

## مطالعه آزمایشگاهی اثر دیواره‌های روزنه‌دار در حوضچه آرامش بر عمق ثانویه و طول غلتاب پرش هیدرولیکی

رضا خانخانی زوراب\* و سید محمود کاشفی‌پور<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۲/۱۶)

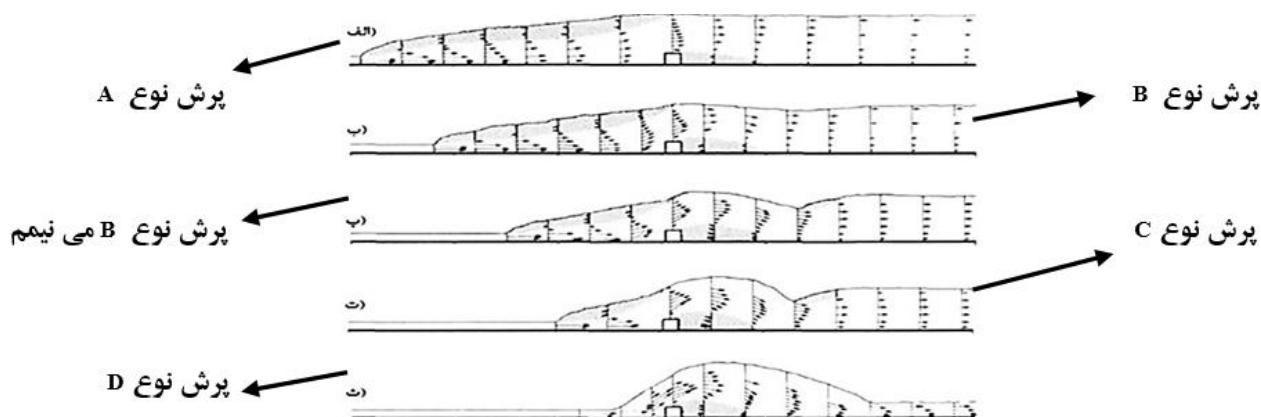
### چکیده

هدف از انجام این تحقیق، بررسی عملکرد دو دیواره روزنه‌دار در حوضچه آرامش و چگونگی تأثیر آن بر مشخصات پرش هیدرولیکی از قبیل طول غلتاب پرش هیدرولیکی، کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و عمق مورد نیاز پایاب می‌باشد. همچنین فاصله مناسب قرارگیری دو دیواره روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش به ازای یک ارتفاع ثابت برای دیواره روزنه‌دار اول و دوم با سطح بازشدگی ۵۰ درصد مشخص گردد. آزمایش‌ها در دبی‌های ۴۷ تا ۱۴۵ لیتر بر ثانیه و برای اعداد فرود در بازه ۳/۶ تا ۱۱/۲ در قالب ۴۸ آزمایش انجام شده است. نتایج داده‌های آزمایشگاهی بر روی دو دیواره روزنه‌دار نشان داد که زوج دیواره روزنه‌دار در صورتی می‌توانند طول غلتاب پرش را تا حد قابل قبولی کاهش دهند که فاصله بین آنها شرایط را برای ایجاد یک پرش پایدار فراهم کند و با کاهش فاصله بین دیواره‌ها، طول غلتاب پرش هیدرولیکی الزاما کاهش نمی‌یابد. همچنین زوج دیواره روزنه‌دار عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اجباری را تا ۲۷/۸ درصد کمتر از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد و طول غلتاب را تا ۷۶/۹ درصد کمتر از طول غلتاب پرش هیدرولیکی آزاد در عدد فرود ۱۱/۲ رسانده است.

واژه‌های کلیدی: دیواره روزنه‌دار، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، طول غلتاب، عمق ثانویه پرش اجباری

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: reza\_khankhani@yahoo.com



شکل ۱. طبقه‌بندی انواع پرش در حالت وجود دیواره در حوضچه آرامش. (هگر و لی، ۱۹۹۲)

## مقدمه

کنترل پرش هیدرولیکی به روش‌های مختلفی از جمله: سرریز لبه تیز، سرریز لبه پهن، تغییر تراز کف حوضچه، حوضچه‌های آرامش، دیواره سرتاسری و روزنه‌دار انجام می‌شود. نکته قابل توجه در طراحی تمام حوضچه‌های آرامش USBR این است که کف حوضچه بایستی به اندازه کافی پایین برده شود تا عمق پایاب از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کمتر نباشد. برای دوری از این موضوع، حوضچه‌های آرامش دیگری به گونه‌ای که کف حوضچه آرامش در رقوم‌های بالاتر قرار گیرد با استفاده از ضمامم خاص مورد بررسی قرار گرفته که نیاز به عمق پایاب کمتری دارند و این موضوع بحث این تحقیق است که به تفصیل به آنها پرداخته می‌شود. اساس طراحی دیواره روزنه‌دار بر این فرضیه استوار است که دیواره روزنه‌دار در یک حوضچه آرامش می‌تواند باعث تغییراتی در خصوصیات پرش هیدرولیکی و کاهش طول و عمق پایاب در پرش هیدرولیکی و افزایش افت انرژی در پرش شود.

رند (۱۴ و ۱۵) 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 نسبت به

دیواره‌های دندان‌دار پرداخت و نتیجه گرفت که دیواره‌های ممتد نسبت به دیواره‌های دندان‌دار افت انرژی بیشتری ایجاد می‌کنند.

اتوسو و همکاران (۱۶) جریان عبوری از روی دیواره را به سه دسته تقسیم کردند:

۱. پرش نوع اول که در آن وضعیت بالادست دیواره تحت تأثیر عمق پایاب است.
۲. پرش نوع دوم که در آن وضعیت بالادست دیواره تحت تأثیر شرایط پایین دست نیست.
۳. برخورد آزاد جریان به دیواره و عدم تشکیل پرش هیدرولیکی در بالادست است.

مطالعات بعدی بر روی پرش هیدرولیکی اجباری در اثر وجود یک دیواره به وسیله هگر ولی (۹) ادامه یافت. آنها با ارائه یک طبقه‌بندی جدید مطابق شکل (۱)، انواع پرش هیدرولیکی اجباری را به پنج نوع پرش نوع A، پرش نوع B، پرش نوع B می‌نیمم، پرش نوع C و پرش نوع D، تقسیم‌بندی کردند که در پرش نوع A، فاصله قرار گرفتن دیواره از ابتدای پرش حداکثر و در پرش نوع D این فاصله حداقل می‌باشد.

راجاراتنام و هورتینگ (۱۲) ایده کنترل پرش هیدرولیکی به وسیله یک صفحه قائم روزنه‌دار را مطرح نمودند نتایج به دست آمده نشان داد که یک صفحه با روزنه‌هایی به مساحت ۴۰ درصد سطح صفحه می‌تواند به عنوان جایگزینی برای

در خلاف جهت جریان تا ۴۲/۵ درصد افت نسبی انرژی نسبت به پرش آزاد را ایجاد می‌کند.

