

Phân tích và đánh giá các công thức thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy trên nền nhẵn bằng mô phỏng CFD

Trịnh Công Tý^{1*}

¹Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Nước nhảy đáy nhẵn
Chiều dài nước nhảy
Công thức thực nghiệm
Mô phỏng CFD
Mô hình rối $k-\epsilon$
Mô hình rối RNG $k-\epsilon$

TÓM TẮT

Nước nhảy là cơ chế tiêu tán năng lượng quan trọng trong dòng chảy kênh hở, trong đó việc xác định chính xác chiều dài nước nhảy có ý nghĩa quyết định đối với thiết kế quy mô bể tiêu năng. Mặc dù, đã có nhiều công thức thực nghiệm được đề xuất để dự báo chiều dài nước nhảy ổn định và từ đó trên nền nhẵn L_j , nhưng kết quả giữa các công thức vẫn tồn tại sai khác đáng kể khi áp dụng cho cùng số Froude đầu kênh Fr_1 . Do đó, nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng số với hai mô hình rối $k-\epsilon$ và RNG $k-\epsilon$ cho số Froude đầu kênh từ 4,61 đến 8,6 để phân tích và đánh giá độ phù hợp của các công thức thực nghiệm khi xác định L_j . Kết quả nghiên cứu chỉ rõ sự thay đổi phân bố vận tốc của dòng chảy dọc kênh, chênh lệch về biên dạng vận tốc dòng chủ cho các mô hình rối. Đồng thời nghiên cứu cũng tái hiện đầy đủ hình ảnh đường dòng giúp việc xác định và nhận diện chiều dài nước nhảy và chiều dài khu xoáy nước L_r được rõ ràng hơn. Mặt khác, nghiên cứu cho thấy các kết quả dự báo L_j và L_r với mô hình số có sự chênh lệch đáng kể giữa hai mô hình rối và thiên nhỏ hơn so với các công thức thực nghiệm, đặc biệt ở dải số Fr_1 trung bình đến lớn. Nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng hỗ trợ lựa chọn mô hình rối phù hợp và góp phần nâng cao độ tin cậy trong việc xác định chiều dài nước nhảy phục vụ thiết kế bể tiêu năng trên nền nhẵn.

KEYWORDS

Hydraulic jumps on a smooth bed
Jump length
Empirical formulas
CFD simulation
 $k-\epsilon$ turbulence model
RNG $k-\epsilon$ turbulence model

ABSTRACT

Hydraulic jumps represent a key energy dissipation mechanism in open-channel flows, in which accurate determination of the jump length is essential for the design and sizing of stilling basins. Although numerous empirical formulas have been proposed to predict the jump length of stable and free hydraulic jumps on smooth beds, significant discrepancies remain among these formulations when applied to identical upstream Froude numbers. Therefore, this study employs numerical simulations using two turbulence models, the standard $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ models, to analyse and evaluate the applicability of empirical formulas for predicting the jump length L_j over a range of upstream Froude numbers from 4,61 to 8,6. The results reveal notable differences in the longitudinal velocity distribution and main flow velocity profiles predicted by the two turbulence models. In addition, the reconstructed streamline patterns enable clearer identification of the jump length and the roller length L_r . The numerical results indicate that the predicted values of L_j and L_r exhibit significant discrepancies between the two turbulence models, tending to be smaller than those estimated by empirical formulas, particularly for moderate to high Froude numbers. The findings provide a quantitative basis for selecting appropriate turbulence models and contribute to improving the reliability of jump length prediction for the design of stilling basins on smooth beds.

1. Đặt vấn đề

Nước nhảy là hiện tượng chuyển tiếp đột ngột từ dòng chảy xiết sang dòng chảy êm trong kênh hở và thường xuất hiện tại các công trình thủy như: đập tràn, kênh dẫn và bể tiêu năng. Nhờ khả năng tiêu tán năng lượng lớn trong phạm vi không gian tương đối ngắn, nước nhảy đóng vai trò quan trọng trong việc hạn chế xói lở hạ lưu và bảo đảm an toàn cho kết cấu công trình. Trong đó, chiều dài nước nhảy là thông số thiết kế quan trọng, quyết định phạm vi gia cố đáy và kích thước bể tiêu năng.

Để dự báo chiều dài nước nhảy trên nền nhẵn, nhiều công thức thực nghiệm đã được đề xuất dựa trên các thí nghiệm mô hình vật lý, tiêu biểu như: các công thức của Woycieki (1934), Kinney (1935) [1]; Chow (1959), Elevatorski (1959) [2]; N. N. Pavlôpxki, V. A. Saomian [3], ... Tuy nhiên, khi áp dụng cho cùng điều kiện dòng chảy và cùng số Froude đầu kênh Fr_1 , các công thức này thường cho kết quả khác nhau đáng kể. Nguyên nhân của sự sai khác được cho là liên quan đến sự khác biệt về điều kiện thí nghiệm, quy mô mô hình thực nghiệm hay cách xác định điểm kết thúc nước nhảy, cũng như giới hạn của phương pháp đo mặt thoáng khi có dao động mạnh.

*Liên hệ tác giả: tytc@huce.edu.vn

Nhận ngày 18/12/2025, sửa xong ngày 20/01/2026, chấp nhận đăng ngày 22/01/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1206>

Ngày nay, với sự phát triển mạnh mẽ của phương pháp mô phỏng động lực học chất lỏng (CFD) dựa trên hệ phương trình Reynolds trung bình (RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes) cùng các mô hình rối hai phương trình đã mở ra khả năng mô tả chi tiết hơn cấu trúc dòng chảy trong bài toán nước nhảy nói riêng và các vấn đề thủy lực phức tạp trong lĩnh vực công trình thủy nói chung. Các mô hình rối như $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$ cho phép tái hiện trường vận tốc, trường rối và hình thái mặt thoáng với mức độ chi tiết cao, qua đó cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá lại các công thức thực nghiệm truyền thống.

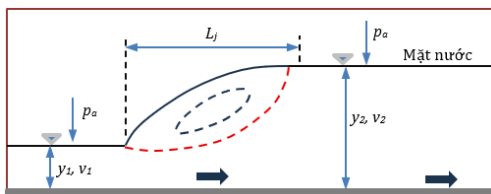
Mặc dù mô hình CFD đã được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu thủy lực công trình. Tuy nhiên, số lượng nghiên cứu so sánh một cách hệ thống giữa các công thức thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy với kết quả mô phỏng số, đặc biệt trên nền nhẵn và trong dải số Froude từ 4,61 đến 8,6 vẫn còn hạn chế, chưa được làm rõ. Điều này gây khó khăn cho việc lựa chọn công thức phù hợp trong thiết kế và lựa chọn kích thước hiệu quả của bể tiêu năng.

Xuất phát từ thực tế trên, nghiên cứu này tập trung phân tích và đánh giá các công thức thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy ổn định, tự do trên nền nhẵn thông qua mô phỏng CFD với hai mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$ với sự thay đổi của số Froude đầu kênh thay đổi từ 4,61 đến 8,6 (nước nhảy hoàn chỉnh). Kết quả nghiên cứu nhằm làm rõ mức độ sai khác giữa các công thức, đánh giá ảnh hưởng của mô hình rối đến chiều dài nước nhảy dự báo, và cung cấp cơ sở khoa học hỗ trợ lựa chọn phương pháp tính toán phù hợp trong thiết kế công trình tiêu năng.

2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở lý thuyết nước nhảy hoàn chỉnh

Nước nhảy là hiện tượng chuyển tiếp đặc trưng của dòng chảy xiết đột ngột chuyển sang trạng thái dòng chảy êm. Sự thay đổi chế độ dòng chảy này đi kèm với sự tăng đột biến độ sâu, giảm vận tốc dòng chảy và gia tăng đáng kể mức độ rối. Trong các công trình tháo nước, đập dâng và kênh hở hay công trình thoát nước cho đường cao tốc khu vực miền núi, nước nhảy giữ vai trò quan trọng nhờ khả năng tiêu tán năng lượng tập trung, hạn chế xói lở nền và đảm bảo an toàn cho kết cấu công trình khi vận hành. Hình 1 mô tả hiện tượng nước nhảy ổn định, tự do trên kênh lăng trụ mặt cắt chữ nhật, đáy nằm ngang và nhẵn.



Hình 1. Sơ đồ nước nhảy ổn định, tự do trên kênh lăng trụ chữ nhật nằm ngang.

