Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 1-14

Research Paper

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

EXTENDED ABSTRACT

Experimental investigation of the effect of single-row dentate baffles on the length of vertical drop structure

A. Jamshidi[1], M. Shafai Bejestan[2], M. Bahrami Yarahmadi[3] and M. Rahmanshahi [4]

1- MSc student, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Correponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (m_shafai@yahoo.com).*
3-Associate professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Research assistant, University of Hong Kong, Hong Kong.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 28 March 2025
Revised: 30 April 2025
Accepted: 24 May 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
bed erosion, grade control structure, vertical drop structures, dam reservior.

TO CITE THIS ARTICLE:

Jamshidi, A., Shafaei Bajestan, M., Bahrami Yarahmadi, M., Rahmanshahi, M. 2026. 'Experimental investigation of the effect of single-row dentate baffles on the length of vertical drop structure', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 1-14. doi: 10.22055/jise.2025.49328.2156

Abstract

Among the hydraulic structures used in watershed management for sediment management in mountain streams are vertical weirs. In order to prevent bed erosion downstream of the structures a horizontal concrete slab is used which a hydraulic jump is formed. One of the important design parameters is to reduce the length of the hydraulic jump and, as a result, reduce the length of the slab for the economic efficiency of the project, which is the main goal of this research. The experiments were conducted in a rectangular flume 30 cm wide and 12 m long. The experiments in this research are divided into two groups with and without barriers. In the experiment with barriers, a row of dentated barriers with a height of five centimeters installed at a distance of 40 centimeters from the weir toe. In addition, in the experiment with barriers, a sill was used at the end of the weir. The height of the end sill was considered to be two, three, and four centimeters. The experiments were conducted under seven different flow conditions (Froude number in the range of 6.34 to 12.5 at the beginning of the jump). The results showed that the use of a discontinuous barrier with the end sill reduced the length of the hydraulic jump. Changing the height of the final sill did not have a significant effect on reducing the length of the hydraulic jump, with a maximum effect of about 5.7%. The results showed that the use of a discontinuous barrier at heights of 0.05, 0.08, and 0.11 times the height of the structure reduced the length of the hydraulic jump by 52, 53, and 57.7 percent, respectively.

Introduction

Neck point migration in steeply sloping mountain streams, in addition to reducing the bed level and widening the channel for a long distance, causes a large amount of sediment to transport downstream. The sediments are deposit in the downstream areas of the riverbed or dam reservoirs, which leads to a decrease in the sediment transport capacity of the river or a gradual decrease in the capacity of the dam reservoir. Studies show that up to 90 percent of the sediment accumulated in dam reservoirs is due to

neck-point migration. To control such disaster, the location of all depressions in the streambed must first be determined with the help of accurate maps or ground surveys. Then, a grade control structure is construct at the site of the depression. Among the most widely used structures is the vertical drop structure (VDS). As is clear, the kinetic energy at the basin should be dissipate by creation of hydraulic jump. This occurs when sufficient downstream flow depth is available. Although this point is taken into account during the design of the structure, the gradual erosion of the channel bed during operation will lead to the deepening of the downstream streambed and, as a result, tailwater depth decreases. In addition, climate change has led to abnormal events, and as a result, the flow conditions have also changed, causing floods with higher flow discharge and higher entrance flow velocity. Which results in increasing both L_1 and L_2 and part of the jump shifted downstream of the basin which led scouring at the streambed.

Considering the above problem mentioned, a new structure can be construct, or the existing structure to be modified in such a way that the hydraulic jump requires a smaller tailwater depth and occurs over a shorter length. Various solutions have been investigated so far to deal with this problem. Among them, several studies have been conducted to reduce the kinetic energy of the jet entering the structure, which in turn reduces the L_1 and the length of the hydraulic jump or L_2. Placing mesh plates, dentate the crest of the structures or widening the approaching channel are among studies have been done so far. Although these studies have achieved good results in dissipating the approach velocity, trapping the boulders, tree branches, foliage, and floating objects can block the meshes and take them out of use.

Therefore, the purpose of the present studies is to use dentate baffles on the basin floor and the end sill at the end of the basin to investigate their use on the basin length reduction.

Experimental apparatus

A model of vertical drop structure (VDS) built in a flume of 15 meters long, 30 cm wide and 50 cm long with glass walls at the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz. To measure the flow rate, an ultrasonic digital flowmeter manufactured by Farasanj Company used with an accuracy of one percent. A mechanical depth gauge with an accuracy of one tenth of a millimeter used to measure the water depth. The VDS is a metal plate 30 cm wide and 35 cm high, installed at 3 meters downstream of the flume entrance. Two series of experiments conducted: the first series of seven experiments without baffles and the second series of 21 experiments with baffles in the middle of the jump and at the end with three different heights. The test method was as follows: the water flow entered the flume slowly to provide the desired flow rate. Then the downstream valve gradually closed until the hydraulic jump formed freely downstream. These conditions e kept constant for a while and after ensuring that the flow conditions is stable. Seven different inlet flow conditions were established. The head upstream of the structure was considered equal to : 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 and 7 cm, respectively. During each test, the flow rate, the initial jump depth, the secondary jump depth, the jump length and the location of the nape flow attack the bed downstream of the breakwater measured. The hydraulic jump length s defined as the distance between the starting point and the point where the bubbles almost disappear and water surface has little variation. The initial and secondary jump depths measured by a point gauge. At the same time, photographs and videos taken from the front view with a camera.

Results

The measured L_1 were compared with Rand (1955) formula which shows 2% difference. The measured Y_2 also were compared with Blanger's equation and the Rand (1955)'s relation The results show good agreements.

Figure (1) also shows comparison of the results of L_2/P for the baseline and dentate floor baffle (DBF) and end sill with different height. As seen, the value of L_2/P is higher for the end sill with $H_2/P=0.05$ than in the other end sill. After that, the end sill with $H_2/P=0.08$ have the highest value of L_2/P. The value of L_2/P at $H_2/P=0.11$ has the lowest value. It should be noted that the value of L2/P at

H2/Ps of 0.05 and 0.08 is the same except for Yc/P of 0.09, so the data related to them are consistent. Figure (1) shows that the value of L2/P in the experiments with the presence of DBF with different threshold heights has decreased compared to the control experiments. The lowest value of L_2/P reduction is related to all Yc/Ps with height H_2/P=0.05, which is an average of 52%. The value of L2/P reduction for the end sill with height H/P=0.08 for Yc/Ps of 0.07 to 0.19 is an average of 53%. The value of L_2/P reduction for the end sill with height of H2/P=0.11 at Yc/Ps = 0.07 to 0.19 is an average of 57.7%; therefore, the weakest performance in terms of jump length reduction is for the end sill with H_2/P=0.05 and the best performance in this regard is for the end sill with height of H_2/P=0.11.

