

XÁC ĐỊNH CHIỀU DÀI HIỆU QUẢ CỦA NỀN NHÁM TRONG ĐIỀU KIỆN NƯỚC NHẢY ỔN ĐỊNH VÀ TỰ DO BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE ROUGH BED LENGTH FOR FREE AND STABLE HYDRAULIC JUMPS USING 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

DOI: <https://doi.org/10.665154/jmst.916>

Tóm tắt

Nước nhảy là một giải pháp tiêu năng hiệu quả, được ứng dụng rộng rãi trong các công trình thoát lũ và đóng vai trò quan trọng trong bảo vệ hạ lưu công trình. Gần đây, nước nhảy tự do trên nền nhám được quan tâm nghiên cứu nhờ khả năng nâng cao hiệu quả tiêu năng và giảm quy mô bể tiêu năng. Tuy nhiên, việc xác định chiều dài nền bê cần gia cố nhám để bảo đảm sự hình thành nước nhảy hoàn chỉnh vẫn chưa được làm rõ. Nghiên cứu này ứng dụng mô hình Flow-3D, kết hợp mô hình rối RNG k-ε và phương pháp thể tích chất lỏng (VOF), nhằm xác định chiều dài nền nhám hiệu quả đối với nước nhảy hoàn chỉnh. Kết quả nghiên cứu với số Froude đầu vào $Fr_1 = 6,77$ cho thấy chiều dài nền nhám hiệu quả (L_n) bằng 0,8 lần chiều dài nước nhảy trên đáy nhẵn (L_w), bảo đảm hiệu quả tiêu năng tốt và trạng thái dòng chảy ổn định. Đồng thời, phạm vi cần gia cố đáy nhám nhỏ nhất (L_{gc}) chỉ khoảng 0,2 đến 0,3 lần L_n ; sau phạm vi này, đáy kênh chỉ cần tạo nhám mà không yêu cầu gia cố kết cấu móng phức tạp. Ngoài ra, các kết quả thu được cũng cung cấp cơ sở tham khảo hữu ích cho thiết kế và tối ưu hóa bề tiêu năng trong các công trình thủy cũng như các hạng mục thoát nước trên đường cao tốc vùng đồi núi.

Từ khóa: Chiều dài hiệu quả của nền nhám, nước nhảy, nền nhám, mô phỏng động lực học chất lỏng - CFD.

Abstract

A hydraulic jump is an effective energy dissipation solution, widely applied in flood control structures and playing a crucial role in protecting downstream areas. Recently, free-stable hydraulic jumps on rough beds have attracted research interest due to their potential to improve energy dissipation efficiency and reduce the size of stilling basins. However, determining the length of

rough beds in the stilling basins zone to ensure the formation of a complete hydraulic jump until now has not been completely resolved. This study applied a Flow-3D model, which combines the RNG k-ε turbulence model and the Volume of Fluid (VOF) method, to determine the effective rough bed length for a complete hydraulic jump. The study results, with an input Froude number $Fr_1 = 6,77$, show that the effective rough bed length (L_n) is equal to 0.8 times the jump length on a smooth bed (L_w), ensuring good energy dissipation efficiency and stable flow conditions. At the same time, the minimum required rough bed reinforcement range (L_{gc}) is only about 0.2 to 0.3 times L_n ; beyond this range, the channel bed only needs roughening without requiring complex abutment reinforcement. In addition, the results obtained also provide a useful reference basis for the design and optimisation of stilling basins in hydraulic structures, as well as drainage items on highways in hilly areas.

Keywords: Effective length of rough bed, rough bed, hydraulic jump, Computational Fluid Dynamics - CFD.

1. Đặt vấn đề

Hiện tượng nước nhảy (hydraulic jump) là một quá trình thủy lực phức tạp, thường xảy ra khi dòng chảy xiết (supercritical flow) chuyển sang trạng thái chảy êm (subcritical flow) sau khi vượt qua công trình xả lũ hoặc đập tràn [1, 2]. Đây là một cơ chế tiêu hao năng lượng dòng chảy tự nhiên hiệu quả, đóng vai trò quan trọng trong việc bảo vệ nền móng và các kết cấu hạ lưu của công trình thoát lũ. Trong điều kiện vận hành ổn định và tự do, nước nhảy giúp giảm đáng kể năng lượng dư thừa, hạn chế hiện tượng xói lở và phá hoại nền công trình.

Trong thực tế, điều kiện nền của bể tiêu năng có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả tiêu hao năng lượng của nước nhảy. Việc sử dụng nền nhám đã được chứng

minh là một giải pháp kỹ thuật hữu hiệu nhằm tăng cường quá trình tiêu năng thông qua việc tạo các xoáy rối, gia tăng ma sát đáy và phân tán năng lượng dòng chảy [3, 4]. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, sự hiện diện của nền nhám không chỉ giúp rút ngắn chiều dài nước nhảy L_j mà còn giảm chiều sâu hạ lưu yêu cầu y_2 , từ đó tối ưu hóa quy mô và chi phí xây dựng công trình [5-12].

Các công trình nghiên cứu trước đã tập trung khảo sát ảnh hưởng của độ nhám, hình dạng phần tử nhám và bố trí nhám đối với đặc tính thủy lực của nước nhảy hoàn chỉnh [4, 9, 10, 13-15]. Tuy nhiên, việc xác định chiều dài nền nhám hiệu quả, được hiểu là phạm vi nền cần được bố trí gia cố nhám nhằm vừa đảm bảo khả năng chống chế và duy trì nước nhảy ổn định, vừa đạt hiệu quả tiêu năng tương đương với trường hợp nền nhám toàn phần, cho đến nay vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống và đầy đủ. Khoảng trống nghiên cứu này đặc biệt rõ nét khi xem xét dưới góc độ mô phỏng động lực học chất lỏng bằng các công cụ tính toán tiên tiến như mô hình số Flow-3D [16].

Vi vậy, nghiên cứu này được triển khai nhằm xác định chiều dài nền nhám hiệu quả trong điều kiện nước nhảy tự do và ổn định, thông qua mô phỏng số, sử dụng phần mềm Flow-3D với điều kiện dòng chảy xiết ở đầu kênh có số $Fr_1 = 6,77$. Nghiên cứu xem xét hai kiểu mô hình đáy nhám M_I8 và M_II8 được kế thừa từ kết quả nghiên cứu của T. C. Tý và cộng sự [4], đại diện cho các dạng bố trí điển hình của phần tử nhám trên đáy bê tông. Trong đó, các phần tử nhám có dạng lăng trụ tam giác vuông được bố trí liên tục theo hướng ngược dòng chảy đối với mô hình M_I và xuôi dòng chảy cho mô hình M_II, qua đó cho phép đánh giá một cách hệ thống ảnh hưởng của chiều dài nền nhám đến đặc trưng thủy lực và hiệu quả tiêu năng của nước nhảy.

Kết quả nghiên cứu dự kiến sẽ đóng góp cơ sở khoa học tin cậy cho việc tối ưu hóa thiết kế bề tiêu năng, đồng thời mang lại giá trị ứng dụng thiết thực trong công tác thiết kế, vận hành các hệ thống xả lũ và thoát nước của công trình thủy lợi cũng như các tuyến đường cao tốc khu vực đồi núi. Những đóng góp này đặc biệt có ý nghĩa trong bối cảnh chế độ dòng chảy lũ ngày càng biến đổi phức tạp và tiềm ẩn nhiều bất lợi đối với công trình dưới tác động ngày càng rõ nét của biến đổi khí hậu.

