XÂY DỰNG CÔNG THỨC THỰC NGHIỆM TÍNH TOÁN ĐỘ SÂU SAU NƯỚC NHẢY TRONG KÊNH MẶT CẮT CHỮ NHẬT CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA LỰC CẢN

Hồ Việt Hùng
Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: *Độ sâu sau nước nhảy là một đặc trưng quan trọng của nước nhảy, ảnh hưởng trực tiếp đến độ sâu và chiều dài của bể tiêu năng sau đập tràn hoặc cống ngầm. Do đó, việc xây dựng công thức để tính toán chính xác độ sâu sau nước nhảy là rất cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao. Bài báo này trình bày việc thiết lập và kiểm định các công thức thực nghiệm để tính toán tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy, áp dụng cho kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình chữ nhật, khi xét đến ảnh hưởng của ma sát. Định lý Buckingham được sử dụng để xác định mối liên hệ giữa độ sâu nước nhảy và các yếu tố thủy lực khác. Các số liệu thí nghiệm nước nhảy của Hager và Bretz đã được ứng dụng để xác định các hệ số và kiểm định các công thức. Kết quả kiểm định độc lập cho thấy, sai số tương đối trung bình nhỏ hơn 2% và hệ số R^2 sấp sỉ bằng 1. Như vậy, các công thức được đề xuất có dạng đơn giản, phạm vi sử dụng rộng mà vẫn đảm bảo độ chính xác cao của kết quả tính toán.*
Từ khóa: *Nước nhảy, độ sâu liên hiệp, Buckingham, công thức thực nghiệm.*

Summary: *The sequent depth of the hydraulic jump is an essential characteristic of a hydraulic jump that directly affects the depth and length of the stilling basin after the spillway or culvert. Therefore, establishing formulas for accurately calculating the sequent depth of a hydraulic jump is very necessary and has high practical significance. This paper presents the establishment and testing of the empirical formulas to calculate the conjugate depths ratio of a hydraulic jump, applied to the horizontal prismatic channel with a rectangular cross-section, considering the influence of friction. Buckingham's theorem is used to determine the relationship between the conjugate depths' ratio of a hydraulic jump and other hydraulic factors. Hager and Bretz's experiment data on hydraulic jumps were used to determine the coefficients and test the formulas. Independent test results show that the mean absolute percentage error is less than 2% and the determination coefficient R^2 is approximately equal to 1. Thus, the proposed formulas have a simple form and a wide application range, ensuring high accuracy in calculating results.*
Keywords: *Hydraulic jump, conjugate depths, Buckingham, empirical formula.*

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong tính toán thiết kế bể tiêu năng sau đập tràn hoặc cống ngầm, việc xác định đúng độ sâu sau nước nhảy rất quan trọng, nó ảnh hưởng trực tiếp đến độ sâu và chiều dài của bể tiêu năng. Các đặc trưng hình học của nước nhảy cần được tính toán 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 của nước nhảy, nó phục vụ cho việc xác định vị trí nước nhảy trong kênh, hình thức nối tiếp sau công trình, dạng nước nhảy ngập hay tự do. Dựa trên các độ sâu nước nhảy sẽ tính toán

Ngày nhận bài: 11/8/2023
Ngày thông qua phản biện: 21/9/2023
Ngày duyệt đăng: 29/9/2023

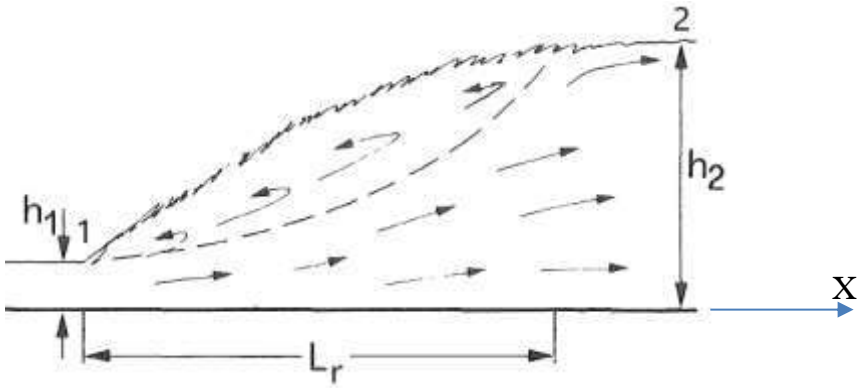
được chiều dài khu xoáy của nước nhảy và kích thước bể tiêu năng.

