

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH FLOW-3D XÁC ĐỊNH ĐỘ SÂU LIÊN HIỆP VÀ CHIỀU DÀI NƯỚC NHẢY TRÊN ĐÁY NHÁM TAM GIÁC

APPLICATION OF FLOW-3D MODEL FOR DETERMINATION OF CONJUGATE DEPTH AND JUMP LENGTH ON A TRIANGULAR ROUGH BED

TRINH CÔNG TÝ^{1,2}, TRẦN CÔNG TRIỆU^{1*}, PHẠM CHÍ THÀNH¹

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

²Trường Đại học Thủy lợi & Thủy điện, Đại học Tứ Xuyên, Thành Đô 610065, Trung Quốc

*Email liên hệ: trieutc@huce.edu.vn

Tóm tắt

Nước nhảy đã được sử dụng rộng rãi để tiêu tán năng lượng dư thừa sau khi dòng chảy qua công trình thoát lũ. Bài báo này trình bày nghiên cứu độ sâu liên hiệp sau nước nhảy và chiều dài nước nhảy trên đáy nhám tam giác sử dụng công cụ mô phỏng số Flow-3D, Phần mềm Flow-3D áp dụng kết hợp họ mô hình rối RNG $k-\varepsilon$ và phương pháp thể tích chất lỏng (VOF) đã được ứng dụng phổ biến mô phỏng hiện tượng thủy lực phức tạp trong công trình thủy. Nghiên cứu đã đưa ra bốn mô hình đáy nhám dựa trên sự bố trí và đặc trưng hình học khác nhau của các dải khối nhám trên đáy kênh với số Froude (Fr_1) thay đổi từ 4,8 đến 9,4. Kết quả nghiên cứu cho thấy bốn mô hình đáy nhám mới có ảnh hưởng mạnh đến đặc trưng thủy lực của nước nhảy: Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy (y_2) giảm từ 16-27% so với nước nhảy truyền thống trong cùng điều kiện thí nghiệm; chiều dài nước nhảy (L_j) giảm khoảng 30-53% so với chiều dài nước nhảy trên đáy nhẵn.

Từ khóa: Nước nhảy, đáy nhám tam giác, mô hình Flow-3D, độ sâu liên hiệp sau nước nhảy, chiều dài nước nhảy.

Abstract

A hydraulic jump has been widely used to dissipate excess energy downstream of the spillway. This paper presents a study on the conjugate depth and the jump length on the triangular rough bed using the Flow-3D numerical simulation tool, which uses a combination of the RNG $k-\varepsilon$ model, and the volume of fluid (VOF) method has been widely applied to simulate complex hydraulic phenomena in hydraulic works. The study has proposed four rough bed models based on the different arrangements and geometrical

characteristics of rough blocks on the channel bottom, with the Froude number (Fr_1) varying from 4.8 to 9.4. The results show that four rough bed models strongly influence the hydraulic characteristics of hydraulic jumps. The conjugate depth (y_2) is reduced by 16-27% compared to a smooth bed in the same experimental conditions; the jump length (L_j) is about 30-53% less than the smooth bed.

Keywords: Hydraulic jump, triangular rough beds, Flow-3D, Conjugate depth, Jump length.

1. Tổng quan

Trong những năm đây, những nghiên cứu về hiện tượng nước nhảy trên đáy nhám là một hướng nghiên cứu mới thu hút các nhà nghiên cứu về thủy lực. Do ảnh hưởng của nền nhám, độ sâu liên hiệp sau nước nhảy và chiều dài nước nhảy giảm đáng kể và hầu như không gây ra hiện tượng xâm thực ở đáy kênh. Nhờ đó, chi phí xây dựng công trình tiêu năng giảm.

Các loại hình đáy nhám được nghiên cứu cho đến nay có thể được phân thành hai loại chính: loại thứ nhất là đáy nhám được tạo thành từ các phần tử nhám rời rạc có dạng khối [1, 2]. Loại thứ hai được hình thành bởi các phần tử nhám liên tục được gọi là dải nhám, như nghiên cứu của các tác giả [3-5], bao gồm: Hình sin, hình tam giác, hình chữ nhật,... Những đáy nhám này thường được nghiên cứu chủ yếu trên các mô hình vật lý được thực hiện trong phòng thí nghiệm thông qua phép đo và trực quan hóa dòng chảy. Cách tiếp cận này có thể cung cấp thông tin hữu ích về các đặc tính dòng nhưng cũng làm tăng chi phí thí nghiệm.

