

Một công thức dựa trên mạng nơ ron nhân tạo dự báo khả năng chống chọc thủng sàn bê tông cốt thép hai phương bị ăn mòn

An ANN-based formula for predicting the punching shear capacity of corroded two-way reinforced concrete slabs

Lê Thế Anh⁽¹⁾, Vũ Hoàng Hiệp⁽²⁾ và Đặng Vũ Hiệp⁽³⁾

Tóm tắt

Dự báo khả năng chống chọc thủng của sàn bê tông cốt thép bị ăn mòn là một trong những vấn đề phức tạp trong kết cấu công trình. Phát triển một phương pháp dự báo tin cậy, thuận tiện cho thực hành trong khi kể đến một số nhân tố ảnh hưởng của ăn mòn là cần thiết. Bài báo này trình bày kết quả xây dựng công thức thực nghiệm để dự báo khả năng chống chọc thủng của sàn bê tông cốt thép hai phương có cốt thép dọc bị ăn mòn nhân tạo. Một kỹ thuật học máy có tên mạng nơ ron nhân tạo (ANN) đã được sử dụng. Tính chính xác của công thức đề xuất được so sánh với công thức thực nghiệm và mô hình ANN đã được công bố trước đây. Kết quả cho thấy công thức đề xuất cho kết quả dự báo tốt hơn bởi hệ số xác định bằng 0.8690, căn bậc hai của sai số bình phương trung bình bằng 41.2522 kN.

Từ khóa: Sàn bê tông cốt thép, mạng nơ ron nhân tạo, khả năng chống chọc thủng, ăn mòn, phá hoại

Abstract

Predicting the punching shear capacity of corroded reinforced concrete slabs is one of the complex issues in structural engineering. Developing a reliable and practical prediction method that considers various factors of corrosion is necessary. This paper presents the results of establishing an empirical formula to predict the punching shear capacity of two-way reinforced concrete slabs with artificially corroded longitudinal reinforcement. A machine learning technique named Artificial Neural Network (ANN) has been used. The accuracy of the proposed formula is compared with previously published empirical formula and ANN model. The results show that the proposed formula provides better predictions, with a coefficient of determination of 0.8690 and a root mean square error of 41.2522kN.

Key words: Reinforced concrete slabs, artificial neural network (ANN), punching shear capacity, corrosion, failure

⁽¹⁾ThS, Giảng viên, bộ môn Kết cấu bê tông cốt thép, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, Email: anhlt@hau.edu.vn; ĐT: 0983213790

⁽²⁾PGS. TS, Giảng viên, Bộ môn Kết cấu bê tông cốt thép, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, Email: vuhoanghiệp@hau.edu.vn; ĐT: 0962194080

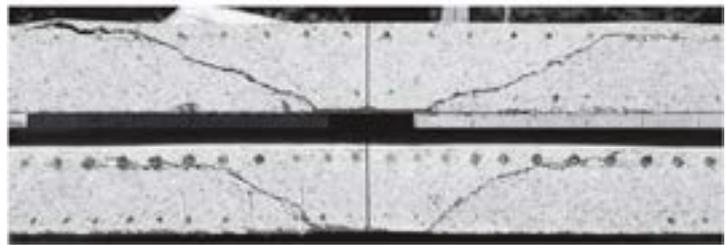
⁽³⁾PGS. TS, Giảng viên, Bộ môn Kết cấu bê tông cốt thép/khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, Email: hiepdv@hau.edu.vn; ĐT: 0985691874

Ngày nhận bài: 30/9/2024
Ngày sửa bài: 4/10/2024
Ngày duyệt đăng: 07/10/2024

1. Tổng quan

Kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng dân dụng, công nghiệp, cầu đường vì khả năng chịu lực tốt cũng như chi phí sản xuất rẻ. Tuy nhiên, ảnh hưởng dài hạn của môi trường đến độ bền lâu của kết cấu BTCT là khó tránh khỏi, nhất là trong môi trường có tính xâm thực cao [1]. Mặc dù được bê tông bảo vệ, nhưng do nhiều nguyên nhân khác nhau, cốt thép bên trong bê tông có thể bị ăn mòn, dẫn đến tuổi thọ của kết cấu bị suy giảm nghiêm trọng [2], [3], [4].

