

XÁC ĐỊNH ĐẶC TRƯNG NƯỚC NHẢY ỔN ĐỊNH TRÊN KÊNH
BẰNG MÔ HÌNH CFD
DETERMINATION OF STABLE HYDRAULIC JUMP CHARACTERISTICS
IN A CHANNEL BY USING CFD MODEL

TRỊNH CÔNG TÝ*, PHẠM CHÍ THÀNH

Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email liên hệ: tytc@huce.edu.vn

Tóm tắt

Nước nhảy là một hiện tượng thủy lực rất quan trọng đối với hình thức tiêu năng dòng chảy đáy, nó được áp dụng rộng rãi ở hạ lưu công trình thoát lũ trong đầu mối hệ thống thủy lợi - thủy điện, nên được quan tâm và nghiên cứu từ rất sớm trên cả mô hình thí nghiệm và lý thuyết. Mặc dù một số đặc điểm chủ yếu của nước nhảy liên quan đến quy mô công trình tiêu năng đã được xác định bằng công thức như: Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy, chiều dài nước nhảy, tổn thất năng lượng. Tuy nhiên, một số đặc trưng khác của nước nhảy như: trường dòng chảy, áp suất, dòng rối, cơ chế tổn thất năng lượng hay trộn khí vẫn chưa nhận được nhiều sự quan tâm và thể hiện chi tiết. Vì vậy, nghiên cứu này ứng dụng mô hình tính toán động lực học chất lỏng (CFD) mô phỏng hiện tượng nước nhảy ổn định, tự do trên kênh nhẵn, đáy nằm ngang, mặt cắt chữ nhật với số Froude dòng chảy xiết thay đổi từ 4,61 đến 8,97. Nghiên cứu đã xác nhận mô hình số mô phỏng tốt hiện tượng nước nhảy với sai số nhỏ hơn 5% so với kết quả tính toán lý thuyết và thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu đã bổ sung, hoàn thiện và làm rõ sự thay đổi của các đặc trưng khác của nước nhảy theo dòng chảy và số Froude mà thí nghiệm hay lý thuyết còn hạn chế. Ngoài ra, kết quả bài báo cung cấp thêm tài liệu tham khảo cho lĩnh vực thủy lực công trình tiêu năng.

Từ khóa: Mô hình CFD, đặc trưng nước nhảy, kênh dẫn.

Abstract

Hydraulic jump is an important hydraulic phenomenon for dissipating energy in bottom flows, and it is widely applied downstream of flood discharge structures in irrigation and hydropower systems. As a result, it has received attention very early and has been extensively studied experimentally and theoretically.

Although several hydraulic jump characteristics relating to the size design of energy dissipation works, such as conjugate depth, jump length, and energy loss, have been quantified by mathematical formulas, other features of hydraulic jump, such as the flow field, pressure, turbulence flow, energy loss characteristics, and air entrainment, have not either received as much attention or been detailed extensively. Therefore, this study applied the Computational Fluid Dynamics (CFD) method to simulate the phenomenon of a stable, free hydraulic jump on a smooth, horizontal-bottom, rectangular channel, with the supercritical Froude number ranging from 4.61 to 8.97. The research has validated that the numerical model simulated the hydraulic jump phenomenon quite accurately, with an error of less than 5% compared to theoretical calculations and experimental results. The study results have supplemented, completed, and clarified the variations of other hydraulic jump characteristics according to the flow and Froude number, for which experimental or theoretical approaches have been limited. Additionally, the paper results provided valuable references for the energy dissipation hydraulic engineering field.

Keywords: CFD model, hydraulic jump characteristics, channel.

1. Đặt vấn đề

Tiêu năng dòng chảy đáy bằng hình thức nước nhảy được sử dụng rất phổ biến trong công trình tháo lũ có cột nước vừa và thấp đối với hệ thống đầu mối công trình thủy lợi - thủy điện, do nó có hiệu quả tiêu tán năng lượng lớn, qua đó giúp đảm bảo an toàn hạ lưu khi công trình vận hành thoát lũ [1].

Hiện tượng nước nhảy trên kênh dẫn, đáy nhẵn, nằm ngang, mặt cắt chữ nhật đã được nghiên cứu bằng thực nghiệm và lý thuyết từ sớm bởi Peterka [2]. Các đặc trưng thủy lực của nước nhảy bao gồm: Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy, chiều dài nước nhảy, tổn thất năng lượng

đã được xác định qua các công thức tính toán dựa trên phương trình liên tục và động lượng của chất lỏng, cũng như các công thức thực nghiệm đã được đề cập trong các tài liệu về thủy lực công trình [3-7].

