

Chuẩn đoán kết cấu bê tông cốt thép bị ăn mòn dựa trên mô hình lai ghép trí tuệ nhân tạo

Diagnosing corroded reinforced concrete structures based on hybrid artificial intelligence model

> TS NGUYỄN ĐĂNG TRINH¹, THS PHẠM ĐỨC THẮNG², THS.KTS NGUYỄN THANH HẢI¹

¹ Viện Quy hoạch Xây dựng miền Nam, Bộ Xây dựng

² Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM

TÓM TẮT

Một trong những nguyên nhân chính làm suy giảm độ bền kết cấu của kết cấu bê tông cốt thép là do ăn mòn các thanh cốt thép. Dự báo khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn đã được khảo sát từ góc độ thực nghiệm và lý thuyết. Hầu hết các công trình nghiên cứu đã được thực hiện bằng cách sử dụng các công thức thực nghiệm và mô hình dự đoán đơn lẻ. Nghiên cứu này sử dụng mô hình lai ghép giữa máy hỗ trợ véc tơ bình phương bé nhất với thuật toán tiến hóa vi phân trên môi trường tính toán của phần mềm Matlab. Mô hình được xây dựng và thử nghiệm trên bộ dữ liệu thu thập thực tế tại TP.HCM. Kết quả so sánh cho thấy rằng mô hình lai ghép có được hiệu suất dự đoán cao nhất trong việc ước tính cường độ còn lại của dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn so với các mô hình riêng lẻ. Nghiên cứu này cho thấy một ứng dụng của trí tuệ nhân tạo trong việc dự báo hiệu quả để ước tính độ bền kết cấu sớm trong việc lập kế hoạch bảo trì tòa nhà.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo; sự ăn mòn; mô hình lai ghép; khai phá dữ liệu.

ABSTRACT

One of the main causes of deterioration in structural strength of reinforced concrete structures is due to corrosion of reinforcing bars. Prediction of bearing capacity of reinforced concrete beams corroded has been investigated from experimental and theoretical perspectives. Most of the research work has been done using empirical formulas and single prediction models. This study uses a hybrid model between the least squares vector support machine and the differential evolution algorithm on the computing environment of Matlab software. The model is built and tested on a collected dataset in Ho Chi Minh City, Vietnam. The comparison results show that the hybrid model has the highest predictive performance in estimating the residual strength of corroded reinforced concrete beams compared with the individual models. This study demonstrates an effective predictive application of artificial intelligence for structural strength estimation early in building maintenance planning

Keywords: Artificial intelligence; corrosion; hybrid modeling; data mining

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) đã được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực công trình dân dụng, trong đó nhiều công trình đã xuống cấp. Ăn mòn cốt thép là một trong những tác động chủ yếu gây ra sự xuống cấp của kết cấu BTCT [1]. Theo quan niệm thiết kế, bê tông cốt thép là vĩnh cửu; tuy nhiên, các kết cấu bê tông cốt thép vẫn bị hư hỏng hoặc phá hủy nghiêm trọng do ăn mòn trong thực tế [2]. Quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông diễn ra theo hai giai đoạn chính: (1) giai đoạn các yếu tố ảnh hưởng xâm nhập vào bên trong bê tông cho đến khi bắt đầu xảy ra ăn mòn; (2) giai đoạn mà sự ăn mòn xảy ra mạnh mẽ cho đến khi cốt thép bị phá hủy đáng kể. Thông thường, một lớp oxit sắt được tạo ra trên bề mặt cốt thép và bên trong môi trường kiềm sẽ bảo vệ cốt thép [3]. Ăn mòn dẫn đến hư hỏng bê tông, như nứt, vỡ vò do giãn nở thể tích, làm giảm tiết diện cốt thép, sau đó làm suy giảm cường độ liên kết giữa bê tông [4, 5] và cốt thép [6, 7]. Do đó, việc tập trung vào đánh giá các kết cấu BTCT hiện có là rất quan trọng để dự đoán khả năng kết

cấu và sau đó xem xét một phương pháp bảo dưỡng tối ưu [8, 9].

