

DỰ BÁO HỆ SỐ ỔN ĐỊNH (N_c) CỦA ĐƯỜNG HÀM HÌNH CHỮ NHẬT DỰA TRÊN THUẬT TOÁN MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO

Đinh Văn Phương¹, Nguyễn Thị Hồng Vân², Hồ Đắc Nhật², Nguyễn Thành Trung^{2*}

¹Học viên cao học, Khoa Sau đại học, Trường Đại học Lạc Hồng, Trần Biên, Việt Nam

²Khoa Kỹ thuật Công trình, Trường Đại học Lạc Hồng, Trần Biên, Việt Nam

*Tác giả liên hệ: nguyenthanhtrung@lhu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 02/05/2026
Ngày hoàn thiện: 21/05/2026
Ngày chấp nhận: 22/05/2026
Ngày đăng: 29/06/2026

TỪ KHÓA

Đường hàm hình chữ nhật;
Mạng nơ-ron nhân tạo;
Hệ số ổn định N_c ;
Phân tích giới hạn phần tử hữu hạn.

TÓM TẮT

Một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được đề xuất trong nghiên cứu này nhằm dự đoán hệ số ổn định N_c của đường hàm hình chữ nhật trong nền đất sét không thoát nước. Bộ dữ liệu huấn luyện gồm 60 trường hợp được trích xuất từ nghiên cứu đã kiểm chứng của Shiau và cộng sự (2024) sử dụng phương pháp phân tích giới hạn phần tử hữu hạn (FELA), với hai thông số đầu vào là tỷ lệ độ sâu chôn hầm (H/D) và tỷ lệ chiều rộng (B/D), cùng bốn đầu ra là hệ số N_c cho hai kịch bản sụp đổ và bùng nền ở cận trên và cận dưới. Mô hình ANN được xây dựng bằng mã nguồn tự viết trong Matlab và huấn luyện bằng thuật toán tối ưu Adam hiện đại. Nghiên cứu tập trung khảo sát hai hướng chính: ảnh hưởng của số nơ-ron trong lớp ẩn và so sánh các hàm kích hoạt. Kết quả cho thấy hàm kích hoạt Gelu cho hiệu năng vượt trội so với các hàm truyền thống, và mô hình đạt hệ số xác định R^2 trên tập kiểm tra từ 0,9987 đến 0,9998 cho cả bốn đầu ra, vượt trội so với mô hình MARS. Mô hình này hứa hẹn là công cụ hữu ích cho kỹ sư trong việc ước lượng nhanh hệ số ổn định của hàm hình chữ nhật mà không cần thực hiện các mô phỏng số phức tạp.

PREDICTING STABILITY FACTOR N_c OF RECTANGULAR TUNNELS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Đinh Văn Phương¹, Nguyễn Thị Hồng Vân², Hồ Đắc Nhật², Nguyễn Thành Trung^{2*}

¹Graduate Student, Graduate School, Lac Hong University, Bien Hoa City, Dong Nai Province, Vietnam

²Faculty of Civil Engineering, Lac Hong University, Bien Hoa City, Dong Nai Province, Vietnam

*Corresponding Author: nguyenthanhtrung@lhu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: May 2nd, 2026
Revised: May 21st, 2026
Accepted: May 22nd, 2026
Published: Jun 29th, 2026

KEYWORDS

Rectangular tunnel;
ANN;
Stability factor N_c ;
Finite element limit analysis.

ABSTRACT

An artificial neural network (ANN) model is proposed in this study to predict the stability factor N_c of rectangular tunnels in undrained clay. The training dataset comprising 60 cases is extracted from the verified study of Shiau et al. (2024) using the finite element limit analysis (FELA) method, with two input parameters: the depth ratio (H/D) and the width ratio (B/D), along with four outputs: N_c for collapse and blowout scenarios at both lower and upper bounds. The ANN model is developed using custom MATLAB code and trained with the modern Adam optimization algorithm. The study focuses on two main investigation directions: the effect of the number of hidden-layer neurons and the comparison of activation functions. Results show that the GELU activation function outperforms traditional functions, and the model achieves coefficients of determination R^2 on the test set ranging from 0.9987 to 0.9998 for all four outputs, surpassing the MARS model. The proposed model offers a practical and efficient tool for engineers to rapidly estimate the stability factor of rectangular tunnels without the need for complex numerical simulations.

