

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر میزان بازشدگی دیواره روزنه‌دار دوم در حوضچه آرامش افقی بر پروفیل جریان و مشخصات پرش هیدرولیکی

رضا خانخانی زوراب^{۱*}، سید محمود کاشفی پور^۲ و بابک شاهی نژاد^۳

۱ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۸

چکیده

یکی از پدیده‌های هیدرولیکی مهم که در دهه‌های گذشته محققان به آن پرداخته‌اند پرش هیدرولیکی است که تا هم اکنون نیز این پژوهش‌ها ادامه دارد. در این تحقیق، اثرهای زوج دیواره روزنه‌دار با روزنه‌های دایره‌ای شکل و میزان بازشدگی ثابت برای دیواره روزنه‌دار اول (۵۰ درصد) و میزان بازشدگی متفاوت برای دیواره روزنه‌دار دوم (۱۲/۵، ۲۵ و ۵۰ درصد)، بر پروفیل جریان عبوری از روی دیواره‌های روزنه‌دار و مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش ارزیابی شده است. آزمایش‌ها در دبی‌های ۴۷/۳ تا ۱۴۵/۵ لیتر بر ثانیه و برای اعداد فرود در بازه ۳/۶ تا ۱۱/۲ در قالب ۳۲ آزمایش اجرا شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که زوج دیواره روزنه‌دار با میزان بازشدگی (۱۲/۵ درصد - ۵۰ درصد) افت نسبی انرژی را تا ۸۳/۷ درصد افزایش داده است. زوج دیواره روزنه دار با بازشدگی ۵۰ درصد نیز برای هر دو دیواره، طول پرش هیدرولیکی را تا ۲/۱۵ برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد کاهش داده است. زوج دیواره با ۵۰ درصد بازشدگی برای دیواره روزنه‌دار اول و دوم بهترین عملکرد را به لحاظ ایجاد پرش‌های کامل و پایدار داشته است. زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰ درصد برای دیواره روزنه‌دار اول و دوم، در مقایسه با سایر زوج دیواره‌های روزنه‌دار، به علت بالا آمدن غلظت‌های ایجاد شده در پشت دیواره روزنه‌دار دوم از کف به سطح جریان، پتانسیل ایجاد فرسایش را در پایین دست حوضچه‌های آرامش کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی

زوج دیواره روزنه دار، درصد بازشدگی، پرش هیدرولیکی پایدار، استهلاک انرژی، طول پرش هیدرولیکی

مقدمه

این ضرورت نه تنها برای محافظت کف و دیواره‌های رودخانه پایین دست در برابر فرسایش ناشی از سرعت و انرژی بالای جریان است، بلکه برای حصول اطمینان از محافظت از بدنه پایین دست سد و سازه‌های وابسته به آن از جمله محافظت از خروجی نیروگاه، تخلیه کننده‌های عمقی، خروجی آبگیرها و نیز کانال‌های انتقال پایین دست در مقابل انرژی جنبشی مخرب آب نیز هست که این عمل با استفاده از سازه‌های مستهلک کننده انرژی صورت می‌گیرد. از انواع مختلفی از مستهلک کننده‌های

به دلیل بالا بودن تراز سرریز نسبت به بستر رودخانه، و به تبع آن افزایش تراز هد آب، انرژی جریان به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد و در نتیجه جریان خروجی در پایین دست قابلیت تخریب نسبتاً بالایی خواهد داشت. بنابراین لازم است انرژی مازاد به طریقی مستهلک شود؛ در سازه‌های آبی، مانند سرریزها، این وظیفه بر عهده مستهلک کننده‌های انرژی است. استهلاک انرژی جنبشی تولید شده در سرریزها ضروری است.

۲- جریان روی دیواره غیر مستغرق. دیواره غیر مستغرق با جریان فوق بحرانی پایین دست دیواره مشخص می شود که در این حالت استهلاک انرژی کامل نمی شود. این نوع جریان اغلب در نظر نخواهد بود زیرا به طور کامل مفهوم استهلاک انرژی را بیان نمی کند (Hager & Li, 1992). می توان به جای دیواره پیوسته، از دیواره روزنه دار^۱ نیز استفاده کرد (Rajaratnam & Hurtig, 2000) که موضوع اصلی این تحقیق را تشکیل می دهد. شگری (Shukry, 1957) با یک سری آزمایش نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی (Fr_1)، فاصله قرارگیری دیواره از پنجه پرش (L_s)، ارتفاع نسبی دیواره ($\frac{h}{y_1}$) و عمق آب پایاب (y_t) در چگونگی شکل گیری جریان از روی دیواره موثرند. هلال و همکاران (Helal *et al.*, 2013) نیز با بررسی روش هایی برای به حداقل رساندن آبشستگی پایین دست سازه های هیدرولیکی با به کارگیری دیواره پیوسته نشان دادند وجود دیواره پیوسته تاثیری قابل توجه در افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق آبشستگی در پایین دست دارد، به طوری که در حالت $\frac{H_d}{L_f} = 0.04$ باشد که H_d ارتفاع دیواره و L_f طول کف است.

هگر و لی (Hager & Li, 1992) به دسته بندی انواع پرش اجباری از روی دیواره پرداختند که در این تحقیق نیز از این طبقه بندی پرش استفاده شده است. بنابراین در ابتدا تعریف این دسته بندی ارائه می شود. پرش نوع A عملاً مربوط به پرش کلاسیک است که دیواره در انتهای غلتاب های سطحی قرار می گیرد (شکل ۱-الف). در پرش نوع B، اثر دیواره افزایش می یابد و غلتاب های کف به سمت بالا و سطح جریان منحرف می شوند و الگوی خط جریان

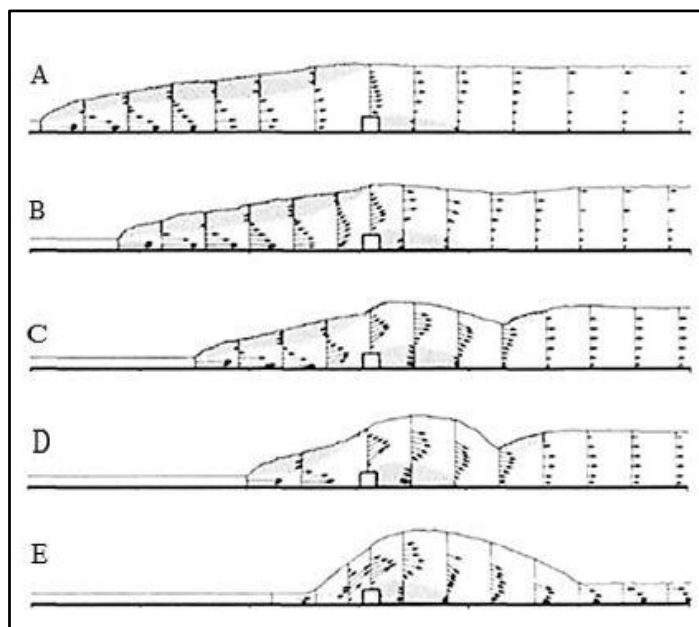
انرژی استفاده می شود؛ از مهم ترین آنها می توان به پرتاب کننده جامی^۱ و حوضچه های آرامش^۲ اشاره کرد (Khankhani Zorab, 2016). حوضچه های آرامش با پرش هیدرولیکی شامل کف بندهای افقی و شیب دار و نیز متعلقات استهلاک انرژی مانند بلوک های تنداب^۳ بلوک های حوضچه^۴ و دیواره انتهایی^۵ پیوسته یا دنداندار برای کنترل پرش هیدرولیکی هستند. چنین متعلقاتی اساساً موقعیت پرش را کنترل می کنند و باعث می شوند که پرش نزدیک به سازه ورودی تشکیل شود. استفاده از دیواره همچنین اجازه می دهد تا طول حوضچه کوتاه انتخاب شود و به عنوان یک ضریب اطمینان در برابر جارو شدن پرش عمل کند (Behrouzi Rad *et al.*, 2013). منظور از کنترل پرش هیدرولیکی، تشکیل شدن پرش هیدرولیکی در موقعیت مکانی خاص است. اندکی تغییر در شرایط جریان و عوامل موثر در تشکیل پرش، سبب تشکیل نشدن پرش و انتقال امواج به فاصله هایی دورتر در پایین دست می شود. در این صورت، انرژی جنبشی جریان تا فاصله های زیادی به سمت پایین ویژگی خود را حفظ می کند و سبب تخریب تاسیسات پایین دست می شود. پرش هیدرولیکی با روش های گوناگون کنترل می شود از جمله: تغییر تراز کف حوضچه، حوضچه های آرامش USBR، دیواره سرتاسری و غیره. حوضچه های آرامش با دیواره سرتاسری از بیش از نیم قرن پیش مورد توجه قرار گرفته اند. تحقیقات نشان داده است که به طور کلی برای کاهش طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه و نیز برای افزایش افت انرژی می توان از دیواره پیوسته سرتاسری در حوضچه استفاده کرد. در این خصوص دو نوع عمده جریان روی دیواره شناسایی شده است: ۱- جریان روی دیواره مستغرق،

