

Dự đoán sức kháng chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép bằng hồi quy quy trình Gaussian

■ TS. NGUYỄN THÙY ANH; THS. VŨ ĐÌNH PHIÊN

Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Mô hình hồi quy quy trình Gaussian (GPR) để dự đoán sức kháng chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép (BTCT) được đề xuất trong nghiên cứu này. Cơ sở dữ liệu gồm 207 kết quả thí nghiệm thu thập từ các tài liệu hiện có được sử dụng cho quá trình đào tạo và kiểm chứng mô hình GPR được đề xuất, với 5 thông số đầu vào (chiều dày có hiệu của sàn, cường độ nén của bê tông, cường độ chảy của thép, hàm lượng thép và kích thước cột tiết diện hình vuông). Thông số đầu ra của bài toán dự đoán là sức kháng chọc thủng của sàn. Ba chỉ số thống kê, cụ thể là hệ số xác định (R^2), căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE) và sai số tuyệt đối trung bình (MAE) được sử dụng để đánh giá hiệu suất của mô hình GPR thực hiện với 30 bước lặp. Kết quả của nghiên cứu này chỉ ra rằng, GPR cung cấp một phương pháp thay thế phù hợp để dự đoán sức kháng chọc thủng của sàn khi so sánh với kết quả thực nghiệm (RMSE = 100,875, MAE = 51,859, R^2 = 0,965). Để phân tích độ nhạy và mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến sức kháng chọc thủng của sàn BTCT, phân tích đồ thị phụ thuộc từng phần (PDP) được thực hiện. Kết quả của nghiên cứu này cho thấy mô hình GPR được đề xuất có khả năng dự đoán một cách nhanh chóng và chính xác, đồng thời xem xét được các yếu tố ảnh hưởng đến sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT.

TỪ KHÓA: Hồi quy quy trình Gaussian (GPR), sàn phẳng BTCT, sức kháng chọc thủng.

ABSTRACT: A Gaussian process regression model (GPR) to predict the punching shear strength of flat concrete slabs is proposed in this study. The model is developed using a database collected from 207 experiments available in the existing literature, with 5 input parameters (effective slab depth, concrete strength, reinforcement ratio, yield tensile strength of reinforcement, and width of square loaded area). The output parameter of the prediction problem is the punching shear strength. Three statistical indicators, namely the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and mean absolute error

(MAE) are used to evaluate the performance of the GPR model performed with 30 iterations. The results of this study indicate that GPR provides a suitable alternative to predict the punching shear strength of flat concrete slabs when compared with experimental results. To analyze the sensitivity and influence of the input parameters on the punching shear strength, partial dependence plots analysis is performed. The results of this study show that the proposed GPR model can predict quickly and accurately, and at the same time, consider the factors affecting the punching shear strength of flat concrete slabs.

KEYWORDS: Gaussian process regression (GPR), flat concrete slabs, punching shear strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu sàn phẳng BTCT hiện đang được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng cũng như các công trình giao thông do chúng có những ưu điểm về mặt kiến trúc, kết cấu và thi công. So với hệ sàn dầm, sàn phẳng có những ưu điểm vượt trội như cho phép tăng tương đối chiều cao thông tầng, tính thẩm mỹ cao, thi công nhanh, sử dụng không gian linh hoạt và giảm giá thành xây dựng [1]. Tuy nhiên, khi thiết kế kết cấu sàn phẳng, vấn đề thiết kế chống phá hoại chọc thủng giữa cột và sàn luôn được quan tâm đặc biệt vì đây là kiểu phá hoại giòn nguy hiểm. Khi đó, vật liệu làm việc ngoài miền đàn hồi, xuất hiện phá hoại không có hiện tượng báo trước, thép chịu uốn có thể chưa đạt đến giới hạn chảy, dẫn đến sập đổ cả mảng lớn sàn hay cả công trình.

Cho đến nay, đã có nhiều nghiên cứu đưa ra các mô hình nhằm xác định khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng BTCT [2,3]. Một số mô hình được đề cập đến như mô hình cơ học phá hoại chọc thủng theo điều kiện cân bằng, mô hình thanh dàn, mô hình phá hoại vùng dèo, mô hình uốn khi tính chọc thủng và mô hình vết nứt tới hạn và góc xoay. Bên cạnh đó, các nghiên cứu thực nghiệm và phương pháp số đã được thực hiện để xác định khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng BTCT [4]. Đồng thời, tiêu chuẩn thiết kế tương ứng với mỗi quốc gia cũng đã đề xuất công thức xác định sức kháng chọc thủng của sàn BTCT [5]. Tuy nhiên, công thức dự báo khả năng chống chọc thủng

của sàn phẳng BTCT dựa trên mô hình lý thuyết và thực nghiệm có sự khác nhau khá lớn do phải sử dụng những giả thiết nhất định [6]. Ngoài ra, công thức xác định sức kháng theo các tiêu chuẩn thiết kế cũng có sự khác nhau do hệ số đưa vào các công thức là khác nhau. Do đó, khả năng áp dụng các công thức này cho việc thiết kế chung là không tổng quát.

