



FLEXURAL CAPACITY PREDICTION OF HYBRID STRUCTURE CONSISTING OF UHPC-NSC USING SYMBOLIC REGRESSION MODELS

Le Ba Anh, Hoang Viet Hai*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 31/01/2024

Revised: 09/06/2024

Accepted: 11/06/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.13>

* *Corresponding author*

Email: hoangviethai@utc.edu.vn

Abstract. Machine learning (ML) models are attracting significant attention and widespread application from many scientists in civil engineering. These models produce a result more quickly than traditional methods, especially when processing large datasets. Consequently, the development of more accurate predictive models for engineering problems is currently a key focus of scientific research. This article presents research on developing a symbolic regression model (SR) using data from previous studies to build an equation that predicts the flexural capacity of reinforced concrete beams or slabs (NSC), reinforced with ultra-high-performance concrete (UHPC). A database of 65 UHPC-NSC beam or slab samples with rectangular cross-sections, subjected to bending loads, is used to train the model. Among symbolic regression models, the Operon model demonstrates superior performance in terms of training speed and accuracy. With accuracy $R^2 = 0.96$ and $MAE = 6.4$, the Operon model has approximately the same accuracy as other machine learning models that have been published. At the same time, the Operon model also has the advantage of expressing the prediction equation clearly, helping to clearly demonstrate the physical nature of the model as well as increase applicability. The equation obtained from the Operon model was also compared with experiments performed by the research team.

Keywords: Flexural capacity, Ultra-High-Performance Concrete, Machine Learning, Symbolic Regression Model.

@2024 University of Transport and Communications



DỰ BÁO KHẢ NĂNG CHỊU UỐN KẾT CẤU BTCT ĐƯỢC TĂNG CƯỜNG BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG (UHPC) SỬ DỤNG MÔ HÌNH HỒI QUY KÝ TỰ

Lê Bá Anh, Hoàng Việt Hải*

Trường đại học Giao thông Vận Tải, Số 3 Phố Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 31/01/2024

Ngày nhận bài sửa: 09/06/2024

Ngày chấp nhận đăng: 11/06/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.13>

* Tác giả liên hệ

Email: hoangviethai@utc.edu.vn

Tóm tắt. Mô hình học máy (ML) đang thu hút sự quan tâm và ứng dụng rộng rãi của nhiều nhà khoa học trong lĩnh vực kỹ thuật. Mô hình này mang lại kết quả nhanh chóng hơn so với các phương pháp phân tích truyền thống, đặc biệt là khi xử lý dữ liệu lớn. Do đó, việc phát triển các mô hình dự báo chính xác hơn cho các bài toán kỹ thuật hiện đang là trọng tâm nghiên cứu của các nhà khoa học. Bài báo này trình bày nghiên cứu về phát triển mô hình hồi quy ký tự (SR-Symbolic Regression) dựa trên dữ liệu của các nghiên cứu trước đây để xây dựng phương trình dự đoán khả năng chịu mômen của dầm, bản bê tông cốt thép (BTCT) được tăng cường bằng bê tông tính năng siêu cao (UHPC). Cơ sở dữ liệu gồm 65 mẫu bản UHPC- BTCT tiết diện hình chữ nhật chịu tải trọng uốn được sử dụng để huấn luyện mô hình. Trong các mô hình hồi quy ký tự, mô hình Operon thể hiện hiệu suất vượt trội về tốc độ huấn luyện và độ chính xác. Với độ chính xác $R^2= 0,96$ và $MAE= 6,4$, mô hình Operon có độ chính xác xấp xỉ các mô hình dự báo khác đã được công bố. Đồng thời mô hình Operon còn có ưu điểm là thể hiện được phương trình dự báo một cách tường minh giúp thể hiện rõ bản chất vật lý của mô hình cũng như tăng khả năng áp dụng. Phương trình thu được từ mô hình Operon cũng được so sánh với thí nghiệm được nhóm nghiên cứu thực hiện.

Từ khóa: Khả năng chịu uốn, Bê tông siêu tính năng (UHPC), Mô hình học máy (ML), Mô hình hồi quy ký tự.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với sự phát triển nhanh chóng của kết cấu hạ tầng, có rất nhiều công trình bằng bê tông cốt thép (BTCT) đã được xây dựng, cùng với thời gian các công trình sẽ bị xuống cấp suy giảm khả năng chịu lực do tác động của môi trường và tải trọng. Do đó, việc nghiên cứu ra các vật liệu mới có độ bền và tuổi thọ cao là hết sức cần thiết. Bê tông thông thường (BTT) được sử dụng rộng rãi trong xây dựng, tuy nhiên nó có nhược điểm về trọng lượng thể tích lớn, độ bền thấp (đặc biệt là khả năng chịu kéo), khả năng hấp thụ năng lượng thấp và có tính giòn dưới tác dụng của tải trọng. Nhược điểm của bê tông dẫn đến việc các kỹ sư, nhà khoa học cần phải tìm kiếm các phương án về vật liệu tốt hơn. Một trong những vật liệu này là bê tông siêu tính năng (UHPC), có các đặc tính cơ học đặc biệt khi so sánh với bê tông thông thường (BTT). UHPC không chỉ có cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và độ cứng tốt hơn so với bê tông thông thường, mà còn có độ bền cao hơn [1]. UHPC được đạt được thông qua việc tối ưu hóa các chất kết dính trong hỗn hợp, cát mịn và lượng lớn sợi thép (>2% theo thể tích).