Nghiên cứu tóm tắt giới thiệu một số đặc trưng chính của nước nhảy liên quan trực tiếp tới nội dung của bài báo: độ sâu liên hợp sau

nước nhảy y_2 , độ sâu phân giới y_c , vận tốc phân giới v_c , số Froude đầu kênh Fr_1 , năng lượng dòng chảy tại đầu kênh và hạ lưu lần lượt là E_1 , E_2 được biểu diễn qua các biểu thức dưới đây.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}; y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; v_c = \frac{q}{y_c} \quad (1)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1); E_1 = v_1 + \frac{v_1^2}{2g}; E_2 = v_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2)$$

Chiều dài nước nhảy L_j được xác định thông qua thực nghiệm và phân tích hồi quy, nghiên cứu tiến hành tổng hợp và giới thiệu một số công thức thực nghiệm xác định L_j đã được công bố và sử dụng trong thiết kế công trình tiêu năng như bảng 1.

2.2. Mô hình CFD

Phần mềm Flow-3D được sử dụng khá phổ biến trên thế giới nhờ phạm vi ứng dụng rất rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật. Ở Việt Nam, hiện có một số lượng hạn chế các Trường đại học, Viện nghiên cứu và đơn vị thiết kế trong lĩnh vực công trình thủy ứng dụng để mô phỏng những vấn đề thủy lực công trình phức tạp, thủy lực môi trường, ..., đây là mô hình tính toán động lực học chất lỏng 3 chiều (3D) thông qua phương pháp thể tích hữu hạn giải hệ phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng Navier-Stokes.

Mô hình Flow-3D phiên bản 2016 [8] có tích hợp sẵn một số mô hình dòng chảy rối như: mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn, RNG $k-\epsilon$, LES, ... Trong nghiên cứu này, hai mô hình rối chính được áp dụng là $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$. Cả hai mô hình đều thuộc nhóm mô hình rối hai phương trình, mô tả trường rối thông qua phương trình vận chuyển năng lượng động học rối (k) và tốc độ tiêu tán năng lượng rối (ϵ).

Thông qua sự so sánh giữa hai mô hình rối cho phép đánh giá mức độ phù hợp trong mô phỏng chiều dài nước nhảy L_j trên đây nhẵn. Mặt khác, mô hình rối RNG $k-\epsilon$ được lựa chọn để ước tính ứng suất kéo dòng chảy gần tường, vì nó đã được chứng minh là có độ chính xác cao [9]. Mô hình này cho thấy các kết quả chấp nhận được trong các vùng hình học phức tạp và trường dòng chảy trong các công trình thủy lực, chẳng hạn như ở các dốc tiêu năng dạng bậc [10, 11] hay nước nhảy trên đáy nhám [12, 13], ... Trong khi đó mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn là mô hình đơn giản, ổn định và phù hợp với các dòng chảy rối phát triển, thích hợp cho các mô phỏng quy mô công trình thủy lực (đập tràn, bể tiêu năng), nhưng điểm không mô phỏng tốt các vùng có độ tách dòng mạnh, xoáy lớn hoặc biến dạng rối mạnh. Các phương trình cơ bản trong mô hình toán được giới thiệu cơ bản như sau:

- Phương trình liên tục và phương trình động lượng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (32)$$

- Phương trình k, ϵ [14]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (33)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (34)$$

trong đó: ρ là mật độ, p là áp suất; t là thời gian; u_i và u_j là các thành phần vận tốc; μ , μ_t lần lượt là hệ số nhớt động lực học của chất lỏng và hệ số nhớt dòng rối.

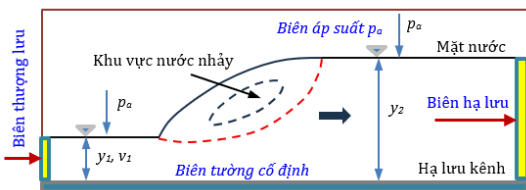
2.3. Thiết kế các kịch bản (trường hợp) nghiên cứu

Nghiên cứu thực hiện mô phỏng số với mô hình rối $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn cho 05 trường hợp số Fr_1 như trong trường hợp mô phỏng với mô hình rối RNG $k-\varepsilon$ đã được thực hiện bởi nhóm tác giả T. C. Tý và P. C. Thành [15]. Chi tiết các thông số dòng chảy cho mô phỏng được thể hiện trong bảng 2 dưới đây.

2.4. Thiết lập miền tính toán và điều kiện biên mô hình số

Miền tính toán trong nghiên cứu được thiết lập bao quát toàn bộ khu vực xảy ra hiện tượng nước nhảy, từ phần đầu kênh dẫn nơi bố trí dòng chảy xiết đến một phần hạ lưu kênh dẫn tại đó dòng chảy đã chuyển tiếp hoàn toàn thành dòng chảy êm như thể hiện trên Hình 2. Miền mô phỏng được thiết lập với lưới cấu trúc (structured mesh), ô lưới có kích thước 3 chiều giống nhau (hexahedra), bài báo kế thừa kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả T. C. Tý và P. C. Thành [15] đã công bố cho kích thước ô lưới được lựa chọn là 2mm đối với các trường hợp nghiên cứu ứng dụng mô hình rối $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn.

Để thực hiện được các mô phỏng số, chúng ta cần gán các điều kiện biên cho mô hình tính toán. Trong bài toán này, biên thượng lưu (biên đầu kênh dẫn) được sử dụng cho các kịch bản mô phỏng được gán đồng thời mực nước dòng chảy xiết y_1 và vận tốc dòng chảy v_1 từ Bảng 2, biên hạ lưu được thiết lập mực nước tĩnh y_2 ; áp suất khí quyển được gán cho biên mặt thoáng của dòng chảy trên kênh dẫn; đáy kênh được thiết lập là bên tường cố định, hai bên kênh dẫn được gán là biên đối xứng, chi tiết thể hiện trên Hình 2.



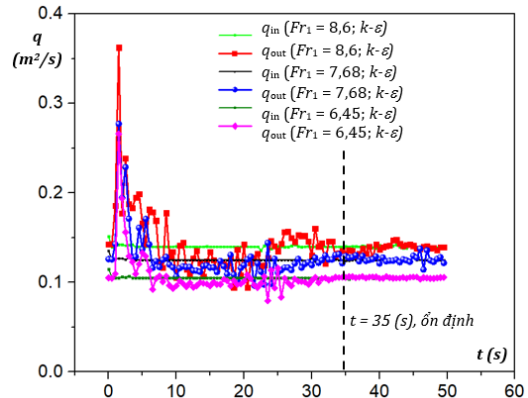
Hình 2. Miền tính toán và điều kiện biên mô phỏng số.

3. Kết quả và thảo luận

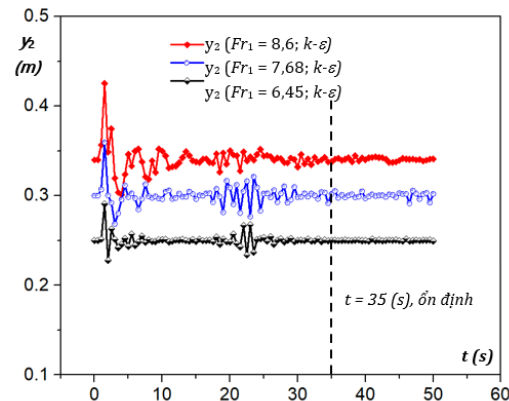
3.1. Xác nhận mô hình số

Việc xác nhận kết quả mô hình số đối với mô hình rối RNG $k-\varepsilon$ đã được thực hiện bởi T. C. Tý và P. C. Thành [15], do đó với cỡ lưới được lựa chọn trong mô phỏng 2 mm đảm bảo độ tin cậy để thực hiện

với các mô phỏng cho mô hình rối $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn. Vì vậy, ở nghiên cứu này chỉ kiểm tra độ ổn định của mô hình số thông qua việc kiểm tra mức độ dao động của các điều kiện biên trong mô hình số. Cụ thể là kiểm soát biên lưu lượng vào đầu kênh (q_{in}) và ra mô hình tại hạ lưu kênh dẫn (q_{out}), cùng với độ ổn định của mực nước hạ lưu (y_2) được thiết lập cho các mô phỏng số. Nghiên cứu được thực hiện trên máy tính có cấu hình cơ sở: với 02 CPU Intel(R) Xeon(R) Platinum 8180 CPU @ 2.50 GHz (Logical processors: 112), 96 GB RAM. Các kết quả kiểm tra mức độ ổn định của mô hình mô phỏng số được trình bày trên Hình 3 và 4.



