

NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY TRÊN TRÀN XẢ LŨ CÓ MỐ NHÁM GIA CƯỜNG BẰNG MÔ HÌNH DÒNG CHẢY HAI PHA

Lê Thị Thu Hiền, Dương Hoài Đức, Đinh Hải Đăng

Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Bài báo sử dụng mô hình thủy lực 3 chiều Flow 3D trong mô phỏng dòng chảy qua tràn, bề tiêu năng của tràn xả lũ Ngàn Trươi với hai phương án mố nhám gia cường trên dốc: nhám âm và nhám dương. Mô hình thủy động lực học Flow 3D dựa trên hệ phương trình Navier-Stokes là công cụ hữu hiệu trong mô phỏng các đặc tính thủy lực phức tạp của dòng chảy qua các công trình thủy lợi. Kết quả tính toán cao trình mực nước và vận tốc ứng với 2 cấp lưu lượng khác nhau được so sánh với số liệu thực nghiệm ứng với cả hai phương án tiêu năng trên dốc. Ngoài ra bài báo cũng chỉ ra sự cần thiết phải thêm mô hình trộn khí trong việc mô phỏng dòng chảy có xáo trộn lớn trên các công trình thủy lợi và lựa chọn phương án mố nhám hợp lý bằng mô hình toán

Từ khóa: Flow-3D, tràn xả lũ, bề tiêu năng, đặc tính thủy lực, mố nhám

Summary: My research uses Flow 3D model in simulating the flow through the spillway, stirring basin of the Ngan Truoi spillway with two options of reinforced piles on slopes: negative and positive roughness. The Flow 3D hydrodynamic model based on the Navier-Stokes system is an effective tool in simulating the complex hydraulic properties of the flow through irrigation constructions. Calculation results of water level and velocity with 2 different operating conditions are compared with empirical data for both slope dissipation alternatives. In addition the paper also points out the need to add air entrainment models in the simulation of large turbulent flows on hydraulic works as well as select the optimal dissipated obstacles by using numerical model.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

An toàn đập và các công trình phụ trợ như tràn 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. 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, bề tiêu năng. Rất nhiều những nghiên cứu về dòng chảy trên các tràn có bậc có độ dốc khá lớn như [1, 2, 5, 6]. Năm 2009, S. Felder and H. Chanson đưa ra nghiên cứu sự tiêu tán năng lượng trên dốc nước có bậc có độ dốc nhỏ, [7]. Tuy nhiên, theo hiểu biết của các tác giả, đặc tính của dòng chảy trên các tràn xả lũ có mố nhám lại chưa được nghiên cứu nhiều. Ở Việt nam, loại tràn này khá phổ biến, có khoảng 50 công trình. Độ dốc của các loại tràn xả lũ này dao động trong khoảng 5% đến 15%, nối tiếp với kênh dẫn hạ lưu bằng bề tiêu năng hay mũi phun hút dòng chảy lên rồi

Ngày nhận bài: 12/7/2020

Ngày thông qua phản biện: 06/8/2020

Ngày duyệt đăng: 11/8/2020

rơi tự do xuống. Chiều dài dốc phụ thuộc vào điều kiện địa hình, từ 50m đến 240m. Lưu lượng dòng chảy qua loại công trình này cũng khá lớn nên vận tốc dòng chảy trên tràn có thể lớn hơn 20m/s ở cuối dốc. Vì vậy, để tiêu hao phần năng lượng khá lớn trên dốc nhằm giảm hư hại bề mặt hay giảm thiểu kích thước công trình tiêu năng ở phía sau cần phải có biện pháp tiêu tán năng lượng phù hợp trên dốc. Sử dụng các mô nhám trên dốc nước cho mục đích tiêu hao năng lượng dòng chảy trên dốc này đã và đang được nghiên cứu rộng rãi. Mô nhám âm và mô nhám dương bố trí trên toàn bộ dốc nước có tác dụng tiêu năng rất tốt. Tuy nhiên, chúng có thể tạo ra áp suất âm hay gia tăng khả năng xâm thực trên dốc nước khi dòng chảy có vận tốc lớn, [8]. Vì vậy, cần phải có đánh giá phân tích để chỉ ra loại mô nhám nào vừa đảm bảo khả năng tiêu hao năng lượng, vừa giảm thiểu hiện tượng này. Ngoài ra, sự xâm nhập khí trong dòng chảy xiết– nơi có sự xáo trộn lớn cũng có thể ảnh hưởng tới dòng chảy trên dốc

nước và trong bể. Vì vậy, trong nội dung bài báo này, các tác giả xác định các đặc trưng thủy lực của dòng chảy qua tràn xả lũ - bể tiêu năng Ngàn Trươi, Hà Tĩnh khi không xét và có xét đến hiện tượng trộn khí nhằm chỉ ra việc cần thiết của việc có thêm mô hình trộn khí khi tính toán dòng chảy có sự xáo trộn mạnh. Các kết quả tính theo mô hình toán được so sánh với giá trị đo đạc bằng mô hình vật lý.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán

Mô hình thương mại thủy động lực học 3 chiều Flow-3D được xây dựng bởi công ty Flow Scien INc. Trong những năm gần đây, mô hình này được sử dụng rộng rãi do khả năng xử lý được nhiều vấn đề thủy lực của dòng chảy. 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 $\mathbf{u}_m$ 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:

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

trong đó P là áp suất, $\boldsymbol{\tau}$ là tensor ứng suất Reynolds.

Mô hình trộn khí trong Flow 3D có thể bắt 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:

$$F_T = \rho_w k; \quad F_d = \rho_w g_n L_T + \frac{\sigma_{sur}}{L_T} \quad \text{với} \quad L_T = \frac{CNU^{3/4} k^{3/2}}{\varepsilon_T} \quad (3)$$

$$\delta V = \begin{cases} k_{air} A_s \left[\frac{2(F_t - F_d)}{\rho_w} \right]^{1/2} & n\hat{e}u \cdot F_t > F_d \\ 0 & n\hat{e}u \cdot F_t < F_d \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó L_T là chiều dài dòng rối; $CNU = 0.9$; k_T , ε_T tương ứng là hai thông số năng lượng rối và năng lượng tiêu tán. 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; δV là thể tích khí đi vào dòng chảy trong một đơn vị thời gian.

Flow 3D cung cấp 2 loại mô hình dòng rối nhằm mô tả tính rối của dòng chảy. Các mô hình họ RANs như: mô hình một phương trình k , hai phương trình k - ϵ , hay Renormalization Group (RNG) k - ω . Trong bài báo này các tác giả sử dụng mô hình dòng rối RNG k - ω để mô phỏng dòng chảy qua công trình thủy lợi.

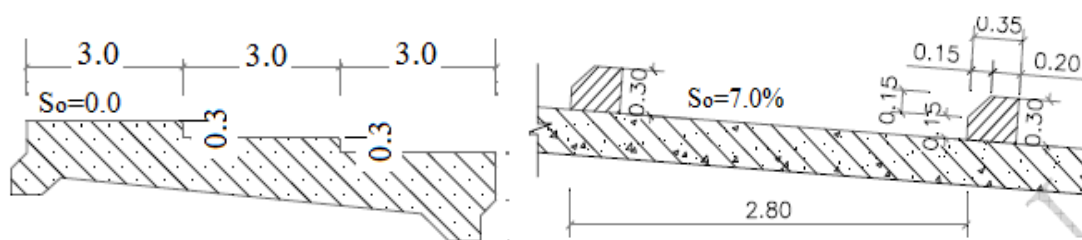
2.2. Mô hình vật lý

Dự án “Hệ thống Thủy lợi Ngàn Trươi-Cẩm
Trang, Hà Tĩnh” do Tổng Công ty Tư vấn Xây

đựng Thủy lợi Việt Nam - CTCP thiết kế, [3].
Trần có điều tiết, quy mô 7 cửa xả mặt ($n \times B \times H = 7 \times 12.0 \times 3.4\text{m}$) nối tiếp dạng dốc nước với độ dốc $S_0 = 7.0\%$, dài 140m, rộng 100.80m, trên dốc có bố trí các móng nhám gia cường. Đầu tràn dài 14.7m dạng thực dụng WES bằng bê tông cốt thép, cao độ ngưỡng xả là +48.60m. Đoạn chuyển tiếp xuống bể tiêu năng, rộng 100.80m là một đoạn bậc nước dài 23m có bố trí các bậc cao 0.75m, từ cao trình +36.4m xuống cao trình +30m. Đoạn kênh chuyển tiếp được nối từ cuối bể tiêu năng đến đầu kênh xả: dài 310m, có mặt cắt hình thang; hệ số mái $m=2.0$, kết cấu bằng bê tông cốt thép. Mô hình được xây dựng với tỷ lệ 1/50 nhằm kiểm tra các đặc tính thủy lực như mực nước, lưu tốc, áp suất trên tràn, dốc nước, bể tiêu năng và đề xuất phương án cải tạo công trình, (Hình 1). Có hai hình thức móng nhám bố trí trên toàn dốc nước được xây dựng trong mô hình vật lý. Móng nhám âm tương ứng với phương án thiết kế (PATK); Móng nhám dương tương ứng với phương án hoàn thiện (PAHT), (Hình 2, 3).



