

# ỨNG DỤNG MÔ HÌNH RỪNG NGẪU NHIÊN DỰ ĐOÁN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA CỘT ỐNG THÉP NHỒI BÊ TÔNG TIẾT DIỆN ELIP

ThS. MAI VĂN CHIẾN

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải,

## TÓM TẮT

Cột ống thép nhồi bê tông (CFST) đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều loại công trình nhờ nhiều ưu điểm vượt trội so với các loại kết cấu khác. Khi sử dụng CFST, điều quan trọng là phải nghiên cứu khả năng chịu nén dọc trục để đảm bảo an toàn vì loại kết cấu này chủ yếu là chịu lực nén. Trong nghiên cứu này, mô hình rừng ngẫu nhiên được áp dụng để dự đoán khả năng chịu lực của cột CFST hình elip dưới tác dụng của tải trọng dọc trục. Bộ dữ liệu gồm 145 kết quả thí nghiệm được thu thập với các thông số đầu vào ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của cột CFST, đó là chiều dài của cột, chiều dài trục chính, chiều dài trục nhỏ, chiều dày của ống thép, cường độ chảy của thép và cường độ nén của bê tông, trong khi thông số đầu ra là tải trọng tới hạn của cột CFST khi chịu nén dọc trục. Hiệu suất của mô hình RF được đánh giá bằng cách sử dụng hệ số tương quan ( $R$ ) và căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE). Kết quả cho thấy mô hình RF cho kết quả đáng tin cậy với hệ số tương quan  $R = 0.9472$ . Bên cạnh đó, phân tích độ nhạy cho biết mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến giá trị dự đoán.

**Từ khóa:** Rừng ngẫu nhiên (RF); cột ống thép nhồi bê tông (CFST); tải trọng tới hạn.

## ABSTRACT

Concrete-filled steel tubular (CFST) has been widely applied in many types of works thanks to many outstanding advantages compared to other structures. It is essential to study the axial compression capacity of CFST to ensure safe use since this type of structure mainly supports compressive loads. In this study, a random forest model (RF) is applied to predict the axial compression capacity of elliptical CFST columns under axial load. The data set includes 145 experimental results collected with input parameters such as the length of the column, length of the main shaft, length of the small shaft, thickness of the steel pipe, yield strength of steel and compressive strength of concrete, while the output parameter is the axial compression capacity of the CFST column when subjected to compression. The performance of the RF model was evaluated using the correlation coefficient ( $R$ ) and the root mean square error (RMSE). The findings show that the RF model gives reliable results with the correlation coefficient  $R = 0.9472$ . Besides, the sensitivity analysis shows the influence of the input parameters on the predicted value.

**Keywords:** Random Forest (RF); concrete-filled steel tubular (CFST); axial compression capacity;

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, cột ống thép nhồi bê tông (CFST) được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng công trình nhờ nhiều tính năng vượt trội về kết cấu [1]. Loại cột này có nhiều ưu điểm về khả năng chịu lực so với cột thép rỗng hoặc cột bê tông về nhiều mặt như: Khả năng chống cháy, khả năng chịu cắt ngang, độ ổn định, hay khả năng chịu tải trọng do động đất [2]. Nhiều hình dạng khác nhau đã được sử dụng cho mặt cắt ngang của các cột CFST, như hình tròn, hình vuông hoặc hình chữ nhật. Gần đây, hình dạng mặt

cắt elip đã được áp dụng cho các nghiên cứu về cột CFST. Cột tiết diện elip có nhiều ưu điểm vượt trội của cột CFST so với các cột cổ điển như: cường độ, khả năng chống cháy, khả năng ngăn ngừa xoắn cục bộ [3]. Mặc dù vậy, cho đến nay chưa có tiêu chuẩn thiết kế nào thiết lập cho cột CFST hình elip, thay vào đó các quy tắc thiết kế cho cột hình tròn hoặc hình chữ nhật được khuyến nghị dùng cho loại cột này [4]. Một số nghiên cứu thực nghiệm và phương pháp mô phỏng số đã được thực hiện đối với các cột CFST tiết diện elip để nghiên cứu sự phân bố ứng suất của chúng dưới tác động nén dọc

