

Research Paper

Experimental Determination of Pressure Fluctuations in Stilling Basin with Sudden Expanding and Roughened Bed

Marzieh Naem Hasani¹, Kouros Nekoufar^{2*}, Morteza Biklaryan²
and Morteza Jamshidi²

¹PhD Scholar, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

²Assist. Professor, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

Article information

Received: May 27, 2021

Revised: July 07, 2021

Accepted: July 10, 2021

Keywords:

Abrupt Expanding
Stilling Basin

Hydraulic
Jump Pressure

Fluctuations Rough

Stilling Basin

*Corresponding author:

nekoufar@iauc.ac.ir



Abstract

The effect of fluctuating pressures due to turbulence on the hydraulic jump causes significant damage to the relaxation pool. Moreover, the presence of roughness in the bed changes the behavior of flow lines and the formation of vortices during the jump. Therefore, the aim of this study was to determine the effect of the presence of roughness on hydrodynamic pressures in type S hydraulic jump in sudden divergence sections. For this purpose, experiments were performed in a relatively large channel with a width of 0.8 and a length of 12 m in the calm pool with divergence ratios of 0.33, 0.5, 0.67 and 1 in the range of Frued numbers between 2 to 9.5. Roughness elements with a height of 3 cm and specified distances were placed in the channel bed and downstream of the divergence section. In order to determine the effects of roughness on the level of hydrodynamic pressures, the experiments were performed in two separate stages, including a completely flat pool bed without the presence of roughness in the first stage (77 experiments) and with the presence of roughness in the pool floor in the second stage (81 experiments). The results showed that the presence of roughness in the bed reduces the intensity of pressure fluctuations in the relaxation pool. In addition, in sudden divergent sections, due to the formation of lateral vortices, the energy drop increases and the intensity of pressure fluctuations decreases. The maximum reduction rates of pressure fluctuations were estimated to be 27, 46 and 58% for the divergence ratios of 0.67, 0.5 and 0.33 in the rough bed, respectively.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open access article distributed under the CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



Introduction

Stilling basins with sudden expansions are one of the energy-dissipater structures. The application of cross-sectional expansion in channels would be a useful way to ensure the stabilization of the hydraulic jump in the stilling basins. In some previous studies, the effects of expansion on jump characteristics were investigated and study of the relationship between expansion ratio and pressure fluctuation parameters lacks in the literature. Thus, this study attempted to carry out the experimental research for evaluating the effects of different expansion ratios on pressure fluctuation, during the hydraulic jump on a roughened bed.

Materials and Methods

The experiments were conducted in a rectangular channel with 12 m length, 0.8 m width and 0.7 m depth having glass side walls. The narrow part of the flume was constructed using two Plexiglas boxes which extended 0.8 m downstream to

enlarge abruptly and asymmetrically the width of the main flume. In this study four expansion ratio ($\frac{B_1}{B_2}$) of 1, 0.67, 0.5, and 0.33 with 0.8, 0.53, 0.4, and 0.27 m width were considered respectively (where, B_1 is the width of the approaching flume to the expansion in upstream and B_2 is the flume width in downstream). In order to roughening the bed, the discrete elements of roughness were made by polyethylene with the heights of 3 cm. These elements were located below the water jet and were not exposed to the incoming water jet, directly. Due to the fact that the pressure in the stilling basin's bed has random fluctuations, analysis was mainly evaluated by statistical methods and with the help of π -Buckingham analysis. The most important pressure fluctuation parameter is the non-dimensional coefficient of C_p' . Non-dimensional pressure fluctuation parameter (C_p') and also its maximum value ($C_p'_{max}$) were calculated for all expanding ratios.

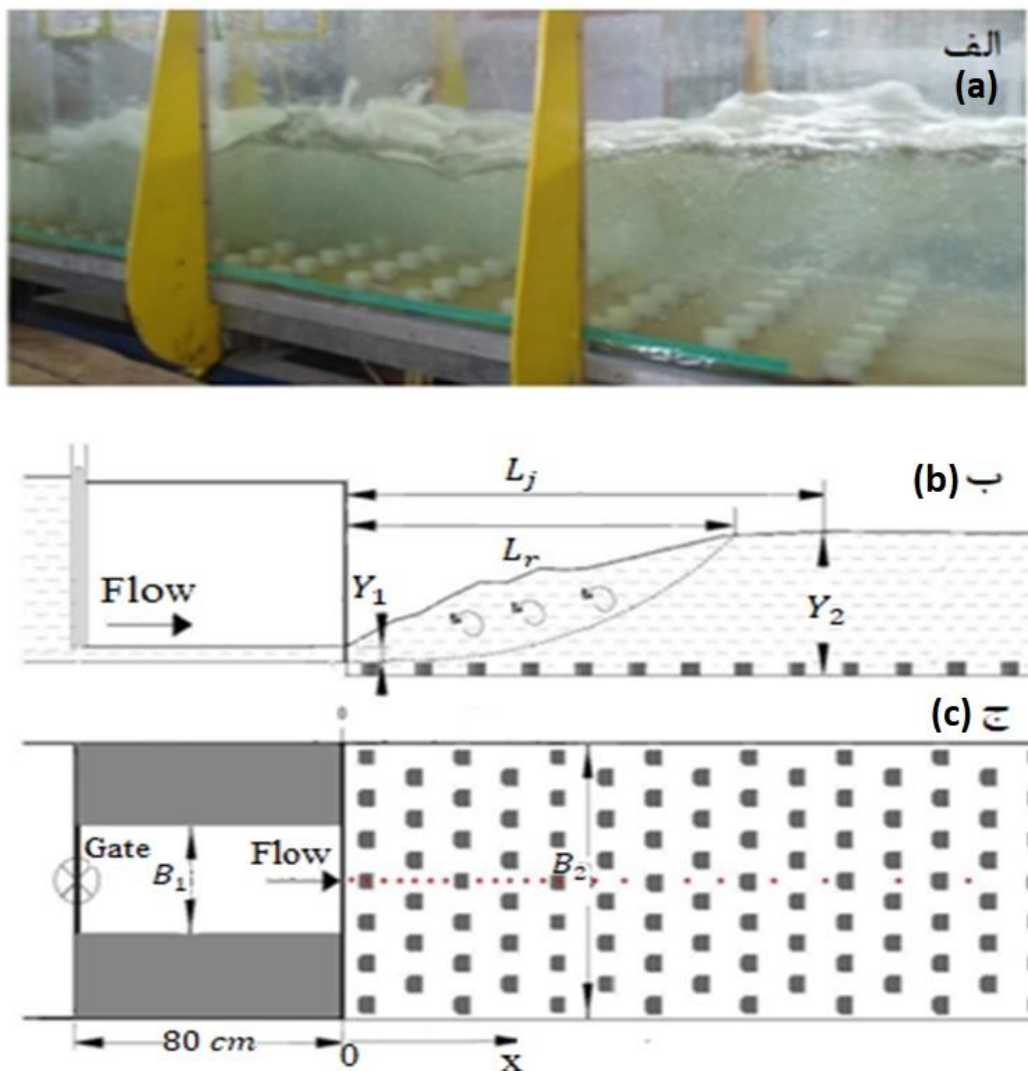


Fig.1 View of the: a) laboratory flume, b) jump parameters, c) plan of flume

Results

The intensity of pressure fluctuations rose at the beginning of the jump, and reached its maximum value. Then, it decreased and became almost constant until the end of the jump. C_p' parameter also decreased by increasing Froude number, because of faster growth of kinetic energy than pressure fluctuation rate. Besides, presence of bed roughness caused to decrease the pressure fluctuations intensity. The value of pressure fluctuations coefficient decreased by decreasing the expansion ratio (β), so that this parameter in expansion ratio of 0.33 had the minimum value. On the other hand, the value of $C_p'_{max}$ decreased

with increasing the Froude number in both smooth and rough bed. Due to presence of bed roughness, $C_p'_{max}$ decreased by an average of 20% than in smooth bed. Considering the simultaneous impact of bed roughness and expansion ratio, it can be concluded that $C_p'_{max}$ decreases by an average of 27% in expansion ratio of 0.67. Moreover, in expansion ratio of 0.5 and 0.33, the reduction rate of $C_p'_{max}$ achieved almost 46 and 58%, respectively (Fig. 1). As a result, presence of both factors of roughness and expansion, lead to reduce the non-dimensional parameter of $C_p'_{max}$.