Hình 3. Kiểm tra độ ổn định của tham số tỷ lưu lượng q trong mô hình số ứng với các trường hợp số Fr_1 khác nhau.



Hình 4. Kiểm tra độ ổn định của biến mực nước hạ lưu y_2 trong mô phỏng với các số Fr_1 khác nhau.

Từ Hình 3 và 4, nhận thấy mô hình số đạt được độ ổn định với thời gian mô phỏng khoảng $t = 35$ s, là căn cứ để dừng công việc mô phỏng và trích rút kết quả để phân tích cho các nội dung nghiên cứu tiếp theo. Kết quả mô phỏng số xác định một số đặc trưng nước nhảy như: Chiều dài nước nhảy L_j , chiều dài khu nước xoáy L_r , và chiều dài phạm vi gia cố đáy bề L_{gc} (tính từ vị trí chân nước nhảy tới vị trí mà trường vận tốc dòng chủ có sự suy giảm rất nhanh, mạnh trong khu vực nước nhảy hay vị trí mức độ tiêu tán năng lượng rối giảm mạnh và trở về giá trị nhỏ). Kết quả được thể hiện chi tiết trên Bảng 3.

Bảng 1. Tổng hợp công thức thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy L_j .

Tác giả	Công thức xác định L_j	(-)
Riegel and Beebe (1917) [1]	$L_j \approx 5(y_2 - y_1)$	(3)
Safranez (1927) [1]	$L_j \approx 5,2y_2$	(4)
Woycieki (1934) [1]	$L_j = (y_2 - y_1)(8 - 0,05 \frac{y_2}{y_1})$	(5)
Smetana (1934) [1]	$L_j \approx 6(y_2 - y_1)$	(6)
Douma (1934) [1]	$L_j = 5,2y_2$	(7)
Aravin (1935) [1]	$L_j \approx 5,4(y_2 - y_1)$	(8)
Kinney (1935) [1]	$L_j = 6,02(y_2 - y_1)$	(9)
Page (1935) [1]	$L_j = 5,6y_2$	(10)
Chertoussov (1935) [1]	$L_j = 10,3y_1(Fr_1 - 1)^{0,81}$	(11)
Bakhmetef, Matzke (1936) [1]	$L_j = 5(y_2 - y_1)$	(12)
Ivanchenko (1936) [1]	$L_j = 10,6(y_2 - y_1)(Fr_1^2)^{-0,185}$	(13)
Posey (1941) [1]	$L_j \approx (4 \div 7)(y_2 - y_1)$	(14)
Wu (1949) [1]	$L_j = 10(y_2 - y_1)Fr_1^{-0,16}$	(15)
Marques et al. (1997) [1]	$L_j = 8,5(y_2 - y_1)$	(16)
Simões et al. (2012) [1]	$L_j = 9,52(y_2 - y_1)$	(17)
Knapp (1932) [1]	$L_j = (62,5y_1 / E_1 + 11,3) * [(y_1 - y_2)^2 / (2g) - (E_1 - E_2)]$	(18)
Simões (2008) [1]	$L_j = y_2(Fr_1^2 - 81,85Fr_1 + 61,13) * 1 / (-0,62 - 10,7Fr_1)$	(19)
Chow (1959) [2]	$L_j = 6,1y_2$	(20)
Elevatorski (1959) [2, 4]	$L_j = 6,9(y_2 - y_1)$	(21)
Semetana (1934) [5]	$L_j = 6(y_2 - y_1)$	(22)
Bakhmateff (1932) [6]	$L_j = 5(y_2 - y_1)$	(23)
Nolan (1936) [7]	$L_j = 5,4(y_2 - y_1)$	(24)
Công thức thực nghiệm [3]	$L_j = (4 \div 5)(y_2 - y_1)$	(25)
N. N. Pavlôpxki [3]	$L_j = 2,5(1,9y_2 - y_1)$	(26)
V. I. Aravin [3]	$L_j = \left[0,18 \left(\frac{y_c}{y_1} \right)^{4,35} + 25 \right] \frac{(y_2 - y_1)^3 y_1^2}{y_c^3 y_2}$	(27)
V. A. Saomian [3]	$L_j = 3,6(y_2 - y_1) \left(1 + \frac{y_1}{y_2} \right)^2$	(28)
M. Đ. Tsec tôuxốp [3]	$L_j = 10,3y_1 \left[\sqrt{\left(\frac{y_c}{y_1} \right)^3 - 1} \right]^{0,81}$	(29)
O. M. Aivadian [3]	$L_j = 8 \cdot \frac{10 + \sqrt{Fr_1}}{Fr_1} \cdot \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$	(30)

Bảng 2. Kích bản mô phỏng và điều kiện dòng chảy xiết đầu kênh [15].

TT	q (m ² /s)	y_1 (m)	v_1 (m)	$Re_1 \cdot 10^3$ (-)	Fr_1 (-)
MH1	0,075	0,03	2,50	74,26	4,61
MH2	0,090		3,00	89,11	5,53
MH3	0,105		3,50	103,96	6,45
MH4	0,125		4,17	123,76	7,68
MH5	0,140		4,67	138,61	8,60

trong đó: q là lưu lượng đơn vị, y_1 , v_1 , Fr_1 , Re_1 lần lượt là độ sâu, vận tốc, số Froude, số Reynold dòng chảy tại mặt cắt trước khi xảy ra nước nhảy (mặt cắt ngay phạm vi chân nước nhảy).

Bảng 3. Kết quả tính toán chiều dài nước nhảy L_j , chiều dài khu xoáy L_r và chiều dài đáy kênh cần gia cố L_{gc} .

TT	Fr_1 (-)	Mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn			Mô hình rối RNG $k-\epsilon$		
		L_j / y_1 (-)	L_r / y_1 (-)	L_{gc} / L_j (-)	L_j / y_1 (-)	L_r / y_1 (-)	L_{gc} / L_j (-)
MH1	4,61	32,00	28,67	0,73	25,67	21,67	0,71
MH2	5,53	33,33	29,33	0,70	29,33	26,67	0,68
MH3	6,45	37,67	35,00	0,64	34,67	29,00	0,65
MH4	7,68	50,00	44,00	0,49	43,33	36,67	0,55
MH5	8,60	50,00	48,33	0,47	46,67	40,00	0,51

3.2. Dạng đường mặt nước và phân bố vận tốc dòng chảy

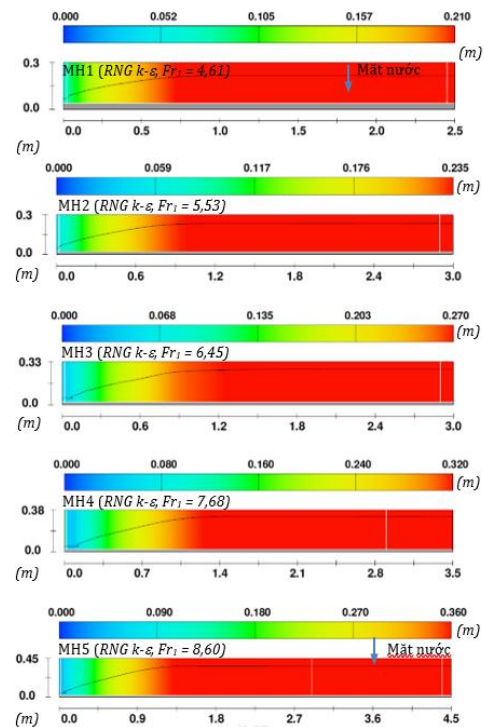
Kết quả mô phỏng cho thấy hiện tượng nước nhảy trên nền nhẵn được hình thành rõ ràng đối với tất cả các kích bản nghiên cứu, thể hiện qua sự tăng đột ngột của mực nước, sự suy giảm nhanh vận tốc dòng chủ và sự xuất hiện vùng xoáy ngược đặc trưng ngay sau chân nước nhảy. Dạng đường mặt nước thu được từ mô hình số phản ánh đầy đủ cấu trúc điển hình của nước nhảy hoàn chỉnh, bao gồm vùng dòng chảy xiết trước nhảy, vùng nước xoáy (roller region – con lăn) và vùng dòng chảy phục hồi ở hạ lưu (dòng chảy êm).

