



بررسی آزمایشگاهی اثر تغییرات فاصله یک و دو دیواره روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش بر افت انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی

رضا خانخانی زورآب^۱ و سید محمود کاشفی پور^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز kashefipour@excite.com

پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۶/۷/۲۵

دریافت: ۱۳۹۶/۲/۴

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، بررسی عملکرد یک و دو دیواره روزنه‌دار در حوضچه آرامش و چگونگی تأثیر آن بر مشخصات پرش هیدرولیکی از قبیل طول پرش هیدرولیکی، افت نسبی انرژی و عمق مورد نیاز پایاب می‌باشد. همچنین فاصله بهینه قرارگیری یک و دو دیواره روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش به ازای یک ارتفاع ثابت برای دیواره روزنه‌دار اول و دوم با سطح بازشدگی ۵۰ درصد مشخص می‌گردد. آزمایش‌ها در دبی‌های ۴۷/۳ تا ۱۴۵/۵ لیتر بر ثانیه و برای اعداد فرود در بازه ۳/۶ تا ۱۱/۲ در قالب ۷۲ آزمایش انجام شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی یک رابطه ریاضی برای پیش بینی طول حوضچه آرامش در حالت وجود دو دیواره روزنه‌دار ارائه شده است. نتایج داده‌های آزمایشگاهی بر روی دو دیواره روزنه‌دار نشان داد که زوج دیواره روزنه‌دار در صورتی می‌تواند طول 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 پرش الزاما کاهش نمی‌یابد. همچنین زوج دیواره روزنه‌دار طول پرش را تا ۱/۸۹ برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد کاهش می‌دهد و مقدار افت نسبی انرژی را به ۸۱/۷ درصد در عدد فرود ۱۱/۲ رسانده است.

کلید واژه‌ها: دیواره روزنه‌دار، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، استهلاك انرژی.

مقدمه

هدف از ساخت یکی از انواع حوضچه‌های آرامش تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه است. این نوع مستهلک کننده‌ها به‌عنوان متداول‌ترین مستهلک‌کننده‌های انرژی در سدها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی بوده و عموماً دارای راندمان‌های بالای ۶۰ درصد در استهلاك انرژی می‌باشند (Chow, 1973). هر حوضچه آرامش برحسب شدت پرش هیدرولیکی، معمولاً احتیاج به اجزایی دارد تا ضمن شکل دادن پرش هیدرولیکی در یک موقعیت و محل خاص، تا حد امکان از طول آن بکاهد. از جمله این اجزا می‌توان به بلوک‌های پای تنداب، بلوک‌های آرام کننده و دیواره سرتاسری روزنه‌دار که موضوع این تحقیق را در بر گرفته است، اشاره کرد.

حوضچه‌های آرامش با دیواره سرتاسری از بیش از نیم قرن پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات نشان داده است که به طور کلی برای کاهش طول پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه و همچنین افزایش افت انرژی، می‌توان از یک دیواره پیوسته سرتاسری در حوضچه استفاده کرد. در این خصوص دو نوع عمده جریان بر روی دیواره شناسایی شده است که عبارتند از: ۱- دیواره مستغرق ۲- دیواره غیرمستغرق.

Shukry (1957) با انجام یک سری آزمایش‌ها 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 همچنین عمق آب پایاب (y_t) در چگونگی شکل‌گیری جریان از روی دیواره موثرند.

Rand (1965, 1967) 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. Karki (1976) تشکیل شدن یا نشدن پرش در جریان عبوری از روی دیواره را براساس عدد فرود در مقطع اولیه (Fr_1) و ارتفاع نسبی دیواره ($\frac{h}{y_1}$) مورد بررسی قرار داد. Bertz و Hager (1986) پرش هیدرولیکی اجباری در یک حوضچه آرامش مستطیلی وقتی که دیواره سرتاسری در مقابل جریان ایجاد شده باشد را به سه حالت تقسیم کرد. حالت اول که ارایه‌دهنده پرش نوع A است، قدرت ایجاد فرسایش بسیار کمی دارد. در پرش نوع B، پرش قادر به فرسایش قسمت‌هایی از بستر رودخانه در قسمت پایین دست می‌باشد. پرش نوع C، بیانگر شرایطی است که پرش

ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به‌علاوه دیواره با ارتفاع کم، تغییر محسوسی در میزان عمق نسبی ثانویه ($\frac{y_2}{y_1}$) و افت نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) 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. همچنین آن‌ها آزمایش‌هایی نیز 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 موثر باشد که دیواره دوم بلندتر از دیواره اول باشد. همچنین Alikhani et al (2010) نیز به بررسی و کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از دیواره پیوسته پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها برای عدد فرود چهار تا ۱۲ و نسبت ارتفاع دیواره به عمق اولیه پرش هیدرولیکی دو تا ۸ انجام شد که نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که دیواره پیوسته تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد دارد. آن‌ها همچنین معیارهای طراحی برای حوضچه آرامش با دیواره پیوسته را ارائه کردند. Behrouzi-rad et al (2013) به بررسی شرایط جریان با وجود دیواره روزنه دار 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 منحنی شکل پیوسته با مقطع مثلثی نشان داد که قرارگیری سه ردیف دیواره منحنی با انحنای ۱۲۰ درجه و تقعر در خلاف جهت جریان تا ۴۲/۵ درصد افت نسبی انرژی نسبت به پرش آزاد را ایجاد می‌کند.