2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình toán Flow-3D

Mô hình thủy lực Flow-3D là một phần mềm/ công cụ tính toán động lực học chất lỏng ba chiều (3D)

chuyên dụng giải quyết các bài toán thủy lực dòng chảy hở và tương tác chất lỏng với công trình xây dựng [16]. Mô hình này giải hệ phương trình Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) về chuyển động của chất lỏng bằng cách sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn [16].

Trong nghiên cứu này, mô hình rối RNG $k-\epsilon$ được sử dụng để mô phỏng các đặc trưng dòng chảy rối phức tạp trong vùng nước nhảy và khu vực nền nhám [4]. Mô hình này là mở rộng của mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn do Launder và Spalding [17] đề xuất, trong đó mô tả động năng rối (k) và tốc độ tiêu tán (ϵ) thông qua hai phương trình vi phân độc lập, giúp mô phỏng quá trình vận chuyển và khuếch tán năng lượng rối trong các dòng chảy có độ rối cao.

Mô hình rối RNG $k-\epsilon$, được phát triển bởi Yakhot và Orszag [18] dựa trên lý thuyết nhóm tái chuẩn hoá (Renormalization Group Theory), đã bổ sung các thuật ngữ hiệu chỉnh để mô tả chính xác hơn ảnh hưởng của sự uốn cong dòng chảy, quá trình tách dòng và vùng rối mạnh phù hợp với các hiện tượng thường xuất hiện trong nước nhảy. Nhờ vậy, mô hình này có khả năng cải thiện đáng kể độ chính xác của mô phỏng số đối với các bài toán dòng chảy có biến thiên mạnh về vận tốc và năng lượng, so với mô hình rối $k-\epsilon$ truyền thống.

Trong phần mềm Flow-3D, mô hình rối RNG $k-\epsilon$ được tích hợp cùng phương pháp thể tích chất lỏng (VOF) [19] để mô phỏng và định vị giao diện giữa các pha và sự dao động của mặt nước. Sự kết hợp giữa hai mô hình này cho phép mô phỏng chi tiết cấu trúc rối, sự phân bố vận tốc, cũng như tổn thất năng lượng trong vùng nước nhảy trên nền nhám có hình dạng và chiều dài khác nhau. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng mô hình rối RNG $k-\epsilon$ và phương pháp VOF cho vấn đề nghiên cứu.

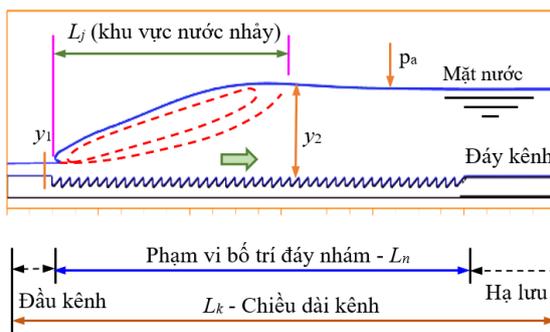
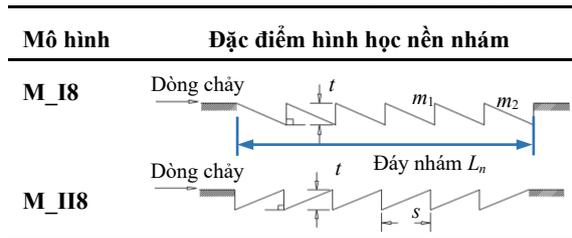
2.2. Xây dựng mô hình nền nhám và các trường hợp nghiên cứu

Bề tiêu năng (Stilling basin) được thiết lập theo mô hình kênh dẫn lăng trụ mặt cắt chữ nhật ba chiều, có chiều dài và chiều cao thành kênh đủ để bảo đảm nước nhảy phát triển hoàn toàn trong miền tính toán.

Nền nhám được mô phỏng bằng cách bố trí các phần tử nhám dạng lăng trụ tam giác vuông đặt liên tiếp nhau từ vị trí đầu kênh (chân nước nhảy) xuôi về hạ lưu kênh dẫn theo chiều dòng chảy. Chi tiết bố trí nền nhám trong bề tiêu năng và sơ đồ nước nhảy được minh họa trong Hình 1. Trong đó, các thông số về hình học nền nhám và điều kiện dòng chảy được thể hiện cụ thể trong Bảng 1 và 2.

Nghiên cứu này sử dụng sơ đồ và kết quả mô phỏng nước nhảy trên hai mô hình đáy nhám M_I8 và M_II8 (xem Bảng 1) cho các trường hợp mô phỏng số lần lượt là 38 và 83 [4]. Với chiều dài nền nhám bố trí trên đáy kênh tối thiểu bằng với trường hợp chiều dài nước nhảy trên nền nhẵn (L_{tr}) trong cùng điều kiện dòng chảy xiết đầu kênh. Kết quả xác định độ sâu liên hợp sau nước nhảy y_2 và chiều dài nước nhảy trên nền nhám L_j được thể hiện trong Bảng 2, tương ứng với số Froude đầu vào kênh/ bể là $Fr_1 = 6,77$.

Bảng 1. Mô hình đáy nhám nghiên cứu [4]



Hình 1. Nền nhám và sơ đồ nước nhảy ổn định, tự do [4]

Bảng 2. Kết quả mô phỏng số và thông số dòng chảy [4]

Trường hợp mô phỏng	m_1	m_2	Fr_1	y_1	y_2	L_j
M_I8 (No.38)	0,0	1,5	6,77	2,0	14,2	0,60
M_II8 (No.83)	1,5	0,0	6,77	2,0	14,9	0,56

Trong đó: t, s là chiều cao và chiều rộng của phần từ nhám, có giá trị lần lượt là 2,0 và 3,0 cm; m_1, m_2 lần lượt là hệ số mái dốc phần từ nhám về thượng và hạ lưu kênh.

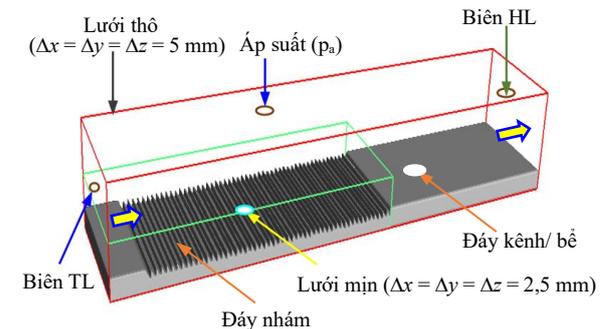
Nghiên cứu này thực hiện các mô phỏng số cho hai trường hợp bố trí đáy nhám gồm các phần từ thuận (M_II8) và ngược chiều dòng chảy (M_I8), đồng thời có cùng điều kiện về dòng chảy xiết đầu kênh và cố định mực nước hạ lưu như Bảng 2 (tương ứng với đáy nhám bố trí gần như toàn bộ đáy kênh), nhưng có các chiều dài phạm vi bố trí nền nhám thay đổi so với chiều dài nước nhảy trên đáy nhẵn L_{tr} (cố định điểm

chân nước nhảy tại đầu kênh, điểm bắt đầu bố trí đáy nhám), lần lượt các tỷ lệ L_n/L_{tr} là: 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1,0 và lớn hơn 1,0.