Tuy nhiên, do giá thành cao, UHPC hiện không được sử dụng rộng rãi trong xây dựng như vật liệu bê tông truyền thống. Do đó, việc tạo ra các kết cấu bằng cách kết hợp hai vật liệu này (UHPC và BTT) là điều rất quan trọng theo quan điểm của các nhà nghiên cứu [2]. Phương pháp này có thể mang lại những cơ hội mới trong ngành xây dựng. Trong một số nghiên cứu trước đó, đã được khẳng định rằng trong các dầm/bản composite UHPC-BTCT, với sự có mặt của lớp bê tông UHPC đặt ở vùng chịu nén và/hoặc vùng chịu kéo giúp tăng khả năng chịu uốn cho dầm/bản. Do đó, chi phí cao của UHPC có thể được sử dụng một cách kinh tế, dẫn đến các thiết kế kết cấu hiệu quả và tiết kiệm chi phí hơn [3]. Ngoài ra, trong các nghiên cứu được thực hiện bởi Yin và đồng nghiệp, ảnh hưởng chiều dày bản UHPC trên bản BTCT đã được đánh giá thông qua kết quả thực nghiệm. Trong những nghiên cứu này [3,4], đã chỉ ra rằng lớp UHPC gây thay đổi và giảm sự xuất hiện vết nứt trong BTCT dưới tác dụng của tải trọng. Ngoài ra, kết cấu liên hợp UHPC- BTCT có khả năng hấp thụ năng lượng cũng như độ cứng và độ dẻo dai lớn hơn nhiều so với BTCT thường. Do là vật liệu mới, hiện tại chưa có nhiều tiêu chuẩn tính toán cho kết cấu UHPC đặc biệt là kết cấu BTCT được sửa chữa tăng cường bằng UHPC. Do đó, việc tìm ra phương án dự báo ứng xử của kết cấu composite này là hết sức cần thiết.

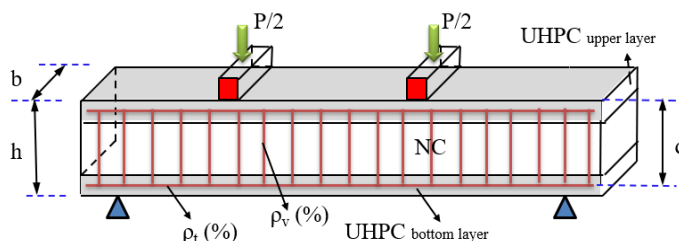
Gần đây, việc sử dụng mô hình Học Máy (ML) trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng đã đạt được đà phát triển đáng kể [5]. Đặc biệt, việc phát triển các mô hình thông minh để dự đoán các thuộc tính cơ học và khả năng làm việc của vật liệu xây dựng cơ bản như UHPC và BTT đã có những đóng góp nhất định trong lĩnh vực vật liệu xây dựng. Những mô hình ML có khả năng cung cấp dự đoán chính xác cao hơn các thuộc tính mong muốn tốt hơn so với các phương pháp phân tích truyền thống [6]. Trong bối cảnh này, việc sử dụng mô hình ML để hiểu rõ hơn về ứng xử kết cấu composite UHPC-BTCT, đặc biệt là để dự đoán khả năng chịu uốn, là vô cùng quan trọng. Mô hình dự đoán ML sẽ mang lại những lợi ích đáng kể hơn so với các phương pháp phân tích truyền thống trong việc dự đoán hiệu suất của kết cấu composite UHPC-BTCT nhờ khả năng xử lý hiệu quả các bộ dữ liệu. Do các phương pháp phân tích truyền thống thường mất thời gian và hạn chế về mô hình hóa. Ngược lại, mô hình ML có tiềm năng cung cấp kết quả nhanh chóng và chính xác hơn. Do đó, việc sử dụng mô hình ML sẽ làm giảm thời gian trong việc phân tích, đánh giá của các kết cấu composite UHPC-BTCT, nó có thể hỗ trợ thiết kế trong việc tạo ra những giải pháp kết cấu đáng tin cậy và kinh tế hơn. Nghiên cứu gần đây của Katlan et al [7] qua việc so sánh dựa trên mười thuật toán Máy Học được ưa chuộng nhất trong lĩnh vực kỹ thuật [8, 9] đã chứng minh được mô

hình XGBoost trong việc dự đoán khả năng chịu uốn của kết cấu liên hợp UHPC-BTCT. Tuy nhiên, các mô hình học máy này có điểm chung là không thể biểu diễn mô hình một cách tường minh dẫn đến sự khó khăn trong việc hiểu rõ bản chất vật lý cũng như hạn chế trong việc ứng dụng một cách rộng rãi.

Hồi quy ký tự là một nhánh của các mô hình học máy với mục tiêu là xác định các hàm số biểu diễn mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào và đầu ra. Trong các mô hình hồi quy ký tự, lập trình di truyền (GP-Genetic Programming) và các mô hình được lấy cảm hứng từ GP có độ chính xác và độ đơn giản tốt hơn các mô hình hồi quy khác. Nghiên cứu này tập trung vào việc dự đoán khả năng chịu momen của các kết cấu composite UHPC-BTCT bằng mô hình Operon [10], là mô hình lập trình di truyền cải tiến đã được chứng minh là một trong những mô hình hồi quy ký tự tốt nhất hiện nay. Sau đó, phương trình thu được sẽ được sử dụng để so sánh với ứng xử chịu uốn của kết cấu UHPC-BTCT của nhóm nghiên cứu đã thực hiện ở một vài nghiên cứu gần đây.

2. PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO

2.1. Dữ liệu thu thập



Hình 1. Thông số thí nghiệm uốn 04 điểm kết cấu UHPC-BTCT phục vụ thu thập dữ liệu.

