

Comparison of Stilling Basins With Rigid and Gabion Equipment

Majid Fazli ^{1*}, Hoda Nabavi ²

1- Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Bu-Ali Sina Hamedan, Iran.

2- M.Sc. Graduated, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Bu-Ali Sina Hamedan, Iran

* mfazli@basu.ac.ir

Received: 28 January 2021, Accepted: 10 May 2021



J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The hydraulic jump is a phenomenon that occurs widely in most of hydraulic structures, such as spillways in large dams, downstream weirs and sluice gates and where the velocity of flow is very high. A hydraulic jump is to change flow condition suddenly from supercritical flow (low depth by high speed) to subcritical flow (high depth by low velocity). The Hydraulic jump can be used as energy dissipation and then limited scour at the bed of the channel. Stilling basin must be designed perfectly to ensure efficient operating over a wide range of flow. To stabilize the hydraulic jump, basin length and height reduction and application of energy dissipation additional types of equipment may be used. Baffle block is one of the equipment used to stabilize the hydraulic jump and dissipate energy by impact action. Baffle block can be used with different shapes such as cubic and trapezoidal (trapezoidal shape in section). The cubic block shape is more effective as installed respect to the best dimensions of height, width, spacing, and the best location in the basin. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR) recommended that the corners of the baffle block not be rounded because the corners are effective in producing eddies that help in energy dissipation. Previous studies showed that the model of baffle blocks circulates the jet of water in the vertical transverse direction behave best than others for dissipation of energy. Rotative jet water prevents the jump action to an extent, so there is a complete energy dissipation and reduction in the stilling basin length. However, an insufficient number of studies on gabion baffle blocks and gabion end sill in stilling basin has been developed more recently compared with studies on fixed baffle blocks and fixed end sill. Also, another insecurity that exists for the baffle blocks of stilling basin is cavitation around them, which reduced if gabion baffles used due to changes in the flow pattern conditions. In this research, the USBR stilling basin was equipped with baffle blocks and the end sill in two conditions and tested in the laboratory. In one case, the bed and the equipment of stilling basin were rigid, but in the other, the baffle blocks and the end sill was permeable and constructed with gabion by different porosity.

Methodology: The Experiments carried out at the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Engineering, the Bu-Ali Sina University of Hamedan. The flume with 15 m long, 0.6 m wide and 0.6 m deep used. In this research, the hydraulic jump stilling basin equipped with baffle blocks and end sill in different conditions. The bed of stilling basin was rigid, but the various types of baffle blocks and end sills with different permeability were used. The concrete used for constructing rigid baffle blocks and end sill, while gabion used for making permeable baffle blocks and end sill. Sand and gravel used to make baffle blocks and end sills by 30, 45 and 60

percent permeability. For creating high velocity and low flow depth to achieve a high Froude number a sluice gate were used. The sluice gate was placed 8 meters from the beginning of the flume. A butterfly gate at the end of the flume adjusts the tailwater depth. The baffle blocks and end sill dimensions and positions were according to USBR III recommendations. The experiments tested in three Froude numbers of 3.8, 4.3 and 5.1. The flow depth measured on a grid of 5 cm×5 cm using a depth gauge with an accuracy of 0.1 mm.

Results and Discussion: The use of gabions for constructing baffle blocks and end sill has been less studied so far, so the results are discussed first qualitative and then quantitative.

Qualitative description: According to the porosity of the baffle blocks and the end sill in the stilling basin, the hydraulic jumps classified into four categories. In one type of hydraulic jump, the rolling flow of the water surface ends before reaching the end sill. This type of hydraulic jump occurs in a stilling basin in which the baffle blocks and the end sill have the highest porosity which is in this study 60%. The advantages show that by decreasing the permeability of the baffle blocks and the end sills, other types of hydraulic jumps formed by the roller flow of the water surface continues after the end sill. The results also show that with reduced permeability of the baffle blocks and the end sill, the rotational flow after the end sill plunged towards the bottom of the stilling basin.

Quantitative description: After measuring the flow depth, the conjugate relative depths ratio, relative depth, relative length, relative energy loss and water surface profile for hydraulic jumps formed in the stilling basin with baffle blocks and end sill with different porosities 0, 30, 45% and 60% computed. Then, the changes of these parameters investigated according to the Froude number of the inlet flow to the stilling basin. Advantages show that by increasing the porosity of baffle blocks and end sill. The results show that by increasing the porosity of the baffle blocks and end sill, the ratio of conjugate depths decreases by the amount of this decrease increases with increasing the Froude number of the inlet flow to the stilling basin. So that for Froude number equal to 5 and porosity 60% of baffle blocks and end sill, this reduction reaches about 40%. The change in the relative depth and relative length of the hydraulic jump has a similar trend to the conjugate depths due to the increased porosity of the baffle blocks and the end sill. By the Froude number was equal to 5 and the porosity of baffle blocks and end sill was 60% o, the relative length and relative depth of the hydraulic jump reduced by about 12.5% and 12.2%, respectively of the standard condition. However, the energy loss increases with increasing the porosity of the baffle blocks and the end sill and reaches about 45% for Froude number equal to 5 and porosity 60%.

Conclusion: In this study, in addition to rigid baffle blocks and end sill, the permeable baffle blocks and permeable end sill with porosities of 30 45 and 60 per cent were used in the USBR type III stilling basin. Then the significant characteristics of hydraulic jumps in stilling basin were computed and compared for different Froude number. The results show that the gabion baffle blocks and end sill by changing the flow pattern in the stilling basin reduces the relative depth and relative length of the hydraulic jump while increasing the energy losses. The results also showed that by increasing the permeability of the baffle blocks and end sills, the energy losses increase, the relative depth and relative length of hydraulic jumps decrease.

Keywords: Hydraulic jump, Stilling basin, Porosity, Baffle blocks, End sill.

© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This 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/>)

مقایسه عملکرد حوضچه‌های آرامش با تجهیزات صلب و تجهیزات توری سنگی

مجید فضلی^{۱*}، هدی نبوی^۲

۱- استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان.

* mfazli@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از جمله روش‌های متداول برای استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین‌دست سازه‌های آبی در حوضچه‌های آرامش، پرش هیدرولیکی می‌باشد. برای کاهش ابعاد حوضچه آرامش اقدام‌هایی مانند ساخت بلوک‌های میانی، پله‌های مثبت و منفی و آستانه انتهایی به منظور هدرفت بیشتر انرژی جنبشی جریان در محدوده پرش هیدرولیکی و کاهش مشخصه‌های آن استفاده می‌شود. در این تحقیق پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش به همراه بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی برابر شرایط استاندارد حوضچه آرامش USBR III به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. با این تفاوت که در این پژوهش بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی، افزون بر حالت صلب، در حالت توری سنگی با درصد تخلخل‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد نیز بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش میزان تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی با عت کاهش طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه می‌شود. به طوری که برای تخلخل ۶۰ درصد بیشترین کاهش طول نسبی و عمق ثانویه نسبی به ترتیب به میزان ۱۲/۵ و ۱۲/۲ درصد نسبت به حالت حوضچه آرامش استاندارد USBR III رخ می‌دهد. همچنین مشاهده شد که هدرفت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با کف صلب و تجهیزات متخلخل، با افزایش درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه روند افزایشی را طی می‌کند و برای حوضچه آرامش با کف صلب و تجهیزات با تخلخل ۶۰ درصد نسبت به شرایط استاندارد افت انرژی نسبی با ۴۵ درصد افزایش همراه است.

