

NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY QUA TRẦN XẢ LŨ TÀ RỤC - KHÁNH HÒA BẰNG MÔ HÌNH DÒNG RỐI KẾT HỢP TRỘN KHÍ

Lê Thị Thu Hiền¹, Dương Hoài Đức², Đinh Hải Đăng², Nguyễn Đức Phú³

Tóm tắt: Hai module dòng rối và trộn khí của mô hình thủy động lực học Flow 3D được sử dụng để mô phỏng dòng chảy qua cụm công trình trần xả lũ, hồ xói kênh dẫn hạ lưu Tà Rục – Khánh Hòa. Các đặc trưng thủy lực của dòng chảy như mực nước, lưu tốc, được tính toán so sánh với số liệu thực đo. Chiều dài dòng phun được xem xét bằng cả công thức kinh nghiệm, kết quả tính từ Flow 3D rồi so sánh với thực nghiệm và chỉ ra rằng việc sử dụng mô hình toán cho kết quả hợp lý hơn. Ba phương án góc hắt mũi phun của trần xả lũ cũng được xem xét, lựa chọn thông qua đánh giá chiều dài dòng phun, phân bố vận tốc, áp suất của dòng chảy tại hồ xói nhằm khẳng định việc cần thiết phải kể tới tính chất tự trộn khí của dòng chảy có vận tốc lớn trên các công trình phức tạp.

Từ khóa: Flow-3D, trần xả lũ, hồ xói, đặc tính thủy lực.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

An toàn đập và các công trình phụ trợ như trần xả lũ, cống, v.v... luôn đóng một vai trò quan trọng trong quản lý lưu vực, hồ chứa ở Việt nam. Sự hư hỏng của các dạng công trình này sẽ dẫn tới những thiệt hại, hậu quả khó lường cả con người và vật chất ở hạ lưu công trình do sóng lũ vỡ đập gây nên. Vì vậy, việc nghiên cứu đặc tính thủy lực của dòng chảy qua các công trình này ứng với các cấp làm việc khác nhau luôn cần được xem xét. Mô hình toán, từ lâu luôn được coi là công cụ hữu hiệu trong mô phỏng các bài toán thủy động lực học. Đặc biệt, với sự phát triển của công nghệ thông tin, các phần mềm tính thủy lực ra đời có khả năng mô phỏng dòng chảy có độ chính xác lớn khi có kể tới tính rối, tính nhớt của chất lỏng, kể tới sự tương tác giữa pha lỏng với pha rắn hay hiện tượng trộn khí. Gần đây, Flow 3D được coi là một công cụ hữu hiệu trong nghiên cứu các bài toán thủy lực phức tạp. Flow 3D mô phỏng dòng chảy dạng 3 chiều dựa trên mô hình toán RANs để giải hệ phương trình Navier-Stokes, bao gồm các mô hình dòng rối, trộn khí để bắt được hiện tượng tự trộn khí của dòng chảy qua tràn, dốc nước, bể tiêu năng. Kumcu, (2016). Demeke và nnk (2019)

sử dụng mô hình Flow 3D mô phỏng dòng chảy qua hệ thống công trình trần xả lũ, kênh dẫn hạ lưu, Salmasi và nnk (2018) lại dùng mô hình Fluent kết hợp thực nghiệm nghiên cứu dòng chảy qua các bậc nước. Đặc điểm thủy lực của dòng chảy trên bậc như: mực nước, vận tốc, vị trí điểm phân tách phần không trộn khí trộn khí, (interception point) được phân tích kỹ trong F.A Bombardelli et al, (2011), K. Morovati et al (2017), Z. Dong et al, (2019). Tuy nhiên, theo hiểu biết của các tác giả những phân tích chi tiết về đặc điểm thủy lực của dòng phun từ trần xả lũ tương tác với dòng chảy trong kênh dẫn hạ lưu chưa được phân tích kỹ. Đặc biệt, việc lựa chọn góc hắt mũi phun và kích thước hồ xói của hầu hết các công trình thủy lợi ở Việt Nam chủ yếu được xác định bằng thực nghiệm hay các công thức kinh nghiệm mà chưa có tính toán nào bằng mô hình toán ba chiều xác định các đặc điểm thủy lực của phần dòng chảy sau tràn. Vì vậy trong bài báo này, các tác giả sử dụng mô hình dòng rối kết hợp trộn khí để mô phỏng dòng chảy qua cụm công trình trần xả lũ, hồ xói, kênh hạ lưu Tà Rục - Khánh Hòa. Những phân tích chi tiết các đặc điểm thủy lực của dòng phun tương tác với dòng chảy sau tràn như vận tốc, áp suất, tính ổn định dòng chảy thông qua tỷ lệ trộn khí được chỉ ra nhằm lựa chọn góc phun hợp lý nhất của tràn này.

