bảng 1. Các trường hợp tổn hao ứng suất trước để huấn luyện và chẩn đoán.

Tập dữ liệu	Trường hợp tổn hao	Mức độ tổn hao (%)	Lực ứng suất trước (kN)	Độ cứng lò xo (N/m)
Huấn luyện	T0	0	49,05	120×10 ⁶
Huấn luyện	T1	20	39,20	105×10 ⁶
Huấn luyện	T2	40	29,40	90×10 ⁶
Huấn luyện	T3	60	19,60	75×10 ⁶
Chẩn đoán	T1'	5	46,60	116,3×10 ⁶
Chẩn đoán	T2'	30	34,34	97,5×10 ⁶
Chẩn đoán	T3'	55	22,07	78,8×10 ⁶
Chẩn đoán	T4'	70	14,72	67,5×10 ⁶

Theo cơ chế tiếp xúc, sự tương tác tại vị trí tiếp xúc có thể được đơn giản hóa bằng hệ số cản và độ cứng của lò xo. Mặt khác, sự biến đổi của hệ số cản và độ cứng lò xo có liên quan đến sự thay đổi của áp lực tiếp xúc [15]. Theo nghiên cứu [14], lực ứng suất trước được mô hình hóa thông qua độ cứng lò xo. Khi kết cấu bị hư hỏng, lực ứng suất trước giảm, đồng nghĩa với việc độ cứng lò xo bị giảm đi tương ứng. Vì vậy, đáp ứng trở kháng của kết cấu sẽ thay đổi theo độ cứng lò xo tại vị trí tiếp xúc. Trong mô hình, độ cứng lò xo tại vị trí tiếp xúc của vùng neo là một thông số chưa biết và không chắc

chắn. Trong nghiên cứu này, giá trị độ cứng lò xo được xác định bằng cách sử dụng phương pháp thử dần (trial and error), so sánh với đáp ứng trở kháng từ thực nghiệm cho trường hợp không tổn hao (T0) và tổn hao (T3). Từ đó, phương pháp nội suy và ngoại suy tuyến tính được sử dụng để xác định giá trị độ cứng lò xo cho các trường hợp còn lại [16].

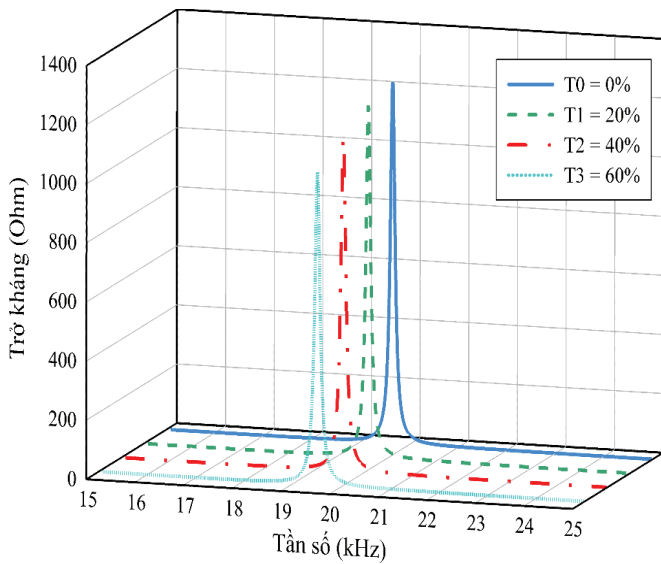
Trong nghiên cứu này, phần mềm ANSYS APDL có tính năng mô phỏng trở kháng cơ - điện, được sử dụng để thiết lập mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) cho vùng neo cáp. Hình 5 thể hiện mô hình PTHH của vùng neo cáp trong ANSYS. Bản neo, đầu neo và tấm tương tác được mô hình hóa bằng phần tử khối đặc có 8 nút SOLID45. Cảm biến PZT được mô hình hóa bằng phần tử cơ - điện có 8 nút SOLID5. Hệ lò xo được mô hình hóa bằng phần tử đàn hồi COMBIN14. Đáp ứng trở kháng từ mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm tương ứng trong [7] để minh chứng tính chính xác và tính khả thi của mô phỏng số. Hình 6 thể hiện kết quả so sánh đỉnh trở kháng giữa mô phỏng và thực nghiệm cho trường hợp T0. Kết quả so sánh cho 4 trường hợp huấn luyện được tổng hợp trong bảng 2. Kết quả này cho thấy sự chênh lệch nhỏ hơn 1%. Điều đó chứng tỏ, mô hình PTHH của vùng neo cáp có độ tin cậy rất cao và có thể được sử dụng để đại diện cho vùng neo cáp thực tế trong vấn đề chẩn đoán tổn hao ứng suất trước. Hình 7 và hình 8 cho thấy rằng đáp ứng trở kháng trong miền tần số 15~25 kHz nhạy hơn so với trong miền tần số 77~87 kHz khi có tổn hao xảy ra nên sẽ ưu tiên sử dụng miền tần số 15~25 kHz để chẩn đoán tổn hao.