1- Flip Bucket
3- Chute Block
5- End Sill

2- Stilling Basin
4- Pool Block
6- Perforated Sill

پرش نوع C، از نظر فرسایش شدیدتر از حد معمول است و از نظر استهلاک انرژی گزینه‌ای موثر در نظر گرفته نمی‌شود. (شکل ۱-ت).
 پرش نوع D زمانی آغاز خواهد شد که جریان آشفته‌تر می‌شود و موج‌های غلتاب می‌توانند به کف برسند و فرسایش ناشی از پرش نوع D (فرسایش کف حوضچه) انتظار می‌رود. زمانی که عمق پایاب کم باشد، پرش نوع D ممکن است زودتر از آن ظاهر شود که شرایط عادی اجازه می‌دهد.

روی دیواره منحنی‌شکل می‌شود. همچنین ارتفاع غلتاب‌های کف بیشتر خواهد شد و جوش‌های سطحی شدید در قسمت پشت دیواره به وجود می‌آید. این نشانه‌ها در حالی است که هنوز تغییر قابل توجهی در سطح آزاد جریان به وجود نیامده است (شکل ۱-ب). پرش نوع B-min نوعی از پرش است که غلتاب‌های ثانویه در پایین دست دیواره تشکیل می‌شوند (شکل ۱-پ). پرش نوع C، پرشی است با شاخصه بیشترین تفاوت بین عمق جریان بالای دیواره و عمق پایاب.



شکل ۱- طبقه‌بندی انواع پرش در حالت وجود دیواره در حوضچه آرامش. الف) پرش نوع A ب) پرش نوع B پ) پرش نوع B می نیمم ت) پرش نوع C ث) پرش نوع D (Hager & Li, 1992)

Fig.1- Classification of jump types in the presence of sill in the stilling basin. a) A-jump, b) B-jump, c) B_m-jump d) C-jump e) D-jump. (Hager & Li, 1992)

۴۰ درصد سطح صفحه می‌تواند به جای بلوک‌ها یا سایر سازه‌های موجود در حوضچه‌های آرامش در سازه‌های هیدرولیکی کوچک به کار رود. مطابق آزمایش‌های راجاراتنام و هورتیگ (Rajaratnam, & Hurtig, 2000)، وقتی جت از روزنه‌های صفحه قائم عبور می‌کند، در اثر اصطکاک با دیواره‌های روزنه‌ها افت انرژی شدیدتری اتفاق

راجاراتنام و هورتیگ (Rajaratnam, & Hurtig, 2000) ایده کنترل پرش هیدرولیکی با یک صفحه قائم روزنه‌دار را به میان آوردند و بر این اساس به آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر صفحه با روزنه‌های مختلف در کنترل پرش هیدرولیکی دست زدند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد که یک صفحه با روزنه‌هایی به مساحت

بازشدگی ۵۰ درصد، طول حوضچه آرامش را نسبت به طول پرش هیدرولیکی آزاد به ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. خانخانی‌زوراب (Khankhani Zorab, 2016) تاثیر فاصله طولی دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰ درصد را بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کرد و به این نتیجه دست یافت که زوج دیواره روزنه‌دار با فاصله‌های نسبی $(\frac{L_{S2}}{y_1} = 26/7$ و $\frac{L_{S1}}{y_1} = 20)$ از پنجه پرش هیدرولیکی، بیشترین کارایی را در پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. L_{S2} و L_{S1} به ترتیب فاصله دیواره روزنه‌دار اول و دوم از پنجه پرش هیدرولیکی و y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی است. برادی و همکاران (Brady *et al.*, 2004) با بررسی سطح آزاد جریان با استفاده از پردازش تصویر، روشی جایگزین برای ثبت و آنالیز داده‌ها بر اساس استفاده از عکس‌های دیجیتال ارائه کردند. روش موجود برای اعتبارسنجی سیالات دینامیکی محاسباتی (CFD) و تجزیه و تحلیل امواج آزمایشگاهی کاربرد دارد. از محدودیت‌های این روش یکی آن است که ثبت داده‌ها به‌جای شرایط میانی جریان بر اساس شرایط مرزی جریان تعریف شده است. بنابراین، برای آنالیز داده‌ها باید از سایر روش‌ها مانند (PIV یا LDV) کمک گرفت.

نابرگا و همکاران (Nobrega *et al.*, 2014) به کمک تجزیه و تحلیل تصویرها و سنسورهای اندازه‌گیری التراسونیک، به بررسی تشخیص سطح آزاد جریان در پرش هیدرولیکی پرداختند. روش پیشنهادی برای تجزیه و تحلیل تصویرها، روش میانگین مشخصات رابط طولی سازگار^۱ است. در این روش از جابه‌جایی سنسورها در راستای طولی در مکان‌های تعیین شده در جهت طول برای به‌دست آوردن پروفیل سطح جریان استفاده شده است. این محققان همچنین نشان دادند که روش پردازش

می‌افتد. در پایین‌دست 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. نتایج آزمایش‌های آنها نشان می‌دهد صفحه قائم روزنه‌دار باید در فاصله دو برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی نسبت به پنجه پرش قرار گیرد. همچنین، در پشت صفحه روزنه‌دار طول کفبند بتنی حوضچه آرامش باید به اندازه ۰/۷ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ادامه یابد.

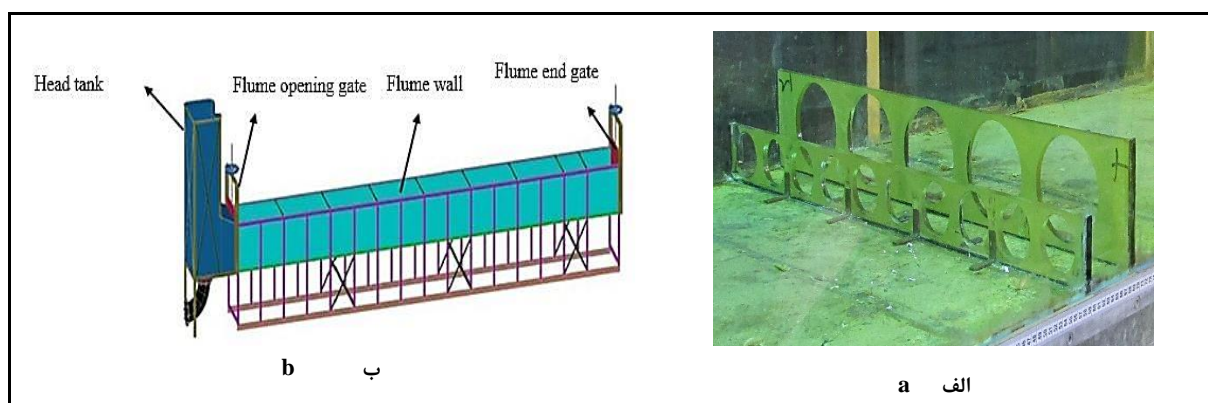
بیرامی و ایلاقی (Beirami & Eilaghi, 2005) با یک‌سری آزمایش روی حوضچه‌های آرامش با یک دیواره سرتاسری نشان دادند که با افزایش ارتفاع دیواره و کاهش فاصله قرارگیری آن از پنجه پرش، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به‌علاوه دیواره با ارتفاع کم، تغییر محسوسی در میزان عمق نسبی ثانویه $\frac{y_2}{y_1}$ ، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی) و افت نسبی انرژی $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، افت انرژی در پرش هیدرولیکی و E_1 ، انرژی مخصوص جریان در محل عمق اولیه پرش هیدرولیکی) نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک ایجاد نمی‌کند و در چنین شرایطی طول پرش هیدرولیکی اجباری نیز تقریباً با طول پرش در شرایط بدون دیواره برابر است. این محققان روی کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از دو دیواره پیوسته به آزمایش‌هایی دست زدند 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، موثرتر باشد که دیواره دوم بلندتر از دیواره اول باشد. بهروزی‌راد و همکاران (Behrouzi Rad *et al.*, 2013) با بررسی شرایط جریان با وجود دیواره روزنه‌دار نشان دادند وجود دیواره روزنه‌دار با

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای شروع آزمایش‌ها از فلوم موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد که جداره‌ای از جنس پلکسی‌گلاس دارد و در آن دو دیواره روزنه‌دار ایجاد شده بود. نمای فلوم مورد استفاده و جاگذاری دیواره‌های روزنه‌دار در شکل ۲ نشان داده شده است. طول، عرض، و ارتفاع این فلوم به ترتیب ۱۰، ۰/۸، و ۰/۶۵ متر و حداکثر دبی جریان در آن ۱۵۰ لیتر بر ثانیه بر اساس بازشدگی دریچه ورودی (۳ سانتی‌متر) است.

