

پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با آستانه روزنه‌دار و پیوسته

منوچهر فتحی مقدم^{۱*}، پوریا آسیابان^۲، سجاد کیانی^۳، فرهاد اکبرپور^۴

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۳۰

^۱-استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

^{۲،۳،۴}-دانشجویان دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fathi49@gmail.com

چکیده

به منظور جلوگیری از آبشستگی بستر رودخانه و آسیب به سازه‌های پایین دست، انرژی جنبشی جریان عبوری از روی سرریزهای بزرگ باید به وسیله یک پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش مستهلک گردد. حوضچه‌های آرامش انواع مختلفی دارند که عمدتاً شامل حوضچه‌های آرامش استاندارد *USBR* هستند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی عملکرد دیواره‌های روزنه‌دار و دیواره پیوسته در حوضچه‌های آرامش و چگونگی تأثیر آن‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی از قبیل طول پرش و افت نسبی انرژی می‌باشد. نتایج تحقیقات نشان داد که دیواره روزنه‌دار در مقایسه با دیواره پیوسته، عملکرد مناسب‌تری در کنترل و تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش دارد به طوری که این نوع دیواره موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی و افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. به علاوه، نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که دیواره با سطح بازشدگی ۵۰ درصد موجب کاهش نسبی طول حوضچه آرامش به میزان ۶۱٪ در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد می‌شود. همچنین افت نسبی انرژی در این نوع دیواره به ازای عدد فرود ۴/۵، برابر ۶۰ درصد است که این مقدار برای عدد فرود ۱۲ به حدود ۹۰ درصد می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، پرش هیدرولیکی، طول حوضچه آرامش، عدد فرود

Hydraulic Jump in Stilling Basins with Perforated and Continuous Sills

M Fathi-Moghadam^{1*}, P Asiaban², S Kiani³, F Akbarpoor⁴

Received: 14 January 2015 Accepted: 20 August 2016

¹ Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Shahid Chamran Univ., Ahvaz, Iran

^{2, 3 & 4} PhD Students, Dept. of Hydraulic Structures, Shahid Chamran Univ., Ahvaz, Iran

* Corresponding Author, Email: fathi49@gmail.com

Abstract

Kinetic energy of the water over large spillways should be dissipated in the stilling basins by generation of a hydraulic jump in order to prevent scouring of riverbed and damaging the downstream structures. There are many types of stilling basins, and the most popular ones in practice are the standard *USBR* basins. The purpose of this study is to evaluate the behavior of perforated and continuous sills in stilling basin as well as their effects on the characteristics of a hydraulic jump including jump length and relative dissipated energy. Results of experiments indicate that the perforated sill, in comparison with the continuous one, has a better behavior in controlling and stabilization of hydraulic jump within the stilling basin which increases the energy dissipation and reduces the jump length. Furthermore, the results show that the perforated sill with 50% opening reduces the basin length about 61% of the required basin length for a free hydraulic jump. Moreover, perforated sill basins are able to dissipate 60% of the inflow energy at Froude number 4.5, while dissipation of energy increases to 90% at Froude number 12.

Keywords: Energy dissipation, Froude Number, Hydraulic jump, Stilling basin length

مقدمه

بنابراین لازم است این انرژی افزوده به طریقی در پایین دست سرریز مستهلک شود که در سرریز سدها این وظیفه بر عهده مستهلک کننده های انرژی^۲ می باشد. معمولاً انواع مختلفی از مستهلک کننده های انرژی مورد استفاده قرار می گیرند که متداول ترین آن ها، حوضچه های آرامش^۳ می باشد به نحوی که انرژی جریان در اثر پرش هیدرولیکی و ایجاد تلاطم شدید در حوضچه آرامش مستهلک می گردد. به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی و کنترل بهتر آن در این حوضچه ها، می توان از بلوک ها و یا یک دیواره سرتاسری پیوسته^۴ در داخل حوضچه استفاده نمود.

به دلیل محدود بودن حجم مخزن سدها، لازم است در هنگام وقوع سیلاب، مازاد حجم جریان ورودی به مخزن به صورت پیش بینی شده و تحت شرایط مطمئن هیدرولیکی تخلیه گردد. برای عبور آب های اضافی و سیلاب ها از سراب به پایاب سدها از سازه های به نام سرریز^۱ استفاده می شود. بالا بودن تراز سطح آب در بالادست سرریز نسبت به بستر رودخانه باعث می شود مقدار زیادی از انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی در پنجه سرریز تبدیل شود. چنین جریانی دارای قدرت تخریب کننده قابل توجهی می باشد که ممکن است به کل سازه هیدرولیکی مورد نظر آسیب جدی وارد نماید.