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh đô thị hóa diễn ra mạnh mẽ tại Việt Nam hiện nay, không gian mặt đất tại các thành phố lớn như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh đang ngày càng trở nên chật hẹp. Việc phát triển không gian ngầm, đặc biệt là các công trình giao thông ngầm (hầm chui dân sinh, hầm đường bộ, hệ thống tàu điện ngầm) và hạ tầng kỹ thuật, đang trở thành xu hướng tất yếu. Trong các dạng công trình ngầm, đường hầm tiết diện hình chữ nhật rất phổ biến nhờ ưu điểm tận dụng tối đa không gian sử dụng so với hầm tròn. Tuy nhiên, việc đánh giá ổn định của hầm hình chữ nhật, đặc biệt là xác định hệ số ổn định (N_c), phức tạp hơn nhiều do sự tập trung ứng suất tại các góc vuông và cơ chế phá hoại phụ thuộc mạnh vào tương tác đất – kết cấu [1].

Trong lĩnh vực địa kỹ thuật, nhiều công trình đã nghiên cứu bài toán ổn định hầm hình chữ nhật. Sloan và cộng sự [2] được xem là những người đặt nền móng cho phương pháp Phân tích giới hạn phần tử hữu hạn (FELA) với các thuật toán giới hạn trên và giới hạn dưới. Wilson và cộng sự [3] công bố nghiên cứu toàn diện đầu tiên về hầm hình chữ nhật trong đất sét không thoát nước, khảo sát ảnh hưởng của các tỷ lệ hình học B/H và C/D , đồng thời chỉ ra rằng cơ chế phá hoại của hầm chữ nhật phức tạp hơn nhiều so với hầm tròn do sự tập trung ứng suất tại các góc vuông. Tiếp nối, nhóm Abbo và cộng sự [4] mở rộng phân tích cho hầm chữ nhật trong đất có trọng lượng, trong khi Sahoo và Kumar [5] xét đến ảnh hưởng của sự không đồng nhất cường độ đất theo chiều sâu. Đặc biệt, Keawsawasvong và Shiau [6] thực hiện nghiên cứu tham số quy mô lớn và đề xuất phương trình xấp xỉ thực nghiệm. Gần đây, Shiau và cộng sự [7] mở rộng bài toán sang không gian ba chiều, cung cấp bộ dữ liệu FELA toàn diện kèm mô hình hồi quy MARS đạt độ chính xác $R^2 = 0,9989$.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về công trình ngầm chủ yếu tập trung vào phân tích ứng xử cơ học của kết cấu ngầm trong nền đất yếu [8] hoặc tương tác đất – kết cấu vỏ hầm [9]. Xu hướng ứng dụng Trí tuệ nhân tạo và Học máy trong kỹ thuật xây dựng cũng đang bắt đầu được quan tâm [10]. Tuy nhiên, hiện vẫn tồn tại một khoảng trống nghiên cứu đáng kể đối với bài toán cụ thể là dự đoán hệ số ổn định N_c của hầm hình chữ nhật – hầu hết các thiết kế thực tế vẫn phụ thuộc vào việc tra cứu biểu đồ ổn định của nước ngoài hoặc chạy mô phỏng số cho từng trường hợp riêng lẻ, gây tốn kém thời gian và thiếu linh hoạt.

Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) là một nhánh của trí tuệ nhân tạo lấy cảm hứng từ cấu trúc và chức năng của hệ thần kinh sinh học. Mô hình ANN đầu tiên được đề xuất bởi McCulloch và Pitts [11]. Nhờ thuật toán lan truyền ngược (Backpropagation) của Rumelhart, Hinton và Williams [12], các mạng nơ-ron nhiều lớp mới được huấn luyện hiệu quả, mở ra khả năng mô hình hóa các hàm phi

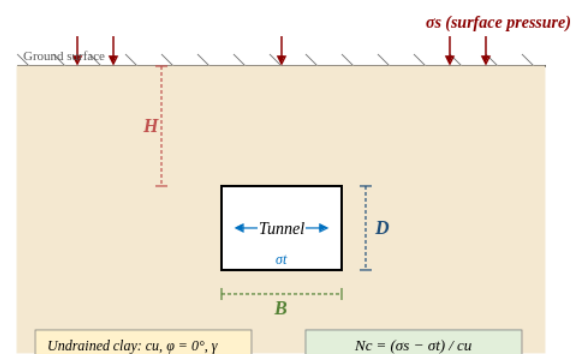
tuyến phức tạp. Ngày nay, ANN được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật, bao gồm cả dự đoán các thông số địa kỹ thuật.

Xuất phát từ bối cảnh đó, nghiên cứu này đề xuất mô hình mạng nơ-ron nhân tạo để dự đoán hệ số ổn định N_c của đường hầm hình chữ nhật, sử dụng thuật toán tối ưu Adam hiện đại. Nghiên cứu tập trung vào hai hướng khảo sát chính: (i) ảnh hưởng của số nơ-ron trong lớp ẩn đến hiệu năng mô hình và (ii) so sánh hiệu quả của các hàm kích hoạt khác nhau, nhằm tìm ra cấu hình tối ưu cho bài toán.

2. ĐỊNH NGHĨA BÀI TOÁN

Bài toán ổn định của đường hầm hình chữ nhật được xem xét trong không gian ba chiều (3D) dưới hai kịch bản phá hoại chính: sụp đổ (*Collapse*) và bùng nền (*Blowout*). Trạng thái sụp đổ xảy ra khi tải trọng phụ thêm trên mặt đất vượt quá khả năng chịu tải của đất nền xung quanh hầm, dẫn đến khối đất phía trên nóc hầm trượt xuống. Ngược lại, trạng thái bùng nền liên quan đến áp lực chống giữ bên trong hầm quá lớn đẩy khối đất lên phía trên.

Đường hầm hình chữ nhật có chiều cao D và chiều rộng B , được chôn ở độ sâu H tính từ mặt đất đến nóc hầm (Hình 1). Bài toán có hai tham số đầu vào không thứ nguyên chính: tỷ lệ độ sâu H/D thay đổi từ 1 đến 10 (phản ánh mức độ chôn sâu của hầm) và tỷ lệ chiều rộng B/D thay đổi từ 0,5 đến 5 (phản ánh hình dạng tiết diện ngang). Đất nền được mô hình hóa theo tiêu chuẩn phá hoại Mohr-Coulomb với cường độ không thoát nước cu ($\varphi = 0^\circ$), đồng nhất và đẳng hướng.



Hình 1. Định nghĩa bài toán ổn định đường hầm hình chữ nhật trong nền đất sét không thoát nước

Bảng 1. Phạm vi các thông số đầu vào và đầu ra

Ký hiệu	Giải thích	Phạm vi	Số giá trị
H/D	Tỷ lệ độ sâu	1, 2, ..., 10	10
B/D	Tỷ lệ chiều rộng	0,5; 1; 2; 3; 4; 5	6
$N_c \text{ collapse}$	Sụp đổ (LB/UB)	4,35 – 16,79	60
$N_c \text{ blowout}$	Bùng nền (LB/UB)	-16,78 – -4,33	60