Hình 1: Mô hình vật lý của tràn xả lũ Ngân Trươi



Hình 2: Cấu tạo chi tiết của mố nhám âm và mố nhám dương

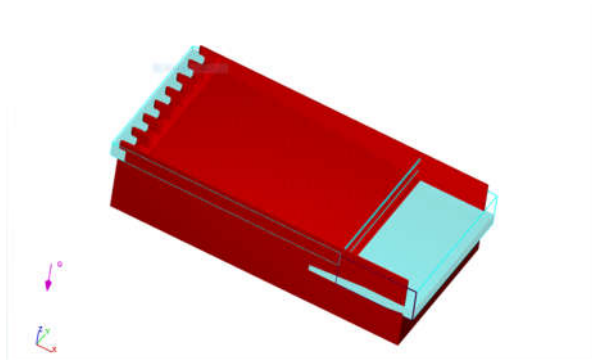
Các giá trị thực đo trên mô hình được nhân với tỷ lệ mô hình để ra các kích thước trên nguyên hình, sau đó so sánh với các kết quả tương ứng

trong mô hình toán. Hai trường hợp thí nghiệm được lấy để so sánh với kết quả của Flow 3D như trong bảng 1.

Bảng 1: Các trường hợp thí nghiệm

Trường hợp	Lưu lượng Q (m ³ /s)	Cao trình mực nước thượng lưu Z _{TL} (m)	Cao trình mực nước hạ lưu, Z _{HL} (m)
1	3319	55.86	39.54
2	1061	52.00	35.11

Mô hình Flow-3D version 11 được sử dụng để mô phỏng dòng chảy qua tràn xả lũ và bể tiêu năng ở nguyên hình. Dùng AutoCAD-3D mô phỏng công trình, sau đó xuất ra file dạng stl rồi đưa vào Flow 3D.

*Hình 3: Mô hình tràn trong Flow 3D.*

Miền tính toán được chia thành 2 block như hình 3. Block 1 gồm tràn và đoạn dốc. Block 2 là phần còn lại. Biên trên của Block 1 có dạng Specific pressure là mực nước thượng lưu, biên dưới Block 1 là symmetry, hai bên là wall. Phương z: Trên và dưới tương ứng là symmetry. Block 2 cũng có biên trên là symmetry, biên dưới là Flow out. Độ nhám bề mặt công trình là $n = 0.017$. Điều kiện ban đầu của bài toán là cao trình mực nước thượng lưu đập tràn và hạ lưu bể tiêu năng như số liệu trong bảng 1. Kết quả được tính với các kích thước lưới khác nhau: 1.0m, 0.75m, 0.5m cho toàn bộ công trình tương ứng với số ô lưới lần lượt là 463.500; 1.098.666; 3.708.000 nhằm tìm ra phương án hợp lý cả về kết quả tính toán lẫn thời gian chạy máy tính. Ngoài ra, các tác giả sử dụng lưới 0.1m tính toán cho 1m bề rộng dòng chảy với

số ô lưới lên đến 4.500.000 để mô phỏng được hiện tượng nước nhảy trong bể tiêu năng, điều này sẽ được đề cập trong nghiên cứu tiếp theo.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Ảnh hưởng của kích thước lưới

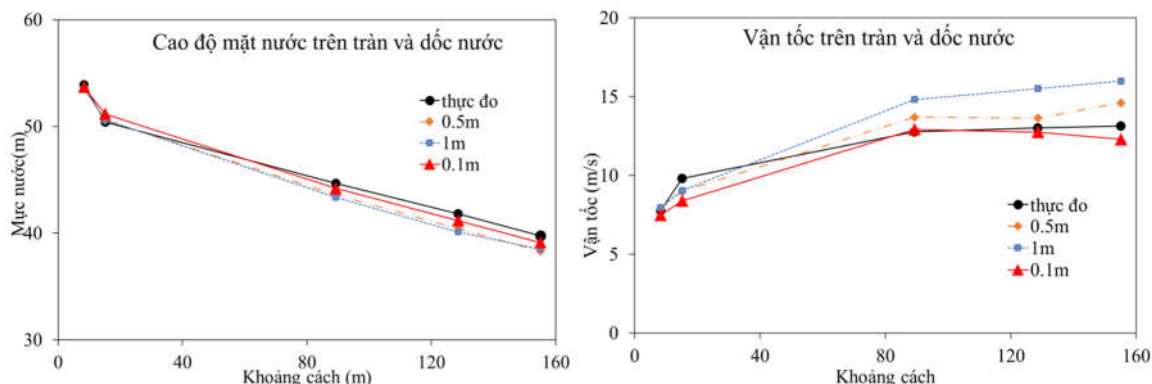
Để kiểm tra độ tin cậy của mô hình Flow 3D trong mô phỏng dòng chảy qua tràn, các số liệu cao độ mực nước tính toán tại 10 điểm đo tại tim tràn được so sánh với số liệu thực nghiệm trong cả 4 phương án tính, (Bảng 2). Ở đây, hệ số Nash được dùng để đánh giá kết quả tính theo mô hình toán so với mô hình vật lý, công thức tính hệ số này như sau:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{sim_i} - X_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{obs_i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (5)$$

