

NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG DÒNG CHẢY QUA ĐẬP TRÀN MẶT CẮT CHỮ NHẬT, ĐỈNH NGẮN BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS OVER SHORT-CRESTED RECTANGULAR SPILLWAY USING THE CFD METHOD

TRỊNH CÔNG TÝ

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

Email liên hệ: tytc@huce.edu.vn

Tóm tắt

Đập tràn mặt cắt chữ nhật được ứng dụng rộng rãi cho công trình thoát lũ có cột nước vừa và thấp trong lĩnh vực công trình thủy. Trong đó, mặt cắt đập tràn đỉnh rộng nhận được sự quan tâm nhiều hơn trong nghiên cứu và ứng dụng thực tế so với dạng mặt cắt đập tràn thành mỏng và thực dụng (đỉnh ngắn). Mặt khác, các nghiên cứu, dữ liệu công bố trên cơ sở lý thuyết và thực nghiệm hiện có đối với các đặc trưng dòng chảy và hệ số lưu lượng (m) cho loại đập tràn mặt cắt chữ nhật đỉnh ngắn vẫn còn hạn chế và chưa hoàn thiện. Để giải quyết vấn đề này, cần có thêm nhiều nghiên cứu bổ sung để hoàn thiện cơ sở dữ liệu. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng mô hình tính toán động lực học chất lỏng (CFD) để mô phỏng dòng chảy qua đập tràn. Các kết quả mô hình số cho thấy rõ sự thay đổi trong trường dòng và phân bố ứng suất kéo của dòng chảy, minh chứng ảnh hưởng của chiều cao đập tràn đến đặc trưng dòng chảy. Ngoài ra, bài báo đã xây dựng các đồ thị quan hệ giữa tỷ lệ chiều cao đập tràn và tỷ lệ cột nước tràn với hệ số lưu lượng. Đồng thời, một công thức dự đoán cho hệ số lưu lượng dựa trên tỷ lệ cột nước tràn cũng được thiết lập, với hệ số tương quan cao.

Từ khóa: Mô phỏng số, đập tràn mặt cắt chữ nhật, khả năng tháo, trường dòng chảy.

Abstract

Rectangular cross-section spillways are commonly employed in flood discharge systems for medium and low water heads in hydraulic engineering. Among these, wide-crest spillways have received more attention in research and practical application compared to thin-walled, short-crest spillways. However, existing theoretical and experimental studies on flow characteristics and the discharge coefficient (m) for short-crest rectangular spillways remain

limited and incomplete. To solve this problem, more supplement research was needed to complete databases. Therefore, this study utilizes a computational fluid dynamics (CFD) model to simulate flow over the spillway. The numerical model results clearly show variations in the flow field and shear strain rate magnitude distribution, demonstrating weir height's influence on flow characteristics. Additionally, the article constructed graphical relationships between weir height ratios and spillway head ratios with a discharge coefficient. Simultaneously, a predictive formula for the discharge coefficient based on spillway head ratio is also established, with a high correlation coefficient.

Keywords: Numerical simulation, rectangular cross-section spillway, discharge capacity, flow field.

1. Đặt vấn đề

Đập tràn giúp hồ chứa thủy lợi-thủy điện vận hành an toàn trước điều kiện dòng chảy lũ về công trình. Do đó, nó có vị trí rất quan trọng đối với hệ thống công trình cụm đầu mối như đập dâng, cửa lấy nước,... và đảm bảo an toàn cho vùng hạ du công trình.

Theo tiêu chuẩn về quy trình tính toán thủy lực đập tràn [1], Đập tràn được phân loại rất đa dạng: Theo hình dạng cửa vào có đập tràn cửa vào hình chữ nhật, tam giác, hình thang,...; theo hình dạng và kích thước mặt cắt ngang đập có tràn thành mỏng, đỉnh rộng và mặt cắt thực dụng như dạng mặt cắt đa giác (hình chữ nhật, hình thang, tam giác), Creager-Ophicerop hay WES của Mỹ với điều kiện làm việc có hoặc không có chân không; theo cách bố trí trên mặt bằng công trình đầu mối có tràn thẳng góc, xiên, cong hay zíc zắc,...; theo chế độ chảy có tràn chảy tự do, chảy ngập và có hoặc không có co hẹp bên. Với sự đa dạng đó, nên đập tràn nhận được rất nhiều sự quan tâm và nghiên cứu với các công trình nghiên cứu từ cơ bản đến chuyên sâu, chẳng hạn các loại mặt cắt tràn

Creager-Ophicerop hay WES thường áp dụng cho công trình tháo lũ có cột nước lớn, được nghiên cứu rất chi tiết trong các tài liệu chuyên ngành thủy lợi-thủy điện. Các cách tiếp cận nghiên cứu đối với dòng chảy qua tràn được thực hiện cả trên lý thuyết lẫn thực nghiệm và đã được trình bày chi tiết trong các tài liệu chuyên ngành [1-3].