Thí nghiệm mô hình thủy lực có thể coi là phương pháp truyền thống, kết quả đo đạc từ thí nghiệm có độ tin cậy cao và phản ánh xác thực các vấn đề thủy lực công trình. Tuy nhiên, phương pháp này có hạn chế, làm gia tăng chi phí khi thực hiện nhiều thí nghiệm. Do đó, thông thường thí nghiệm thủy lực cơ bản lựa chọn, xác định một số đặc trưng chủ yếu của nước nhảy áp dụng cho thiết kế công trình tiêu năng như: Chiều sâu liên hiệp sau nước nhảy (y_2), chiều dài nước nhảy (L_j), chiều cao nước nhảy, biên dạng vận tốc dòng chảy trên một số mặt cắt đo đạc mà chưa làm rõ hay biểu diễn trực quan hóa, chi tiết các đặc tính dòng chảy như: Trường dòng chảy, đặc tính dòng chảy rối, cấu trúc xoáy, đặc điểm gây ra tổn thất năng lượng, hiện tượng trộn khí. Ngoài ra, việc sử dụng phương trình liên tục và phương trình động lượng trong nghiên cứu nước nhảy theo hướng lý thuyết để thiết lập các công thức xác định độ sâu liên hiệp sau nước nhảy (y_2) đã coi ảnh hưởng của lực ma sát gây ra bởi tính nhớt của chất lỏng đối với lòng dẫn là không đáng kể và bỏ qua [4, 5].

Ngày nay, sự phát triển mạnh mẽ của khoa học máy tính với cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đã thúc đẩy cho phương pháp CFD ngày càng phát triển và ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực của đời sống nói chung và lĩnh vực công trình thủy nói riêng [8]. Một số phần mềm thương mại và phi thương mại về CFD phổ biến hiện nay như: Flow-3D, Ansysfluent, OpenFoam, xFlow, ... Mỗi mô hình thủy lực có những ưu và nhược điểm riêng. Tuy nhiên, mô hình Flow-3D có khả năng mạnh mẽ trong xử lý nhiều vấn đề thủy lực phức tạp đối với dòng chảy qua công trình thoát lũ, công trình tiêu năng [9]. Vì vậy, trong phạm vi bài báo này, tác giả lựa chọn mô hình thủy lực Flow-3D [10] mô phỏng hiện tượng nước nhảy tự do, ổn định trên kênh dẫn đáy nhẵn, mặt cắt chữ nhật, nằm ngang với số Froude dòng chảy xiết thay đổi từ 4,61 đến 8,97. Kết quả mô phỏng tập trung làm rõ, thể hiện trực quan, chi tiết và làm nổi bật các đặc trưng khác của nước nhảy so với phương pháp thí nghiệm truyền thống và lý thuyết vẫn còn hạn chế.

2. Nội dung, phương pháp nghiên cứu

2.1. Lý thuyết mô hình CFD

Mô hình số Flow-3D được ứng dụng rộng rãi mô phỏng các vấn đề thủy lực công trình, đây là mô hình CFD thủy động lực học 3 chiều, dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn giải hệ phương trình bảo toàn khối

lượng và động lượng Navier-Stokes. Hệ phương trình Reynolds Averaged Navier-Stokes được viết dưới dạng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_j$$

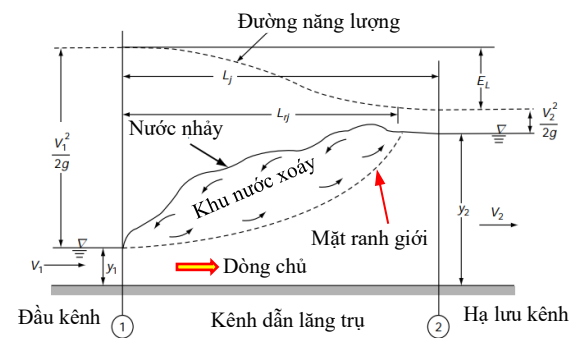
Trong đó: t là thời gian; u_i, u_j là các thành phần vận tốc; μ, μ_t lần lượt là hệ số nhớt động lực học của chất lỏng và hệ số nhớt dòng rối; ρ là mật độ và p là áp suất thủy tĩnh.

Flow-3D tích hợp một số mô hình mô tả đặc tính dòng chảy rối như: $k-\epsilon$, LES, RNG $k-\epsilon$, ... Trong đó, mô hình rối RNG $k-\epsilon$ được coi là hiệu quả hơn khi mô phỏng hiện tượng nước nhảy [9]. Ngoài ra, nghiên cứu áp dụng phương pháp thể tích chất lỏng xác định mặt thoáng chất lỏng cho dòng chảy [9].