Gần đây, nhiều nghiên cứu thủy lực đã sử dụng phương pháp mô hình toán để nghiên cứu hiện tượng nước nhảy trên đáy nhám cũng như đáy nhám [6]. Kết quả mô hình số đã được đánh giá và so sánh phù hợp với kết quả thí nghiệm do các tác giả công

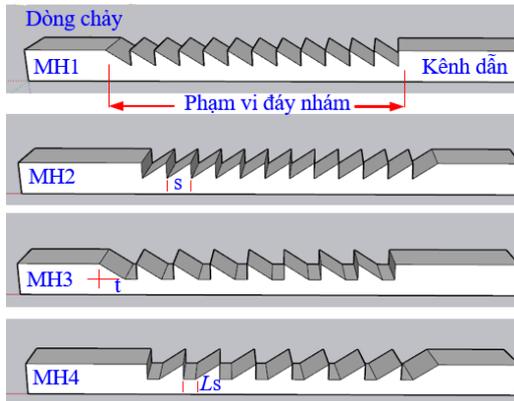
bổ [7, 8]. Do những ưu điểm của phương pháp số so với phương pháp thí nghiệm nên trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn phương pháp VOF và mô hình rối RNG $k-\varepsilon$ trong Flow-3D, làm công cụ chính thực hiện nghiên cứu hiện tượng nước nhảy trên đáy nhám.

Do đặc điểm hình học của đáy nhám rất đa dạng, kết hợp với sự bố trí khác nhau trên đáy bê tông nên nghiên cứu này đề xuất 4 mô hình đáy nhám tam giác (xem Hình 1). Các phần tử nhám được bố trí khác với các nghiên cứu đã đề cập ở trên. Từ đó, nghiên cứu ảnh hưởng của các mô hình đáy nhám này đối với đặc trưng thủy lực chủ yếu của nước nhảy có ảnh hưởng trực tiếp đến quy mô và giá thành của các công trình tiêu năng như: độ sâu liên hiệp sau nước nhảy y_2 , chiều dài nhảy L_j với số Froude ($Fr_1 = V_1 / \sqrt{gy_1}$; V_1, y_1 là vận tốc, độ sâu dòng chảy trước nước nhảy) thay đổi từ 4,8 đến 9,4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình đáy nhám nghiên cứu

Các mô hình đáy nhám tam giác và đặc điểm hình học được trình bày chi tiết như Hình 1 và Bảng 1.



Hình 1. Sơ đồ hình học mô hình đáy nhám (MH)

Ghi chú: t, s lần lượt là chiều cao và chiều rộng phần tử nhám; L_s là khoảng cách giữa các phần tử nhám.

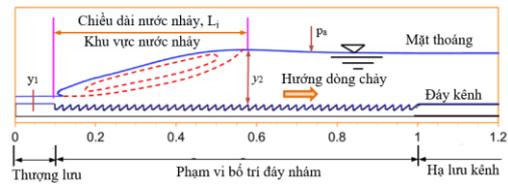
Bảng 1. Thông số đầu vào của các mô hình

STT	Tham số hình học đáy nhám			Tham số dòng chảy	
	t (cm)	S (cm)	L_s (cm)	y_1 (cm)	Fr_1 (-)
MH1					
MH2	2,0	1,5÷3,0	0,0		
MH3		2,0÷3,0		1,5÷3,0	4,8÷9,4
MH4		2,0÷3,0	2,0÷6,0		

Các đặc trưng thủy lực của nước nhảy ổn định, tự do trên đáy nhám tam giác được thể hiện chi tiết trên Hình 2 (y_1, y_2 lần lượt là độ sâu dòng chảy trước và sau nước nhảy; L_j là chiều dài nước nhảy).

2.2. Mô hình Flow-3D

Nghiên cứu này sử dụng Flow-3D tiếp cận mô phỏng hiện tượng nước nhảy trên đáy nhám bằng cách kết hợp phương pháp VOF và họ mô hình rối RNG $k-\varepsilon$ [7-9]. Mặt nước tự do được xác định bằng cách sử dụng phương pháp VOF[10].