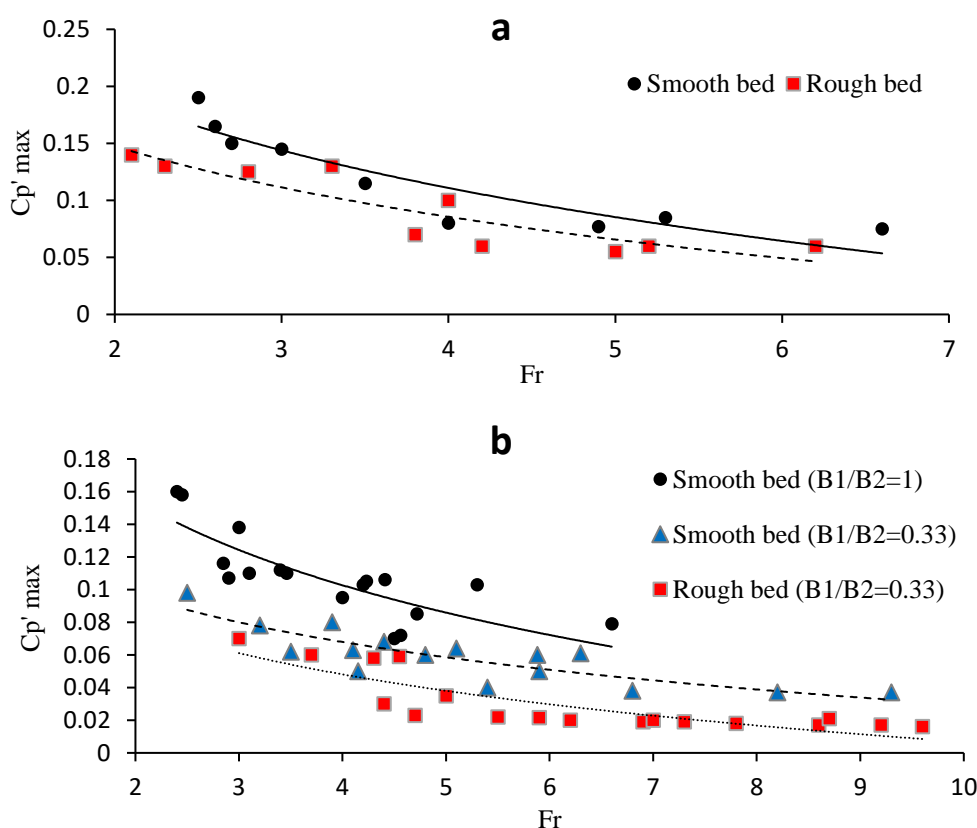


Fig. 1 Reduction percentage of $C_p'_{max}$ in expansion ratios of: a) 1 and b) 0.33

Conclusion

In summary, the results showed that both bed roughness and sudden expanding basin lead to decreasing the pressure fluctuation intensity due to producing lateral vorticities and eddies and increasing the energy loss in the basin. Therefore, the reduction rate of maximum pressure fluctuation in rough bed was 20, 27, 46, and 58% for expansion ratio of 1, 0.67, 0.5, and 0.33, respectively rather than smooth bed.

Data availability

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author, upon reasonable request.

Conflict of interests

The authors declare there are no competing interests.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir



مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی نوسانات فشار پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی و بستر زبر

مرضیه نعیم حسنی^۱، کورس نکوفر^{۲*}، مرتضی بیک لریان^۲ و مرتضی جمشیدی^۲

^۱دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
^۲استادیار، گروه عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۳/۰۶]
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۴/۱۶]
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۴/۱۹]

واژه‌های کلیدی:

المان‌های زبری
پرش هیدرولیکی نوع S
حوضچه آرامش
فشارهای هیدرودینامیکی
کانال با واگرایی ناگهانی

اثر فشارهای نوسانی ناشی از تلاطم در پرش هیدرولیکی موجب آسیب قابل توجهی در حوضچه آرامش می‌شود. همچنین، وجود زبری در بستر باعث تغییر دادن رفتار خطوط جریان و تشکیل گردابه‌ها در طول پرش می‌شود. از این رو، هدف پژوهش حاضر تعیین اثر حضور زبری بر فشارهای هیدرودینامیکی در پرش هیدرولیکی نوع S در مقاطع واگرایی ناگهانی بود. برای این منظور آزمایش‌ها در یک کانال نسبتاً بزرگ به عرض ۰/۸ و طول ۱۲ m در حوضچه آرامش با نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ در محدوده اعداد فرود بین ۲ تا ۹/۵ انجام شد. المان‌های زبری با ارتفاع ۳ cm و فواصل مشخص در بستر کانال و در پایین دست مقطع واگرایی جای گذاری شد. به منظور تعیین اثرات زبری در میزان فشارهای هیدرودینامیکی، آزمایش‌ها در دو مرحله مجزا شامل بستر حوضچه کاملاً صاف و بدون حضور زبری در مرحله اول (۷۷ آزمایش) و با حضور زبری در کف حوضچه در مرحله دوم (۸۱ آزمایش) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که وجود زبری در بستر باعث کاهش شدت نوسانات فشار در حوضچه آرامش می‌شود. همچنین در مقاطع واگرایی ناگهانی به دلیل تشکیل گردابه‌های جانبی افت انرژی افزایش و شدت نوسانات فشار کاهش می‌یابد. آهنگ کاهش بیشینه نوسانات فشار به ترتیب ۲۷، ۴۶ و ۵۸٪ برای نسبت واگرایی ۰/۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ در بستر زبر تخمین زده شد.