Hiện nay, độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng, mặt cắt chữ nhật thường được tính theo công thức Belanger (1828) khi biết số Froude và độ sâu trước nước nhảy [1]. Công thức này được xây dựng trên cơ sở áp dụng Phương trình động lượng cho nước nhảy đáy trong kênh chữ nhật, đáy bằng, khi bỏ qua lực ma sát và coi áp suất phân bố theo quy luật như thủy tĩnh trong các mặt cắt trước và sau nước nhảy. Ứng dụng công thức Belanger (1) có thể xác định tỷ số hai độ sâu liên hiệp của nước nhảy (xem Hình 1).

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

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

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.

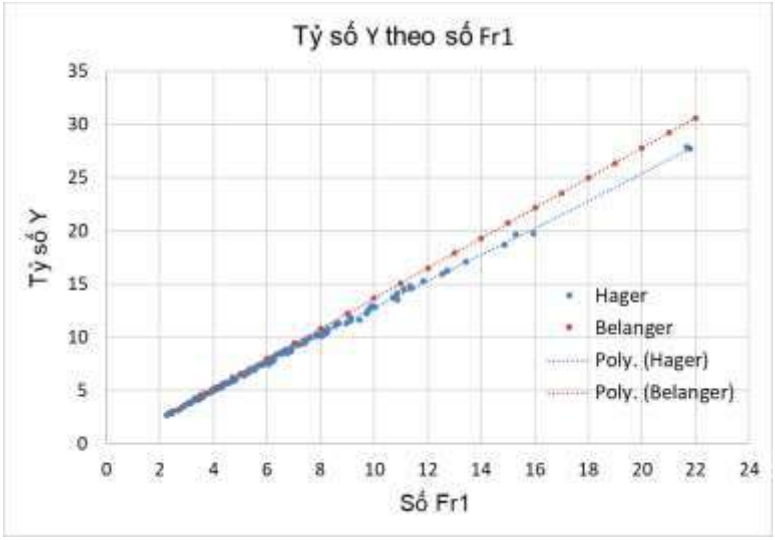


Hình 1: Các độ sâu liên hiệp của nước nhảy, mô phỏng theo Hager [3]

Năm 1973, Sarma K.V.N. và Newnham D.A. đề xuất công thức tính tỷ số độ sâu nước nhảy theo dạng tương tự công thức (1), áp dụng cho trường hợp số Froude trước nước nhảy nhỏ hơn 4 [7]. Trong công thức của Sarma, tỷ số độ sâu nước nhảy chỉ phụ thuộc vào số Fr_1 và có giá trị lớn hơn so với khi tính theo công thức (1). Ngoài ra, các tác giả khác như Peterka (1984) [5], Bretz (1987) [2], Hager (1989) [3] đã công bố các nghiên cứu của mình dựa trên các thí nghiệm trong máng kính khi đo đạc các độ sâu liên hiệp của nước nhảy và chiều dài khu xoáy. Peterka khuyến cáo sử dụng công thức (1) và cho rằng nước nhảy ít bị ảnh hưởng bởi độ sâu hạ lưu khi số Fr_1 thay đổi trong khoảng từ 4.5 đến 9. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu của Hager lại 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). Hình 2 cho thấy tỷ số Y* tính theo (1) lớn hơn kết quả thí nghiệm của Hager khi số Fr_1 lớn hơn 5.5. Nguyên nhân là do tính nhớt của chất lỏng và độ nhám bề mặt lòng dẫn đã gây ra lực ma sát tác dụng vào dòng chảy làm giảm độ sâu sau nước nhảy.