2.3. Thiết lập miền mô phỏng và gán các điều kiện biên cho mô hình số

Miền không gian tính toán được xác lập bao quát toàn bộ phần bề tiêu năng với khối lưới thô, vùng gần đáy và khu vực nước nhảy nhằm tăng cường độ chính xác trong mô phỏng vùng dòng rối mạnh và hỗn loạn được bố trí lưới mịn. Từ kết quả nghiên cứu của T. C. Tý và nnk [4], lưới thô và mịn được chọn gồm các phần tử có kích thước ba chiều như nhau ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$), cỡ lưới 5,0mm cho lớp lưới thô và 2,5mm cho lớp lưới mịn.

Điều kiện dòng chảy xiết được thiết lập cho biên thượng lưu - đầu kênh (Biên TL) bao gồm mực nước y_1 và vận tốc V_1 ; mực nước hạ lưu y_2 được gán cho biên hạ lưu (Biên HL); mặt nước (mặt thoáng) tiếp xúc với không khí tại biên trên được gán là áp suất khí quyển p_a ; đáy kênh được thiết lập biên tường cố định và biên đối xứng được gán cho hai bên thành bể, chi tiết được thể hiện trên Hình 2.



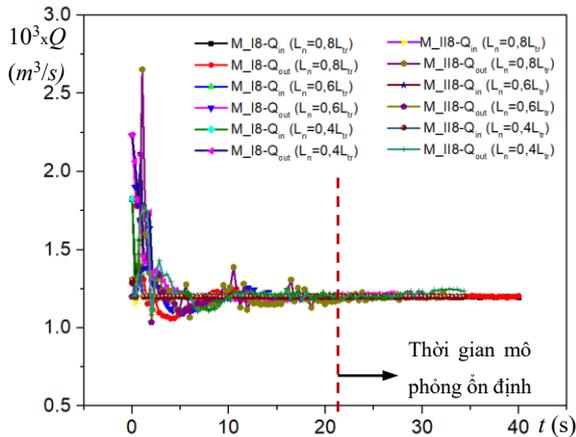
Hình 2. Thiết lập miền mô phỏng và biên tính toán cho mô hình đáy nhám nghiên cứu

3. Kết quả và thảo luận

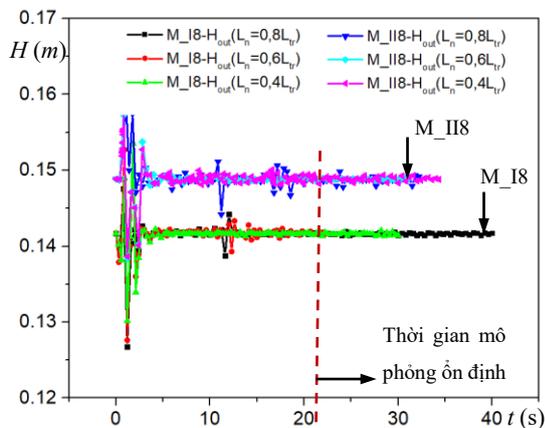
3.1. Xác nhận mô hình số

Việc kiểm định và hiệu chỉnh mô hình đã được thực hiện trong nghiên cứu của nhóm tác giả T. C. Tý và nnk [4] bao gồm: Các tham số về độ sâu liên hợp sau nước nhảy, chiều dài nước nhảy và biên dạng vận tốc dòng chảy khu vực nước nhảy cho kích thước lưới sử dụng trong các mô phỏng ở bài báo này. Do đó, nghiên cứu này chỉ kiểm tra tính ổn định đối với một số kết quả mô phỏng thủy lực về điều kiện biên lưu lượng Q và mực nước H (y_2) tại đầu và cuối kênh để mô phỏng đạt trạng thái nước nhảy tự do và ổn định, từ đó làm căn cứ để kết thúc quá trình tính toán mô phỏng số trên máy tính. Kết quả mô phỏng số sau đó được trích rút để phân tích cho các nội dung nghiên cứu ở phần tiếp theo.

Hình 3 và 4 cho thấy kết quả mô phỏng số về điều kiện lưu lượng vào ra (Q_{in} , Q_{out}) trong mô hình và biên mực nước hạ lưu (H_{out}) của mô hình đạt trạng thái ổn định với thời gian mô phỏng khoảng $t = 20$ s. Các tính toán mô phỏng số được thực hiện dao động trong khoảng từ 5 đến 32 giờ tùy thuộc vào trường hợp bố trí chiều dài đáy nhám khác nhau, tính toán CFD này được thực hiện trên máy tính có cấu hình cơ bản với 02 CPU Intel(R) Xeon(R) Platinum 8180 CPU @ 2.50 GHz (Logical processors: 112), 96 GB RAM.



Hình 3. Kết quả biên lưu lượng Q (m^3/s) của các mô phỏng số theo thời gian t (s)



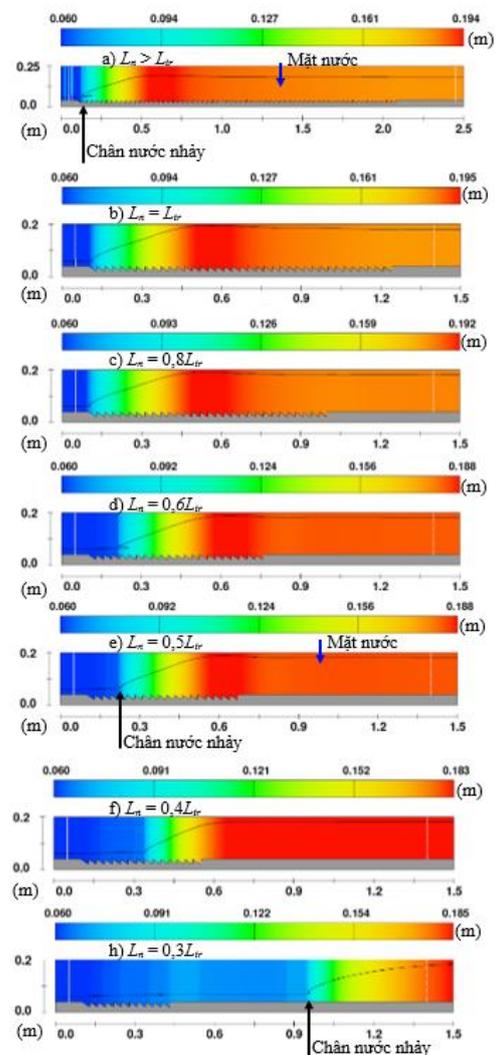
Hình 4. Kết quả biên mực nước H (m) của các mô phỏng số theo thời gian t (s)

3.2. Nối tiếp dòng chảy và hình thái nước nhảy trong bể tiêu năng

Kết quả mô phỏng số thu được từ mô hình Flow-3D cho thấy quá trình hình thành và phát triển của nước nhảy trên nền nhám diễn ra phù hợp với quy luật thủy lực quan sát được trong thực nghiệm và mô hình toán [3, 6, 8-10, 12, 20] khi trường hợp chiều dài nền nhám bố trí $L_n \geq 0,8L_{tr}$. Khi dòng chảy xiết tới từ cửa vào bể/ kênh gặp nền nhám (điểm không chế xảy ra

