

Dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn bê tông cốt thép chữ nhật sử dụng mô hình mạng thần kinh nhân tạo

Prediction of shear capacity of squat rectangular RC walls using artificial neural networks

Phan Văn Tiên*, Nguyễn Duy Duẩn

Trường Đại học Vinh

*Email liên hệ: vantienkxd@vinhuni.edu.vn

Tóm tắt:

Mục tiêu của nghiên cứu này là xây dựng mô hình dựa trên mạng thần kinh nhân tạo (ANN) để dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn bê tông cốt thép (BTCT) tiết diện chữ nhật. Một bộ dữ liệu bao gồm 312 kết quả thí nghiệm từ các nghiên cứu trước đây đã công bố được sưu tập dùng cho việc phát triển mô hình ANN. Kết quả dự báo dựa trên mô hình ANN được so sánh với tám công thức trong các tiêu chuẩn thiết kế và các nghiên cứu điển hình đã công bố trước đây. Các tham số thống kê dùng để đánh giá mức độ chính xác của các mô hình bao gồm hệ số xác định (R^2) và sai số quân phương (RMSE). Ngoài ra, giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của tỷ số giữa giá trị dự báo và giá trị thí nghiệm cũng được đánh giá. Kết quả cho thấy rằng mô hình ANN vượt trội hơn nhiều trong việc dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT tiết diện chữ nhật so với các công thức đề xuất khác.

Từ khóa: Vách ngăn bê tông cốt thép; Khả năng kháng cắt; Mô hình mạng thần kinh nhân tạo; Dữ liệu thí nghiệm.

Abstract:

The aim of this study is to develop an artificial neural network (ANN) model for predicting the shear capacity of squat rectangular reinforced concrete (RC) walls. A set of 312 experimental results is collected from the literature for constructing the ANN model. The performance of the ANN model is compared with that of seven proposed formulas in the current design codes and published studies. Three statistical parameters are used to evaluate the accuracy of the predictive models, in which the coefficient of determination (R^2) and root-mean-squared error (RMSE) are considered. Additionally, the characteristics, i.e., mean and standard deviation, of the ratio of predicted shear strengths to experiment values are quantified. The results reveal that the ANN model outperforms other proposed formulas in predicting the shear capacity of squat rectangular RC walls.

Keywords: Squat rectangular reinforced concrete walls; Shear capacity; Artificial neural network; Experimental database.

1. Giới thiệu

Vách ngăn bê tông cốt thép (BTCT) được ứng dụng rộng rãi trong kết cấu nhà cửa hoặc các kết cấu nhà máy điện hạt nhân do loại vách này có khả năng chịu tải trọng ngang lớn [1]. Có hai loại tiết diện ngang điển hình của vách ngăn BTCT đó là tiết diện chữ nhật và tiết diện có cánh. Những thập niên gần đây, nhiều nghiên cứu đã đề xuất các công thức thực nghiệm tính toán khả

năng kháng cắt của vách BTCT tiết diện chữ nhật [2]-[7].

Barda và cộng sự [2] đã tiến hành thí nghiệm 08 mẫu vách ngăn có các phần tử biên. Từ đó, nhóm tác giả này đã đề xuất một công thức tính toán khả năng kháng cắt dựa trên các kết quả thí nghiệm. Gulec và Whittaker [5] đã đề xuất các công thức thực nghiệm tính toán khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT tiết diện chữ nhật và tiết

diện có cánh dựa trên kết quả của 227 bộ dữ liệu thí nghiệm. Wood [3] đã xem xét lại và đánh giá công thức tính toán cường độ kháng cắt danh nghĩa trong tiêu chuẩn thiết kế ACI 318-83 dựa trên bộ dữ liệu gồm 143 thí nghiệm của vách ngăn BTCT chịu tải trọng ngang. Sánchez-Alejandre và Alcocer [4] đã đề xuất một mô hình thiết kế cho việc tính toán cường độ kháng cắt của vách ngăn BTCT chịu tải trọng động đất. Kassem [6] đã rút ra một biểu thức dưới dạng giải tích tính toán cường độ kháng cắt xem xét đến sự ảnh hưởng của phần bê tông theo đường chéo và cốt thép bụng vách. Các tham số mô hình được hiệu chỉnh sử dụng 664 bộ dữ liệu thí nghiệm của vách chữ nhật và vách có cánh. Bên cạnh đó, một số tiêu chuẩn thiết kế điển hình đã cung cấp các công thức tính toán khả năng kháng cắt của vách tiết diện chữ nhật bao gồm ACI 318 [8], ASCE/SEI-43 [9], và EC8 [10]. Tuy nhiên, có sự khác nhau trong các biểu thức của các tiêu chuẩn, trong đó đặc biệt là các giới hạn áp dụng và giả thiết kèm theo.

Các thuật toán trí tuệ nhân tạo đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khoa học nói chung và kỹ thuật xây dựng nói riêng. Đến hiện tại, đã có một vài nghiên cứu sử dụng các mô hình học máy (ML) để dự báo khả năng kháng cắt của vách BTCT. Moradi and Hariri-Ardebili [11] đã xây dựng một thư viện dữ liệu tổng hợp bao gồm vách ngăn, vách mảnh, vách có cánh và vách chữ nhật; từ đó, xây dựng mô hình ML để tính toán khả năng kháng cắt của các vách BTCT. Tuy nhiên, mức độ chính xác của mô hình ML còn chưa thực sự cao. Gần đây, Nguyen và cộng sự [12] đã đề xuất công thức và giao diện đồ họa người dùng để dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT có cánh. Chen và cộng sự [13] đã sử dụng mô hình lai ANN-PSO để dự báo khả năng kháng cắt của vách BTCT dựa trên 139 số liệu thí nghiệm. Mặc dù vậy, số lượng dữ liệu thí nghiệm cần lớn hơn nữa để đảm bảo phạm vi các tham số đầu vào được mở rộng, tăng hiệu quả dự báo. Tariq và cộng sự [14] đã xây dựng một công thức dự báo khả năng chịu

cắt của vách BTCT dựa trên lập trình diễn giải gen đơn. Công thức đề xuất xem xét cho cả ba loại vách BTCT bao gồm vách tiết diện chữ nhật, vách có cánh và vách hình quả tạ. Các tác giả chỉ ra rằng công thức đề xuất dự báo khả năng chịu cắt của vách BTCT có độ chính xác khá cao, với hệ số tương quan bằng 0.96. Tuy nhiên, cần có một nghiên cứu dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT chữ nhật dựa trên mô hình ANN.