اولین تحقیق اصولی درباره طول غلتابی توسط سافرانز (۱۵) انجام شد. وی در مجموع انجام شانزده آزمایش، طول بی‌بعد غلتابی را برای اعداد فرود بزرگ‌تر از ۲/۹۳ استخراج کرد.

هگر و همکاران (۸) آزمایش‌هایی جهت تعیین طول غلتابی انجام داد. آنها آزمایش‌های خود را با سه فلوم به عرض‌های ۰/۵ متر، ۰/۳ متر و ۰/۱۷ متر و با اعداد فرود ۳، ۴، ۵ و ۶ انجام داد و دریافت که برای  $\omega < 1$ ،  $(\omega = \frac{y_1}{b})$  طول بی‌بعد غلطابی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\lambda_T = a_0 + a_1 \omega \quad [1]$$

که در آن  $a_0$  ضرایبی هستند که به  $Fr_1$  بستگی دارند.

هدف از انجام مطالعه حاضر کاهش طول غلتاب و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی با استفاده از دو دیواره روزنه‌دار به ارتفاع ۷ و ۱۳ سانتی‌متر، با روزنه‌های دایره‌ای شکل و با درصد بازشدگی روزنه‌ها به میزان ۵۰ درصد از سطح کل دیواره می‌باشد. اگرچه تحقیقاتی بر روی تک دیواره و صفحه‌های روزنه‌دار انجام گرفته، اما تاکنون تحقیقی بر روی اثر دو دیواره روزنه‌دار بر مشخصات پرش هیدرولیکی انجام نشده است.

### عمق‌های مزدوج در پرش هیدرولیکی

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

رابطه (۲) که به رابطه بلانجر (Belanger) معروف است، رابطه نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش هیدرولیکی آزاد در یک مقطع مستطیلی می‌باشد. با داشتن  $y_1$  و  $Fr_1$  و با استفاده از این رابطه می‌توان عمق ثانویه پرش هیدرولیکی را محاسبه نمود. برای اعداد فرود بزرگ‌تر از ۲، معادله (۱) به‌طور تقریب به‌صورت معادله ۳ نوشته می‌شود (چاو، ۷).

$$\frac{y_2}{y_1} = \sqrt{2} Fr_1 - \frac{1}{2} \quad [3]$$

این معادله نشان می‌دهد که نسبت اعماق مزدوج  $\frac{y_2}{y_1}$  با عدد

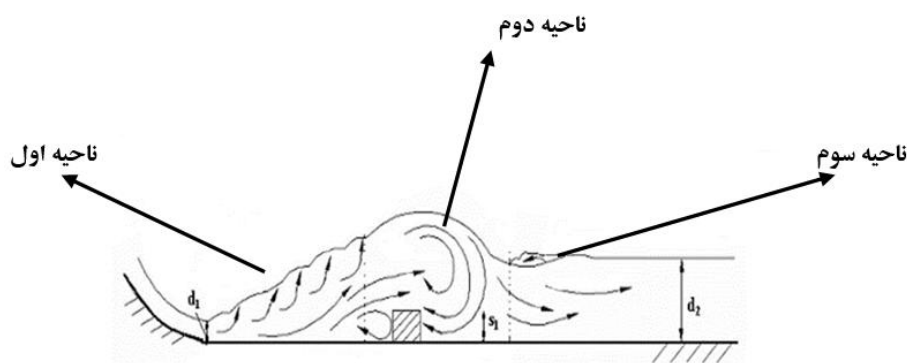
بلوک‌ها یا سایر ضمامم موجود در حوضچه‌های آرامش در سازه‌های هیدرولیکی کوچک قرار گیرد. در پایین دست صفحه نیز جریان هم‌چنان فوق بحرانی است ولی عدد فرود در حدود ۱/۶۵ کنترل می‌شود.

تحقیقات بعدی بر روی حوضچه‌های آرامش با یک دیواره سرتاسری به وسیله بیرامی و ایلاقی (۱) ادامه یافت. آنها با انجام یک سری آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش ارتفاع دیواره و کاهش فاصله قرارگیری آن از پنجه پرش، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین آنها آزمایش‌هایی نیز بر روی کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از دو دیواره پیوسته انجام داده و دریافتند که قرارگیری دیواره دوم بعد از دیواره اول تنها در شرایطی می‌تواند در کاهش عمق ثانویه و افزایش افت انرژی نسبت به حالت یک دیواره مؤثر واقع شود که دیواره دوم بلندتر از دیواره اول باشد.

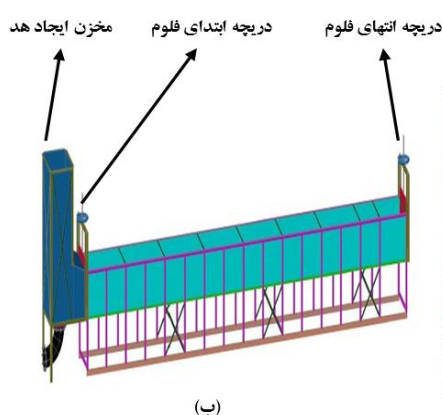
هلال و همکاران (۱۰) نیز به بررسی روش‌هایی جهت به حداقل رساندن آبستگي پایین دست سازه‌های هیدرولیکی با به‌کارگیری دیواره پیوسته پرداختند. آزمایش‌های آنها با به‌کارگیری آرایش‌های مختلف از دیواره‌های پیوسته با ارتفاع دیواره‌های ۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر به‌صورت یک ردیف دیواره و چند ردیف دیواره تعبیه شده در کف یک فلوم آزمایشگاهی به فواصل مختلف ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر تحت دبی‌های مختلف انجام پذیرفت. آزمایش‌ها نشان داد که وجود دیواره پیوسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق آبستگي در پایین دست دارد.

بهریزی‌راد و همکاران (۶) به بررسی شرایط جریان با وجود دیواره روزنه‌دار پرداختند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد وجود دیواره روزنه دار با درصد بازشدگی ۵۰ درصد طول حوضچه آرامش را نسبت به طول پرش هیدرولیکی آزاد به ۴۰ درصد می‌رساند.

آزمایش‌های عاشور و همکاران (۴) بر روی اشکال مختلفی از دیواره‌های منحنی شکل پیوسته با مقطع مثلثی نشان داد که قرارگیری سه ردیف دیواره منحنی با انحنای ۱۲۰ درجه و تقعر



شکل ۲. انواع گرداب تشکیل شده در تشکیل پرش با وجود دیواره (رند، ۱۹۶۵)



شکل ۳. (الف) نمای کلی از فلوم آزمایشگاهی (ب) شماتیک فلوم

فرود به صورت خطی تغییر می کند.

