

NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY TRÊN ĐỐC NƯỚC SAU TRÀN CÓ TRỤ PIN BẰNG MÔ HÌNH TOÁN KẾT HỢP THỰC NGHIỆM

Nguyễn Văn Tài, Lê Thị Thu Hiền

Trường Đại học Thủy Lợi

Tóm tắt: Dòng chảy trên đốc nước sau trụ pin xuất hiện các gợn nước nổi cao, các gợn nước này va chạm nhau, va chạm vào tường bên tạo nên một lưới chuyển động của các gợn nước. Bài báo này sử dụng mô hình số trị 2D-FV mô phỏng dòng chảy 3 chiều này trên đốc nước, áp dụng cho dòng chảy trên đốc nước của tràn xả lũ hồ chứa nước Tà Rục, tỉnh Khánh Hòa. Kết quả này được kiểm định bằng mô hình vật lý được thực hiện ở Phòng Thí nghiệm Thủy lực, Trường Đại học Thủy lợi.

Từ khóa: Đốc nước, gợn nước, phương pháp số, 2D-FV, dòng chảy 3 chiều.

Summary: The flow over chute spillway after pillars occur water waves. These waves collide each other and collide to the side walls of slope, causing the grid of water waves. Using a numerical model, namely 2D-FV to simulate this 3D flow over Taruc spillway – Khanh Hoa case study. This result can be validated by a physical model constructed in the Hydraulic Lab of Thuyloi University.

Key words: chute spillway, water wave, numerical model, 2D-FV, 3D flow

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những nghiên cứu dòng chảy qua tràn xả lũ có đốc nước được các nhà khoa học nghiên cứu khá nhiều. Các công trình có các công trình phụ trợ phức tạp cần phải kiểm tra qua thí nghiệm mô hình vật lý.

Trong nghiên cứu dòng chảy bằng mô hình vật lý, các hiện tượng vật lý dần được sáng tỏ. Bằng trực quan dòng chảy trên đốc nước sau tràn xuất hiện hiện tượng tách dòng rõ ràng, các xoáy cục bộ sau trụ pin xuất hiện, đầu đốc nước, do ảnh hưởng của các trụ pin như các vật cản của dòng chảy chính nên trong đốc nước xuất hiện các gợn nước nổi cao sang 2 phía xuất phát từ các trụ pin, các gợn nước này va chạm vào nhau, va vào tường bên rồi phản xạ vào dòng chảy, hỗn hợp các gợn nước này tạo thành một lưới gợn nước chuyển động trong đốc nước. Tuy nhiên kết quả các đo đạc

các yếu tố thủy lực như: Vận tốc, áp suất, cao độ mặt nước trong đốc nước chỉ được thể hiện với các giá trị trung bình, không thể hiện hay mô phỏng được mô hình không gian 3 chiều để thể hiện lưới các gợn nước chuyển động, cần sự mô phỏng bằng mô hình toán.

Từ lâu, mô hình toán được coi là công cụ hữu hiệu trong việc mô phỏng các hiện tượng thủy lực phức tạp. Thông thường, khi tính toán thủy lực dòng chảy trên đốc nước thường áp dụng phương pháp sai phân trực tiếp. Kết quả chỉ lấy các giá trị mực nước và lưu tốc trung bình mặt cắt mà không đưa ra được hình ảnh 3D về dòng chảy trên đốc. Mô hình toán hai chiều có thể mô phỏng chính xác hình ảnh dòng chảy không đều trên đốc. Lê Thanh Hùng (2016) [1] đã áp dụng một mô hình số trị nghiên cứu dòng chảy xiết trên đốc nước có đoạn thu hẹp để chỉ ra do ảnh hưởng của đoạn thu hẹp này mà trên đốc hình thành các sóng xiên. Thực tế chỉ ra rằng, dòng chảy trên đốc sau tràn có trụ pin sẽ hình thành lưới gợn nước chuyển động lại chưa được nghiên cứu. Vì vậy trong bài báo

Ngày nhận bài: 08/8/2017

Ngày thông qua phản biện: 08/9/2017

Ngày duyệt đăng: 26/9/2017

này, các tác giả sử dụng một mô hình toán dựa trên hệ phương trình nước nông phi tuyến hai chiều (2D-NSWE) được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn loại Godunov (FVM) để mô phỏng bài toán này. Kết quả được kiểm chứng bằng số liệu độ sâu, vận tốc thực đo của dòng chảy trên dốc nước tràn Tà Rục - Khánh Hòa.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