Hager đã xây dựng các đồ thị để tra tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy, khi xét đến ảnh hưởng của độ sâu tương đối trước nước nhảy (h_1/b) và tính nhớt của chất lỏng thông qua số Reynolds [3]. Hager cũng đề xuất công thức gần đúng để tính độ sâu sau nước nhảy trong kênh chữ nhật nằm ngang. Retsinis và

Papanicolaou (2020) đã sử dụng phương pháp số để khảo sát đường mặt nước và mô phỏng nước nhảy trong kênh chữ nhật nằm ngang khi số Fr_1 dao động từ 2.44 đến 5.38, kết quả tính toán được kiểm định bằng số liệu thực đo trong phòng thí nghiệm [6]. Retsinis và Papanicolaou không đề xuất công thức nào để tính toán độ sâu sau nước nhảy.



Hình 2: So sánh tỷ số Y tính theo Belanger (1) và kết quả thí nghiệm của Hager

Vì vậy, vấn đề đặt ra là: cần thiết lập một công thức tính độ sâu sau nước nhảy một cách chính xác, đơn giản và phù hợp với thực tế. Bài báo này sẽ trình bày việc xây dựng công thức hồi quy phi tuyến đa biến để tính toán tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy, áp dụng cho kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình chữ nhật. Công thức này được kiểm định độc lập nhằm đảm bảo tính khách quan và độ chính xác của kết quả tính toán.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ CÁC DỮ LIỆU CẦN THIẾT

2.1. Áp dụng phương trình động lượng và Định lý Pi của Buckingham

Nhằm mục đích xác định mối quan hệ giữa độ sâu nước nhảy với các yếu tố thủy lực khác, phương trình động lượng được áp dụng cho đoạn dòng chảy 1-2 trong phạm vi nước nhảy (Hình 1), xét kênh chữ nhật nằm ngang, trục X được chọn trùng với đáy kênh hướng theo chiều dòng chảy. Phương trình động lượng kết hợp với phương trình liên tục (3) sẽ có dạng (4) dưới đây.

$$Q = V_1A_1 = V_2A_2;\ A_1 = bh_1;\ A_2 = bh_2$$
$$V_2 = \frac{h_1}{h_2}V_1 \qquad (3)$$

$$\sum F_x = F_1 - F_2 - F_{ms} = \rho Q(V_2 - V_1)$$
$$p_{c1}A_1 - p_{c2}A_2 - \overline{\tau_o}\,\overline{P}L = \rho V_1 bh_1\left(\frac{h_1}{h_2}V_1 - V_1\right) \qquad (4)$$

Trong đó: Q – lưu lượng dòng chảy; V_2 - vận tốc trung bình tại mặt cắt sau nước nhảy; b – chiều rộng lòng dẫn chữ nhật; A_1 và A_2 – diện tích mắt cắt ướt trước và sau nước nhảy; F_1 và F_2 – áp lực thủy động tác dụng vào các mặt cắt 1 và 2, trước và sau nước nhảy; F_{ms} – lực ma sát của thành rắn tác dụng vào đoạn dòng chảy 1-2; p_{c1} và p_{c2} – áp suất tại trọng tâm mặt cắt 1 và 2; ρ – khối lượng riêng của chất lỏng; L – chiều dài nước nhảy; $\overline{P}$ - chu vi ướt trung bình của đoạn 1-2; $\overline{\tau_o}$ - ứng suất tiếp trung bình tại bề mặt lòng dẫn. p_{c1} và p_{c2} phụ thuộc loại chất lỏng và các độ sâu trước và sau nước nhảy,

trong dòng chảy hở, các áp suất có thể biểu thị dưới dạng hàm số (5).

$$p_{c1} = p(\rho, g, h_1)$$
$$p_{c2} = p(\rho, g, h_2) \quad (5)$$

Chu vi ướt trung bình phụ thuộc vào các độ sâu h_1, h_2 và chiều rộng b. 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 (6) như sau:

$$\overline{P} = \overline{P}(h_1, h_2, b)$$
$$L = L(V_1, h_1, g) \quad (6)$$

Ứng suất tiếp trung bình tại bề mặt lòng dẫn phụ thuộc bán kính thủy lực R_h và các yếu tố khác như ρ, μ, e, V_1, V_2, áp dụng phương trình liên tục (3) sẽ thu được hàm số (7).

