

Dự báo sức kháng cắt của dầm bê tông cốt thép có lỗ khoét

Prediction on the shear strength of reinforced concrete beam with openings

Lê Bá Anh¹, Lê Đăng Dũng¹, Nguyễn Quang Sĩ^{2,*}, Nguyễn Xuân Huy¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải

*Tác giả liên hệ: sinq_ph@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 22/12/2023 ; Ngày chấp nhận đăng: 15/1/2024

Tóm tắt:

Bài báo đề cập tới ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt thép (BTCT) có lỗ khoét ở bụng dầm. Dựa trên các dữ liệu thí nghiệm và mô phỏng đã thu thập, việc phân tích tham số được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng khả năng chịu cắt của dầm. Một mô hình trí tuệ nhân tạo dựa trên phương pháp hồi quy ký tự được đề xuất nhằm dự báo cường độ chịu cắt của dầm. So sánh với dữ liệu từ kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình trí tuệ nhân tạo đưa ra dự báo tin cậy về khả năng chịu cắt của dầm BTCT có lỗ khoét.

Từ khóa: Dầm bê tông cốt thép; Lỗ khoét bản bụng; Sức kháng cắt; Mô hình AI.

Abstract:

This study investigates the shear behavior of reinforced concrete (RC) beams with web openings. Based on the experimental and numerical data collected, different parameters were analyzed to clarify their influence on the shear capacity strength of the beam. An artificial intelligence (AI) model was proposed to predict the beam's shear strength. Compared to the experimental data, the AI model is a reliable tool for predicting the shear strength of RC beams with openings.

Keywords: RC beam; Web opening; Shear strength; AI model.

1. Giới thiệu

Dầm BTCT là một trong những cấu kiện phổ biến nhất, được sử dụng trong các công trình xây dựng dân dụng, giao thông cũng như thủy lợi. Trong kết cấu nhà dân dụng, mong muốn tăng không gian sử dụng và chiều cao thông thủy đối với cấu kiện dầm ngày càng được quan tâm. Việc này dẫn đến cần tối ưu hóa vị trí lắp đặt hệ thống kỹ thuật (đường dây cáp, đường ống nước, hệ thống thông hơi,...). Phương án khoét lỗ cho hệ thống kỹ thuật chạy xuyên qua dầm là một giải pháp phù hợp, hiệu quả và được sử dụng khá phổ biến đối với nhiều công trình trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Các loại dầm BTCT khoét lỗ liên tục (dầm khoang tròn, ovan) tạo thêm điểm nhấn kiến trúc, thể hiện vẻ

đẹp của công trình, đồng thời, giảm trọng lượng cấu kiện. Tuy nhiên, các lỗ khoét là nguyên nhân làm giảm khả năng chịu lực, tính ổn định của dầm. Sự có mặt các lỗ khoét dẫn đến giảm tiết diện, gây ra hiện tượng tập trung ứng suất, có nguy cơ xuất hiện vết nứt xung quanh thành lỗ. Chính vì vậy, việc xác định kích thước, vị trí của lỗ khoét cần xem xét trong tính toán để đảm bảo khả năng chịu lực cũng như công năng của cấu kiện.

Ở Việt Nam, hiện nay, chưa có tiêu chuẩn đưa ra các chỉ dẫn về thiết kế dầm BTCT có lỗ khoét. Bên cạnh đó, số lượng các nghiên cứu về dạng cấu kiện này chưa nhiều. Nghiên cứu [1] đề xuất việc sử dụng mô hình giàn ảo để đánh giá sự làm việc của dầm cao có khoét lỗ. Tài liệu [2] và [3] sử

dụng các công cụ mô phỏng như Ansys, Safir để mô phỏng ứng xử chịu lực của dầm BTCT có lỗ khoét. Quân và cộng sự [4] tiến hành nghiên cứu thực nghiệm kết hợp mô phỏng số trên dầm BTCT có lỗ khoét hình vuông. Các nghiên cứu thực nghiệm về dạng kết cấu này còn hạn chế tại Việt Nam.

Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu thực hiện về chủ đề dầm BTCT có lỗ khoét như nghiên cứu của Mansur và Tan [5], Ahmed và các cộng sự [6], Amiri và các cộng sự [7]. Trong thời gian gần đây, các phương pháp trí tuệ nhân tạo (AI - Artificial intelligence) được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực và đạt được nhiều thành quả. Trong lĩnh vực nghiên cứu ứng xử của dầm cao BTCT, Mohammadhasani và cộng sự [8] đã đề xuất hệ thống suy luận mờ dựa trên mạng thích ứng (ANFIS) và mô hình hồi quy tuyến tính để dự đoán độ võng của dầm. Feng và cộng sự [9] đã sử dụng các mô hình Ensemble. Mohammed và Ismail [10] đã sử dụng mô hình Support Vector Machine (SVM), XGBoost và hồi quy đa biến (MARS). Zhang và cộng sự [11], đã sử dụng các mô hình SVR-GA, ANN và GBT để dự đoán cường độ cắt của dầm cao BTCT. Bên cạnh đó, số lượng mẫu thí nghiệm được sử dụng làm cơ sở dữ liệu còn hạn chế vì lí do kinh tế. Saleh và cộng sự [12] đã đề xuất sử dụng kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn để xây dựng cơ sở dữ liệu nhằm mục đích tìm kiếm mô hình dự báo cường độ chịu cắt của dầm cao BTCT. Những nghiên cứu trên đều có điểm chung là sử dụng các mô hình học máy hộp đen. Những mô hình này dù đạt được độ chính xác tốt nhưng đều có nhược điểm là không thể biểu diễn một cách tường minh và đơn giản.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiếp cận phương pháp hồi quy ký tự, một nhánh của học máy, với mục tiêu xây dựng một phương trình tường minh dự báo cường độ chịu cắt của dầm cao BTCT có lỗ khoét. Cơ sở lý thuyết và thực nghiệm của dầm cao BTCT có lỗ khoét được trình bày trong phần tiếp theo, từ đó, xây dựng cơ sở dữ liệu dùng trong phương pháp học máy. Phần 3 thể hiện mô hình hồi quy ký tự QLattice

được sử dụng để tìm kiếm công thức phù hợp nhất. Kết quả và thảo luận được trình bày ở phần cuối cùng.

2. Sức kháng cắt dầm bê tông cốt thép có lỗ khoét

Khi xem xét đến sức kháng cắt của dầm BTCT, có sự phân chia thành hai dạng là dầm mảnh (slender beams) và dầm cao (deep beams).

