

# THIẾT LẬP MÔ HÌNH MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO (ANN) TÍNH TOÁN ĐỘ SÂU SAU NƯỚC NHẢY TRONG KÊNH LĂNG TRỤ MẶT CẮT CHỮ NHẬT

Hồ Việt Hùng

Trường Đại học Thủy lợi

**Tóm tắt:** Hiện tượng nước nhảy xảy ra khi dòng chảy biến đổi từ trạng thái chảy xiết với vận tốc lớn sang trạng thái chảy êm với vận tốc nhỏ. Độ sâu sau nước nhảy là một đặc trưng quan trọng, cần được xác định để từ đó tính toán chiều dài khu xoáy của nước nhảy và kích thước bể tiêu năng hay kênh dẫn nước. Khi bỏ qua lực ma sát, có thể xác định được tỷ số hai độ sâu liên hiệp của nước nhảy theo công thức Belanger cho kênh lăng trụ đáy bằng, mặt cắt chữ nhật. Tuy nhiên, trong thực tế có lực ma sát, độ sâu sau nước nhảy sẽ có trị số nhỏ hơn so với tính toán theo công thức Belanger. Vì vậy, bài báo này trình bày việc thiết lập một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để tính toán tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy. Mô hình này có xét đến tính nhám của bề mặt lòng dẫn và tính nhớt của chất lỏng. Mô hình ANN mà tác giả đề xuất cho kết quả tính toán có độ chính xác rất cao, hệ số  $R^2$  đạt sấp xỉ 1 trong cả hai lần kiểm định. Phạm vi ứng dụng mô hình khá rộng, do đó có thể áp dụng mô hình này vào thực tế tính toán độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt chữ nhật.

**Từ khóa:** Nước nhảy, kênh lăng trụ, ANN, độ sâu liên hiệp, độ sâu nước nhảy

**Summary:** The hydraulic jump is the result of an abrupt reduction in flow velocity, converting a high-velocity supercritical flow into a low-velocity subcritical flow. The sequent depth of the hydraulic jump is an important characteristic that needs to be determined to calculate the vortex length of the hydraulic jump and the size of the stilling basin or water canal. Neglecting the frictional force, the ratio of conjugate depths of the hydraulic jump can be determined according to the Belanger formula for a horizontal rectangular prismatic channel. However, when the friction force is present in practice, the sequent depth will have a smaller value than that calculated by the Belanger formula. Therefore, this paper presents the development of an artificial neural network (ANN) model to calculate the conjugate depth ratio of the hydraulic jump. This model considers the surface roughness of the channel and the fluid viscosity. The proposed ANN model has very high accuracy calculation results; the coefficient  $R^2$  is approximately 1 in the validating and testing phases. The application scope of this model is quite large, so it can be applied in practice to calculate the sequent depth of the jump in a horizontal prismatic channel with a rectangular cross-section.

**Key words:** Hydraulic jump, prismatic channel, ANN, conjugate depths, sequent depth.

## 1. TỔNG QUAN NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Hiện tượng nước nhảy thường xảy ra sau đập tràn và cửa cống, khi dòng chảy chuyển từ trạng thái chảy xiết với vận tốc lớn sang trạng thái chảy êm với vận tốc nhỏ. Ngoài ra, nước nhảy còn xuất hiện trong đoạn kênh có độ dốc nhỏ

nổi tiếp với dốc nước. Các đặc trưng hình học của nước nhảy gồm có: độ sâu trước và sau nước nhảy, độ sâu cuối khu xoáy cuộn, chiều dài khu xoáy và chiều dài nước nhảy. Độ sâu sau nước nhảy là một đặc trưng quan trọng, cần được xác định để từ đó tính toán chiều dài khu

Ngày nhận bài: 20/7/2022

Ngày thông qua phản biện: 21/9/2022

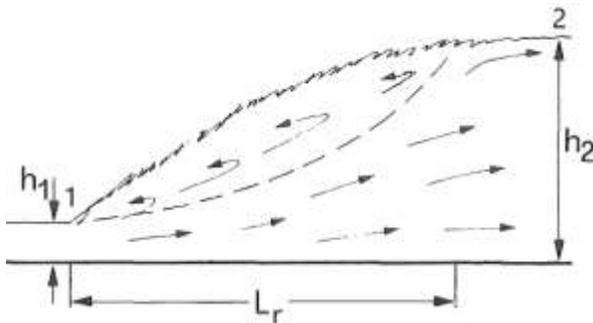
Ngày duyệt đăng: 22/11/2022

xoáy của nước nhảy và kích thước bề tiêu năng hay kênh dẫn nước. Ứng dụng Phương trình động lượng, khi bỏ qua lực ma sát, có thể xác định được tỷ số hai độ sâu liên hiệp của nước nhảy (xem Hình 1). Belanger (1828) đã xây dựng công thức tính độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng, mặt cắt chữ nhật, khi biết số Froude và độ sâu trước nước nhảy [2].