$$\overline{\tau_o} = F(b, h_1, h_2, V_1, \rho, \mu, e) \quad (7)$$

Trong đó: μ – hệ số nhớt của chất lỏng; e – độ nhám tuyệt đối của lòng dẫn. Như vậy, độ sâu sau nước nhảy là hàm số của nhiều biến số, được thể hiện trong phương trình (8).

$$h_2 = f(h_1, V_1, b, \rho, \mu, e, g) \quad (8)$$

Trong (8) có tất cả 8 biến số và chứa đủ 3 thứ nguyên cơ bản M, L, T. Do vậy, theo Định lý Buckingham sẽ tìm được 5 hàm Π có mối liên hệ với nhau theo phương trình (9).

$$\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) \quad (9)$$

Kết quả tính toán theo Định lý Pi thu được 5 hàm Π như sau:

$\Pi_1 = h_2/h_1$; $\Pi_2 = Fr_1$; $\Pi_3 = Re_1^*$; $\Pi_4 = e/h_1$; $\Pi_5 = h_1/b$

Trong đó: Re_1^* - số Reynold hiệu chỉnh tại mặt cắt trước nước nhảy được tính theo công thức (10); υ - hệ số nhớt động học của nước. Ký hiệu hàm $\Pi_1 = Y$; hàm $\Pi_5 = \omega$.

$$Re_1^* = \frac{V_1 h_1}{\upsilon} \quad (10)$$

Như vậy, tỷ số hai độ sâu của nước nhảy được biểu thị bằng phương trình (11).

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \Phi\left(Fr_1, Re_1^*, \frac{e}{h_1}, \frac{h_1}{b}\right) \quad (11)$$

2.2. Các dữ liệu cần thiết

Để thiết lập công thức thực nghiệm theo dạng phương trình (11) và hiệu chỉnh các hệ số, tác giả bài báo này đã thu thập dữ liệu thí nghiệm từ 2 nghiên cứu của Hager và nnk (1989, 1990) [3], [4]. Trong các nghiên cứu của mình, Hager và nnk đã tiến hành 4 chuỗi thí nghiệm trong máng chữ nhật nằm ngang 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 nhảy. Do đó theo Hager, độ nhám tuyệt đối của lòng dẫn mô hình là e = 0.005 mm [3]. Các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ từ 16 đến 18 ^oC, vì vậy hệ số nhớt động học của nước là $\upsilon = 1.1*10^{-6}$ m^2/s. Số Reynolds Re_1 tại mặt cắt trước nước nhảy được tính theo các công thức (12).

$$Re_1 = \frac{4 V_1 R_{h1}}{\upsilon} \quad (12)$$

Tổng cộng 144 bộ số liệu thí nghiệm của Hager và 18 bộ số liệu của Bretz đã được sử dụng trong bài báo này. Thông số thủy lực của các chuỗi thí nghiệm được thống kê trong Bảng 1 dưới đây. Tác giả bài báo này đã sử dụng phần mềm SPSS và 144 bộ dữ liệu để xác định các hệ số trong công thức hồi quy phi tuyến đa biến. Công thức thực nghiệm này được kiểm định độc lập bằng bộ số liệu thí nghiệm của Bretz (1987). Chuỗi dữ liệu để kiểm định gồm 18 bộ kết quả thí nghiệm do Bretz thực hiện trong máng kính chữ nhật đáy bằng có chiều rộng 500 mm [2].