Ứng xử của cấu kiện BTCT chịu cắt, đặc biệt là liên kết sàn-cột trong hệ thống sàn không dầm đã được rất nhiều các nhà nghiên cứu quan tâm trong nhiều thập kỷ trở lại đây. Khả năng chịu lực của sàn phẳng không dầm phụ thuộc chủ yếu vào khả năng chịu uốn/cắt của vùng sàn xung quanh đầu cột. Đối với khả năng chịu uốn, có thể sử dụng một vài phương pháp phân tích nội lực như phương pháp dải, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến, phương pháp đường chảy dẻo để dự báo [5]. Ngược lại với khả năng chịu cắt (chống chọc thủng), phương pháp đơn giản thường dùng là sử dụng các công thức thực nghiệm cho trong các tiêu chuẩn thiết kế để dự báo [6], [7]. Tuy nhiên, các công thức cho trong các tiêu chuẩn thiết kế thường hoặc bỏ qua ảnh hưởng của cốt thép dọc, hiệu ứng kích cỡ, hoặc tỷ lệ kích thước tiết diện ngang cột. Điều này dẫn đến các kết quả dự báo từ các tiêu chuẩn thường quá thận trọng, có hệ số biến động lớn và hệ số tương quan thấp so với kết quả thực nghiệm [8]. Phá hoại kiểu chọc thủng là kiểu phá hoại đột ngột với biến dạng nhỏ kèm theo sự hình thành vết nứt nghiêng chia tách thấp chọc thủng với phần còn lại của sàn (Hình 1).



Hình 1. Kiểu phá hoại chọc thủng tiêu biểu trong sàn không dầm [9]

Trong trường hợp cốt thép chịu kéo trong bản sàn bị ăn mòn, dự báo khả năng chống chọc thủng trong các tiêu chuẩn thiết kế chưa được đề cập tới. Tiếp cận đơn giản là áp dụng các công thức cho trong các tiêu chuẩn với chiều cao làm việc hoặc hàm lượng cốt thép dọc còn lại sau khi bị ăn mòn. Tiếp cận này cho số lượng mẫu có kết quả dự báo so với kết quả thực nghiệm nằm ở mức nguy hiểm lên đến 47% đối với tiêu chuẩn ACI 318-19, trong khi đối với TCVN 5574 : 2018 chỉ là khoảng 12% [10]. Tuy nhiên số lượng các mẫu nằm ở mức thận trọng khi tính toán theo TCVN 5574:2018 lên đến 43%. Điều này cho thấy mức độ chính xác của kết quả dự báo theo cả hai tiêu chuẩn trên đều ở mức thấp (hệ số xác định $R^2 = 0.54$) [10].

Các nghiên cứu thực nghiệm về khả năng chống chọc thủng của sàn BTCT gần đây đã được một số nhà nghiên cứu quan tâm. Nghiên cứu trong [11] chỉ ra phạm vi chọc thủng trong trường hợp cốt thép sàn bị ăn mòn rộng hơn so với sàn không bị ăn mòn. Nếu hàm lượng cốt dọc ban đầu trong sàn cao đồng thời mức độ ăn mòn trung bình thì khả năng biến dạng của sàn tăng lên. Mặt khác, nghiên cứu [12] cho thấy nếu phạm vi vùng ăn mòn của bản sàn trên đầu cột là nhỏ thì khả năng chống chọc thủng của sàn ít bị ảnh hưởng. Nghiên cứu cũng chỉ ra mất mát diện tích cốt thép dọc ảnh hưởng nhiều đến khả năng chịu chọc thủng và độ cứng của sàn không dầm.

Từ các tổng quan trên, có thể thấy rằng dự báo khả năng chịu chọc thủng của sàn BTCT bị ăn mòn cốt thép dọc là bài toán phức tạp do xuất hiện thêm các nhân tố ảnh hưởng của ăn mòn gây ra. Một số các nghiên cứu đã đề xuất công thức thực nghiệm dự báo khả năng chống chọc thủng [10], xây dựng mô hình phần tử hữu hạn [13], xây dựng mô hình dự báo bằng mạng nơ ron nhân tạo (ANN) [14] cho sàn BTCT bị ăn mòn. Mặc dù các nghiên cứu này đã giúp cho việc dự báo khả năng chống chọc thủng của sàn BTCT bị ăn mòn được

