

Dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén sử dụng phương pháp mạng nơ ron nhân tạo

Estimating the fire resistance of reinforced concrete column subjected to compression using an artificial neural network

> TRỊNH MINH QUANG¹, NGUYỄN DUY HƯNG², NGUYỄN LƯU UY³, NGUYỄN DUY LIÊM⁴, TRẦN NGỌC THANH^{2*}

¹SV Viện Xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM

²GV Viện Xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM; *Tác giả chịu trách nhiệm, Email: ngocthanh.tran@ut.edu.vn

³HVCH Viện Xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM

⁴GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TP.HCM

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đã phát triển mô hình mạng nơ ron nhân tạo (ANN) để dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén. Tổng cộng 374 kết quả thí nghiệm được thu thập với 12 thông số đầu vào khác nhau bao gồm: cường độ chịu nén, lớp bê tông bảo vệ, chiều dài cột, bề rộng tiết diện cột, chiều cao tiết diện cột, điều kiện biên, tải trọng tác dụng, độ lệch tâm của tải trọng, hàm lượng cốt thép, số cốt thép, đường kính cốt thép, và cường độ chảy của thép. Thêm nữa, một phần mềm được xây dựng để dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén bằng cách tích hợp dữ liệu dự đoán của mô hình. Kết quả nghiên cứu cho thấy, mô hình ANN có khả năng dự đoán tốt sức kháng lửa trong giai đoạn huấn luyện với giá trị hệ số R là 0.94 và giá trị RMSE là 23 phút. Trong giai đoạn kiểm tra, mô hình ANN dự đoán tương đối tốt với giá trị hệ số R khoảng 0.78 và giá trị RMSE khoảng 59 phút. Kết quả phân tích độ nhạy cho thấy chiều cao tiết diện cột có tác động đáng kể nhất đến sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén. Bên cạnh đó, phần mềm dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén được phát triển có giao diện đơn giản, dễ sử dụng, và thao tác nhanh.

Từ khóa: Cột bê tông cốt thép; chịu nén; sức kháng cháy; mạng nơ ron nhân tạo; phân tích độ nhạy.

ABSTRACT

This study aims to develop an artificial neural network (ANN) model for predicting the fire resistance of reinforced concrete columns subjected to compression. A total of 374 experimental test results, incorporating 12 input parameters, were collected. These parameters include compressive strength, concrete cover, column length, cross-section width, cross-section height, boundary conditions, compressive load, load eccentricity, longitudinal reinforcement ratio, number of reinforcements, diameter of reinforcements, and yield strength of reinforcements. Additionally, a software tool was developed to predict the fire resistance of reinforced concrete columns by integrating the ANN model's estimated dataset. The results showed that the ANN model effectively predicted fire resistance in the training set, achieving an R value of 0.94 and an RMSE of 23 minutes. In the testing set, the model demonstrated acceptable accuracy, with an R value of 0.78 and an RMSE of 59 minutes. Sensitivity analysis revealed that the cross-section height was the most important parameter influencing fire resistance. Furthermore, the developed software was found to be simple, user-friendly, and efficient.

keywords: Reinforced concrete column; compression; fire resistance; artificial neural network; sensitivity analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sức kháng lửa của kết cấu công trình là vấn đề nhận được sự quan tâm rộng rãi gần đây. Các vụ cháy xảy ra ngày càng nhiều và phổ biến với mức độ thiệt hại không nhỏ về tính mạng con người và tài sản. Dưới tác động của lửa cháy, các kết cấu vừa chịu lực vừa chịu lửa nên có thể nhanh chóng suy giảm khả năng chịu lực và dẫn đến sự sụp đổ

một phần hoặc toàn bộ kết cấu công trình. Vì vậy, để đảm bảo được sự ổn định của các kết cấu công trình khi có cháy xảy ra, việc đánh giá đúng sức kháng lửa của chúng là rất cấp thiết.