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

Chuỗi thí nghiệm	$\omega = h_1/b$	Fr_1	$Re_1.10^{-5}$	$Re_1*.10^{-5}$	e/h1
1 b_1=500mm	0.012	6.56-15.31	0.35-0.71	0.09-0.18	0.0008
	0.019	5.24-11.83	0.57-1.11	0.15-0.29	0.0005
	0.03	4.70-8.60	0.95-1.69	0.25-0.45	0.0003
	0.038	3.26-7.87	0.87-2.14	0.25-0.57	0.0003
	0.057	3.33-5.88	1.61-2.90	0.45-0.81	0.0002
	0.078	3.34-4.36	2.50-3.29	0.72-0.95	0.0001
2 b_2=98mm	0.1	3.39-10.87	0.30-1.10	0.09-0.33	0.0005
	0.12	4.80-8.98	0.58-1.17	0.18-0.37	0.0004
	0.19	4.01-8.26	0.81-1.81	0.28-0.63	0.0003
	0.26	4.73-6.92	1.41-2.11	0.53-0.80	0.0002
	0.36	3.49-5.83	1.49-2.53	0.64-1.09	0.0001
	0.39	3.60-5.55	1.69-2.67	0.74-1.18	0.0001
	0.55	2.69-4.56	1.78-3.13	0.92-1.64	0.0001
	0.65	2.45-4.15	1.94-3.43	1.10-2.00	0.0001
3 b_3=500mm	0.055-0.068	3.96-11.12	1.87-7.04	0.52-1.99	0.0002-0.0001
	0.098-0.109	2.26-8.56	2.32-10.27	0.69-3.12	0.0001
4 b_4=500mm	0.01	4.33-15.96	0.19-0.54	0.05-0.14	0.001
	0.021	2.88-11.37	0.34-1.21	0.09-0.31	0.0005
	0.024	2.94-9.91	0.44-1.34	0.12-0.35	0.0004
	0.048	3.06-6.71	1.15-2.53	0.32-0.69	0.0002
	0.072	2.38-5.38	1.75-3.63	0.50-1.04	0.0001

2.3. Phương pháp đánh giá sai số

Các trị số của hệ số tất định (R^2), Sai số bình phương trung bình (MSE), Sai số căn quân phương (RMSE), Sai số tuyệt đối trung bình (MAE), Sai số tương đối (RE), Sai số tương đối trung bình (MAPE) đã được sử dụng để đánh giá sai số của kết quả tính toán. Các trị số trên được tính toán theo các công thức từ (13) đến (18). Mô hình toán cho kết quả có độ chính xác cao khi trị số của R^2 gần bằng 1 và các sai số nhỏ.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O}_i)^2} \qquad (13)$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2 \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(|P_i - O_i|) \quad (16)$$

$$RE = \frac{O_i - P_i}{O_i} \times 100\% \quad (17)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (18)$$

Trong đó: O_i, $\overline{O}_i$ 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 VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác định các hệ số của công thức thực nghiệm

Trên cơ sở phương trình (11), phần mềm IBM SPSS 20 đã được sử dụng để xác định các hệ số của phương trình hồi quy phi tuyến đa biến có dạng như phương trình (19). Đây là công thức thực nghiệm thể hiện mối liên hệ giữa 5 hàm Π, trong đó, các hệ số lần lượt là: a, b, c, d, x1, x2, x3, x4.

Y = a * Fr₁ ^ x1 + b * Re₁* ^ x2 + c * ω ^ x3 + d * (e/h1) ^ x4 (19)

Để xác định chính xác các hệ số, khi số Fr_1 dao động trong một phạm vi rộng, tác giả bài báo này đã chia chuỗi dữ liệu thành 2 phần: phần 1 bao gồm 68 bộ số liệu với số $Fr_1 < 5.5$; phần 2 có 76 bộ số liệu với số $Fr_1 > 5.5$.

3.1.1. Công thức thực nghiệm khi số $Fr_1 < 5.5$

Kết quả tính toán xác định các hệ số trong phương trình (19) khi số Fr_1 nhỏ hơn 5.5 được thống kê trong Bảng 2 (theo số liệu từ SPSS). Có thể thấy rằng, x4 bằng 7 làm cho trị số của số hạng cuối cùng trong (19) rất nhỏ, sấp sỉ bằng 0. Giá trị của x1 lớn hơn nhiều so với x2 chứng tỏ mức độ ảnh hưởng của số Fr_1 là lớn hơn so với số Re_1. Như vậy từ Bảng 2 sẽ có phương trình (20), loại bỏ số hạng cuối cùng vì trị số không đáng kể, thu được phương trình (21) là công thức thực nghiệm để tính toán tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy trong kênh chữ nhật đáy bằng khi số Fr_1 nhỏ hơn 5.5.

