Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (2V): 147–162

ĐẶC TRƯNG TRƯỜNG VẬN TỐC TRONG NƯỚC NHẢY HOÀN CHỈNH TRÊN NỀN NHÁM LĂNG TRỤ TAM GIÁC VUÔNG

Trịnh Công Tý[a,*]

[a]*Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 17/3/2026, Sửa xong 01/5/2026, Chấp nhận đăng 20/5/2026

Tóm tắt

Nghiên cứu này phân tích cấu trúc động lực học của nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhám lăng trụ tam giác vuông thông qua hậu xử lý 210 trường hợp mô phỏng số đã được kiểm chứng. Thay vì chỉ xem xét các tham số vĩ mô như độ sâu liên hợp và chiều dài nước nhảy, nghiên cứu tập trung làm rõ cơ chế tiêu hao năng lượng ở thang vi mô dựa trên biên dạng vận tốc chuẩn hóa và phân bố xoáy trong vùng nước nhảy. Kết quả cho thấy hình học nhám tam giác vuông làm thay đổi bản chất lớp dòng cắt chính, ngoài cuộn xoáy âm đặc trưng của nước nhảy trên đáy trơn, các gradient vận tốc cục bộ do quá trình gia tốc trên mặt nghiêng và tách dòng tại cạnh nhám đã tạo nên các vùng xoáy dương sát đáy. Sự tương tác giữa hệ xoáy âm quy mô lớn và các xoáy dương cục bộ này làm tăng cường trao đổi động lượng theo phương đứng, tái phân bố năng lượng từ dòng chủ xuống lớp biên đáy. Hệ quả là biên dạng vận tốc sai khác rõ rệt so với trường hợp nền trơn, với vận tốc cực đại dịch chuyển ra xa đáy và chiều dày lớp biên tăng xấp xỉ ba lần. Ngoài ra, những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thiết kế bể tiêu năng.

Từ khoá: nước nhảy tự do; nền nhám lăng trụ tam giác vuông; bể tiêu năng; trường vận tốc; biên dạng vận tốc chuẩn hóa; phân bố xoáy.

FLOW VELOCITY FIELD CHARACTERISTICS IN THE HYDRAULIC JUMP REGION OVER RIGHT TRIANGULAR PRISM ROUGH BEDS

Abstract

This study examines the hydrodynamic structure of fully developed hydraulic jumps over rough beds composed of right triangular prisms, based on a comprehensive post-processing analysis of 210 validated numerical simulations. Rather than limiting the analysis to macroscopic parameters such as sequent depth and jump length, the research focuses on the microscale mechanisms governing energy dissipation, based on normalised velocity profiles and vorticity distributions within the hydraulic jump region. The results demonstrate that the triangular roughness geometry fundamentally modifies the primary shear layer structure. In addition to the dominant negative roller vortex typically observed in smooth-bed hydraulic jumps, localised velocity gradients generated by flow acceleration along the inclined prism faces and flow separation at the roughness edges give rise to positive vorticity zones in the near-bed region. The interaction between the large-scale negative roller and these near-bed positive vortices enhances vertical momentum exchange and promotes a redistribution of kinetic energy from the turbulent core toward the bottom boundary layer. As a consequence, the velocity profiles deviate significantly from classical hydraulic jump behaviour, with the maximum velocity shifting farther from the bed and the boundary-layer thickness increasing to approximately three times that of smooth-bed conditions. Furthermore, these findings provide a scientific basis for optimising the design of stilling basins.

Keywords: free hydraulic jump; right triangular prism rough bed; stilling basin; velocity field; normalized velocity profiles; vorticity distributions.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(2V)-12 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Nước nhảy là một hiện tượng thủy lực cơ bản trong dòng chảy hở, đặc trưng bởi sự chuyển tiếp đột ngột từ chế độ chảy xiết sang chế độ chảy êm, kèm theo quá trình tiêu tán năng lượng mạnh mẽ và biến đổi sâu sắc cấu trúc dòng chảy rối. Hiện tượng này thường xuất hiện ở hạ lưu các công trình xả lũ, đập tràn và bể tiêu năng, nơi yêu cầu kiểm soát hiệu quả năng lượng dư thừa nhằm đảm bảo ổn định lòng dẫn và an toàn công trình [1–8]. Về bản chất động lực học, nước nhảy hoàn chỉnh được chi phối bởi sự tương tác phức tạp giữa lớp dòng cắt rối phát triển mạnh, vùng cuộn xoáy quy mô lớn ở

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* tytc@huce.edu.vn (Tý, T. C.)

phía trên (roller zone) và lớp biên sát đáy, nơi diễn ra quá trình trao đổi động lượng và tiêu hao năng lượng với cường độ cao [9].

Trong các nghiên cứu kinh điển, nước nhảy chủ yếu được khảo sát trên nền đáy trơn [10–15], với giả thiết rằng cơ chế tiêu hao năng lượng được chi phối bởi sự phát triển của lớp dòng cắt rối chính và hệ xoáy quy mô lớn trong vùng nước nhảy. Tuy nhiên, trong điều kiện thực tế, khi yêu cầu rút ngắn chiều dài bể tiêu năng hoặc khi bị hạn chế về mặt bằng bố trí, việc sử dụng nền đáy trơn thường không đáp ứng được hiệu quả tiêu năng mong muốn. Do đó, các phần tử nhám với hình học xác định thường được bố trí trên đáy bể nhằm tăng cường tiêu hao năng lượng và điều chỉnh cấu trúc dòng chảy [3]. Sự hiện diện của nền nhám không chỉ làm gia tăng lực cản ma sát mà còn gây biến đổi đáng kể trường vận tốc và cơ chế tổ chức dòng chảy rối. Cụ thể, nền nhám làm thay đổi phân bố vận tốc theo phương thẳng đứng, thúc đẩy sự hình thành và tương tác của các cấu trúc xoáy cục bộ, đồng thời làm biến đổi phân bố ứng suất cắt trong toàn bộ vùng nước nhảy [16–26]. Những ảnh hưởng này đặc biệt rõ rệt trong lớp dòng gần đáy, nơi đóng vai trò then chốt trong quá trình truyền động lượng và tiêu hao năng lượng của dòng chảy. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về nước nhảy trên nền nhám, phần lớn các công trình vẫn tập trung vào các chỉ tiêu vĩ mô như chiều dài nước nhảy, tỷ lệ suy giảm năng lượng hoặc hệ số tiêu năng [25–29]. Một số nghiên cứu thực nghiệm và số gần đây đã bắt đầu xem xét phân bố vận tốc trung bình và ứng suất đáy [16, 18, 19, 28, 29], tuy nhiên các phân tích này chủ yếu mang tính mô tả hoặc cục bộ, chưa làm rõ được cơ chế động lực học chi phối ở cấp độ vi mô. Đặc biệt, các đại lượng có ý nghĩa quyết định đối với quá trình truyền động lượng và tiêu hao năng lượng như tensor biến dạng đối xứng (strain-rate tensor), cấu trúc xoáy cục bộ và tương tác giữa xoáy - lớp biên đáy vẫn chưa được khảo sát một cách hệ thống. Điều này dẫn đến việc thiếu hụt một khung lý thuyết đầy đủ để giải thích bản chất của quá trình tiêu năng trên nền nhám có hình học xác định. Song song với đó, sự phát triển của các phương pháp nghiên cứu hiện đại đã mở ra khả năng tiếp cận sâu hơn vào cấu trúc dòng chảy. Các kỹ thuật đo đạc thực nghiệm như PIV [30] và ADV [31] cho phép đo đạc trường vận tốc với độ phân giải cao, trong khi các mô hình động lực học chất lỏng tính toán (CFD) cung cấp khả năng tái hiện chi tiết trường dòng chảy rối trong không gian và thời gian. Tuy nhiên, ngay cả trong các nghiên cứu CFD gần đây [25, 29], trọng tâm vẫn chủ yếu là mô phỏng và xác nhận các đặc trưng tổng thể của nước nhảy, trong khi việc khai thác sâu các đại lượng động lực học bậc cao như trường biến dạng và cấu trúc xoáy gắn với hình học nhám vẫn còn hạn chế. Đáng chú ý, nền nhám dạng lăng trụ tam giác vuông [25] tạo ra một cấu hình hình học bất đối xứng theo phương dòng chảy, dẫn đến sự hình thành các cơ chế động lực học đặc thù như gia tốc cục bộ, tách dòng, và tái bám tuần hoàn theo chu kỳ bước nhám. Những quá trình này không chỉ làm thay đổi phân bố vận tốc mà còn có thể tái cấu trúc trường xoáy và trường biến dạng trong vùng gần đáy, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến cơ chế truyền động lượng và tiêu hao năng lượng. Tuy nhiên, cho đến nay, mối liên hệ định lượng giữa hình học nhám dạng lăng trụ tam giác vuông với đặc trưng trường vận tốc, cấu trúc xoáy và tensor biến dạng trong nước nhảy hoàn chỉnh vẫn chưa được làm rõ một cách hệ thống. Cụ thể, trong nghiên cứu Tý, T. C., và cs. [25] mới chủ yếu dừng lại ở việc mô tả các đặc trưng tổng thể của dòng chảy, trong khi các cơ chế động lực học chi phối trong vùng dòng chảy sát đáy, khu vực có vai trò quyết định đối với ứng suất cắt và ổn định thủy lực vẫn chưa được phân tích đầy đủ.