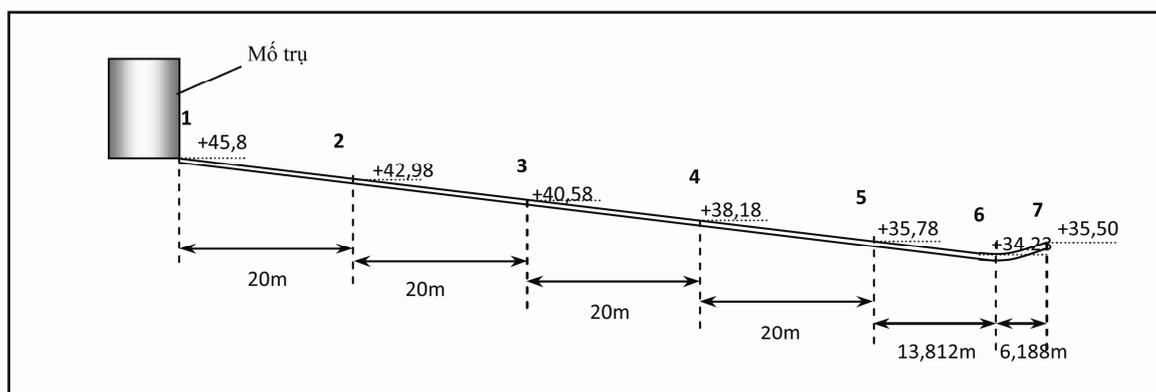
Tràn xả lũ Tà Rục là công trình đầu mối quan trọng của Hồ chứa nước Tà Rục, nằm trên địa phận xã Cam Phước Tây, huyện Cam Lâm, tỉnh Khánh Hòa. Tràn xả lũ hồ chứa nước Tà Rục có dạng hình cong không chân không dạng Corigio-Ophi xêrop với 3 khoang, chiều rộng mỗi khoang là 8,0m, dốc nước được xây

dựng sau tràn, cuối dốc nước là mũi phun, tiêu năng bằng dòng phun - hố xói.

Dốc nước sau tràn: Dốc nước có mặt cắt chữ nhật, cuối dốc nước là mũi phun, hình thức tiêu năng bằng máng phun với các thông số chính như sau:

- Chiều dài dốc nước : $L_d = 100m$;
- Chiều rộng dốc nước : $B = 28m$;
- Độ dốc của dốc: $S_o = 12\%$;
- Hệ số nhám: $n = 0,017$;
- Lưu lượng thiết kế $Q_{TK} = 799m^3/s$
- Lưu lượng kiểm tra $Q_{KT} = 996m^3/s$

2.1. Nghiên cứu trên mô hình vật lý



Hình 1: Sơ đồ vị trí các mặt cắt đo vận tốc, áp suất và cao độ mặt nước trên dốc nước.

Mô hình thí nghiệm tràn xả lũ Tà Rục được xây dựng và thí nghiệm tại bãi thí nghiệm ngoài trời của Trường Đại học Thủy lợi. Mô hình được xây dựng theo tiêu chuẩn Frouds với tỷ lệ hình học $L_r=40$, các tỷ lệ về vận tốc, lưu lượng được lấy tương ứng với tiêu chuẩn đã chọn như sau (Trần Quốc Thương (2005), [2]):

- Tỷ lệ vận tốc, $V_r = L_r^{0,5} = 6,3245$
- Tỷ lệ lưu lượng: $Q_r = L_r^{2,5} = 10119,29$
- Tỷ lệ hệ số nhám: $n_r = L_r^{1/6} = 1,849$

Mô hình được xây dựng là mô hình không gian, lòng cứng, chính thái. Các yếu tố thủy

lực như đường mặt nước, lưu tốc, áp lực, chế độ nổi tiếp hạ lưu được phản ánh đầy đủ và chính xác. Các bộ phận của mô hình (cả phần tràn và dốc nước) được chế tạo bằng kính hữu cơ có độ nhám tương ứng với tỷ lệ thích hợp. Phần hồ chứa thượng lưu và hố xói hạ lưu được trát bằng xi măng cát đen mịn và thỏa mãn tỷ lệ mô hình. Toàn bộ khoảng cách, cao độ trong mô hình đảm bảo độ chính xác cho phép. Khoảng cách, mặt cắt ngang, cắt dọc và các chi tiết của đập tràn, dốc nước được kiểm tra bằng bằng thước thép kẹp có độ chính xác 1/10mm.