Gần đây, sự phát triển và ứng dụng của học máy trong lĩnh vực xây dựng và giao thông đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi [7]. Tận dụng cơ sở dữ liệu đã được thử nghiệm, các thuật toán học máy thể hiện khả năng đơn giản hóa các phương pháp tiếp cận cổ điển, chẳng hạn như phương pháp thử nghiệm hoặc mô phỏng số. Trong số các thuật toán học máy, hồi quy quy trình Gaussian (GPR) là một cách tiếp cận học tập hiệu quả và đáng tin cậy để mô hình hóa các ánh xạ hàm phức tạp và phi tuyến. Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá khả năng của mô hình hồi quy quy trình Gaussian trong việc mô hình hóa ước tính sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT, dựa trên bộ dữ liệu gồm 207 kết quả thí nghiệm được thu thập trên các tạp chí uy tín.

2. HỒI QUY QUY TRÌNH GAUSSIAN (GPR)

Hồi quy quy trình Gaussian (GPR) là một phương pháp tiếp cận Bayes, phi tham số để giải bài toán hồi quy. GPR có một số ưu điểm, hoạt động tốt trên các tập dữ liệu nhỏ và là một công cụ mạnh trong giải bài toán dự đoán với nền tảng toán học sử dụng xác suất Bayes. GPR được biểu diễn dưới dạng một quá trình Gaussian của hàm trung bình của nó, được ký hiệu là $m(x)$ và hàm hiệp phương sai, được ký hiệu là $k(x, x')$

$$f(x) = GP[m(x), k(x, x')] \quad (1)$$

Đối với GPR cơ bản, $m(x)$ được đặt bằng 0, ma trận hiệp phương sai mô tả cấu trúc và hình dạng của hàm. Mỗi quan hệ giữa các tham số đầu vào và biến đầu ra được định nghĩa là:

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (2)$$

where $\varepsilon = \mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$

Trong đó: ε - Nhiễu độc lập, σ_n^2 - Phương sai của nhiễu. Từ công thức (2), hàm xác suất nhận được là:

$$L(y|f) = \mathcal{N}(y|f, \sigma_n^2 \mathbf{I}) \quad (3)$$

Với:

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (4)$$

$$f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T \quad (5)$$

Phân phối biên $L(f)$ được xác định bởi một Gaussian với giá trị trung bình bằng 0 và ma trận hiệp phương sai dựa trên ma trận Gram theo mối quan hệ: $L(f) = \mathcal{N}(f|0, K)$, trong đó $K = k(x, x)$ là ma trận hiệp phương sai tương ứng với hàm hiệp phương sai k . Thuật ngữ "cận biên" được sử dụng để chỉ một mô hình phi tham số. Có thể thấy rằng, công thức (3) tuân theo phân phối của Gauss, do đó phân phối biên của y được xác định như sau:

$$L(y) = \mathcal{N}(y|f|0, K_y) \quad (6)$$

Trong đó: $K_y = K + \sigma_n^2 \mathbf{I}$. Đặt $f_* = f(x_*)$ là vector của các giá trị hàm tương ứng với các biến đầu vào x_* và ε_* là nhiễu tương ứng. Phân phối Gaussian được xác định là:

$$\begin{bmatrix} y \\ y_* \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} f \\ f_* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon_* \end{bmatrix} \right) \approx \mathcal{N} \left(0, \begin{bmatrix} K_y & K_* \\ K_*^T & K_{**} + \sigma_n^2 \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

Với: $K_* = [k(x_*, x_1), \dots, k(x_*, x_M)]^T$ và $K_{**} = k(x_*, x_*)$. Phân phối dự đoán $L(y_*|y)$ là phân phối Gauss, trong đó hàm trung bình và hàm hiệp phương sai được xác định như sau:

$$m(x_*) = K_*^T K_y^{-1} y \quad (8)$$

$$\sigma^2(x_*) = K_{**} - K_*^T K_y^{-1} K_* + \sigma_n^2 \quad (9)$$

Nghịch đảo của ma trận hiệp phương sai K_y có thể được xác định bằng cách sử dụng phép nhân tử hóa Cholesky. Hàm hiệp phương sai là một yếu tố rất quan trọng trong GPR, vì nó xác định tính tương tự của dữ liệu, có tác động lớn đến kết quả dự đoán.