Hình 5 và Hình 6 trình bày dạng nổi tiếp dòng chảy và nước nhảy ứng với mô hình rối RNG $k-\epsilon$ và $k-\epsilon$ tiêu chuẩn cho các giá trị số Froude đầu kênh $4,61 \leq Fr_1 \leq 8,6$. Đối với cả hai mô hình, khi số Fr_1 tăng, chiều dài vùng nước xoáy và biên độ dao động mặt nước đều gia tăng, phản ánh sự tăng cường mức độ rối và tiêu tán năng lượng trong khu vực nước nhảy.

Khi so sánh kết quả mô phỏng từ hai mô hình rối cho thấy mô hình RNG $k-\epsilon$ tái hiện biên dạng mặt nước mượt hơn và vị trí kết thúc nước nhảy rõ ràng hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn. Trong khi đó, với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn, mặt nước có xu hướng dao động mạnh hơn và vùng chuyển tiếp từ con lăn sang dòng chảy ổn định ở hạ lưu kém rõ nét, đặc biệt trong các trường hợp số Froude trung bình đến lớn. Sự khác biệt này phản ánh khả năng mô tả trường rối và cơ chế suy giảm năng lượng khác nhau của hai mô hình.

Phân bố vận tốc và đường dòng tương ứng được thể hiện trong Hình 7 (RNG $k-\epsilon$) và Hình 8 ($k-\epsilon$ tiêu chuẩn). Kết quả cho thấy sự suy giảm vận tốc dòng chủ diễn ra mạnh mẽ ngay sau chân nước nhảy, đồng

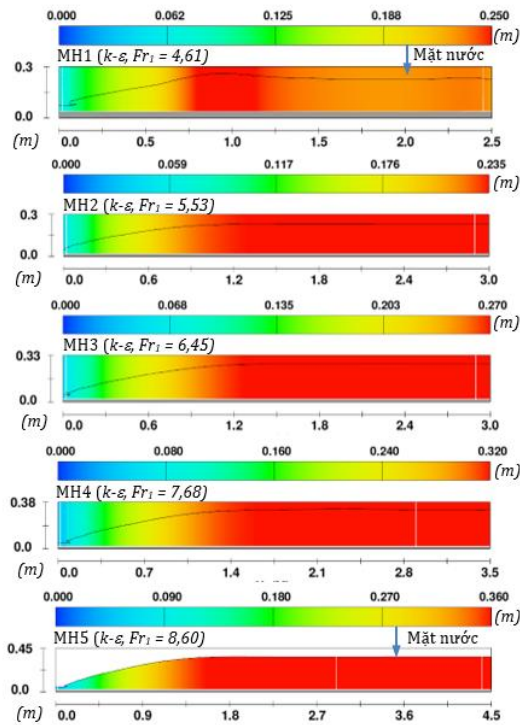
thời xuất hiện vùng dòng chảy ngược sát mặt nước, đặc trưng cho vùng nước xoáy của nước nhảy.



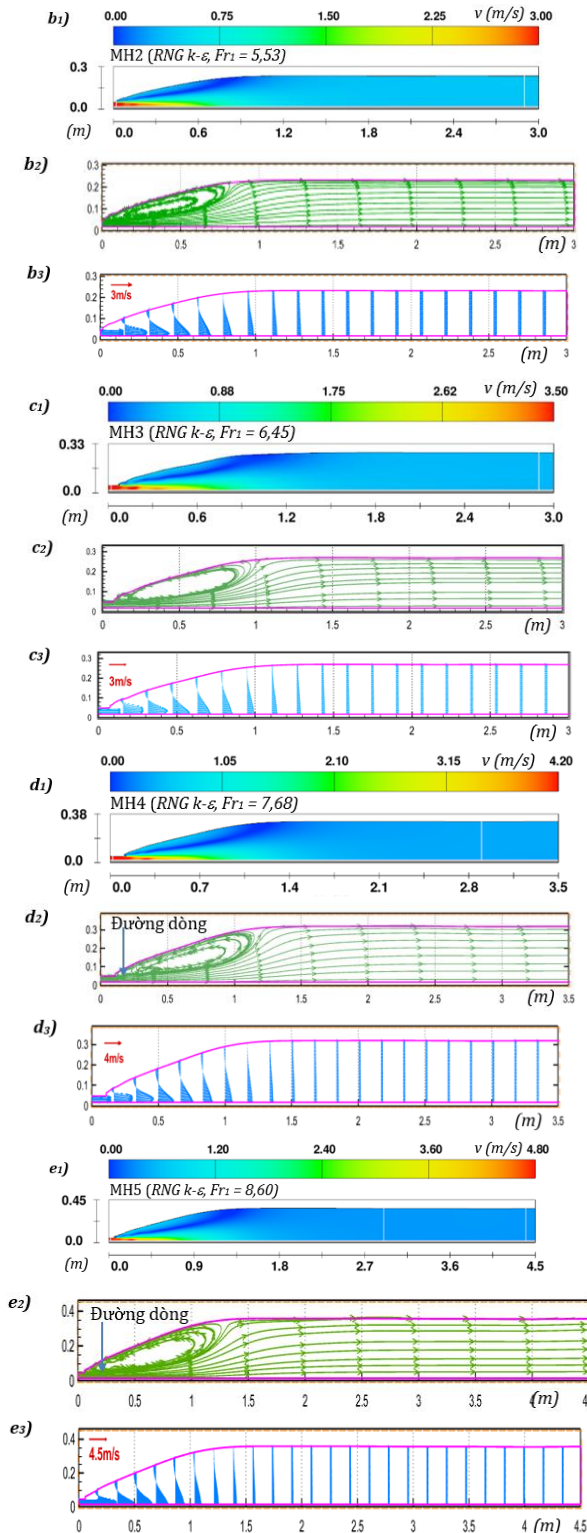
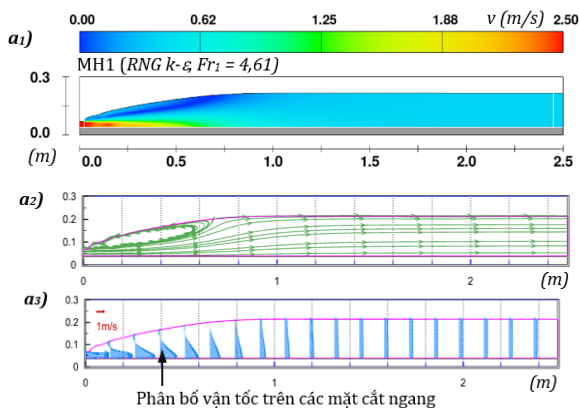
Hình 5. Nổi tiếp dòng chảy và nước nhảy với mô hình rối RNG $k-\epsilon$ cho các trường hợp nghiên cứu.

Đối với mô hình RNG $k-\varepsilon$, vùng xoáy ngược được mô tả rõ ràng, có hình dạng gọn và chiều dài khu xoáy được xác định nhất quán theo sự thay đổi của số Froude. Các đường dòng trong vùng nước nhảy cho thấy cấu trúc xoáy khép kín, ổn định và ít bị khuếch tán, giúp việc xác định chiều dài nước nhảy L_j và chiều dài khu xoáy L_r trở nên trực quan và đáng tin cậy hơn.