Thí nghiệm với phương án thiết kế và kiểm tra

khi mở hoàn toàn 3 cửa, [3]. Các vị trí đo đặc vận tốc, cao độ mặt nước, áp suất được lấy theo các mặt cắt trên sơ đồ tại vị trí tim tràn (khoảng giữa), tim dốc nước, tim hồ xói và kênh hạ lưu.

Mực nước tại kênh dẫn thượng hạ lưu được đo bằng máy thủy bình Sokkia do Nhật bản chế tạo và thước thép. Cao độ đường mặt nước ở kênh thượng lưu và kênh hạ lưu lấy tại tim của kênh, trên tràn và dốc nước cao độ đường mặt nước lấy ở giữa khoang tràn thứ 2 và tim dốc nước trên cùng mặt cắt với các mặt cắt đo vận tốc. Vận tốc dòng chảy qua đập được đo bằng thiết bị điện tử P.EMS của Hà lan với đầu đo E40 và E30. Tín hiệu đo được xử lý qua phần mềm của phòng Thí nghiệm Trường Đại học Thủy lợi. Số liệu mực nước và lưu tốc tại các vị trí được đo đặc trên mô hình và tính toán cho nguyên hình được thể hiện trong bảng 1 và bảng 2.

2.2. Nghiên cứu bằng mô hình toán

Hệ phương trình nước nông phi tuyến hai chiều dạng bảo toàn được viết dưới dạng vector (Cunge và nnk, 1980), [4]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{K}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S}_1(\mathbf{U}) + \mathbf{S}_2(\mathbf{U}) \quad (1)$$

$$\mathbf{U}_{ij}^{n+1} = \mathbf{U}_{ij}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [\mathbf{K}_{i+1/2,j} - \mathbf{K}_{i-1/2,j}] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [\mathbf{H}_{i,j+1/2} - \mathbf{H}_{i,j-1/2}] + \Delta t \mathbf{S}_{1ij} + \Delta t \mathbf{S}_{2ij} \quad (5)$$

Trong đó các chỉ số trên *n* là bước thời gian; chỉ số dưới *i* và *j* là vị trí các ô lưới theo phương *x* và phương *y*; Δt , Δx , Δy là bước thời gian và không gian của miền tính toán.

Các thông lượng $\mathbf{K}_{i\pm 1/2,j}$; $\mathbf{H}_{i,j\pm 1/2}$ và số hạng độ dốc đáy \mathbf{S}_{1ij} được phân rã theo phương pháp Flux Difference Splitting được giới

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_i^{n+1} = & \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{K}_{i+1/2,j} - \mathbf{K}_{i-1/2,j}) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (\mathbf{H}_{i,j+1/2} - \mathbf{H}_{i,j-1/2}) \\ & + \Delta t (\mathbf{S}_{1x(i+1/2,j)}^+ + \mathbf{S}_{1x(i-1/2,j)}^-) + \Delta t (\mathbf{S}_{1y(i,j+1/2)}^+ + \mathbf{S}_{1y(i,j-1/2)}^-) + \Delta t \cdot \mathbf{S}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Trong đó, \mathbf{U} là vector biến; \mathbf{K} và \mathbf{H} là các thông lượng theo các phương *x* và *y*; \mathbf{S}_1 và \mathbf{S}_2 là số hạng độ dốc đáy và độ dốc ma sát.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; \mathbf{K}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + 0.5gh^2 \\ huv \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + 0.5gh^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_1(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{S}_2(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_x}{\rho} \\ -\frac{\tau_y}{\rho} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Với τ_x và τ_y được tính theo:

$$\tau_x = \rho C_f u \sqrt{u^2 + v^2}; \tau_y = \rho C_f v \sqrt{u^2 + v^2}; C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (4)$$

h là độ sâu; *u* và *v* là các thành phần vận tốc theo các phương *x* và *y*; *z_b* là cao độ đáy; *n* là hệ số nhám Manning; *g* là gia tốc trọng trường.

