



## Mô phỏng dòng chảy sau vỡ đập dùng mô hình Flow 3D: Ứng dụng cho đập thủy điện Hòa Bình

### Simulation of dam-break flows using Flow 3D model: A case study of Hoa Binh hydroelectric dam

Phạm Văn Khôi\*

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Từ khóa:*

Bài toán vỡ đập  
Mô phỏng số  
Mô hình Flow 3D  
Đập thủy điện Hoà Bình

TÓM TẮT

Dưới tác động của động đất hay lượng mưa lớn bất thường, nguy cơ vỡ các đập thủy điện đang vận hành là hiện hữu. Tại Việt Nam hiện nay, kịch bản vỡ đập thủy điện Hoà Bình có ảnh hưởng tới vùng hạ lưu sông Đà và sông Hồng cần xem xét. Nghiên cứu này dùng mô hình số Flow 3D mô phỏng đặc trưng dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hoà Bình. Thông số địa hình hiện nay của khu vực hạ lưu đập thủy điện được đưa vào mô hình số ba chiều Flow 3D cùng các điều kiện biên phù hợp để mô phỏng như điều kiện thực tế. Sau kịch bản vỡ đập, mô hình đã thể hiện kết quả chiều sâu và vận tốc dòng chảy lan truyền ở khu vực hạ lưu trong khoảng 200 s. Từ kết quả mô phỏng, có thể đưa ra dự báo thảm họa ngập lụt ở khu vực hạ lưu đập thủy điện Hoà Bình cũng như khu vực đô thị lớn như Thành phố Hà Nội.

*Keywords:*

Dam-break  
Numerical simulation  
Flow-3D model  
Hoa Binh  
hydroelectric dam

ABSTRACT

Under the impact of earthquakes or unusually heavy rainfall, the risk of dam failures at operating hydropower plants is real. In Vietnam, the scenario of the Hoa Binh Hydropower Dam breaking and its effects on the downstream areas of the Da River and Red River needs to be considered. This study uses the Flow 3D numerical model to simulate the flow characteristics after the failure of the Hoa Binh Hydropower Dam. The current topographic data of the downstream area of the Hoa Binh Hydropower Dam is incorporated into the three-dimensional Flow 3D model, along with appropriate boundary conditions to simulate real-world scenarios. Following the dam failure scenario, the model displays the depth and velocity of the flow spreading in the downstream area within 200 seconds. Based on the simulation results, it is possible to forecast the flood disaster in the downstream area of the Hoa Binh Hydropower Dam as well as major urban areas such as Hanoi.

\* Phạm Văn Khôi. Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Email: [khoipv.ctt@vimaru.edu.vn](mailto:khoipv.ctt@vimaru.edu.vn)

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.13\(6\).17-24](https://www.doi.org/10.55228/JTST.13(6).17-24)

Ngày nhận bài: 7/10/2024; Ngày nhận bài sửa: 30/10/2024; Ngày chấp nhận đăng: 08/11/2024

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2024

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

## 1. Giới thiệu

Tại Việt Nam, đập thủy điện ngoài chức năng chính sản xuất năng lượng điện phục vụ phát triển kinh tế còn có chức năng điều tiết nguồn tài nguyên nước quốc gia. Sau 30 năm hoạt động, với vị trí liền kề Thủ đô Hà Nội, đập thủy điện Hòa Bình vẫn giữ được vai trò quan trọng đối với nền an ninh năng lượng quốc gia và an ninh nông nghiệp khu vực Đồng bằng Bắc Bộ. Tuy nhiên, dưới tác động của các yếu tố tự nhiên như động đất hay mưa lớn bất thường, nguy cơ vỡ đập thủy điện Hòa Bình là hiện hữu và cần được tính toán dự báo ảnh hưởng của nó một cách kỹ lưỡng [1]. Đặc biệt, quy mô dân số và cơ sở hạ tầng hiện nay của đô thị loại đặc biệt - Thành phố Hà Nội, phát triển nhanh chóng tiềm ẩn rủi ro cao nếu thảm họa vỡ đập thủy điện Hòa Bình xảy ra. So với mô phỏng bằng mô hình vật lý, mô phỏng bởi mô hình số được xem là cách tiếp cận tiết kiệm chi phí nhưng vẫn đảm bảo tính chính xác cho công tác dự báo đặc trưng dòng chảy sau vỡ đập. Flow 3D [2] là mô hình số ba chiều được sử dụng rộng rãi trong công tác mô phỏng dòng chảy tương tác với các loại kết cấu đập [3], [4], [5], [6], [7], [8], hay công trình biển [9], [10], [11]. Tuy nhiên, giống như các mô hình ba chiều khác, thời gian mô phỏng dài và tiêu tốn tài nguyên máy tính nếu tính toán cho miền mô phỏng có kích thước lớn. Trong nghiên cứu này, kịch bản vỡ đập thủy điện Hòa Bình được thiết lập, sử dụng mô hình số ba chiều Flow 3D để mô phỏng đặc trưng dòng chảy cho khu vực hạ lưu, từ đó, có thể dự báo chính xác cho vùng mô phỏng và lân cận, đặc biệt là Thủ đô Hà Nội, nếu thảm họa vỡ đập xảy ra.