trong đó X_{sim} và X_{obs} 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.

Kết quả tính toán mực nước, lưu tốc trong trường hợp $Z_{TL} = 55.86m$ ứng với 2 phương án mô nhám được chỉ ra trong Hình 4 và trong hai Bảng 2, 3. Nhìn chung, các sai số giữa kết quả mực nước tính bằng mô hình toán và mô hình vật lý khoảng 5-7%. Hệ số Nash trong 4 loại kích thước lưới rất tốt (trên 90%). Với lưới 0.1m, hệ số này gần như bằng 1.0 ở cả 3 trường hợp tính toán. Tuy nhiên, với kết quả lưu tốc, chênh lệch giữa tính toán và thực đo lớn hơn so với kết quả mực nước. Bảng 2 chỉ ra rằng, lưới thô 1.0m cho hệ số Nash tệ nhất trong cả hai phương án thí nghiệm. Lưới 0.1m cho giá trị này tốt nhất, phương án thiết kế cho kết quả tốt hơn phương án hoàn thiện vì độ ổn định của dòng chảy trên dốc tốt hơn. Kết quả này chỉ ra rằng, mô hình Flow 3D hoàn toàn phù hợp trong việc mô tả dòng chảy qua các công trình thủy lợi có chế độ thủy lực phức tạp. Lưới có kích thước 0.5m, 0.75m cho kết quả thủy lực trên

dốc nước và trên tràn khá ổn. Tuy nhiên, lưới loại lưới khác.
0.1m cho kết quả sát với thực tế nhất hơn các



Hình 4: Kết quả mực nước, lưu tốc của phương án thiết kế

Bảng 2: Hệ số Nash của mực nước

MN TL	KÍCH THƯỚC LƯỚI							
	1		0.75		0.5		0.1 có khí	
	PATK	PAHT	PATK	PAHT	PATK	PAHT	PATK	PAHT
55.86	0.955	0.93	0.96	0.93	0.96	0.93	0.98	0.98
52			0.966	0.96		0.96	0.986	0.99

Bảng 3: Hệ số Nash của lưu tốc

MN TL	KÍCH THƯỚC LƯỚI							
	1		0.75		0.5		0.1 có khí	
	PATK	PAHT	PATK	PAHT	PATK	PAHT	PATK	PAHT
55.86	0.172	0.22	0.79	0.68	0.82	0.71	0.85	0.79
52			0.75	0.65		0.66	0.81	0.71

3.2. Ảnh hưởng của mô hình trộn khí tới kết quả tính toán

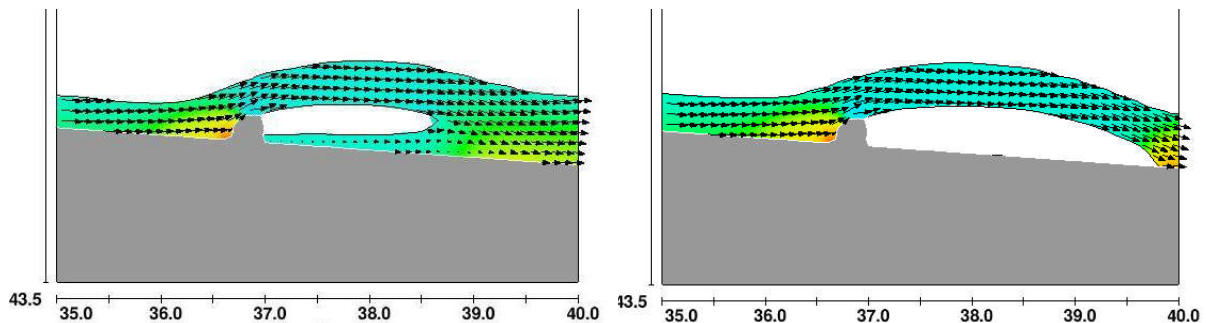
Việc mô phỏng dòng chảy trên dốc nước cần phải kể tới hiện tượng trộn khí khi độ sâu dòng chảy trên dốc nước nhỏ. Do ảnh hưởng của các mố nhám mà làm cho dòng chảy trong trường hợp này bị xáo trộn mạnh mẽ, khí xâm nhập vào dòng chảy ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính thủy lực của dòng chảy. Khi lưu lượng nhỏ, dòng chảy trên dốc không còn là chảy tràn (skimming flow) mà có thể có dòng chảy thứ cấp (napped flow). Ví dụ việc xuất hiện dòng chảy thứ cấp phía sau mố nhám khi dòng chảy là napped flow chỉ có thể được mô phỏng khi có kể đến mô hình trộn khí, nước bị quẩn lại phía mố nhám.