Mục tiêu của bài báo này là xây dựng mô hình ANN để dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT tiết diện chữ nhật. Một bộ số liệu gồm 312 kết quả thí nghiệm được thu thập. Hiệu năng dự báo của mô hình ANN được so sánh với tám công thức đề xuất trước đây. Mức độ chính xác của các mô hình dự báo được đánh giá thông qua các tham số thống kê bao gồm hệ số xác định (R^2) và sai số quân phương ($RMSE$). Ngoài ra, giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của tỷ số giữa giá trị cường độ dự báo và giá trị thí nghiệm cũng được tính toán để đánh giá.

2. Các công thức tính toán khả năng kháng cắt của vách BTCT chữ nhật

Trong nghiên cứu này, các tác giả đã xem xét các tiêu chuẩn thiết kế điển hình là ACI 318 Chương 11 và Chương 18 [8], ASCE/SEI-43 [9], EC8 [10]. Đồng thời, các tác giả cũng khảo sát 04 nghiên cứu đã công bố trước đây bao gồm Barda và cộng sự [2], Wood [3], Gulec & Whittaker [5] và Adorno-Bonilla [7]. Bảng 1 tóm tắt các công thức (mô hình) dự báo khảo sát trong nghiên cứu này.

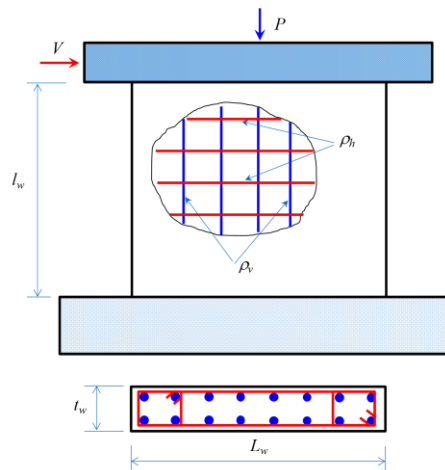
3. Bộ dữ liệu thí nghiệm

Một bộ gồm 312 dữ liệu kết quả thí nghiệm vách ngăn BTCT tiết diện chữ nhật đã được thu thập và chọn lọc trong các bài báo đã công bố [15-37]. Cần lưu ý rằng bộ dữ liệu này bao quát được phạm vi rất rộng của các tham số đầu vào như độ mảnh, tỷ số nén và đặc trưng vật liệu sử dụng. Bê tông và cốt thép có xét đến cường độ cao, trong đó cường độ bê tông lớn nhất xét đến là 70 MPa và cường độ chảy dẻo cốt thép dọc đạt đến 806 MPa.

Bảng 1. Công thức tính toán cường độ kháng cắt của vách ngăn BTCT theo các mô hình.

Mô hình	Công thức tính
ACI 318 Chương 11 [8]	$V = V_c + V_s \leq 0.83\sqrt{f'_c}t_w d; d = 0.8l_w$ $V_c = 0.27\lambda\sqrt{f'_c}t_w d + \frac{Pd}{4l_w}$ $\text{Hoặc } V_c = \left[0.05\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{l_w \left(0.1\lambda\sqrt{f'_c} + 0.2\frac{P}{l_w t_w} \right)}{\frac{M}{V} - \frac{l_w}{2}} \right] t_w d$ $V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$ <p>Trong đó:</p> <p>V_c là cường độ kháng cắt do bê tông;</p> <p>V_s là cường độ chịu cắt do cốt thép ngang;</p> <p>f'_c là cường độ chịu nén của bê tông;</p> <p>t_w là chiều dày bụng vách;</p> <p>l_w là chiều dài bụng vách;</p> <p>P là lực nén;</p> <p>A_v là diện tích cốt thép ngang;</p> <p>f_y là cường độ chảy dẻo của cốt thép;</p> <p>s là khoảng cách cốt thép ngang;</p> <p>λ là hệ số kể đến sự suy giảm đặc tính của bê tông.</p>
ACI 318 Chương 18 [8]	$V = A_{cv} \left(\alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_h f_y \right) \leq 0.83 A_{cw} \sqrt{f'_c}$ <p>Trong đó:</p> <p>A_{cw} là diện tích mặt cắt ngang của bụng vách theo phương lực cắt;</p> <p>ρ_h là hàm lượng cốt thép ngang;</p> <p>α_c là hệ số đặc trưng cho tỷ lệ kháng cắt của phần bê tông so với toàn vách.</p> $V = v_n d t_w, (d = 0.6l_w)$ $v_n = 0.69\sqrt{f'_c} - 0.28\sqrt{f'_c} \left(\frac{h_w}{l_w} - 0.5 \right) + \frac{P}{4l_w t_w} + \rho_{se} f_y \leq 1.67\sqrt{f'_c}$ $\rho_{se} = A\rho_v + B\rho_h$
ASCE/SEI-43 [9]	<p>Nếu $h_w/l_w < 0.5$ $A = 1$; $B = 0$</p> <p>Nếu $0.5 < h_w/l_w < 1.5$ $A = -h_w/l_w + 1.5$; $B = h_w/l_w - 0.5$</p> <p>Nếu $h_w/l_w \geq 1.5$ $A = 0$; $B = 1$</p> <p>Trong đó;</p> <p>h_w là chiều cao vách;</p> <p>ρ_v là hàm lượng cốt thép dọc.</p>
EC8 [10]	$V = \left[\rho_h f_y h \left(\frac{M_n}{V_n l_w} - 0.3 \right) + \rho_v f_y v * \left(1.3 - \frac{M_n}{V_n l_w} \right) \right] t_w d_w$ <p>Nếu $\frac{1.5P}{A_w f'_c} < 0.1$</p>