2.2. Mô hình và các trường hợp mô phỏng

Nghiên cứu được thực hiện với 06 trường hợp mô phỏng trong điều kiện dòng chảy như thể hiện ở Bảng 1.

Sơ đồ nước nhảy ổn định, tự do trên kênh:



Hình 1. Sơ đồ nước nhảy trên kênh lắng trụ

Bảng 1. Trường hợp tính toán và điều kiện dòng chảy

TT	q (m ² /s)	y ₁ (m)	v ₁ (m)	Re ₁ .10 ³ (-)	Fr ₁ (-)
TH1	0,075		2,50	74,26	4,61
TH2	0,090		3,00	89,11	5,53
TH3	0,105	0,03	3,50	103,96	6,45
TH4	0,125		4,17	123,76	7,68
TH5	0,140		4,67	138,61	8,60
TH6	0,146		4,87	144,55	8,97

Trong đó: q là lưu lượng đơn vị, y_1, v_1, Fr_1, Re_1 lần lượt là độ sâu, vận tốc, số Froude, số Reynold dòng chảy tại mặt cắt trước xảy ra nước nhảy.

2.3. Miền tính toán và các điều kiện biên

Mô phỏng số được thực hiện trong miền không gian tạo thành từ khối lưới bao quát phạm vi từ đầu kênh đến hạ lưu kênh. Miền không gian này được rời rạc hóa thành các ô lưới có cấu trúc với kích thước ba chiều như nhau. Dựa vào kích thước hình học mặt cắt kênh dẫn chữ nhật, các điều kiện dòng chảy xiết (y_1, V_1) sử dụng trong mô phỏng cũng như một số kết quả nghiên cứu trước về hiện tượng nước nhảy [9, 11, 12], nghiên cứu này lựa chọn kích thước lưới tính toán $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2\text{mm}$. Nghiên cứu sử dụng kích thước lưới này để thực hiện các trường hợp mô phỏng số và kiểm tra kết quả mô phỏng số với số liệu lý thuyết để xác nhận cỡ lưới chọn là phù hợp với mô phỏng số.

Điều kiện biên áp dụng cho các trường hợp mô phỏng được thiết lập như sau: Thượng lưu kênh được thiết lập đồng thời mực nước y_1 và vận tốc dòng chảy v_1 ; hạ lưu kênh dẫn là mực nước y_2 ; mặt thoáng của chất lỏng tiếp xúc với không khí có áp suất bằng áp suất khí quyển; biên đáy kênh được giả thiết là tường; hai biên thành kênh là tường cố định.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá kết quả mô phỏng số

Để đánh giá độ phù hợp của mô hình số với hiện tượng nước nhảy, nghiên cứu sử dụng kết quả mô hình số so sánh với kết quả tính toán bằng lý thuyết của nước nhảy ổn định tự do [6]. Cụ thể, bài báo sử dụng số liệu độ sâu liên hiệp sau nước nhảy để kiểm tra sai số, kiểm định mô hình thủy lực:

Bảng 2. Kết quả so sánh độ sâu liên hiệp sau nước nhảy

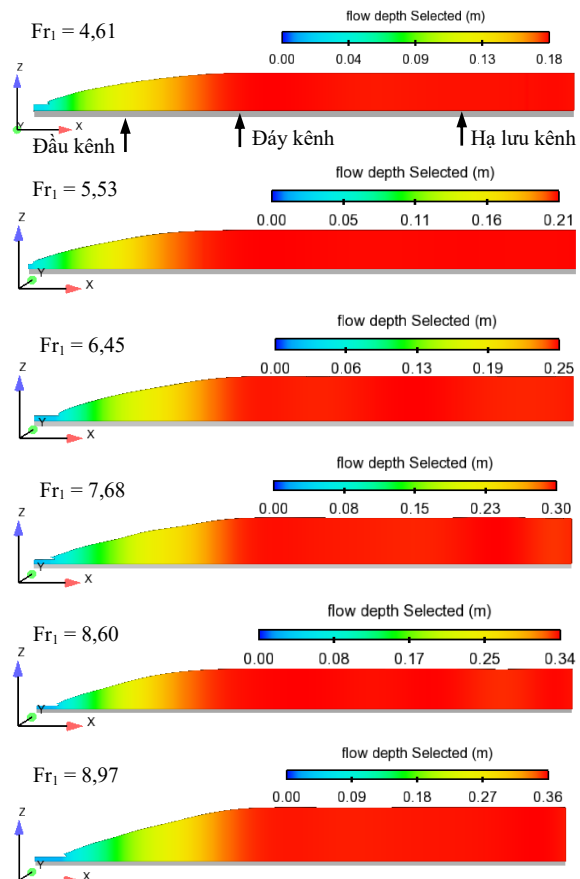
TT	Fr_1 (-)	y_2/y_1 (m)	y_2/y_1 (m)	Sai số %
		Lý thuyết [6]	Mô phỏng	
TH1	4,61	6,03	5,83	3,31%
TH2	5,53	7,33	7,10	3,18%
TH3	6,45	8,63	8,27	4,25%
TH4	7,68	10,37	9,87	4,82%
TH5	8,60	11,67	11,27	3,43%
TH6	8,97	12,20	11,67	4,37%