Trong nghiên cứu này, độ chính xác của GPR được đánh giá bằng các tiêu chí thống kê thường được sử dụng, cụ thể, hệ số xác định (R^2), căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE) và sai số tuyệt đối trung bình (MAE). Các tiêu chí này là các tham số quan trọng trong phân tích hồi quy, nó diễn giải các mối quan hệ giữa đầu ra dự đoán và thực tế theo những cách khác nhau. Giá trị R^2 cao hơn cho thấy mối tương quan tốt, trong khi giá trị thấp hơn của RMSE và MAE cho thấy hiệu suất tốt hơn của thuật toán. Thông tin chi tiết và công thức của các tiêu chí này có thể được tìm thấy trong tài liệu [8].

3. CƠ SỞ DỮ LIỆU

Để xây dựng mô hình dự đoán sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT, bộ cơ sở dữ liệu gồm 207 kết quả thử nghiệm được thu thập từ các tài liệu khác nhau và được thể hiện trong phụ lục A của tài liệu tham khảo [9]. Các biến đầu vào ảnh hưởng đến khả năng kháng chọc thủng được xem xét trong nghiên cứu này bao gồm chiều dày có hiệu của sàn (d), cường độ nén của bê tông (f'_c), hàm lượng cốt thép (ρ), cường độ chảy của thép (f_y), kích thước cột tiết diện hình vuông (c). Sức kháng chọc thủng (V) là biến đầu ra của mô hình GPR. Phân tích định lượng các thông số đầu vào và đầu ra được trình bày chi tiết trong Bảng 3.1. Trong số tất cả các mẫu trong cơ sở dữ liệu, 145 mẫu thử nghiệm (chiếm 70% bộ dữ liệu) được chọn ngẫu nhiên sử dụng làm tập đào tạo và 62 mẫu còn lại (chiếm 30% bộ dữ liệu) được sử dụng để điều tra độ chính xác của mô hình GPR đã huấn luyện. Các giá trị của tham số đầu vào và đầu ra đều được chuẩn hóa trong khoảng giá trị từ 0 đến 1.

Bảng 3.1. Các tham số đặc trưng cho khả năng chống chọc thủng của sàn phẳng BTCT được sử dụng trong nghiên cứu

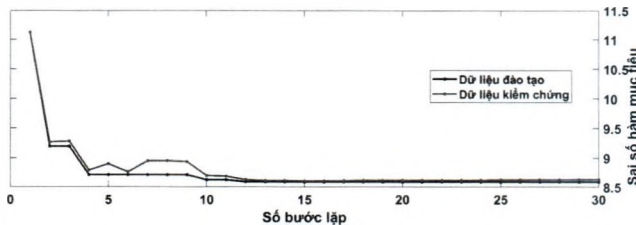
| | Min | Trung bình | Max | Độ lệch chuẩn |
|---|--------|------------|---------|---------------|
| Chiều dày có hiệu của sàn (d), mm | 35,00 | 121,32 | 500,00 | 74,82 |
| Cường độ nén của bê tông (f'_c), MPa | 14,20 | 43,48 | 119,00 | 23,34 |
| Cường độ chảy của thép (f_y), MPa | 294,00 | 472,71 | 720,00 | 95,75 |
| Hàm lượng cốt thép (ρ), % | 0,25 | 1,28 | 5,01 | 0,81 |
| Kích thước cột tiết diện hình vuông (c), mm | 80,00 | 197,92 | 520,00 | 80,18 |
| Sức kháng chọc thủng của sàn phẳng (V), kN | 29,00 | 476,34 | 2681,00 | 528,87 |