$$Y^* = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \quad (1)$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}} \quad (2)$$

Trong đó:  $h_1$  và  $h_2$  – các độ sâu trước và sau nước nhảy;  $Fr_1$  – số Froude trước nước nhảy;  $V_1$  – vận tốc trung bình tại mặt cắt trước nước nhảy;  $g$  – gia tốc trọng trường.



Hình 1: Các độ sâu nước nhảy, mô phỏng theo Hager [4]

Ngoài ra, Peterka (1984) [7], Bretz (1987) [3], Hager (1989) [4] đã tiến hành các thí nghiệm trên mô hình vật lý để đo đạc các độ sâu liên hiệp của nước nhảy và chiều dài khu xoáy. Hager đã xây dựng các đồ thị để tra tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy khi xét đến ảnh hưởng của tính nhớt (số Reynolds) và độ sâu tương đối trước nước nhảy  $h_1/b$  [4]. Kết quả nghiên cứu của Hager cho thấy, trong thực tế khi số  $Fr_1$  tương đối lớn và độ sâu  $h_1$  nhỏ, độ sâu sau nước nhảy  $h_2$  sẽ có trị số nhỏ hơn so với tính toán theo công thức (1). Việc này đặt ra vấn đề là: cần thiết lập một mô hình toán để tính độ sâu sau nước nhảy một cách chính xác hơn.

Trong những năm gần đây, các mô hình Mạng

neuron nhân tạo (Artificial Neural Network - ANN) và các thuật toán học máy (Machine Learning – ML) đã được ứng dụng trong việc tính toán các yếu tố thủy lực của dòng chảy. Asaad Y. Shamseldin (2010) [1] đã sử dụng mô hình ANN để dự báo lưu lượng dòng chảy sông Nile xanh ở Sudan. Naseri và Othman (2012) đã xây dựng các mô hình ANN trong MATLAB 2007 để tính toán chiều dài nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình chữ nhật, mô hình toán được hiệu chỉnh và kiểm định bằng 109 bộ số liệu thực đo trên mô hình vật lý [6]. Dữ liệu đầu vào mô hình là: số  $Fr_1$ , tỷ số  $h_2/h_1$ , lưu lượng đơn vị  $q = Q/b$ . Kết quả dự báo tốt nhất có hệ số  $R^2 = 0,996$  [6]. Sauida (2016) cũng đã sử dụng mô hình mạng ANN để tính toán chiều dài nước nhảy ngập sau công trình điều tiết có 5 cửa chữ nhật được mô phỏng trong phòng thí nghiệm. Tổng cộng 1216 thí nghiệm đã được tiến hành để thu thập dữ liệu cho mô hình ANN. Lớp đầu vào (Input layer) gồm 9 nơ-ron là 9 dữ liệu cần nhập vào mô hình, lớp đầu ra (Output layer) có 1 nơ-ron là tỷ số chiều dài nước nhảy với độ sâu  $h_1$  ( $L_j/h_1$ ). Kết quả tính toán có hệ số  $R^2 = 0,8855$  là cao nhất [8].

Mặc dù vậy, chưa có nghiên cứu nào sử dụng mô hình ANN để tính toán độ sâu sau nước nhảy. Do đó, trong bài báo này, tác giả sẽ trình bày việc thiết lập một mô hình toán dựa trên mạng ANN để tính toán tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy  $Y = h_2/h_1$ , áp dụng cho kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình chữ nhật.

## 2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Các dữ liệu cần thiết cho mô hình

Trong nghiên cứu này, thư viện phần mềm mã nguồn mở Keras, các thư viện Numpy, Pandas, cùng với ngôn ngữ lập trình Python 3.6 đã được sử dụng để chạy các thuật toán học máy (ML) và thiết lập 2 mô hình ANN tính tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy.