تصویر در مطالعه ساختار جریان در پدیده‌های پیچیده مانند پرش هیدرولیکی کاربرد فراوان دارد و پیشنهاد کردند که از سنسورهای التراسونیک در اندازه‌گیری‌های عملی در کنار نتایج آزمایشگاهی حاصل از پردازش تصویر استفاده شود.

مرور مطالعات قبلی نشان می‌دهد روی میزان بازشدگی تک دیواره و صفحه‌های روزنه‌دار تحقیق شده اما تا کنون اثر میزان بازشدگی دیواره روزنه‌دار دوم بررسی نشده است. در این پژوهش سعی شده اثر میزان بازشدگی دیواره روزنه‌دار دوم بر الگوی جریان به کمک نرم‌افزار Engauge و همچنین مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی و ارزیابی شود.



شکل ۲- الف) نمای از قرار گیری دیواره‌های روزنه دار در فلوم آزمایشگاهی ب) شماتیک فلوم

Fig. 2- a) View of the plexiglass perforated sills in laboratory flumes, b) Overview of laboratory flumes

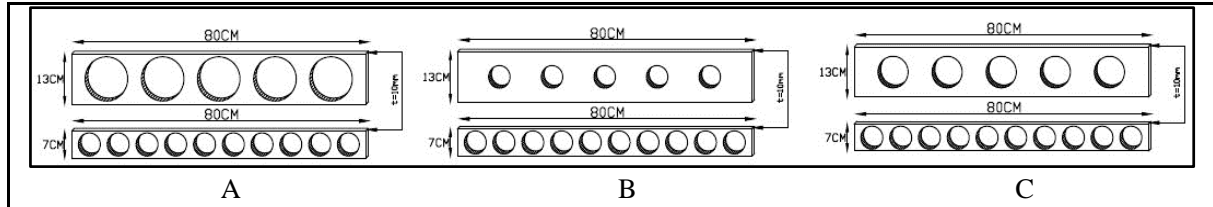
در انتهای فلوم یک دریچه کشویی از جنس پلکسی‌گلاس قرار دارد که برای باز و بسته شدن آن از یک غربیلک استفاده می‌شود. شبکه‌ای از لوله‌های پلاستیکی در جلو دریچه انتهای فلوم تعبیه شده و منظور از آن جلوگیری از تشکیل امواج در پایین دست پرش هیدرولیکی است. دبی جریان با یک سرریز مستطیلی کالیبره اندازه‌گیری می‌شود که در انتهای فلوم قرار دارد. جریان آب پس از عبور از روی سرریز مستطیلی وارد مخازن ذخیره آب می‌گردد. آب داخل مخزن با پمپ‌های موجود در

کف استخر تامین آب خارج از آزمایشگاه، به داخل مخزن تامین آب برای همه فلوم‌ها در آزمایشگاه منتقل و از آنجا مقدار آب مورد نیاز هر یک از فلوم‌ها از طریق شیر کنترل جریان ورودی تامین می‌شود. عمق جریان با عمق‌سنج دیجیتالی با درجه دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی پرش، از جمله طول غلتاب آن، از مترهای نواری چسبیده به دیواره فلوم با درجه دقت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. علاوه بر آن، در فاصله‌های ۵۰ سانتی‌متری، مترهایی به صورت

عمودی نیز نصب گردید. برای افزایش اطمینان از اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، عمق جریان در سه نقطه ثابت در عرض فلوم (یکی در خط مرکزی فلوم و دو اندازه‌گیری دیگر هریک به فاصله ۲۰ سانتی متر از خط مرکزی و در طرفین آن) اندازه‌گیری و از میانگین آنها استفاده شد. در همه آزمایش‌ها ارتفاع گشودگی درجه‌کشویی ابتدای فلوم در ورودی به مقدار ثابت ۳ سانتی‌متر تنظیم گردید.

دیواره‌های روزنه‌دار از جنس پلکسی‌گلاس با عرض ۸۰ سانتی‌متر (معادل عرض فلوم)، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۷ سانتی‌متر برای تیغه جلو و ۱۳ سانتی‌متر برای تیغه دوم ساخته شدند. ارتفاع بهینه دیواره‌ها بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحقیقات پایروند (Payervand, 2017) $\frac{S_1}{y_1} = 2/3$ و ابعاد آنها ارائه شده است.

انتخاب شد که S_1 و S_2 به ترتیب ارتفاع دیواره‌های روزنه‌دار اول و دوم و y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی است. با توجه به تحقیقات بهروزی‌راد و همکاران (Behrouzi Rad et al., 2013) میزان بازشدگی دیواره روزنه‌دار اول ۵۰ درصد انتخاب گردید. برای دستیابی به هدف‌های این تحقیق، دیواره روزنه‌دار دوم با سه درجه بازشدگی ۲۵/۵، ۱۲ و ۵۰ درصد ایجاد شد. 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. برای جلوگیری از زبری روزنه‌های دایره‌ای شکل از سیستم برش لیزر برای ساخت آنها استفاده شده است. در شکل ۳ شماتیک سه زوج دیواره روزنه‌دار و ابعاد آنها ارائه شده است.



شکل ۳- شماتیک زوج دیواره روزنه‌دار با میزان بازشدگی ۵۰ درصد برای دیواره اول و الف) ۲۵ درصد برای دیواره دوم، ب) ۱۲/۵ درصد برای دیواره دوم، پ) ۵۰ درصد برای دیواره دوم

Fig. 3- Overview of two perforated sills with opening percentage to 50 for the first perforated sill and A) 25% for the second perforated sill B) 12.5% for the second perforated sill, C) 50% for the second perforated sill.

آزمایش‌ها کاری وقت‌گیر و مشکل است. ولی تنظیم بار آبی مخزن ذخیره روی یک عدد مشخص آسان‌تر و دقیق‌تر است زیرا امکان مقایسه نتایج برای عدد فرود مشخص را هم فراهم می‌آورد. سرانجام، 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 دنبال شد. برای تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد در هر عدد فرود، عمق پایین‌دست به کمک درجه‌انتهایی به نحوی تنظیم می‌گردید که پرش آزاد رخ

شرح اجرای آزمایش‌ها

در ابتدا ارتفاع نظیر دبی‌های حداقل و حداکثر جریان‌یافته در فلوم، روی اشل نصب شده (در کنار مخزن) در ابتدای فلوم مشخص شد. پس از آن، در بین دو بار آبی حداقل و حداکثر با روش آزمون و خطا ۶ بار آبی دیگر روی اشل مشخص و علامت‌گذاری شد. با توجه به نوسان‌های ناشی از دور موتور پمپ و همچنین زمان‌بر بودن تنظیم یک دبی مشخص، رسیدن به اعداد فرود مشابه برای تمامی

سه پایه دوربین عکس‌برداری کاملاً تراز باشد؛ ارتفاع آن هم باید هم‌تراز فلوم آزمایشگاهی باشد تا عکس‌هایی که گرفته می‌شوند کاملاً افقی باشند و بتوان از آنها به‌خوبی در نرم‌افزار استفاده کرد. شرایط پرش هیدرولیکی در اعداد فرود بالا به‌گونه‌ای است که جریان تلاطم بیشتری دارد و تعیین پروفیل‌های پرش هیدرولیکی بدون استفاده از نرم‌افزار دقیق نیست. برای تهیه پروفیل‌های پرش هیدرولیکی پس از تعیین نقاط کنترل در نرم‌افزار، تعداد نقاط مورد نیاز را تعیین و با انتقال ابعاد این نقاط به نرم‌افزارهای رسم منحنی مانند Excel می‌توان پروفیل پرش هیدرولیکی عبوری از روی زوج دیواره روزنه‌دار تعیین کرد. یادآوری می‌شود که برای تهیه پروفیل‌های جریان عبوری از روی زوج دیواره فرض بر این است که جریان دو بعدی و در عرض تغییرات یکسان است.