Bảng 2: Giá trị của các hệ số trong công thức thực nghiệm khi $Fr_1 < 5.5$

Hệ số	a	x1	b	x2	c	x3	d	x4
Giá trị	0.093	2.3	0.102	0.196	1.465	-0.087	1	7

$Fr_1 < 5.5$: $$Y = \frac{h_2}{h_1} = 0.09Fr_1^{2.3} + 0.1\mathrm{Re}_1^{*0.196} + 1.47\left(\frac{h_1}{b}\right)^{-0.087} + \left(\frac{e}{h_1}\right)^{7} \quad (20)$$

$Fr_1 < 5.5$: $$Y = \frac{h_2}{h_1} = 0.09Fr_1^{2.3} + 0.1\mathrm{Re}_1^{*0.196} + 1.47\left(\frac{b}{h_1}\right)^{0.087} \quad (21)$$

3.1.2. Công thức thực nghiệm khi số Fr_1 lớn hơn hoặc bằng 5.5

Khi số Fr_1 lớn hơn 5.5, kết quả tính toán xác định các hệ số trong phương trình (22) được thống kê trong Bảng 3 (các số liệu lấy từ SPSS). Hệ số R^2 khi tính toán các hệ số của công thức (22) là 0.985.

Y = e * Fr₁ ^ x5 + f * Re₁* ^ x6 + g * ω ^ x7 + h * (e/h1) ^ x8 (22)

Bảng 3: Giá trị của các hệ số trong công thức (22) khi Fr_1 >5.5

Hệ số	e	x5	f	x6	g	x7	h	x8
Giá trị	1.682	0.929	5.093	-0.119	0.067	-0.459	1	7

Bảng 3 cho thấy, giá trị của h và x8 bằng d và x4, do đó có thể bỏ qua số hạng cuối cùng trong phương trình (22). Từ Bảng 3 thu được phương trình (23). Vì giá trị của độ nhám tương đối rất nhỏ và x8 = 7 nên trị số của số hạng cuối cùng trong (23) là không đáng kể, có thể bỏ qua, dẫn đến phương trình (24). Đây là công thức tính toán tỷ số độ sâu liên hiệp của nước nhảy trong kênh chữ nhật đáy bằng khi số Fr_1 lớn hơn hoặc bằng 5.5.

Fr_1 >= 5.5: $$Y=\frac{h_2}{h_1}=1.68Fr_1^{0.929}-5.09\,\mathrm{Re}_1^{*-0.119}+0.07\left(\frac{h_1}{b}\right)^{-0.459}+\left(\frac{e}{h_1}\right)^{7} \quad (23)$$

Fr_1 >= 5.5: $$Y=\frac{h_2}{h_1}=1.68Fr_1^{0.929}-5.09\,\mathrm{Re}_1^{*-0.119}+0.07\left(\frac{b}{h_1}\right)^{0.459} \quad (24)$$

Các phương trình (21) và (24) thể hiện rằng, dòng chảy rối ở khu thành trơn thủy lực nên ảnh hưởng của số Re_1 là đáng kể.

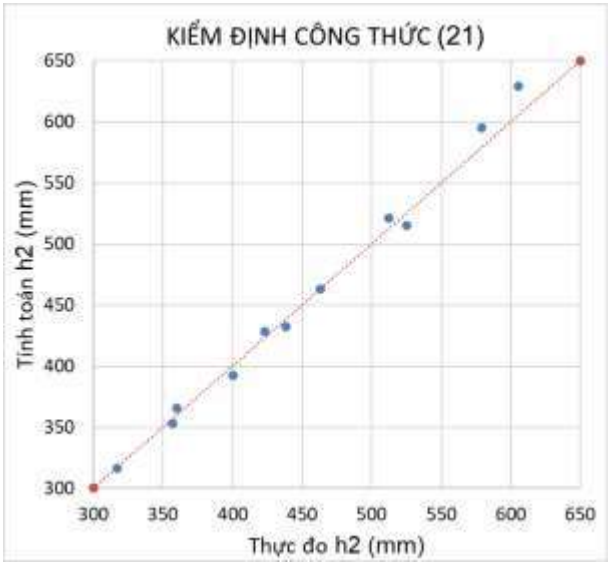
3.2. Kiểm định các công thức thực nghiệm

