

# MÔ HÌNH DÒNG CHẢY BA CHIỀU: LÝ THUYẾT, KIỂM CHUẨN VÀ ỨNG DỤNG MÔ PHÒNG ĐẬP TRÀN KIỂU XI PHÔNG

## FLOW-3D MODEL: THEORY, VERIFICATION AND APPLICATION TO SIMULATE SIPHON SPILLWAYS

PHẠM VĂN KHÔI<sup>1\*</sup>, VŨ VĂN NGHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

<sup>2</sup>Khoa Công trình giao thông, Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh

\*Email liên hệ: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

### Tóm tắt

Bài báo giới thiệu mô hình dòng chảy ba chiều (Flow - 3D) và ứng dụng mô phỏng đập tràn kiểu xi phông để tháo nước hồ chứa. Lý thuyết sử dụng và các ứng dụng chủ yếu của mô hình trong lĩnh vực công trình thủy được trình bày. Kết quả thí nghiệm vật lý kiểm chuẩn mô hình cho thấy mô hình dòng chảy ba chiều mô phỏng rất tốt cho công trình đập tràn kiểu xi phông. Từ đó, mô hình được sử dụng để mô phỏng hoạt động thực tế của đập tràn xi phông Hadong. Kết quả mô phỏng thể hiện rõ hiện tượng đặc trưng là áp suất âm ở trong ống xi phông xuất hiện làm cho ống xi phông làm việc. Mô hình dòng chảy ba chiều và kết cấu đập tràn kiểu xi phông có thể ứng dụng rộng rãi trong tính toán thủy lực công trình tại Việt Nam.

**Từ khóa:** Mô hình dòng chảy ba chiều, đập tràn kiểu xi phông, tính toán động lực học chất lỏng, kiểm chuẩn mô hình, hệ phương trình Navier - Stokes.

### Abstract

This paper introduces the Flow - 3D model and simulations of siphon spillways in reservoirs. The model theory and model applications in hydraulics are presented. The physical experiment to verify the Flow - 3D model shows that the model works well for the case of siphon spillways. Consequently, the model is used to simulate the Hadong siphon spillway. The research results show the outstanding characteristic of the siphon spillways that the negative pressure occurring in the siphon makes it working. The Flow - 3D model and the siphon spillways can be applied to investigate hydraulics in Vietnam.

**Keywords:** Flow-3D model, siphon spillways, computational fluid dynamics, model verification, Navier - Stokes equations.

### 1. Giới thiệu

Mô hình dòng chảy ba chiều thuộc họ các phần mềm khoa học dòng chảy (Flow Science) được công ty Flow Science (Mỹ) phát triển. Hiện nay, mô hình dòng chảy ba chiều được ứng dụng rộng rãi để mô phỏng hầu hết các lĩnh vực khoa học kỹ thuật như hàng không, cơ khí, xây dựng công trình thủy,... Trên thế giới, trong lĩnh vực tính toán thủy lực công trình, mô hình dòng chảy ba chiều được sử dụng để mô phỏng sóng [1, 2], mô hình dòng chảy qua đập tràn [3, 4]. Tại Việt Nam, mô hình dòng chảy ba chiều đang dần được sử dụng rộng rãi hơn trong tính toán mô phỏng dòng chảy qua đập tràn [5, 6], bậc nước [7].

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu tính toán dòng chảy tháo lũ qua đập tràn kiểu xi phông sử dụng mô hình vật lý và mô hình dòng chảy ba chiều. Đập tràn kiểu xi phông là loại đập tràn đang được sử dụng rộng rãi trên thế giới [8-11] với ưu điểm là giảm được bề rộng thân đập, từ đó giảm khối lượng công trình đập, tiết kiệm chi phí xây dựng. Tại Việt Nam, đập tràn xi phông ít được sử dụng do thiếu tính toán chi tiết và khó khăn trong vấn đề công nghệ thi công lắp đặt. Theo tìm hiểu của nhóm tác giả, đập tràn xi phông đầu tiên ở Việt Nam được xây dựng để tiêu thoát nước hồ chứa Bàu Nhum [12] từ thời Pháp thuộc, được xây dựng lại năm 1963 (đập bị vỡ năm 1962) và nâng cấp năm 2009 (Hình 1). Đập tràn này có 5 ống xi phông, đường kính trong của ống là 0,3m, lưu lượng xả lớn nhất 1m<sup>3</sup>/s là rất hạn chế.