کلید واژگان: پرش هیدرولیکی، بلوک‌های میانی، آستانه انتهایی، توری سنگی، درصد تخلخل، طول پرش.

۱- مقدمه

آن وجود دارد که پژوهشگران را برای ادامه ارزیابی‌ها در این زمینه ترغیب می‌کند. در بررسی پرش هیدرولیکی فراسنجه‌های نسبت عمق ثانویه، طول نسبی پرش و افت نسبی انرژی دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. به طور کلی، در طراحی حوضچه‌های آرامش چندین عامل از جمله: جنس پی، عدد فرود جریان ورودی، زاویه برخورد جریان با کف حوضچه آرامش، تراز سطح پایاب و ملاحظه‌های اقتصادی موثر است.

در سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی برای جلوگیری از خروج پرش و استقرار آن در درون حوضچه آرامش، از بلوک‌های میانی، پله‌های مثبت و منفی و آستانه انتهایی استفاده می‌شود (Peterka, 1983). در حوضچه‌های آرامش، اغلب از عنصرهایی

حوضچه آرامش یکی از جمله متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست تنداب‌ها هستند که بسته به شرایط تنداب و جریان آب، از انواع مختلف و استاندارد این سازه در پروژه‌ها استفاده می‌شود (Izadjoo and Shafai- Bajestan, 2007). ابعاد حوضچه آرامش به ویژگی‌های پرش هیدرولیکی به‌ویژه طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بستگی دارد. از نظر تاریخی، نخستین بار پرش هیدرولیکی توسط بیدون بررسی شد. از آن زمان تاکنون، پژوهشگران زیادی شرایط و ویژگی‌های این پدیده را بررسی کرده‌اند. با وجود این، علی‌رغم گذشت نزدیک به دو سده از آغاز بررسی‌ها در مورد پرش‌های هیدرولیکی، هنوز مسئله‌های ناشناخته‌ای در مورد

برای کنترل پرش استفاده می‌شود که می‌توان به کاربرد آن‌ها در تثبیت، کنترل، کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اشاره کرد (Nasr Esfahani and Shafai-Bajestan, 2012). در پژوهش دیگری Gohari and Farhoudi (2009) بستریهایی با زبری‌های نواری مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ را بررسی و مشاهده کردند عمق ثانویه جهش بر روی سطح‌های زبر نسبت به سطح صاف کاهش دارد و این کاهش با افزایش فاصله زبری‌ها، افزایش می‌یابد. (Salamiasl et al. (2018 در تحقیقی اجزای زبر را بر روی یک صفحه در کف فلوم در پایین دست تندآب به گونه‌ای قرار دادند که سطح بالایی آنها در زیر جت آب ورودی قرار گیرد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های پرش از جمله طول پرش و عمق مزدوج به دلیل وجود اجزای زبر کاهش می‌یابد. میزان کاهش این فراسنجه‌ها به طور متوسط به ترتیب ۳۳ و ۳۶ درصد می‌باشد و بستگی به عدد فرود و شکل اجزای زبر دارد.

(Ghavamifar (2015 به بررسی تاثیر آرایش زبری‌های A-Jacks بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نوع (A) پرداختند. A-Jacks در حقیقت قطعه بتنی است که از پیوستن دو قطعه T شکل بدست می‌آید در این تحقیق، عدد فرود جریان ورودی در محدوده ۵/۳۲۵ تا ۸/۰۹۶ بود. نتایج این تحقیق نشان داد که امان‌ها تقریباً تحت هر شش آرایش (مثلثی پیوسته، هشتی، خطی، دایره تو خالی، پروانه، مربعی) عمق مزدوج و طول پرش را نسبت به بستر صاف به طور میانگین به ترتیب ۳۶٪ و ۱۰٪ کاهش می‌دهند.

Badizadegan et al. (2014) پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با بستر سینوسی را بررسی کردند نتایج نشان داد که با به کارگیری بستر موجدار سینوسی در حوضچه آرامش، میتوان شاهد کاهش نسبت عمق‌های ثانویه به اولیه نزدیک به ۲۰ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک در این نوع از حوضچه‌ها بود. نتایج بررسی‌های Parsamehr et al. (2012) در بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل و با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد، نشان داد که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد و روی بستر زبر بیشینه ۴۴ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد.

(Minaei gigolo et al. (2016 در پژوهشی تشکیل پرش

هیدرولیکی در حوضچه آرامش با آستانه پلکانی را بررسی کردند. در این آزمایش‌ها تأثیر آستانه بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بررسی شده است. نتایج نشان داد که در شرایط یکسان جریان ورودی، آستانه پلکانی در مقایسه با آستانه شیب‌دار در تثبیت پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش تأثیر بیشتری داشته و با افزایش شمار پله‌های آستانه از ۲ به ۳ طول بیشتری از پرش هیدرولیکی بیرون از حوضچه آرامش خواهد بود. Eltoukhy (2016) در یک بررسی آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شیب حوضچه آرامش بر طول آن، ارتفاع و محل قرار دادن آب‌پایه انتهایی پرداخت. او ضمن ارائه یک رابطه برای تعیین ارتفاع آب‌پایه انتهایی در حوضچه آرامش بر حسب طول آن و عدد فرود جریان ورودی حوضچه، نتیجه گرفت که طول حوضچه و ارتفاع آب‌پایه در محدوده‌ای که طول حوضچه ۳ تا ۵ برابر تفاضل عمق‌های پیش و پس از پرش هیدرولیکی باشد با هم رابطه مستقیم دارند.

(Eshkou et al. (2015 در تحقیقی تأثیر تغییر زاویه بلوک‌های حوضچه آرامش تیپ USBR III بر روی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را بررسی و نتیجه گرفتند که درصد نرخ تغییرات اتلاف انرژی با بیشتر شدن زاویه همگرایی بلوک‌ها تا ۳۰ درجه، با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. Akbari et al. (2019) به صورت آزمایشگاهی تأثیر استفاده از بستر متخلخل در حوضچه آرامش بر روی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تخلخل بستر ابعاد مولفه‌های پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهد، به طوری که عمق ثانویه پرش ۱۵/۸ درصد و طول پرش ۲۵ درصد نسبت به حالت بستر صلب کاهش می‌یابد. و البته کاهش ابعاد مولفه‌های پرش تابعی از قطر مصالح بستر، ضخامت و طول بستر متخلخل و عدد فرود جریان ورودی است. (Mahtabi et al. (2020 به طبقه‌بندی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر پرداختند، آنان بر مبنای هدررفت انرژی در پرش‌های هیدرولیکی، آنها را به چهار طبقه تقسیم و عملکرد حوضچه‌های آرامش با بستر زبر را با حوضچه‌های آرامش با بستر صاف مقایسه کردند. با توجه به اهمیت حوضچه آرامش در استهلاک انرژی محققان دیگری نیز در جهت ملاحظات اقتصادی و فنی به منظور کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و افزایش اُفت انرژی در آن، با ایجاد زبری در کف حوضچه آرامش با استفاده از عنصرهایی به شکل‌های