Nếu không kể tới sẽ tạo thành dòng phun phóng xa không phù hợp thực tế như hình 5. Ngoài ra độ chính xác của mực nước, lưu tốc tính bằng mô hình Flow 3D có kể tới trộn khí tại các điểm đo so với thí nghiệm cũng lớn hơn so với trường hợp không tính, (hình 6).

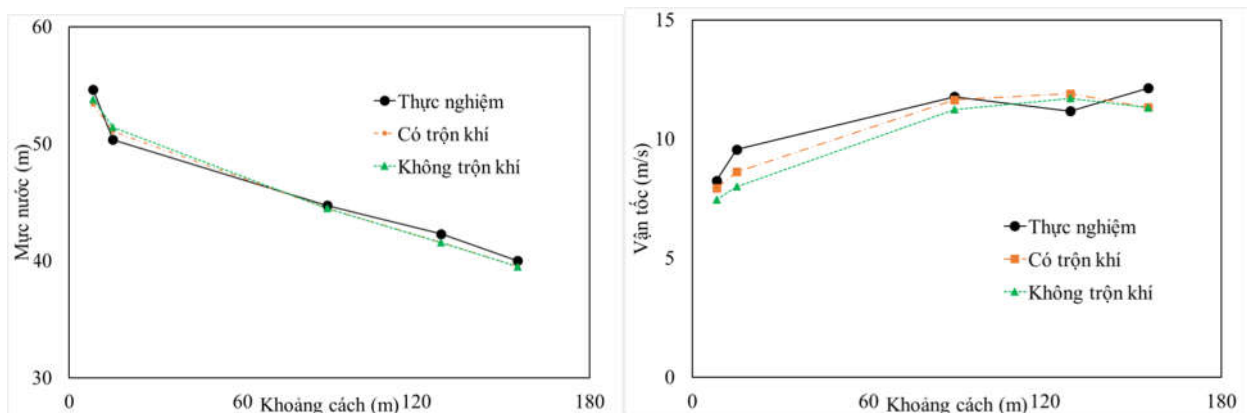
Kết quả tính toán mực nước và vận tốc tại các điểm nghiên cứu với lưới 0.1m trong trường hợp làm việc thứ nhất $Z_{TL} = 55.86m$ trên hình 6 cho thấy: Không có sự khác biệt nhiều về mực nước tính toán bằng mô hình Flow 3D không kể và có kể tới module trộn khí, trừ điểm đo thứ hai phía sau tràn (hạ lưu trụ pin) – nơi dòng chảy bị xáo trộn mạnh do ảnh hưởng của sóng xiên sau trụ pin. Tuy nhiên với vận tốc, kết quả

tính có cả mô hình trộn khí tốt hơn nhiều so với trường hợp còn lại ở hầu hết các điểm đo. Tại vị trí thứ ba, cách đầu dốc 74m, vận tốc khi có

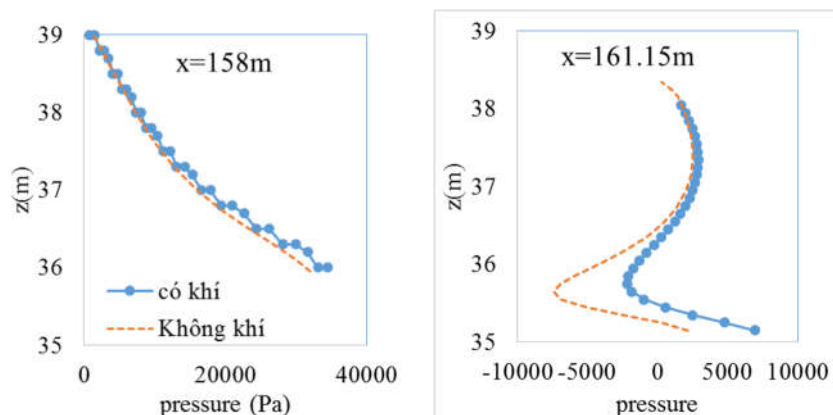
kể trộn khí gần sát với thực nghiệm (11.64 m/s so với 11.77 m/s – sai số 0.83%), trong khi giá trị vận tốc khi không kể trộn khí sai số tới 4.5%.