Trong bài báo này, mô hình số Flow 3D và kiểm chuẩn được giới thiệu ở phần 2. Phần 3 nêu vị trí của đập thủy điện Hòa Bình và các

thông số chủ yếu. Phần 4 trình bày thiết lập mô hình, kết quả mô phỏng và thảo luận. Kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo được đưa ra ở phần 5.

## 2. Mô hình Flow 3D và kiểm chuẩn

Mô hình ba chiều Flow 3D [2] sử dụng hệ phương trình Navier-Stokes bao gồm phương trình liên tục và phương trình động lượng:

$$\nabla \cdot (A\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \nabla \cdot (A\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot p + G + f_v \quad (2)$$

Trong đó,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  là toán tử vi phân,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  tương ứng là vận tốc dòng chảy theo các phương  $x, y, z$ ;  $\rho$  là khối lượng riêng nước;  $p$  là áp suất;  $G$  là gia tốc bản thân;  $f_v$  là gia tốc nhớt. Do đường lưới trong mô hình nhận diện kích thước hình học bằng phương pháp tỷ lệ,  $A$  là tỷ lệ diện tích nước chiếm chỗ và  $V_F$  là tỷ lệ thể tích nước chiếm chỗ trong hệ tọa độ Descartes.

Chiều sâu nước được xác định theo phương pháp chuyển đổi thể tích chất lỏng VOF (volume of fluid) [12], [13] được thể hiện qua phương trình:

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \nabla \cdot (V_w A\mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

Trong đó,  $V_w$  là tỷ lệ thể tích chất lỏng (nước) trong lưới tính toán,  $V_w = 0$ ,  $0 < V_w < 1$  và  $V_w = 1$  tương ứng thể hiện các pha khí, giao diện và nước. Gia tốc nhớt  $f_v$  thể hiện lực cản do tính nhớt của chất lỏng trong hệ tọa độ Descartes ba chiều:

$$\rho V_F f_{vx} = s_x - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right] \quad (4)$$

$$\rho V_F f_{vy} = s_y - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right] \quad (5)$$

$$\rho V_F f_{vz} = s_z - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right] \quad (6)$$

Trong đó,  $s_{i(i=x,y,z)}$  là ứng suất biên theo các trục tọa độ, các thành phần  $\tau$  là ứng suất cắt. Mô hình chảy rối sử dụng hệ số nhớt động lực  $\mu$  và hai phương trình tổn thất năng lượng  $k - \varepsilon$ , được thể hiện như sau:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial k}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_T + G_T + D_k - \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} (P_T + C_{3\varepsilon} G_T) + D_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

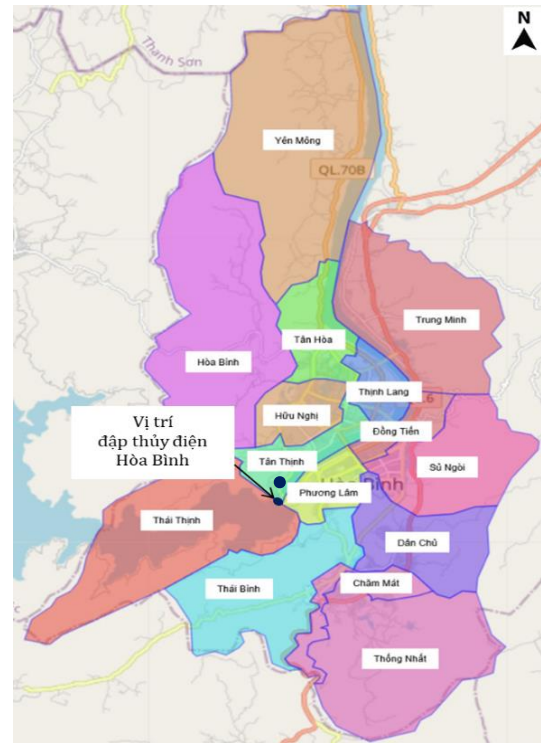
Với,  $P_T$  là thành phần năng lượng động học rối;  $G_T$  là thành phần lực nổi;  $D_k$  và  $D_\varepsilon$  tương ứng là các thành phần khuếch tán;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  là các hệ số được sử dụng.