Một trong những kết cấu quan trọng nhất trong các công trình là cột bê tông cốt thép. Cột sẽ tiếp nhận tất cả các tải trọng bên trên công trình sau đó truyền xuống móng. Do đó, sức kháng lửa của cột chịu nén

là chủ đề thu hút được nhiều sự quan tâm từ các nhà nghiên cứu. Do ứng xử của cột vừa chịu lửa vừa chịu nén rất phức tạp nên đa phần các nghiên cứu về kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén là các nghiên cứu thực nghiệm ngoài nước. Lie và các cộng sự [Lie et al. (1988)] đã khảo sát ảnh hưởng của kích thước tiết diện và độ ẩm của bê tông đến sức kháng cháy của cột bê tông cốt thép chịu nén. Kết quả khảo sát cho thấy, kích thước tiết diện ảnh hưởng đến nhiệt độ lan truyền trong cốt thép và sức kháng cháy của cột ngược lại độ ẩm thì không ảnh hưởng đến sức kháng cháy của cột. Kodur và các cộng sự [Tan and Yao (2003)] đã kết luận rằng cốt đai bố trí xiên góc và khoảng cách của chúng có tác động đáng kể đến khả năng chống cháy của cột. Buch và Sharma [Buch và Sharma (2019a)] đã phát hiện ra sức kháng lửa của cột giảm từ 43% đến 46% khi độ lệch tâm của tải trọng tăng thêm 40 mm. Ngoài ra đường kính cốt thép dọc cũng được nhận thấy ảnh hưởng đến sức kháng lửa của cột. Jau và Huang [Jau và Huang (2008)] đã nhấn mạnh rằng chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép cũng như kích thước lõi bê tông ảnh hưởng đáng kể đến sức kháng lửa của cột. Li và các cộng sự [Li et al. (2021)] cũng đã chỉ ra ảnh hưởng của độ lệch tâm của tải trọng và cốt sợi đến sức kháng lửa của cột. Wu và các cộng sự [Wu et al. (2007)] đã chỉ ra kích thước tiết diện cột khác nhau thì sức kháng lửa của cột cũng khác nhau. Trong khi đó, các nghiên cứu trong nước chủ yếu đề cập đến việc mô phỏng khả năng chịu lực của cột có xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ do lửa cháy [Thu và Hoàng (2021), Chương và Vui (2022)].

Mặc dù đã có một số kết quả thực nghiệm đánh giá sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén, tuy nhiên việc thí nghiệm đòi hỏi rất nhiều thời gian và chi phí, đặc biệt các thiết bị thí nghiệm phức tạp ít phổ biến và chỉ có ở một số nhóm nghiên cứu kể cả trên thế giới. Vì vậy rất cần một mô hình có thể dự đoán chính xác sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén để giảm bớt chi phí và thời gian của thí nghiệm. Mặc dù hiện nay có một số tiêu chuẩn đã quy định các mô hình bán thực nghiệm để dự đoán sức kháng lửa của cột [Rafika and Hashmi (2021)], khả năng dự đoán của các mô hình này còn hạn chế do không thể xét hết nhiều yếu tố ảnh hưởng cùng lúc đến sức kháng lửa của cột như đã đề cập ở trên. Trong khi đó, phương pháp máy học là một phương pháp tiềm năng có khả năng dự đoán chính xác các yếu tố đầu ra khi có nhiều yếu tố đầu vào cùng lúc và các yếu tố đầu vào mối quan hệ phức tạp. Tuy nhiên, theo tìm hiểu của tác giả, chỉ Naser [Naser (2021)] đã tiến hành để xuất mô hình dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép

Bảng 1. Thông số các nhóm mẫu thí nghiệm

| STT | Thông số | Đơn vị | Giá trị nhỏ nhất | Giá trị lớn nhất | Loại thông số |
|-----|---------------------------|--------|---|------------------|---------------|
| 1 | Cường độ chịu nén | MPa | 24 | 143.5 | Đầu vào |
| 2 | Lớp bê tông bảo vệ | mm | 19 | 70 | Đầu vào |
| 3 | Chiều dài cột | m | 1.25 | 5.76 | Đầu vào |
| 4 | Bề rộng tiết diện cột | mm | 127 | 406 | Đầu vào |
| 5 | Chiều cao tiết diện cột | mm | 127 | 915 | Đầu vào |
| 6 | Điều kiện biên | | Ngàm - Ngàm, Khớp - Khớp và Khớp - Ngàm | | Đầu vào |
| 7 | Tải trọng tác dụng | kN | 0 | 6468 | Đầu vào |
| 8 | Độ lệch tâm của tải trọng | mm | 0 | 150 | Đầu vào |
| 9 | Hàm lượng cốt thép | % | 0.75 | 8.44 | Đầu vào |
| 10 | Số cốt thép | | 4 | 8 | Đầu vào |
| 11 | Đường kính cốt thép | mm | 10 | 32 | Đầu vào |
| 12 | Cường độ chảy của thép | MPa | 235 | 591 | Đầu vào |
| 13 | Sức kháng lửa | phút | 0 | 510 | Đầu ra |

2.2. Các thông số đánh giá mô hình

Hai thông số đo lường là hệ số tương quan (R) và sai số bình phương tối thiểu (RMSE), được tính toán để đánh giá mức độ chính xác của mô hình dự đoán. Công thức tính toán của các thông số này như sau:

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n a_i' a_i - \left(\sum_{i=1}^n a_i' \right) \left(\sum_{i=1}^n a_i \right)}{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n a_i'^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n a_i' \right)^2} \sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n a_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n a_i \right)^2}} \quad (1)$$

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

chịu nén dựa trên các phương pháp máy học nhưng số lượng mẫu thu thập còn hạn chế và độ chính xác của mô hình chưa cao.

Để khắc phục các thiếu sót trên, nghiên cứu này đề xuất sử dụng phương pháp mạng nơ ron nhân tạo để dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén dựa trên một số lượng mẫu đáng kể. Thêm nữa, phân tích độ nhạy được tiến hành để đánh giá ảnh hưởng của từng thông số đầu vào đến sức kháng lửa của cột. Cuối cùng, một phần mềm tích hợp dữ liệu dự đoán của phương pháp mạng nơ ron nhân tạo, được phát triển để có thể dự đoán sức kháng lửa của cột một cách tiện lợi và dễ dàng.

2. DỮ LIỆU DỰ ĐOÁN VÀ CÁC THÔNG SỐ ĐÁNH GIÁ MÔ HÌNH

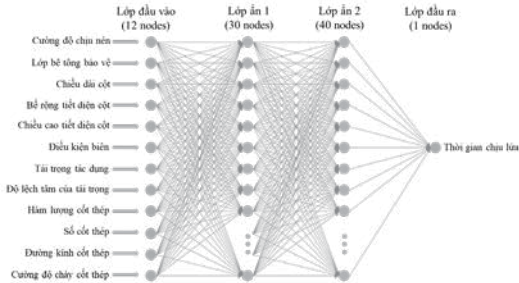
2.1. Dữ liệu thực nghiệm

Để dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép, tổng cộng 374 kết quả thí nghiệm được thu thập từ 23 bài báo nghiên cứu [Lie et al. (1988), Li et al. (2021), Tan and Yao (2003), Buch và Sharma (2019a), Wu et al. (2007), Lie (1989), Yeo et al. (2014), Ali et al. (2004), Ali et al. (2014), Jau and Huang (2008), Rodrigues et al. (2009), Tan and Yao (2013), Tan and Nguyen (2013), Wu et al. (1992), Kodur and McGrath (2003), Kodur et al. (2003), Kodur et al. (2004), Kodur et al. (2005), Buch và Sharma (2019b), Shah và Sharma (2017), Serega (2015), Al Naqeeb and Al Thairy (2021), Bratina et al. (2005)]. Bảng 1 cung cấp phạm vi của các thông số đầu vào và đầu ra. 12 thông số đầu vào được khảo sát là: cường độ chịu nén, lớp bê tông bảo vệ, chiều dài cột, bề rộng tiết diện cột, chiều cao tiết diện cột, điều kiện biên, tải trọng tác dụng, độ lệch tâm của tải trọng, hàm lượng cốt thép, số lượng cốt thép, đường kính cốt thép, cường độ chảy của thép. Thông số đầu ra là: sức kháng lửa. Theo Bảng 1 thì phạm vi của các thông số đầu vào và đầu ra như sau: cường độ chịu nén của bê tông là 24 - 143.5 MPa, lớp bê tông bảo vệ là 19 - 70 mm, chiều dài cột là 1.25 - 5.76 m, bề rộng tiết diện cột là 127 - 406 mm, chiều cao tiết diện cột là 127 - 915 mm, 3 điều kiện biên bao gồm Ngàm - Ngàm; Khớp - Khớp và Khớp - Ngàm, tải trọng tác dụng 0 - 6468 kN, độ lệch tâm của tải trọng là 0 - 150 mm, hàm lượng cốt thép là 0.75 - 8.44%, số cốt thép là 4 - 8, đường kính cốt thép là 10 - 32 mm, cường độ chảy của thép là 235 - 591 MPa, và sức kháng lửa là 0 - 510 mins.