trục. Cụ thể như, Jamaluddin và cộng sự [5] đã nghiên cứu ứng xử của các cột CFST tiết diện elip thông qua các nghiên cứu thực nghiệm trên 26 mẫu thí nghiệm chịu nén có cường độ bê tông khác nhau. Nghiên cứu này đã chỉ ra độ mảnh của cột được đặc trưng bởi sự xoắn cục bộ và tổng thể. Ngoài ra cột CFST cường độ cao có độ dẻo cao hơn cột thép nhồi bê tông thông thường. Lam và cộng sự [6] đã chứng minh khả năng chịu lực cũng phụ thuộc vào độ mảnh của ống thép, và việc tăng chiều dài ống làm giảm khả năng chịu lực của cột. Tuy nhiên, chi phí cho thí nghiệm trong phòng thí nghiệm

thường rất tốn kém, cũng như sự phức tạp trong các đặc điểm hình học và tính chất vật liệu dẫn đến việc phát triển một mô hình FE tổng quát để dự đoán chính xác khả năng nén dọc trục của một cột CFST hình elip là một thách thức lớn.

Trong vài thập kỷ gần đây, phương pháp trí tuệ nhân tạo (AI) đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng khoa học kỹ thuật liên quan đến nhiều dạng kết cấu khác nhau, đặc biệt là loại kết cấu chịu nén dọc trục. Đối với các cột CFST, đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến trí tuệ nhân tạo được thực hiện để nghiên cứu ứng xử của chúng dưới nhiều loại tải trọng khác nhau. Ví dụ, ứng suất của các cột CFST có tiết diện tròn chịu nén đã được nghiên cứu bởi Ahmadi và cộng sự [7], Moon và cộng sự [8]. Trong một nghiên cứu khác, Tran và cộng sự [9] đã phát triển một mô hình dựa trên mạng nơ-ron để dự đoán khả năng chịu lực của cột CFST vuông. Kết quả thu được từ các nghiên cứu trên đã chứng minh được phương pháp AI là một phương pháp hiệu quả để dự đoán ứng xử cơ học của các loại kết cấu.

Chính vì vậy, mục tiêu chính của nghiên cứu này là xây dựng mô hình trí tuệ nhân tạo dựa trên thuật toán rừng ngẫu nhiên có khả năng dự báo khả năng chịu tải giới hạn của cột CFST chịu nén dọc trục. Nghiên cứu tập trung vào cột CFST tiết diện elip, với dữ liệu đầu vào bao gồm chiều dài cột, chiều dài trục chính và phụ của tiết diện, chiều dày của ống thép, tính chất cơ học của thép và bê tông (cường độ chảy của thép và cường độ chịu nén của bê tông, tương ứng) được thu thập từ các tài liệu có sẵn. Để khảo sát và đánh giá hiệu quả của

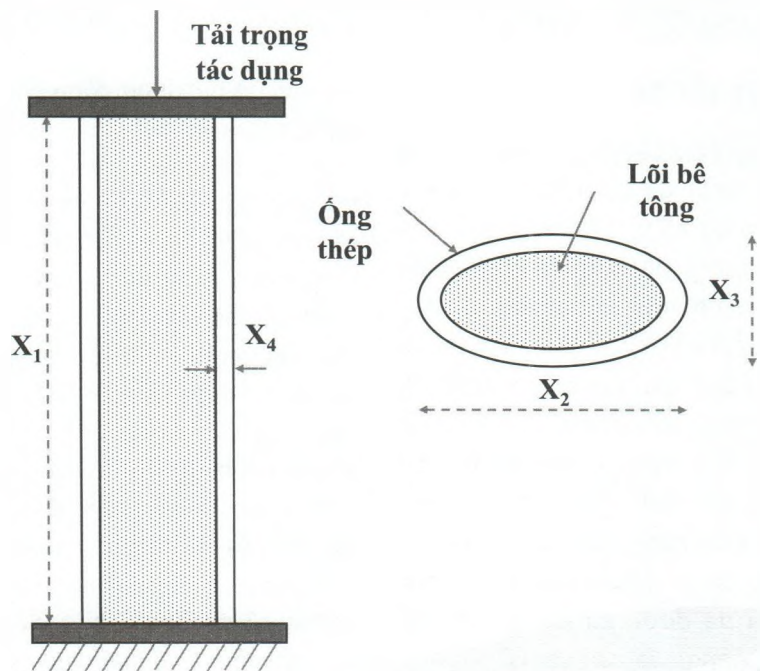
các mô hình học máy, nghiên cứu này sử dụng các tiêu chí thống kê khác nhau như: hệ số tương quan Pearson (R) và căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE). Cuối cùng nghiên cứu cũng đưa ra được một phân tích độ nhạy để nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến kết quả dự đoán của mô hình học máy đã được sử dụng.