آنالیز ابعادی و تعیین پارامترهای موثر

پارامترهای تأثیر گذار پرش هیدرولیکی اجباری با دو دیواره روزنه‌دار عبارت‌اند از:

الف) خصوصیات جریان: شامل سرعت ورودی (V_1)؛ عمق اولیه پرش هیدرولیکی (y_1)؛ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد (y_2^*) که از رابطه بلانجر^۳ به‌دست می‌آید (Chow, 1973)؛ عمق پایاب (y_t)؛ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اجباری (y_2)؛ طول پرش هیدرولیکی (L_b) و طول غلتاب پرش هیدرولیکی (L_r)

ب) خصوصیات سیال جریان: مانند جرم واحد حجم سیال (ρ)؛ لزوجت دینامیک (μ) و شتاب ثقل (g)

ج) خصوصیات هندسی: مانند فاصله قرارگیری دیواره روزنه‌دار اول از پنجه پرش هیدرولیکی (L_{s1}) و فاصله قرارگیری دیواره روزنه‌دار دوم از پنجه پرش هیدرولیکی (L_{s2})؛ ارتفاع دیواره اول (h_1) و ارتفاع

دهد. در این حالت، مشخصات پرش هیدرولیکی مانند عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و عمق اولیه، با عمق سنج دیجیتالی و طول پرش و طول غلتاب نیز با مترهای نصب شده روی فلوم اندازه‌گیری و برداشت می‌گردید. از کلیه آزمایش‌ها عکس و فیلم تهیه شد تا با نرم‌افزارهای مناسب کامپیوتری طول غلتابی اندازه‌گیری مجدد، و جهت صحت‌سنجی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شود. مطابق نتایج آزمایش‌های خانجانی‌زوراب (Khankhani Zorab, 2016)، بهترین فاصله موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی برای زوج دیواره روزنه‌دار با روزنه‌های دایره‌ای شکل و بازشدگی ثابت، مقدار $20 = \frac{L_{s1}}{Y_1}$ و $26/7 = \frac{L_{s2}}{y_1}$ است که L_{s1} و L_{s2} به ترتیب فاصله دیواره روزنه‌دار اول و دوم از پنجه پرش هیدرولیکی هستند که در این تحقیق نیز از همین فاصله استفاده گردید. در مجموع ۳۲ آزمایش اجرا شد، هر زوج دیواره با ۸ عدد فرود آزمایش و ۸ پرش هیدرولیکی آزاد با اعداد فرود مذکور برای مقایسه ایجاد شد. در تمامی آزمایش‌ها برای جلوگیری از شرایط پاشش^۱، پرش اجباری به‌گونه‌ای ایجاد گردید که ابتدا پرش به صورت مستغرق باشد و پس از آن با باز کردن دریچه کشویی انتهای فلوم، پرش کامل (غیر مستغرق) شکل بگیرد.

نحوه تهیه پروفیل‌های پرش هیدرولیکی

برای تهیه پروفیل‌های پرش هیدرولیکی عبوری از روی زوج دیواره روزنه‌دار، از نرم‌افزار (Engauge) استفاده شد. به این منظور باید سه نقطه را با مختصات معلوم به عنوان معیار یا نقاط کنترل^۲ روی فلوم مشخص کرد تا با تعریف آن نقاط (با همان مختصات) در نرم‌افزار بتوان مشخصات پرش هیدرولیکی مانند پروفیل را تعیین کرد. عکس‌های تهیه شده نیز باید به‌گونه‌ای گرفته شده باشند که

1- Splash

2- Bench Mark

3- Blanger

دیواره دوم (h_2)؛ مجموع سطح روزنه‌ها (A_0) و سطح کل دیواره (A).

با توجه به افقی بودن کف فلوم، شیب کف فلوم (S) در تمام آزمایش‌ها صفر است و اثر آن لحاظ نشده است. پس از آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد به شکل رابطه ۱ به دست آمدند.

$$f\left(\frac{L_B}{y_2^*}, \frac{A_0}{A}, Fr_1, Re_1, \frac{h_1}{y_1}, \frac{LS_1}{y_1}, \frac{h_2}{y_1}, \frac{LS_2}{y_1}, \frac{y_t}{y_2^*}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}\right) = 0 \quad (1)$$

با توجه به اینکه در تمام آزمایش‌ها جریان متلاطم است (مقدار عدد رینولدز بیشتر از ۱۲۵۰۰ به دست آمده است)، بنابراین اثر لزوجت که به شکل عدد رینولدز ($\frac{\rho V_1 y_1}{\mu}$) خود را نشان می‌دهد، صرف نظر شده است. ارتفاع و فاصله نسبی دیواره اول و دوم (که با توجه به ثابت بودن ارتفاع و فاصله دیواره‌ها قابل صرف نظر کردن هستند) و عمق نسبی پایاب (که در همه آزمایش‌ها برابر ۱ است) حذف شدند. با توجه به اینکه متغیرهای مهم و مورد نظر طول نسبی پرش هیدرولیکی اجباری ($\frac{L_B}{y_2^*}$)، عمق نسبی مزدوج پرش در شرایط اجباری ($\frac{y_2}{y_1}$) و طول نسبی غلتاب پرش هیدرولیکی ($\frac{L_r}{y_1}$) هستند، رابطه ۱ می‌تواند به صورت رابطه ۲ نوشته شود.

$$\frac{L_B}{y_2^*}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_r}{y_1} = f\left(\frac{A_0}{A}, Fr_1\right) \quad (2)$$

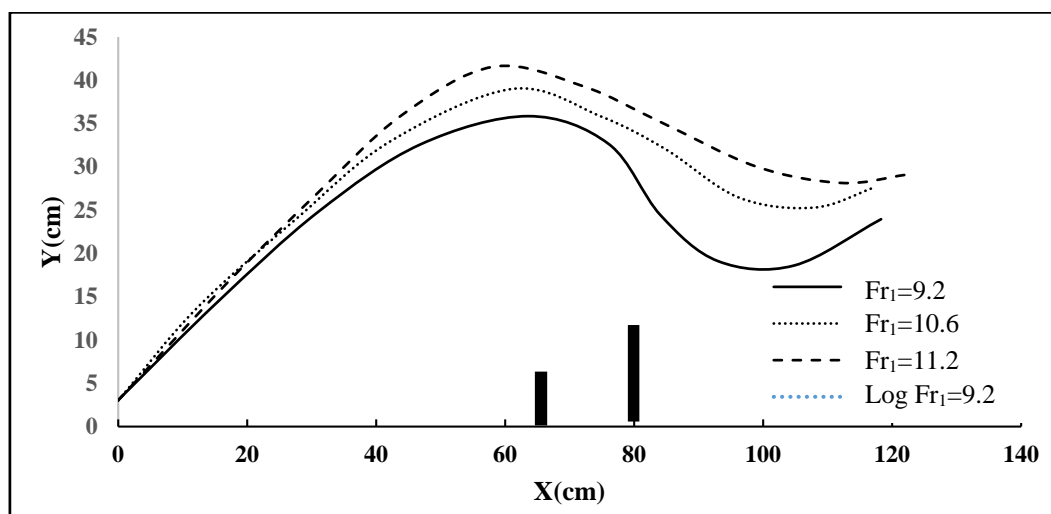
نتایج و بحث

تغییرات پروفیل جریان عبوری از روی دیواره‌های

روزنه‌دار

تغییرات پروفیل جریان عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با میزان بازشدگی ۱۲/۵٪-۵۰٪

