

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA DÒNG CHẢY TRÊN BẬC TIÊU NĂNG  
Ở HẠ LƯU ĐẬP TRÀN PIANO, THỦY ĐIỆN NẬM SÌ LƯƠNG 4  
INVESTIGATION INTO FLOW BEHAVIOR OVER ENERGY DISSIPATION  
STEPS DOWNSTREAM OF THE PIANO KEY SPILLWAY AT NAM SI LUONG 4  
HYDROPOWER PLANT

TRỊNH CÔNG TÝ, TRẦN CÔNG TRIỆU\*

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

\*Email liên hệ: [trieutc@huce.edu.vn](mailto:trieutc@huce.edu.vn)

**Tóm tắt**

Tác động của biến đổi khí hậu dẫn tới dòng lũ tăng cao đột ngột tại các công trình cụm đầu mối, làm nổi bật tầm quan trọng của việc nghiên cứu và triển khai các giải pháp công trình tháo lũ hiệu quả. Đập tràn phím piano, một giải pháp đầy hứa hẹn, đang là đối tượng được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong các dự án thủy lợi, thủy điện. Đặc điểm nổi bật là khả năng tháo tăng 4 đến 5 lần so với tràn thực dụng khi cùng điều kiện bố trí và dòng chảy. Nhiều công trình nghiên cứu đã xác định ảnh hưởng của hình học đập đến khả năng tháo hay nối tiếp dòng chảy qua đập với hạ lưu tại các đập tràn có độ chênh mực nước thấp. Nghiên cứu này sử dụng mô hình toán nghiên cứu ứng xử dòng chảy qua tràn phím Piano nối tiếp với bậc tiêu năng có độ dốc lớn tại dự án thủy điện Nậm Sỉ Lương 4. Kết quả nghiên cứu làm rõ một số đặc điểm chính của dòng chảy qua đập tràn phím Piano trên công trình đầu mối. Đồng thời bài báo sử dụng phương pháp Omega ( $\Omega$ ) nhận diện và phân tích xoáy trên bậc nước, từ đó làm rõ cơ chế tiêu tán năng lượng và hiệu quả tiêu năng của giải pháp bậc nước hạ lưu đập.

**Từ khóa:** Đập tràn phím Piano, Mô hình Flow-3D, phương pháp Omega, nhận diện xoáy, ứng xử.

**Abstract**

Impacts of climate change, which result in sudden increases in flood flows at headworks structures, emphasise the critical importance of advancing research and implementing effective engineering solutions. The Piano spillway, a promising solution, has been the subject of extensive research and application in irrigation and hydroelectric projects. Its standout feature is the ability to increase discharge capacity by 4 to 5 times compared to practical spillways under similar arrangement and flow conditions.

Numerous research projects have investigated the influence of dam geometry on the ability to discharge or connect the flow through the dam to the downstream at spillways with low water level differences. This study employs a mathematical model to examine the flow behaviour through the Piano spillway connected to the energy dissipation step with a significant slope at the Nam Si Luong 4 hydropower project. The research results shed light on some key flow characteristics through the Piano spillway on the headworks. Additionally, the paper utilizes the Omega method to identify and analyze vortices on the water step, thereby elucidating the energy dissipation mechanism and the energy dissipation efficiency of the downstream water step solution.

**Keywords:** Piano key spillway, Flow-3D model, Omega method, vortex identifier, flow behavior.

**1. Đặt vấn đề**

Trong những năm gần đây, đặc biệt là sau cơn bão Yagi, vấn đề an toàn các hồ chứa và tình trạng ngập lụt hạ du các công trình thủy lợi - thủy điện đã thu hút sự quan tâm mạnh mẽ từ các cấp quản lý, cũng như các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước. Sự biến đổi khí hậu, cùng với những thay đổi trong chế độ dòng chảy lũ về các hồ chứa, đã gây ảnh hưởng bất lợi đến khả năng xả lũ của công trình. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải tăng cường năng lực thoát lũ, nhằm đảm bảo an toàn trong quá trình vận hành các hồ chứa.

Đập tràn phím Piano là một trong các giải pháp thoát lũ được nghiên cứu và phát triển trong những năm gần đây. Đây là loại hình đập tràn có khả năng tháo rất lớn, gấp khoảng 4-5 lần so với đập tràn thực dụng khi cùng các điều kiện bố trí và dòng chảy [1]. Với đặc điểm hình học phức tạp và nhiều tham số như: Chiều rộng ô phím vào, ra; chiều dài ô phím; độ dốc phím; chiều cao đập,... Nhiều công trình nghiên cứu trên mô hình vật lý và mô hình số về ảnh hưởng của các thông số hình học đập và dòng chảy đến khả năng

tháo của đập, những công trình nghiên cứu này làm rõ và hoàn thiện, gần như đầy đủ về phạm vi này của đập [1-6]. Các nghiên cứu về đập tràn phím Piano chủ yếu được thực hiện trên thí nghiệm trong phòng về xác định khả năng tháo và tìm các đặc trưng hình học tốt nhất cho hệ số tháo mà phân loại đập tràn thành 4 loại A, B, C, D [3], còn theo TCVN 12262: 2018 phân thành 2 loại (PK 1 và PK 2) có khuyến cáo áp dụng cho công trình thủy lợi - tràn xả lũ ở Việt Nam [4].