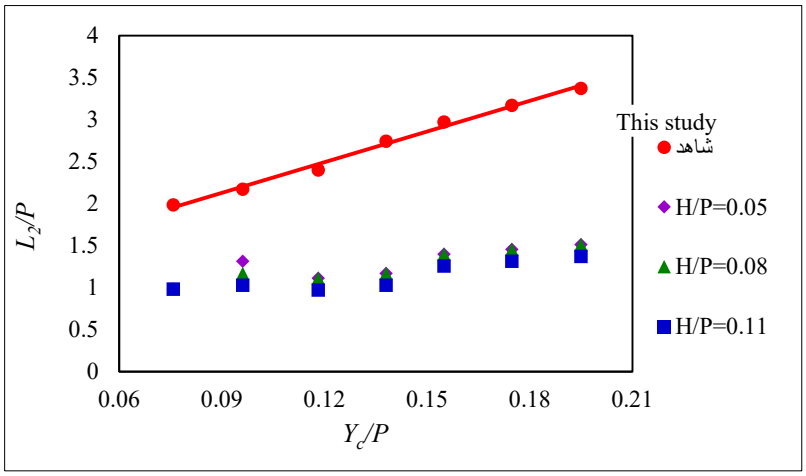


Fig. 1- Variation of L_2/P from basin without baffles and with dentate baffles and end sill with different height

Conclusion

The aim of the present study was to experimentally investigate the effect of dentate baffles installed at the floor of vertical drop structure's basin and the end sill with different height, on the jump characteristics. The basin can be design and installed to control the neck-point migration in mountain streams or to modify the existing basin with smooth bed which its downstream bed has experience sever erosion. To reach such purpose, two series of experiments carried out and by analysis of data, the following results were obtained:

1-The results of the baseline tests agree with the Rand (1955)'s prediction relations for the L_1 and Y_2 in the basin.

2-The height of the end sill has shown a little effect on the length of hydraulic jump, L_2.

3-The dentate floor baffles and the higher end sill (H_2/P=0.11) can reduce the jump length by as high as much 57% compare to the jump which occur at the smooth bed basin.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1400.25487.

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Azadeh Jamshidi, experimental works and data collection.
Second Author: Mahmood Shafaei Bajestan, research topic, analysis of data, respond to the reviewers.
Third Author: Mohammad Bahrami Yarahmadi, control and analysis of data.
Fourth author: Mostafa Rahmanshahi, analysis of some data.

Acknowledgment

This study was supported financially from grant provided by vice-chancellor of research of Shahid Chamran university of Ahvaz. The authors would like to thanks for providing the grant.

References

1- Rand, W., 1955, September. Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 81, No. 9, pp. 1-13). ASCE.

© 2026 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 ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۴-۱

بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع منقطع تک ردیفه بر کاهش طول کف‌بند در شیب‌شکن‌های قائم

آزاده جمشیدی [۱]، محمود شفاعی بجستان [۲]، محمد بهرامی یاراحمدی [۳] و مصطفی رحمانشاهی [۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.m_shafai@yahoo.com

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- محقق، دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ، هنگ کنگ، چین.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

از جمله سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده در آبخیزداری به‌منظور مدیریت رسوب در آبراهه‌های کوهستانی شیب شکن‌های قائم می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از آبشستگی بستر در پایین دست شیب شکن قائم از کف‌بند استفاده می‌شود که روی آن پرش هیدرولیکی شکل می‌گیرد. یکی از پارامترهای مهم طراحی کاهش طول پرش هیدرولیکی و در نتیجه کاهش طول کف‌بند برای اقتصادی شدن پروژه می‌باشد که هدف اصلی این تحقیق محسوب می‌شود. آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و طول ۱۲ متر انجام شده است. آزمایش‌های این تحقیق به دو دسته با مانع و بدون مانع تقسیم می‌شود. در آزمایش با مانع از یک ردیف مانع منقطع به ارتفاع پنج سانتی‌متر که در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از شیب شکن نصب شده بود، استفاده شد. علاوه بر این در آزمایش با مانع از آستانه در انتهای کف‌بند استفاده شد. ارتفاع آستانه انتهایی دو، سه و چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها تحت هفت شرایط مختلف جریان (عداد فرود در محدوده ٦/٣٤ تا ۱۲/۵در ابتدای پرش) انجام شدند. نتایج نشان داد که استفاده از مانع منقطع به‌همراه آستانه انتهایی باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی شده است. تغییر ارتفاع آستانه انتهایی تأثیری زیادی بر کاهش طول پرش هیدرولیکی نداشت بگونه‌ای که حداکثر تاثیر آن حدود ۵/۷ درصد می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از مانع منقطع به‌همراه آستانه انتهایی به ارتفاع‌های ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۱۱ برابر ارتفاع شیب شکن باعث شد طول پرش هیدرولیکی به‌ترتیب ۵۲، ۵۳ و ۵۷/۷ درصد کاهش یابد.

کلید واژه‌ها: کنترل رسوب بستر، آبراهه با شیب تند، سازه کنترل شیب، شیب شکن قائم.

مقدمه

فرسایش بستر در آبراهه‌های کوهستانی که شیب تندی دارند، علاوه بر کاهش تراز بستر و تعریض آبراهه، باعث انتقال رسوب زیادی به پایین‌دست می‌گردد. این رسوبات در نواحی پایین دست در بستر رودخانه‌ها و یا مخازن سدها نهشته شده که منجر به کاهش ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه و یا کاهش تدریجی ظرفیت مخزن سد می‌گردد. در چنین آبراهه‌هایی، هر نوع تغییر اختلاف تراز بستر یا رقوم سطح آب، باعث شروع فرسایش پس‌رونده می‌گردد. بدین ترتیب که موقعیت پایین افتادگی (کاهش تراز) بستر، به سمت بالادست مهاجرت می‌کند. در یک سیلاب ممکن است این مهاجرت به بالادست، تا کیلومترها رخ دهد و باعث عمیق شدن بستر آبراهه و تعریض آن در نتیجه ریزش سواحل شود. در نتیجه حجم زیادی از رسوب به پایین دست منتقل می‌شود. مطالعه‌ها نشان می‌دهد که تا ۹۰ درصد رسوب تجمع یافته در سدها ناشی از فرسایش پس‌رونده می‌باشد. برای مهار فرسایش پس‌رونده، ابتدا باید موقعیت تمام پایین افتادگی‌های بستر آبراهه با کمک نقشه‌های دقیق یا پیمایش زمینی مشخص گردد. آن‌گاه در محل پایین افتادگی بستر اقدام به ساخت سازه‌ای مقاوم در مقابل جریان سیلابی کرد تا از پس‌روی محل پایین افتادگی به بالادست جلوگیری شود. انواع سازه‌ها با مصالح مختلفی تاکنون به‌وجود آمده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که به سازه‌های کنترل شیب معروف هستند. از جمله‌ی این سازه‌ها می‌توان به شیب شکن‌های مایل و قائم اشاره کرد. این نوع شیب شکن‌ها با مصالح مختلفی مانند لاشه سنگ، آجر و ملات سیمان، توری سنگی (گابیون)، سنگ و سیمان، بتن پیش ساخته و یا بتن‌آرمه احداث می‌شوند. شکل (۱) نمونه‌هایی از انواع شیب شکن را نشان می‌دهد (Chamani and Beirami, 2002).

 DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156


Concrete vertical drop


Inclined drop


Gabion stepped drop

Fig. 1- Different types of drop structures (searching in Google)
شکل ۱- انواع سازه‌های شیب شکن (جستجو در گوگل)

بیشترین کاربرد در بین انواع سازه‌های اصلاح شیب را سازه شیب شکن قائم دارد که موضوع مطالعه حاضر می‌باشد. اولین مطالعه‌ها مرتبط با شیب شکن قائم توسط Moore (1943)، Donnelly و Blaisdell (1959)، Rand (1955) و Gill (1979) انجام شده است و روابطی برای ابعاد حوضچه و نیز نیم رخ جت عبوری از شیب شکن ارائه داده‌اند. جریان آب با عبور از شیب شکن به‌صورت سقوط آزاد به کف‌بند پایین‌دست سازه برخورد می‌کند. جت آب پس از برخورد با کف‌بند، به دو قسمت تقسیم می‌شود. بخشی از آن به عقب جت رانده شده که با برخورد آن به دیواره عمودی شیب شکن، انرژی جنبشی آن به صفر رسیده و به انرژی فشاری تبدیل می‌شود در نتیجه سطح آب پشت جت در فاصله بین جت و دیواره عمودی شیب شکن افزایش می‌یابد. در صورتی که شرایط جریان ورودی به شیب شکن تغییر نکند، ارتفاع آب در ناحیه نیز تغییر نمی‌کند هر چند به‌دلیل نوسانات لحظه‌ای سرعت جت آب، سطح آب پشت جت نیز نوسان می‌کند. بخش دیگری از جت برخوردی به کف‌بند، با انرژی زیاد به پایین‌دست منتقل می‌شود لذا ضروری است انرژی جنبشی آن قبل از ورود به بستر فرسایشی آبراهه، تا حدی کاهش یابد که منجر به فرسایش بستر آبراهه نگردد. ایجاد پرش هیدرولیکی یکی از راه‌های مؤثر برای کاهش انرژی جنبشی می‌باشد. ایجاد پرش هیدرولیکی البته مستلزم وجود عمق پایاب کافی در آبراهه می‌باشد. در صورتی که عمق آب در دبی طراحی به‌اندازه‌ی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی باشد، در آن صورت در پایین‌دست محل برخورد جت با کف‌بند، پرش هیدرولیکی شکل خواهد گرفت. در نتیجه طول کف بند باید به‌اندازه‌ی مجموع فاصله افقی محل برخورد جت با کف‌بند از دیواره عمودی شیب شکن و طول پرش هیدرولیکی باشد. در صورتی که به هر دلیلی عمق پایاب کمتر از عمق مزدوج باشد، پرش به پایین‌دست منتقل شده و منجر به آبشستگی بستر آبراهه در پایین‌دست سازه و در نهایت تخریب سازه خواهد شد. هر چند در زمان طراحی شیب شکن، این نکته مد نظر قرار می‌گیرد، ولی فرسایش تدریجی بستر آبراهه در طول بهره‌برداری منجر به گود شدگی بستر پایین‌دست و در نتیجه کاهش عمق پایاب می‌گردد. علاوه بر این تغییر اقلیم منجر به رخدادهای غیر نرمال شده است و در نتیجه الگوی طبیعی جریان نیز تغییر کرده است که باعث وقوع سیلاب‌ها با دبی بیشتری شده است. افزایش دبی آبراهه نیز باعث افزایش سرعت ورودی جریان به سازه می‌گردد که درنتیجه آن طول پرش هیدرولیکی افزایش یافته و بخشی از پرش به خارج از کف‌بند منتقل می‌شود و چنانچه تمهیداتی صورت نگیرد، می‌تواند منجر به آبشستگی در پایین‌دست سازه گردد.

راهکارهای مختلفی تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان با این مسئله مقابله کرد. مطالعه‌هایی در خصوص تأثیر شیب پایین‌دست توسط Hong et al (2010) انجام شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که طول کف‌بند با افزایش میزان شیب پایین‌دست افزایش یافته است. Liu et al. (2014) به بررسی تأثیر شیب مثبت کانال در بالادست شیب شکن قائم مستطیلی بر مشخصات جریان پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش شیب، عمق لبه شیب شکن، عمق استخر و راندمان استهلاک انرژی کاهش پیدا می‌کند. Chiu et al. (2017) با در نظر گرفتن یک گودال مستطیلی با ابعاد متفاوت در پای شیب شکن به بررسی عددی جریان بر روی

شیب شکن قائم پرداختند. نتایج مطالعه‌های آن‌ها بیان‌گر این است که وجود یک گودال در پای شیب شکن سبب به‌وجود آمدن سه نوع رژیم جریان شامل جریان سطحی، جریان ریزشی و جریان نوسانی متناوب بر روی این سازه می‌گردد. مطالعه‌های متعددی انجام شده است تا بتوان انرژی جنبشی جت را کاهش داد که خود باعث کاهش فاصله افقی برخورد جت تا دیواره عمودی شیب شکن و نیز کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌گردد. مطالعه‌هایی نیز با هدف تعیین شرایط هیدرولیکی یا اصلاح دهانه ورودی شیب شکن به‌منظور افزایش استهلاک انرژی در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه Ghaderi, et al (2019) به بررسی تأثیر تنگ شدگی ورودی شیب شکن پرداختند و دریافتند که با وجود تنگ‌شدگی قائم سرعت ورودی جریان افزایش می‌یابد که منجر به ورود هوا و افزایش تلاطم و افزایش استهلاک انرژی به میزان ۳۰ درصد می‌گردد. یک سری مطالعه‌هایی در خصوص نصب صفحات مشبک در ورودی شیب شکن نیز انجام شده است. Hasannia et al. (2020) دریافتند که نصب صفحات مشبک ترکیبی (افقی و قائم) در ورودی شیب شکن تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. Daneshfaraz et al (2020) گزارش دادند که تغییر شیب مثبت صفحات مشبک بر روی عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی بی‌تاثیر است. مطالعه Daneshfaraz et al (2021) نشان داد که با نصب صفحات مشبک مقدار استهلاک انرژی نسبی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. ضمن اینکه میزان بازشدگی صفحات مشبک تأثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی جریان ندارد. Mirzaee et al. (2021) و Pasbani Khiavi و Hasanniya (2022)، با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به بررسی عددی پارامتر استهلاک انرژی شیب شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی پرداختند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که لبه دندانه‌ای افقی، شدت آشفتگی را افزایش و در نتیجه میزان استهلاک انرژی جنبشی را افزایش می‌دهد. ضمن اینکه افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آن‌ها نیز مؤثر می‌باشد.