Hiện tại, các nghiên cứu về đập tràn mặt cát chữ nhật thành mỏng và đỉnh rộng chảy tự do là khá đầy đủ về đặc trưng dòng chảy qua tràn như: Đường mặt nước, chế độ nối tiếp dòng chảy với hạ lưu hay hệ số lưu lượng qua tràn [1, 2, 4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về đập tràn có mặt cát chữ nhật với đỉnh ngắn (tỷ lệ cột nước trên đỉnh tràn so với chiều dày đỉnh đập trong phạm vi 0,5÷2,0) vẫn chưa nhận được sự quan tâm và nghiên cứu đầy đủ. Điều này được thể hiện rõ qua sự thiếu hụt thông tin trong các tài liệu chuyên ngành về loại đập tràn này [1, 2]. Các tài liệu này chủ yếu đề cập đến hệ số lưu lượng qua đập tràn phụ thuộc vào tỷ lệ cột nước trên tràn so với chiều dày đỉnh đập mà chưa làm rõ ảnh hưởng của chiều cao đập đến đặc trưng dòng chảy qua tràn và khả năng tháo. Gần đây, Y. Chen và nnk [5] đã công bố nghiên cứu dựa trên kết quả thực nghiệm và mô hình số về khả năng tháo của đập tràn chữ nhật đỉnh ngắn khá phù hợp với nhau và có sai số rất nhỏ, nhưng giá trị của hệ số lưu lượng m theo nghiên cứu này lại lớn hơn so với các giá trị m được tính toán theo tiêu chuẩn tính toán thủy lực đập tràn hay số tay tính toán thủy lực [1, 2] khoảng 3% đến 10% tùy thuộc vào giá trị tỷ lệ cột nước trên đập tràn và chiều cao đập. Mặt khác, trong nghiên cứu của Y. Chen và nnk [5], một số đặc trưng khác của dòng chảy như: Trường dòng, đặc tính rối,... chưa được trình bày.

Từ những hạn chế, tồn tại được phân tích và đánh giá ở trên đối với dòng chảy qua đập tràn mặt cát chữ nhật với đỉnh ngắn. Nghiên cứu này sử dụng mô hình toán, đây là phương pháp tiếp cận có nhiều ưu điểm, rất phù hợp với bài toán dòng chảy hở qua đập tràn [6] để mô phỏng dòng chảy qua đập tràn thực dụng mặt cát chữ nhật, đỉnh ngắn. Từ đó, đánh giá sự thay đổi các đặc trưng dòng chảy và khả năng tháo của đập tràn đối với chiều cao đập cũng như tỷ lệ cột nước trên đỉnh tràn. Nội dung công việc được thực hiện trong các điều kiện như sau: Về đập tràn, thực hiện nghiên cứu với đập tràn thấp và cao trung bình có tỷ lệ chiều cao đập P/H thay đổi trong phạm vi từ 0,5 đến 3,0; về dòng chảy qua tràn, sử dụng tỷ lệ cột nước trên đỉnh tràn $0,5 \leq H/C \leq 2,0$; dòng chảy tự do qua đập tràn và không có co hẹp bên.

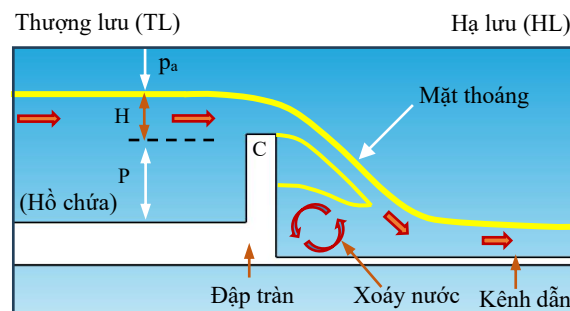
2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình toán

Đặc trưng dòng chảy qua đập tràn mặt cát thực dụng chữ nhật được mô phỏng bởi mô hình Flow-3D. Mô hình sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn để giải hệ phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng Navier-Stokes 3 chiều. Kết quả nghiên cứu từ các tác giả L.T.T. Hiền và nnk, T.C. Tý [6, 7] đã chỉ ra mô hình rối RNG $k-\epsilon$ và phương pháp thể tích chất lỏng [8] phù hợp mô phỏng dòng chảy hở qua đập tràn.

2.2. Đập tràn và các trường hợp nghiên cứu

Các mô hình đập tràn thực dụng mặt cát hình chữ nhật, đỉnh ngắn được sử dụng trong nghiên cứu được mô tả ở Hình 1. Tổng số 40 trường hợp mô phỏng được thực hiện, với sự thay đổi của chiều cao đập trong phạm vi $0,5 < P/H < 3,0$ bao gồm đập thấp và đập cao trung bình; chiều cao cột nước trên đỉnh tràn so với chiều dày đỉnh đập H/C trong khoảng từ 0,5 đến 2,0 (chi tiết xem Bảng 1).