مختلف یا افزودن دیواره متخلخل به حوضچه، بررسی‌هایی را انجام دادند (Abbaspour et al., 2019; Akib et al., 2015; Felder and Chanson, 2016). به‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در زمینه پرش هیدرولیکی و حوضچه آرامش صورت پذیرفته است لیکن در مورد حوضچه آرامش با کف صلب و بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی متخلخل و مقایسه آن با حوضچه آرامش با کف، بلوک میانی و آستانه انتهایی صلب تحقیقی صورت نگرفته است. و از آنجا که استفاده از بلوک‌های میانی متخلخل می‌تواند با برهم زدن الگوی جریان، خطر جدارخوردگی^۱ کاویتاسیون در پیرامون آن‌ها را نیز کاهش دهد. لذا در این تحقیق با اتکاء به ابعاد حوضچه آرامش USBR III و استفاده از کف صلب برای حوضچه آرامش و قرار دادن بلوک‌های میانی صلب و متخلخل و نیز قرار دادن آب‌پایه انتهایی صلب و متخلخل رفتار جریان در پرش هیدرولیکی و ابعاد حوضچه آرامش بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آبراهه آزمایشگاهی

آبراهه آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی عمران دانشگاه بوعلی همدان یک فلوم بتنی به طول ۱۵ متر، عرض ۶۰ سانتیمتر و ارتفاع ۰/۶ متر با دیواره‌های شفاف از جنس شیشه

۱۰ میلی‌متری است. به‌طوری که الگوی جریان قابل دیدن و عکس‌برداری است در انتهای آبراهه یک دریچه پروانه‌ای به‌منظور تنظیم عمق جریان قرار دارد. کف آبراهه بتنی بوده که توسط روکش شیشه‌ای پوشانده شده است. برای بررسی ویژگی‌های مورد نظر در این پژوهش، نیاز به داشتن بستری از جنس مصالح مختلف ناحیه‌ای به طول ۲/۵ متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر در آبراهه تعبیه شد. شکل ۱ نگاره فلوم تحقیقاتی را که در آن موقعیت سرریز مثالی اندازه‌گیری شدت جریان و دریچه کشویی تنظیم عمق ورودی به حوضچه آرامش مشخص شده است را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۲ و ۳ نیز به‌ترتیب عکس‌های دریچه کشویی تنظیم کننده عمق جریان و دریچه پروانه‌ای انتهای فلوم برای تنظیم عمق پایاب نشان داده شده است. برای ساخت کف بستر و بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی، از شن، ماسه و قلوه‌سنگ استفاده شد. عکس‌هایی از مصالح استفاده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بلوک و آستانه‌های مورد استفاده در این پژوهش، از جنس مصالح سنگی با وزن مخصوص مشخص بوده که با توری‌های فلزی (با درصد بازشدگی و سوراخ‌های متناسب با درصد تخلخل) پوشیده شده‌اند. برای تعیین چگالی مصالح سنگی آزمایش استاندارد ASTM C 127 به‌کار رفت که هدف از انجام این آزمایش اندازه‌گیری چگالی فضایی سنگدانه‌هاست.



Fig. 1 Photograph of the experimental flume

شکل ۱ نگاره آبراهه تحقیقاتی

چگالی فضایی مشخصه عمومی است که برای محاسبه حجم اشغال‌شده توسط سنگ‌دانه‌ها به‌کار برده می‌شود. پس از اندازه‌گیری چگالی سنگ‌دانه‌ها به این صورت عمل گردید که به

ازای تخلخل مورد نظر با مشخص بودن حجم هر توری، حجم سنگ مورد استفاده مشخص شده و با مشخص بودن وزن مخصوص سنگ می‌توان وزن سنگ مورد نظر را به‌دست آورد.

¹ Cavitation

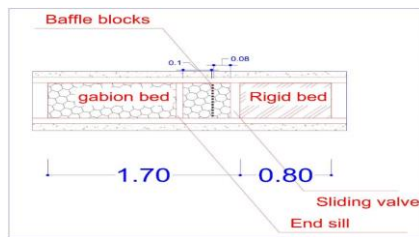
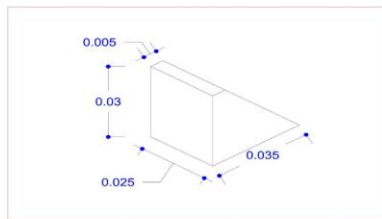
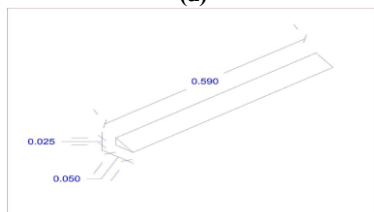


Fig. 5 Position of middle blocks and end sill in the stilling basin in meters

شکل ۵ طرح موقعیت قرارگیری بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی در حوضچه آرامش بر حسب متر



(a)



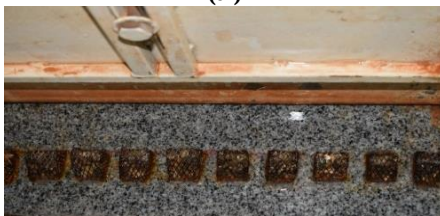
(b)

Fig. 6 Dimensions of : (a) middle blocks, (b) end sill in meters

شکل ۶ ابعاد (a) بلوک میانی ؛ (b) آستانه انتهایی بر حسب متر



(a)



(b)

Fig. 7 Stilling basins with rigid bed by middle blocks and end sill: (a) rigid, (b) gabion

شکل ۷ حوضچه‌های آرامش با کف صلب و بلوک و آستانه انتهایی (a) صلب؛ (b) متخلخل

شکل ۷ نمونه‌ای از حوضچه‌های آرامش، در شرایط کف صلب با

سپس آن قدر به توری سنگ اضافه می‌کنیم تا به وزن تعیین شده برسد. برای ثبت عمق جریان در طول پرش، از عمق‌سنجی که بر روی سامانه ریلی موجود بر روی حوضچه آرامش قرار دارد، استفاده شده است. این عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر امکان برداشت عمق در نقطه‌های مختلف و به‌ویژه عمق‌های اولیه و ثانویه پرش را فراهم می‌کرد.



Fig. 2 Photograph of sluice gate

شکل ۲ نگاره‌ای از دریچه کشویی



Fig. 3 Photograph of butterfly gate

شکل ۳ دریچه پروانه‌ای



Fig. 4 Sand and gravel to build middle blocks and end sill

شکل ۴ مصالح مورد استفاده در ساخت بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی

ابعاد آستانه و بلوک‌ها و همچنین محل قرارگیری آن‌ها برابر استاندارد USBR، حوضچه آرامش نوع III، محاسبه شد بر این مبنی در شکل ۵ پلان موقعیت قرارگیری بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی و در شکل ۶ به ترتیب ابعاد دقیق بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی نشان داده شده است. مشاهده‌های آزمایشگاهی یعنی نوع و ویژگی‌های پرش، محل تشکیل گردابه‌ها و انحنا موجود در سطح جریان و میزان نوسان پاشنه پرش با استفاده از دوربین NIKON D3400، ۲۴ مگاپیکسل با بیشینه شفافیت ۶۰۰۰ در ۴۰۰۰ ثبت شد. دبی در فلوم آزمایشگاهی از طریق سرریز مثلی واسنجی شده اندازه‌گیری می‌شد.

بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی صلب و متخلخل را نشان می‌دهد.

۲-۲- تجزیه و تحلیل ابعادی

به‌منظور یافتن رابطه بین عامل‌های مؤثر بر پرش هیدرولیکی، تجزیه و تحلیل ابعادی روی فراسنجه‌های مؤثر انجام شد. متغیرهای مستقل و مؤثر در این زمینه عبارتند از:

- عامل‌های مربوط به هندسه آبراهه: عرض آبراهه (B)، شیب طولی مجرا (S_0)، درصد تخلخل مصالح کف بستر آبراهه (O_b)
- عامل‌های مربوط به هندسه بلوک‌های میانی: ابعاد بلوک‌های میانی (h_3)، محل قرارگیری بلوک‌های میانی (L)، شمار بلوک‌های میانی (SN)، فاصله بین بلوک‌های میانی (S) و درصد تخلخل بلوک‌های میانی (O_p)

- عامل‌های مربوط به هندسه آستانه انتهایی: ارتفاع آستانه (h_4)، محل قرارگیری آستانه (L_E) و درصد تخلخل آستانه (O_p)

- عامل‌های مربوط به شرایط هیدرولیکی جریان: سرعت میانگین جریان در مقطع بالادست (V_1)، عمق اولیه پرش هیدرولیکی (y_1)، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (y_2)، عمق پایاب (y_t)، طول پرش هیدرولیکی (L_j)، دبی (Q)، اتلاف انرژی (ΔE) ارتفاع پرش ($y_2 - y_1$)، و انرژی اولیه (E_1)

- عامل‌های مربوط به کیفیت سیال: جرم مخصوص آب (ρ)، شتاب ثقل زمین (g)، لزوجت حرکتی (U) و لزوجت پویایی (μ) فراسنجه‌های بدون بعد مؤثر در پرش هیدرولیکی در بستر با بلوک و آستانه را به‌صورت تابع زیر می‌توان نشان داد:

$$\Phi = f \left(Fr_1, Re, O_p, S_0, SN, \frac{S}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{h_3}{y_1}, \frac{h_4}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{L_E}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_t}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}, \frac{y_2 - y_1}{y_2} \right) \quad (1)$$

با توجه به اینکه شیب آبراهه، ارتفاع بلوک و آستانه و فاصله آن‌ها از دریچه، شمار بلوک‌ها، فاصله بین بلوک‌ها و عرض کانال ثابت بوده، فراسنجه‌های بدون بعد S_0 ، L ، h_3 ، h_4 ، B و SN حذف می‌شوند. همچنین چون اعداد رینولدز در آزمایش‌های انجام شده بزرگتر از ۱۵۸۰۰ است لذا می‌توان از تاثیر لزوجت چشم‌پوشی کرد. از سوی دیگر، با در نظر گرفتن

فراسنجه بدون بعد کاهش عمق نسبی D برابر با:

$$D = \frac{y_2 - y_1}{y_2} \quad (2)$$

رابطه (۱) به رابطه زیر ساده می‌شود.

$$\Phi = f(Fr_1, O_p, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_t}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}, \frac{L_j}{y_2}, D) \quad (3)$$

با توجه با عدم تغییر $\frac{y_t}{y_1}$ و ثابت بودن هریک از فراسنجه‌های موجود در رابطه (۳) هنگام بررسی تاثیر دیگر فراسنجه‌ها می‌توان نوشت:

$$\frac{L_j}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}, \frac{y_2}{y_1}, D, \frac{L_j}{y_2} = f(Fr_1, O_p) \quad (4)$$

در این پژوهش، فراسنجه‌های بدون بعد نسبت عمق ثانویه به اولیه، نسبت طول پرش به عمق اولیه، کاهش عمق نسبی، نسبت هدررفت انرژی به انرژی اولیه و نسبت طول پرش به عمق ثانویه برای تغییرپذیری‌های عدد فرود و درصد تخلخل تجهیزات حوضچه آرامش بررسی می‌شود. تغییرپذیری‌های عدد فرود و دبی در کانال برابر جدول ۱ و تخلخل نیز ۳۰ درصد، ۴۵ درصد و ۶۰ درصد انتخاب شد.

جدول ۱ دبی‌ها و اعداد فرود آزمایش شده

Table 1 Discharges and Froude numbers

Q(m ³ /s)	Fr
0.028	3.7
0.0185	4.3
0.0095	5

۳- بحث و نتایج

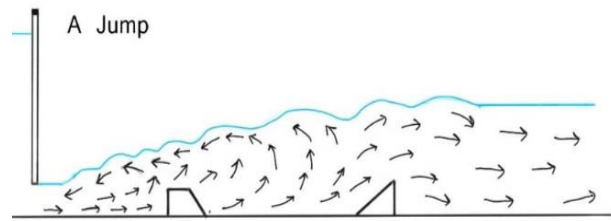
۳-۱- بحث کیفی

تقسیم‌بندی انواع پرش برحسب درصد تخلخل

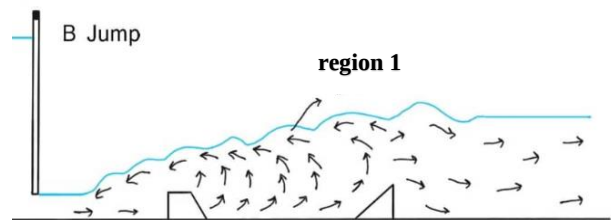
در این قسمت، انواع پرش‌های تشکیل شده با تغییر درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی توضیح داده شده است. پرش‌های تشکیل شده درون حوضچه آرامش به ۴ دسته اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۸). در این شکل، پرش‌ها، با تغییر درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی ایجاد شده‌اند. همچنین عدد فرود برابر با ۳/۷، عمق اولیه پرش هیدرولیکی برابر با ۲/۵ سانتی‌متر، فاصله ابتدای پرش از دریچه کشویی برابر با صفر، کف بستر آبراهه صلب و محل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی ثابت می‌باشد.



