

Experimental Study on the Effects of Rectangular Zigzag Blocks Geometry on Hydraulic Jump Characteristics in Trapezoidal Channel

Alireza Javadi ^{1*}, Ebrahim Asadi ²

1- Msc Student of Civil Department, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University.

2- Assistant Professor of Civil Department, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University.

* Ali.javadi71@yahoo.com

Received: 1 January 2021, Accepted: 3 June 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Hydraulic jump is a phenomenon in which the flow regime changes from supercritical to subcritical. The characteristics of hydraulic jump are rapid expansion of the flow with turbulence, high local energy loss and increase in the height of the free surface of the water. Due to the nature of the flow, the specific force remains constant before and after the hydraulic jump. In this phenomenon, the water depth increases in a short distance and consequently the flow velocity decreases. This increase in depth and decrease in velocity, together with a noticeable decrease in energy, causes turbulence in the flow and converts the kinetic energy of water into heat energy. The turbulence created in the stream decreases as it approaches the end of the jump. Installing obstacles with different geometries on the path of flow have an important effect on controlling the jump location, reducing the length of the hydraulic jump and increasing the energy dissipation of flow during the hydraulic jump.

Methodology: In The research flume is 6 meters in length and 60 centimeters in height. The flume is trapezoidal with a floor width of 16 cm and the side of the trapezoid has a slope of 75 degrees and in the length has a slope of zero degrees. Water is pumped from a storage tank to the reservoir at the beginning of the flume. To supply the water load required to achieve higher Froude numbers, a sediment tank at the beginning of the flume, which is cylindrical in shape, has been used. This tank is measured by a gauge with an accuracy of 1 mm to read the height of the water inside the tank. In order for the flow to be developed at the beginning of the channel, a part called the jet box is used. By controlling the opening of this part and the pump flow, the desired head in the tank can be reached as well as certain Froude numbers. A total of 60 experiments were performed. The blocks have three heights and the distance between the rows of blocks in three modes, so the arrangement of the blocks is divided into nine types. The height of the stream is considered in six different cases. To draw the jump curve, water depth was measured at three points including the end of the blocks, the point equal to the middle of the jump length, and the water depth at the end of the jump.

Results and Discussion: The ratio of the secondary depth of the hydraulic jump to the primary depth is one of the most important parameters used in the design of relaxation ponds. According to results, the ratio of hydraulic jump conjugate numbers related to the experiments of present study can be defined by the mean curve of the presented empirical relation. Comparing this formula with the experiences of previous researchers shows a good agreement.

The results of previous studies also show a decrease in the ratio of conjugate depths to smooth surface if obstacles in the waterway are used. Also, it can be said that the secondary depth of hydraulic jump is reduced, if rectangular blocks are used. To reduce this depth, increasing the height of the block has a greater effect than increasing the distance between the blocks. By shortening the length of the hydraulic jump, the length of the required pond will be shortened and it will be more economical. According to results, the length of the hydraulic jump compared to the flat bed decreased by an average of 49.5%. In a hydraulic jump, when the flow lines collide with each other, the perturbation created in the flow path, the kinetic energy related to velocity, is converted into heat energy and causes the kinetic energy of the flow to be depleted and its regime to change from supercritical to subcritical. Therefore, calculating the amount of kinetic energy consumption and jump assessment is one of the important topics in this discussion. By analyzing the ratio of energy drop to initial flow energy versus initial Froude number in all experiments, it can be said that with increasing the Froude number, the value of this ratio also increases, which in the maximum value is approximately equal to 85.5% energy loss. To determine the effect of rectangular blocks on changes in this energy loss ratio, parameter G is defined. According to results, the maximum value of this parameter is 84.8% and the minimum value is 0.8%.

Conclusion: A diagram related to the dimensionless profile of the water surface shows that the profiles related to all experiments can be defined by a regression curve with a good approximation. The ratio of sequent depths of hydraulic jump with rectangular blocks to smooth bed decreases. This decrease is more noticeable within higher Froude numbers. The maximum value of parameter D of the hydraulic jump in this study is equal to 9.4%, which indicates the effect of increasing the height and the distance between the blocks on the secondary depth of the jump. The maximum drop of flow energy on rectangular blocks is equal to 85.5%. Increasing the height of the blocks has a more effective role in reducing the flow energy than increasing the distance between the blocks.

Keywords: Dissipate of flow energy, Hydraulic jump, Physical model, Sequent depth, Zigzag blocks.



© 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/>)

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه بلوک‌های مستطیلی زیگزاگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای

علیرضا جوادی^{۱*}، ابراهیم اسدی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

* Ali.javadi71@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۳ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: وقوع پدیده پرش هیدرولیکی در کانال‌های روباز باعث کاهش سطح انرژی و تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی می‌گردد. تعبیه موانع با هندسه‌های مختلف بر مسیر جریان تاثیر مهمی بر کنترل محل پرش، کاهش طول پرش هیدرولیکی و افزایش افت انرژی جریان در طی پرش دارد. در این تحقیق اثر تغییرات ارتفاع و فاصله میان بلوک‌های مستطیلی، که به صورت زیگزاگی در کف کانال روباز دوزنقه‌ای نصب شده بود، بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی شد. مجموعاً ۶۰ آزمایش در بازه اعداد فرود ۱/۸ تا ۱۸/۸ انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی به‌طور میانگین شاهد کاهش عمق ثانویه به مقدار ۳/۶۹ درصد، کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۴۹/۵ درصد و افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی به میزان ۴۶/۳۴ درصدی نسبت به بستر صاف می‌باشد. مشاهدات بیانگر تاثیر بیشتر بلوک‌های مستطیلی زیگزاگی بر مشخصات پرش نسبت به بسترهای زبر علیرغم تراکم کمتر و همچنین اثر کمتر نسبت به بلوک‌های با طرح بدون زاویه می‌باشد. افزایش ارتفاع بلوک‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی، نسبت به فاصله میان بلوک‌ها بوده است.

کلید واژگان: افت انرژی، پرش هیدرولیکی، بلوک زیگزاگی، عمق مزدوج، مدل فیزیکی.

۱- مقدمه

برآورد پرش هیدرولیکی^۱ نوعی جریان متغیر سریع به‌شمار آمده و پدیده ای است که در آن جریان از عمق فوق بحرانی به عمق زیر بحرانی تغییر می‌کند. چنانچه دریچه‌ای در مسیر یک آبراهه منشوری با دبی ثابت قرار گیرد جریان پیش از دریچه زیر بحرانی و پس از آن فوق بحرانی خواهد بود و با رسیدن جریان به عمق یکنواخت انبساط سریع جریان توأم با آشفستگی، افت انرژی موضعی زیاد و افزایش ارتفاع سطح آزاد آب خواهد بود. با توجه به ماهیت جریان، نیروی مخصوص در پیش و پس از پرش هیدرولیکی ثابت باقی می‌ماند (Abrishami, 2008).