Các dữ liệu dùng để hiệu chỉnh và kiểm định

các mô hình ANN được thu thập từ 2 nghiên cứu của Hager và nnk (1989, 1990) [4], [5]. Trong các nghiên cứu của mình, Hager và nnk đã tiến hành 4 chuỗi thí nghiệm trong máng chữ nhật đáy bằng có chiều rộng 500 mm và 98 mm. Đáy mô hình và tường bên trái làm bằng nhựa PVC, tường bên phải làm bằng kính để tiện quan sát nước chảy. Do đó độ nhám tuyệt đối của mô hình được chọn là  $e = 0,005$  mm [4]. Các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ từ 16 – 18 °C, hệ số nhớt động học của nước là  $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s [5]. Số Reynolds  $Re_1$  và số Reynold hiệu chỉnh  $Re_1^*$  tại mặt cắt trước nước chảy được tính theo công thức (3) và (4).

$$Re_1 = \frac{4V_1 R_{h1}}{\nu} \quad (3)$$

$$Re_1^* = \frac{V_1 h_1}{\nu} \quad (4)$$

Thông số thủy lực của các chuỗi thí nghiệm được thống kê trong Bảng 1 dưới đây. Tổng cộng 144 bộ số liệu thí nghiệm đã được sử dụng trong bài báo này. Các dữ liệu này được chia làm 2 phần để phục vụ mô hình ANN, phần thứ nhất gồm 96 bộ dữ liệu nhằm mục đích hiệu chỉnh mô hình (training), phần thứ hai gồm 48 bộ dữ liệu (1/3 số liệu) để kiểm định mô hình (validating). Ngoài ra, mô hình ANN còn tiếp tục được kiểm định độc lập (test) bằng một bộ số liệu khác, đó là kết quả thí nghiệm của Bretz (1987). Chuỗi dữ liệu này gồm 18 bộ số liệu do Bretz thực hiện các thí nghiệm trong máng chữ nhật đáy bằng có chiều rộng 500 mm [3]. Bộ số liệu này đã được Bretz công bố trong nghiên cứu của mình.

**Bảng 1: Các thông số cơ bản của các thí nghiệm**

Chuỗi thí nghiệm	$h_1/b$	$(e/h_1) \cdot 10^{-3}$	$Fr_1$	$Re_1 \cdot 10^{-5}$	$Re_1^* \cdot 10^{-5}$
1 $b_1=500\text{mm}$	0.012	0.833	6.56-15.31	0.35-0.71	0.09-0.18
	0.019	0.526	5.24-11.83	0.57-1.11	0.15-0.29
	0.03	0.333	4.70-8.60	0.95-1.69	0.25-0.45
	0.038	0.263	3.26-7.87	0.87-2.14	0.25-0.57
	0.057	0.175	3.33-5.88	1.61-2.90	0.45-0.81
	0.078	0.128	3.34-4.36	2.50-3.29	0.72-0.95
2 $b_2=98\text{mm}$	0.1	0.510	3.39-10.87	0.30-1.10	0.09-0.33
	0.12	0.425	4.80-8.98	0.58-1.17	0.18-0.37
	0.19	0.269	4.01-8.26	0.81-1.81	0.28-0.63
	0.26	0.196	4.73-6.92	1.41-2.11	0.53-0.80
	0.36	0.142	3.49-5.83	1.49-2.53	0.64-1.09
	0.39	0.131	3.60-5.55	1.69-2.67	0.74-1.18
	0.55	0.093	2.69-4.56	1.78-3.13	0.92-1.64
	0.65	0.078	2.45-4.15	1.94-3.43	1.10-2.00
3 $b_3=500\text{mm}$	0.055-0.068	0.182-0.147	3.96-11.12	1.87-7.04	0.52-1.99
	0.098-0.109	0.102-0.092	2.26-8.56	2.32-10.27	0.69-3.12
4 $b_4=500\text{mm}$	0.01	1.0	4.33-15.96	0.19-0.54	0.05-0.14
	0.021	0.476	2.88-11.37	0.34-1.21	0.09-0.31
	0.024	0.417	2.94-9.91	0.44-1.34	0.12-0.35
	0.048	0.208	3.06-6.71	1.15-2.53	0.32-0.69

Chuỗi thí nghiệm	$h_1/b$	$(e/h_1).10^{-3}$	$Fr_1$	$Re_1.10^{-5}$	$Re_1^*.10^{-5}$
	0.072	0.139	2.38-5.38	1.75-3.63	0.50-1.04

## 2.2. Áp dụng phương trình động lượng và lý thuyết Pi của Buckingham xác định các hàm $\Pi$

Phương trình động lượng áp dụng cho đoạn dòng chảy 1-2 trong phạm vi nước nhảy (Hình 1) có dạng (5), với kênh chữ nhật đáy bằng, trục X được chọn nằm ngang hướng theo chiều dòng chảy.