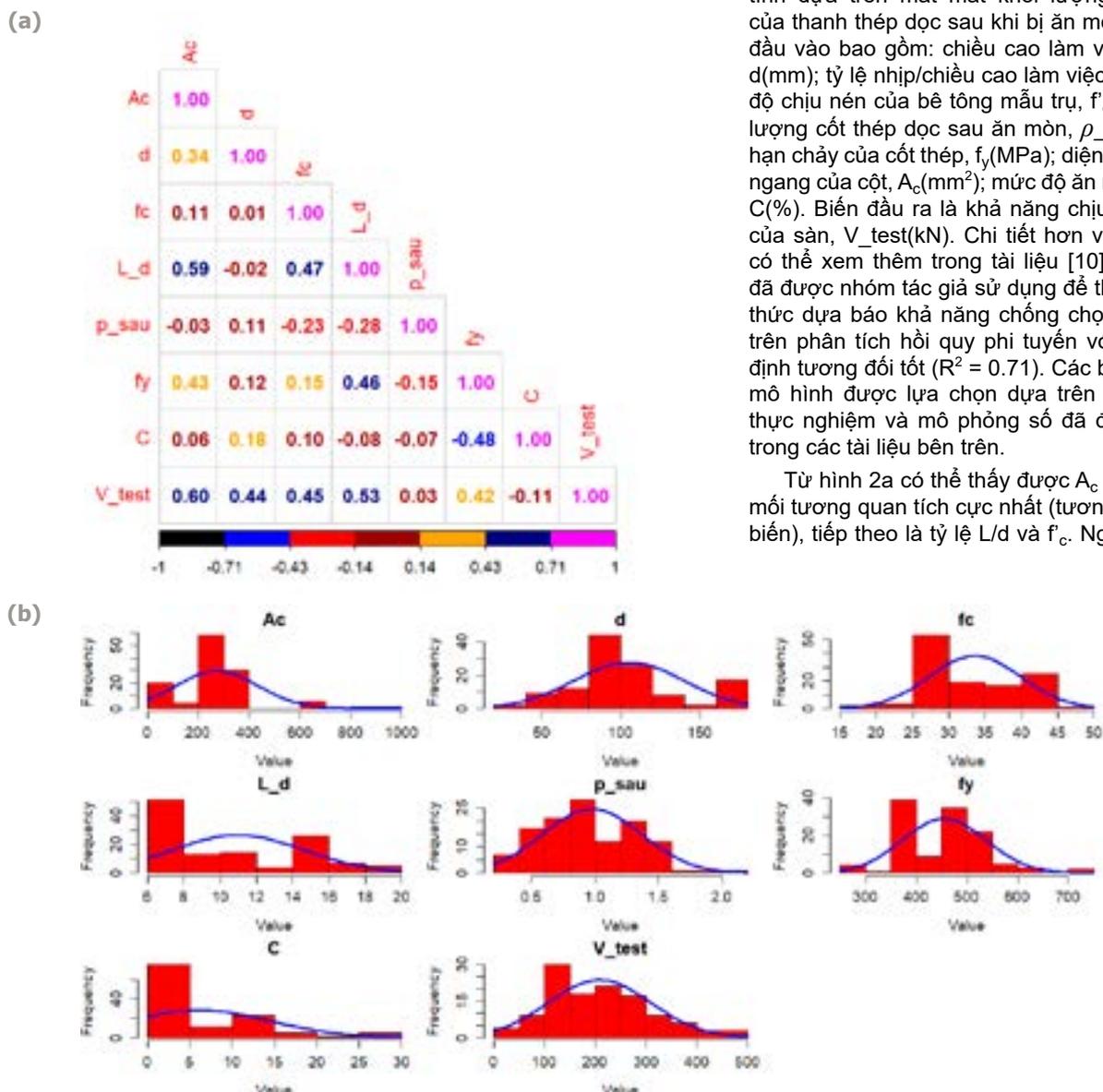
thuận tiện, chính xác hơn nhưng vẫn tồn tại một số vấn đề: (1) độ chính xác so với kết quả thực nghiệm chưa cao; (2) phạm vi kiểm chứng trên bộ dữ liệu thực nghiệm chưa lớn; (3) không đề xuất công thức dự báo rút ra từ mô hình ANN.