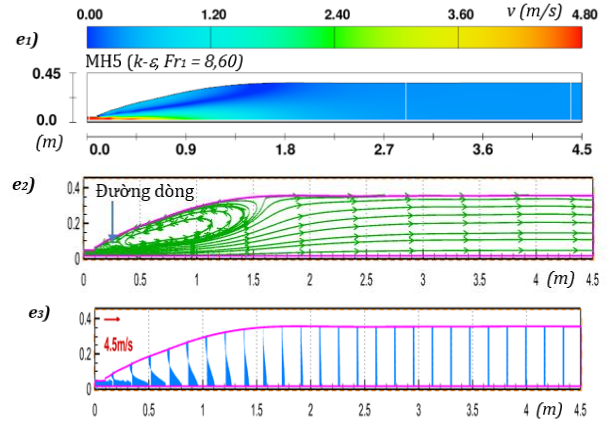
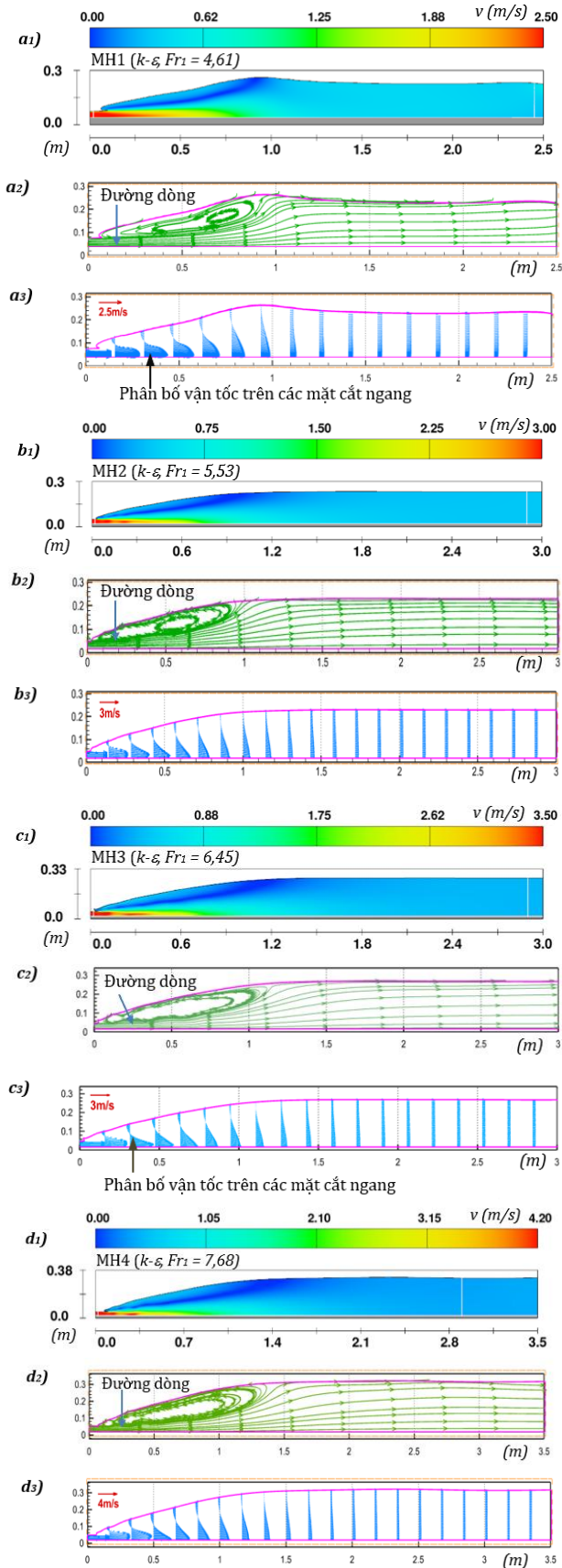
Ngược lại, với mô hình $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn, trường vận tốc có xu hướng khuếch tán mạnh hơn, vùng xoáy mở rộng và ranh giới giữa dòng chảy ngược và dòng chảy chính kém sắc nét. Các đường dòng cho thấy hiện tượng phân tán xoáy rõ rệt hơn, đặc biệt trong các trường hợp số Froude lớn, dẫn đến sự không chắc chắn trong việc xác định chính xác điểm kết thúc của nước nhảy.



Hình 6. Nối tiếp dòng chảy và nước nhảy với mô hình rối $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn cho các trường hợp nghiên cứu.



Hình 7. Phân bố vận tốc, đường dòng với mô hình rối RNG $k-\varepsilon$ cho các trường hợp nghiên cứu.



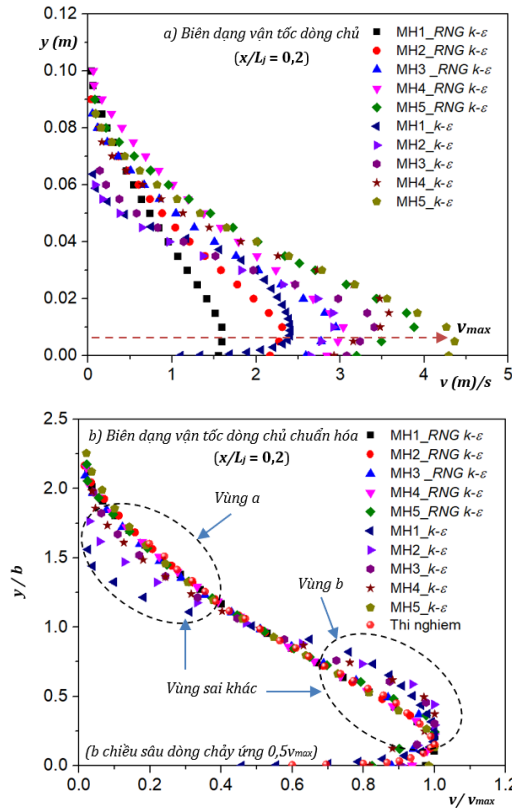
Hình 8. Phân bố vận tốc, đường dòng với mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn cho các trường hợp nghiên cứu.

Nhìn chung, sự khác biệt trong mô tả trường vận tốc và đường dòng giữa hai mô hình rối phản ánh trực tiếp cơ chế xử lý rối khác nhau của mỗi mô hình. Mô hình RNG $k-\epsilon$, với khả năng điều chỉnh tốt hơn mức tiêu tán rối trong các vùng có gradient vận tốc lớn, cho kết quả mô phỏng nước nhảy ổn định và phù hợp hơn về mặt vật lý. Điều này giải thích vì sao chiều dài nước nhảy và chiều dài khu xoáy thu được từ mô hình RNG $k-\epsilon$ thường nhỏ hơn và sát với cấu trúc dòng chảy thực hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn, đặc biệt trong dải số Froude trung bình đến lớn.

Hình 9 thể hiện biên dạng vận tốc dòng chủ tại mặt cắt $x/L_j = 0,2$ (x tính từ chân nước nhảy), là vị trí nằm trong vùng đầu của nước nhảy, nơi quá trình chuyển tiếp từ dòng chảy xiết sang dòng chảy êm vẫn đang diễn ra mạnh mẽ. Tại vị trí này, trường dòng chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng tia vận tốc cao, vùng xoáy ngược phía trên và quá trình trao đổi động lượng theo phương đứng, do đó biên dạng vận tốc phản ánh rõ mức độ khác biệt trong khả năng mô phỏng của các mô hình rối.

Kết quả cho thấy cả hai mô hình rối đều tái hiện được xu hướng chung của biên dạng vận tốc với giá trị vận tốc lớn tập trung ở vùng gần đáy và suy giảm nhanh theo chiều sâu. Tuy nhiên, sự khác biệt đáng kể xuất hiện tại vùng trung gian của cột nước. Mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn cho biên dạng vận tốc tương đối “phẳng” hơn, với vùng vận tốc cao lan rộng lên phía trên (Hình 9 vùng b), phản ánh xu hướng khuếch tán rối mạnh theo phương đứng. Điều này cho thấy mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn có xu hướng đánh giá cao hệ số nhớt rối, dẫn đến sự pha trộn động lượng quá mức trong vùng con lăn.

Ngược lại, mô hình RNG $k-\epsilon$ cho biên dạng vận tốc dốc hơn, với gradient vận tốc lớn hơn tại vùng chuyển tiếp giữa dòng chính và vùng xoáy. Vận tốc cực đại được duy trì sát đáy hơn (xem Hình 9b), trong khi vận tốc ở vùng phía trên giảm nhanh. Đặc điểm này phản ánh khả năng của mô hình RNG $k-\epsilon$ trong việc mô tả tốt hơn sự suy giảm rối và ảnh hưởng của biến dạng rối mạnh, vốn là đặc trưng của vùng đầu nước nhảy. Nhờ đó, mô hình RNG $k-\epsilon$ thể hiện rõ hơn ranh giới giữa dòng tia xiết và vùng xoáy ngược phía trên.



Hình 9. Biên dạng vận tốc dòng chủ trong khu vực nước nhảy với các mô hình rối: $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$ tại vị trí $x/L_j = 0,2$.

Sự khác biệt trong biên dạng vận tốc tại $x/L_j = 0,2$ là minh chứng, giải thích một phần nguyên nhân trực tiếp dẫn đến sai khác trong dự báo chiều dài nước nhảy và chiều dài khu nước xoáy giữa hai mô hình rối. Mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn, do khuếch tán rối mạnh hơn, có xu hướng làm suy yếu nhanh tia dòng và dẫn đến chiều dài nước nhảy lớn hơn. Trong khi đó, mô hình RNG $k-\epsilon$ duy trì cấu trúc dòng tia rõ ràng hơn trong giai đoạn đầu của nước nhảy, từ đó dự báo chiều dài nước nhảy và chiều dài khu xoáy nhỏ hơn và phù hợp hơn với bản chất vật lý của dòng chảy.