*نویسنده مسئول:

aliaghat@ut.ac.ir

۱- مقدمه

جریان به مقدار قابل توجهی کاسته می‌شود (Chanson 2011). حوضچه‌های آرامش با قرارگیری در انتهای کانال یا تنداب باعث استهلاک انرژی سینماتیک مخرب پرش‌های هیدرولیکی و همچنین کاهش اثرات فرسایشی پرش در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی می‌شود. از جمله مهم‌ترین پارامترهای طراحی حوضچه‌های آرامش می‌توان به طول،

پرش هیدرولیکی یک جریان متغیر سریع در جریان‌های روباز می‌باشد و عبارت است از پدیده‌ای که در آن جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیربحرانی تبدیل می‌شود (Wu et al. 2015). در اثر پدیده پرش هیدرولیکی عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت

می‌شود. (Matin et al. (2008) رابطه‌ای بین عمق اولیه و ثانویه پرش S با استفاده از عدد فرود اصلاح‌شده معرفی کرد. عدد فرود اصلاح‌شده از حل معادلات پیوستگی و مومنتم در یک کانال با عرض متغیر حاصل می‌شود. این عدد تابع زاویه شیب بستر، عدد فرود اولیه، نسبت اعماق اولیه به ثانویه، نسبت عرض کانال در انتهای پرش به عرض آن در ابتدای پرش و نسبت مساحت قبل و بعد از پرش است. Zare and Doering (2010) اثرات دندانه با ارتفاع‌های مختلف و موقعیت‌های متفاوت روی پرش S در دو واگرایی ناگهانی متقارن و نامتقارن را ارزیابی کرد. وقوع پرش هیدرولیکی در تمام طول سطح صاف در حوضچه آرامش به‌صرفه نیست، بنابراین با استفاده از فن‌هایی شامل بلوک‌های پای تندآب، بلوک آرام‌کننده و آب‌پایه‌های انتهایی می‌توان طول پرش را کاهش داد (Zahabi et al. 2018). به دلیل اینکه بلوک‌های آرام‌کننده به‌طور مستقیم در معرض جت جریان ورودی قرار دارند، در معرض آسیب‌های فرسایش و خوردگی هستند (Hosseini et al. 2019; Torabi et al. 2019).

پرش هیدرولیکی روی بستر زبر در ابتدا توسط Rajaratnam (1968) مطالعه شد. وی پارامتر زبری نسبی $(K = ke/y_1)$ را ارائه کرد که در آن ke زبری معادل و y_1 عمق اولیه پرش می‌باشد. در پژوهش Parsamehr et al. (2017) مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با شیب معکوس بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع زبری و افزایش شیب معکوس باعث کاهش طول پرش و عمق ثانویه می‌شود. اثرات بستر زبر بر مشخصات پرش S در کانال واگرا برای اولین بار توسط Neisi and Shafai (2013) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که عمق ثانویه پرش حدود ۵۳٪ نسبت به پرش کلاسیک بر روی بستر صاف کاهش می‌یابد. Daneshfaraz et al. (2019) نشان دادند که با افزایش ارتفاع المان‌های زبری، طول پرش، S ۱۲ تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد و در نتیجه عمق ثانویه پرش ۲۰ تا ۳۰/۴٪ نسبت به بستر صاف کم‌تر می‌شود.

در صورت وجود محدودیت‌های اقتصادی و توپوگرافی امکان‌پذیر، گودبرداری برای حوضچه آرامش وجود ندارد. کاربرد واگرایی عرضی در کانال‌ها یک روش برای اطمینان از پایداری پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش است (Torkamanzad et al. 2019). علاوه بر این، نوسانات فشار پرش هیدرولیکی بر روی حوضچه آرامش اثرات مخرب سازه‌ای و اقتصادی دارد،

عرض، ارتفاع دیواره‌ها و تراز بستر اشاره کرد که به مشخصات پرش هیدرولیکی و عمق پایاب بستگی دارد (Daneshfaraz et al. 2015; Sadeghfam et al. 2017).

استهلاک انرژی و تلاطم جریان در حوضچه‌های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است. نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی در نتیجه تلاطم‌های شدید بزرگ‌مقیاس است و اثر فشارهای نوسانی ناشی از تلاطم می‌تواند قابل توجه باشد. بنابراین در طراحی حوضچه آرامش علاوه بر جنبه‌های ساختاری حوضچه آرامش باید اثرات نوسانات فشار نیز مورد توجه قرار گیرد. به‌عنوان مثال نوسانات فشار ممکن است که در سطح بستر و در سطح درزها سبب ایجاد ترک و انتشار آن در ساختمان دال شود. با ادامه نوسانات ممکن است که بلوک‌های دال به‌طور کامل از توده اطرافش جدا شده و اگر نیروی زیرفشار، دارای شدت و مدت‌زمان کافی باشد، می‌تواند بلوک‌های دال را از جایگاه اصلی آن خارج نماید. همچنین هنگامی که فشار در یک نقطه از سطح حوضچه منفی می‌شود، ممکن است با توجه به نیروهای زیرفشار به‌طور موضعی موجب ناپایداری خطرناکی در زیر دال بتنی شود.

به‌طور کلی سه نوع پرش هیدرولیکی براساس عمق پایاب آب وجود دارد. در عمق‌های کم، پنجه پرش پایین‌تر از موقعیتی است که موج‌های عرضی به دیوار کانال برخورد می‌کنند. در این حالت، پرش نوع R تشکیل می‌شود. با افزایش عمق پایاب، پرش بین مقطع واگرا و نقطه محل برخورد می‌گیرد و پرش نوع S ایجاد می‌شود. هنگامی که عمق آب در محل گرداب‌های جانبی افزایش می‌یابد، جریان فوق بحرانی قادر به تخلیه جریان در منطقه گرداب‌های جانبی نخواهد بود. در این حالت پرش به‌طور عمده به‌صورت یک جت نامتقارن بدون غلطاب‌های سطحی تشکیل می‌شود. در این جریان به‌طور مداوم دو گرداب جانبی وجود دارد. جریان در پرش نوع S غیریکنواخت با سرعت بالا و متمرکز به سمت یکی از دیواره‌های جانبی و جریان برگشتی در سمت مقابل آن می‌باشد. با افزایش عمق، پنجه پرش بالاتر از محل اتصال قرار می‌گیرد و پرش ایجادشده از نوع T است. براساس فاصله پنجه پرش با محل اتصال، پرش T می‌تواند متقارن یا نامتقارن باشد (Imran and Akib 2013).

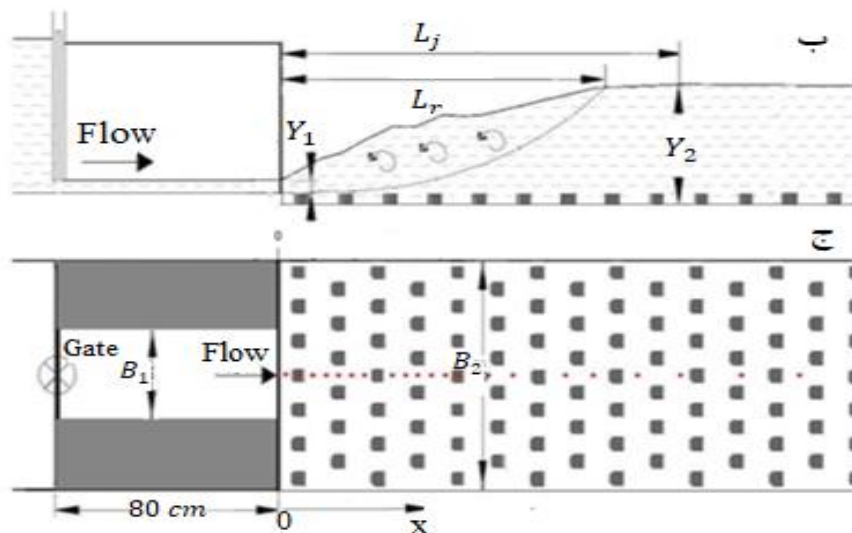
Alhamid (2004) نشان داد که پرش نوع S در مقایسه با پرش کلاسیک باعث افزایش طول پرش در کانال منشوری

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- برنامه آزمایشگاهی

در جریان‌های با هوادهی طبیعی که هوادهی آن‌ها عموماً ناشی از آشفتگی است (مانند جریان آشفته در پرش هیدرولیکی) استفاده از معیار تشابه عدد فرود در مدل‌سازی هنگامی معتبر است که مدل به حد کافی بزرگ باشد تا در طول پرش هیدرولیکی، ورود هوا بتواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در استهلاك انرژی داشته باشد (Kato et al., 2000; Kuswandi and Triatmadja 2019). در این پژوهش مدل با ابعاد نسبتاً بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل‌ها سعی بر این است تا اثر مقیاسی تا حد امکان کاهش یابد.