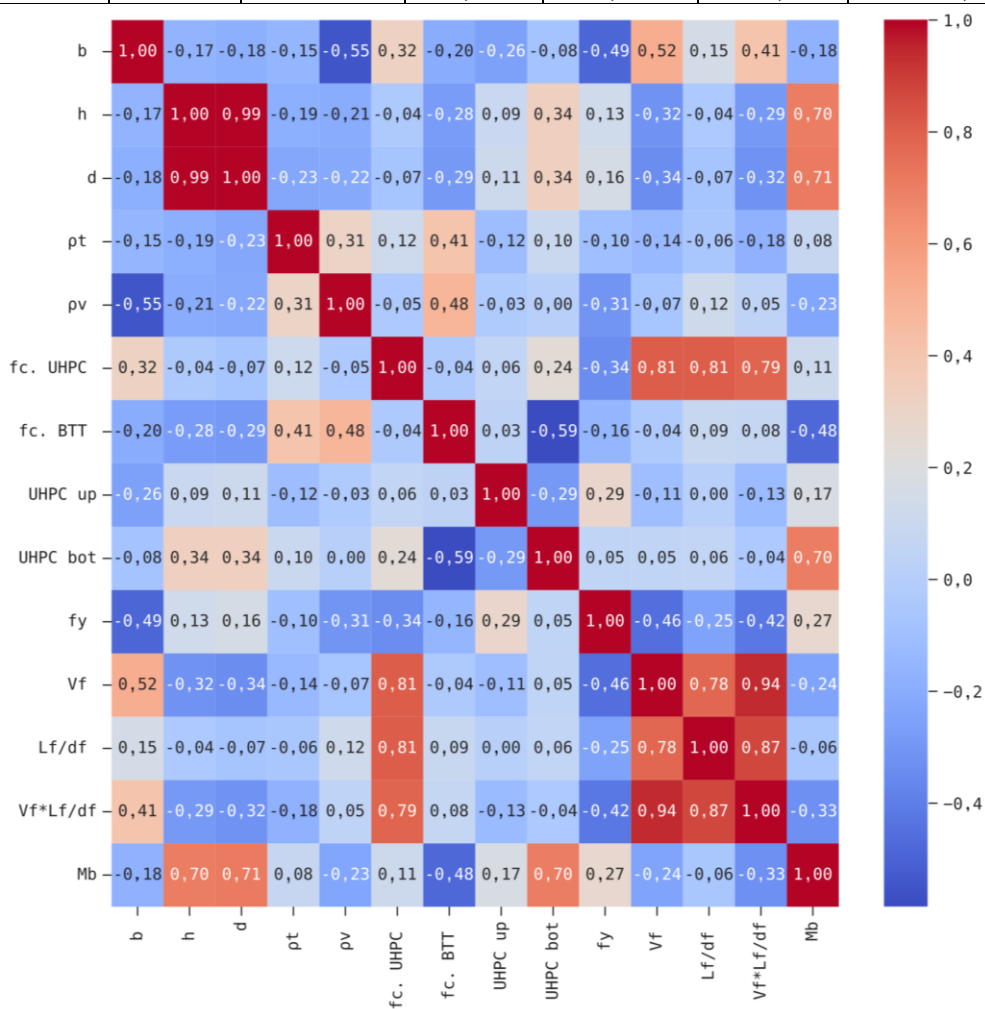
Bài báo này nhằm nghiên cứu mô hình dự đoán để dự báo khả năng chịu momen của kết cấu composite UHPC-BTCT dưới tác động tải trọng uốn. Việc dự đoán khả năng uốn kết cấu là hết sức quan trọng và nghiên cứu này nhằm đóng góp vào việc phát triển các phương pháp mới để làm cho những dự đoán này trở nên chính xác và đáng tin cậy hơn. Thông qua các nghiên cứu trước đây, 65 kết quả thực nghiệm thu được từ các bài báo [11-17] làm cơ sở dữ liệu. Các thí nghiệm của các nghiên cứu trước đây đều tập trung vào dầm hoặc bản có cốt ngang hình chữ nhật, do đó nghiên cứu sẽ tập trung vào xây dựng mô hình cho kết cấu này. Các kết cấu composite UHPC-BTCT có các cấu tạo khác nhau về kích thước mặt cắt ngang, chiều dày của UHPC ở phía trên và dưới của dầm, cường độ của UHPC và BT, hàm lượng cốt thép thường và hàm lượng sợi thép trong UHPC (Hình 1). Biểu đồ tổng quan về kết cấu UHPC-BTCT và các thuộc tính tương ứng của chúng được thể hiện trong Hình 2. Hơn nữa, kết quả của các bộ dữ liệu thu thập được tóm tắt trong Bảng 1.

Qua phân tích đánh giá, tổng cộng 11 thông số đầu vào khác nhau được xác định để ước lượng khả năng chịu moment của kết cấu composite UHPC-BTCT. Các thông số bao gồm chiều rộng (b), chiều cao dầm (h), chiều cao làm việc (d), tỉ lệ cốt thép dọc (ρ_t), tỉ lệ cốt thép đai (ρ_v), cường độ chịu nén của UHPC ($f_{c,UHPC}$), cường độ chịu nén của bê tông thường (f_c BTT), chiều dày của lớp UHPC ở phía trên của dầm/bản (UHPC_{up}), chiều dày của UHPC ở phía dưới của dầm/bản (UHPC_{bot}), ứng suất kéo chảy của cốt thép thường (f_y), và chỉ số sợi thép trong UHPC ($V_f \times L_f / d_f$, trong đó V_f , L_f và d_f là tỉ lệ thể tích, chiều dài và đường kính của sợi, tương ứng). Đầu ra là khả năng chịu momen của các dầm ($M_{b,exp}$), được định nghĩa là giá trị tương ứng với mô men lớn nhất trong đường cong mô men-độ võng của mẫu. Thông tin