### طول غلتاب پرش هیدرولیکی

طول چرخش یا غلتاب ( $L_r$ ) عبارت است از فاصله شروع پرش تا آخرین موج غلطان. طول بی بعد غلتابی توسط یکی از اعماق اولیه پرش ( $y_1$ )، عمق ثانویه پرش ( $y_2$ ) و یا تفاضل این دو ( $y_2 - y_1$ ) ارائه می شود. از آنجا که عمق ثانویه پرش ( $y_2$ ) به پارامترهای جریان ورودی، از جمله  $y_1$ ،  $Fr_1$  و دیگر پارامترها بستگی دارد، بهترین رابطه برای طول بی بعد غلتابی، رابطه  $(\frac{L_r}{y_1})$  می باشد (۸). به طور کلی در اثر عبور جریان از داخل روزنه ها و روی دیواره سه ناحیه گردابی را مطابق شکل (۲) می توان مشاهده کرد:

(۱) گرداب های تشکیل شده قبل از دیواره

(۲) گرداب های تشکیل شده در پشت دیواره

(۳) گرداب های سطحی کوچک تشکیل شده در ابتدای شروع جریان یکنواخت. به دلیل گرداب های شدید در ناحیه اول و انحنای شدید خطوط جریان در ناحیه دوم، قسمت اعظم افت انرژی حاصل از وجود دیواره در مسیر پرش در اثر تشکیل گرداب های نوع اول و دوم است (۱۳).

### مواد و روش ها

آزمایش های انجام شده در این تحقیق بر روی دو دیواره روزنه دار در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز در یک فلوم با جداره ای از جنس پلکسی گلاس و مخزن آهنی که در شکل (۳) نشان داده شده است، به انجام رسید. این فلوم دارای طول مؤثر ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر، ارتفاع ۰/۶۵ متر و حداکثر دبی

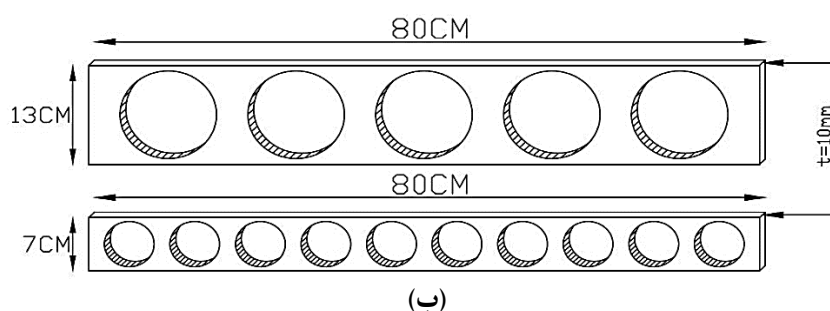
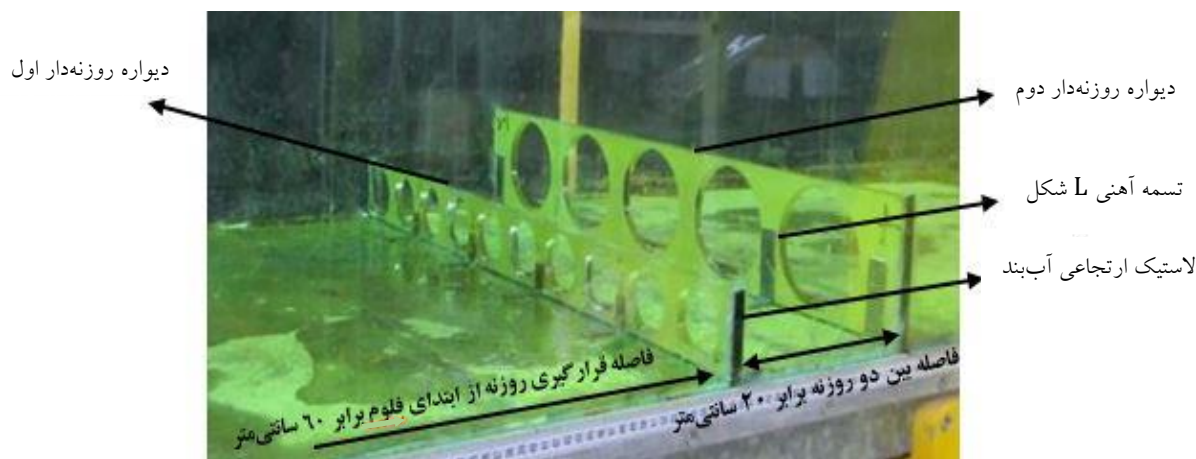
مه‌ره در پشت دریچه نصب گردید. همچنین برای جلوگیری از ناهمواری‌های احتمالی و بسیار کوچک سطح چوب یک قطعه قوسی شکل از جنس ورق گالوانیزه تهیه و روی قطعه چوبی نصب گردید. مطابق نظرات لین و تسای (۱۰) وجود چنین زائده‌ای از انقباض جریان جلوگیری کرده و باعث می‌شود که عمق اولیه پرش هیدرولیکی با ارتفاع گشودگی دریچه برابر باشد. پس از آن‌که فلوم جهت انجام آزمایش‌ها آماده گردید، اقدامات لازم برای ساخت تیغه‌های روزنه‌دار از جنس پلکسی گلاس با عرض ۸۰ سانتی متر ( معادل عرض فلوم) و با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۷ سانتی متر برای تیغه جلویی (تیغه اول،  $\frac{S_1}{y_1} = 2/3$ ) و ۱۳ سانتی متر برای تیغه دوم ( $\frac{S_2}{y_2} = 4/3$ ) انجام گرفت. این ارتفاعات از دیواره‌ها براساس نتایج آزمایش‌هایی بر روی ارتفاع بهینه دو دیواره روزنه‌دار توسط پایروند و کاشفی‌پور (۲) انتخاب شدند. در شکل (۴) نمونه‌ای از دیواره‌های روزنه‌دار هنگام نصب در فلوم و نمای شماتیک آن نشان داده شده است. مطابق آزمایش‌های انجام شده بر روی یک دیواره روزنه‌دار توسط بهروزی‌راد و همکاران (۵)، میزان درصد بازشدگی روزنه‌ها نسبت سطح کل دیواره، ۵۰ درصد می‌باشد. روزنه‌ها به گونه‌ای ایجاد شده‌اند که حداکثر میزان همپوشانی را با دیواره دوم داشته باشند، به این معنا که روزنه‌های دیواره اول در مقابل قسمت پیوسته دیواره دوم قرار گرفته باشند.

#### شرح اجرای آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، دبی جریان با استفاده از یک سرریز مستطیلی کالیبره شده در پایین دست فلوم اندازه‌گیری می‌شد. آزمایش‌ها بدین ترتیب صورت گرفت که با توجه به حداقل و حداکثر دبی جریان یافته در فلوم، ارتفاع نظیر این دبی‌ها روی اشل نصب شده در کنار مخزن ذخیره در ابتدای فلوم علامت‌گذاری گردید. در بین دو بار آبی حداقل و حداکثر با روش آزمون و خطا ۶ بار آبی دیگر بر روی اشل علامت‌گذاری

۱۵۰ لیتر بر ثانیه با توجه به ارتفاع گشودگی دریچه ورودی (معادل ۳ سانتی متر) می‌باشد.