^۱ Energy dissipators

^۲ Stilling basin

^۴ Continuous sill

^۱ Spillways

مزدوج پرش هیدرولیکی (y_2/y_1) در شرایط وجود یک دیواره در مسیر جریان ارائه کرد:

$$Y = \frac{y_2}{y_1} = Y^* - Y_s \quad [1]$$

Y^* نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی آزاد در بستر صاف است که از معادله بلانگر (معادله ۲) به-دست می‌آید (برتز ۱۹۸۷):

$$Y^* = \frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad [2]$$

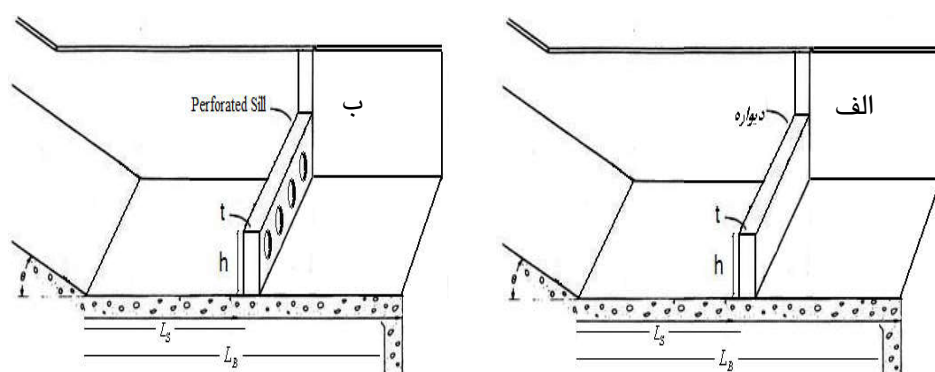
$$Y_s = \alpha \left(\frac{h}{y_1} \right)^\beta \quad [3]$$

که Y_s بیان‌گر تأثیر دیواره، α و β پارامترهایی هستند که به نوع پرش هیدرولیکی بستگی دارند. مطالعات بعدی بر روی پرش هیدرولیکی اجباری در اثر وجود یک دیواره پیوسته به‌وسیله هگر و لی (۱۹۹۰) ادامه یافت. وی با ارائه یک طبقه‌بندی جدید، انواع پرش هیدرولیکی را به پنج نوع A-jump, B-jump, Minimum B-jump, C-jump و D-jump تقسیم‌بندی کرد که در پرش نوع A، فاصله قرار گرفتن دیواره از ابتدای پرش بیشینه و در پرش نوع D این فاصله کمینه می‌باشد. وی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، نموداری برای طراحی حوضچه آرامش ارائه نمود که با استفاده از آن ارتفاع مورد نیاز دیواره (h) و فاصله آن از ابتدای حوضچه آرامش (L_s) برای تشکیل هر یک از انواع پرش‌های مذکور با توجه به عدد فرود در مقطع اولیه (Fr_1) و نیز عمق پایاب (y_1) به‌دست می‌آید. راجاراتنام و هورتینگ (۲۰۰۰) ایده کنترل پرش هیدرولیکی به‌وسیله یک صفحه قائم روزنه‌دار را مطرح نمودند و یک سری آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر صفحه با روزنه‌های مختلف در کنترل پرش هیدرولیکی را انجام دادند.

همچنین می‌توان به‌جای دیواره پیوسته، از دیواره روزنه‌دار^۹ نیز استفاده کرد (شکل ۱).

حوضچه‌های آرامش با دیواره پیوسته و یا دیواره روزنه‌دار به‌دلیل افت انرژی بیشتر، طول کوتاه‌تر و کنترل و تثبیت بهتر پرش هیدرولیکی قابل رقابت با حوضچه‌های کلاسیک (معمولی) می‌باشند و جایگزینی مناسبی برای این‌گونه حوضچه‌ها خواهند بود که موضوع اصلی این تحقیق را تشکیل می‌دهند. بررسی ابعاد و اشکال هندسی بلوک‌ها و یا دیواره‌ها، و ارتباط آن‌ها با مشخصات جریان در حوضچه‌های آرامش، از نیم‌قرن پیش مورد توجه محققین قرار گرفت. اولین مطالعه روی حوضچه‌ها با دیواره پیوسته توسط شکری (۱۹۵۷) انجام گرفت. او با انجام یک‌سری آزمایش‌ها نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی (Fr_1)، فاصله قرارگیری دیواره از ابتدای حوضچه (L_s) و ارتفاع نسبی دیواره (h/y_1) ارتفاع دیواره و y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی) و همچنین عمق آب پایاب (y_1) در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی دیواره مؤثرند. رند (۱۹۶۷ و ۱۹۶۵) یک طبقه‌بندی گسترده از انواع جریان روی دیواره را مهیا کرد که بر ارتباط بین ارتفاع دیواره و عمق پایاب با عمق جریان ورودی و عدد فرود در مقطع اولیه پرش استوار بود و نشان داد که با افزایش ارتفاع دیواره و کاهش فاصله آن از پنجه پرش، عمق آب در پایاب کاهش می‌یابد. وی همچنین به مقایسه میزان افت انرژی روی تک دیواره‌های ممتد و دندانه‌دار پرداخت و نتیجه گرفت که دیواره‌های ممتد نسبت به دیواره‌های دندانه‌دار افت انرژی بیشتری ایجاد می‌کنند. برتز (۱۹۸۷) پرش هیدرولیکی در یک حوضچه آرامش مستطیلی با دیواره سرتاسری را بر اساس قدرت فرسایشی جریان به سه-حالت تقسیم‌بندی کرد. همچنین وی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی رابطه زیر را برای محاسبه نسبت اعماق

^۹ Perforated sill



شکل ۱- حوضچه آرامش با دیواره پیوسته (الف) و دیواره روزنه دار (ب).