Mô hình số Flow 3D đã được kiểm chuẩn cho các bài toán mô phỏng dòng chảy qua đập [4], [5], [6], [7]. Gần đây, mô hình được kiểm chuẩn cho các bài toán: Dòng chảy sau vỡ đập trên nền đáy phẳng; dòng chảy sau vỡ đập tương tác với kết cấu; dòng chảy sau vỡ đập tạo sóng leo - sóng rút - sóng phản xạ với kết cấu [8]. Các hiện tượng dòng chảy sau vỡ đập trong các bài toán trên đều được thể hiện của nội dung nghiên cứu này nên tác giả không đề cập trong bài báo.

### 3. Đập thủy điện Hòa Bình và khu vực mô phỏng

Đập thủy điện Hòa Bình được bắt đầu xây dựng vào năm 1979 và hoàn thành vào năm 1994. Hiện nay, đập trực thuộc địa phận thành phố Hoà Bình, tỉnh Hoà Bình (Hình 1). Theo Hình 1, vùng chân đập thủy điện hai bên bờ hạ lưu sông Đà là khu vực tập trung đông đúc (khoảng 100.000 người) thuộc các

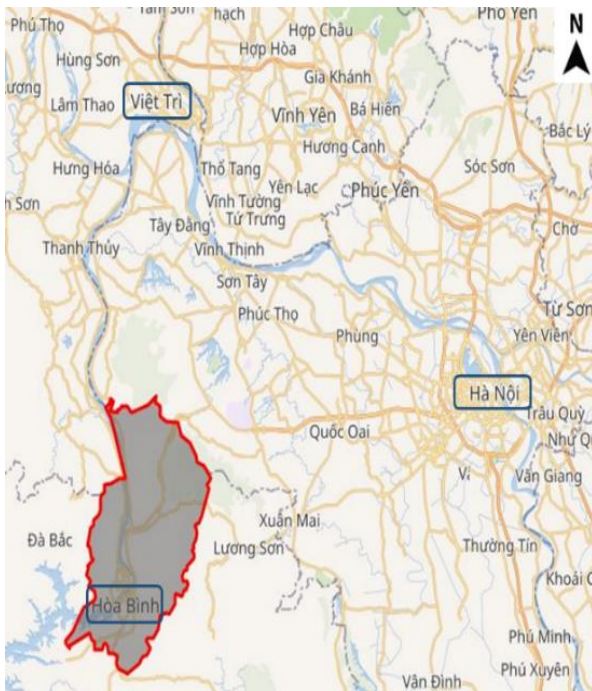
phường: Tân Thịnh, Phương Lâm, Đồng Tiến, Thịnh Lang, Hữu Nghị, Tân Hoà, Trung Minh.



Hình 1. Vị trí đập thủy điện Hoà Bình trong địa giới hành chính thành phố Hoà Bình, tỉnh Hoà Bình.

Đập thủy điện Hoà Bình ngăn hạ lưu sông Đà, tạo ra hồ sông Đà có diện tích 208 km<sup>2</sup> với dung tích chứa 9,45 tỷ m<sup>3</sup> nước. Do đó, Thủy điện Hoà Bình và hồ sông Đà có vai trò chiến lược trong khu vực phía Bắc Việt Nam (Hình 2). Theo Hình 2, ngoài vai trò quan trọng trong việc cung cấp năng lượng điện cho quốc gia, nguồn nước sông Đà hợp lưu với nguồn nước sông Hồng ở Việt Trì (tỉnh Phú Thọ) góp phần điều tiết nước cho khu vực Đồng bằng sông Hồng, trong đó có Thủ đô Hà Nội. Hình 3 thể hiện cấu tạo của đập cùng khu vực được lựa chọn để mô phỏng ba chiều, sử dụng dữ liệu địa hình từ phần mềm Google Earth vào tháng 03 năm 2022.