## 2. MÔ HÌNH VÀ DỮ LIỆU SỬ DỤNG CHO BÀI TOÁN

### 2.1. Dữ liệu được sử dụng

Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu cột CFST có tiết diện elip. Thí nghiệm xác định sức chịu tải tới hạn được minh họa trong Hình 2.1. Thí nghiệm nén của tất cả các mẫu được giả định là các thí nghiệm nén dọc trục đúng tâm. Trong cơ sở dữ liệu này, các khiếm khuyết ban đầu về hình học của cột và các ứng suất dư trong quá trình chế tạo cấu kiện đã được bỏ qua (không được xét tới như một tham số đầu vào). Một số công bố quốc tế cũng chỉ ra rằng các yếu tố này

có rất ít ảnh hưởng tới sức chịu tải tới hạn của cấu kiện cột ống thép nhồi bê tông. Số liệu bao gồm 145 kết quả thử nghiệm trong nghiên cứu đã được công bố tại các tạp chí quốc tế uy tín và được trình bày chi tiết trong tài liệu [10]. Các thí nghiệm thực nghiệm đã được tiến hành theo các bước sau: thiết kế, xử lý ống thép, sản xuất bê tông, đóng rắn mẫu và tiến hành đo sức chịu tải tới hạn. Do đó, các biến đầu vào ảnh hưởng đến khả năng chịu tải tới hạn của cột ống thép nhồi bê tông có tiết diện elip là từ hai nhóm chính: kích thước hình học của cột và tính chất cơ học của vật liệu cấu thành. Do đó, sáu biến độc lập được chọn làm đầu vào, cụ thể là chiều dài cột ( $X_1$ ), chiều dài trục chính ( $X_2$ ), chiều dài trục phụ ( $X_3$ ), chiều dày của ống thép ( $X_4$ ), cường độ chảy của thép ( $X_5$ ) và cường độ nén của bê tông ( $X_6$ ). Trong đó,  $X_1$  thay đổi từ 160 đến 3600 mm với giá trị trung bình là 992.8 mm,  $X_2$  dao động từ 85.4 đến 318.5 mm với giá trị trung bình là 164.78 mm,  $X_3$  thay đổi trong phạm vi từ 57 đến 155 mm với giá



Hình 2.1. Sơ đồ minh họa thí nghiệm sức chịu tải của cột CFST tiết diện elip.



trị trung bình là 86.48 mm,  $X_4$  dao động từ 1 đến 9.72 mm với giá trị trung bình là 4.18 mm,  $X_5$  dao động từ 201 đến 612 MPa với giá trị trung bình là 377.08 MPa,  $X_6$  có giá trị thay đổi trong khoảng từ 13.18 đến 102.26 MPa với giá trị trung bình là 48.96 MPa.

Bộ dữ liệu được chia ngẫu nhiên thành hai bộ dữ liệu con bao gồm phần thứ nhất (70% số liệu) dùng để đào tạo mô hình, được gọi là phần đào tạo. Phần thứ hai (30% số liệu còn lại) dùng để kiểm chứng mô hình, sẽ được gọi tắt là phần kiểm chứng. Với cách chia trên, bộ dữ liệu gồm 145 số liệu sẽ có 102 số liệu dùng để đào tạo và 43 số liệu dùng để đánh giá khả năng dự báo của mô hình. Tất cả dữ liệu được chuẩn hóa về phạm vi [0,1] để giảm sai lệch số trong khi xử lý bằng thuật toán AI, theo khuyến nghị của các nghiên cứu trước đây.