حوضچه آرامش را پیدا کند. وی با جایگذاری بلوک‌های با اشکال نیم‌دایره، مثلث، مستطیل و نوزنقه دریافت که دیواره‌های نیم‌دایره ایستاده و نوزنقه ایستاده بهترین عملکرد در استهلاک انرژی و کاهش آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش را دارند. بیرامی و ایلاقی (۱۳۸۴)، کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش افقی با استفاده از یک یا دو دیواره ممتد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش فاصله قرارگیری دیواره‌ها از پنجه پرش و همچنین افزایش ارتفاع آن‌ها، عمق ثانویه و طول گرداب پرش کاهش می‌یابد و موجب افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی می‌شود. راور و همکاران (۱۳۸۹)، تأثیر آرایش و ارتفاع زبری‌های یکپارچه نوزنقه‌ای قائم را بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کردند. مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های حاصل از پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف نشان داد که عمق پایاب و طول پرش هیدرولیکی در این بستر نسبت به بستر صاف به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. هلال و همکاران (۲۰۱۳) نیز به بررسی روش‌هایی جهت به کمینه رساندن آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی با به کارگیری دیواره‌های پیوسته پرداختند. آزمایش‌ها آن‌ها را به کارگیری آرایش‌های مختلف از دیواره‌های پیوسته با ارتفاع دیواره‌های ۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر به صورت یک ردیف دیواره و چند ردیف

نتایج به دست آمده نشان داد که یک صفحه با روزنه‌هایی به مساحت ۴۰ درصد سطح صفحه می‌تواند به عنوان جایگزینی برای بلوک‌ها یا سایر ضمایم موجود در حوضچه‌های آرامش در سازه‌های هیدرولیکی کوچک قرار گیرد. مطابق آزمایش‌ها راجاتنام و هورتینگ، وقتی جت از روزنه‌های صفحه قائم عبور می‌کنند، در اثر اصطکاک با دیواره‌های روزنه‌ها افت انرژی شدیدی اتفاق می‌افتد. در پایین دست صفحه نیز جریان همچنان فوق بحرانی است ولی عدد فرود در حدود ۱/۶۵ کنترل می‌شود. در این شرایط عمق پایاب مورد نیاز می‌تواند تا ۵۰ درصد پرش هیدرولیکی آزاد کاهش یابد. علیخانی و همکاران (۲۰۱۰) نیز به بررسی و کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از دیواره پیوسته پرداختند. آزمایش‌ها آن‌ها برای عدد فرود ۴ تا ۱۲ و نسبت ارتفاع دیواره به عمق اولیه پرش هیدرولیکی ۲ تا ۸ انجام شد. نتایج آزمایش‌ها آن‌ها نشان داد که دیواره پیوسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد دارد. آن‌ها همچنین معیارهای طراحی برای حوضچه آرامش با دیواره پیوسته ارائه نمودند. پس از آن بستاوی (۲۰۱۳) به بررسی شکل‌های جدیدی از بلوک‌های مستهلک‌کننده انرژی در حوضچه‌های آرامش پرداخت. وی با انجام آزمایش بر روی ۱۴ شکل مختلف از بلوک‌ها تلاش کرد تا مؤثرترین شکل بلوک‌ها در استهلاک انرژی در

چنین زائده‌ای از انقباض جریان جلوگیری کرده و باعث می‌شود که عمق اولیه پرش هیدرولیکی تقریباً با عمق بازشدگی دریچه برابر باشد. در نتیجه عمق اولیه پرش برای محدوده بازشدگی دریچه در این تحقیق بین $1/4$ تا $2/8$ سانتی‌متر با توجه به مقدار عدد فرود مورد نیاز بوده است. در انتهای فلوم، یک دریچه بادبزی شکل فلزی برای تأمین و تنظیم و کنترل عمق پایاب مورد نیاز در پرش هیدرولیکی تعبیه گردید. جریان پس از عبور از روی دریچه بادبزی شکل، از فلوم خارج شده و وارد مخازن زمینی ذخیره آب فلوم می‌گردد. آب از مخازن زمینی فوق‌الذکر، توسط یک دستگاه پمپ و لوله‌های رابط به داخل مخزن فایبرگلاس ابتدای فلوم پمپ می‌گردد. بدین ترتیب سیستم چرخش آب در فلوم تکمیل می‌شود. این پمپ به گونه‌ای است که قابلیت تغییر دور موتور آن فراهم می‌باشد و با تغییر دور موتور، دبی فلوم افزایش یا کاهش داده می‌شود.