Nhằm đảm bảo tính khách quan trong việc hiệu chỉnh và kiểm định công thức cũng như đánh giá độ chính xác của kết quả tính, các công thức thực nghiệm sẽ được kiểm định độc lập một lần nữa. Công thức (21) và (24) sẽ được sử dụng để tính toán độ sâu sau nước nhảy, sau đó so sánh kết quả tính toán với số liệu thực đo trong 18 thí nghiệm của Bretz. Kết quả tính độ sâu sau nước nhảy theo các công thức (21) và (24), cùng với sai số tương đối được thống kê trong Bảng 4. Có thể thấy rằng, kết quả tính toán của các công thức thực nghiệm có sai số tương đối nhỏ, dưới 4%. Công thức (24) có sai số nhỏ hơn so với công thức (21). Khi sử dụng công thức (24) các kết quả tính toán đều nhỏ hơn so với thực đo. Việc này có thể giải thích là do điều kiện thí nghiệm của Bretz và Hager không hoàn toàn tương đồng khi số Fr_1 lớn hơn 5.5. Bretz đã làm thí nghiệm trong một máng kính hoàn toàn, tất cả các mặt kênh đều là kính. Bảng 5 và các Hình 3a, 3b trình bày kết quả kiểm định các công thức (21) và (24), cho thấy các sai số nhỏ hơn 10 mm và hệ số R^2 sấp sỉ bằng 1. Các sai số tương đối trung bình của cả 2 công thức đều nhỏ hơn 2%, chứng tỏ các công thức này có độ chính xác rất cao và phù hợp để tính toán độ sâu sau nước nhảy. Việc kiểm định độc lập các công thức (21) và (24) bằng một chuỗi dữ liệu chưa sử dụng khi xây dựng công thức đã đảm bảo tính khách quan và cho thấy rằng, công thức (24) có độ chính xác cao hơn công thức (21). Như vậy, có thể sử dụng các công thức này để tính độ sâu sau nước nhảy trong thực tế.

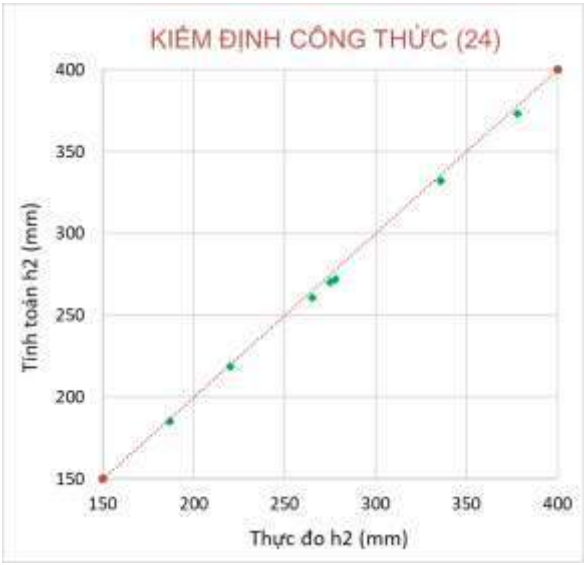
Bảng 4: So sánh kết quả tính toán với số liệu thực đo độ sâu nước nhảy

TT	Giá trị thực đo nước nhảy	Tính theo công thức (21)	Tính theo công thức (24)