در این پدیده که یک متغیر سریع به‌شمار می‌آید عمق آب در فاصله کوتاهی افزایش پیدا کرده و در پی آن سرعت جریان کاهش می‌یابد. این افزایش عمق و کاهش سرعت، همراه با افت

انرژی محسوس باعث ایجاد آشفستگی در جریان شده و انرژی جنبشی آب را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند. آشفستگی جریان با نزدیک شدن به انتهای پرش کمتر می‌شود (Izadjoo and Shafai Bejestan, 2007).

حوضچه‌های آرامش به‌ندرت به‌تنهایی برای کنترل و محدود کردن کامل پرش هیدرولیکی استفاده می‌شوند زیرا نیازمند طول و ارتفاع دیواره‌های بیشتر بوده و در نتیجه هزینه‌ی اجرا آن بسیار زیاد خواهد شد، لذا بایستی تمهیدهایی به منظور کنترل بهتر پرش هیدرولیکی در نظر گرفته شود. از جمله این تمهیدها می‌توان به در نظر گرفتن مانع‌ها (بلوک) در آغاز، میانه و انتهای حوضچه آرامش اشاره کرد، بر این مبنا حوضچه‌های مختلفی توسط Peterka (1958) معرفی شده است. از پرش هیدرولیکی برای کاهش انرژی جنبشی اضافی جریان و در نتیجه جلوگیری

¹ Hydraulic Jump

Shafaei Bejestan and Nisi (2009) اندازه‌های مختلفی از زبری‌های مکعب شکل برای عدد فرود ۴/۵ تا ۱۲ را آزمایش کرد و به این نتیجه رسید که این عنصرها نیروی برشی را کاهش می‌دهند و می‌توان طول طراحی حوضچه‌های آرامش را تا ۴۰ درصد کاهش داد. (Ghazali et al. (2009) ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار مثلثی با اعداد فرود اولیه ۶/۱ تا ۱۳/۱ را بررسی کردند و نتایج نشان داد که عمق پایاب و طول پرش روی بسترهای موج‌دار مثلثی نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان به ترتیب ۲۵ تا ۵۴/۷ درصد کوچک‌تر است. (Parsamehr and Hosseinzade (2013) هیدرولیکی بر روی بستری با شیب معکوس و بلوک‌های استوانه‌ای شکل در فاصله‌های متفاوت انجام دادند. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، فاصله بین زبری‌ها، شیب معکوس و عدد فرود، عمق ثانویه پرش کاهش و افت انرژی و تنش برشی افزایش می‌یابد. در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل بر روی شیب معکوس ۱/۵ درصد، عمق مزدوج پرش نسبت به پرش کلاسیک به طور میانگین ۳۶ درصد کاهش یافت و ضریب تنش برشی به طور میانگین ۱۶ برابر بستر صاف و افقی است. (Abbaspour et al. (2014) تاثیر بستر موج‌دار سینوسی شکل بر روی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در محدوده گسترده‌تری از ارتفاع نسبی موج در بازه ۰/۳۲ تا ۱/۶ بررسی کردند.

Gandhi and Singh (2016) رابطه‌های تجربی ویژگی‌های جریان در آبراهه‌های دوزنقه‌ای را در حالت کلاسیک و همچنین با استفاده سه سری بلوک‌های بافل، در بازه اعداد فرود ۲ تا ۱۰ به دست آوردند. در این آزمایش‌ها نسبت عمق‌های مزدوج در حالت استفاده از بلوک‌ها تا میزان بیشینه ۲۹ درصد نسبت به حالت کلاسیک کاهش نشان داده است. همچنین کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان بیشینه ۴۳ درصد در صورت استفاده از بلوک بافل نسبت به حالت کلاسیک مشاهده شده است.

Hasanzadeh Vayghan et al. (2019) تاثیر قرار دادن یک پله در مسیر جریان خروجی از یک سرریز نعل‌اسبی را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها، که در آن از دو پله ۳/۸ و ۷/۶ سانتی‌متری در مسیر جریان بهره گرفته شده‌بود، بیانگر افزایش ارتفاع عمق ثانویه جریان به میزان بیشینه ۲۷۲٪ و کاهش فشار وارده به بستر حوضچه به میزان

از فرسایش پایین دست بهره می‌گیرند در نتیجه محلی که پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد باید در مقابل سایش و جدار خوردگی در اثر سرعت بالای جریان بالادست مقاوم شود. پرش هیدرولیک کلاسیک به طور گسترده‌ای توسط Rajaratnam (1966) بررسی شده است. این پژوهشگر در بررسی‌های نخستین بر روی پرش هیدرولیکی در بستر زیر مولفه بی بعد k را بنابر رابطه (۱) تعریف کرد، این مولفه به ارتفاع زبری و عمقیش از پرش هیدرولیکی وابسته است.

$$k = \frac{k_e}{y_1} \quad (1)$$

که در آن k_e بیانگر ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق اولیه جریان می‌باشد. با توجه به عدد فرود اولیه و مقدار k می‌توان نسبت عمق ثانویه به اولیه را محاسبه کرد. عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر درحالتی که k در حدود ۰/۳ تا ۰/۵ باشد در مقایسه با حالت کلاسیک (k برابر صفر) کاهش خواهد داشت. طول غلتان پرش و طول پرش نیز نزدیک به نصف حالت پرش کلاسیک کاهش می‌یابند. (Mohammad Ali (1991) از عنصرهای مکعبی شکل استفاده کرد و آنها را به صورت منظم در بستر آبراهه مستطیلی با نسبت مساحت عنصرها به کل کف برابر ۰/۱۰ نصب کرد. وی طول پرش هیدرولیکی را تابع عدد فرود اولیه ارزیابی کرد. استفاده از عنصرهای زبری در کف کانال باعث بهبود بازده پرش هیدرولیکی شد، بدین معنا که عمق ثانویه و طول غلتان پرش کاهش یافته و محل رخداد پرش تثبیت می‌شود. (Ead and Rajaratnam (2002) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ و ارتفاع‌های نسبی مختلف موج بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش نزدیک به نصف طول آن روی بستر صاف است. (Tokyay (2005) از بلوک‌های بافل و دامنه‌های موج گیر برای ثابت نگه داشتن محل پرش و کوتاه کردن طول حوضچه‌ی آرامش استفاده کرده است. وی برای گام‌های مختلف موج به عنوان زبری کف، اعداد فرود در بازه‌ی مشخص و نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه به عنوان تابعی از عدد فرود مشخص آزمایش‌هایی را انجام داده است. نتایج نشان می‌دهند برای شرایط بالادست (عمق اولیه و عدد فرود اولیه)، عمق ثانویه برای ایجاد پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در حدود ۲۰ درصد کوچک‌تر از این میزان در بستر صاف است. طول پرش بر روی بستر زبر در حدود ۳۵ درصد کمتر از حالت بستر صاف است.