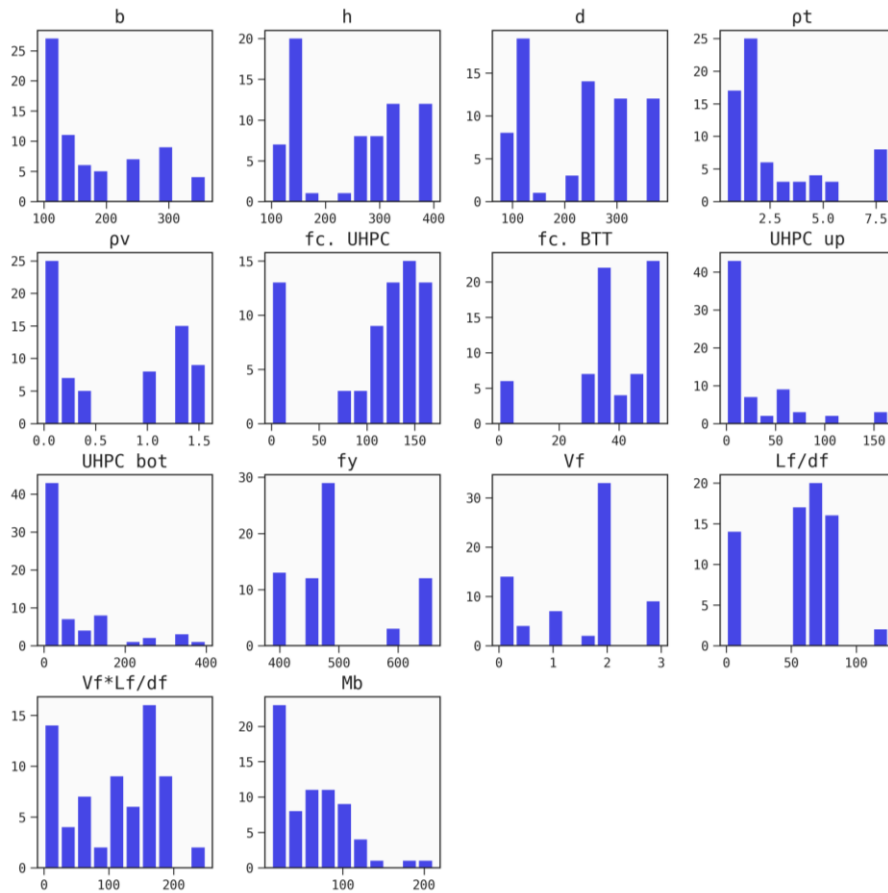
thống kê và phân phối tần suất của đầu ra và đặc tính đầu vào cho cơ sở dữ liệu thu thập được được cung cấp trong Bảng 1 và Hình 2, tương ứng.

Bảng 1. Các chỉ số thống kê của tập dữ liệu.

	Kí hiệu	Số lượng mẫu	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị nhỏ nhất	Giá trị lớn nhất
b	X1	65	176,377	84,174	100	300
h	X2	65	251,594	103,176	100	400
d	X3	65	221,522	102,228	74	385
pt	X4	65	2,727	2,322	0,44	8,1
pv	X5	65	0,684	0,617	0	1,57
fc. UHPC	X6	65	109,036	56,949	0	169,8
fc. BTT	X7	65	37,963	14,429	0	54
UHPC up	X8	65	24,362	40,854	0	165
UHPC bot	X9	65	61,768	97,137	0	400
f_y	X10	65	495,810	86,729	386	660,5
V_f	X11	65	1,522	0,983	0	3
L_f/d_f	X12	65	55,081	31,018	0	125
V_f*L_f/d_f	X13	65	107,334	73,605	0	250
M_b	Y	65	62,643	42,875	12,2	211,9



Hình 2. Mối tương quan giữa kết cấu UHPC-BTCT và các yếu tố ảnh hưởng.



Hình 3. Biểu đồ phân phối của các thuộc tính.

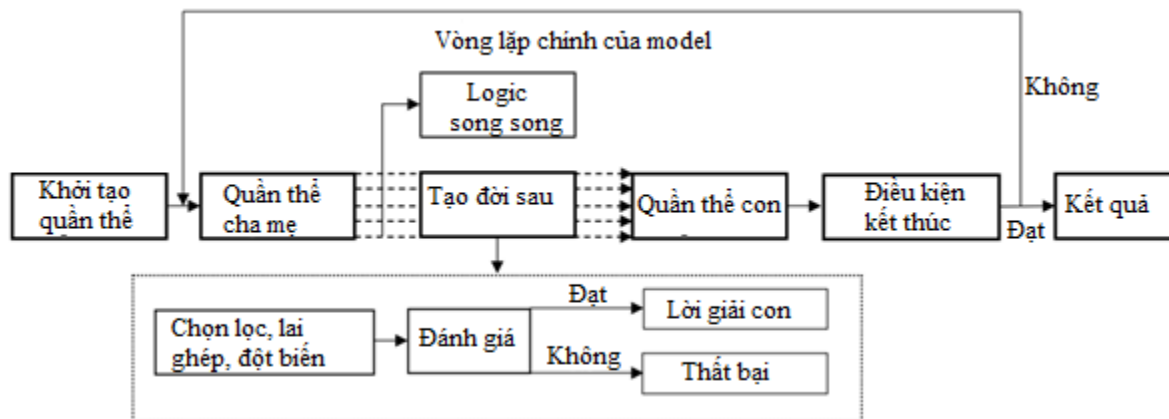
Biểu đồ cột trong Hình 3 thể hiện phân phối và đặc điểm của dữ liệu bằng cách hiển thị tần suất của các giá trị khác nhau trong một dải giá trị cụ thể. Như có thể thấy từ Hình 2, giá trị b nằm trong khoảng từ 100 đến 360 mm, trong khi giá trị d chủ yếu nằm trong khoảng 120-400 mm, tập trung chủ yếu từ 150 đến 280 mm. Cũng có thể thấy rằng giá trị ρ_t tập trung chủ yếu xung quanh 1-4%, trong khi giá trị p_v tập trung chủ yếu trong khoảng 0,5% đến 2%. Các giá trị của $f_{c,UHPC}$ và $f_{c,BTT}$ tập trung chủ yếu xung quanh 100-180 MPa và 30-45 MPa, tương ứng. Ngược lại, chiều dày của lớp UHPC phía trên và UHPC phía dưới tập trung chủ yếu xung quanh 30-120 mm và 100-250 mm, tương ứng, trong khi giá trị cường độ kéo chảy của cốt thép thường f_y tập trung trong khoảng từ 400 đến 500 MPa. Đối với giá trị $V_f \times L_f/d_f$, trong khi nó có giá trị từ 0 đến 250, chủ yếu tập trung trong khoảng từ 100 đến 170. Như vậy, các số liệu đầu vào của kết quả thí nghiệm cho thấy sự biến động đáng kể, và do đó việc thiết lập được một mô hình dự báo ứng xử chịu uốn của kết cấu liên hợp giữa bê tông UHPC-BTCT là hết sức cần thiết.