Khi có lỗ khoét, độ mảnh của dầm mảnh tăng, phá hoại do uốn hoặc cắt gây ra. Vì vậy, các mô hình tính toán cho dầm mảnh có lỗ khoét thường khá đơn giản. Ngược lại, với dầm cao có lỗ khoét, ứng xử phức tạp và nhạy cảm hơn, do có nhiều thông số ảnh hưởng đến sự truyền lực, đặc biệt là kích thước và vị trí lỗ khoét. Thêm vào đó, khi có lỗ khoét, dầm cao có các phần tử lệ dạng dầm cao hoặc dầm mảnh khác nhau trên cùng một dầm. Vì vậy, sự phá hoại có thể khác nhau ở các vùng này, nói cách khác, sự phá hoại của dầm cao có khoét lỗ có thể là sự kết hợp của nhiều dạng hư hoại. Chính vì thế, một mô hình giải tích đơn giản để dự đoán sức kháng cắt của dầm cao có lỗ khoét là khó xây dựng.

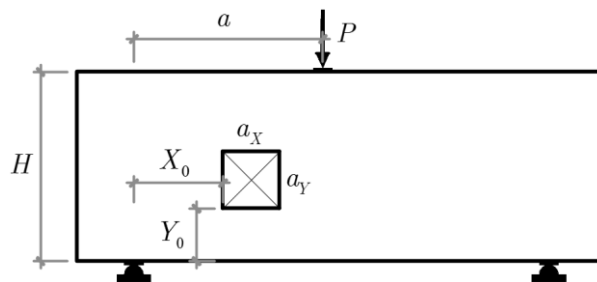
Đã có nhiều thí nghiệm được thực hiện trên thế giới để xem xét sự làm việc của dầm BTCT có lỗ khoét và một số mô hình giải tích đã được đề xuất nhằm xác định cho sức kháng cắt của dầm cao có lỗ khoét. Nói chung, các mô hình này đều dựa trên sơ đồ hệ thanh, do đó, mức độ chính xác của kết quả bị ảnh hưởng rất nhiều bởi cấu tạo hình học và sơ đồ được đề xuất. Dựa trên kết quả từ các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng về ứng xử của dầm cao có lỗ khoét có thể thấy, tổng thể các tham số được xét đến khi nghiên cứu về sự làm việc của dầm cao có lỗ khoét gồm hai yếu tố chính là tham số vật liệu và tham số hình học.

Về vật liệu, bao gồm cường độ của bê tông, cường độ và hàm lượng của cốt thép. Về hình học, có nhiều tham số ảnh hưởng đến ứng xử của dầm, cụ thể gồm: Kích thước mặt cắt, kích thước và vị trí lỗ khoét (Hình 1). Để có được tính tổng quát và áp dụng rộng rãi, những tham số được đưa về các dạng tỷ lệ, cụ thể:

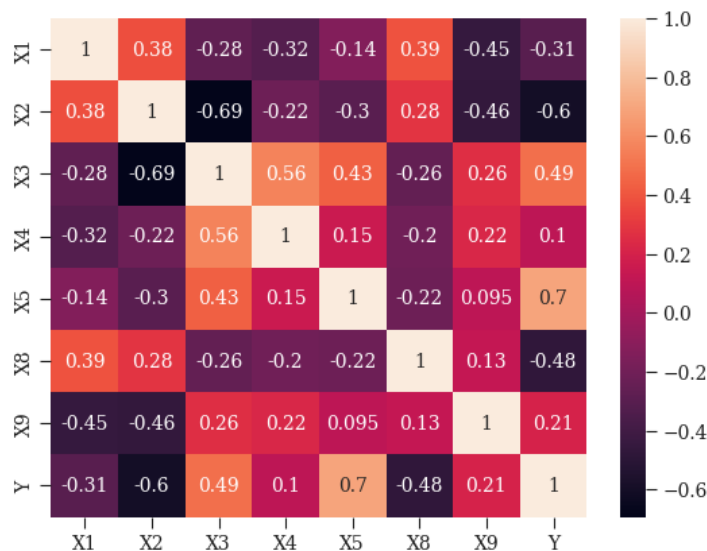
- Kích thước của lỗ mở được xét đến qua các tỷ lệ: $X_3 = \frac{a_x}{a}$, $X_4 = \frac{a_y}{H}$;
- Vị trí của lỗ khoét được xét đến qua các tỷ lệ: $X_5 = \frac{X_0}{a}$ và $X_6 = \frac{Y_0}{H}$;
- Hàm lượng cốt thép đai: $X_8 = \rho_{sw} (\%)$;
- Hàm lượng cốt thép dọc: $X_9 = \rho_s (\%)$;
- Vị trí của lực tác dụng (nhịp cắt) được xét đến qua tỷ số: $X_2 = \frac{a}{H}$.

Trong đó: H là chiều cao của mặt cắt dầm, a là khoảng cách từ điểm đặt lực đến gối gần nhất, a_x là kích thước lỗ theo phương dọc dầm (phương ngang), a_y là kích thước lỗ theo phương đứng của dầm. X_0 là khoảng cách từ điểm góc lỗ khoét đến

gối gần nhất theo phương ngang, Y_0 là điểm góc lỗ khoét đến gối gần nhất theo phương đứng. Bảng 1 thể hiện các thông số (từ X_1 đến X_9) của các mẫu đã được nhiều tác giả trên thế giới thực hiện và sức kháng (Y). Ngoài các số liệu được tổng hợp trong Phụ lục A của bài báo này, các số liệu đã được thu thập bởi Saleh và cộng sự [12] được sử dụng để tăng thêm nguồn dữ liệu cho nghiên cứu.



Hình 1. Các thông số hình học của dầm.



Hình 2. Quan hệ giữa các tham số trong tập dữ liệu được biểu diễn thông qua hệ số Pearson.

Bảng 1. Các đặc trưng thống kê của cơ sở dữ liệu.