بیشینه ۴۵٪ می‌باشد.

برای تامین بار آبی مورد نیاز برای رسیدن به اعداد فرود بالاتر، از مخزن آرام کننده ابتدای فلوم که استوانه‌ای شکل و دارای قطر قاعده ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، استفاده شده‌است. این مخزن توسط یک اشل با دقت ۱ میلی‌متر اندازه‌گذاری شده تا ارتفاع آب درون مخزن، بر روی آن خوانش شود. برای جلوگیری از آشفته‌گی جریان، در قسمت مابین مخزن و فلوم از بخشی به نام جعبه‌جت استفاده شده‌است که درون آن یک صفحه آرام‌کننده با روزنه‌های دایره‌ای قرار دارد، با کنترل بازشدگی دریچه این قسمت و دبی پمپ می‌توان به بار مورد نظر در مخزن و همچنین اعداد فرود مشخصی رسید. بازشدگی به میزان ۱۵ میلی‌متر بوده و به وسیله پیچ‌هایی محکم شده است تا در مقابل فشار جریان تغییر مکان و بازشدگی نداشته باشد. عمق پرش هیدرولیکی در پنج نقطه به وسیله گیج اندازه‌گیری گردید. این نقطه‌ها شامل ابتدا و انتهای پرش و سه نقطه در طول پرش به فاصله یکسان می‌باشد.

در این تحقیق از صفحه‌های مستطیلی شکل به عرض ۱ سانتی‌متر و طول ۸ سانتی‌متر استفاده شده است (شکل ۲). طول صفحات با توجه به تراکم بهینه ارائه شده در پژوهش‌های محمد علی (Mohammed Ali, 1991) و الحمید (Alhamid, 1994)، با محاسبه‌های انجام شده در راستای نزدیک‌تر کردن تراکم مدل به آن انتخاب شده‌است. این صفحات در سه نوع ارتفاعی و سه چیدمان مختلف در آبراهه تعبیه شده‌اند. ارتفاع صفحه‌های (مولفه h) به سه حالت ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری در نظر گرفته شده‌اند. صفحه‌ها در سه ردیف طولی و دو ردیف عرضی با زاویه ۹۰ درجه و زیگزگی نسبت به هم در آبراهه دوزنقه‌ای نصب شده‌اند. با محاسبه‌های انجام شده در راستای نزدیک‌تر کردن تراکم صفحه‌ها به مقدار بهینه، فاصله عرضی بین این صفحه‌ها ۱ سانتی‌متر و فاصله صفحه‌ها کناری از دیواره‌های آبراهه دوزنقه‌ای نیز ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌است. بنابر این در هر ردیف، بلوک‌های مستطیلی ۱۵/۷ درصد از سطح مقطع آبراهه را پوشش می‌دهند. فاصله طولی بین صفحه‌ها (مولفه S) نیز در سه حالت ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متری برای مقایسه تاثیر این فاصله انتخاب شده‌است (شکل ۳). در همه آزمایش‌ها، ردیف نخست بلوک‌ها در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از دریچه نصب شده‌اند.

با توجه به این که بررسی جامع‌ای در حوزه پرش هیدرولیکی و استفاده از بلوک‌ها در آبراهه‌های دوزنقه‌ای انجام نشده‌است، به این منظور برای نخستین بار، از بلوک‌های مستطیلی صفحه‌ای شکل که به صورت زیگزگی یک در میان، که زاویه ۹۰ درجه‌ای با یکدیگر دارند، در کف یک آبراهه دوزنقه‌ای استفاده شده‌است. همچنین برای درک اثر زاویه بلوک‌ها، نتایج به دست آمده با بررسی‌های پیشین پژوهشگران، که از بلوک‌های عمود بر مسیر جریان استفاده کرده‌اند، مقایسه شد. همچنین با استفاده از شش پله پایاب، امکان تثبیت پرش در فاصله‌ی معین از دریچه به‌رغم افزایش دبی ممکن شد، بنابراین آزمایش‌ها در بازه بزرگی از اعداد فرود اولیه انجام پذیرفت. ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف بررسی شد و نتایج آن در این پژوهش تجزیه و تحلیل می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام پذیرفت. فلوم تحقیقاتی دانشکده دارای ابعادی به طول ۶ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. این فلوم به صورت دوزنقه‌ای و به عرض کف ۱۶ سانتی‌متر بوده و اضلاع کناری دوزنقه دارای شیب ۷۵ درجه‌ای می‌باشد. فلوم دارای شیب صفر درجه بوده و از جنس فلز فولاد رنگ‌شده می‌باشد، دیواره‌ها نیز از جنس پلکسی‌گلس شفاف تعبیه شده‌است. در این فلوم آب از یک مخزن ذخیره به حجم ۴ متر مکعب به وسیله یک پمپ، به مخزن ابتدای فلوم پمپاژ می‌شود (شکل ۱).

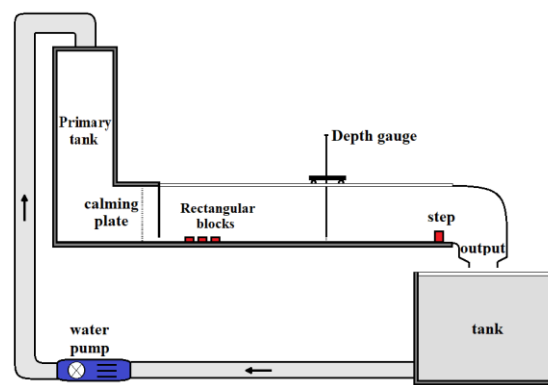


Fig.1 Overview of the research flume

شکل ۱ طرح کلی فلوم تحقیقاتی

بلوک‌ها، نقطه برابر با وسط طول پرش و همچنین عمق آب در انتهای پرش می‌باشد. در شکل ۴ نمونه‌ای از پرش تشکیل شده بر روی بلوک‌های مستطیلی در فاصله پنجاه سانتی‌متری از دریچه مشاهده می‌شود.