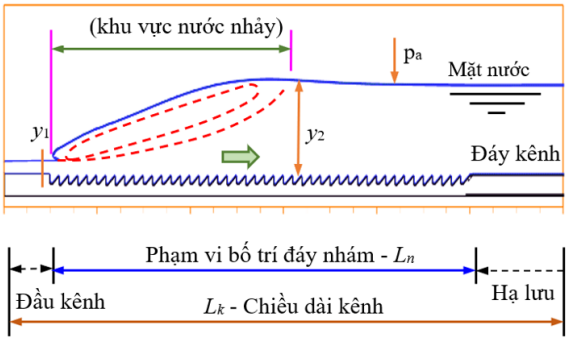
Từ những phân tích trên có thể thấy rằng, khoảng trống nghiên cứu hiện nay không chỉ nằm ở việc thiếu dữ liệu, mà quan trọng hơn là thiếu một cách tiếp cận tích hợp giữa trường vận tốc - cấu trúc xoáy - trường biến dạng để giải thích cơ chế động lực học của nước nhảy trên nền nhám có hình học xác định. Trong bối cảnh đó, nghiên cứu này tập trung phân tích đặc trưng trường vận tốc của nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhám lăng trụ tam giác vuông thông qua bộ dữ liệu gồm 210 mô phỏng số đã được kiểm chứng từ Tý, T. C., và cs. [25] với số Froude $4{,}8 \geq Fr_1 \geq 9{,}4$. Các đại lượng bao gồm

trường vận tốc trung bình, phân bố xoáy trên mặt phẳng dọc dòng chảy, tensor biến dạng đối xứng và ứng suất kéo sát đáy được khai thác đồng thời nhằm làm rõ cơ chế truyền động lượng và tổ chức dòng chảy trong vùng nước nhảy. Đồng thời, mối tương quan giữa ứng suất đáy và cấu hình nhám được phân tích để đánh giá mức độ ổn định của cơ chế tiêu năng. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng góp phần xây dựng một cách nhìn hệ thống hơn về động lực học nước nhảy trên nền nhám nhân tạo, làm rõ vai trò của cấu trúc xoáy và trường biến dạng trong điều chỉnh dòng chảy rối, qua đó cung cấp cơ sở khoa học tin cậy cho việc thiết kế và tối ưu hóa bể tiêu năng trong thực tiễn.

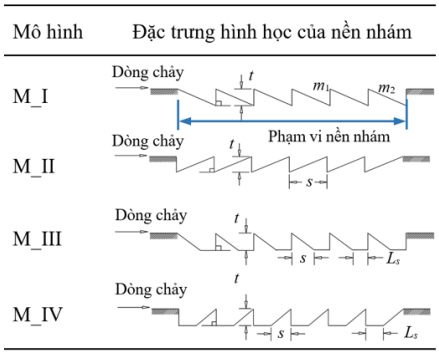
2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Chuẩn bị dữ liệu cho vấn đề nghiên cứu

Để thực hiện phân tích chuyên sâu về đặc trưng trường vận tốc của nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhám lăng trụ tam giác vuông, nghiên cứu này kế thừa bộ dữ liệu gồm 210 trường hợp mô phỏng số đã được kiểm chứng và công bố trước đó bởi Tý, T. C. và cộng sự [25]. Sơ đồ mô phỏng nước nhảy trên nền nhám cùng các cấu hình hình học đáy được trình bày tại Hình 1(a) và Hình 1(b).



(a) Nước nhảy ổn định tự do trên đáy nhám



(b) Mô hình đáy nhám nghiên cứu

Hình 1. Sơ đồ nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhám và đáy nhám nghiên cứu [25]

Các điều kiện biên được thiết lập nhằm bao phủ miền nước nhảy hoàn chỉnh trong kênh hở/bể tiêu năng, với độ sâu dòng chảy xiết đầu vào trong khoảng 1,5 cm $\leq y_1 \leq$ 3,0 cm và số Froude tương ứng 4,8 $\leq Fr_1 \leq$ 9,4. Với các điều kiện này, độ sâu liên hợp sau nước nhảy y_2 biến thiên từ 7,2 cm đến 31,6 cm, trong khi chiều dài nước nhảy L_j dao động trong khoảng 0,27 m đến 1,25 m [25]. Hai tham số đặc trưng y_2 và L_j được sử dụng để xác định phạm vi phân tích, đảm bảo tập trung làm rõ sự biến đổi của trường vận tốc và phân bố ứng suất kéo sát đáy trên nền nhám, cũng như đánh giá vai trò của chúng trong cơ chế tiêu hao năng lượng.

Các mô phỏng số trong [25] được thực hiện bằng phần mềm Flow-3D, giải hệ phương trình chi phối bao gồm phương trình liên tục và phương trình động lượng, kết hợp với mô hình rối RNG k–ε. Lưới tính toán được thiết lập với kích thước mịn 2,5 mm trong vùng gần đáy nhám nhằm đảm bảo độ phân giải các cấu trúc dòng chảy cục bộ, và 5,0 mm cho phần còn lại của miền tính. Điều kiện biên thượng lưu được xác định bởi độ sâu và vận tốc dòng chảy xiết, trong khi điều kiện biên hạ lưu được hiệu chỉnh theo phương pháp thử dần để đảm bảo sự hình thành và phát triển ổn định của nước nhảy trong miền tính toán.

Độ tin cậy của mô hình đã được kiểm chứng thông qua hai bước: (i) phân tích độc lập lưới nhằm đảm bảo tính hội tụ của nghiệm số, và (ii) so sánh kết quả mô phỏng với số liệu thực nghiệm từ tài liệu [22]. Kết quả cho thấy sai số giữa mô phỏng và thực nghiệm nhỏ, khoảng 5%, đồng thời biên dạng phân bố vận tốc dòng chủ không thứ nguyên thể hiện sự phù hợp tốt với dữ liệu đo đạc. Điều này

khẳng định khả năng của bộ dữ liệu mô phỏng trong việc phản ánh chính xác cấu trúc trường dòng chảy, làm cơ sở tin cậy cho các phân tích chuyên sâu trong nghiên cứu này.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

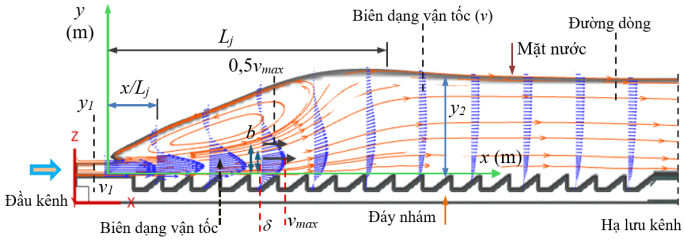
Trên cơ sở bộ dữ liệu mô phỏng đã được kiểm chứng, nghiên cứu tiến hành hậu xử lý chi tiết (CFD post-processing) đối với toàn bộ 210 trường hợp [25] nhằm khai thác sâu các đặc trưng động lực của trường dòng trong vùng nước nhảy. Phần mềm Flow-3D [32] được sử dụng để trích xuất các đại lượng thủy động lực học quan trọng, bao gồm: trường vận tốc trung bình, phân bố xoáy theo phương ngang (ω_y) và cường độ biến dạng trượt (shear strain rate magnitude) trong khu vực gần đáy nhám. Dữ liệu trường dòng sau khi trích xuất được xử lý và trực quan hóa bằng công cụ Tecplot 360 EX (version 2022R2) để xây dựng phân bố vận tốc trên các mặt cắt ngang kênh, đường dòng trong miền nghiên cứu.

Các biên dạng vận tốc dòng chủ và quan hệ chuẩn hóa được thể hiện và phân tích bằng phần mềm OriginPro 9 nhằm làm rõ sự phát triển lớp dòng cắt và biến đổi cấu trúc lớp biên trong khu vực nước nhảy. Đồng thời, phần mềm IBM SPSS Statistics 20 được sử dụng để thực hiện phân tích hồi quy và xây dựng các quan hệ thực nghiệm giữa vận tốc cực đại, chiều dày lớp biên và tọa độ không thứ nguyên dọc theo chiều dài nước nhảy. Việc kết hợp các công cụ tính toán, xử lý dữ liệu và phân tích thống kê cho phép đánh giá một cách hệ thống và định lượng cơ chế biến đổi trường vận tốc cũng như ứng suất đáy trên nền nhám lăng trụ tam giác vuông.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng trường vận tốc dòng chủ trong khu vực nước nhảy

Trường vận tốc dòng chủ là một trong những đặc trưng thủy lực cốt lõi, chi phối trực tiếp cấu trúc động lực và cơ chế tiêu hao năng lượng trong nước nhảy, cả trong trường hợp đáy trơn và trên nền nhám nhân tạo. Khi các phần tử nhám được bố trí trong khu vực nước nhảy hoàn chỉnh, chúng gây ra những biến đổi đáng kể đối với cấu trúc lớp dòng cắt chính, dẫn đến sự thay đổi đồng thời của biên dạng phân bố vận tốc theo phương đứng, vị trí và giá trị vận tốc cực đại, cũng như hướng chuyển động cục bộ của dòng chảy.

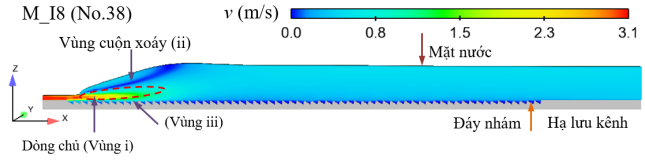


Hình 2. Minh họa các đặc trưng biên dạng vận tốc dòng chủ nước nhảy

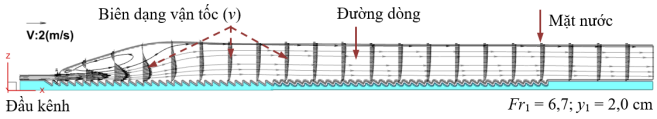
Sự tương tác giữa dòng chủ và hình học nhám làm gia tăng gradient vận tốc trong vùng gần đáy, đồng thời thúc đẩy quá trình tái phân bố động lượng trong toàn bộ vùng nước cuộn xoáy. Những biến đổi này phản ánh sự điều chỉnh cấu trúc dòng chảy rối dưới tác động của nền nhám và đóng vai trò quan trọng trong việc chi phối hiệu quả tiêu năng.