Hình 5: Ảnh hưởng của mô hình trộn khí tới dòng chảy qua bậc. Trái (có kể trộn khí); Phải (không kể trộn khí)



Hình 6: Mức nước và vận tốc thực đo khi không có và có mô hình trộn khí – $Z_{TL} = 55.86m$



Hình 7: Phân bố áp suất theo phương đứng tại bậc chuyển tiếp thứ nhất, $Z_{TL} = 52m$ - PAHT

Xem xét đại lượng áp suất, thí nghiệm chỉ ra với phương án thiết kế, trên đoạn chuyển tiếp từ dốc nước xuống bể tiêu năng tại bậc nước thứ 3, thứ 4 có xuất hiện áp suất âm cục bộ trên thành

đứng của bậc nhưng giá trị nhỏ $-3924Pa \div -2648Pa$. PAHT có áp suất âm bằng $-590Pa$. Mặt khác, có sự khác biệt tương đối về kết quả tính toán phân bố áp suất theo phương đứng tại điểm

nằm tại mép bậc đầu tiên của bậc nước trong PAHT khi có kể tới trộn khí và không kể tới trộn khí, (Hình 7). Kết quả tính áp suất theo mô hình Flow 3D khi có kể tới trộn khí được chỉ ra trong bảng 4 cho thấy: Mặc dù PAHT vẫn cho

kết quả áp suất âm trên bậc chuyển tiếp nhưng tại 2 điểm nằm trên bậc đầu tiên của phần bậc nước giá trị khá nhỏ so với PATK. Điều này là phù hợp với kết luận của thí nghiệm.

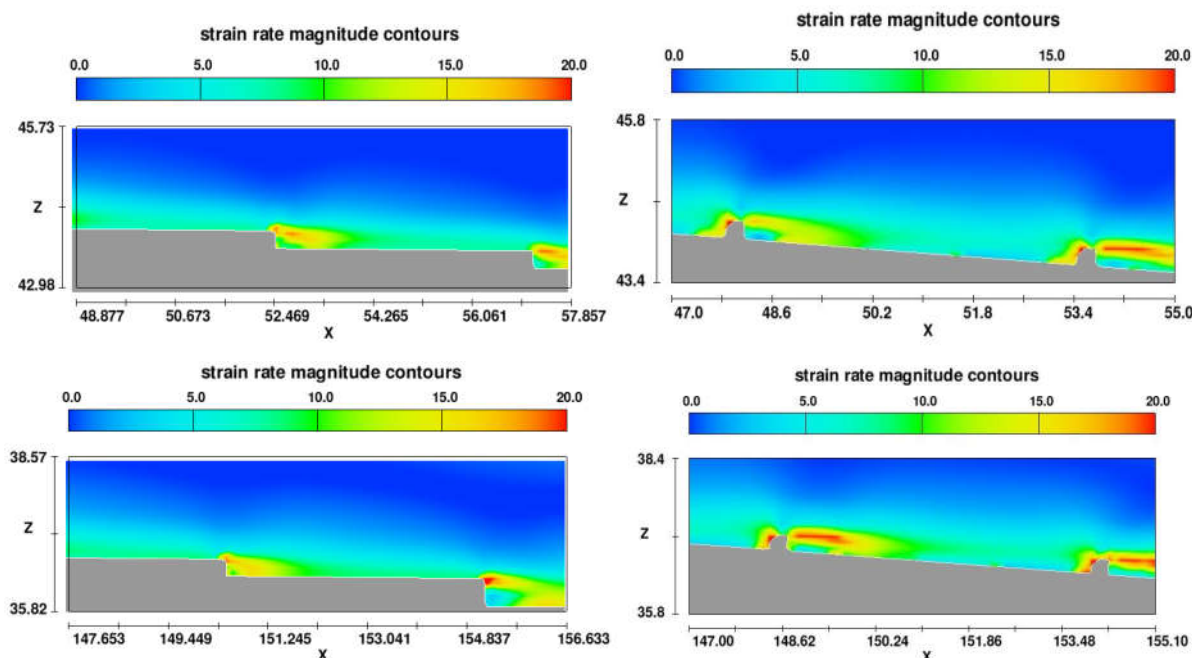
Bảng 4: Áp suất chân không lớn nhất trên bậc tính theo mô hình toán