Tên	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₈	X ₉	Y
count	543	543	543	543	543	543	543	543
mean	47,127	0,735	0,483	0,248	0,639	0,797	0,25	1960,153
std	20,209	0,406	0,335	0,116	0,743	0,666	0,19	1889,105
min	19,62	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	51
25%	32	0,5	0,267	0,2	0,25	0,45	0,0	222,5
50%	40	0,688	0,417	0,233	0,417	0,450	0,29	1645,378
75%	57,95	0,9	0,638	0,3	0,650	1,000	0,29	3101,263
max	132,1	2	1,6	0,625	3,600	5,428	0,949	7328,650

Từ các tham số được đưa vào xem xét, qua phân tích cho thấy, các tham số có ảnh hưởng lớn đến kết quả gồm cường độ chịu nén của bê tông, kích thước của lỗ khoét, vị trí của lỗ khoét theo phương ngang, hàm lượng của cốt thép dọc, hàm lượng của cốt thép đai. Quan hệ giữa các tham số trong tập dữ liệu biểu diễn theo hệ số Pearson được thể hiện ở Hình 2.

3. Mô hình dự báo sức kháng cắt dầm có lỗ khoét dựa trên trí tuệ nhân tạo

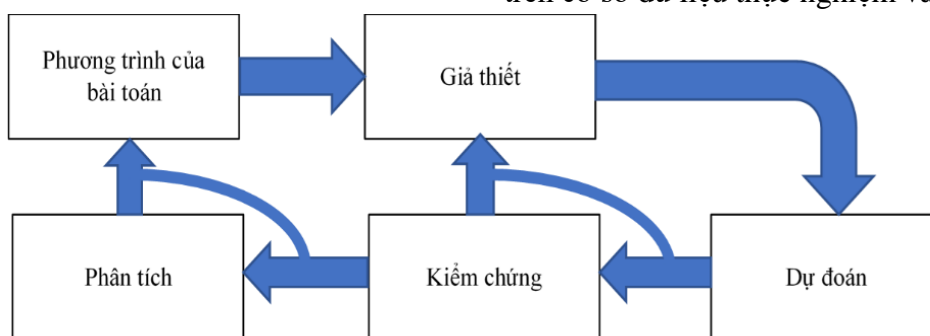
3.1. Hồi quy ký tự và mô hình QLattice

Hồi quy ký tự (SR - Symbolic Regression) là một lĩnh vực nhỏ của học máy liên quan đến việc khám phá mô hình của dữ liệu đã cho dưới dạng biểu thức (hoặc phương trình) toán học. Trong khi, hầu hết các phương pháp hồi quy khác đều dựa vào điều chỉnh các trọng số trong cấu trúc mô hình được xác định trước, quá trình chính của bài toán SR liên quan đến việc tìm kiếm cấu trúc của chính mô hình đó bằng cách kết hợp các đặc điểm, toán tử toán học và hằng số thành một hàm duy nhất. Các biểu thức được xác định thông qua nhiều phương pháp khác nhau như phương pháp lập trình di truyền được lấy cảm hứng từ di truyền trong sinh học, hoặc phương pháp cảm hứng từ mạng học sâu. Các phương pháp SR khác nhau đã được ứng dụng

và kiểm chứng [13]-[15], không chỉ đối với các bài toán đã có lời giải thực tế, còn với các bài toán chưa rõ dạng phân tích. Phương pháp SR mở rộng sang ứng dụng trong việc học không giám sát thông qua biểu diễn hàm ẩn [16] và được chứng minh là hoạt động tốt trên các tập dữ liệu nhỏ [17]. Ưu điểm chính của SR là phát hiện các mối quan hệ phi tuyến tính và khả năng biểu diễn chúng một cách rõ ràng. Một số ứng dụng đáng chú ý nhất của SR trong lĩnh vực vật lý và cơ học. Trong đó, các quy luật tự nhiên được rút ra từ dữ liệu quan sát [18], tạo ra các phần mềm tiên tiến như Eureka [19] và AI Feynman [20], [21].

QLattice [22] là một cách tiếp cận SR lấy cảm hứng từ phương pháp tích phân đường Feynman. QLattice mô phỏng một đường dẫn bắt nguồn từ đầu vào, xuyên qua không gian mạng trước khi xuất hiện ở đầu ra. Quá trình này được lặp lại nhiều lần cho đến khi một liên kết vững chắc được hình thành. Các liên kết này hội tụ đến con đường có khả năng xảy ra nhất, cụ thể, ở đây là mô hình tốt nhất cho vấn đề đang tiến hành nghiên cứu. Quá trình mô phỏng của QLattice được trình bày như Hình 3.

Trong bài báo này, mô hình QLattice được sử dụng để xây dựng phương trình dự báo sức kháng cắt của dầm cao BTCT có lỗ khoét dựa trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng.

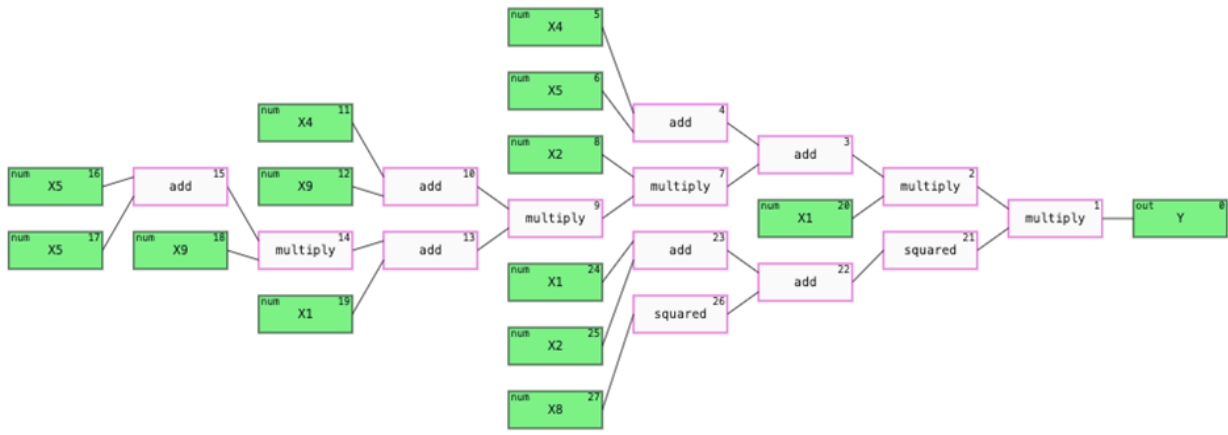


Hình 3. Sơ đồ của mô hình QLattice.

