

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Negative Slope, Bed Roughness and Positive Step on Velocity Profile and Pressure Oscillations of Hydraulic Jump

N. Pourabdollah^{1*}, M. Heidarpour², J. Abedi-Koupai³ and J. Mohamadzadeh⁴

1* - Corresponding Author, PhD Student, Water Engineering Department, Isfahan University of Technology, Iran. (*nahid7760@yahoo.com*).

2- Professor, Water Engineering Department, Isfahan University of Technology, Iran.

3- Professor, Water Engineering Department, Isfahan University of Technology, Iran.

4- Assistant Professor, Water Engineering Department, Shiraz University, Iran.

Received: 11 September 2017

Revised: 15 May 2018

Accepted: 20 May 2018

Keywords: Boundary Layer Thickness, Standard Deviation, Shear Stress, Stilling Basin.

DOI: 10.22055/jise.2018.23313.1657.

Introduction

The control of speed and pressure oscillations along the stream, as two critical parameters in designing hydraulic systems, is vital since they have to be set within an acceptable range in order to prevent damages to hydraulic structures. Ead and Rajaratnam (2002) studied the hydraulic jump characteristics on the corrugated bed and calculated the thickness of dimensionless boundary layer to be 0.45. Pourabdollah et al. (2015) investigated the effect of roughness and adverse slope of the bed on the velocity profile and determined the mean shear force coefficient to be 11.5 times more than that of the classical condition. Fiorotto and Rinaldo (1992) stated that in hydraulic jump the pressure is oscillating around the mean pressure value, which is almost equal to piezometric head at each point. Also Lopardo and Solari (1980) determined the pressure oscillations equal to 0.084 for hydraulic jump at downstream of valve. Accordingly, although various studies have been carried out on hydraulic jump characteristics under different conditions, the simultaneous effect of end positive step, bed roughness and adverse slope on hydraulic jump characteristics have not yet been explored. Therefore, the aim of this study was to investigate the velocity profiles, flow surface and pressure oscillations in hydraulic jump within the stilling basin at defined conditions.

Methodology

This research was carried out at the hydraulic laboratory of Isfahan University of Technology in a rectangular flume with 0.4 width, 0.6 height and 8m length. The stilling basin included an adverse slope bed with 2m length and one end positive step. The slope of the basin was considered to be 0, -1.5, -3, and -5%. Also, the height of end positive step was considered to be 3 and 6 cm. The experiments were conducted in both smooth and gravelly rough bed with $4.76 \leq t \leq 5.66$, $11.1 \leq t \leq 12.7$ and $19.1 \leq t \leq 22.2$ mm. This research was conducted in four flow rates in the range of 25 to 50 LPS and 576 experiments were performed in the Froude number range of 4 to 10. The flow depth was measured by a point gauge with an accuracy of ± 0.1 mm and the flow velocity was measured by the pitot tube. Meanwhile, several photographs were taken from each jump using a digital camera to plot the water surface. Finally, by using the Curve Expert software the variations of water surface profile were analyzed, and an equation was obtained for determination of water surface profiles. In stilling basin length, several piezometers were installed at each 10 cm with their ends fixed to a graded plate. Similarly to the hydraulic jump, several photographs were taken from the piezometers graded plate. Then, the pressure oscillations were calculated during hydraulic jump. Also, based on the measured

pressure of installed piezometers, the cavitation coefficient was calculated and the occurrence probability of this phenomenon was investigated.

Result and discussion

The results showed that at each constant Froude number, L_j/D_1 was decreased by increasing the adverse slope, rough bed and positive end step. In this study, the jump length was reduced by 47% compared to that of the classic condition. Instead, this value had been reported by Pourabdollah et al. (2014), Parsamehr et al. (2014), and Izadjoo and Shafai Bejestan (2007) to be 39.6, 49.9 and 50 %, respectively. Hence, stilling basin can be built with smaller length to save expenses. Moreover, a novel equation was propounded to estimate the water level in accordance with the experimental data. Observing velocity profiles revealed that the thickness of the boundary layer (δ) was increased in different conditions of adverse slope, bed roughness and positive step as compared to that of the classical jump. The differences refer to the higher uniformity of the velocity profile along with the jump of study. Based on the results, the standard deviation of the pressure oscillations (σ_x) has decreased by increasing the roughness diameter and height of positive step. Also, the bed roughness and the positive step in a fixed adverse slope increased the shear stress and reduced the pressure oscillations. Therefore, the above listed factors reduced σ_x compared to that of the classical condition. Calculation of dimensionless coefficients of C_p^+ , C_p^- and C_p' showed that these coefficients were decreased due to increasing the bed roughness and the height of positive step. In this study, the maximum C_p^+ and C_p^- values were calculated to be 0.088 and 0.090, respectively, corresponded to $0.19 \leq X/L_j \leq 0.375$. Also, the pressure oscillations were measured by piezometers installed in hydraulic jump length at different conditions, and the minimum cavitation coefficient was calculated to be 3.87.

Conclusion

In this research, the effect of adverse slope, bed roughness and end positive step on the length, velocity profiles, water surface and pressure oscillations of the hydraulic jump were investigated. The results showed that increasing the roughness, adverse slope and the height of end positive step reduces the length of hydraulic jump and the main reduction was related to gravel roughness with mean diameter of 2cm, adverse slope of 5% and positive step height of 6cm. Hence, stilling basin can be built shorter leading to save costs. Based on the results, the thickness of the boundary layer in the presence of the rough bed, adverse slope and positive step was determined to be 4.44 times of smooth bed conditions. Moreover, the shear force coefficient (ϵ) was determined to be 12.4 times more than that of the classic condition. According to the results, the presence of bed roughness, positive step and adverse bed slope increase the shear stress and, as a result, decrease the pressure oscillations. Therefore, the factors of adverse bed slope, bed roughness and positive step reduced the σ_x compared to that of the classical condition. Also, the dimensionless coefficient of pressure oscillations was decreased by 64.7% compared to that of the classical jump. In this study, the minimum cavitation coefficient was calculated to be 3.87, indicating no cavitation phenomena.

Acknowledgement

We would like to appreciate Isfahan University of Technology for financially supporting this research.

- 1- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), pp.656-663.
- 2- Fiorotto, V. and Rinaldo, A., 1992. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), pp.499-520.

- 3- Izadjoo, F. and Shafai-Bejestan, M., 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Applied Sciences*, 7(8), pp.1164-1169.
- 4- Lopardo, R. A. and Solari, H. G., 1980. Pressure fluctuations beneath free hydraulic jump. *Proc. 9th Congress of the Latin American Hydraulica, International Association of Hydraulic Research*. 1: 77-89.
- 5- Parsamehr, P. and Hossenzadeh, D.A., 2013. Experimental Study of Effect of Rough Bed on Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump on Adverse Slope. *Irrigation Science and Engineering (JISE) (Scientific Journal of Agriculture)*, 36(1): 89-101.
- 6- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R.A., 2015. Investigation of Water Velocity and Surface Profile in Hydraulic Jump over Rough Bed with Adverse Slope. *Water and Soil Science*, 25(1): 143-152.
- 7- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R.A., 2014. Experimental Investigation of Effect of Roughness and Adverse Slope on Length and Roller Length of Hydraulic Jump. *IWRJ*, 8(14): 155-164.



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

اثر شیب منفی، زبری بستر و پله انتهایی بر پروفیل سرعت و نوسانات فشار پرش هیدرولیکی

ناهید پور عبدالله^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۲، جهانگیر عابدی کوپایی^۳ و جهانشیر محمدزاده هایلی^۴

*- نویسنده مسئول، دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه صنعتی اصفهان Nahid7760@yahoo.com

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۳۰

بازنگری: ۱۳۹۷/۲/۲۵

دریافت: ۱۳۹۶/۶/۲۰

چکیده

حوضچه‌های آرامش برای کنترل پرش هیدرولیکی تحت شرایط شیب معکوس و زبری بستر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش اثر هم‌زمان سه شیب منفی، سه قطر زبری و دو ارتفاع پله مثبت انتهایی بر پروفیل سرعت و نوسانات فشار در اعداد فرود ۴ تا ۱۰ بررسی شده است. براساس نتایج ضخامت لایه مرزی بی‌بعد 0.71 محاسبه شد که در مقایسه با بستر صاف قابل ملاحظه بود. هم‌چنین تنش برشی $12/6$ برابر شرایط بستر صاف به دست آمد. نتایج نشان داد سه عامل شیب منفی، زبری بستر و پله مثبت انتهایی باعث کاهش انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار نسبت به حالت کلاسیک می‌شود. بیشترین مقدار ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار و ضریب بدون بعد نوسانات فشار به ترتیب برابر 0.27 و 0.275 محاسبه شد که در مقایسه با حالت کلاسیک به ترتیب $65/6$ و $64/7$ درصد کاهش داشته است. هم‌چنین حداقل ضریب کاویتاسیون در این مطالعه برابر $3/87$ محاسبه گردید و بنابراین سازه با مشکل کاویتاسیون مواجه نخواهد بود.

