Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 3, Fall 2025, p. 21-39

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

The effect of a submerged jet on the characteristics of an asymmetric hydraulic jump in a corrugated bed

F. Davari-Dehkordi[1], J. Ahadiyan[2*], S.M.Sajjadi[3], A. Scorzini[4] and M. Di Bacco[5]

1- Ph.D. in Hydraulic Structures of Water Sciences, Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (j.ahadiyan@scu.ac.ir)*
3- Associated professor of the Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, L'Aquila, Italy.
5- Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, L'Aquila, Italy.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 July 2023
Revised: 11 December 2023
Accepted: 13 December 2023
Available online: 05 November 2025

Keywords:
Hydraulic jump, Asymmetric jump, Energy dissipation, Hydraulic jump length and Corrugated bed.

TO CITE THIS ARTICLE:

Davari Dehkordi, F., Ahadiyan, J., Sajadi, S. M., Scorzini, A. R., Di Bacco, M. 2025. 'The effect of a submerged jet on the characteristics of an asymmetric hydraulic jump in a corrugated bed', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), pp. 21-39. doi: 10.22055/jise.2023.44341.2085

Abstract

Stilling basins are energy-dissipating structures that consistently convert flow from a supercritical to a subcritical state. Negative pressure fluctuations cause significant damage in the basin area. Submerged jet injection nearly eliminates the negative pressure effects in supercritical flow, reducing turbulence and flow velocity downstream. This research aimed to investigate the combined effect of a multiple submerged jet system and continuous corrugated roughness on controlling hydraulic jumps in sudden expansion sections. For this purpose, experiments were conducted in a laboratory flume using three combinations of continuous corrugated beds and submerged jet injection systems. The results showed that the hydraulic jump, with three submerged jet discharge rates and within the inlet Froude number range of 6 to 11, reduced fluctuation intensity and water surface variation in the post-expansion section. It also increased energy dissipation. The energy dissipation rate for horizontal submerged jets was, on average, approximately 20 to 25 percent higher than that of classical and discrete jumps. Correspondingly, at a Froude number of 6, the jump length, roller length, and conjugate depths decreased by 50%, 44%, and 63%, respectively, indicating the positive impact of this system on flow stability.

Introduction

A hydraulic jump is a phenomenon in which the flow transitions from a supercritical to a subcritical state. This phenomenon significantly increases the flow depth over a relatively short distance, thereby reducing the flow velocity and energy (Ahadiyan et al., 2024). Dissipating the flow energy before it moves downstream is an effective solution to prevent potential damage to the canal bed and downstream structures (Ead and Rajaratnam, 2002; Hajialigol et al., 2021; Hajialigol et al., 2024). Khedri-Mirghaed et al. (2018) proposed the use of suspended spherical blocks anchored to the floor of a stilling basin. These blocks had a relative density lower than water and were connected to the basin floor using resistant plastic tethers.

Their results showed that the sequent depth, hydraulic jump length, and energy dissipation all increased when these blocks were used compared to a smooth bed. It was also found that changing the arrangement of the barriers did not significantly change the rate of energy dissipation. Research on hydraulic jump formation has been conducted over rough beds with various shapes, including triangular, cubic, rectangular, trapezoidal, and sinusoidal configurations. The results demonstrated that rough beds significantly reduce the hydraulic jump length (Hager et al., 1990). Furthermore, studies on the properties of hydraulic jumps over sinusoidal beds revealed a linear relationship between the conjugate depth ratio and the Froude number. Haghdoost et al. (2022), investigated the effects of a Lateral Jet Flow (LJF) on the stabilization and key characteristics of the spatial hydraulic jump in a stilling basin with suddenly expanding channels. According to their results, the distance of the LJF from the narrow channel and the number of LJFs improve the stabilization of the hydraulic jump and enhance the flow pattern in the downstream channel. Mahjoubi et al. (2024) investigated a jet system positioned to intersect the flow from an ogee spillway after a sudden expansion. Their results showed a decrease in the momentum parameter from the expansion point downstream. Sharoonizadeh et al. (2022), in a subsequent study, experimentally investigated the interaction effects of multiple submerged opposing jets on the hydrodynamic characteristics of the flow in a downstream channel. The results concluded that the examined system performs effectively in preventing flow instability phenomena associated with suddenly expanding channels.

Another energy dissipation method involves the use of submerged jets. These jets are injected horizontally or at an angle, either from the front or the side of the flow, in conjunction with the hydraulic jump. This technique enhances energy dissipation downstream and reduces the conjugate depth ratio, jump length, and bottom shear forces (Tahmasbipour, et al., 2024).

The purpose of this study is to investigate the effects of a counterflow jet and bed roughness on the energy dissipation performance of the structure. Undoubtedly, increasing the energy dissipation capacity of the structure influences the downstream hydraulic jump characteristics and the required length of the stilling basin.

Methodology

The experiments were conducted in a flume located in the hydraulic models laboratory of the Faculty of Water and Environmental Engineering at Shahid Chamran University, Ahvaz. The flume system consists of a storage tank measuring 1 m in width and 2.4 m in length, and an ogee spillway with a height of 0.6 m and a width of 0.67 m. The main channel is horizontal with a rectangular cross-section, 12 m long, 1 m wide, and 0.87 m deep.

The tests were performed for corrugated beds, with three distinct configurations as detailed in Table 1. These were compared to a baseline case featuring an asymmetric discrete jump without continuous bed roughness.

Subsequently, a submerged jet was introduced into the flow. The jet injection system was connected to the flume's storage tank. The jet flow rate was measured using an ultrasonic flow meter, with values ranging from 4.5 to 8 liters per second. In the longitudinal section of the continuous corrugated bed, the flow absorption, roller length, and hydraulic jump length were measured.

Due to the high turbulence in the overflow section, the initial depth was determined using Belanger's equation (Equation 1) and the downstream depth. The energy dissipation percentage was calculated using Equation (2) (Chanson, 2015).

$$y_1 = \frac{y_2}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1\right) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (2)$$

where E_1 is the flow energy at the upstream, y_1 is the first depth of hydraulic jump measured using Equation (1), and y_2 is the second depth of jump measured by a point gauge, and Fr_2 is the Froude No. of the second depth.

Table 1- Characteristics and test variables of the research

Name of corrugated bed	Corrugated bed dimensions (cm)	Abb.. name of jet	Jet discharge (L/s)	Main discharge (L/s)	Froud Number
				26	10.8
C1	S = 3; t = 1	J1	4.5	37	9.5
C2	S = 5; t = 3	J2	6	45	8.7
C3	S = 10; t = 6	J3	8	56	7.4
				67	6.2

Results and Discussion

In this research, experiments were conducted using five primary flow rates: 26, 37, 45, 56, and 67 liters per second. The initial energy of the flow was determined by measuring the overflow depth at the spillway. Additionally, the sequent depth (or secondary depth) of the hydraulic jump was obtained by measuring the water depth downstream of the spillway.

The initial depth of the hydraulic jump at the toe of the spillway was then calculated using Equation (1). Energy dissipation calculations were performed using Equation (2) to determine the percentage of energy loss.

A summary of the test combinations and the resulting energy dissipation percentages for the three types of corrugated beds is presented in Table 2. By determining the location of the hydraulic jump, its influence on the energy dissipation rate was assessed, allowing for the identification of the optimal jump configuration associated with maximum energy loss.

Table 2- The results of the percentage of energy consumption in different situations

Model	Froud Number				
	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
S1: Sample	19.246	44.446	61.081	53.599	29.032
C1	26.305	8.031	19.185	4.522	11.642
C2	11.48	13.277	16.495	4.073	21.584
C3	34.457	38.822	40.490	17.468	1.743
C1-J1	9.710	2.940	4.278	14.967	77.195
C1-J2	2.365	13.716	20.742	28.145	35.576
C1-J3	6.974	20.799	30.341	42.103	55.367
C2-J1	9.500	23.106	32.040	42.314	53.002
C2-J2	10.885	24.928	34.295	45.522	57.969
C2-J3	7.090	20.843	30.115	41.569	53.939
C3-J1	70.371	17.126	0.849	19.903	51.369
C3-J2	33.429	3.492	14.425	35.390	58.852
C3-J3	5.008	4.291	21.239	45.608	60.026

Conclusions

The experimental results demonstrated that the energy dissipation in basins with larger corrugated bed dimensions is approximately 15% higher than in those with smaller dimensions. Furthermore, with the addition of a submerged jet, this value reaches up to 30% in the case of discrete jumps.

The counterflow jet system positively influenced the asymmetric jump, enhancing its stability and improving flow uniformity. At a Froude number (Fr) of 6, the energy loss, hydraulic jump length, and roller length were measured at 50%, 44%, and 63%, respectively. Moreover, as the flow rate increases, the relative reduction in hydraulic jump length diminishes.

In summary, the findings of this study indicate that the combined use of bed roughness and submerged jets as an energy dissipation system significantly improves the flow pattern and key characteristics of the hydraulic jump. Consequently, the implementation of submerged jets can help prevent severe damage to hydraulic structures and protect the downstream riverbed.