**2.2. Mô hình Rừng ngẫu nhiên (Random Forest - RF)**

Rừng ngẫu nhiên (Random Forest - RF) là một thuật toán học có giám sát được sử dụng để giải các bài toán phân loại và hồi quy, được giới thiệu và phát triển bởi Leo Breiman vào năm 2001 [11]. Trong những năm gần đây, RF được sử dụng khá phổ biến do có những ưu điểm so với các thuật toán khác, đó là khả năng đánh giá sai số bên trong, đánh giá mức độ quan trọng của biến đầu vào, khả năng xử lý các biến có độ tương quan thấp. RF là một trong những thuật toán được xây dựng trên mô hình cây quyết định. Mỗi cây đóng vai trò như một phiếu bầu làm cơ sở cho việc ra quyết định của thuật toán. Mỗi cây quyết định được tạo dựa trên một tập mẫu huấn luyện ngẫu nhiên được tạo ra từ tập ban đầu có cùng độ lớn theo nguyên tắc lấy mẫu lại (phương pháp Bootstrap), tức là một mẫu có thể được lấy

nhiều lần. Cây quyết định dựa trên tập mẫu mới được tạo với nguyên tắc chỉ sử dụng một số biến đầu vào giới hạn tại mỗi nút tách. Kết quả cuối cùng là kết quả trung bình thu được từ tất cả các cây quyết định. Việc kết hợp các kết quả của nhiều cây quyết định độc lập có độ chệch thấp và phương sai cao sẽ giúp RF đạt được cả độ chệch thấp và phương sai thấp.

Các cây dự đoán sẽ nhận các giá trị số cụ thể trong bài toán hồi quy thay vì kỹ thuật phân loại (ra quyết định) [12]. Trong thiết kế các cây quyết định của phân tích hồi quy, các cây được phép phát triển đến độ sâu tối đa của dữ liệu huấn luyện mà không thực hiện bất kỳ quá trình giảm (phân nhánh) nào. Đây cũng là một ưu điểm đáng kể của thuật toán này vì việc giảm cây là một yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của mô hình [13]. Breiman [12] cũng lập luận rằng khi số lượng cây tăng lên, sai số chung luôn hội tụ ngay cả khi cây không bị giảm, và việc xử lý mô hình quá khớp được thực hiện dựa trên quy luật số lớn. Số lượng biến được sử dụng (p) tại mỗi nút để tạo cây quyết định và số lượng cây quyết định (Q) được sử dụng là hai tham số được chọn trước bởi người dùng. Tuy nhiên, số lượng cây trong rừng phải đủ lớn để đảm bảo rằng tất cả các thuộc tính được sử dụng nhiều lần. Các giá trị thường được sử dụng là 500 cây cho bài toán phân loại, 1000 cây cho bài toán hồi quy.

**2.3. Đánh giá khả năng dự báo của mô hình**

Để đánh giá hiệu suất và độ chính xác của mô hình RF trong việc dự đoán sức chịu tải tới hạn của cột CFST, các chỉ số hiệu suất được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm căn sai số toàn phương trung bình (RMSE) và hệ số tương quan

(R). Các chỉ số hiệu suất này được xác định theo công thức sau:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - \bar{Q}_0)(Q_{i,i} - \bar{Q}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - \bar{Q}_0)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{i,i} - \bar{Q}_i)^2}} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{i,i})^2} \quad (8)$$

Trong đó: n là số lượng bộ dữ liệu,  $Q_0$  và  $\bar{Q}_0$  là giá trị thí nghiệm thực tế và giá trị thí nghiệm thực tế trung bình,  $Q_i$  và  $\bar{Q}_i$  là giá trị dự đoán và giá trị dự đoán trung bình, được tính theo mô hình dự báo. Trong số các chỉ số hiệu suất được sử dụng, RMSE đạt giá trị tối ưu khi bằng 0 và R đạt giá trị tối ưu khi bằng 1.