Hình 2. Nước nhảy ổn định trên đáy nhám tam giác

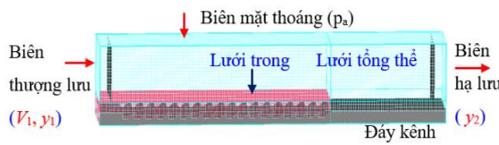
2.3. Lưới và điều kiện biên mô phỏng số

Miền không gian của mô phỏng số được tạo thành từ hai khối lưới: Khối lưới tổng thể được thiết lập cho toàn bộ miền không gian mô phỏng số (từ đầu kênh đến cuối kênh dẫn) và khối lưới bên trong được sử dụng cho vùng đáy nhám và vùng nước nhảy vì vùng này chế độ thủy lực phức tạp cần có lưới mịn hơn. Lưới được sử dụng trong các mô phỏng số này là một lưới có cấu trúc với cùng kích thước lưới ba chiều ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$), như trong Hình 3. Dựa trên nhiều nghiên cứu trước và kích thước hình học của mô hình, nghiên cứu này xem xét lưới có kích thước như trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số các lưới mô phỏng số

Kích thước ô lưới (khối trong) (mm)	Kích thước ô lưới (khối tổng thể) (mm)
$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2,0$	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 4,0$

Điều kiện biên của mô phỏng số được thiết lập như sau: Biên thượng lưu kênh đồng thời gán vận tốc V_1 và độ sâu dòng chảy xiết y_1 . Biên hạ lưu kênh sử dụng mực nước hạ lưu với độ sâu dòng chảy là y_2 . Điều kiện biên mặt thoáng chất lỏng được thiết lập là áp suất khí quyển. Đáy của kênh gán là tường cố định, các điều kiện biên đối xứng được sử dụng cho các điều kiện biên bên trong khối lưới. Chi tiết về các điều kiện biên này được hiển thị trong Hình 3.



Hình 3. Miền tính toán và điều kiện biên

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kiểm chứng kết quả mô phỏng số

Dựa trên dữ liệu thí nghiệm của Samadi-Boroujeni, et al. [4] kiểm chứng mô hình Flow-3D trong bài báo này bằng cách so sánh tỷ lệ độ sâu liên hiệp sau nước nhảy (y_2/y_1) trong mô hình MH2 với dữ liệu thí nghiệm [4]. Hình dạng của mô hình vật lý được sử dụng để kiểm chứng tương tự như mô hình MH2 chạy bằng phương pháp mô phỏng số. Có thể thấy từ Bảng 3 rằng kết quả tính toán của tỷ lệ độ sâu liên hiệp sau nước nhảy (y_2/y_1) phù hợp với kết quả của dữ liệu thí nghiệm. Sai số tương đối là 5,74% cho thấy kết quả mô phỏng số là chính xác và phù hợp.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm và mô hình Flow-3D

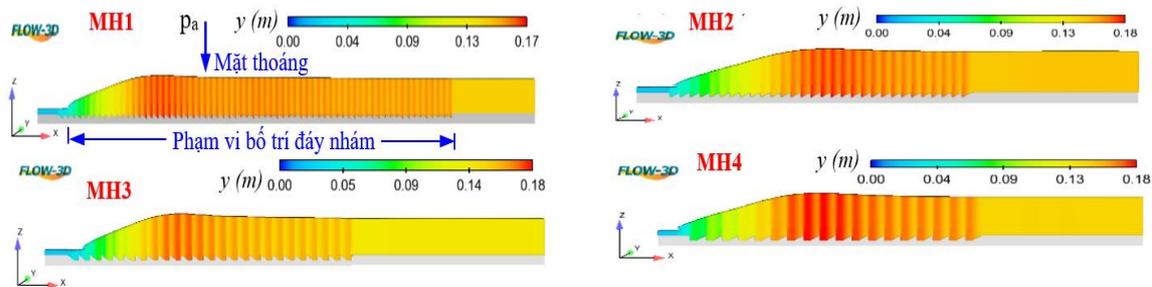
Tên mô hình	Giá trị thí nghiệm [4] (y_2/y_1)	Giá trị mô hình Flow-3D (y_2/y_1)	Sai số (%)
MH2	5,75	6,10	5,74

(y_2 * là độ sâu liên hiệp nước nhảy trên đáy nhẵn)