¹ Bộ môn Thủy lực - Trường Đại học Thủy lợi

² Sinh viên lớp 59C1 - Trường Đại học Thủy lợi

³ Công ty TNHH MTV QLCT Thủy lợi Đalak

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Mô hình thủy động lực Flow 3D dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn giải hệ phương

trình bảo toàn khối lượng và động lượng Navier-Stokes 3 chiều. Với dòng chảy trộn khí, phương trình liên tục được viết như sau:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \times (\rho_m \mathbf{u}_m) - \nabla \times (\nu \nabla \rho_m) = 0 \quad (1)$$

Trong đó ρ_m và $\mathbf{u}_m$ tương ứng là khối lượng riêng trung bình và vận tốc trung bình. Số hạng thứ ba bên vế trái gọi là rối khuếch tán nó chỉ hoạt động khi dòng rối sinh ra do khối lượng riêng

không là hằng số.

Phương trình động lượng của dòng chảy trộn khí được mô tả như sau:

$$\frac{\partial (\rho_m \mathbf{u}_m)}{\partial t} + \nabla \times (\rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) = -\nabla P + \rho_m \mathbf{g} + \nabla \times \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

với P là áp suất, $\boldsymbol{\tau}$ là tensor ứng suất Reynolds, $\mathbf{u}_m$ và $\mathbf{g}$ là véc tơ lưu tốc và véc tơ gia tốc trọng trường.

Các bọt khí đi vào bề mặt của dòng chảy khi dòng chảy có sự xáo trộn mãnh liệt do lực gây ra

dao động của dòng chảy cho rối, xoáy (biểu thị bằng lực F_t) lớn hơn lực cân bằng F_d sinh ra do trọng lực và sức căng bề mặt. Vì vậy, thể tích khí đi vào dòng chảy δV có thể được xác định bằng các phương trình toán học sau:

$$\delta V = \begin{cases} k_{air} A_s \left[\frac{2(F_t - F_d)}{\rho_w} \right]^{1/2} & \text{nếu } F_t > F_d \\ 0 & \text{nếu } F_t < F_d \end{cases} \quad (3)$$

trong đó:

$$F_t = \rho_w k; \quad F_d = \rho_w g_n L_T + \frac{\sigma_{sur}}{L_T} \quad (4)$$

Với L_T là chiều dài dòng rối; ρ_w là khối lượng riêng của nước; g_n là thành phần gia tốc trọng trường vuông góc với bề mặt dòng chảy; σ_{sur} là hệ số sức căng bề mặt.

Trong nhiều mô hình dòng rối của Flow 3D như mô hình một phương trình k, hai phương trình k-ε

hay Renormalization Group (RNG) thì mô hình RNG được coi là hữu hiệu hơn cả khi mô phỏng đặc tính của dòng chảy qua các công trình thủy lợi như đập tràn, dốc nước (Kumcu, 2016). Vì vậy, trong bài báo này mô hình dòng rối RNG được sử dụng.