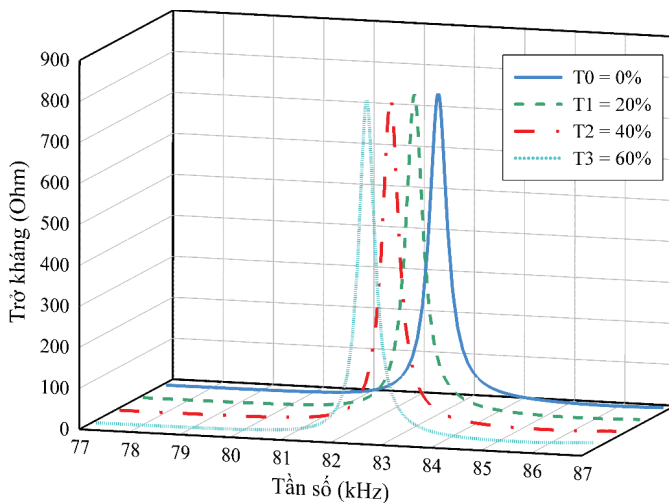
Hình 6. Đáp ứng trở kháng của trường hợp T0.

Bảng 2. So sánh đỉnh trở kháng giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Trường hợp tổn hao	Mức độ tổn hao (%)	Mô phỏng f ₁ (kHz)	Thực nghiệm f ₁ (kHz)	Δf ₁ (%)	Mô phỏng f ₂ (kHz)	Thực nghiệm f ₂ (kHz)	Δf ₂ (%)
T0	0	19,67	19,63	0,20	82,51	82,23	0,34
T1	20	19,63	19,63	0,00	82,50	82,15	0,43
T2	40	19,58	19,57	0,05	82,49	82,03	0,56
T3	60	19,52	19,53	0,05	82,48	-	-



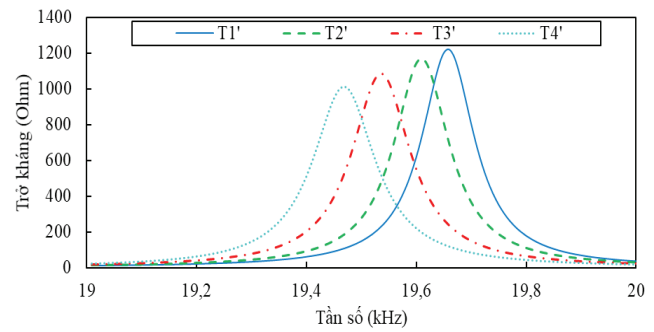
Hình 7. Đáp ứng trở kháng mô phỏng 15~25 kHz.



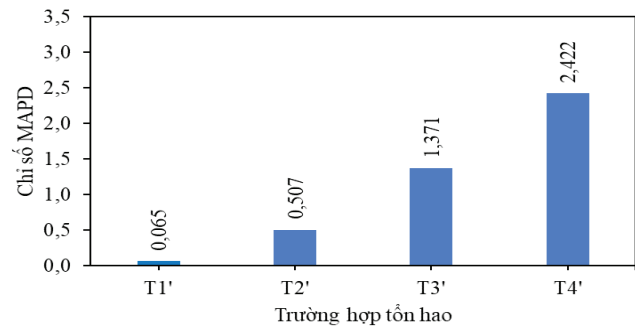
Hình 8. Đáp ứng trở kháng mô phỏng 77~87 kHz.