3.2. Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy

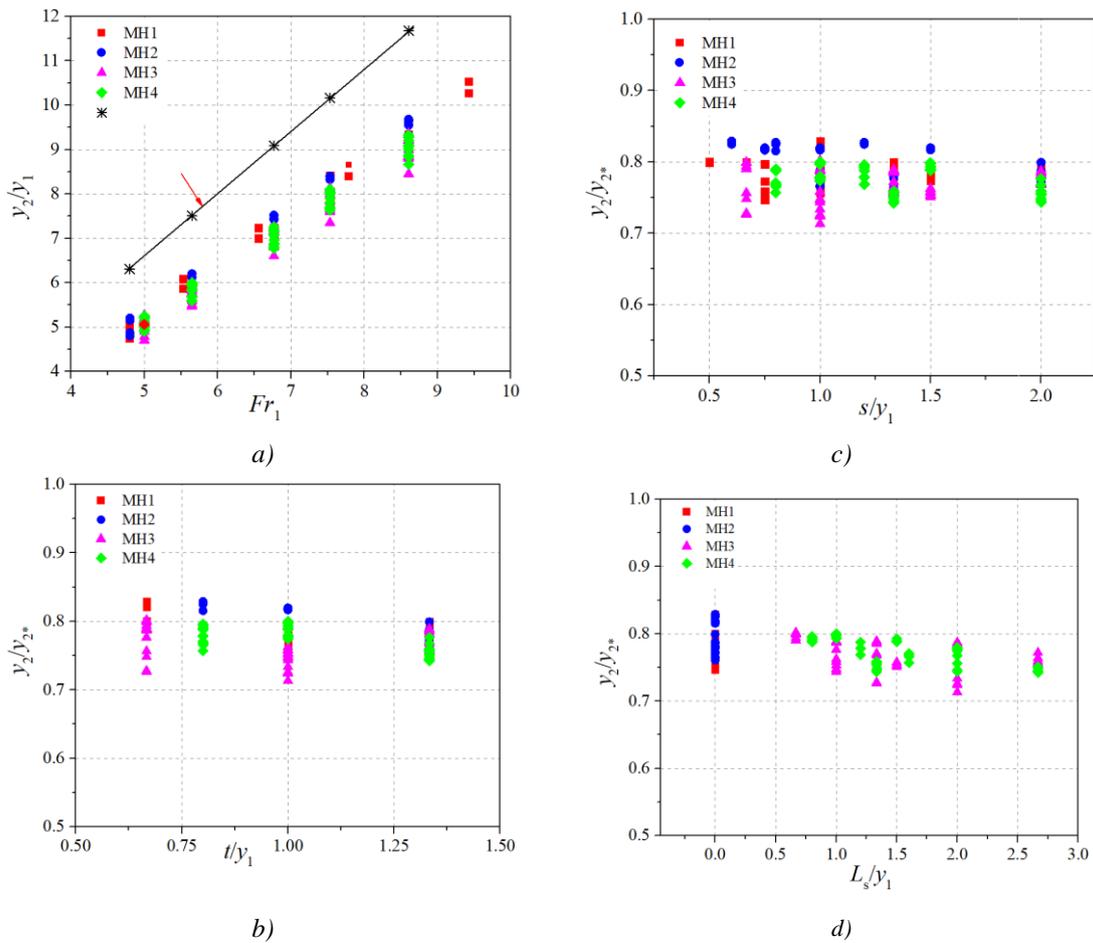
Độ sâu liên hiệp y_2 được sử dụng để thiết kế chiều cao tường bên của công trình tiêu năng giúp giảm ảnh hưởng của dòng chảy hạ lưu công trình thoát lũ lên bờ sông hay bờ kênh.