دبی جریان به وسیله یک سرریز مستطیلی در پایاب، با استفاده از رابطه سرریزهای مستطیلی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آب و عمق اولیه و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، شاخص مدرج با دقت $0/1$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای اندازه‌گیری بهتر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله موقعیت تشکیل شدن و طول آن، فلوم توسط مترهای پارچه‌ای مدرج گردید. برای اندازه‌گیری سرعت جریان در پایین دست پرش از یک دستگاه میکرومولینه استفاده شد به طوری که جهت رسیدن به دقت مناسب در اندازه‌گیری و اجتناب از خطاهای ناشی از توزیع سرعت در عمق، اندازه‌گیری‌ها به روش سه نقطه‌ای در عمق انجام گردید. همچنین برای اندازه‌گیری سرعت جریان در ابتدا پرش از یک لوله پیتو استفاده شده است و در جهت اطمینان بیشتر با معادله پیوستگی نیز کنترل گردیده است. آزمایش‌ها در دبی‌های $8/5$ تا 30 لیتر بر ثانیه و برای اعداد فرود در بازه $4/5$ تا 12 و با استفاده از دیواره‌های روزنه‌دار و پیوسته ساخته شده از جنس

دیواره تعبیه شده در کف یک فلوم آزمایشگاهی به فواصل مختلف 40 ، 50 ، 60 و 70 سانتی‌متر تحت دبی‌های مختلف انجام پذیرفت. آزمایش‌ها نشان داد که وجود دیواره پیوسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق آبستگی در پایین دست دارد.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان افت انرژی و کنترل بهتر پرش هیدرولیکی در دو گزینه مختلف حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار با بازشدگی‌های مختلف و حوضچه آرامش با دیواره سرتاسری بدون روزنه در مواجهه با شرایط یکسان جریان ورودی می‌باشد. همچنین مقایسه‌ای بین طول حوضچه‌های آرامش مورد اشاره با حوضچه‌های تیپ و استاندارد USBR صورت بگیرد تا اقتصادی‌ترین حوضچه آرامش مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

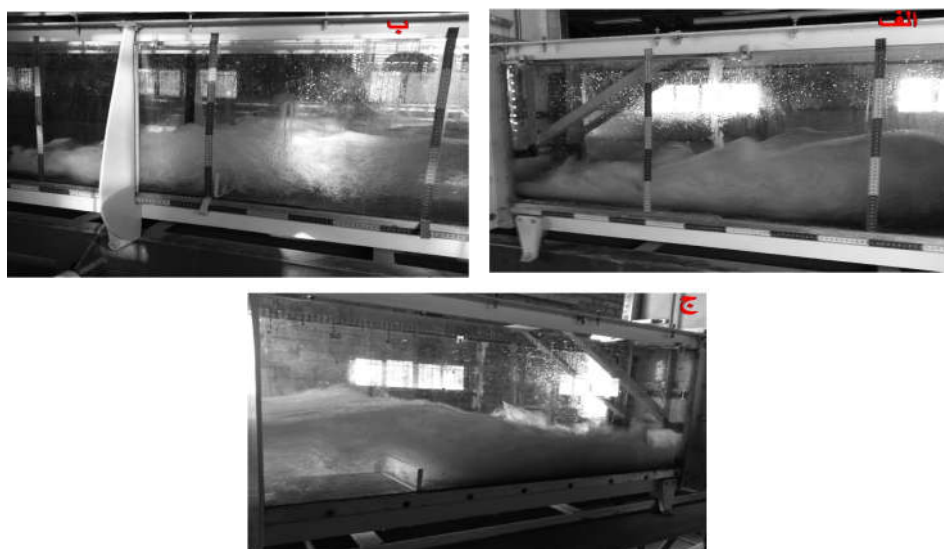
آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو در یک فلوم شیب‌پذیر با جداره شیشه‌ای و مخزن فایبرگلاس به انجام رسیده است. این فلوم دارای عرض 30 سانتی‌متر و ارتفاع 50 سانتی‌متر و طول 10 متر می‌باشد. در ابتدای فلوم یک مخزن فایبرگلاس تعبیه شده که علاوه بر ذخیره بخشی از آب مورد نیاز، وظیفه تأمین بار آبی جهت تشکیل پرش هیدرولیکی را نیز بر عهده دارد. همچنین یک دریچه کشویی با میزان بازشدگی $1/5$ تا 3 سانتی‌متر برای ایجاد جریان فوق بحرانی در ابتدای فلوم نصب گردید. جهت جلوگیری از اثر انقباض زیاد دریچه بر روی عمق اولیه پرش هیدرولیکی، یک قطعه از جنس پلکسی‌گلاس به طول 30 سانتی‌متر، عرض 5 سانتی‌متر و ضخامت 3 سانتی‌متر تهیه گردید. این قطعه به صورت ربع دایره‌ای برش داده شد و در پشت دریچه توسط پیچ نصب گردید. وجود