2.2. Xây dựng mô hình dự báo

Trong những năm gần đây, bên cạnh cách mô hình black box truyền thống, các mô hình whitebox điển hình trong đó là lập trình di truyền (GP-Genetic Programming). Với bên cạnh ưu điểm là xây dựng được mô hình tường minh và có tính ứng dụng cao, mô hình GP vẫn còn nhược điểm là thời gian xây dựng mô hình lâu do tính ngẫu nhiên trong quá trình di truyền. Trong quá trình nghiên cứu và cải tiến lập trình di truyền, nhiều phương pháp mới đã được đề xuất để tăng tốc lập trình di truyền. Trong số đó, Operon [10] được biết đến là phương pháp đạt được độ chính xác

cao nhất cho dữ liệu thực tế như vấn đề đang xét đến. Không giống như những phương pháp GP dạng cây tiêu chuẩn khác, Operon sử dụng tính song song trong quá trình tiến hóa, lai tạo mỗi cá thể mới độc lập trong luồng logic riêng của nó. Đối với mỗi luồng logic, Operon khởi tạo một chu trình di truyền dẫn đến một trong hai kết quả: thành công nếu đời sau được tạo ra, thất bại nếu đời sau không đạt được như kì vọng. Quá trình làm việc của phương pháp Operon được trình bày trong Hình 4.

Ngoài ra, Operon sử dụng mã hóa tuyến tính, trong đó, mỗi cây được biểu diễn dưới dạng chuỗi hậu tố của các nút. Mỗi nút có các thuộc tính điển hình như độ dài, độ sâu, mức độ hoặc mã hoạt động. Ví dụ, mã hóa tuyến tính cho công thức $(a + b) \cdot (a + c) \cdot (b + c)$ tương ứng với biểu diễn hậu tố $((a b +) (a c +) (b c +) \times)$. Operon cũng giới thiệu một thuật toán tạo cây mới được gọi là trình tạo cây cân bằng (BTC- Balanced Tree Creator), thuật toán này tạo ra độ dài cây từ phân bố xác suất nhất định và tinh chỉnh tần số ký hiệu mong muốn trong quần thể. Cơ chế này đạt được sự đánh giá hiệu quả thông qua việc sử dụng trình thông dịch cây theo đợt, trình thông dịch này được lặp lại qua các nút cây và thực thi các chức năng tương ứng trên các lô dữ liệu có kích thước cố định. Việc đánh giá mức độ phù hợp được thực hiện bằng cách sử dụng bước tìm kiếm cục bộ cho các tham số mô hình tối ưu thông qua bình phương tối thiểu phi tuyến tính.



Hình 4. Quá trình tiến hóa của mô hình Operon.

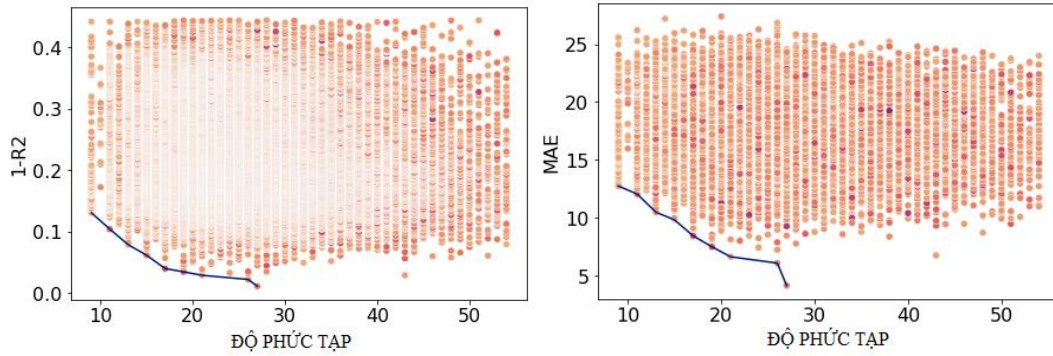
Đối với một hàm số là kết quả của phương pháp hồi quy ký tự, có hai tiêu chí quan trọng nhất để đánh giá độ chính xác và độ phức tạp của hàm số. Một hàm số có độ chính xác cao đôi khi có độ phức tạp quá lớn dẫn đến khó khăn trong việc biểu diễn tường minh cũng như áp dụng vào thực tế. Ngược lại, với những hàm số ngắn gọn thường khó đạt hiệu quả cao so với các hàm số khác. Việc lựa chọn một giải pháp tốt nhất cân bằng giữa hiệu quả và độ chính xác của mô hình trong tập kết quả thu được không đơn giản. Để giải quyết vấn đề này, nhóm nghiên cứu đã sử dụng phương pháp như sau: (i) tiến hành một số lượng lớn các lần chạy GP cho mỗi mô hình; (ii) ghi lại tất cả dữ liệu liên quan (các thước đo thống kê cho tập dữ liệu huấn luyện và kiểm tra, phương trình thu được, độ phức tạp, tham số GP, thời gian chạy,...) cho mỗi lần chạy mô hình trong tệp dữ liệu; (iii) xây dựng mặt Pareto bao gồm các điểm tối ưu tốt hơn các giải pháp khác về độ chính xác và độ phức tạp; (iv) lựa chọn các phương án tối ưu tốt nhất trực tiếp từ những kết quả ở mặt Pareto.