Trường hợp	Z_{TL} (m)	Áp suất chân không lớn nhất – PATK (Pa)	Áp suất chân không lớn nhất – PAHT (Pa)
1	55.86	23561.5	9027.2
2	52.00	4549.5 (bậc 2); 6242.8 (bậc 3)	894.9 (bậc 2); 981.2 (bậc 3)

3.3 Đánh giá khả năng tiêu hao năng lượng của hai phương án mố nhám

Việc bố trí mô nhám rải đều từ đầu đến cuối dốc làm tiêu hao năng lượng của dòng chảy trên dốc khá lớn. Lớp ứng suất kéo (shear strain rate magnitude) phát triển gần sát đáy là yếu tố quan

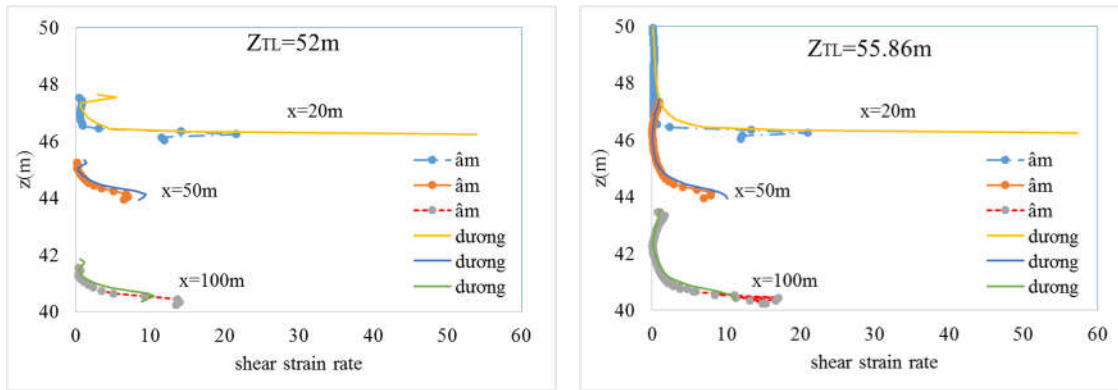
trọng ảnh hưởng tới việc thay đổi hay tiêu tán năng lượng. Điều đó cũng ảnh hưởng tới việc khởi phát hiện tượng chân không trên dốc. Vì trong những vùng có ứng suất kéo lớn sẽ sinh ra các xoáy và dòng chảy thứ cấp sau các mố nhám. Áp suất tại tâm của xoáy giảm có thể sinh ra áp suất âm tại mố.



Hình 8: Phân bố ứng suất kéo của hai phương án mố nhám âm và dương của Trường hợp 1: $Z_{TL} = 55.86m$, $Q = 3319 m^3/s$

Hình 8, 9 cho thấy phương án mố nhám dương làm cho lớp ứng suất kéo phát triển mạnh hơn trong khoảng 0.4m-0.8m lớp dòng chảy sát thành. Điều đó có nghĩa mức độ rối của dòng

chảy trên dốc trường hợp này lớn hơn trường hợp mố nhám âm, nghĩa là phần năng lượng tiêu tán nhiều hơn.



Hình 9: Phân bố đại lượng ứng suất kéo theo phương đứng mố nhám âm và dương tại 3 vị trí $z = 20m$; $x=50m$ và $100m$ trường hợp $Z_{TL} = 55.86m$.

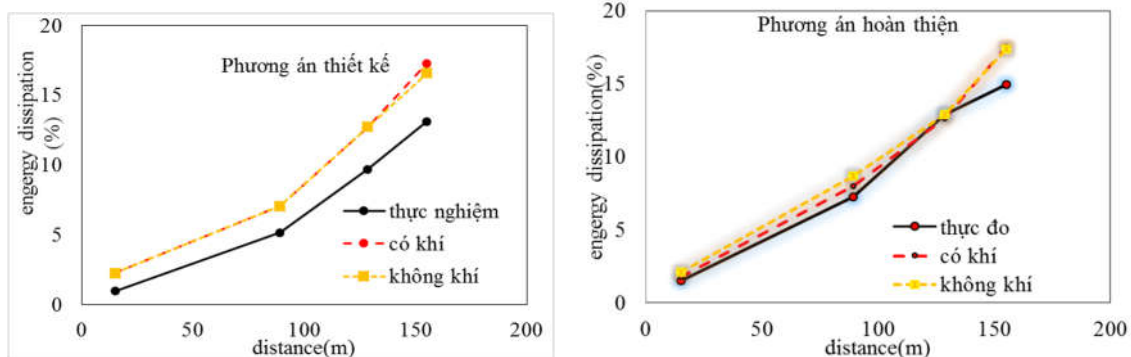
Điều này cũng được chứng tỏ bằng kết luận trong mô hình vật lý và mô hình toán dựa vào công thức (6) tính tổn thất năng lượng dòng chảy trên dốc nước:

$$h_L = \left(Z_d + \frac{V_d^2}{2g} \right) - \left(Z_c + \frac{V_c^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Với: Z_d , Z_c : Cao độ mặt nước tại mặt cắt đầu và cuối dốc; V_d , V_c : Vận tốc dòng chảy tại mặt cắt đầu và cuối dốc.

Ứng với trường hợp làm việc nguy hiểm nhất, $Z_{TL} = 55.86 m$ ($P = 0.1\%$), lưu lượng dòng chảy trên tràn đạt tới $3319 m^3/s$, xác định tổn thất năng lượng trên tràn và dốc nước theo cả

hai phương án mố nhám theo Hình 10. Kết quả thực nghiệm cho thấy tổn thất năng lượng cuối dốc của phương án thiết kế là 13.12% ít hơn so với Phương án hoàn thiện 14.94% . Kết quả tính theo có khí và không khí trong cả 2 trường hợp mố nhám âm và dương khá sát nhau. Tuy vậy, so sánh phần trăm tổn thất năng lượng tính theo mô hình toán thì tỷ lệ tiêu hao năng lượng theo 2 phương án này lần lượt là 17.23% và 17.55% . Ngoài ra, vận tốc trung bình dòng chảy của trường hợp mố nhám âm cao hơn mố nhám dương. Điều đó cho thấy, phương án mố nhám dương làm tiêu hao năng lượng trên dốc tốt hơn mố nhám âm, [9].



Hình 10: Tiêu hao năng lượng dọc theo dòng chảy của 2 phương án mố nhám

4. KẾT LUẬN

Việc sử dụng mô hình toán cả dòng rối và trộn khí để đánh giá ảnh hưởng của hai loại mố nhám

gia cường trên dốc nước là cần thiết. Những đặc tính thủy lực của dòng chảy trên dốc được xem xét, so sánh với số liệu của thí nghiệm như: mực

nước, vận tốc, áp suất chứng tỏ rằng việc đưa cả mô hình trộn khí vào mô phỏng dòng chảy có xáo trộn lớn cho kết quả tốt nhất, gần với thực đo nhất. Phân tích tổn thất năng lượng

dòng chảy trên dốc bằng thực nghiệm và mô hình toán cho kết quả mô phỏng có khả năng tiêu hao năng lượng tốt hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Bayon, J. P. Toro, F.A. Bombardelli, J. Matos, P.A López Jimenez, (2018). *Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non areated, skimming flow in stepped spillways*. Journal of Hydro-environment Research 10, 137-149.
- [2] F. A. Bombardelli, I. Meireles, J. Matos, (2011). *Laboratory measurements and multi block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-areated skimming flow region of steep stepped spillways*. Environ Fluid Mech, 11, 263-288.
- [3] Phòng thí nghiệm Quốc gia về động lực sông biển. *Báo cáo thí nghiệm Thủy lực tràn xả lũ Ngàn Trươi-Hà Tĩnh*
- [4] Getnet Kebede Demeke, Dereje Hailu Asfaw and Yilma Seleshi Shiferaw (2019). *3D Hydrodynamic Modelling Enhances the Design of Tendaho Dam Spillway, Ethiopia*. Water 2019, 11, 82; doi:10.3390/w11010082.
- [5] Kermani. E. F. and Barani. G. A (2014). *Numerical simulation of flow over spillway based on CFD method*. Scientia Iranica A. 21(1). 91-97.
- [6] Serfe Yurdagul Kumcu (2016). *Investigation of flow over spillway modeling and comparison between experimental data and CFD analysis*. KSCE Journal of Civil Engineering. 21(3). 994-1003.
- [7] S. Felder; Hubert Chanson (2009). *Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways*. Environ Fluid Mech, 9, 427-441.
- [8] Z. Dong, J. Wang, D.F. Vetsch, R. M. Boes, G. Tan, (2019). *Numerical simulation of air water two phase flow on stepped spillway behind X shaped flaring gate piers under very high unit discharge*. Water, 11, 1956, doi:10.3390/w110101956.
- [9] Lê Văn Nghi, Đoàn Thị Minh Yến, (2013). *Hiệu quả tiêu hao năng lượng dọc đường của giải pháp nhám gia cường trên dốc nước*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi, 16.