Acknowledgements

Thanks to the honorable vice president for research and technology of Shahid Chamran University, Ahvaz, in terms of providing the research validity of this research in the form of a doctoral thesis, and also thanks to the respected personnel of the laboratories of the Faculty of Water and Environmental Engineering of Shahid Chamran University Ahvaz for his great help and assistance in conducting this research.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1402.260

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Fathollah Davari-Dehkordi, Perform the experiments, Initial Draft of writing the manuscript.
Second Author: Javad Ahadiyan, Developing the plan for conducting experiments, controlling gathered data, reviewing and analyzing data, and final revision of the article.
Third Author: Data management, data analysis, and manuscript review.

References

1- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. 2024. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003.

2- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(7), pp.656-663. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).

3- Hager W.H., Bermen R., Kawagoshi N. 1990. Classic Hydraulic Jump: Length of Roller. Journal of Hydraulic Research, Pages 591-608. Doi: 10.1080/00221689009499048.

4- Haghdoost, M.R., Sajjadi, S.M., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2022. Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply* 1 November 2022; 22 (11): 8337–8352. doi: https://doi.org/10.2166/ws.2022.376.

5- Hajialigol, S.; Ahadiyan, J.; Sajjadi, M.; Scorzini, A.R.; Di Bacco, M.; Shafai Bejestan, M. 2021. Cross-beams dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of the flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147, 06021012. Do: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622.

6- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Hazi, M. A., Chadee, A. A., Nadian, H. A., & Kirby, J. T. 2024. Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structure (cross beams) in abruptly expanding channels. Results in Engineering, 21, 101829. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829.

7- Mahjoubi, A., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Kashefipour, S. M. 2024. 'Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), pp. 1903-1920. doi: 10.22059/ijswr.2024.377718.669725. (In Persian).

8- Khedri-Mirghaed, P., Ahadiyan, J., Varshosaz, A. 2018. 'Effect of Suspended Anchored Spherical Energy Dissipator Blocks on Hydraulic Jump Characteristics', *Modares Civil Engineering journal*, 18(5), pp. 61-70. https://mcej.modares.ac.ir/article_12133.html?lang=en. (In Persian).

9- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., De Bacco, M., Sajjadi, S. M., Fathi-Moghadam, M. 2022. Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter-flow jets in expanding channels. Acta Mech 233, 3867–3880 (2022). https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2.

10- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. 2024. Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. https://doi.org/10.3390/w16233513.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤٨، شماره‌ی۳، پاییز ١٤٠٤، مقاله پژوهشی، ص. ۲۱-۳۹

بررسی آزمایشگاهی اثر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن در بستر سینوسی

فتح‌الله داوری دهکردی[۱]، جواد احدیان [۲*]، سید محسن سجادی[۳]، آناریتا اسکورزینی[۳] و ماریو دیاکو[۴]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.j.ahadiyan@scu.ac.ir
۳- دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۴- دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معماری، دانشگاه لاکویلا، لاکویلا، ایتالیا.
۵- دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معماری، دانشگاه لاکویلا، لاکویلا، ایتالیا

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

حوضچه‌های آرامش، سازه‌های اتلاف انرژی می‌باشند که همواره جریان را از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌دهد. نوسانات فشار منفی موجب آسیب‌رسانی قابل‌توجه در محل حوضچه می‌شود. تزریق جت مستغرق تاثیر فشار منفی موجود در جریان فوق‌بحرانی را تقریبا از بین‌برده و سبب کاهش تلاطم و سرعت جریان در پایین‌دست می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر توام سیستم جت مستغرق چندگانه و زبری موج‌دار پیوسته بر کنترل پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرای ناگهانی انجام شد. بدین منظور، آزمایش‌ها در یک آبراهه آزمایشگاهی با سه ترکیب بستر موج‌دار پیوسته و تزریق سیستم جت مستغرق انجام شدند. نتایج نشان داد پرش هیدرولیکی با سه دبی تزریق جت مستغرق و در محدوده اعداد فرود ورودی شش الی ۱۱، شدت نوسان و تغییر سطح جریان را در محدوده پس از واگرایی مقطع کاهش می‌دهد. همچنین موجب افزایش اتلاف انرژی می‌شود. میزان استهلاک انرژی برای جت‌های افقی مستغرق تقریبا به‌طور میانگین ۲۰ الی ۲۵ درصد بیشتر از مقدار نظیر آن در پرش کلاسیک و گسسته می‌باشد که به‌ترتیب طول پرش، طول غلتاب و اعماق مزدوج در فرود ٦، ۵۰ درصد، ٤٤درصد و ٦۳ درصد کاهش داشتند و نشان از تاثیر مثبت این سیستم بر پایداری جریان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: جهش آبی، پرش نامتقارن ، استهلاک انرژی، طول پرش هیدرولیکی و بستر موج‌دار.

مقدمه

کنترل جریان در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد؛ چرا که با عبور جریان از روی سرریزها، سرعت جریان افزایش می‌یابد و در پایین‌دست می‌تواند موجب تخریب و آسیب شود، لذا باید این نیروی حاصل از انرژی جنبشی را مستهلک نمود. در برخی از موارد برای افزایش راندمان آبگیری می‌توان از انرژی مازاد بهره جست (Ahadiyan et al, 2024a). سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی شامل دو نوع ضربه‌ای و پرش هیدرولیکی هستند که نوع ضربه‌ای آب را به سمت موانعی هدایت می‌کند که جریان را از مسیر منحرف کرده و با ایجاد تلاطم بیشتر، انرژی را مستهلک می‌کند. همچنین با تشکیل پرش هیدرولیکی در صورت وجود عمق پایاب، می‌توان از رخدادهای منفی جریان فوق‌بحرانی کاست. پرش هیدرولیکی به‌عنوان یک پدیده اتلاف انرژی در دانش هیدرولیک می‌باشد که طی یک روند سریع، جریان از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌کند (Bahrami et al., 2017). سازه‌های استهلاک انرژی متعددی برای کنترل پرش هیدرولیکی وجود دارند که در راستای افزایش بازدهی و تثبیت آن استفاده می‌شوند. رایج‌ترین سازه، حوضچه آرامش با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌باشد که در نتیجه تلاطم و آشفتگی جریان، انرژی اضافی خنثی می‌گردد. با توجه به اینکه هزینه و زمان بسیاری برای ساخت حوضچه‌های آرامش در انتهای سرریزها و سدهای انحرافی می‌شود، پس کاهش طول پرش از جوانب متعددی چون پایداری و طراحی استاندارد مهم می‌باشد. لذا برای رفع این مشکل از واگرایی به‌عنوان یک روش اقتصادی و اصولی در طرح این سازه می‌توان نام برد (Hager and Bremen, 1989). از طرف دیگر در حوضچه‌های آرامش واگرا، جریان نامتقارن خواهد بود و پارامتر اساسی در این ناحیه، عمق پایاب می‌باشد و با نسبت عمق مزدوج به عمق اولیه برای هر نسبت بازشدگی، پنجه پرش به سوی سراب و یا پایاب منتقل می‌شود. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با توجه به محل تشکیل و پنجه پرش متاثر از عمق پایاب به‌ترتیب به چهار نوع پرش فرار، گسسته، انتقالی و کلاسیک مطابق با شکل (۱)، تقسیم می‌شوند (Hager and Bremen, 1993)؛ اهمیت این موضوع تحقیق و پژوهش‌های بسیاری را در پی داشته‌است. Herbrand (1973) با بررسی ویژگی پرش گسسته بر روی بستر صاف، میزان طول پرش بصورت تجربی طبق رابطه (۱) آمده‌است.

$$\frac{L_{jB}}{L_j} = 0.8 \ ; \ B < 0.64 \qquad (۱)$$

Matin et al. (2016) با بررسی پرش در مقطع واگرا با نسبت‌های بازشدگی گوناگون، طول پرش را در رابطه (۲) مطابق با رابطه پرش کلاسیک یافت.

$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \qquad (۲)$$

بررسی هایی دیگر در رابطه با پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد که در صورت وقوع پرش در موقعیت تغییر مقطع، نوع پرش گسسته بوده و طول پرش تحت اثر نسبت بازشدگی مطابق با جدول (۱) خواهد بود (Hager et al., 1990; Hager and Bremen, 1993). از سازه‌هایی چون بسترهای زبر، بیم‌ها، صفحات و موانع مستغرق می‌توان به‌عنوان مستهلک‌کننده استفاده کرد. زبری‌ها در کف کانال‌ها مانعی در برابر جریان بوده و اثر آن‌ها در بستر موجب کاهش مومنتم در خروج نسبت به ورودی در کانال می‌شود (Carollo et al., 2007; Hajialigol et al., 2021). نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آستانه در عرض‌های مختلف، با افزایش عرض، افزایش سرعت و در نتیجه کاهش عمق پرش ، باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود (Daneshfaraz et al., 2023).