3.2. Kết quả và thảo luận

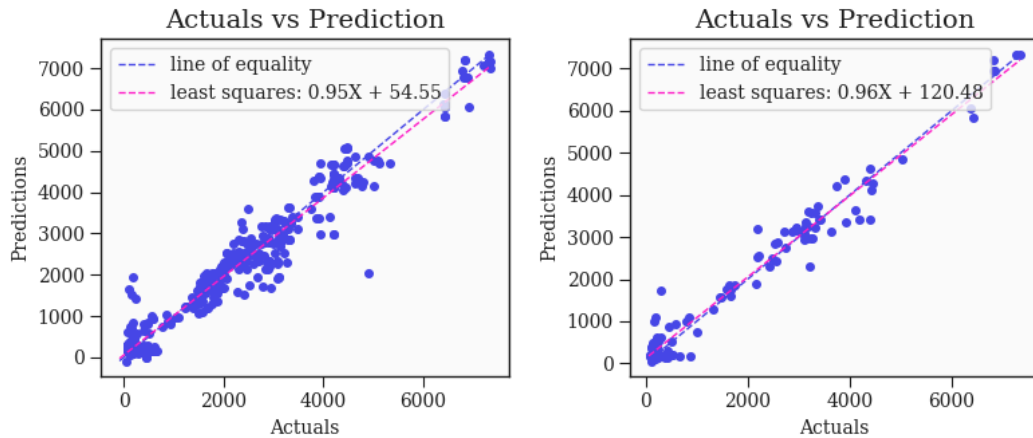
Với mô hình được đề xuất, nhóm nghiên cứu đã tiến hành huấn luyện với bộ dữ liệu dầm cao BTCT có lỗ. Các phép toán được sử dụng trong

quá trình huấn luyện bao gồm: Cộng, trừ, nhân, chia, lũy thừa. Mô hình kết quả được trình bày trong Hình 4 và được viết lại theo dạng phương trình (1).



Hình 4. Mô hình tối ưu tìm được.

$$\begin{aligned}
 Y = & 15455,1 \times (0,0173X_1 - 0,3434) \times (-0,011X_1 - 0,045X_2 + (1 - 0,375X_8)^2 + 0,412)^2 \\
 & \times (1,8X_4 + 0,9634X_5 + (2,195 - 1,475X_2)) \\
 & \times (0,015X_1 + (0,162 - 0,374X_5) \times (0,533X_9 - 0,778) - 1,33) \\
 & \times (5X_4 - 0,582X_9 - 2,283) - 0,8 + 167,263
 \end{aligned} \tag{1}$$



Hình 5. So sánh kết quả chính xác và kết quả dự báo của phương trình đề xuất.

Bảng 2. So sánh sự làm việc của các mô hình khác nhau.

Model	Data	R2	MAE	RMSE
Train	QLattice	0,956	265	393
	XGB	0,99	120	219
	GBR	0,996	85	120
	MLP	0,942	276	390
Test	QLattice	0,966	251	351
	XGB	0,97	168	336
	GBR	0,947	293	462
	MLP	0,902	460	630

Kết quả thu được từ Bảng 2 cho thấy, phương trình tìm được có độ chính xác cao, với các chỉ số đánh giá lần lượt là R2 = 0,966, MAE = 251, RMSE = 351. Các chỉ số này có độ chính xác cao hơn so với kết quả của mô hình nghiên cứu bởi Saleh và cộng sự [12].

4. Kết luận

Nội dung của bài báo đề cập đến ứng xử chịu cắt của dầm cao BTCT có lỗ khoét ở bản bụng. Các dữ liệu về ứng xử chịu cắt của dầm đã được tổng hợp và phân tích, từ đó, chỉ ra những tham số quan trọng ảnh hưởng đến sức kháng cắt của dầm BTCT có lỗ khoét.

Dựa trên cách tiếp cận QLattice của phương pháp hồi quy ký tự, bài báo đã đề xuất công thức

dự báo cường độ chịu cắt của dầm cao BTCT có lỗ khoét. Công thức dự báo đề xuất có độ chính xác cao với các chỉ số đánh giá lần lượt là $R2 = 0,966$, $MAE = 251$, $RMSE = 351$. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả đề xuất thực hiện các thí nghiệm bổ sung đối chứng cũng như phát triển với dầm cao BTCT có các hình dạng lỗ khoét khác nhau (tròn, ovan).

Phụ lục A. Tham số thu được từ kết quả thí nghiệm dầm cao có lỗ khoét của các tác giả trên thế giới

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Cường độ cốt thép	Hàm lượng cốt thép đai	Hàm lượng cốt thép dọc	Sức kháng cắt
	f'_c	$\frac{a}{H}$	$\frac{a_x}{a}$	$\frac{a_y}{H}$	$\frac{X_0}{a}$	$\frac{Y_0}{H}$	f_y	$\rho_{sw}(\%)$	$\rho_s(\%)$	$V(kN)$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
Shaaban [23]	20,16	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,79	0,71	193,81
	20,16	1,00	0,20	0,20	0,53	0,40	0,00	2,79	0,71	170,64
	20,16	1,00	0,20	0,20	0,28	0,40	0,00	2,79	0,71	162,00
	20,16	1,00	0,35	0,20	0,43	0,40	0,00	2,79	0,44	130,89
	20,16	1,60	0,22	0,20	0,27	0,40	0,00	2,79	0,44	125,00
	19,62	1,60	0,22	0,20	0,27	0,40	0,00	2,79	0,44	120,45
	20,16	2,00	0,18	0,20	0,21	0,40	0,00	2,79	0,44	110,25
	19,62	2,00	0,18	0,20	0,21	0,00	0,00	2,79	0,44	110,66
Al-Enezi [24]	132,10	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	426,30	5,43	0,35	380,00
	132,10	0,69	0,65	0,20	0,40	0,43	426,30	5,43	0,63	205,00
	132,10	0,69	0,29	0,20	0,76	0,43	426,30	5,43	0,71	215,00
	132,10	0,69	0,65	0,20	0,40	0,43	426,30	5,43	0,35	175,00
	132,10	0,69	0,51	0,20	0,75	0,43	426,30	5,43	0,47	170,00
Farouk [25]	27,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	650,00	2,75	0,40	313,30
	27,00	1,00	0,19	0,19	0,41	0,41	650,00	2,75	0,40	276,30
	27,00	1,00	0,38	0,38	0,31	0,31	650,00	2,75	0,40	241,30
	27,00	1,00	0,63	0,63	0,19	0,19	650,00	2,75	0,40	98,20
	27,00	1,00	0,45	0,20	0,28	0,40	650,00	2,75	0,40	118,50
	27,00	1,00	0,45	0,60	0,28	0,20	650,00	2,75	0,40	109,90