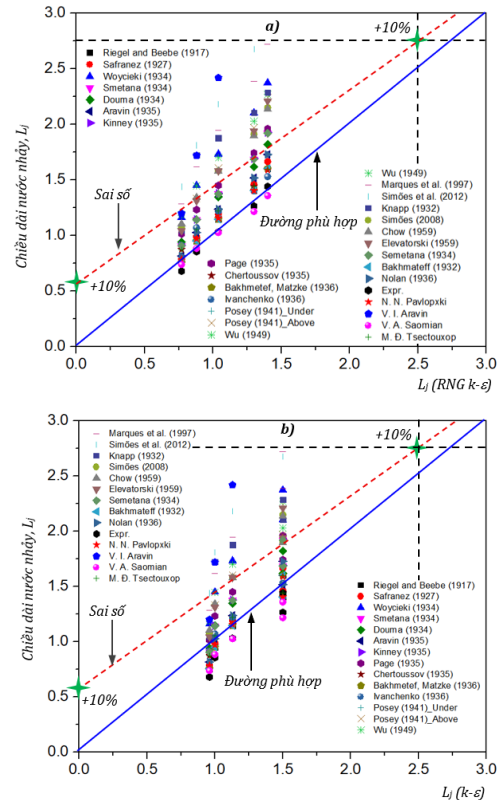
Phân tích Hình 9 cho thấy việc lựa chọn mô hình rối có ảnh hưởng rõ rệt đến mô phỏng cấu trúc vận tốc trong vùng đầu nước nhảy. Trong các bài toán mà mục tiêu là xác định chính xác chiều dài nước nhảy và phạm vi ảnh hưởng của vùng xoáy, mô hình RNG $k-\epsilon$ tỏ ra có ưu thế hơn nhờ khả năng mô tả hợp lý gradient vận tốc và cường độ rối trong vùng dòng chảy biến dạng mạnh.

3.3. Phân tích và đánh giá chiều dài nước nhảy L_j

Kết quả mô phỏng số cho thấy chiều dài nước nhảy L_j tăng theo số Fr_1 đối với cả hai mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$, phản ánh đúng xu thế vật lý của quá trình chuyển tiếp từ dòng chảy xiết sang dòng chảy êm. Tuy nhiên, giá trị L_j thu được từ hai mô hình rối có sự

khác biệt đáng kể và nhìn chung nhỏ hơn so với các giá trị dự báo từ các công thức thực nghiệm đã được tổng hợp trong mục 2.1.

Cụ thể, kết quả thể hiện trên Hình 10 cho thấy mô hình RNG $k-\epsilon$ dự báo chiều dài nước nhảy ngắn hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn trong toàn bộ dải số Fr_1 nghiên cứu. Sự khác biệt này trở nên rõ rệt hơn khi Fr_1 tăng, cho thấy ảnh hưởng của cách mô hình hóa rối đến việc xác định vị trí kết thúc nước nhảy. Mô hình RNG $k-\epsilon$, với khả năng mô tả tốt hơn sự suy giảm năng lượng rối và phân bố ứng suất kéo trong vùng xoáy mạnh, cho phép xác định ranh giới kết thúc nước nhảy sớm hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn.

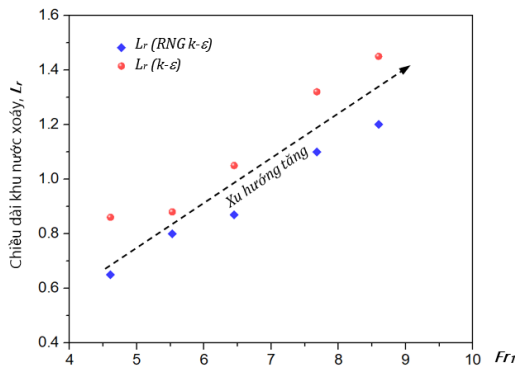


Hình 10. So sánh chiều dài nước nhảy L_j giữa kết quả mô phỏng số (mô hình rối: $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$) và các nghiên cứu khác.

Khi so sánh với các công thức thực nghiệm cổ điển, kết quả mô phỏng số từ cả hai mô hình rối đều có xu hướng thiên nhỏ, đặc biệt trong dải số Fr_1 trung bình đến lớn. Sự chênh lệch này có thể được lý giải bởi các công thức thực nghiệm thường được xây dựng dựa trên quan sát, đo đạc hình thái mặt nước hoặc chiều dài khu nước xoáy bề mặt, trong khi mô hình CFD cho phép xác định chiều dài nước nhảy dựa trên sự suy giảm đồng thời của trường vận tốc, trường rối và dao động mật thoảng. Do đó, ranh giới kết thúc nước nhảy trong mô phỏng số thường được xác định nghiêm ngặt hơn so với phương pháp đo truyền thống.

Ngoài ra, sự không thống nhất trong định nghĩa chiều dài nước nhảy giữa các nghiên cứu thực nghiệm cũng là nguyên nhân dẫn đến sai khác hệ thống. Một số công thức đo đến vị trí mặt nước ổn định

hoàn toàn, trong khi một số khác chỉ xét đến phạm vi tồn tại của vùng nước xoáy. Kết quả mô phỏng trong nghiên cứu này cho thấy chiều dài khu nước xoáy L_r chiếm tỷ lệ lớn của giá trị L_j .



Hình 11. Sự thay đổi của chiều dài khu xoáy nước L_r với số Fr_1 các mô hình rối: $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$.

Hình 11 cho thấy chiều dài khu vực nước xoáy L_r tăng rõ rệt theo số Fr_1 đối với cả hai mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$, phản ánh sự gia tăng cường độ rối và mức độ phát triển của vùng nước xoáy nước nhảy khi năng lượng dòng vào tăng. Xu hướng này phù hợp với cơ chế vật lý của nước nhảy hoàn chỉnh trên nền nhẵn, trong đó vùng xoáy mở rộng theo sự gia tăng động lượng dòng chảy xiết.

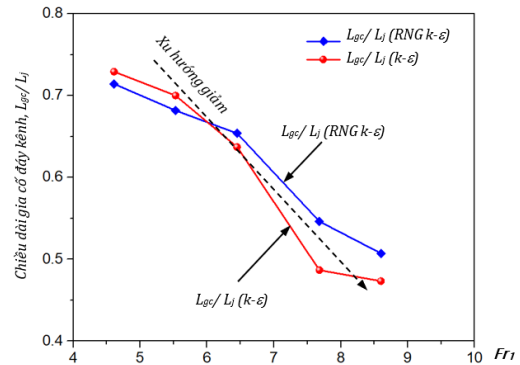
Mô hình RNG $k-\epsilon$ dự báo chiều dài khu vực xoáy L_r nhỏ hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn trong toàn bộ dải Fr_1 khảo sát. Sự sai khác này trở nên rõ rệt hơn ở các giá trị Fr_1 trung bình đến lớn, cho thấy mô hình RNG $k-\epsilon$ mô tả quá trình tiêu tán năng lượng rối hiệu quả hơn và làm suy giảm sớm cấu trúc xoáy lớn trong vùng xoáy nước. Ngược lại, mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn có xu hướng duy trì vùng xoáy dài hơn do hạn chế trong việc mô phỏng chính xác sự biến dạng và suy giảm rối mạnh.

Hình 12 thể hiện rõ xu hướng biến đổi của phạm vi gia cố đáy kênh L_{gc} theo số Fr_1 đối với hai mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$. Khi số Fr_1 tăng, L_{gc} có xu hướng giảm tương đối so với chiều dài nước nhảy L_j , phản ánh quá trình tiêu tán năng lượng diễn ra tập trung hơn ở vùng gần chân nước nhảy trong các trường hợp dòng chảy có năng lượng lớn.

Đối với cùng một giá trị Fr_1 , mô hình RNG $k-\epsilon$ dự báo phạm vi L_{gc} nhỏ hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn. Điều này cho thấy RNG $k-\epsilon$ mô tả quá trình suy giảm trường vận tốc dòng chủ và tốc độ tiêu tán năng lượng rối nhanh và tập trung hơn, đặc biệt trong vùng nước xoáy của nước nhảy. Ngược lại, mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn có xu hướng làm “kéo dài” vùng ảnh hưởng của dòng rối về phía hạ lưu, dẫn đến phạm vi gia cố đáy được xác định lớn hơn.