بررسی‌های فراوان در رابطه با تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر با شکل‌های مختلفی همچون مثلثی، مکعب، مستطیلی و ذوزنقه‌ای و بسترهای سینوسی انجام شده‌است (Ead and Rajaratnam,2002; Mohamed Ali,1991; Shafai Bajestan and Neisi, 2009; Alhamid, 2004). نتایج حاصل از این پژوهش‌ها نشان دادند که بستر زبر تاثیر به‌سزایی در کاهش طول پرش هیدرولیکی داشته‌است؛ روابط ارائه شده متناسب با طول پرش و طول غلتاب و شرایط موجود در این آزمایش‌ها به‌طور مختصر در جدول (۱) آمده‌اند. نتایج تحقیقاتی بر ویژگی پرش‌هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار نشان دادند که نسبت اعماق مزدوج با اعداد فرود بر روی بسترهای موج‌دار یک رابطه خطی بوده و با افزایش عدد فرود، مقدار ضریب نیروی برشی بسترهای موج‌دار افزایش می‌یابد که حدود ۶/۵ الی ۱۰ برابر بستر صاف می‌باشد (Badizadegan et al., 2014). با توجه به اینکه مهندسان طراح برای هماهنگی بالادست و پایین‌دست و افزایش راندمان، اقدام به حذف سازه تبدیل نموده تا تاثیر مثبتی بر پرش هیدرولیکی داشته‌باشد، استفاده از بستر زبر در مقطع واگرایی عملکردی مفید برای کنترل طول پرش خواهد داشت. با توجه به تحقیقات پیشین می‌توان گفت که هرچه نسبت بازشدگی کمتر باشد، بازدهی پرش هیدرولیکی بیشتر است ولی این میزان نسبت به پرش کلاسیک دارای طول بیشتری خواهد بود (Kazemianzadeh and Shafai Bajestan, 2008; Izadjoo and Shafai Bajestan, 2007; Izadjoo et al., 2005). نتایج بررسی‌های پرش پایدار بر روی بستر موجی شکل با اعداد فرود مختلف نشان داد که به‌طور تقریبی طول پرش نیمی از طول آن روی بستر صاف بوده و عمق ثانویه ۲۵ درصد کاهش یافت (Ead and Rajaratnam, 2002). همچنین تحقیقاتی دیگر نشان دادند که نقش بستر موج‌دار بر روی پرش هیدرولیکی پایدار و قوی به‌صورت تجربی در محدوده اعداد فرود آن‌ها و طول‌موج‌های متفاوت نشان‌دهنده اثر مثبت زبری بر طول غلتاب و پرش بوده‌است (Tokyay, 2012). Abbaspour et al. (2009) با بررسی بستر موج‌دار سینوسی و ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه می‌باشد و به شیب یا طول‌موج بستر وابسته نمی‌باشد. این درحالی است که نتایج دیگری نشان می‌دهد با به کارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه آرامش، می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه تا میزان ۲۰ درصد در حدود عدد فرود ۱۲ و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک بود (Badizadegan et al., 2011).

از سازه‌های استهلاک انرژی دیگری که می‌توان نام برد، تزریق جت‌های مستغرق است که همراه با پرش هیدرولیکی به‌صورت افقی یا زاویه‌دار در راستای مقابل یا عمود بر جریان ممکن است وارد شوند و استهلاک انرژی را در پایین‌دست انجام می‌دهد. نتیجه پژوهشی نشان داد که ورود جت به پرش با زاویه‌های بزرگتر، موجب کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش استهلاک انرژی و نیروهای برشی کف می‌شود (Dastourani et al, 2016). با افزایش تعداد جت خروجی و تزریق آن به جریان به‌صورت افقی سبب افزایش استهلاک شده و فشار منفی در کف بستر و تلاطم سطح جریان آب را کمتر می‌کند (Deng et al., 2008). در بررسی دیگری که میزان تأثیر جانمایی و موقعیت مکانی تزریق جت مستغرق را بررسی می‌کرد، نتایج حاکی از اتلاف انرژی در فاصله یک‌سوم ابتدایی حوضچه آرامش رخ می‌دهد و در اعداد فرود بیشتر از ۸، میزان ۷۰ درصد سنجیده شد (Chen et al., 2014).

Ahadian و Varshosaz (2018) در تحقیقی به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در قالب مطالعه آزمایشگاهی بر روی بستر صاف و همراه با موانع شناور متصل به کف با طول‌های مهاری مختلف پرداختند. در تحقیق آنها برای مدل‌سازی موانع شناور، قطر کاربردی موانع به صورت ثابت برابر با چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. یکی از نتایج مهم در تحقیق آنها این بود که انعطاف‌پذیری و نوسان در موانع کاربردی به عنوان مستهلک کننده‌ی پرش هیدرولیکی، باعث افزایش افت انرژی مازاد می‌گردد. این در حالی است که با افزایش طول‌های مهاری موانع، بخش بیشتری از مومنتم جریان ورودی جذب موانع می‌شود. که البته این موضوع برای محدوده‌ی اعداد فرود ۵/۱الی ۷/۵ اثر بیشتری دارد. در همین راستا Khedri-Mirghaed et al. (2018) در تحقیقی استفاده از بلوک‌های معلق کروی مهار شده به کف حوضچه آرامش را پیشنهاد نمودند. این نوع بلوک‌ها دارای چگالی نسبی کمتر از آب و به‌وسیله‌ی مهاری از جنس پلاستیک مقاوم به کف حوضچه متصل

DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

شده بودند. ویژگی اصلی این موانع بر خلاف بلوک‌های صلب معمول، داشتن تحرک و نوسان متناسب با جریان عبوری از آن‌ها است. نتایج آنها نشان داد که عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در حضور این نوع بلوک‌ها نسبت به بستر صاف افزایش داشته است. همچنین مشخص شد که تغییر آرایش موانع تغییر چندانی در میزان استهلاک انرژی ایجاد نمی‌کند.

Hassanpour et al. (2017) با بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی با نسبت واگرایی‌های مختلف (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) و اعداد فرود ورودی در بازه ۶ الی ۱۱ با یکدیگر و همچنین مقایسه با مقادیر مربوطه اندازه‌گیری‌شده برای پرش هیدرولیکی کلاسیک نشان دادند که عمق پایاب موردنیاز برای تشکیل یک پرش هیدرولیکی و نیز طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی روی یک مقطع واگرای تدریجی با بستر ناهموار به‌طور محسوسی کمتر از پرش‌های هیدرولیکی اولیه بود. نتایج نشان می‌دهد که این سازه، انرژی جریان را از بین برده و طول حوضچه‌های آرامش را کاهش می‌دهند و جت‌های پرسرعت را از کف حوضچه‌های آرامش منحرف می‌کنند (Hassanpour et al. 2020; Aal et al. 2018).

Sharoonizadeh et al., (2021) نیز با بررسی تزریق جت مستغرق چندگانه در مقطع واگرای ناگهانی و در فواصل و اعداد فرود معین و با تعداد منافذ خروجی سیستم جت مستغرق، پرش هیدرولیکی را کنترل کرده و در انتقال از جریان فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی، با کاهش قابل‌توجه طول آن، ناپایداری پرش برطرف کرده‌است.

Haghdoost et al. (2022) .در یک مطالعه تجربی اثرات جریان جت جانبی (LJF) را در یک حوضچه آرامش با کانال‌های با واگرای ناگهانی بر تثبیت و ویژگی‌های مهم پرش هیدرولیکی مکانی را بررسی نمودند. طبق نتایج، فاصله LJF از کانال باریک و تعداد LJF، تثبیت پرش هیدرولیکی و بهبود الگوی جریان در کانال پایاب را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، میانگین عمق ثانویه و طول پرش مکانی به‌ترتیب ۱۴ و ۲۰ درصد در مقایسه با عدم وجود LJF کاهش می‌یابد. در همین راستا Sharoonizadeh et al. (2022a) این بار در یک مطالعه، اثرات برهم‌کنش چندین جریان جت متقابل مستغرق به صورت تجربی بر اساس ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان حاصل از کانال پایاب را بررسی نمودند. نتایج، عملکرد خوب سیستم مورد بررسی را در جلوگیری از پدیده ناپایداری جریان مرتبط با کانال‌های با انبساط ناگهانی را نتیجه‌گیری نمودند. در تحقیقی دیگر Sharoonizadeh et al. (2022b) پیکربندی‌های مختلف سیستم جت با اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ را آزمایش نمودند و در نهایت، سه پیکربندی بهینه انتخاب شدند. مقایسه نتایج استفاده از سیستم تزریق جت آب با پرش هیدرولیکی نوع S نشان داد که ضرایب تصحیح انرژی و مومنتوم در تمام پیکربندی‌های مختلف به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج آنها نشان از عملکرد خوب سیستم تزریق جت در پایدارسازی پرش هیدرولیکی نامتقارن S و کاهش طول حوضچه آرامش بود.

Ahadiyan et al. (2024b) در یک مقطع واگرای تدریجی نسبت به کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با استفاده از جت و بستر موجدار تحقیق نمودند. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که بستر موج‌دار در محدوده مقطع واگرای تدریجی، طول پرش را نسبت به عدم وجود آن کاهش داده و تغییرات عمق جریان نیز کمتر شده است. همچنین، تاثیر جت مقابل به شکل مستغرق، این روند را بهبود می‌بخشد.