Theo nghiên cứu đã được công bố [18], có 04 tham số chính ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình: Độ sâu quần thể ban đầu, số lượng lựa chọn, quy mô quần thể và số thế hệ. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành khảo sát với các giá trị: Độ sâu quần thể ban đầu: 2, 3, 4, 5, 6; số lượng lựa chọn giải đầu: 5, 10, 15, 20; quy mô quần thể: 1000, 1100, 2000; và số thế hệ: 20, 40, 60, 80, 100, mỗi bộ tham số cho mô hình được tính toán 30 lần, tổng cộng là 15.000 lần tính toán.

Trong mỗi lần tính toán, các hàm số được tạo ra một cách ngẫu nhiên, sau đó, hàm số có độ chính xác cao nhất được lưu và đánh giá với tập dữ liệu kiểm chứng. Để đánh giá độ chính xác của mô hình, 2 hệ số đánh giá độ chính xác là R2 và MAE được sử dụng như sau:

$$R_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_l)^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

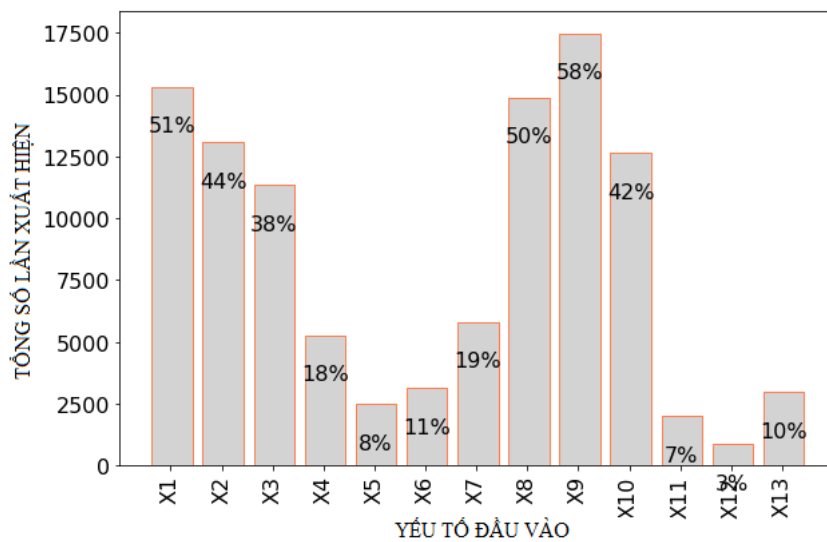


Hình 5. Quan hệ giữa độ phức tạp của phương trình và độ chính xác (a)1-R2, (b) MAE.

Mối quan hệ giữa độ chính xác và độ phức tạp của phương trình được thể hiện trong Hình 5. Mặt Pareto, tập hợp của những kết quả tối ưu, được thể hiện bằng đường màu xanh. Hàm số hợp lý nhất tìm thấy dựa trên kết quả phân tích các hàm số thu được như sau:

$$\text{Mu} = 30,88 \times (0,014 \times X_{10} + 0,089 \times X_4 - 5,55) \times (0,006 \times X_3 + 0,005 \times X_8 + (0,62 - 0,28 \times X_4)) \times (0,047 \times X_7 - 0,0045 \times X_8 - 2,54) + (-0,17 \times X_{11} - 0,37) \times (-0,009 \times X_9 - 0,6) + 0,46 \times (0,003 \times X_6 - 1)^2 - 2,56 + 69,3446 \quad (3)$$

Hình 6 là biểu đồ thống kê số lần xuất hiện của các tham số đầu vào trong tập kết quả các hàm số thu được.



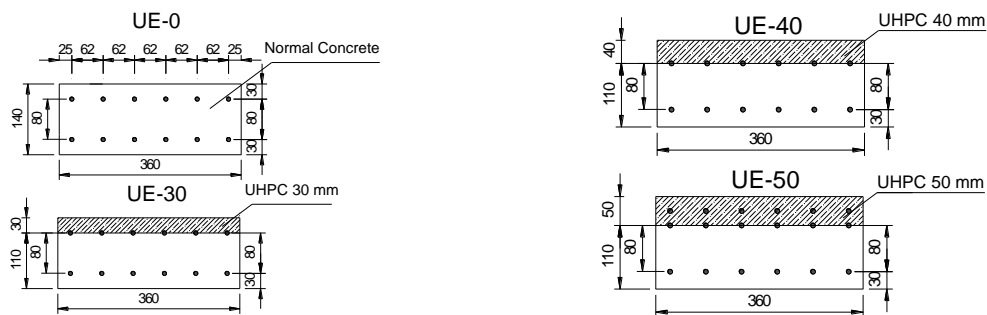
Hình 6. Thống kê sự xuất hiện của các tham số trong tập kết quả.

3. THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH

Để đánh giá được hiệu quả của mô hình học máy (ML) vừa được xây dựng, phần tiếp theo của bài báo sẽ so sánh mô hình dự báo với kết quả thí nghiệm của nghiên cứu gần đây [19].