Với sự phát triển mạnh mẽ của máy tính, phương pháp tính toán động lực học chất lỏng (CFD) trở nên như một công cụ hữu hiệu cho công việc nghiên cứu các đặc tính dòng chảy phức tạp như công trình tràn, bể tiêu năng. Phương pháp CFD có ưu điểm vượt trội trong phân tích các đặc trưng dòng chảy như trường vận tốc, áp suất, dòng rối, hàm khí. Đây là hướng tiếp cận hiệu quả giúp công việc nghiên cứu về dòng chảy qua tràn được chi tiết và sáng tỏ hơn [7].

Các nghiên cứu trước đây tập trung nghiên cứu dòng chảy trên tràn phím Piano có chiều cao đập thấp, hạ lưu ngập nước [1], mà chưa nghiên cứu đến trường hợp tràn Piano trên đập có chiều cao lớn, độ dốc cao. Nghiên cứu này mô phỏng dòng chảy qua đập tràn phím Piano cho công trình tháo lũ của thủy điện Nậm Sỉ Lường 4. Thông thường với đập cao, chiều ngang hẹp, phương án xả lũ cửa van luôn được ưu tiên. Tuy nhiên phương án này chi phí xây dựng và vận hành tốn kém, không linh hoạt khi lũ về đột ngột. Dự án thủy điện Nậm Sỉ Lường 4 là một công trình tiêu biểu về giải pháp thoát lũ cho đập cao (theo TCVN 9147:2012), là sự kết hợp giữa cửa van và tràn phím Piano. Với chiều cao đập lớn nên cần có nối tiếp tiêu năng sau tràn Piano, ở đây sử dụng bậc tiêu năng. Nghiên cứu này tập trung làm rõ đặc trưng của dòng chảy qua đập tràn và nối tiếp với công trình tiêu năng bậc nước trên dốc nước. Cùng với đó, nghiên cứu sử dụng phương pháp nhận diện xoáy Omega ( $\Omega$ ) [8, 9] để làm rõ sự hình thành và phát triển xoáy nước, giúp hiểu rõ hơn về quá trình tiêu tán năng lượng trên bậc tiêu năng. Từ các kết quả thu được sẽ phản ánh rõ ứng xử (đặc trưng, diễn tiến, hình thành, phát triển) của dòng chảy trên bậc tiêu năng ở hạ lưu đập tràn Piano.

## 2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mô hình thủy lực

Mô hình toán Flow-3D có thể xử lý rất nhiều vấn đề thủy lực phức tạp đối với tương tác giữa dòng chảy với các thành phần công trình xây dựng như: Bể tiêu năng, đập tràn, cống thoát nước,... [10, 11]. Mô hình dựa trên việc giải phương trình tổng quát Navier-Stocks. Độ chính xác của kết quả mô phỏng phụ thuộc

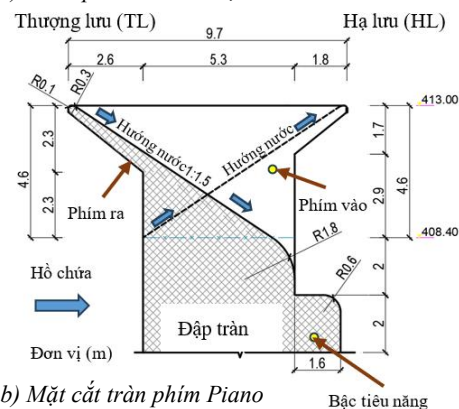
nhiều vào việc chọn mô hình rối. Mô hình rối RNG  $k-\epsilon$  và phương pháp thể tích chất lỏng (VOF) [12] được sử dụng rộng rãi và chứng minh sự phù hợp trong mô phỏng dòng chảy qua đập tràn [11, 13, 14].

### 2.2. Mô hình đập tràn Piano và các trường hợp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu trong bài viết này là đập tràn xả lũ cao 51m có đầu tràn phím Piano của Thủy điện Nậm Sỉ Lường 4 tại suối Chảy ở huyện Mường Tè tỉnh Lai Châu. Cụm công trình tràn kết hợp xả qua cửa van và xả tràn tự do phím Piano [15]. Phần tràn phím Piano được thể hiện trong Hình 1a. Các thông số chính của đập được thiết kế như sau: Chiều rộng ô phím vào và ra là 1,7m; chiều dày thành các ô phím 0,3m; bố trí 6 phím vào và 6 phím ra; bố trí bậc tiêu năng ngay sau đập tràn, chiều rộng và chiều cao mỗi bậc lần lượt là 1,6m và 2,0m [16] (chi tiết xem Hình 1b). Ngưỡng tràn Piano bằng cao trình mực nước dâng bình thường hồ chứa (MNDBT) là 413m.