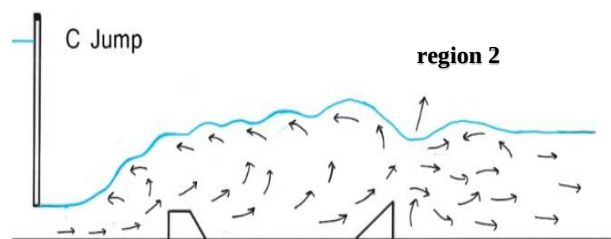
(a) hydraulic Jump type A



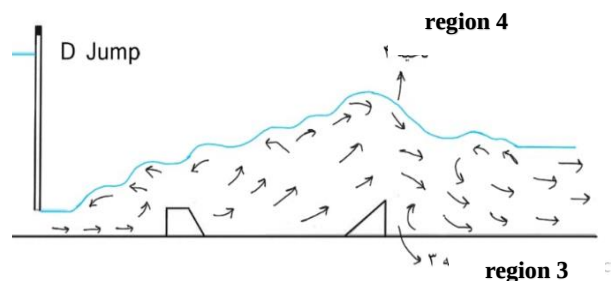
(b) hydraulic Jump type B



(c) hydraulic Jump type C



(d) hydraulic Jump type D

**Fig. 8** Different types of hydraulic jumps qualitatively with their photograph

شکل ۸ انواع پرش هیدرولیکی به صورت کیفی به همراه عکس‌های انواع پرش

بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی، ۶۰٪ است، اثر درصد تخلخل آستانه انتهایی در این نوع پرش کم است. در واقع این نوع پرش مرز بین اندرکنش و نبود اندرکنش جت و آستانه است طوری که در عمق‌های پایاب بیشتر از عمق پایایی که به ازای آن پرش نوع A رخ می‌دهد، پرش به سمت بالادست حرکت کرده و پرش تا حدود زیادی تحت تأثیر درصد تخلخل آستانه قرار نمی‌گیرد.

پرش نوع B

با کمی کاهش درصد تخلخل بلوک و آستانه نسبت به حالتی که پرش نوع A در آن تشکیل شد، در حالت بلوک و آستانه با

پرش نوع A

پرش نوع A پرشی است که تمامی سطح غلتایی یا بازگشتی پرش هیدرولیکی پیش از رسیدن به آستانه انتهایی شکل گرفته باشد، یعنی انتهای سطح غلتایی جریان بر ابتدای آستانه منطبق شود و جریان روی آستانه (جریانی که حوضچه را ترک می‌کند) تا حدود زیادی یک‌جهته و بدون سطح بازگشتی باشد. جریان با سرعت بالا (جت دیواره‌ای) که در نزدیکی بستر حرکت می‌کند، در نزدیکی آستانه از کف جدا شده و با هدایت آستانه به سمت سطح جریان منحرف می‌شود. در این نوع پرش، درصد تخلخل

بین جت و آستانه شدید است، جریان منحرف شده به سطح، حالت پاششی دارد. شیب سطح جریان در این نوع پرش با برخورد به آستانه عوض می‌شود. یعنی حالت شکستگی شیب در جلوی آستانه پدیدار می‌شود. در این نوع پرش نیز، افزایش عمق ثانویه و طول پرش نسبت به پرش نوع C مشاهده می‌شود. مقایسه بین پرش‌ها نشان می‌دهد با تبدیل پرش از نوع A به B، C و در نهایت D، برخورد بین جریان با سرعت بالا (جت دیواره) ای موجود در کف پرش هیدرولیکی) با آستانه افزایش می‌یابد. سطح جریان روی آستانه موج‌دار می‌شود و سطح غلتایی دوم پدیدار می‌شود و جریان عبوری از روی آستانه حالت برخوردی با کف پیدا می‌کند.

۲-۳- مقایسه کمی

۲-۳-۱- نسبت اعماق مزدوج در برابر تغییرپذیری‌های عدد فرود تغییرپذیری‌های $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر Fr_1 برای تمام آزمایش‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود که نسبت عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی با افزایش درصد تخلخل بلوک و آستانه روند کاهشی داشته و بیشینه کاهش در حالت استفاده از بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی با تخلخل ۶۰٪ می‌باشد که در این حالت این نسبت برای عدد فرود جریان ورودی ۵ به حدود ۱۲/۲ درصد، نسبت به حالت استفاده از بلوک میانی و آستانه صلب کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰ نیز تغییرپذیری‌های این نسبت بر حسب درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی برای اعداد فرود مختلف نشان داده شده است. در این شکل نیز به روشنی کاهش این نسبت با توجه به افزایش درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی مشاهده می‌شود.

تخلخل ۴۵٪، شکل پرش تغییر می‌کند، به‌طوری که موج‌هایی در سطح جریان بعد از آستانه پدیدار می‌شود. همچنین پاشنه پرش به سمت آستانه حرکت می‌کند. در این شرایط جت دیواره‌ای موجود در کف با آستانه برخورد کرده و به سمت سطح جریان منحرف شده و سبب پدیدار شدن ناحیه‌ی جوشش (ناحیه ۱ در شکل ۸) در سطح جریان می‌شود. تفاوت بارز پرش نوع A با پرش نوع B، وجود ناحیه‌ی جریان جوششی در سطح آب در پرش نوع B است.

پرش نوع C

با کاهش درصد تخلخل بلوک و آستانه تا ۳۰٪، بر آشفتگی سطح جریان روی آستانه افزوده شده و درگیری بین جت و تخلخل آستانه بیشتر می‌شود. با توجه به برخورد شدید جت با آستانه و هدایت جت به سمت سطح جریان، با افزایش جوشش در سطح جریان، جریان پس از آستانه حالت شیرجه‌ای پیدا می‌کند و همچنین سطح غلتاب دوم (ناحیه ۲ در شکل ۸) نیز پس از جریان شیرجه‌ای در پشت آستانه شکل می‌گیرد. تفاوت عمده پرش نوع C و پرش نوع B، تشکیل سطح غلتایی دوم و جریان شیرجه‌ای پس از آستانه است که در پرش نوع B مشاهده نشد که علت آن افزایش عمق ثانویه و طول پرش نسبت به پرش نوع B است.

پرش نوع D

با کاهش بیشتر درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه تا حالت صلب، نوسان‌های جریان عبوری از روی آستانه شدیدتر می‌شود، به‌طوری که جت با برخورد به آستانه با حالت شیرجه‌ای به کف حوضچه برخورد می‌کند (ناحیه ۳ در شکل ۸) (جریان برخوردی). همچنین ابعاد سطح غلتایی دوم (ناحیه ۴ در شکل ۸) نیز بزرگتر می‌شود. با توجه به اینکه در این نوع پرش برخورد

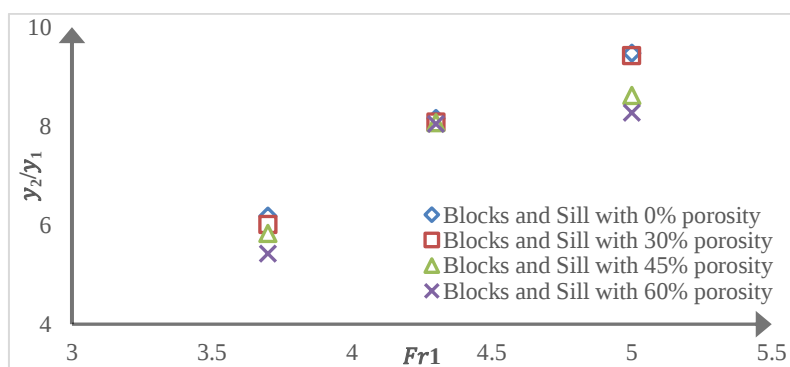


Fig. 9 The Ratio of y_2/y_1 to Froude number

شکل ۹ تغییرپذیری‌های نسبت y_2/y_1 بر حسب عدد فرود اولیه

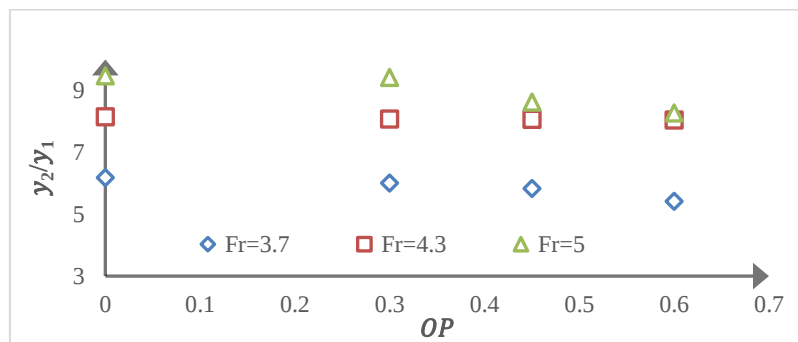


Fig. 10 The Ratio of y_2/y_1 to porosity of middle blocks and end sill

شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های نسبت y_2/y_1 بر حسب درصد تخلخل بلوک و آستانه برای پرش هیدرولیکی