Các phương pháp thông thường để dự đoán khả năng chịu uốn còn lại của dầm BTCT bị ăn mòn sử dụng phương pháp kiểm tra phá hủy hoặc mô hình số [10, 11]. Phương pháp phá hủy thường sử dụng dữ liệu quan sát được của các mẫu thí nghiệm trong phòng thí nghiệm. Các mẫu thử được kiểm tra các mức độ hư hỏng ăn mòn khác nhau. Cách tiếp cận này tốn nhiều thời gian vì các mẫu vật ít nhất cũng cần vài tháng để đạt được mức độ ăn mòn mong muốn. Hơn nữa, phương pháp này tiêu tốn chi phí cao và thiết bị thí nghiệm đặc biệt. Một thử nghiệm thường mất nửa năm để hoàn thành. Mặc dù các thử nghiệm có thể là một trong những cách tốt nhất để mang lại dữ liệu thực, nhưng các chi phí liên quan đôi khi khiến chúng không thể đạt được [12, 13].

Để khắc phục những hạn chế vốn có trong các phương pháp phá hủy, nhiều nghiên cứu đã sử dụng các phương pháp tiếp cận mô hình số [14]. Các mô hình số đã giảm thời gian hoàn thành và chi phí liên quan mà không làm giảm độ chính xác của ước tính [15].

Ăn mòn là một quá trình tự nhiên, chứa các thuộc tính phi tuyến [16]. Tuy nhiên, các phương pháp tiếp cận thực nghiệm bỏ qua các yếu tố phi tuyến tính này. Do đó, việc sử dụng quan hệ tuyến tính để mô hình hóa sự ăn mòn là không thỏa mãn. Nhiều mô hình được đề xuất đã chứng minh rằng độ chính xác của phương trình hồi quy phụ thuộc nhiều vào số lượng dữ liệu thực nghiệm [17]. Để tổng quát hóa các mô hình, các bộ dữ liệu bổ sung cần được thu thập. Tuy nhiên, việc thu thập dữ liệu mới để xây dựng một mô hình mới đòi hỏi một nỗ lực đáng kể và tốn nhiều thời gian.

Các mô hình trí tuệ nhân tạo (AI-artificial intelligence) đã được nổi lên như một công cụ sáng tạo để khắc phục cho những hạn chế của phương pháp thực nghiệm và lý thuyết trong việc giải quyết các vấn đề phi tuyến tính và không chắc chắn [18]. Các ứng dụng của AI đã được nghiên cứu rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau [19, 20]. Một số nghiên cứu đã chứng minh rằng kỹ thuật AI có khả năng xử lý các ứng xử phi tuyến [21] và mang lại độ chính xác cao về cường độ dư dự đoán của dầm BTCT bị ăn mòn [22]. Các biến thể khác của ML đã được đề xuất để xử lý các lĩnh vực khác nhau trong lĩnh vực xây dựng cũng như các lĩnh vực khác [23].

Nghiên cứu này đưa ra một phương pháp lai ghép trí tuệ nhân tạo mới để dự đoán cường độ dư của dầm BTCT bị ăn mòn. Mô hình được thiết lập bằng sự tích hợp của Máy vectơ hỗ trợ bình phương nhỏ nhất (LS-SVM) và thuật toán tối ưu cộng sinh tìm kiếm (SOS). LS-SVM là một kỹ thuật học máy tiên tiến sở hữu nhiều tính năng vượt trội thể hiện ở khả năng tổng quát hóa và tính toán nhanh. Trong khi đó, SOS [24], công cụ tìm kiếm dựa trên tập tìm kiếm, được triển khai để tối ưu hóa các thông số điều chỉnh cần thiết để xây dựng hệ thống dự đoán. Mô hình tổng hợp này sử dụng thuật toán logic chéo k-fold trên bộ dữ liệu đã được thu thập từ trước.

2. PHƯƠNG PHÁP

2.1 Máy vectơ hỗ trợ bình phương nhỏ nhất (LS-SVM)

Đề xuất bởi Suykens, Gestel [25], LSSVR (least squares support vector regression) giả định rằng một tập dữ liệu $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ có thể được biểu diễn dưới dạng một hàm phi tuyến tính và một hàm quyết định, như trong phương trình (1).

$$y(x) = \omega^T \phi(x) + b \quad (1)$$

trong đó $x \in R^n$, $y \in R$, ω là trọng số vec tơ; ϕ là hàm phi tuyến ánh xạ đầu vào tới không gian đa chiều; và b là phần dư.