a) Tràn phím Piano thực



b) Mặt cắt tràn phím Piano

### Hình 1. Chi tiết đập tràn phím Piano thực tế và thiết kế

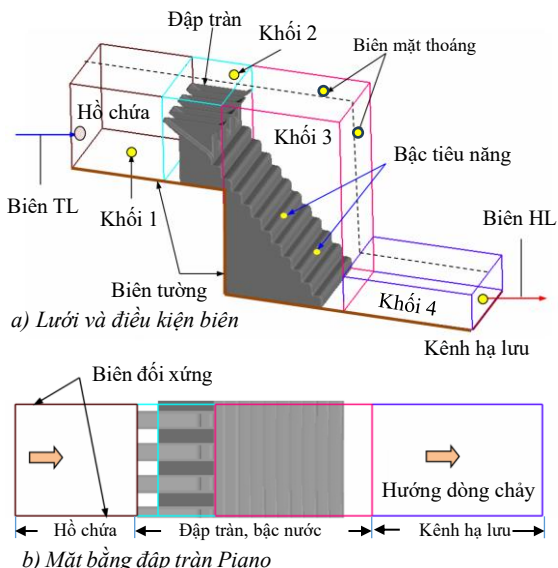
Nghiên cứu thực hiện các mô phỏng số dòng chảy qua tràn với các giá trị mực nước từ MNDBT đến mực nước lũ kiểm tra (MNLKT) = 415m, bài báo thực hiện với 3 giá trị cột nước trên đỉnh tràn như thể hiện ở Bảng 1. Trong đó:  $H_o$  cột nước trên đập tràn; MNLT là mực nước thượng lưu.

**Bảng 1. Trường hợp mô phỏng và điều kiện dòng chảy**

Mô hình	H <sub>0</sub> (m)	MNTL (m)	Ghi chú
1	1,2	414,2	-
2	1,6	414,6	-
3	2,0	415,0	(lũ kiểm tra)

**2.3. Thiết lập phạm vi và các điều kiện biên mô phỏng**

Nghiên cứu sử dụng phần mềm SketchUp dựng 3D mô hình công trình đập tràn phím Piano, sau đó chuyển mô hình 3D sang định dạng file.stl đưa vào mô hình thủy lực Flow-3D thực hiện mô phỏng. Miền không gian tính toán được chia thành 4 khối lưới như Hình 2. Trong đó, phạm vi đập tràn Piano được bố trí lưới mịn (lưới tốt) nhằm nắm bắt các đặc trưng thủy lực qua tràn tốt hơn; phạm vi hồ chứa (khối 1) và hạ lưu đập (khối 3, 4) được bố trí cùng kích cỡ phần tử lưới. Lưới được sử dụng trong mô phỏng là lưới có cấu trúc ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ ). Dựa trên một số công trình khoa học đã công bố trước đây sử dụng mô hình toán trong nghiên cứu dòng chảy qua tràn và kinh nghiệm sử dụng mô hình toán [11, 14, 17, 18], nhóm nghiên cứu đề xuất kích thước lưới bao gồm: Kích thước phần tử ô lưới 0,1m cho khối 2 và 0,2m cho các khối lưới còn lại, với tổng số  $4,1 \times 10^6$  phần tử lưới được thiết lập, để thực hiện mô phỏng và đánh giá độ chính xác của kết quả sau mô phỏng.



**Hình 2. Miền không gian tính toán và điều kiện biên**

Để phục vụ mô phỏng cần thiết lập các điều kiện biên phù hợp. Biên thượng lưu (hồ chứa) được gán là mực nước hồ chứa, tương ứng với mỗi cột nước trên tràn H<sub>0</sub>. Biên hạ lưu gán dòng chảy tự do với áp suất

khí quyển p<sub>a</sub>. Biên trên là biên mặt thoáng chất lỏng tiếp xúc với môi trường khí quyển; biên đáy hồ chứa, đập tràn và kênh hạ lưu được thiết lập là tường cố định; hai bên đập dâng lựa chọn là biên đối xứng (do tính chất đối xứng của các phím Piano trên mặt bằng), chi tiết bố trí các điều kiện được thể hiện trên Hình 2.

**3. Kết quả và thảo luận**

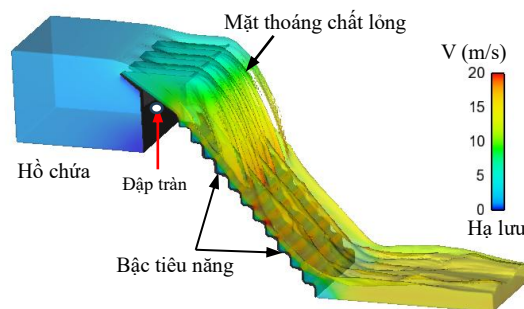
**3.1. Xác nhận kết quả mô hình toán**

Để đánh giá sự phù hợp giữa mô hình thủy lực và kết quả tính toán thiết kế công trình thoát lũ của công trình thủy điện Nậm Sì Lường 4 [19]. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng các thông số về mực nước hồ chứa (cột nước trên tràn H<sub>0</sub>) và hệ số lưu lượng qua đập tràn phím Piano với trường hợp MNLKT = 415,0m (H<sub>0</sub> = 2,0m).