Hệ phương trình (1) được giải theo phương pháp thể tích hữu hạn loại Godunov,

thiệu lần đầu bởi Hubbard và nnk, (2000), [5]. Phương pháp này nhằm đảm bảo sự cân bằng chính xác giữa thông lượng và số hạng nguồn.

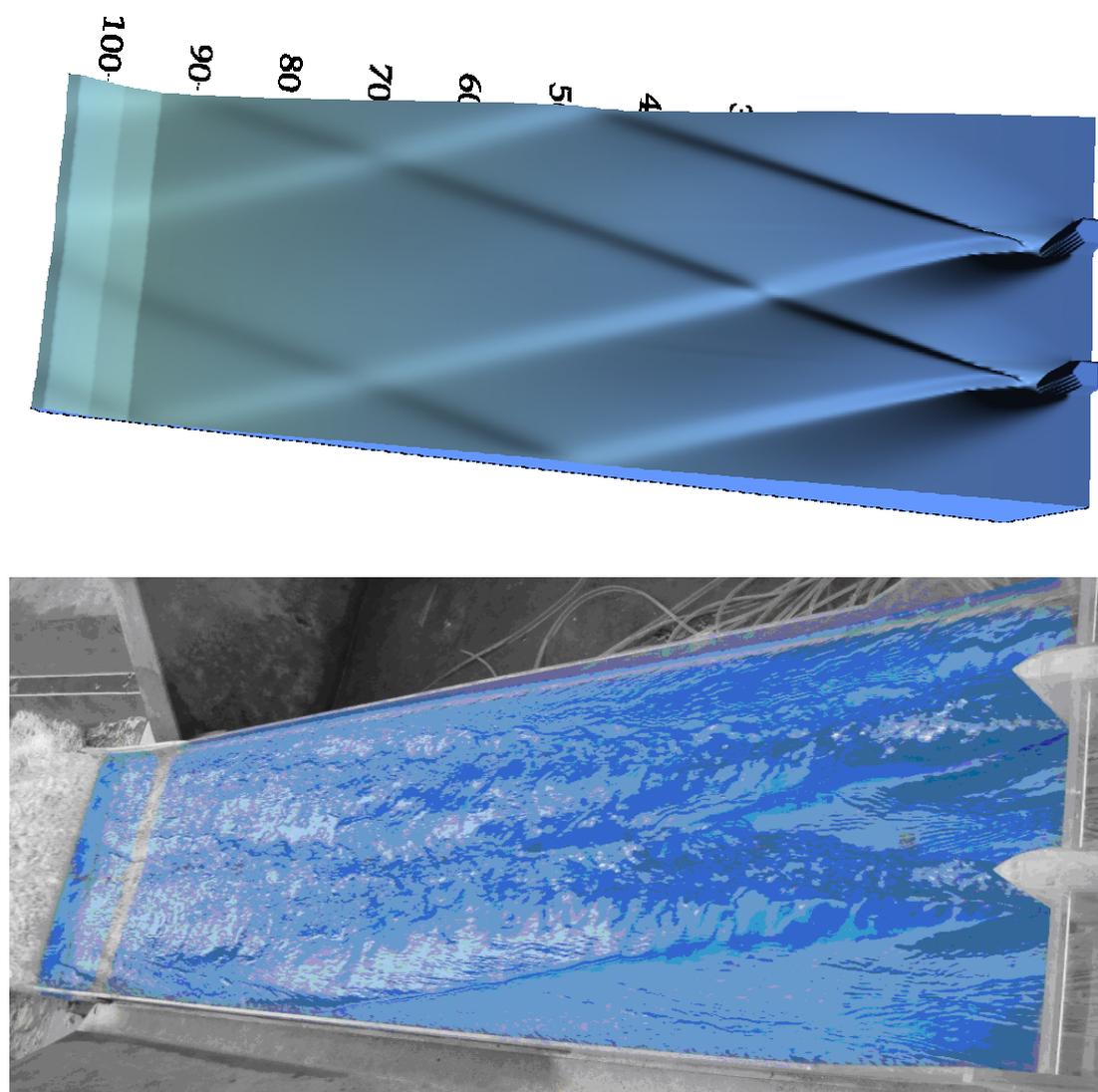
Cuối cùng, biểu thức để giải hệ phương trình 2D - NSWE theo phương pháp số đã chọn là:

Tác giả đã tự xây dựng chương trình tính có tên là 2D-FV bằng ngôn ngữ Fortran90 dựa trên phương trình này. Tính chính xác và hiệu quả của 2D-FV đã được kiểm định và giới thiệu trong [6], [7], [8]. Ứng dụng chương trình này vào mô phỏng dòng chảy trên dốc nước Tà Rục, Quảng Nam tính với 2 cấp lưu lượng $Q_{TK}=799m^3/s$ và $Q_{KT}=996m^3/s$. Điều kiện biên trên gồm độ sâu và vận tốc được lấy tại đầu dốc nước, biên dưới là biên mở. Do dòng chảy trên dốc là dòng chảy ổn định nên chọn thời gian tính toán đủ lớn để kết quả không bị ảnh hưởng bởi điều kiện ban đầu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hình ảnh dòng chảy trên dốc

Kết quả tính toán bằng phương pháp số được mô phỏng ở hình 2. Hình ảnh dòng chảy trên dốc nước sau tràn có trụ pin cả trên mô hình vật lý và mô hình toán ứng với giá trị lưu lượng kiểm tra $996m^3/s$ có sự đồng nhất tương đối. Trên dốc hình thành các gân nước xuất phát từ đầu trụ pin đan xen lẫn nhau. Ở khoang giữa tràn ngay đầu dốc mặt nước bị hõm xuống, hình ảnh này cũng thấy rõ trong kết quả 3D của mô hình toán.