Bảng 2 cho thấy, sai số tính toán giữa kết quả mô phỏng và tính toán lý thuyết nước nhảy đối với độ sâu liên hiệp sau nước nhảy nhỏ hơn 5%. Vì vậy, mô hình Flow-3D với kích thước lưới được lựa chọn 2mm phù hợp để mô phỏng hiện tượng nước nhảy.

3.2. Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy

Hình 2 trình bày chi tiết các kết quả mô phỏng cho các trường hợp nghiên cứu tương ứng với sự thay đổi

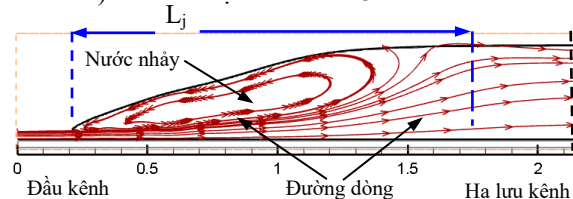
của số Fr_1 . Kết quả nghiên cứu thể hiện rõ và trực quan sự chuyển tiếp từ dòng chảy xiết (ở đầu kênh, y_1) với đặc trưng số Fr_1 thay đổi từ 4,61 đến 8,97 sang dòng chảy êm hình thành ở sau nước nhảy (hạ lưu kênh, y_2) với số $Fr_2 < 1$. Tại mặt cắt sau nước nhảy mặt nước gần như nằm ngang, tại đó xác định được chiều sâu liên hiệp sau nước nhảy y_2 . Từ Bảng 2 cho thấy mô hình Flow-3D mô tả khá chính xác độ sâu y_2 , với sai số nhỏ.



Hình 2. 2D mô phỏng độ sâu dòng chảy trên kênh dẫn

3.3. Chiều dài nước nhảy

Chiều dài nước nhảy L_j được xác định là khoảng cách từ chân nước nhảy tới tại mặt cắt sau nước nhảy (tại đó đường dòng của dòng chảy gần như song song với nhau) như thể hiện trên Hình 3.



Hình 3. Xác định chiều dài nước nhảy

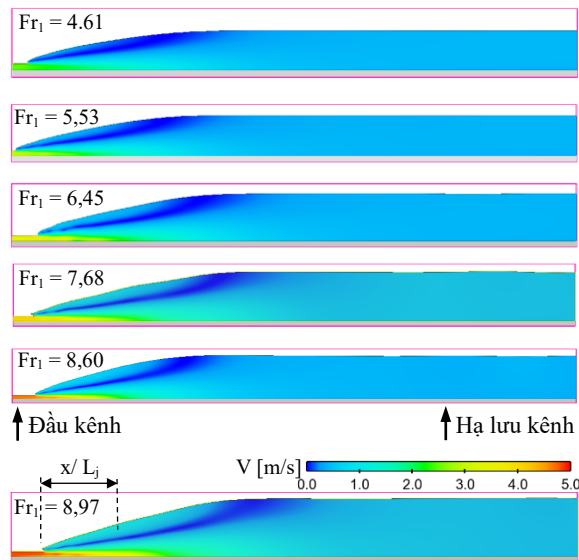
Từ kết quả mô phỏng, chiều dài nước nhảy đã được xác định và so sánh với công thức thực nghiệm

như thể hiện trong Bảng 3. Bảng 3 cho thấy mô hình Flow-3D mô tả chiều dài nước nhảy với độ chính xác cao, sai số nhỏ hơn 5% so với thực nghiệm.