با نگاهی به مطالعه‌های گذشته مشخص می‌شود که بیشتر تحقیقات برای افزایش استهلاک انرژی و در نتیجه کاهش طول کف‌بند، بر اصلاح سازه ورودی با نصب صفحات مشبک یا دندانه کردن لبه تاج بوده است. این روش‌ها هر چند موجب افزایش استهلاک انرژی می‌گردد ولی برای سازه شیب شکن در آبراهه‌هایی که رسوب یا مواد شناور حمل می‌کنند مناسب نیست و در کوتاه مدت منجر به گرفتگی می‌شود و تأثیر آن ممکن است بر خلاف انتظار باشد. از این رو در این تحقیق استفاده از مانع منقطع در بستر یا کف‌بند سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطالعه‌های محققین قبلی نشان داده که نصب موانع در کف سازه می‌تواند طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند (Shafai Bejestan and Neisi, 2009).

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

متغیرهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در شرایط شیب شکن قائم بدون مانع و با مانع و آستانه انتهایی که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند، عبارت‌اند از: عمق اولیه پرش هیدرولیکی (Y_1)، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (Y_2)، سرعت جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی (V_1)، عمق بحرانی جریان در بالادست شیب شکن (Y_C)، جرم مخصوص آب (ρ)، لزوجت دینامیکی آب (μ)، کشش سطحی (σ)، شتاب ثقل (g)، ارتفاع شیب شکن (P)، ارتفاع مانع عرضی (H)، فاصله مانع عرضی از شیب شکن (X)، ارتفاع آستانه انتهایی (H_2)، طول برخورد تیغه جریان به کف‌بند در پایین‌دست شیب شکن (L_1)، طول پرش هیدرولیکی (L_2) (رابطه ۱).

$$f(Y_1, Y_2, V_1, Y_C, \rho, \mu, \sigma, g, P, H, X, H_2, L_1, L_2) = 0 \quad (۱)$$

با استفاده از روش پی باکینگهام و انتخاب متغیرهای ρ و V_1 و Y_1 به‌عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بی‌بعد استخراج شدند. از آنجا که در تمامی آزمایش‌ها عمق جریان روی تاج شیب شکن در بالادست بیش از سه سانتی‌متر بود لذا اثر کشش سطحی یا عدد وبر در این تحقیق قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد (Rahmanshahi et al., 2023 Doustkam et al., 2024). علاوه بر این جریان در بالادست و پایین دست سازه کاملاً آشفته و تأثیر لزجت نیز ناچیز است لذا از عدد رینولدز جریان نیز صرفنظر می‌شود. علاوه بر این مقدار پارامتر X/P در این تحقیق ثابت و برابر ۱/۱۴ می‌باشد لذا از این پارامتر نیز صرفنظر می‌شود. در نتیجه رابطه نهایی به‌صورت زیر می‌باشد (رابطه ۲):

$$\frac{Y_2}{Y_1}, \frac{Y_2}{P}, \frac{L_2}{P}, \frac{L_1}{P} = f(Fr_1, \frac{H}{P}, \frac{H_2}{P}, \frac{Y_C}{P}) \quad (۲)$$

در رابطه فوق Fr_1 عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی می‌باشد.

 DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156

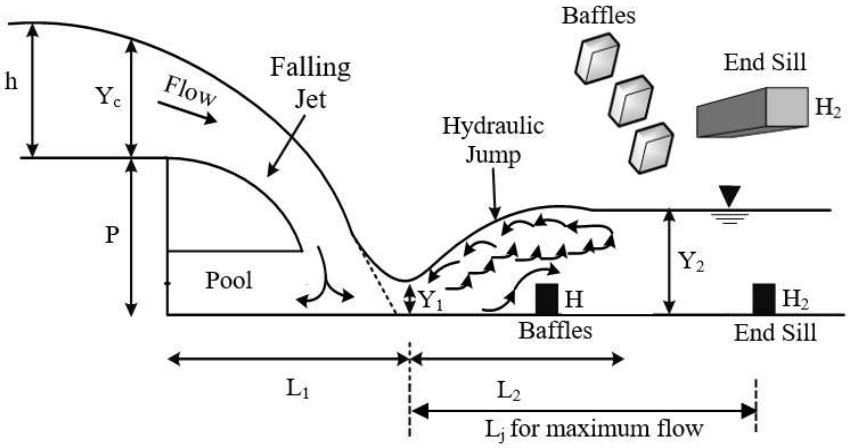


Fig. 2- Vertical drop structures with dentate baffles and end sill
شکل ۲- شیب شکن قائم با مانع منقطع و آستانه انتهایی