کلید واژه‌ها: انحراف معیار، تنش برشی، حوضچه آرامش، ضخامت لایه مرزی.

مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های هیدرولیکی کنترل سرعت جریان می‌باشد. سرعت جریان برای شرایط مختلف طراحی باید در محدوده قابل قبولی قرار گیرد تا از تخریب و خسارت جلوگیری شود. با توجه به تأثیر عواملی چون لزجت آب، وجود دیواره‌ها، شیب و زبری بستر و هم‌چنین اثر سطح آزاد آب، فرض ثابت بودن سرعت در هر مقطع جریان درست نمی‌باشد. لذا توزیع سرعت در کانال‌ها پیچیده بوده و به دست آوردن یک رابطه کلی به سادگی امکان‌پذیر نیست. Rajaratnam (1967) آزمایش‌های خود را بر روی جریان رو به جلو محدود کرده و مطالعه‌های گسترده‌ای روی توزیع سرعت متوسط در پرش هیدرولیکی ایجاد شده در پایین دست یک دریاچه و روی یک کانال صاف و در محدوده اعداد فرود (Fr_1) $2/68$ تا $9/78$ انجام داد. او نشان داد که پروفیل سرعت در پرش شبیه پروفیل سرعت در جت دیواری کلاسیک است.

Ead et al. (2000) در کالورت با بستر موج‌دار نشان داد که تنش‌های برشی روی بسترهای موج‌دار به وجود آمده و این پدیده

موجب کاهش قابل توجهی در میدان‌های سرعت در مقایسه با بستر صاف شده است.

Ead و Rajaratnam (2002) تعداد ۱۱ آزمایش را در خصوص پرش هیدرولیکی روی دو نوع بستر موج‌دار و برای اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند و پروفیل‌های سرعت را در تعدادی از آزمایش‌ها با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را برابر 0.45 به دست آوردند که در مقایسه با حالت کلاسیک افزایش یافته است.

Abbaspour et al. (2009) پروفیل‌های سرعت را در ۲۰

آزمایش پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار اندازه‌گیری نمودند که در این پروفیل‌ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره بوده، به طوری که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که ضریب نیروی برشی (E) در بستر موج‌دار در حدود ۱۰ برابر بستر صاف بوده است. ایشان رابطه حاکم در بستر موج‌دار را به صورت معادله (۱) ارائه کردند:

$$C_p^+ = \frac{(P_{max} - \bar{P})}{V_1^2/2g} \quad (۴)$$

$$C_p^- = \frac{(P_{min} - \bar{P})}{V_1^2/2g} \quad (۵)$$

در روابط فوق، C_p^+ حداکثر انحراف فشار حداکثر و C_p^- حداکثر انحراف فشار حداقل از فشار میانگین، P_{max} فشار حداکثر، P_{min} فشار حداقل و \bar{P} میانگین فشار در هر پیژومتر می‌باشد. همچنین نتایج تحقیقات Abdul Khader و Elango (1974) نشان داد که حداکثر ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار نزدیک به محل پنجه پرش و تقریباً ۰/۰۸۵ است. Marques et al. (1997) ضریب بدون بعد شدت نوسانات فشار را به صورت زیر تعریف نمودند:

$$\Omega = \frac{\sigma_x D_2}{H_t D_1} \quad (۶)$$

$$H_t = \left(D_1 + \frac{V_1^2}{2g} + t \right) - \left(D_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (۷)$$

در این دو رابطه Ω : ضریب بدون بعد شدت نوسانات فشار، σ_x : انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار، H_t : افت فشار، D_1 و D_2 : به ترتیب عمق اولیه و عمق ثانویه پرش، t : ارتفاع زبری و V_1 و V_2 : به ترتیب سرعت اولیه و ثانویه پرش می‌باشد. Lopardo و Solari (1980) نوسانات فشار را برای پرش هیدرولیکی در پایین دست یک دریاچه برای اعداد فرود بین ۲/۵ تا ۷/۵ اندازه‌گیری نمودند و بیشترین مقدار را برابر ۰/۰۸۴ به دست آوردند.

Fiorotto و Rinaldo (1992) عنوان کردند مقدار میانگین فشار مشخص کننده مبنایی است که نوسانات فشار حول آن انجام می‌شود. در پرش هیدرولیکی مقدار متوسط نوسانات فشار تقریباً با فشار پیژومتریک و یا به عبارتی برابر با پروفیل سطح آب در هر نقطه می‌باشد.

Parsamehr et al. (2014) در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل روی شیب معکوس ۱/۵ درصد ضریب تنش برشی به طور متوسط ۱۶ برابر بستر صاف و افقی شد. Fathi et al. (2013) در بررسی فشارهای دینامیکی ناشی از برخورد جت خروجی از پرتابه جامی شکل در زوایای مختلف عنوان کردند که با افزایش دبی، مقادیر C_p' افزایش می‌یابد، همچنین در یک دبی ثابت با افزایش زاویه برخورد از صفر به ۹۰ درجه مقادیر C_p' افزایش می‌یابد.

$$\varepsilon = 1.1Fr_1^2 - 2.4Fr_1 + 1 \quad R^2 = 0.93 \quad (۱)$$

Izadjoo و Shafai Bejestan (2007) نیز پروفیل‌های توزیع قائم سرعت را در ۱۰ آزمایش برداشت نمودند در تحقیق آن‌ها سرعت جریان فوق بحرانی قبل از پرش بین ۱/۵۳ تا ۴/۹ متر بر ثانیه و در دورترین پروفیل برداشت شده، سرعت حداکثر بین ۰/۵ تا یک متر بر ثانیه متغیر بوده است. آن‌ها برای محدوده فوق معادله ضریب تنش برشی در پرش بر روی بستر زبر را به صورت رابطه (۲) ارائه نمودند:

$$\varepsilon = 1.59Fr_1^2 - 11.857Fr_1 + 31.933 \quad R^2 = 0.97 \quad (۲)$$

Samadi et al. (2013) مطالعه‌های پرش را روی شش نوع بستر موجدار مثلثی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نیروی برشی روی بستر موجدار مثلثی حدود ۸/۵ برابر بستر صاف می‌باشد. Ghazali et al. (2012) مطالعاتی را روی پنج نوع بستر موجدار مثلثی انجام داد. ایشان مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد روی بستر موجدار را برابر ۰/۳۹ به دست آورد در حالی که این مقدار در بستر صاف ۰/۱۶ است. همچنین افت انرژی در پرش بر روی بستر موجدار را حدود ۱۱/۳ درصد بیشتر از بستر صاف عنوان کرد.

Pourabdollah et al. (2015) اثر زبری و شیب منفی بستر را بر پروفیل سرعت و سطح آب پرش هیدرولیکی در اعداد فرود اولیه ۴/۹ تا ۷/۸، روی سه نوع بستر زبر و شیب‌های صفر، ۰/۶-، ۱/۳- و ۲- درصد بررسی کردند. ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در این مطالعه برابر با ۰/۶۶ و متوسط ضریب نیروی برشی ۱۱/۵ برابر حالت کلاسیک به دست آمد. یکی دیگر از پارامترهای مهم در مطالعه پرش هیدرولیکی، بررسی تغییرات ضرایب مختلف مربوط به نوسانات فشار در طول پرش می‌باشد.