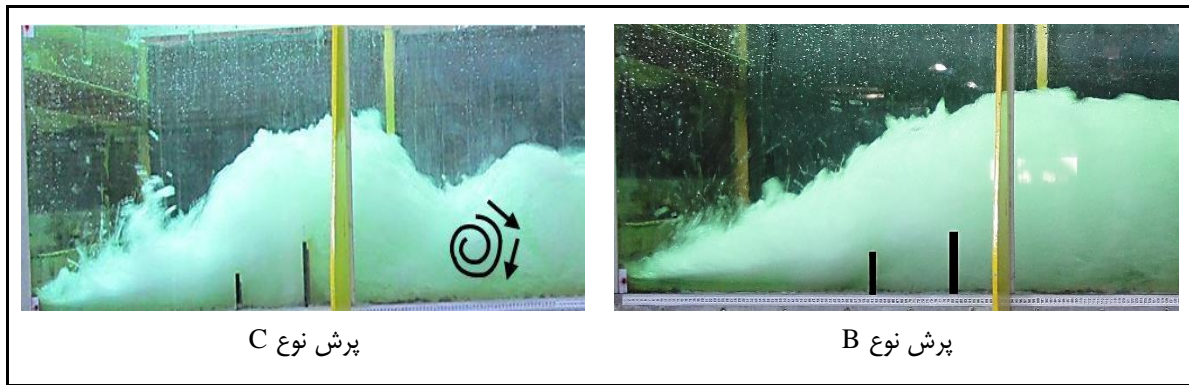
شکل ۴ پروفیل جریان از روی دو دیواره روزنه‌دار را با بازشدگی دیواره اول ۵۰ درصد و دیواره دوم ۱۲/۵ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود پروفیل جریان عبوری از روی دو دیواره مذکور برای سه عدد فرود رسم شده است زیرا در ۵ عدد فرود، پرش اجباری در حضور این دو دیواره طوری تشکیل می‌شد که امکان قرارگیری آنها در دسته‌بندی شکل ۱ مطابق نتایج آزمایش‌های هگر و لی (Hager & Li, 1992) وجود نداشت. بر اساس این طبقه‌بندی، در حضور دیواره ممکن است پرش‌هایی تشکیل شوند که غلتاب‌های ایجاد شده در پشت دیواره روزنه دار دوم به کف حوضچه برخورد کنند و تا فاصله‌های طولانی تا پایین دست ادامه یابند. بدین معنا که جریان پس از عبور از دیواره روزنه دار دوم حالت سرریزی پیدا می‌کند و تا فاصله‌های طولانی در پایین دست ادامه می‌یابد که در این صورت امکان اندازه‌گیری مشخصات پرش وجود ندارد. از این رو، این نوع پرش‌ها برای مقایسه با سایر پرش‌ها حذف گردیدند.



شکل ۴- پروفیل جریان عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی (۱۲/۵٪ - ۵۰٪)
 Fig. 4- Flow pattern passing through two perforated sills with opening percentage (12.5% - 50%)

گرفت. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود، پرش‌ها به سمت پایدارتر شدن نزدیک می‌شوند. پرش‌های هیدرولیکی اجباری بر اساس نوع انحنای پروفیل جریان روی دیواره، موقعیت انتهای پرش هیدرولیکی نسبت به دیواره‌ها و نوع غلتاب‌های تشکیل شده در انتهای پرش، که امکان آسیب رساندن به پایین دست حوضچه را دارند، مطابق دسته‌بندی هگر و لی (Hager & Li, 1992)، طبقه‌بندی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، غلتاب‌های تشکیل شده در پشت دیواره دوم در کف حوضچه آرامش تشکیل می‌شوند و در اعداد فرود بالا با شدت بیشتری به کف حوضچه برخورد می‌کنند و این عامل خود باعث آسیب‌رساندن به پایین دست حوضچه آرامش و فرسایش می‌شود.

به این نکته نیز باید توجه کرد که با افزایش عدد فرود، پرش‌ها به گونه‌ای مطابق دسته‌بندی هگر و لی (Hager & Li, 1992) در شکل ۱، شکل می‌گیرند. با مقایسه اشکال ۱ و ۴ می‌توان دید که پروفیل جریان عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با شرایطی که بازشدگی دیواره دوم ۱۲/۵ درصد باشد در قالب پرش نوع A یا نوع B تشکیل نمی‌شود. پروفیل جریان عبوری از روی این زوج دیواره را به دلیل اینکه از قسمت پنجه پرش تا قسمت حداکثر عمق جریان با شیب تندی جلو می‌رود، می‌توان در دسته پرش نوع C قرار داد. پرش نوع C از نظر فرسایش بزرگ‌تر از حد معمول است و از نظر استهلاک انرژی گزینه‌ای موثر در نظر گرفته نمی‌شود. اگرچه مطابق شکل ۴ در اعداد فرود ۱۰/۶ و ۱۱/۲ می‌توان پرش‌ها را از نوع B-MIN نیز در نظر

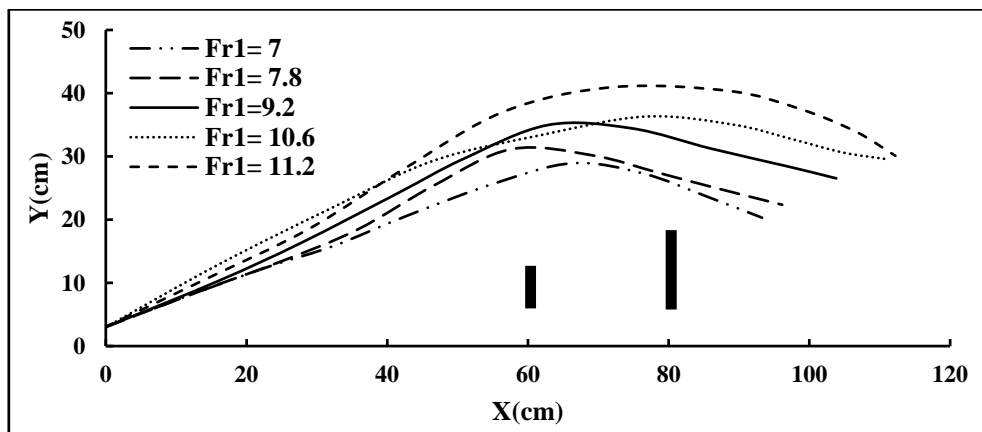


شکل ۵- نحوه شکل گیری غلتاب‌ها در پشت دیواره روزنه‌دار دوم در کف حوضچه آرامش

Fig.5- Formation of rollers behind the second perforated sill at the bottom of the stilling basin

تغییرات پروفیل جریان عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با میزان بازشدگی ۲۵٪-۵۰٪ در شکل ۶، تغییرات پروفیل جریان از روی دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی دیواره اول ۵۰ درصد و دیواره دوم ۲۵ درصد نشان داده شده است. تعداد پرش‌های اجباری تشکیل شده در حضور دیواره‌های مذکور، به‌طوری که بتوان آنها را در دسته‌بندی هگر و لی

تعداد پرش‌های تشکیل شده در حضور دیواره‌های روزنه‌دار با بازشدگی ۱۲/۵ و ۵۰ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت پرش اجباری در ۵ عدد فرود تشکیل شده است. در اعداد فرود کمتر از ۷ امکان تشکیل پرش وجود نداشت و از این رو در مقایسه با سایر پرش‌ها حذف شدند.



شکل ۶- تغییرات پروفیل (نیمرخ) سطح آب عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی (۲۵٪-۵۰٪)

Fig. 6- Variation of Flow pattern passing through two perforated sills with opening percentage (25% - 50%)

در شکل ۷ دیده می‌شود که پرش‌های اجباری تشکیل شده مطابق دسته‌بندی هگر و لی (Hager & Li, 1992) در شکل ۱ در محدوده پرش نوع B قرار می‌گیرند، زیرا پرش‌های اجباری به‌صورت کامل تشکیل شده‌اند و مانند پرش‌های اجباری شکل ۵ دو

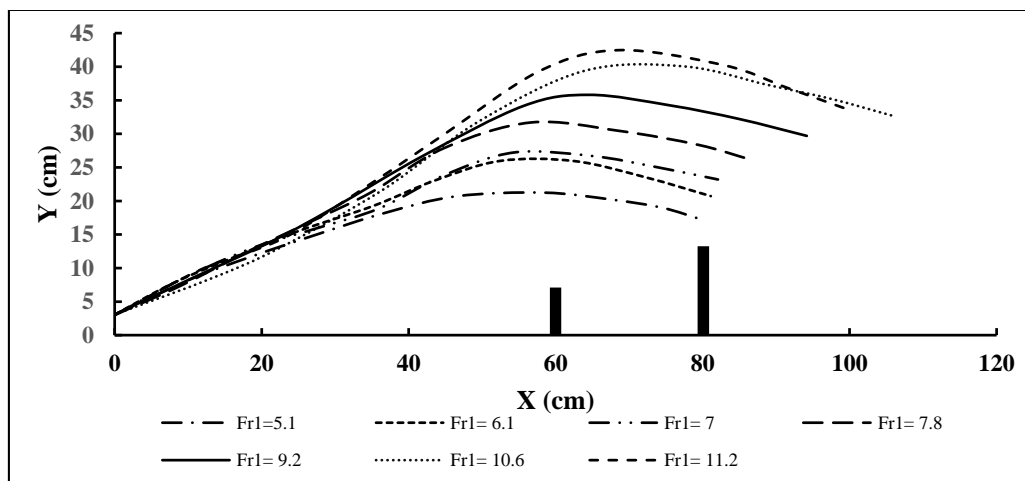
قسمتی نیستند. هرچه عدد فرود بیشتر می‌شود طول پرش اجباری بیشتر خواهد شد و دیواره‌ها بیشتر در داخل پرش قرار می‌گیرند، بنابراین نمی‌توان پرش‌های اجباری تشکیل شده در حضور این زوج دیواره را در دسته پرش نوع A قرار داد.