هیدرولیکی قدرت فرسایش دهنده‌گی زیادی دارد و آب‌شستگی‌های عمیق در بستر رودخانه پایین‌دست ایجاد می‌کند که این نوع پرش تنها برای بسترهای مقاوم در برابر فرسایش مناسب است.

مطالعات بعدی روی پرش هیدرولیکی اجباری در اثر وجود یک دیواره پیوسته به وسیله هگر و لی ادامه یافت. آن‌ها با ارائه یک طبقه‌بندی جدید، انواع پرش هیدرولیکی اجباری را به پنج نوع پرش نوع A، پرش نوع B، پرش نوع B حدافل، پرش نوع C و پرش نوع D، تقسیم بندی کردند که در پرش نوع A، فاصله قرار گرفتن دیواره از ابتدای پرش حداکثر و در پرش نوع D این فاصله حدافل می‌باشد (Hager and Li, 1992). در شکل (۱) نمایی از طبقه‌بندی انواع پرش توسط هگر مشاهده می‌شود که در دسته‌بندی پرش‌های هیدرولیکی این تحقیق کمک شایانی نموده است.

Narayanan و Farhudi (1991) نیز به بررسی الگوهای جریان در پرش‌های هیدرولیکی اجباری و حوضچه‌های آرامش پرداختند و نیروهای فشاری را بر روی دیواره اندازه‌گیری کردند. Rajaratnam و Hurtig (2000) ایده کنترل پرش هیدرولیکی به‌وسیله یک صفحه قائم روزنه‌دار را مطرح نمودند و یک سری آزمایش‌ها برای بررسی تاثیر صفحه با روزنه‌های مختلف در کنترل پرش هیدرولیکی را انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که یک صفحه با روزنه‌هایی به مساحت ۴۰ درصد سطح صفحه می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای بلوک‌ها یا سایر ضمایم موجود در حوضچه‌های آرامش در سازه‌های هیدرولیکی کوچک قرار گیرد.

تحقیقات بعدی روی حوضچه‌های آرامش با یک دیواره سرتاسری به وسیله Beirami و Eylaghi (2004) ادامه یافت. آن‌ها با انجام یک سری آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش ارتفاع دیواره و کاهش فاصله قرارگیری آن از پنجه پرش، عمق

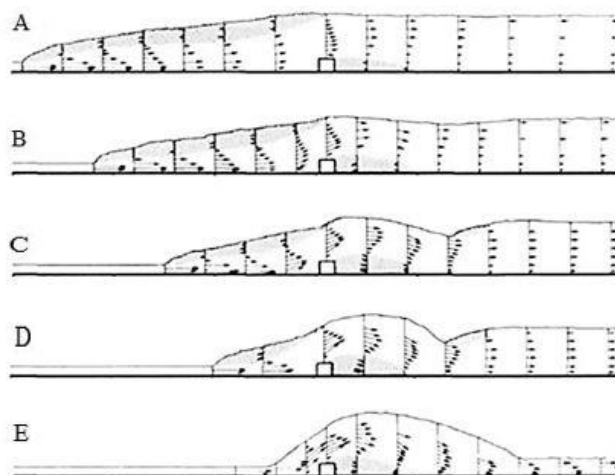


Fig.1- Classification of jump types in the presence of sill in the stilling basin. a) A-jump, b) B-jump, c) B_m-jump d) C-jump e) D-jump. (Hager and Li, 1992)

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

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 سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد. جریان پس از عبور از روی سرریز مستطیلی وارد مخازن ذخیره آب می‌گردد. سپس آب داخل مخزن به‌وسیله پمپ‌های موجود در کف استخر تامین آب که در خارج از آزمایشگاه قرار دارد، به داخل مخزن تامین 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 تامین می‌شود. بدین ترتیب سیستم چرخش آب در فلوم تکمیل می‌شود. عمق جریان توسط عمق‌سنج دیجیتالی با درجه دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌گردد. ضمناً برای اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی پرش از جمله طول آن، مترهای نواری با درجه دقت یک میلی‌متر به دیواره فلوم چسبانده شد. همچنین در فواصل ۵۰ سانتی‌متری، مترهایی به‌صورت 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 سانتی‌متر از خط مرکزی و در طرفین آن) اندازه‌گیری و از میانگین آن‌ها استفاده گردید. در کلیه آزمایش‌ها ارتفاع گشودگی دریاچه کشویی ابتدای فلوم در ورودی به مقدار ثابت سه سانتی‌متر تنظیم گردید.

هدف از انجام مطالعه حاضر کاهش طول حوضچه آرامش و به حداکثر رساندن میزان افت انرژی حاصل از پرش هیدرولیکی با استفاده از دو دیواره روزنه‌دار به ارتفاع ۷ و ۱۳ سانتی‌متر، با روزنه‌های دایره‌ای شکل و با درصد بازشدگی روزنه‌ها به‌میزان 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.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر روی یک و دو دیواره روزنه‌دار در آزمایشگاه دانشگاه شهید چمران اهواز در یک فلوم با جداره‌ای از جنس پلکسی گلاس و مخزن آهنی که در شکل (۲) شماتیکی از آن نشان داده شده است، به انجام رسید. در جدول (۱) مشخصات فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده آورده شده است.