Chẩn đoán tổn hao ứng suất trước

Miền tần số 19~20 kHz được chọn để khảo sát cho vấn đề tổn hao ứng suất trước. Cần lưu ý đây là bài toán chẩn đoán ngược, các trường hợp giả định tổn hao T1', T2', T3', T4' là chưa biết được mức độ tổn hao bao nhiêu, cần được chẩn đoán; còn các trường hợp T0, T1, T2, T3 là đã biết được mức độ tổn hao, được dùng để huấn luyện. Hình 9 thể hiện đáp ứng trở kháng của 4 trường hợp cần chẩn đoán. Các trường hợp này được chẩn đoán thành công có xuất hiện tổn hao thông qua chỉ số MAPD (hình 10). Chỉ số MAPD càng cao khi mức độ tổn hao càng lớn. Tuy nhiên, chỉ số này không thể cho biết mức độ của tổn hao cụ thể như thế nào. Do vậy, mạng nơ-ron nhân tạo được sử dụng để chẩn đoán mức độ của tổn hao.

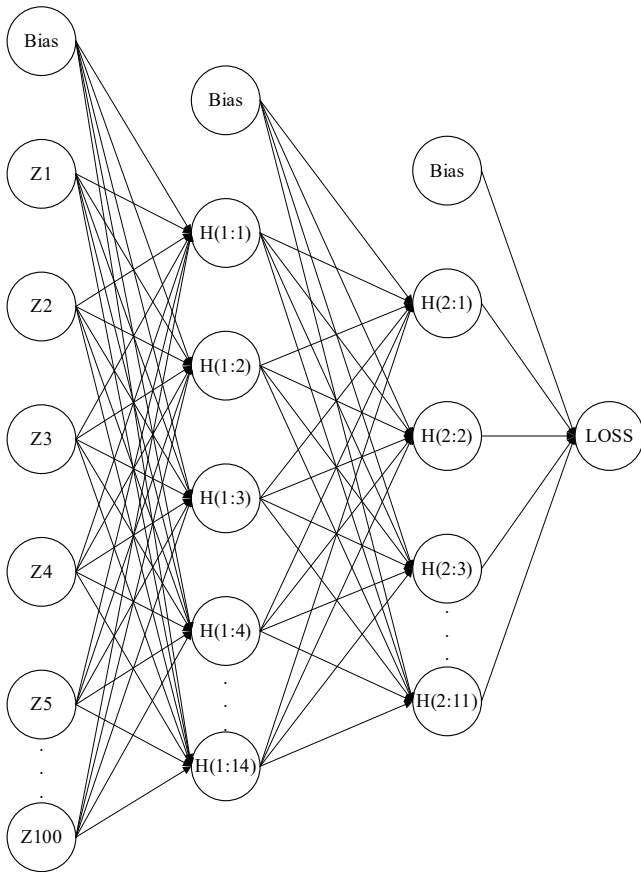


Hình 9. Đáp ứng trở kháng của các trường hợp cần chẩn đoán.

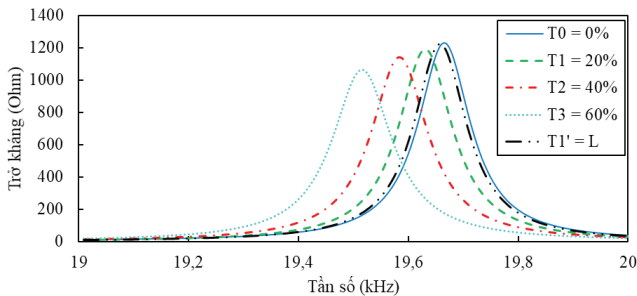


Hình 10. Chỉ số MAPD của các trường hợp cần chẩn đoán.