Hình 1. Sơ đồ nghiên cứu dòng chảy qua đập tràn

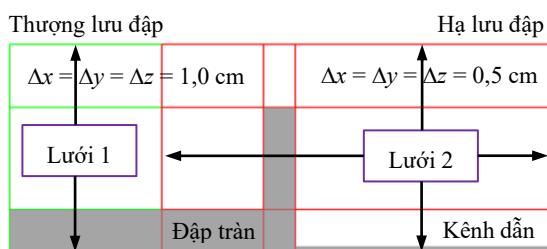
Bảng 1. Trường hợp mô phỏng và điều kiện dòng chảy

Mô hình	P/H (-)	Loại đập	H/C (-)	C (m)
1 ÷ 40	0,75	Đập thấp	0,6	0,25
	1,00			
	1,25			
	1,50			
	1,75			
	2,10	Đập cao trung bình	1,2	1,8
	2,30			
	2,50			
	2,70			
	2,90			

Trong đó: P , H và C lần lượt là chiều cao đập, cột nước đập tràn và chiều dày của đỉnh đập tràn.

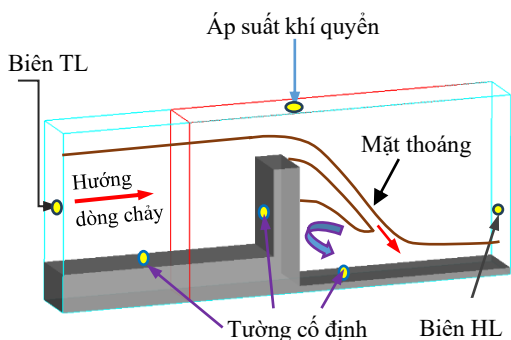
2.3. Thiết lập phạm vi và các điều kiện biên mô phỏng

Miền không gian thực hiện các mô phỏng số đối với dòng chảy qua đập tràn được rời rạc hóa thành các phần tử dạng khối lập phương nằm trong các lưới tính toán. Lưới 1 được thiết lập cho toàn bộ không gian mô phỏng từ hồ chứa ở thượng lưu đến cuối kênh dẫn hạ lưu đập, Lưới 2 hay gọi là lưới mịn được bố trí cho khu vực dòng chảy có sự thay đổi lớn về trường dòng đó là khu vực trước đập tràn khoảng $(2\div 5).H$ và phần hạ lưu đập như Hình 2 đã thể hiện. Căn cứ vào kích thước hình học đập (P, C), cột nước trên đỉnh tràn H cho các trường hợp mô phỏng và kinh nghiệm lựa chọn kích thước lưới cho các bài toán mô phỏng số dòng chảy hở [9-11]. Bài báo lựa chọn cỡ lưới đều 1,0 cm cho Lưới 1 và 0,5cm cho Lưới mịn để thực hiện các mô phỏng số.



Hình 2. Miền không gian tính toán mô phỏng dòng chảy

Miền không gian tính toán được giới hạn bởi 06 mặt biên, cụ thể: Biên thượng lưu hồ chứa nước (Biên TL) được gán là mực nước tĩnh H (m) thay đổi với các trường hợp mô phỏng; biên hạ lưu (Biên HL) là dòng chảy tự do và biên mặt thoáng chất lỏng được thiết lập là áp suất khí quyển; đáy hồ chứa, đập và kênh dẫn hạ lưu được gán là tường cố định; biên đối xứng được sử dụng cho hai bên thành của đập tràn và kênh dẫn. Các điều kiện biên được thể hiện trên Hình 3.



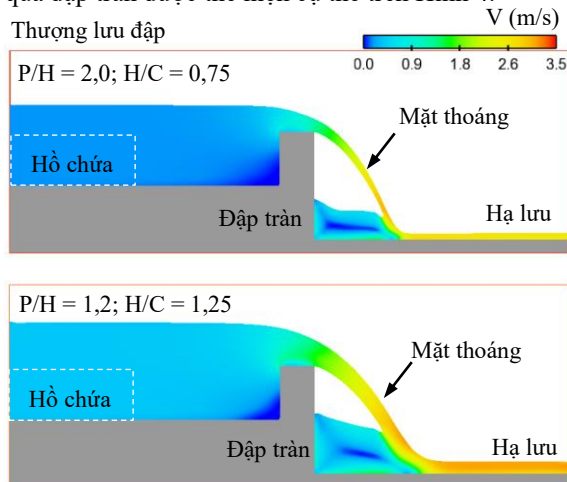
Hình 3. Thiết lập các điều kiện biên cho các mô hình số

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kiểm chuẩn kết quả mô phỏng số

Nghiên cứu sử dụng kết quả thực nghiệm mô hình

đập tràn mặt cắt chữ nhật, đỉnh ngắn của Y. Chen và nnk [5] với các thông số hình học đập $P=24,0\text{cm}$, $C=16,0\text{cm}$ và cột nước H trên đỉnh đập lần lượt là 8,0cm, 12,0cm và 20,0cm làm cơ sở để đánh giá sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng thủy lực với thực nghiệm. Kết quả mô phỏng số về trường dòng chảy qua đập tràn được thể hiện cụ thể trên Hình 4.