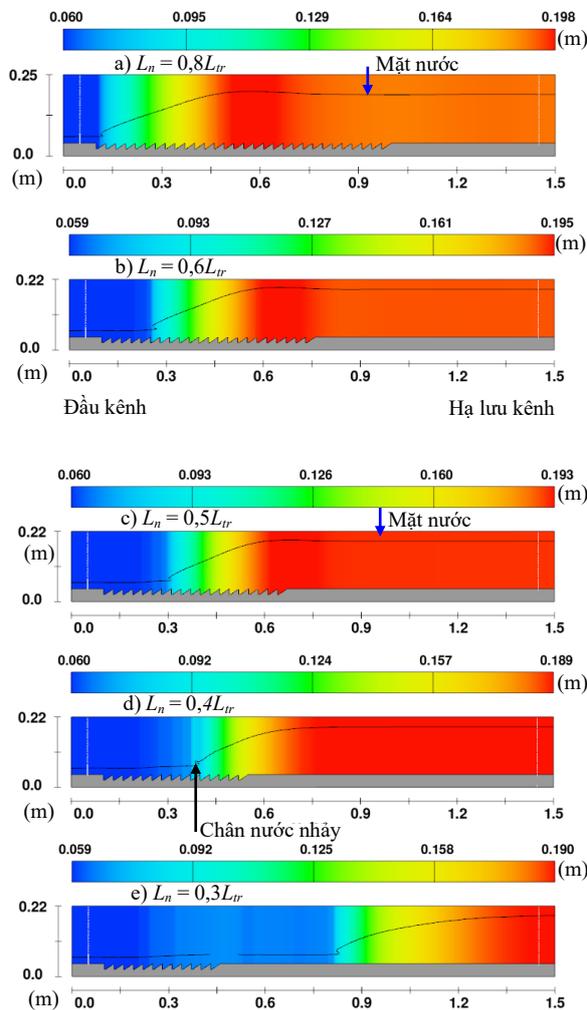
hiện tượng nước nhảy) lập tức xuất hiện vùng rối cục bộ hình thành tại các chỗ nhám sát đầu đáy nhám, kết hợp với vùng xoáy tuần hoàn mạnh xuất hiện trên dòng chủ kèm theo mặt nước dao động đáng kể như Hình 5 (a,b và c) và Hình 6a trình bày.

Khi chiều dài nền nhám trong khoảng từ 0,4 đến 0,8 lần chiều dài nước nhảy trên đáy trơn (L_{tr}) xuất hiện nước nhảy tự do, ổn định nhưng vị trí chân nước nhảy dịch chuyển dần cách xa vị trí không chế điểm bắt đầu xảy ra hiện tượng nước nhảy trên nền nhám, mặc dù mực nước hạ lưu vẫn được giữ không đổi trong các kịch bản nghiên cứu đối với mỗi mô hình đáy nhám nghiên cứu. Vị trí chân nước nhảy vẫn xuất hiện trong phạm vi của nền nhám, nhưng nền nhám không bao được toàn bộ khu vực nước nhảy, một phần nước nhảy kéo dài xuống phạm vi đáy nhẵn như Hình 5 (d, e và f) hay Hình 6 (b, c, và d).



Hình 5. Nối tiếp dòng chảy và hình thái nước nhảy đối với mô hình đáy nhám M_{I18} với số $F_{r1} = 6,77$

Trường hợp chiều dài đáy nhám nhỏ, với $L_n = 0,3L_{tr}$ như bố trí trên Hình 5h và 6e. Thì với cả hai mô hình đáy nhám M_I8 và M_II8 đều xuất hiện nước nhảy xa trên nền nhẵn phía hạ lưu kênh/ bể mà không xuất hiện trong vùng đáy nhám đã bố trí. Điều này có thể giải thích do chiều dài nền nhám L_n nhỏ nên năng lượng tiêu hao của dòng chảy xiết qua khu vực nền nhám nhỏ, do đó dòng chảy cần phải tiêu hao năng lượng thêm nên cần dịch chuyển về hạ lưu với mực nước hạ lưu giữ không đổi như trong nghiên cứu hoặc là phải tăng mực nước hạ lưu lên để khống chế nước nhảy xuất hiện tại vị trí được bố trí trong nghiên cứu, trường hợp này không được xem xét trong điều kiện nghiên cứu của bài báo.



Hình 6. Nối tiếp dòng chảy và hình thái nước nhảy đối với mô hình đáy nhám M_II8 với số $F_{r1} = 6,77$

Đối với nền nhẵn với cùng mực nước hạ lưu như với nền nhám, nước nhảy có xu hướng dịch chuyển xa về phía hạ lưu với vùng rối phát triển không đều. Ngược lại, khi bổ sung nền nhám, các phần tử nhám làm tăng cường ma sát đáy, thúc đẩy sự phát triển của

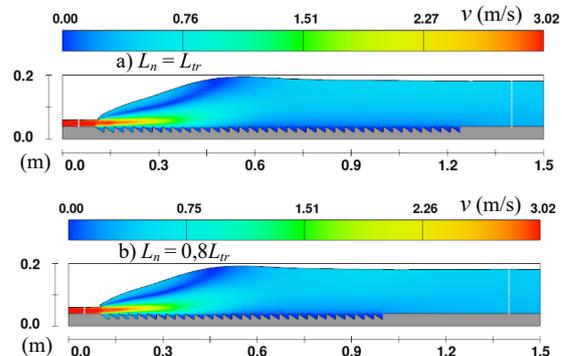
vùng rối, khiến nước nhảy hình thành sớm hơn và có hình thái ổn định hơn ở vị trí khống chế xuất hiện nước nhảy trong bể/ kênh.

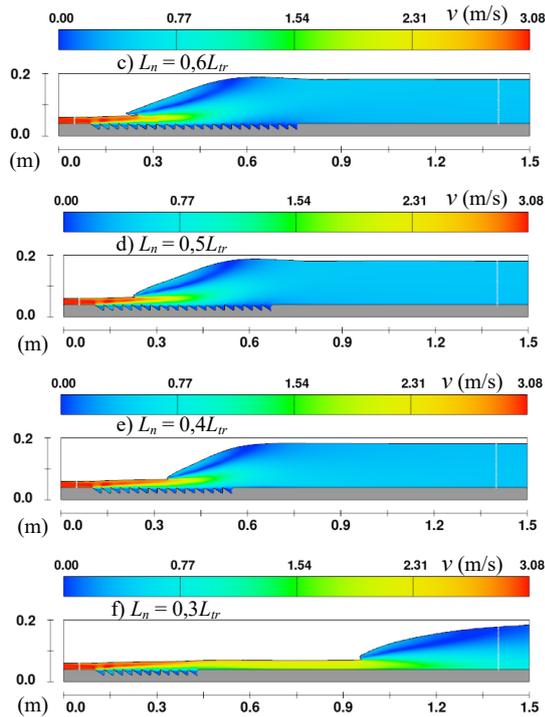
3.3. Phân bố vận tốc và tiêu năng đáy nhám

Khi bố trí chiều dài nền nhám L_n lớn hơn hoặc bằng $0,8L_{tr}$ thì đều xuất hiện nước nhảy tại vị trí đầu nền nhám cho cả mô hình đáy nhám M_I8 và M_II8, sự phân bố trường vận tốc được chuyển tiếp từ dòng chảy xiết đầu kênh thông qua nước nhảy chuyển thành dòng chảy êm hạ lưu gần như tương đồng (ít có sự thay đổi, khác biệt lớn) chi tiết thể hiện rõ trên Hình 7 (a, b) và Hình 8a. Ở đây, khu vực nước nhảy nằm trọn trong phạm vi của nền nhám, chiều dài khu vực nước nhảy L_j chiếm khoảng 30% đến 50% chiều dài nền nhám L_n bố trí, dòng chảy xiết bị suy giảm rất nhanh trong phạm vi khoảng $0,6L_j$ do ảnh hưởng trực tiếp bởi các hàng mố nhám đầu khu vực nền nhám giúp tiêu tán năng lượng trực tiếp, tập trung và tốt hơn.

