

MỘT SỐ VẤN ĐỀ VỀ THỦY LỰC DÒNG CHẢY KHI ỨNG DỤNG LƯỚI THÉP CƯỜNG ĐỘ CAO NGĂN LŨ Bùn ĐÁ TẠI ĐẬP DÂNG MƯỜNG TÙNG, ĐIỆN BIÊN

Nguyễn Chí Thanh, Phạm Thị Ngọc Diệp

Viện Thủy công

Nguyễn Phương Dung, Trần Đức Thành

Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Lũ bùn đá đã và đang gây ảnh hưởng nghiêm trọng tới đời sống của người dân và an ninh quốc phòng, đặc biệt là tại khu vực miền núi phía Bắc. Trên thế giới, giải pháp ngăn lũ bùn đá sử dụng lưới thép cường độ cao đã được áp dụng phổ biến và tiêu chuẩn hóa tại một số nước. Bài báo giới thiệu một giải pháp kết hợp lưới thép cường độ cao và đập dâng – một dạng công trình ngăn nước rất phổ biến tại khu vực miền núi phía Bắc. Giải pháp được mô phỏng bằng phần mềm FLOW-3D, tính toán áp dụng tại đập dâng Mường Tùng (Mường Chà, Điện Biên). Các kết quả tính toán cho thấy giải pháp có tính khả thi và hiệu quả ngăn lũ bùn đá, có thể nhân rộng trong thực tế.

Từ khóa: Lũ bùn đá; lưới thép cường độ cao; đập dâng.

Summary: Debris flows have been seriously affecting people's lives and national security, especially in the northern mountainous region. In the world, the solution to prevent debris flows using high-strength steel mesh has been widely applied and standardized in a number of countries. This article introduces a solution combining high-strength steel mesh and checkdams—a very popular type of water-blocking structure in the northern mountainous region. The solution is simulated using FLOW-3D software, calculated and applied at the Muong Tung checkdam (Muong Cha, Dien Bien). The calculation results show that the solution is feasible and effective in preventing debris flows, and can be replicated in practice.

Keywords: Debris flow; high strength steel mesh; checkdam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh ảnh hưởng của biến đổi khí hậu ngày càng rõ rệt những năm gần đây ở Việt Nam, tình hình thiên tai ở các tỉnh miền núi phía Bắc diễn biến phức tạp. Các hiện tượng lũ quét, lũ bùn đá, sạt lở đất xảy ra ở nhiều nơi, với mức độ ngày càng gia tăng, gây thiệt hại nghiêm trọng về người và tài sản và môi trường sinh thái [1]. Lũ bùn đá là loại hình thiên tai xảy ra khi mưa lớn tập trung trong thời gian ngắn, hoặc mưa kéo dài nhiều ngày, trong những khu vực có địa hình cắt, độ dốc lưu vực và độ dốc sông suối lớn, độ ổn định của lớp đất mặt yếu do quá trình phong hóa, độ che phủ của thảm thực vật

thấp hoặc do các hoạt động sinh hoạt, sản xuất.

Dòng chảy lũ bùn đá chứa nhiều bùn, cát, sỏi, đá kích thước lớn; vận tốc dòng chảy có thể đạt tới hàng chục m/s. Với động năng của vật thể di chuyển tốc độ cao cộng thêm sự linh hoạt của dòng chảy trên bề mặt địa hình gây ra những thiệt hại rất lớn về người và tài sản [2]. Theo Thống kê từ Tổng cục phòng, chống thiên tai trong giai đoạn từ 1953 - 2006, Việt Nam đã xảy ra 448 trận lũ bùn đá, trung bình 7 trận/năm. Nhưng sang giai đoạn từ 2000 - 2015, tổng số trận lũ bùn đá là 250 trận, trung bình 15 - 16 trận/năm [3].