Trong một bài toán dự đoán, hàm R được xây dựng dưới dạng tối ưu hóa có ràng buộc, như trong phương trình (2).

$$\text{Cực tiểu hóa: } R(\omega, \varepsilon, b) = \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Ràng buộc: } y_i = \omega^T \phi(x_i) + b + \varepsilon_i; \quad i = 1, \dots, n$$

trong đó C biểu thị hằng số chính quy, phải được người dùng xác định và cung cấp trọng số của phần thứ hai so với phần đầu tiên và ε_i là phần lỗi của dữ liệu huấn luyện.

Phương trình (3) mô tả kết quả mô hình LSSVR cho hàm hồi quy. Phương trình (4) cho thấy hàm nhân, là một hàm cơ sở bán kính (RBF); đây là một hàm phổ biến thường được sử dụng để giải các bài toán dự đoán.

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \xi_i K(x_i, x_k) + b \quad (3)$$

$$K(x_i, x_k) = \exp\left(\frac{\|x_i - x_k\|^2}{2\gamma^2}\right) \quad (4)$$

trong đó ξ_k và b là một phần của nghiệm của hệ tuyến tính, γ là một tham số hàm nhân. Theo đó, để cải thiện hiệu suất của mô hình LSSVR, giá trị của hai tham số điều chỉnh (C , γ) phải được xác định. Do đó, thuật toán tối ưu SOS được sử dụng để tìm các giá trị phù hợp của C và γ .

2.2 Thuật toán cộng sinh tìm kiếm (SOS)

Thuật toán SOS (symbiotic organisms search) là một thuật toán

metaheuristic hiệu quả được phát triển bởi Cheng and Prayogo [26] vào năm 2014 và đã được sử dụng thành công để giải quyết nhiều vấn đề kỹ thuật [27, 28]. SOS được lấy cảm hứng từ sự tương tác cộng sinh giữa các cặp sinh vật trong tự nhiên. Ba bước chính của thuật toán SOS, tương ứng với ba kiểu tương tác cộng sinh trong tự nhiên, như sau.

Trong giai đoạn tương hỗ, hai sinh vật liên quan đến các mối quan hệ cùng có lợi để tăng xác suất sống sót của chúng trong hệ sinh thái. Các phương trình sau tạo ra các giải pháp mới.

$$x_{i,new} = x_i + \text{rand}(0,1) * \left[x_{best} - \left(\frac{x_i + x_j}{2} \right) * (1 + \text{round}(\text{rand}(0,1))) \right] \quad (5)$$

$$x_{j,new} = x_j + \text{rand}(0,1) * \left[x_{best} - \left(\frac{x_i + x_j}{2} \right) * (1 + \text{round}(\text{rand}(0,1))) \right] \quad (6)$$

$$x_i = \begin{cases} x_i & f(x_i) \leq f(x_{i,new}) \\ x_{i,new} & f(x_i) > f(x_{i,new}) \end{cases} \quad (7)$$

$$x_j = \begin{cases} x_j & f(x_j) \leq f(x_{j,new}) \\ x_{j,new} & f(x_j) > f(x_{j,new}) \end{cases} \quad (8)$$

trong đó x_i và x_j lần lượt là sinh vật thứ i và thứ j trong hệ sinh thái với $i \neq j$; x_{best} đại diện cho sinh vật hiện đang thích nghi tốt nhất với hệ sinh thái; $x_{i,new}$ và $x_{j,new}$ lần lượt là giải pháp mới của x_i và x_j , và $f(x_i)$ và $f(x_j)$ lần lượt là giá trị hàm mục tiêu của x_i và x_j .

Trong giai đoạn liên kết, tương tác giữa hai sinh vật có lợi cho sinh vật trước và độc lập với nhau. Các quy tắc sau đây mang lại các giải pháp mới trong tương tác chung.

$$x_{i,new} = x_i + \text{rand}(-1,1) * (x_{best} - x_j) \quad (9)$$

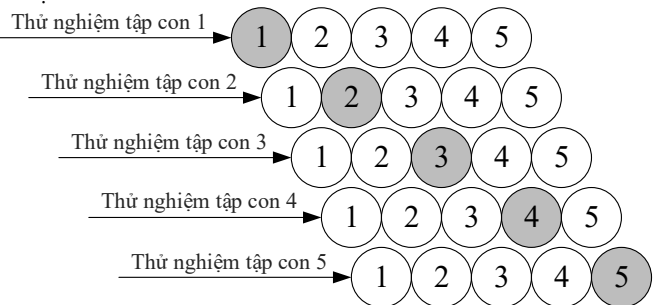
Giai đoạn ký sinh liên quan đến sự tương tác giữa hai sinh vật trong đó ký sinh trùng được hưởng lợi từ việc gây hại cho vật chủ. Vectơ ký sinh trùng được tính như sau.