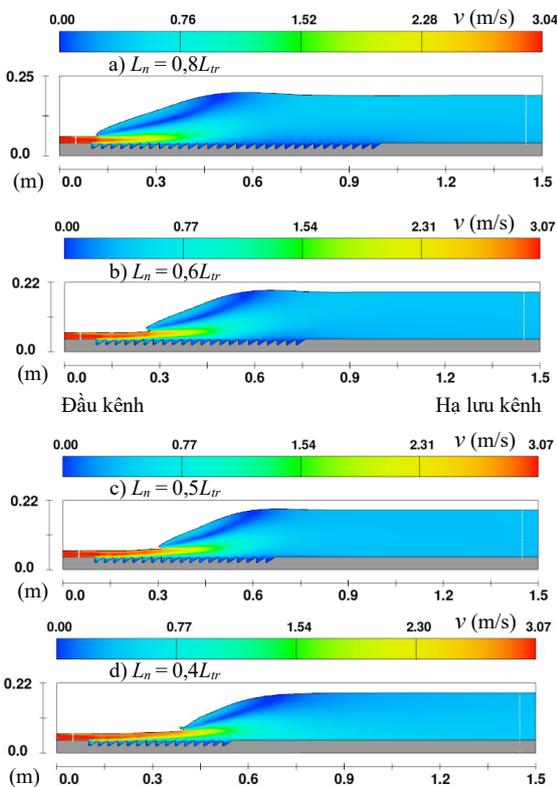
Khi thay đổi chiều dài bố trí nền nhám từ giá trị $0,8L_{tr}$ xuống $0,3L_{tr}$ như kết quả trên Hình 7 (c, d, e và f) và Hình 8 (b, c, d và e) hình thức nối tiếp dòng chảy xiết sang dòng chảy êm gián tiếp thông qua một đoạn đường nước dâng ở trạng thái chảy xiết (L_x) rồi mới xảy ra nước nhảy, tùy theo mức độ giảm chiều dài nền nhám L_n mà đoạn nước dâng kéo dài theo hay tăng theo. Với $0,8 < L_n/L_{tr} \leq 0,4$ điểm chân nước nhảy vẫn được khống chế trong phạm vi nền nhám, tuy nhiên nền nhám không bao được toàn bộ khu vực nước nhảy với tỷ lệ L_n/L_{tr} nhỏ, cụ thể là $L_n/L_{tr} \leq 0,5$ như trên Hình 7d, e và Hình 8c, d đã thể hiện.

Với bố trí $L_n/L_{tr} = 0,3$ như Hình 7f và Hình 8e, hiện tượng nước nhảy vẫn xuất hiện, nhưng vượt qua phạm vi bố trí nền nhám, do đó mục đích bố trí nền nhám ban đầu đã không đạt được hiệu quả khống chế nước nhảy như mong muốn, trường hợp này đoạn dòng chảy xiết dâng khá dài vượt qua cả nền nhám kéo xuống hạ lưu kênh dẫn, dẫn tới phạm vi gia cố bể/ kênh tăng và khó kiểm soát vị trí xuất hiện nước nhảy.





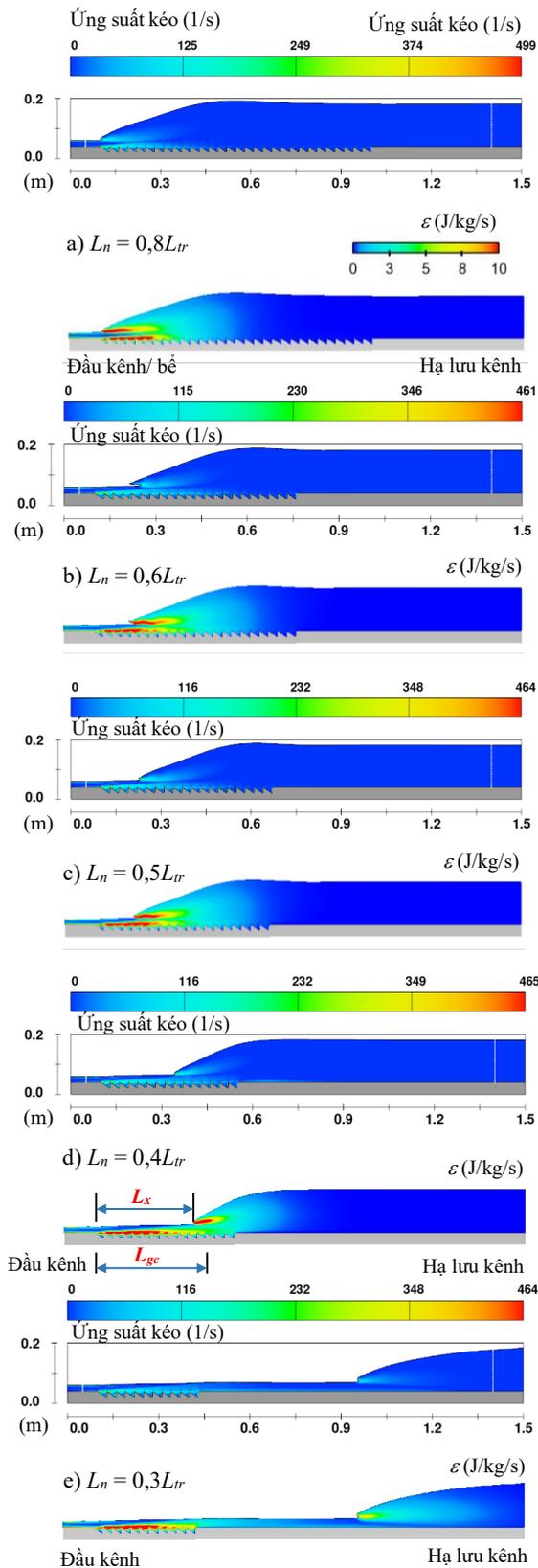
Hình 7. 2D trường vận tốc cho các chiều dài đáy nhám M_{I18} với số $Fr_1 = 6,77$