Theo [15], cao độ mặt đập là 125 m (so với mực nước biển), mực nước gia cường 120 m, mực nước chết 80 m và mực nước dâng bình thường 117 m. Vùng mô phỏng được lựa chọn có chiều rộng 4 km, chiều dài 6 km với tổng diện tích mô phỏng 24 km<sup>2</sup>. Đây là khu vực trung tâm thành phố Hòa Bình cũng như trung tâm tỉnh Hoà Bình, tập trung đông dân cư và cơ sở hạ tầng thiết yếu.



Hình 2. Vị trí thành phố Hòa Bình trong khu vực phía Bắc Việt Nam [14].



Hình 3. Khu vực mô phỏng.

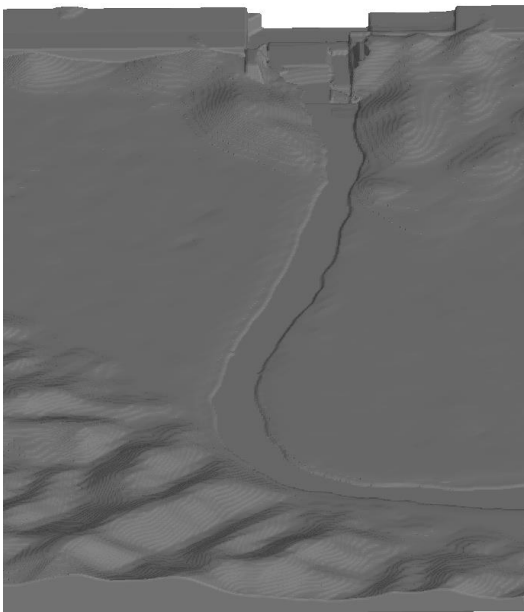
## 4. Mô phỏng dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hòa Bình

### 4.1. Thiết lập mô hình

Việc thiết lập mô hình mô phỏng dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hoà Bình như thực tế là rất phức tạp. Trong nghiên cứu này, tác giả đã tiến hành thu thập số liệu thực tế về kích thước đập, các thông số mực nước hồ thủy điện và mực nước sông Đà phần chân đập (mực nước trước và sau đập). Quan trọng nhất là công tác biên tập dữ liệu địa hình khu vực mô phỏng. Nguồn dữ liệu chính được sử dụng là nguồn dữ liệu mở của Google Earth. Số liệu địa hình, cấu tạo đập thu thập từ Google Earth được chuyển đổi về dạng số liệu chuẩn của mô hình Flow 3D (tệp định dạng .stl). Sau đó, thiết lập kịch bản mô phỏng cho trường hợp bất lợi nhất là phần đập cao 125 m, rộng 580 m bị vỡ hoàn toàn, chỉ còn lại vai đập ở hai bên.

Các điều kiện ban đầu về mực nước được thiết lập: Mực nước sau đập là 120 m, mực nước trước đập được thiết lập là chiều sâu

nước sông Đà khu vực cửa đập. Tuỳ theo đặc điểm địa hình đoạn sông, chiều sâu nước nơi thấp nhất là 5 m, sâu nhất là 17 m. Độ chênh lệch chiều cao cột nước trước và sau đập là 115 m. Với diện tích khu vực mô phỏng rất lớn, ảnh hưởng đến khối lượng tính toán và thời gian mô phỏng. Nghiên cứu lựa chọn kích thước lưới mô phỏng là 12,5 m, tạo ra tổng số 5.570.136 phần tử mô phỏng. Hệ số nhám được lựa chọn là  $0,034 \text{ m}^{-1/3}$ s. Do dung tích hồ rất lớn, điều kiện biên phía sau đập được thiết lập là biên nước với chiều cao không đổi 120 m. Biên đáy là tường, biên trên là áp suất không khí (101325 Pa), các biên còn lại là biên hở để dòng chảy có thể tự do chảy ra ngoài miền mô phỏng. Kết quả thiết lập miền mô phỏng trong mô hình Flow 3D được thể hiện trên **Hình 4**.