Trước những hậu quả nghiêm trọng do lũ bùn

Ngày nhận bài: 12/8/2024

Ngày thông qua phản biện: 09/10/2024

Ngày duyệt đăng: 21/11/2024

đã gây ra, yêu cầu nghiên cứu, ứng dụng các giải pháp nhằm giảm thiểu tối đa tác động của hiện tượng trên là cấp thiết. Việc kết hợp được một giải pháp công trình linh hoạt trên cơ sở sử dụng các cơ sở hạ tầng phòng chống thiên tai hoặc thủy lợi sẵn có là một giải pháp tận dụng được nội lực của địa phương và giảm được kinh phí đầu tư ban đầu. Nhóm tác giả đã nghiên cứu

áp dụng công nghệ đập ngăn bùn đá bằng lưới thép kết hợp đập dâng sẵn có ở vùng miền núi phía Bắc. Giải pháp sử dụng lưới thép cường độ cao đã được áp dụng ở nhiều nước và ở một số công trình giao thông trọng điểm ở Việt Nam nhưng chưa được nghiên cứu ứng dụng cho các công trình ngăn lũ bùn đá.



Hình 1: Lũ bùn đá phá hủy trường học [1].



Hình 2: Hiện trạng khu vực sau khi lũ bùn đá đi qua

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá hiệu quả ngăn lũ bùn đá của một công trình đập dâng sử dụng lưới thép cường độ cao ở Điện Biên. Bài báo này tập trung trình bày việc đánh giá, phân tích chế độ dòng chảy bùn đá qua công trình dựa trên việc so sánh trạng thái dòng chảy qua công trình trong trường hợp có và không có lưới chắn bùn đá. Bài viết cũng hướng tới giải quyết vấn đề tương tác giữa dòng bùn đá với lưới thép. Kết quả này là thông số đầu vào cho bài toán xác định cường độ lưới thép nhằm đảm bảo an toàn trong một số trận lũ bùn đá thiết kế.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ ỨNG DỤNG LƯỚI THÉP CƯỜNG ĐỘ CAO

2.1. Cơ sở lý thuyết lưới thép cường độ cao

Trong các nghiên cứu trên thế giới, lưới thép cường độ cao được đặt ở giữa các kênh/dòng chảy nơi có thể phát sinh lũ bùn đá. Một hay nhiều hàng lưới thép cường độ cao bảo vệ được kéo dài từ bờ này sang bờ kia. Giữa lòng sông và mép dưới của lưới, có một không gian trống có thể xả dòng chảy bình thường và nước lũ ở mức thấp. Khoảng trống này cũng là không gian di chuyển cho các loại cá và sinh vật trong dòng

suối.



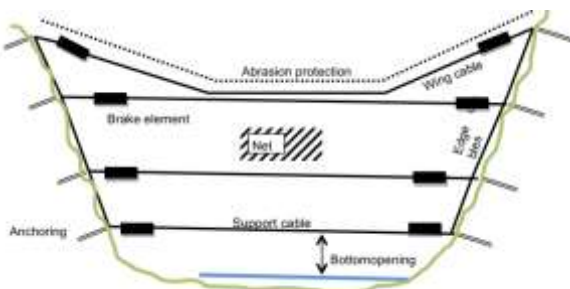
Hình 3: Hệ thống lưới thép nhiều lớp đang hoạt động [4]



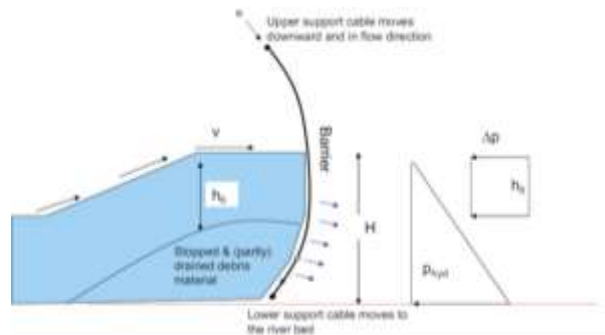
Hình 4: Hệ thống lưới thép linh hoạt đầy bùn đất [5].