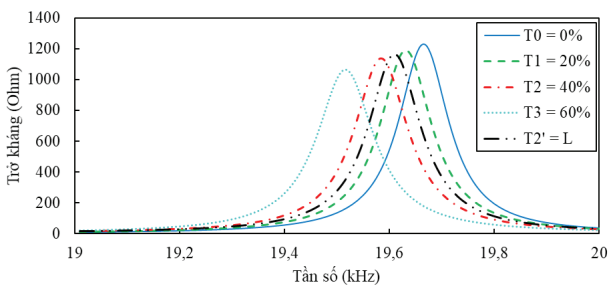
Mạng ANNs được xây dựng trong miền tần số 19~20 kHz, với độ rộng 1 kHz (1000 Hz) và bước tần số 10 Hz, do đó sẽ có 1000/10=100 biến đầu vào để chẩn đoán tổn hao. Trong nghiên cứu này, mạng ANNs là mạng truyền thẳng có nhiều lớp (MLP), như hình 11, được xây dựng bằng công cụ Neural Networks trong phần mềm IBM SPSS [17]. Theo đó, sơ đồ mạng gồm 1 lớp vào, 2 lớp ẩn và 1 lớp ra xuất kết quả. Lớp vào có 100 nơ-ron tương ứng là đáp ứng trở kháng tại các vị trí tần số; số nơ-ron trong lớp ẩn được phần mềm kiến nghị để cho kết quả tối ưu nhất, lớp ẩn 1 có 14 nơ-ron và lớp ẩn 2 có 11 nơ-ron; lớp ra có 1 nơ-ron tương ứng là tổn hao cần chẩn đoán (LOSS). Các trọng số liên kết được lựa chọn tự động ngẫu nhiên và sẽ điều chỉnh thay đổi qua các lần huấn luyện. Tại mỗi lớp đều có thêm một biến ngưỡng (Bias); biến này được thêm vào để điều chỉnh giá trị kết quả của hàm truyền, làm tăng khả năng thích nghi của mạng trong quá trình huấn luyện. Hình 12 đến hình 15 thể hiện các đáp ứng trở kháng tương ứng với dữ liệu đầu vào của từng trường hợp cần chẩn đoán. Trong đó, đáp ứng trở kháng có giá trị tổn hao L là chưa biết. Mục tiêu của mạng ANNs MLP là tìm giá trị L này. Các kết quả sau khi chạy mạng ANNs MLP được trình bày trong hình 16 và bảng 3. Kết quả phân tích cho thấy mạng ANNs MLP chẩn đoán chính xác mức độ tổn hao ứng suất trước cho cả bốn trường hợp, sai số dao động từ 0~13%.



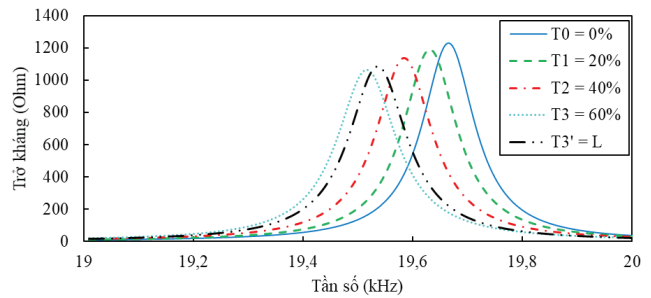
Hình 11. Sơ đồ mạng ANNs MLP.



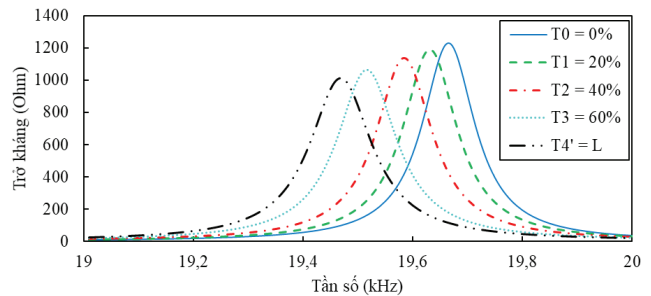
Hình 12. Đáp ứng trở kháng để chẩn đoán T1'.



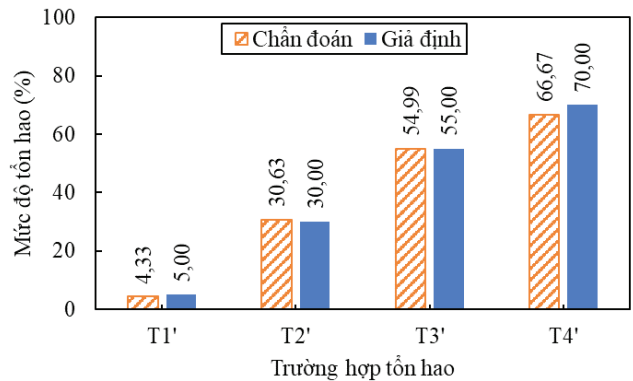
Hình 13. Đáp ứng trở kháng để chẩn đoán T2'.



Hình 14. Đáp ứng trở kháng để chẩn đoán T3'.



Hình 15. Đáp ứng trở kháng để chẩn đoán T4'.



Hình 16. Kết quả chẩn đoán mức độ tổn hao.