Abdul Khader و Elango (1974) نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند و نحوه محاسبه پارامترهای مهم در این زمینه شامل ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار و حد نهایی نوسانات فشار را به صورت معادله‌های (۳) تا (۵) ارائه نمودند:

$$C_p' = \frac{\sigma_x}{V_1^2/2g} \quad (۳)$$

در این رابطه C_p' : ضریب بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار، σ_x : انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار، V_1 : سرعت اولیه پرش و g : شتاب ثقل می‌باشد.

انتهایی، زبری سنگریزه‌ای و شیب معکوس بستر و روی خصوصیات مختلف پرش هیدرولیکی در دست نمی‌باشد. بنابراین هدف این پژوهش، مطالعه پروفیل‌های سرعت، سطح آب و همچنین نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش با شرایط بیان شده بوده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان در فلومی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۴، ارتفاع ۰/۶ و با طول هشت متر و دیوارهای پلکسی گلاس شفاف صورت گرفت (شکل ۱). طول حوضچه آرامش شامل دو متر سطح شیبدار و یک پله مثبت انتهایی بود. به منظور افزایش عدد فرود اولیه در دو متر از طول کانال (قبل از دریچه بالادست) ارتفاع کانال از ۰/۶ متر به ۱/۲۵ متر افزایش یافت. همچنین شیب بستر حوضچه آرامش صفر، ۱/۵-، ۳- و ۵- درصد انتخاب شد. ارتفاع پله مثبت انتهایی نیز صفر، سه و شش سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌های این پژوهش هم در حالت بستر بدون زبری و هم برای بستر با زبری سنگریزه‌ای با دانه‌بندی $0.075 \leq d \leq 0.25$ میلی‌متر انجام گرفت (شکل ۲). این تحقیق در چهار دبی بین ۲۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه انجام گرفت. بنابراین در این مطالعه ۵۷۶ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴ تا ۱۰ برنامه‌ریزی و انجام پذیرفت. نمونه ای از پرش آزاد در شکل (۳) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری عمق جریان از یک عمق سنج دستی با دقت ± 0.1 میلی‌متر و برای اندازه‌گیری سرعت از لوله پیتوت استفاده گردید که با استفاده از سرعت سنج ADV کالیبره شده بود (شکل ۴-الف). برای ترسیم پروفیل سطح آب با استفاده از دوربین دیجیتال از هر پرش چندین عکس گرفته شده و سپس در نرم‌افزار گرافر (Grapher7) که نتایج کالیبراسیون آن در شکل (۴-ب) نشان داده شده است، رقومی گردید. در نهایت تغییرات پروفیل سطح آب تحلیل و با استفاده از نرم افزار Curve Expert معادله‌ای برای پروفیل سطح آب استخراج شد. به‌طور کلی در این تحقیق در ۱۳۲ آزمایش پروفیل سرعت برداشت گردید. همچنین در طول حوضچه آرامش به فواصل ۱۰ سانتی‌متری پیژومتر نصب گردید. پیژومترهای مذکور در یک صفحه مدرج نصب گردیدند. به‌طور مشابه با پروفیل سطح آب، از صفحه مدرج و پیژومترهای متصل به آن در دوره زمانی از هر پرش گرفته می‌شد. سپس عکس‌ها رقومی شده و از این اعداد برای بررسی نوسانات فشار در طول پرش هیدرولیکی استفاده شد. همچنین براساس معادله (۸) و فشار پیژومترهای نصب شده، ضریب کاویتاسیون محاسبه و احتمال وقوع این پدیده بررسی شد.

Hossen et al. (2013) در بررسی فشارهای دینامیکی وارد بر دیواره جانبی، ناشی از جت خروجی از پرتابه جامی شکل در حوضچه مستغرق به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار برای ضریب میانگین فشار C_p' برابر با ۰/۸۸ می‌باشد. بیشترین فشار در محل برخورد مرکز جت به صفحه اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از مرکز جت فشار کاهش می‌یابد.

Karimi et al. (2014) نشان دادند که وجود زبری در بستر حوضچه آرامش باعث کاهش شدت نوسانات تلاطمی پرش می‌گردد. براساس نتایج مطالعه آن‌ها، حداکثر ضریب شدت نوسانات فشار در پرش واگرایی زیر تا مقدار ۰/۰۲۳ به‌دست آمده که تقریباً ۵۳ درصد نسبت به پرش واگرایی صاف و ۷۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش داشته است.

Nasr Esfahani و Shafai-Bajestan (2014) پدیده کاویتاسیون را برای پرش در بستر با زبری مصنوعی و پله معکوس با استفاده از معادله (۸) بررسی نمودند. براساس نتایج ایشان احتمال پدیده کاویتاسیون در طول پرش وجود نداشت.

$$\sigma = \frac{\frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_V}{\gamma} + \frac{P_0}{\gamma}}{\frac{V_0^2}{2g}} \quad (8)$$

در این رابطه σ ضریب کاویتاسیون، P_{atm}/γ فشار اطراف محیط می‌باشد که در شرایط آزمایشگاه معادل یک اتمسفر یا ۱۰/۳۳ متر ستون آب، P_V/γ مقدار هد فشار بخار مایع است که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل ۰/۳۳ متر ارتفاع آب، P_0/γ فشار نظیر ارتفاع آب که روی سازه در قسمت‌های مختلف و $V_0^2/2g$ ارتفاع نظیر سرعت در مقطع مورد نظر می‌باشد. بنابراین σ نسبت افت فشار لازم برای تخییر آب است. خوردگی زمانی آغاز می‌شود که σ برابر و یا کوچکتر از ۱ باشد.

Karimi et al. (2017) نشان دادند که انحراف معیار نوسانات فشار و فشارهای حدی ناشی از پرش هیدرولیکی وابسته به عدد فرود جریان ورودی و موقعیت نقطه مورد نظر نسبت به پنجه پرش است. به‌طوری که حداکثر ضرایب نوسانات فشار در فاصله ۱۰ تا ۳۰ برابر عمق اولیه پرش نسبت به پنجه پرش رخ می‌دهد. واگرایی در مقطع پرش سبب کاهش ضرایب نوسانات فشار است. به طوری که در نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷ انحراف معیار نوسانات فشار به ترتیب برابر با ۴۳٪، ۳۸٪ و ۱۹٪ در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش می‌یابد.

با توجه به مطالب بیان شده اگر چه تحقیقات مختلفی روی پرش هیدرولیکی در شرایط متفاوت انجام گرفته است اما مطالعه‌های منتشر شده‌ای در رابطه با بررسی اثر وجود هم‌زمان پله مثبت

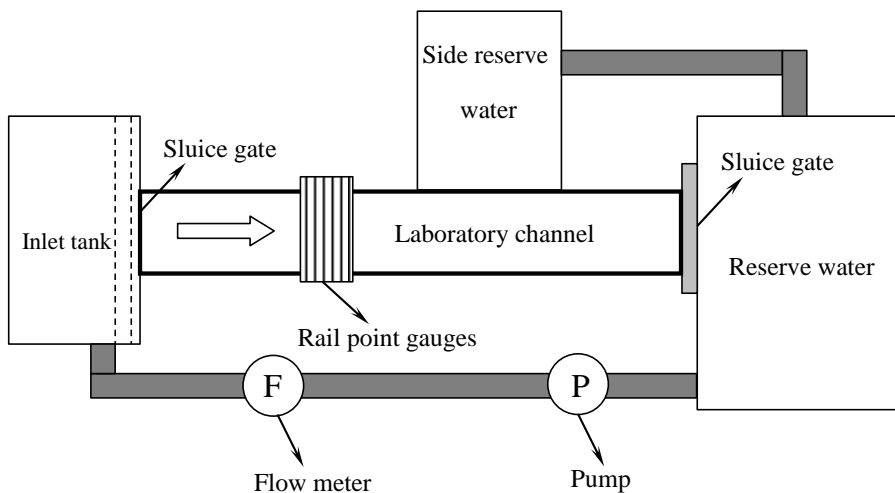


Fig. 1- Laboratory channel plan
 شکل ۱- پلان کانال آزمایشگاهی



Fig. 2- Diameter range of crushed gravel sieve
 شکل ۲- زبری های سنگریزه های دانه بندی شده