در انتهای فلوم، یک دریاچه کشویی از جنس پلکسی گلاس قرار دارد که باز و بسته شدن آن به‌وسیله یک غربیلک انجام می‌شود. شبکه‌ای به‌وسیله لوله‌های پلاستیکی تعبیه و در جلوی دریاچه انتهایی فلوم قرار داده شده است. این کار به‌منظور جلوگیری از تشکیل امواج در پایین‌دست پرش هیدرولیکی، در عمق پایاب

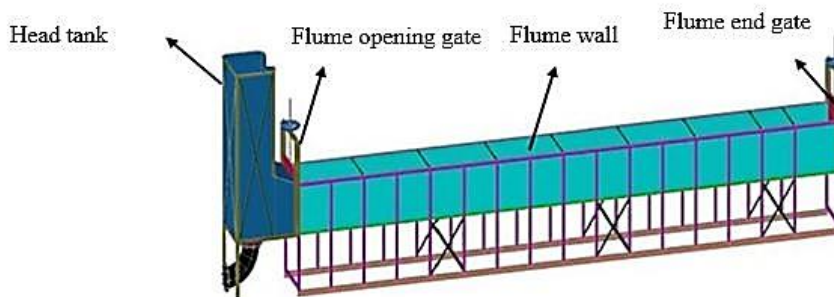


Fig. 2- Overview of laboratory flumes

شکل ۲- شماتیک فلوم آزمایشگاهی

جدول ۱- مشخصات فلوم آزمایشگاهی

Table 1- Characteristics of laboratory flum

Characteristic of laboratory flume	Size
Flume length	15 m
Flume width	0.8 m
Flume height	0.65 m
Maximum discharge flume due to valve opening height	150 liters per second
Flume Inlet Tank Height (For Head Supply)	3.5 m
Inlet pipe diameter to flume	300 mm
Pump operation height	12 m

برای جلوگیری از اثر انقباض در پیچه بر روی عمق اولیه پرش هیدرولیکی، یک قطعه از جنس چوب درخت اکالیپتوس به طول ۸۰ سانتی‌متر (عرض فلوم)، عرض ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱۲ سانتی‌متر تهیه گردید. سپس به صورت ربع دایره‌ای مطابق آن چه در شکل (۳) مشاهده می‌شود، برش داده شد که به وسیله پیچ و مهره در پشت در پیچه نصب گردید. مطابق نظرات Tsai و Lin (2002) وجود چنین زائیده‌ای از انقباض جریان جلوگیری کرده و باعث می‌شود که عمق اولیه پرش هیدرولیکی با ارتفاع گشودگی در پیچه برابر باشد. پس از آن که فلوم برای انجام آزمایش‌ها آماده گردید، اقدامات لازم برای ساخت تیغه‌هایی روزنه‌دار از جنس پلکسی گلاس با عرض ۸۰ سانتی‌متر (معادل عرض فلوم) و با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۷ سانتی‌متر برای تیغه‌های جلویی (تیغه اول $\frac{S_1}{y_1} = 2/3$ و ۱۳ سانتی‌متر برای تیغه‌های دوم

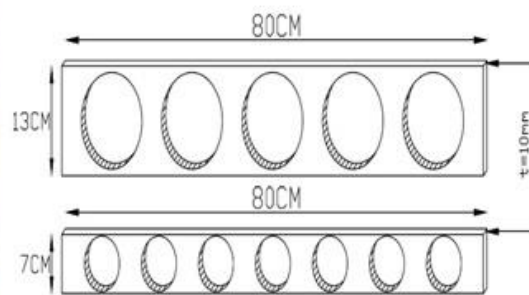
انجام گرفت. این ارتفاعات از دیواره‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌هایی روی ارتفاع بهینه دو دیواره روزنه‌دار توسط Payervand (2015) انتخاب شدند. در شکل (۴) نمونه‌ای از دیواره‌های روزنه‌دار هنگام نصب در فلوم و نمای شماتیک آن نشان داده شده است. مطابق آزمایش‌های انجام شده بر روی یک دیواره روزنه‌دار توسط Behrouzi-rad et al. (2013) 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. در آزمایش‌های انجام شده، طول پرش هیدرولیکی و فاصله قرارگیری دیواره از ابتدای پرش هیدرولیکی با استفاده از متر پارچه‌ای نصب شده بر روی جداره فلوم اندازه‌گیری گردید.



Fig. 3- View of the wooden piece mounted behind the inlet gate
شکل ۳- نمای از قطعه چوبی نصب شده در پشت در پیچه ورودی



B



A

Fig.4- View of perforated sills. A) Schematic of perforated sills. B) View of the plexiglass perforated sills in the experiments

شکل ۴- الف) شماتیک دیواره‌های روزنه دار (ب) نمای از دیواره‌های روزنه‌دار از جنس پلکسی گلاس در آزمایش‌ها

افت نسبی انرژی در حوضچه آرامش

افت انرژی (ΔE) عبارت است از میزان کاهش انرژی از مقطع اولیه تا مقطع ثانویه پرش که به دلیل ایجاد تلاطم در جریان می‌باشد. برای محاسبه میزان افت انرژی در پرش می‌توان با به کار بردن معادله انرژی برای مقاطع قبل و بعد از پرش، میزان اختلاف انرژی بین دو مقطع را محاسبه کرد. افت نسبی انرژی معمولاً به صورت نسبت تغییرات انرژی کل در حجم کنترل ($\Delta E = E_1 - E_2$) به انرژی در مقطع اولیه پرش (E_1) به دست می‌آید.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (1)$$