حضور این زوج دیواره در ۷ عدد فرود تشکیل می‌شود که می‌توان آنها را در دسته‌بندی پرش‌های قرار داد که هگر و لی (Hager & Li, 1992) مشخص کرده‌اند. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که پرش‌های اجباری تشکیل شده در حضور این زوج دیواره تا عدد فرود $7/8$ را می‌توان مطابق دسته‌بندی مذکور، در زمره پرش نوع A معرفی کرد. پرش نوع A عملاً مربوط به پرش کلاسیک است که دیواره در انتهای غلتاب‌های سطحی قرار می‌گیرد، این پدیده به خوبی در شکل ۸ دیده می‌شود.

پرش نوع B، اثر دیواره افزایش می‌یابد و غلتاب‌های کف به سمت بالا و سطح جریان منحرف می‌شوند و پروفیل جریان روی دیواره منحنی‌شکل شده که این پدیده به‌خوبی در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

تغییرات پروفیل جریان عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی $50\% - 50\%$

پروفیل جریان عبوری از روی زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی دیواره اول و دوم به‌میزان 50% درصد در شکل ۷ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، پرش اجباری در



شکل ۷- تغییرات پروفیل (نیمرخ) سطح آب عبوری از روی دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ($50\% - 50\%$)
 Fig. 7- Variation of Flow pattern passing through two perforated sills with opening percentage ($50\% - 50\%$)

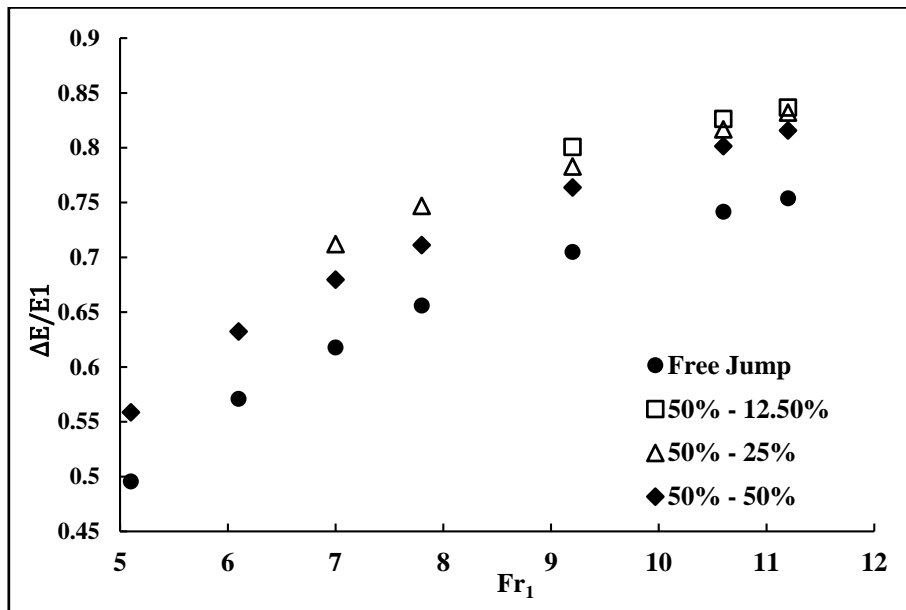
با بازشدگی 50% درصد بسیار پایدارتر از پرش‌های اجباری تشکیل شده در حضور زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی $25\% - 50\%$ هستند. پرش‌های اجباری در حضور زوج دیواره ($25\% - 50\%$) نسبت به پرش‌های اجباری در حضور زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ($12/5\% - 50\%$) پایدارترند. با توجه به مطالب قبلی می‌توان نتیجه گرفت، به لحاظ پایداربودن پرش هیدرولیکی و تشکیل یک پرش کامل، زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی 50% درصد بهترین زوج دیواره است.

در اعداد فرود $9/2$ تا $11/2$ ، انتهای غلتاب‌های سطحی روی دیواره انتهایی قرار نمی‌گیرند. به‌همین دلیل در دسته پرش نوع A طبقه‌بندی نمی‌شوند و می‌توان آنها را پرش نوع B دانست. گفتنی است که در پرش نوع B ایجاد شده در حضور زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی 50% درصد، فاصله بین عمق ثانویه (انتهای پرش هیدرولیکی اجباری) و عمق جریان بالای دیواره کمتر است تا در پرش‌های نوع B در حضور دو دیواره روزنه‌دار با درصد بازشدگی ($25\% - 50\%$). بنابراین، پرش‌های اجباری تشکیل شده در حضور زوج دیواره روزنه‌دار

تغییرات افت نسبی انرژی

افت نسبی انرژی در حالت وجود دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی دیواره اول برابر ۵۰ درصد و بازشدگی متفاوت برای دیواره دوم، در فاصله نسبی $\frac{Ls_1}{Y_1} = 20$ و $\frac{Ls_2}{Y_1} = 26/7$ از پنجه پرش هیدرولیکی مشاهده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در بررسی میزان اثرگذاری دیواره‌های روزنه‌دار می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی با حضور دیواره‌های روزنه‌دار است. در شکل ۸ نمودار



شکل ۸- تغییرات افت نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) در برابر عدد فرود برای زوج دیواره‌ها با بازشدگی متفاوت برای دیواره دوم

Fig. 8- Variation of relative Energy loss ($\frac{\Delta E}{E_1}$) versus Froude number for perforated sills with different opening percentage of second perforated sill

روزنه‌دار دوم دارد. در نتیجه، قسمت پیوسته این دیواره در مقایسه با دو دیواره دیگر بیشتر می‌شود و جت‌های عبوری از روزنه‌های دیواره اول به قسمت پیوسته بیشتری از دیواره دوم برخورد می‌کنند و استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. در جدول ۱، مقدار اختلاف افت نسبی انرژی در زوج دیواره روزنه‌دار با درصدهای متفاوت بازشدگی، نسبت به پرش آزاد، ارائه شده است.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی (۵/۱۲-۵۰٪) بیشترین افت نسبی انرژی را در پرش هیدرولیکی ایجاد کرده است. این زوج دیواره میزان افت نسبی انرژی را تا ۹/۶ درصد نسبت به پرش آزاد در عدد فرود ۹/۲ افزایش داده و به ۸۳/۷ درصد در عدد فرود ۱۱/۲ رسانده است. دلیل این پدیده آن است که در زوج دیواره روزنه‌دار (۵/۱۲-۵۰٪) دیواره دوم بازشدگی کمتری نسبت به سایر دیواره‌های