Bài báo này trình bày cách xây dựng một công thức thực nghiệm dựa trên mạng ANN để dự báo khả năng chịu chọc thủng đúng tâm của sàn BTCT hai phương không có cốt ngang, có cốt thép dọc chịu kéo bị ăn mòn clorua. Công thức xây dựng dựa trên các kết quả thực nghiệm thu thập được từ các nghiên cứu trước đây có kể đến ảnh hưởng của mức độ ăn mòn, giới hạn chảy dẻo của cốt thép dọc. Kết quả dự báo được so sánh với một số nghiên cứu trước đây trên các chỉ số thống kê như hệ số xác định R^2 , sai số phần trăm trung bình (MAPE), căn bậc hai sai số bình phương trung bình (RMSE).

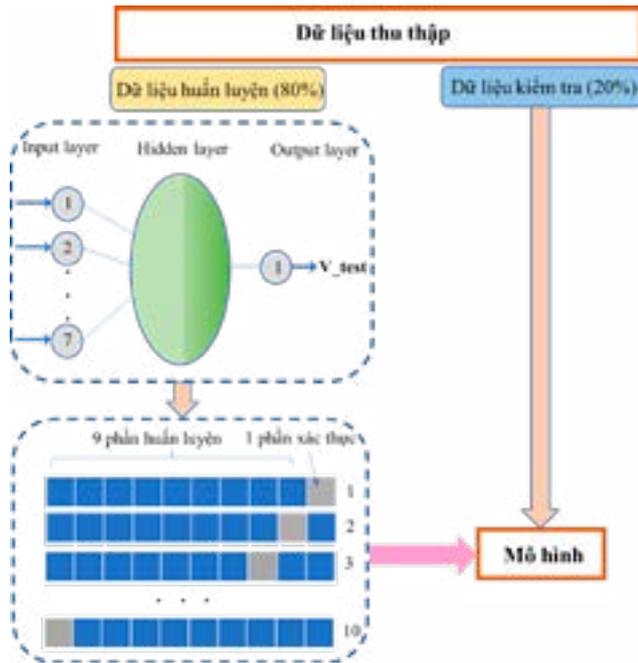
2. Thu thập và chuẩn bị dữ liệu

Bộ dữ liệu được nhóm tác giả thu thập được từ các nghiên cứu đã công bố trong tài liệu [14] và [15]. Bộ dữ liệu bao gồm 123 kết quả thực nghiệm và mô phỏng số sàn phẳng hai phương có cốt thép dọc bị ăn mòn trong môi trường dung dịch muối clorua. Mức độ ăn mòn cốt thép dọc (C%) được tính dựa trên mất mát khối lượng trung bình của thanh thép dọc sau khi bị ăn mòn. Các biến đầu vào bao gồm: chiều cao làm việc của sàn, d (mm); tỷ lệ nhịp/chiều cao làm việc, L/d ; cường độ chịu nén của bê tông mẫu trụ, f_c (MPa); hàm lượng cốt thép dọc sau ăn mòn, ρ_{sau} (%); giới hạn chảy của cốt thép, f_y (MPa); diện tích tiết diện ngang của cột, A_c (mm²); mức độ ăn mòn cốt dọc, C(%). Biến đầu ra là khả năng chịu chọc thủng của sàn, V_{test} (kN). Chi tiết hơn về bộ dữ liệu có thể xem thêm trong tài liệu [10]. Bộ dữ liệu đã được nhóm tác giả sử dụng để thiết lập công thức dự báo khả năng chống chọc thủng dựa trên phân tích hồi quy phi tuyến với hệ số xác định tương đối tốt ($R^2 = 0.71$). Các biến đưa vào mô hình được lựa chọn dựa trên các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số đã được đề cập trong các tài liệu bên trên.

Từ hình 2a có thể thấy được A_c và V_{test} có mối tương quan tích cực nhất (tương quan đồng biến), tiếp theo là tỷ lệ L/d và f_c . Ngược lại tỷ lệ



Hình 2. Tương quan các biến (a); phân bố giá trị của các biến (b) trong bộ dữ liệu