شرح اجرای آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، با جریان یافتن دبی حداقل در فلوم، در بالادست سرریز مستطیلی، عمق جریان با استفاده از اشل اندازه‌گیری سطح آب اندازه‌گیری می‌گردید و سپس با کمک رابطه سرریزها، دبی جریان در این شرایط برای سرریز مستطیلی به دست آمد. پس از آن با باز کردن شیر جریان ورودی به فلوم، عمق متناظر آن در فاصله مناسب از بالادست سرریز مستطیلی اندازه‌گیری گردید و دبی مجدداً محاسبه شد. این کار تا آب‌دهی حداکثر با توجه به ارتفاع مخزن ذخیره فلوم ادامه یافت و سپس منحنی دبی-اشل سرریز مستطیلی رسم گردید. آزمایش‌ها بدین ترتیب صورت گرفت که با توجه به حداقل و حداکثر دبی جریان یافته در فلوم، ارتفاع نظیر این دبی‌ها روی اشل نصب‌شده در کنار مخزن ذخیره در ابتدای فلوم علامت‌گذاری گردید، (شکل ۲). در بین دو بار آبی حداقل و حداکثر با روش آزمون و خطا شش بار آبی دیگر بر روی اشل علامت‌گذاری 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 هشت 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. ابتدا برای تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد، دریچه کشویی پایین-دست به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که عمق پایاب با عمق ثانویه پرش هیدرولیکی برابر باشد. سپس با تعبیه دیواره‌های روزنه‌دار در مقابل پرش هیدرولیکی، اثر این دیواره‌ها بر روی کنترل پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله با استفاده از یک دیواره روزنه‌دار با ارتفاع ثابت ۷ سانتی‌متر ($\frac{L_{S1}}{y_1} = 2/3$)، پرش

هیدرولیکی اجباری در فواصل ۵۰ ($\frac{L_{S1}}{y_1} = 16/7$)، ۶۰ ($\frac{L_{S1}}{y_1} = 20$) و ۷۰ ($\frac{L_{S1}}{y_1} = 23/3$) سانتی‌متر از پنجه پرش با استفاده از یک دیواره روزنه‌دار، برای هر ۸ عدد فرود به دست آمده، تشکیل شد. همچنین شرایط پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، الگوی جریان قبل و بعد از دیواره، عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری و ثبت گردید. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌های این تحقیق، محل تشکیل پنجه پرش هیدرولیکی (ابتدای پرش) دقیقاً جلوی دریچه کشویی بالادست بود. پس از بررسی نتایج حاصله، از میان فواصل ذکر شده فاصله‌ای که در آن، طول مورد نیاز حوضچه آرامش کمترین مقدار، افت انرژی حداکثر و کنترل پرش هیدرولیکی به شکل مناسبی صورت گیرد، به عنوان فاصله بهینه قرارگیری دیواره انتخاب می‌شود. در انتخاب فواصل ذکر شده بایستی ذکر کرد که با توجه به نتایج آزمایش‌های Ashour et al (2015)، این سه فاصله در محدوده مقداری برابر با یک سوم طول پرش هیدرولیکی آزاد انتخاب شده‌اند. در مرحله بعد، پس از تعیین فاصله بهینه تک دیواره روزنه‌دار، آزمایش‌های دو دیواره روزنه‌دار به گونه‌ای که دیواره دوم در فواصل ۱۰ ($\frac{L_{S2}-L_{S1}}{y_1} = 3/3$)، ۲۰ ($\frac{L_{S2}-L_{S1}}{y_1} = 6/7$) و ۳۰ ($\frac{L_{S2}-L_{S1}}{y_1} = 10$) سانتی‌متری از دیواره اول قرار گرفته بود، انجام شد. پس از بررسی نتایج و تعیین بهترین زوج دیواره در افزایش افت انرژی و کاهش طول حوضچه، بهترین زوج دیواره با فاصله ثابت بین آن‌ها، نسبت به پنجه پرش در سه فاصله ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر از دیواره اول جابه‌جا شدند تا بهترین فاصله برای یک زوج دیواره به دست آید. در این تحقیق، ۷۲ آزمایش جهت رسیدن به اهداف فوق انجام شد.

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 (غیر مستغرق) شکل بگیرد.