**Hình 4.** Địa hình khu vực mô phỏng dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hòa Bình.

#### 4.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

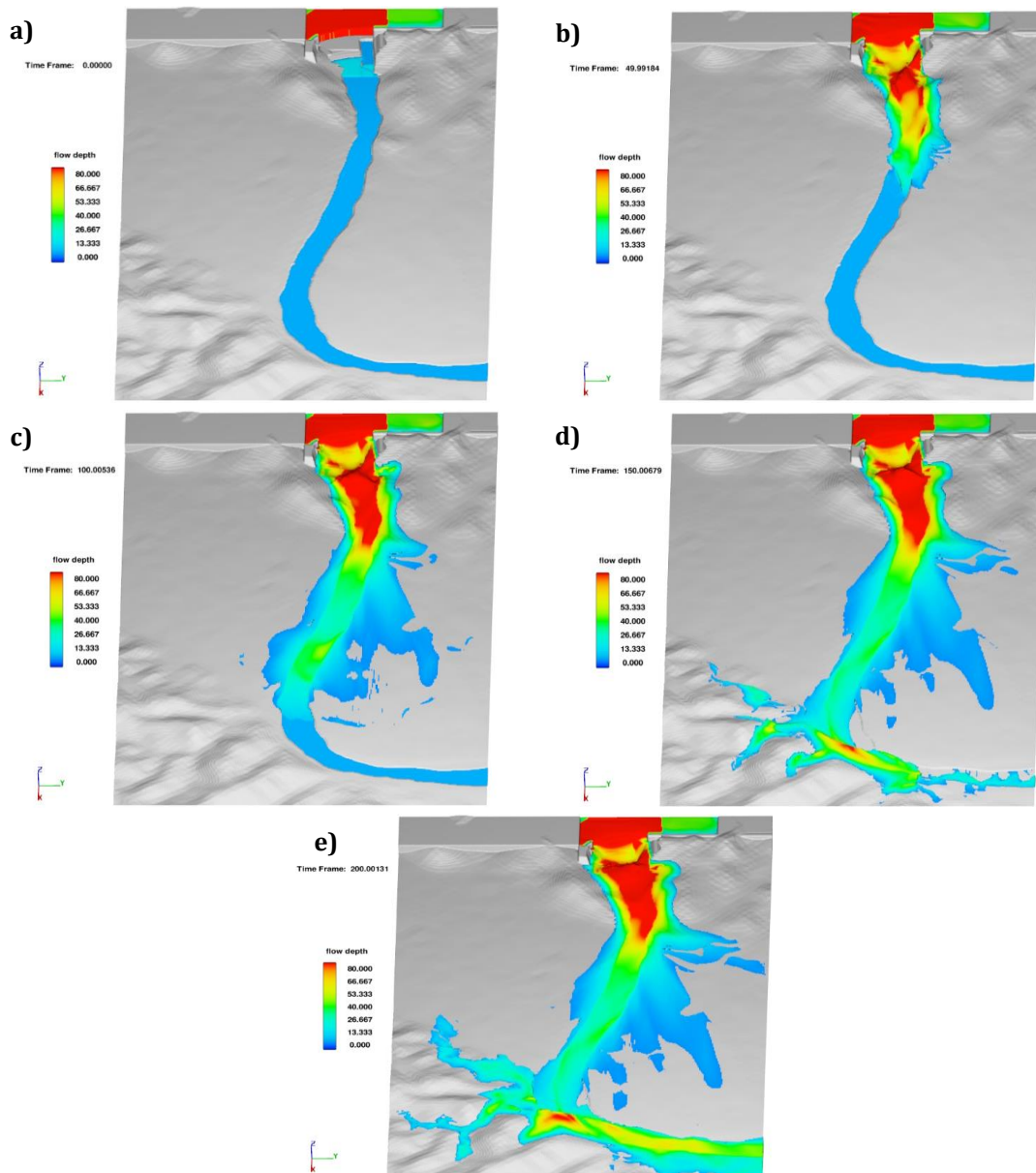
Kết quả mô phỏng chiều sâu và vận tốc dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hoà Bình tại các thời điểm  $t = 0 \text{ s}$ ,  $50 \text{ s}$ ,  $100 \text{ s}$ ,  $150 \text{ s}$ , và  $200 \text{ s}$  được thể hiện tương ứng trên **Hình 5** và **Hình 6**. Trong **Hình 5**, chiều sâu dòng chảy được thể hiện trên thang chia màu từ 0 m đến 80 m. Chiều sâu dòng chảy đặc trưng cho