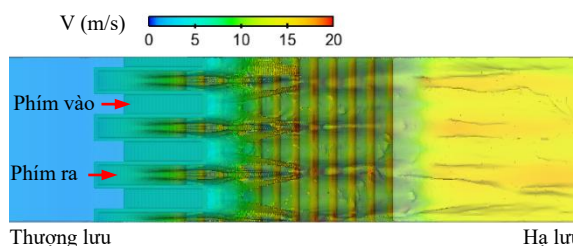
Về tổng thể, khả năng tháo đập tràn Piano được xác định theo công thức:

$$Q = k \cdot \epsilon \cdot \sigma_p \cdot m \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{P} \quad (1)$$

Trong đó: Q là lưu lượng tháo của tràn Piano (m<sup>3</sup>/s); k là hệ số xét đến ảnh hưởng của địa hình đường bờ trước tràn, hướng và phân bố dòng chảy đến tràn, tương quan giữa chiều rộng và chiều sâu dòng chảy đến với tràn dạng phím đàn Piano; ε là hệ số co hẹp dòng chảy do ảnh hưởng của các mô biên mô giữa, trụ cầu; σ<sub>p</sub> là hệ số chảy ngập; m là hệ số lưu lượng, dao động trong khoảng 4,2 ÷ 4,5 tùy thuộc vào dạng mặt cắt tràn.



a) Trường vận tốc dòng chảy qua đập tràn



b) Mặt bằng dòng chảy qua đập tràn Piano

**Hình 3. Kết quả trường vận tốc dòng chảy qua đập tràn**

Kết quả mô phỏng dòng chảy qua đập tràn được thể hiện trên Hình 3 bao gồm hình ảnh 3D dòng chảy qua đập và mặt bằng thể hiện dòng chảy qua các phím vào, ra của đập tràn Piano, cũng như nối tiếp hạ lưu đập với bậc nước. Từ Bảng 2 cho thấy sai số giữa kết quả mô hình Flow-3D và tính toán thiết kế đối với cột nước trên tràn và hệ số lưu lượng qua đập khá nhỏ (< 6%). Do đó, kích thước phần tử ô lưới được lựa chọn ở trên phù hợp với bài toán nghiên cứu mô phỏng dòng chảy qua đập tràn, kích thước này sẽ được áp dụng cho các trường hợp khác của nghiên cứu.

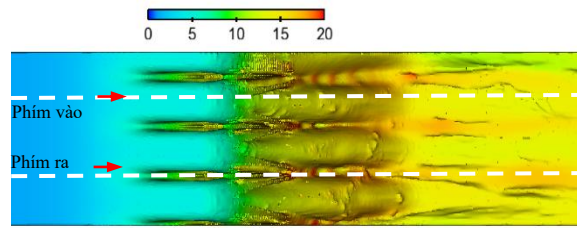
**Bảng 2. Kết quả so sánh thông số dòng chảy đập tràn**

TT	Cột nước tràn $H_0$ (m)			Hệ số lưu lượng (m)		
	Thiết kế [19]	Mô phỏng	Sai số (%)	Thiết kế [19]	Mô phỏng	Sai số (%)
1	2,00	1,97	1,50	4,50	4,27	5,11

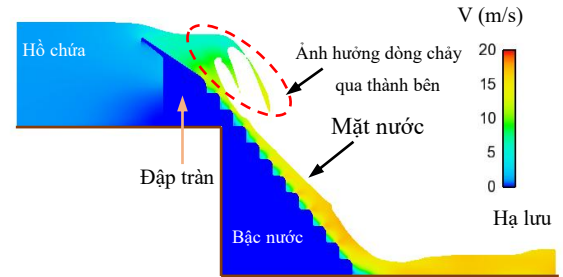
**3.2. Đặc điểm dòng chảy qua đập tràn Piano và bậc tiêu năng**

Tùy thuộc vào đặc trưng hình học của đập tràn phím Piano (thiết kế kích thước phím vào và phím ra), cột nước  $H_0$  trên tràn mà đặc điểm dòng chảy qua đập có thể được phân định ranh giới rõ ràng hoặc không. Với trường hợp mô phỏng cho  $MNLKT = 415,0m$  tương ứng với cột nước trên tràn  $H_0 = 2,0m$ , dòng chảy qua đập tràn được thể hiện chi tiết trên Hình 4. Từ Hình 4a, cho thấy dòng chảy được phân thành 3 phần: Phần thứ nhất dòng chảy tràn qua tường thượng lưu phím ra; phần thứ hai tràn qua các thành bên của phím vào, nó tạo thành các luồng nước rơi trực tiếp xuống ô phím nước ra; phần thứ ba dòng chảy qua các tường hạ lưu phím nước vào (xem Hình 4c), hình thành các luồng nước rơi tự do vào không khí, cuối của luồng nước va chạm với lớp đệm nước trên bậc tiêu năng do dòng chảy trên phím ra tạo nên trên bậc nước.