Sajjadi et al., (2025) در یک مطالعه عددی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی نوع S با استفاده از بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری را در بازشدگی‌های ناگهانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که به‌کارگیری این سیستم زبری پس از دریافت بهینه ترکیب‌بندی در همه اعماق پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج‌های نامتقارن و جریان برگشتی می‌گردد. Mahjoubi et al. (2024) در خصوص قرارگیری سیستم جت در تقابل و تقاطع با جریان آب خروجی از سرریز اوجی پس از مقطع واگرای ناگهانی تحقیق نمودند. یافته‌های آنان نشان داد که پارامتر مومنتم از محل انبساط ناگهانی به سمت پایین دست کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نیروی مومنتم بر روی بستر کاهش می‌یابد. ترکیب‌بندی با تعداد جت حداقل، بیشترین یکنواختی جریان را به همراه داشته و قطر جت وابسته به نوع پرش و عمق پایاب می‌باشد. Tahmasbipour et al. (2024) در خصوص کنترل پرش نامتقارن از نوع T با استفاده از سیستم هم‌زمان جت متقاطع و زبری بستر به صورت مواج تحقیق جامعی ارائه دادند. چنین پیکربندی‌های پیچیده به ندرت در تحقیق‌های گذشته یافت می‌شود. نتایج تجربی ایشان نشان داد که افزایش موج بستر باعث کاهش طول پرش و نسبت عمق ثانویه می‌شود. آنها دریافتند که افزایش دبی نسبی جت، تأثیر قابل توجهی در کنترل پرش T شکل و کاهش طول نسبی آن دارد.

Hajialigol et al. (2023) در یک تحقیق نتیجه استفاده از چند سری تیرهای متقاطع، آزمایش شده در ترکیب‌بندی‌های هندسی و شرایط هیدرولیکی مختلف را بررسی نمودند. این محققین اندازه‌گیری سرعت‌های سه بعدی برای تعیین‌های یکنواختی جریان، ضریب مومنتم و انرژی، تجزیه و تحلیل توزیع سرعت‌های سه بعدی، انرژی جنبشی آشفتگی، بررسی‌های تکمیلی توسعه تمرکز خطوط هم تنش و افت انرژی پرش در شرایط آزمایش‌های مرجع و ترکیب‌بندی‌های بهینه، بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر شدت انرژی تلاطمی و تنش‌های رینولدزی در نسبت عمق پایاب ۰/۹ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از این رو در این عمق پایاب حداکثر نرخ استهلاک انرژی نیز رخ می‌دهد. در تحقیقی دیگر Hajialigol et al. (2024) تلاشی برای مطالعه کارایی سرریزها در شرایط سیلاب را بررسی نمودند. برای این منظور از ویژگی‌های آشفتگی جریان ناشی از

مستهلک‌کننده جدید به عنوان مجموعه‌ای از تیرهای عرضی برای کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن استفاده نمودند. آنها نشان دادند تحلیل توزیع سرعت در این سیستم باعث می‌شود آبشارهای انرژی به سطح آب می‌رسند و در آنجا بشکنند، بنابراین می‌توان شرایط پایدارتر و یکنواخت‌تری از نظر خطوط جریان در این حالت در نظر گرفت.

از آن‌جایی‌که سلامت و ایمنی سازه‌ها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی و همچنین حفاظت رودخانه و بستر و سواحل آن مدنظر می‌باشد، لذا باید با اتلاف و استهلاک انرژی از وقوع آسیب‌ها و تخریب‌های ناشی از انرژی جنبشی بیش از حد و سرعت بالای جریان آب در رودخانه و کانال‌های آب‌رسانی جلوگیری نمود. حال آن‌که این مهم در راستای بهبود راندمان حوضچه آرامش و کنترل پرش هیدرولیکی و حفظ بستر از فرسایش باشد. در این بررسی هدف اصلی کاهش طول پرش و غلتاب و همچنین ایجاد عمق ثانویه و مزدوج پرش در بازه کمتری از فاصله طولی و استهلاک انرژی بیشتر نسبت به دیگر حالات و انواع پرش‌های هیدرولیکی می‌باشد تا به پایداری جریان و یکنواختی مطلوب دست یافت.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

برای دست‌یابی به اهداف این پژوهش، ابتدا باید به شناخت و آگاهی پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی پرداخت تا بتوان عمق ثانویه پرش، طول پرش‌هیدرولیکی و طول غلتابی را به‌دست آورد. با تجزیه و تحلیل و آنالیز ابعادی، رابطه اساسی تحقیق که شامل متغیرهای بدون بعد هستند، استخراج گردید. پارامترهای موثر در این آزمایش در رابطه (۳) ارائه گردیده‌است؛

$$F(\Delta E, E_1, L_j, L_r, \rho, \mu, g, V, Q, Q_j, B, b, P, y_t, y_1, y_2, S, t) = 0 \quad (۳)$$

در رابطه فوق، ΔE افت انرژی، E_1 انرژی اولیه، L_j طول پرش هیدرولیکی، L_r طول غلتابی، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال، g شتاب گرانش، V سرعت جریان، Q دبی جریان در کانال اصلی، Q_j دبی جت، B عرض کانال اصلی، b عرض کانال در مقطع واگرا، P فاصله سیستم جت مستغرق از مقطع واگرایی، y_t عمق پایاب، y_1 عمق نخست پرش و y_2 عمق دوم پرش هیدرولیکی، S فاصله هر دو قله متوالی از یکدیگر در بستر سینوسی و t ارتفاع قله‌های بستر سینوسی هستند. با توجه به ارتفاع قله‌ها و طول‌موج یا فاصله هر دو قله که متفاوت می‌باشند، میزان سه بستر با ابعاد مختلف مطابق با جدول (۲) لحاظ شده‌اند؛ همچنین میزان پنج دبی ورودی به کانال و مجرای اصلی در بازه اعداد فرود شش الی ۱۱ انتخاب و سه دبی جت مستغرق، ۴/۵ ، ۶ و هشت لیتر بر ثانیه برای تزریق به کانال اصلی اتخاذ شد که در جدول (۲) نیز آمده‌است. با آنالیز ابعادی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و انتخاب ρ, V, y_1 به‌عنوان متغیرهای تکراری، رابطه (۴) به‌صورت پایین حاصل گردید؛

$$F\left(\frac{\Delta E}{E_1}, Fr, Re, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{b}{B}, \frac{P}{B}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{y_1}\right) = 0 \quad (۴)$$

در این رابطه، Re عدد رینولدز جریان و Fr عدد فرود هستند که با توجه به اینکه میزان عدد رینولدز از ۲۰۰۰ بیشتر بوده و در محدوده وضعیت آشفته و متلاطم است، می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Chow, 1959). همچنین از مقادیر ثابتی چون $\frac{b}{B}$ و $\frac{P}{B}$ نیز صرف‌نظر گردید؛ بنابراین، رابطه نهایی به‌صورت رابطه (۵) ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = F\left(Fr, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1}\right) \quad (۵)$$

دامنه تغییرات پارامترهای بدون بعد در آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌است.

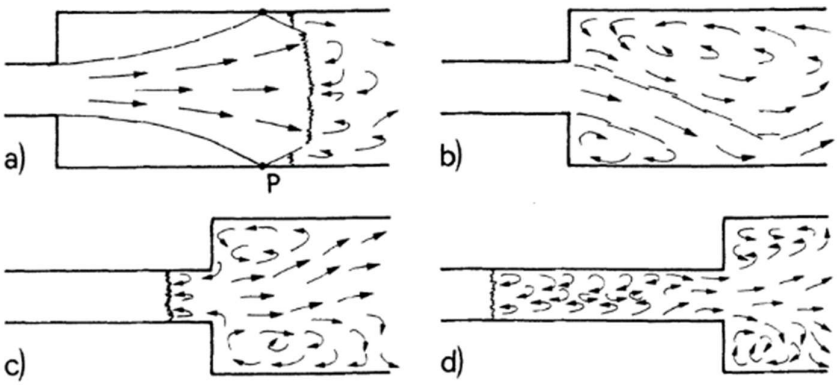


Fig. 1- Types of jumps in the sudden expansion of the section

شکل ۱- انواع پرش در انبساط ناگهانی مقطع

 DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

جدول ۱- تعدادی روابط پیش بینی طول پرش و طول غلتابی در بستر زبر

Table 1- A number of relationships predict the length of the jump and the length of the swell in the rough bed

No.	Researcher	Equation
(1)	Herbrand, 1973	$\frac{L_{jB}}{L_j} = 0.8 \ ; \ B < 0.64$
(2)	Matin et al., 1998	$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right)$
(3)	Hager et al., 1990	$\frac{L_{jB}}{L_j} = 2 - \sqrt{B}$
(4)	Hager et al., 1990	$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right)$
(5)	Hager and Bremen, 1993	$\frac{L_j}{y_1} = 8(Fr_1 - 1.5)$