Fig. 3- Example of the free jump in roughness $4.76 < t < 5.66$, adverse slope 1.5% and positive step 6 cm
 شکل ۳- نمونه از پرش آزاد در زبری $4.76 < t < 5.66$ ؛ شیب ۱/۵٪ و پله انتهایی ۶ سانتی متری

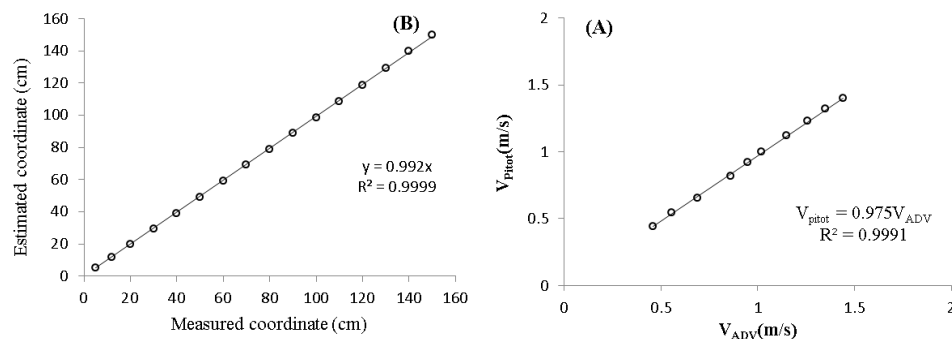


Fig. 4- (A) Calibration curve of pitot tube (B) Calibration curve of *Ghraphe7* software

شکل ۴- (A) نمودار کالیبراسیون لوله پیتوت (B) نمودار کالیبراسیون نرم افزار *Ghraphe7*

و افزایش شیب منفی نیز بیان کرد. با توجه به اثر کاهشی هر یک از متغیرهای شیب، زبری و پله انتهایی روی طول پرش هیدرولیکی می‌توان نتیجه گرفت اثر متقابل این سه روی طول پرش هیدرولیکی نیز کاهشی بوده به طوری که افزایش شیب معکوس بستر، افزایش ارتفاع پله مثبت انتهایی و یا اندازه (قطر) زبری، هر سه باعث کاهش طول پرش می‌شوند. به طور کلی در این تحقیق کاهش طول پرش ۴۷ درصد بود. این کاهش در تحقیقات Pourabdollah et al (2014)، Parsamehr و Hosseinzadeh (2013) و Izadjoo و Shafai Bejestan (2007) به ترتیب برابر ۳۹/۶، ۴۹/۹ و ۵۰ بیان شد.

پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی را می‌توان تقریباً یک منحنی در نظر گرفت که از مقطع اولیه تا ثانویه امتداد دارد (Chow, 1959). بنابراین می‌توان استدلال نمود هر عاملی که باعث تغییر در افت انرژی، عمق ثانویه و طول پرش می‌شود بر معادله پروفیل سطح آب پرش نیز مؤثر است. بر همین اساس با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق عوامل شیب، زبری بستر و پله مثبت انتهایی، عدد فرود اولیه و اعماق اولیه و ثانویه پرش برای استخراج معادله پروفیل سطح آب در نظر گرفته شد. پروفیل‌های بدون بعد سطح آب از ترسیم نسبت $(D_2 - D_1)/(D_2 - D_1)$ در مقابل x/L_j به دست می‌آیند (Ead and Rajaratnam, 2002). با توجه به نتایج این مطالعه، پروفیل‌های بدون بعد سطح آب در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. براساس این شکل و به کمک نرم‌افزار Curve Expert بهترین معادله برای ترسیم پروفیل سطح آب به صورت معادله (۱۲) استخراج شده است ($R^2=0.86$).

$$\frac{(D - D_1)}{(D_2 - D_1)} = 0.635 ATAN \left(0.0547 \exp \left(5.26 \frac{x}{L_j} \right) \right) \quad (12)$$

در معادله بالا D_1 و D_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش، x فاصله از ابتدای پرش، L_j طول پرش هیدرولیکی و D عمق جریان

نتایج و بحث

طول پرش هیدرولیکی

به منظور بررسی میزان تأثیر زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی بر طول پرش هیدرولیکی اگر چنانچه D_1 عمق اولیه پرش روی بستر زبر، u_i سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش باشد، بنابراین L_j تابعی از پارامترهای زیر خواهد بود:

(۹)

$$L_j = f(D_1, u_1, g, \mu, \rho, t, \theta, z)$$

که در این رابطه: g : شتاب ثقل، ρ : دانسیته، μ : لزجت دینامیکی آب، t : قطر زبری، v : لزجت سینماتیکی، θ : شیب بستر و z : ارتفاع پله مثبت انتهایی می‌باشد. بنابراین با توجه به تحلیل ابعادی و اینکه مقدار عدد رینولدز در این تحقیق در محدوده ۴۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ متغیر بود که بیانگر جریان آشفته است، بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرف نظر نمود در نتیجه نسبت L_j/D_1 به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\frac{L_j}{D_1} = f_1(Fr_1, \frac{t}{D_1}, \frac{z}{D_1}, \theta) \quad (10)$$

بنابراین با استفاده از نرم افزار SPSS معادله برازش داده شده به صورت زیر حاصل گردید:

$$\frac{L_j}{D_1} = 11.234 + 5.94 Fr_1 - 16.741 \frac{t}{D_1} - 3.8 \frac{z}{D_1} - 3.81 \theta \quad R^2 = 0.88 \quad (11)$$

براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تغییرات L_j/D_1 در برابر عدد فرود در شکل (۵) نشان داده شده است. براساس این شکل‌ها، با قرار دادن زبری و پله مثبت انتهایی روی شیب‌های مختلف، طول پرش هیدرولیکی کاهش یافته است، به طوری که در هر شیب منفی و پله مثبت انتهایی با افزایش زبری این نسبت بیشتر کاهش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان به صورت مشابه برای ثابت در نظر گرفتن زبری

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاربرد معادله (۱۲) می‌توان پروفیل سطح آب را با دقت قابل قبولی ترسیم نمود.

در فاصله x می‌باشد. مقایسه نمونه‌ای از پروفیل سطح آب مشاهداتی و ترسیم شده با استفاده از معادله (۱۲) در شکل (۶-ب) نشان داده

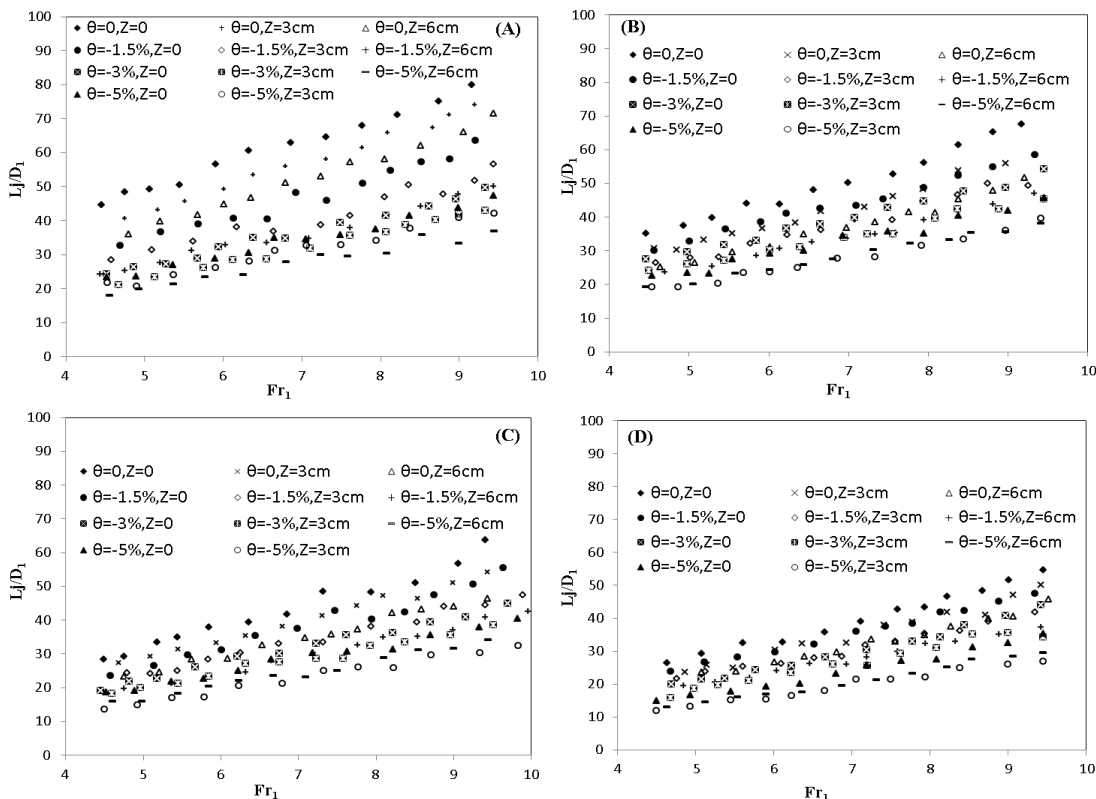


Fig. 5- Variation of Lj/D_1 versus Fr_1 for different sizes of adverse slope and positive step (A) without roughness (B) roughness $4.76 \leq t \leq 5.66$ (C) $11.1 \leq t \leq 12.7$ and (D) $19.1 \leq t \leq 22.2$