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

Bảng 2. Kết quả so sánh hệ số lưu lượng qua đập tràn

Nội dung	H/C (-)	Hệ số lưu lượng (m)		Sai số (%)
		Thực nghiệm [5]	Mô phỏng	
P/H = 3,0	0,50	0,365	0,359	1,67
P/H = 2,0	0,75	0,390	0,379	2,82
P/H = 1,2	1,25	0,410	0,417	1,71

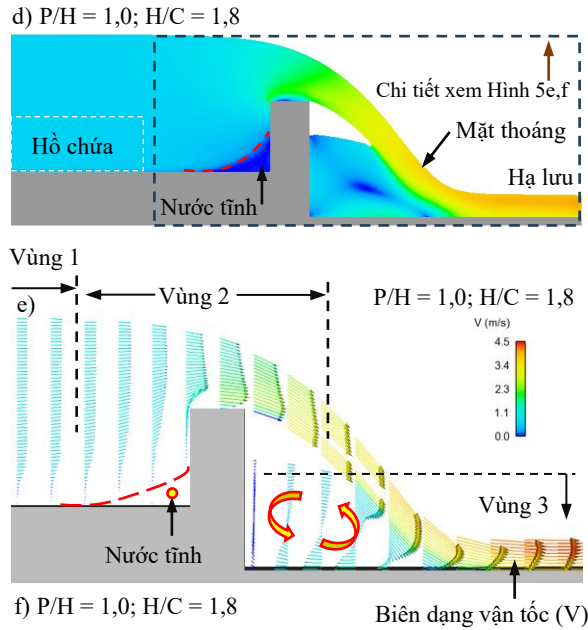
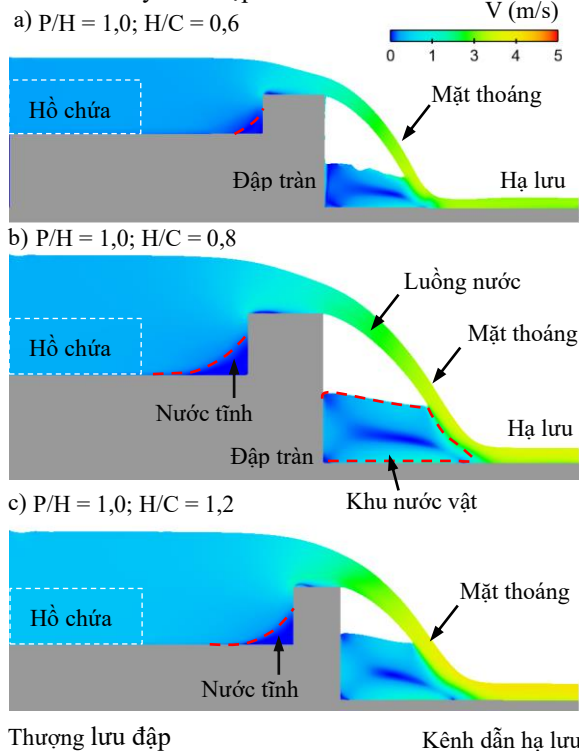
Dựa vào kết quả tính toán so sánh về hệ số lưu lượng qua đập tràn m ở Bảng 2, cho thấy sai số giữa kết quả mô phỏng số và kết quả thực nghiệm theo Y. Chen và nnk [5] là rất nhỏ, chênh lệch không đáng kể ($< 3\%$). Vì vậy, mô hình thủy lực với kích thước phần tử lưới ở miền không gian tính toán (Lưới 1 & 2) đã lựa chọn ở mục 2.3 là phù hợp với bài toán mô phỏng dòng chảy hở qua đập tràn, trạng thái chảy tự do. Kích thước lưới này được áp dụng cho các mô phỏng số trong kịch bản nghiên cứu.

3.2. Đặc điểm dòng chảy qua đập tràn

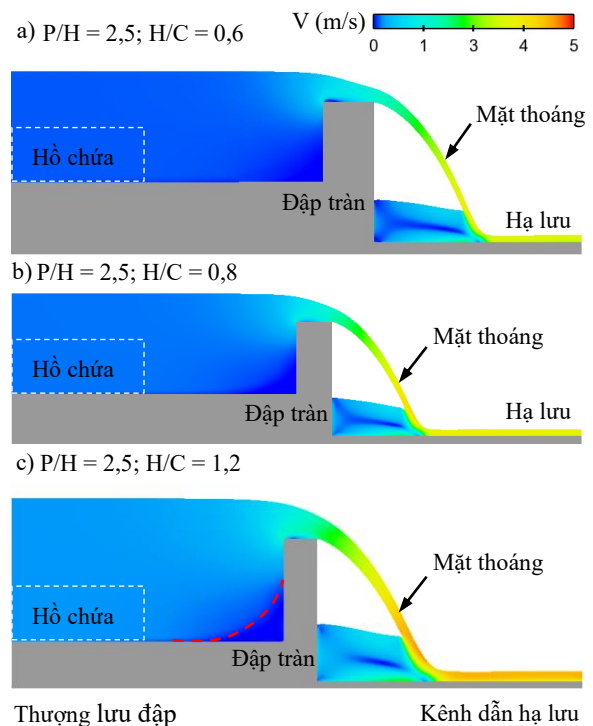
Dòng chảy qua đập tràn thực dụng mặt cắt chữ nhật có thể được phân thành ba vùng (Hình 5e): Vùng 1 ở thượng lưu hồ chứa cách đập một khoảng cách lớn hơn khoảng $(3\div 5).H$, tại đó vận tốc dòng chảy rất nhỏ và gần như không đáng kể ($V \approx 0 \text{ m/s}$); vùng 2 là khu vực đập tràn bao gồm phạm vi dòng chảy ngay trước