Fig. 3- View of the laboratory flume
شکل ۳- نمائی از فلوم آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر با دیواره‌های شیشه‌ای انجام شده است (شکل ۳). برای اندازه‌گیری دبی از فلومتر دیجیتالی آلتراسونیک تولید شرکت فراسنج است با دقت یک درصد استفاده شد. از عمق‌سنج مکانیکی با دقت یک دهم میلی‌متر برای اندازه‌گیری عمق آب استفاده شده است. شیب شکن، صفحه‌ی فلزی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد که در فاصله سه متری از ابتدای فلوم نصب شده است. موانع از جنس تفلون فشرده بوده که در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از ابتدای شیب شکن نصب گردیده است. این فاصله با آزمایش‌های مقدماتی که بیشترین تأثیر را داشته باشد تعیین گردید. در فاصله نزدیکتر، جت با برخورد به مانع موجب می‌شد تا سطح آب به‌طور ناگهانی افزایش یابد و تأثیر موانع بر طول پرش کمتر شود. در فواصل دورتر نیز تأثیر آن‌ها کمتر بود. در مطالعه Donnelly و Blaisdell (1959) بر روی شیب شکن قائم، فاصله نصب موانع از محل برخورد جت با کف برابر $0.8Y_c$ پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در آزمایش‌های شاهد و در بیشترین دبی جریان، عمق بحرانی برابر ۶/۸ سانتی‌متر و L_1 برابر ۳۷ سانتی‌متر بود لذا در مطالعه حاضر این فاصله حدوداً $0.45Y_c$ می‌باشد. ارتفاع موانع منقطع برابر پنج سانتیمتر (معادل حدود $0.80Y_c$) بود که تقریبا برابر با توصیه Donnelly و Blaisdell (1959) که معادل $0.85Y_c$ می‌باشد، مطابقت دارد. عرض و فاصله بین موانع سه سانتی‌متر (معادل $0.45Y_c$) موانع منقطع با دیوار ها نیز سه سانتی‌متر فاصله داشتند. ضمناً مقدار Y_1 و یا عمق آب قبل از پرش در بیشترین دبی برابر دو سانتی‌متر بوده است که در این صورت ارتفاع موانع منقطع $2.5Y_1$، عرض ، فاصله بین موانع و فاصله موانع از دیوار برابر $1.5Y_1$بوده است. همچنین موانع منقطع در فاصله $1.5Y_1$ از محل اصابت جت به بستر نصب شده‌اند. ارتفاع آستانه انتهایی در این مطالعه متغیر (دو، سه و چهار سانتی‌متر) بود.

برای رسیدن به اهداف تحقیق، دو سری آزمایش انجام شد که سری اول تعداد هفت آزمایش بدون مانع و سری دوم ۲۱ آزمایش با مانع در میانه پرش و آستانه انتهایی در انتهای پرش انجام شد. ارتفاع آستانه انتهایی متفاوت بود. روش انجام آزمایش هم بدین گونه بود که جریان آب به‌آرامی وارد فلوم می‌شد تا دبی مورد نظر

تأمین گردد. آنگاه دریچه پایین دست به تدریج بسته می‌شد تا پرش هیدرولیکی در پایین‌دست شیب شکن به‌طور آزاد شکل بگیرد. این شرایط برای مدتی ثابت نگه داشته می‌شد و پس از اطمینان از ثابت بودن شرایط جریان، رقوم سطح آب از بالادست شیب شکن تا پایین‌دست در چندین نقطه توسط عمق‌سنج اندازه‌گیری می‌شد. هم‌زمان توسط دوربین از نمای روبه‌رو عکس و فیلم نیز تهیه می‌شد. دبی جریان نیز پس از اطمینان از تثبیت جریان، قرائت و یادداشت می‌گردید. در این مطالعه از هفت دبی مختلف استفاده شد به‌طوری که عمق جریان در بالادست شیب شکن (h) به‌ترتیب برابر ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ و ۷ سانتی‌متر و عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش به‌ترتیب برابر ۶/۳۴، ۶/۸۴، ۷/۵۲، ۸/۰۶، ۹/۰۷، ۱۰/۵۰ و ۱۲/۵۲ بود. در طول هر آزمایش دبی جریان، عمق اولیه پرش، عمق ثانویه پرش، طول پرش و محل اصابت تیغه جریان به بستر در پایین‌دست شیب شکن اندازه‌گیری شد. طول پرش هیدرولیکی به‌عنوان فاصله بین نقطه شروع پرش و نقطه‌ای که تقریباً حباب‌ها از بین می‌روند تعریف می‌شود. برداشت عمق اولیه و ثانویه پرش توسط عمق‌سنج انجام شد. مکان مناسب برای اندازه‌گیری عمق ثانویه، انتهای پرش هیدرولیکی است که اثرات آشفتگی و سایر اختلالات در جریان کمتر است و تراز سطح آب تقریباً وضعیت ثابتی دارد. از تفاضل رقوم سطح آب و رقوم بستر، عمق اولیه و ثانویه پرش به دست می‌آید. در شکل (۴) نمائی از پرش هیدرولیکی در آزمایش بدون مانع (شاهد) نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

آزمایش‌های بدون مانع

تخمین L_1 و Y_2

از اولین مطالعه‌هایی که منجر به ارائه ابعاد طراحی شیب شکن قائم شده است می‌توان به مطالعه‌های Rand (1955) اشاره کرد که روابط (۳) و (۴) را برای یک شیب شکن قائم در بستر بدون مانع ارائه کرد.

$$\frac{L1}{P} = 4.3\left(\frac{Yc}{P}\right)^{0.81} \quad (۳)$$

$$\frac{Y2}{P} = 1.66\left(\frac{Yc}{P}\right)^{0.81} \quad (۴)$$

در روابط فوق L_1 فاصله محل اصابت تیغه جریان به بستر از شیب شکن، Y_C عمق بحرانی جریان در بالادست لبه‌ی شیب شکن، P ارتفاع شیب شکن و Y_2 عمق مزدوج پرش هیدرولیکی است (شکل ۲).

شکل (۵) طول اندازه‌گیری شده L_1 در این مطالعه را در مقایسه با طول محاسبه شده از رابطه (۳) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج تحقیق تفاوت اندکی با رابطه (۳) دارد و میزان خطا به‌طور متوسط دو درصد می‌باشد.

شکل (۶-الف) نیز مقادیر اندازه‌گیری شده عمق مزدوج Y_2 را در مقابل مقادیر محاسبه شده از رابطه بلانگر Belanger (1828) رابطه (۵) را نشان می‌دهد.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1\right) \quad (۵)$$

در رابطه فوق، Y_1 و Y_2 به‌ترتیب برابر اعماق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی و Fr_1 عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی است.

با دقت در شکل (۶) ملاحظه می‌کنید که نسبت Y_2/Y_1 آزمایشگاهی کمتر از رابطه بلانگر است. محاسبات نشان داد که نسبت Y_2/Y_1 حاصل از رابطه بلانگر به‌طور متوسط نه درصد بیش از داده‌های آزمایشگاهی است. میزان خطا می‌تواند ناشی از فرضیات به‌کار رفته در رابطه بلانگر و همچنین خطای ناشی از تجهیزات مورد استفاده و یا خطای انسانی در برداشت داده‌ها باشد که در تحقیقات آزمایشگاهی معمول است و این میزان خطا مورد قبول می‌باشد. علاوه بر این داده‌های حاصل از آزمایش‌های بدون مانع با رابطه ارائه شده Rand (1955) نیز مقایسه گردید که نتایج در شکل (۶ ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و رابطه (۴) وجود دارد. محاسبات نشان داد که Y_2/P حاصل از نتایج آزمایشگاهی به‌طور متوسط سه درصد بیش از رابطه (۴) است.