$$\sum F_x = F_1 - F_2 - F_{ms} = \rho Q(V_2 - V_1)$$

$$\frac{1}{2} \rho g b h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g b h_2^2 - \bar{\tau}_o PL = \rho V_1 b h_1 \left( \frac{h_1}{h_2} V_1 - V_1 \right) \quad (5)$$

Trong đó:  $F_1$  và  $F_2$  – áp lực thủy động tác dụng vào các mặt cắt 1 và 2;  $F_{ms}$  – lực ma sát của thành rắn tác dụng vào đoạn dòng chảy 1-2;  $V_2$  – vận tốc trung bình tại mặt cắt sau nước nhảy;  $Q$  – lưu lượng dòng chảy;  $b$  – chiều rộng lòng dẫn chữ nhật;  $\rho$  – khối lượng riêng của chất lỏng;  $L$  – chiều dài nước nhảy;  $\bar{P}$  – chu vi ướt trung bình của đoạn 1-2;  $\bar{\tau}_o$  – ứng suất tiếp trung bình tại bề mặt lòng dẫn.

Theo Hager (1990) [5], chiều dài nước nhảy phụ thuộc vào số  $Fr_1$  và độ sâu  $h_1$  nên có thể viết dưới dạng hàm số như sau:  $L = L(V_1, h_1, g)$ .

Chu vi ướt trung bình phụ thuộc vào các độ sâu  $h_1, h_2$  và chiều rộng  $b$ , do đó:  $\bar{P} = \bar{P}(h_1, h_2, b)$ .

Ứng suất tiếp trung bình tại bề mặt lòng dẫn phụ thuộc bán kính thủy lực  $R_h$  và các yếu tố khác như  $\rho, \mu, e, V_1, V_2$ , áp dụng phương trình liên tục sẽ thu được (6).

$$\bar{\tau}_o = F(b, h_1, h_2, V_1, \rho, \mu, e) \quad (6)$$

Trong đó:  $\mu$  – hệ số nhớt của chất lỏng,  $\mu = \nu \rho$ ;

$e$  – độ nhám tuyệt đối của lòng dẫn. Như vậy, độ sâu sau nước nhảy là hàm số của nhiều yếu tố được thể hiện trong phương trình (7).

$$h_2 = f(h_1, V_1, b, \rho, \mu, e, g) \quad (7)$$

Trong (7) có 8 biến số và chứa đủ 3 thứ nguyên cơ bản M, L, T. Do vậy, theo lý thuyết Pi sẽ có 5 hàm  $\Pi$ :  $\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5)$ . Kết quả tính toán theo lý thuyết Pi cho 5 hàm  $\Pi$  như trong Bảng 2.

**Bảng 2: Các hàm  $\Pi$**

	$\Pi_1 = Y$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$
Các hàm $\Pi$	$h_2/h_1$	$Fr_1$	$Re_1^*$	$e/h_1$	$h_1/b$

Do đó, tỷ số hai độ sâu của nước nhảy được biểu thị bằng phương trình (8).

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \Phi \left( Fr_1, Re_1^*, \frac{e}{h_1}, \frac{h_1}{b} \right) \quad (8)$$

## 2.3. Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)

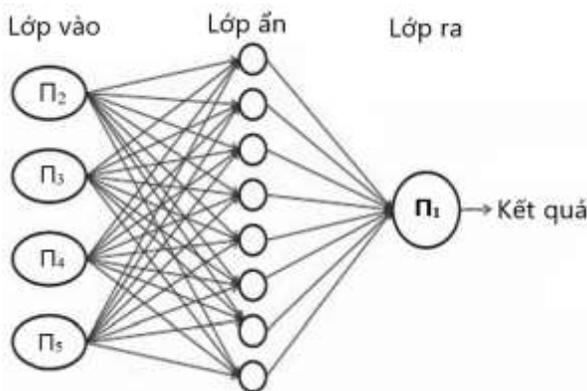
Tác giả bài báo này chọn 2 mô hình mạng ANN có số lớp ẩn khác nhau, mạng 1 có 1 lớp ẩn, mạng 2 có 2 lớp ẩn để so sánh và nhận xét. Số nơ-ron trong lớp đầu vào (Input layer) bằng 4 chính là các hàm  $\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$  cần nhập vào mô hình, lớp đầu ra (Output layer) có 1 nơ-ron là hàm  $\Pi_1$ . Số nơ-ron trong mỗi lớp ẩn (Hidden layer) sẽ được chọn bằng cách thử dần, bắt đầu từ 4 cho đến 8. Các thông số khác của mô hình được tóm tắt dưới đây. Hình 2 mô tả cấu trúc của một ANN.