2. TRÀN XẢ LŨ TÀ RỤC – KHÁNH HÒA

Bảng 1. Thông số của tràn xả lũ, hồ xói, kênh hạ lưu Tà Rục - Khánh Hòa

Hạng mục công trình	Thông số
Cao trình ngưỡng tràn	+48.5 m
Bề rộng tràn nước (n×b)	3×8m
Chiều dài, chiều rộng dốc nước mặt cắt hình chữ nhật	100m; 28m
Hệ số nhám n; độ dốc dốc nước	0.017; 12%
Cao trình mũi phun góc hắt 20°	+35.5m
Cao trình đáy hồ xói	+13.8m
Kích thước hồ xói mặt cắt hình thang	20m×32.3m(35.6m)
Cao trình đáy kênh hạ lưu, bề rộng kênh	+22.0m; 54m

Tràn xả lũ của hồ chứa Tà Rục thuộc tỉnh Khánh Hòa. Hồ chứa nước Tà Rục được xây dựng sẽ đáp ứng nhu cầu cấp nước sinh hoạt cho nhân dân và nhu cầu sử dụng nước của các ngành kinh tế trong khu vực, thúc đẩy phát triển kinh tế xã hội, góp phần xóa đói giảm nghèo, phát triển vành đai kinh tế Vân Phong và khu du lịch Nha Trang - Cam Ranh. Các thông số của cụm công trình này được mô tả trong Bảng 1.

Mô hình thí nghiệm vật lý tràn xả lũ Tà Rục, tỉnh Khánh Hòa được xây dựng tại Phòng thí nghiệm Thủy lực tổng hợp, Trường Đại học Thủy lợi, (Hình 1). Dòng chảy qua tràn chủ yếu phụ thuộc vào gia tốc trọng trường nên mô hình được xây dựng theo tiêu chuẩn Froude. Các giá trị thực đo trên mô hình được nhân với tỷ lệ mô hình để ra các kích thước trên nguyên hình, sau đó so sánh với các kết quả tương ứng trong mô

hình toán, (Báo cáo kết quả thí nghiệm thủy lực tràn xả lũ Tà Rục, 2009). Hai trường hợp thí nghiệm được lấy để so sánh với kết quả của Flow 3D mô tả trong Bảng 2.

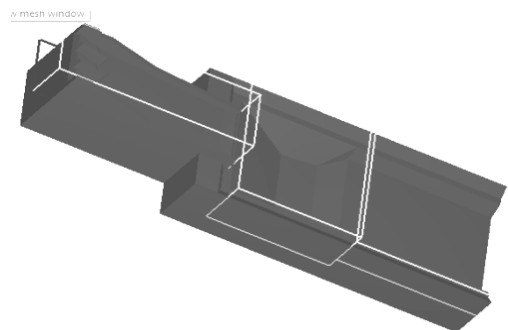


Hình 1. Mô hình thí nghiệm tràn Tà Rục

Bảng 2. Các trường hợp tính toán trong mô hình vật lý và mô hình toán

Trường hợp	Lưu lượng Q (m ³ /s)	Tần suất P(%)	Cao trình mực nước thượng lưu Z _{TL} (m)	Cao trình mực nước hạ lưu, Z _{HL} (m)
1	996	0.2	55.96	26.04
2	779	1.0	55.04	25.76

Mô hình Flow-3D version 11 được sử dụng để mô phỏng dòng chảy qua tràn Tà Rục ở nguyên hình. Dùng AutoCAD-3D mô phỏng công trình, sau đó xuất ra file dạng stl rồi đưa vào Flow 3D (Hình 2). Các block của tràn xả lũ Tà Rục được chia như sau: Block 1 gồm tràn và dốc nước được chia thành các lưới có kích thước 0.5m×0.5m×0.5m; Block 2 là hồ xói được chia thành các lưới có kích thước 0.75m×0.75m×0.75m; Block 3 là kênh dẫn hạ lưu được chia thành các lưới có kích thước 1m×1m×1m. Biên của bài toán theo các phương: X: Biên trên block 1 là Specified pressure với Fluid elevation là mực nước thượng lưu Z_{TL} biên dưới block 1 là Outflow; Y: Wall; Z: Biên dưới là Wall, biên trên là Specified pressure với Fluid fraction lấy bằng 0. Điều kiện ban đầu của bài toán được thiết lập căn cứ vào Bảng 2.