شکل ۵- تغییرات Lj/D_1 در برابر Fr_1 برای اندازه‌های مختلف شیب و پله مثبت انتهایی (A) بدون زبری، (B) زبری $4.76 \leq t \leq 5.66$ ، (C) زبری $11.1 \leq t \leq 12.7$ و (D) زبری $19.1 \leq t \leq 22.2$

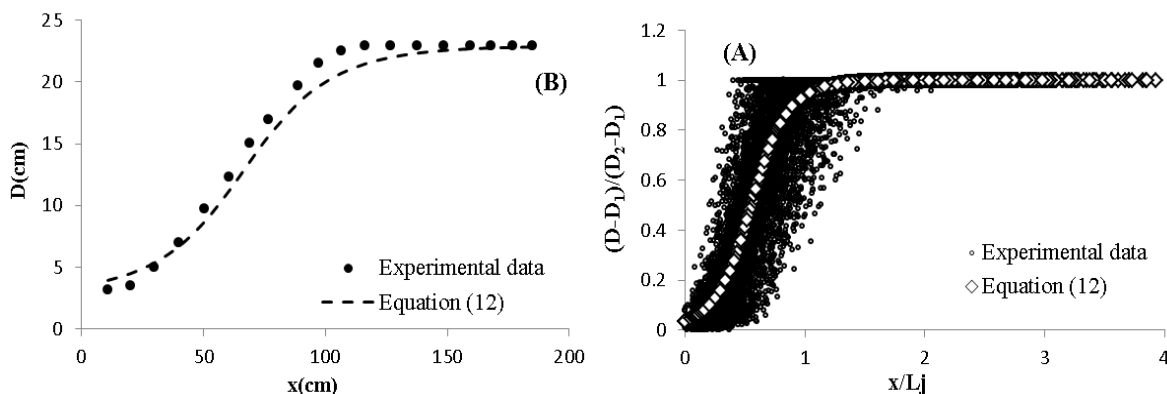


Fig. 6- Comparison between measured and estimated (Eq. 12) water surface profile, (A) dimensionless profiles of all experiments (B) adverse slope 3%, diameter roughness 0.5 and positive step height 3 cm (flow 50 LPS sluice gate opening 5 cm)

شکل ۶- مقایسه پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط معادله (۱۲)، (الف) پروفیل‌های بدون بعد کل آزمایش‌ها، (ب) شیب بستر ۳٪، قطر زبری ۰/۵ و ارتفاع پله سه سانتی‌متر (در دبی ۵۰ LPS، بازشدگی دریاچه پنج سانتی‌متر)

پروفیل بی بعد سرعت

طول جریان می‌باشد. براساس نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تغییرات U/Um در برابر x/L_j در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ابتدای پرش مقدار سرعت بیشتر و با نزدیک شدن به انتهای پرش، مقدار سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج این مطالعه، تغییرات U/Um در برابر x/L_j را می‌توان توسط معادله (۱۳) برآورد نمود:

$$\frac{U}{Um} = 0.3197 \left(\frac{x}{L_j} \right)^{-0.825} \quad R^2 = 0.774 \quad (13)$$

تغییرات ضخامت لایه مرزی (δ/b) در برابر x/D_1 در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت لایه مرزی در این تحقیق 0.71 به‌دست آمده است که در مقایسه با نتایج Ead و Rajaratnam (2002)، Pourabdollah et al (2015) که به‌ترتیب برابر 0.45 ، 0.57 و 0.66 بیان شده، بیشتر می‌باشد.

از سوی دیگر تغییرات b/D_1 در برابر x/D_1 در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. با توجه به نتایج این مطالعه نسبت b/D_1 را می‌توان از معادله (۱۴) برآورد نمود:

$$\frac{b}{D_1} = 0.1137 \left(\frac{x}{D_1} \right) + 2.4912 \quad R^2 = 0.963 \quad (14)$$

هم‌چنین تغییرات b/D_1 به ازای x/D_1 برای نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج سایر تحقیقات قبلی در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار b/D_1 در این مطالعه نسبت به نتایج سایر پژوهش‌ها بیشتر بوده است. این پدیده، به دلیل افزایش مقدار b به علت افزایش افت انرژی در اثر شیب معکوس، زبری بستر و وجود پله مثبت انتهایی رخ داده است.

پروفیل بدون بعد سرعت از ترسیم تغییرات نسبت عمق جریان به پارامتر b در مقابل نسبت سرعت جریان (U) به سرعت حداکثر (Um) تشکیل می‌گردد. هم‌چنین b عمقی است که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت حداکثر و $\partial u / \partial D < 0$ باشد. شکل پروفیل‌های قائم بدون بعد سرعت برداشت شده در آزمایش‌های مختلف این مطالعه و حالت کلاسیک در (۷-الف) نشان داده شده است. مطابق این شکل، سرعت بیشتر بر روی بستر زبر همراه با شیب معکوس و پله مثبت انتهایی نسبت به نازل دیواری کلاسیک در عمق بیشتری رخ می‌دهد. با توجه به این که ضخامت لایه مرزی در هر مقطع از پرش هیدرولیکی برابر عمقی است که در آن سرعت بیشتر است، بنابراین ضخامت لایه مرزی (δ) در حالت‌های مختلف شیب، زبری بستر و پله مثبت انتهایی در این مطالعه نسبت به حالت کلاسیک افزایش یافته است. این تفاوت حاکی از یکنواختی بیشتر سرعت در طول پرش روی بستر زبر همراه با شیب منفی در مقایسه با حالت کلاسیک است. براساس نتایج ضخامت لایه مرزی بدون بعد (δ/b) به‌طور متوسط برابر 0.71 به‌دست آمد در حالی که ضخامت لایه مرزی در بستر صاف 0.16 است.

پروفیل‌های بی‌بعد سرعت حاصل از نتایج این تحقیق در مقابل نتایج سایر تحقیقات قبلی در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، ضخامت لایه مرزی روی سطوح شیبدار همراه با بستر زبر و پله مثبت انتهایی (نتایج این تحقیق) در مقایسه با تحقیقات Ead و Rajaratnam (2002)، Pourabdollah et al (2015) و Samadi et al (2013) بیشتر می‌باشد. یکی دیگر از پارامترهای بدون بعد مورد مطالعه در پرش هیدرولیکی، بررسی نسبت تغییرات سرعت بدون بعد (U/Um) در