Đối với mỗi kịch bản phá hoại, nghiên cứu tập trung xác định hệ số ổn định tối hạn không thứ nguyên N_c theo công thức (1):

$$N_c = (\sigma_s - \sigma_t) / c_u \quad (1)$$

Trong đó σ_s là áp lực bề mặt, σ_t là áp lực trong hầm, và c_u là cường độ kháng cắt không thoát nước của đất. Dựa trên lý thuyết phân tích giới hạn, giá trị N_c thực tế luôn nằm trong một khoảng hội tụ giữa giá trị giới hạn dưới (Lower Bound – LB) và giá trị giới hạn trên (Upper Bound – UB). Do đó, với mỗi tổ hợp (H/D, B/D), bộ dữ liệu bao gồm bốn đầu ra: N_c collapse LB, N_c collapse UB, N_c blowout LB, và N_c blowout UB. Phạm vi các thông số đầu vào và đầu ra được trình bày trong Bảng 1.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cơ sở dữ liệu và cấu trúc ANN

Bộ dữ liệu gồm 60 trường hợp được trích xuất từ công trình đã kiểm chứng của Shiau và cộng sự [7]. Phân tích mức độ hội tụ giữa cận trên và cận dưới cho thấy chênh lệch trung bình chỉ khoảng 6,12% cho kịch bản sụp đổ và 6,08% cho kịch bản bùng nền, khẳng định chất lượng dữ liệu đủ tin cậy cho việc huấn luyện ANN. Toàn bộ dữ liệu được chuẩn hóa về khoảng [0, 1] theo công thức Min-Max và chia ngẫu nhiên thành 3 tập: huấn luyện (70%, 42 mẫu), kiểm chứng (15%, 9 mẫu) và kiểm tra (15%, 9 mẫu).

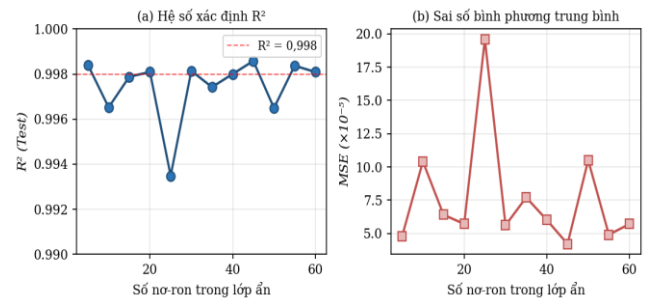
Mạng ANN được sử dụng là mạng truyền thẳng nhiều lớp (Feedforward Neural Network), gồm lớp đầu vào với 2 nơ-ron (H/D, B/D đã chuẩn hóa), lớp ẩn thực hiện biến đổi phi tuyến và lớp đầu ra với 1 nơ-ron dùng hàm kích hoạt tuyến tính. Bốn mô hình ANN riêng biệt được huấn luyện độc lập cho 4 đầu ra N_c . Khác với nhiều nghiên cứu trong nước thường sử dụng thuật toán Levenberg-Marquardt (trainlm), nghiên cứu này triển khai thuật toán Adam bằng mã nguồn tự viết với các siêu tham số: tốc độ học $\alpha = 0,005$; $\beta_1 = 0,9$; $\beta_2 = 0,999$; kích thước mini-batch 16; số epoch tối đa 3000 và patience cho early stopping là 300. Hiệu suất mô hình được đánh giá qua hai chỉ số MSE và R^2 theo công thức (2) và (3):

$$MSE = (1/n) \cdot \sum (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

3.2. Ảnh hưởng của số nơ-ron trong lớp ẩn

Hướng khảo sát thứ nhất nhằm xác định số lượng nơ-ron tối ưu trong lớp ẩn. Số lượng nơ-ron được thay đổi từ 5 đến 60 với cùng cấu hình: 1 lớp ẩn, hàm kích hoạt tanh, 3000 epoch kết hợp early stopping. Kết quả trên tập kiểm tra được thể hiện trong Hình 2.