پس مطالعه این آثار مخرب امری ضروری می‌باشد. خصوصیات جریان بر پرش هیدرولیکی در سطح گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است، درحالی‌که در زمینه خصوصیات متلاطم پرش پژوهش‌های نسبتاً محدودی صورت گرفته است. همچنین، در برخی از تحقیقات گذشته اثر واگرایی ناگهانی روی مشخصات پرش مورد بررسی قرار گرفته است، اما مطالعه رابطه بین نسبت واگرایی و پارامترهای نوسانات فشار در ادبیات فنی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو این پژوهش سعی دارد که با تحقیقات آزمایشگاهی اثرات نسبت‌های مختلف واگرایی را روی فشارهای هیدرودینامیکی و نوسانات فشار در حین وقوع پرش هیدرولیکی روی بستر با المان‌های زبری بررسی کند.



شکل ۱- نمایی از: الف) فلوم آزمایشگاهی، ب) پارامترهای پرش هیدرولیکی، ج) پلان فلوم
Fig.1 View of the: a) laboratory flume, b) jump parameters, c) plan of flume

ارتفاع سطح آب در داخل مخزن نیز یک لوله مانومتری به مخزن متصل شده و با نصب متر نواری در کنار آن لوله مانومتر مدرج شده است. دریچه انتهایی برای کنترل موقعیت پنجه پرش هیدرولیکی در قسمت واگرایی قرار دارد. مقدار جریان ورودی به فلوم توسط دستگاه دی‌سنج ماورای صوت اندازه‌گیری می‌شود. به منظور کالیبره نمودن دی‌سنج در

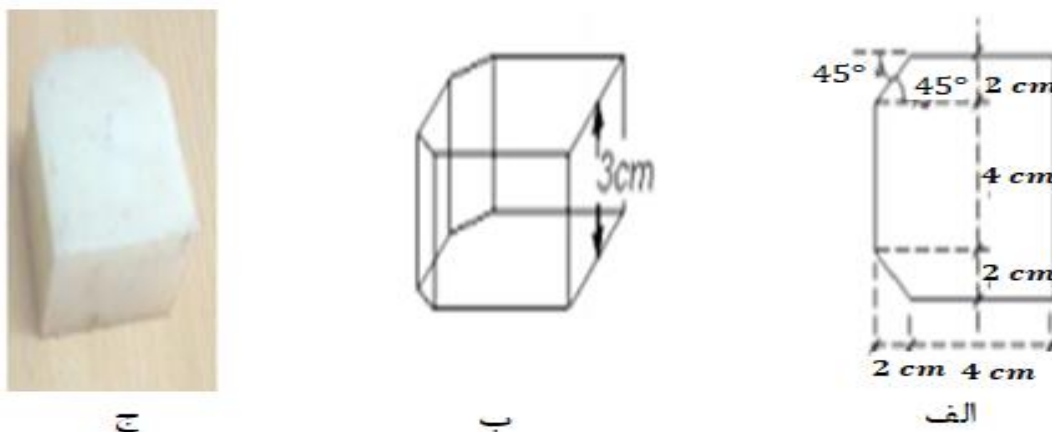
شکل (۱) نمایی از فلوم آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهد. مقطع فلوم مستطیلی به طول ۱۲ m، عرض ۰/۸ m و ارتفاع دیواره‌های آن برابر با ۰/۷ m می‌باشد. کف کانال فلزی و دیواره‌های آن از جنس شیشه می‌باشد. فلوم مورد نظر مطابق شکل (۱) شامل یک مخزن به ارتفاع ۳/۴ m (جهت تأمین هد مورد نیاز) در ابتدای آن می‌باشد. به منظور مشاهده

و در دو طرف فلوم نصب شد. در این پژوهش از چهار نسبت واگرایی ($\beta = \frac{B_1}{B_2}$) ۱، ۰/۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ به ترتیب برای عرض‌های ۰/۸ m، ۰/۵۳، ۰/۴ و ۰/۲۷ در مقطع اول استفاده شد، به طوری که B_1 عرض کانال در قسمت تنگ‌شدگی و B_2 عرض اصلی کانال می‌باشد.

در شکل (۱)، Y_1 ارتفاع اولیه پرش هیدرولیکی، Y_2 ارتفاع ثانویه پرش، L_z طول پرشو L_r فاصله شروع پرش تا محل اتمام گردابه‌های ایجاد شده در پرش می‌باشد. به منظور تهیه المان‌های زبری به ارتفاع ۳ cm از ورق پلی‌آمید استفاده شد (شکل ۲). این المان‌ها در پایین‌دست محل واگرایی و به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که زیر جت ورودی آب قرار گیرند عملاً به طور مستقیم در مقابل جریان ورودی قرار ندارند (Bejestan and Neisi 2009). در نتیجه احتمال وقوع کاویتاسیون کاهش می‌یابد (Ead and Rajaratnam 2002; Wu et al. 2015).

محل انتهای کانال هدایت‌کننده خروجی آب، یک سرریز مستطیلی قرار گرفته است و در کنار این سرریز یک پیزومتر نصب شده که ارتفاع آب در پشت سرریز از طریق آن قابل اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه پرش با استفاده از دو روش انجام گرفته است: (۱) ابزار دیجیتالی ماورای صوت با دقت ۱۴۰ داده در ثانیه برای اندازه‌گیری عمق آب در حین فرایند آزمایش. (۲) ارتفاع آب به کمک گیج نقطه‌ای با دقت ۱ mm. در این مطالعه، میانگین مقادیر ارتفاع‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از دو روش فوق محاسبه شده است تا پروفیل دقیقی حاصل شود (Torabi and Shafieefar 2015).