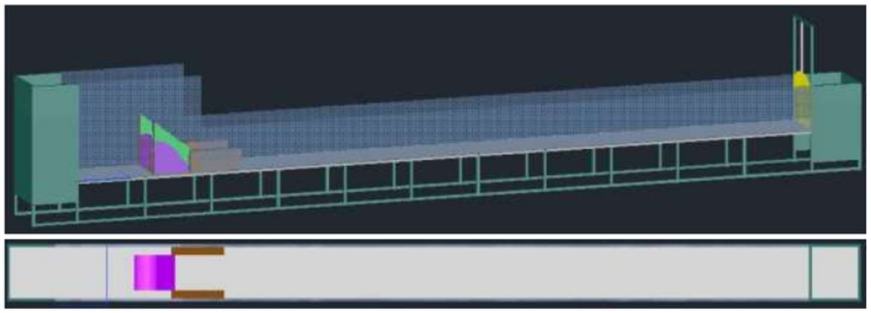


Fig. 2- The laboratory experimental section used in this study

شکل۲- شمایی از فلوم مورد استفاده در این پژوهش

روش انجام آزمایش و امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیطزیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلوم شامل یک مخزن ذخیره با ابعاد یک متر عرض و ۲/۴ متر طول، یک سرریز اوجی با ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر است. یک مجرای افقی با سطح مقطع مستطیل به طول ۱۲ متر، عرض یک متر و عمق ۰/۸۷ متر می‌باشد. شکل (۲) مقطع طولی فلوم موردنظر را نشان می‌دهد. دو دیوار پلکسی در نوک سرریز در دو طرف کانال نصب شد تا یک قسمت باریک به طول ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر ایجاد شود تا بتوان یک مقطع با انبساط ناگهانی و با نسبت انبساط عرض بالادست به پایین‌دست ۰/۶۷ متر داشت. همچنین یک دریچه عمودی در قسمت انتهایی فلوم برای کنترل عمق پایاب و محل تشکیل پرش هیدرولیکی تعبیه شد (شکل ۳). با استفاده از یک شیر فلکه کشویی، میزان دبی ورودی به فلوم با توجه به منحنی دبی – اشل سرریز تنظیم می‌شود. با استفاده از یک شاخص مدرج به‌عنوان عمق سنج با دقت یک‌دهم سانتی‌متر، عمق آب اندازه‌گیری گردید.

نحوه انجام آزمایش بدین‌صورت بود که با قرارگیری بسترهای موجدار پیوسته بلافاصله پس از مقطع واگرای ناگهانی و ورود دبی‌هایی به میزان ۲۵ الی ۶۷ لیتر بر ثانیه و با تعداد پنج عدد فرود در بازه ۶/۲ الی ۱۰/۸ جریان برقرار شد. پس از ورود دبی معین به‌عنوان جریان اصلی و برقراری جریان، با تنظیم دریچه در پایین‌دست می‌توان میزان عمق پایاب موردنظر برای تشکیل پرش هیدرولیکی را به‌دست آورد و برداشت داده‌های عمقی جریان را با عمق‌سنج و میزان سرعت جریان در طول مسیر را با استفاده از سرعت‌سنج پروانه‌ای یک‌بعدی اندازه‌گیری کرد. همچنین این آزمایش‌ها برای بسترهای موجدار که هرسه حالت آن با ابعاد متفاوت از یکدیگر طبق جدول (۳) هستند، نسبت به حالت نامتقارن پرش گسسته و بدون وجود زبری پیوسته در بستر سنجیده شدند. در ادامه با ورود جت مستغرق توسط سیستمی که با اتصال به مخزن ذخیره‌ای فلوم تامین شده‌بود، تزریق جت صورت گرفت. دبی‌های انتخابی جت ورودی به سیستم به‌صورت مستغرق، ۴/۵ ، ۶ و ۸ لیتر بر ثانیه توسط دبی سنج آلتراسونیک اندازه‌گیری شدند و استغراق جریان و طول غلتاب و پرش هیدرولیکی در بازه طولی بستر موجدار پیوسته سنجیده شدند. شکل (۴) و (۵) نمایی از تزریق جت به سیستم و پرش هیدرولیکی در مقطع بستر موجدار را نشان می‌دهد. با توجه به آشفتگی بسیار بالا در پنجه سرریز می‌توان با استفاده از رابطه بلانگر، رابطه (۶) و عمق پایین دست، عمق اولیه را یافت و همچنین درصد استهلاک انرژی با رابطه (۷) به‌دست‌آمد (Chanson, 2015)؛

$$y_1 = \frac{y_2}{2}\left(\sqrt{1 + 8{Fr_2}^2} - 1\right) \quad (۶)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (۷)$$

جدول ۲- مشخصات و متغیرهای آزمایش در پژوهش

Table 2- Characteristics and test variables of the research

Froud Number	Main discharge (L/s)	Jet discharge (L/s)	Abb. name of jet	Corrugated bed dimensions (cm)	Name of corrugated bed
10.8	26				
9.5	37	4.5	J1	S = 3; t = 1	C1
8.7	45	6	J2	S = 5; t = 3	C2
7.4	56	8	J3	S = 10; t = 6	C3
6.2	67				



Fig. 3- A view of the gate of the flume (a) and the ogee spillway (b)

شکل۳- نمایی از دریچه فلوم (الف) و سرریز اوجی (ب)



Fig. 4- A view of the bed roughness (a) and hydraulic jump on the bed (b)

شکل٤- نمایی از شکل زبری بستر (الف) و پرش هیدرولیکی در بستر (ب)

 DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

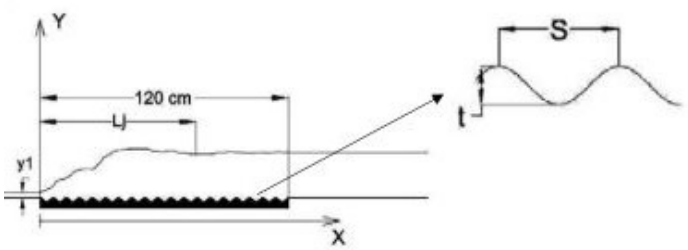


Fig. 5- A view of the sinusoidal corrugated bed after the expansion

شکل۵- شمایی از بستر موج‌دار پس از واگرایی

جدول ۳- روند نام‌گذاری و ترکیب مدل‌های آزمایشی در تحقیق

Table 3- The process of naming and combining experimental models in research

Model	t (cm)	S (cm)	Discharge of jet (L/s)
C1-J1	1	3	4.5
C1-J2	1	3	6
C1-J3	1	3	8
C2-J1	3	5	4.5
C2-J2	3	5	6
C2-J3	3	5	8
C3-J1	6	10	4.5
C3-J2	6	10	6
C3-J3	6	10	8
C1	1	3	-
C2	3	5	-
C3	6	10	-

نتایج و بحث

با توجه به شرایط جریان ورودی و پژوهش‌های پیشین در این زمینه نشان داده‌است که پرش نوع گسسته در مقطع واگرا، نقش پررنگ‌تری در استهلاک انرژی در قیاس با انواع دیگر پرش‌های هیدرولیکی در این‌گونه مقاطع دارد و بازدهی آن رابطه مستقیمی با نسبت بازشدگی بیشتر واگرایی خواهد داشت. لذا برای کنترل پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای ناگهانی از ترکیب زبری موج‌دار در بستر همراه با جت مستغرق استفاده شد که نتایج به‌ترتیب ارائه خواهند شد.

الف) استهلاک انرژی سرریز

در این پژوهش، آزمایش‌ها برای پنج دبی اصلی ۲۶، ۳۷، ۴۵، ۵۶ و ۶۷ لیتر بر ثانیه بر روی مدل مذکور انجام شد و با سنجش میزان عمق بالادست سرریز، میزان انرژی اولیه حاصل گردید. همچنین با اندازه‌گیری عمق پایاب در پایین‌دست سرریز، میزان عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به‌دست آمد. سپس با استفاده از رابطه (۷)، عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پای سرریز محاسبه گردید. همچنین محاسبات مربوط به استهلاک انرژی از طریق رابطه (۸) انجام شد و درصد افت انرژی به‌دست آورده‌شد. روند ترکیب آزمایش‌ها در جدول (۳) به اختصار بیان شده‌است و همین‌طور جدول (۴) خلاصه نتایج محاسباتی درصد استهلاک انرژی برای سه حالت بستر موج‌دار را نشان می‌دهد. با یافتن محل تشکیل پرش هیدرولیکی میزان نقش‌آفرینی آن بر میزان اتلاف انرژی مشخص شده و می‌توان افت انرژی بیشتری داشت.

همانطور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۴)، میزان افت انرژی در بستر سینوسی با طول‌موج‌های بلندتر و عمیق‌تر بیشتر بوده و تاثیر بهتری در کاهش سرعت جریان داشته‌است و انرژی را مستهلک کرده و همچنین عمق ثانویه را در طول کمتری از بستر موج‌دار مهار و کنترل کرده‌است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تاثیر تزریق جت در همه حالات و ترکیب‌های قرارگیری با افزایش دبی جت مستغرق بیشتر بوده و در استهلاک انرژی نقش بسزایی دارد. در شکل (۶) تاثیر همزمان زبری بستر و تزریق جت نسبت به حالات بدون جت و همچنین بدون بستر موج‌دار پیوسته به‌هنگام تشکیل پرش نوع گسسته در مقطع واگرایی نشان داده شده‌است. همانطور که پیداست با افزایش دبی جت مستغرق متقابل و افزایش طول‌موج زبری در بستر، اتلاف انرژی بیشتری را نیز به ثبت رسانده شده‌است. البته با افزایش دبی جریان اصلی و دبی‌های کمتر جت مستغرق، مقدار درصد استهلاک انرژی نیز کاهش داشته‌است.