Mô hình	Công thức tính
	$V = \left[0.15\sqrt{f'_c} + \rho_h f_{yh} \left(\frac{M_n}{V_n l_w} - 0.3 \right) + \rho_v f_{yv} * \left(1.3 - \frac{M_n}{V_n l_w} \right) \right] t_w d_w$ <p>Nếu $\frac{1.5P}{A_w f'_c} > 0.1$</p> <p>$d_w = 0.8l_w$; $\frac{M_n}{V_n l_w}$ = tỷ số mô men và lực cắt.</p>
Barda và cộng sự [2]	$V = \left(0.67\sqrt{f'_c} - 0.21\sqrt{f'_c} \frac{h_w}{l_w} + \frac{P}{4l_w t_w} + \rho_v f_y \right) t_w d$ <p>($d = 0.6l_w$)</p>
Wood [3]	$0.5A_{cv}\sqrt{f'_c} \leq V = \frac{A_{vf}f_y}{4} \leq 0.83A_{cv}\sqrt{f'_c}$ <p>A_{vf} là diện tích cốt thép ngang kháng cắt.</p>
	$V = \frac{1.5\sqrt{f'_c}A_w + 0.25F_{vw} + 0.2F_{vbe} + 0.4P}{\sqrt{\frac{h_w}{l_w}}} \leq 10A_w\sqrt{f'_c}$
Gulec và Whittaker [5]	<p>Áp dụng cho $h_w/l_w \leq 1.0$</p> <p>Trong đó:</p> <p>A_w là diện tích tiết diện ngang của vách;</p> <p>F_{vw} là cường độ cung cấp bởi cốt thép dọc trong bụng vách;</p> <p>F_{vbe} là cường độ cung cấp bởi cốt thép dọc trong phần biên của vách.</p>
	$V = \left(0.35 + 0.068f'_c - 0.08f'_c \frac{h_w}{l_w} + 0.41 \frac{P}{A_g} + 0.47\rho_{se}f_{yse} + 0.39\rho_{be}f_{ybe} \right) A_{cv}$ <p>$f_{yse} = Af_{yv} + Bf_{yh}$</p> <p>$\rho_{se} = A\rho_v + B\rho_h$</p>
Adorno-Bonilla [7]	$\rho_{be} = \frac{A_{sbe}}{A_{cv}}$ <p>Nếu $\frac{h_w}{l_w} \leq 0.5$ thì $A = 1$; $B = 0$</p> <p>Nếu $0.5 < \frac{h_w}{l_w} < 1.5$ thì $A = -\frac{h_w}{l} + 1.5$; $B = \frac{h_w}{l} - 0.5$</p> <p>Nếu $h_w/l_w \geq 1.5$ thì $A = 0$; $B = 1$</p>

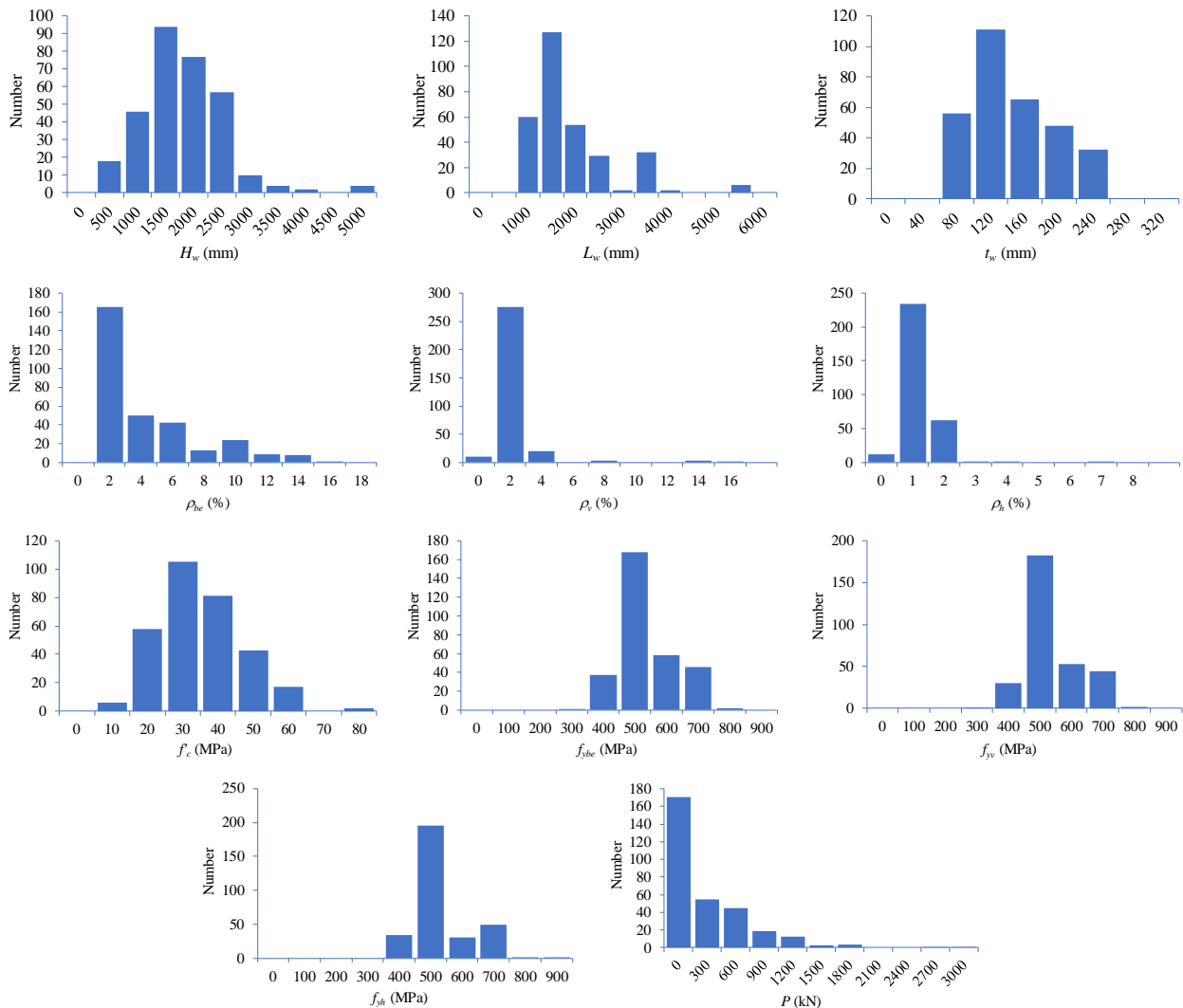


Hình 1. Minh họa vách ngăn BTCT chữ nhật.

- Chiều cao vách: $500 \text{ mm} \leq H_w \leq 4691 \text{ mm}$;
- Chiều dài vách: $600 \text{ mm} \leq L_w \leq 5415 \text{ mm}$;
- Bề dày của vách: $60 \text{ mm} \leq t_w \leq 240 \text{ mm}$;
- Độ mảnh: $0.3 \leq H_w/L_w \leq 2.2$;
- Tỷ số nén: $0 \leq P/f'_c A_g \leq 0.50$;
- Hàm lượng cốt dọc phần tử biên: $0.0\% \leq \rho_{be} \leq 14.3\%$;
- Hàm lượng cốt thép theo phương đứng của vách: $0.00\% \leq \rho_v \leq 14.3\%$;
- Hàm lượng cốt thép theo phương ngang của vách: $0.00\% \leq \rho_h \leq 6.7\%$;
- Cường độ chịu nén bê tông: $5.2 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 70.3 \text{ MPa}$;
- Cường độ chảy dẻo cốt thép phần tử biên: $300 \text{ MPa} \leq f_{ybe} \leq 770 \text{ MPa}$;

- Cường độ chảy dẻo cốt thép theo phương đứng: $300 \text{ MPa} \leq f_{yv} \leq 770 \text{ MPa}$;
- Cường độ chảy dẻo cốt thép theo phương ngang: $314 \text{ MPa} \leq f_{yh} \leq 806 \text{ MPa}$.