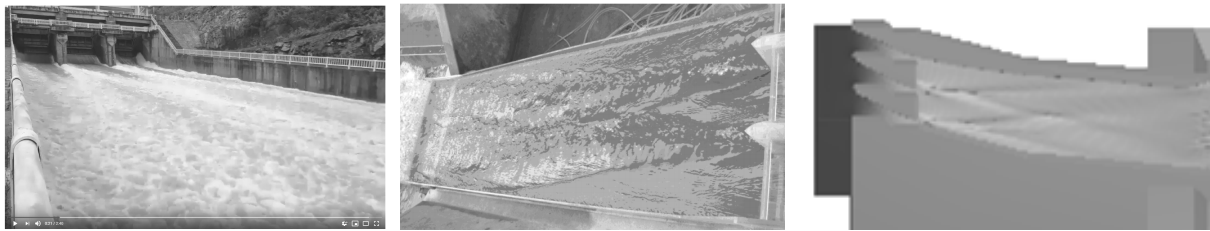


Hình 2. Mô hình cụm công trình Tà Rục trong Flow 3D

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1 So sánh với số liệu thực đo

Các đặc trưng thủy lực của dòng chảy qua tràn xả lũ Tà Rục đã được nghiên cứu trong bài báo của Nguyễn Văn Tài và nnk, (2017) bằng mô hình toán hai chiều dựa trên phương trình nước nông. Ảnh hưởng của trụ pin hình thành sóng xiên trên dốc cũng được nhìn thấy trong kết quả tính bằng Flow 3D, (hình 3) rất phù hợp với kết quả thí nghiệm lần thực tế.



Hình 3. Hình ảnh 3D dòng chảy qua tràn xuống hố xói và kênh dẫn hạ lưu (từ trái qua: Hình ảnh thực tế, thí nghiệm và mô hình toán)

Ngoài ra, để kiểm tra độ tin cậy của mô hình Flow 3D trong mô phỏng dòng chảy qua tràn, các số liệu cao độ mực nước tính toán tại 10 điểm đo tại tim tràn được so sánh với số liệu thực nghiệm như ở Bảng 3. Ở đây, hệ số Nash được dùng để đánh giá kết quả tính theo mô hình toán so với mô hình vật lý. Công thức tính hệ số Nash được xác định theo phương trình (5):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{tt} - X_{td_i})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{td_i} - \bar{X}_{td})^2} \quad (5)$$

trong đó X_{tt} và X_{td} tương ứng là mực nước, lưu tốc tính toán và thực đo tại các vị trí nghiên cứu; i là chỉ số giá trị tính toán và thực

đo tại điểm thứ i ; N là số giá trị trong chuỗi nghiên cứu.

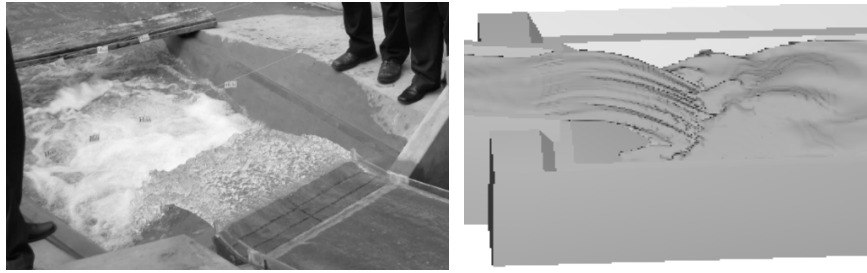
Nhìn chung, các sai số giữa mô hình toán và mô hình vật lý khoảng 1-5%. Những sai khác này phần nhiều là do ảnh hưởng của kích thước lưới tính toán. Kích thước lưới có cấu trúc là 0.5m trên tràn nên điểm lấy kết quả theo phương pháp số chỉ gần sát với số liệu thực đo. Hệ số Nash của mực nước, vận tốc trong trường hợp không trộn khí lần lượt là 0.95806 và 0.9341; trong trường hợp có kẻ trộn khí, hai hệ số này lần lượt là 0.95836 và 0.93275. Vì vậy, không có sự khác biệt nhiều giữa kết quả tính theo mô hình có trộn khí và không trộn khí trên tràn và dốc nước.