và sau đập tràn, tại vùng này trường vận tốc dòng chảy có sự thay nhanh và trị số biến đổi lớn, dòng chảy phía trên đỉnh đập tràn tăng dần vận tốc đồng thời chiều sâu dòng chảy giảm dần (đường nước hạ) khi tới đập tràn, khi vượt qua đỉnh đập hình thành luồng nước (dòng phun tự do) với vận tốc lớn rơi xuống kênh dẫn hạ lưu đập. Vùng còn lại là hạ lưu đập, nơi mà luồng nước nối tiếp với kênh dẫn hạ lưu, luồng nước mang vận tốc lớn và chạm trực tiếp với bề mặt đáy kênh tại điểm A như Hình 5f, tại đây dòng chảy tách thành hai phần. Phần chính là dòng chủ hướng theo hạ lưu kênh dẫn mang vận tốc lớn, phần còn lại là dòng chảy ngược tiến lại hạ lưu đập hình thành khu nước vật (xoáy nước).

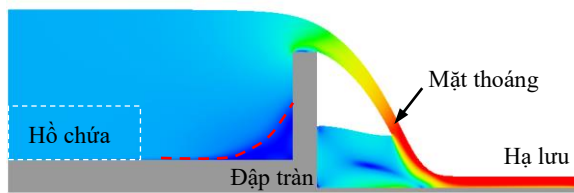
Với đập thấp, xem Hình 5a-d ảnh hưởng của đáy kênh trước đập (phần hồ chứa) khá rõ, trường vận tốc thay đổi trị số trong khoảng từ 0,1m/s đến 0,6m/s khi cột nước trên đập H/C tăng dần từ 0,6 đến 1,8. Tại vị trí ngay chân đập phía thượng lưu hình thành khu vực nước tĩnh ($V \approx 0\text{m/s}$), khu vực này được nhận diện rất rõ trên Hình 5e,f. Ngược lại, với đập cao trung bình ảnh hưởng kênh dẫn thượng lưu hồ chứa rất nhỏ (xem trên Hình 6a-d), phạm vi vùng nước tĩnh ngay trước đập khá lớn, dòng chảy gần như chỉ chịu ảnh hưởng của chiều dày đỉnh đập.



Hình 5. Phân bố trường vận tốc dòng chảy qua đập tràn thấp với các tỷ lệ H/C



d) $P/H = 2,5; H/C = 1,8$



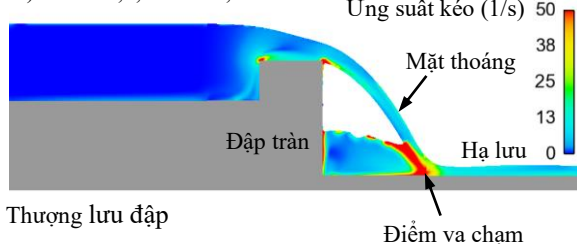
Hình 6. Phân bố trường vận tốc dòng chảy qua đập tràn chiều cao trung bình với các tỷ lệ H/C

Phân bố trường vận tốc dòng chảy qua đập tràn được xem xét, thể hiện cụ thể và chi tiết trên Hình 5e,f. tại Hình 5e cho thấy biên dạng vận tốc dòng chảy phía hồ chứa khá nhỏ và gần như đều (phạm vi nhỏ sát đáy vận tốc $V \approx 0\text{m/s}$), các đường dòng gần như song song như Hình 5f thể hiện. Tại phạm vi chiều dày đỉnh đập C biên dạng vận tốc có sự thay đổi lớn về giá trị và hướng, trong khu vực này đường dòng cong, điều này minh chứng dòng chảy trên đỉnh đập không chỉ tồn tại chủ đạo vận tốc theo phương ngang mà còn thành phần vận tốc theo phương đứng khá rõ. Phần hạ lưu đập hình thành khu nước vật (khu nước xoáy ngược dòng) với vận tốc không lớn nhưng có tác dụng tiêu tán một phần động năng dòng chảy qua đập tràn khi nối tiếp với kênh dẫn hạ lưu, chi tiết hơn sẽ được thể hiện và phân tích ở nội dung mục 3.3.