3. MÔ HÌNH MẠNG NƠ RON NHÂN TẠO

3.1. Kết cấu mô hình

Kết cấu của mô hình mạng nơ ron nhân tạo (ANN) bao gồm 1 lớp đầu vào, 2 lớp ẩn, và 1 lớp đầu ra được thể hiện trên Hình 1. Lớp đầu vào gồm 12 nơ ron đại diện cho các thông số đầu vào bao gồm cường độ chịu nén, lớp bê tông bảo vệ, chiều dài cột, bề rộng tiết diện cột, chiều cao tiết diện cột, điều kiện biên, tải trọng tác dụng, độ lệch tâm của tải trọng, hàm lượng cốt thép, số cốt thép, đường kính cốt thép, cường độ chảy cốt thép. Lớp đầu ra gồm 1 nơ ron là sức kháng lửa. Số lớp ẩn và số nơ ron trong mỗi lớp được xác định thông qua quá trình thử dần để tìm ra thông số tối ưu cho mô hình. Trong nghiên cứu này, số lớp ẩn được xác định là 2 với 30 nơ ron trong lớp đầu và 40 nơ ron trong lớp thứ hai.



Hình 1. Kết cấu của mô hình ANN

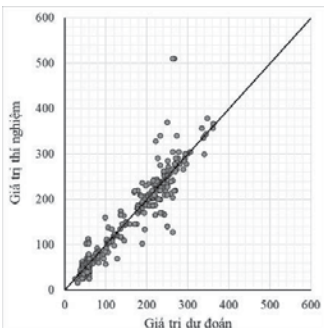
Trong quá trình vận hành của mô hình ANN, lớp đầu vào nhận dữ liệu đầu vào rồi chuyển qua các lớp ẩn. Giá trị kết quả sau đó được chuyển sang lớp đầu ra. Hàm kích hoạt tuyến tính (Relu) được áp dụng để truyền giá trị giữa các nơ ron trong các lớp và hàm tối ưu Adam được sử dụng như là thuật toán học back-propagation. Thêm nữa, hàm sai số bình phương trung bình được sử dụng để đạt được sai số nhỏ nhất giữa kết quả dự đoán và giá trị thí nghiệm.

3.2. Kết quả dự đoán

Các thông số đo lường cho kết quả dự đoán sức kháng lửa trong giai đoạn huấn luyện của mô hình ANN được thống kê trên Bảng 2. Độ sai lệch và tương quan giữa kết quả dự đoán và kết quả thí nghiệm trong giai đoạn huấn luyện được thể hiện trên Hình 2. Kết quả dự đoán cho thấy mô hình đề xuất có khả năng dự đoán rất gần các điểm thí nghiệm và có sự tương quan tốt giữa kết quả dự đoán và thí nghiệm với giá trị hệ số R là 0.94 và giá trị RMSE là 23 phút.