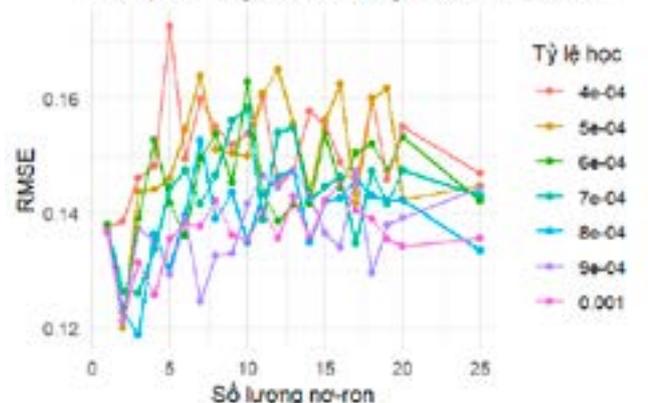


Hình 3. Quá trình xây dựng mạng ANN

ăn mòn C và V_{test} có mối tương quan tiêu cực (tương quan nghịch biến). Các quan hệ tương quan trên phù hợp với các kết luận rút ra từ kết quả thực nghiệm. Hình 2b thể hiện phân bố tần suất (frequency) mẫu xuất hiện ứng với từng khoảng giá trị cho trước. Có thể thấy được mức độ ăn mòn trong các thí nghiệm và mô phỏng số phổ biến ở khoảng 5%, tiếp theo là khoảng 10-15%. Hàm lượng cốt thép dọc còn lại sau ăn mòn phổ biến ở mức khoảng 1% trong khi cường độ chịu nén của bê tông phổ biến ở mức 25-30MPa. Tất cả các biến đầu vào và ra đều không tuân theo luật phân bố chuẩn như đường cong màu xanh trên hình 2b.

Để thiết lập công thức dựa trên mạng ANN, trước hết cần tiến hành tiền xử lý dữ liệu để loại bỏ các dữ liệu gây nhiễu làm ảnh hưởng đến tính tổng quát của mô hình. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng hai chỉ số Z_{score} và G [16] để tìm các điểm dữ liệu ngoại lai (dữ liệu gây nhiễu). Phương pháp này có thể sử dụng để phát hiện điểm dữ liệu có giá trị lớn nhất và điểm giữ liệu có giá trị nhỏ nhất có bất thường so với các điểm dữ liệu khác hay không. Kết quả phân tích cho thấy các hàng dữ liệu có $A_c = 1600cm^2$, $\rho_{sau} = 2.3\%$ và $d = 29.7mm$ là các giá trị ngoại lai và bị loại bỏ ra bộ dữ liệu.

(a) Mối quan hệ giữa số lượng nơ-ron và RMSE



3. Mạng ANN

3.1. Cấu trúc mạng

Sau khi loại bỏ ba hàng dữ liệu ngoại lai, bộ dữ liệu còn lại có 120 dữ liệu được chuẩn hoá min-max và được chia thành hai tập dữ liệu độc lập là tập huấn luyện (chiếm 80%) và tập kiểm tra (chiếm 20%). Tỷ lệ này được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng khi huấn luyện mạng ANN [17], [18], [19]. Để tránh hiện tượng quá khớp trong quá trình huấn luyện, tập dữ liệu huấn luyện được chia thành 10 phần trong đó 9 phần dùng để huấn luyện mô hình, phần còn lại dùng để xác thực chéo mô hình. Quá trình được lặp lại 10 lần (10-fold CV) để sinh ra 10 mô hình khác nhau trong quá trình huấn luyện.

Mô hình cuối cùng để đưa ra đánh giá trên tập kiểm tra là mô hình có chỉ số RMSE nhỏ nhất (hình 3). Số lượng nơ-ron trong lớp ẩn và tỷ lệ học được tối ưu bằng phương pháp lưới tìm kiếm (grid search). Kết quả cho thấy với tỷ lệ học bằng 8×10^{-4} và số nơ-ron trong lớp ẩn bằng 3 thì giá trị RMSE là nhỏ nhất (hình 4a). Hình 4b thể hiện cấu trúc mạng ANN 7-3-1 đạt được trên tập huấn luyện.

3.2 Kết quả và bàn luận

Hình 5 thể hiện kết quả dự báo bởi mô hình ANN đã đề xuất trên tập dữ liệu huấn luyện và tập dữ liệu kiểm tra. Các kết quả cho thấy hệ số xác định R^2 , các chỉ số thống kê như RMSE và MAPE đạt được đều tốt hơn so với kết quả dự báo trong các nghiên cứu [10] và [14]. Ngoài ra cấu trúc mạng nơ-ron đề xuất gọn hơn so với cấu trúc mạng nơ-ron 8-15-1 sử dụng trong [14]. Từ đó có thể nhận xét rằng mô hình ANN 7-3-1 dự báo tương đối chính xác, đủ tin cậy so với kết quả thực nghiệm.