Hình 1 minh họa các tham số kích thước hình học, vật liệu sử dụng và tải trọng tác dụng lên vách ngăn chữ nhật BTCT. Lưu ý rằng lực dọc tác dụng lên vách là đúng tâm. Biểu đồ phân bố của 312 bộ dữ liệu đầu vào được thể hiện trên hình 2. Ma trận tương quan giữa các tham số của bộ dữ liệu sử dụng được thể hiện trên hình 3. Bảng 2 mô tả các đặc trưng thống kê của các tham số đầu vào trong bộ dữ liệu thu thập. Các chỉ số thống kê bao gồm giá trị bé nhất (Min), giá trị lớn nhất (Max), giá trị trung bình (Mean), độ lệch chuẩn (SD) và hệ số biến động (CV).



Hình 2. Biểu đồ phân bố của bộ dữ liệu đầu vào.

4. Mô hình ANN

4.1. Cấu trúc mô hình ANN

ANN là một thuật toán học máy được xây dựng dựa trên mạng thần kinh sinh học. Hiện nay, nó được sử dụng rộng rãi do hiệu quả tính toán và tiện dụng trong quản lý và sử dụng thuật toán. Mạng perceptron nhiều lớp (MLP) là dạng thuật toán phổ biến nhất trong mô hình ANN.

Một MLP bao gồm nhiều nơ-ron (nút), các nơ-ron được phân chia thành ba lớp: lớp vào (input layer), một hoặc nhiều lớp ẩn (hidden layer) và lớp ra (output layer). Lớp vào cho phép tiếp nhận các thông số đầu vào của mạng, lớp ra là thể hiện kết

quả dự báo của mạng, còn lớp ẩn nằm giữa lớp vào và lớp ra thể hiện logic làm việc của mạng. Các nơ-ron chứa các trọng số (weight) và ngưỡng (threshold) tương ứng; các nơ-ron được kết nối với nhau để lan truyền tín hiệu từ lớp vào đến lớp ra. Ngoài ra, để truyền tín hiệu trong mạng cần có các hàm kích hoạt (activation function) hoặc hàm truyền. Trong nghiên cứu này, hàm phi tuyến *tansig* được sử dụng cho lớp ẩn và hàm tuyến tính *purelin* được dùng cho lớp ra. Hai hàm này được thể hiện theo các biểu thức (10) và (11) như sau:

$$y = \text{tansig}(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1 \quad (10)$$

$$y = \text{purelin}(x) = x \quad (11)$$

	<i>Hw</i>	<i>Lw</i>	<i>tw</i>	<i>ρbe</i>	<i>ρv</i>	<i>ρh</i>	<i>f'c</i>	<i>fybe</i>	<i>fyv</i>	<i>fyh</i>	<i>P</i>	<i>Vtest</i>
<i>Hw</i>	1.00	0.36	0.10	0.12	-0.05	-0.16	-0.08	0.10	0.07	0.02	0.05	-0.02
<i>Lw</i>	0.36	1.00	0.23	-0.17	-0.23	-0.15	-0.31	-0.04	-0.03	0.02	-0.19	0.40
<i>tw</i>	0.10	0.23	1.00	0.00	-0.01	0.14	0.37	0.37	0.33	0.31	0.01	0.80
<i>ρbe</i>	0.12	-0.17	0.00	1.00	0.18	0.01	0.01	0.06	0.05	0.04	0.00	0.06
<i>ρv</i>	-0.05	-0.23	-0.01	0.18	1.00	0.54	0.23	0.11	0.09	0.08	0.00	-0.03
<i>ρh</i>	-0.16	-0.15	0.14	0.01	0.54	1.00	0.17	0.17	0.14	0.11	0.01	0.19
<i>f'c</i>	-0.08	-0.31	0.37	0.01	0.23	0.17	1.00	0.32	0.29	0.26	0.14	0.33
<i>fybe</i>	0.10	-0.04	0.37	0.06	0.11	0.17	0.32	1.00	0.95	0.90	-0.19	0.30
<i>fyv</i>	0.07	-0.03	0.33	0.05	0.09	0.14	0.29	0.95	1.00	0.95	-0.19	0.26
<i>fyh</i>	0.02	0.02	0.31	0.04	0.08	0.11	0.26	0.90	0.95	1.00	-0.19	0.28
<i>P</i>	0.05	-0.19	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.14	-0.19	-0.19	-0.19	1.00	-0.05
<i>Vtest</i>	-0.02	0.40	0.80	0.06	-0.03	0.19	0.33	0.30	0.26	0.28	-0.05	1.00

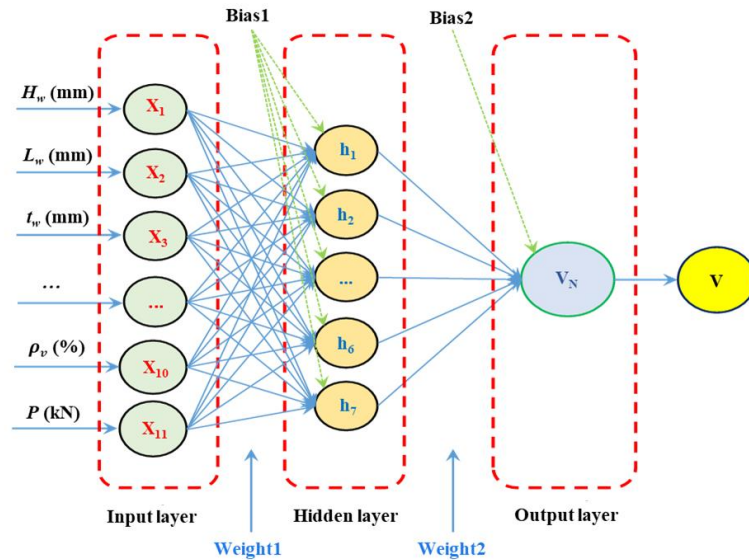
Hình 3. Ma trận tương quan giữa các tham số của bộ dữ liệu.