- Số lượng nơ-ron trong mỗi lớp ẩn: 4 hoặc 8

- Hàm kích hoạt (Activation function): Sigmoid

hoặc ReLU

- Hệ số học (Learning rate): 0,001
- Bộ tối ưu hóa (Optimizer): Adam
- Hàm mất mát (Loss function): MSE
- Số lần lặp tối đa (Epoch): 10000
- Các kỹ thuật được sử dụng: Early Stopping, Regularizer.



Hình 2: Sơ đồ cấu trúc mạng ANN với 1 lớp ẩn

#### 2.4. Phương pháp đánh giá sai số

Để đánh giá sai số của kết quả tính toán, tác giả sử dụng Sai số bình phương trung bình (MSE), Sai số căn quân phương (RMSE), Sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và hệ số tất định ( $R^2$ ) được tính toán theo các công thức dưới đây. Mô hình toán cho kết quả có độ chính xác cao khi trị số  $R^2$  gần bằng 1 và các sai số nhỏ.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|P_i - O_i|) \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (12)$$

Trong đó:  $O_i$ ,  $\bar{O}_i$  và  $P_i$  lần lượt là trị số thực đo, trị số thực đo trung bình và trị số tính toán tương ứng thứ  $i$ ;  $n$  là số lần tính.

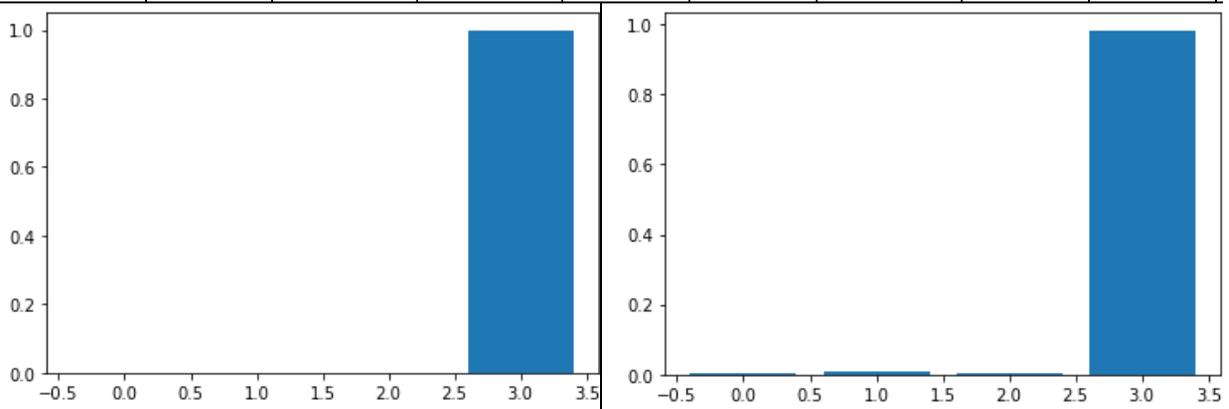
### 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

#### 3.1. Đánh giá ảnh hưởng của các hàm Pi đến tỷ số độ sâu nước nhảy

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng (Feature Importance) của các yếu tố thủy lực đến tỷ số  $Y$ , tác giả bài báo này đã sử dụng 2 thuật toán học máy là Cây quyết định (Decision Tree) và Rừng ngẫu nhiên (Random Forest). Ngôn ngữ lập trình Python 3.6 và thư viện Sklearn, matplotlib đã được sử dụng để tính toán và vẽ biểu đồ. Kết quả tính toán trong Bảng 3 cho thấy rằng, cả hai thuật toán đều phản ánh chung 1 xu thế, đó là: số  $Fr_1$  ảnh hưởng nhiều nhất và mạnh nhất đến tỷ số  $Y$ , tiếp theo là độ nhám tương đối, số  $Re_1$  ảnh hưởng ít nhất (xem Hình 3). Điều này cũng hợp lý vì khi dòng chảy có vận tốc lớn (khu thành nhám thủy lực), ảnh hưởng của tính nhám bề mặt lớn hơn tính nhớt của chất lỏng. Tuy nhiên đây là dòng chảy trong lòng dẫn hở nên ảnh hưởng của trọng lực lớn hơn so với lực ma sát. Kết quả đánh giá này được sử dụng để sắp xếp thứ tự các hàm Pi trong mô hình ANN, giúp cho kết quả tính toán chính xác hơn.