جدول ۱ محدوده تغییرپذیری متغیرهای این تحقیق

Table 1 The range of changes in the variables of this research

Variable	Range of changes
Blocks height (cm)	0, 2, 3, 4
Blocks distance (cm)	1, 2, 4
Froude number (Dn)	1.79 – 18.83



Fig.4 View of the jump formed in the trapezoidal canal
شکل ۴ نمایی از پرش تشکیل شده در آبراهه دوزنقه‌ای

اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به مخزن ابتدای فلوم توسط یک دبی‌سنج فراصوتی با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه که حسگر آن بر روی لوله ورودی پمپ قرار گرفته است انجام پذیرفت. همچنین اندازه‌گیری عمق در نقطه‌های نامبرده در بالا به وسیله عمق سنج^۱ با دقت ۱ میلی‌متری است انجام پذیرفته‌است. با استفاده از بررسی‌های تجربی گذشته، متغیرهای مؤثر در پرش هیدرولیکی را می‌توان به شرح رابطه (۲) بیان کرد.

$$f(L_j, y_1, y_2, V_1, \rho, g, h, s, v) = 0 \quad (2)$$

که در آن L_j طول پرش، y_1 و y_2 عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی و V_1 سرعت اولیه جریان چهار متغیر دینامیکی، ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب گرانشی و v گرانشی سیال سه متغیر سینماتیکی، h ارتفاع بلوک‌های مستطیلی و s فاصله



Fig.2 Samples of rectangular blocks used in the experiments of this research

شکل ۲ نمونه بلوک‌های مستطیلی استفاده شده در آزمایش‌های این تحقیق

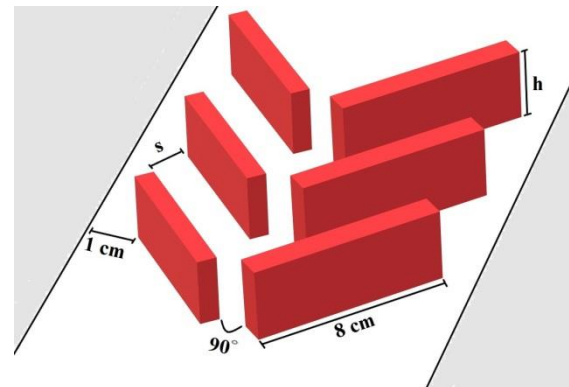


Fig.3 Zigzag plates 3d-plan in trapezoidal channel
شکل ۳ طرح سه بعدی صفحه‌های زیگزاگی در آبراهه دوزنقه‌ای

در آزمایش‌های انجام شده با توجه به تنوع ابعاد بلوک‌های تعبیه شده در مسیر جریان و تفاوت در استهلاک انرژی و همچنین بالاتر رفتن عدد فرود اولیه، عدم تشکیل پرش بر روی بلوک‌های مستطیلی امکان‌پذیر می‌باشد. در نتیجه برای ایجاد عمق پایاب مناسب و تشکیل پرش بر روی بلوک‌ها، از ۵ پله‌ی انتهایی استفاده می‌شود. این پله‌ها در خروجی فلوم قرار می‌گیرند. ارتفاع پله‌های مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند. لازم به یادآوری است در آغاز همه آزمایش‌ها در حالت بدون وجود پله پایاب بررسی می‌شود. که ویژگی‌های متغیرهای استفاده شده در این آزمایش‌ها در جدول ۱ درج شده است.

برای رسم منحنی پرش، عمق آب در وسط عرض آبراهه و در سه نقطه طول آن اندازه‌گیری شد. این نقطه‌ها شامل انتهای

¹ Point gage

آب درون مخزن اشاره می‌کند که در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق اعداد ما بین ۵ تا ۱۶۳ سانتی‌متر می‌باشد.

۳-۱- رخ‌نمای بدون بعد سطح آب

پس از ترسیم نمودارهای رخ‌نماهای مربوط به برداشت‌های آزمایشگاهی، برای ترسیم رخ‌نماهای بدون بعد، دو مولفه بدون بعد تعریف شد. مولفه محور افقی که برابر با $(\frac{x}{L_j})$ که در آن x بیانگر فاصله محل خوانش عمق از دریچه و L_j معادل طول پرش هیدرولیکی است. برای محور عمودی نیز $(\frac{y-y_1}{y_2-y_1})$ که در آن y برابر با عمق خوانش شده، y_1 برابر با عمق اولیه آب و y_2 برابر با عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌باشد، تعریف شد. به منظور به‌دست آوردن معادله رخ‌نمای بدون بعد سطح آب در آزمایش‌های انجام پذیرفته شده، از نرم‌افزار Curve expert استفاده شد (شکل ۵).

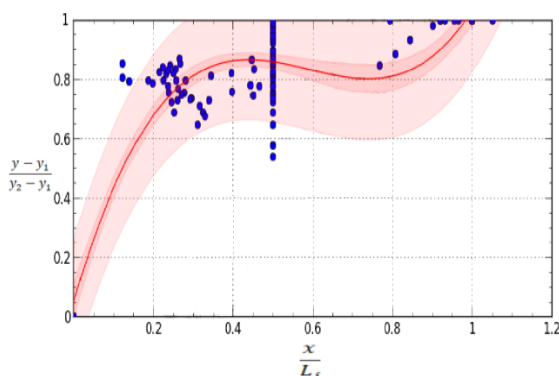


Fig.5 Dimensionless profile of hydraulic jump on rectangular blocks

شکل ۵ رخ‌نمای بی‌بعد پرش هیدرولیکی بر روی بلوک‌های مستطیلی

برابر این نمودار رخ‌نمای بی‌بعد پرش هیدرولیکی مربوط به آزمایش‌های این تحقیق را می‌توان با منحنی میانگین رابطه (۶) تعریف کرد.

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = 4.72 \left(\frac{x}{L_j}\right)^3 - 8.39 \left(\frac{x}{L_j}\right)^2 + 4.61 \left(\frac{x}{L_j}\right) + 0.05 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.88$$

معادله این نمودار در حالت بستر صاف به صورت رابطه (۷) تعریف شد.