Hình 1. Đập tràn xi phông Bàu Nhum, Quảng Trị

Với mục tiêu bổ sung tính toán thực tế cho công trình đập tràn kiểu xi phông trong điều kiện Việt Nam, nhóm tác giả giới thiệu sử dụng mô hình dòng chảy ba chiều và kiểm chuẩn mô hình bằng thí nghiệm vật lý. Mô hình dòng chảy ba chiều được áp dụng để mô phỏng làm việc của đập tràn xi phông Hadong, Hàn Quốc (Hình 2), qua đó thấy được tính ứng dụng thực tế của mô hình. Đập tràn Hadong sử dụng 9 ống xi phông với đường kính trong của ống là 2,7m, lưu lượng xả lớn nhất là 490m<sup>3</sup>/s.



Hình 2. Đập tràn xi phông Hadong, Hàn Quốc

## 2. Mô hình dòng chảy ba chiều

### 2.1. Hệ phương trình chủ đạo

Mô hình dòng chảy ba chiều là một trong số các mô hình tính toán động lực học chất lỏng (Computational fluid dynamics - CFD) được sử dụng phổ biến hiện nay. Hệ phương trình chủ đạo [13] là hệ phương trình Navier - Stokes với ba phương trình động lượng (1) - (3) và một phương trình liên tục (4) như sau:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} \quad (1)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} \quad (2)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (3)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) \quad (4)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}$$

Trong đó:  $\rho$  là khối lượng riêng chất lỏng;  $V_F$  là tỷ lệ phần thể tích bị chìm;  $u, v, w$  là các thành phần vận tốc theo phương  $x, y, z$ ;  $A_x, A_y, A_z$  là tỷ lệ phần diện tích bị chìm theo phương  $x, y, z$ ;  $R_{SOR}$  là thành phần nguồn do khối lượng;  $R_{DIF}$  là thành phần khuếch tán do rối;  $G_x, G_y, G_z$  là gia tốc trọng trường theo phương  $x, y, z$ ;  $f_x, f_y, f_z$  là gia tốc do nhớt theo phương  $x, y, z$ ;  $b_x, b_y, b_z$  là thành phần do lực cản trong vật thể rỗng theo phương  $x, y, z$ ;  $u_w, v_w, w_w$  là vận tốc của các thành phần nguồn;  $u_s, v_s, w_s$  là vận tốc của chất lỏng tại bề mặt của các thành phần nguồn;  $\xi$  là hệ số chuyển đổi về hình học vật thể giữa hệ tọa độ đề các và hệ tọa độ cầu;  $R$  là hệ số chuyển đổi khi dùng hệ tọa độ cầu hoặc hệ tọa độ đề các.

Ngoài ra, khi tính toán dòng chảy rối, mô hình tính toán tổn thất năng lượng giải hai phương trình  $k - \epsilon$  hoặc hai phương trình  $k - \omega$ . Theo đó, hai phương trình  $k - \epsilon$  với ưu điểm tính toán chính xác hơn với bài toán tương tác dòng chảy qua đập tràn [5, 6] được sử dụng trong nghiên cứu này.

### 2.2. Ứng dụng chủ yếu của mô hình

Mô hình dòng chảy ba chiều có thể mô phỏng được hầu hết các hiện tượng vật lý trong tự nhiên, bao gồm dòng chảy chất lỏng nén được (compressible fluid) và dòng chảy chất lỏng không nén được (incompressible fluid). Mô hình có thể mô phỏng tốt 3 pha rắn - lỏng - khí, từ đó mô phỏng sự làm việc đồng thời của kết cấu công trình (rắn) với dòng chảy (lỏng) và không khí. Một ưu điểm nữa là mô hình có thể mô phỏng không gian 3 chiều [14-16] (tính toán theo cả 3 phương  $x, y$  và  $z$ ) nên tính chính xác cao hơn các mô hình dòng chảy 2 chiều [17, 18]. Tuy nhiên, do mô hình tính toán 3 chiều nên tiêu tốn nhiều tài nguyên hơn và thời gian mô phỏng lâu hơn các mô hình 2 chiều.