نتایج نشان می‌دهد که به طور میانگین میزان عمق پایاب مورد نیاز حدود $0.78y_2$ می‌باشد که در مقایسه با عمق پایاب مورد نیاز حوضچه آرامش USBR II و USBR III که به ترتیب $0.83y_2$ و $0.97y_2$ می‌باشد، کمتر است. این مقایسه نشان می‌دهد که می‌توان حوضچه آرامشی همراه با بستر و بلوک و آستانه با درصد تخلخل مشخصی طراحی کرد که عمق پایاب مورد نیاز آن ۶ تا ۸ درصد کمتر از عمق پایاب مورد نیاز حوضچه آرامش USBR II و USBR III می‌باشد. میزان بیشینه فراسنجه کاهش عمق نسبی در این پژوهش 0.73 می‌باشد.

۳-۲-۲- تغییرپذیری‌های کاهش عمق نسبی
برای نشان دادن میزان کاهش عمق مزدوج بسترهای با بازدارنده، از ضریب بدون بعد کاهش عمق نسبی D استفاده شده است. تغییرات D در برابر Fr_1 برای تمام آزمایش‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که پارامتر بدون بعد کاهش عمق نسبی با افزایش درصد تخلخل بلوک و آستانه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در منحنی‌های فوق مشخص است، کمترین مقدار D مربوط به بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی با تخلخل 60% می‌باشد.

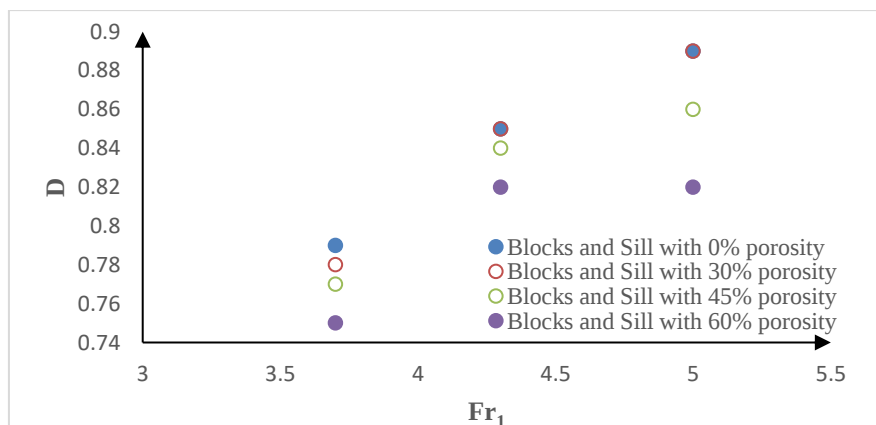


Fig. 11 The Ratio of D to Froude number for different porosity of middle blocks and end sill

شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های D بر حسب عدد فرود اولیه برای پرش هیدرولیکی برای بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی با تخلخل‌های مختلف

با تخلخل‌های مختلف را نشان می‌دهند، همان‌گونه که مشاهده می‌شود طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه روند کاهشی داشته و این کاهش با افزایش عدد فرود جریان، شدت بیشتری دارد که در این حالت

۳-۲-۳- طول نسبی پرش هیدرولیکی بر حسب عدد فرود اولیه
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بترتیب تغییرپذیری‌های طول نسبی پرش بر عمق‌های اولیه و ثانویه نسبت به تغییرپذیری‌های عدد فرود اولیه در شرایط بستر صلب با بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی

تشکیل شده در بالادست بلوک‌ها و گرداب‌های کف تشکیل شده در پایین‌دست بلوک‌ها، قسمت اعظم انرژی مستهلک گشته و در نتیجه موج ساکنی در پایین‌دست بلوک‌ها و آستانه ایجاد می‌شود. دلیل اصلی کاهش طول پرش در جهش‌های آب، بر روی بستر با بازدارنده با درصد تخلخل‌های مشخص، در مقایسه با بسترهای بدون بازدارنده، وجود تنش برشی اضافه است.

میزان‌های کاهش این نسبت برحسب عمق اولیه برای حوضچه استاندارد حدود ۱۲/۵ درصد می‌باشد.

علت اصلی کاهش طول پرش هیدرولیکی، تشدید جریان‌های ثانویه ناشی از تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی است. ولی برای ارزیابی دقیق آن نیاز به اندازه‌گیری میدان سرعت و تحلیل هیدرودینامیکی است. با قرارگیری بلوک و آستانه بر روی بستر، در درون پرش، در نتیجه ایجاد گرداب‌های سطحی

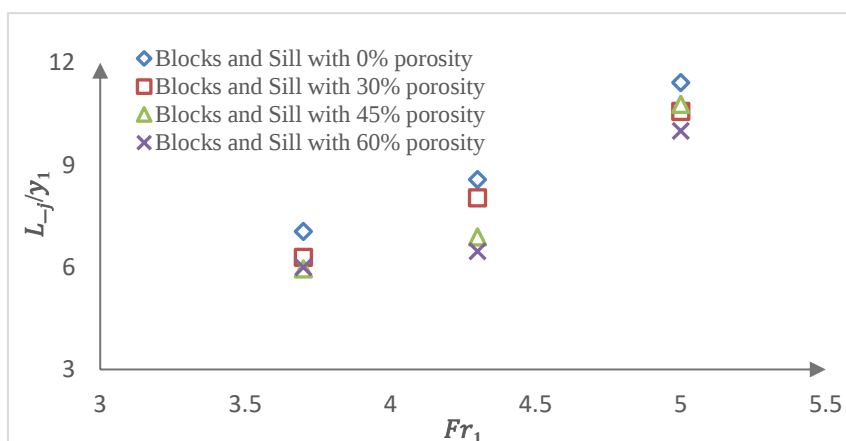


Fig. 12 The Ratio of $\frac{L_j}{y_1}$ to Froude number

شکل ۱۲ تغییرپذیری‌های نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ بر حسب عدد فرود اولیه برای پرش هیدرولیکی