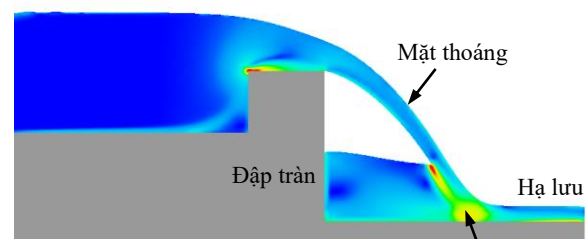
3.3. Phân bố ứng suất kéo dòng chảy trên đập tràn

Để làm rõ hơn ảnh hưởng của chiều cao đập P và chiều dày đỉnh đập C đến trường dòng chảy và khả năng tháo, trong nghiên cứu này xem xét và đánh giá sự phân bố ứng suất kéo xuất hiện trong dòng chảy trên tràn. Đối với đập thấp (xem Hình 7) ảnh hưởng của kênh dẫn trước đập và chiều cao đập khá rõ, ứng suất kéo có giá trị nhỏ hơn $10 (1/s)$. Ngược lại, với đập cao trung bình thì ảnh hưởng này gần như không đáng kể (xem Hình 8). Ứng suất kéo xuất hiện lớn nhất chủ yếu tập trung ở phạm vi đỉnh đập, góc phía hồ chứa, do hình học đập là góc vuông tại đỉnh nên dòng chảy không thuận dòng từ hồ chứa qua đập, tại vị trí này rất dễ xảy ra hiện tượng tác dòng. Trong những vùng có ứng suất kéo lớn sẽ rất dễ sinh ra các xoáy và dòng chảy thứ cấp.

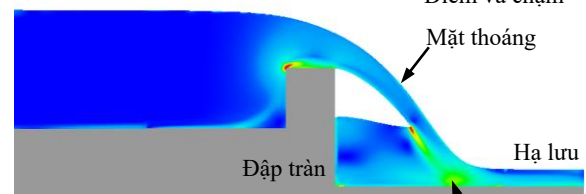
a) $P/H = 1,0; H/C = 0,6$



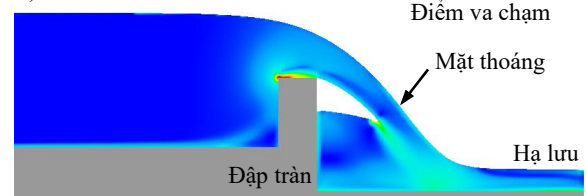
b) $P/H = 1,0; H/C = 0,8$



c) $P/H = 1,0; H/C = 1,2$



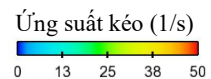
d) $P/H = 1,0; H/C = 1,8$



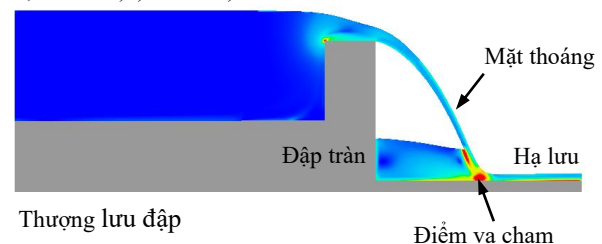
Hình 7. Phân bố trường ứng suất kéo của dòng chảy trên đập tràn thấp

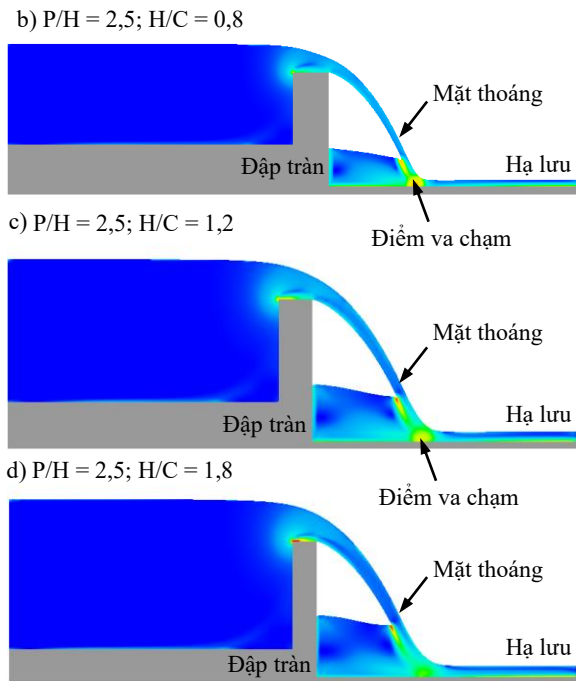
Phía hạ lưu đập, tại khu vực luồng nước rơi tự do nối tiếp với kênh dẫn thông qua khu nước vật, ứng suất kéo xuất hiện khá lớn trong phạm vi từ 25 đến 50 ($1/s$), do ảnh hưởng của dòng chảy thứ cấp và các xoáy sinh ra trong quá trình nối tiếp luồng nước với hạ lưu, điều này làm tăng mức độ rơi của dòng chảy, dẫn đến hiệu quả tiêu tán năng lượng dư thừa của dòng chảy khi qua đập tràn xuống hạ lưu được cải thiện tốt hơn. Tuy nhiên, với sự xuất hiện luồng nước mang vận tốc lớn, rơi trực tiếp xuống kênh dẫn hạ lưu sẽ dẫn tới nguy cơ xói lòng dẫn, mất an toàn đập.