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Cường độ cốt thép	Hàm lượng cốt thép đai	Hàm lượng cốt thép dọc	Sức kháng cắt
	f'_c	$\frac{a}{H}$	$\frac{a_X}{a}$	$\frac{a_Y}{H}$	$\frac{X_0}{a}$	$\frac{Y_0}{H}$	f_y	$\rho_{sw}(\%)$	$\rho_s(\%)$	$V(kN)$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
Jasim [26]	27,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	569,67	0,87	0,42	500,00
	27,00	1,10	0,36	0,40	0,32	0,30	569,67	0,87	0,42	190,00
	27,00	1,10	0,36	0,40	0,55	0,30	569,67	0,87	0,42	210,00
	27,00	1,10	0,42	0,46	0,29	0,27	569,67	0,87	0,42	175,00
	27,00	1,10	0,42	0,46	0,49	0,27	569,67	0,87	0,42	170,00
Min [27]	72,00	1,50	0,07	0,10	0,52	0,45	500,00	1,02	0,00	352,80
	72,00	1,50	0,07	0,10	0,65	0,45	500,00	1,02	0,00	415,80
	72,00	1,50	0,07	0,10	0,38	0,45	500,00	1,02	0,00	422,40
	72,00	1,50	0,07	0,10	0,25	0,45	500,00	1,02	0,00	422,20
	70,00	1,50	0,07	0,10	0,45	0,55	500,00	1,02	0,00	347,70
	70,00	1,50	0,07	0,10	0,45	0,65	500,00	1,02	0,00	401,80
	70,00	1,50	0,07	0,10	0,45	0,35	500,00	1,02	0,00	267,90
	70,00	1,50	0,07	0,10	0,45	0,25	500,00	1,02	0,00	240,50
	63,00	1,50	0,07	0,10	0,55	0,55	500,00	1,02	0,00	303,10
	63,00	1,50	0,07	0,10	0,65	0,65	500,00	1,02	0,00	245,10
	63,00	1,50	0,07	0,10	0,35	0,35	500,00	1,02	0,00	189,70
	63,00	1,50	0,07	0,10	0,25	0,25	500,00	1,02	0,00	177,60
	82,00	1,50	0,07	0,10	0,35	0,55	500,00	1,02	0,00	454,40
	82,00	1,50	0,07	0,10	0,25	0,65	500,00	1,02	0,00	457,80
	82,00	1,50	0,07	0,10	0,55	0,35	500,00	1,02	0,00	232,30
	82,00	1,50	0,07	0,10	0,65	0,25	500,00	1,02	0,00	185,10
	72,00	1,50	0,07	0,10	0,45	0,45	500,00	1,02	0,00	390,10
	80,00	1,50	0,07	0,10	0,43	0,38	500,00	1,02	0,00	193,20
	80,00	1,50	0,07	0,10	0,40	0,40	500,00	1,02	0,00	112,80
	79,00	1,50	0,13	0,10	0,45	0,45	500,00	1,02	0,00	166,80
79,00	1,50	0,27	0,10	0,45	0,45	500,00	1,02	0,00	122,60	
79,00	1,50	0,13	0,10	0,38	0,45	500,00	1,02	0,00	174,40	
79,00	1,50	0,27	0,10	0,25	0,45	500,00	1,02	0,00	122,80	

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Cường độ cốt thép	Hàm lượng cốt thép đai	Hàm lượng cốt thép dọc	Sức kháng cắt
	f'_c	$\frac{a}{H}$	$\frac{a_X}{a}$	$\frac{a_Y}{H}$	$\frac{X_0}{a}$	$\frac{Y_0}{H}$	f_y	$\rho_{sw}(\%)$	$\rho_s(\%)$	$V(kN)$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
	64,00	1,50	0,20	0,10	0,38	0,45	500,00	1,02	0,00	146,10
	64,00	1,50	0,27	0,10	0,35	0,45	500,00	1,02	0,00	138,20
	91,00	1,50	0,07	0,20	0,45	0,45	500,00	1,02	0,00	306,60
	91,00	1,50	0,07	0,30	0,45	0,35	500,00	1,02	0,00	157,90
	91,00	1,50	0,07	0,20	0,45	0,35	500,00	1,02	0,00	135,20
	91,00	1,50	0,07	0,30	0,45	0,25	500,00	1,02	0,00	111,80
	64,00	1,50	0,07	0,30	0,45	0,35	500,00	1,02	0,00	109,80
	64,00	1,50	0,07	0,40	0,45	0,30	500,00	1,02	0,00	81,40
	34,00	1,50	0,17	0,25	0,38	0,38	500,00	1,02	0,00	88,10
	34,00	1,50	0,20	0,30	0,35	0,35	500,00	1,02	0,00	87,00
	34,00	1,50	0,23	0,35	0,33	0,33	500,00	1,02	0,00	79,50
	34,00	1,50	0,27	0,40	0,30	0,28	500,00	1,02	0,00	72,40
	66,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	500,00	1,02	0,00	489,50
	66,00	1,50	0,17	0,25	0,38	0,38	500,00	1,02	0,00	125,60
	66,00	1,50	0,20	0,30	0,35	0,35	500,00	1,02	0,00	93,20
	66,00	1,50	0,23	0,35	0,33	0,33	500,00	1,02	0,00	78,90
	66,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	500,00	1,02	0,00	657,60
	66,00	1,00	0,25	0,25	0,56	0,38	500,00	1,02	0,00	583,10
	66,00	1,00	0,30	0,30	0,53	0,35	500,00	1,02	0,00	334,50
	66,00	1,00	0,35	0,35	0,49	0,33	500,00	1,02	0,00	174,40
Maaddawy [28]	21,00	0,80	0,38	0,30	0,31	0,35	420,00	1,54	0,47	205,20
	21,00	0,80	0,50	0,40	0,25	0,30	420,00	1,54	0,47	163,00
	21,00	0,80	0,63	0,50	0,19	0,25	420,00	1,54	0,47	106,60
	21,00	0,80	0,38	0,30	0,13	0,55	420,00	1,54	0,47	260,20
	21,00	0,80	0,50	0,40	0,13	0,45	420,00	1,54	0,47	220,00
	21,00	0,80	0,63	0,50	0,13	0,35	420,00	1,54	0,47	127,60
	21,00	0,80	0,38	0,30	0,50	0,15	420,00	1,54	0,47	291,40
	21,00	0,80	0,50	0,40	0,38	0,15	420,00	1,54	0,47	210,70