Lưới bảo vệ được kéo căng bằng cách sử dụng các cáp hỗ trợ và cũng được cố định dọc theo khu vực bờ kênh. Các cáp được neo vào bờ kênh. Nếu chiều rộng của đoạn sông quá rộng (thường >15÷20m), hệ giàn trung gian có thể được lắp đặt hỗ trợ cho cáp. Ngoài ra, các dây cáp có thêm tăng đơ để căn chỉnh độ căng phù hợp với các tải trọng thực tế. Trong trường hợp lưới thép cường độ cao được đặt trên tràn, cáp cần phải được trang bị bảo vệ mài mòn.

nhất là khoan để thi công neo cho lưới. Vật liệu có thể được vận chuyển bằng xe tải hoặc trực thăng và lắp đặt mà không cần sử dụng máy móc nặng, phức tạp. Công trình hoàn thành mà không có thay đổi lớn về kết cấu. Theo quy tắc, bảo vệ chống ăn mòn của các thành phần lưới thép đảm bảo tuổi thọ tối thiểu không có sự cố từ 30 đến 50 năm. Nếu có sự cố lũ bùn đá, lưới thép cần được sửa chữa một cách hiệu quả và có tổ chức, đồng thời loại bỏ những cốt liệu lớn trước lưới. Thông thường, các thiết bị hãm đặc biệt (phanh) sẽ được được thay thế [6].



Hình 5: Bố trí cơ bản của một Lưới thép điển hình [6]



Hình 6: Mặt cắt tính toán lực tác dụng lên lưới thép

Các lưới thép cường độ cao được thiết kế để làm chậm và ngăn các hạt cốt liệu lớn trong dòng chảy lũ bùn đá tới nhờ khả năng biến dạng lớn của chúng. Cấu trúc lưới cho phép thoát nước của hỗn hợp cốt liệu có trong dòng lũ, nhanh chóng dừng lại và ổn định nhờ ma sát tăng dần của các hạt rắn. Hạt cốt liệu lớn được ngăn chặn hoặc giảm tốc (lắng đọng) cho đến khi lưới thép hoàn toàn đầy.

Các lực tác động lên lưới thép phụ thuộc vào thành phần vật chất trong dòng chảy lũ bùn đá và điều kiện địa chất của lòng suối. Chiều cao và tốc độ dòng chảy ảnh hưởng đáng kể đến áp lực tác động dự kiến. Tổng thể tích kết hợp với độ dốc kênh và góc lắng đọng liên quan đến dung lượng giữ lại tổng thể của mỗi lưới chắn thép.

Ưu điểm lớn của lưới thép cường độ cao là việc lắp đặt đơn giản và nhanh chóng. Thiết bị lớn

Đối với tải trọng tối đa của một lưới thép cường độ cao cản dòng chảy lũ bùn đá, giả định rằng dòng chảy bùn đá xảy ra đột ngột và do đó lưới chắn thép chịu tải bởi một va chạm ban đầu tương đối mạnh (Hình 10).

Giai đoạn sinh lũ thường bắt nguồn ở những sườn dốc có độ dốc lớn (từ 15° trở lên, phổ biến trên 20°). Dòng chảy gia tăng động năng ở giai đoạn tiếp theo trước khi lắng lại ở khu vực thuận lợi nơi có độ dốc nhỏ hơn 10° . Để tạo điều kiện thuận lợi cho đập làm việc, các lưới thép cường độ cao ngăn bùn đá nên được bố trí trong khu vực có độ dốc nhỏ hơn 10° , nơi động năng dòng lũ có xu hướng giảm dần [2].

2.2. Mô phỏng tương tác dòng chảy với vật thể trong không gian 3 chiều sử dụng FLOW-3D

Nghiên cứu sử dụng mô hình số FLOW-3D để mô phỏng tương tác của dòng lũ bùn đá với công trình đập dâng kết hợp lưới thép cường độ cao. FLOW-3D sử dụng phương trình Navier-Stokes làm phương trình chủ đạo. Phương trình này là sự kết hợp của hai phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng [7].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

Trong đó: u_i là thành phần vận tốc theo 3 phương x, y, z ; P là thành phần áp suất; ν là hệ số nhớt động học. Phương trình 1 và 2 chỉ có thể giải được bằng toán học trong một số bài toán dòng chảy có điều kiện đơn giản. Dòng chảy trong các công trình thủy lợi hầu hết là dòng chảy rối.