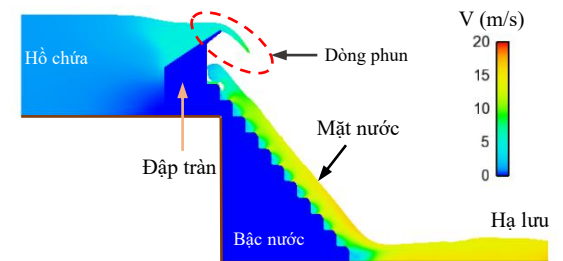
Hình 4d thể hiện rõ đặc điểm dòng chảy trên phím vào, dòng nước từ hồ chứa tiến vào ô đón nước có bề mặt thoáng. Dòng chảy này không phải là đường nằm ngang như dòng chảy trên các đập tràn thực dụng, đỉnh rộng truyền thống mà có dạng vòng lên ở giữa phím sau đó hạ dần (đường nước đỏ) về các thành bên. Dòng chảy ngang hình thành trên đập tràn, luồng nước trên thành bên bổ sung một lượng rất lớn lưu lượng xuống ô phím ra, làm chế độ dòng chảy phím ra trở nên phức tạp hơn.



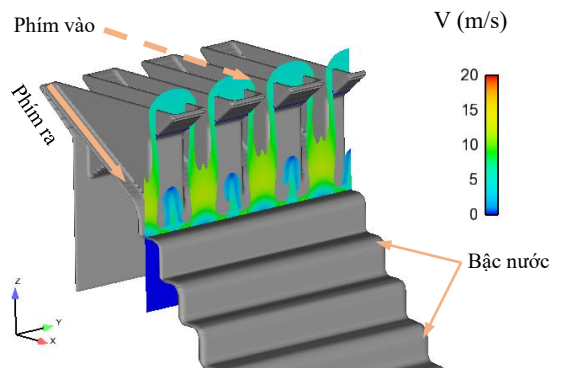
a) Mặt bằng dòng chảy qua đập tràn



b) Mặt cắt dòng chảy phím ra



c) Mặt cắt dòng chảy phím vào



d) Mặt cắt ngang dòng chảy cuối phím tràn

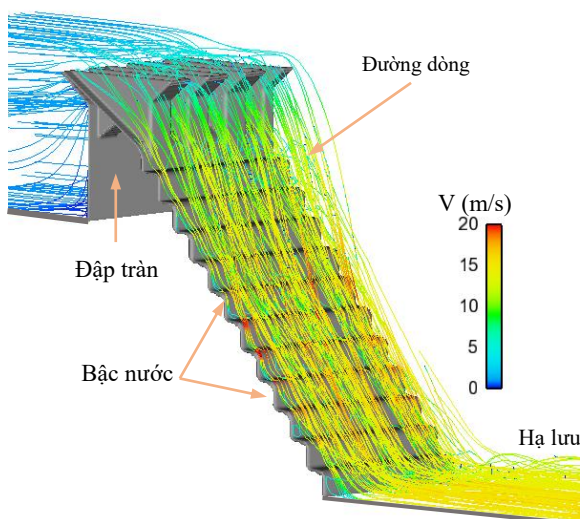
**Hình 4. Phân bố trường vận tốc dòng chảy qua đập tràn**

Dòng chảy trên phím ra, có vai trò chủ yếu trong việc thoát lưu lượng lũ (Hình 4b). Nước từ hồ chứa qua tường thượng lưu phím hình thành dòng chảy trên dốc nước có độ dốc lớn. Vận tốc dòng chảy tăng dần hướng theo hạ lưu phím và có thể đạt tới hơn 10m/s. Đồng thời dòng chảy trên phím ra chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi dòng chảy qua thành bên phím vào hình thành các dòng liên tục và không liên tục phân bố theo chiều dài phím từ thượng lưu về hạ lưu.

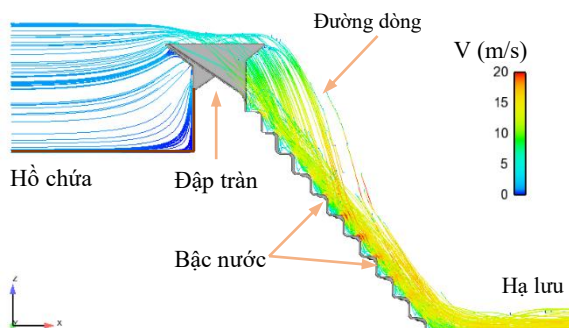
Hình 4c thể hiện dòng chảy qua tường hạ lưu phím vào. Phía cuối luồng nước gần tiếp xúc với dòng chảy trên bậc tiêu năng. Tại vị trí này, luồng nước có thể

thành dòng chảy không liên tục, có sự trộn không khí vào luồng.

Với mực nước lũ kiểm tra, trên bậc nước hình thành dòng chảy lướt “skimming flow”. Do đó làm tăng hiệu quả tiêu năng trên bậc nước khi kết hợp với chế độ phức tạp của dòng chảy qua đập tràn Piano, dòng phun qua phím vào và dòng chảy trên dốc nước độ dốc lớn ở phím ra, xem Hình 4a, b và c.



a) Hình ảnh 3D đường dòng qua đập tràn Pinao



b) Hình ảnh 2D đường dòng qua đập tràn Pinao

**Hình 5. Hình ảnh 3D và 2D đường dòng qua đập tràn**

Tương tác dòng chảy giữa các phím vào, ra và bậc tiêu năng được làm rõ hơn trên thể hiện đặc trưng đường dòng qua đập và bậc nước như Hình 5. Hình này cho thấy sự phức tạp của dòng chảy qua đập và nối tiếp với bậc nước. Dốc nước hình thành các đường dòng cong rõ rệt, cho thấy tạo thành các xoáy nước tiêu tán năng lượng ngay trên bậc nước.