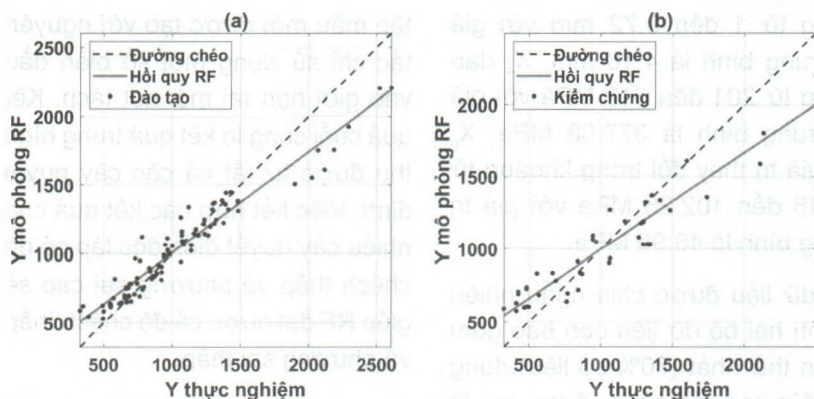
**3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

Trong phần trình bày trên, hệ số của mô hình RF được sử dụng trong suốt quá trình mô phỏng là *Số cây trong rừng ngẫu nhiên = 500, số nhánh tối thiểu = 2*. Đây là các giá trị mặc định khi sử dụng thuật toán trong môi trường lập trình Matlab.

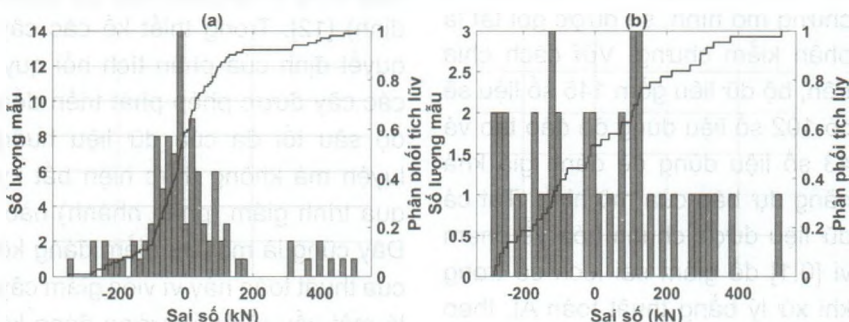
Hình 3.1 biểu thị một kết quả điển hình trong dự báo giá trị sức chịu tải tới hạn của cột CFST có tiết diện elip. Đối với bộ dữ liệu đào tạo, tương quan giữa kết quả mô phỏng RF và thí nghiệm xác định sức chịu tải tới hạn đạt đến  $R=0.9659$ , cho thấy năng lực đào tạo của mô hình RF là rất tốt. Có thể nhận thấy rằng số ít dữ liệu cho kết quả sai số lớn và các sai số này chủ yếu nằm ở những mẫu thí nghiệm có giá trị sức chịu tải tới hạn lớn. Đối với bộ dữ liệu kiểm chứng, kết quả tương quan R đạt được là  $R=0.9472$  và cũng tồn tại ít kết quả dự báo cho ra sai số dự báo lớn với kết quả thí nghiệm. Trên cơ sở so sánh với nghiên cứu được công bố trước đây của Tran và cộng sự [10] sử dụng cùng một bộ dữ liệu nhưng mô hình học

máy khác nhau, cụ thể là ANN, có thể thấy rằng mô hình RF đưa ra hiệu suất dự báo tương đương với mô hình ANN. Tuy nhiên mô hình RF được sử dụng trong nghiên cứu này hoàn toàn chưa được tinh chỉnh các siêu tham số, mà các giá trị mặc định của mô hình được sử dụng. Tuy rằng thời gian và quá trình mô phỏng sẽ rất lâu, nhưng nếu được tinh chỉnh thì mô hình RF hoàn toàn có khả năng dự báo tốt hơn mô hình ANN. Ngoài ra, trong công bố của Tran và cộng sự, các mô hình ANN đều có hiện tượng dữ liệu đào tạo có hiệu suất dự báo thấp hơn dữ liệu kiểm chứng. Điều này đặt ra những câu hỏi về khả năng dự báo quá khớp của mô hình ANN được đề xuất. Trong nghiên cứu này, mô hình RF thường đưa ra hiệu suất tốt hơn cho phần đào tạo so với phần kiểm chứng. Do đó, những kết quả trên đây cho thấy mô hình RF hoàn toàn có khả năng dự báo tốt và có độ tin cậy cao với giá trị sức chịu tải tới hạn của cột CFST có tiết diện elip.