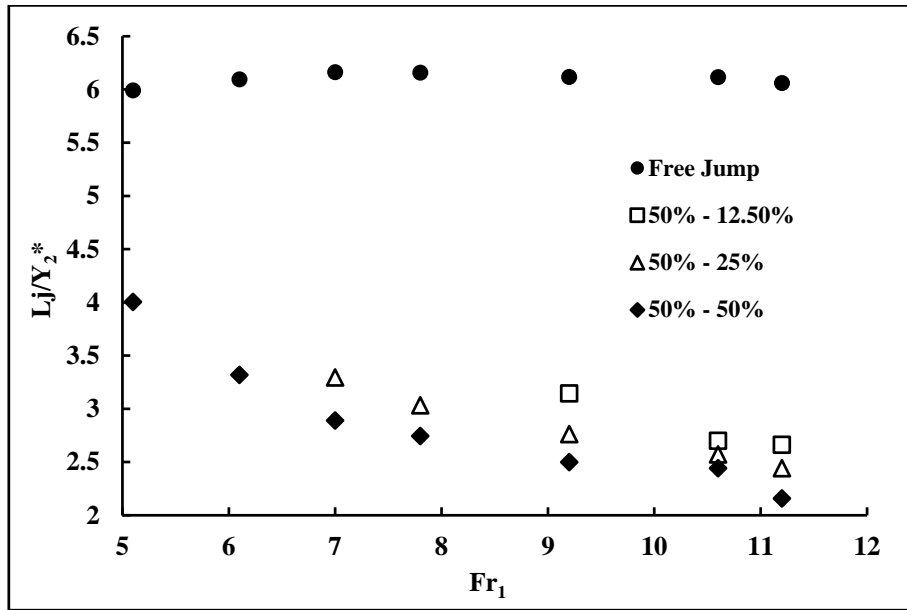
جدول ۱- اختلاف مقدار افت نسبی انرژی (برحسب درصد) در حالت دو دیواره روزنه‌دار نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد
 Table.1- Difference percentages of relative energy loss values in the state two perforated sills compared to free hydraulic jump

Fr ₁	زوج دیواره (۵۰٪-۵۰٪)	زوج دیواره (۲۵٪-۵۰٪)	زوج دیواره (۱۲/۵٪-۵۰٪)
	Two perforated sills (50%-50%)	Two perforated sills (50%-25%)	Two perforated sills (50%-12.5%)
5.1	6.3	---	----
6.1	6.1	----	----
7	6.2	9.4	----
7.8	5.5	9.1	----
9.2	5.9	7.8	9.6
10.8	6	7.5	8.5
11.2	6.2	7.8	8.3

تغییرات طول نسبی حوضچه آرامش

سطح بازشدگی روزنه‌ها در این نوع حوضچه باعث شده بخشی از جریان اجازه عبور از داخل دیواره را پیدا کند که این موضوع به همراه عملکرد دیواره به عنوان مانع بر سر راه جریان، موجب افزایش شدید افت انرژی و کاهش قابل توجه طول پرش هیدرولیکی می‌گردد، به طوری که طول پرش هیدرولیکی در مقایسه با شرایط استاندارد پرش آزاد به نحوی چشمگیر کاهش می‌یابد. این نوع حوضچه در مقایسه با حوضچه‌های آرامش استاندارد، عملکرد مناسب‌تری دارد و طول پرش هیدرولیکی را نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد به کمتر از نصف می‌رساند. روند تغییرات $\frac{L_j}{Y_2}$ در حضور دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ثابت (۵۰ درصد) برای دیواره اول و بازشدگی متفاوت برای دیواره دوم در فاصله نسبی $\frac{L_{S_2}}{Y_1} = 26/7$ و $\frac{L_{S_1}}{Y_1} = 20$ از پنجه پرش هیدرولیکی

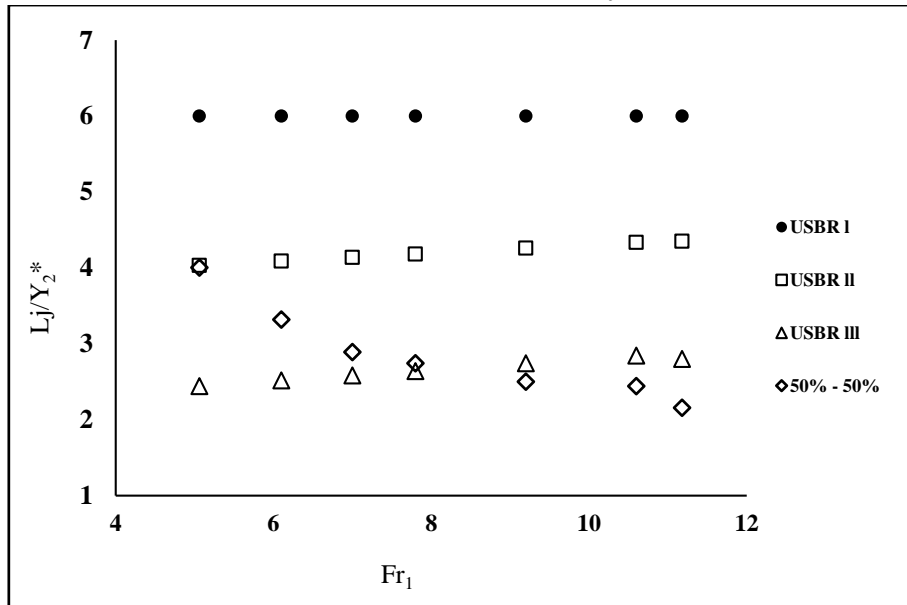
در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود طول پرش کاهش می‌یابد. بر اساس نمودار شکل ۹، زوج دیواره با بازشدگی (۵۰٪-۵۰٪) بهترین عملکرد را در کاهش نسبت $\frac{L_j}{Y_2}$ دارد. دلیل این موضوع آن است که در حضور زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی (۵۰٪-۵۰٪)، پرش‌ها به صورت کاملاً پایدار تشکیل می‌شود به نحوی که دسته‌ای از پرش‌های تشکیل شده در حضور این زوج دیواره را می‌توان مطابق دسته‌بندی پرش‌ها در گزارش هگر و لی (Hager & Li, 1992) از نوع پرش A دانست. بنابراین، با اینکه زوج دیواره با درصد بازشدگی (۱۲/۵٪-۵۰٪) بهترین اثر را در افزایش افت نسبی انرژی دارد، اما پرش‌های تشکیل شده در حضور زوج دیواره با درصد بازشدگی (۵۰٪-۵۰٪) پایدار است و به خوبی می‌توانند طول نسبی پرش را کاهش دهند.



شکل ۹- تغییرات طول نسبی پرش ($\frac{L_j}{Y_2^*}$) در برابر عدد فرود برای زوج دیواره‌ها با درصدهای بازشدگی متفاوت برای دیواره دوم

Fig. 9- Variation of Relative jump length ($\frac{L_j}{Y_2^*}$) versus Froude number for perforated sills with different opening percentage of second perforated sill

در نمودار شکل ۱۰ اثر کاهش $\frac{L_j}{Y_2^*}$ در پرش هیدرولیکی با طول نسبی حوضچه آرامش حضور زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰٪-۵۰٪ و فاصله نسبی $\frac{L_{S1}}{Y_1} = 20$ و $\frac{L_{S2}}{Y_1} = 26/7$ از پنجه شده است.



شکل ۱۰- نمودار مقایسه طول نسبی حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰٪-۵۰٪ با حوضچه‌های استاندارد USBR

Fig. 10- Diagram of Comparison of Relative Length of stilling basin in the Presence of Two perforated sills with opening percentage (50% - 50%) versus Standard USBR basins.

قبول زوج دیواره (۵/۱۲٪ - ۵۰٪). به لحاظ افت نسبی انرژی است. به لحاظ کاهش طول نسبی حوضچه آرامش، زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰٪-۵۰٪ به‌دلیل ایجاد پرش‌های کامل‌تر روی خود، بهترین عملکرد را دارد و میزان طول نسبی حوضچه آرامش را تا ۲/۱۵ برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد در عدد فرود ۱۱/۲ کاهش داده است. این زوج دیواره طول پرش هیدرولیکی را تا ۶۴/۵ درصد نسبت به پرش آزاد کاهش می‌دهد که نسبت به نتایج آزمایش‌های بهروزی‌راد (Behrouzi *et al.*, 2013)، ۲۴/۵ درصد طول پرش هیدرولیکی را بیشتر کاهش می‌دهد. عملکرد این زوج دیواره نسبت به عملکرد حوضچه‌های آرامش USBR I و USBR II و USBR III بهتر اما نسبت به عملکرد حوضچه آرامش SAF ضعیف‌تر است. حداکثر افزایش افت نسبی انرژی نسبت به پرش آزاد در مطالعات بیرامی و ایلاقی (Beirami & Ilaghi, 2005) برابر ۶ درصد اما در تحقیق حاضر ۱۰ درصد یعنی ۴ درصد بیشتر از مقداری است که آنها گزارش داده‌اند. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰٪-۵۰٪ بهترین عملکرد را در کنترل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش و کمک به ایجاد پرش پایدار دارد به‌گونه‌ای که غلتاب‌های ایجاد شده در پشت دیواره روزنه‌دار دوم کاملاً از کف حوضچه به‌سمت بالا و سطح جریان هدایت می‌شوند که نتیجه آن تشکیل پرش‌های نوع A یا B در حضور این زوج دیواره است. به‌عبارت دیگر، پرش‌های ایجاد شده از نظر فرسایش مشکلی برای پایین‌دست حوضچه‌های آرامش ایجاد نمی‌کنند.