Bảng 3. Kết quả so sánh chiều dài nước nhảy

TT	Fr ₁ (-)	L _j / y ₁ (m) Thực nghiệm	L _j / y ₁ (m) mô phỏng	Sai số %
TH1	4,61	26,33	25,33	3,80%
TH1	5,53	32,33	31,00	4,12%
TH2	6,45	38,67	37,00	4,31%
TH3	7,68	46,67	45,33	2,86%
TH4	8,60	53,00	50,67	4,40%
TH5	8,97	55,33	53,67	3,01%

3.4. Trường dòng chảy

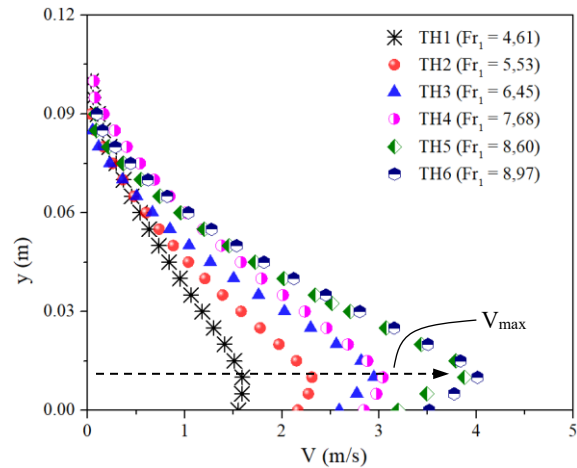


Hình 4. Kết quả 2D mô phỏng trường vận tốc

Dòng chảy xiết ở đầu kênh với vận tốc V_1 lớn, mang động năng cao thông qua hiện tượng nước nhảy chuyển hóa thành dòng chảy êm, xuôi về hạ lưu kênh với vận tốc V_2 nhỏ và chủ yếu là thế năng dòng chảy y_2 , qua đó giúp giảm tác động bất lợi của dòng chảy đối với hạ lưu công trình tháo lũ. Quá trình chuyển tiếp về động năng dòng chảy, sự thay đổi của trường vận tốc dòng chảy lớn $2,5 \leq V_1$ (m/s) $\leq 4,87$ từ đầu kênh (trước nước nhảy) dọc theo kênh dẫn xuôi về hạ lưu được mô tả cụ thể trong Hình 4 với các số Fr_1 thay đổi trong phạm vi nước nhảy tự do, ổn định. Hình 4 mô tả rõ ràng phạm vi xuất hiện nước nhảy, đồng thời thể hiện rõ rệt dòng chảy xoáy tại khu vực nước nhảy. Cụ thể, đường màu xanh đậm từ chân nước nhảy kéo dài lên mực nước hạ lưu kênh thể hiện với vận tốc $V=0$ m/s phân chia khu vực nước nhảy thành hai phần: Phần phía dưới là dòng chảy xuôi dòng (dòng chủ), chiếm ưu thế chính, đảm bảo dòng chảy hình thành

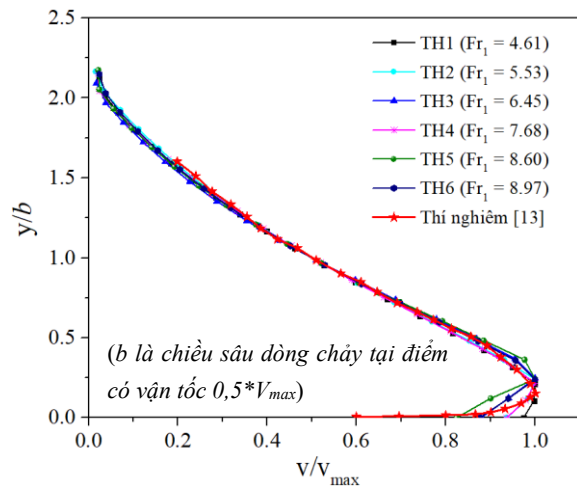
liên tục trên kênh dẫn; phần phía trên, chuyển động ngược lại với hướng chính của dòng chảy hay còn gọi là dòng chảy ngược hay khu nước xoáy.

Bài báo xem xét sự thay đổi của biên dạng vận tốc của dòng chủ trong phạm vi nước nhảy so với kết quả nghiên cứu được thực hiện bởi Ead and Rajaratnam [13] với cùng điều kiện dòng chảy được thể hiện như Hình 5 và 6.



Hình 5. Phân bố vận tốc dòng chủ tại mặt cắt $x/L_j = 0,2$

Hình 6 mô tả biên dạng vận tốc chuẩn hóa ở khu vực nước nhảy được rút ra từ kết quả mô hình thủy lực ứng với các số Fr_1 khác nhau cho thấy phù hợp tốt với kết quả công bố bởi Ead and Rajaratnam [13].