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = 1.33 \left(\frac{x}{L_j}\right)^3 - 2.38 \left(\frac{x}{L_j}\right)^2 + 1.49 \left(\frac{x}{L_j}\right) + 0.56 \quad (7)$$

بلوک‌های مستطیلی نیز دو متغیر هندسی می‌باشد. در نتیجه با استفاده از نظریه پی-باکینگهام و در نظر گرفتن مولفه‌های ρ ، g و y_1 به عنوان متغیرهای تکراری، می‌توان مولفه‌های بی‌بعد تاثیرگذار بر جریان را برابر رابطه (۳) به دست آورد.

$$f\left(\frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{s}{y_1}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, Re_1 = \frac{V_1 y_1}{\nu}\right) = 0 \quad (3)$$

بنابر بررسی‌های (Rajaratnam, 1966) اگر عدد رینولدز بیش از ۱۰۰۰۰ باشد، می‌توان از نیروی لزجت صرف نظر کرد، در نتیجه مولفه‌های بی‌بعد این تحقیق را می‌توان به صورت رابطه (۴) خلاصه کرد.

$$\frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f\left(\frac{h}{y_1}, \frac{s}{y_1}, Fr_1\right) \quad (4)$$

در نتیجه برابر رابطه (۴) می‌توان گفت که اعداد بی‌بعد نسبت عمق‌های مزدوج و همچنین طول پرش به عمق اولیه، تابعی از عدد فرود اولیه جریان و همچنین ارتفاع و فاصله بلوک‌های مستطیلی شکل می‌باشد که در آزمایش‌های انجام پذیرفته اندازه‌گیری و بررسی شد.

۳- نتایج و تحلیل

در این پژوهش در جمع ۶۰ آزمایش انجام گرفته‌است که متشکل از ده دسته‌بندی بلوک‌های مستطیلی و شش ارتفاع مختلف پایاب می‌باشد. در نمودارهای به دست آمده از این آزمایش‌ها، دسته‌بندی بلوک‌های مستطیلی به صورت h_i که بیانگر ارتفاع بلوک و s_i که بیانگر فاصله بین ردیف بلوک‌ها می‌باشد، بیان شده‌است. در آغاز پیش از انجام آزمایش‌ها تعیین مقدار ضریب فشردگی (C_c) مربوط به دریچه مورد استفاده در آبراهه دوزنقه‌ای لازم می‌باشد. بنابر این پیش از آغاز آزمایش‌ها با برداشت‌هایی که در بارهای معین مورد استفاده در آزمایش‌های اصلی انجام گرفت و همچنین استفاده از رابطه (۵) که توسط Beyrami (2006) برای محاسبه این ضریب ارائه شده است، ضریب فشردگی دریچه میانگین برابر با ۰/۶۱ می‌باشد. که این میزان برابر با میزان توصیه شده توسط Beyrami (2006) نیز می‌باشد.

$$C_c = 0.57 + \frac{0.043}{1.1 - \frac{w}{y_0}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، w بیانگر مقدار باز شدگی دریچه است که در آزمایش‌های مربوط به این پژوهش برابر با ۱/۵ سانتی‌متر می‌باشد. y_0 نیز به میزان عمق آب پیش از دریچه یا همان بار

بنابر شکل ۶ میزان میانگین کاهش نسبت عمق‌های مزدوج در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی نسبت به بستر صاف برابر با ۳/۶۹ درصد می‌باشد. نسبت اعداد مزدوج پرش هیدرولیکی مربوط به آزمایش‌های این تحقیق را می‌توان با منحنی میانگین رابطه (۹) تعریف کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.843Fr_1 + 1.9331 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.91$$

رابطه بالا در حالت بستر صاف به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.733Fr_1 + 0.0819 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.99$$

مقایسه دو رابطه (۹) و (۱۰) بیانگر تاثیر بلوک‌های مستطیلی بر کاهش نسبت عمق‌های مزدوج می‌باشد. که این میزان با افزایش عدد فرود چشمگیرتر خواهد شد. در ادامه به مقایسه رابطه (۹) با تجربه‌های محققان پیشین می‌پردازیم:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1146Fr_1 \quad (11)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1223Fr_1 - 0.0365 \quad (12)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.047Fr_1 - 0.5902 \quad (13)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.853Fr_1 - 1.3839 \quad (14)$$

در رابطه (۱۱) که توسط Abbaspour (2010) بیان شده است، ویژگی‌های پرش در بستر موج دار سینوسی بررسی شده است. در رابطه (۱۲) که توسط Tokyay (2005) بیان شده، ویژگی‌های پرش در بستر موج‌دار مثلثی شکل بررسی شده است. در رابطه (۱۳) که توسط Izadjoo and Shafai Bejestan (2007) بیان شده، پرش بر روی بستر موجدار دوزنقه‌ای شکل بررسی شده است. در رابطه (۱۴) که توسط Sedighi (2017) بیان شده است، ویژگی‌های پرش با تأثیر توأم صفحه‌های مستطیلی و بازشدگی جریان بررسی شده است. با مقایسه این رابطه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که در اعداد فرود بالاتر، بلوک‌های مستطیلی عملکرد بهتری نسبت به بسترهای موجدار خواهند داشت، اما با توجه به تراکم کمتر سطح مقطع بلوک‌ها نسبت به بسترهای موجدار، در اعداد فرود پایین عملکرد بستر موجدار بهتر می‌باشد. همچنین با مقایسه این نوع از چیدمان با بلوک‌های مستطیلی بدون زاویه، متوجه عملکرد بهتر بلوک‌های بدون زاویه در همی اعداد فرود خواهیم شد، که با توجه به استفاده توأم با بازشدگی آبراهه و همچنین بیشتر بودن سطح مقطع بلوک در برابر جریان، قابل پیش‌بینی می‌باشد. نتایج به دست آمده از

$$R^2 = 0.9$$

با مقایسه رابطه‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود که شیب نمودار مربوط به بستر آزاد بسیار کمتر است. همچنین مقایسه رابطه (۶) با یکی از تجربه‌های محققان پیشین نشانگر تقریب نزدیک آن‌ها می‌باشد.

$$\frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_1} = 2.93 \left(\frac{x}{L_j}\right)^3 - 6.49 \left(\frac{x}{L_j}\right)^2 + 4.87 \left(\frac{x}{L_j}\right) + 0.12 \quad (8)$$

در رابطه (۸) که توسط Nazhdali and Esmaeili (2012) ارائه شده است، ویژگی‌های پرش در بر روی زبری‌های مثلثی بررسی شده است. مقایسه رابطه‌های (۶) و (۸) بیانگر بزرگتر بودن شیب اولیه پرش و افزایش عمق چشمگیر در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی است، علت این پدیده که در محل وجود بلوک‌های مستطیلی رخ می‌دهد، آشفتگی‌های شدیدتر نسبت به زبری‌های مثلثی و وجود جریان‌های غلتابی در جهت‌های مختلف ناشی از برخورد آب با بلوک‌های زیگزاگی است. این آشفتگی‌ها افت انرژی شدید جریان را در پی دارد، به گونه‌ای که پس از آن جریان به سرعت از حالت آشفتگی خارج و عمق آب تغییر بسیار نامحسوسی خواهد داشت.