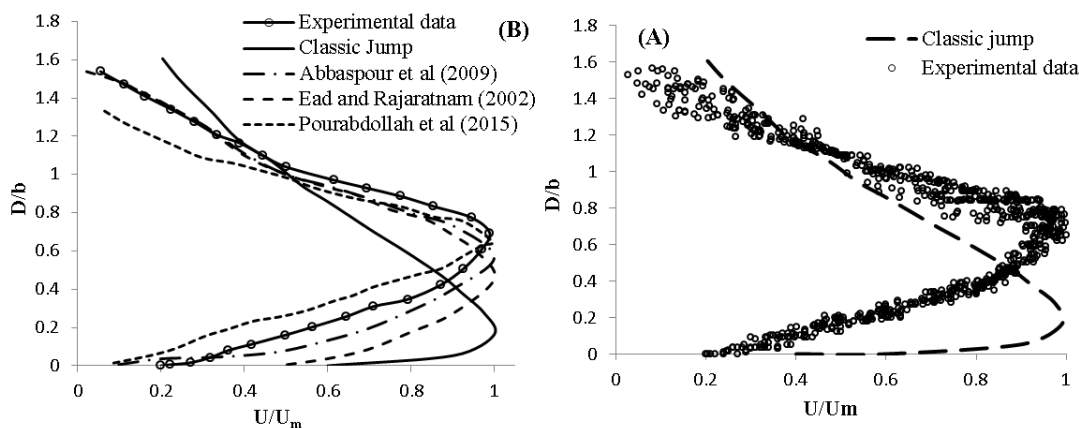


Fig. 7- Dimensionless velocity profiles, (A) all experimental data (B) comparison with results of other studies

شکل ۷- پروفیل‌های بی‌بعد سرعت، (A) برای تمامی آزمایشات (B) مقایسه با مطالعات گذشته

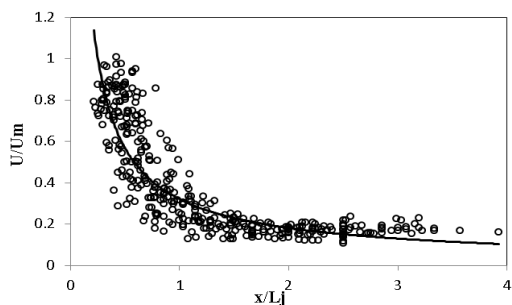


Fig. 8- Variation of U_m/U_{m1} with x/D_1 for experimental data

شکل ۸- تغییرات U/U_m به ازای x/D_1 برای تمامی داده‌های آزمایش

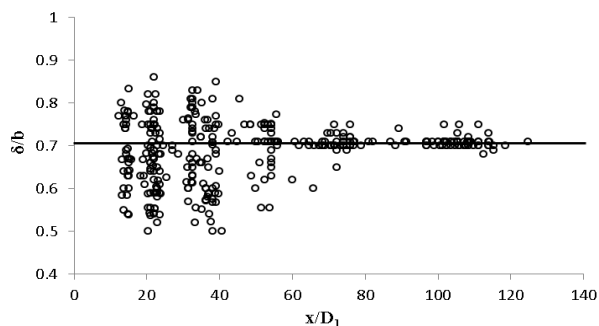


Fig. 9- Variation of δ/b with x/D_1 for experimental data

شکل ۹- تغییرات δ/b به ازای x/D_1 برای تمامی داده‌های آزمایش

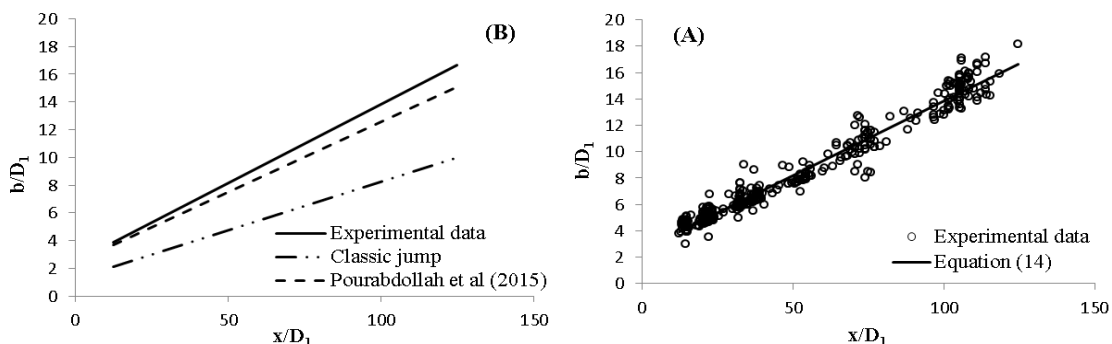


Fig. 10- Variation of b/D_1 with x/D_1 (A) for all experimental data, (B) comparison with results of other studies

شکل ۱۰- تغییرات b/D_1 به ازای x/D_1 (A) برای تمامی داده‌های آزمایش، (B) مقایسه با مطالعات گذشته

از سوی دیگر، تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/D_1) به ازای x/D_1 برای نتایج این تحقیق همراه با نتایج سایر تحقیقات قبلی در شکل (۱۱-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل (۱۱-ب) نشان داده شده، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/D_1) روی سطوح شیب‌دار همراه با بستر زبر و پله مثبت انتهایی (نتایج این تحقیق) در مقایسه با تحقیقات Ead و Rajaratnam (2002)، Pourabdollah et al (2009) و Abbaspour et al (2015) بیشتر بوده است. زیرا شیب منفی، زبری بستر و پله مثبت انتهایی باعث می‌شود عمق رخ دادن سرعت بیشتر از بستر جریان

ضخامت لایه مرزی بدون بعد را علاوه بر روش قبلی، می‌توان از تقسیم ضخامت لایه مرزی بر عمق اولیه پرش نیز به دست آورد. با توجه به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تغییرات لایه مرزی بی‌بعد (δ/D_1) به ازای x/D_1 در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است. بر همین اساس، می‌توان ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در امتداد طولی پرش هیدرولیکی برای شیب‌های منفی همراه با بستر زبری و پله مثبت انتهایی را با استفاده از معادله زیر برآورد نمود:

$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0919 \left(\frac{x}{D_1} \right) + 2.1257 \quad R^2 = 0.823 \quad (15)$$

تغییرات نوسانات فشار

انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار (σ_x) معیار مناسبی برای بررسی شدت نوسانات فشار می‌باشد. به دلیل حجم زیاد داده‌ها یک نمونه از انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار برای شیب ۳٪- و انواع زبری (t) و پله مثبت انتهایی (z) در شکل (۱۳) نشان داده شده است. براساس شکل مذکور، با افزایش قطر زبری و ارتفاع پله مثبت انتهایی مقدار σ_x کاهش یافته است. وجود زبری و پله مثبت انتهایی در یک شیب ثابت سبب افزایش تنش برشی بستر و مانع از گسترش طولی گردابه‌ها و در نتیجه کاهش مقدار و طول نوسانات فشار می‌شود. همچنین با افزایش شیب منفی به دلیل وجود نیروی وزن در خلاف جهت جریان و اتلاف انرژی بیشتر نسبت به حالت کلاسیک مقدار σ_x کاهش شدت می‌یابد. بنابراین وجود سه عامل شیب منفی، زبری بستر و پله مثبت انتهایی باعث کاهش σ_x نسبت به حالت کلاسیک می‌گردد. همچنین با افزایش عدد فرود اولیه مقدار σ_x افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش عدد فرود اولیه به دلیل اینکه گردابه‌های قوی‌تری تشکیل می‌شود انحراف نوسانات فشار افزایش می‌یابد.

نسبت به حالت کلاسیک و یا سایر مطالعات ذکر شده افزایش پیدا کند و لذا ضخامت لایه مرزی افزایش یابد.

تغییرات ضریب نیروی برشی (ε) در برابر عدد فرود اولیه برای آزمایش‌های این مطالعه در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود اولیه مقدار ε به صورت توانی افزایش می‌یابد. بر همین اساس برای برآورد ضریب نیروی برشی در شرایط مطالعه حاضر می‌توان از معادله زیر استفاده نمود ($R^2=0.85$):

$$\varepsilon = 1.7123Fr_1^2 - 9.0176Fr_1 + 19.635 \quad (16)$$

مقایسه ضریب نیروی برشی در این تحقیق با سایر تحقیقات در شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ε در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با شیب‌های منفی و یا پله مثبت انتهایی بیشتر از سایر پژوهش‌های پیشین و حالت کلاسیک می‌باشد. براساس نتایج، مقدار ε در مطالعه حاضر به‌طور میانگین ۱۲/۴ برابر ضریب نیروی برشی در بسترهای صاف است.