Cần lưu ý rằng cấu trúc mạng ANN đề xuất phù hợp với phạm vi dữ liệu biến đầu vào có trong bộ dữ liệu. Ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép dọc được kể đến thông qua biến mức độ ăn mòn trung bình C trên toàn bộ thanh thép. Nghĩa là xem xét kiểu ăn mòn là đồng đều, chưa xem xét đến kiểu ăn mòn điểm trên thanh cốt thép dọc. Ngoài ra, mô hình mạng đề xuất cũng chưa xem xét đến phạm vi ăn mòn của vùng sàn trên đầu cột cũng như sự mất mát lực dính giữa bề mặt tiếp xúc thép-bê tông do ăn mòn gây ra. Do đó, vẫn cần xây dựng các mô hình học máy tiên tiến hơn kể đến các nhân tố này.

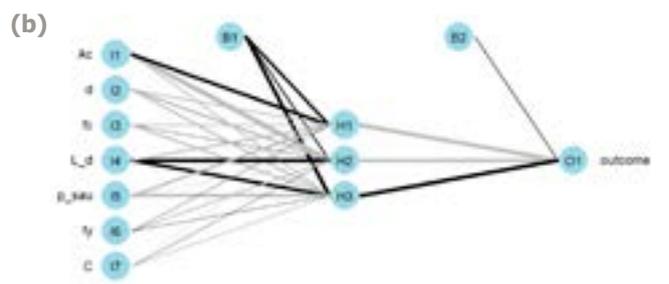
3.3 Công thức suy ra từ mạng ANN

Công thức toán học để dự báo khả năng chống chọc thủng của sàn BTCT bị ăn mòn cốt thép dọc được thể hiện thông qua công thức (1) và (2).

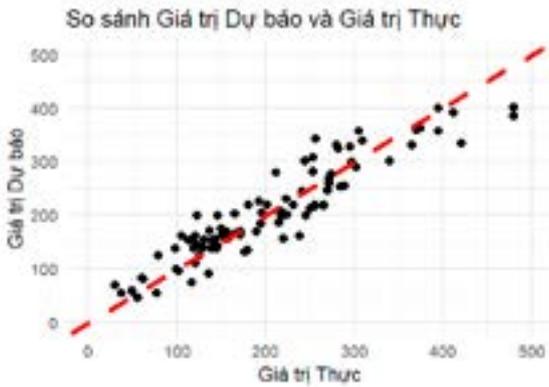
$$V_{test_norm} = 0.970H1 - 5.3790H2 - 4.9010H3 + 4.9894 \quad (1)$$

Công thức (1) thể hiện giá trị lực chọc thủng đã được chuẩn hoá min-max khi xử lý dữ liệu đầu vào.

Trong công thức (2), ma trận kích thước 3x7 là ma trận trọng số trong lớp ẩn. Ma trận cột được cộng vào chính là

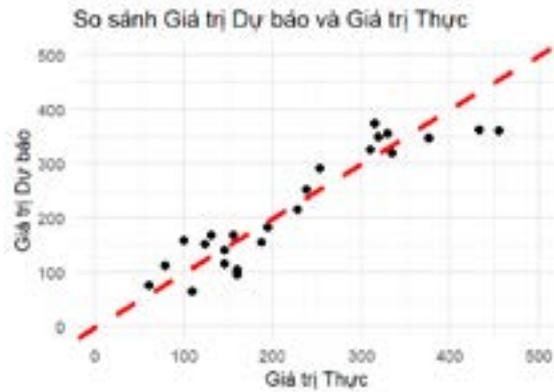


Hình 4. Xác định các tham số tối ưu cho mạng ANN (a); cấu trúc mạng ANN (b)



a.

$R^2 = 0.8653$
 RMSE = 35.7411 kN
 MAPE = 16.9488%



b.