Mạng nơ-ron làm việc (huấn luyện) theo quy trình chung: Đầu tiên, khi lớp vào được xác định thì các trọng số được gán. Các trọng số này sẽ giúp xác định tầm quan trọng của các biến đầu vào. Tất cả các biến đầu vào được nhân với trọng số và sau đó được cộng lại. Tiếp đó, tín hiệu được truyền qua hàm kích hoạt để xác định đầu ra. Nếu đầu ra vượt quá giá trị ngưỡng thì nó sẽ kích hoạt nút và dữ liệu sẽ truyền đến lớp tiếp theo trong mạng. Kết quả đầu ra của một nút sẽ trở thành giá trị đầu vào của nút tiếp theo cho đến khi có kết quả dự báo cuối cùng ở lớp ra. Quy trình truyền dữ liệu từ lớp này sang lớp khác được gọi là mô

hình mạng chuyển tiếp (feedforward network). Trong quá trình huấn luyện mô hình, độ chính xác kết quả dự báo sẽ được kiểm soát thông qua sai số toàn phương trung bình (mean squared error - MSE). Giá trị MSE được tính toán theo công thức sau đây:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - t_i)^2 \quad (12)$$

Trong đó, N là tổng số mẫu dữ liệu, t_i and p_i tương ứng là các giá trị mục tiêu và giá trị dự báo của mẫu dữ liệu thứ i .



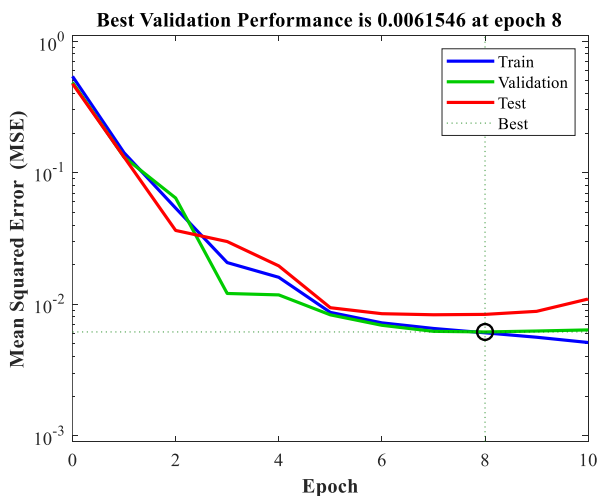
Hình 4. Cấu trúc mô hình ANN đề xuất.

Để tối ưu sự làm việc của mô hình ANN, cấu trúc hợp lý cần được xác định. Trong nghiên cứu này, phương pháp thử và sai được sử dụng để tìm được số lượng lớp ẩn và số nơ-ron trong mỗi lớp ẩn. Kết quả là cấu trúc một lớp ẩn với bảy nơ-ron được sử

dụng, như trên hình 4. Trong đó, tỷ lệ dữ liệu huấn luyện (train) chiếm 75%, còn 25% dữ liệu còn lại chia đều cho việc kiểm chứng (test) và phê chuẩn (validation).

Bảng 2. Đặc trưng thống kê của các tham số trong bộ dữ liệu.

Tham số	H_w (mm)	L_w (mm)	t_w (mm)	ρ_{be} (%)	ρ_v (%)	ρ_h (%)	f'_c (MPa)	f_{ybe} (MPa)	f_{yv} (MPa)	f_{yh} (MPa)	P (kN)	V_n (kN)
Min	500	600	60	0.0	0.0	0.0	5.2	300	300	314	0.0	83
Mean	1633	1691	131	3.2	0.9	0.6	30.8	487	488	483	226	717
Max	4691	5415	240	14.3	14.3	6.7	70.3	770	770	806	2978	2831
SD	758	863	48	3.4	1.6	0.6	11.5	87	88	88	407	650
COV	0.46	0.51	0.37	1.07	1.73	0.93	0.37	0.18	0.18	0.17	1.80	0.91

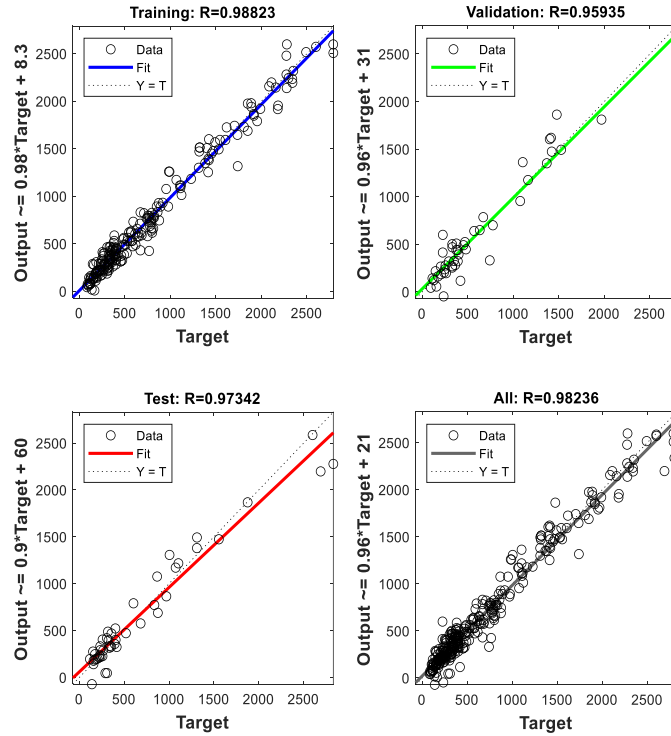


Hình 5. Sự làm việc của mô hình ANN.

4.2. Hiệu năng của mô hình ANN

Hình 5 thể hiện sự làm việc của mô hình ANN đề xuất với giá trị MSE giảm dần theo quá trình lặp tăng dần. Sự kiểm soát mức độ hợp lý của mô hình được xác định sau 08 vòng huấn luyện (epoch) với giá trị sai số MSE đạt 0.00615. Hình 6 biểu thị sự so sánh kết quả dự báo theo ANN và kết quả thí nghiệm cho các tập dữ liệu huấn luyện, kiểm chứng, phê chuẩn và tất cả dữ liệu. Qua đó cho thấy rằng kết quả dự báo từ mô hình ANN là rất sát với kết quả thí nghiệm cho các tập dữ liệu với hệ số R^2 xấp xỉ 0.97. Hay nói cách khác, ANN có hiệu năng cao và cho kết quả dự báo khả năng kháng cắt của vách BTCT rất đáng tin cậy.