Các giả thiết

Để đơn giản hóa tính toán, giả thiết toàn bộ phần vật liệu (debris) theo dòng lũ bùn đá qua lưới đều bị giữ lại, chỉ có dòng chảy bùn đất thoát qua.

Trọng lượng riêng dòng chảy lũ bùn: $\gamma_{\text{lũ bùn}} = 1550 \text{ kg/m}^3$. Trọng lượng riêng của debris $\gamma_{\text{debris}} = 1400 \text{ kg/m}^3$

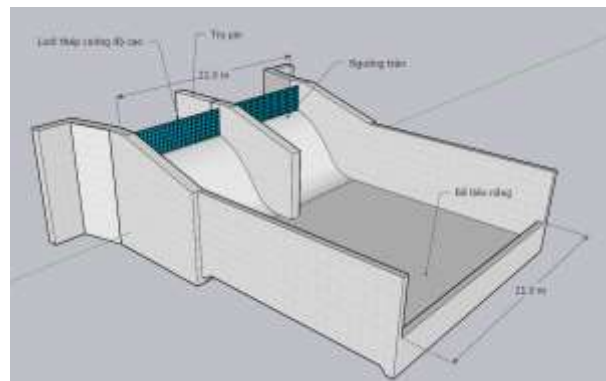
3. MÔ PHỎNG ỨNG DỤNG LƯỚI THÉP CƯỜNG ĐỘ CAO TRÊN ĐỈNH ĐẬP DÂNG MƯỜNG TÙNG

3.1. Thông tin về đập dâng

Đập dâng Mường Tùng thuộc xã Mường Tùng huyện Mường Chà tỉnh Điện Biên là ngã ba sông của hai dòng Nậm He và Nậm Lay là các chi lưu phía nam của sông Đà. Hai dòng suối này là nguyên nhân chính gây ra các trận lũ quét liên tiếp trong các năm 1990 - 1991, 1994, 1996 và 2000 làm chết và bị thương hàng trăm người cùng hàng nghìn gia súc, gia cầm, cây trồng,... Chiều cao đập $H=5\text{m}$, bề rộng đập $B=21\text{m}$, Kết cấu đập vật liệu đá học xây bọc BTCT, $q = 4 \div 8 \text{ m}^3/\text{s.m}$, cửa lấy nước bên. Tổng chiều dài hệ thống kênh là 3km. Diện tích tưới thiết kế là 32 ha, được xây dựng 2010.

3.2. Thiết lập mô hình

Tạo dựng mô hình ba chiều của đập dâng Mường Tùng với kích thước 1:1 trong phần mềm Sketchup. Chi tiết kích thước được thể hiện trên Hình 7.



Hình 7: Mô phỏng đập dâng Mường Tùng kết hợp lưới thép cường độ cao

3.3. Các bước thiết lập bài toán

3.3.1. Chia lưới miền tính toán

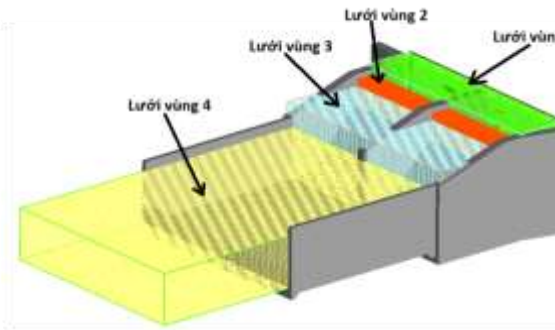
Phần mềm tính toán với phương pháp thể tích hữu hạn, ứng dụng phương trình Navier-Stokes.

Ở vùng có độ yêu cầu cao về kết quả, lưới tính toán được chia dày hơn những vị trí khác. Trong mô hình tính toán này, lưới được chia thành 4

vùng lưới có kích thước khác nhau. Với các thông số vùng được chia như dưới Bảng 1 và hình 8.