جدول ٤- نتایج میزان درصد استهلاک انرژی در حالات گوناگون

Table 4- The results of the percentage of energy consumption in different situations

Model	Froude Number				
	6.2	7.4	8.7	9.5	10.8
S1: Sample	19.246	44.446	61.081	53.599	29.032
C1	26.305	8.031	19.185	4.522	11.642
C2	11.48	13.277	16.495	4.073	21.584
C3	34.457	38.822	40.490	17.468	1.743
C1-J1	9.710	2.940	4.278	14.967	77.195
C1-J2	2.365	13.716	20.742	28.145	35.576
C1-J3	6.974	20.799	30.341	42.103	55.367
C2-J1	9.500	23.106	32.040	42.314	53.002
C2-J2	10.885	24.928	34.295	45.522	57.969
C2-J3	7.090	20.843	30.115	41.569	53.939
C3-J1	70.371	17.126	0.849	19.903	51.369
C3-J2	33.429	3.492	14.425	35.390	58.852
C3-J3	5.008	4.291	21.239	45.608	60.026

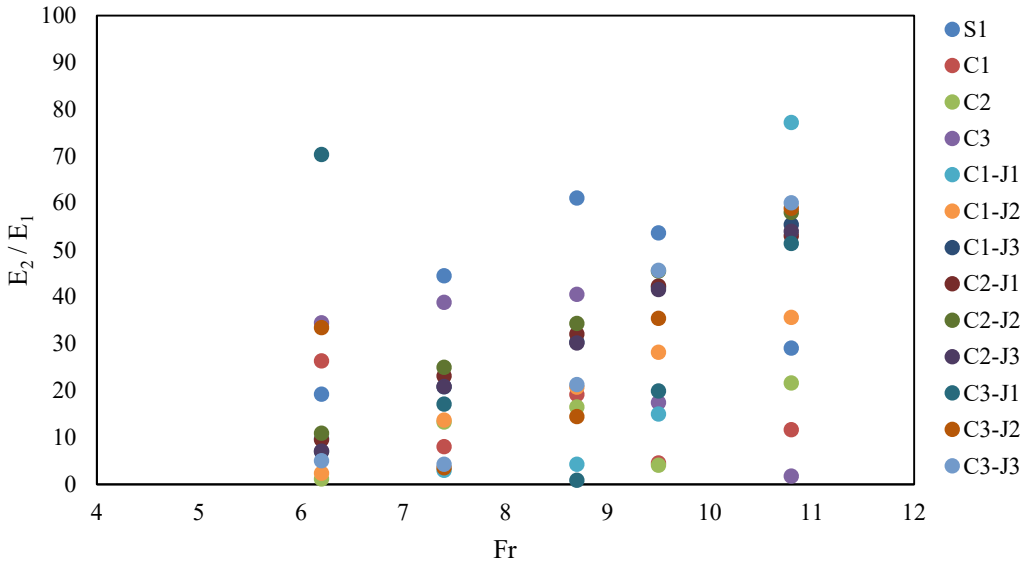


Fig. 6- The relative energy consumption of hydraulic jump caused by the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل٦- استهلاک انرژی نسبی پرش هیدرولیکی ناشی از حضور بستر موج‌دار و جت مستغرق

ب) بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

یکی از دیگر شاخصه‌های مهم در پرش هیدرولیکی، نسبت عمق دوم به عمق نخستین پرش می‌باشد؛ چرا که کاهش این نسبت اعماق مزدوج پرش، در طراحی حوضچه های آرامش موثر خواهد بود. شکل (۷) نسبت عدد فرود جریان در مقابل اعماق مزدوج پرش را برای هر یک از حالات مدل‌سازی‌شده نشان می‌دهد. مطابق با این نمودارهای رسم‌شده، قرارگیری بستر موج‌دار با ابعاد هندسی بزرگ‌تر نسبت به حالات دیگر تاثیر بیشتری داشته‌است. همچنین با تزریق جت این میزان بهبود یافته و انرژی بیشتری مستهلک گردیده‌است. در فرود پایین، این تغییرات نسبت به حالت بدون جت برابر ۲۵ درصد بوده و با تزریق جت مقابل جریان به ۴۵ درصد می‌رسد. با افزایش عدد فرود، این میزان کمتر شده و ۳۰ درصد می‌باشد.

ج) طول پرش هیدرولیکی

برای بررسی میزان طول پرش هیدرولیکی، حالت‌های گوناگون مورد آزمایش و سنجش قرار گرفتند. برای تحقق این هدف و تحلیل

DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

این روش‌های طراحی در هندسه، میزان مقادیر طول پرش نسبت به عمق اولیه سنجیده شده و در مقابل عدد فرود جریان در شکل (۸) به نمایش درآمده‌است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش دبی جت، میزان طول پرش کاهش یافته‌است؛ نظر به نمودار ترسیم‌شده، در حالتی که زبری بستر ابعاد بیشتری از نظر طول موج خود داشته‌است، طول پرش نیز کاهش یافته‌است. این مقادیر برای فرودهای پایین تا ۵۰ درصد کمتر شده و برای فرودهای بالا، ۳۰ درصد کاهش گردیده‌است. در زمانی‌که تزریق جت به مجرای اصلی صورت می‌گیرد، جریان به سمت بالادست هدایت شده و بر اثر تلاطم و اغتشاش، جریان در حوضچه آرامش به‌طور چشم‌گیر و قابل‌ملاحظه‌ای افزایش عمق می‌دهد؛ بنابراین برای مهار پرش هیدرولیکی شکل‌گرفته به طول بیشتری از حوضچه آرامش نیاز است. با مقایسه این حالات نسبت به تحقیق‌های پیشین مشابه، نشان از افزایش استهلاک انرژی و کاهش طول پرش می‌دهند که با اشاره به این مورد می‌توان به آثار مثبت این پژوهش اشاره نمود.

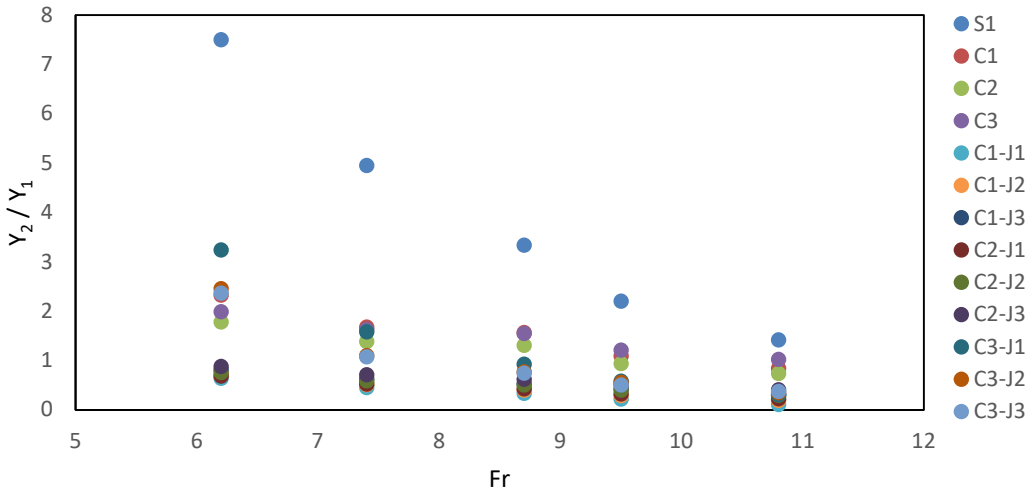


Fig. 7- Comparison of hydraulic jump conjugate depths ratio against Froude number in the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل۷- مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود در حضور بستر موج‌دار و جت مستغرق

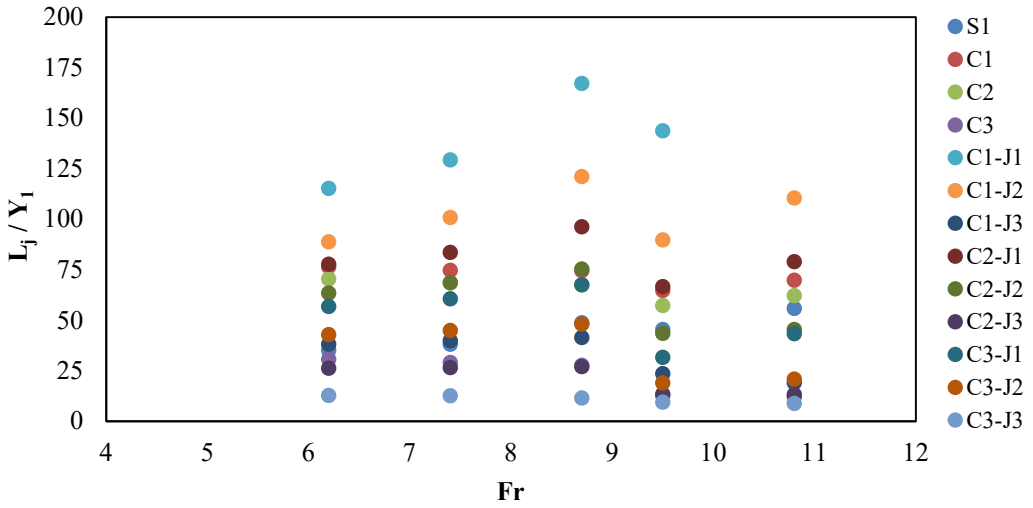


Fig. 8- Comparison of the Froude number against the length of the hydraulic jump to its conjugated depth in the corrugated bed