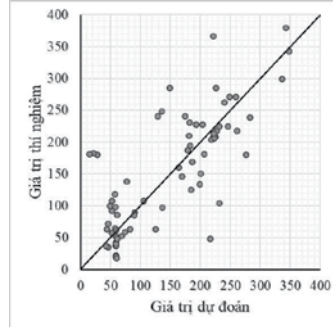
Bảng 2. Các thông số đo lường kết quả dự đoán sức kháng lửa theo mô hình ANN

| Giai đoạn | R | RMSE (phút) |
|------------|------|-------------|
| Huấn luyện | 0.94 | 23.19 |
| Kiểm tra | 0.78 | 59.88 |



Hình 2. Tương quan giữa kết quả dự đoán và kết quả thí nghiệm trong giai đoạn huấn luyện

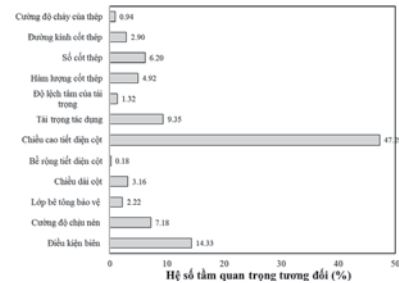
Các thông số đo lường cho kết quả dự đoán sức kháng lửa trong giai đoạn kiểm tra của mô hình ANN cũng được cung cấp trên Bảng 2. Độ sai lệch và tương quan giữa kết quả dự đoán và kết quả thí nghiệm trong giai đoạn kiểm tra của mô hình được thể hiện trên Hình 3. Kết quả dự đoán cho thấy mặc dù mô hình ANN dự đoán tương đối tốt ở giai đoạn kiểm tra với giá trị hệ số R khoảng 0.78 và giá trị RMSE khoảng 59 phút, khả năng dự đoán ở giai đoạn kiểm tra không chính xác bằng giai đoạn huấn luyện.



Hình 3. Tương quan giữa kết quả dự đoán và kết quả thí nghiệm trong giai đoạn kiểm tra

4. PHÂN TÍCH ĐỘ NHẠY

Hình 4, thể hiện sự đóng góp của từng biến đầu vào đối với sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép được xác định bởi mô hình ANN. Kết quả cho thấy chiều cao tiết diện được xác định là các thông số đầu vào có ảnh hưởng nhất đến sức kháng lửa cuối cùng, ngược lại bề rộng tiết diện gần như không có ảnh hưởng đáng kể. Cụ thể xếp hạng mức độ đóng góp của các thông số đầu vào như sau: Chiều cao tiết diện cột (47.29%) > Điều kiện biên (14.33%) > Tải trọng tác dụng (9.35%) > Cường độ chịu nén (7.18%) > Số cốt thép (6.2%) > Hàm lượng cốt thép (4.92%) > Chiều dài cột (3.16%) > Đường kính cốt thép (2.9%) > Lớp bê tông bảo vệ (2,22%) > Độ lệch tâm tải trọng (1.32%) > Cường độ chảy của thép (0.94%) > Bề rộng tiết diện cột (0.18%).



Hình 4. Mức độ đóng góp của các thông số đầu vào đến sức kháng lửa của cột

5. PHẦN MỀM DỰ ĐOÁN

5.1. Phát triển phần mềm

Trình tự phát triển phần mềm dự đoán sức kháng lửa của cột tích hợp dữ liệu dự đoán của mô hình như sau:

Bước 1: Xuất file code mô hình ANN sang file có đuôi .pkl để liên kết vào phần mềm.

Bước 2: Sử dụng phần mềm tạo giao diện là QtDesigner để thiết kế giao diện cho phần mềm. Sau đó xuất file python "Giao diện.py" thành file "Giao diện.ui" để kết hợp với mô hình dự đoán.

Bước 3: Thông qua môi trường làm việc jupyter notebook, code giao diện "Giao diện.ui" và code mô hình dự đoán "mohinhdudoan.pkl" được kết nối lại với nhau. Các input được lấy từ "Giao diện.ui" sau đó được dự đoán và trả kết quả thông qua "mohinhdudoan.pkl". Cuối cùng phần mềm dự đoán được hoàn thành và kiểm tra.