آنالیز ابعادی و تعیین پارامترهای مؤثر

پارامترهای تأثیرگذار پرش هیدرولیکی اجباری با یک و دو دیواره روزنه‌دار عبارتند از:
 خصوصیات قابل تغییر جریان شامل سرعت ورودی (V_1)، عمق اولیه پرش هیدرولیکی (y_1)، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد (y_2^*) که از رابطه Blanger به دست می‌آید، عمق پایاب (y_t) یا (T_w)، خصوصیات سیال جریان یافته شامل جرم واحد حجم سیال (ρ) و لزوجت دینامیک (μ)، فاصله قرارگیری دیواره روزنه‌دار اول از پنجه پرش هیدرولیکی (L_{S1}) و فاصله قرارگیری دیواره روزنه‌دار دوم از پنجه پرش هیدرولیکی (L_{S2})، طول حوضچه آرامش (L_B)، ارتفاع دیواره اول (تک دیواره روزنه‌دار) (S_1) و ارتفاع دیواره دوم (S_2)، مجموع سطح روزنه‌ها (A_0)، سطح کل دیواره (A)، شتاب ثقل (g)، شیب کف فلوم (S).
 در آنالیز ابعادی، برخی پارامترها که تاثیر آن‌ها کمتر می‌باشد مانند:

دیواره روزنه‌دار دوم با فواصل نسبی ذکر شده می‌باشد. در شکل (۶) نمودار افت نسبی انرژی در حالت وجود دو دیواره روزنه‌دار مشاهده می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد زوج دیواره روزنه‌دار با فواصل نسبی $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$ و $(\frac{Ls_1}{y_1} = 26/7)$ بیشترین افت نسبی انرژی در پرش را ایجاد می‌کنند. این زوج دیواره میزان افت نسبی انرژی را تا $6/2$ درصد نسبت به حالت پرش آزاد افزایش داده و افت نسبی انرژی را به $81/6$ درصد در عدد فرود $11/2$ رساند. با معلوم شدن بهترین زوج دیواره (تا این مرحله از انجام آزمایش-ها) در افزایش افت نسبی انرژی مطابق تئوری آزمایش، در حالی که این زوج دیواره را فاصله بین آن‌ها ثابت می‌باشد نسبت به پنجه پرش جابه‌جا کرده تا بهترین نتیجه در افزایش افت نسبی انرژی حاصل گردد. در این حالت زوج دیواره با فواصل نسبی $(Ls_2 - Ls_1 = 20cm)$ در فاصله 50 $(\frac{Ls_1}{y_1} = 16/7)$ ، 60 $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$ و 70 $(\frac{Ls_1}{y_1} = 23/3)$ سانتی‌متری از پنجه پرش جابجا شد. نمودار افت نسبی انرژی این زوج دیواره در شکل (۷) آمده است.

همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، نمودار افت نسبی انرژی در زوج دیواره با فواصل نسبی $(\frac{Ls_1}{y_1} = 16/7)$ و $(\frac{Ls_2}{y_1} = 23/3)$ با میانگین اختلاف $0/2$ درصد نسبت به زوج دیواره با فواصل نسبی $(\frac{Ls_1}{y_1} = 26/7)$ و $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$ بیشتر است. در این نمودار افزایش افت نسبی انرژی نسبت به پرش آزاد تا $6/33$ درصد افزایش یافته و همچنین افت نسبی انرژی در این زوج دیواره به $81/7$ درصد فرود $11/2$ رسیده است. در جدول (۲) مقادیر اختلاف افت نسبی انرژی در حالت دو دیواره نسبت به پرش آزاد برای نمودار شکل (۷) رسم شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های Eylaghi و Beirami (2004) روی دو دیواره پیوسته مشاهده می‌شود که میزان افت انرژی نسبت به پرش آزاد در حالت دو دیواره روزنه‌دار با شرایط $(\frac{Ls_2}{y_1} = 23/3)$ و $(\frac{Ls_1}{y_1} = 16/7)$ درصد بیشتر از حالت دو دیواره پیوسته با شرایط $(S_2 = 30mm, S_1 = 30mm)$ و $46/0$ $(\frac{S_2}{Ls_2} = 0/)$ می‌باشد. به طوری که در عدد فرود $11/2$ میزان افت انرژی در حالت دو دیواره روزنه‌دار به $81/7$ درصد رسیده و در حالت دو دیواره پیوسته (مطابق آزمایش‌های Eylaghi و Beirami (2004)) به 81 درصد رسیده است.

شیب کف فوم (S) که در تمام آزمایش‌ها صفر بود، اثر لزوجت که به شکل عدد رینولدز $(\frac{\rho V_1 y_1}{\mu})$ خود را نشان داد، (به دلیل این‌که در تمام آزمایش‌ها جریات در محدوده عدد رینالدز بیشتر از 12500 قرار دارد (Chow, 1973).

درصد بازشدگی سطح روزنه‌ها که در تمامی آزمایش‌ها 50 درصد بود، ارتفاع نسبی دیواره اول و دوم که با توجه به ثابت بودن ارتفاع دیواره‌ها قابل صرف‌نظر بودند و عمق نسبی پایاب که در همه آزمایش‌ها برابر یک بود، حذف گردیدند. پس از آن مهم‌ترین پارامترهای بی‌بعد به شکل زیر به دست آمدند.

$$f\left(\frac{L_B}{y_2}, \frac{L_S}{y_2}, Fr_1\right) = 0 \quad (2)$$

پس از انجام آنالیز ابعادی، داده‌های ثبت شده و برداشت شده از آزمایش‌ها براساس آنالیز ابعادی صورت‌گرفته، مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج به‌صورت نمودارهای جداگانه‌ای برای پرش هیدرولیکی در حضور یک و دو دیواره روزنه‌دار رسم شدند.

نتایج و بحث

افت نسبی انرژی در حوضچه آرامش با یک دیواره روزنه‌دار

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود بیشترین اثر در کاهش افت انرژی، مربوط به دیواره با فاصله نسبی $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$ می‌باشد. حداکثر میزان افت انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد، $4/9$ درصد افزایش می‌یابد یعنی میزان افت انرژی در حالت با دیواره به $80/3$ درصد در عدد فرود $11/2$ رسید.