Bảng 1: Kích thước lưới và số lượng

	Vùng 1	Vùng 2	Vùng 3	Vùng 4
Kích thước ô lưới (m)	0,2	0,1	0,2	0,2

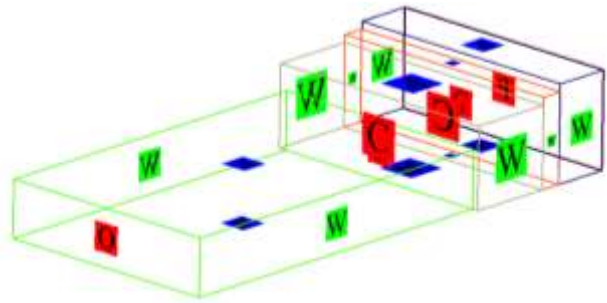


Hình 8: Các vùng chia lưới tính toán

Tổng số ô lưới	129.27	366.12	163.05	454.74
	2	0	9	0

3.3.2. Thiết lập điều kiện biên

Điều kiện biên ứng với mỗi vùng có sự khác nhau bởi vị trí và vai trò trong mô hình tính là khác nhau. Chi tiết các điều kiện biên khác được thể hiện trên hình 17 và Bảng 2.

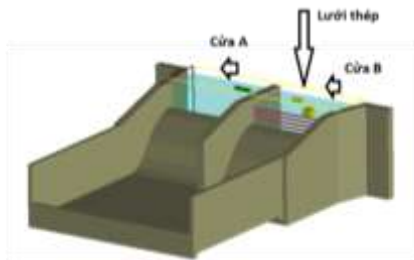


Hình 9: Mô tả điều kiện biên của mô hình

3.3.3. Lưới thép cường độ cao

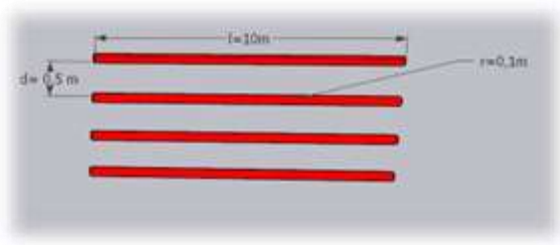
Đập dâng gồm hai đường tràn với kích thước B = 10 m;

Mô phỏng bài toán thủy lực nước tràn qua cả



Hình 10: Vị trí lưới thép trên đập dâng

hai cửa (cửa A không có lưới thép; cửa B có lưới thép). Nhằm làm rõ sự khác biệt giữa việc có lưới thép hay không có lưới chắn thép.



Hình 11: Kích thước lưới thép mô phỏng

Lưới thép cường độ cao (nan chính) được bố trí ở cửa B với các thông số như sau: Kích thước mặt cắt ngang r = 0,1m ; chiều dài l = 10 m. Khoảng cách của các thanh là d = 0,5 m.

3.3.4. Vị trí kích thước vật thể trôi (debris 1 và debris 2)

Vật thể trôi bao gồm hai loại vật thể (vật thể hình khối và vật thể hình trụ). $\gamma_{\text{đá}} = 1550 \text{ kg/m}^3$; $\gamma_{\text{debris}} = 1400 \text{ kg/m}^3$. Hai dạng vật thể này được mô phỏng cùng dòng chảy lũ bùn tại khoang B (debris1) và khoang A (debris2) như bảng dưới đây.

Bảng 2: Mô phỏng vật thể trôi tại khoang B và khoang A

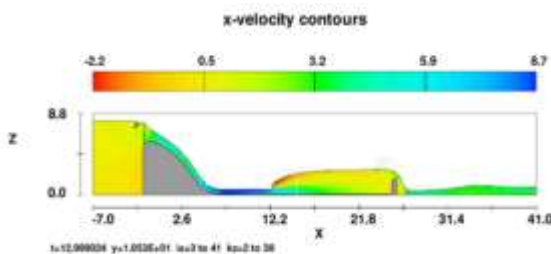
Debris 1	Dạng hình trụ và hình khối lập phương, khoang B	
Debris 2	Dạng hình trụ, khoang A	

3.4. Kết quả tính toán

3.4.1. Kết quả phân tích vận tốc và áp suất

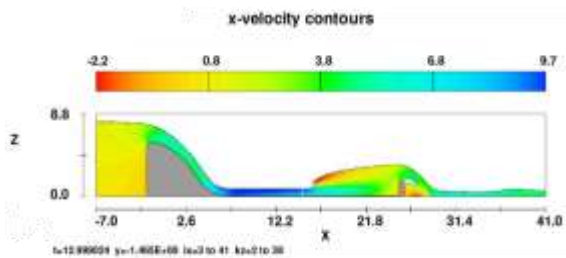
Lưới thép cường độ cao có ảnh hưởng đến các thông số thủy lực như vận tốc, áp suất dòng lũ bùn qua toàn bộ tràn, bề tiêu năng.