در انتهای فلوم، یک دریچه کشویی از جنس پلکسی گلاس قرار دارد که باز و بسته شدن آن به وسیله یک غریبلک انجام می‌شود. شبکه‌ای به وسیله لوله‌های پلاستیکی تعبیه و در جلوی دریچه انتهای فلوم قرار داده شده است. این کار به منظور جلوگیری از تشکیل امواج در پایین دست پرش هیدرولیکی، در عمق پایاب می‌باشد. یک سرریز مستطیلی در انتهای فلوم قرار گرفته است که وظیفه اندازه‌گیری دبی در فلوم را بر عهده دارد. این سرریز آهنی بوده و دارای عرض ۱۰۰ سانتی متر و ارتفاع ۳۵ سانتی متر می‌باشد. جریان پس از عبور از روی سرریز مستطیلی وارد مخازن ذخیره آب می‌گردد. سپس آب داخل مخزن به وسیله پمپ‌های موجود در کف استخر تأمین آب که در خارج از آزمایشگاه قرار دارد، به داخل مخزن تأمین آب برای همه فلوم‌ها در آزمایشگاه منتقل شده و از آنجا مقدار آب مورد نیاز هر یک از فلوم‌ها از طریق شیر کنترل جریان ورودی تأمین می‌شود. بدین ترتیب سیستم چرخش آب در فلوم تکمیل می‌شود. عمق جریان توسط عمق سنج دیجیتالی با درجه دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌گردید. ضمناً برای اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی پرش از جمله طول غلتاب آن، مترهای نواری با درجه دقت ۱ میلی‌متر به دیواره فلوم چسبانده شد. همچنین در فواصل ۵۰ سانتی متری، مترهایی به صورت عمودی نیز نصب گردید. برای افزایش اطمینان عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، عمق جریان در سه نقطه ثابت در عرض فلوم (یکی در خط مرکزی فلوم و دو اندازه‌گیری دیگر هر کدام به فاصله ۲۰ سانتی متر از خط مرکزی و در طرفین آن) اندازه‌گیری و از میانگین آنها استفاده گردید. در کلیه آزمایش‌ها ارتفاع گشودگی دریچه کشویی ابتدای فلوم در ورودی به مقدار ثابت ۳ سانتی متر تنظیم گردید. برای جلوگیری از اثر انقباض دریچه بر روی عمق اولیه پرش هیدرولیکی، یک قطعه از جنس چوب درخت اکالیپتوس به طول ۸۰ سانتی متر (عرض فلوم)، عرض ۲۰ سانتی متر و ضخامت ۱۲ سانتی متر تهیه گردید. سپس به صورت ربع دایره‌ای برش داده شد که به وسیله پیچ و



شکل ۴. الف) نحوه قرارگیری دیواره‌های روزنه‌دار در فلوم و ب) شماتیک دیواره‌های روزنه‌دار

از جمله عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و عمق اولیه، توسط عمق سنج دیجیتالی و طول غلتاب نیز توسط مترهای پارچه‌ای نصب شده بر روی فلوم اندازه‌گیری می‌گردید. ضمناً از کلیه آزمایش‌ها عکس و فیلم تهیه شد تا با کمک نرم‌افزارهای مناسب کامپیوتری طول غلتابی اندازه‌گیری مجدد، و با اندازه‌گیری در آزمایشگاه برای صحت اندازه‌گیری‌ها مقایسه گردد. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌های این تحقیق، محل تشکیل پنجه پرش هیدرولیکی (ابتدای پرش) دقیقاً جلوی دریچه کشویی بالادست می‌باشد. پس از تعیین فاصله بهینه تک دیواره روزنه‌دار  $(\frac{LS_1}{y_1} = 20)$  یا ۶۰ سانتی‌متر از پنجه پرش هیدرولیکی) مطابق نتایج آزمایش‌های خانخانی و کاشفی‌پور، آزمایش‌های دو دیواره روزنه‌دار به گونه‌ای که دیواره دوم در فواصل ۱۰  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 3/3)$ ، ۲۰  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 10)$  و ۳۰  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 10)$  سانتی‌متری از دیواره اول قرار گرفته باشد،

گردید تا با توجه به دبی‌هایی که از منحنی دبی اشل سرریز مستطیلی به دست آمده بود، یک توزیع قابل قبول برای تغییرات اعداد فرود جریان حاصله از این ۸ بار آبی به دست آید. حسن انجام این کار، آن است که با توجه به نوسانات ناشی از دور موتور پمپ و همچنین زمانبر بودن تنظیم یک دبی مشخص، رسیدن به اعداد فرود مشابه برای تمامی آزمایش‌ها، کاری وقت‌گیر و خسته‌کننده است. اما با این کار، تنظیم بار آبی مخزن ذخیره بر روی یک عدد مشخص، کاری آسان‌تر و دقیق‌تر می‌باشد، زیرا امکان مقایسه نتایج برای یک عدد فرود مشخص را هم فراهم می‌آورد. بدین ترتیب آزمایش‌ها برای محدوده اعداد فرود ۳/۶ تا ۱۱/۲ به ازای دبی‌های ۴۷/۳ تا ۱۴۵/۵ لیتر بر ثانیه در ۸ عدد فرود انجام شد.

برای تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد در هر عدد فرود، عمق پایین دست به کمک دریچه انتهایی به نحوی تنظیم می‌گردید که پرش آزاد رخ دهد. مشخصات پرش هیدرولیکی در این حالت

هیدرولیکی ( $L_{S1}$ ) و فاصله قرارگیری دیواره روزنه دار دوم از پنجه پرش هیدرولیکی ( $L_{S2}$ )، ارتفاع دیواره اول (تک دیواره روزنه‌دار) ( $h_1$ ) و ارتفاع دیواره دوم ( $h_2$ )، مجموع سطح روزنه‌ها ( $A_0$ )، سطح کل دیواره ( $A$ )؛  
در آنالیز ابعادی، برخی پارامترها که تأثیر آنها کمتر می‌باشد، از جمله:

شیب کف فلوم ( $S$ ) که در تمام آزمایش‌ها صفر است، اثر لزوجت که به شکل عدد رینالدز ( $\frac{\rho V_1 y_1}{\mu}$ ) خود را نشان می‌دهد، به دلیل این که جریان متلاطم در تمام آزمایش‌ها در محدوده عدد رینالدز بیشتر از ۱۲۵۰۰ قرار دارد (چاو، ۷)، درصد بازشدگی سطح روزنه‌ها که در تمامی آزمایش‌ها ۵۰ درصد می‌باشد، ارتفاع نسبی دیواره اول و دوم که با توجه به ثابت بودن ارتفاع دیواره‌ها قابل صرف نظر هستند و عمق نسبی پایاب که در همه آزمایش‌ها برابر ۱ می‌باشد، حذف گردیدند. پس از آن مهم‌ترین پارامترهای بی‌بعد به شکل زیر به دست آمدند.