با دقت در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که در عدد فرود $3/6$ میزان افت نسبی انرژی در فواصل نسبی $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$ و $(\frac{Ls_1}{y_1} = 23/3)$ کمتر از پرش آزاد می‌باشد. دلیل این پدیده آن است که با دور شدن فاصله دیواره از پنجه پرش عمق پایاب در شکل‌گیری پرش بی‌اثر می‌شود و پرش قادر است، بدون تنظیم دریچه پایین‌دست جهت تامین عمق پایاب تشکیل شود. با افزایش عدد فرود، وجود عمق پایاب برای تشکیل پرش در حضور دیواره روزنه‌دار الزامی می‌شود و عمق پایاب نسبت به حالت پرش آزاد کاهش یافته که باعث افزایش افت نسبی انرژی می‌شود.

افت نسبی انرژی در حوضچه آرامش با دو دیواره روزنه‌دار

با توجه به انتخاب دیواره با فاصله نسبی $(\frac{Ls_1}{y_1} = 20)$ به‌عنوان بهترین دیواره در افزایش افت نسبی انرژی، نوبت به اضافه کردن

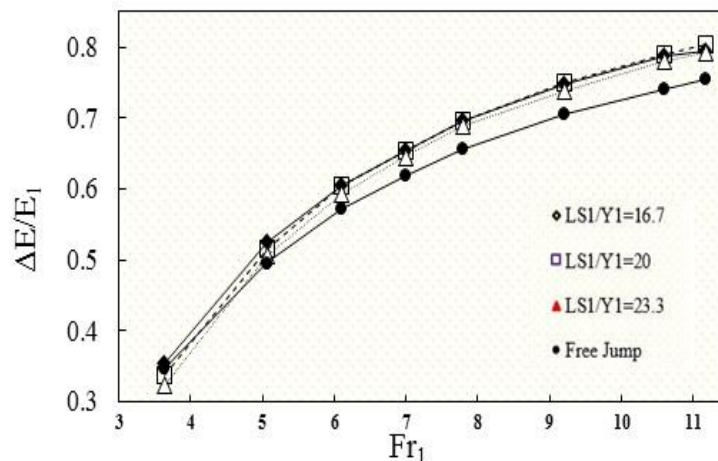


Fig. 5-Variation of relative Energy loss ($\frac{\Delta E}{E_1}$) versus Froude number for different relative distances in single wall mode.

شکل ۵- تغییرات افت نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) در برابر عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت تک دیواره

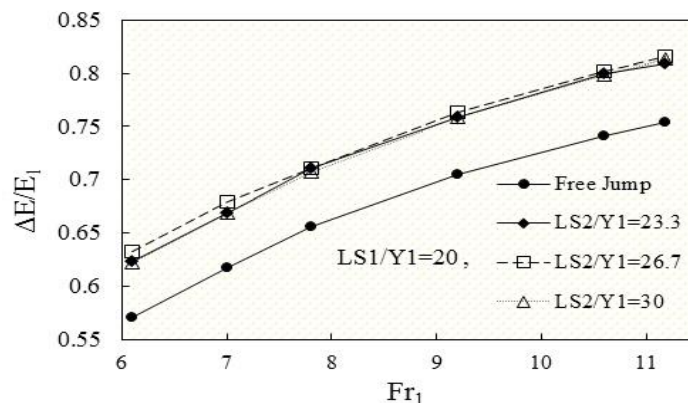


Fig.6- Variation of relative Energy loss ($\frac{\Delta E}{E_1}$) versus Froude number for different relative distances in two perforated sills mode and ($\frac{LS_1}{Y_1} = 20$).

شکل ۶- تغییرات افت نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) در برابر عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره و ($\frac{LS_1}{Y_1} = 20$)

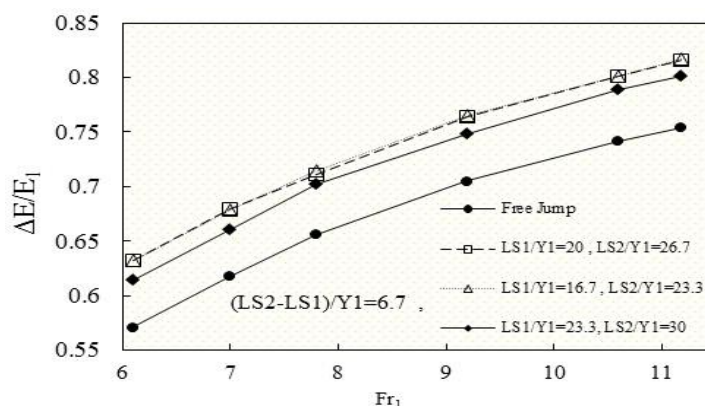


Fig.7- Variation of relative Energy loss ($\frac{\Delta E}{E_1}$) versus Froude number for different relative distances in two perforated sills mode and ($\frac{LS_2-LS_1}{Y_1} = 6.7$)

شکل ۷- تغییرات افت نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) در برابر عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره و ($\frac{LS_2-LS_1}{Y_1} = 6.7$)

جدول ۲- درصد اختلاف مقادیر افت نسبی انرژی در حالت ($\frac{Ls_2-Ls_1}{y_1} = 6/7$) نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد

Table 2- Difference percentages of relative energy loss values in the state ($\frac{Ls_2-Ls_1}{y_1} = 6.7$) compared to free hydraulic jump.