Hình 4 thể hiện kết quả mô phỏng số đối với độ

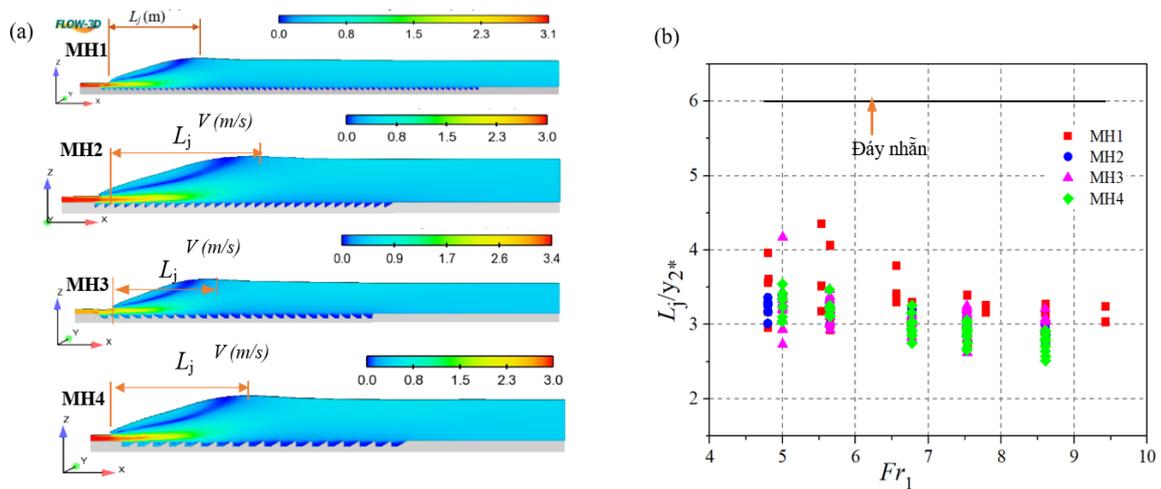


Hình 4. Độ sâu liên hiệp y_2 của mô hình với $Fr_1 = 6.7$ và $y_1 = 2,0cm$

sâu y_2 của các mô hình MH1-MH4, trên hình thể hiện rõ ràng hiện tượng nước nhảy xảy ra trên đáy nhám (vùng dòng chảy xiết đầu kênh, vùng dòng chảy ổn định hạ lưu và vùng chuyển tiếp từ dòng chảy xiết sang dòng chảy êm được gọi là vùng nước nhảy). Độ sâu liên hiệp y_2 có thể bị ảnh hưởng bởi điều kiện dòng chảy ban đầu (y_1, Fr_1) và các đặc điểm hình học của đáy nhám (t, s, L_s). Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số trên đối với độ sâu y_2 , nghiên cứu này sử dụng phương pháp đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa độ sâu liên hiệp không thứ nguyên ($y_2/y_1, y_2/y_2^*$) với các tham số ($Fr_1, t/y_1, s/y_1, L_s/y_1$) như thể hiện trên Hình 5. Hình 5a thể hiện mối quan hệ tỷ lệ độ sâu y_2/y_1 với số Froude đầu kênh Fr_1 , giá trị y_2/y_1 đồng biến với sự gia tăng của số Fr_1 , quy luật này cũng tương đồng với nước nhảy trên đáy nhẵn, với số $4,8 \leq Fr_1 \leq 9,4$ giá trị độ sâu y_2 luôn nhỏ hơn so với đáy nhẵn khoảng 20%, mô hình MH3 và MH4 cho thấy hiệu quả giảm độ sâu y_2 tốt hơn MH1 và MH2. Mối quan hệ của tham số độ sâu y_2/y_2^* với các đặc điểm hình học của đáy nhám ($t/y_1, s/y_1, L_s/y_1$) nghiên cứu được thể hiện chi tiết trên Hình 5b, c, d, các hình trên chỉ ra rằng các tham số về hình học của đáy nhám có ảnh hưởng không đáng kể tới sự giảm độ sâu liên hiệp y_2 . Vì vậy, độ sâu liên hiệp nước nhảy trên đáy nhám phụ thuộc chủ yếu vào số Froude đầu kênh Fr_1 mà không phụ thuộc vào đặc điểm hình học của dạng đáy nhám. Kết quả của nghiên cứu này cũng cho thấy sự phù hợp tốt với kết quả thu được từ các nghiên cứu trước đó Ead and Rajaratnam [3] và Samadi - Boroujeni, et al. [4]. Ngoài ra, bài báo này cũng sử dụng phương pháp hồi quy bội để xác định ảnh hưởng của các tham số trên đối với độ sâu liên hiệp (y_2/y_1). Phân tích hồi quy bội cho thấy không có mối quan hệ chặt chẽ nào giữa tỷ lệ độ sâu (y_2/y_1) và các đặc điểm hình học đáy nhám. Điều này có thể là do sự sắp xếp đỉnh phần tử nhám ngang bằng với đáy kênh.



Hình 5. Quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu y_2/y_1 với Fr_1 và các tham số (t, s, L_s)



Hình 6. Chiều dài nước nhảy L_j trên đáy nhám tam giác

3.3. Chiều dài nước nhảy

Chiều dài nước nhảy là một trong những thông số chính được sử dụng trong tính toán thiết kế chiều dài bể tiêu năng hay phạm vi gia cố lòng sông (lòng

kênh) để chống xói lở cho công trình và vùng hạ lưu. Do đó, nó cũng quyết định chi phí xây dựng của công trình tiêu năng. Chiều dài nước nhảy được xác định dựa trên các kết quả của mô hình số, nó là khoảng cách từ chân nước nhảy tới mặt cắt sau nước nhảy,

tại đó dòng chảy gần như ổn định (xem Hình 6a).