5. So sánh kết quả dự báo của mô hình ANN và các công thức đề xuất



Hình 6. So sánh kết quả dự báo từ mô hình ANN với thí nghiệm.

5.1. Tham số đánh giá

Các tham số thống kê sử dụng cho đánh giá các mô hình dự báo bao gồm hệ số xác định (R^2) và sai số quân phương ($RMSE$). Lưu ý rằng giá trị R^2 đặc trưng cho phần trăm dữ liệu gần nhất với đường hồi quy; R^2 càng cao thì mô hình tính toán càng tốt và ngược lại. Còn tham số $RMSE$ là dùng để đại diện cho mức độ chênh lệch (sai số) giữa giá trị tính toán và giá trị thí nghiệm; nếu $RMSE$ càng bé thì mô hình tính toán càng chính xác và ngược lại.

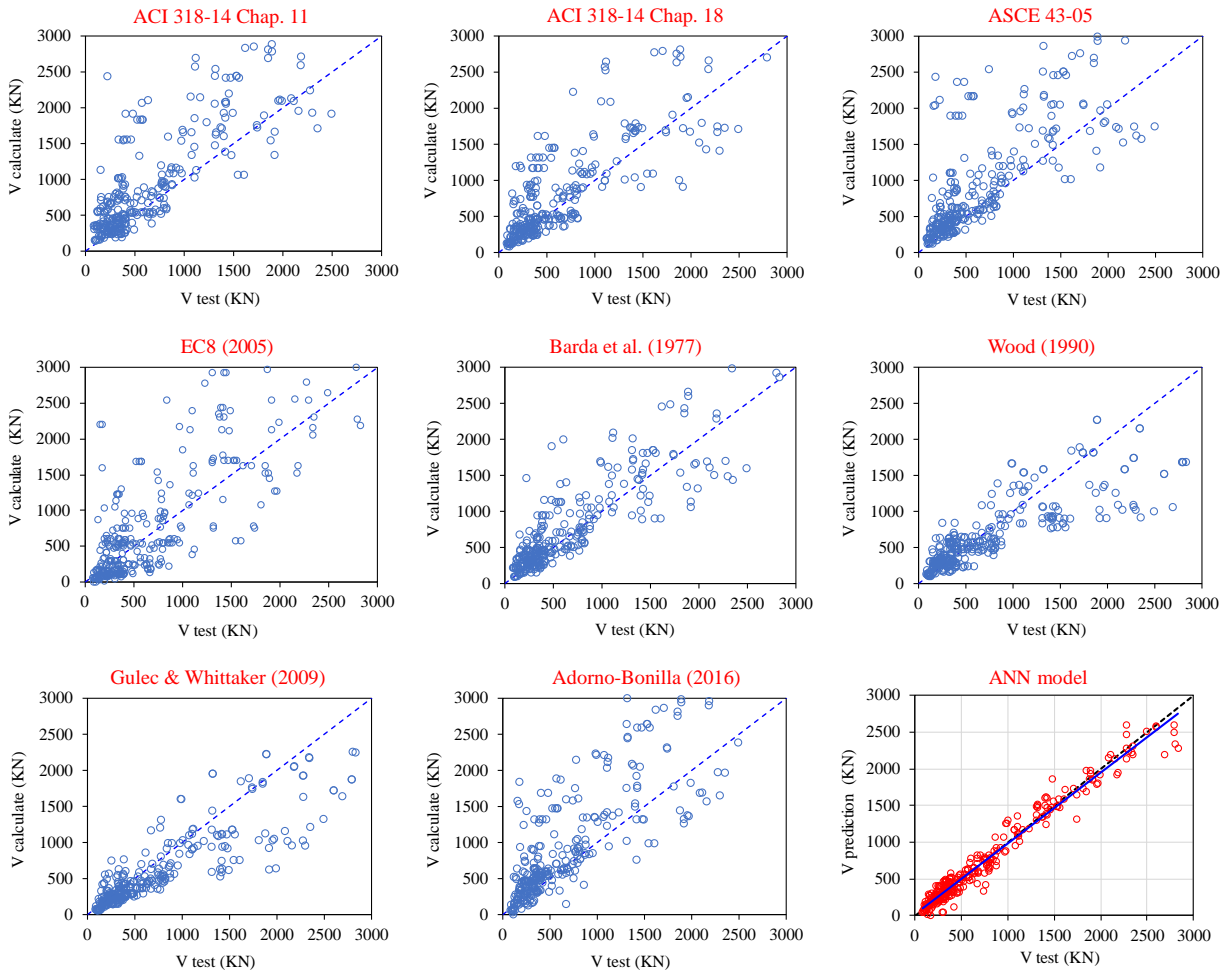
$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{o})^2} \right) \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \quad (14)$$

Trong đó t_i và o_i tương ứng là kết quả thí nghiệm và tính toán của dữ liệu thứ i ; n là số lượng dữ liệu; \bar{o} là giá trị trung bình của các kết quả tính toán.

5.2. Kết quả so sánh và đánh giá

Hình 7 thể hiện sự so sánh kết quả dự báo khả năng kháng cắt giữa kết quả thí nghiệm và theo 9 mô hình dự báo. Đường đứt (tức là đường 1:1) chính là đường mục tiêu, các số liệu dự báo nằm trên đường này sẽ bằng với kết quả thí nghiệm; dữ liệu càng gần với đường 1:1 thì độ chính xác của kết quả dự báo càng cao. Có thể nhận thấy rằng, mô hình ANN cho kết quả dự báo gần nhất với kết quả thí nghiệm so với các mô hình (công thức) khác. Ngoài ra, mô hình của Gulec-Whittaker [5] và Wood [3] cho phân bố dữ liệu kết quả tính toán gần với đường chuẩn 1:1 nhất trong 8 mô hình lý thuyết xem xét, tiếp đến là mô hình EC8 [10]. Kết quả tính toán từ các mô hình ACI 318 [8] và ASCE/SEI-43 [9] có sự phân tán khá lớn. Sự sai khác này có thể do việc xem xét sự có mặt của tỷ số hình dạng của vách và ảnh hưởng của phần tử biên (boundary element) ở vách đến cường độ chịu cắt.



Hình 7. So sánh khả năng kháng cắt giữa kết quả thí nghiệm và các mô hình dự báo.