Fr_1	$\frac{Ls_1}{y_1} = 16.7, \frac{Ls_2}{y_1} = 23.3$	$\frac{Ls_1}{y_1} = 20, \frac{Ls_2}{y_1} = 26.7$	$\frac{Ls_1}{y_1} = 23.3, \frac{Ls_2}{y_1} = 30$
6.1	6.2	6.1	4.3
7	6	6.2	4.3
7.8	5.8	5.5	4.6
9.2	6.1	5.9	4.3
10.6	5.9	6	4.7
11.2	6.3	6.2	4.7

تغییرات طول حوضچه آرامش

اگرچه طول پرش هیدرولیکی یکی از پارامترهای حساس در طراحی است، اما در حالت کلی قابل محاسبه از طریق تحلیل‌های ریاضی نبوده و لازم است تا در هر مورد از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده گردد. طول پرش (L_j)، برابر است با فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان که در این صورت ارتفاع این نقطه برابر ارتفاع پایاب می‌باشد.

تغییرات طول حوضچه آرامش با یک دیواره روزنه‌دار

در شکل (۸) اثر طول حوضچه آرامش نسبت به عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد در شرایط استفاده از یک دیواره روزنه‌دار برای فواصل نسبی مختلف ملاحظه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار تا $2/2$ برابر عمق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر دیواره روزنه‌دار طول پرش را تا $63/4$ درصد نسبت به پرش آزاد کاهش می‌دهد.

تغییرات طول بهینه حوضچه آرامش با دو دیواره روزنه‌دار

با توجه به نمودار شکل (۹)، زوج دیواره با فواصل نسبی ($\frac{Ls_1}{Y_1} = 20$ و $\frac{Ls_2}{Y_1} = 23/3$) بیشترین اثر در کاهش طول پرش هیدرولیکی را داشته‌اند. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود تغییرات طول نسبی حوضچه آرامش در مقابل عدد فرود از عدد فرود ۶ تا $11/2$ رسم شده است. دلیل این امر را می‌توان به طبقه‌بندی پرش‌ها مطابق شکل (۱) نسبت داد. در اعداد فرود $3/6$ و

$5/1$ پرش در حضور دو دیواره روزنه‌دار 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 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. در شکل (۱۰) تصویری از تشکیل پرش از نوع C-jump، در حضور دو دیواره روزنه‌دار نشان داده شده است. لازم به ذکر است پرش در حضور زوج دیواره با فواصل نسبی ($\frac{Ls_1}{Y_1} = 20$ و $\frac{Ls_2}{Y_1} = 23/3$) در سایر اعداد فرود به صورت پایدار تشکیل شده، اما چون پرش در زوج دیواره با فواصل نسبی ($\frac{Ls_1}{Y_1} = 20$ و $\frac{Ls_2}{Y_1} = 26/7$) در اعداد فرود بیشتری به صورت پایدار تشکیل شده است، این زوج دیواره را به عنوان بهترین زوج دیواره جهت ادامه آزمایش‌ها در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود در عدد فرود $11/2$ هر دو زوج دیواره، به یک میزان در کاهش طول پرش اثر دارند، هم‌چنین کمترین طول نسبی پرش هیدرولیکی نیز در این عدد فرود حاصل شده است. بنابراین این زوج دیواره طول نسبی پرش را تا $2/15$ عمق ثانویه پرش آزاد کاهش می‌دهد که هنوز در مقابل حوضچه آرامش SAF به طول بیشتری برای ساخت حوضچه آرامش نیاز دارد. در شکل (۱۱) زوج دیواره با فواصل نسبی ($\frac{Ls_1}{Y_1} = 20$ و $\frac{Ls_2}{Y_1} = 26/7$) در دو موقعیت جدید دیگر نسبت به پنجه پرش قرار گرفته که نمودار تغییرات طول نسبی پرش در آن مشاهده می‌شود.

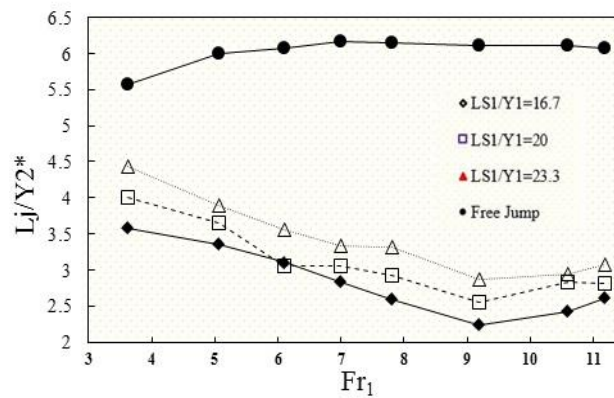


Fig. 8-Variation of Relative jump length ($\frac{L_j}{Y_{2*}}$) versus Froude number for different relative distances in one perforated sill mode

شکل ۸- تغییرات طول نسبی پرش ($\frac{L_j}{Y_{2*}}$) در مقابل عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت یک دیواره روزنه‌دار