#### Bảng 3: Mức độ ảnh hưởng của các hàm Pi

Thuật toán	Cây quyết định (Decision Tree)				Rừng ngẫu nhiên (Random Forest)			
Các biến độc lập	$h_1/b$	$e/h_1$	$Re_1^*$	$Fr_1$	$h_1/b$	$e/h_1$	$Re_1^*$	$Fr_1$
Mức độ ảnh hưởng (điểm)	0.00011	0.00038	0.00010	0.9994	0.00525	0.00775	0.00439	0.9826
Thứ tự ảnh hưởng	3	2	4	1	3	2	4	1



Hình 3: Mức độ ảnh hưởng của các hàm Pi đến tỷ số Y (0:  $h_1/b$ ; 1:  $e/h_1$ ; 2:  $Re_1^*$ ; 3:  $Fr_1$ )  
Cây quyết định bên trái, Rừng ngẫu nhiên bên phải

### 3.2. Kết quả kiểm định mô hình ANN

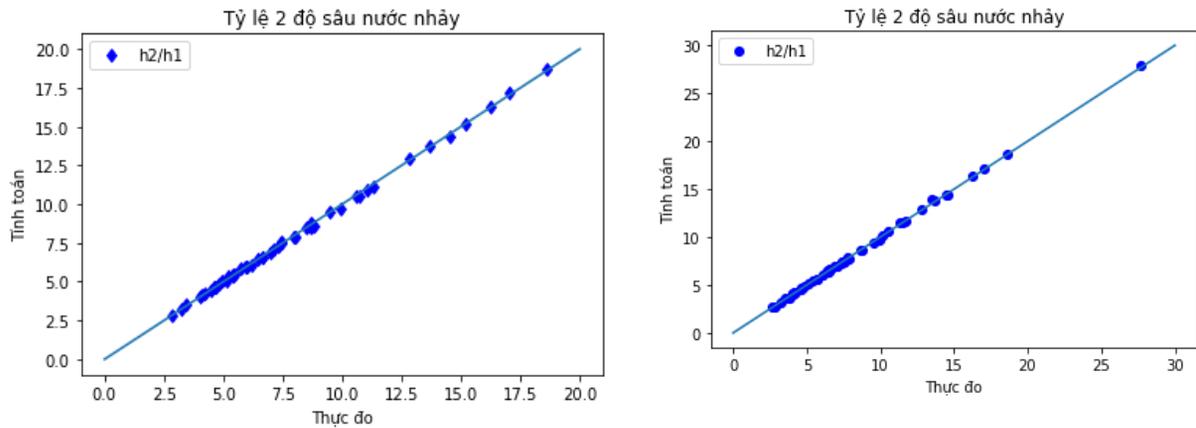
Mô hình ANN đã được kiểm định bằng phần dữ liệu thứ hai gồm 48 bộ số liệu thực đo. Kết quả kiểm định được thống kê trong Bảng 4 cho thấy, kết quả tính toán có độ chính xác rất cao, trị số  $R^2$  sấp xỉ bằng 1. Mô hình ANN với 2 lớp ẩn cho kết quả có độ chính xác cao hơn không đáng kể so với mô hình 1 lớp ẩn. Hàm kích hoạt ReLU

phù hợp hơn cho mô hình này so với hàm Sigmoid. Mô hình 2 lớp ẩn mất nhiều thời gian chạy hơn so với mô hình 1 lớp ẩn, số lần lặp hơn gấp đôi, khi kết quả tính toán đạt giá trị tốt nhất mô hình sẽ tự động dừng tính toán. 8 nơ-ron trong mỗi lớp ẩn cho kết quả tốt hơn 4 nơ-ron, điều này có thể giải thích vì lớp vào đã có 4 nơ-ron.

Bảng 4: Kết quả kiểm định mô hình

Mô hình tính $h_2/h_1$	Hàm kích hoạt	Số lớp ẩn	Số nơ-ron trong mỗi lớp ẩn	Số lần lặp (Epoch)	MSE	RMSE	MAE	$R^2$

ANN-2L	ReLU	2	8	2613	0.011	0.104	0.085	0.9994
ANN-1L	ReLU	1	8	1288	0.013	0.115	0.088	0.9993



Hình 4: Kết quả kiểm định, so sánh thực đo và tính toán, Mô hình 2L bên trái, 1L bên phải

Hình 4 cho thấy, các kết quả tính toán rất phù hợp với số liệu thực đo, gần như không có khác biệt giữa mô hình 1 lớp ẩn với 2 lớp ẩn. Các mô hình chọn ngẫu nhiên 48 bộ số liệu để tính toán và so sánh với thực đo nên 2 đồ thị trên Hình 4 có khác nhau về trị số của Y. Như vậy các mô hình ANN đã được kiểm định và có thể sử dụng để tính toán giá trị của tỷ số Y.