Bảng 3. Cao độ mực nước, vận tốc tính toán và thực đo khi $Q=996\text{m}^3/\text{s}$

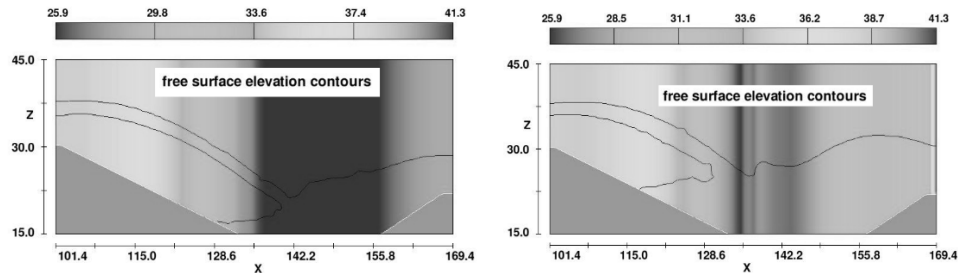
Điểm đo	Tọa độ x(m)	Cao độ đáy z(m)	$Z_{\text{thực đo}}$ (m)	zMH (m)	zMH(m)	$V_{\text{thực đo}}$ (m/s)	VMH(m/s)	VMH (m/s)
				Có khí	Không khí		Có khí	Không khí
V2	3.87	48.50	52.64	54.004	54.003	8.21	8.414	8.428
V3	7.06	47.00	50.92	52.502	52.502	8.99	9.694	9.690
V4	8.82	46.04	49.52	51.502	51.503	9.60	10.051	10.038
V5	10.27	45.40	48.68	50.256	50.253	10.20	10.552	10.539
V6	13.55	44.24	46.96	48.502	48.500	11.18	11.743	11.740
V7	30.73	40.76	43.76	43.000	43.001	14.01	15.540	15.565
V8	47.54	38.76	40.80	41.342	41.342	15.69	16.389	16.415
V9	76.95	35.72	37.56	37.900	37.831	16.52	18.180	18.210
V10	89.94	34.36	36.04	36.390	36.390	17.33	18.500	18.510
V11	98.29	35.52	37.24	37.582	37.505	18.00	18.418	18.363

4.2 Lựa chọn góc hắt mũi phun hợp lý bằng mô hình dòng rối kết hợp trộn khí

Để thiết kế được hố xói cần tính toán với nhiều cấp lưu lượng khác nhau để vẽ đường bao hố xói.



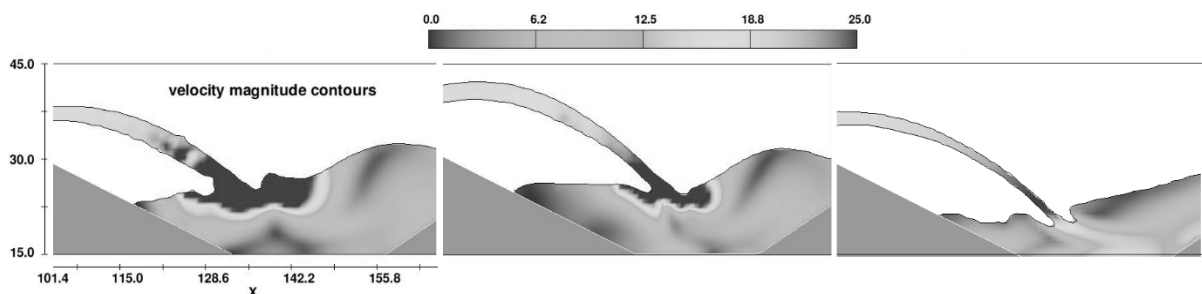
Hình 5. Hình ảnh 3D dòng phun từ mũi phun vào hố xói thực nghiệm và mô hình toán khi góc hắt bằng 20°