با توجه به این که عرض فلوم آزمایشگاه برابر با ۸۰ cm است، برای ایجاد واگرایی ناگهانی باید عرض فلوم را در بخش کوتاهی کاهش داد. برای این منظور، زوج باکس‌هایی در ابعاد ۱۰۰×۶۰×۲۷، ۱۰۰×۶۰×۱۰، ۲۰×۶۰×۱۰ و ۱۰۰×۶۰×۱۳/۵ cm تهیه



شکل ۲- الف) ابعاد المان، ب) نمای سه‌بعدی، و ج) تصویر المان زبری
 Fig. 2 a) dimensions of element, b) 3D view, and c) image of roughened element

جدول ۱- محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده

Table 1 Range of measured variables

Expansion ratio	Bed	Ranges of jump variables			
		y_1 (cm)	Re	Fr_1	Q (l/s)
1	smooth	3-6	60000-132000	2-6.9	40-90
0.67			82000-161000	2.2-8.5	45-102
0.5			53000-172000	2.3-9.5	22-73
0.33			91000-192000	2.5-10.5	25-60
1	rough	3-6	52000-141000	2-6.5	31-96
0.67			65000-156000	2.3-8	32-90
0.5			62000-153000	2.4-9.1	26-70
0.33			74000-242000	3-9.5	20-70

انجام شد. به منظور بررسی اثرات زبری در میزان فشارهای هیدرودینامیکی آزمایش‌ها در دو مرحله مجزا صورت پذیرفت. مرحله اول بستر حوضچه کاملاً صاف و بدون حضور

۲-۲- شرح آزمایش

پس از طراحی و ساخت مدل، تعداد ۱۵۸ آزمایش با هدف اندازه‌گیری فشارهای هیدرودینامیکی در کف حوضچه آرامش

باریک‌تر که برابر با ۲۶، ۴۰، ۵۳ و ۸۰ cm می‌باشد، B_2 عرض فلوم در مقطع عریض‌تر می‌باشد و مقدار آن در کلیه نسبت‌های واگرایی ثابت و برابر با ۸۰ cm است، X فاصله از پنجه پرش، ρ_w چگالی آب و v لزجت سینماتیکی آب می‌باشد.

به‌منظور یافتن گروه‌های بی‌بعد از قضیه پی-باکینگهام استفاده شده است. این تئوری در سال ۱۹۱۴ توسعه یافته است و بر مبنای یافتن هم‌زمان تابع‌های بی‌بعد با توجه به متغیرهای تکرار و وابسته می‌باشد (Buckingham 1914). به کمک این قضیه و انتخاب V_1 ، γ_1 و ρ_w به‌عنوان پارامترهای تکرار، معادله کلی شامل پارامترهای بدون بعد مطابق رابطه (۳) استخراج شده است.

$$f\left(\frac{\sqrt{P'^2}}{V_1^2/2g}, \frac{Y_2}{Y_1}, \frac{B_1}{B_2}, \frac{X}{L_j}, \frac{V_1 Y_1}{v}, \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}}\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش بررسی نوسانات فشار در حوضچه آرامش بود، می‌توان ضرایب نوسانات فشار را به‌عنوان

تابعی از پارامترهای بدون بعد به‌صورت رابطه (۴) تعریف کرد.

$$C_p' = \frac{\sqrt{P'^2}}{V_1^2/2g} = f\left(\frac{Y_2}{Y_1}, \frac{B_1}{B_2}, \frac{X}{L_j}, \frac{V_1 Y_1}{v}, \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}}\right) \quad (4)$$

۳ - یافته‌ها و بحث

۳-۱- پارامتر C_p' در پرش منشوری

برای اعداد فرود مختلف، ضریب C_p' در طول پرش محاسبه شده و نتایج برای پرش منشوری ($\beta = 90^\circ$) در بستر صاف و زیر در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل، ضریب C_p' با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد، که با نتایج مطالعات گذشته همخوانی دارد (Yan 2006; Lopardo and Romagnoli 2009). این موضوع بر اینکه شدت آشفتگی و تلاطم پرش با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد دلالت ندارد، بلکه به این دلیل است که با افزایش عدد فرود جریان، نرخ رشد انرژی جنبشی ($V_1^2/2g$) بیشتر از نرخ رشد نوسانات فشار (σ) است. همچنین با توجه به شکل (۳) پارامتر C_p' در بستر زیر کاهش یافته است. به بیانی دیگر، وجود زبری در بستر حوضچه سبب کاهش نوسانات فشار شده است.

زبری برای نسبت‌های واگرایی ۱، ۰/۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ که در مجموع شامل ۷۷ آزمایش می‌باشد. در مرحله دوم نیز ۸۱ آزمایش با حضور زبری در کف حوضچه و برای همان نسبت‌های واگرایی انجام شد. محدوده متغیرهای آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

۳-۲- بیان تئوری مسئله

به‌دلیل اینکه فشارهای هیدرودینامیکی در بستر حوضچه آرامش دارای نوسانات تصادفی است، تحلیل‌ها توسط روش‌های آماری ارزیابی می‌شوند. مهم‌ترین پارامتر نوسانات فشار ضریب بی‌بعد C_p' است که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Lopardo and Romagnoli 2009).

$$C_p' = \frac{\sigma}{V_1^2/2g} \quad (1)$$

که، σ مقدار جذر مربع نوسانات فشار و برابر با $\sqrt{P'^2}$ است، V_1 سرعت اولیه پرش و g شتاب ثقل زمین است.

۳-۲-۴- آنالیز ابعادی مدل فیزیکی

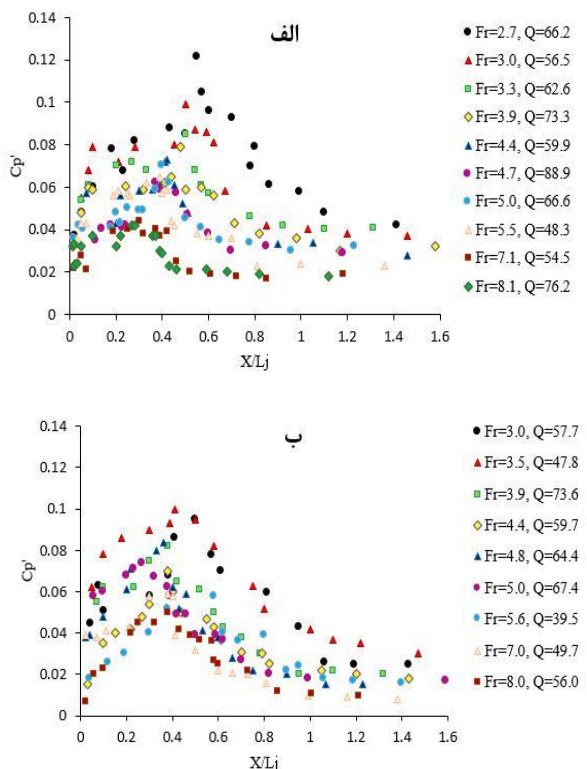
یک مدل در صورتی از نظر دینامیکی با نمونه اصلی خود متشابه می‌باشد که اولاً از نظر هندسی و حرکتی متشابه بوده و ثانیاً کلیه نیروهای وارده بر نقاط متناظر بر هر دو سیستم یکسان باشد. تحلیل ابعادی یک روش مؤثر برای کاهش تعداد و پیچیدگی متغیرهای تأثیرگذار بر یک پدیده فیزیکی می‌باشد، به‌طور خلاصه اگر پدیده‌ای به n متغیر با بعد بستگی داشته باشد، تحلیل ابعادی تعداد متغیرها را به k متغیر بی‌بعد کاهش می‌دهد. تعداد ابعاد مختلف حاضر در مسئله $n-k$ است که ابعاد پایه یا اساسی نامیده می‌شوند. در این قسمت با تشریح پارامترهای مختلف مؤثر بر ضرایب فشارهای هیدرودینامیکی در حوضچه آرامش در یک مقطع واگرایی ناگهانی و استفاده از تئوری پی-باکینگهام معادلات کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج می‌شوند. عوامل مؤثر بر فشارهای هیدرودینامیکی در حوضچه آرامش مطابق رابطه (۲) می‌باشد (Karimi et al. 2014; Daneshfaraz et al. 2019).