Nhằm làm rõ các đặc trưng trên, nghiên cứu tiến hành phân tích chi tiết trường vận tốc dòng chủ dựa trên bộ dữ liệu mô phỏng số đã được hậu xử lý. Các nội dung phân tích bao gồm biên dạng vận tốc chuẩn hóa theo chiều sâu và sự phát triển của lớp biên dọc theo chiều dài nước nhảy. Sơ đồ phân tích phân bố vận tốc trong nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhám lăng trụ tam giác vuông được trình bày ở hình dưới, làm cơ sở cho các đánh giá và thảo luận tiếp theo.

Phân bố phổ màu biểu diễn độ lớn trường vận tốc tương ứng với bốn cấu hình đáy nhám điển hình được trình bày tại Hình 3(a), Hình 4(a), Hình 5(a) và Hình 6(a). Kết quả cho thấy cấu trúc trường dòng trong khu vực nước nhảy có thể được phân chia thành ba vùng đặc trưng: (i) vùng dòng chủ có vận tốc lớn tập trung ở lõi dòng, (ii) vùng cuộn xoáy phía trên với sự hiện diện của dòng chảy đảo chiều và cấu trúc rối phát triển mạnh, và (iii) vùng tương tác sát đáy nhám, nơi gradient vận tốc tập trung cao do ảnh hưởng trực tiếp của hình học bề mặt.

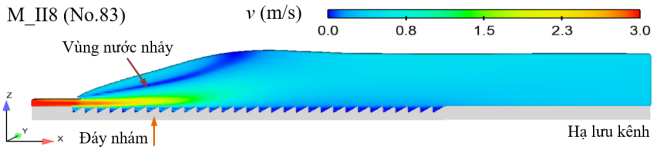


(a) Phân bố vận tốc dòng chảy dọc theo kênh

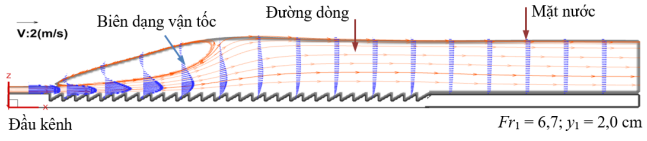


(b) Đường dòng và biên dạng vận tốc ngang

Hình 3. Phân bố vận tốc và đường dòng đối với đáy nhám M_I8 (No. 38)

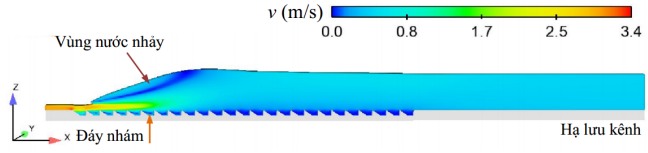


(a) Phân bố vận tốc dòng chảy dọc theo kênh

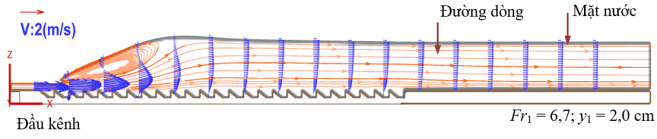


(b) Đường dòng và biên dạng vận tốc ngang

Hình 4. Phân bố vận tốc và đường dòng với đáy nhám M_II8 (No. 83)

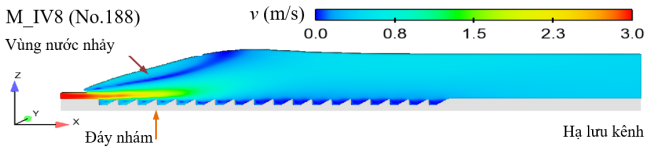


(a) Phân bố vận tốc dòng chảy dọc theo kênh

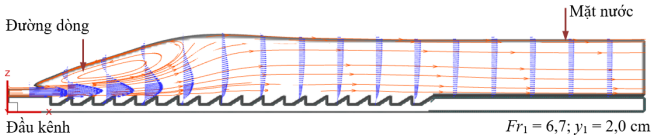


(b) Đường dòng và biên dạng vận tốc ngang

Hình 5. Phân bố vận tốc và đường dòng đáy nhám M_III8 (No. 128)



(a) Phân bố vận tốc dòng chảy dọc theo kênh



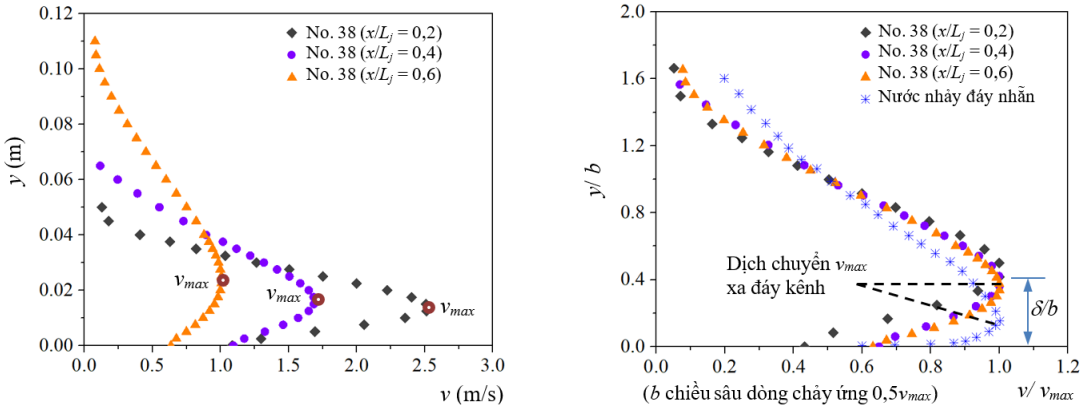
(b) Đường dòng và biên dạng vận tốc ngang

Hình 6. Phân bố vận tốc và đường dòng với đáy nhám M_IV8 (No. 188)

Dòng chủ được giới hạn giữa lớp cuộn xoáy phía trên và vùng chịu tác động của nền nhám phía dưới, thể hiện rõ vai trò trung gian trong quá trình truyền động lượng. Trong phạm vi chiều dài hữu hạn của nước nhảy, vận tốc dòng chủ suy giảm nhanh theo phương dòng chảy do quá trình trao đổi động lượng mạnh với vùng xoáy và tiêu hao năng lượng rối.

Ngoài ra, kết quả mô phỏng phản ánh rõ quá trình chuyển tiếp điển hình của nước nhảy, từ trạng thái dòng chảy xiết ở thượng lưu với vận tốc lớn và độ sâu nhỏ sang trạng thái dòng chảy êm ở hạ lưu với vận tốc giảm đáng kể và độ sâu tăng lên. Sự phù hợp này cho thấy bộ dữ liệu mô phỏng có khả năng tái hiện hợp lý cấu trúc thủy lực của nước nhảy, qua đó đảm bảo độ tin cậy cho các phân tích tiếp theo.

Để làm rõ hơn sự biến đổi biên dạng vận tốc theo phương đứng tại các mặt cắt trước, trong và sau nước nhảy, các mặt cắt vận tốc và đường dòng được trích xuất và trực quan hóa bằng công cụ Tecplot như thể hiện tại Hình 3(b), Hình 4(b), Hình 5(b) và Hình 6(b). Phân tích này cho phép nhận diện rõ ràng phạm vi vùng cuộn xoáy, dòng chủ. Đồng thời xác định vị trí kết thúc chiều dài nước nhảy L_j trên cơ sở cấu trúc trường dòng trên kênh. Các hình ảnh cũng minh họa trực quan quá trình suy giảm nhanh vận tốc trong vùng nước nhảy và sự thiết lập lại trạng thái dòng chảy êm ở hạ lưu như các kết quả nghiên cứu thực nghiệm trước đây về nước nhảy ổn định, tự do.



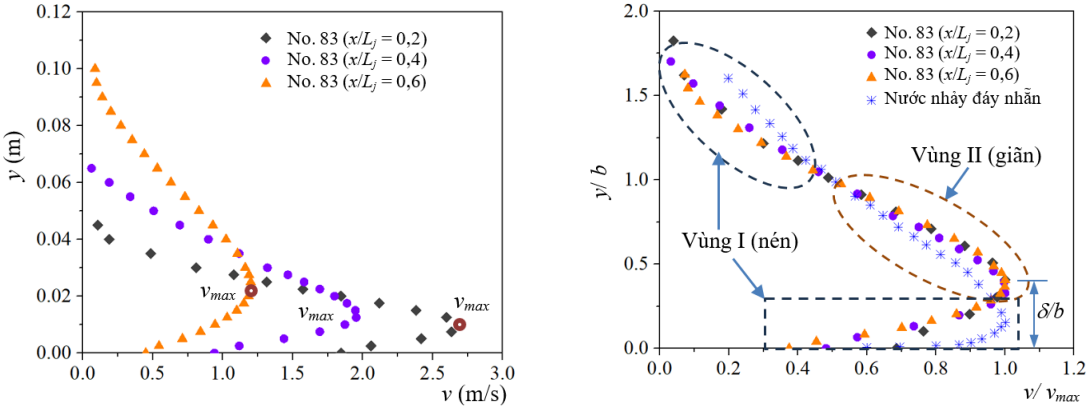
(a) Biên dạng vận tốc dòng chủ

(b) Biên dạng vận tốc đã chuẩn hóa

Hình 7. Biên dạng vận tốc dòng chủ khu nước nhảy đáy nhám M_I8 (No. 38)

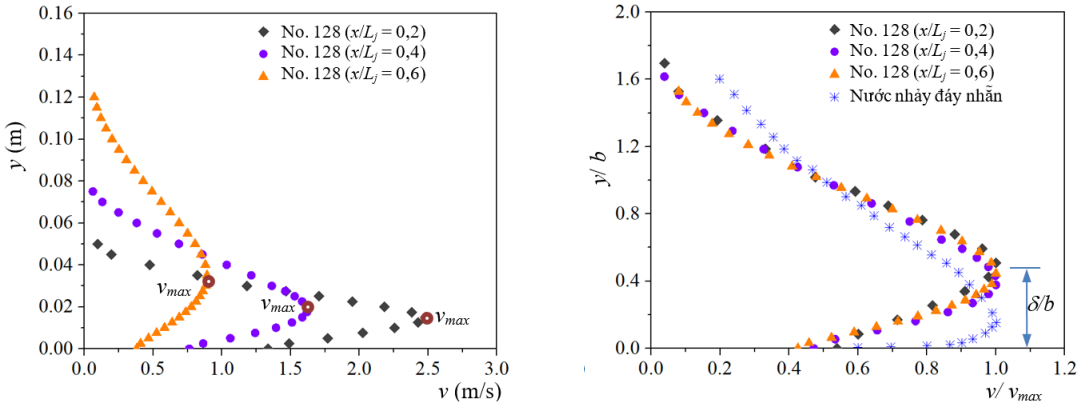
Để làm rõ sự biến đổi của biên dạng vận tốc dòng chủ trong khu vực nước nhảy, các mặt cắt ngang

điển hình được lựa chọn tại các vị trí không thứ nguyên x/L_j = 0,2; 0,4 và 0,6 (vị trí thể hiện trên Hình 2). Các Hình 7(a), Hình 8(a), Hình 9(a) và Hình 10(a) trình bày chi tiết biên dạng vận tốc theo phương đứng (thay đổi theo độ sâu) đối với bốn mô hình đáy nhám dưới cùng điều kiện dòng chảy Fr_1 = 6,7 và độ sâu dòng chảy xiết y_1 = 2,0 cm.