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả mô hình GPR tối ưu

Đối với quá trình huấn luyện mô hình AI nói chung cũng như mô hình GPR nói riêng, việc lựa chọn các siêu tham số là rất quan trọng để có được kết quả đầu ra đáng

tin cậy và có độ chính xác cao. Trong quá trình đào tạo, chu kỳ đưa tất cả các mẫu đào tạo qua mạng được gọi là một bước lặp. Quá trình huấn luyện sau đó được lặp lại cho đến khi lỗi trong đầu ra đạt giá trị chấp nhận được. Trong quá trình thực hiện các bước lặp, các siêu tham số được tự động tối ưu hóa và lựa chọn bằng cách sử dụng tối ưu hóa Bayes. Hình 4.1 cho thấy, quá trình tối ưu hóa cho các phần đào tạo và kiểm tra bằng cách sử dụng mô hình GPR, được đánh giá bằng sai số hàm mục tiêu. Có thể thấy rằng, từ bước lặp thứ 10, có sự hội tụ tốt của sai số hàm mục tiêu cho cả phần đào tạo và kiểm chứng và không có sự thay đổi đột ngột nào xảy ra trong quá trình tối ưu hóa. Cuối cùng, sự lặp lại tối ưu được quan sát ở 30 bước lặp, trong đó sai số đối với bộ dữ liệu đào tạo và kiểm chứng là thấp nhất. Kết quả tối ưu hóa các siêu tham số của mô hình GPR được lựa chọn tương ứng như sau: hàm hiệp phương sai là hàm Matern 3/2, hàm cơ sở là hàm tuyến tính và giá trị sigma được chọn bằng 11,585. Các giá trị tiêu chí thống kê của mô hình GPR được trình bày chi tiết trong Bảng 4.1 cho cả tập đào tạo và tập kiểm chứng.

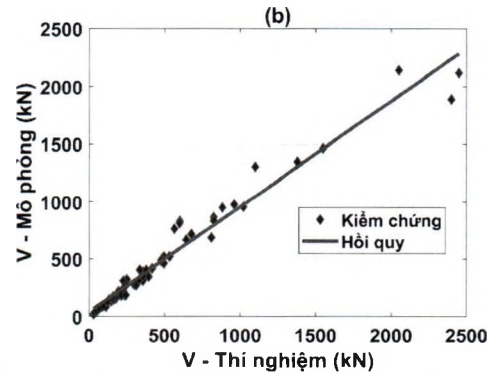
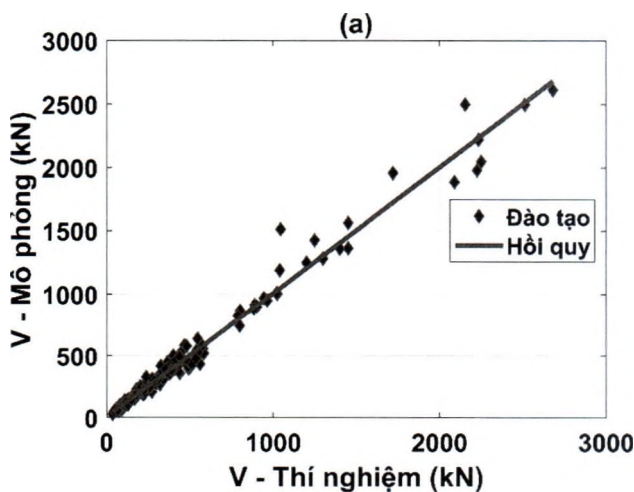


Hình 4.1: Đánh giá sai số hàm mục tiêu trong quá trình tối ưu hóa cho tập dữ liệu đào tạo (a) và tập dữ liệu kiểm chứng (b)

Bảng 4.1. Giá trị các tiêu chí đánh giá hiệu suất mô hình GPR cho tập dữ liệu đào tạo và kiểm chứng

| | RMSE | MAE | R ² |
|-------------------------------|---------|--------|----------------|
| Tập dữ liệu đào tạo | 73,360 | 41,720 | 0,980 |
| Tập dữ liệu kiểm chứng | 100,875 | 51,859 | 0,965 |

Mô hình hồi quy thể hiện cho mối tương quan giữa các giá trị sức kháng chọc thủng thực tế và dự đoán cho tập dữ liệu đào tạo và kiểm chứng được thể hiện trên Hình 4.2. Sự phù hợp tuyến tính cũng được áp dụng và vẽ biểu đồ trong từng trường hợp. Các giá trị của R² được tính cho phần đào tạo và phần kiểm chứng lần lượt là R² = 0,980 và R² = 0,965.