### 3.3. Nhận diện và phân tích diễn biến cấu trúc xoáy nước trên bậc tiêu năng

Để xác định hiệu quả tiêu năng hay mức độ tiêu tán năng lượng dư thừa của dòng chảy sau công trình tháo lũ, thông thường dựa trên việc so sánh năng

lượng giữa hai mặt cắt thượng và hạ lưu công trình. Do đó, cách tiếp cận này đã không làm rõ quá trình và vị trí cụ thể xảy ra tiêu tán năng lượng trong dòng chảy. Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng xoáy nước đóng vai trò quan trọng trong việc gây ra tiêu tán năng lượng. Vì vậy, việc nhận diện và phân tích xoáy nước trở thành một công cụ hữu ích để đánh giá hiệu quả quá trình tiêu tán năng lượng trong dòng chảy.

Sự xuất hiện các cấu trúc xoáy trong dòng chảy làm tăng mức độ hỗn loạn của dòng chảy từ đó làm tăng khả năng tiêu tán năng lượng. Hiện nay, có một số phương pháp phân tích xoáy như tiêu chí  $Q$  [20], đây là phương pháp truyền thống, được sử dụng trong phần mềm CFD, tuy nhiên tồn tại một số nhược điểm về xác định giá trị ngưỡng để nhận diện rõ các xoáy và phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm của nhà nghiên cứu. Gần đây, một số phương pháp mới nhận diện xoáy tốt hơn như Omega ( $\Omega$ ) [8, 9] trong nhận diện xoáy, phương pháp  $\Omega$  có ưu điểm vượt trội với giá trị 0,52 xác định được xoáy hình thành. Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp  $\Omega$  để nhận diện và phân tích diễn tiến cấu trúc xoáy nước, các biểu thức xác định giá trị  $\Omega$  được đề cập trong phương trình (2).

$$\Omega = \frac{b}{a + b + \varepsilon} \quad (2)$$

$$a = \text{trace}(A^T A) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (A_{ij})^2 \quad (3)$$

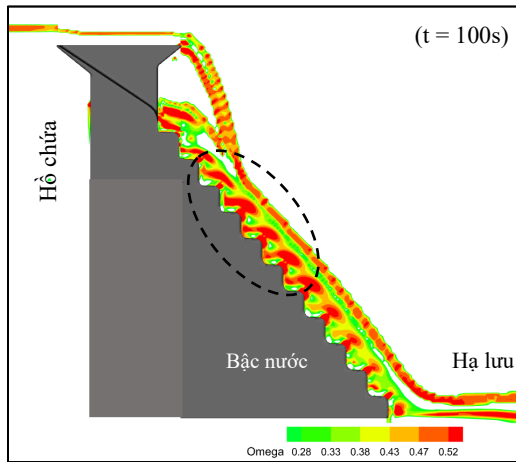
$$b = \text{trace}(B^T B) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (B_{ij})^2 \quad (4)$$

Trong đó, ma trận  $A$  và  $B$  là các thành phần đối xứng và phản đối xứng của ten xơ gradient vận tốc  $\nabla V$ . Để tránh trường hợp chia hết cho 0, một tham số dương nhỏ  $\varepsilon$  được thêm vào mẫu số bên phải của phương trình

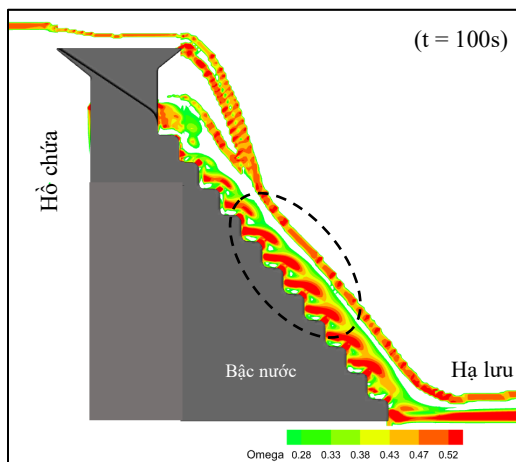
Dựa vào kết quả mô hình CFD và code của phương pháp  $\Omega$ , nghiên cứu đã thể hiện được các trường giá trị nhận diện xoáy trên Hình 6 phụ thuộc vào cột nước trên tràn và cùng xét với thời gian mô phỏng  $t = 100s$ .