Fig. 4- View of the formation of the hydraulic jump of the control experiment

شکل ٤- نمایی از تشکیل پرش هیدرولیکی آزمایش شاهد در وضعیت پایدار

 DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156

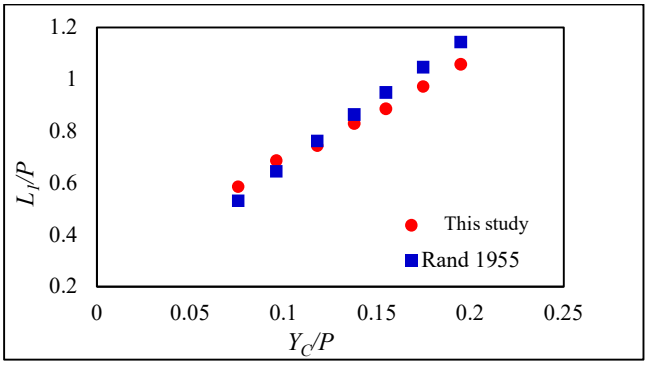


Fig. 5- Comparison of the baseline experimental data with Eq.3

شکل ۵ – مقایسه نتایج این تحقیق با رابطه (۳)

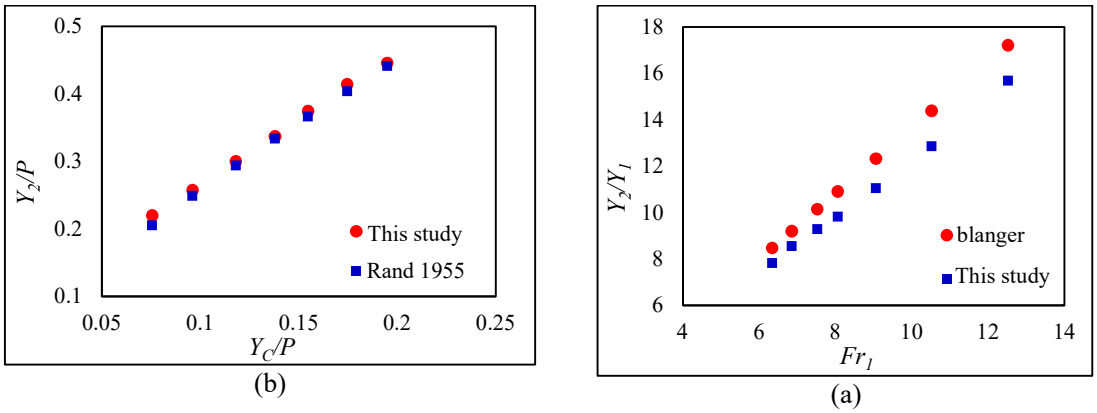


Fig. 6- Comparison of the sequent depth ratio obtained from the baseline experiments with equations of (a) Belanger (1828) and (b) Rand (1955)

شکل ٦- مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش حاصل از آزمایش شاهد و معادله‌های (a) بلانگر (۱۸۲۸) و (b) رند (۱۹۵۵)

آزمایش‌های با مانع منقطع

موانع منقطع در فاصله یک سوم طول پرش هیدرولیکی از شروع پرش نصب گردید. طول پرش هیدرولیکی هم با توجه به بیشترین طول که در این آزمایش‌ها به‌دست آمد، مربوط به آزمایش با حداکثر دبی جریان در آزمایش‌های بدون مانع، اختیار گردید. در این سری آزمایش‌ها، آستانه انتهایی پیوسته نیز در انتهای طول پرش مربوط به حداکثر دبی جریان نیز نصب گردید. سه اندازه مختلف ارتفاع آستانه انتهایی مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از نصب موانع میانی و آستانه انتهایی بررسی میزان تأثیر آن‌ها بر طول پرش هیدرولیکی بود. این موانع تأثیر چندانی بر طول L_1 که تابع شرایط جریان ورودی به شیب شکن است، ندارد ولی جریان فوق بحرانی که به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند با برخورد به این موانع بخشی از انرژی جنبشی خود را مستهلک می‌کند در نتیجه انتظار این است که طول پرش هیدرولیکی کاهش یابد. از این رو در این بخش تأثیر این موانع صرفاً روی طول پرش هیدرولیکی بررسی می‌شود. توضیح اینکه نتایج تحقیقات از جمله Izadjoo و Shafai- Bejestan (2007) و Shafai Bejestan و Neisi (2009) نشان داد که موانع نیز می‌توانند باعث کاهش عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تا حدود ۲۰ درصد گردد. ولی در این بررسی و همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در این سری آزمایش‌ها، عمق پایاب برابر عمق مزدوج در آزمایش‌های بدون مانع اختیار گردید، در نتیجه تأثیر موانع منقطع صرفاً بر طول پرش هیدرولیکی بررسی شده است.

ارتفاع آستانه انتهایی

در این بخش اثر ارتفاع آستانه انتهایی بر طول پرش هیدرولیکی بررسی شده است. در شکل (۷) تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی (L_2/P) در مقابل ارتفاع نسبی آستانه انتهایی (H_2/P) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تغییر ارتفاع نسبی آستانه (H_2/P) در محدوده ۰/۰۵ الی ۰/۰۸ و در جریان با عمق‌های بحرانی ۰/۰۷، ۰/۱۵، ۰/۱۷، ۰/۱۹=Y_c/P، تأثیری بر مقدار L_2/P ندارد. افزایش شرایط جریان در Y_c/P های ۰/۰۹، ۰/۱۱ و ۰/۱۳ باعث کاهش اندکی بر L_2/P گردیده است به‌طوری که محاسبات نشان می‌دهد که این کاهش به‌ترتیب برابر ۲۱/۷، ۳۰/۶ و ۱۷/۸ درصد است. همچنین افزایش ارتفاع آستانه (H_2/P) در محدوده

۰/۰۸ الی ۰/۱۱ و برای جریان با Y_c/P های ۰/۰۷، ۰/۰۹، ۰/۱۱ و ۰/۱۳ روی شیب شکن، تأثیرناچیزی بر مقدار L_2/P ندارد. افزایش ارتفاع نسبی آستانه برای Y_c/P های ۰/۱۵، ۰/۱۷ و ۰/۱۹ باعث کاهش مقدار L_2/P گردید. این کاهش به‌ترتیب برابر ۷/۲، ۶/۵ و ۰/۰۶ درصد محاسبه شد. همان‌گونه که از شکل (۷) مشهود است، با تغییر Y_c/P از ۰/۱۳ به ۰/۱۵ مقدار L_2/P افزایش بیشتری را نسبت به Y_c/P های قبلی نشان می‌دهد.