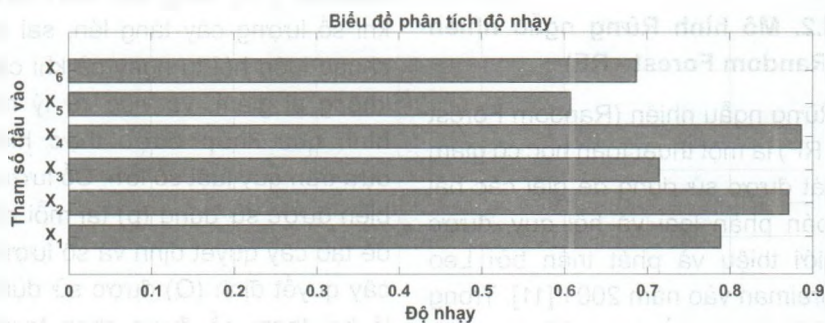
Sai số của mô hình RF được hiển thị giữa giá trị tính toán bởi mô hình RF và giá trị thực nghiệm sức chịu tải tới hạn cho cơ sở dữ liệu đào tạo (Hình 3.2a) và cơ sở dữ liệu kiểm chứng (Hình 3.2b). Có thể thấy các giá trị sai số tương ứng với cơ sở dữ liệu đào tạo và thử nghiệm là tương đối nhỏ. Dựa trên phân bố tích lũy (đường đen), có thể xác định sai số phần trăm của các dự báo trong một phạm vi nhất định nào đó. Ví dụ, với cơ sở dữ liệu đào tạo, tỷ lệ phần trăm mẫu có lỗi trong khoảng [-200; 200] kN là trên 85%. Tương tự, sai số 80% giữa giá trị thử nghiệm và mô phỏng RF của cơ sở dữ liệu kiểm chứng là khoảng [-200; 200] kN. Kết quả của các tiêu chí hiệu suất cho thấy mô hình RF có thể



Hình 3.1. Biểu đồ hồi quy của mô hình RF cho phần đào tạo và kiểm chứng.



Hình 3.2. Kết quả sai số cho phần dữ liệu đào tạo (a) và kiểm chứng (b).



Hình 3.3. Tầm quan trọng của 6 thông số đầu vào sử dụng trong nghiên cứu này.

dự đoán rất tốt giá trị sức chịu tải tới hạn của cột ống thép nhồi bê tông có tiết diện elip.

Nhìn chung, các dự báo dựa trên mô hình RF được đề xuất có thể mang lại ước tính tốt về sức chịu tải tới hạn của cột CFST có tiết diện elip. Nếu những kết quả thí nghiệm được tập hợp lại và được tận dụng hơn nữa để tạo thành một bộ dữ liệu lớn hơn, việc sử dụng RF để xây dựng mối tương quan với độ chính xác cao sẽ đem

lại tiện ích rất nhiều cho các kỹ sư ngành kết cấu.

Cuối cùng, phân tích độ nhạy được sử dụng để đánh giá tầm quan trọng của từng tham số của mô hình đến việc dự đoán kết quả đầu ra. Nó là một kỹ thuật để dự báo kết quả của sự lựa chọn các thông số đầu vào dựa trên một tập hợp các yếu tố. Các nhà phân tích có thể đánh giá những thay đổi trong một biến ảnh hưởng như thế nào đến kết quả bằng cách thiết lập một tập



hợp các biến cụ thể. Cách tiếp cận này được sử dụng với những ràng buộc nhất định được xác định bởi một hoặc nhiều biến đầu vào.