شکل۸- مقایسه عدد فرود در برابر طول پرش هیدرولیکی نسبت به عمق مزدوج آن در بستر موج‌دار

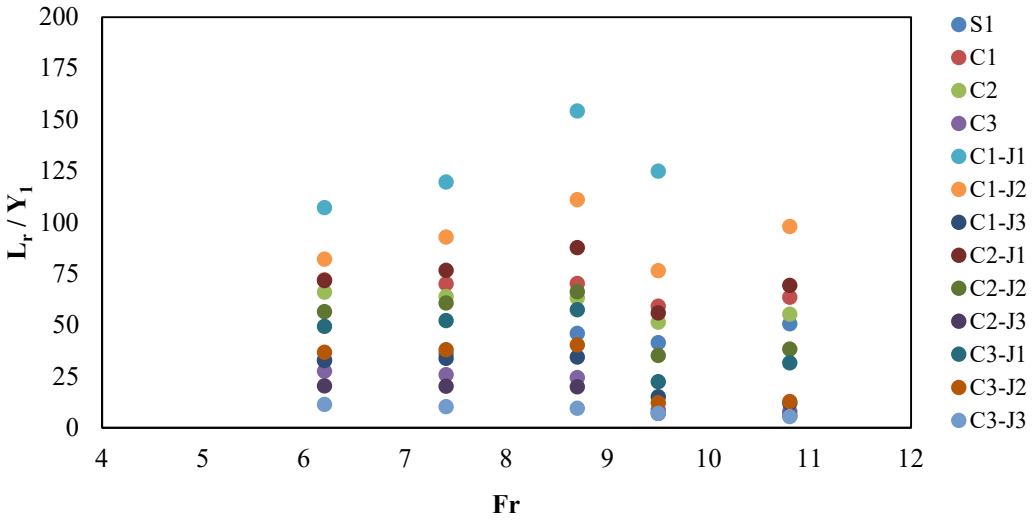


Fig. 9- Variations of the relative jump length against Froud number for bed with different roughness

شکل۹- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود برای بستر با زبری های مختلف

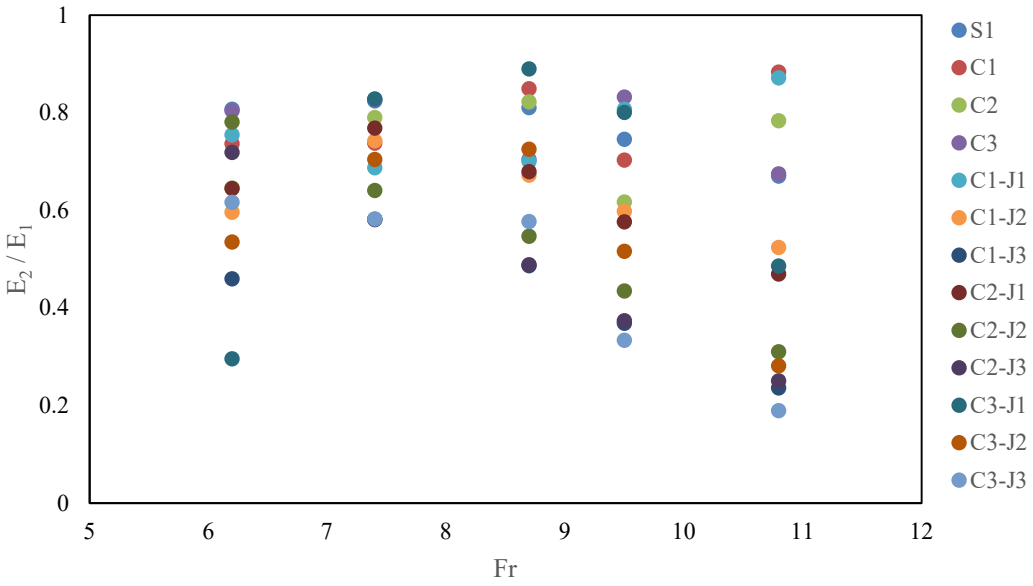


Fig. 10- Relative energy loss versus Froude number relative to each other

شکل۱۰- اتلاف انرژی نسبی در مقابل عدد فرود نسبت به یکدیگر

د) طول غلتاب

از پارامترهای مهم دیگری که در طراحی حوضچه‌های آرامش با اهمیت است، طول غلتاب می‌باشد؛ زیرا در بازه آن ضخامت قسمت دال را باید بیشتر لحاظ کرد و حفاظت بستر را تأمین کرد. پس از اهمیت بسزایی برخوردار است و شاخصی برای بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی خواهد بود. لذا در این پژوهش، طول غلتاب در شرایط مختلف اندازه‌گیری شد. از شکل (۹) استنباط می‌شود در دبی‌ها و اعداد فرود پایین، طول غلتاب جت مستغرق بیشتر از حالت پرش نوع گسسته و همین‌طور کلاسیک است و در دبی‌های بالاتر این میزان با یکدیگر برابر می‌شوند. میزان طول غلتاب در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درصد و در بیشترین حالت تا ۶۳ درصد نسبت به‌حالت کلاسیک، کاهش داشته‌است. همچنین در شکل (۱۰)، میزان اتلاف انرژی نیز نمایش داده شده‌است که نقش مثبت این سیستم استهلاک را نشان می‌دهد.

 DOI: 10.22055/jise.2023.44341.2085

نتیجه‌گیری

سرعت بالای جریان عبوری در پایین‌دست سرریزها باعث تخریب بستر طبیعی رودخانه و کانال‌های آبرسانی می‌شود. با استفاده از اتلاف‌کننده‌های انرژی همانند حوضچه‌های آرامش، موانع و بلوک‌ها و واگرایی‌ها می‌توان انرژی جنبشی جریان را کاهش داد و به استهلاک انرژی و کاهش طول غلتاب و پرش پرداخت.

از آزمایش‌های صورت‌گرفته مشخص شد که میزان استهلاک انرژی در حوضچه‌هایی که با افزایش ابعاد بستر موج‌دار همراه هستند، حدودا ۱۵ درصد از حالات کوچک‌تر، بیشتر بوده و همچنین با اضافه‌شدن جت مستغرق مقابل این مقدار تا ۳۰ درصد نسبت حالات پرش نوع گسسته نیز می‌رسد. تزریق جت آب موجب اتلاف انرژی در دبی‌های بالاتر جت مستغرق در طول پرش به‌طور میانگین ۲۰ درصد بیشتر از پرش در حالات زبری‌هایی با ابعاد کوچکتر می‌باشد. طول نسبی پرش هیدرولیک با افزایش عدد فرود اولیه یعنی فاصله جت افزایش می‌یابد. بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی طول غلتاب نشان‌دهنده این است که در دبی‌های کمتر، ۵۵ الی ۶۰ درصد کاهش داشته و با افزایش دبی، این تغییرات به ۴۰ درصد رسید. مقایسه داده‌های حاصل از این بررسی با دیگر تحقیقات پیشین نشان دادند که زبری موج‌دار تاثیر بسزایی در کنترل پرش و همچنین ترکیب آن با جت مستغرق موجب کاهش سرعت ثانویه و افزایش عمق مزدوج پرش در طول کمتری از مسیر می‌شود.

در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان داد که ترکیب زبری بستر و جت‌های مستغرق به‌عنوان یک سیستم اتلاف انرژی، الگوی جریان و ویژگی‌های اولیه پرش هیدرولیک را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشند. در نتیجه، استفاده از جت مستغرق می‌تواند به جلوگیری از آسیب شدید به سازه‌های هیدرولیکی و حفظ بستر رودخانه در پایین‌دست کمک کند.

تقدیر و تشکر

با تشکر از معاونت محترم پژوهشی و فنآوری دانشگاه شهید چمران اهواز به لحاظ فراهم نمودن اعتبار پژوهشی این تحقیق در قالب پایان نامه دکتری و نیز با سپاس از پرسنل محترم آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل کمک‌ها و مساعدت‌های فراوان در انجام این تحقیق.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی نویسنده دوم به شماره پژوهانه SCU.WH1402.260 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: فتح‌الله داوری دهکردی، انجام آزمایش‌ها، نگارش اولیه مقاله.

نویسنده دوم: جواد احدیان، تدوین برنامه انجام آزمایش‌ها، کنترل داده‌ها، بررسی و تجزیه و تحلیل داده ها، اصلاح نهایی مقاله.

نویسنده سوم: محسن سجادی، کنترل داده‌ها، بررسی و تجزیه و تحلیل داده ها، بررسی درفت مقاله.