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Cường độ cốt thép	Hàm lượng cốt thép đai	Hàm lượng cốt thép dọc	Sức kháng cắt
	f'_c	$\frac{a}{H}$	$\frac{a_X}{a}$	$\frac{a_Y}{H}$	$\frac{X_0}{a}$	$\frac{Y_0}{H}$	f_y	$\rho_{sw}(\%)$	$\rho_s(\%)$	$V(kN)$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
	21,00	0,80	0,63	0,50	0,25	0,15	420,00	1,54	0,47	137,90
El-Maaddawy [29]	20,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	520,00	1,81	0,00	51,30
	20,00	2,00	0,25	0,50	0,38	0,25	520,00	1,81	0,00	14,00
	20,00	2,00	0,44	0,50	0,28	0,25	520,00	1,81	0,00	15,30
	20,00	2,00	0,63	0,30	0,19	0,35	520,00	1,81	0,00	28,70
	20,00	2,00	0,63	0,40	0,19	0,30	520,00	1,81	0,00	27,30
	20,00	2,00	0,63	0,50	0,19	0,25	520,00	1,81	0,00	21,30
Abed [30]	28,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	535,00	0,25	0,00	399,00
	28,00	0,80	0,38	0,31	0,31	0,35	535,00	0,25	0,00	196,00
	28,00	0,80	0,38	0,31	0,68	0,25	535,00	0,25	0,00	275,00
	28,00	0,80	0,50	0,40	0,25	0,30	535,00	0,25	0,00	135,50
	28,00	0,80	0,62	0,49	0,19	0,25	535,00	0,25	0,00	115,50
Yoo [31]	39,31	1,50	0,17	0,25	0,36	0,38	0,00	0,00	0,00	88,09
	39,31	1,50	0,20	0,30	0,34	0,35	0,00	0,00	0,00	86,52
	39,31	1,50	0,23	0,35	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	79,46
	39,31	1,50	0,27	0,40	0,31	0,30	0,00	0,00	0,00	71,40
	39,31	1,50	0,17	0,25	0,36	0,38	0,00	0,00	0,00	107,70
	39,31	1,50	0,20	0,30	0,34	0,35	0,00	0,00	0,00	103,20
	39,31	1,50	0,23	0,35	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	88,29
	39,31	1,50	0,27	0,40	0,31	0,30	0,00	0,00	0,00	82,99
	77,60	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	472,65
	77,60	1,50	0,17	0,25	0,36	0,38	0,00	0,00	0,00	125,57
	77,60	1,50	0,20	0,30	0,34	0,35	0,00	0,00	0,00	93,20
	77,60	1,50	0,23	0,35	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	82,40
	77,60	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	657,56
	77,60	1,50	0,17	0,25	0,36	0,38	0,00	0,00	0,00	583,11
	77,60	1,50	0,20	0,30	0,34	0,35	0,00	0,00	0,00	334,52
77,60	1,50	0,23	0,35	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	174,42	

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Cường độ cốt thép	Hàm lượng cốt thép đai	Hàm lượng cốt thép dọc	Sức kháng cắt
	f'_c	$\frac{a}{H}$	$\frac{a_X}{a}$	$\frac{a_Y}{H}$	$\frac{X_0}{a}$	$\frac{Y_0}{H}$	f_y	$\rho_{sw}(\%)$	$\rho_s(\%)$	$V(kN)$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
Yang [32]	55,80	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	803,00	0,97	0,00	817,00
	55,80	0,50	0,25	0,10	0,38	0,45	803,00	0,97	0,00	726,00
	55,80	0,50	0,25	0,10	0,38	0,45	803,00	0,97	0,39	864,00
	55,80	0,50	0,25	0,10	0,38	0,45	803,00	0,97	0,79	1177,00
	55,80	0,50	0,25	0,20	0,38	0,40	803,00	0,97	0,00	627,00
	55,80	0,50	0,25	0,20	0,38	0,40	803,00	0,97	1,34	1107,00
	55,80	0,50	0,25	0,30	0,38	0,35	803,00	0,97	0,00	565,00
	55,80	0,50	0,25	0,30	0,38	0,35	803,00	0,97	1,52	998,00
	55,80	0,50	0,50	0,10	0,25	0,45	803,00	0,97	0,00	644,00
	55,80	0,50	0,50	0,10	0,25	0,45	803,00	0,97	0,79	910,00
	55,80	0,50	0,50	0,10	0,25	0,45	803,00	0,97	1,19	1133,00
	55,80	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	803,00	0,97	0,00	480,00
	55,80	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	803,00	0,97	0,48	688,00
	55,80	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	803,00	0,97	0,97	697,00
	55,80	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	803,00	0,97	1,45	740,00
Yang [33]	50,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	0,89	0,00	770,00
	50,00	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	800,00	0,89	0,00	289,00
	50,00	0,50	0,50	0,30	0,25	0,20	800,00	0,89	0,00	300,00
	50,00	0,50	0,50	0,30	0,25	0,50	800,00	0,89	0,00	334,00
	50,00	0,50	0,50	0,10	0,25	0,45	800,00	0,89	0,00	466,00
	50,00	0,50	0,50	0,20	0,25	0,40	800,00	0,89	0,00	348,00
	50,00	0,50	0,25	0,30	0,38	0,35	800,00	0,89	0,00	337,00
	50,00	0,50	0,65	0,30	0,18	0,35	800,00	0,89	0,00	236,00
	50,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	0,89	0,00	476,00
	50,00	1,00	0,50	0,30	0,25	0,35	800,00	0,89	0,00	144,00
	50,00	1,00	0,50	0,30	0,25	0,20	800,00	0,89	0,00	172,00
	50,00	1,00	0,50	0,30	0,25	0,50	800,00	0,89	0,00	258,00
	50,00	1,00	0,50	0,10	0,25	0,45	800,00	0,89	0,00	225,00