mức độ ngập lụt hạ lưu khi dòng chảy lan truyền. Sau khi đập vỡ 50 s, dòng nước sau đập đổ xuống sông Đà ở chân đập là chính và một phần qua đê sông như **Hình 5b**. Tại  $t = 100 \text{ s}$  (**Hình 5c**), dòng chảy đã tiếp cận khu vực khúc cong sông Đà cách chân đập 4 km với chiều sâu nước khoảng 40 m. Dòng nước tiếp tục vượt qua đê sông và gây ngập lụt (trung bình 10 m) hai bên đô thị ven sông. Đến  $t = 150 \text{ s}$  (**Hình 5d**), dòng chảy đã dồn về khúc cong do sức cản của dãy núi với chiều sâu khoảng 80 m. Dòng chảy tại khúc cong tương tác với dãy núi làm ngập lụt toàn bộ khu vực xung quanh. Chiều sâu nước tại chân đập ở thời điểm này trên 80 m và tiếp tục lan rộng phạm vi ngập lụt hai bên bờ sông Đà, đặc biệt là phạm vi các phường Tân Thịnh, Hữu Nghị với chiều sâu trung bình 15 m. Đến thời điểm  $t = 200 \text{ s}$  (**Hình 5e**), dòng chảy chủ yếu tương tác với dãy núi cạnh sông Đà, tạo hiện tượng sóng leo lên các khe núi và gây ngập lụt nghiêm trọng ở phường Đồng Tiến và Trung Minh, có nơi chiều sâu ngập lụt lên đến 50 m.

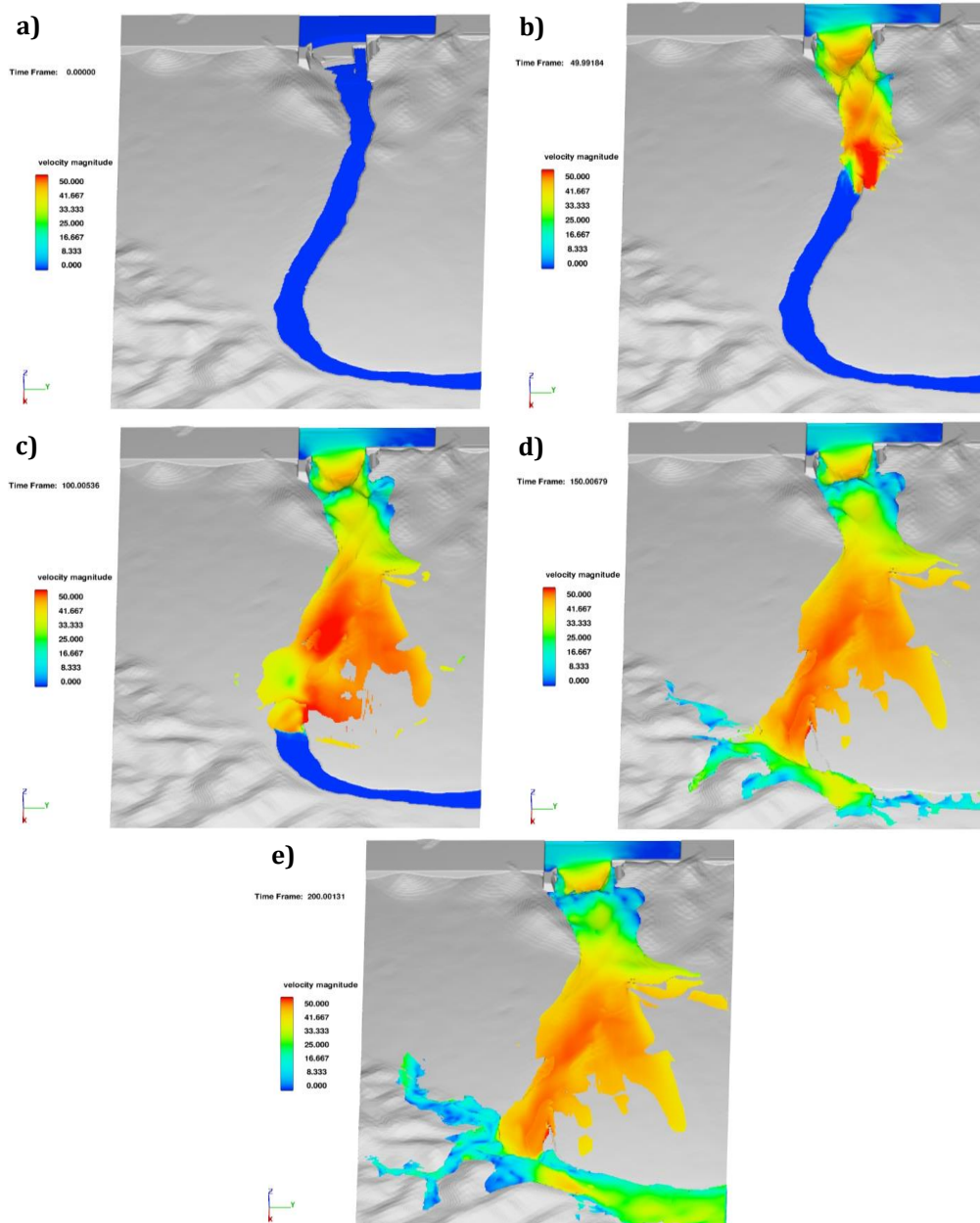
Theo **Hình 6**, vận tốc dòng chảy được thể hiện trên thang chia màu từ 0 đến 50 m/s. Vận tốc dòng chảy đặc trưng cho tải trọng của dòng chảy tác động vào vật cản trong quá trình lan truyền, từ đó, đánh giá được mức độ phá hủy cơ sở hạ tầng của dòng chảy sau vỡ đập. Tại thời điểm ban đầu  $t = 0 \text{ s}$  (**Hình 6a**), vận tốc dòng chảy tại mọi điểm đều bằng 0 m/s. Tại  $t = 50 \text{ s}$  (**Hình 6b**), vận tốc dòng chảy phía hồ Hòa Bình ở cửa đập trên 0 m/s và vận tốc dòng chảy tại chân đập khoảng 50 m/s. Đặc biệt lớn là vận tốc dòng chảy tại những điểm dòng chảy bắt đầu lan truyền tới (water front) khoảng 60 m/s. Đến thời điểm  $t = 100 \text{ s}$  (**Hình 6c**), khi dòng chảy vỡ đập bắt đầu lan truyền tới khúc cong sông Đà, vận tốc dòng chảy trung bình khoảng 50 m/s tại khu vực ngập lụt bên phải hình vẽ thuộc về phường Tân Thịnh, Hữu Nghị. Sau đó, đến thời điểm