Bê tông siêu tính năng (UHPC) sử dụng để chế tạo gồm các cốt liệu thành phần chính với đặc tính kỹ thuật được như sau: Xi măng Portland PC40; Cát Quartz; Phụ gia và tro bay; Sợi thép sử dụng trong bê tông là loại sợi thép mạ đồng. Sợi thép có cường độ chịu kéo cao hơn 2000 MPa và đường kính bằng 0,2 mm dài 12 mm. Thí nghiệm vật liệu đã được tiến hành ở các nghiên cứu trước đây [3]. Cường độ chịu nén của mẫu bê tông UHPC ở 28 ngày có cường độ trung bình 130 MPa, cường độ chịu kéo trung bình 9 MPa. Bê tông thường được sử dụng trong nghiên cứu có cường độ chịu nén $f_c' = 35,8$ MPa ở 28 ngày tuổi.

Cốt thép thường được sử dụng có các loại cốt thép sau đây: cốt thép ở vùng chịu kéo có cỡ đường kính 12 mm; cốt thép ở vùng chịu nén có đường kính 12 mm; cốt thép đai sử dụng là cốt thép có đường kính 6 mm ở khu vực đầu dầm để tránh việc phá hủy cục bộ ở khu vực gối kê. Chi tiết bố trí cốt thép trên mặt cắt ngang như trong Hình 7.

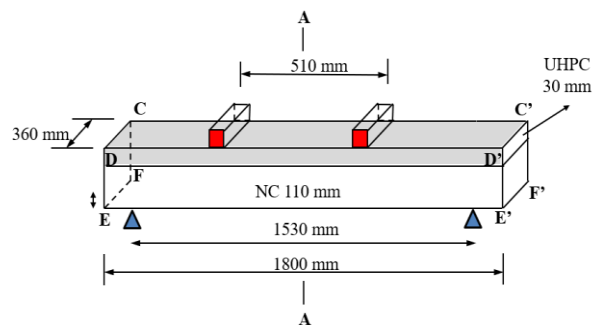


Hình 7. Chi tiết cấu tạo mặt cắt ngang của bản thí nghiệm [19].

Kích thước của bản BTCT được chế tạo như sau: chiều dài 1800 mm; chiều rộng 360 mm; chiều cao 110 mm. Sau đó, khi tiến hành đổ bê tông được 03 ngày sẽ tiến hành đổ UHPC trên bề mặt với các chiều dày khác nhau là 30 mm, 40 mm, 50 mm (Hình 7). Sau 28 ngày, mẫu bản được tiến hành thí nghiệm uốn 04 điểm trong phòng thí nghiệm của Trường Đại học giao thông vận tải (Hình 8.a). Thí nghiệm uốn 04 điểm với khoảng cách giữa 02 điểm uốn là 510 mm (Hình 8.b) [19].



a)



b)

Hình 8. Thí nghiệm uốn 04 điểm [19].

Thí nghiệm được thực hiện với tốc độ gia tải là 0,1 kN/s. Trong quá trình làm thí

nghiệm, độ võng ở vị trí giữa nhịp được đo đạc thông qua 01 LDVT.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả thí nghiệm và dự báo.

Mẫu	Kết quả thí nghiệm [19]		Kết quả dự báo
	P_u (kN)	M_u (kN)	M_u dự báo (kN.m)
NC	148,35	37,83	35,24
UHPC-30	195,06	49,74	50,83
UHPC-40	230,05	58,66	55,21
UHPC-50	243,43	62,07	59,59

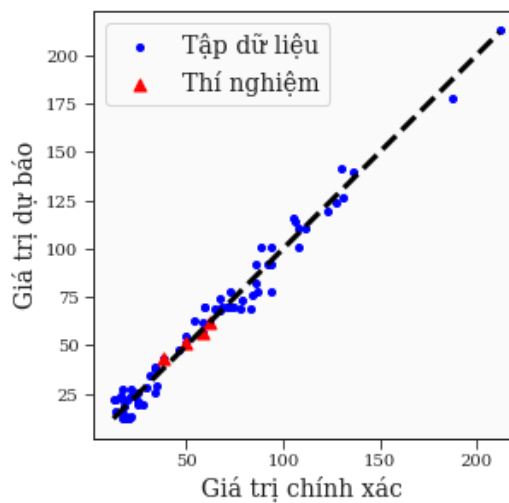
Trong đó: P_u là lực phá hoại mẫu, M_u là mô men gây phá hoại mẫu, M_u dự báo là mô men dự báo từ thuật toán Operon

4. KẾT QUẢ DỰ BÁO VÀ THẢO LUẬN

Độ chính xác của phương trình (3) được đánh giá thông qua hai hệ số R^2 và MAE. Các kết quả này cũng được so sánh với các mô hình đã được công bố trong [7] có bổ sung thêm dữ liệu trong nghiên cứu [19]. Bảng 3 cho thấy hàm số tìm được có độ chính xác khá cao $R^2=0,959$, $MAE = 7,0$ đối với tập huấn luyện và $R^2= 0,964$ và $MAE= 6,25$ đối với tập kiểm chứng (Bảng 3, Hình 9).

Bảng 3. So sánh mô hình tìm được và các mô hình đã được công bố trong [7].

Thuật toán	Tập huấn luyện		Tập kiểm chứng	
	R^2	MAE	R^2	MAE
MLP	0,947	7,06	0,834	7,81
RF	0,970	5,30	0,873	7,77
ERT	0,989	3,27	0,895	6,31
XGBoost	0,996	0,79	0,945	4,94
KNN	0,925	7,71	0,791	9,46
AdaBoost	0,976	5,35	0,910	6,28
Operon	0,959	7,0	0,964	6,25



Hình 9. So sánh các giá trị dự báo và giá trị chính xác.