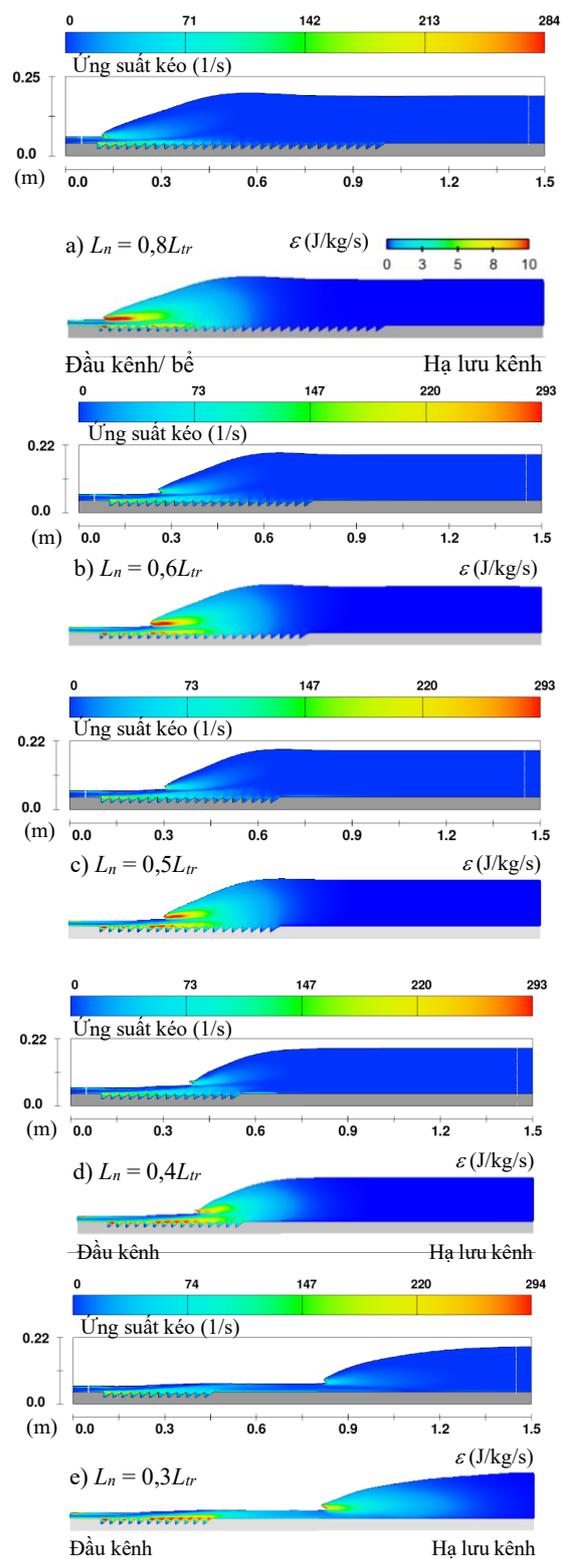
Hình 8. 2D trường vận tốc cho các chiều dài đáy nhám M_{I18} với số $Fr_1 = 6,77$

Để tìm hiểu rõ hơn bản chất của hiện tượng thủy lực khi chiều dài nền nhám giảm thì nổi tiếp và hình thái nước nhảy có sự thay đổi rõ rệt với tỷ lệ chiều dài nền nhám giảm từ 0,8 đến 0,3 L_{tr} . Nghiên cứu đã trích rút kết quả từ mô hình CFD cho hai đặc trưng thủy lực của dòng chảy lặn lướt là ứng suất kéo (strain rate magnitude - 1/s) và tốc độ tiêu tán năng lượng rối ϵ (turbulent dissipation rate - J/kg/s) như Hình 9&10 (a - e). Về tổng thể, khi bố trí nền nhám vào đáy bể/ kênh, nền nhám ảnh hưởng trực tiếp tới dòng chảy xiết, minh chứng thể hiện qua phổ phân bố ứng suất kéo có giá trị cao tại các hàng nhám đầu tiên của nền nhám và giảm dần trong phạm vi chiều dài nước nhảy, sau phạm vi chiều dài nước nhảy thì ứng suất kéo gần như bằng không Hình 9&10 (a, b, c) vùng ứng suất này tập trung tại các hàng nhám đầu của nền nhám, giá trị lớn nhất của ứng suất kéo đạt gần 200 1/s vùng có ứng suất cắt dòng chảy rất mạnh là nguyên nhân hình thành nên nhiều vùng rối nhỏ trong khu vực đầu mố nhám, từ đó tăng cường tiêu tán năng lượng dòng chảy, kèm theo tốc độ tiêu tán năng lượng rối cao (ϵ) các xoáy rối được tiêu tán triệt để sau một vài hàng nhám đầu tiên, giá trị của ϵ từ 3 đến hơn 10 J/kg/s, giá trị cao trên đỉnh các mố nhám nơi dòng chảy ma sát trực tiếp vào đỉnh mố nhám, tại đây trường vận tốc có sự thay đổi nhanh chóng, xuôi về hạ lưu vận tốc suy giảm mạnh và giảm rất nhanh. Hiệu quả tiêu năng được giải quyết triệt để và tập trung, với cách bố trí này không những không chế được hiện tượng nước nhảy trong bể mà có không chế được vị trí tập trung tiêu tán năng lượng, từ đó có biện pháp gia cố phạm vi đáy bể hợp lý.

Khi chiều dài nền nhám giảm xuống, ứng suất đáy nhám tăng cường độ trên nền nhám nhưng kéo dài xuống hạ lưu đáy nhẵn, vùng hạ lưu đáy nhẵn có giá trị ứng suất đáy bé hơn, trong khi đó vùng đáy nhám giá trị lớn. Khi kiểm tra về mức độ tiêu tán năng lượng rối ϵ có giá trị cao nhưng vùng ảnh hưởng nhỏ, một phần trên các đỉnh nhám và kéo dài theo chiều dài nền nhám, tức là các vùng xoáy rối rộng, không tắt ngay trong khu vực không chế, dẫn đến cần gia cố đáy kênh dài hơn, tốn kém chi phí xây dựng công trình.



Hình 9. 2D phân bố ứng suất kéo và tốc độ tiêu tán của năng lượng rối ε với đáy nhám M_{I8} , $Fr_1 = 6,77$



Hình 10. 2D phân bố ứng suất kéo và tốc độ tiêu tán của năng lượng rối ε với đáy nhám M_{I18} , $Fr_1 = 6,77$

Trên quan điểm phân tích sâu về đặc trưng ứng suất kéo kết hợp với tiêu tán năng lượng rối ε giúp chúng ta nhìn thấy rõ và định lượng hơn việc bố trí đáy nhám có hiệu quả như thế nào đối với việc tiêu

tán năng lượng của dòng chảy và không chế hiện tượng nước nhảy xuất hiện trong bể tiêu năng như ý tưởng của kỹ sư thiết kế công trình.

3.4. Xác định chiều dài hiệu quả của nền nhám cho nước nhảy ổn định, tự do

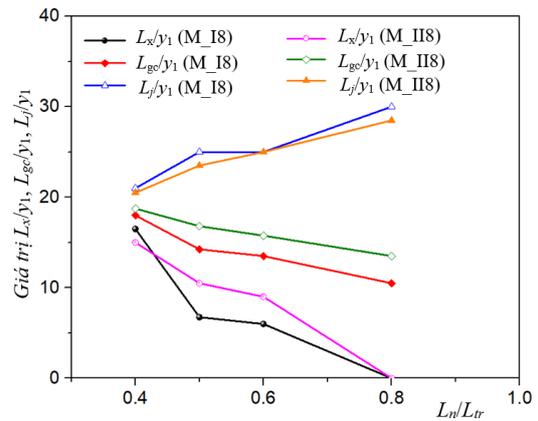
Nghiên cứu đã tổng hợp chiều dài dòng chảy xiết (chiều dài đường nước dâng xiết) được tính từ điểm đầu nền nhám đến chân nước nhảy L_x ; chiều dài phạm vị xem xét tăng cường gia cố đáy bể/ kênh chịu ảnh hưởng trực tiếp của dòng chảy xiết có nguy cơ xói mạnh, phá hủy kết cấu L_{gc} được xác định từ điểm bắt đầu đáy nhám tới hàng nhám có chỉ số ε giảm đột ngột về giá trị nhỏ (minh họa L_x ; L_{gc} xem trên Hình 9 (d)); chiều dài nước nhảy L_j với các trường hợp nghiên cứu tương ứng với sự thay đổi của tỷ lệ L_n/L_{tr} đối với các mô hình đáy nhám, chi tiết kết quả được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả về chiều dài nền nhám, dòng chảy xiết, gia cố đáy bể, nước nhảy