$t = 150$  s và  $t = 200$  s tương ứng trên Hình 6d và Hình 6e, vận tốc dòng chảy lớn nhất vẫn duy trì khoảng 41,67 m/s ở khu vực bên phải hình vẽ và vận tốc dòng chảy trung bình khoảng 20 m/s ở các khu vực còn lại. Căn cứ vào kết quả mô phỏng, có thể nhận thấy, nếu kịch bản vỡ đập này xảy ra, khu vực sẽ chịu thiệt hại về mặt cơ sở hạ tầng chủ yếu thuộc về phường Tân Thịnh và Hữu Nghị (ngoài hai bên bờ sông Đà). Việc xác định vận tốc dòng chảy sau vỡ đập có ý nghĩa quan trọng trong dự báo tốc độ ngập lụt đối với các đô thị lớn khác xuôi dòng sông Đà.

Dọc theo sông Đà đến ngã ba sông Hồng ở Việt Trì, quãng đường tới trung tâm thành phố Việt Trì là 70 km. Và dọc theo sông Hồng từ Việt Trì tới trung tâm Thành phố Hà Nội, quãng đường dòng chảy trên sông Hồng khoảng 60 km. Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc trung bình của dòng chảy khoảng 41,67 m/s (tương đương 150 km/h). Từ đó, trong các nghiên cứu tiếp theo có thể dự báo thời gian ngập lụt tới các đô thị Việt Trì, Hà Nội sau khi vỡ đập thủy điện Hòa Bình theo kịch bản này.



**Hình 5.** Kết quả mô phỏng chiều sâu dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hoà Bình tại thời điểm (a) 0 s, (b) 50 s, (c) 100 s, (d) 150 s và (e) 200 s.



**Hình 6.** Kết quả mô phỏng vận tốc dòng chảy sau vỡ đập thủy điện Hoà Bình tại thời điểm (a) 0 s, (b) 50 s, (c) 100 s, (d) 150 s và (e) 200 s.

### 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả mô phỏng đặc trưng dòng chảy sau vỡ đập, ứng dụng mô hình số Flow 3D cho đập thủy điện Hoà Bình. Mô hình số Flow 3D thể hiện các đặc trưng vận tốc và chiều sâu dòng chảy cùng đặc tính dòng chảy rối được mô phỏng qua hệ phương trình chủ đạo. Mô hình số Flow 3D đã được tác giả kiểm chuẩn cho các bài toán tương tự. Các thông số đập thủy điện Hoà Bình và địa hình vùng hạ lưu đập được giới thiệu để phục vụ thiết lập các điều kiện biên

và điều kiện ban đầu cho kịch bản mô phỏng bài toán vỡ đập ba chiều. Kết quả mô phỏng cho vùng hạ lưu đập rộng 24 km<sup>2</sup> với hai thông số chiều sâu ngập lụt và vận tốc lan truyền được thể hiện chi tiết trong nghiên cứu này. Kết quả cho thấy chiều sâu ngập lụt trung bình của khu vực đông dân cư là 15 m và vận tốc lan truyền 41,67 m/s. Từ đó, có thể tiến hành mô phỏng dự báo ngập lụt sau vỡ đập thủy điện Hoà Bình cho các đô thị lớn như Thành phố Hà Nội trong các nghiên cứu tiếp theo.

## Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

## Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ không được cung cấp theo yêu cầu.

---

Phạm Văn Khôi. Faculty of Civil Engineering, Vietnam Maritime University.  
khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

---

## Tài liệu tham khảo

- [1] L. D. Tru và N. H. Vũ, *Những hư hỏng của công trình thủy công và phân tích các nguyên nhân*. Hà Nội, Việt Nam: NXB Nông nghiệp, 1977.
- [2] Flow Science, Santa Fe, NM, USA. *FLOW-3D® Version 2023R1 Users Manual*. (2023). Accessed: Aug. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.flow3d.com>
- [3] H. Hu, J. Zhang, and T. Li, "Dam-break flows: Comparison between Flow-3D, MIKE 3 FM, and analytical solutions with experimental data," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, 2018, Art. no. 2456, doi: 10.3390/app8122456.
- [4] Đ. X. Khánh, L. T. T. Nga và H. V. Hùng "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*, số 61, tr. 99–106, 06. 2018.
- [5] L. T. T. Hiền, D. H. Đức, Đ. H. Đăng, và N. Đ. Phú, "Nghiên cứu dòng chảy qua tràn xả lũ Tà Rục - Khánh Hòa bằng mô hình dòng rối kết hợp trộn khí," *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, số. 70, tr. 25–32, 2020.
- [6] P. V. Khôi and V. V. Nghi, "Mô hình dòng chảy ba chiều: Lý thuyết, kiểm chuẩn và ứng dụng mô phỏng đập tràn kiểu xi phông," *Tạp chí Khoa học công nghệ Hàng hải*, số 67, tr. 73-77, 08. 2021.
- [7] P. V. Khôi, P. T. Ngà, và Đ. T. H. Ngọc, "Mô hình dòng chảy ba chiều: Công cụ van khí và ứng dụng điều chỉnh lưu lượng xả nước đập tràn xi phông," *Tạp chí Khoa học công nghệ Hàng hải*, số 69, tr. 57–61, 01. 2022.
- [8] V. V. Nghi và P. V. Khôi, "Mô phỏng tương tác dòng chảy sau vỡ đập với đáy hạ lưu phức tạp dùng mô hình Flow 3D," *Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải*, tập 12, số 2, tr. 24–30, 03. 2023, doi: 10.55228/JTST.12(2).24-30.
- [9] P. V. Khôi và V. V. Nghi, "Nghiên cứu ứng dụng mô hình dòng chảy ba chiều mô phỏng hiệu quả tiêu tán sóng đơn cho đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng," *Tạp chí Giao thông vận tải*, số 03/2023, tr. 116–118, 2023.
- [10] P. V. Khôi, "Lựa chọn chiều cao đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn của đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, số 73, tr. 47–51, 01. 2023.
- [11] P. V. Khôi, "Lựa chọn mặt cắt ngang đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn cho đê chắn sóng tường đứng rỗng dạng ngập dùng mô hình Flow-3D," *Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải*, tập 12, số 6, tr. 46–53, 11. 2023, doi: 10.55228/JTST.12(6).46-53.
- [12] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *J. Comput. Phys.*, vol. 39, no. 1, pp. 201–225, Jan. 1981, doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- [13] M. R. Barkhudarov, "Lagrangian VOF advection Method for FLOW-3D®," *Flow Science Technical Note (FSI-03-TN63-R)*, 2004.
- [14] Wikipedia, "Hòa Bình." vi.wikipedia.org. Truy cập: 30/8/2024. [Online]. Available: [https://vi.wikipedia.org/wiki/Hòa\\_Bình](https://vi.wikipedia.org/wiki/Hòa_Bình)
- [15] Công ty Thủy điện Hoà Bình. "Thông số kỹ thuật chính của Công ty Thủy điện Hoà Bình." thuydienhoabinh.vn. Truy cập: 30/8/2024 [Online]. Available: <https://www.thuydienhoabinh.vn/thong-so-ky-thuat-cong-trinh/>