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Tỷ lệ	Cường độ cốt thép	Hàm lượng cốt thép đai	Hàm lượng cốt thép dọc	Sức kháng cắt
	f'_c	$\frac{a}{H}$	$\frac{a_X}{a}$	$\frac{a_Y}{H}$	$\frac{X_0}{a}$	$\frac{Y_0}{H}$	f_y	$\rho_{sw}(\%)$	$\rho_s(\%)$	$V(kN)$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
	50,00	1,00	0,50	0,20	0,25	0,40	800,00	0,89	0,00	184,00
	50,00	1,00	0,25	0,30	0,38	0,35	800,00	0,89	0,00	163,00
	50,00	1,00	0,65	0,30	0,18	0,35	800,00	0,89	0,00	130,00
	50,00	1,00	0,80	0,30	0,10	0,35	800,00	0,89	0,00	90,00
	24,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	0,89	0,00	535,00
	24,00	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	800,00	0,89	0,00	233,00
	24,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	0,89	0,00	375,00
	24,00	1,00	0,50	0,30	0,25	0,35	800,00	0,89	0,00	117,00
	80,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	0,89	0,00	823,00
	80,00	0,50	0,50	0,30	0,25	0,35	800,00	0,89	0,00	335,00
	80,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	0,89	0,00	573,00
	80,00	1,00	0,50	0,30	0,25	0,35	800,00	0,89	0,00	112,00
Abdelaal [34]	32,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	400,00	1,06	0,29	1100,00
	32,00	0,50	0,33	0,30	0,33	0,35	400,00	1,06	0,29	1000,00
	32,00	0,50	0,50	0,25	0,25	0,35	400,00	1,06	0,29	850,00
	32,00	0,50	0,67	0,30	0,17	0,35	400,00	1,06	0,29	600,00
	32,00	0,50	0,67	0,35	0,17	0,33	400,00	1,06	0,29	500,00
	32,00	0,50	0,67	0,40	0,17	0,30	400,00	1,06	0,29	300,00
Kong [35]	37,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	430,00	0,42	0,00	595,00
	35,60	0,30	0,30	0,20	0,70	0,40	430,00	0,42	0,00	460,00
	36,90	0,30	0,50	0,20	0,50	0,40	430,00	0,42	0,00	390,00
	35,50	0,30	0,70	0,20	0,30	0,40	430,00	0,42	0,00	280,00
	34,70	0,30	1,00	0,20	0,00	0,40	430,00	0,42	0,00	260,00
	35,00	0,30	1,20	0,20	0,20	0,40	430,00	0,42	0,00	200,00
	33,30	0,30	1,50	0,20	0,50	0,40	430,00	0,42	0,00	250,00
	39,20	0,30	0,30	0,20	0,00	0,40	430,00	0,42	0,00	420,00
	31,80	0,30	0,50	0,20	0,00	0,40	430,00	0,42	0,00	380,00
	38,10	0,30	0,70	0,20	0,00	0,40	430,00	0,42	0,00	280,00

Tham số	Cường độ chịu nén	Tỷ lệ $\frac{a}{H}$	Tỷ lệ $\frac{a_X}{a}$	Tỷ lệ $\frac{a_Y}{H}$	Tỷ lệ $\frac{X_0}{a}$	Tỷ lệ $\frac{Y_0}{H}$	Cường độ cốt thép f_y	Hàm lượng cốt thép đai $\rho_{sw}(\%)$	Hàm lượng cốt thép dọc $\rho_s(\%)$	Sức kháng cắt $V(kN)$
	f'_c									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
	33,60	0,30	1,30	0,20	0,00	0,40	430,00	0,42	0,00	210,00
	33,30	0,30	0,30	0,20	0,70	0,67	430,00	0,42	0,00	360,00
	33,10	0,30	0,30	0,20	0,00	0,67	430,00	0,42	0,00	560,00
	37,80	0,30	1,00	0,20	0,00	0,67	430,00	0,42	0,00	300,00
	30,20	0,30	0,30	0,20	0,70	0,13	430,00	0,42	0,00	560,00
	33,60	0,30	0,30	0,20	0,00	0,13	430,00	0,42	0,00	260,00
	37,60	0,30	1,00	0,20	0,00	0,13	430,00	0,42	0,00	195,00

Tài liệu tham khảo

- [1] H. H. Trị, “Đánh giá sự làm việc của dầm cao khoét lỗ thiết kế theo mô hình giàn ảo,” Luận văn Thạc sỹ, Kỹ thuật xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp, Đại học Đà Nẵng, thành phố Đà Nẵng, 2016.
- [2] N. N. Phương và T. V. Dũng, “Khảo sát ảnh hưởng của lỗ khoét đến khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép thường bằng phần mềm Ansys,” *TCKH KT & XD*, số 25, tr. 29-31, 2017. [Online]. Available: https://sti.vista.gov.vn/file_DuLieu/dataTLKHCN//CVt69/2017/CVt69S252017028.pdf.
- [3] C.T. Bình, “Phân tích phi tuyến kết cấu dầm cao bê tông cốt thép có khoét lỗ rỗng,” *TCKHCN XD*, số 3, tr. 12-18, 2017. [Online]. Available: https://ibst.vn/upload/documents/file_upload/1512635710Chu-Thi-Binh.pdf.
- [4] N. H. Quân, N. X. Huy, L. Đ. Dũng và N. Q. Sĩ, “Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng ứng xử chịu cắt của dầm cao bê tông cốt thép có lỗ mở,” *TC KH GTVT*, tập 74, số 8, tr. 975-986, 10.2023, doi: 10.47869/tcsj.74.8.10.
- [5] M. A. Mansur and K. -H. Tan, *Concrete beams with openings: Analysis and design*, W.F. Chen, Ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press LLC, 1999.
- [6] A. Ahmed, M. M. Fayyadh, S. Naganathan, and K. Nasharuddin, “Reinforced concrete beams with web openings: A state of the art review,” *Mater. Des.*, vol. 40, pp. 90–102, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.03.001.
- [7] S. Amiri, R. Masoudnia and A. A. Pabarja, “The study of the effects of web openings on the concrete beams,” *Austr. J. Bas. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 547-556, 2011.
- [8] M. Mohammadhassani et al., “Application of the ANFIS model in deflection prediction of concrete deep beam,” *Struct. Eng. Mech.*, vol. 45, no. 3, pp. 319–32, Feb. 2023, doi: 10.12989/sem.2013.45.3.323.
- [9] D. -C. Feng, W. -J. Wang, S. Mangalathu, G. Hu, and T. Wu, “Implementing ensemble learning methods to predict the shear strength of RC deep beams with/without web reinforcements,” *Eng. Struct.*, vol. 235, May 2021, Art. no. 111979, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111979.
- [10] H. R. M. Mohammed and S. Ismail, “Proposition of new computer artificial intelligence models for shear strength prediction of reinforced concrete beams,” *Eng. Comput.*, vol. 38, pp. 3739–3757, Aug. 2022, doi: 10.1007/s00366-021-01400-z.
- [11] G. Zhang et al., “Reinforced concrete deep beam shear strength capacity modelling using