Với cột nước trên tràn thay đổi từ MNDBT đến MNLKT thì bậc nước đảm bảo khả năng tiêu tán phần lớn năng lượng trên các bậc (Hình 6). Các cấu trúc xoáy xuất hiện với cường độ cao và phạm vi lớn tại các vị trí mà dòng phun (luồng nước) từ phím vào rơi trực tiếp xuống bậc nước, các vị trí này không cố định mà thay đổi theo chiều cao cột nước trên tràn, cụ thể với cột nước  $H_o$  nhỏ dòng phun rơi trên các bậc nước gần hạ lưu đập, với MNLKT thì vị trí gần phạm vi cuối bậc nước. Trong phạm vi xuất hiện xoáy cường

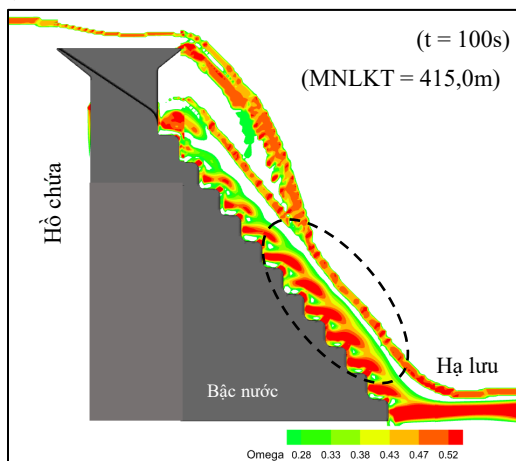
độ cao, hình thành dòng phun trên bậc nước, hay các xoáy cuộn trong dòng chảy tầng mức hỗn loạn của dòng chảy.



a) Cột nước trên tràn  $H_o = 1,2m$

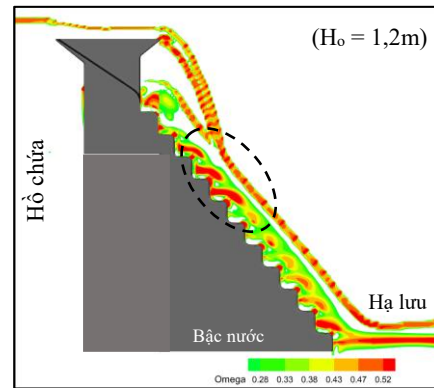


b) Cột nước trên tràn  $H_o = 1,6m$

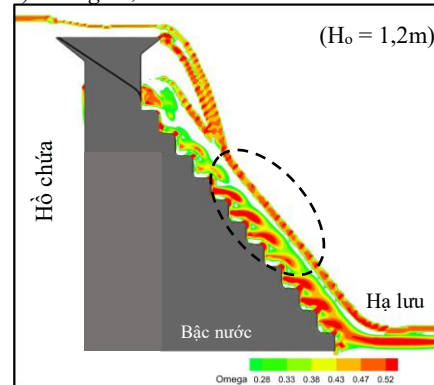


c) Cột nước trên tràn  $H_o = 2,0m$

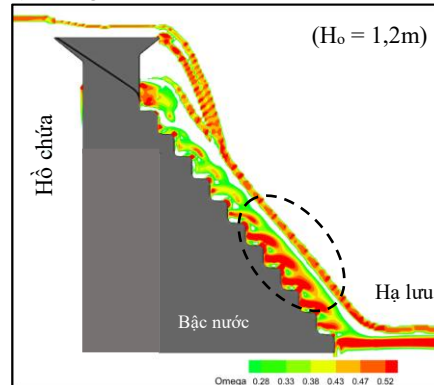
**Hình 6. Xác định cấu trúc xoáy bằng phương pháp  $\Omega$  cho các mực nước trên đập tràn Piano**



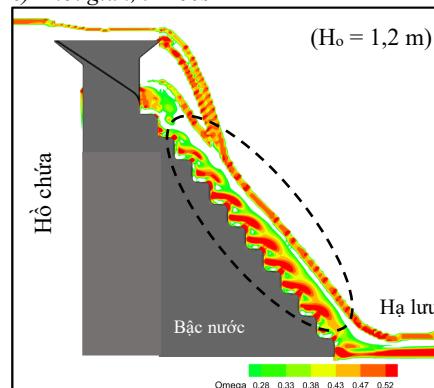
a) Thời gian,  $t = 30s$



b) Thời gian,  $t = 40s$



c) Thời gian,  $t = 60s$



d) Thời gian,  $t = 100s$

**Hình 7. Diễn biến cấu trúc xoáy nước trên bậc tiêu năng theo thời gian (t) với cột nước  $H_o = 1,2m$**

Hình 7, thể hiện diễn tiến cấu trúc xoáy của dòng chảy xuất hiện trên bậc nước theo thời gian, tại thời điểm dòng chảy bắt đầu tràn qua phím Piano ( $t = 30s$ ) các xoáy xuất hiện tại các bậc nước chân đập, lúc này dòng chảy mới bắt đầu chế độ chảy, tiếp theo thời gian  $t = 40s, 60s$  cho thấy sự dịch chuyển các xoáy nước trên bậc tiêu năng xuôi xuống hạ lưu đập, tại giá trị  $t = 100s$  dòng chảy qua đập đạt trạng thái ổn định, vì vậy cấu trúc dòng xoáy xuất hiện khá đầy đủ trên các bậc nước. Dòng phun tự do từ phím vào khi rơi xuống mặt dốc nước sẽ gặp lớp đệm xoáy nước ngay trên mặt bậc. Lớp đệm xoáy nước giữ vai trò như bộ giảm chấn, giảm tác động của dòng nước lên bề mặt tràn, bảo vệ lớp bê tông.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã áp dụng phương pháp mô hình toán xây dựng cơ sở dữ liệu số phục vụ cho việc phân tích, đánh giá và làm rõ hơn các đặc điểm chính của dòng chảy qua đập tràn phím Piano, cũng như sự nối tiếp dòng chảy với bậc tiêu năng cho công trình thủy điện Nậm Sỉ Lường 4, nơi có độ chênh mực nước thượng lưu và hạ lưu lớn.