$$f(P', V_1, \gamma_1, \gamma_2, B_1, B_2, X, L_j, \rho_w, v, g) = 0 \quad (2)$$

که، P' جزء نوسانی فشار است که برابر است با $P - \bar{P}$ فشار هیدرواستاتیکی و \bar{P} فشار هیدرواستاتیکی متوسط در هر سطح مقطع است، V_1 سرعت در مقطع اولیه پرش است و با استفاده از رابطه پیوستگی محاسبه می‌شود، γ_1 عمق اولیه پرش، γ_2 عمق ثانویه پرش، B_1 عرض فلوم در مقطع

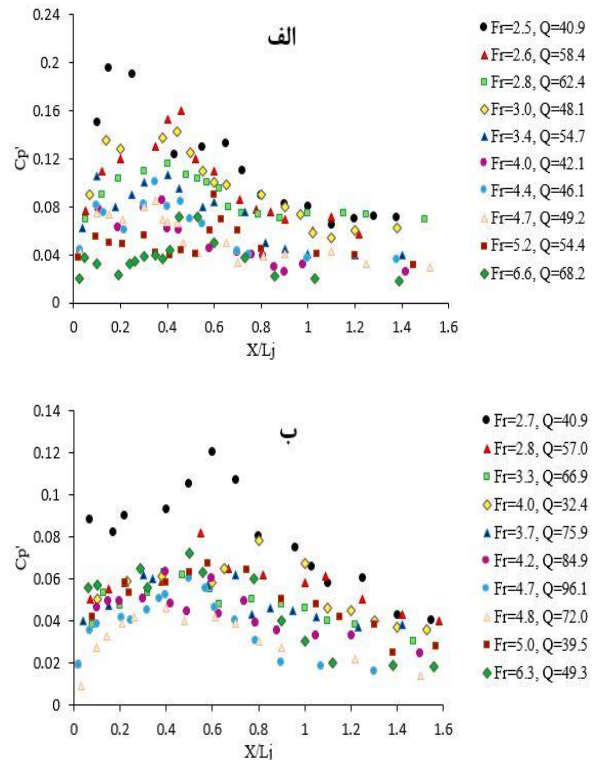
Samadi- و Liuet al. (2020) ، (2007) ،
 Boroujeni et al. (2013) تطابق دارد،
 به طوری که افزایش عدد فرود بالادست به دلیل
 ایجاد گردابه‌های بزرگ در طول پرش باعث
 افزایش غیرخطی نیروهای برشی شده است.

مشابه با حالت قبل، در شکل (۵) نیز در ابتدا
 شدت نوسانات فشار زیاد می‌شود. سپس به
 بیشینه مقدار خود رسیده و پس از آن روند نزولی
 را طی می‌کند تا در نهایت به مقدار تقریباً ثابتی
 برسد. روند تغییرات نوسانات فشار در طول پرش
 در ضریب واگرایی ۰/۳۳ (شکل ۶) مشابه با
 حالات قبل است. علاوه بر این، وجود زبری در
 بستر حوضچه باعث کاهش شدت نوسانات فشار
 شده است. با کاهش نسبت واگرایی (β) مقدار
 ضریب شدت نوسانات فشار کاهش می‌یابد،
 به طوری که ضریب C_p' در واگرایی ۰/۳۳ نسبت
 به پرش منشوری به شدت کاهش یافته و به
 حداقل خود می‌رسد.



شکل ۴- پارامتر C_p' برای نسبت واگرایی ۰/۶۷ در بسترهای: الف- صاف و ب- زبر

Fig. 4 C_p' parameter for expansion ratio of 0.67 at: a) smooth and b) rough beds

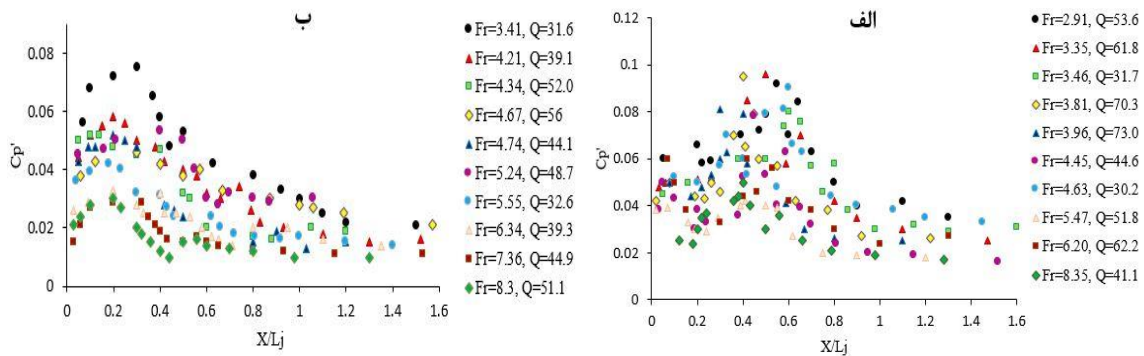
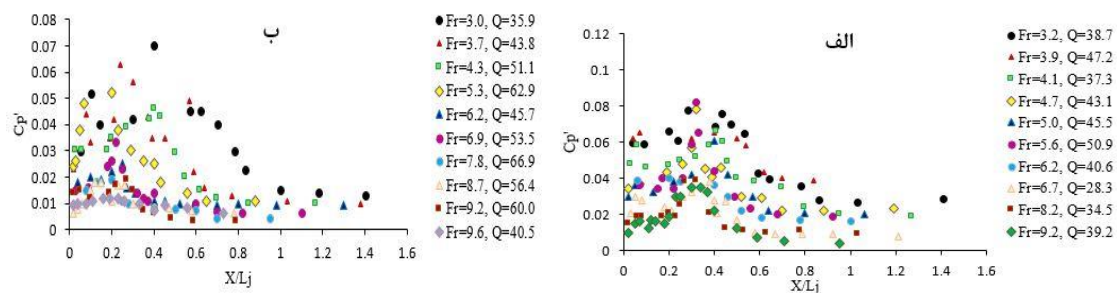


شکل ۳- پارامتر C_p' در پرش منشوری ($\beta = 1$) در بسترهای: الف- صاف و ب- زبر

Fig. 3 C_p' parameter in prismatic jump ($\beta = 1$) at a) smooth and b) rough beds