Xem xét L_{gc} là khoảng cách từ chân nước nhảy đến vị trí mà trường vận tốc dòng chủ và tốc độ tiêu tán năng lượng rối suy giảm mạnh và trở về giá trị nhỏ, kết quả này cho thấy RNG $k-\epsilon$ phản ánh rõ ràng hơn cơ chế tiêu tán năng lượng thực của nước nhảy. Điều này có ý nghĩa thực tiễn quan trọng, bởi việc sử dụng mô hình rối phù hợp có

thể giúp giảm chiều dài gia cố đáy kênh mà vẫn đảm bảo an toàn công trình, góp phần tối ưu hóa thiết kế bề tiêu năng trên nền nhẵn.



Hình 12. Thay đổi phạm vi gia cố đáy kênh với số Fr_1 cho các mô hình rối: $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$ nghiên cứu.

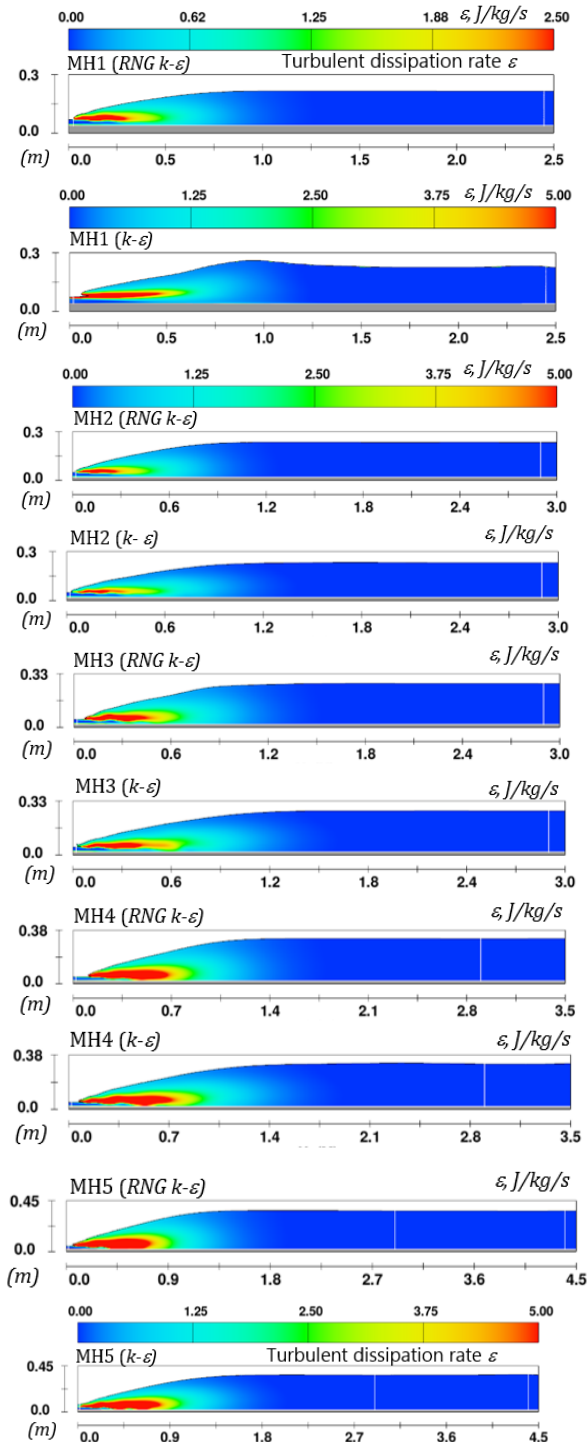
3.4. Phân tích đánh giá cơ chế tiêu tán năng lượng và xoáy trong khu nước nhảy

Hình 13 thể hiện phân bố không gian của tốc độ tiêu tán năng lượng rối ϵ trong khu vực nước nhảy ứng với các kịch bản số Fr_1 khác nhau, được mô phỏng bằng hai mô hình rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\epsilon$. Kết quả cho thấy sự tập trung mạnh của tham số ϵ tại vùng chân nước nhảy và khu vực ranh giới giữa dòng chủ và khu nước xoáy, phản ánh đúng cơ chế tiêu tán năng lượng chủ đạo của nước nhảy thông qua quá trình phát triển xoáy lớn và sự phá vỡ cấu trúc dòng chảy xiết.

Đối với mô hình RNG $k-\epsilon$, vùng có giá trị ϵ lớn được mô tả rõ ràng hơn, liên tục hơn và kéo dài theo phương dòng chảy so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn. Điều này cho thấy mô hình RNG $k-\epsilon$ có khả năng nắm bắt tốt hơn sự biến thiên cường độ rối trong vùng có gradient vận tốc lớn, đặc biệt là tại ranh giới giữa dòng chủ và dòng ngược trong khu nước xoáy. Ngược lại, mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn có xu hướng làm “mềm hóa” trường rối, dẫn đến vùng tiêu tán năng lượng rối phân bố hẹp hơn và suy giảm nhanh hơn theo chiều hạ lưu.

Khi số Fr_1 tăng, cả hai mô hình đều cho thấy sự gia tăng đáng kể về cường độ và phạm vi phân bố không gian của ϵ , phản ánh mức độ tiêu tán năng lượng mạnh hơn của nước nhảy. Tuy nhiên, sự khác biệt giữa hai mô hình trở nên rõ rệt hơn ở dải Fr_1 trung bình đến lớn, trong đó mô hình RNG $k-\epsilon$ dự báo mức tiêu tán năng lượng rối cao hơn và phân bố sâu hơn trong lòng dòng chảy. Điều này lý giải vì sao chiều dài nước nhảy và chiều dài khu nước xoáy xác định từ mô hình RNG $k-\epsilon$ thường nhỏ hơn so với mô hình $k-\epsilon$ tiêu chuẩn.

Nhìn chung, phân bố ϵ trong Hình 13 cung cấp bằng chứng trên khía cạnh vật lý rõ ràng cho sự khác biệt trong kết quả dự báo chiều dài nước nhảy giữa hai mô hình rối. Kết quả khẳng định rằng mô hình RNG $k-\epsilon$ phù hợp hơn để mô phỏng cơ chế tiêu tán năng lượng và cấu trúc xoáy phức tạp trong nước nhảy trên nền nhẵn, đặc biệt trong các trường hợp dòng chảy có cường độ rối cao.



Hình 13. Phân bố tốc độ tiêu tán của năng lượng rối ε với các mô hình rối: RNG $k-\varepsilon$ và $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn cho các kịch bản nghiên cứu.

Mặt khác, phổ phân bố tốc độ tiêu tán năng lượng rối ε trong Hình 13 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai mô hình rối $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn và RNG $k-\varepsilon$ trong khu vực nước nhảy. Với cùng điều kiện dòng chảy xiết đầu kênh, mô hình RNG $k-\varepsilon$ cho giá trị ε cực đại tập trung mạnh tại vùng con lặn và vùng vận tốc lớn ngay sau chân nước nhảy, trong khi mô hình

$k-\varepsilon$ tiêu chuẩn thể hiện vùng tiêu tán rộng hơn nhưng giá trị đỉnh ε thấp hơn. Định lượng cho thấy giá trị ε cực đại của mô hình RNG $k-\varepsilon$ lớn hơn khoảng 20% so với mô hình $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn trong dải số Froude trung bình đến lớn ($Fr_1 \approx 5,5 \div 8,6$), phản ánh khả năng mô tả tốt hơn quá trình khuếch đại rối và tiêu tán năng lượng mạnh cục bộ.

Sự suy giảm nhanh của ε theo phương dọc dòng chảy ở mô hình RNG $k-\varepsilon$ cũng diễn ra sớm hơn, dẫn đến phạm vi ảnh hưởng của vùng rối mạnh ngắn hơn so với mô hình $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn. Điều này giải thích vì sao chiều dài nước nhảy L_j và chiều dài khu xoáy L_r xác định từ mô hình RNG $k-\varepsilon$ thường nhỏ hơn và tập trung hơn so với mô hình $k-\varepsilon$ tiêu chuẩn. Kết quả cho thấy mô hình RNG $k-\varepsilon$ có xu hướng mô phỏng cơ chế tiêu tán năng lượng hiệu quả và thực hơn trong nước nhảy trên nền nhẵn, đặc biệt trong các trường hợp có cường độ rối lớn và gradient vận tốc mạnh.

3.5. Thảo luận

Kết quả mô phỏng trong nghiên cứu cho thấy rõ ràng việc sử dụng các công thức truyền thống để ước lượng chiều dài nước nhảy có thể dẫn đến sai số đáng kể khi áp dụng cho từng điều kiện thủy lực cụ thể. Những công thức này vốn được thiết lập từ thí nghiệm vật lý với quy mô, thiết bị và điều kiện thực nghiệm khác nhau, nên sự khác biệt trong dự báo là điều khó tránh. Khi đối chiếu với kết quả từ mô phỏng CFD được mô tả đầy đủ hơn quá trình phát triển vùng nước xoáy, phân bố dòng rối và chuyển tiếp mặt thoáng thì mức độ sai lệch của từng công thức được thể hiện rõ ràng hơn.