$$f\left(\frac{L_{S1}}{y_1}, \frac{L_{S2}}{y_1}, Fr_1, \frac{L_r}{y_2^*}, \frac{y_2}{y_2^*}\right) = 0 \quad [4]$$

با توجه به اینکه متغیرهای مهم و مورد نظر عمق نسبی مزدوج پرش در شرایط اجباری ( $\frac{L_r}{y_2^*}$ ) و طول نسبی غلتاب پرش هیدرولیکی ( $\frac{L_r}{y_2^*}$ ) می‌باشد، لذا رابطه (۴) می‌تواند به صورت رابطه (۵) نوشته شود.

$$\frac{y_2}{y_2^*}, \frac{L_r}{y_2^*} = f\left(\frac{L_{S1}}{y_1}, \frac{L_{S2}}{y_1}, Fr_1\right) \quad [5]$$

### نتایج و بحث

**تغییرات عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی در حضور دو دیواره روزنه‌دار**

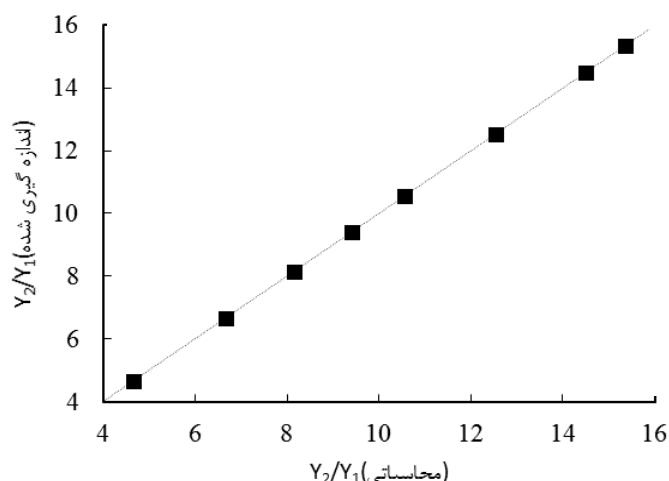
در نمودار شکل (۵) مقادیر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد هنگام انجام آزمایش‌ها و سپس توسط نرم‌افزار اندازه‌گیری عمق جریان (Engauge) اندازه‌گیری شد. سپس با مقادیر حاصل از

انجام می‌شود (۳). پس از بررسی نتایج، و تعیین بهترین زوج دیواره در افزایش افت انرژی و کاهش طول حوضچه، حال بهترین زوج دیواره با فاصله ثابت بین آنها، نسبت به پنجه پرش در سه فاصله ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر از دیواره اول جابه‌جا می‌شوند تا بهترین فاصله برای یک زوج دیواره به دست آید. در انتخاب فواصل ذکر شده بایستی ذکر کرد که با توجه به نتایج آزمایش‌های عاشور و همکاران (۵)، این سه فاصله در محدوده مقداری برابر با یک سوم طول پرش هیدرولیکی آزاد یا براساس آزمایش‌های راجاراتنام و هورتیگ (۱۲) به اندازه دو برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد انتخاب شده‌اند. در این تحقیق، ۴۸ آزمایش جهت رسیدن به اهداف فوق انجام شد که در تمامی آزمایش‌ها برای جلوگیری از شرایط پاشش (Splash)، پرش اجباری به گونه‌ای ایجاد گردید که ابتدا پرش به صورت مستغرق باشد و سپس با باز کردن دریچه کشویی انتهای فلوم، یک پرش کامل (غیرمستغرق) شکل بگیرد.

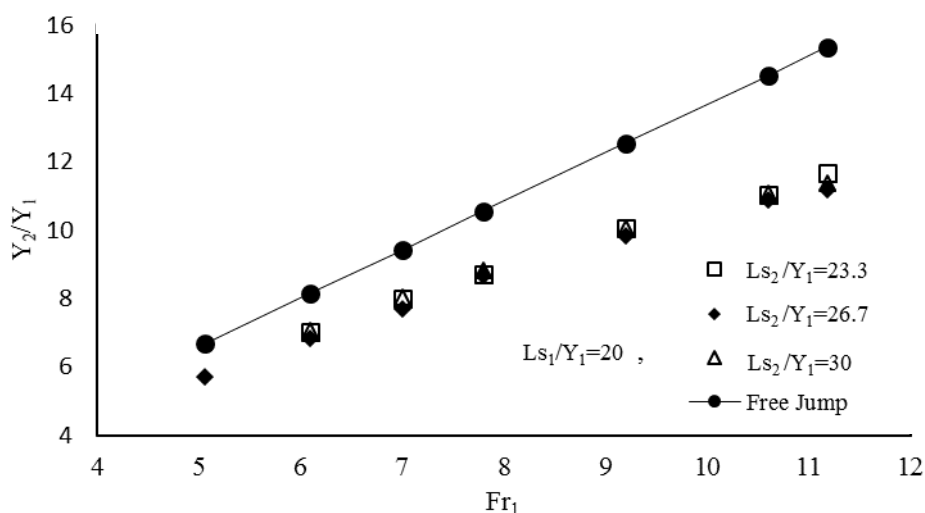
### آنالیز ابعادی و تعیین پارامترهای مؤثر

از آنجا که در تعیین آنالیز ابعادی با توجه به مجهول بودن ارتباط پارامترها با هم، پس از تجزیه و تحلیل آنها یک‌سری پارامتر بی‌بعد یا اصطلاحاً عدد بی‌بعد استخراج می‌گردد. با توجه به اینکه این اعداد علاوه بر داشتن چندین پارامتر مختلف از لحاظ ابعادی نیز بی‌بعدند، یافتن ارتباط بین آنها بسیار آسان‌تر و سریع‌تر از برقراری ارتباط بین پارامترهای اولیه خواهد بود. پارامترهای تأثیرگذار پرش هیدرولیکی اجباری با دو دیواره روزنه‌دار عبارتند از:

خصوصیات جریان شامل: سرعت ورودی ( $V_1$ )، عمق اولیه پرش هیدرولیکی ( $y_1$ )، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد ( $y_2^*$ ) که از رابطه بلانچر به دست می‌آید، عمق پایاب ( $y_2$ ) یا ( $T_w$ )، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اجباری ( $y_2$ )، طول غلتاب پرش هیدرولیکی ( $L_r$ )؛ خصوصیات سیال جریان شامل: جرم واحد حجم سیال ( $\rho$ ) و لزوجت دینامیک ( $\mu$ )؛ هندسه دیواره‌ها شامل: فاصله قرارگیری دیواره روزنه دار اول از پنجه پرش



شکل ۵. مقایسه عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با نتایج حاصل از رابطه بلانجر