Kết quả vận tốc chất lỏng tại khoang A, khoang B được hiển thị ở Hình 12 và Hình 13. Vận tốc cửa A (cửa có lưới thép) có giá trị nằm trong khoảng từ (-2,2 đến 8,7) m/s và $V_{\max} = 8,7$ m/s đạt được tại vị trí $x = 7,4$ m. Vận tốc cửa B (cửa không có lưới thép) có giá trị nằm trong khoảng



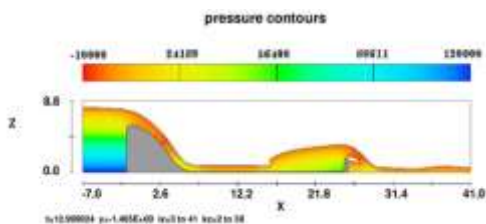
Hình 12: Mặt cắt zx qua cửa B của có lưới thép

từ (-2,2 đến 9,7) m/s và $V_{\max} = 9,7$ m/s đạt được tại vị trí $x = 9,0$ m. Kết quả thu được cho thấy ảnh hưởng của lưới thép cường độ cao lên vận tốc dòng chảy lũ là rất đáng kể. Vận tốc tới gần tại hai cửa là xấp xỉ bằng nhau và tăng dần sau khi chảy qua ngưỡng thực dụng, đạt giá trị cực đại tại vị trí nằm trong khoảng (7,0 đến 12,2)m, ngay sau công trình xuất hiện dòng chảy xiết. Vì có sự cản trở của lưới thép cường độ cao làm cho nước nhảy sau công trình thay đổi theo hướng có lợi, dòng chảy có lưu tốc thấp hơn, áp lực lên công trình cũng giảm.



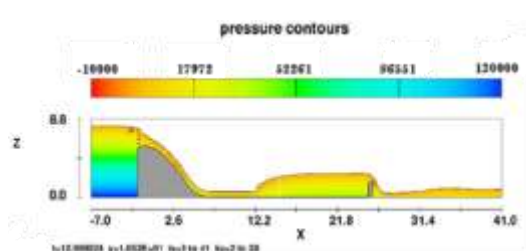
Hình 13: Mặt cắt zx qua cửa A không có lưới thép

Kết quả áp suất chất lỏng tại khoang A, khoang B được hiển thị ở Hình 14 và Hình 15. Kết quả áp suất tại khoang A (không có lưới thép) có giá trị nằm trong khoảng (-8.022 đến 120.822) Pa, kết quả áp suất tại khoang B (có lưới thép) có giá trị nằm trong khoảng (-16.318 đến 120.841) Pa.



Hình 14: Mặt cắt zx qua cửa A của không có lưới thép

Áp suất chất lỏng tại hai trường hợp đều có sự khác biệt, bên cửa B (cửa có lưới thép) do có lưới thép cường độ cao chắn ngang ngưỡng tràn làm cho nước phía thượng lưu có dâng lên cao hơn bên cửa A (cửa không có lưới thép) vậy nên áp suất lớn nhất tại chân đập bên cửa A bé hơn áp suất lớn nhất tại cửa B.