(a) Biên dạng vận tốc dòng chủ (b) Biên dạng vận tốc đã chuẩn hóa

Hình 8. Biên dạng vận tốc dòng chủ khu nước nhảy đáy nhám M_II8 (No. 83)

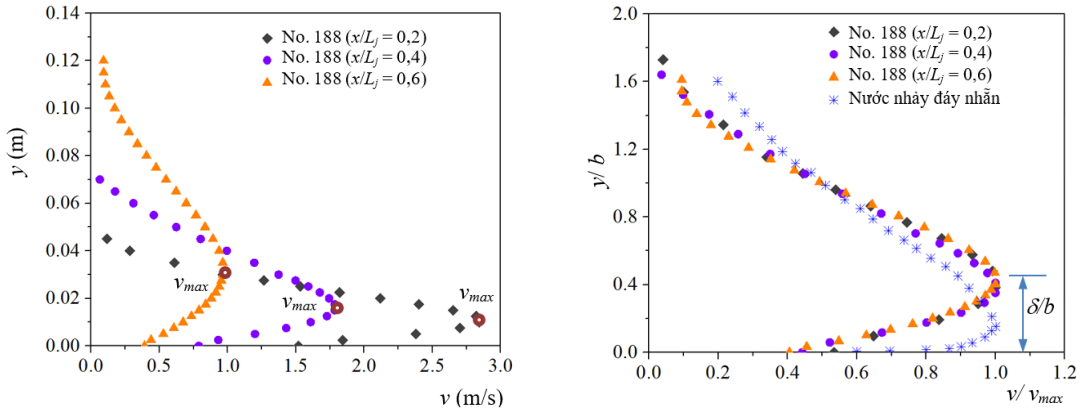


(a) Biên dạng vận tốc dòng chủ (b) Biên dạng vận tốc đã chuẩn hóa

Hình 9. Biên dạng vận tốc dòng chủ khu nước nhảy đáy nhám M_III8 (No. 128)

Kết quả cho thấy sự suy giảm vận tốc diễn ra mạnh mẽ dọc theo chiều dài nước nhảy. Tại vị trí x/L_j = 0,2, ảnh hưởng của dòng chảy xiết vẫn chiếm ưu thế, thể hiện qua biên dạng vận tốc hẹp và nhọn theo phương đứng với vận tốc cực đại ($v_{\max}$) xấp xỉ 2,6 m/s. Khi tiến gần về hạ lưu (x/L_j = 0,6), vận tốc cực đại giảm đáng kể xuống khoảng 1,0 m/s, đồng thời biên dạng vận tốc được mở rộng theo phương đứng, cho thấy vùng vận tốc lớn có xu hướng dịch chuyển xa đáy nhám hơn do quá trình trao đổi động lượng và tiêu hao năng lượng trong vùng cuộn xoáy.

Nghiên cứu đã thực hiện việc chuẩn hóa biên dạng vận tốc dòng chủ đưa về quan hệ không thứ nguyên giữa hai tham số $v/v_{\max}$ và y/b để đánh giá định lượng sự thay đổi trường vận tốc của dòng chủ với các mô hình đáy nhám nghiên cứu. Nhìn chung về đặc điểm hình học biên dạng vận tốc chuẩn hóa ở các mặt cắt với các vị trí x/L_j nghiên cứu có xu hướng khá tương đồng giữa các cấu hình nhám như thể hiện trên các Hình 7(b), Hình 8(b), Hình 9(b) và Hình 10(b). Tuy nhiên, khi so sánh với trường



(a) Biên dạng vận tốc dòng chủ

(b) Biên dạng vận tốc đã chuẩn hóa

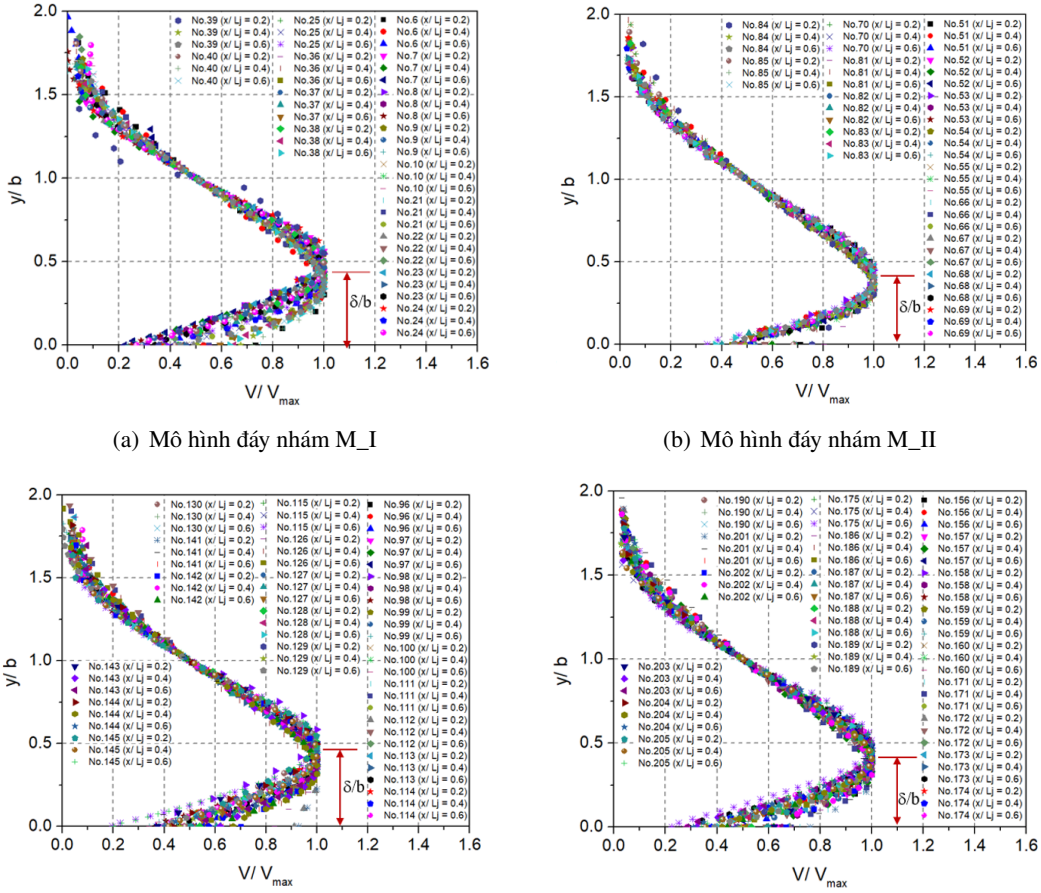
Hình 10. Biên dạng vận tốc dòng chủ khu nước nhảy đáy nhám M_IV8 (No. 188)

hợp đáy trơn cho thấy sự khác biệt rõ rệt. Cụ thể, xuất hiện vùng (I) nơi biên dạng vận tốc bị nén theo phương đứng tại ranh giới giữa vùng cuộn xoáy mặt thoáng với dòng chủ và khu vực gần đáy nhám, trong khi vùng (II) trên lớp biên của dòng chủ có xu hướng bị kéo giãn, làm cho vị trí vận tốc cực đại ($v_{\max}$) dịch chuyển xa đáy hơn và chiều dày lớp biên δ tăng đáng kể. Những biến đổi này phản ánh tác động rõ rệt của hình học nhám đến cấu trúc phân bố vận tốc trong nước nhảy hoàn chỉnh (minh họa trên Hình 8(b)).

Các biên dạng vận tốc dòng chủ sau khi chuẩn hóa đối với từng cấu hình đáy nhám được tổng hợp và trình bày chi tiết trên Hình 11. Kết quả cho thấy, trong toàn bộ dải số Froude khảo sát ($4{,}8 \leq Fr_1 \leq 9{,}4$), hình dạng các đường cong $v/v_{\max}$ theo y/b có mức độ tương đồng cao, phản ánh tính ổn định của cấu trúc phân bố vận tốc khi chịu tác động của hình học nhám. Đáng chú ý, chiều dày lớp biên không thứ nguyên δ/b đối với nền nhám đạt xấp xỉ 0,45, lớn hơn đáng kể so với trường hợp đáy trơn khoảng 0,16 [16]. Sự gia tăng đáng kể chiều dày lớp biên này cho thấy nền nhám làm tăng cường trao đổi động lượng gần đáy và thúc đẩy quá trình tiêu hao năng lượng trong vùng nước nhảy, đồng thời làm suy giảm rõ rệt gradient vận tốc theo phương đứng so với cấu hình đáy trơn.