Với cột nước trên đỉnh tràn tăng dần thì phân bố ứng suất kéo trong dòng chảy ở khu vực hạ lưu của các đập thấp và cao trung bình giảm, do khu vực nước vật tăng dần, dẫn tới nối tiếp luồng nước với hạ lưu kênh dẫn được tốt hơn.



a) $P/H = 2,5; H/C = 0,6$

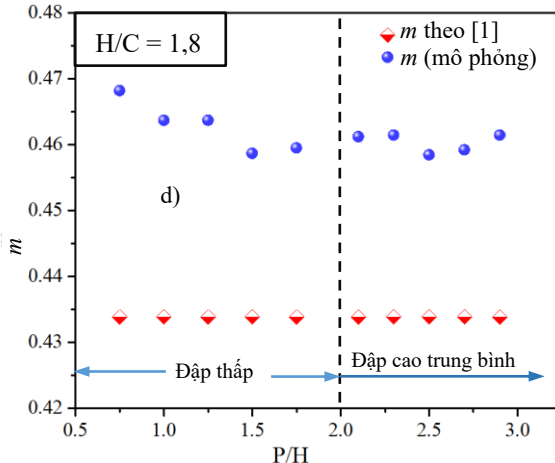
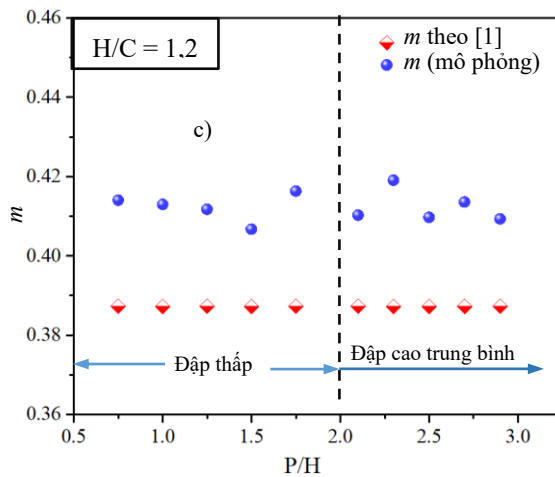
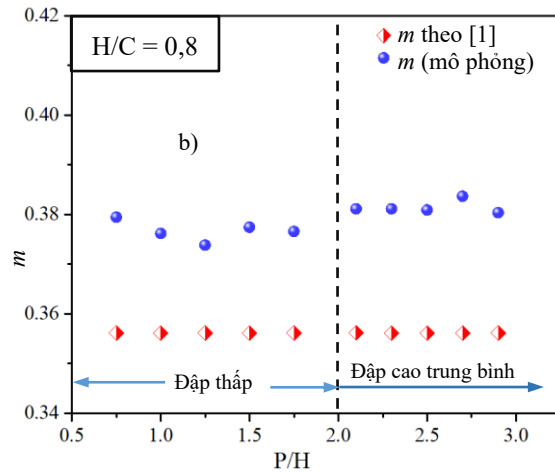
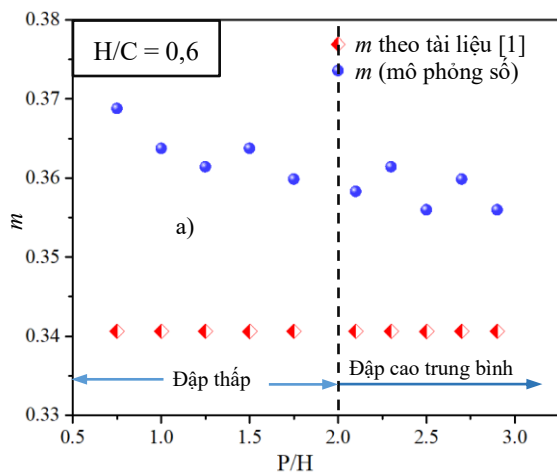




Hình 8. Phân bố trường ứng suất kéo của dòng chảy trên đập tràn cao trung bình

3.4. Ảnh hưởng của đặc điểm hình học đập tràn đến khả năng tháo (m)

Hình 9 thể hiện trực quan, định lượng các mối quan hệ giữa tỷ lệ chiều cao đập P/H và tỷ lệ cột nước trên đỉnh tràn H/C đối với khả năng tháo (m) qua đập tràn chảy tự do, không co hẹp bên. Với giá trị chiều cao cột nước trên tràn nhỏ, $H/C = 0,6$ (xem Hình 9a), kết quả nghiên cứu chỉ ra hệ số m cao hơn đối với đập thấp ($0,5 < H/C \leq 2,0$) có giá trị khoảng $0,36 \pm 0,37$; với đập có chiều cao trung bình thì hệ số lưu lượng dao động trong khoảng từ $0,356$ đến $0,362$.