و ۳ و ... سانتی‌متر انجام داده (تا ارتفاع تیغه‌ای که پرش هیدرولیکی مستغرق نگردد) و نتایج ثبت می‌گردید. پس از بررسی همه نتایج، می‌توان ارتفاع بهینه دیواره و مناسب‌ترین محل قرارگیری آن را نیز استخراج نمود. همچنین آزمایش‌ها برای سایر دیواره‌ها با سطح بازشدگی‌های مختلف انجام می‌گیرد و به‌ازای هر سطح-بازشدگی، ارتفاع دیواره بهینه و فاصله بهینه قرارگیری آن از ابتدای حوضچه آرامش و طول بهینه پرش هیدرولیکی مشخص و نتایج ثبت و برداشت می‌گردد. در ادامه با تغییر در شرایط جریان، عمق و عدد فرود اولیه پرش هیدرولیکی، سری جدیدی از آزمایش‌ها برای تمامی دیواره‌های روزنه‌دار تکرار می‌گردد و ارتفاع دیواره بهینه و فاصله بهینه قرارگیری برای هریک از شرایط جدید استخراج می‌شود. به‌همین طریق، آزمایش‌ها برای دیواره پیوسته انجام گرفته و فاصله بهینه دیواره از ابتدای پرش و ارتفاع آن برای تمامی دبی‌های ذکر شده ثبت می‌شود. در شکل ۲، الگوی جریان در پرش هیدرولیکی آزاد با بستر صاف و همچنین در حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار و پیوسته نشان داده شده است.

پلکسی‌گلاس با ضخامت ۸ میلی‌متر و ارتفاع دیواره برابر با ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ سانتی‌متر انجام شده است. همچنین آزمایش‌ها در دیواره روزنه‌دار با ۴ نسبت بازشدگی سطح روزنه‌ها برابر ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد صورت گرفته است.

روش انجام آزمایش‌ها

نحوه انجام آزمایش‌ها به‌این صورت بوده که برای یک شرایط ثابت پرش هیدرولیکی (یک دبی مشخص و یک عدد فرود ثابت)، دیواره‌ای با سطح روزنه‌های ۱۲ درصد با ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر در فواصل مختلف از ابتدای پرش قرار داده و شرایط پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، عمق جریان بر روی دیواره، الگوی جریان قبل و بعد از دیواره، عمق و سرعت ثانویه پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری و ثبت می‌گردید. از میان فواصل مختلف طولی، فاصله‌ای که در آن طول حوضچه آرامش کمترین مقدار و افت انرژی بیشینه و کنترل پرش هیدرولیکی به نحو مناسبی صورت گیرد، به‌عنوان فاصله بهینه قرارگیری دیواره (L_s) برای این ارتفاع دیواره انتخاب می‌شود. همین مراحل آزمایش را برای دیواره‌هایی با ارتفاع‌های ۱ و ۲



شکل ۲- الگوی جریان در پرش هیدرولیکی آزاد- (الف)، حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار (ب) و پیوسته (ج).

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی اجباری با دیواره روزنه‌دار و پیوسته شامل شرایط هیدرولیکی جریان، خصوصیات سیال جریان و پارامترهای توصیف‌کننده هندسه دیواره روزنه می‌باشند که آن‌ها را می‌توان به صورت رابطه تابعی زیر نوشت:

$$f(h, y_1, v_1, L_B, L_S, A_0, A, S, g, \mu, \rho) = 0 \quad [4]$$

h ارتفاع بهینه دیواره، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، v_1 سرعت متوسط ورودی، L_B طول بهینه حوضچه آرامش، L_S فاصله بهینه قرارگیری دیواره روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش، A_0 مجموع سطح روزنه‌ها، A سطح کل دیواره، S شیب کف فوم، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیک و ρ جرم واحد حجم سیال می‌باشد. با به‌کارگیری نظریه باکینگهام در تحلیل ابعادی و ترکیب پارامترها، رابطه ۵ را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعد زیر نوشت:

$$f\left(\frac{h}{y_1}, \frac{L_B}{y_1}, \frac{L_S}{y_1}, \frac{A_0}{A}, \frac{A_0}{y_1}, F_1, R_e, S\right) = 0 \quad [5]$$

در رابطه ۵، F_1 عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی و R_e عدد رینولدز است. از میان پارامترهای بی‌بعد استخراج شده، از تأثیر شیب کف فوم (S) به دلیل اینکه در تمام آزمایش‌ها صفر بوده است صرف‌نظر شده است. همچنین اثر لزجت که به شکل عدد رینولدز (R_e) خود را نشان می‌دهد، به دلیل اینکه در تمام آزمایش‌ها، جریان در محدوده آشفتگی قرار دارد، حذف گردید. در تحقیق حاضر، بررسی پارامتر بدون بعد A_0/y_1 ، جزء اهداف پژوهش مورد نظر نبوده است بنابراین حذف گردید. در نتیجه رابطه ۶ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

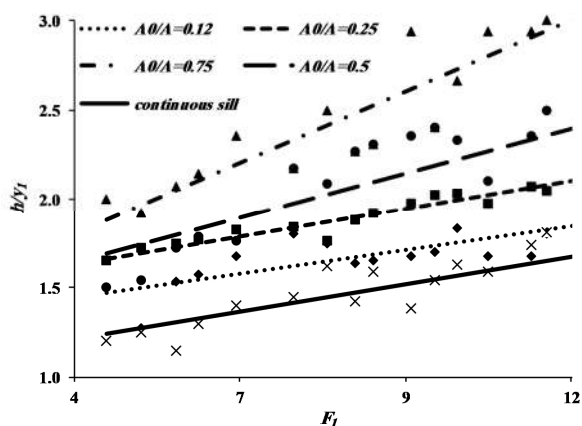
$$f\left(\frac{h}{y_1}, \frac{L_B}{y_1}, \frac{L_S}{y_1}, \frac{A_0}{A}, F_1\right) = 0 \quad [6]$$

نتایج و بحث

در زیر، نتایج آزمایش‌ها انجام شده پس از تحلیل‌های صورت گرفته و بر اساس تحلیل ابعادی انجام شده آورده شده است.