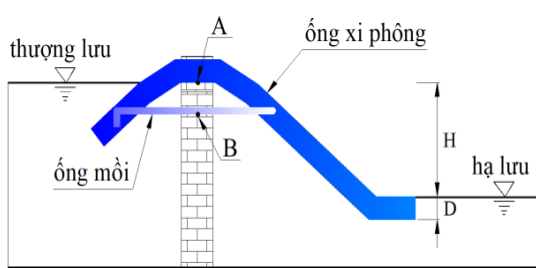
## 3. Kiểm chuẩn mô hình dòng chảy ba chiều

### 3.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của đập tràn xi phông trong thí nghiệm kiểm chuẩn

Hình 3 mô tả cấu tạo của đập tràn xi phông điển hình được sử dụng trong thí nghiệm kiểm chuẩn. Khi mực nước thượng lưu cao hơn ngưỡng tràn của đập (điểm A), nước chảy tràn thông thường trong ống xi phông sẽ đẩy nước và không khí trong ống ra ngoài làm xuất hiện chân không trong ống xi phông để kéo

nước thượng lưu lên chảy ngập ống xi phông. Trạng thái này được gọi là trạng thái xi phông làm việc. Khi mực nước thượng lưu thấp hơn ngưỡng tràn, để xi phông làm việc, ống mồi được sử dụng. Khi mực nước thượng lưu cao hơn ngưỡng tràn của ống mồi (điểm B), nước sẽ chảy tràn thông thường qua ống mồi để vào ống xi phông rồi chảy xuống hạ lưu. Tương tự, sau một thời gian, chân không trong ống xi phông xuất hiện kéo nước thượng lưu lên chảy qua ngưỡng tràn của đập rồi chảy ngập ống xi phông. Xi phông lại vào trạng thái làm việc. Trên Hình 3, D là đường kính ống xi phông, H là độ chênh mực nước thượng lưu - hạ lưu. Đập tràn tháo nước khi mực nước thượng lưu nằm trong khoảng giữa ngưỡng tràn đập và ống mồi.

### 3.2. Kết quả thí nghiệm kiểm chuẩn



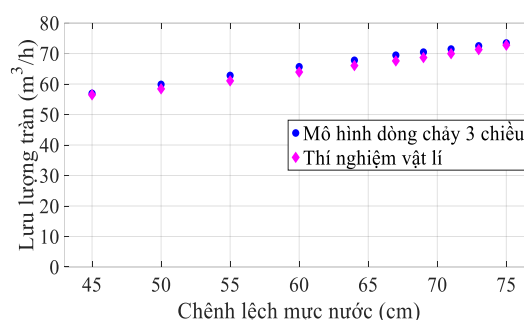
Hình 3. Cấu tạo của đập tràn xi phông điển hình



Hình 4. Mặt bằng và kết cấu xi phông trong thí nghiệm kiểm chuẩn

Để tiến hành kiểm chuẩn mô hình dòng chảy ba chiều cho kết cấu đập tràn kiểu xi phông, nhóm tác giả đã tiến hành xây dựng mô hình vật lý và mô hình mô phỏng dòng chảy ba chiều với cùng thông số kích thước và điều kiện đầu vào. Mô hình vật lý thí nghiệm kiểm chuẩn đập tràn xi phông được thực hiện tại phòng thí nghiệm của Viện nghiên cứu Nông nghiệp Hàn Quốc, thành phố Ansan, tỉnh Gyeonggi, Hàn Quốc như thể hiện trên Hình 4.

Đường kính trong của ống xi phông (D) là 10cm, độ chênh mực nước thượng lưu - hạ lưu lớn nhất là 75cm (mực nước thượng lưu ngập hoàn toàn ống xi phông) và nhỏ nhất là 45cm (mực nước thượng lưu tại ngưỡng tràn ống mồi). Thí nghiệm tiến hành thay đổi 10 giá trị điều kiện đầu vào là độ chênh mực nước thượng - hạ lưu từ nhỏ nhất (45cm) đến lớn nhất (75cm), khi ống xi phông ở trạng thái làm việc thì đo lưu lượng tràn của ống tại cửa ra hạ lưu cho từng trường hợp. Kết quả so sánh giữa mô hình dòng chảy ba chiều và mô hình vật lý được thể hiện trên Hình 5.