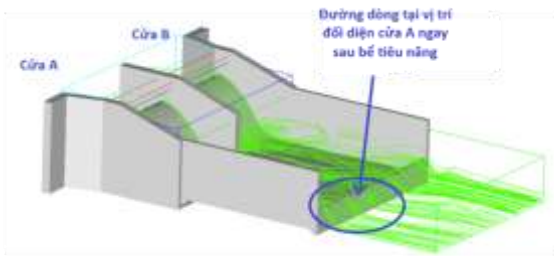
Hình 15: Mặt cắt zx qua cửa B có lưới thép

Ngoài ra kết quả còn cho thấy ảnh hưởng của lưới thép cường độ cao đến lưu lượng dòng chảy là khá rõ rệt. Lưu lượng của dòng lũ phụ thuộc vào diện tích mặt cắt ướt và lưu tốc dòng lũ. Lưu lượng dòng chảy bên cửa A (cửa không

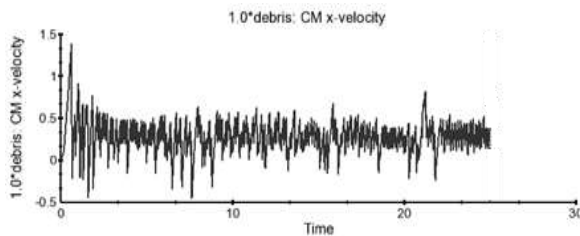
có lưới thép) không bị ảnh hưởng đến lưới thép nên lớn hơn lưu lượng dòng chảy bên cửa B (cửa có lưới thép).

3.4.2. Kết quả phân tích đường dòng.

Đường dòng mô phỏng quá trình vận động của dòng chảy lũ tại thời điểm dòng chảy ổn định. Kết quả cho thấy đường dòng tại vị trí đối diện khoang A (cửa không có lưới thép) có xu hướng xoáy cuộn vào chận tường phía sau bề tiêu năng, vì vậy tại vị trí này có thể diễn ra xói sâu vào chân công trình như mô phỏng Hình 16. Kết quả bên còn lại khoang B (cửa có lưới thép) cho thấy đường dòng có xu hướng thuận dòng hơn và không tác động nhiều vào chân công trình như bên khoang A. Điều đó cho thấy hiệu quả của lưới thép làm giảm năng lượng dòng lũ.



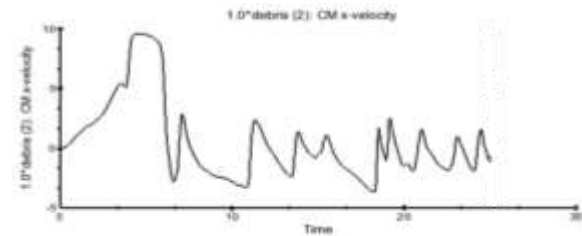
Hình 16: Đường dòng tại thời điểm dòng chảy ổn định



Hình 17: Debris(1): CM x- velocity

3.4.3. Biến thiên vận tốc của vật thể theo thời gian

Mối quan hệ giữa vận tốc và thời gian của các vật thể có trong dòng lũ được mô phỏng gồm: debris1 mô phỏng bên phía có lưới thép cường độ cao (khoang B), debris2 được mô phỏng bên không có lưới thép (khoang A). Kết quả cho thấy debris1 bị lưới ngăn lại ở thượng lưu và có vận tốc thay đổi liên tục dao động quanh giá trị 0,3 m/s theo thời gian. Giá trị này tương ứng với giá trị của vận tốc dòng lũ trước lưới. Debris2 có vận tốc thay đổi đạt đến giá trị lớn nhất tại thời điểm $t = 5s$ (mô phỏng), sau đó giảm xuống và tiếp tục dao động lên xuống quanh giá trị 0. Mô phỏng cho thấy debris2 bị mắc kẹt lại ở bề tiêu năng (Hình 17, 18).



Hình 18: Debris(2) CM x - velocity

3.5. Thảo luận về ảnh hưởng của lưới thép đến dòng chảy lũ bùn đá

Đặc trưng thủy lực của dòng chảy lũ bùn đá chịu ảnh hưởng bởi lưới thép cường độ cao: bên khoang A (cửa không có lưới thép) có hình thành xoáy cuộn sau bề tiêu năng – do lưu tốc của dòng bùn còn khá cao. Trong khi đó tại khoang B (cửa có lưới thép) lưu tốc giảm và động năng dòng chảy đã giảm so với giá trị tại khoang A. Như vậy, tác dụng của lưới thép, ngoài việc ngăn chặn các vật thể có trong dòng chảy lũ thì còn giảm động năng của dòng lũ bùn, tạo dòng chảy êm hơn phía hạ lưu.