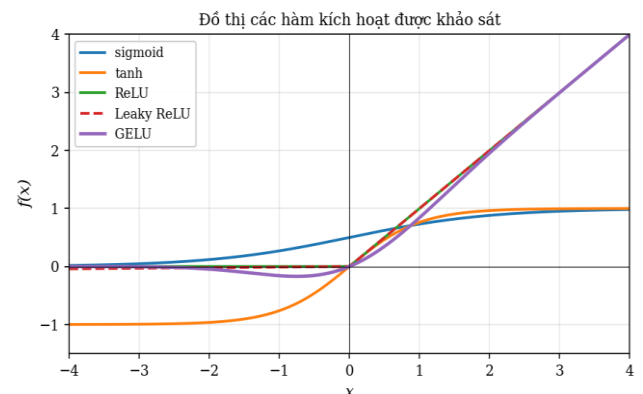


Hình 2. Ảnh hưởng của số nơ-ron trong lớp ẩn đến hiệu năng mô hình ANN: (a) hệ số xác định R^2 và (b) sai số bình phương trung bình MSE

Từ Hình 2 có thể rút ra các nhận xét quan trọng. Thứ nhất, tất cả các cấu hình từ 5 đến 60 nơ-ron đều đạt $R^2 > 0,993$ trên tập kiểm tra, cho thấy ngay cả mô hình ANN đơn giản với 5 nơ-ron cũng đã học tốt mối quan hệ phi tuyến giữa (H/D, B/D) và N_c . Điều này phản ánh bài toán có cấu trúc tương đối đơn giản với chỉ hai biến đầu vào. Thứ hai, hiệu năng mô hình không tăng tuyến tính theo số nơ-ron: các cấu hình với 5, 45 và 55 nơ-ron cho kết quả gần như tương đương ($R^2 \approx 0,998$), trong khi cấu hình 25 nơ-ron lại cho kết quả thấp bất thường ($R^2 = 0,993$) do ảnh hưởng của tính ngẫu nhiên trong khởi tạo trọng số. Thứ ba, khi số nơ-ron vượt quá một ngưỡng nhất định, mô hình có xu hướng dừng huấn luyện sớm hơn do kích hoạt cơ chế early stopping. Kết luận: để cân bằng giữa độ chính xác và chi phí tính toán, cấu hình 25 nơ-ron được chọn làm cơ sở để khảo sát hàm kích hoạt ở bước tiếp theo.

3.3. So sánh hiệu năng của các hàm kích hoạt

Hướng khảo sát thứ hai tập trung so sánh hiệu quả của các hàm kích hoạt, đóng vai trò then chốt trong mạng nơ-ron. Nếu không có hàm kích hoạt phi tuyến, tổ hợp của nhiều lớp cũng chỉ tương đương với một phép biến đổi tuyến tính duy nhất. Nghiên cứu khảo sát năm hàm kích hoạt phổ biến: tanh, sigmoid, ReLU, Leaky ReLU và GELU – trong đó GELU là hàm hiện đại được thiết kế cho các mô hình Transformer. Đồ thị năm hàm kích hoạt được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Đồ thị năm hàm kích hoạt được khảo sát trong nghiên cứu

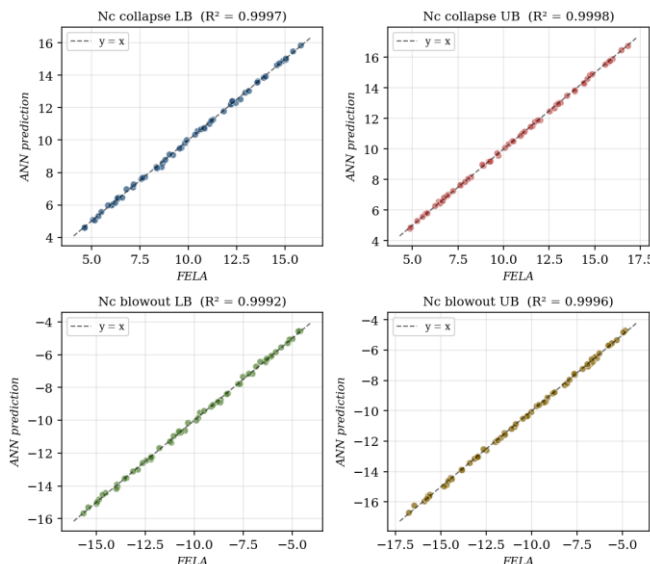
Bảng 2. So sánh hiệu năng của các hàm kích hoạt