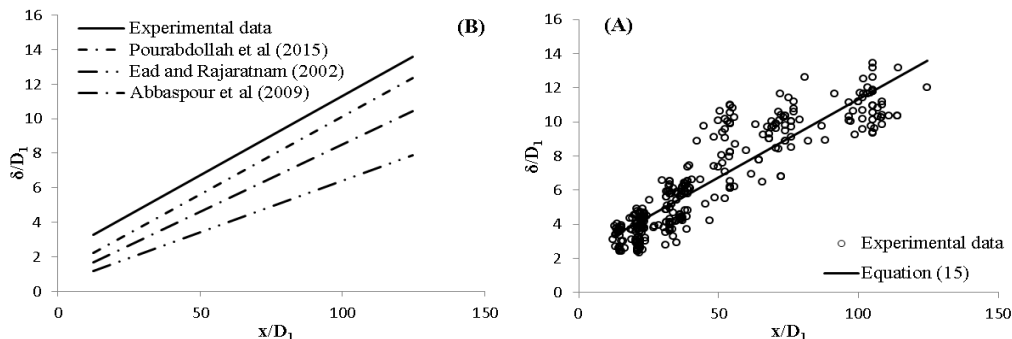


Fig. 11- Variation of δ/D_1 with x/D_1 (a) for all experimental data, (b) comparison with results of other studies

شکل ۱۱- تغییرات δ/D_1 به ازای x/D_1 (a) برای تمامی داده‌های آزمایش، (b) مقایسه با مطالعات گذشته

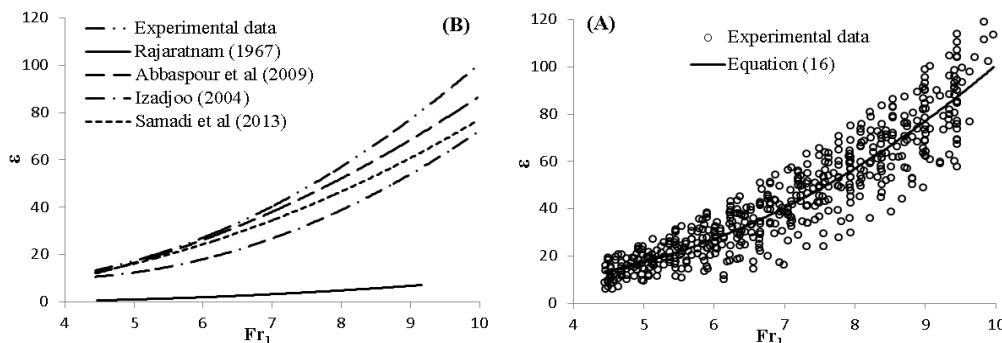


Fig. 12- Variations of ε with Fr_1 (A) for all experiment data, (B) comparison with results of other studies

شکل ۱۲- تغییرات ε به ازای Fr_1 (A) برای تمامی داده‌های آزمایش، (B) مقایسه با مطالعات گذشته

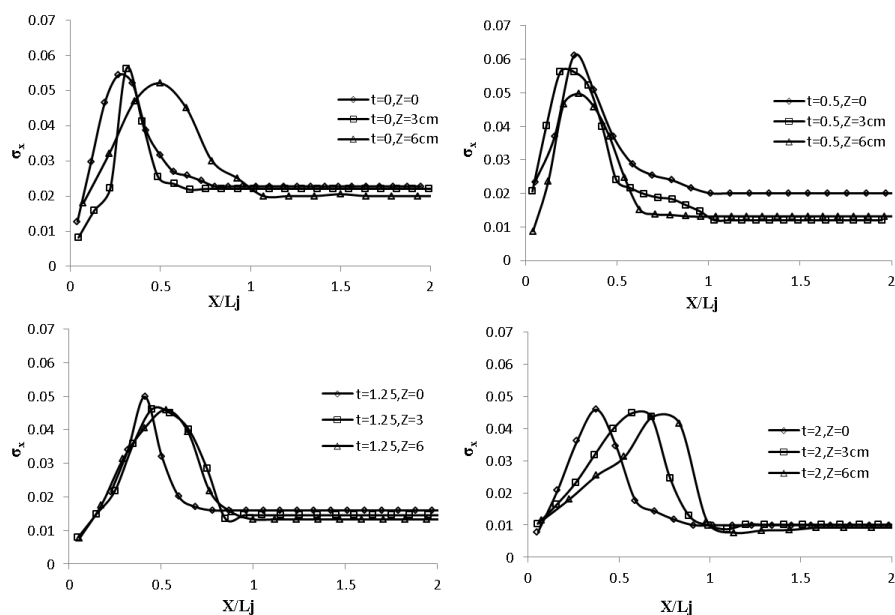


Fig. 13- Standard deviation changes for adverse slope 3% in different roughness and positive step height
 شکل ۱۳- تغییرات انحراف معیار استاندارد برای شیب ۳٪ در انواع زبری و ارتفاع پله مثبت انتهایی

ضریب بدون بعد شدت نوسانات فشار

به دلیل حجم زیاد داده‌ها نمونه‌ای برای شیب ۳- درصد در انواع زبری و ارتفاع پله مثبت شش سانتی‌متری در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار Ω در ابتدا شروع به افزایش نموده تا اینکه در فاصله $X/(D_2-D_1)=2/83$ به مقدار حداکثر خود می‌رسد. سپس روند نزولی داشته تا اینکه به مقدار ثابتی می‌رسد. این روند در تمامی آزمایش‌ها مشاهده شده است. این مقدار در مطالعات Marques et al. (1997) برابر $1/75$ ، در مطالعات Karimi et al (2014) روی بستر واگرای زبر برابر $3/8$ به دست آمده است. به‌طور کلی در این تحقیق با قرارگیری شیب منفی همراه با بستر زبر و پله مثبت انتهایی مقدار Ω_{max} برابر $0/275$ و در حالت کلاسیک برابر $0/78$ به دست آورده شد، که تقریباً $64/7$ درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش داشته است.

با توجه به نوسانات فشار اندازه‌گیری شده توسط پیزومترهای نصب شده در طول جریان پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف این مطالعه ضریب کاویتاسیون با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد. براساس نتایج معادله مذکور، حداقل ضریب کاویتاسیون برابر $3/87$ محاسبه شد. بنابراین در هیچ یک از حالات مورد مطالعه ضریب مذکور از حالت بحرانی کمتر نبوده و بنابراین احتمال وقوع کاویتاسیون وجود نداشته است.

ضرایب بدون بعد C_p^+ , C_p^- , C_p'

علاوه بر انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار، تعیین ضرایب بدون بعد C_p^+ , C_p^- و C_p' برای بررسی شرایط هیدرولیکی حوضچه آرامش ضروری می‌باشد. به‌همین منظور این ضرایب بدون بعد محاسبه شده و برای شیب ۳- درصد و زبری با قطرهای مختلف و پله مثبت انتهایی با ارتفاع‌های متفاوت در شکل (۱۴) ترسیم گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بدون زبری این ضرایب بزرگتر بوده و با افزایش زبری و پله مثبت انتهایی مقدار این ضرایب کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار ضریب C_p' در این پژوهش $0/27$ محاسبه شد که در مقایسه با حالت کلاسیک $65/6$ درصد کاهش نشان می‌دهد. همچنین با افزایش عدد فرود مقدار C_p' کاهش می‌یابد که ناشی از افزایش مقدار بار سرعت نسبت به σ_x می‌باشد و بدان معنا نیست که نوسانات فشار کاهش می‌یابد. ضریب C_p^+ بیان‌کننده اختلاف فشارهای حداکثر از فشار متوسط می‌باشد. این ضریب بیان‌کننده میزان اثرات ضربات ناشی از نوسانات فشار بر کف حوضچه آرامش می‌باشد. ضریب C_p^- بیان‌کننده اختلاف فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط است. در این تحقیق برای پرش روی سطح شیبدار، بستر زبر و پله مثبت انتهایی حداکثر مقدار C_p^+ برابر با $0/88$ و حداکثر قدر مطلق ضریب C_p^- برابر با $0/09$ به دست آمد که مقادیر مذکور در محدوده $0/375 \leq X/Lj \leq 0/19$ رخ داده‌اند.