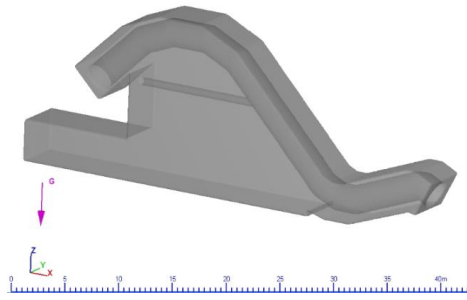


Hình 5. So sánh kết quả của mô hình dòng chảy ba chiều và kết quả của thí nghiệm vật lý

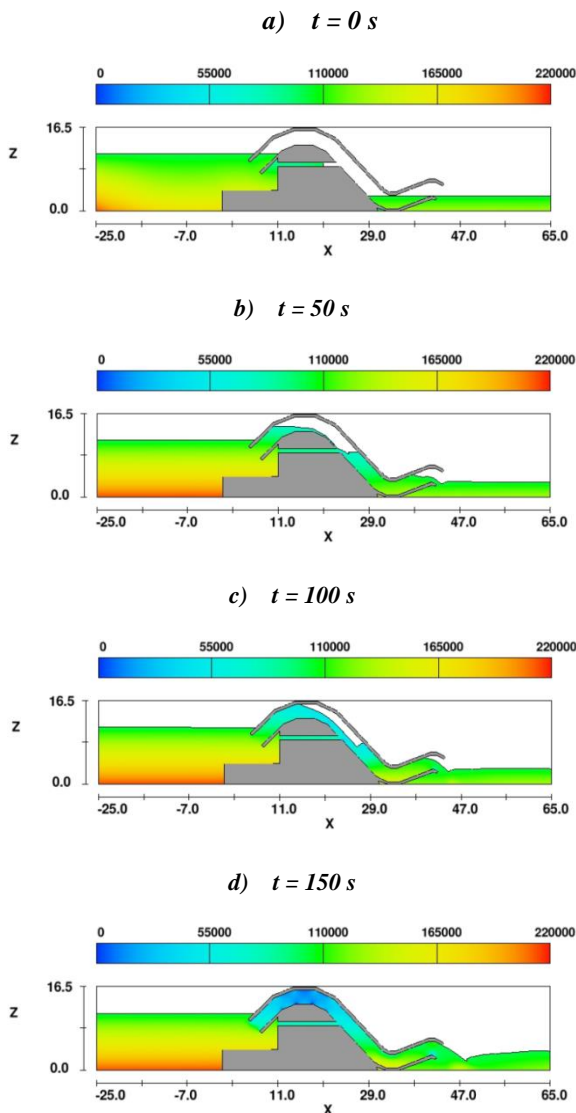
Như thể hiện trên Hình 5, khi ống xi phông ở trạng thái làm việc, giá trị lưu lượng tăng từ 56,46m³/h đến 72,74m³/h khi độ chênh mực nước tăng tương ứng từ 45cm đến 75cm đối với kết quả đo được từ mô hình vật lý. Đối với mô hình dòng chảy ba chiều, kết quả mô phỏng lưu lượng cũng có xu hướng tăng từ 56,93m³/h đến 73,44m³/h khi độ chênh mực nước tăng tương ứng từ 45cm đến 75cm. Kết quả trên cho thấy mô hình dòng chảy ba chiều mô phỏng rất tốt so với mô hình vật lý với độ sai khác lớn nhất là 2,81% khi độ chênh mực nước tương ứng là 55cm.

### 4. Ứng dụng mô hình dòng chảy ba chiều mô phỏng xả lũ hồ chứa bằng đập tràn xi phông

Mô hình dòng chảy ba chiều được ứng dụng mô phỏng dòng chảy cho đập tràn xi phông Hadong, Hàn Quốc (Hình 2). Kết cấu đập tràn xi phông được thiết lập trong mô hình dòng chảy ba chiều như thể hiện trên Hình 6. Đường kính trong ống xi phông là 2,7m, chiều dài ống xi phông là 44,128m, đường kính trong ống mồi là 0,8m, chiều dài ống mồi là 11,13m. Độ chênh mực nước thượng lưu - hạ lưu tính toán là 8,2m (mực nước thượng lưu nằm trong khoảng giữa ngưỡng tràn đập và ống mồi như Hình 7. a).