### 3.3. Kết quả thử nghiệm (test) các mô hình ANN

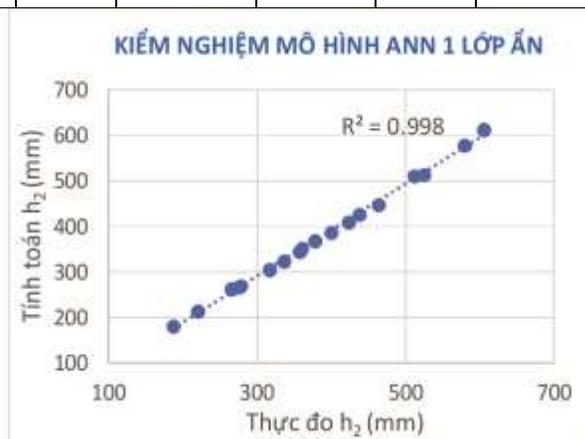
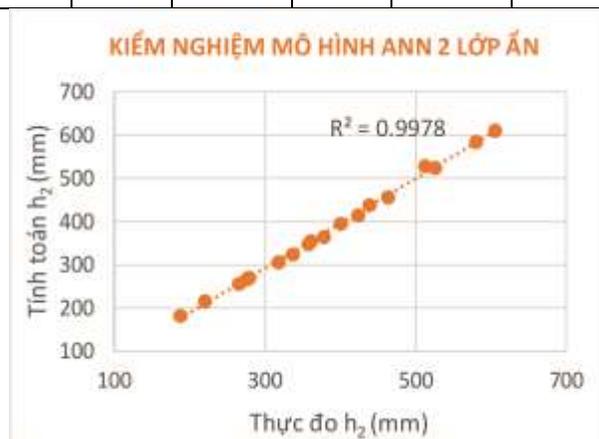
Các mô hình ANN kể trên tiếp tục được kiểm

định độc lập một lần nữa (test). Bộ số liệu gồm 18 giá trị tỷ số Y chưa được dùng để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình trong mục 3.2 sẽ được sử dụng ở đây. Độ sâu  $h_1$  nhỏ nhất là 23 mm, lớn nhất là 119 mm. Số  $Fr_1$  trong khoảng từ 3,3 đến 7,8 là các số  $Fr_1$  phổ biến trong thực tế. Kết quả test được thống kê trong Bảng 5. Sai số tương đối của mô hình 2 lớp ẩn thấp hơn so với mô hình 1 lớp ẩn, các sai số đều nhỏ hơn 4%. Sai số nhỏ nhất là của mô hình 2 lớp ẩn, chỉ có 0,07%.

Bảng 5: Kết quả test 2 mô hình ANN

TT	Giá trị thực đo				Tính theo ANN 2 lớp ẩn			Tính theo ANN 1 lớp ẩn		
	$Fr_1$	$h_1$ mm	$h_2$ mm	$h_2/h_1$	$h_2/h_1$	$h_2$ mm	Sai số	$h_2/h_1$	$h_2$ mm	Sai số
1	5.23	53	360	6.79	6.68	354	<b>1.69%</b>	6.63	352	<b>2.33%</b>
2	6.26	33	275	8.33	8.10	267	<b>2.79%</b>	8.10	267	<b>2.80%</b>
3	3.92	103	525	5.15	5.09	524	<b>0.20%</b>	4.99	514	<b>2.12%</b>
4	7.23	23	220	9.56	9.37	215	<b>2.09%</b>	9.29	214	<b>2.93%</b>
5	7.82	18	187	10.39	10.14	183	<b>2.37%</b>	10.07	181	<b>3.08%</b>
6	3.31	145	605	4.17	4.21	611	<b>-0.95%</b>	4.22	612	<b>-1.14%</b>

7	4.56	67.4	400	5.93	5.85	394	<b>1.39%</b>	5.75	387	<b>3.18%</b>
8	5.26	61.3	423	6.9	6.75	414	<b>2.15%</b>	6.67	409	<b>3.35%</b>
9	5.67	50.3	378	7.52	7.24	364	<b>3.62%</b>	7.31	368	<b>2.73%</b>
10	4.94	55.1	357	6.48	6.31	347	<b>2.67%</b>	6.25	344	<b>3.52%</b>
11	5.27	45.5	317	6.97	6.71	305	<b>3.65%</b>	6.69	304	<b>3.98%</b>
12	6.22	40.7	336	8.25	7.95	324	<b>3.65%</b>	7.94	323	<b>3.81%</b>
13	6.14	33.9	278	8.2	7.95	269	<b>3.12%</b>	7.94	269	<b>3.15%</b>
14	5.5	36.5	265	7.27	7.01	256	<b>3.45%</b>	7.18	262	<b>1.11%</b>
15	4.43	76.6	438	5.72	5.71	438	<b>0.07%</b>	5.57	427	<b>2.57%</b>
16	5.01	70.5	463	6.57	6.46	456	<b>1.62%</b>	6.34	447	<b>3.51%</b>
17	4.15	98.3	512	5.21	5.37	528	<b>-3.12%</b>	5.19	511	<b>0.28%</b>
18	3.91	118.5	579	4.89	4.93	584	<b>-0.90%</b>	4.87	577	<b>0.29%</b>