$$x_i = \begin{cases} x_i & \text{nếu } \text{rand}(0,1) \leq \text{rand}(0,1) \\ LB + \text{rand}(0,1) * (UB - LB) & \text{nếu } \text{rand}(0,1) > \text{rand}(0,1) \end{cases} \quad (10)$$

trong đó LB (giới hạn dưới) và UB (giới hạn trên) biểu thị các giới hạn biên tương ứng của vấn đề cần giải quyết.

2.3 Phương pháp xác thực chéo k-fold

Các nghiên cứu thường áp dụng thuật toán xác thực chéo k lần để giảm thiểu sai số liên quan đến lấy mẫu ngẫu nhiên của việc huấn luyện. Kohavi đã xác nhận rằng thử nghiệm 5 lần đem lại thời gian tính toán và phương sai tối ưu [29]. Phương pháp này phân chia tập mẫu dữ liệu thành 5 tập con, tiến hành xây dựng và xác thực mô hình 5 lần, chọn 1 tập dữ liệu khác để kiểm tra, huấn luyện mô hình bằng 4 tập dữ liệu và sử dụng tập còn lại để kiểm tra tính chính xác của mô hình được minh họa ở hình 1. Độ chính xác của mô hình được tính bằng độ chính xác trung bình của 5 mô hình trong 5 lần xác thực.



Hình 1. Phương pháp xác thực chéo 5 lần

2.4 Phương pháp đánh giá hiệu suất

Để đánh giá độ chính xác của quá trình dự đoán của các mô hình

lai ghép đề xuất và mô hình so sánh, các phương pháp sau đã được sử dụng:

- Phần trăm sai số trung bình tuyệt đối

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y - y'}{y} \right| \quad (11)$$

- Sai số trung bình tuyệt đối

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - y'| \quad (12)$$

- Sai số toàn phương trung bình

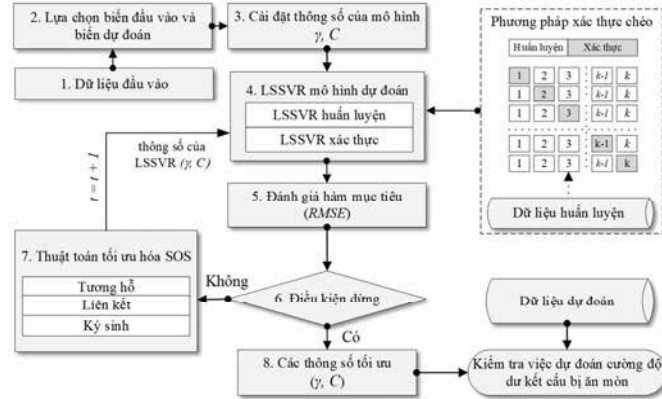
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y' - y)^2} \quad (13)$$

trong đó y' là giá trị dự đoán; y là giá trị thực tế; và n là số lượng mẫu dữ liệu

3. MÔ HÌNH LAI GHPHÉP

3.1 Cấu trúc mô hình

Mô hình lai ghép được thiết lập bằng cách kết hợp LSSVR và SOS. LSSVR có chức năng chính là dự đoán, SOS dùng để tìm kiếm các thông số tối ưu của mô hình dự đoán nhằm tăng hiệu quả mô hình. Hình 2 minh họa mô hình lai ghép cho việc chuẩn đoán cường độ dư kết cấu bị ăn mòn.