Bảng 3 trình bày kết quả của các tham số thống kê R^2 và $RMSE$ cho từng mô hình tính toán. Ngoài ra, các đặc trưng thống kê của tỷ số giữa cường độ chịu cắt tính toán và cường độ chịu cắt theo thí nghiệm ($V_{calculate}/V_{test}$) cũng được tính toán để đánh giá. Các đặc trưng thống kê này bao gồm giá trị trung bình (mean) và độ lệch chuẩn (standard deviation). Kết quả từ bảng 3 cho thấy rằng, mô hình ANN dự báo khả năng kháng cắt của vách BTCT tốt nhất với giá trị R^2 cao nhất ($= 0.964$) và sai số quân phương $RMSE$ nhỏ nhất ($= 132$ kN). Bên cạnh đó, giá trị trung bình của tỷ số $V_{calculate}/V_{test}$ từ mô hình ANN bằng 1.01 (rất gần với 1.0) với độ lệch chuẩn rất bé ($= 0.252$).

Ngoài ra, kết quả tính toán cho thấy rằng mô hình tính toán của Gulec-Whittaker [5] cho khả năng kháng cắt tương đối tốt với giá trị $R^2 = 0.763$ và sai số quân phương $RMSE = 351$ kN. Điều này có thể được giải thích là công thức của

Gulec-Whittaker [5] đã xem xét phạm vi áp dụng cho vách ngăn BTCT. Tiếp theo đó là các mô hình tính toán của Wood [3] và tiêu chuẩn Châu Âu EC8 [10] lần lượt với giá trị R^2 bằng 0.705 và 0.666, và giá trị $RMSE$ lần lượt bằng 373 kN và 505 kN. Ngoài ra, một điều cần lưu ý rằng tỷ số $V_{calculate}/V_{test}$ của các mô hình này đều khá gần với 1.0, có nghĩa là giá trị trung bình tính toán tương đối gần với kết quả thí nghiệm. Trong khi đó, các mô hình tính toán còn lại cho kết quả dự báo với mức độ chính xác thấp hơn so với 3 mô hình (công thức) vừa nêu ở trên.

Như vậy, mô hình ANN đề xuất cho kết quả dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT tốt nhất, tiếp đến là mô hình của Gulec-Whittaker [5], Wood [3] và tiêu chuẩn EC8 [10]. Vì vậy, các kỹ sư có thể cân nhắc sử dụng mô hình ANN thay thế cho các công thức trong tiêu chuẩn thiết kế để tính toán dự báo khả năng kháng cắt của vách BTCT một cách nhanh chóng và chính xác.

Bảng 3. Tham số thống kê đánh giá các mô hình tính toán khả năng kháng cắt của vách BTCT.

TT	Mô hình tính toán	R^2	RMSE (kN)	Đặc trưng của tỷ số $V_{tính toán} / V_{thực nghiệm}$	
				Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
1	ACI 318 Ch. 11 [8]	0.361	1145	2.29	4.43
2	ACI 318 Ch. 18 [8]	0.631	660	1.15	1.33
3	ASCE 43 [9]	0.633	651	1.79	1.94
4	EC8 [10]	0.666	505	1.23	1.36
5	Barda và cộng sự [2]	0.498	661	1.66	2.63
6	Wood [3]	0.705	373	1.10	0.49
7	Gulec-Whittaker [5]	0.763	351	0.90	0.41
8	Adorno-Bonilla [7]	0.702	574	1.62	1.49
9	Mô hình ANN	0.964	132	1.01	0.252

6. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng mô hình ANN để dự báo khả năng kháng cắt của vách ngăn BTCT tiết diện chữ nhật. Bộ dữ liệu bao gồm 312 kết quả thí nghiệm từ các nghiên cứu trước đây đã được tập hợp để dùng cho việc huấn luyện mô hình ANN. Kết quả dự báo dựa trên mô hình ANN được so sánh với 08 công thức trong các tiêu chuẩn thiết kế và các nghiên cứu điển hình đã công bố trước đây. Các kết luận được rút ra như sau.

- Mô hình ANN đề xuất trong nghiên cứu này dự báo khả năng kháng cắt của vách BTCT chính xác hơn so với các công thức (mô hình) trong tiêu chuẩn thiết kế và nghiên cứu trước đây.

- Độ chính xác của các mô hình được đánh giá thông qua các tham số thống kê của tỷ số $V_{calculate}/V_{test}$, đó là R^2 , RMSE, giá trị trung bình và độ lệch chuẩn.

- Trong 08 công thức công thức đề xuất trước đây, công thức của Gulec-Whittaker [5] cho kết quả gần với thí nghiệm nhất, tiếp theo là công thức của Wood [3] và EC8 [10].

- Kết quả tính toán theo công thức ACI 318 [8] và ASCE 43-05 [9] có độ phân tán lớn hơn so với các mô hình khác.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Bộ giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài mã số “B2022-TDV-09”.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. K. Gulec, A. S. Whittaker, B. Stojadinovic; “Shear strength of squat rectangular reinforced concrete walls”. ACI Structural Journal. 2008; 105(4):488-497. DOI: 10.14359/19863.
- [2] F. Barda, J. M. Hanson, W. G. Corley; “Shear strength of low-rise walls with boundary elements”. Special Publication. 1977; 53:149-202. DOI: 10.14359/17697.
- [3] S. L. Wood; “Shear strength of low-rise reinforced concrete walls”. Structural Journal. 1990; 87:99-107. DOI: 10.14359/2951.
- [4] A. Sánchez-Alejandre, S. M. Alcocer; “Shear strength of squat RC walls subjected to earthquake loading—trends and models”. Engineering Structures. 2010; 32(8):2466-2476. DOI:10.1016/j.engstruct.2010.04.022.
- [5] C. K. Gulec, A. S. Whittaker; “Empirical Equations for Peak Shear Strength of Low Aspect Ratio RC Walls”. ACI Structural Journal. 2011; 108(1):80-89. DOI: 10.14359/51664205.
- [6] W. Kassem; “Shear strength of squat walls: A strut-and-tie model and closed-form design