۳-۲- نسبت عمق‌های مزدوج

نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به عمق اولیه از مهم‌ترین مولفه‌های مورد استفاده در طراحی حوضچه‌های آرامش می‌باشد، کاهش این میزان موجب کاهش ارتفاع دیواره حوضچه آرامش و همچنین تا حدودی کاهش ارتفاع آزاد حوضچه آرامش می‌گردد، در نتیجه از منظر اقتصادی نیز دارای اهمیت می‌باشد (Hosseini and Abrishami, 2006).

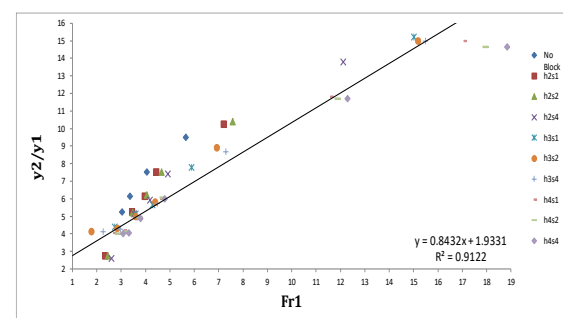


Fig.6 Changes in the ratio of Sequent depths to froude number

شکل ۶ تغییرپذیری نسبت عمق‌های مزدوج با عدد فرود

تیز کوتاه تر شده و در نتیجه از نظر اقتصادی صرفه بیشتری خواهد داشت. برای مقایسه داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها، مولفه بی بعد $\frac{L_j}{y_1}$ تعریف شده است. نمودار شکل ۸، که نشان دهنده تغییرپذیری این مولفه در برابر عدد فرود اولیه جریان می‌باشد، نشانگر کاهش طول پرش هیدرولیکی، در صورت تعبیه بلوک‌ها، نسبت به بستر صاف در اعداد فرود نزدیک به هم می‌باشد. به طور میانگین با استفاده از بلوک‌های مستطیلی طول پرش هیدرولیکی نسبت به بستر صاف ۴۹/۵ درصد کاهش داشته‌است.

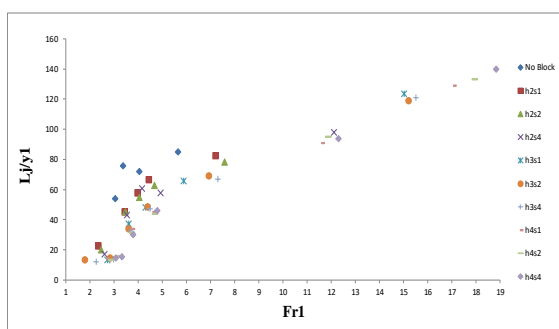


Fig.8 Changes in the relative number of the hydraulic jump length with the froude number

شکل ۸ تغییرپذیری عدد نسبی طول پرش هیدرولیکی با عدد فرود

نسبت طول پرش هیدرولیکی به عمق اولیه مربوط به آزمایش‌های این تحقیق را می‌توان با منحنی میانگین رابطه (۱۶) تعریف کرد:

$$\frac{L_j}{y_1} = -0.355Fr_1^2 + 13.99Fr_1 - 8.54 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.87$$

برای تعیین تاثیر بلوک‌های مستطیلی بر تغییرپذیری این نسبت نیز، مولفه J به صورت رابطه (۱۷) تعریف شد.

$$J = \frac{L_{jmin} - L_{jmax}}{L_{jmin}} * 100 \quad (17)$$

بدین گونه که L_{jmin} بیانگر کوتاه‌ترین طول جهش در عمق پایاب یکسان و L_{jmax} بیانگر بلندترین طول جهش در همان عمق پایاب می‌باشد. با مشاهده نمودار شکل (۹) می‌توان بیان داشت که در اعداد فرود نزدیک به هم نوع h4s4 کوتاه‌ترین طول پرش را داشته‌است. برابر شکل، میزان بیشینه این مولفه برابر ۸۰ درصد و میزان کمینه آن ۰ درصد می‌باشد.

مطالعات پیشین محققان دیگر نیز نشان‌دهنده کاهش نسبت اعماق مزدوج به سطح صاف در صورت استفاده از موانع در مسیر آب می‌باشد. از نتایج کاربردی کاهش نسبت عمق‌های مزدوج می‌توان به کاهش هزینه‌های اجرای دیواره‌های حوضچه‌های آرامش اشاره کرد.

برای تعیین اثر بلوک‌های مستطیلی بر تغییرهای این نسبت، مولفه D به صورت رابطه (۱۵) تعریف شده‌است.

$$D = \frac{y_{min} - y_{max}}{y_{min}} * (-100) \quad (15)$$

y_{min} بیانگر کمترین عمق ثانویه پرش و y_{max} بیانگر بیشترین عمق ثانویه پرش در پایاب یکسان می‌باشد. بزرگ‌تر شدن این مولفه که توسط Ead and Rajaratnam (2002) ارائه گردید، نشانگر افزایش هدررفت انرژی در پرش هیدرولیکی می‌باشد. با مشاهده نمودار می‌توان گفت که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی کاهش می‌یابد. همچنین برای کاهش این عمق، افزایش ارتفاع بلوک تاثیر بیشتری نسبت به افزایش فاصله بین بلوک‌ها دارد. کاهش عمق ثانویه، در اعداد فرود بالاتر نامحسوس‌تر است. علت این پدیده، بیشتر شدن افت نسبی انرژی در بستر صاف و کمتر شدن اختلاف آن با حالت بستر با بلوک‌های مستطیلی می‌باشد. برابر شکل ۷، میزان‌های بیشینه و کمینه مولفه D به ترتیب برابر با ۹/۴ درصد و صفر درصد می‌باشد.

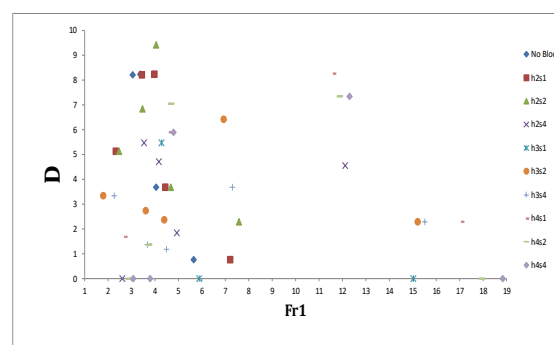


Fig. 7 Diagram of the difference in the secondary depth of the jump against froude number

شکل ۷ نمودار اختلاف عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود

۳-۳- طول پرش هیدرولیکی

یکی دیگر از مولفه‌های مهم در طراحی حوضچه‌ها، چه از منظر اقتصادی و چه از منظر سازه‌ای، طول پرش هیدرولیکی می‌باشد. با کوتاه‌تر شدن طول پرش هیدرولیکی، طول حوضچه مورد نیاز

درصد می‌باشد.