شکل (۸) تغییرات L_2/P برای آزمایش‌های شاهد و با مانع منقطع را نشان می‌دهد. محور عمودی این شکل نشان دهنده نسبت طول پرش به ارتفاع شیب شکن (L_2/P) و محور افقی آن نشان دهنده نسبت عمق بحرانی به ارتفاع شیب شکن (Y_c/P) است. این شکل نشان می‌دهد که در آزمایش‌های با حضور مانع منقطع، مقدار L_2/P در مانع با $H_2/P=0.05$ نسبت به سایر موانع بیشتر است. پس از آن مانع با $H_2/P=0.08$ بیشترین مقدار L_2/P را به خود اختصاص داده است. مقدار L_2/P در $H_2/P=0.11$ کمترین مقدار را دارد. لازم به ذکر است که مقدار L_2/P در H_2/P برابر ۰/۰۵ و ۰/۰۸ به غیر از $Y_c/P=0.09$ یکسان است لذا داده‌های مربوط به آن‌ها برهم منطبق شده‌اند. شکل (۸) نشان می‌دهد که مقدار L_2/P در آزمایش‌های با حضور با مانع منقطع و ارتفاع‌های مختلف آستانه انتهایی نسبت به آزمایش‌های شاهد کاهش یافته است. کمترین مقدار کاهش L_2/P مربوط به آستانه با ارتفاع H_2/P=0.05 است که این میزان کاهش به‌طور متوسط برابر ۵۲ درصد می‌باشد. مقدار کاهش L_2/P برای مانع با ارتفاع H/P=0.08 به ازای Y_c/Pهای ۰/۰۷ الی ۰/۱۹ به‌طور متوسط برابر ۵۳ درصد است. مقدار کاهش L_2/P برای مانع با $H_2/P=0.11$ به ازای Y_c/P های ۰/۰۷ الی ۰/۱۹ به‌طور متوسط برابر ۵۷/۷ درصد است؛ بنابراین ضعیف‌ترین عملکرد از نظر کاهش طول پرش برای آستانه با ارتفاع $H_2/P=0.05$ و بهترین عملکرد در این زمینه برای آستانه با ارتفاع $H_2/P=0.11$ می‌باشد.

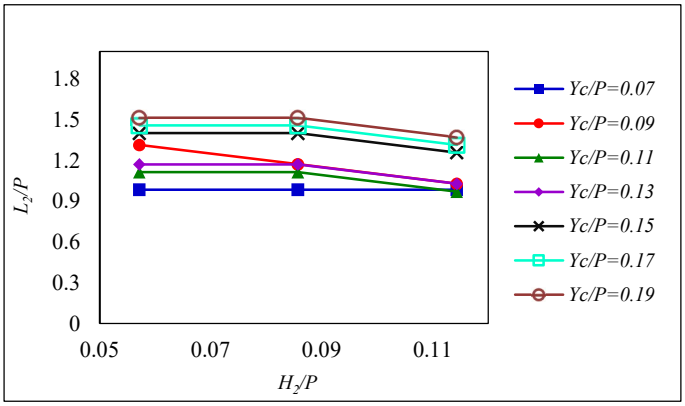


Fig. 7- Variation of L_2/P versus H_2/P for basin with dentate baffles and different flow conditions

شکل ۷- تغییرات L_2/P در مقابل H_2/P برای آزمایش‌های با موانع منقطع برای شرایط مختلف جریان

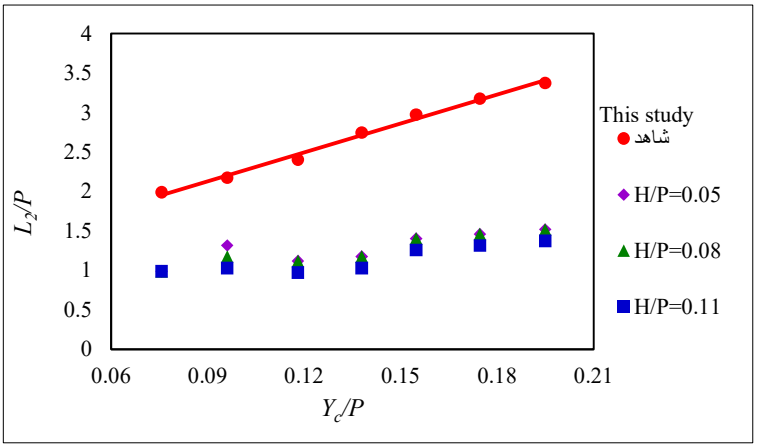


Fig. 8-Variation of L_2/P from basin without baffles and with dentate baffles and end sill with different height

شکل ۸- مقایسه L_2/P در حوضچه بدون مانع و با مانع منقطع و آستانه انتهایی با ارتفاع‌های مختلف

DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، سازه‌های آبشکن عمودی از جمله سازه‌هایی هستند که برای کنترل فرسایش بستر در رودخانه‌هایی با شیب تند احداث می‌شوند. طی سالیان گذشته تعداد زیادی از این سازه‌ها احداث شده‌اند که بنا به دلایل متعددی از جمله فرسایش بستر رودخانه پایین‌دست و در نتیجه کاهش عمق پایاب و یا تغییر اقلیم منطقه و در نتیجه افزایش دبی‌های حدی باعث شده تا حوضچه در حال حاضر راندمان اولیه را نداشته باشد و بخشی از پرش به بیرون حوضچه منتقل می‌شود. در نتیجه ضرورت دارد تا اصلاحاتی برای این‌گونه سازه‌ها اعمال شود. در این مطالعه افزودن موانع منقطع در بستر حوضچه به‌عنوان راهکاری برای کاهش طول پرش مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج ارائه شده نشان داد که طول پرش در حداکثر دبی تا ۵۷ درصد نیز کاهش می یابد که دلیل اصلی آن را می‌توان این‌طور بیان کرد: برخورد جت به موانع منقطع باعث می شود تا اولا جت به بخش های جداگانه تقسیم می‌شود و بخشی از بین موانع عبور می‌کند و بخشی از روی موانع. این دو جت در پایین دست تلاقی می‌کنند. برخورد جت به مانع و پراکنده شدن آن نیز باعث تلاطم بیشتر توده جریان در بدنه پرش می‌شود که در نتیجه منجر به افزایش بیشتر استهلاک انرژی و در نتیجه کاهش طول پرش می گردد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف بررسی نصب موانع منقطع و آستانه انتهایی با ارتفاع‌های مختلف بر طول پرش هیدرولیکی پایین دست شیب شکن قائم انجام گردید. برای رسیدن به اهداف تحقیق دو سری آزمایش با و بدون مانع تحت دبی‌های مختلف انجام شد و خلاصه نتایج به شرح زیر به دست آمد:

۱- داده‌های آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که مناسبترین فاصله نصب موانع منقطع در فاصله $0.6Y_c$ از محل برخورد جت با کف حوضچه می‌باشد. Y_c برابر با عمق بحرانی در شرایط دبی طرح است. همچنین ارتفاع موانع کف در این مطالعه برابر $0.8Y_c$ می‌باشد.