Hình 2. Cấu trúc mô hình lai ghép

3.2 Mô tả và chuẩn bị dữ liệu

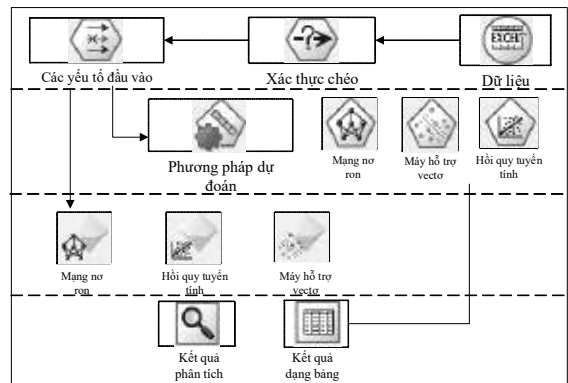
Trong phần này, nguồn dữ liệu khảo sát thực tế của 39 công trình với 120 dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn nằm rải rác khắp địa bàn TP.HCM. Đặc điểm chung các công trình là chung cư, nơi ở tập thể, số tầng cao dao động từ 2 đến 7 tầng được xây dựng phần lớn trước năm 1975. Trải qua khoảng thời gian từ khi xây dựng đưa vào sử dụng đến nay, các công trình khảo sát hiện tại hệ kết cấu bê tông cốt thép gần như xuống cấp trầm trọng mà đặc biệt là dầm bê tông cốt thép. Bộ dữ liệu được ghi nhận thực tế này, do đơn vị Trung tâm quản lý nhà và giám định xây dựng thuộc sở xây dựng TP.HCM khảo sát từ năm 2016 đến nay.

Bảng 1. Mô tả dữ liệu

Mô tả	Biến	Nhỏ nhất	Lớn nhất	Trung bình
Chiều dài của dầm bị ăn mòn (L) - mm	X1	1000.00	5300.00	3456.25
Chiều rộng của dầm bị ăn mòn (B) - mm	X2	95.00	294.86	176.48
Chiều cao của dầm bị ăn mòn (H) - mm	X3	195.00	498.34	317.50
Tải đều (P) - kN / m	X4	2.72	39.73	16.70
Cường độ bê tông còn lại (R) - daN / cm ²	X5	144.00	230.00	183.60
Diện tích cốt thép dầm bị ăn mòn (As) - mm ²	X6	661.37	962.11	782.57
Mômen giới hạn của dầm bị ăn mòn [M] - kN.cm	Y	92.41	2100.06	979.29

3.3 Cấu trúc mô hình so sánh

Để xác nhận hiệu suất của mô hình lai ghép đề xuất, hiệu suất của nó được so sánh với các phương pháp tiếp cận được chuẩn hóa khác. Cần lưu ý rằng mô hình mới được xây dựng bao gồm LS-SVM và SOS. Để xác nhận tính ưu việt của mô hình lai ghép được đề xuất, ba mô hình học máy khác, đó là mạng nơ ron nhân tạo (ANN), máy hỗ trợ vec tơ (SVM), và mô hình hồi quy (LR) được sử dụng để so sánh kết quả. Các thông số đầu vào của mô hình so sánh được thiết lập mặc định trong quá trình huấn luyện và thử nghiệm nhằm đảm bảo cho mô hình hoạt động một cách khách quan, dễ dàng và thỏa mãn về mức độ hoạt động và độ chính xác. Hình 3 minh họa các bốn bước dùng mô hình so sánh để dự đoán cường độ dư kết cấu bị ăn mòn bằng phần mềm SPSS của IBM [30]. (1) Nhập dữ liệu đầu vào nút nguồn dựa trên thuật toán xác thực chéo. (2) Sử dụng nút dự đoán số để đào tạo dữ liệu. (3) Sử dụng mô hình để kiểm tra dữ liệu. (4) Đánh giá phân tích thông qua bảng kết quả.



Hình 3. Cấu trúc các mô hình so sánh

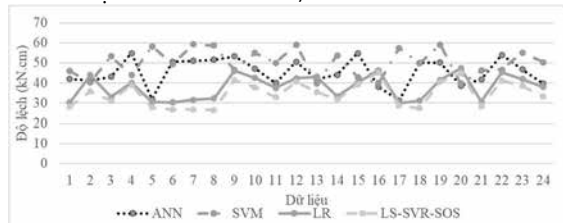
4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Phần này đưa ra kết quả phân tích và so sánh hiệu suất mô hình kết hợp với ba mô hình dự đoán đơn được đề xuất thông qua các chỉ tiêu đánh giá. Từ kết quả xếp hạng hiệu suất ta kết hợp các mô hình đơn với nhau nhằm tăng hiệu quả dự đoán.