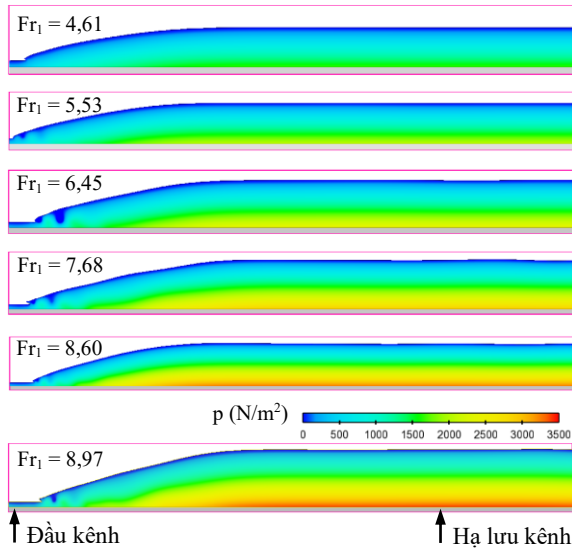


Hình 6. Biên dạng chuẩn hóa vận tốc dòng chảy chủ

3.5. Phân bố áp suất

Phân bố áp suất của dòng chảy trước nước nhảy và sau nước nhảy theo quy luật phân bố áp suất thủy tĩnh được thể hiện khá rõ ràng trên Hình 7. Tại vùng chân nước nhảy xuất hiện vùng có áp suất rất nhỏ gần như bằng áp suất khí quyển (pa), điều này được giải thích do tại chân nước nhảy dòng chảy xiết đột ngột tăng độ

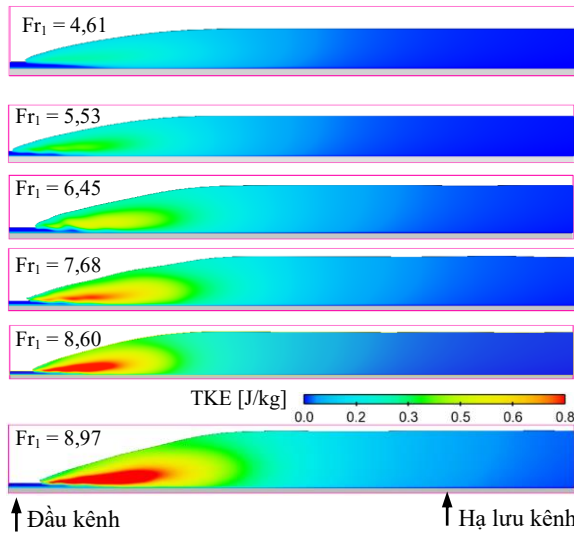
sâu và giảm vận tốc nên cuốn theo không khí trên bề mặt chất lỏng vào dòng chảy, tạo thành các bóng khí di chuyển trong dòng chảy.



Hình 7. Kết quả 2D mô phỏng trường áp suất trên kênh

3.6. Đặc trưng dòng chảy rối

Đặc trưng dòng rối trong nước nhảy có thể được thể hiện rõ ràng, trực quan thông qua kết quả mô hình thủy lực. Hình 8 cho thấy sự thay đổi của động năng dòng chảy rối (Turbulent kinetic energy- TKE) dọc theo dòng chảy với các số Fr_1 biến đổi.



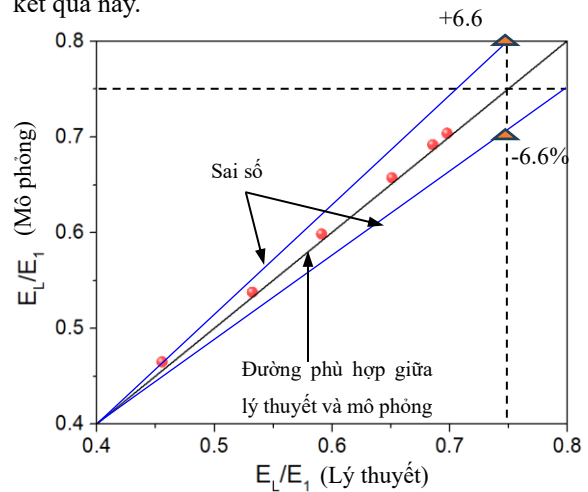
Hình 8. Kết quả 2D mô phỏng dòng rối (TKE) trên kênh

Quan sát trên Hình 8, các đặc trưng TKE được phân thành ba khu vực dọc theo dòng chảy: Khu vực trước nước nhảy TKE có sự thay đổi nhỏ tại sát đáy kênh, do dòng chảy xiết chịu ảnh hưởng ma sát đáy kênh và độ lớn TKE < 0,2J/kg; khu vực sau nước nhảy hay hạ lưu kênh TKE gần như không thay đổi (dòng chảy êm hạ lưu, vận tốc nhỏ nên ảnh hưởng đáy kênh hay cấu trúc dòng chảy không đáng kể), độ lớn TKE ≈