Kết quả dự báo ứng xử chịu uốn của mẫu dầm bản được tăng cường bằng lớp UHPC dày 30 mm, 40 mm, 50mm được tổng hợp trong Bảng 2. Hình 9 mô tả mối quan hệ giữa kết quả thí nghiệm và kết quả dự báo. Trong đó, kết quả màu đỏ là kết quả thí nghiệm được mô tả trong phần 3 của bài báo. Kết quả thu được cho thấy mô hình Operon được đề xuất có thể dự báo được khả năng chịu uốn có kết cấu composite UHPC-BTCT với độ chính xác khá cao khi so sánh với các mô hình khác.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng mô hình học máy (ML) nhằm dự báo ứng xử chịu uốn của kết cấu composite UHPC-BTCT. Kết quả xây dựng mô hình được thực hiện dựa trên 65 nghiên cứu trong các công bố gần đây của các tác giả trên thế giới, sau đó mô hình Operon được sử dụng nhằm thiết lập mối quan hệ phục vụ việc dự báo ứng xử chịu uốn của kết cấu composite UHPC-BTCT. Phương trình dự báo được thiết lập sau đó được sử dụng để dự báo ứng xử chịu uốn của 04 bản thí nghiệm. Kết quả cho thấy, phương pháp đề xuất cho độ chính xác khá cao với $R^2 = 0,964$ và đề xuất được một công thức tường minh trong việc xây dựng sự phụ thuộc giữa các yếu tố ảnh hưởng của các tham số đến ứng xử chịu uốn của kết cấu composite UHPC-BTCT.

Kết quả dự báo được thực hiện thông qua 65 kết quả thực nghiệm thu thập được, sau đó phương trình dự báo dùng để kiểm chứng 04 kết quả thực nghiệm khác. Số lượng dữ liệu thực nghiệm chưa đủ lớn, do đó trong các nghiên cứu tiếp theo cần cập nhật thêm nhiều số liệu để chuẩn xác hơn nữa phương trình đề xuất.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2024-CT-017

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hoàng Việt Hải, Thực nghiệm và mô phỏng ứng xử chịu kéo của bê tông siêu tính năng, Tạp Chí Khoa Học Giao Thông Vận Tải, 74 (2023) 709-717. <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.6.2>
- [2]. H. Yin, K. Shirai, W. Teo, Finite element modelling to predict the flexural behaviour of ultra-high performance concrete members, Engineering Structures, 183 (2019) 741-755. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.046>
- [3]. Hoàng Việt Hải, Thực nghiệm ứng xử chịu uốn bản bê tông cốt thép được tăng cường bê tông siêu tính năng (UHPC). Tạp Chí Khoa Học Giao Thông Vận Tải, 74 (2023) 1100-1109. <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.9.7>
- [4]. H. Yin, W. Teo, K. Shirai, Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete, Construction and Building Materials, 155 (2017) 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.077>
- [5]. M. Mohtasham Moein, A. Saradar, K. Rahmati, S.H. Ghasemzadeh Mousavinejad, J. Bristow, V. Aramali, M. Karakouzian, Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: A review, Journal of Building Engineering, 63 (2023) 105444. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105444>
- [6]. L.K Nguyen, T.H Trinh, T.T Nguyen, H.D. Nguyen, Comparative study on the performance of different machine learning techniques to predict the shear strength of RC deep beams: Model selection and industry implications, Expert Systems with Applications, 230 (2023) 120649. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120649>

- [7]. M. Katlav, F. Ergen, Data-driven moment-carrying capacity prediction of hybrid beams consisting of UHPC-NSC using machine learning-based models, *Structures*, 59 (2024) 105733. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105733>
- [8]. H.-T. Thai, Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review, *Structures*, 38 (2022) 448-491. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.003>
- [9]. A.T.G. Tapeh, M.Z. Naser, Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Structural Engineering: A Scientometrics Review of Trends and Best Practices, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30 (2023) 115-159. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09793-w>
- [10]. B. Burlacu, G. Kronberger, M. Kommenda, Operon C++: an efficient genetic programming framework for symbolic regression, in *Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, Association for Computing Machinery: Cancun, Mexico. (2020) 1562–1570. <https://doi.org/10.1145/3377929.3398099>.
- [11]. H. Falah Hassan, Behavior of Hybrid Deep Beams Containing Ultra High Performance and Conventional Concretes, *Engineering & Technology Journal*, 33 (2015) 30-50. <https://doi.org/10.30684/etj.33.1A.3>
- [12]. M. Safdar, T. Matsumoto, K. Kakuma, Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Composite Structures*, 157 (2016) 448-460. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.010>
- [13]. K. Turker, I.B. Torun, Flexural performance of highly reinforced composite beams with ultra-high performance fiber reinforced concrete layer, *Engineering Structures*, 219 (2020) 110722. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110722>
- [14]. Y. Yang, C. Xu, J. Yang, K. Wang, Experimental study on flexural behavior of precast hybrid UHPC-NSC beams, *Journal of Building Engineering*, 70 (2023) 106354. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106354>
- [15]. S. Yuan, Z. Liu, T. Tong, J. Liu, Experimental, analytical, and numerical investigation on flexural behavior of hybrid beams consisting of ultra-high performance and normal-strength concrete, *Engineering Structures*, 268 (2022) 114725. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114725>
- [16]. M.A. Al-Osta, M.N. Isa, M.H. Baluch, M.K. Rahman, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 279-296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>
- [17]. L. Hussein, L. Amleh, Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 1105-1116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.030>
- [18]. B.A. Le, B.V. Tran, T.S. Vu, V.H. Vu, V.H. Nguyen, Predicting the Compressive Strength of Pervious Cement Concrete based on Fast Genetic Programming Method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08396-2>
- [19]. V.H. Hoang, T.A. Do, A.T. Tran, X.H. Nguyen, Flexural capacity of reinforced concrete slabs retrofitted with ultra-high-performance concrete and fiber-reinforced polymer, *Innovative Infrastructure Solution*, 9 (2024) 113. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01410-y>