**Hình 6. Kết cấu đập tràn xi phông Hadong trong mô hình dòng chảy ba chiều**



**Hình 7. Mô phỏng đập tràn xi phông Hadong trong mô hình dòng chảy ba chiều tại các thời điểm: a)  $t=0s$ ; b)  $t=50s$ ; c)  $t=100s$ ; d)  $t=150s$**

Hình 7. (a, b, c, d) thể hiện kết quả mô phỏng đập tràn xi phông tại mặt cắt dọc công trình ở các thời điểm  $t=0s, 50s, 100s$  và  $150s$ . Ngoài kích thước theo phương ngang (trục x) và phương đứng (trục z), thang chia màu phía trên mỗi hình thể hiện giá trị áp suất tuyệt đối (đơn vị Pa). Lưu ý rằng giá trị áp suất khí quyển là  $101.300Pa$ . Tại thời điểm  $t=0s$  (Hình 7.a), mực nước thượng lưu nằm dưới ngưỡng tràn đập và chảy ngập ống mồi. Khi ống mồi hoạt động, nước sẽ chảy từ ống mồi vào trong ống xi phông phía hạ lưu để đẩy nước và không khí trong ống xi phông ra phía hạ lưu cũng như làm dâng mực nước phía hạ lưu trong ống xi phông. Cùng lúc đó, sự chênh lệch áp suất giữa ngoài ống và trong ống xi phông phía thượng lưu sẽ tạo lực để kéo nước phía thượng lưu lên chảy qua ngưỡng tràn của đập như thể hiện trên Hình 7.b tại thời điểm  $t=50s$ . Tiếp theo, nước vừa chảy tràn qua ngưỡng tràn vừa chảy ngập trong ống mồi làm mực nước thượng lưu tiếp tục dâng lên đến đỉnh xi phông (Hình 7.c) tại thời điểm  $t=100s$  và làm ngập hoàn toàn trong ống xi phông (Hình 7.d) tại thời điểm  $t=150s$ . Lúc này, xi phông chính thức ở trạng thái làm việc, áp suất tại đỉnh xi phông luôn nhỏ hơn áp suất khí quyển ( $101.300Pa$ ), được gọi là áp suất âm. Đây chính là đặc trưng hoạt động của ống xi phông và tuân theo định luật Bernoulli trong tính toán thủy lực công trình. Vận tốc tại cửa ra ống xi phông là  $9,53m/s$ , tương ứng với lưu lượng xả đạt  $54,54m^3/s$ .