Bài báo đã sử dụng phương pháp Omega để nhận diện, phân tích diễn biến xoáy nước trên các bậc tiêu năng được bố trí ở hạ lưu đập tràn, từ đó làm rõ hình thức tiêu tán năng lượng dòng chảy trên các bậc nước, đây là cách tiếp cận mới trong vấn đề xem xét, đánh giá tiêu năng trên dốc nước. Thêm nữa nghiên cứu sẽ là cơ sở để người thiết kế chọn bê tông mác cao hơn tại các vị trí có xoáy nước mạnh.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số: **41-2024/KHXD**.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đ. T. M. Yên (2018). *Nghiên cứu khả năng tháo qua tràn Piano khi kể đến ảnh hưởng của mực nước hạ lưu*. Luận án Tiến sỹ, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.

[2] H. Hu, Z. Qian, W. Yang, D. Hou, and L. Du (2018). *Numerical study of characteristics and discharge capacity of Piano key weirs*. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 62, pp.27-32.

[3] O. Machiels, M. Piroton, A. Pierre, B. Dewals, and S. Erpicum (2014). *Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs*. Journal of Hydraulic Research, Vol.52, No.3, pp.326-335.

[4] TCVN 12262: 2018. *Tính toán thủy lực tràn phím*

*Piano*. Viện khoa học Thủy lợi miền Nam.

- [5] D. Singh and M. Kumar (2023). *Effect of the inlet-to-outlet key width ratio of Piano Key Weir on its hydraulic behaviour*. Flow Measurement and Instrumentation, Vol.91, 102342p.
- [6] A. A. Bekheet, N. M. AboulAtta, N. Y. Saad, and D. A. El-Molla (2022). *Effect of the shape and type of Piano key weirs on the flow efficiency*. Ain Shams Engineering Journal, Vol.13, No.3, 101620p.
- [7] 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, doi: 10.17559/tv-20230206000327.
- [8] C. Liu, Y. Wang, Y. Yang, and Z. Duan (2016). *New omega vortex identification method*. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, Vol.59, pp.1-9.
- [9] X. Dong, Y. Gao, and C. Liu (2019). *New normalized Rortex/vortex identification method*. Physics of Fluids, Vol.31, No.1.
- [10] L. T. T. Hiền, D. H. Đăng, D. H. Đức (2020). *Nghiên cứu dòng chảy trên tràn xả lũ có mô nhám gia cường bằng mô hình dòng chảy hai pha*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy lợi, Tập. 61.
- [11] T. C. Tý (2024). *Ảnh hưởng của các thông số hình dạng mặt cắt đập tràn hình thang vuông đến hệ số lưu lượng*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 80, tr.47-52.
- [12] F. S. Inc (2020). Flow-3D V9.3 User's Manual. Santa Fe, NM, USA.
- [13] L. T. T. Hiền, D. H. Đức, Đ. H. Đăng, N. Đ. Phú (2020). *Nghiên cứu dòng chảy qua tràn xả lũ Tà Rục - Khánh Hòa bằng mô hình rối kết hợp trộn khí*. Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, Tập 70, tr.25-32.
- [14] Đ. T. M. Yên, L. V. Nghị (2018). *Đặc trưng hình dạng và nối tiếp của dòng chảy qua tràn Piano*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy lợi, Tập. 42, tr.10.
- [15] Công ty Tư vấn Đại học Xây dựng (2019). *Báo cáo chính phân xây dựng- Dự án thủy điện Nậm Sỉ Lường 4*, Báo cáo chính phân xây dựng.
- [16] Công ty Tư vấn Đại học Xây dựng (2019). *Hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công Thủy điện Nậm Sỉ Lường 4 - Công trình đầu mối*. Hồ sơ thiết kế.

- [17] 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, 674p.
- [18] Cong Ty Trinh, Zhang JianMin, Cong Trieu Tran (2024). *Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps*. Applied Sciences. Vol.14(2), pp.1-19.
- [19] Công ty Tư vấn Đại học Xây dựng (2019). *Phụ lục tính toán 2 - tính toán thủy lực tràn Thủy điện Nậm Sỉ Lường 4*. Phụ lục tính toán.
- [20] J. C. Hunt, A. A. Wray, and P. Moin (1988). *Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows*. Studying turbulence using numerical simulation databases, 2. Proceedings of the 1988 summer program.

Ngày nhận bài:	05/11/2024
Ngày nhận bản sửa:	17/11/2024
Ngày duyệt đăng:	02/12/2024