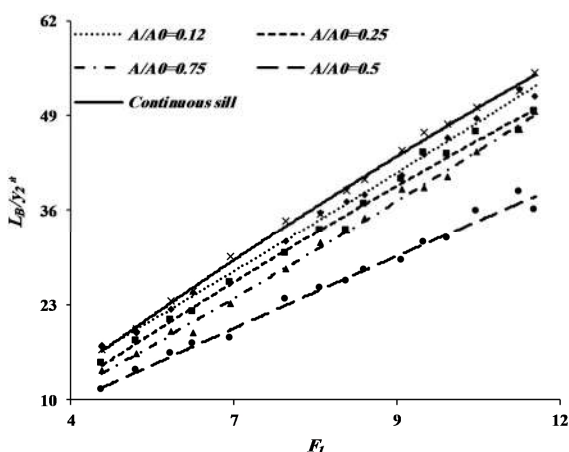
ارتفاع نسبی بهینه دیواره‌های روزنه‌دار و پیوسته

در شکل ۳، ارتفاع نسبی بهینه دیواره‌های روزنه‌دار و پیوسته به ازای عمق پایاب برابر با عمق ثانویه آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش درصد بازشدگی روزنه‌ها، ارتفاع نسبی دیواره بهینه افزایش می‌یابد به عبارت ساده‌تر، با بازشدگی روزنه‌ها به میزان ۷۵ درصد، تقریباً جریان مانعی بر سر راه خود حس نمی‌کند و عملاً شرایط به حالتی که تنها چند بلوک ایستاده با ارتفاع زیاد و عرض کم بر سر راه جریان ایجاد شده باشد نزدیک می‌شود از این رو ارتفاع بهینه دیواره روزنه‌دار برای کنترل پرش هیدرولیکی بایستی افزایش یابد تا کمینه‌ای از سطح دیواره برای ایستادن در مقابل جریان مهیا شود. به علاوه در شرایط یکسان، ارتفاع نسبی دیواره بهینه برای دیواره‌های روزنه‌دار از ارتفاع نسبی دیواره پیوسته بیشتر می‌باشد. همچنین با افزایش عدد فرود جریان، ارتفاع دیواره‌ها افزایش می‌یابد. علت این امر به شدت جریان‌های ورودی به حوضچه آرامش مربوط بوده به طوری که هر چه عدد فرود جریان کاهش یابد، به دلیل اینکه شدت جریان ورودی کاسته شده است، به دیواره‌های کوتاه‌تری جهت کنترل پرش هیدرولیکی نیاز داریم.



شکل ۳- تغییرات ارتفاع نسبی دیواره روزنه‌دار و پیوسته.

آرامش در دیواره‌های روزنه‌دار کمتر از دیواره پیوسته بوده و با افزایش بازشدگی مقدار طول حوضچه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین طول حوضچه آرامش در بازشدگی ۵۰ درصد حاصل می‌شود.

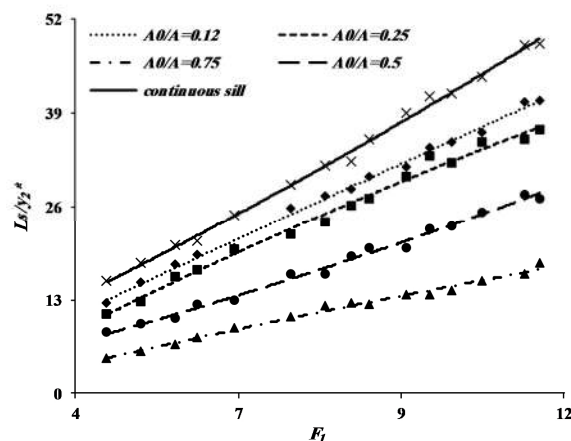


شکل ۵- تغییرات طول بهینه حوضچه آرامش در بازشدگی‌های مختلف سطح روزنه‌ها و دیواره پیوسته.