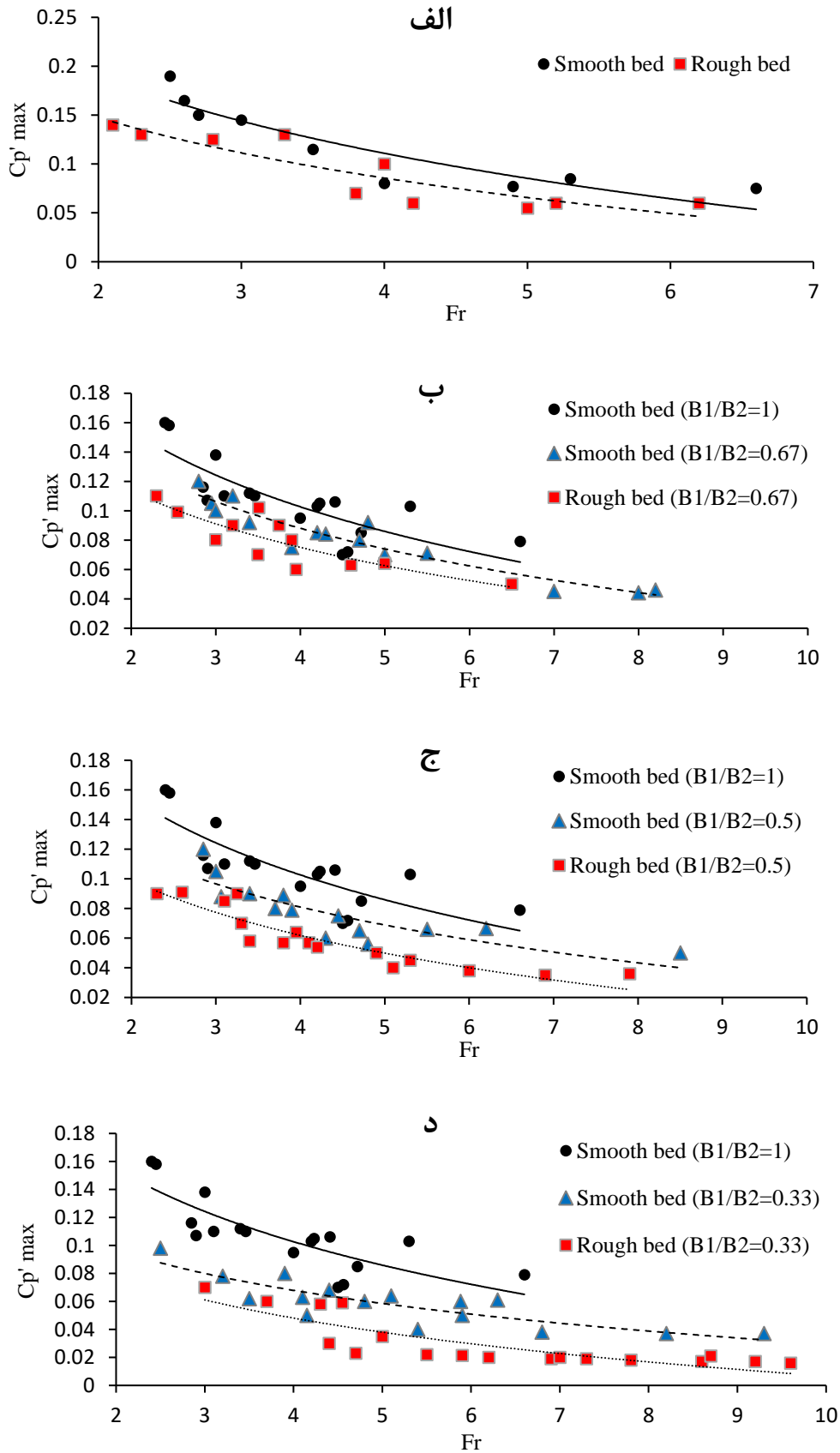
۲-۳- ضریب شدت نوسانات فشار در پرش واگرایی ناگهانی

ضریب بدون بعد شدت نوسانات فشار (C_p') برای پرش هیدرولیکی با نسبت‌های واگرایی ۰/۱۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ در بستر صاف و زبر محاسبه شده و نتایج آن به ترتیب در شکل‌های (۴) تا (۶) ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، روند تغییرات این پارامتر برای همه حالات مشابه است. در ابتدای پرش شدت نوسانات فشار افزایش یافته تا به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد. سپس سیر نزولی داشته تا اینکه در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت شده است. همچنین با افزایش عدد فرود جریان نیز ضریب C_p' کاهش می‌یابد. این امر بدین معنی نیست که با افزایش عدد فرود اولیه پرش از شدت نوسانات فشار کاسته می‌شود، بلکه علت آن رشد سریع تر انرژی جنبشی ($V_1^2/2g$) نسبت به نوسانات فشار می‌باشد. این یافته با نتایج پژوهش‌های Izadjoo and Bejestan

شکل ۵- پارامتر C_p' برای نسبت واگرایی ۰/۵ در بسترهای الف- صاف و ب- زبرFig. 5 C_p' parameter for expansion ratio of 0.5 at: a) smooth and b) rough bedsشکل ۶- پارامتر C_p' برای نسبت واگرایی ۰/۳۳ در بسترهای الف- صاف و ب- زبرFig. 6 C_p' parameter for expansion ratio of 0.33 at: a) smooth and b) rough beds

حداکثر ضریب شدت نوسانات فشار ($C_p'_{max}$) در بستر زبر، به طور میانگین در حدود ۲۰٪ نسبت به بستر صاف کاهش یابد. در بررسی تأثیر هم‌زمان وجود زبری در بستر حوضچه و ایجاد نسبت واگرایی، ملاحظه می‌شود که حداکثر شدت نوسانات فشار در بستر زبر با نسبت واگرایی ۰/۶۷ به طور متوسط ۲۷٪ نسبت به پرش صاف منشوری کاهش یافته است. همچنین در نسبت واگرایی ۰/۵ و ۰/۳۳ نرخ کاهش $C_p'_{max}$ به ترتیب ۴۶ و ۵۸٪ به دست آمده است (شکل ۷). به عنوان نتیجه، حضور هم‌زمان زبری بستر و واگرایی باعث کاهش ضریب بی‌بعد $C_p'_{max}$ شده است. جدول (۲) مقادیر کاهش ضریب $C_p'_{max}$ را در حالات مختلف واگرایی و زبری نشان می‌دهد.

۳-۳- حداکثر ضریب بدون بعد شدت نوسانات فشار
با توجه به اینکه در طراحی حوضچه آرامش حداکثر ضریب نوسانات فشار ($C_p'_{max}$) در طول پرش مورد توجه می‌باشد، لازم است تغییرات آن نسبت به عدد فرود مورد بررسی قرار گیرد. این ضریب نیز تابعی از عدد فرود جریان است. به این ترتیب تغییرات آن نسبت به عدد فرود برای نسبت‌های مختلف واگرایی در بستر صاف و زبر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۷) برای پرش منشوری، تغییرات ضریب $C_p'_{max}$ نسبت به عدد فرود اولیه برای بستر زبر و صاف ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود هم در بستر صاف و هم در بستر زبر همواره با افزایش عدد فرود اولیه مقدار ضریب $C_p'_{max}$ کاهش می‌یابد. وجود زبری در بستر حوضچه سبب شده است تا



شکل ۷- درصد کاهش ضریب $C_p'_{max}$ برای نسبت‌های واگرایی: الف- ۱، ب- ۰/۶۷، ج- ۰/۵ و د- ۰/۳۳
 Fig. 7 Reduction percentage of $C_p'_{max}$ in expansion ratios of: a) 1, b) 0.67, c) 0.5 and d) 0.33

۴- نتیجه گیری

طراحی مناسب حوضچه آرامش عامل مهمی در مدیریت و کاهش هزینه‌های ناشی از آن است. در مطالعه حاضر یکی از ویژگی‌های مهم پرش هیدرولیکی یعنی نوسانات فشار تحت اثر هم‌زمان زبری نسبی و واگرایی ناگهانی با مطالعه آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج حاصل شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

۱- با کاهش نسبت واگرایی (β) مقدار ضریب شدت نوسانات فشار کاهش می‌یابد، به طوری که ضریب C_p' در واگرایی ۰/۳۳ نسبت به پرش منشوری به شدت کاهش یافته و به حداقل خود می‌رسد.