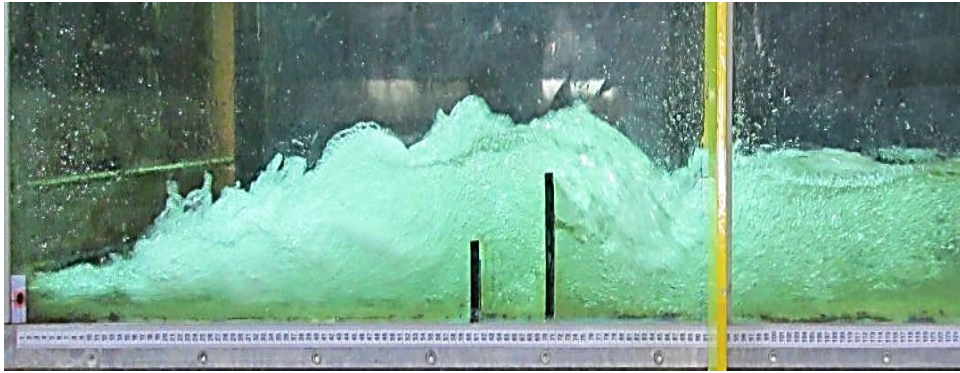
شکل ۶. تغییرات عمق نسبی ثانویه ( $\frac{y_2}{y_1}$ ) در برابر عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره در شرایط ( $\frac{Ls_1}{y_1} = 20$ )

رابطه (۲) (Belanger Equation) مقایسه و در قالب نمودار رسم گردید. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود داده‌های آزمایشگاهی دقت قابل قبولی در مقابل داده‌های رابطه بلانجر دارند. در نمودار شکل (۶) تغییرات عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی برای دو دیواره روزنه‌دار به گونه‌ای که دیواره روزنه‌دار اول در فاصله نسبی ( $\frac{Ls_1}{y_1} = 20$ ) و دیواره روزنه‌دار دوم در فواصل نسبی ( $\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7$ )، ( $\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 3/3$ ) و

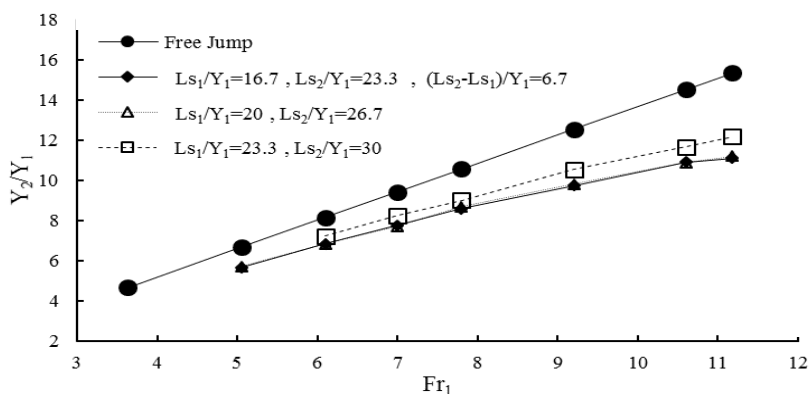
از دیواره اول قرار می‌گیرد، رسم شده است. در این نمودار با افزایش عدد فرود، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در حضور دو دیواره روزنه‌دار نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد کمتر شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد زوج دیواره با فواصل نسبی ( $\frac{Ls_1}{y_1} = 20$ ) و

بیشترین اثر در کاهش عمق نسبی ثانویه را داشته‌اند. این زوج دیواره عمق ثانویه پرش را تا ۲۷ درصد





شکل ۷. نمایی از تشکیل پرش C-jump در عدد فرود ۵/۱ در حضور دو دیواره روزنه‌دار با فواصل نسبی  $(\frac{Ls_1}{Y_1} = 20)$  و  $(\frac{Ls_2}{Y_1} = 23/3)$



شکل ۸. تغییرات عمق نسبی ثانویه  $(\frac{Y_2}{y_1})$  در برابر عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره روزنه‌دار با

$$\text{شرایط } (\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7)$$

نوع C-jump، در حضور دو دیواره روزنه‌دار را نشان می‌دهد. حال با مشخص شدن فاصله مناسب بین دو دیواره روزنه‌دار، این دو دیواره روزنه‌دار با فاصله نسبی ثابت یعنی  $(\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7)$  در سه موقعیت از پنجه پرش قرار می‌گیرند تا بهترین زوج دیواره در کاهش عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی مشخص گردد. مطابق نمودار شکل (۸) زوج دیواره روزنه‌دار با فاصله نسبی  $(\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7)$  در فواصل ۵۰  $(\frac{Ls_1}{y_1} = 16/7)$ ، ۶۰  $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$  و ۷۰  $(\frac{Ls_1}{y_1} = 23/3)$  سانتی‌متر از پنجه پرش جابه‌جا می‌شوند. همان‌طور که در نمودار شکل (۸) پیداست، دو زوج دیواره با فواصل نسبی  $(\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7)$ ،  $(\frac{Ls_1}{y_1} = 16/7)$

نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد کاهش می‌دهند. با دقت در نمودار شکل (۶) ملاحظه می‌شود که عمق نسبی ثانویه پرش در حضور دو دیواره روزنه‌دار در عدد فرود باهم مقایسه شده‌اند. دلیل این امر را می‌توان به طبقه‌بندی پرش‌ها مطابق شکل (۱) نسبت داد. در اعداد فرود معادل ۳/۶ و ۵/۱ پرش هیدرولیکی در حضور دو دیواره روزنه‌دار (در بعضی از فواصل دیواره‌ها از هم) به صورت کامل تشکیل نشد و پرش تشکیل شده را می‌توان از نوع C-jump یا Minimum B-jump دانست که این نوع پرش‌ها شرایط پرش کامل از نوع B-jump را دارا نیستند. طبق نظر هگر و لی (۹) این پرش‌ها پایداری پرش B-jump را ندارند و علاوه بر بیشتر کردن طول سنگ‌چین پس از حوضچه آرامش، فرسایش بیشتری را نیز ایجاد می‌کنند. شکل (۷) تصویری از تشکیل پرش هیدرولیکی از

جدول ۱. درصد کاهش عمق نسبی ثانویه نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد برای نمودار شکل (۸)

$(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 6/7)$ دو دیواره با فاصله نسبی بین			$Fr_1$
$\frac{LS_2}{y_1} = 30$ و $\frac{LS_1}{y_1} = 23/3$	$\frac{LS_2}{y_1} = 26/7$ و $\frac{LS_1}{y_1} = 20$	$\frac{LS_2}{y_1} = 23/3$ و $\frac{LS_1}{y_1} = 16/7$	
----	----	----	۳/۶
----	۱۴/۶	۱۵/۲	۵/۱
۱۱/۴	۱۶/۳	۱۶/۳	۶/۱
۱۲/۵	۱۸/۱	۱۷/۶	۷
۱۴/۸	۱۷/۷	۱۸/۸	۷/۸
۱۵/۹	۲۱/۷	۲۲/۴	۹/۲
۱۹/۶	۲۵	۲۴/۸	۱۰/۶
۲۰/۶	۲۷/۱	۲۷/۸	۱۱/۲