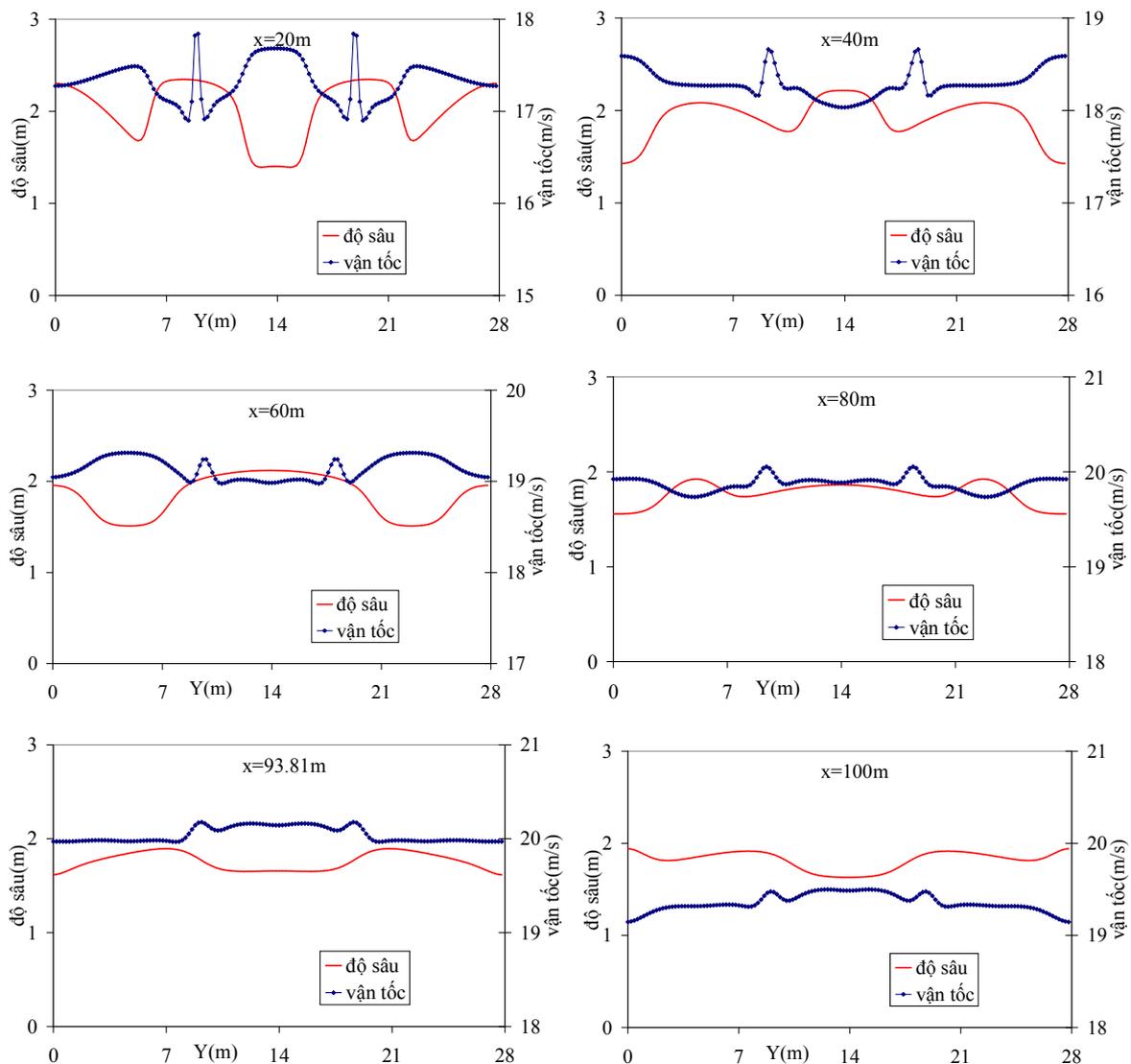


Hình 2: Hình ảnh dòng chảy trên dốc nước mô hình tràn Tà Rục ứng với $Q_{KT} = 996m^3/s$

3.2. Độ sâu và vận tốc dòng chảy

Sự thay đổi mực nước và lưu tốc trên mặt cắt ngang dốc nước tính theo mô hình toán ứng với lưu lượng $996\text{m}^3/\text{s}$ được trình bày trên hình 3. Kết quả chỉ ra rằng, tại vị trí $x=20\text{m}$ có sự chênh lệch độ sâu trên cùng một mặt cắt là lớn nhất $0,9\text{m}$. Do sự hình thành hõm nước tại vị trí chính giữa đầu dốc mà độ sâu tại tim dốc tại $x=20\text{m}$ nhỏ hơn cả tại $x=40\text{m}$ ($1,42\text{m}$ so với $2,2\text{m}$). Vận tốc tại vị trí tim dòng chảy biến đổi từ $17,9\text{m/s}$ tại $x=20\text{m}$ lên đến $20,2\text{m/s}$ đạt tại chân dốc, sau đó giảm xuống $19,51\text{m/s}$ tại mũi

hất tương ứng với $x=100\text{m}$. Hình 3 cũng cho thấy, giá trị vận tốc lớn nhất trên mặt cắt ngang đạt được không phải ở tim dòng chảy mà tại vị trí có gân nước, ví dụ tại mặt cắt $x=40\text{m}$, tại gân nước vận tốc đạt tới $18,66\text{m/s}$ trong khi tại chính giữa mặt cắt vận tốc chỉ là $18,2\text{m/s}$. Đây là điểm thuận lợi của mô hình toán so với mô hình vật lý khi cho ta biết đặc điểm thủy lực chi tiết trên toàn bộ dòng chảy trong khi thí nghiệm chỉ cho kết quả tại điểm nghiên cứu.



Hình 3: Sự phân bố mực nước, lưu tốc trên các mặt cắt ngang tại $x= 20\text{m}; 40\text{m}; 60\text{m}; 80\text{m}; 93,81\text{m}, 100\text{m}$

Kết quả độ sâu dòng chảy và vận tốc thực đo và tính bằng mô hình 2D-FV tại vị trí tim các mặt cắt $x=20m$; $40m$; $60m$; $80m$; $93,81m$ và $100m$ ứng với hai phương án $Q_{KT}=996m^3/s$ và $Q_{TK}=799m^3/s$ được thể hiện lần lượt trên bảng 1 và 2. Chỉ số Nash ứng với độ sâu dòng chảy tương ứng với 2 phương án trên lần lượt là: 68,14% và 81,6%. Chỉ số Nash ứng với vận

tốc dòng chảy cũng tương ứng với 2 phương án đó lần lượt là: 77,44% và 75,31%. Điều đó cho thấy mô hình toán mô phỏng khá phù hợp đặc điểm của dòng chảy trên dốc sau tràn có trụ pin. Tuy nhiên, giữa tính toán và thực đo có sự sai khác (đặc biệt tại vị trí đầu dốc) vì mô hình toán do tác giả lựa chọn không mô tả tính rối của dòng chảy.