Hàm kích hoạt	MSE (Test)	R ² (Test)	Xếp hạng
tanh	0,000196	0,99348	3
sigmoid	0,000046	0,99847	2
ReLU	0,000349	0,98837	4
Leaky ReLU	0,000458	0,98473	5
Gelu	0,000032	0,99893	1

Kết quả từ Bảng 2 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các hàm kích hoạt. Thứ nhất, Gelu cho hiệu năng tốt nhất với $R^2 = 0,99893$ và $MSE = 3,2 \times 10^{-5}$, vượt trội so với tất cả các hàm còn lại. Đây là một phát hiện quan trọng: trong khi hầu hết các nghiên cứu trước đó về ANN trong địa kỹ thuật thường mặc định sử dụng tansig/sigmoid, việc áp dụng Gelu – một hàm kích hoạt hiện đại được thiết kế cho Transformer/GPT – mang lại cải thiện đáng kể cho bài toán hồi quy truyền thống trong địa kỹ thuật. Thứ hai, sigmoid xếp thứ hai ($R^2 = 0,99847$), cho thấy hàm s-curve vẫn hiệu quả với dữ liệu đã chuẩn hóa về $[0, 1]$. Thứ ba, Relu và Leaky Relu cho hiệu năng thấp nhất ($R^2 = 0,988$ và $0,985$), do tính không mượt tại $x = 0$ và hiện tượng "dying Relu" làm giảm khả năng xấp xỉ các hàm trơn – đặc điểm cần thiết cho bài toán hồi quy Nc.

3.4. Mô hình tối ưu và so sánh với MARS

Kết hợp hai hướng khảo sát trên, mô hình ANN tối ưu được xác định với cấu trúc mạng dạng phễu $[20, 10, 5]$ (20 nơ-ron lớp 1, 10 nơ-ron lớp 2, 5 nơ-ron lớp 3) sử dụng hàm kích hoạt Gelu, đạt $R^2 = 0,99903$ trên tập kiểm tra và $MSE = 2,9 \times 10^{-5}$. Mô hình này được áp dụng độc lập cho cả 4 đầu ra. Hình 4 trình bày biểu đồ hiển thị so sánh giá trị dự đoán của ANN với kết quả FELA, cho thấy các điểm dữ liệu nằm cực kỳ sát đường chéo lý tưởng $y = x$.



Hình 4. So sánh giá trị Nc dự đoán bằng ANN $[20, 10, 5]$ và kết quả từ FELA cho cả 4 đầu ra

Bảng 3 so sánh trực tiếp hiệu năng mô hình ANN với mô hình MARS được công bố trong bài báo gốc của Shiau và cộng sự [7] với $R^2 = 0,9989$.

Bảng 3. So sánh mô hình ANN $[20, 10, 5]$ với mô hình MARS

Mô hình	Đầu ra / Nguồn	R ²
MARS	Shiau et al. (2024)	0,99890
ANN	Nc collapse LB	0,99974
ANN	Nc collapse UB	0,99980
ANN	Nc blowout LB	0,99917
ANN	Nc blowout UB	0,99963