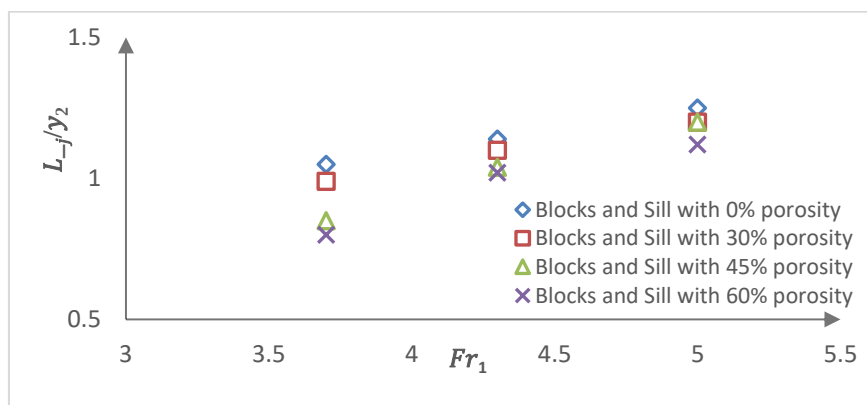


Fig. 13 The Ratio of $\frac{L_j}{y_2}$ to Froude number

شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های نسبت $\frac{L_j}{y_2}$ بر حسب عدد فرود اولیه برای پرش هیدرولیکی

۳-۲-۴- هدررفت انرژی نسبی

مرحله‌های هدررفت انرژی در پرش هیدرولیکی، اختلاف انرژی مخصوص پیش و پس از پرش است. اُفت انرژی نسبی همه آزمایش‌ها به ازای میزان‌های مختلف عدد فرود اولیه در شکل ۱۴ رسم شده است. در این نمودار، E: هدررفت انرژی می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (5)$$

که در آن، E_1 انرژی اولیه در بالادست پرش و E_2 انرژی ثانویه در پایین‌دست پرش می‌باشد. همچنین در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که هدررفت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش

درصد تخلخل بلوک و آستانه روند افزایشی را طی می‌کند. میزان بیشینه افت انرژی با حضور بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی با تخلخل ۶۰٪، در حدود ۴۵ درصد می‌باشد. در توجیه این تغییرپذیری‌ها می‌توان گفت که با توجه به این‌که با افزایش درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی عمق ثانویه

کاهش می‌یابد و توجه به این موضوع که در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیشتر است، با کاهش عمق ثانویه اختلاف انرژی در مقطع‌های اولیه و ثانویه پرش افزایش یافته و در پی آن افت انرژی افزایش می‌یابد.

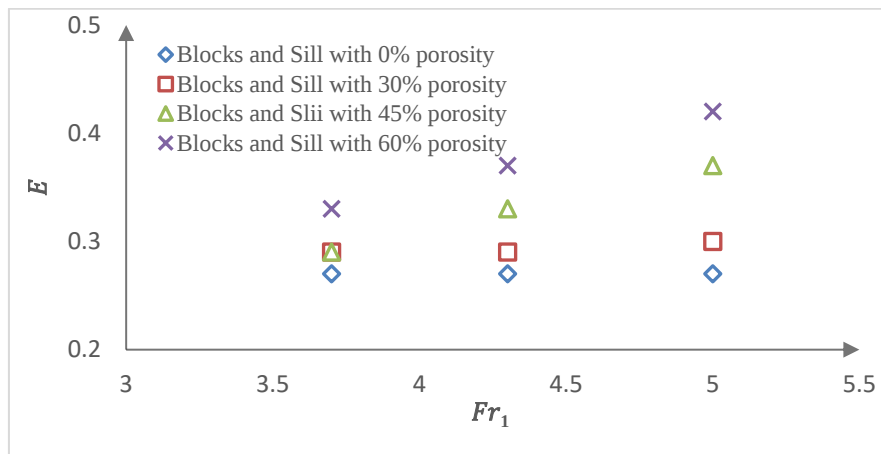


Fig. 14 The Ratio of E to Froude number

شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های E بر حسب عدد فرود اولیه برای پرش هیدرولیکی

۳-۲-۵- رخنمای سطح آب

برای بررسی رخنمای سطح آب در امتداد پرش هیدرولیکی تغییرپذیری‌های $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر $\frac{x}{L_j}$ و تغییرات $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر $\frac{L_j}{y_1}$ برای همه‌ی آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که نسبت عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی با

افزایش نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ افزایش می‌یابد.

همچنین مشاهده می‌شود که نسبت عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی با افزایش درصد تخلخل بلوک و آستانه کاهش می‌یابد و نمودار به سمت چپ میل می‌کند و این بدین معنی است که با افزایش درصد تخلخل، میزان‌های نسبت عمق‌های مزدوج و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

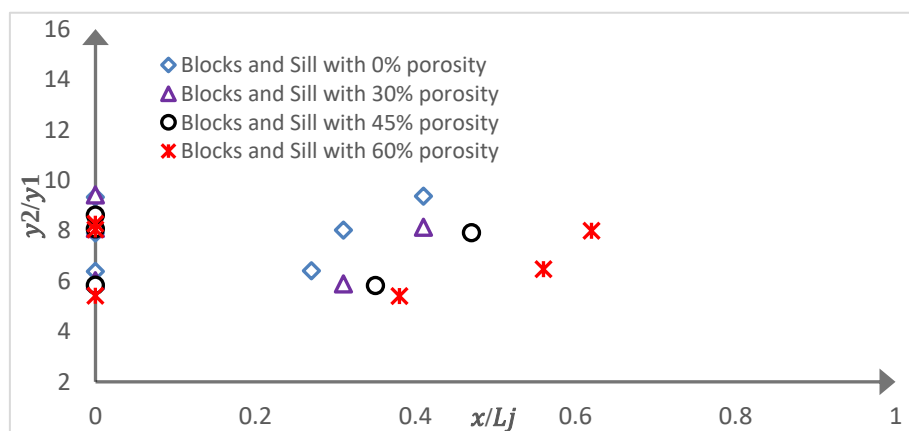


Fig. 15 The Ratio of $\frac{y_2}{y_1}$ to $\frac{x}{L_j}$

شکل ۱۵ تغییرپذیری‌های $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر $\frac{x}{L_j}$

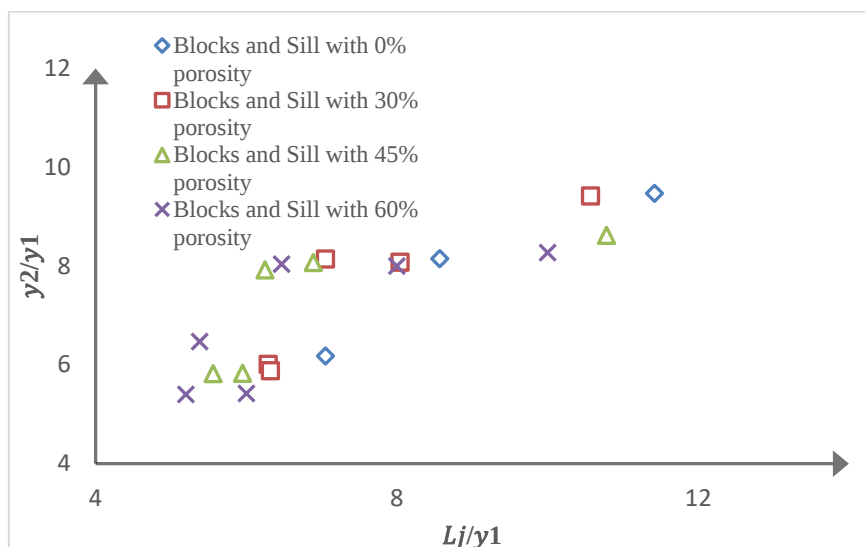


Fig. 16 The Ratio of $\frac{y_2}{y_1}$ to $\frac{L_j}{y_1}$
 شکل ۱۶ تغییرپذیری‌های $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر $\frac{L_j}{y_1}$