Kết quả phân tích trường vận tốc cho thấy dọc theo chiều dài nước nhảy L_j, vận tốc cực đại $v_{\max}$ suy giảm rõ rệt, trong khi chiều dày lớp biên δ gia tăng đáng kể. Xu thế trái chiều này phản ánh quá trình tái phân bố động lượng và tiêu hao năng lượng diễn ra mạnh mẽ trong vùng nước nhảy trên nền nhám. Nhằm định lượng quy luật biến đổi của hai tham số đặc trưng này và cung cấp cơ sở phục vụ thiết kế bể tiêu năng, nghiên cứu tiến hành thiết lập mối quan hệ giữa các đại lượng không thứ nguyên $v_{\max}/v_1$ và δ/y_1 theo biến x/y_1 (vị trí mặt cắt thể hiện trên Hình 2). Trong phạm vi khảo sát, vận tốc đầu vào v_1 dao động từ 1,84 đến 5,11 m/s, trong khi vận tốc dòng chảy êm hạ lưu v_2 nằm trong khoảng 0,35 đến 0,57 m/s.

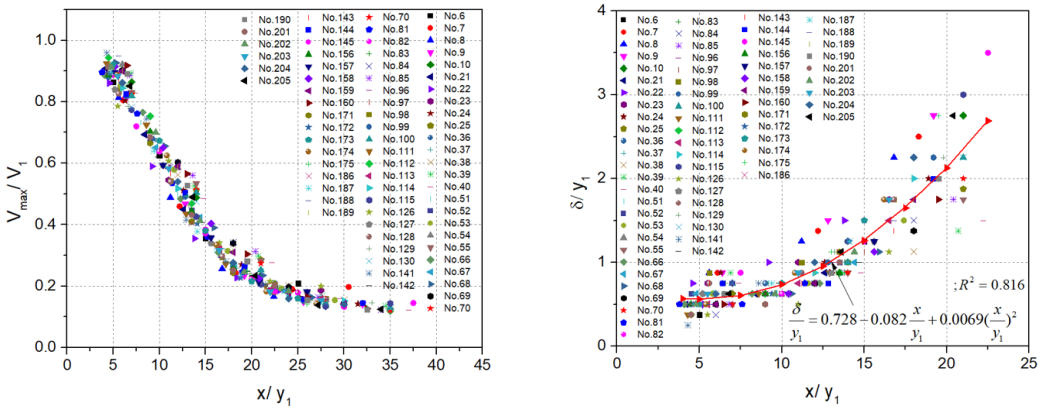
Kết quả thể hiện trên Hình 12 cho thấy tham số $v_{\max}/v_1$ giảm theo chiều tăng của x/y_1 với mức độ tương quan rất cao ($R^2 = 0{,}981$), cho thấy quy luật suy giảm vận tốc cực đại có tính ổn định và nhất quán. Ngược lại, tham số δ/y_1 có mức độ phân tán hơn theo biến x/y_1 ($R^2 = 0{,}816$), phản ánh sự nhạy cảm của quá trình phát triển lớp biên đối với cấu trúc rối và hình học nhám. Mặc dù mức độ tương quan khác nhau, cả hai quan hệ đều thống nhất về ý nghĩa thủy lực: khi tỷ lệ x/y_1 tăng, vận tốc cực đại suy giảm trong khi chiều dày lớp biên gia tăng. Các quan hệ định lượng tương ứng được thiết



(a) Mô hình đáy nhám M_I (b) Mô hình đáy nhám M_II

(c) Mô hình đáy nhám M_III (d) Mô hình đáy nhám M_IV

Hình 11. Biên dạng vận tốc dòng chủ chuẩn hóa cho các mô hình đáy nhám



(a) $v_{\max}/v_1$ theo x/y_1 (b) δ/y_1 theo biến x/y_1

Hình 12. Sự thay đổi của tham số $v_{\max}/v_1$ và δ/y_1 so với x/y_1

lập và trình bày trong các biểu thức (1) và (2).

$$\frac{v_{\max}}{v_1} = 1{,}242 - 0{,}0742\frac{x}{y_1} + 0{,}0012\left(\frac{x}{y_1}\right)^2; \quad R^2 = 0{,}981 \tag{1}$$

$$\frac{\delta}{y_1} = 0{,}728 - 0{,}082\frac{x}{y_1} + 0{,}0069\left(\frac{x}{y_1}\right)^2; \quad R^2 = 0{,}816 \tag{2}$$

Kết quả phân tích cho thấy cấu trúc dòng chủ trong nước nhảy trên nền nhám khác biệt rõ rệt so với trường hợp đáy trơn. Sự hiện diện của các phần tử nhám lăng trụ tam giác vuông làm gia tăng gradient vận tốc cục bộ và gây ra hiện tượng tách dòng - tái bám phía sau đỉnh nhám, từ đó hình thành các vùng xoáy sát đáy. Hệ quả là vận tốc trong vùng gần đáy suy giảm đáng kể so với lõi dòng chủ, đồng thời quá trình trao đổi động lượng theo phương đứng được tăng cường. Cơ chế này thúc đẩy sự phát triển nhanh của lớp biên rối δ trong phạm vi nước nhảy, phù hợp với xu thế gia tăng δ/y_1 đã được định lượng theo biến x/y_1.

Khi chuẩn hóa dưới dạng $v/v_{\max}$, các biên dạng vận tốc cho thấy vị trí vận tốc cực đại dịch chuyển xa đáy hơn so với trường hợp nền trơn, phản ánh sự tái phân bố năng lượng từ lớp cận đáy lên vùng dòng chủ. Đồng thời, hình dạng đường cong vận tốc trở nên phi tuyến rõ rệt và không còn tuân theo dạng logarit đặc trưng của nước nhảy trên đáy trơn. Những biến đổi này khẳng định vai trò chi phối của hình học nhám trong việc tái cấu trúc trường vận tốc và tăng cường tiêu hao năng lượng trong nước nhảy hoàn chỉnh.

Sự gia tăng gradient vận tốc theo phương đứng ($\partial u/\partial z$) đóng vai trò là nguồn sinh xoáy trong trường dòng chảy, do trong bài toán hai chiều, thành phần xoáy theo phương oy (ω_y) phụ thuộc trực tiếp vào các gradient vận tốc, trong đó $\partial u/\partial z$ chi phối rõ rệt trong vùng cận đáy và tại các khu vực biến đổi hình học đột ngột.

3.2. Đặc trưng vận tốc dòng chảy khu vực gần đáy nhám

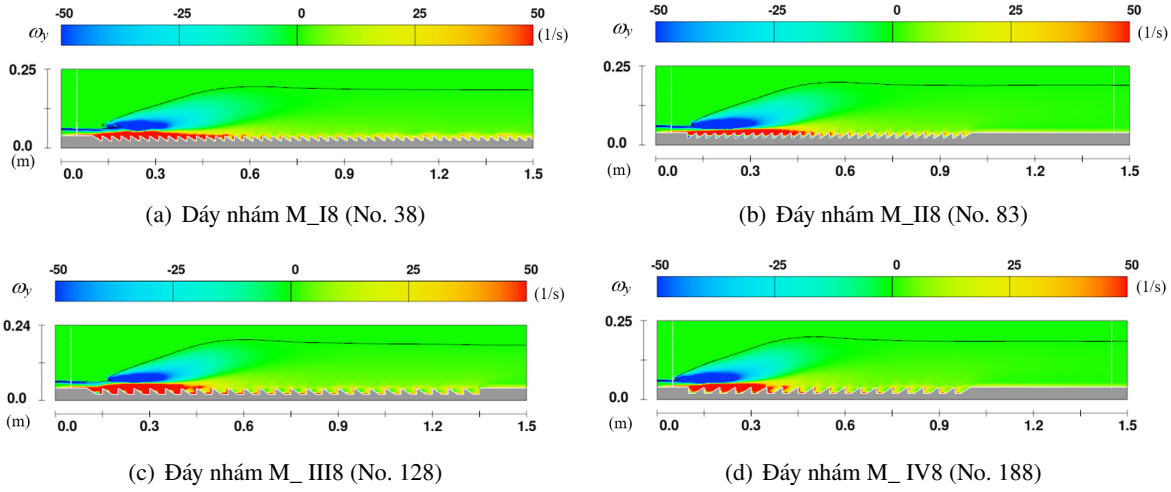
Trường vận tốc khu vực gần đáy nhám được xem xét, phân tích và đánh giá thông qua phân tích phân bố thành phần xoáy theo phương $0y$ ($0y$-vorticity) trong mặt phẳng $0xz$. Đối với bài toán hai chiều, xoáy được xác định bởi biểu thức (3):

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \tag{3}$$

trong đó u và w lần lượt là vận tốc theo phương dọc dòng chảy ($0x$) và phương thẳng đứng ($0z$). Đại lượng ω_y phản ánh trực tiếp cường độ quay cục bộ của phần tử chất lỏng do các gradient vận tốc gây ra, đồng thời là chỉ báo quan trọng về sự phát triển của lớp dòng cắt (shear layer) trong dòng chảy, hiện tượng tách dòng và cấu trúc xoáy trong vùng nước nhảy.

Khi phân tích dưới góc độ phân bố xoáy và quan hệ với biên dạng vận tốc theo phương đứng (xem Hình 11, Hình 13) cho thấy sự khác biệt bản chất về cấu trúc động lực giữa nước nhảy trên đáy trơn và đáy nhám lăng trụ tam giác vuông. Trên đáy trơn, cấu trúc nước nhảy điển hình được đặc trưng bởi một cuộn xoáy quy mô lớn với xoáy mang giá trị âm ($\omega_y < 0$) chiếm ưu thế gần như toàn bộ vùng lõi nước nhảy. Cấu trúc này thể hiện rõ trong vùng đầu nước nhảy, nơi gradient vận tốc theo phương đứng đạt giá trị lớn nhất và quyết định phần lớn cơ chế tiêu hao năng lượng.