Độ dài không thứ nguyên của chiều dài nước nhảy (L_j/y_{2*}) được biểu thị dựa trên các số Froude ban đầu (Fr_1), như trong Hình 6b. Nghiên cứu chỉ ra rằng tỷ lệ chiều dài L_j/y_{2*} gần như là hằng số với giá trị trung bình khoảng 3,0 khi $Fr_1 \geq 6,8$ và thay đổi lớn từ 2,8 đến 4,2 với $4,8 \geq Fr_1 \geq 9,4$. Trong khi đó, tỷ lệ chiều dài L_j/y_{2*} đối với nước nhảy trên đáy nhẵn là 6,0.

Các mô hình đáy nhám tam giác trong nghiên cứu này có hiệu quả giảm chiều dài nước nhảy rõ ràng. Trung bình chiều dài giảm 48,5% so với chiều dài nước nhảy trên đáy nhẵn cùng điều kiện dòng chảy đầu vào. Kết quả của nghiên cứu này rất phù hợp với kết quả công bố bởi Ead and Rajaratnam [3], và Samadi-Boroujeni, et al. [4]. Hình 6b chỉ ra rằng MH1 có hiệu quả giảm chiều dài nước nhảy nhỏ nhất với số $Fr_1 \leq 6,8$, MH4 cho hiệu quả giảm chiều dài nước nhảy tốt nhất.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã mô phỏng thành công hiện tượng nước nhảy trên bốn loại hình đáy nhám tam giác bằng mô hình thủy lực Flow-3D. Kết quả của nghiên cứu này chỉ ra rằng các tham số hình học của các mô hình đáy nhám (t , s , L_s) có ảnh hưởng gần như không đáng kể đến việc giảm độ sâu liên hiệp sau nước nhảy và chiều dài nước nhảy. Độ sâu liên hiệp phụ thuộc rất mạnh vào số Froude đầu kênh, Fr_1 .

Nghiên cứu này chỉ ra rằng bốn mô hình đáy nhám tam giác đã có hiệu quả làm độ sâu liên hiệp và chiều dài nước nhảy. Với sự thay đổi của Fr_1 từ 4,8 đến 9,4 thì độ sâu liên hiệp (y_2) giảm khoảng 20% so với nước nhảy truyền thống. Đồng thời, chiều dài bước nhảy (L_j) trung bình nhỏ hơn 48,5% so với nước nhảy trên đáy nhẵn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. S. Bejestan and K. Neisi (2009), *A new roughened bed hydraulic jump stilling basin*, Asian journal of applied sciences, Vol.2, No.5, pp.436-445.
- [2] N. Torkamanzad, A. Hosseinzadeh Dalir, F. Salmasi, and A. Abbaspour (2019), *Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed*, Water, Vol.11, No.9, p.1756.

- [3] S. Ead and N. Rajaratnam (2002), *Hydraulic jumps on corrugated beds*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, No.7, pp.656-663.
- [4] H. Samadi-Boroujeni, M. Ghazali, B. Gorbani, and R. F. Nafchi (2013), *Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.40, No.9, pp.841-847.
- [5] S. A. Alil, S. A. Sarhan, and S. M. Ali (2017), *Characteristics of hydraulic jump on a striped channel Bed*, Journal of Duhok University, pp.654-661.
- [6] N. Viti, D. Valero, and C. Gualtieri (2018), *Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook*, Water, Vol.11, No.1, doi: 10.3390/w11010028.
- [7] D. Velioglu, N. D. Tokyay, and A. Dincer (2015), *A numerical and experimental study on the characteristics of hydraulic jumps on rough beds*, in E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, Vol.s28, pp.1-9.
- [8] A. Ghaderi, M. Dasineh, F. Aristodemo, and A. Ghahramanzadeh (2020), *Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses*, Journal of Hydroinformatics, Vol.22, No.6, pp.1554-1572.
- [9] S. Nikmehr and Y. Aminpour (2020), *Numerical Simulation of Hydraulic Jump over Rough Beds*, Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol.64, No.2, pp.396-407.
- [10] F. S. Inc. (2016), Flow Science Inc. FLOW-3D V 11.2 *User's Manual*. Santa Fe, NM, USA.
- [11] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, and C. J. Freitas (2008), *Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications*, Journal of fluids Engineering - Transactions of the ASME, Vol.130, No.7.

Ngày nhận bài:	16/01/2023
Ngày nhận bản sửa:	21/02/2023
Ngày duyệt đăng:	05/03/2023