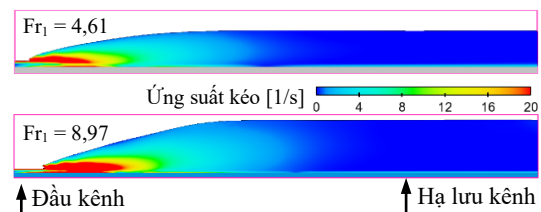
0J/kg; tại khu vực nước nhảy TKE có sự thay đổi rất lớn, không đồng đều, phạm vi mặt thoáng có sự biến đổi nhỏ nhất, sau đó đến phạm vi đáy kênh, TKE có cường độ mạnh và tập trung tại phạm vi bao quanh ranh giới giữa khu nước xoáy của nước nhảy và dòng chủ trên kênh (xem bổ sung Hình 1), tại biên này có sự thay đổi liên tục các phần tử chất lỏng vừa tham gia vào khu nước xoáy, dòng chủ. Vì vậy, mức độ hỗn loạn các phần tử chất lỏng rất cao. Ngoài ra, theo chiều dòng chảy TKE có cường độ mạnh trong phạm vi nửa chiều dài nước nhảy, sau đó cường độ giảm dần khi chiều sâu dòng chảy tăng. Số Fr_1 càng tăng thì TKE ở khu vực nước nhảy càng lớn.

3.7. Tổn thất năng lượng (E_L/E_1)

Dòng chảy xiết chuyển trạng thái thành dòng chảy êm thông qua nước nhảy đặc trưng bởi sự tiêu tán năng lượng lớn, với sự thay đổi số Fr_1 từ 4,61 đến 8,97 thì tổn thất năng lượng biến đổi trong phạm vi rộng từ 45% đến 70% [6], số Fr_1 càng lớn thì hiệu quả tiêu tán năng lượng càng tốt. Hình 9 so sánh mức độ tổn thất năng lượng giữa kết quả mô phỏng số và lý thuyết tính toán, hình này cho thấy giá trị sai số rất nhỏ giữa hai kết quả này.



Hình 9. Tổn thất năng lượng giữa mô phỏng và lý thuyết



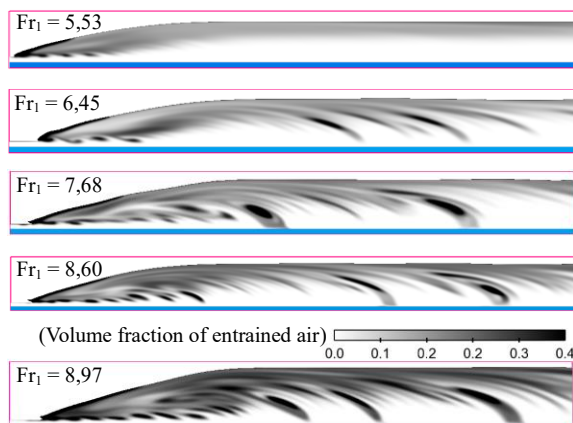
Hình 10. 2D phân bố ứng suất kéo trên kênh dẫn

Hình 8 và 10 minh chứng rất rõ về ảnh hưởng của số Fr_1 đến sự tiêu tán năng lượng của dòng chảy trong khu vực nước nhảy. Với số Fr_1 lớn thì mức độ hỗn loạn của dòng chảy rối càng mạnh mẽ, ứng suất kéo

xuất hiện, chủ yếu tập trung ở khu vực ranh giới giữa dòng chủ và khu vực nước cuộn phía trên dòng chủ (xem Hình 8) sẽ sinh ra các xoáy dẫn tới hiệu quả tiêu tán năng lượng trong dòng chảy tốt hơn.

3.8. Đặc điểm trộn khí trong nước nhảy

Nước nhảy cuộn theo không khí vào dòng chảy, tại chân nước nhảy không khí bị cuốn vào mãnh liệt, sau đó di chuyển trong phạm vi lớn ở khu vực nước xoáy, một bộ phận không khí sẽ thoát ra mặt thoáng chất lỏng trong phạm vi nước nhảy, phần còn lại dưới tác dụng của dòng chảy trên kênh nên nó bị cuốn về hạ lưu kênh (xem Hình 11). Hình này thể hiện rõ ràng với số Fr_1 càng lớn không khí bị cuốn vào dòng chảy càng mãnh liệt và ảnh hưởng kéo dài tới hạ lưu kênh. Từ Hình 11 và Hình 12 xét với trường hợp số Froude gần tương tự nhau ($Fr_1 = 7,5$ và $7,68$), nghiên cứu nhận thấy có sự tương đồng về hiện tượng trộn khí vào dòng chảy khi xảy ra hiện tượng nước nhảy trên kênh.