Phân tích độ nhạy sử dụng mô hình RF cho phép tác giả đánh giá tầm quan trọng của các yếu tố đầu vào trong cuộc điều tra này. Một chỉ số tính năng quan trọng được xây dựng dựa trên các mức độ khác nhau của các biến từ các lượng tử 0 đến 1 để xác định tác động của từng yếu tố dự báo. Chỉ số hiệu suất cơ bản của sáu biến đầu vào được thể hiện trong Hình 3.3. Chiều dày ống thép là biến đầu vào có chỉ số tính năng quan trọng nhất (0.885), tiếp theo là chiều dài trục lớn (0.875), chiều dài cột (0.790), chiều dài trục bé (0.715) và cường độ nén của bê

tông (0.685) và cuối cùng là cường độ chảy của thép (0.610).

#### 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong nghiên cứu này, bộ dữ liệu gồm 145 kết quả thí nghiệm của cột CFST hình elip chịu tải trọng dọc trục được sử dụng để xây dựng mô hình rừng ngẫu nhiên dự đoán khả năng chịu lực của cột. Các thông số đầu vào được sử dụng để đào tạo mô hình bao gồm hai nhóm (kích thước hình học của mặt cắt và các đặc tính cơ học của vật liệu). Việc đánh giá hiệu suất của mô hình RF được thực hiện bằng cách sử dụng hai tiêu chí thống kê, R và RMSE. Kết quả cho thấy mô hình RF có độ tin cậy cao để dự đoán khả năng chịu lực của cột CFST với hệ số

tương quan  $R = 0.9472$ . Bên cạnh đó, phân tích độ nhạy cũng được thực hiện để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào trong việc dự đoán khả năng chịu lực của các cột CFST hình elip. Kết quả cho thấy độ dày thành ống thép và chiều dài trục lớn của mặt cắt ngang là các thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của cột CFST hình elip (tương ứng là 0.885 và 0.875). Kết quả của nghiên cứu này có thể giúp đơn giản hóa việc thiết kế các cột CFST hình elip. Các giá trị tối ưu thu được cho phép xác định nhanh chóng và chính xác khả năng chịu lực của cột CFST hình elip với các mục đích thực tế. ■

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Yang, T. Sheehan, X.H. Dai, D. Lam, Experimental study of beam to concrete-filled elliptical steel tubular column connections, *Thin-Walled Structures*. 95 (2015) 16-23.
- [2] F. McCann, L. Gardner, W. Qiu, Concrete-filled elliptical section steel columns under concentric and eccentric loading, in: 8th International Conference on Advances in Steel Structures, July 22-24, 2015.
- [3] Q.-X. Ren, L.-H. Han, D. Lam, W. Li, Tests on elliptical concrete filled steel tubular (CFST) beams and columns, *Journal of Constructional Steel Research*. 99 (2014) 149-160.
- [4] H. Yang, D. Lam, L. Gardner, Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow sections, *Engineering Structures*. 30 (2008) 3771-3781.
- [5] N. Jamaluddin, D. Lam, X.H. Dai, J. Ye, An experimental study on elliptical concrete filled columns under axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*. 87 (2013) 6-16.
- [6] D. Lam, L. Gardner, M. Burdett, Behaviour of axially loaded concrete filled stainless steel elliptical stub columns, *Advances in Structural Engineering*. 13 (2010) 493-500.
- [7] M. Ahmadi, H. Naderpour, A. Kheyroddin, Utilization of artificial neural networks to prediction of the capacity of CCFT short columns subject to short term axial load, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 14 (2014) 510-517.
- [8] J. Moon, J.J. Kim, T.-H. Lee, H.-E. Lee, Prediction of axial load capacity of stub circular concrete-filled steel tube using fuzzy logic, *Journal of Constructional Steel Research*. 101 (2014) 184-191.
- [9] V.-L. Tran, D.-K. Thai, S.-E. Kim, Application of ANN in predicting ACC of SCFST column, *Composite Structures*. 228 (2019) 111332.
- [10] V.-L. Tran, Y. Jang, S.-E. Kim, Improving the axial compression capacity prediction of elliptical CFST columns using a hybrid ANN-IP model, *Steel and Composite Structures*. 39 (2021) 319-335.
- [11] L. Breiman, Random forests, *Machine Learning*. 45 (2001) 5-32.
- [12] L. Breiman, 1 RANDOM FORESTS-RANDOM FEATURES, (1999).
- [13] M. Pal, P.M. Mather, An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification, *Remote Sensing of Environment*. 86 (2003) 554-565.