Bảng 2: Tổng hợp kết quả thử nghiệm của các mô hình

Mô hình	MAPE(%)	MAE (kN.cm)	RMSE (kN.cm)
LS-SVR-SOS	6.5181	0.0198	0.0284
ANN	11.8332	0.0323	0.0451
SVM	17.6145	0.0519	0.0652
LR	8.6418	0.0233	0.0341

Bảng 2 trình bày kết quả của mô hình lai ghép LS-SVR-SOS và các mô hình so sánh như ANN, SVM và LR. Các mô hình có khả năng dự đoán cường độ dư của kết cấu bị ăn mòn với độ chính xác cao. Kết quả so sánh cho thấy LS-SVR-SOS là mô hình tốt nhất trong số tất cả các mô hình dự báo để ước tính khả năng còn lại của các kết cấu BTCT bị ăn mòn với giá trị tốt nhất của RMSE, MAE và MAPE. Xếp theo sau lần lượt là các mô hình LR, ANN và SVM.



Hình 4. Độ lệch tuyệt đối kết quả của các mô hình AI cho lần thử nghiệm tốt nhất

Hình 4 vẽ biểu đồ giá trị tuyệt đối của sự khác biệt giữa dữ liệu dự đoán và dữ liệu quan sát được trong lần thử nghiệm tốt nhất về độ bền của kết cấu dầm bị ăn mòn, được tìm được bởi mô hình lai ghép và các mô hình đơn so sánh. Như thể hiện trong Hình 4, sai số tuyệt đối lớn nhất giữa ước tính và quan sát thực tế được tìm thấy bởi mô hình so sánh là 59.25 kN.cm, trong khi sai số thu được khi sử dụng mô hình lai ghép chỉ là 26.53 kN.cm. Sự khác biệt không đáng kể này đã chứng minh rằng các mô hình đề xuất có khả năng dự đoán đầy đủ về độ bền uốn còn lại của dầm BTCT bị ăn mòn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một phương pháp lai ghép trí tuệ nhân tạo mới để ước tính khả năng của các kết cấu BTCT bị ăn mòn. 120 dữ liệu được thu thập từ các tòa nhà dân dụng thực tế tại TP.HCM và được áp dụng để phát triển các mô hình dự báo. Phương pháp xác thực chéo 5 lần được thực hiện để giảm bớt sự sai lệch trong việc so sánh kết quả dự đoán. Các kết quả thử nghiệm và so sánh đã chứng minh rằng mô hình lai ghép LS-SVM-SOS thể hiện hiệu suất tốt nhất để ước tính cường độ của dầm BTCT bị ăn mòn so với các mô hình đơn lẻ. Những thực tế này chứng minh tiềm năng mạnh mẽ của các mô hình lai ghép như một công cụ hữu ích cho các nhà quản lý xây dựng trong việc bảo trì công trình.

Những đóng góp chính của nghiên cứu này được nêu là (1) phát triển mô hình lai ghép và các mô hình riêng lẻ khác nhau có thể dự đoán khả năng chịu lực của các dầm BTCT bị ăn mòn. (2) Ưu điểm của các mô hình máy học đã được nêu bật trong việc quản lý cấu trúc của các tòa nhà cũ. (3) Cung cấp bộ dữ liệu thực được thu thập không chỉ để kiểm chứng mô hình đề xuất mà còn làm tài liệu cho các nghiên cứu về sau. (4) Kết quả của nghiên cứu có thể giúp các hệ thống quản lý tòa nhà hoạt động tốt, và do đó dẫn đến cải thiện tuổi thọ của kết cấu và giảm chi phí bảo trì.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Công ty CP Công nghệ và xây dựng Việt Hàn và Viện Quy hoạch Xây dựng miền Nam trong khuôn khổ Đề tài mã số **V-01-2022**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Liu, J., et al., *Effect of Stirrup Corrosion and Fire on Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021.
- Reshvanlou, B.A., K. Nasserzadeh, and J. Ahmadi, *Modified Time-Dependent Model for Flexural Capacity Assessment of Corroded RC Elements*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021.
- Anh, T.n.H.i., N.n.H.n. Giang, and N.N. Tân, *Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường kháng uốn của dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn bằng tấm sợi composite CFRP*. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN, 2021. **15**(1V): p. 1-16.
- Yang, Y., et al., *Effect of corrosion-induced crack and corroded rebar shape on bond behavior*. Structural Concrete, 2019. **20**(6): p. 2171-2182.
- Zhou, H., et al., *Effects of stirrup corrosion on bond-slip performance of reinforcing steel in concrete: An experimental study*. Construction and Building Materials, 2015. **93**: p. 257-266.
- Song, L., Z. Fan, and J. Hou, *Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019. **13**(1): p. 24.
- Lachemi, M., et al., *The effect of corrosion on shear behavior of reinforced self-consolidating concrete beams*. Engineering Structures, 2014. **79**: p. 1-12.
- Lin, H. and Y. Zhao, *Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars*. Construction and Building Materials, 2016. **118**: p. 127-138.
- El-Sayed, A.K., *Shear capacity assessment of reinforced concrete beams with corroded stirrups*. Construction and Building Materials, 2017. **134**: p. 176-184.
- Biswas, R.K., et al., *Effect of non-uniform rebar corrosion on structural performance of RC structures: A numerical and experimental investigation*. Construction and Building Materials, 2020. **230**: p. 116908.