Một điểm đáng chú ý là không công thức nào giữ được độ chính xác ổn định trong toàn bộ dải số Froude nghiên cứu. Một số công thức cho kết quả tốt trong vùng số Froude trung bình nhưng lại lệch nhiều khi số Froude lớn, trong khi một số khác có xu hướng dự báo thiếu hoặc thừa chiều dài nước nhảy đối với các trường hợp năng lượng lớn. Điều này phản ánh cách mỗi công thức mô tả ranh giới kết thúc nước nhảy theo các tiêu chí riêng. Chẳng hạn, dựa trên sự biến mất của xoáy bề mặt, sự ổn định của mặt thoáng hoặc sự giảm dần của gradient vận tốc. Chính sự không thống nhất trong cách xác định này khiến việc so sánh trực tiếp giữa các công thức luôn tồn tại sai khác hệ thống.

Trong khi đó, mô phỏng CFD cho phép nhận dạng chính xác hơn quá trình suy giảm rối và vị trí dòng chảy trở lại trạng thái ổn định. Nhờ đó, CFD giúp chỉ ra những giới hạn của các công thức thực nghiệm, chẳng hạn sự nhạy cảm với điều kiện dòng vào hoặc mức dao động mặt thoáng. Kết quả mô phỏng cũng gợi mở rằng việc thiết lập quan hệ mới dựa trên dữ liệu số có thể cải thiện đáng kể độ chính xác so với các quan hệ thực nghiệm cổ điển.

Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng bản thân CFD không phải không có hạn chế. Kết quả phụ thuộc vào việc lựa chọn mô hình rối, kích cỡ lưới tính toán, mô tả mặt thoáng và các tham số số học, ... Mặc dù mô hình RNG $k-\varepsilon$ và $k-\varepsilon$ hoạt động tốt trong nghiên cứu này, nhưng để mô phỏng chính xác hơn dao động bề mặt và vùng xoáy mạnh, các phương pháp tiên tiến như LES hoặc DES có thể mang lại kết quả chi tiết và ổn định hơn.

Nhìn chung, việc kết hợp dữ liệu mô phỏng và công thức truyền thống cung cấp góc nhìn toàn diện hơn về chiều dài nước nhảy. Sự hỗ trợ này vừa giúp cải thiện lựa chọn công thức trong thực tiễn, vừa mở ra hướng phát triển các quan hệ mới dựa trên bộ dữ liệu mô phỏng có độ chính xác cao.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu bổ sung thêm cơ sở khoa học và thực tiễn trong việc lựa chọn và áp dụng mô hình dòng rối $k-\epsilon$ tiêu chuẩn hay RNG $k-\epsilon$ phù hợp cho bài toán nước nhảy trên đáy nhẵn được tích hợp trong các mô hình CFD tiên tiến. Nghiên cứu đã đưa ra được các mô phỏng về đặc trưng nước nhảy như biên mặt thoáng chất lỏng, phân bố vận tốc theo các mặt cắt dọc/ngang và tái hiện hình ảnh đường dòng trong dòng chảy.

Nghiên cứu đánh giá được sai lệch giữa các công thức thực nghiệm về chiều dài nước nhảy với kết quả từ mô hình số, cái mà có căn cứ rõ ràng hơn để xác định chính xác hơn chiều dài nước nhảy và giảm bớt các sai số chủ quan của người đo đạc và biên tập số liệu trong quá trình thí nghiệm. Từ đó, giúp các kỹ sư thiết kế công trình tiêu năng có thêm căn cứ lựa chọn công thức xác định kích thước bể tiêu năng phù hợp với yêu cầu cụ thể của từng loại công trình.

Bài báo cũng đưa ra chiều dài xem xét cần gia cố đối với phạm vi chiều dài đáy bể tiêu năng, đây là thông số ảnh hưởng đến mức độ an toàn của công trình trong quá trình vận hành hay giảm chi phí đầu tư xây dựng. Nghiên cứu chỉ ra rằng, phạm vi gia cố nhỏ hơn chiều dài nước nhảy kể cả các trường hợp có kết quả dự báo chiều dài nước nhảy nhỏ nhất. Chính vì thế, mặc dù có nhiều công thức xác định L_j có sự chênh lệch tương đối lớn nhưng sự cố công trình xảy ra không nhiều, vì thực tế thiết kế đáy bể tiêu năng thì phần nền đáy bể từ đầu kênh (chịu tác động của dòng chảy xiết) đến phần hạ lưu đều có chung chất lượng kết cấu khá là tương đồng để thuận tiện quá trình thi công đẩy nhanh tiến độ hoàn thành công trình.

Nghiên cứu đã sử dụng đặc trưng phản ánh mức độ tiêu tán năng lượng rối ϵ để xác định vùng dòng rối đã tắt, ngắt dần lan truyền hay ảnh hưởng tới hạ lưu, kết hợp với sự thay đổi của trường vận tốc xác định phạm vi đáy kênh cần chú trọng gia cố và khuyến nghị.

Tài liệu tham khảo

[1]. H. E. Schulz, J. D. Nóbrega, A. L. A. Simões, H. Schulz, and R. d. M. Porto, "Details of hydraulic jumps for design criteria of hydraulic structures," *Hydrodynamics-concepts and experiments*. Rijeka: InTech, vol. 1, pp. 73-116, 2015. DOI: 10.5772/58963

[2]. D. Velioglu, N. D. Tokyay, and A. Dincer, "A numerical and experimental study on the characteristics of hydraulic jumps on rough beds," in *Proceedings of the 36th IAHR World Congress*, 2015, vol. 28, pp. 1-9. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=8098>

[3]. A. D. A. P. G. KEXELEP, N. V. DANHINSENKO, A. A. KAXPAXON, G. I. KRIPSENKO, N. N. PASKOP, X. M. XLIKI, *Sổ tay tính toán thủy lực*. Maxcova, 1984.

[4]. K. Subramanya, *Flow in Open channels*. MacGraw Hill, 2009.

[5]. K. Roushangar and F. Homayounfar, "Prediction characteristics of free and submerged hydraulic jumps on horizontal and sloping beds using SVM method," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 4696-4709, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1070-6>

[6]. B. A. Bakhmeteff, *Hydraulics of open channels*. Inc., New York: McGrawHill Book Company, 1932.

[7]. P. Nolan, "Discussions of the hydraulic jump in terms of dynamic similarity," *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 101, no. 1, pp. 648-672, 1936.

[8]. F. S. Inc., "FLOW-3D V 11.2 User's Manual," ed: Flow Science Inc. Santa Fe, NM, USA, 2016.

[9]. T. C. Ty, Z. J. Min, T. C. Trieu, "Influence of Right Triangular Prism Rough Beds on Hydraulic Jumps," *Applied Sciences*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14020594>.

[10]. A. Ghaderi, S. Abbasi, and S. Di Francesco, "Numerical study on the hydraulic properties of flow over different pooled stepped spillways," *Water*, vol. 13, no. 5, p. 710, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13050710>

[11]. S. Li and J. Zhang, "Numerical investigation on the hydraulic properties of the skimming flow over pooled stepped spillway," *Water*, vol. 10, no. 10, p. 1478, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10101478>

[12]. T. C. Ty, T. C. Trieu, "Numerical and analysis effects of rectangular prism rough beds on hydraulic jumps in open channels," *AIP Advances*, vol. 15, no. 7, p. 10, July 2025, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0267793>.

[13]. A. Ghaderi, M. Dasineh, F. Aristodemo, and C. Aricò, "Numerical simulations of the flow field of a submerged hydraulic jump over triangular macroroughnesses," *Water*, vol. 13, no. 5, p. 674, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13050674>

[14]. V. Yakhot and S. A. Orszag, "Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory," *Journal of scientific computing*, vol. 1, no. 1, pp. 3-51, 1986. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01061452>

[15]. T. C. Ty and P. C. Thành, "Xác định đặc trưng nước nhảy ổn định trên kênh bằng mô hình CFD," *Tap chí Khoa học Công Nghệ Hàng Hải*, vol. 80, pp. 1-7, 2024. <https://vjol.info.vn/index.php/vimaru/article/view/109758>