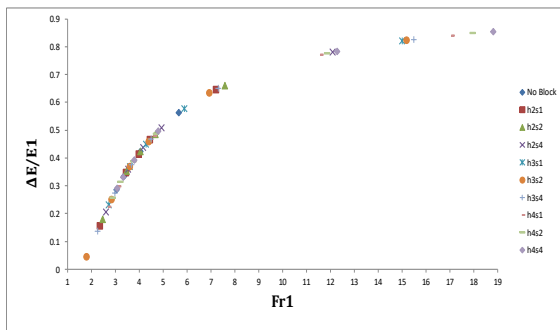


Fig.10 Graph of the ratio of energy drop to initial energy against froude number

شکل ۱۰ نمودار نسبت افت انرژی به انرژی اولیه در برابر عدد فرود

نسبت افت انرژی به عدد فرود اولیه مربوط به آزمایش‌های این تحقیق را می‌توان با منحنی میانگین رابطه (۱۹) تعریف کرد:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0045Fr_1^2 + 0.129Fr_1 - 0.055 \quad (19)$$

$$R^2 = 0.96$$

برای تعیین تاثیر بلوک‌های مستطیلی بر تغییرپذیری این نسبت افت انرژی نیز، مولفه G به صورت رابطه (۲۰) تعریف شده است.

$$G = \frac{El - El'}{El'} * 100 \quad (20)$$

بدین گونه که El بیانگر افت انرژی در بستر صاف و El' بیانگر افت انرژی در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی می‌باشد.

برابر شکل ۱۱، میزان بیشینه این مولفه برابر ۹۰/۱ می‌باشد. به بیان دیگر نرخ هدررفت انرژی در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی زیگزاگی نسبت به بستر صاف به میزان تا بیشینه ۹۰/۱ درصد افزایش می‌یابد. نرخ هدررفت انرژی با افزایش عدد فرود اولیه جریان، کاهش می‌یابد که با نتایج بررسی‌های Abbaspour (2009) همخوانی دارد. علت این پدیده افزایش افت نسبی انرژی در بستر صاف با افزایش عدد فرود اولیه می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

جمع‌بندی نتیجه‌گیری‌های به عمل آمده از آزمایش ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بر روی بلوک‌های مستطیلی شکل با چیدمان زیگزاگی به صورت خلاصه در ادامه آمده است.

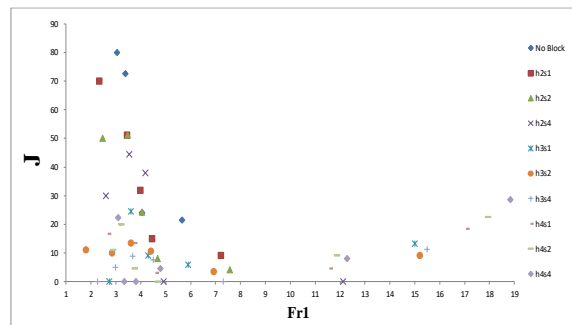


Fig.9 Diagram of the difference between the hydraulic jump length and the froude number

شکل ۹ نمودار اختلاف طول پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود

۳-۴- استهلاک انرژی

در یک پرش هیدرولیکی با برخورد خطوط جریان به یکدیگر آشفتگی ایجاد شده در مسیر جریان، انرژی جنبشی مربوط به سرعت، تبدیل به انرژی گرمایی شده و باعث استهلاک انرژی جنبشی جریان و تغییر رژیم آن از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی می‌شود. لذا محاسبه میزان استهلاک انرژی جنبشی و ارزیابی پرش یکی از موضوع‌های مهم این بحث می‌باشد. افت انرژی (ΔE) برابر با میزان کاهش انرژی مقطع اولیه (E_1) به انرژی مقطع ثانویه (E_2) در طی پدیده پرش می‌باشد. رابطه (۱۸) که توسط Hager (1992) ارائه شده است، بیانگر افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی می‌باشد.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1}\right)^2 \quad (18)$$

در شکل ۱۰ نمودار افت نسبی انرژی به انرژی اولیه جریان در برابر عدد فرود اولیه نشان داده شده است. بنابر نمودار با افزایش عدد فرود میزان این نسبت نیز افزایش می‌یابد، این افزایش با نتایج گزارش شده توسط Abbaspour (2009) نیز همخوانی نشان می‌دهد. بیشترین میزان افت انرژی برابر با ۸۵/۵ درصد می‌باشد. دلیل این افزایش در افت نسبی انرژی، آشفتگی‌ها و تداخل‌های بیشتر جریان در اعداد فرود بالاست. بنابر این می‌توان بیان داشت که استفاده از بلوک‌های مستطیلی زیگزاگی در مسیر جریان میزان بسیار زیادی از انرژی تخریب‌کننده جریان را مستهلک کرده و در نتیجه باعث کارآمدتر شدن حوضچه‌ها و جلوگیری از تخریب پایین دست می‌شود. همچنین بنابر نمودار شکل ۱۰ میزان میانگین افزایش افت نسبی انرژی در حالت استفاده از بلوک‌های مستطیلی نسبت به بستر صاف برابر با ۴۶/۳

صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی، نسبت به بستر صاف است. علت این افزایش، آشفتنگی‌های بیشتر جریان در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی است.