در شکل ۶، مقایسه‌ای بین طول حوضچه‌های استاندارد USBR و حوضچه آرامش با دیواره پیوسته و دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰ درصد شده است به طوری که در بازه اعداد فرود $4/5$ تا 12 ، طول پرش هیدرولیکی آزاد تقریباً معادل $6/1$ برابر عمق مزدوج پرش هیدرولیکی (y_2^*)، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد که از رابطه بلانگر به دست می‌آید) می‌باشد و طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره پیوسته به $3/2$ برابر عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تقلیل می‌یابد که این موضوع حاکی از کاهش نسبی طول پرش هیدرولیکی اجباری تا $47/5$ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد دارد. این امر باعث کاهش طول حوضچه آرامش مورد نیاز و طراحی اقتصادی‌تر سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی می‌گردد. این در حالی است که حوضچه‌های آرامش USBR III باعث کاهش طول حوضچه آرامش به میزان ۵۵ درصد نسبت به طول پرش هیدرولیکی آزاد می‌شود. از طرف دیگر

فاصله بهینه قرارگیری دیواره‌ها

در شکل ۴، تغییرات فاصله بهینه قرارگیری دیواره‌های روزنه‌دار و پیوسته به‌ازای عمق پایاب برابر با عمق ثانویه آورده شده است. با افزایش درصد بازشدگی روزنه‌ها، فاصله بهینه قرارگیری دیواره‌های روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش کاهش می‌یابد به طوری که فاصله بهینه دیواره پیوسته از دیواره‌های روزنه‌دار بیشتر است. این موضوع به دلیل امکان یافتن عبور بخشی از جریان از روزنه‌های تعبیه‌شده در دیواره است که اجازه نزدیک شدن بیشتر دیواره به پنجه پرش هیدرولیکی را می‌دهد به طوری که هر چه سطح روزنه‌ها بیشتر باشد فاصله بهینه دیواره کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش عدد فرود و قدرت جریان، فاصله نسبی بهینه دیواره از ابتدای پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد تا از افشانه شدن جریان و ایجاد جریان‌های بسیار نامطلوب در پشت دیواره جلوگیری شود.

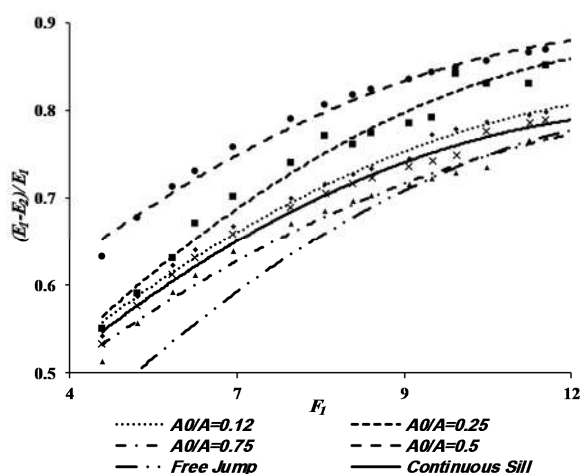


شکل ۴- تغییرات فاصله بهینه قرارگیری دیواره روزنه‌دار و پیوسته.

طول بهینه حوضچه آرامش

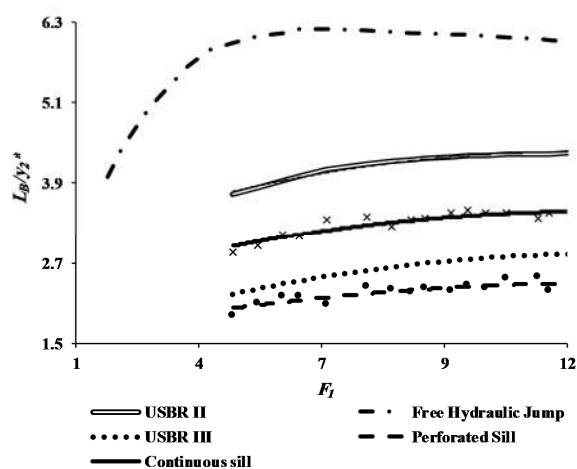
در شکل ۵، طول بهینه حوضچه آرامش نسبت به عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، طول حوضچه

مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد می‌گردد که این موضوع در کاهش قدرت فرساینده‌گری جریان خروجی از حوضچه آرامش بسیار مؤثر می‌باشد. از طرفی روند تغییرات افت نسبی انرژی به‌گونه‌ای است که با افزایش عدد فرود، افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در تمام آزمایش‌ها، کمترین مقدار افت نسبی انرژی در عدد فرود ۴/۵ و بیشترین آن در عدد فرود ۱۲ رخ داد. همچنین آزمایش‌ها نشان می‌دهد که دیواره روزنه‌دار با سطح روزنه‌ها برابر ۵۰ درصد، بیشترین افت نسبی انرژی را دارد. به‌طوری‌که افت نسبی انرژی در این نوع دیواره در عدد فرود ۴/۵، برابر ۶۰ درصد است که این مقدار برای عدد فرود ۱۲ به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. این امر به‌دلیل این است که برای نسبت‌های بازشدگی سطح روزنه‌ها به سطح دیواره برابر ۱۲ و ۲۵ درصد، به‌دلیل سطح کم روزنه‌ها، شرایط جریان در این حوضچه بسیار شبیه دیواره پیوسته می‌باشد. همچنین برای نسبت سطح روزنه‌ها به سطح دیواره برابر ۷۵ درصد نیز از آنجا که سطح روزنه‌ها نسبت به سطح دیواره بسیار زیاد است بخش عمده جریان از روزنه‌ها عبور می‌کند و این حالت شبیه حالتی است که تقریباً مانع قابل توجهی بر سر راه جریان وجود ندارد در نتیجه مقدار افت انرژی در این بازشدگی کمتر از مقدار افت در دیواره پیوسته است.