Hình 5: Kết quả test 2 mô hình, so sánh tính toán với thực đo

Hình 5 và Bảng 6 so sánh kết quả tính toán của 2 mô hình ANN với số liệu thực đo độ sâu sau nước nhảy  $h_2$ . Cả 2 mô hình đều có hệ số  $R^2$  là 0,998, sấp xỉ 1, chứng tỏ các mô hình đã tính

toán rất chính xác độ sâu sau nước nhảy. Sai số tuyệt đối trung bình (MAE) dưới 10 mm; sai số tương đối lớn nhất là 3,98%. Mô hình 2 lớp ẩn có sai số nhỏ hơn mô hình 1 lớp ẩn.

Bảng 6: So sánh kết quả test 2 mô hình

Trị số tính toán	RMSE (mm)	MAE (mm)	$R^2$	Sai số trung bình	Sai số max	Sai số min
$h_2$ theo ANN-2L	8.64	7.67	0.998	2.19%	3.65%	0.07%
$h_2$ theo ANN-1L	10.02	9.10	0.998	2.55%	3.98%	0.28%

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, tác giả đã trình bày một phương pháp mới, sử dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo tính toán độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình chữ nhật. Trong mô hình ANN, khi số lớp ẩn là 2 thì thời gian tính lâu hơn, nhiều bước lặp hơn nhưng kết quả có độ chính xác cao hơn so với mô hình ANN 1 lớp ẩn. Số lượng nơ-ron trong lớp vào bằng số hàm Pi cần thiết để tính tỷ số độ sâu nước nhảy, đó là: số Froude  $Fr_1$ , số Reynolds  $Re_1^*$  trước nước nhảy, độ nhám tương đối  $e/h_1$  và độ sâu trước nước nhảy tương đối  $h_1/b$ . Số nơ-ron trong mỗi lớp ẩn nên là 8, nhiều hơn số nơ-ron trong lớp vào. Hàm kích hoạt

ReLU cho kết quả tốt hơn hàm Sigmoid.

Các mô hình ANN mà tác giả đề xuất cho kết quả tính toán có độ chính xác rất cao, hệ số  $R^2$  đạt sấp xỉ 1 trong cả hai lần kiểm định mô hình. Người sử dụng chỉ cần nhập 4 dữ liệu cần thiết là có kết quả tính tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy. Mô hình này có xét đến tính nhám của bề mặt lòng dẫn và tính nhớt của chất lỏng nhằm đảm bảo tính khách quan và chính xác của kết quả tính toán. Phạm vi ứng dụng mô hình khá rộng (xem Bảng 1), do đó mô hình này có thể được áp dụng vào thực tế để tính toán độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng, mặt cắt chữ nhật.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Asaad Y. Shamseldin (2010). Artificial neural network model for river flow forecasting in a developing country. *Journal of Hydroinformatics*, 12.1.
- [2] Belanger, J.B. Essai Sur La Solution Numeric de Quelques Problems Relatifs an Mouvement Permenent Des Causcourantes (1828); Carilian-Goeury. Paris, France. In French.
- [3] Bretz, N. V. (1987). Ressaut Hydraulique Force par Seuil (Hydraulic Jump Forced by Sill), These No. 699 presentee au Departement de Genie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, pour l'obtention du Grade de Docteur es Sciences Techniques, Lausanne. In French.
- [4] Hager, W.H., Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: Sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*. 27(5), 565–585.
- [5] Hager, W.H., Bremen, R., and Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: Length of roller. *Journal of Hydraulic Research*. 28(5), 591-608.
- [6] Naseri, M., Othman, F. (2012). Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software* 48, 27–31.
- [7] Peterka, A.J. (1984). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. In: Monograph E, editor. A water resources technical publication, vol. 25. USBR.
- [8] Sauda, M.F. (2016). Prediction of hydraulic jump length downstream of multi-vent regulators using Artificial Neural Networks, *Ain Shams Engineering Journal*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2015.12.005>.