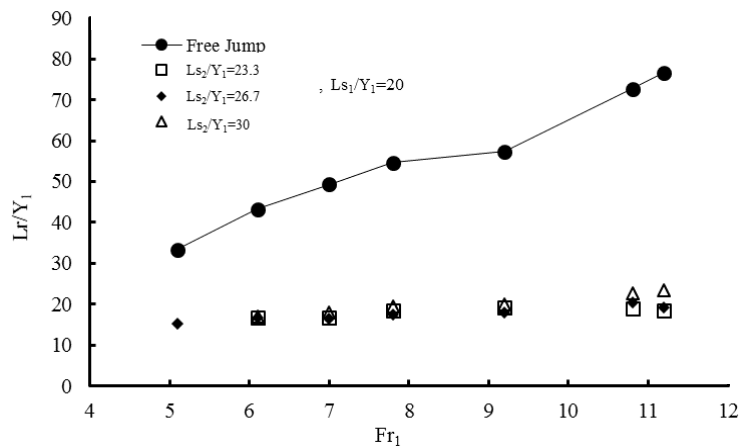
خروجی از روزنه‌های دیواره اول به قسمت پیوسته دیواره دوم برخورد می‌کند. همچنین وجود روزنه‌های دیواره دوم نیز به اصطکاک بیشتر جریان با دیواره منجر می‌شود و به همین دلیل غلتاب‌های خروجی از روزنه‌های دیواره دوم نیز به کاهش بیشتر عمق ثانویه کمک می‌کنند.

#### تغییرات طول غلتاب در حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار

نمودار شکل (۹) تغییرات طول نسبی غلتاب در برابر عدد فرود، در حضور دو دیواره روزنه‌دار در شرایطی که دیواره روزنه‌دار اول در فاصله نسبی  $(\frac{LS_1}{y_1} = 20)$  و دیواره دوم در فواصل نسبی  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 3/3)$ ،  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 6/7)$  و  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 10)$  از دیواره اول باشد را نشان می‌دهد. زوج دیواره با فواصل نسبی  $(\frac{LS_2}{y_1} = 26/7)$  و  $(\frac{LS_1}{y_1} = 20)$  از پنجه پرش، طول غلتاب را تا ۷۴/۹ درصد نسبت به پرش آزاد در عدد فرود ۱۱/۲ کاهش می‌دهد.

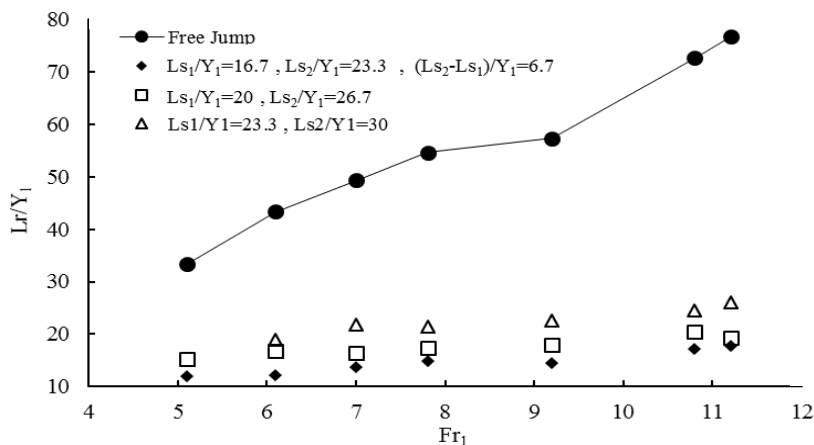
با معلوم شدن بهترین زوج دیواره در کاهش طول غلتاب، مطابق تئوری آزمایش، این زوج دیواره را درحالی که فاصله بین

و  $(\frac{LS_2}{y_1} = 23/3)$  و  $(\frac{LS_2 - LS_1}{y_1} = 6/7)$ ،  $(\frac{LS_1}{y_1} = 20)$  و  $(\frac{LS_2}{y_1} = 26/7)$  به یک اندازه عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی را کاهش داده‌اند. در جدول (۱) درصد کاهش عمق نسبی ثانویه نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد برای نمودار شکل (۸) رسم شده است. زوج دیواره روزنه‌دار با فواصل نسبی  $(\frac{LS_1}{y_1} = 16/7)$  و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اجباری را تا ۱۱ درصد بیشتر از دو دیواره پیوسته مطابق نتایج آزمایش‌های بیرامی و ایلاقی (۱) در عدد فرود ۱۱/۲ کاهش داده است. به‌گونه‌ای که در عدد فرود ۱۱/۲ زوج دیواره با فواصل نسبی مذکور عمق ثانویه پرش هیدرولیکی را تا ۲۸ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد کاهش داده‌اند، درحالی‌که زوج دیواره پیوسته در آزمایش‌های بیرامی و ایلاقی (۱) عمق ثانویه پرش هیدرولیکی را تا ۱۷ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد کاهش داده است. دلیل کاهش بیشتر عمق ثانویه پرش اجباری توسط زوج دیواره روزنه‌دار را می‌توان به وجود روزنه‌های موجود در دیواره‌ها نسبت داد. به‌گونه‌ای که وجود قسمت‌های روزنه‌دار و پیوسته تعبیه شده در دیواره‌ها باعث کاهش بیشتر عمق ثانویه پرش می‌شود. در دیواره‌های روزنه‌دار جت‌های



شکل ۹. تغییرات طول نسبی غلتاب پرش هیدرولیکی ( $\frac{Lr}{Y_1}$ ) در مقابل عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره روزنه‌دار

$$\text{با شرایط } \left(\frac{Ls_1}{y_1} = 20\right)$$



شکل ۱۰. تغییرات طول نسبی غلتاب پرش هیدرولیکی ( $\frac{Lr}{Y_1}$ ) در مقابل عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره روزنه‌دار

$$\text{با شرایط } \left(\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7\right)$$

فواصل نسبی ( $\frac{Ls_1}{y_1} = 16/7$  و  $\frac{Ls_2}{y_1} = 23/3$ ) طول غلتاب را تا ۷۶/۹ درصد نسبت به پرش آزاد در عدد فرود ۱۱/۲ کاهش داده است. زوج دیواره روزنه‌دار طول غلتاب پرش هیدرولیکی اجباری را تا ۱۹/۱ درصد در عدد فرود ۱۱/۲ نسبت به طول غلتاب پرش هیدرولیکی اجباری در حضور دیواره پیوسته مطابق نتایج آزمایش‌های ایلاتقی و بیرامی (۱) کاهش داده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۹) و شکل (۱۰) مشاهده

آنها ثابت می‌باشد، نسبت به پنجه پرش جابه‌جا کرده تا بهترین نتیجه در کاهش طول غلتاب حاصل گردد. در این حالت زوج دیواره با فواصل نسبی ( $\frac{Ls_2 - Ls_1}{y_1} = 6/7$ ) در فاصله ۵۰ از پنجه پرش جابه‌جا می‌شود که نمودار کاهش طول نسبی غلتاب این زوج دیواره در شکل (۱۰) آمده است. در این نمودار، زوج دیواره با



شکل ۱۱. نمایی از ایجاد غلتاب‌ها در حوضچه آرامش با دو دیواره روزنه‌دار

روزنه‌دار تأثیر بسیار مهمی در ایجاد پرش هیدرولیکی، کنترل و تثبیت آن در داخل حوضچه آرامش و جلوگیری از انتقال پرش هیدرولیکی به پایاب دارد.