Bảng 1: Kết quả độ sâu dòng chảy theo mô hình vật lý và mô hình toán

TT	Q (m^3/s)	Cao độ, độ sâu Vị trí	Đầu	Trên	Trên	Trên	Trên	Điểm	Mũi phun
			dốc	dốc	dốc	dốc	dốc	thấp nhất	
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		Khoảng cách (m)	0	20	20	20	20	13,812	6,188
		K/c cộng dồn (m)	0	20	40	60	80	93,812	100
		Cao độ đáy (m)	45,38	42,98	40,58	38,18	35,78	34,23	35,5
1	996	Độ sâu (m) - Mô hình vật lý	2,48	1,60	2,10	2,00	1,85	1,67	1,64
		Độ sâu (m) - Mô hình toán		1,42	2,22	2,12	1,86	1,66	1,63
2	799	Độ sâu (m) - Mô hình vật lý	1,75	1,44	1,82	1,77	1,62	1,45	1,46
		Độ sâu (m) - Mô hình toán		1,3	1,89	1,80	1,60	1,45	1,43

Bảng 2: Kết quả vận tốc dòng chảy theo mô hình vật lý và mô hình toán

TT	Q (m^3/s)	Vận tốc Vị trí	Đầu	Trên	Trên	Trên	Trên	Điểm	Mũi phun
			dốc	dốc	dốc	dốc	dốc	thấp nhất	
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		Khoảng cách (m)	0	20	20	20	20	13,812	6,188
		K/c cộng dồn (m)	0	20	40	60	80	93,81	100
1	996	Vận tốc (m/s)- Mô hình vật lý	18,25	18,4	18,7	19,2	19,8	20,3	19,52
		Vận tốc (m/s)- Mô hình toán		17,9	18,20	18,98	19,8	20,2	19,51
2	799	Vận tốc (m/s)- Mô hình vật lý	16,31	17,42	18,29	18,90	19,28	19,58	19,21
		Vận tốc (m/s)- Mô hình toán		17,06	18,01	18,80	18,88	19,10	18,79

3. KẾT LUẬN

Tính chất thủy lực phức tạp của dòng chảy trên dốc nước sau tràn có trụ pin hoàn toàn có thể được mô phỏng bằng chương trình tính 2D-FV. Sự xuất hiện lưới gân nước trên dốc do ảnh hưởng của trụ pin công trình thủy lợi Tà Rục - Khánh Hòa được chỉ ra bằng cả mô hình vật lý và mô hình toán. Kết quả thủy lực phân bố mực nước, lưu tốc trên các mặt cắt

ngang đưa ra bằng mô hình toán được mô tả chi tiết cho thấy tại vị trí xuất hiện gân nước trên dốc, vận tốc là lớn nhất. Mặt khác, kết quả tính độ sâu và vận tốc tại tim các mặt cắt được so sánh với số liệu thực đo với hai phương án lưu lượng trên dốc cho thấy khá phù hợp. Vì vậy, có thể dùng chương trình 2D-FV trong việc mô phỏng các bài toán thủy lực dạng này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Thanh Hùng (2016). *Ứng dụng mô hình số trị nghiên cứu dòng chảy xiết trên dốc nước sau tràn có đoạn thu hẹp*. Tạp chí Tài nguyên nước, 1, 41-48.
- [2] Trần Quốc Thương (2005). *Thí nghiệm thủy lực công trình*, NXB Xây dựng.
- [3] Phòng thí nghiệm Thủy lực - Trường Đại học Thủy lợi, (2009). *Báo cáo thí nghiệm Mô hình vật lý Thủy lực tràn xả lũ hồ chứa nước Tà Rục, tỉnh Khánh hòa*.
- [4] Cunge. J.A; Holly. F.M; Verwey. A (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. London: Pitman Publishing Limited.
- [5] M.E. Hubbard and P. Garcia Navarro (2000). *Flux difference splitting and the balancing of source terms and flux gradients*. Journal of Computational Physics. 165, 89–125.
- [6] Le T.T.H (2014). *2D Numerical modeling of dam break flows with application to case studies in Vietnam*. Ph.D thesis, University of Brescia, Italia.
- [7] Lê Thị Thu Hiền (2015). *Ứng dụng phương pháp số giải bài toán sóng gián đoạn trong tính toán thủy lực khi đập bê tông vỡ*. Tạp chí khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, 50, 88-94.
- [8] Lê Thị Thu Hiền ; Hồ Việt Hùng (2017). *Simulating Malpasset (France) Dam-break case study by a two-dimensional shallow flow model*. Tạp chí khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, 57, 103-110.