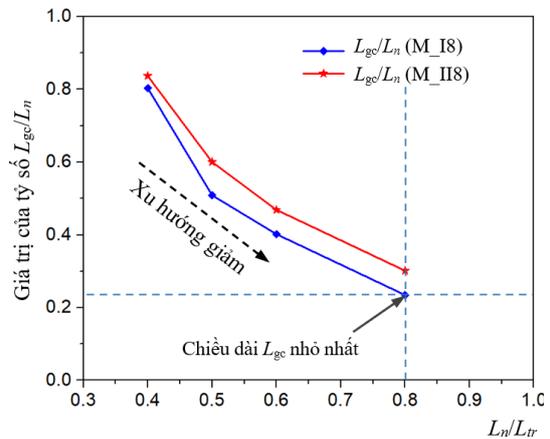
Mô hình	L_n/L_{tr}	L_x/y_1	L_{gc}/y_1	L_{gc}/L_n	L_j/y_1
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	0,8	0,0	10,5	0,2	30,0
	0,6	6,0	13,5	0,4	25,0
MI_8	0,5	6,8	14,3	0,5	25,0
	0,4	16,5	18,0	0,8	21,0
	0,3	45,0	45,0	2,7	-
	0,8	0,0	13,5	0,3	28,5
	0,6	9,0	15,8	0,5	25,0
MII_8	0,5	10,5	16,8	0,6	23,5
	0,4	15,0	18,8	0,8	20,5
	0,3	35,0	35,0	2,1	-

Từ Hình 11 cho thấy khi tỷ lệ L_n/L_{tr} giảm từ 0,8 về 0,4, thì tỷ lệ chiều dài L_x/y_1 tăng nhanh từ 0 đến 16,5 điều này đồng nghĩa nối tiếp dòng chảy xiết đầu kênh với hạ lưu không hình thành trực tiếp qua nước nhảy mà phải chuyển tiếp qua một đoạn đường nước dâng với đặc tính chảy xiết sau đó mới tới nước nhảy và dòng chảy êm hạ lưu. Việc xuất hiện chiều dài đường nước dâng xiết trong khu vực nền nhám làm gia tăng phạm vị gia cố nền, nên cần xem xét tăng cường kết cấu đáy bể, điều này được phản ánh rõ trong Hình 11 với sự biến thiên tỷ lệ nghịch của giá trị L_{gc}/y_1 với sự thay đổi của giá trị L_n/L_{tr} . Khi $L_n/L_{tr} = 0,4$ thì chiều dài gia cố đáy bể đạt giá trị lớn nhất (xét với điều kiện nước nhảy hình thành trên đáy nhám) $L_{gc}/y_1 = 18,8$ đối với đáy loại M_II8 và 18,0 đối với đáy loại M_I8.

Khi xem xét, đánh giá chiều dài nước nhảy L_j/y_1 tỷ lệ thuận với chiều giảm của tỷ số L_n/L_{tr} . Với $L_n/L_{tr} = 0,8$ thì xuất hiện nước nhảy tại vị bắt đầu bố trí đáy nhám (vị trí không chế nước nhảy), lúc này không xuất hiện dòng chảy xiết $L_x = 0$ và chiều dài đáy bể xem xét gia cố là nhỏ nhất L_{gc}/y_1 lần lượt có giá trị là 10,5 và 13,5 cho đáy M_I8 và M_II8. Khi giảm chiều dài nền nhám thì dòng chảy cần phải chuyển tiếp qua đoạn chiều dài dòng chảy xiết để tiêu hao năng lượng sau đó mới hình thành nước nhảy xa, hiệu quả của nền nhám giảm, ảnh hưởng nhỏ với đặc tính dòng chảy xiết đầu kênh.



Hình 11. Thay đổi của L_x/y_1 , L_{gc}/y_1 , L_j/y_1 theo L_n/L_{tr} với các mô hình nền nhám M_I8 và M_II8



Hình 12. Thay đổi của L_{gc}/L_n theo L_n/L_{tr} với các mô hình nền nhám M_I8 và M_II8

Việc bố trí đáy nhám trên đáy bể/ kênh nhằm mục đích không chế vị trí xuất hiện nước nhảy theo ý định của kỹ sư thiết kế công trình thủy công từ đó lên phương án thiết kế bể tiêu năng phù hợp bao trọn lấy phạm vị nước nhảy, giảm xói cho hạ lưu. Hình 12 thể hiện rõ sự thay đổi tỷ lệ nghịch của tham số L_{gc}/L_n theo L_n/L_{tr} . Khi $L_n/L_{tr} = 0,8$ thì chiều dài gia cố nền nhỏ

nhất L_{gc}/L_n khoảng 0,2 đến 0,3 trong khi đó $L_n/L_{tr} = 0,4$ thì phạm vi gia cố tăng mạnh tới bốn lần, điều này đã được làm sáng tỏ trong nội dung Mục 3.3. Ngoài ra, tỷ lệ L_{gc}/L_n giữa mô hình đáy nhám M_I8 và M_II8 có độ chênh lệch đáng kể với giá trị $L_n/L_{tr} = 0,8$, khi tỷ lệ L_n/L_{tr} giảm dần thì mức chênh lệch về chiều dài gia cố đối với hai mô hình đáy nhám nghiên cứu gần như không đáng kể.

3.5. Thảo luận tổng hợp

Các kết quả mô phỏng số chứng minh rằng nền nhám được bố trí trên bề mặt đáy bê/ kênh có ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình tiêu năng của nước nhảy, đặc biệt trong điều kiện vận tốc đầu vào lớn và số Fr_1 cao. Việc lựa chọn chiều dài đáy nhám hợp lý có thể giúp giảm đáng kể phạm vi gia cố kết cấu nền nhám và kích thước bề tiêu năng nhưng vẫn kiểm soát, duy trì tốt nước nhảy ổn định ở vị trí không cố định. Tuy nhiên, việc gia cố nhám vượt quá chiều dài hiệu quả không mang lại cải thiện đáng kể về tiêu năng, thậm chí có thể gây dao động mặt nước và xói cục bộ tại vùng chuyển tiếp giữa đáy nhám và nền nhẵn.

Do đó, kết quả nghiên cứu khẳng định rằng mô phỏng số bằng Flow-3D là công cụ hữu hiệu để đánh giá và tối ưu hóa thiết kế bề tiêu năng, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc áp dụng trong các công trình thủy và hạ tầng thoát nước ở khu vực đồi núi, nơi điều kiện thi công thực tế còn nhiều hạn chế.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã sử dụng mô hình số Flow-3D để khảo sát ảnh hưởng của chiều dài nền nhám đến đặc trưng nước nhảy trong điều kiện chảy tự do và ổn định với số Froude đầu kênh $Fr_1 = 6,77$. Mô hình kết hợp giữa phương pháp VOF và mô hình rối RNG $k-\epsilon$ cho phép mô phỏng chính xác cấu trúc rối, phân bố vận tốc, cũng như quá trình tiêu hao năng lượng trong bề tiêu năng có bố trí nhám.