- formula”. *Engineering Structures*. 2015; 84:430-438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.027.
- [7] C. M. Adorno-Bonilla; “Shear strength and displacement capacity of squat RC shear walls”. PhD dissertation, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico; 2016.
- [8] American Concrete Institute; “Building code requirements for structural concrete and commentary”; ACI 318-14; Michigan, USA; 2014.
- [9] American Society of Civil Engineers; “Seismic design criteria for structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities”. ASCE/SEI-43; Virginia, USA; 2005.
- [10] European Committee for Standardization; “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules”; EC8; 2005.
- [11] M. J. Moradi, M. A. Hariri-Ardebili; “Developing a library of shear walls database and the neural network based predictive meta-model”. *Applied Sciences*. 2019; 9(12):2562. DOI: 10.3390/app9122562.
- [12] D-D. Nguyen, V-L. Tran, D-H. Ha, V-Q. Nguyen, T-H. Lee; “A machine learning-based formulation for predicting shear capacity of squat flanged RC walls”. *Structures*. 2021; 29:1734-1747. DOI:10.1016/j.istruc.2020.12.054.
- [13] X. L. Chen, J. P. Fu, J. L. Yao, J. F. Gan; “Prediction of shear strength for squat RC walls using a hybrid ANN-PSO model”. *Engineering with Computers*. 2018; 34:367-383. DOI:10.1007/s00366-017-0547-5.
- [14] M. Tariq, A. Khan, A. Ullah, B. Zamin, K. R. Kashyzadeh, M. Ahmad; “Gene Expression Programming for Estimating Shear Strength of RC Squat Wall”. *Buildings*. 2022; 12(7):918. DOI:10.3390/buildings12070918.
- [15] T. A. Tran, J. W. Wallace; “Cyclic Testing of Moderate-Aspect-Ratio Reinforced Concrete Structural Walls”. *ACI Structural Journal*. 2015; 112(6):653-665. DOI:10.14359/51687907.
- [16] I. D. Lefas, M. D. Kotsovos, N. N. Ambraseys; “Behavior of RC structural walls: strength, deformation characteristics, and failure mechanism”. *Structural Journal*. 1990; 87(1):23-31. DOI:10.14359/2911.
- [17] S. Epackachi, A. S. Whittaker; “A validated numerical model for predicting the in-plane seismic response of lightly reinforced, low-aspect ratio RC shear walls”. *Engineering Structures*. 2018; 168:589-611. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.04.025.
- [18] A. E. Cardenas, H. G. Russell, W. G. Corley; “Strength of low-rise structural walls”. *Special Publication*. 1980; 63:221-242. DOI:10.14359/6653.
- [19] T. Terzioglu, K. Orakcal, L. M. Massone; “Cyclic lateral load behavior of squat reinforced concrete walls”. *Engineering Structures*. 2018; 160:147-160. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.01.024.
- [20] M. Del Carpio Ramos, A. S. Whittaker, C. K. Gulec; “Predictive equations for the peak shear strength of low-aspect ratio reinforced concrete walls”. *Journal of Earthquake Engineering*. 2012; 16(2):159-187. DOI:10.1080/13632469.2011.613529.
- [21] J. Ma, C. L. Ning, B. Li; “Peak Shear Strength of Flanged Reinforced Concrete Squat Walls”. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(4):04020037. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002575.
- [22] P. A. Hidalgo, C. A. Ledezma, R. M. Jordan; “Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls”. *Earthquake Spectra*. 2002; 18(2):287-308. DOI:10.1193/1.1490353.
- [23] L. M. Massone; “Strength prediction of squat structural walls via calibration of a shear-flexure interaction model”. *Engineering Structures*. 2010; 32(4):922-932. DOI:10.1016/j.engstruct.2009.12.018.
- [24] T. Salonikios, A. Kappos, I. Tegos, G. Penelis; “Cyclic load behavior of low-slenderness reinforced concrete walls: Design basis and test results”. *ACI Structural Journal*. 1999; 96(4):649-660. DOI:10.14359/703.
- [25] K. Pilakoutas, A. Elnashai; “Cyclic behavior of reinforced concrete cantilever walls, Part I: Experimental results”. *ACI Structural Journal*. 1995; 92(3):271-281. DOI:10.14359/1128.
- [26] P. Riva, A. Franchi; “Behavior of Reinforced Concrete Walls with Welded Wire Mesh Subjected to Cyclic Loading”. *ACI Structural Journal*. 2001; 98(3):324-334. DOI:10.14359/10221.

- [27] H. Park, J. Baek, J. Lee, H. Shin; “Cyclic Loading Tests for Shear Strength of Low-Rise RC Walls with Grade 550 MPa Bars”. *ACI Structural Journal*. 2015; 112(3):299-310. DOI:10.14359/51687406.
- [28] J. W. Baek, H. G. Park, J. H. Lee, C. J. Bang; “Cyclic loading test for walls of aspect ratio 1.0 and 0.5 with grade 550 MPa (80 ksi) shear reinforcing bars”. *ACI Structural Journal*. 2017; 114(4):969-982. DOI:10.14359/51689680.
- [29] M. Cheng, S. Hung, R. D. Lequesne, A. Lepage; “Earthquake-Resistant Squat Walls Reinforced with High Strength Steel”. *ACI Structural Journal*. 2016; 113(5):1065-1076. DOI:10.14359/51688825.
- [30] J. P. Rivera, A. S. Whittaker; “Damage and Peak Shear Strength of Low-Aspect-Ratio Reinforced Concrete Shear Walls”. *Journal of Structural Engineering*, 2019; 145(11):04019141. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002364.
- [31] Y. Zhang, Z. Wang; “Seismic behavior of reinforced concrete shear walls subjected to high axial loading”. *Structural Journal*. 2000; 97(5):739-750. DOI:10.14359/8809.
- [32] J. W. Wallace, K. J. Elwood, L. M. Massone; “Investigation of the axial load capacity for lightly reinforced wall piers”. *Journal of Structural Engineering*. 2008; 134(9):1548-1557. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:9(1548).
- [33] Y. L. Mo, J. Chan; “Behavior of reinforced-concrete-framed shear walls”. *Nuclear Engineering and Design*. 1996; 166(1):55-68. DOI: 10.1016/0029-5493(96)01244-7.
- [34] D. Palermo, F. J. Vecchio, H. Solanki; “Behavior of three-dimensional reinforced concrete shear walls”. *ACI Structural Journal*. 2002; 99(1):81-89. DOI: 10.14359/11038.
- [35] F. E. Farvashany, S. J. Foster, B. V. Rangan; “Strength and deformation of high-strength concrete shearwalls”. *ACI Structural Journal*. 2008; 105(1):21-29. DOI: 10.14359/19065.
- [36] N. C. Mickleborough, F. Ning, C. M. Chan; “Prediction of stiffness of RC shearwalls under service loads. *Structural Journal*. 1999; 96(6):1018-1026. DOI: 10.14359/778.
- [37] K. I. Christidis, K. G. Trezos; “Experimental investigation of existing non-conforming RC shear walls”. *Engineering Structures*. 2017; 140:26-38. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.02.063.