شکل ۷- تغییرات افت نسبی انرژی در بازشدگی‌های مختلف سطح روزنه‌ها و دیواره پیوسته.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در مقایسه با دیواره پیوسته سراسری، دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰ درصد عملکرد بهتری در کاهش طول حوضچه آرامش مورد نیاز دارد، به‌طوری‌که کاهش نسبی طول حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار (۲/۳) برابر عمق مزدوج پرش) تقریباً ۶۱ درصد طول مورد نیاز حوضچه آرامش در پرش هیدرولیکی آزاد در شرایط مشابه جریان می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه طول پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش مختلف.

افت نسبی انرژی

در شکل ۷، نمودار افت نسبی انرژی برای دیواره‌های روزنه‌دار با سطح بازشدگی ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد و دیواره پیوسته ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده، دیواره پیوسته سرتاسری باعث افزایش افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد با بستر صاف می‌گردد که این موضوع در کاهش قدرت فرساینده‌گری جریان خروجی از حوضچه آرامش بسیار مؤثر می‌باشد به‌طوری‌که این اختلاف با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد.

دیواره روزنه‌دار، به‌دلیل اضافه شدن افت روزنه، باعث افزایش افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی در

آزمایشگاهی را به این صورت می‌توان بیان داشت که وجود دیواره‌های روزنه‌دار و پیوسته در حوضچه‌های آرامش موجب افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد با بستر صاف می‌شود به طوری که دیواره روزنه‌دار، به دلیل اضافه شدن افت روزنه‌ها، افت انرژی بیشتری را در پرش هیدرولیکی ایجاد می‌کند.

حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار و پیوسته باعث کاهش چشم‌گیر طول پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد با بستر صاف می‌شود که این امر نشان‌دهنده کاهش طول حوضچه آرامش مورد نیاز و طراحی اقتصادی‌تر سازه‌های مستهلک‌کننده است. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که دیواره روزنه‌دار با سطح بازشدگی برابر ۵۰ درصد، بیشترین افت نسبی انرژی و کمترین طول حوضچه آرامش مورد نیاز را دارد.

برای طراحی حوضچه آرامش با سطح بازشدگی دیواره برابر ۵۰ درصد (که بیشترین مقدار افت انرژی و کمترین طول حوضچه آرامش مورد نیاز در بین دیواره‌های روزنه‌دار را دارد) در پایاب سرریزها، روابط برازشی ۷، ۸ و ۹ پیشنهاد می‌گردد به طوری که با کمک این معادلات می‌توان ارتفاع بهینه دیواره، فاصله مطلوب قرارگیری دیواره و طول حوضچه آرامش آن را به‌ازای عدد فرود مورد نظر محاسبه نمود.

$$\frac{h}{y_1} = 0.135F_r + 0.959 \quad (R^2 = 0.84) \quad [7]$$

$$\frac{L_s}{y_1} = 2.65F_r - 3.59 \quad (R^2 = 0.98) \quad [8]$$

$$\frac{L_B}{y_1} = 3.68F_r - 4.67 \quad (R^2 = 0.98) \quad [9]$$

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار و پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی این تحقیق

منابع مورد استفاده

- بیرامی م ک و ایلاقی حسینی م، ۱۳۸۴. کنترل پرش هیدرولیکی با یک و دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی. نشریه استقلال، سال ۲۴، شماره ۱، جلد ۱، صفحه‌های ۹۷ تا ۱۱۹.
- راور ز، فرهودی ج و نژندعلی ع، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر آرایش و ارتفاع بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم بر مشخصات جهش هیدرولیکی. صفحه‌های ۱۱۰ تا ۱۱۹. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۰-۱۲ اسفندماه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- Alikhani A, Behrouzi-Rad R and Fathi-Moghadam M, 2010. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International Journal of Physical Sciences* 5(1): 025-029.
- Anonymous, 1987. *Design of Small Dams*. Third Edition, Government Printing Office. Washington. DC, USA.
- Bestawy A, 2013. New shapes of baffle piers used in stilling basins as energy dissipaters. *Asian Transactions on Engineering* 3(01): 213-221
- Bretz NV, 1987. The forced hydraulic jump. Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Hager WH and Li D, 1992. Sill-controlled energy dissipater. *Journal of Hydraulic Research* 30(2): 165-181.
- Helal EY, Nassralla TH and Abdelaziz AA, 2013. Minimizing of scour downstream hydraulic structures using sills. *International Journal of Civil and Structural Engineering* 3(3): 591-602.
- Rajaratnam N and Hurtig KI, 2000. Screen-type energy dissipation for hydraulic structures. *Journal of the Hydraulics Division* 126(4): 310-312.
- Rand W, 1965. Flow over a vertical sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 91: 97-122.
- Rand W, 1967. Flow over dentate sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 97: 135-153.
- Shukry A, 1957. The efficiency of floor sills under drowned hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 83: 1-8.