۲- وجود زبری در بستر حوضچه باعث کاهش شدت نوسانات فشار به علت تولید گردابه‌های جانبی شده و اتلاف انرژی در حوضچه کاهش پیدا کرده است.

۳- آهنگ کاهش ماکزیمم نوسانات فشار در بستر زبر برابر ۰/۲۰، ۰/۲۷، ۰/۴۶ و ۰/۵۸ به ترتیب برای نسبت‌های واگرایی ۰/۱، ۰/۲۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ نسبت به بستر صاف محاسبه گردید.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های تولیدشده یا تحلیل شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Alhamid, A. A. (2004). S-jump characteristics on sloping basins. *J. Hydraul. Res.*, 42(6), 657-662.
- Bejestan, M. S. and Neisi, K. (2009). A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian J. Appl. Sci.*, 2(5), 436-445.
- Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev.*, 4(4), 345.
- Chanson, H. (2011). Hydraulic jumps: turbulence and air bubble entrainment. *J. Houille Blanche*, 3, 5-16.
- Daneshfaraz, R., Sadeghi, H., Rezazadeh Joudi, A. and Abraham, L. (2017). Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in contraction and expansions. *J. Eng. Nat. Sci./Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 35(1), 87-91
- Daneshfaraz, R., Majediasl, M., Mirzaee, R., Parsamehr, P. (2019). Experimental study of the roughness bed with non-continuous trapezoidal elements on S-jump characteristics in the non-prismatic rectangular channel. *Sharif J. Civil Eng.*, [In Persian].

جدول ۲- مقایسه درصد کاهش ضریب C_p' نسبت به پرش منشوری

Table 2 comparison of reduction percentage of C_p' in respect to smooth prismatic jump

Type of jump	reduction (%) of C_p'
Smooth bed and sudden expansion; $\beta = 0.67$	18
Smooth bed and sudden expansion; $\beta = 0.5$	23
Smooth bed and sudden expansion; $\beta = 0.33$	30
rough bed and prismatic jump; $\beta = 1$	20
rough bed and sudden expansion; $\beta = 0.67$	27
rough bed and sudden expansion; $\beta = 0.5$	46
rough bed and sudden expansion; $\beta = 0.33$	58

قابل ذکر است که زبری بستر با ایجاد گردابه‌های بزرگ باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. به علاوه، در مقاطع واگرایی ناگهانی به دلیل شکل‌گیری گردابه‌های جانبی، اتلاف انرژی افزایش یافته و شدت نوسانات فشار کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش با مطالعات گذشته همخوانی قابل قبولی می‌باشد. Karimi et al. (2014) در بررسی تغییرات ضریب انحراف معیار استاندارد و ضرایب حدی دریافتند که در ابتدای پرش سیر صعودی داشته تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسند. سپس با سیر نزولی مقدار آن‌ها کاهش یافته و در انتهای پرش تقریباً ثابت می‌شوند. همچنین در برخی تحقیقات نشان داده شد که زبری بستر منتج به افزایش تنش برشی و سپس کاهش نوسانات فشار می‌شود (Hassanpour et al. 2019; Torkamanzad et al. 2017).

- Ead, S. Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *J. Hydraul. Eng.*, 128(7), 656–663.
- Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., and Gualtieri, C. (2017). An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9(12), 945.
- Hosseini, D., Torabi, M. and Moghadam, M. A. (2019). Preference assessment of energy and momentum equations over 2D-SKM method in compound channels. *J. Water Resour. Eng. Manag.*, 6(1) 24-34.
- Imran, H. M. and Akib, S. (2013). A review of hydraulic jump properties in different channel bed conditions. *Life Sci. J.*, 10(2), 126-130.
- Izadjoo, F. and Shafai Bajestan, M. (2007). Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *J. Appl. Sci*, 7, 1164–1169.
- Karimi, M., Mousavi Jahromi, H. and Shafai Bajestan, M. (2014). The effect of roughness in pressure fluctuations in the stilling basin with sudden expansion. *J. Water Soil Conserv.*, 4(1), 63-78 [In Persian].
- Kato, F., Sato, S. and Yeh, H. (2000). Large-scale experiment on dynamic response of sand bed around a cylinder due to tsunami. *Int. J. Coast. Eng.*, 1848-1859.
- Kuswandi, R. and Triatmadja, R., (2019). The use of dam break model to simulate tsunami runup and scouring around a vertical cylinder. *J. Appl. Fluid Mech.*, 12(5), 1395-1406.
- Liu, Y., Zhang, D., Wu, J., Zhang, D. and Yang, M. (2020). Roughened bed stilling basin and its hydraulic jump characteristics, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 758 (1), 12082.
- Lopardo, R. A. and Romagnoli, M. (2009). Pressure and velocity fluctuations in stilling basins. *Adv. Water Resour. Hydraul. Eng.*, 2093–2098. doi:10.1007/978-3-540-89465-0_359.
- Matin, M. A., Hasan, M. R. and Islam, M. A. (2008). Experiment on hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel. *J. Civil Eng.*, 36(2), 65-77.
- Neisi, K. and Shafai Bajestan, M. (2013). Characteristics of S-jump on roughened bed stilling basin. *J. Water Sci. Res.*, 5(2), 25-34.
- Parsamehr, P., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A., Abbaspour, A. and Nasr Esfahani, M. J. (2017). Characteristics of hydraulic jump on rough bed with adverse slope. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 23(3), 301-307.
- Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jump on rough bed. *Trans. Eng. Instit. Can.*, 11(A-2).
- Sadeghfam, S., Akhtari, A., Daneshfaraz, R. and Tayfur, G. (2015). Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, 38(2), 126-138.
- Samadi-Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B., Fattahi Nafchi, R. (2013). Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Can. J. Civ. Eng.* 40(9), 841–847.
- Torabi, M., Shafieefar, M. (2015). An experimental investigation on the stability of foundation of composite vertical breakwaters. *J. Marine Sci. Appl.*, 14(2), 175-182.
- Torabi, M., Hamed, A., Alamatian, A., Zahabi, H. (2019). The effect of geometry parameters and flow characteristics on erosion and sedimentation in channels junction using finite volume method. *Int. J. Eng. Manag. Res.*, 9. DOI: 10.31033/ijemr.9.2.14.
- Torkamanzad, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Salmasi, F., and Abbaspour, A. (2019). Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed. *Water*, 11(9), 1756.
- Wu, J. H., Licheng, C. Z., Ma F., Li, T. C. and Wu, W. W. (2015). Hydraulics of crest spillway with large unit discharge and low Froude number. *J. Hydrodynam., Ser. B*, 27(2), 242-247.
- Yan, Z., Zhou, C. and Lu, S. (2006). Pressure fluctuations beneath spatial hydraulic jumps. *J. Hydrodynam., Ser. B*, 18(6), 723–726.
- Zahabi, H., Torabi, M. Alamatian, E., Bahiraei, M. and Goodarzi, M. (2018). Effects of Geometry and hydraulic characteristics of shallow reservoirs on sediment entrapment. *Water*, 10(12), 17-25.
- Zare, H. K. and Doering, J. C. (2010) Forced hydraulic jumps below abrupt expansions. *J. Hydraul. Eng.*, 137(8), 825-835.