۵- فهرست نشانه‌ها

b_s	عمق پایاب (cm)
C_c	ضریب فشردگی دریچه (بی بعد)
D	ضریب اختلاف عمق ثانویه (بی بعد)
E_1	سطح انرژی مقطع اولیه (cm)
E_2	سطح انرژی مقطع ثانویه (cm)
Fr_1	عدد فرود اولیه (بی بعد)
G	اختلاف افت انرژی (بی بعد)
g	شتاب گرانش ($m \cdot s^{-2}$)
h	ارتفاع بلوک‌های مستطیلی (cm)
J	ضریب اختلاف طول پرش (بی بعد)
L_j	طول پرش هیدرولیکی (cm)
L_{jmin}	کمترین طول پرش (cm)
L_{jmax}	بیشترین طول پرش (cm)
P	ارتفاع پله پایاب (cm)
Q	دبی جریان ($cm^3 \cdot s^{-1}$)
R^2	ضریب تشخیص معادله (بی بعد)
Re_1	عدد رینولدز اولیه (بی بعد)
S	فاصله ردیف بلوک‌های مستطیلی (cm)
V_1	سرعت اولیه جریان ($cm \cdot s^{-1}$)
w	بازشدگی دریچه (cm)
X_s	فاصله پرش از دریچه (cm)
y_0	عمق آب پیش از دریچه (cm)
y_1	عمق اولیه جریان (cm)
y_2	عمق ثانویه جریان (cm)
y_{min}	کمترین عمق ثانویه (cm)
y_{max}	بیشترین عمق ثانویه (cm)
ΔE	افت سطح انرژی جریان (cm)

۶- سپاسگزاری

شایسته است از کارکنان مسئول آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده محل تحصیل که اینجانب را در به انجام رساندن این مهم یاری کردند قدردانی به عمل برسد.

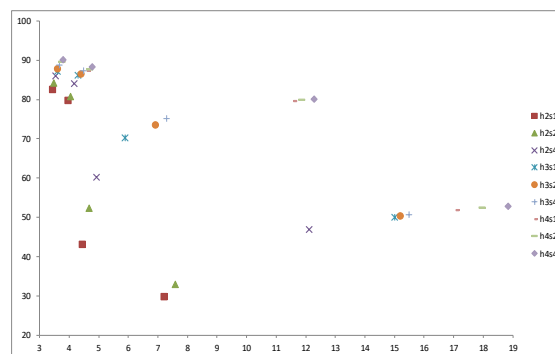


Fig. 11 Diagram of the difference between the flow energy drop and the froude number

شکل ۱۱ نمودار اختلاف افت انرژی در برابر عدد فرود

۱. نمودار مربوط به رخ‌نمای بی‌بعد سطح آب نشانگر این است که رخ‌نماهای مربوط به همه آزمایش‌ها را می‌توان توسط یک منحنی رگرسیون با تقریب مناسب تعریف کرد.
۲. نسبت عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی با بلوک‌های مستطیلی نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. این کاهش، با افزایش عدد فرود محسوس‌تر می‌باشد. میزان میانگین کاهش این مولفه در صورت استفاده از بلوک‌های مستطیلی نسبت به بستر صاف برابر با ۳/۶۹ درصد می‌باشد.
۳. میزان بیشینه مولفه D پرش هیدرولیکی در این تحقیق برابر ۹/۴ درصد می‌باشد، که بیانگر تاثیر افزایش ارتفاع و همچنین فاصله مابین بلوک‌ها بر روی عمق ثانویه پرش است.
۴. طول پرش هیدرولیکی بر روی بلوک‌های مستطیلی نسبت به بستر صاف کوتاه‌تر است. به طور میانگین با استفاده از بلوک‌های مستطیلی طول پرش هیدرولیکی نسبت به بستر صاف ۴۹/۵ درصد کاهش داشته‌است.
۵. میزان بیشینه پارامتر L پرش هیدرولیکی در این تحقیق برابر با ۸۰ درصد می‌باشد، که بیانگر تاثیر افزایش ارتفاع و همچنین فاصله مابین بلوک‌ها بر روی طول پرش است.
۶. بیشینه هدرفت انرژی جریان بر روی بلوک‌های مستطیلی برابر با ۸۵/۵ درصد و میزان افزایش میانگین آن نسبت به بستر صاف برابر با ۴۶/۳ درصد می‌باشد. افزایش ارتفاع بلوک‌ها، نسبت به افزایش فاصله میان بلوک‌ها، نقش موثرتری در کاهش انرژی جریان دارد. همچنین با افزایش عدد فرود میزان استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد.
۷. میزان بیشینه مولفه G پرش هیدرولیکی در این تحقیق برابر ۹۰/۱ درصد می‌باشد، که نشانگر افزایش نرخ اتلاف انرژی در

characteristics. *Journal of Water and Soil*, 26(2), 282-289. (In Persian)

Parsamehr, P. and Hosseinzade, A. (2013). Experimental study of the effect of rough bed on the relative conjugate depth of hydraulic jump on the reverse slope. *Journal of Irrigation Engineering Sciences*, 36(1), 89-101. (In Persian)

Peterka, A.J. (1958). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters*, Denver, Colorado, 240 p.

Rajaratnam, N. (1966). The hydraulic jump in sloping channels. *Irrigation and Power*, 32(2), 137-149.

Shafaei Bejestan M., and Nisi, K. (2009). Investigation of hydraulic jump sequent depth under the influence of rough floor components. *Journal of Soil and Water Science*, 19(1), 165-176. (In Persian)

Tokyay, N.D. (2005). Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Impacts of Global Climate Change Conference*, EWRI, Anchorage, Alaska, USA, 408-416.

۷- منابع

Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farshadizadeh, D., and Sadraddini, A.A. (2010). Numerical Simulation of Hydraulic Jump on Corrugated Bed Using FLUENT Model. *Journal of Water and Soil Science*, 20(2), 83-96. (In Persian)

Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farshadizadeh, D. and Sadraddini, A.A. (2014). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *J of Hydro-environment Research*, 3, 109-117.

Abrishami, J., and Hosseini, S.M. (2008). *Hydraulics of open canals*, Astan Quds Razavi Publications, 614 p.

Alhamid, A.A. (1994). Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins. *Transaction on Ecology and the Environment*, 8, 39-46.

Beyrami, M.K. (2006). *Water transmission structures*. Isfahan University of Technology Publications, 462 p.

Ead, S.A. and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jump on corrugated bed. *J of Hydraulic Engineering*, ASCE, 128(7), 656-663.

Gandhi, S. and Singh, R.P. (2016). Empirical Formulation of Flow Characteristics in Trapezoidal Channels. *Journal of The Institution of Engineers (India)*. 97(3), 247-253.

Ghazali, M. (2010). The effect of triangular corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Water Research*. 4(7), 99-108. (In Persian)

Hasanzadeh Vayghan, V., Mohammadi, M. and Ranjbar, A. (2019). Experimental Study of the Rooster Tail Jump and End Sill in Horseshoe Spillways. *Civil Engineering Journal*. 5(4), 871-880.

Hager, W.H. (1992). *Energy dissipators and hydraulic jump*. Kluwer academic Publishers 110, 288 p.

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

Mohamed Ali, H.S. (1991). Effect of Roughened Bed Stilling Basin on Length of Rectangular Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117, 83-93.

Nazhdali, A. and Esmaeili, K. (2012) Effect of triangular bed surface roughness on hydraulic jump