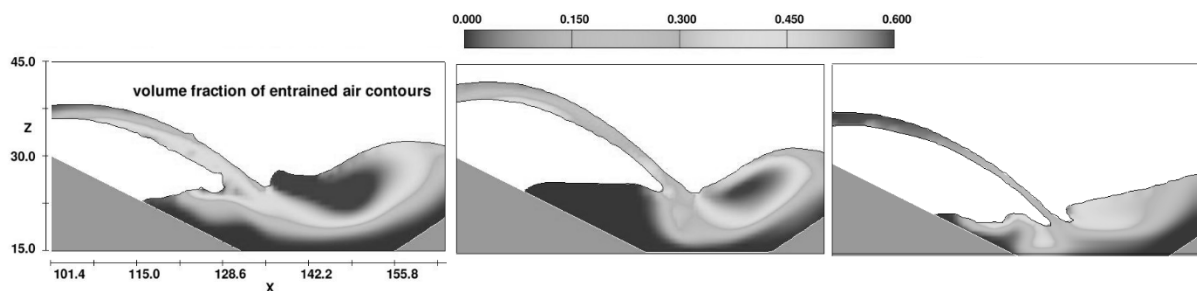
Hình 6. Nước nhảy trong hố xói, góc hắt 20° không xét trộn khí và có xét trộn khí

Mặt khác, thực nghiệm chỉ ra rằng với lưu lượng qua hệ thống $Q = 996 \text{ m}^3/\text{s}$, cao trình mặt thoát của nước trong hố xói dao động quanh giá trị 27.0m, (Báo cáo thí nghiệm Mô hình vật lý Thủy lực tràn xả lũ hồ chứa nước Tà Rục, tỉnh Khánh Hòa, 2009). Hình 6 cho thấy chỉ có kết quả tính từ mô hình toán có kể trộn khí mới phù hợp với thực đo như ở hình 5. Vì vậy, cần thiết phải sử dụng mô hình trộn khí trong mô phỏng dòng chảy có sự xáo trộn mạnh.

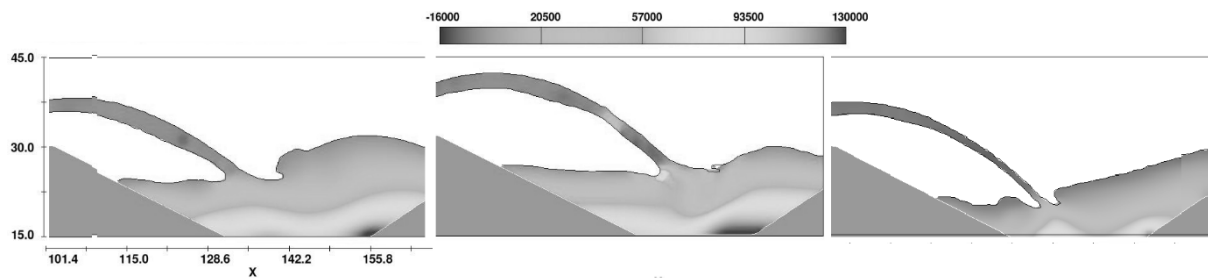
Vận tốc trong hố xói dao động trong khoảng từ 6.2 đến 12.5 m/s, trừ chỗ bề mặt tiếp xúc giữa dòng phun và mực nước hạ lưu, (hình 7). Giá trị này cũng phù hợp với kết quả thực nghiệm từ 4.8 m/s đến 12.8 m/s. Tuy nhiên, xem xét biểu đồ phân bố vận tốc trong hố xói ta thấy, lớp nước trong hố xói ứng với trường hợp 10° là thấp nhất, dẫn tới dòng tia khi chạm mặt nước hạ lưu còn đi xuyên xuống đáy nên đáy tại đáy hố xói vận tốc dòng phun lên tới 13 m/s, điều này có thể gây xói lở đáy.



Hình 7. Phân bố vận tốc trong hố xói ứng với góc hắt 20° , 30° và 10°



Hình 8. Tỷ lệ trộn khí trong hố xói ứng với góc hắt 20° , 30° và 10°



Hình 9. Phân bố áp suất trong hố xói ứng với góc hắt 20° , 30° và 10°

Mặt khác, trường hợp góc hắt 20° lại cho lớp dòng chảy sát mặt có vận tốc khá lớn và phát triển rộng, tỷ lệ thể tích trộn khí cũng lớn hơn nhiều so với góc hắt 30° , (hình 8). Điều này dẫn tới trường hợp góc hắt 20° làm cho dòng chảy mặt trong hố xói bất ổn định và gây bất lợi hơn cho bờ kênh. Phân bố áp suất trong bể khá tương đồng trong 2 trường hợp 20° và 30° , (hình 9). Vì vậy, căn cứ vào những phân tích về phân bố áp suất, vận tốc, độ xáo trộn dòng chảy và chiều dài dòng phun ở trên thì góc hắt 30° sẽ hợp lý hơn góc 20° .