۴- مقایسه با نتایج کار دیگر محققان

با توجه به اینکه مهم‌ترین هدف این پژوهش بررسی عملکرد ملحقات توری‌سنگی حوضچه آرامش بر کاهش طول، کاهش عمق ثانویه و افزایش افت انرژی می باشد. لذا در جدول زیر مقایسه نتایج بدست آمده از این بررسی با نتایج برخی از محققان که در زمینه همانند تحقیق

نموده‌اند بر حسب درصد نسبت به حالت استاندارد ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود استفاده از حوضچه آرامش با تجهیزات توری‌سنگی نیز در کاهش فراسنجه‌های موثر در طراحی حوضچه آرامش عملکرد مناسبی دارد.

جدول ۲ مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج بررسی‌های دیگر محققان

Table 2 compare of advantages of current study with advantages of other researchers

Increase of head loss (%)	Decrease of sequent depth (%)	Decrease of length (%)	The most important feature of research	Researchers
-	25	54.7	Triangular corrugated bed	Ghazali et al. (2010)
Circular is more effective	11.5	Max 11	Rectangular, triangular and circular corrugated bed	Akib et al. (2015)
-	Max 30	Max 40	Permeable six legs elements	Khajeh-Goodari and Shafai- Bajestan (2017)
15	19	29	Netted perforated bed	Akbari et al. (2019)
Max 45	40.8	50	Gabion blokes and end sill	Current study (2021)

۵- جمع بندی

در این پژوهش در حوضچه آرامش نوع USBR III، از بلوک‌های میانی و آب‌پایه متخلخل با تخلخل‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد استفاده و با حوضچه آرامش استاندارد مقایسه شد. نتایج به‌دست

آمده نشان می دهد که تخلخل تجهیزات حوضچه آرامش با تغییر در الگوی جریان سبب کاهش عمق نسبی و طول پرش هیدرولیکی شده و افت انرژی نسبی در پرش هیدرولیکی را افزایش می دهد. به‌طوریکه برای عدد فرود ۵ و تجهیزات

Basin Layouts. International Journal of Civil Engineering and Technology, 7(2), 290-301.

Eshkou, Z., Ahmadi, A. and Dehghani, A. (2015). Experimental investigation of the effects of block inclinations on the hydraulic jump characteristics in the stilling basin USBR III. Journal of Water and Soil Conservation, 4, 231-242. (In Persian)

Felder, S. and Chanson, H. (2016). Air-Water Flow in Hydraulic Jumps on Macro-Roughness. 20th Australasian Fluid Mechanics Conference Perth, Australia.

Ghavamifar, A. (2015). Laboratory study of the effect of roughnesses arrangement (A-Jacks) on type(A) hydraulic jump characteristics. MSc thesis, Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. 135 p. (In Persian)

Ghazali, M., Samadi-Borojeny, H., Ghorbani, B. and Fatahi-Nafchi, R. (2010). The effect of triangular corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Iranian Water Researches Journal, 7, 99-107. (In Persian)

Gohari, A. and Farhoudi, J. (2009). The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia.

Izadjoo, F. and Shafai-Bajestan, M. (2007). Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. J of Applied Sciences, 7(8), 1164-1169.

Khajeh-Goodari, M. and Shafai-Bajestan, M. (2017). Characteristics of Hydraulic Jump on The Bed with Permeable Six Legs Elements. Journal of Irrigation Sciences and Engineering, 2, 15-25 (In Persian)

Mahtabi, G., Chaplot, B., Azamathulla, H. and Pal, M. (2020) Classification of Hydraulic Jump in Rough Beds. Water, 12, 2-11.

Minaei-gigloo, A., Ghodsian, M. and Mehraein, M. (2016). Experimental Investigation of Hydraulic Jump in stilling basin with Stepped Sill. Modares Civil Engineering Journal, 16(1), 146-156.

Nasr Esfahani, M.J. and Shafai-Bajestan, M. (2012). Effect of Roughness Height on the Length of B-jump at an Abrupt Drop, Inter. Res. J. App. Sic., 3(5), 2757-2762.

Parsamehr, P., Hosseinzadeh-Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Abbaspour, A. (2012). Hydraulic Jump on a Bed with Half Cylindrical

حوضچه با ۶۰ درصد تخلخل میزان‌های عمق نسبی و طول نسبی نسبت به حالت استاندارد به ترتیب ۸ و ۱۲/۵ درصد کاهش و افت انرژی نسبی ۴۵ درصد نسبت به حالت استاندارد افزایش می‌یابد. همچنین بلوک میانی و آب پایه انتهایی متخلخل سبب تغییرهایی در رخ‌نمای سطح آب پرش هیدرولیکی شده و به‌طور کلی سبب کاهش ارتفاع رخ‌نمای سطح آب نسبت به کف حوضچه می‌شود.

۶- فهرست نشانه‌ها

Fr_1	عدد فرود در مقطع جریان فوق بحرانی
y_1	عمق اولیه پرش هیدرولیکی، m
y_2	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، m
D	فراسنجه بی‌بعد عمق نسبی، m
X	فاصله پرش از دریچه کشویی، m
O_p	درصد تخلخل بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی، %
L	طول پرش، m
E_1	انرژی اولیه در بالادست پرش، m
E_2	انرژی ثانویه در پایین‌دست پرش، m
E	هدررفت انرژی

۷- منابع‌ها

Abbaspour, A., Taghavianpour, T. and Arvanaghi, H. (2019). Experimental study of the hydraulic jump on reverse bed with porous screens. Applied Water Scienc, 9(7), 154-161.

Akbari, N., Esmaili, K. and Khodashenas, S.R. (2019). Analytical and Experimental investigation of the Hydraulic Jump Characteristics over Permeable Beds. Journal of Hydraulics, 13(4), 1-10. (In Persian)

Akib, S. Ahmed, A.A. Imran, H.M. Mahidin, F.M. Ahmed, H.S. and Rahman, S. (2015). Properties of hydraulic jump over apparent corrugated beds. Journal of Dam Engineering, 25(2), 66-77.

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

Eltoukhy, M.A.R. (2016). Hydraulic Jump Characteristics for Different Open Channel Stilling

Shape Bars. Journal of Water and Soil, 26(3), 775-785. (In Persian)

Peterka, A.J. (1983). Hydraulic design of stilling basin and energy dissipators. Eng. Monograph No. 25, U.S. Bureau of Reclamation, 225 p.

Salamiasl, S., Fathi, A. and Ghomeshi, M. (2018). Effect of the Artificial Bed Roughness's Shape on Hydraulic Jump's Characteristics. Journal of Irrigation Sciences and Engineering, 41(2), 19-31. (In Persian)