۲- نتایج آزمایش‌های بدون مانع اختلاف ناچیزی با روابط روابط (۳) و (۴) دارند و روابط ارائه شده توسط Rand (1955) می‌توانند برای محاسبه طول L_1 و Y_2 مورد استفاده قرار گیرند.

۳- نتایج آزمایش‌های با موانع نشان داد که ارتفاع نسبی آستانه انتهایی (H_2/P) برابر ۰/۰۵ کمترین تأثیر (معادل ۵۲ درصد) و H_2/P برابر ۰/۱۱ بیشترین تأثیر (معادل ۵۷/۷ درصد) بر کاهش طول پرش هیدرولیکی دارد.

۴- به‌طور کلی طول پرش هیدرولیکی در آزمایش‌های با مانع منقطع نسبت به آزمایش‌های بدون مانع کاهش یافت که مقدارحداکثر آن حدود ۵۷ درصد محاسبه شد.

۵- مطالعه حاضر نشان داد که موانع منقطع تأثیر بسیاری بر کاهش طول پرش هیدرولیکی و در نتیجه طول حوضچه دارند، از این رو توصیه می‌شود تا قبل از کابرد این نتایج، آزمایش‌های بیشتری در فلوم‌های بزرگ‌تر و در محدوده اعداد فرود بیشتر انجام گردد.

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.WH1400.25487 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت شده و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان می‌باشد.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آزاده جمشیدی، انجام کارهای آزمایشگاهی و جمع آوری داده‌ها.

نویسنده دوم: محمود شفاعی بجستان، نگارش مقاله، تحلیل و بررسی نتایج، ایده طرح، پاسخ به داوران.

نویسنده سوم: محمد بهرامی یاراحمدی، تحلیل داده‌های آزمایشگاهی.

نویسنده چهارم: مصطفی رحمانشاهی، نظارت بر کار آزمایشگاه.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود .

References

1- Belanger, J.B., 1828. *Essai sur la solution numerique de quelques problemes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes; par m. J.-B. Belanger.*. Chez Carilian-Goeury, libraire, des corps royaux des ponts et chaussees et des mines.

2- Blaisdell, F.W., 1959. *The SAF stilling basin: A structure to dissipate the destructive energy in high-velocity flow from spillways* (No. 156). Agricultural Research Service.

3- Chamani, M. and Beirami, M.K., 2002. Flow characteristics at drops. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(8), pp.788-791.. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:8(788.

4- Chiu, C.L., Fan, C.M. and Tsung, S.C., 2017. Numerical modeling for periodic oscillation of free overfall in a vertical drop pool. *Journal of Hydraulic Engineering*, *143*(1), p.04016077. DOI:10.1061/(ASCE)HY. 1943-7900.0001236.

5- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R. and Bazyar, A., 2020. Experimental investigation of the effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(10), pp.2499-2509. DOI:10.22059/ijswr.2019.283685.668238. (In Persian)

6- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Jafari, M., 2021. Experimental study of the effect of the location of the horizontal screen from the edge of the vertical drop on the pool depth and the amount of downstream energy loss. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, *22*(84), pp.55-68. DOI.org/10.22092/idser.2021.355547.1482. (In Persian)

7- Donnelly, C.A. and Blaisdell, F.W. 1954. Straight drop spillway stilling basin. Technical Paper No. 15, Series B, University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, 35p.

8- Doustkam, M., Rahmanshahi, M., Fathi-Moghadam, M., Keramat, A. and Duan, H.F., 2024. Experimental study on the hydraulic performance of porous broad-crested weirs with sloping crests. *Water Resources Management*, *38*(12), pp.4783-4802., DOI: 10.1007/s11269-024-03887-9.

9- Ghaderi, A., Dasineh, M. and Abbasi, S., 2019. Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop (numerical investigation). *Journal of Hydraulics*, *13*(4), pp.121-131. DOI.org/10.30482/jhyd.2019.82713. (In Persian)

10- Gill, M. A. 1979. Hydraulics of rectangular vertical drop structures. *Journal of Hydraulic Research*, 17(4): 289-302. DOI:10.1080/00221687909499573

11- Hasannia, V., Daneshfaraz, R. and Sadeghfam, S., 2020. Experimental investigating on hydraulic parameters of vertical drop equipped with combined screens. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *52*(10), pp.2487-2500. DOI: 10.22060/ceej.2019.16431.6223. (In Persian)

12- Hong, Y.M., Huang, H.S. and Wan, S., 2010. Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, *48*(1), pp.125-129. https://doi.org/10.1080/00221680903568683.

13- Izadjoo, F., & Shafai-Bejestan, M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*, 7(8): 1164-1169.

14- Liu, S.I., Chen, J.Y., Hong, Y.M., Huang, H.S. and Raikar, R.V., 2014. Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*, *22*(4), p.9. http://dx.doi.org/10.6119/JMST-013-0604-1.

15- Mirzaee, R., Hosseini, K. and Mousavi, F., 2021. Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics*, *16*(1), pp.23-36. DOI: 10.30482/jhyd.2021.256774.1486. (In Persian).

16- Moore, W.L., 1943. Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *108*(1), pp.1343-1360.

17- Pasbani Khiavi, M. and Hasanniya Giglou, V., 2022. Numerical Study of the Effect of Height of Vertical Screens on Vertical Drop Energy Dissipation. *Irrigation and Water Engineering*, *13*(2), pp.65-84.DOI: 10.22125/iwe.2022.162566. (In Persian)

18- Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Shafai Bejestan, M. and Mirjalili, S., 2023. A hybrid model for predicting the energy dissipation on the block ramp hydraulic structures. *Water Resources Management*, *37*(8), pp.3187-3209. DOI:10.1007/s11269-023-03497-x.

19- Rand, W., 1955, September. Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 81, No. 9, pp. 1-13). ASCE.

20- Shafai Bejestan, M., Neisi, K. 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2(5): 436-445. DOI: 10.3923/ajaps.2009.436.445.