Ngược lại, khi xuất hiện đáy nhám dạng lăng trụ tam giác vuông, cấu trúc vận tốc và xoáy thay đổi đáng kể. Trên các đỉnh mố nhám và mặt nghiêng lăng trụ tam giác vuông, dòng chảy bị ép tăng tốc cục bộ, làm xuất hiện vùng gradient vận tốc dương ($\partial u/\partial z > 0$) sát đáy. Hệ quả là hình thành các xoáy mang giá trị dương ($\omega_y > 0$) với cường độ tương đối lớn, phân bố dọc theo đáy nhám trong phạm vi chiều dài nước nhảy. Như vậy, khác với đáy trơn chỉ tồn tại một hệ xoáy âm quy mô lớn, đáy nhám tạo ra cấu trúc xoáy đa cực gồm các xoáy âm của cuộn xoáy chính và các xoáy dương cục bộ phía dưới gần đáy nhám (xem Hình 13). Sự đồng tồn tại của hai vùng xoáy trái dấu làm biến dạng biên dạng vận tốc theo phương đứng được minh chứng trên các Hình 7(b), Hình 8(b), Hình 9(b) và Hình 10(b), qua đó phản ánh sự phức tạp gia tăng của các lớp cắt (shear layer) trong vùng nước nhảy.



(a) Đáy nhám M_I8 (No. 38)

(b) Đáy nhám M_II8 (No. 83)

(c) Đáy nhám M_ III8 (No. 128)

(d) Đáy nhám M_ IV8 (No. 188)

Hình 13. Mức độ phân bố xoáy của chất lỏng trong mặt phẳng 0xz với các mô hình đáy nhám nghiên cứu điển hình

Kết quả phân bố xoáy trên mặt phẳng 0xz cho thấy vùng có cường độ xoáy ($\omega_y > 0$) lớn nhất tập trung chủ yếu sát đáy nhám, đặc biệt tại khu vực đỉnh lăng trụ và ngay phía hạ lưu mỗi phần tử nhám. Giá trị cực đại của ω_y đạt khoảng 40 đến 50 s^{-1} trong đoạn đầu của nước nhảy (xem Hình 13). Đây là mức xoáy rất cao, phản ánh gradient vận tốc cục bộ mạnh trong lớp sát đáy, cho thấy đáy nhám đã gây ra sự tái phân bố động lượng gần như hoàn toàn trong một lớp dòng chảy rất mỏng sát đáy. Điều này khẳng định vai trò chủ động của đáy nhám trong việc điều chỉnh cấu trúc trường vận tốc, thay vì chỉ làm tăng ma sát thuần túy.

Phân bố xoáy dọc theo đáy thể hiện rõ sự xen kẽ giữa các vùng xoáy dương và xoáy âm nhỏ tương ứng với từng đặc điểm hình học của nền nhám (xem Hình 13(b)). Khi dòng chảy tăng tốc trên mặt nghiêng phía thượng lưu của mố nhám (Hình 13(a)), gradient vận tốc đứng tăng mạnh, tạo nên vùng xoáy dương. Tại cạnh vuông phía hạ lưu mố nhám (Hình 13(b)), dòng bị tách đột ngột, hình thành vùng xoáy âm nhỏ do sự phát triển của dòng hồi lưu cục bộ. Quá trình tái bám phía sau tiếp tục làm tăng cường cường độ quay, tạo nên chuỗi xoáy luân phiên dọc theo đáy. Cơ chế này cho thấy mỗi phần tử nhám hoạt động như một "bộ sinh xoáy cưỡng bức", liên tục tạo ra các cấu trúc xoáy nhỏ có tính chu kỳ.

So sánh kết quả phân bố xoáy giữa các trường hợp mô phỏng cho thấy khi bố trí các phần tử nhám có cạnh góc vuông ở phía thượng lưu (mô hình đáy M_I và M_III), phạm vi phân bố xoáy dương mở rộng và cường độ xoáy âm của cuộn xoáy chính có xu hướng giảm dần như thể hiện trên Hình 13(a) và Hình 13(c). Điều này hàm ý rằng năng lượng không còn tập trung chủ yếu trong một cấu trúc xoáy lớn mà được phân tán thành nhiều cấu trúc nhỏ hơn, làm tăng hiệu quả xáo trộn rối và phân tán động năng trong khu vực nước nhảy. Ngược lại với đáy M_II và M_IV thì cường độ xoáy âm của cuộn xoáy chính được duy duy trì ở mức độ lớn hơn, phân bổ xoáy dương nhỏ hơn với đáy M_I và M_III, dẫn tới hiệu quả tiêu năng nhỏ hơn và chiều dài nước nhảy lớn hơn.

Tổng hợp lại, phân tích dựa trên phân bố xoáy và biên dạng vận tốc đã chứng minh rằng hình học đáy nhám làm thay đổi căn bản cấu trúc động lực của nước nhảy. Trong khi đáy trơn đặc trưng bởi một hệ xoáy âm đơn cực do gradient vận tốc âm chi phối, đáy nhám tạo ra hệ xoáy lưỡng cực với các vùng xoáy dương cường độ cao trên đỉnh nhám. Sự đảo dấu cục bộ của gradient vận tốc theo phương đứng là bằng chứng trực tiếp cho thấy đáy nhám không chỉ tăng cường ma sát mà còn tái tổ chức trường dòng chảy. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế công trình tiêu năng, đặc biệt trong việc

tối ưu hóa hình học nhám nhằm kiểm soát cấu trúc xoáy và nâng cao hiệu quả tiêu hao năng lượng trong vùng hạ lưu công trình tiêu năng.

Về cơ chế, các xoáy dương cục bộ hình thành sát đáy nhám không chỉ phát sinh từ gradient vận tốc theo phương đứng ($\partial u/\partial z$) do quá trình tăng tốc cục bộ và tách dòng - tái bám, mà còn đóng vai trò duy trì và khuếch đại các lớp cắt trong vùng cận đáy. Sự tương tác giữa các xoáy dương này với cuộn xoáy âm quy mô lớn tạo nên cấu trúc lớp cắt phức hợp, trong đó gradient $\partial u/\partial z$ được tăng cường và duy trì theo không gian. Hệ quả là trao đổi động lượng theo phương đứng được tăng cường, làm gia tăng trực tiếp thành phần ứng suất cắt chi phối (S_{xz}) trong lớp sát đáy. Mối liên hệ hai chiều giữa cấu trúc xoáy và lớp cắt này là cơ sở vật lý để phân tích định lượng phân bố ứng suất kéo đáy trong mục tiếp theo.

3.3. Đặc trưng ứng suất kéo đáy trên đáy nhám

Việc bố trí các đáy nhám làm gia tăng ứng suất kéo trên đáy nhám dẫn tới làm giảm độ sâu liên hợp sau nước nhảy và chiều dài nước nhảy [25]. Lớp ứng suất kéo phát triển đồng thời tại hai khu vực: khu vực biên ranh giới giữa vùng nước cuộn xoáy và dòng chủ (khu vực này khá giống với trường hợp nước nhảy trên đáy trơn); hai là trên đỉnh các phần tử nhám. Trong đó lớp ứng suất kéo phát triển gần đáy nhám là yếu tố quan trọng ảnh hưởng tới việc thay đổi hay tiêu tán năng lượng trong bể tiêu năng. Đặc trưng ứng suất kéo đáy trên các cấu hình đáy nhám được xác định dựa trên tensor biến dạng đối xứng, cường độ biến dạng (strain rate magnitude), ký hiệu $|S|$, được xác định từ tensor biến dạng đối xứng:

$$|S| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

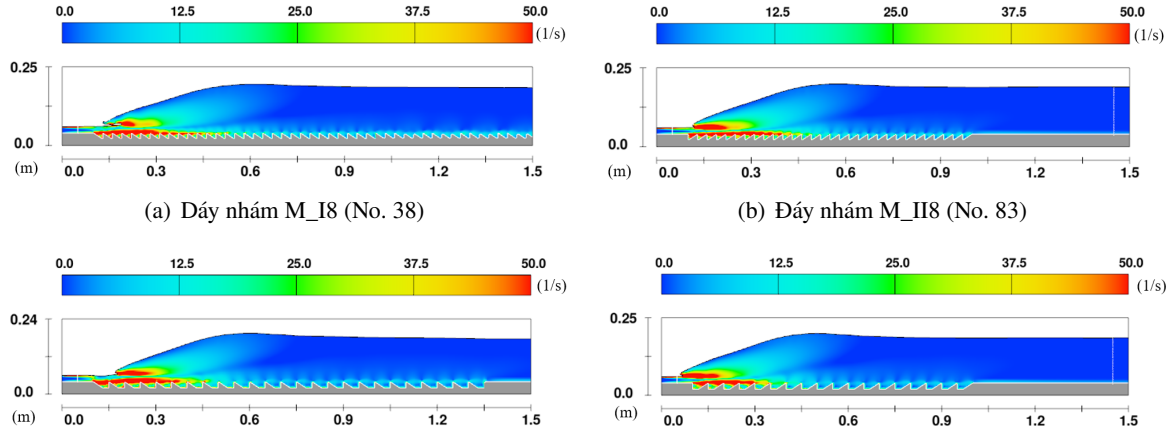
Trong bài toán nước nhảy hai chiều (mặt phẳng oxz), các thành phần chi phối trường biến dạng gần đáy là S_{xz}, S_{xx} và S_{zz}. Tuy nhiên, trong lớp sát đáy, thành phần quyết định ứng suất kéo động lực học là S_{xz} (xem biểu thức 5). Do đó, phân bố $|S|$ trên đáy nhám phản ánh trực tiếp cường độ gradient vận tốc tiếp tuyến và mức độ trao đổi động lượng giữa dòng chủ và bề mặt công trình.

$$S_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{5}$$

Để làm rõ phân bố ứng suất kéo khu vực gần đáy nhám. Từ Hình 14, về tổng thể nhận thấy phân bố phổ giá trị ứng suất kéo đáy không đồng nhất theo không gian và biến thiên mạnh theo vị trí tương ứng với đỉnh và hõm (hốc) giữa các phần tử nhám. Giá trị ứng suất đạt giá trị cao nhất tại khu vực đỉnh nhám xấp xỉ 45–50 s^{-1}, điều này hàm ý rằng thành phần $\partial u/\partial z$ đạt giá trị rất lớn do dòng chảy bị gia tốc cưỡng bức khi trượt qua mặt nghiêng của lăng trụ tam giác.