- an integrative bio-inspired algorithm with an artificial intelligence model,” *Eng. Comput.*, vol. 38 (Suppl 1), pp. 15–28, Apr. 2022, doi: 10.1007/s00366-020-01137-1.
- [12] M. Saleh, M. AlHamaydeh, and M. Zakaria, “Shear capacity prediction for reinforced concrete deep beams with web openings using artificial intelligence methods,” *Eng. Struct.*, vol. 280, Apr. 2023, Art. no. 115675, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115675.
- [13] W. L. Cava et al., “Contemporary symbolic regression methods and their relative performance,” arXiv:2107.14351v1 [cs.NE], Jul. 2021.
- [14] J. Žegklitz and P. Posik, “Benchmarking state-of-the-art symbolic regression algorithms,” *Gen. Program. Evol. Mach.*, vol. 22, pp.5–33, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10710-020-09387-0.
- [15] P. Orzechowski, W. L. Cava, and J. H. Moore, “Where are we now? A large benchmark study of recent symbolic regression methods,” in *GECCO '18: Proc. Gen. Evol. Comput. Conf.*, Koyoto, Japan, Jul. 2018, pp. 1183–1190, doi: 10.1145/3205455.3205539.
- [16] M. Schmidt and H. Lipson, “Symbolic regression of implicit equations,” in *Genetic Programming Theory and Practice VII*, Boston, MA, USA: Springer, 2010, ch. 5 pp. 73–85.
- [17] C. Wilstrup and J. Kasak, “Symbolic regression outperforms other models for small data sets,” arXiv:2103.15147v1 [cs.LG], Mar. 2021.
- [18] M. Schmidt and H. Lipson, “Distilling free-form natural laws from experimental data,” *Sci.*, vol. 324, no. 5923, pp. 81–85, May 2009, doi: 10.1126/science.1165893.
- [19] R. Dubčáková, “Eureqa: Software Review,” vol. 12, pp. 173-178, 2011, doi: 10.1007/s10710-010-9124-z.
- [20] S. -M. Udrescu and M. Tegmark, “AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression,” *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 16, Apr. 2020, Art. no. eaay2631, doi: 10.1126/sciadv.aay2631.
- [21] S. -M. Udrescu et al., “AI Feynman 2.0: Pareto-optimal symbolic regression exploiting graph modularity,” *Comput. Sci.*, arXiv:2006.10782 [cs.LG], Jun. 2020.
- [22] K. R. Broløs et al., “An approach to symbolic regression using feyn,” *Comput. Sci.*, arXiv:2104.05417 [cs.LG], Apr. 2021.
- [23] I. G. Shaaban, “Effect of partial replacement of coarse aggregate by polystyrene balls on the shear behaviour of deep beams with web openings,” *Case Stud. Const. Mater.*, vol. 12, Jun. 2020, Art. no. e00328, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00328.
- [24] M. S. Al-Enezi, A. M. Yousef, and A. M. Tahwia, “Shear capacity of UHPFRC deep beams with web openings,” *Case Stud. Const. Mater.*, vol. 18, Jul. 2023, Art. no. e02105, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02105.
- [25] M. A. Farouk, A. M. R. Moubarak, A. Ibrahim, H. Elwardany, “New alternative techniques for strengthening deep beams with circular and rectangular openings,” *Case Stud. Const. Mater.*, vol. 19, Dec. 2023, Art. no. e02288, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02288.
- [26] W. A. Jasim, A. A. Allawi, and N. K. A. Oukaili, “Effect of size and location of square web openings on the entire behavior of reinforced concrete deep beams,” *Civ. Eng. J.*, vol. 5, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.28991/cej-2019-03091239.
- [27] Y. T. Min, “Strength and behaviour of high strength concrete deep beam with web openings,” Ph.D. dissertation, Sci., Eng., Environ. Technol., Griffith Univ., Queensland, Australia, 2011.
- [28] T. E. Maaddawy and S. Sherif, “FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings,” *Compos. Struct.*, vol. 89, no. 1, pp. 60–69, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.compsstruct.2008.06.022.
- [29] T. El-Maaddawy and B. El-Ariss, “Behavior of concrete beams with short shear span and web opening strengthened in shear with cfrp composites,” *J. Compos. Constr.*, vol. 16, no.

- 1, pp. 47–59, Feb. 2012, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000237.
- [30] H. S. Abed and B. J. Al-Sulayfani, “Experimental and analytical investigation on effect of openings in behavior of reinforced concrete deep beam and enhanced by CFRP laminates,” *Structures*, vol. 48, pp. 706–716, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.01.013.
- [31] T. M. Yoo, J. H. Doh, H. Guan, and S. Fragomeni, “Experimental work on reinforced and prestressed concrete deep beams with various web openings,” *Innov. Struct. Eng. Constr.*, vol. 1, 2008. [Online]. Available: https://research-repository.griffith.edu.au/bitstream/handle/10072/17276/48063_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [32] K. -H. Yang, H. -S. Chung, and A. F. Ashour, “Influence of inclined web reinforcement on reinforced concrete deep beams with openings,” *ACI Struct. J.*, vol. 104, no. 5, pp. 580-589, 2007.
- [33] K. -H. Yang, H. -C. Eun, and H. -S. Chung, “Effect of the size and location of a web opening on the shear behavior of high-strength reinforced concrete deep beams,” *J. Korea Conc. Soc.*, vol. 15, no. 5, pp. 697-704, Oct. 2023, doi: 10.4334/JKCI.2003.15.5.697.
- [34] E. A. H. Abdelaal, H. S. H. Askar, and M. E. El-zoghiby, “Strength characteristics of lightweight reinforced concrete deep beams with web openings,” *Eng. Res. J.*, vol. 166, no. 0, pp. 262–283, Jun. 2020, doi: 10.21608/erj.2020.138834.
- [35] F. K. Kong and G. R. Sharp, “Structural idealization for deep beams with web openings,” *Mag. Conc. Res.*, vol. 29, no. 99, pp. 81–91, Jun. 1977, doi: 10.1680/mac.1977.29.99.81.