زوج دیواره روزنه‌دار عمق ثانویه پرش هیدرولیکی را تا ۲۷/۷۵ درصد کمتر از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد می‌رساند. در زوج دیواره روزنه‌دار به دلیل وجود روزنه‌های بیشتر اصطکاک بیشتر شده و با همپوشانی مناسب دیواره‌ها، جریان با قسمت پیوسته دیواره‌ها برخورد بیشتری دارد که این موضوع در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و طول غلتاب بسیار مهم است. همچنین زوج دیواره روزنه‌دار طول غلتاب پرش را تا ۷۶/۹ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد در عدد فرود ۱۱/۲ کاهش می‌دهد.

### سپاسگزاری

این تحقیق با کمک مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم تأمین شده است که بدین وسیله از معاون پژوهشی دانشگاه برای تأمین پژوهانه تشکر و قدردانی می‌شود.

می‌شود با افزایش عدد فرود کاهش طول نسبی غلتاب نسبت به پرش آزاد بیشتر می‌شود. علت این پدیده آن است که با افزایش عدد فرود شدت جریان افزایش می‌یابد و جریان با سرعت بیشتری با دیواره روزنه‌دار اول برخورد می‌کند و همچنین سرعت جت خروجی از روزنه‌های دیواره اول بیشتر می‌شود. اما وجود دیواره روزنه‌دار دوم باعث می‌شود تا دوباره جت‌های جریان از داخل روزنه‌های دیواره دوم عبور کند که باعث اصطکاک بیشتر و افت انرژی بیشتری می‌شود. قسمت پیوسته دیواره دوم نیز سبب برخورد جریان با شدت زیاد با آن، و افت مضاعف انرژی می‌شود. در شکل (۱۱) نمونه‌هایی از غلتاب‌ها و پرش‌های تشکیل شده در حضور دو دیواره روزنه‌دار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود غلتاب‌های پشت دیواره دوم از کف حوضچه به سمت بالا حرکت کرده‌اند و با توجه به اینکه در اعداد فرود بالا این غلتاب‌ها با شدت بیشتری می‌چرخند، به کف حوضچه برخورد نمی‌کنند و آبشستگی‌های شدید در پایین دست حوضچه آرامش ایجاد نمی‌شود.

### نتیجه‌گیری

آزمایش‌های انجام شده نشان داد که استفاده از دو دیواره

### منابع مورد استفاده

۱. بیرامی، م. ک. و م. ایلاقی. ۱۳۸۳. کنترل پرش هیدرولیکی با یک و دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی، استقلال (۱): ۹۷-۱۱۹.

۲. پاپروند، ح. و س. م. کاشفی‌پور. ۱۳۹۴. تأثیر دیواره روزنه‌دار بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش افقی، دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. خانخانی زوراب، ر. و س. م. کاشفی‌پور. ۱۳۹۴. اثر فاصله دیواره روزنه‌دار در افت انرژی حاصل از پرش هیدرولیکی، دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
4. Ashour, M. A. T. Sayed and S. El-Attar. 2015. Impact of Curved Shaped Energy Dissipaters Downstream Diversion Head Structures on the Dissolved Oxygen Content in Irrigation Canals & Enhancement of Irrigation Water Quality. IJSRT 2(2):14-26.
5. Behrouzi-Rad, R. M., H. R. Fathi-Moghadam and A. Alikhani. 2013. Generation of hydraulic jump with sill, A Sci. J. of the Regional Museum of Carinthia. 20(2): 300-309.
6. Chow, V. T. 1973. Open Channel Hydraulic, McGraw-Hill, New York.
7. Hager, W. H. Bremen, R. And Kawagoshi, N. 1990. Classical hydraulic jump: length of roller, J. of Hydraulic Res. 28(5): 591-608.
8. Hager, W. H. and D. Li. 1992. Sill-controlled energy dissipator. J. of Hydraulic Res. 30(2): 165-181.
9. Helal, E. Y., T. H. Nassralla and A. A. Abdelaziz. 2013. Minimizing of scour downstream hydraulic structures using sills. IJCSE 3(3): 591-602.
10. Lin, C., J. Yen and C. Tsai. 2002. Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition. J. of Irrig. and Drainage Eng. 128(4): 249-252.
11. Rajaratnam, N. and K. Hurtig. 2000. Screen-Type Energy Dissipator for Hydraulic Structures. J. of Hydraulic Eng. 126(4): 310-312.
12. Rand, W. 1965. Flow over a vertical sill in an open channel. J. of Hydraulic Division, ASCE 9:97-122.
13. Rand, W. 1967. Flow over a dentaited sill in an open channel. J. of Hydraulic Division, ASCE 9:135-153.
14. Safranez, K. 1929. Untersuchungen ueber der wechselfprung, Bauingenieur 649-668.
15. Ohtsu, I., Y. Yasuda and H. Hashiba. 1990. Drag on vertical sill of forced jump. J. of Hydraulic Division, ASCE 122: 465-469.
16. - Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Hashiba, H., 1990, Drag on vertical sill of forced jump. J. of Hydraulic Division, ASCE 122: 465-469.

## A laboratory Study on the Effect of Perforated Sills in Stilling Basin on the Secondary Depth and Length of the Roller of the Hydraulic Jump

R. Khankhani Zorab\* and S. M. Kashfipour<sup>1</sup>

(Received: Nov. 27-2016; Accepted: May 6-2017)

### Abstract

The purpose of this study was to evaluate two perforated sills in the stilling basin and their impact on characteristics of the hydraulic jump, such as the length of the roller of hydraulic jump, decrease in the secondary depth of the hydraulic jump, and the required tailwater depth. Also, the optimal distance of two perforated sills from the beginning of the stilling basin with a fixed height for the perforated sill and ratios of the opening of holes equal to 50% were determined. The experiments were carried out in the form of 48 tests for different discharges in the range of 47 to 145 lit/s and for Froude numbers in range of 3.6 to 11.2. The results of the experiments on two perforated sills showed that they could only reduce the length of the roller of the hydraulic jump to an acceptable level, with the distance between them providing the conditions to create a stable jump; also, the length of roller of jump was not decreased by reducing the distance between the sills. Also, they decreased the secondary depth of the forced hydraulic jump up to 27.8%, which was less than the secondary depth of the free hydraulic jump; the length of roller was up to 76.9 % less than the length of the roller of the free hydraulic jump for the Froude number of 11.2.

**Keywords:** Perforated sill, Hydraulic jump, Stilling basin, length of roller, Secondary depth of force hydraulic jump.

---

1. Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: reza\_khankhani@yahoo.com