Sự chênh lệch vận tốc mạnh giữa lớp dòng chủ phía trên và lớp sát đáy tạo nên gradient thẳng đứng lớn, làm S_{xz} tăng mạnh. Trong các hõm nhám giữa hai phần tử liên tiếp, giá trị $|S|$ giảm xuống dưới 10–12 s^{-1}. Ở vùng này, dòng chảy tách lớp và hình thành xoáy hồi lưu ổn định, vận tốc trung bình giảm đáng kể và các gradient $\partial u/\partial z$ cũng như $\partial w/\partial x$ đều nhỏ. Do đó, hốc nhám đóng vai trò vùng đệm động lượng, nơi biến dạng cắt yếu và tiêu hao năng lượng cục bộ thấp. Như vậy, hình học nhám tạo ra hệ nhiều vùng biến dạng cắt cường độ cao sát đáy, thúc đẩy trao đổi động lượng mạnh hơn và làm tăng đáng kể khả năng tiêu hao năng lượng của nước nhảy.

Tương quan về sự gia tăng của ứng suất đáy đối với các mô hình nền nhám được biểu thị thông qua tham số ε_f [25]. Kết quả nghiên cứu từ nhóm tác giả Tý và cs. [25] đã đánh giá sự thay đổi của số ε_f với số Fr_1 và đặc điểm hình học của phần tử nhám (t/y_1, L_s/y_1) nhưng chưa làm sáng tỏ sự khác biệt giữa các mô hình đáy nhám với nhau. Do đó, nghiên cứu này thực hiện phân loại bốn mô hình



(a) Đáy nhám M_I8 (No. 38)

(b) Đáy nhám M_II8 (No. 83)

(c) Đáy nhám M_ III8 (No. 128)

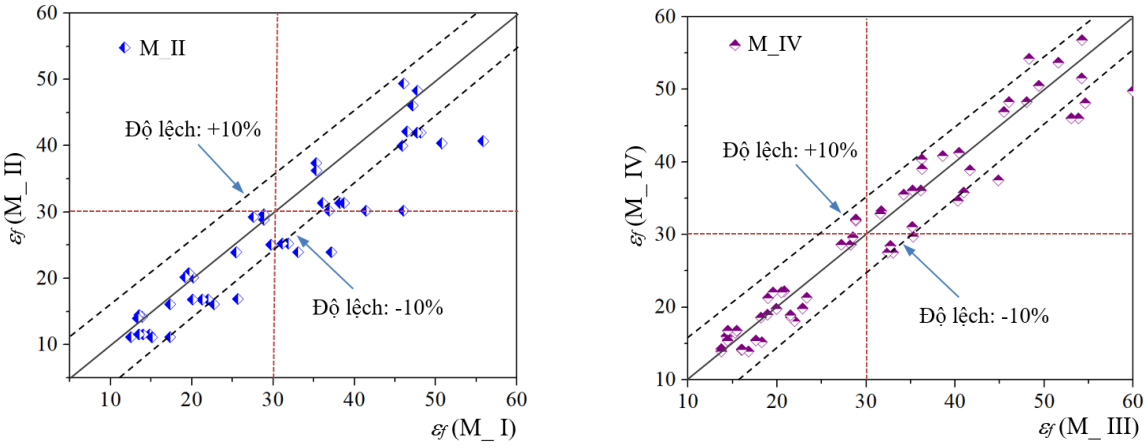
(d) Đáy nhám M_ IV8 (No. 188)

Hình 14. Phân bố lớp ứng suất kéo với các mô hình đáy nhám, trường hợp $Fr_1 = 6{,}7$ và $y_1 = 2{,}0$ cm

đáy nhám (M_I, M_II, M_III và M_IV) thành từng cặp để so sánh với nhau dựa trên sự bố trí liên tục (đáy nhám M_I và M_II) và không liên tục (đáy nhám M_III và M_IV) của các phần tử nhám trên đáy nhám.

Trong cặp so sánh giữa đáy M_I và M_II như Hình 15(a), giá trị ε_f dao động trong khoảng từ 10 đến 50. Phần lớn các điểm nằm trong biên độ ± 10%, tuy nhiên mức phân tán tăng rõ rệt khi $\varepsilon_f > 35$. Điều này cho thấy khi cường độ rối sát đáy đạt giá trị cao, ảnh hưởng của hình học nhám trở nên nhạy cảm hơn mô hình đáy nhám M_I cho hệ số ε_f cao hơn mô hình M_II, điều này phù hợp với các phân tích về xoáy và ứng suất đáy nhám ở trên. Ở vùng ε_f thấp < 20, sự tương quan gần như tuyến tính, phản ánh cơ chế sản sinh lớp cắt (shear layer) chính chi phối tương tự ở cả hai mô hình.

Đối với cặp M_III và M_IV (Hình 15(b)), phân bố điểm dữ liệu tập trung hơn quanh đường ε_f(M_III) = ε_f(M_IV), với sai lệch ± 10% nhỏ và cân đối hai phía. Điều này cho thấy hai cấu hình nhám này tạo ra trường ứng suất đáy có mức độ tương đồng cao hơn, đặc biệt ở miền ε_f trung bình từ 20 đến 40. Xu hướng tuyến tính mạnh phản ánh sự ổn định của cấu trúc dòng tái bám và phân bố xoáy thứ cấp trên hai mô hình đáy nhám.



(a) Mô hình đáy nhám M_I và M_II

(b) Mô hình đáy nhám M_III và M_IV

Hình 15. Tương quan hệ số lực cắt đáy nhám (ε_f) giữa các mô hình nền nhám

Các phân tích xoáy trước đó đã chỉ ra rằng đáy nhám lăng trụ tam giác vuông tạo ra hai hệ xoáy đặc trưng bao gồm xoáy âm và xoáy dương. Sự xuất hiện xoáy dương là điểm khác biệt căn bản so với đáy trơn, nơi gần như chỉ tồn tại xoáy âm liên tục do gradient vận tốc thẳng đứng. Tại các vị trí đỉnh nhám, xoáy dương làm tăng mạnh gradient vận tốc theo phương thẳng đứng. Từ đó làm gia tăng ứng suất kéo sát đáy. Khi cấu trúc xoáy thứ cấp phát triển mạnh và dao động, giá trị ε_f trở nên nhạy cảm với hình học đáy nhám, dẫn đến phân tán lớn hơn trong đồ thị tương quan (trường hợp đáy M_I và M_II). Ngược lại, nếu cấu trúc xoáy dương ổn định và phân bố đều theo chuỗi phần tử nhám (trường hợp đáy M_III và M_IV), quá trình tái bám dòng diễn ra đồng đều, làm cho trường ứng suất đáy giữa hai mô hình có quan hệ tuyến tính chặt chẽ hơn.

3.4. Thảo luận về ý nghĩa thực tiễn

Kết quả phân tích trường vận tốc, cấu trúc xoáy và ứng suất kéo đáy cho thấy nền nhám lăng trụ tam giác vuông không chỉ làm gia tăng ma sát bề mặt đơn thuần mà còn tái cấu trúc cơ chế động lực của nước nhảy hoàn chỉnh theo hướng tăng cường tiêu hao năng lượng sát đáy. Về mặt thực tiễn, điều này có ý nghĩa quan trọng đối với thiết kế bể tiêu năng và ổn định nền hạ lưu công trình xả lũ.

Sự xuất hiện các vùng xoáy dương cục bộ tại đỉnh nhám và vùng tái bám đã làm gia tăng gradient vận tốc theo phương thẳng đứng ($\partial u/\partial z$), kéo theo sự tăng mạnh của thành phần biến dạng trượt S_{xz}. Kết quả là cường độ biến dạng sát đáy (ε_f) tăng đáng kể so với trường hợp đáy trơn. Điều này chứng minh rằng nền nhám tam giác vuông có khả năng thúc đẩy truyền động lượng từ lõi dòng rối xuống lớp biên đáy hiệu quả hơn, qua đó làm tăng tiêu hao năng lượng ngay trong vùng nước nhảy mà không cần gia tăng chiều dài bể tiêu năng.

Cơ chế "gia tốc - tách dòng - tái bám" lặp lại theo chuỗi phần tử nhám tạo nên nhiều vùng tiêu hao năng lượng cục bộ thay vì phụ thuộc chủ yếu vào một cuộn xoáy lớn như trong trường hợp đáy trơn. Về mặt thiết kế, điều này cho thấy việc sử dụng nhám tam giác vuông có thể chuyển cơ chế tiêu năng từ dạng tập trung sang dạng phân bố, làm giảm nguy cơ hình thành vùng xói cục bộ do tập trung ứng suất tại một vị trí duy nhất. Ngoài ra, việc tăng cường ứng suất kéo đáy trong phạm vi kiểm soát còn có ý nghĩa tích cực trong việc giảm năng lượng dư truyền xuống hạ lưu, qua đó góp phần hạn chế xói chân công trình. Tuy nhiên, kết quả cũng chỉ ra rằng khi ε_f đạt giá trị lớn ở vùng đỉnh nhám, ứng suất cục bộ có thể tăng mạnh, do đó cần xem xét đồng thời khả năng chống xói/chịu lực của vật liệu và kết cấu đáy khi áp dụng giải pháp này trong thực tế.