Kết quả mô phỏng cho thấy việc bố trí nền nhám có ảnh hưởng lớn đến hình thái và hiệu quả tiêu năng của nước nhảy. Khi tăng chiều dài nền nhám L_n từ 0,3 đến 0,8 lần chiều dài nước nhảy trên nền nhẵn L_{tr} , hiệu quả tiêu năng được cải thiện rõ rệt, đồng thời trạng thái nước nhảy duy trì ổn định hơn, dẫn tới giảm chiều dài của phạm vi cần gia cố đáy bê, tiếp kiệm chi phí xây dựng công trình.

Từ các kết quả nghiên cứu thu được, có thể xác định chiều dài nền nhám hiệu quả (L_n) tương ứng khoảng 0,8 lần chiều dài nước nhảy trên nền nhẵn (L_{tr}), đảm bảo hiệu quả tiêu năng tốt và trạng thái dòng chảy ổn định, đồng thời phạm vi cần gia cố đáy nhám nhỏ nhất, L_{gc}

khoảng $(0,2 \div 0,3)L_n$, sau phạm vi này đáy kênh chỉ cần tạo nhám mà không cần lưu ý đến vấn đề kết cấu các mô nhám. Khi bố trí $L_n > 0,8 L_{tr}$ thì hiệu quả tiêu năng và hình thái nước nhảy vẫn tương tự như bố trí $L_n = 0,8 L_{tr}$, do đó không cần thiết bố trí đáy nhám có chiều dài $> 0,8 L_{tr}$. Với $0,3L_{tr} < L_n < 0,8L_{tr}$ nổi tiếp dòng chảy và hình thái nước nhảy có sự thay đổi lớn, xuất hiện dòng xiết đáng từ đầu kênh đến chân nước nhảy L_x , làm tăng nguy cơ gây xói và phá hủy đáy kênh nếu không được lưu ý gia cố kết cấu hợp lý.

Nghiên cứu đã sử dụng đặc trưng ứng suất kéo (strain rate magnitude) và tốc độ tiêu tán năng lượng rối ϵ để phân tích và đánh giá hiệu quả tiêu năng của nền nhám đối với nước nhảy, làm rõ phạm vi đáy nhám cần gia cố kết cấu L_{gc} , thông qua việc đánh giá độ lớn và phạm vi phát triển của ϵ trên đáy nhám. Giá trị của ϵ xung quanh 10 J/kg/s trong phạm vi đỉnh các hàng nhám đầu nền nhám tương ứng với mức tiêu năng mạnh và phù hợp với nước nhảy tự do và ổn định.

Kết quả nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học hữu ích cho việc thiết kế và tối ưu hóa bề tiêu năng trong các công trình thủy, đặc biệt là các công trình thoát lũ hoặc hạ tầng giao thông vùng đồi núi, nơi yêu cầu cao về ổn định và an toàn công trình thoát nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. Chow (1959). *Open Channel Hydraulics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- [2] W. H. Hager (1992). *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Kluwer Academic Publishers, Water Science and Technology Library, Vol.8.
- [3] S. Ead and N. Rajaratnam (2002). *Hydraulic jumps on corrugated beds*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, No.7, pp.656-663.
doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).
- [4] T. C. Ty, Z. J. Min, and T. C. Trieu (2024). *Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps*, Applied Sciences, Vol.14, No.2, pp.1-19.
doi: 10.3390/app14020594.
- [5] F. I. Izadnia and M. Shafai-Bejestan (2007). *Corrugated bed hydraulic jump stilling basin*, Journal of Applied Sciences, Vol.7, No.8, pp.1164-1169.
doi: 10.3923/jas.2007.1164.1169.
- [6] A. Abbaspour, D. Farsadizadeh, A. H. Dalir, and A. A. Sadraddini (2009). *Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models*, Turkish Journal of

- Engineering and Environmental Sciences, Vol.33, No.1, pp.61-72.
doi: 10.3906/muh-0901-7.
- [7] I. H. Elsebaie and S. Shabayek (2010). *Formation of hydraulic jumps on corrugated beds*, International Journal of Civil & Environmental Engineering (IJCEE-IJENS), Vol.10, No.1, pp.40-50.
- [8] H. Samadi-Boroujeni, M. Ghazali, B. Gorbani, and R. F. Nafchi (2013). *Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.40, No.9, pp.841-847.
doi: 10.1139/cjce-2012-0019.
- [9] A. Ghaderi, M. Dasineh, F. Aristodemo, and A. Ghahramanzadeh (2020). *Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses*, Journal of Hydroinformatics, Vol.22, No.6, pp.1554-1572.
doi: 10.2166/hydro.2020.298.
- [10] S. Nikmehr and Y. Aminpour (2020). *Numerical Simulation of Hydraulic Jump over Rough Beds*, Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol.64, No.2, pp.396-407.
doi: 10.3311/ppci.15292.
- [11] T. C. Ty, P. Q. Anh và N. K. Ly (2025). *Ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo dự đoán đặc trưng nước nhảy trên đáy nhám lăng trụ tam giác vuông*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng, Vol.15, No. 02, pp.155-160.
doi: 10.54772/jomc.02.2025.888.
- [12] T. C. Ty and T. C. Trieu (2025). *Numerical and analysis effects of rectangular prism rough beds on hydraulic jumps in open channels*, AIP Advances, Vol.15, No.7, p. 075122, pp.1-10.
doi: 10.1063/5.0267793.
- [13] S. Gu, F. Bo, M. Luo, E. Kazemi, Y. Zhang, and J. Wei (2019). *SPH Simulation of Hydraulic Jump on Corrugated Riverbeds*, Applied Sciences, Vol.9, No.3, pp.1-18.
doi: 10.3390/app9030436.
- [14] M. Dasineh, A. Ghaderi, M. Bagherzadeh, M. Ahmadi, and A. Kuriqi (2021). *Prediction of hydraulic jumps on a triangular bed roughness using numerical modeling and soft computing methods*, Mathematics, Vol.9, No.23, pp. 1-24.
doi: 10.3390/math9233135.
- [15] 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, No.5, pp. 1-24.
doi: 10.3390/w13050674.
- [16] Flow Science Inc. (2016). FLOW-3D V 11.2 User's Manual. Santa Fe, NM, USA.
- [17] B. E. Launder and D. B. Spalding (1974). *The numerical computation of turbulent flows*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, No.2, pp.269-289.
- [18] V. Yakhot and S. A. Orszag (1986). *Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory*, Journal of Scientific Computing, Vol.1, No.1, pp.3-51.
- [19] C. W. Hirt and B. D. Nichols (1981). *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*, Journal of Computational Physics, Vol.39, No.1, pp.201-225.
doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- [20] A. Abbaspour, A. H. Dalir, D. Farsadizadeh, and A. Sadraddini (2009). *Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics*, Journal of Hydro-environment Research, Vol.3, No.2, pp.109-117.
doi: 10.1016/j.jher.2009.05.003.

Ngày nhận bài:	21/11/2025
Ngày nhận bản sửa:	09/12/2025
Ngày duyệt đăng:	05/01/2026