Hình 11. Kết quả 2D mô phỏng trộn khí trong nước nhảy



Hiện tượng trộn khí Máng thí nghiệm

Hình 12. Thí nghiệm nước nhảy $Fr_1 = 7,5$ [14]

4. Kết luận

Mô hình thủy lực Flow-3D sử dụng mô hình rối RNG k- ϵ và phương pháp VOF là một phương pháp tiếp cận phù hợp đối với mô phỏng hiện tượng nước nhảy trên kênh dẫn lắng trụ mặt cát chữ nhật đáy nhẵn nằm ngang, các đặc trưng chủ yếu của nước nhảy như: Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy, chiều dài nước nhảy có sai số nhỏ hơn 5%.

Kết quả nghiên cứu từ mô hình số đã định lượng, bổ sung, chỉ rõ và làm sáng tỏ sự thay đổi trường giá trị các đặc trưng khác của nước nhảy như: phân bố

trường dòng chảy, áp suất, dòng rối, hiện tượng trộn khí đối với dòng chảy từ trạng thái chảy xiết sang trạng thái dòng chảy êm, dọc theo dòng chảy trong kênh dẫn với sự biến đổi của số Fr_1 từ 4,61 đến 8,97. Tồn thất năng lượng dòng chảy được minh chứng rất rõ qua đặc tính rối và ứng suất kéo xuất hiện trong dòng chảy, điều mà phương pháp lý thuyết còn hạn chế. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu góp phần là tài liệu tham khảo hữu ích đối với lĩnh vực thủy lực công trình tiêu năng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hỗ trợ thực hiện bởi Viện Công trình thủy lợi - thủy điện, Đại học Tứ xuyên, Trung Quốc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ngô Trí Viêng, Nguyễn Chiến, Nguyễn Phương Mậu, Phạm Văn Quý (2006). *Sổ tay Kỹ thuật Thủy lợi. Phần 2: Công Trình Thủy Lợi. Tập 2: Đập bê tông và bê tông cốt thép & công trình tháo lũ*. Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà Nội.
- [2] A. J. Peterka (1978). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators* (No. 25). Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- [3] Lưu Công Đào, Nguyễn Tài (1984). *Sổ tay tính toán thủy lực*. Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà Nội.
- [4] A. O. Akan (2006). *Open Channel Hydraulics*. Elsevier.
- [5] Nguyễn Cảnh Cầm, Lưu Công Đào, Nguyễn Như Khuê, Võ Xuân Minh, Hoàng Văn Quý, Vũ Văn Tảo, Nguyễn Văn Cung (2006). *Thủy lực tập II*. Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà nội.
- [6] K. Subramanya (2009), *Flow in Open channels*. MacGraw Hill.
- [7] J. M. C. Yunus A. Cengel. (2018), *Fluid mechanics*. Mc Graw Hill Education.
- [8] N. Viti, D. Valero, and C. Gualtieri. (2018), *Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook*. Water, Vol.11, No.1.
- [9] T. C. Ty, Z. J. Min, T. C. Trieu. (2024), *Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps*. Applied Sciences.
- [10] F. S. Inc. (2020). *Flow-3D V9.3 User's Manual*. Santa Fe, NM, USA.
- [11] A. Ghaderi, M. Dasineh, F. Aristodemo, and C. Aricò. (2021), *Numerical simulations of the flow*

- field of a submerged hydraulic jump over triangular macroroughnesses. Water, Vol.13, No.5, p.674.*
- [12] T. C. Trieu and T. C. Ty. (2023), *Prediction of the Vortex Evolution and Influence Analysis of Rough Bed in a Hydraulic Jump with the Omega-Liutex Method*. Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, Vol.30, No.6, pp.1761-1768.
- [13] S. Ead and N. Rajaratnam. (2002), *Hydraulic jumps on corrugated beds*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, No.7, pp.656-663.
- [14] H. Wang and B.E. (2014), *Turbulence and Air Entrainment in Hydraulic Jumps*, Phd Thesis, University in Queensland, Australia.

Ngày nhận bài:	09/08/2024
Ngày nhận bản sửa lần 01:	27/08/2024
Ngày nhận bản sửa lần 02:	01/10/2024
Ngày duyệt đăng:	07/10/2024