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که عملکرد زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰٪-۵۰٪ در حوضچه آرامش بهتر است تا در حوضچه‌های آرامش USBR I و USBR II. در خصوص حوضچه آرامش USBR III تا اعداد فرود حدود ۸ نسبت به حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار عملکرد بهتری در کاهش طول حوضچه دارد. دلیل این امر آن است که در حوضچه آرامش با زوج دیواره روزنه‌دار، در اعداد فرود پایین به‌دلیل کم بودن سرعت برخورد جریان با قسمت پیوسته دیواره و کم بودن سرعت جت‌های خروجی از روزنه‌ها، غلتاب‌های تشکیل شده شدت زیادی ندارند و تأثیر دیواره روزنه‌دار در کاهش طول حوضچه کمتر است. اما در اعداد فرود ۸ و بیشتر، دیواره روزنه‌دار به خوبی جت‌های جریان را از خود عبور می‌دهد و ضمن ایجاد غلتاب‌های کامل‌تر و با شدت بیشتر، اثر بهتری در کاهش طول حوضچه آرامش نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از دو دیواره روزنه‌دار تأثیر بسیار مهمی در ایجاد پرش هیدرولیکی، کنترل و تثبیت آن در داخل حوضچه آرامش و نیز جلوگیری از انتقال پرش هیدرولیکی به پایاب دارد. به لحاظ افت نسبی انرژی، زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی عملکرد بهتری نسبت به سایر زوج دیواره‌های روزنه‌دار دارد و حداکثر میزان افت نسبی انرژی در این زوج دیواره ۸۳/۷ درصد در عدد فرود ۱۱/۲ است، در حالی که حداکثر افت نسبی انرژی در زوج دیواره روزنه‌دار با بازشدگی ۵۰٪-۵۰٪ برابر ۸۱/۷ درصد است که نشان‌دهنده عملکرد قابل

مراجع

- Behrouzi-Rad, R., Fathi-Moghadam, M., Ghafouri, H. R., & Alikhani, A. (2013). Generation of hydraulic jump with sill. *A scientific Journal of the Regional Museum of Carinthia*, 20(2), 300-309.
- Beirami, M. K., & Ilaghi, M. (2005). Forced hydraulic jump by one and two continuous sills in a horizontal stilling basin.. *Jame*, 24(1), 97-119. (in Persian)
- Brady, P. D. M., Boutounet, M., & Beecham, S. (2004). Free surface monitoring using image processing. *Australasian Fluid Mechanics Conference the University of Sydney*, 15, 1-4.
- Chow, V. T. (1973). *Open Channel Hydraulic*. McGraw-Hill. New York.
- Hager, W. H., & Li, D. (1992). Sill-controlled energy dissipator. *Journal of Hydraulic Research*, 30(2), 165-181.
- Helal, E. Y., Nassralla, T. H., & Abdelaziz, A.A. (2013). Minimizing of scour downstream hydraulic structures using sills. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3(3), 591-602.
- Khankhani Zorab, R. (2016). The effect of distance of two perforated sills on hydraulic jump characteristics. (M. Sc. Thesis) Faculty of Water Science Engineering. Shahid Chamran University. Ahwaz. Iran. (in Persian)
- Nobrega, J. D., Schulz, H. E., & Zhu, D. Z. (2014). Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis. *International Symposium on Hydraulic Structures and Society*, 5, 1-8.
- Payervand, H. (2017). The effect of height of two perforated sills on dissipation of energy in hydraulic jump. (M. Sc. Thesis) Faculty of Water Science Engineering. Shahid Chamran University. Ahwaz. Iran. (in Persian)
- Rajaratnam, N., & Hurtig, K. (2000). Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), 310-312.
- Shukry, A. (1957). The efficiency of floor sills under drowned hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division. ASCE*, 83, 1-8.

Laboratory Study on the Effect of Second Perforated Sill Opening on Flow Pattern and Hydraulic Jump Characteristics in Horizontal Stilling Basin

R. Khankhanizorab^{*}, S. M. Kashefipour and B. Shahinezhad

^{*} Corresponding Author: PhD. Student of Water Structures, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: reza_khankhani@yahoo.com

Received: 26 September 2019, Accepted: 27 April 2020

Extended Abstract

Introduction

One of the most extensively investigated phenomena in hydraulic engineering is the hydraulic jump that numerous investigators have studied it over the past century. There are different types of stilling basins, including Standard stilling basin USBR, Stilling basin SAF, Stilling basin with continuous sill and stilling basin with perforated sill noted. Each basin, depending on the intensity of the hydraulic jump, usually needs components to reduce the length of the hydraulic jump as much as possible while shaping it at a specific location. These components include the chute Block, Baffle Piers, and perforated sills that is the subject of this study. These types of dampers are the most common energy dampers in dams and irrigation and drainage networks and generally have high efficiency of over 60% in energy dissipation. The purpose of this study is evaluation of the effect of second perforated sill opening on flow pattern and hydraulic jump characteristics in horizontal stilling basin dissipation of energy and required tail water depth. Also determine the optimal distance of two perforated sills from the beginning of the stilling basin with a fixed height for perforated sill.

Materials and Methods

Experiments were carried out on one and two perforated sills in the Shahid Chamran University Lab in Ahwaz, in a Plexiglas flume and an iron tank. Experiments were carried out so that, given the minimum and maximum flow rates in the flume, the height of such discharges was marked on a deck mounted next to the storage tank at the beginning of the flume. After determining the optimal distance of a single perforated sill, the two perforated sills were tested in such a way that the second wall was located at distances 10, 20 and 30 centimeters from the first perforated sill. After investigating the results and determining the best perforated sill pair in increasing energy loss and decreasing basin length, the best perforated sill pair with constant distance between them were moved to the jump toe at three distances of 50, 60 and 70 centimeters from the first wall to give the best. The distance for a pair of perforated sills are obtained. In all experiments to avoid the splashing conditions, a forced jump was created so that the jump would first be submerged and then a full (non-submerged) jump would be formed by opening the end gate of the flume. Experiments were carried out in the form of 32 tests for different discharges in range of 47.3 to 145.5 lit/s and Froude number in ranges of 3.6 to 11.2.

Results and Discussion

Maximum energy loss compared to free hydraulic jump increases 10%, i.e. perforated sill energy loss rate reached 83.2% at Froude number 11.2. The length of hydraulic jump in the stilling basin with the single perforated sill is reduced to 2.2 times the secondary depth of the hydraulic jump. In other words, the perforated sill reduces the jump length by 64.5% compared to the free jump. In this study experiments were conducted to evaluate the effects of two perforated sills with circular holes and fixed opening percentage to 50 for the first perforated sill and different opening percentage to (12.5%-25%-50%) for the second perforated sill on flow pattern and hydraulic jump characteristics in horizontal stilling basin. It should be noted that several tests were performed to confirm the perforated sill pair with relative distances 60 and 70 centimeters from the jump toe at the mentioned positions and showed that the perforated sill pair still with relative distances 16.7 and 23.3 had the greatest effect on decreasing the relative length of the jump. Based on the results of experiments, an analytical expression was developed for the prediction of the length of hydraulic jump in the case of two perforated sills. Results of experiments on two perforated sills showed that they can only reduce the length of hydraulic jump to an acceptable level that the distance between them provide the conditions for creating a stable jump and the length of jump do not decrease by reducing the distance between the sills.

Conclusions

Results of experiments show that two perforated sills with opening percentage (50% - 12.5%) increase relative energy loss up to 83.7%. Also the length of hydraulic jump in the stilling basin with two perforated sills with opening percentage 50 is reduced to 2.15 times the secondary depth of the free hydraulic jump. The results showed that two perforated sills with opening percentage of 50 for the first and second perforated sills were selected as the best twin of sills to create the perfect and sustainable jumps. In comparison with the other considered couples causes the less erosion potential in downstream of stilling basins due to transferring of the hydraulic rollers from the bed to the surface of flow.

Keywords: Energy Dissipation, Length of Hydraulic Jump, Opening Percent, Perforated Sills, Stable Hydraulic Jump