Hình 9. Quan hệ giữa tỷ lệ chiều cao P/H và hệ số m

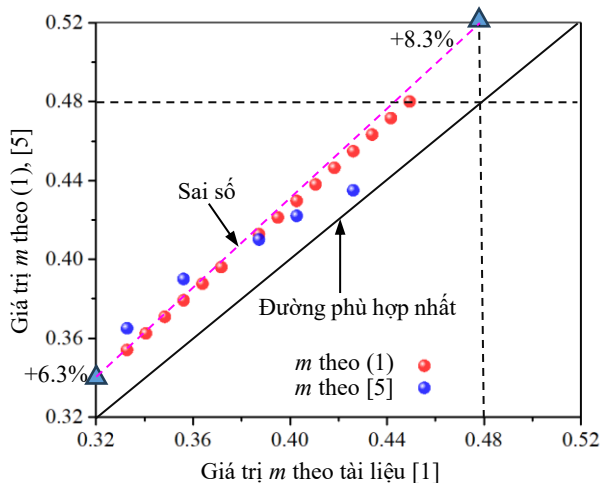
Hệ số lưu lượng m thay đổi với sự gia tăng cột nước trên đỉnh tràn như Hình 9b, c và d đã thể hiện, giá trị m thay đổi từ $0,38$ đến $0,46$. Tuy nhiên, với cùng một giá trị tỷ lệ cột nước lớn đối với đập thấp và đập cao trung bình thì hệ số lưu lượng m có sự thay đổi rất nhỏ và hầu như không đáng kể, cụ thể với các giá trị $H/C = 0,8, 1,2$ và $1,8$ thì giá trị m trung bình lần lượt

là 0,38, 0,416 và 0,461. Điều này được minh họa rõ trên Hình 9.

Mặt khác, khi xem xét mối quan hệ giữa hệ số lưu lượng (m) với tỷ lệ chiều cao cột nước trên đỉnh tràn (H/C), kết hợp với mô hình phân tích hồi quy, nghiên cứu tìm được mối quan hệ của hệ số m theo biểu thức (1) với hệ số tương quan rất cao, $R^2 = 0,993$.

$$m = 0,312 + 0,084 \cdot \frac{H}{C} \quad (1)$$

Các giá trị m dự đoán theo biểu thức (1) được so sánh với kết quả thực nghiệm từ các tài liệu [1, 5] như thể hiện chi tiết trên Hình 10. Từ Hình 10, nhận thấy chênh lệch về giá trị m theo biểu thức (1) và kết quả thực nghiệm của Y. Chen và mnk [5] là rất nhỏ (sai số < 5%), các điểm màu đỏ thể hiện giá trị dự đoán m và điểm màu xanh sẫm theo thực nghiệm [5] bám rất sát nhau. Mặt khác, kết quả xác định m theo công thức (1) và [5] lớn hơn so với tiêu chuẩn tính toán đập tràn và sổ tay tính toán thủy lực [1, 2] khoảng 8%. Sai số này có thể đến từ việc thiết lập biểu thức xác định m từ tài liệu [1, 2] với hệ số tương quan chưa đủ tốt cũng như sai số từ dữ liệu thực nghiệm (các tài liệu [1, 2] không trình bày hệ số R^2 trong tài liệu). Như vậy, phương trình (1) dự báo tốt hệ số lưu lượng cho dòng chảy qua đập tràn mặt cắt chữ nhật, đỉnh ngắn.



Hình 10. Giá trị m dự đoán và các tài liệu chuyên ngành

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã định lượng và phân tích chi tiết đặc điểm của dòng chảy qua đập tràn thực dụng mặt cắt chữ nhật có đỉnh ngắn trên cơ sở xem xét sự thay đổi trường vận tốc và phân bố ứng suất kéo của dòng chảy.

Bài báo đã xây dựng được các đồ thị định lượng mối quan hệ giữa hệ số lưu lượng m với tỷ lệ chiều cao đập tràn P/H đối với đập thấp, cao trung bình cũng

như tỷ lệ cột nước trên đỉnh tràn H/C, thiết lập công thức (1) dự báo hệ số m với tỷ lệ H/C có hệ số R^2 rất cao. Ngoài ra, với đập thấp và cột nước nhỏ thì ảnh hưởng của chiều cao đập khá rõ, với cột nước lớn thì ảnh hưởng chiều cao đập đối với hệ số m rất nhỏ, sự chênh lệch giá trị m giữa đập thấp và cao trung bình không quá <5%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 9147:2012. Công trình thủy lợi - Quy trình tính toán thủy lực đập tràn. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [2] Lưu Công Đào, Nguyễn Tài (1984). Sổ tay tính toán thủy lực. Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà Nội.
- [3] Nguyễn Văn Cung, Nguyễn Xuân Đăng, Ngô Trí Viêng (2005). Công trình tháo lũ trong đầu mối hệ thống thủy lợi. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [4] Robert J. Houghtalen, A. Osman Akan, Ned H. C. Hwang (2017). Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems. Pearson publisher.
- [5] Yuejun Chen, Zongfu Fu, Qingsheng Chen, Zhen Cui (2018). Discharge coefficient of rectangular short-crested weir with varying slope coefficients. Water, Vol.10(2), pp.1-18.
- [6] Trịnh Công 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.
- [7] Lê Thị Thu Hiền, Dương Hoài Đức, Đinh Hải Đăng, Nguyễn Đức 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.
- [8] F. S. Inc (2020). Flow-3D V9.3 User's Manual. Santa Fe, NM, USA.
- [9] 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(5), pp.1-24.
- [10] Cong Trieu Tran, Ty Trinh Cong (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.

[11] Ty Trinh Cong, Zhang JianMin, Cong Trieu Tran (2024). *Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps*. Applied Sciences. Vol.14(2), pp.1-19.

Ngày nhận bài:	16/10/2024
Ngày nhận bản sửa:	08/11/2024
Ngày duyệt đăng:	11/11/2024