Kết quả so sánh cho thấy mô hình ANN vượt trội so với MARS ở cả bốn đầu ra, với mức cải thiện từ 0,03% đến 0,09% về R^2 . Mặc dù mức cải thiện tuyệt đối nhỏ vì cả hai mô hình đều đã đạt $R^2 > 0,998$, kết quả vẫn khẳng định rằng ANN là công cụ dự báo cạnh tranh được với MARS. Bên cạnh độ chính xác cao, ANN còn có ưu điểm về tính linh hoạt trong việc mở rộng số biến đầu vào, tốc độ dự đoán nhanh (chỉ *ms* so với hàng giờ của FELA), và khả năng kết hợp với các kỹ thuật học sâu hiện đại.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phát triển thành công mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) với cấu trúc phễu $[20, 10, 5]$, cho phép dự đoán chính xác hệ số ổn định N_c của đường hầm hình chữ nhật trong nền đất sét không thoát nước với hệ số xác định R^2 đạt từ 0,9987 đến 0,9998. Kết quả thực nghiệm khẳng định mô hình tối ưu này không chỉ vượt trội hơn mô hình hồi quy MARS truyền thống mà còn tối ưu hóa thời gian tính toán từ hàng giờ mô phỏng số xuống mức mi-li-giây, cung cấp một công cụ gọn nhẹ phục vụ hiệu quả cho giai đoạn thiết kế sơ bộ. Đóng góp khoa học cốt lõi của nghiên cứu nằm ở việc tiên phong ứng dụng hàm kích hoạt hiện đại Gelu vào bài toán địa kỹ thuật truyền thống, minh chứng cho năng lực xấp xỉ hàm trơn và hiệu năng vượt trội của nó so với các hàm kinh điển như sigmoid hay tanh. Dù vậy, hạn chế của mô hình hiện tại là mới chỉ khảo sát trên bộ dữ liệu giới hạn gồm 60 trường hợp và phụ thuộc vào giả định nền đất đồng nhất với hai biến hình học đầu vào. Định hướng tiếp theo sẽ tập trung mở rộng quy mô dữ liệu, tích hợp các tham số cơ lý đất nền chuyên sâu như lực dính, góc ma sát, trọng lượng đơn vị, đồng thời triển khai các thuật toán học máy tiên tiến như XGBoost và mạng nơ-ron thông tin vật lý (PINN) để hoàn thiện công cụ dự báo.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Daniel W. Wilson, Andrew J. Abbo, Scott W. Sloan, and Kentaro Yamamoto. 2017. Undrained stability of rectangular tunnels where shear strength increases linearly with depth. *Canadian Geotechnical Journal*. 54(4): 469-480.
- [2] Sloan, S. W. Geotechnical stability analysis. *Géotechnique*, 2013, 63(7): 531–571.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.12.RL.001>
- [3] Wilson, D. W., Abbo, A. J., Sloan, S. W., & Lyamin, A. V. Undrained stability of a square tunnel where the shear strength increases linearly with depth. *Computers and Geotechnics*, 2013, 49: 314–325.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.09.005>
- [4] Abbo, A. J., Wilson, D. W., Sloan, S. W., & Lyamin, A. V. Undrained stability of wide rectangular tunnels. *Computers and Geotechnics*, 2014, 59: 46–59.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.04.005>
- [5] Sahoo, Jagdish Prasad, and Jyant Kumar. "Stability of a circular tunnel in presence of pseudostatic seismic body forces." *Tunnelling and Underground Space Technology* 42 (2014): 264-276.
- [6] Shiau, J., & Keawsawasvong, S. (2022). "Producing Undrained Stability Factors for Various Tunnel Shapes." *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 22(8): 06022017.
DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002487
- [7] Shiau, J., Keawsawasvong, S., Lai, V. Q., & Shiau, K. Rectangular tunnel heading stability in three dimensions and its predictive machine learning models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(12): 4683–4696.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.035>
- [8] Nguyễn Sỹ Hùng. Nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng tiết diện đến sự ổn định gương hầm trong đất sét bão hòa nước. Luận án Tiến sĩ, Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, 2021.
- [9] Lại Văn Quý. Cơ học đất nâng cao và mô hình hóa bài toán địa kỹ thuật trên phần mềm Abaqus. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2024.
- [10] Đỗ Minh Ngọc. Ứng dụng thuật toán học máy trong dự báo biến dạng mặt đất do thi công hầm đô thị. Tạp chí Giao thông Vận tải, 2022, 10.
- [11] McCulloch, W. S., & Pitts, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 1943, 5(4): 115–133.
- [12] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 1986, 323(6088): 533–536.