**4. Kết luận**

Bài báo đã giới thiệu mô hình dòng chảy ba chiều và ứng dụng chủ yếu của mô hình trong lĩnh vực mô phỏng dòng chảy. Đặc biệt, nhóm tác giả tập trung vào việc mô phỏng và kiểm chuẩn mô hình cho công trình đập tràn kiểu xi phông. Đây là kiểu đập tràn tiên tiến được áp dụng phổ biến trên thế giới nhưng hạn chế ở Việt Nam do điều kiện công nghệ thi công lắp đặt. Nhóm tác giả cũng đã mô phỏng các trạng thái làm việc của đập tràn xi phông Hadong, Hàn Quốc để thấy được thực tế hoạt động của nó cùng với lý thuyết tính toán. Từ đó, bổ sung độ tin cậy trong việc tính toán áp dụng loại hình đập tràn kiểu xi phông này trong việc ứng dụng tiêu thoát lũ hồ chứa tầm trung (từ 1 triệu  $m^3$  nước đến 100 triệu  $m^3$  nước) tại Việt Nam. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc điều khiển lưu lượng tràn trong ống xi phông cần được xem xét để tránh việc xả lũ với lưu lượng quá lớn làm ngập lụt phía hạ lưu của hồ chứa. Tính toán đánh giá hiệu quả đầu tư đập tràn kiểu xi phông cũng sẽ được đề cập trong những bước tiếp theo.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Najafi-Jilani, M. Z. Niri, and N. Naderi, *Simulating three dimensional wave run-up over breakwaters covered by antifer units*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.6, No.2, pp.297-306, Jun. 2014.  
doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0180.
- [2] M. A. Musa, A. Y. Maliki, M. F. Ahmad, W. N. Sani, O. Yaakob, and K. B. Samo, *Numerical Simulation of Wave Flow Over the Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC) Device*, Procedia Engineering, Vol.194, pp. 166-173, 2017.  
doi: 10.1016/j.proeng.2017.08.131.
- [3] S. Dehdar-behbahani and A. Parsaie, *Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran*, Alexandria Engineering Journal, Vol.55, No.1, pp.467-473, Mar. 2016.  
doi: 10.1016/j.aej.2016.01.006.
- [4] S. Y. Kumcu, *Investigation of flow over spillway modeling and comparison between experimental data and CFD analysis*, KSCE J Civ Eng, Vol.21, No.3, pp.994-1003, Mar. 2017.  
doi: 10.1007/s12205-016-1257-z.
- [5] Khánh Đ. X., Nga L. T. T., and Hùng H. V., *Ứng dụng phần mềm Flow-3D tính toán vận tốc và áp suất trên đập tràn thực dụng mặt cắt hình cong*, Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, No.61, pp.99-106, 2018.
- [6] L. T. T. Hien and D. H. Duc, *Numerical Simulation of Free Surface Flow on Spillways and Channel Chutes with Wall and Step Abutments by Coupling Turbulence and Air Entrainment Models*, Water, Vol.12, No.11, p. 3036, Oct. 2020, doi: 10.3390/w12113036.
- [7] Thành N. C. and Phương H. Đ., *Tiêu hao năng lượng của dòng chảy qua bậc nước trên mái đập hạ lưu*, Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, No.46, pp.63-70, 2014.
- [8] K. Babaeyan-Koopaei, E. M. Valentine, and D. A. Ervine, *Case Study on Hydraulic Performance of Brent Reservoir Siphon Spillway*, J. Hydraul. Eng., Vol.128, No.6, pp. 562-567, Jun. 2002.  
doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:6(562).
- [9] A. Ghafourian, *Hydraulic of Siphon Spillway by Physical and Computational Fluid Dynamics*, p. 6, 2011.
- [10] R. Tadayon and A. S. Ramamurthy, *Discharge Coefficient for Siphon Spillways*, J. Irrig. Drain Eng., Vol.139, No.3, pp.267-270, Mar. 2013.  
doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000542.
- [11] J. Boatwright, *Air-Regulated Siphon Spillways: Performance, Modeling, Design, and Construction*, p.75.
- [12] N. Ty Niên, *Hồ chứa nước Bàu Nhum: một công trình thủy lợi độc đáo*. Hội đập lớn và phát triển nguồn nước Việt Nam, 2010.
- [13] *FLOW-3D® Version 11.0.3 Users Manual*. 2014.
- [14] G. Ma, J. T. Kirby, and F. Shi, *Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides*, Ocean Modelling, Vol.69, pp.146-165, Sep. 2013.  
doi: 10.1016/j.ocemod.2013.07.001.
- [15] Giang L. S. and Hong T. T. M., *3D numerical modeling of flow and sediment transport in rivers and open channels*, Sci. Tech. Dev. J.-Sci. Earth Environ., Vol.3, No.1, pp.23-36, Aug. 2019, doi: 10.32508/stdjsee.v3i1.508.
- [16] M. Zhenwei, Z. Zhiyan, and Z. Tao, *Numerical Simulation of 3-D Flow Field of Spillway based on VOF Method*, Procedia Engineering, Vol.28, pp. 808-812, 2012.  
doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.814.
- [17] J. S. O'Brien, P. Y. Julien, and W. T. Fullerton, *Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.119, No.2, pp.244-261, Feb. 1993.  
doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244).
- [18] F. Shi, J. T. Kirby, J. C. Harris, J. D. Geiman, and S. T. Grilli, *A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation*, Ocean Modelling, Vol.43-44, pp.36-51, Jan. 2012.  
doi: 10.1016/j.ocemod.2011.12.004.

Ngày nhận bài:	21/3/2021
Ngày nhận bản sửa:	30/3/2021
Ngày duyệt đăng:	12/4/2021