Bảng 3. Kết quả chẩn đoán mức độ tổn hao từ ANNs MLP.

Trường hợp tổn hao	Giả định (%)	Chẩn đoán (%)	Sai số (%)
T1'	5,00	4,33	13,40
T2'	30,00	30,63	2,10
T3'	55,00	54,99	0,02
T4'	70,00	66,67	4,76

Kết luận

Trong bài báo này, một phương pháp chẩn đoán sự xuất hiện và mức độ của tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cấp sử dụng đáp ứng trở kháng cơ - điện kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo đã được phát triển thành công. Các kết luận sau được rút ra từ các kết quả phân tích:

(1) Mô phỏng số đáp ứng trở kháng cơ - điện của một vùng neo cáp đã được mô phỏng thành công. Đáp ứng trở kháng từ mô hình PTHH rất phù hợp với kết quả thực nghiệm.

(2) Chỉ số MAPD đã phát hiện thành công sự xuất hiện của tổn hao ứng suất trước trong vùng neo cáp. Chỉ số MAPD gia tăng khi mức độ tổn hao ứng suất trước gia tăng.

(3) Mạng nơ-ron nhân tạo ANNs MLP đã chẩn đoán chính xác mức độ tổn hao ứng suất trước, với độ chính xác đạt được từ 87 đến 100%.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh trong khuôn khổ Đề tài mã số B2020-20-06. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T.-C. Huynh, N.-L. Dang, J.-T. Kim (2017), “Advances and challenges in impedance-based structural health monitoring”, *Structural Monitoring and Maintenance*, **4(4)**, pp.301-329.
- [2] C. Liang, F.P. Sun, and C.A. Rogers (1994), “Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **5(1)**, pp.12-20.
- [3] F.P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, and C.A. Rogers (1995), “Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **6(1)**, pp.134-139.
- [4] V. Giurgiutiu and A. Zagari (2005), “Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method”, *Structural Health Monitoring*, **4(2)**, pp.99-118.
- [5] S. Park, C.-B. Yun, Y. Roh, and J.-J. Lee (2005), “Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches”, *Smart Structures and Systems*, **1(4)**, pp.339-353.
- [6] S. Park, S. Ahmad, C.B. Yun, and Y. Roh (2006), “Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health

monitoring techniques”, *Experimental Mechanics*, **46(5)**, pp.609-618.

[7] T.-C. Huynh and J.-T. Kim (2014), “Impedance-based cable force monitoring in tendon-anchorage using portable PZT-interface technique”, *Mathematical Problems in Engineering*, pp.1-11.

[8] W. Li, S. Fan, S.C.M. Ho, J. Wu, and G. Song (2018), “Interfacial debonding detection in fiber-reinforced polymer rebar-reinforced concrete using electro-mechanical impedance technique”, *Structural Health Monitoring*, **17(3)**, pp.461-471.

[9] C.C. Aggrawal (2018), *Neural Networks and Deep Learning: a textbook*, Springer International Publishing.

[10] Nguyễn Hữu Hưng (2018), “Nghiên cứu sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo phát hiện hư hỏng trong dầm giản đơn thông qua biến dạng của dầm”, *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*, **2018(1+2)**, tr.39-43.

[11] Lý Hải Bằng, và Nguyễn Thùy Anh (2020), “Nghiên cứu ứng dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo để dự đoán sức chịu tải tới hạn của cầu kiện thép chữ Y”, *Tạp chí Giao thông vận tải*, **2020(3)**, tr.45-49.

[12] S. Bhalla and C. Kiong Soh (2003), “Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **32(12)**, pp.1897-1916.

[13] A.N. Zagari and V. Giurgiutiu (2001), “Electro-mechanical impedance method for crack detection in thin plates”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **12(10)**, pp.709-718.

[14] T.-C. Huynh, Y.-H. Park, J.-H. Park, and J.-T. Kim (2015), “Feasibility verification of mountable PZT-interface for impedance monitoring in tendon-anchorage”, *Shock and Vibration*, **2015**, Article ID 262975.

[15] K.L. Johnson (1987), *Contact mechanics*, Cambridge University Press.

[16] S. Ritdumrongkul, M. Abe, Y. Fujino, and T. Miyashita (2003), “Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator-sensor”, *Smart Materials and Structures*, **13(1)**, p.20.

[17] IBM SPSS (2017), *IBM SPSS Neural Networks 25*, IBM Corporation.