5.2. Dự đoán sức kháng lửa của cột bằng phần mềm

Phần mềm dự đoán có giao diện khá đơn giản, dễ sử dụng và thao tác nhanh như trên Hình 5. Đầu tiên chỉ cần nhập 12 thông số đầu vào được phân loại thành 4 nhóm là đặc trưng hình học, đặc trưng cốt thép, đặc trưng vật liệu và đặc trưng tải trọng. Sau đó nhấn vào tab dự đoán là kết quả dự đoán sẽ hiện ra sức kháng lửa cột bao nhiêu phút.

| ĐẶC TRƯNG HÌNH HỌC: | | ĐẶC TRƯNG VẬT LIỆU: | |
|-------------------------|---------|---------------------------|---------|
| Chiều dài cột: | 5 m | Cường độ nén của bê tông: | 150 MPa |
| Chiều cao tiết diện: | 350 mm | Giới hạn chảy của thép: | 200 MPa |
| Bề rộng tiết diện: | 350 mm | ĐẶC TRƯNG TẢI TRỌNG: | |
| Lớp bê tông bảo vệ: | 30 mm | Điều kiện biên: | FIXFIX |
| ĐẶC TRƯNG CỐT THÉP ĐỌC: | | Lực nén: | 150 KN |
| Số lượng: | 4 thanh | Độ lệch tâm: | 20 mm |
| Đường kính: | 16 mm | DỰ ĐOÁN: 207.38 Phút | |
| Hàm lượng: | 3 % | | |

Hình 5. Giao diện và sử dụng phần mềm dự đoán

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén. Tổng cộng 374 kết quả thí nghiệm cường độ nén được thu thập với 12 thông số đầu vào khác nhau bao gồm: cường độ chịu nén, lớp bê tông bảo vệ, chiều dài cột, bề rộng tiết diện cột, chiều cao tiết diện cột, điều kiện biên, tải trọng tác dụng, độ lệch tâm của tải trọng, hàm lượng cốt thép, số cốt thép, đường kính cốt thép, cường độ chảy của thép. Mô hình máy học ANN đã được phát triển để dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén. Từ kết quả dự đoán, một phần mềm dự đoán được xây dựng để nhằm phục vụ cho việc dự đoán được thuận tiện hơn. Dựa trên những kết quả của nghiên cứu này, các kết luận sau đây có thể được rút ra.

- Mô hình ANN có khả năng dự đoán tốt sức kháng lửa trong giai đoạn huấn luyện với giá trị hệ số R là 0.94 và giá trị RMSE là 23 phút.

- Mô hình ANN dự đoán tương đối tốt ở giai đoạn kiểm tra với giá trị hệ số R khoảng 0.78 và giá trị RMSE khoảng 59 phút. Tuy nhiên khả năng dự đoán ở giai đoạn kiểm tra không chính xác bằng giai đoạn huấn luyện.

- Kết quả phân tích độ nhạy cho thấy chiều cao tiết diện cột có tác động đáng kể nhất đến sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén. Ngược lại bề rộng tiết diện có ảnh hưởng gần như không đáng kể.

- Từ kết quả dự đoán của mô hình ANN, một phần mềm dự đoán sức kháng lửa của cột bê tông cốt thép chịu nén, được phát triển có giao diện đơn giản, dễ sử dụng, và thao tác nhanh.

- Tuy nhiên mô hình để xuất vẫn còn những điểm hạn chế như số lượng dữ liệu thí nghiệm còn hạn chế, một số thông số đầu vào như thông số cốt đai chưa được đề cập, đặc biệt là khả năng dự đoán chính xác của mô hình ở giai đoạn kiểm tra vẫn còn hạn chế.

- Các hướng nghiên cứu trong tương lai cần mở rộng thêm số lượng dữ liệu, xem xét bổ sung thêm các yếu tố đầu vào và áp dụng các phương pháp máy học khác hiệu quả hơn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM thông qua đề tài mã số KHSV2411.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Ali F., Nadjai A., Choi S., Numerical and experimental investigation of the behavior of high strength concrete columns in fire, *Engineering Structures* 32, 2014, 1236–1243.

[2]. Ali F., Nadjai A., Silcocka G., Abu-Tair A., Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns, *Fire Safety Journal* 39, 2004, 433–455.

[3]. Al Nageeb F. and Al Thairy H., The behavior of reinforced concrete columns exposure to eccentric loads at high temperature, *Journal of Physics: Conference Series* 1895, 2021, 1–13.

[4]. Bratina S., Cas B., Saje M., Planin I., Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2, *International Journal of Solids and Structures* 42, 2005, 5716–5733.