- Nguyễn, N.Đ. and N.N. Tân, *Dự báo khả năng chịu lực còn lại của cột BTCT chịu nén lệch tâm phẳng có cốt thép dọc bị ăn mòn*. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN, 2019. **13**(2V): p. 53-62.
- Jnaid, F. and R.S. Aboutaha, *Residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams*. Engineering Structures, 2016. **119**: p. 198-216.
- Ninh, N.T., et al., *Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh (GFRP) bị ăn mòn bởi ion clorua*. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN, 2021. **15**(3V): p. 16-26.
- Lu, Z.-H., et al., *Empirical model of corrosion rate for steel reinforced concrete structures in chloride-laden environments*. Advances in Structural Engineering, 2019. **22**(1): p. 223-239.
- Azad, A.K., S. Ahmad, and B.H.A. Al-Gohi, *Flexural strength of corroded reinforced concrete beams*. Magazine of Concrete Research, 2010. **62**(6): p. 405-414.
- Lu, Z.-H., et al., *Novel empirical model for predicting residual flexural capacity of corroded steel reinforced concrete beam*. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020. **14**(4): p. 888-906.
- Lu, Z.-H., et al., *An empirical model for the shear strength of corroded reinforced concrete beam*. Construction and Building Materials, 2018. **188**: p. 1234-1248.
- Liao, S.-H., P.-H. Chu, and P.-Y. Hsiao, *Data mining techniques and applications – A decade review from 2000 to 2011*. Expert Systems with Applications, 2012. **39**(12): p. 11303-11311.
- Ahmadi, M., H. Naderpour, and A. Kheyroddin, *ANN Model for Predicting the Compressive Strength of Circular Steel-Confined Concrete*. International Journal of Civil Engineering, 2017. **15**(2): p. 213-221.
- Hoàn, P.T., *Ước lượng khả năng chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông bằng thuật toán máy học*. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN, 2021. **15**(3V): p. 69-78.
- Imam, A. and Z.A. Kazmi, *Modified regression and ANN model for load carrying capacity of corroded reinforced concrete beam*. AIMS Materials Science, 2020. **4**(5): p. 1140-1164.
- Imam, A., F. Anifowose, and A.K. Azad, *Residual Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams Using an Adaptive Model Based on ANN*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015. **9**(2): p. 159-172.
- Học, T.Đ. and L.T. Tài, *Tối ưu hóa ước tính mức tiêu thụ năng lượng trong các tòa nhà dựa trên các thuật toán trí tuệ nhân tạo*. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXD, 2020. **14**(1V): p. 35-45.
- Cheng, M.-Y. and D. Prayogo, *Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm*. Computers & Structures, 2014. **139**(0): p. 98-112.
- Suykens, J.A.K., et al., *Least Squares Support Vector Machines*. 2002: World Scientific Publishing Company. 308.
- Cheng, M.-Y. and D. Prayogo, *Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm*. Computers & Structures, 2014. **139**: p. 98-112.
- Ezugwu, A.E. and D. Prayogo, *Symbiotic organisms search algorithm: Theory, recent advances and applications*. Expert Systems with Applications, 2019. **119**: p. 184-209.
- Cheng, M., D. Prayogo, and D. Tran, *Optimizing Multiple-Resources Leveling in Multiple Projects Using Discrete Symbiotic Organisms Search*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015: p. 04015036.
- Kohavi, R., *A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection*. 1995.
- IBM. *PASW Modeler*. NY: IBM Cororation. USA, 2010.