5. KẾT LUẬN

Việc sử dụng mô hình toán ba chiều kết hợp các module dòng rối và trộn khí là cần thiết khi

nghiên cứu dòng chảy qua các công trình thủy lợi có sự xáo trộn lớn. Bài báo đã chỉ ra sự phù hợp của việc sử dụng mô hình toán mô phỏng dòng chảy qua tràn xả lũ Tà Rục-Khánh Hòa với các cấp lưu lượng khác nhau so với số liệu thí nghiệm về mực nước, lưu tốc. Bên cạnh đó, cũng phân tích một số công thức thực nghiệm dùng để xác định chiều dài phóng xa của dòng phun và đề nghị nên kết hợp với cả tính toán mô hình toán trong xác định đại lượng này. Ngoài ra, những phân tích chi tiết về biểu đồ phân bố lưu tốc, áp suất, tỷ lệ trộn khí trong hố xói giúp chúng ta có sự lựa chọn chính xác góc hắt của mũi phun theo quan điểm thủy lực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Nguyễn Cảnh Cầm, Nguyễn Văn Cung, Lưu Công Đào, Nguyễn Như Khuê, Võ Xuân Minh, Hoàng Văn Quý, Vũ Văn Tảo, (2006). *Thủy lực (Tập II)*. NXB Nông nghiệp.
- Nguyễn Văn Tài, Lê Thị Thu Hiền, (2017). *Nghiên cứu dòng chảy trên dốc nước sau tràn có trụ pin bằng mô hình toán kết hợp thực nghiệm*. Tạp chí Khoa học và công nghệ Thủy lợi, ISSN-1859-4255, 40, 126-135.
- Phạm Ngọc Quý (2006), *Giáo trình nối tiếp và tiêu năng hạ lưu công trình tháo nước*. NXB Xây dựng.
- 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*.
- F. A. Bombardelli, I. Meireles, J. Matos, (2011). *Laboratory measurements and multi block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways*. Environ Fluid Mech, 11, 263-288.
- G. K. Demeke, D. H. Asfaw, Y. S. Shiferaw (2019). *3D Hydrodynamic Modelling Enhances the Design of Tendaho Dam Spillway, Ethiopia*. Water 2019, 11, 82; doi:10.3390/w11010082.
- Z. Dong, J. Wang, D. F. Vetsch, R. M. Boes, G. Tan, (2019). *Numerical Simulation of Air–Water Two-Phase Flow on Stepped Spillways behind X-Shaped Flaring Gate Piers under Very High Unit Discharge*. Water, 11, 1956; doi:10.3390/w110101956.
- K. Morovati, A. Eghbalzadeh, (2017). *Study of inception point, void fraction and pressure over pooled stepped spillways using Flow 3D*. International Journal of numerical methods for heat & fluid flow. 10.1108/HFF-03-2017-0112

Abstract:
**STUDYING FLOW OVER TARUC SPILLWAY BY BOTH TURBULENT AND AIR
ENTRAINMENT MODULES OF FLOW 3D**

Two turbulent flow and air entrainment modules of Flow 3D hydrodynamic model were used to simulate the flow through the hydraulic work included the spillway, the channel chute and the erosion tank of Ta Ruc - Khanh Hoa. The hydraulic characteristics of the flow such as water level, velocity are well matching with the measured data. Three alternatives of sneezing angle of channel chute's toe of 10° , 20° and 30° are also considered to find out the optimal case based on the assessment of jet flow length, velocity, pressure distribution at erosion pit. The necessity of the air entrainment model combined with turbulent one in simulating high flow velocity on complex hydraulic constructs was also confirmed.

Keywords: Flow 3D; spillway; hydraulic characteristics; air entrainment

Ngày nhận bài: 30/3/2020

Ngày chấp nhận đăng: 14/7/2020