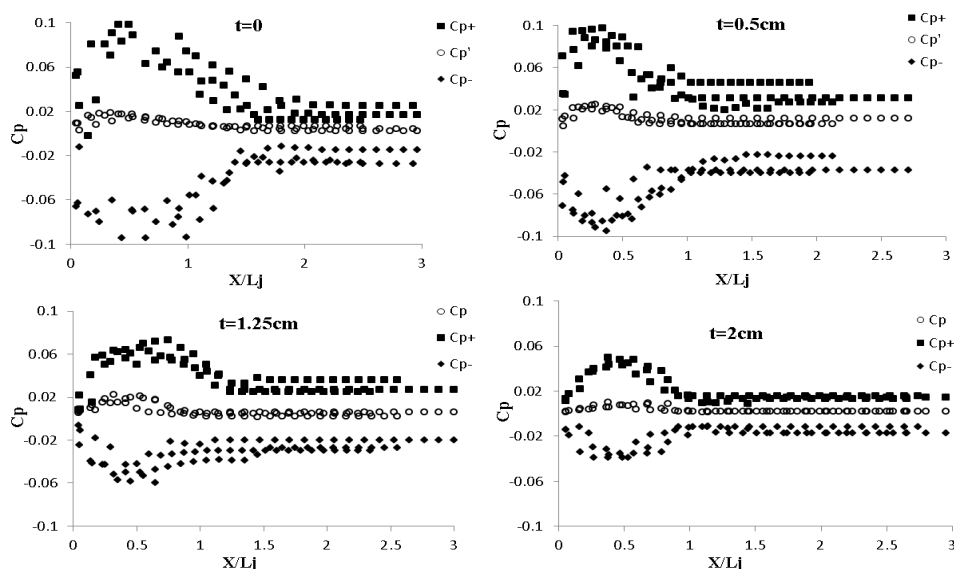


Fig. 14- Variations of C_p^+ , C_p^- and C_p' in adverse slope 3%, different roughness and positive step heights

شکل ۱۴- تغییرات C_p^+ ، C_p^- و C_p' در شیب ۳٪، انواع زبری و ارتفاع پله مثبت انتهایی

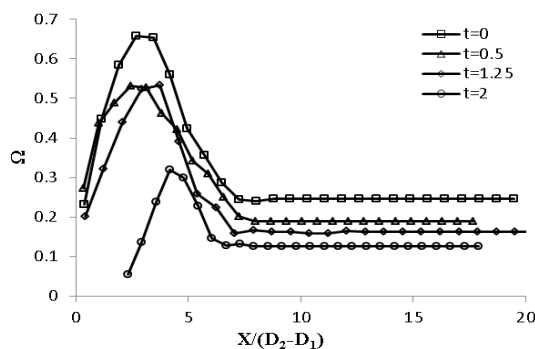


Fig. 15- Variations of Ω coefficient for adverse slope 3%, positive step height 6 cm and different roughness

شکل ۱۵- تغییرات ضریب Ω در بستر با شیب ۳٪، ارتفاع پله مثبت انتهایی ۶ سانتی متری و انواع زبری

۱۲/۴ برابر حالت کلاسیک بود. با توجه به نتایج حاصل شده، وجود زبری و پله مثبت انتهایی در یک شیب ثابت سبب افزایش تنش برشی بستر و مانع از گسترش طولی گردابه‌ها و در نتیجه کاهش نوسانات فشار می‌شود. بنابراین وجود سه عامل شیب منفی، زبری بستر و پله مثبت انتهایی باعث کاهش σ_x نسبت به حالت کلاسیک می‌گردد. همچنین ضریب بدون بعد نوسانات فشار ۶۴/۷ درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش داشت. حداقل ضریب کویتناسیون در این مطالعه برابر ۳/۸۷ محاسبه گردید. از این رو می‌توان گفت از نظر هیدرولیکی سازه با مشکل کویتناسیون مواجه نیست.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است، که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر شیب منفی، زبری بستر همراه با پله مثبت انتهایی بر طول پرش، پروفیل‌های سرعت، سطح آب و نوسانات فشار پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش زبری، شیب منفی همراه با پله انتهایی سبب کاهش طول پرش هیدرولیکی خواهد شد که بیشترین کاهش مربوط به زبری با قطر متوسط دو سانتی‌متر، شیب منفی پنج درصد همراه با پله شش سانتی‌متری می‌باشد. از این رو می‌توان حوضچه‌هایی با طول کمتر را احداث نمود که باعث صرفه‌جویی اقتصادی خواهد گردید. براساس نتایج، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در بستر زبر با شیب کف منفی همراه با پله مثبت انتهایی ۴/۴۴ برابر بستر صاف به‌دست آمد. همچنین مقادیر ضریب نیروی برشی ۸ در این تحقیق به‌طور متوسط

References

- 1- Abbaspour, A., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A.A., 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environment Research*, 3(2), pp.109-117.
- 2- Abdul Khader, M.H. and Elango, K., 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 12(4), pp.469-489.
- 3- Chow, V., 1959. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.
- 4- Ead, S.A., Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Ade, F., 2000. Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(10), pp.750-757.
- 5- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), pp.656-663.
- 6- Fathi, Moghadam, M., Kermannezhad, J., Ghanbari, A.E., Obeydavi, M. and Hodaei, F., 2013. Effect of Angle of Impact on Dynamic Pressure of the Flip Bucket Jets. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 36(1), pp. 1-10. (In Persian).
- 7- Fiorotto, V. and Rinaldo, A., 1992. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), pp.499-520.
- 8- Ghazali, M., Samadi, B.H., Ghorbani, B. and Rahmati, A., 2012. A Laboratory Study of Velocity Profile at Hydraulic Jump on Triangular Corrugated Bed. *The Iranian Society of Irrigation and Water*, 2(8), pp. 117-128. (In Persian)
- 9- Hosseini, H., Fathi Moghadam, M., Avalin, C.Z. and Dehdar, S., 2013. Dynamic Pressure on Side Walls due to Compact of Flip Bucket Jets. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 35(4), pp. 11-20. (In Persian)
- 10- Izadjoo, F. and Shafai-Bajestan, M., 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Applied Sciences*, 7(8), pp.1164-1169.
- 11- Karimi, M., Jahromi, S.M. and Shafai-Bajestan, M., 2017. Pressure Fluctuations in Hydraulic Jump Investigation of Stilling Basin at Sudden Expansion. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(2), pp. 263-272. (In Persian)
- 12- Karimi, M., Musavi, J.S.H. and Shafai-Bajestan, B.M., 2014. The effect of roughness in pressure fluctuations in the stilling basin with sudden expansion. *Journal of Water and Soil Resource Conservation*, 4(1), pp. 63-78. (In Persian)
- 13- Lopardo, R. A. and Solari, H. G., 1980. Pressure fluctuations beneath free hydraulic jump. Proc. In *9th Congress of the Latin American Hydraulica, International Association of Hydraulic Research*.
- 14- Marques, M.G., Drapeau, J. and Verrette, J.L., 1997. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. In *XVII Congress Latino Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador*.
- 15- Nasr Esfahani, M. J. and Shafai-Bajestan, M., 2014. Investigation of cavitation at the roughened bed of abrupt drop stilling basin. *Journal Management System*, 8(2), pp.29-40.
- 16- Parsamehr, P. and Hossenzadeh, D.A., 2013. Experimental Study of Effect of Rough Bed on Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump on Adverse Slope. *journal of Irrigation Science and Engineering(JISE)*, 36(1), pp. 89-101. (In Persian)

- 17- Parsamehr, P., Hossenzadeh, D.A., Farsadizadeh, D. and Abbaspour, A., 2014. Experimental study of Hydraulic Jump characteristics with sill on adverse slope. *Iranian Water Researches Journal*, 7(13), pp. 89-96. (In Persian)
- 18- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R.A., 2015. Investigation of Water Velocity and Surface Profile in Hydraulic Jump over Rough Bed with Adverse Slope. *Water and Soil Science*, 25(1), pp.143-152. (In Persian)
- 19- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R.A., 2014. Experimental Investigation of Effect of Roughness and Adverse Slope on Length and Roller Length of Hydraulic Jump. *Iranian Water Researches Journal*, 8(14), pp. 155-164. (In Persian)
- 20- Rajaratnam, N., 1967. Hydraulic jumps. *Advances in hydrosience*, 4(1), pp.197-280.
- 21- Samadi, H., Ghazali, M., Gorbani, B. and Nafchi, R.F., 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(9), pp.841-847.