Tổng hợp lại, nền nhám lăng trụ tam giác vuông không chỉ là một giải pháp tăng ma sát mà là một cấu hình có khả năng điều chỉnh cấu trúc động lực của nước nhảy thông qua tái tổ chức trường xoáy và tensor biến dạng sát đáy. Điều này mở ra hướng ứng dụng trong thiết kế bể tiêu năng theo nguyên lý tăng cường tiêu hao phân bố và kiểm soát ứng suất đáy một cách chủ động, thay vì chỉ dựa vào kéo dài chiều dài bể hoặc tăng cao trình đáy như các giải pháp nước nhảy truyền thống.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã làm rõ đặc trưng trường vận tốc và cơ chế động lực học của nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhám lăng trụ tam giác vuông thông qua phân tích đồng thời trường vận tốc trung bình, cấu trúc xoáy và ứng suất kéo sát đáy. Trên cơ sở đó, một số kết luận chính được rút ra như sau:

(i) Hình học nhám tam giác vuông làm biến đổi đáng kể cấu trúc lớp dòng cắt chính của nước nhảy. Cụ thể, vùng cuộn xoáy truyền thống không còn duy trì dạng liên tục mà bị biến dạng và phân mảnh theo không gian do tác động của các phần tử nhám. Hệ quả là trường vận tốc không còn phân bố đơn điệu theo chiều sâu, mà xuất hiện các vùng gia tốc và suy giảm cục bộ gắn liền với từng bước nhám.

(ii) Sự xuất hiện đồng thời của các vùng xoáy âm trong lớp dòng cắt chính và các xoáy dương cục bộ tại khu vực đỉnh nhám cho thấy nền nhám không chỉ làm gia tăng mức độ rối mà còn tái tổ

chức cấu trúc xoáy theo không gian. Cấu trúc xoáy này đóng vai trò trung gian trong quá trình trao đổi động lượng giữa lõi dòng và lớp biên sát đáy, qua đó chi phối trực tiếp cơ chế tiêu hao năng lượng trong vùng nước nhảy.

(iii) Phân tích tensor biến dạng cho thấy thành phần biến dạng trượt S_{xz} chiếm ưu thế trong vùng dòng chảy gần đáy và là đại lượng chi phối cường độ biến dạng. Ứng suất kéo sát đáy đạt giá trị cực đại tại đỉnh nhám và vùng tái bám, trong khi suy giảm rõ rệt trong các vùng tách dòng. Đồng thời, mối tương quan ứng suất đáy giữa các cấu hình nhám thể hiện xu hướng tuyến tính với sai lệch trong khoảng ± 10%, cho thấy cơ chế động lực học có tính ổn định và khả năng lặp lại cao theo hình học nhám. Kết quả này hàm ý rằng, trong phạm vi khảo sát, sự thay đổi hình học chủ yếu ảnh hưởng đến cường độ các đại lượng động lực học, trong khi bản chất cơ chế dòng chảy vẫn được duy trì.

Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn quan trọng, cung cấp cơ sở khoa học cho các kỹ sư và nhà nghiên cứu trong việc lựa chọn và tối ưu hóa quy mô bể tiêu năng, cũng như xác định phạm vi cần thiết phải gia cường kết cấu đáy nhằm đảm bảo ổn định thủy lực và an toàn công trình. Việc làm rõ đặc trưng trường vận tốc và phân bố ứng suất sát đáy trên nền nhám góp phần hỗ trợ định hướng thiết kế hợp lý, đặc biệt trong các điều kiện hạn chế về mặt bằng hoặc yêu cầu tiêu năng cao.

Bên cạnh những kết quả đạt được, nghiên cứu còn tồn tại một số hạn chế cần được xem xét. Trước hết, cơ sở dữ liệu chủ yếu dựa trên mô phỏng số và chưa được kiểm chứng đầy đủ bằng thí nghiệm cho các cấu hình đáy nhám tương ứng, do đó độ tin cậy khi ngoại suy cho điều kiện thực tế còn bị giới hạn. Đồng thời, các đặc trưng động lực học quan trọng của dòng chảy như mạch động vận tốc, dao động áp suất và nguy cơ xâm thực chưa được đưa vào phân tích, trong khi đây là các yếu tố có liên quan trực tiếp đến cơ chế tiêu hao năng lượng và ổn định công trình. Ngoài ra, nghiên cứu mới chỉ xét đến điều kiện dòng chảy nước trong, chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của tải bùn cát trong thực tế, nơi các hốc nhám có thể bị bồi lấp, làm biến đổi cấu trúc xoáy trong hốc và suy giảm hiệu quả tiêu năng. Do đó, cần tiếp tục các nghiên cứu theo hướng kết hợp thí nghiệm và mô phỏng, đồng thời xét đến tương tác dòng chảy mang bùn cát, nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và nâng cao khả năng ứng dụng kết quả vào thực tiễn công trình.

Lời cảm ơn

Tác giả cảm ơn sự hỗ trợ về chuyên môn và cơ sở dữ liệu nghiên cứu cho bài báo: Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Viện Khoa học và Công nghệ Công trình thủy và Đại học Tứ Xuyên.

Tài liệu tham khảo

[1] Akan, A. O. (2006). *Open Channel Hydraulics*. Elsevier Ltd.

[2] Cung, N. V., Đặng, N. X., Viềng, N. T. (2015). *Công trình tháo lũ trong đầu mối hệ thống thủy lợi*. Nhà xuất bản Xây dựng.

[3] Peterka, A. (1958). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. USBR. A Water Resources Technical Publication.

[4] Rouse, H., Siao, T., Nagaratnam, S. (1958). Turbulence characteristics of the hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 84(1):1–30.

[5] Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

[6] Kiselev, P. G., Altshul, A. D., Danilchenko, N. V., Kasparson, A. A., Krivchenko, G. I., Pashkov, N. N., Slisskiy, S. M. (1984). *Sổ tay tính toán thủy lực*. Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội.

[7] Viềng, N. T., Chiến, N., Mậu, N. P., Quý, P. N. (2006). *Sổ Tay Kỹ Thuật Thủy Lợi. Phần 2: Công Trình Thủy Lợi. Tập 2: Đập bê tông và bê tông cốt thép & Công trình tháo lũ*. Nhà xuất bản Nông Nghiệp.

[8] Cầm, N. C., Đào, L. C., Cung, N. V., Khuê, N. N., Minh, V. X., Quý, H. V., Tảo, V. V. (2006). *Thủy lực tập II*. Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà Nội.

[9] Witt, A., Gulliver, J., Shen, L. (2015). Simulating air entrainment and vortex dynamics in a hydraulic jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 72:165–180.

[10] Bakhmeteff, B. A. (1932). *Hydraulics of open channels*. McGraw-Hill Book Company, New York.
[11] Rajaratnam, N. (1967). Hydraulic jumps. *Advances in Hydroscience*, 4:197–280.
[12] Lubin, P., Glockner, S., Chanson, H. (2009). Numerical Simulation of Air Entrainment and Turbulence in a Hydraulic Jump. *Proc. Colloque SHF Modèles Physiques Hydrauliques: Outils Indispensables du XXIe Siècle?*, Lyon, France, 24-25 Nov, Société Hydrotechnique de France, 109–114.
[13] Chanson, H. (2011). Hydraulic jumps: turbulence and air bubble entrainment. *La Houille Blanche*, (3): 5–16.
[14] Hùng, H. V. (2022). Thiết lập mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) tính toán độ sâu sau nước nhảy trong kênh lăng trụ mặt cắt chữ nhật. *Khoa học công nghệ thủy lợi*, 75:1–9.
[15] Tý, T. C. (2026). Phân tích và đánh giá các công thức thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy trên nền nhẵn bằng mô phỏng CFD. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, 6(02).
[16] Ead, S., Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7):656–663.
[17] Izadjoo, F., Shafai-Bejestan, M. (2007). Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*, 7(8):1164–1169.
[18] Abbaspour, A., Dalir, A. H., Farsadizadeh, D., Sadraddini, A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environment Research*, 3(2):109–117.
[19] Abbaspour, A., Farsadizadeh, D., Dalir, A. H., Sadraddini, A. A. (2009). Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 33(1):61–72.
[20] Bejestan, M. S., Neisi, K. (2009). A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2(5):436–445.
[21] Elsebaie, I. H., Shabayek, S. (2010). Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 10(1):37–47.
[22] Samadi-Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B., Fattahi Nafchi, R. (2013). Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(9):841–847.
[23] Dasineh, M., Ghaderi, A., Bagherzadeh, M., Ahmadi, M., Kuriqi, A. (2021). Prediction of hydraulic jumps on a triangular bed roughness using numerical modeling and soft computing methods. *Mathematics*, 9(23):1–24.
[24] Trieu, T. C., Ty, T. C. (2023). Prediction of the Vortex Evolution and Influence Analysis of Rough Bed in a Hydraulic Jump with the Omega-Liutex Method. *Tehnički vjesnik - Technical Gazette*, 30(6):1761–1768.
[25] Ty, T. C., Min, Z. J., Trieu, T. C. (2024). Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps. *Applied Sciences*, 14:1–19.
[26] Ty, T. C., Trieu, T. C. (2025). Numerical and analysis effects of rectangular prism rough beds on hydraulic jumps in open channels. *AIP Advances*, 15(7):1–10.
[27] Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F., Ghahramanzadeh, A. (2020). Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses. *Journal of Hydroinformatics*, 22(6):1554–1572.
[28] Nikmehr, S., Aminpour, Y. (2020). Numerical Simulation of Hydraulic Jump over Rough Beds. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2):396–407.
[29] Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F., Aricò, C. (2021). Numerical simulations of the flow field of a submerged hydraulic jump over triangular macroroughnesses. *Water*, 13(5):1–24.
[30] Kim, H. S., Choi, S., Park, M., Ryu, Y. (2023). Flow turbulence and pressure fluctuations in a hydraulic jump. *Sustainability*, 15(19):1–16.
[31] Ruonan, B., Liekai, C., Xingkui, W., Danxun, L. (2016). Comparison of ADV and PIV measurements in open channel flows. *Procedia Engineering*, 154:995–1001.
[32] Inc, F. S. (2020). *Flow-3D V9.3 User's Manual*. Santa Fe, NM, USA.