References

1- Aal, G.M.A., Sobeah, M., Helal, E. and El-Fooly, M., 2018. Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers. *Ain Shams Engineering Journal*, *9*(4), pp.1887-1896. Doi: 10.1016/j.asej.2017.01.008

2- Abbaspour, A., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D., Sadraddini, A.A., 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research*, *3*(2), pp.109-117. Doi10.1016/j.jher.2009.05.003.

3- Ahadian, J., Varshosaz, A. 2018. 'Effect of the Floating Sphere Objects Flexible Bearing Length on the Characteristic of the Hydraulic Jump', *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), pp. 297-308. doi: 10.22069/jwsc.2018.12965.2762. (In Persian).

4- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. 2024a. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003.

5- Ahadiyan, J., Hakami, M., Shafaei Bajestan, M., Sajadi, S. M. 2024b. 'Laboratory investigation of the Effect of a Submerged Jet in a Wavy Bed with a Gradually Diverging Cross-section on the Characteristics of Asymmetric Hydraulic Jump', *Modares Civil Engineering Journal*, 24(1), pp. 151-160. doi: 10.22034/24.1.151. (In Persian).

6- Alhamid, A.A., 2004. S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), pp.657-662. Doi: 10.1080/00221686.2004.9628319.

7- Badizadegan, R., Esmaili, K., Faghfour Maghrebi, M., Saneie, M. 2011. 'Hydraulic Jump Properties in Irrigation Canals with Corrugated Bed', *Water and Soil*, 25(3), pp. 676-687. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9702. (In Persian).

8- Badizadegan, R., Saneie, M. and Esmaili, K., 2014. Comparison Of Hydraulic Jump Characteristics On Different Types of Corrugated Beds. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(2), pp.220-232. (In Persian).

9- Bahrami, H., Ghomeshi, M., Kashefi Por, S.M., Salehi Neyshabouri, S.A.A., 2017. Investigation of the characteristics of the density current because of regime changes. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(1), pp.112-121. Doi: 10.22113/jmst.2017.7773.1390. (In Persian).

10- Carollo, F.G., Ferro, V. and Pampalone, V., 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), pp.989-999. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:9(989).

11- Chanson, H. 2015 *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. Taylor & Francis, London, UK.

12- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L. and Peng, Y., 2014. Characteristics of the velocity distribution in a hydraulic jump stilling basin with five parallel offset jets in a twin-layer configuration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), pp.208-217. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000817.

13- Chow, V.T., 1959. Open-channel hydraulics, *McGraw-Hill Book Company, 1959*. ISBN 07-010776-9.

14- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P., Di Francesco, S., Abraham, J.P., 2023. Experimental study of the geometric shape and size of sill effects on the hydraulic performance of sluice gates. *Water*, *15*(2), p.314. https://doi.org/10.3390/w15020314.

15- Dastourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S.R., 2016. The impact of water jet angle on the characteristics of hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, *23*(3), pp.225-239. https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3195. (In Persian).

16- Deng, J., Xu, W.L., Zhang, J. M., Qu, J., Y.Q. Yang, 2008. A new type of plunge pool—Multi horizontal submerged jets. *Science in China Series (E: Technological Sciences)*, 51(12): 2128-2141.

17- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(7), pp.656-663. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).

18- Hager, W. H. and Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths Ratio. *Journal of Hydraulic Research IAHR*, Vol. 27, No. 5, PP. 566-585. Doi: 10.1080/00221688909499111.

19- Hager W.H., Bermen R., Kawagoshi N. 1990. Classic Hydraulic Jump: Length of Roller. Journal of Hydraulic Research, Pages 591-608. Doi: 10.1080/00221689009499048.

20- Hager, W. H. and Bremen, R. 1993. T-jump in abruptly expanding channel, *Journal of Hydraulic Research*, 31:1, 61-78. Doi: 10.1080/00221689309498860.

21- Haghdoost, M.R., Sajjadi, S.M., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2022. Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply* 1 November 2022; 22 (11): 8337–8352. doi: https://doi.org/10.2166/ws.2022.376.

22- Hajialigol, S.; Ahadiyan, J.; Sajjadi, M.; Scorzini, A.R.; Di Bacco, M.; Shafai Bejestan, M. 2021. Cross-beams dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of the flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 147, 06021012. Do: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622.

23- Hajialigol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S.M., Hazi, M.A., Chadee, A.A., Nadian, H.A. and Kirby, J.T., 2024. Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structural (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, *21*, p.101829.https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829

24- Hajialigol, S., Ahadian, J., Sajadi, S. M., Scorzini, A. R., Shafai Bejestan, M. 2023. 'Laboratory study of crossbeam structural design in control of asymmetric S-type jump of sudden expansion sections', *Journal of Hydraulics*, 18(1), pp. 19-36. doi: 10.30482/jhyd.2022.333263.1595. (In Persian).

25- Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., Gualtieri, C. 2017. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9, 945. Doi: 10.3390/w9120945.

26- Hassanpour, N.; Hosseinzadeh Dalir, A.; Bayon, A.; Abdollahpour, M. 2020. Pressure Fluctuations in the Spatial Hydraulic Jump in Stilling Basins with Different Expansion Ratios. *Water*, 13, 60. Doi: 10.3390/w13010060.

27- Helal, E., Abdelhaleem, F. S., Elshenawy, W. A. (2020). Numerical Assessment of the Performance of Bed Water Jets in Submerged Hydraulic Jumps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146, 04020014. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000147.

28- Herbrand, K. 1973. The Spatial Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*. Pages 205-2018. Doi: 10.1080/00221687309499774.

29- Izadjoo F., Shafai Bajestan M., Bina M. 2005. Hydraulic Jump Characteristics on a Trapezoidal Corrugated Bed. *The Scientific Journal of Agriculture (SJA)*. Page(s) 107-122. Doi: 10.3923/jas.2007.1164.1169.

30- Izadjoo F., Shafai Bajestan M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Journal of Applied Sciences*. volume 7, issue 8, pp. 1164-1169.

31- Kazemianzadeh A., Shafai Bajestan M. 2008. Experimental study of the effect of roughness arrangement on hydraulic jump characteristics in a stilling basin, *3rd Iran Water Resources Management Conference*, Tabriz University, Iran.

32- Mahjoubi, A., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Kashefipour, S. M. 2024. 'Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), pp. 1903-1920. doi: 10.22059/ijswr.2024.377718.669725. (In Persian).

33- Khedri-Mirghaed, P., Ahadiyan, J., Varshosaz, A. 2018. 'Effect of Suspended Anchored Spherical Energy Dissipator Blocks on Hydraulic Jump Characteristics', *Modares Civil Engineering journal*, 18(5), pp. 61-70. https://mcej.modares.ac.ir/article_12133.html?lang=en. (In Persian).

34- Matin, M. A., Alhamid, A. A., Negm, A. M. 1998. Prediction of Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump in Abruptly Expanding Channel, *Proceedings of International Conference on Hydro-Science and Engineering, Hydro-Science and Engineering ICHE98, Advances in Hydro-Science and Engineering*, 14 pages.

35- Matin M.A., Negm A.M. El-Said A.A, and Alhamid A.A. 2016. Prediction of Sequent Depth Ratio of Free Hydraulic Jump in Abruptly enlarged Channels. *Egyptian Journal for Engineering Sciences & Technology*. Pages 31-36.

36- Mohamed Ali, H.S., 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, *117*(1), pp.83-93. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1(83).

37- Sajjadi, S. M., Esmaeilzadeh Feridani, F., Ahadiyan, J. 2025. 'Numerical study of energy loss and S-type hydraulic jump length using cross beams as roughness in sudden expansion', *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(1), pp. 78-97. doi: 10.22126/atwe.2025.11522.1148.

38- Shafai Bejestan M., Neisi K. 2008. 'Effects of Bed Roughness Shape on the Length of Hydraulic Jump', *Journal of Hydraulics*, 3(3), pp. 29-40. doi: 10.30482/jhyd.2008.85472 (In Persian).

39- Shafai Bajestan M., Neisi K. 2009. Effect Shape of Roughness on the Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump. *Water and Soil Science Journal*. Tabriz University, Iran. Pages 165- 176. (In Persian).

40- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., Di Bacco, M., Sajjadi, M. and Moghadam, M.F., 2021. Experimental analysis on the use of counterflow jets as a system for the stabilization of the spatial hydraulic jump. *Water*, *13*(18), p.2572. doi: /10.3390/w13182572.

41- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., De Bacco, M., Sajjadi, S. M., Fathi-Moghadam, M. 2022a. Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter-flow jets in expanding channels. *Acta Mech* 233, 3867–3880 (2022). https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2

42- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Fathi Moghadam, M., Sajjadi, M., Di Bacco, M. 2022b. 'Experimental investigation on the characteristics of hydraulic jump in expanding channels with a water jet injection system', *Journal of Hydraulic Structures*, 7(4), pp. 58-75. doi: 10.22055/jhs.2022.40233.1203.

43- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. 2024. Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. https://doi.org/10.3390/w16233513.

44- Tokyay, N.D., 2012. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *In Impacts of Global Climate Change* (pp. 1-9). https://doi.org/10.1061/40792(173)408.