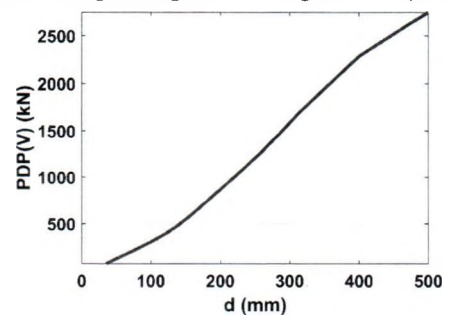


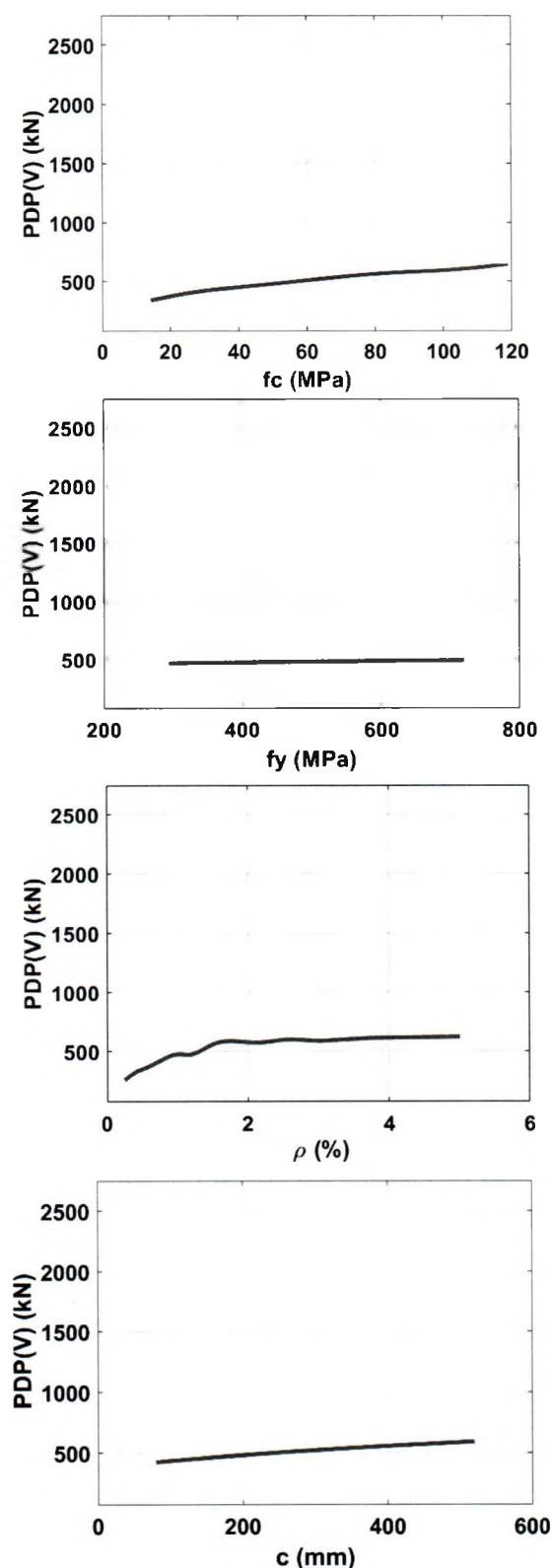
Hình 4.2: Phân tích hồi quy của mô hình GPR sau 30 bước lặp cho tập dữ liệu đào tạo (a) và tập dữ liệu kiểm chứng (b)

4.2. Phân tích ảnh hưởng của các tham số bằng PDP

Giá trị số sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT dự đoán theo mô hình GPR và mỗi biến đầu vào được chọn có mối quan hệ phụ thuộc với nhau, được ước tính hiệu quả bằng Biểu đồ phụ thuộc một phần (Partial dependence plots - PDP). PDP thể hiện mối quan hệ giữa hàm mục tiêu với lần lượt từng tham số đầu vào, mối quan hệ này có thể là tuyến tính, đơn điệu hay phức tạp. Tích phân của mỗi đường PDP được xác định như một chỉ số về tầm quan trọng để định lượng mức độ ảnh hưởng của mỗi tham số đầu vào đến giá trị mục tiêu. Phân tích PDP của 5 biến đầu vào được thể hiện trong Hình 4.3. Sử dụng mô hình GPR, ảnh hưởng của biến đầu vào đến sức kháng chọc thủng của sàn được thực hiện khi tất cả 4 thông số còn lại được cố định. Quan sát trên hình, nhận thấy chiều dày có hiệu của sàn (d) là thông số ảnh hưởng lớn nhất đến sức kháng chọc thủng của sàn (V). Mối quan hệ giữa d và V gần như tuyến tính và là một hàm đồng biến, khi d tăng thì V tăng. Theo biên độ biến thiên sức kháng chọc thủng của sàn, ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến sức kháng lần lượt là cường độ nén của bê tông, hàm lượng cốt thép và kích thước tiết diện của cột. Tuy nhiên, ảnh hưởng của các thông số này đến sức kháng không chênh nhau nhiều, đặc biệt là giữa cường độ nén của bê tông và hàm lượng cốt thép. Đối với thông số cường độ chảy của thép, đường biểu diễn PDP gần như là hàm hằng, điều này thể hiện sự thay đổi cường độ chảy của thép hầu như không ảnh hưởng đến sức kháng chọc thủng của sàn.