[5]. Buch S. H. and Sharma U.K., Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns, *Construction and Building Materials* 225, 2019a, 838–852.

[6]. Buch S. H. and Sharma U.K., Fire Resistance of Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns, *Fire Technology* 55, 2019b, 1517–1552.

[7]. Chương L. H., Vui C. V., Phân tích khả năng chịu tải của cột bê tông cốt thép trong các điều kiện cháy khác nhau, *Tạp Chí Xây Dựng* 6, 2022, 83–87.

[8]. Jau W. C., Huang K. L., A study of reinforced concrete corner columns after fire, *Cement and Concrete Composites* 30, 2008, 623–638.

[9]. Kodur V. K. R., Cheng F. P., Wang T. C., and Sultan M. A., Effect of Strength and Fiber Reinforcement on Fire Resistance of High-Strength Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering* 129, 2003, 74–87.

[10]. Kodur V. K. R., McGrath R. C., Effect of Strength and Fiber Reinforcement on Fire Resistance of High-Strength Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering* 129, 2003, 253–259.

[11]. Kodur V. K. R., McGrath R. C., Leroux P., Latour J. C., Experimental studies for evaluating the fire endurance of high-strength concrete columns, *National Research Council of Canada*, 2005, 1–149.

[12]. Kodur V. K. R., Wang T. C., Cheng F. P., Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns, *Cement and Concrete Composites* 26, 2004, 141–153.

[13]. Lie T. T., Fire resistance of reinforced concrete columns: A parametric study, *Journal of Fire Protection Engineering* 1, 1989, 121–129.

[14]. Lie T. T., Lin T. D., Allen D. E., Abrams M. S., Fire resistance of reinforced concrete columns, *National Research Council of Canada, Division of Building Research*, 1988.

[15]. Li Y., Du P., Tan K. H., Fire resistance of ultra-high performance concrete columns subjected to axial and eccentric loading, *Engineering Structures* 248, 2021, 113158.

[16]. Naser M. Z., Observational Analysis of Fire-Induced Spalling of Concrete through Ensemble Machine Learning and Surrogate Modeling, *Journal of Material in Civil Engineering* 33, 2021, 402–428.

[17]. Rafika S. A., Hashmi A. K., Review on Fire Resistance of Reinforced Concrete Column, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 08, 2021, 1881–1887.

[18]. Rodrigues C. J. P., Laim L., Correia A. M., Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire, *Composite Structures* 92, 2009, 1263–1268.

[19]. Serega S., Effect of transverse reinforcement spacing on fire resistance of high strength concrete columns, *Fire Safety Journal* 71, 2015, 151–161.

[20]. Shah A. H., Sharma U. K., Fire resistance and spalling performance of confined concrete column, *Construction and Building Materials* 156, 2017, 161–174.

[21]. Tan K. H. and Yao Y., Fire Resistance of Four-Face Heated Reinforced Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering* 129, 2003, 1977–1985.

[22]. Tan K. H. and Nguyen T. T., Structural responses of reinforced concrete columns subjected to uniaxial bending and restraint at elevated temperatures, *Fire Safety Journal* 60, 2013, 2–13.

[24]. Thu P. T. N., & Hoàng N. N., Khả năng chịu lửa của cột thép tiết diện chữ I bọc thạch cao dạng hộp chịu nén đứng tâm - So sánh giữa phương pháp tính đơn giản hóa theo EN 1993-1-2 và phương pháp mô phỏng số, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TKHCNXD) - ĐHXDHN* 15, 2021, 120–131.

[25]. Wu B., Hong Z., Tang G. H. and Wang C., Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Square Cross Section, *Advances in Structural Engineering* 10, 2007, 353–369.

[26]. Wu H. J. and Lie T. T., Fire resistance of Reinforced Concrete Columns, *National Research Council of Canada*, 1992, 1–56.

[27]. Yeo I. H., Cho B. Y., An J. H., Min B. Y., Fire Resistance Evaluation of Reinforced Concrete Columns Using Axial Load Ratio and Slenderness Ratio, *Advanced Materials Research* 905, 2014, 269–272.