Dựa trên các kết quả mô phỏng đặc điểm thủy lực của dòng lũ bùn lên tràn và lưới thép, hoàn toàn có thể tính toán kiểm tra cường độ của lưới thép. Đây là một bài toán sẽ được phân tích sâu hơn ở nghiên cứu khác.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Giải pháp lưới thép kết hợp đập dâng có hiệu quả trong việc giảm năng lượng của dòng lũ bùn đá, ngăn và làm chậm dòng lũ, đặc biệt ở những nơi có nguy cơ cao xuất hiện lũ bùn đá/dòng chảy lũ bùn. Việc đánh giá ở nghiên cứu này có nhiệm vụ khẳng định về mặt lý thuyết tác dụng của lưới thép trên những tràn xả lũ đã và đang hoạt động

ở miền núi phía Bắc.

Dù có ưu điểm về khả năng đảm bảo chế độ thủy lực qua tràn, giảm các tác động tiêu cực của dòng lũ bùn. Tuy nhiên quá trình hoạt động của lưới thép ngăn giữ lại phía thượng lưu đập dâng các vật liệu và vật thể trôi có kích thước lớn hơn kích thước ô lưới. Thời gian càng lâu, các vật liệu này tích tụ nhiều gây tắc nghẽn dòng chảy về hạ lưu. Chính vì vậy cần chú ý nạo vét định kỳ trả lại hiện trạng phía thượng lưu đập dâng. Phía hạ lưu cũng cần được nạo vét để đảm bảo dòng chảy vào mùa lũ.

Trong tương lai, nhóm nghiên cứu hướng tới giải quyết bài toán đánh giá kết cấu lưới thép cường độ cao. Ngoài ra, từ kết quả này cùng với các nghiên cứu chuyên sâu khác, có thể đề xuất các tiêu chuẩn, hướng dẫn kỹ thuật, cách lựa chọn vật liệu chế tạo để tối ưu hóa giá thành sản phẩm, từ đó có khả năng nhân rộng ứng dụng trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vũ Bá Thao, “Công trình phòng trị lũ bùn đá,” *Tap chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, vol. 60, pp. 54–63, Jun. 2020.
- [2] T.-K. Nguyen, T.-H. Nguyen, and H. Nghia, “Nghiên cứu khả năng áp dụng giải pháp đập hở khung thép ngăn lũ bùn đá tại khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam,” *Tap chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, vol. 13, pp. 28–37, Nov. 2019, doi: 10.31814/stce.nuce2019-13(5V)-04.
- [3] Thông tấn xã Việt Nam, “Căn nguyên lũ lụt, sạt lở đất.” [Online]. Available: <https://baotintuc.vn/long-form/emagazine/can-nguyen-lu-lut-sat-lo-dat-20201103094854529.htm>
- [4] C. Wendeler, V. Budimir, and M. Denk, “Debris flow protection with flexible ring net barriers – 10 years of experience,” *ce/papers*, vol. 2, no. 2–3, 2018, doi: 10.1002/cepa.809.
- [5] C. Wendeler, A. Volkwein, A. Roth, M. Denk, and S. Wartmann, “Field measurements used for numerical modelling of flexible debris flow barriers,” in *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings, 2007*.
- [6] A. Volkwein, C. Wendeler, and G. Guasti, “Design of flexible debris flow barriers,” pp. 1093–1100, Jan. 2011, doi: 10.4408/IJEGE.2011-03.B-118.
- [7] B. J. Kim, J. H. Hwang, and B. Kim, “FLOW-3D Model Development for the Analysis of the Flow Characteristics of Downstream Hydraulic Structures,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/su141710493.

LỜI CẢM ƠN:

Bài báo sử dụng kết quả nghiên cứu của đề tài: “Nghiên cứu đề xuất giải pháp thiết kế đập dâng miền núi kết hợp đa mục tiêu nhằm giảm thiểu ảnh hưởng lũ bùn đá”, mã số ĐTĐL.CN-83/21. Tác giả xin chân thành cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ đã tạo điều kiện để Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam và Nhóm nghiên cứu thực hiện đề tài này.