	Fr1	h1 (mm)	h2 (mm)	V_1 (m/s)	h2/h1	h2 (mm)	Sai số RE	h2/h1	h2 (mm)	Sai số RE
1	3.28	145	605	3.92	4.338	629	-4.0%			
2	3.91	118.5	579	4.22	5.022	595	-2.8%			
3	3.92	103	525	3.94	5.004	515	1.8%			
4	4.15	98.3	512	4.07	5.299	521	-1.7%			
5	4.43	76.6	438	3.84	5.649	433	1.2%			
6	4.56	67.4	400	3.71	5.822	392	1.9%			
7	4.94	55.1	357	3.63	6.401	353	1.2%			
8	5.01	70.5	463	4.17	6.564	463	0.0%			
9	5.23	53	360	3.77	6.904	366	-1.6%			
10	5.26	61.3	423	4.08	6.984	428	-1.2%			
11	5.27	45.5	317	3.52	6.954	316	0.2%			
12	5.5	36.5	265	3.29				7.14	261	1.7%
13	5.67	50.3	378	3.98				7.42	373	1.3%
14	6.14	33.9	278	3.54				8.03	272	2.1%
15	6.22	40.7	336	3.93				8.16	332	1.1%
16	6.26	33	275	3.56				8.19	270	1.7%
17	7.23	23	220	3.43				9.50	218	0.7%
18	7.82	18	187	3.29				10.28	185	1.0%



Hình 3a: Kết quả kiểm định công thức (21)



Hình 3b: Kết quả kiểm định công thức (24)

Bảng 5: Kết quả kiểm định các công thức thực nghiệm

Kết quả tính h_2	Số lượng dữ liệu	RMSE (mm)	MAE (mm)	R^2	MAPE	RE max	RE min
Công thức (21)	11	10.32	7.97	0.993	1.61%	4.0%	0.0%
Công thức (24)	7	4.12	3.86	0.999	1.37%	2.1%	0.7%

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày một phương pháp thiết lập các công thức hồi quy phi tuyến đa biến tính toán tỷ số độ sâu nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình chữ nhật khi xét đến ảnh hưởng của tính nhớt chất lỏng và các đặc tính vật lý của lòng dẫn. Xét trường hợp lòng dẫn có độ nhám nhỏ, độ sâu sau nước nhảy chịu ảnh hưởng của số Froude, số Reynolds và độ sâu tương đối trước nước nhảy. Tác giả bài báo đã sử dụng Định lý Pi của Buckingham, các số liệu thực đo trên mô hình vật lý và phần mềm SPSS để xác định các hệ số trong công thức thực nghiệm. Các công thức đã thể hiện rằng, độ sâu sau nước nhảy chịu ảnh hưởng nhiều nhất từ số Froude trước nước nhảy; ảnh hưởng của số Reynolds trước nước nhảy, chiều rộng tương đối và độ nhám tương đối là ít hơn. Các công thức này được kiểm định bằng các dữ liệu độc lập chưa sử dụng khi xây dựng công thức. Kết quả kiểm định cho thấy các công thức thực nghiệm có độ chính xác rất cao, hệ số R^2 gần bằng 1. Vì vậy, có thể sử dụng các công thức số (21) và (24) để tính toán độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ nằm ngang, mặt cắt chữ nhật.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bélanger, J.B., (1828), Essai sur la Solution Numérique de quelques Problémes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes (‘Essay on the Numerical Solution of Some Problems relative to Steady Flow of Water’). Carrilian-Goeury, Paris, France. In French.

[2] 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.

[3] Hager, W.H., Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: Sequent depths. Journal of Hydraulic Research. 27(5), pp. 565–585.

[4] Hager, W.H., Bremen, R., and Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: Length of roller. Journal of Hydraulic Research. 28(5), pp. 591-608.

[5] Peterka, A.J. (1984). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. In: Monograph E, editor. A water resources technical publication, vol. 25. USBR.

[6] Retsinis, E., Papanicolaou, P. (2020). Numerical and Experimental Study of Classical Hydraulic Jump. MDPI, Water 2020, 12, 1766; doi:10.3390/w12061766

[7] Sarma, K.V.N., Newnham, D.A. (1973). Surface Profile of Hydraulic Jump for Froude Numbers Less than Four. Water Power, April, pp. 139-142.