Qua phân tích theo PDP, có thể xác định được mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến sức kháng chọc thủng của sàn. Điều này giúp người kỹ sư trong quá trình thiết kế sơ bộ, có thể dựa vào các phân tích định tính và định lượng trên để xác định các yếu tố hình học cũng như vật liệu để tăng khả năng chống chọc thủng cho sàn phẳng BTCT.





Hình 4.3: Kết quả phân tích PDP cho các tham số sử dụng trong bài toán đối với V

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong nghiên cứu này, mô hình hồi quy quy trình Gaussian (GPR) được đề xuất để dự đoán sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT. Với mục đích này, cơ sở dữ liệu

gồm 207 kết quả thực nghiệm được thu thập từ các tài liệu có sẵn. Mô hình GPR được xây dựng với 5 tham số đầu vào liên quan đến kích thước hình học của sàn và đặc tính của vật liệu. Hiệu suất dự đoán của mô hình được đánh giá bằng 3 tiêu chí thống kê khác nhau, cụ thể là hệ số xác định (R^2), căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE) và sai số tuyệt đối trung bình (MAE) được sử dụng để xác nhận và đánh giá hiệu suất của mô hình GPR. Kết quả thu được cho thấy mô hình có độ tin cậy cao ($R^2 = 0,965$). Ngoài ra, phân tích độ nhạy cũng được thực hiện bằng PDP để đánh giá tầm quan trọng của các biến đầu vào. Kết quả phân tích độ nhạy cho thấy mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến sức kháng chọc thủng của sàn. Các kết quả nhận được cho thấy nghiên cứu này có thể giúp ích cho việc dự đoán nhanh chóng và chính xác cũng như xác định được ý nghĩa của các thông số đầu vào đến sức kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Maya, L.F., Ruiz, M.F., Muttoni, A., Foster, S.J. (2012), *Punching shear strength of steel fibre reinforced concrete slabs*, Engineering Structures, 40, 83-94.
- [2]. Marzouk, H., Rizk, E., Tiller, R. (2010), *Design of shear reinforcement for thick plates using a strut-and-tie model*, Canadian Journal of Civil Engineering, 37, 181-194.
- [3]. Rankin, G.I.B., Long, A.E. (1987), *PREDICTING THE ENHANCED PUNCHING STRENGTH OF INTERIOR SLAB-COLUMN CONNECTIONS*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 82, 1165-1186.
- [4]. Madenci, E., Guven, I. (2015), *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*, Springer.
- [5]. Committee, A.C.I. (2005), *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)*.
- [6]. Đinh Thị Như Thảo (2018), *Nghiên cứu khả năng kháng chọc thủng của sàn phẳng BTCT theo các tiêu chuẩn TCVN 5574:2012, EC-2 và ACI-318*, Tạp chí KH&CN, Đại học Đà Nẵng, số 7(128).
- [7]. Nguyen, H.Q., Ly, H.-B., Tran, V.Q., Nguyen, T.-A., Le, T.-T., Pham, B.T. (2020), *Optimization of Artificial Intelligence System by Evolutionary Algorithm for Prediction of Axial Capacity of Rectangular Concrete Filled Steel Tubes under Compression*, Materials. 13, 1205.
- [8]. Ly, H.-B., Monteiro, E., Le, T.-T., Le, V.M., Dal, M., Regnier, G., Pham, B.T. (2019), *Prediction and sensitivity analysis of bubble dissolution time in 3D selective laser sintering using ensemble decision trees*, Materials. 12, 1544.
- [9]. Mashrei, M.A., Mahdi, A.M. (2019), *An adaptive neuro-fuzzy inference model to predict punching shear strength of flat concrete slabs*, Applied Sciences. 9, 809.

Ngày nhận bài: 11/5/2021

Ngày chấp nhận đăng: 28/6/2021

Người phản biện: TS. Lâm Hữu Quang
TS. Trần Văn Quân