$R^2 = 0.8690$
 RMSE = 41.2522 kN
 MAPE = 19.3327%

Hình 5. Kết quả dự báo trên tập huấn luyện (a); trên tập kiểm tra (b)

$$\begin{bmatrix} H1 \\ H2 \\ H3 \end{bmatrix} = \text{sigmoid} \begin{bmatrix} 3.3305 & 3.8026 & -1.5065 & -1.5159 & -2.2691 & -2.7621 & 0.2258 \\ -0.3400 & 1.2169 & -6.9926 & -2.8413 & 0.0217 & 4.5813 & -0.3127 \\ -1.2777 & 0.3229 & 4.6762 & -1.2190 & -2.6629 & -2.1808 & 4.2586 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ac \\ d \\ f'c \\ L_d \\ \rho_sau \\ fy \\ C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -3.5547 \\ 0.2242 \\ -1.0352 \end{bmatrix} \quad (2)$$

giá trị độ lệch của lớp ẩn. Công thức (1) cần nhân thêm tham số chuẩn hoá min-max dữ liệu đầu vào để thu được giá trị V_test dự báo.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp thiết lập công thức dự báo khả năng chống chọc thủng sàn BTCT hai phương có cốt thép dọc bị ăn mòn dựa trên mạng nơ ron nhân tạo ANN. Để đạt được mục tiêu, một bộ gồm 123 dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng số đã công bố trong các nghiên cứu trước được tập hợp và xử lý. Sau đó dữ liệu được huấn luyện dựa trên thuật toán lan truyền ngược để tối ưu trọng số để đạt được giá trị RMSE nhỏ nhất. Một số kết luận được rút ra trong phạm vi nghiên cứu như sau:

- Phân bố dữ liệu thu thập được không tuân theo luật phân bố chuẩn và cần quá trình tiền xử lý dữ liệu để loại bỏ các giá trị gây nhiễu kết quả dự báo;

- Cấu trúc mạng ANN 7-3-1 đạt được có kích thước gọn và chính xác hơn một số đề xuất của các nghiên cứu khác ;

- Công thức đề xuất giúp tường minh kết quả của quá trình huấn luyện và kiểm tra trong mạng ANN. Người thiết kế có thể lập bảng tính thuận tiện cho công việc thay vì sử dụng mạng ANN khó tiếp cận trong thực hành.

Cần có thêm các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số để làm rõ hơn ảnh hưởng của kiểu ăn mòn điểm lên ứng xử chọc thủng của sàn BTCT hai phương./.

Tài liệu tham khảo

- Ahmad S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. *Cement and Concrete Composites*. 2003;25(4):459-71. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0).
- Geiker M, Danner T, Michel A, Belda Revert A, Linderoth O, Hornbostel K. 25 years of field exposure of pre-cracked concrete beams; combined impact of spacers and cracks on reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*. 2021;286:122801. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122801>.
- Mahmoodeza Soltani AS, Almarie B. A State-of-the-Art Review of Bending and Shear Behaviors of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*. 116(3). doi: 10.14359/51714481.
- Hu JY, Zhang SS, Chen E, Li WG. A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. *Construction and Building Materials*. 2022;325:126718. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126718>.
- Nielsen MP. *Limit analysis and concrete plasticity*: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.; 1984. 420p.
- TCVN 5574:2018 *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông bản Xây dựng*; 2018.
- Eurocode 2: *Design of Concrete Structures: Part 1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Brussels.
- Sagaseta J, Tassinari L, Fernández Ruiz M, Muttoni A. Punching of flat slabs supported on rectangular columns. *Engineering Structures*. 2014;77:17-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.007>.
- Jurgen Einpaul JBMFR, Aurelio M. Study on Influence of Column Size and Slab Slenderness on Punching Strength. *ACI Structural Journal*. 113(1). doi: 10.14359/51687945.
- ANH LT, HIỆP ĐV. Dự báo khả năng chống chọc thủng sàn bê tông cốt thép bị ăn mòn. *Tạp chí KHCN Xây dựng*. 2024;4:11-6. doi: <https://doi.org/10.59382/j-ibst.2023.vi.vol4-2>.
- Qian K, Li J-S, Huang T, Weng Y-H, Deng X-F. Punching shear strength of corroded reinforced concrete slab-column connections. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103489. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103489>.
- Aoude H, Cook William D, Mitchell D. Effects of Simulated Corrosion and Delamination on Response of Two-Way Slabs. *Journal of Structural Engineering*. 2014;140(1):04013023. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000775.

(Xem tiếp trang 48)