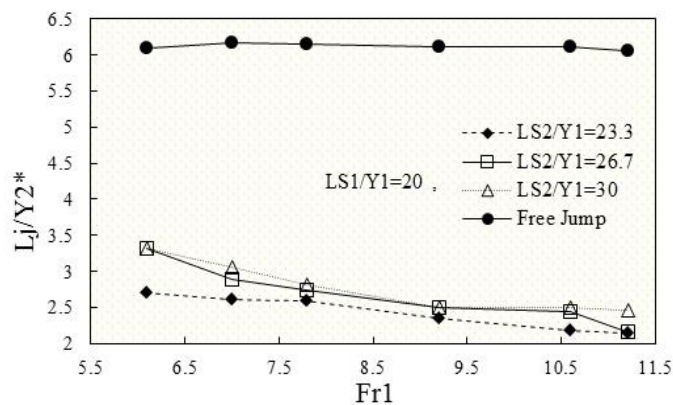


Fig.9-Variation of Relative jump length ($\frac{L_j}{Y_{2*}}$) versus Froude number for different relative distances in two perforated sills mode and ($\frac{LS_1}{Y_1} = 20$)

شکل ۹- تغییرات طول نسبی پرش ($\frac{L_j}{Y_{2*}}$) در مقابل عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره روزنه‌دار و

$$\frac{LS_1}{Y_1} = 20$$

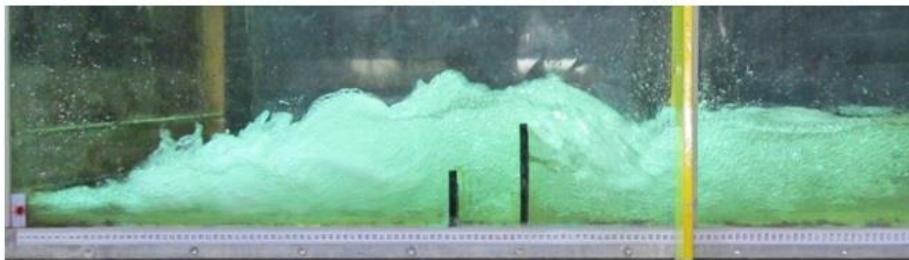


Fig. 10- View of the formation of a C-jump jump at Froude number 5.1 in the presence of two perforated sills with relative distances ($\frac{LS_1}{Y_1} = 20$ and $\frac{LS_2}{Y_1} = 23.3$)

شکل ۱۰- 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

$$\left(\frac{LS_2}{Y_1} = 23.3\right)$$

پرش‌های هیدرولیکی ناپایدارتر در اعداد فرود پایین‌تر می‌باشد. همچنین با بیشتر شدن عدد فرود، پرش‌های پایدارتری تشکیل شده و نتایج حاصل از معادله پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت بیشتری دارند. در نمودار شکل (۱۳) اثر کاهش طول حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار با روزنه‌های دایره‌ای شکل با درصد بازشدگی ۵۰ درصد، ارتفاع‌های نسبی ($\frac{h_1}{y_1} = 2/3$) و $\frac{h_2}{y_1} = 4/3$ و فاصله نسبی ($\frac{L_{S2}-L_{S1}}{y_1} = 6/7$)، $\frac{L_{S1}}{Y_1} = 16/7$ و $\frac{L_{S2}}{Y_1} = 23/3$ از پنجه پرش هیدرولیکی، با طول حوضچه آرامش در حضور تک دیواره روزنه‌دار و سایر حوضچه‌های استاندارد مقایسه شده است. در این نمودار عملکرد حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار بهتر از حوضچه‌های آرامش استاندارد (USBR I، USBR II، USBR III) و حوضچه آرامش با تک دیواره روزنه‌دار می‌باشد. اما در اعداد فرود $3/6$ و $5/1$ عملکرد حوضچه آرامش USBR III بهتر است که دلیل این امر آن است که در حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار در اعداد فرود پایین، به دلیل کم بودن سرعت برخورد جریان با قسمت پیوسته دیواره و همچنین کم بودن سرعت جت‌های خروجی از روزنه‌ها، غلظت‌های تشکیل شده شدت زیادی ندارند و تاثیر دیواره روزنه‌دار در کاهش طول حوضچه کمتر است. اما در حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار نمودار طول نسبی حوضچه تقریباً در عدد فرود ۷ زیر نمودار حوضچه استاندارد USBR III قرار گرفته است ولی در حوضچه آرامش در حضور تک دیواره روزنه‌دار این اتفاق در اعداد فرود نزدیک به ۸ رخ داد. علت آن است که در حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار در اعداد فرود پایین، اگرچه سرعت جریان در هنگام برخورد و سرعت جت-های عبوری از روزنه‌ها مانند حوضچه با تک دیواره روزنه‌دار کم می‌باشند، اما وجود دیواره روزنه‌دار دوم، باعث برخورد جریان با قسمت پیوسته دیواره و عبور مجدد جریان از روزنه‌ها می‌شود. که این پدیده باعث می‌شود طول حوضچه در اعداد فرود پایین سریع‌تر از حوضچه با تک دیواره روزنه‌دار زیر نمودار حوضچه استاندارد USBR III قرار گیرد.

با توجه به نمودار شکل (۱۱)، انتخاب زوج دیواره با فواصل ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر از پنجه پرش در مرحله قبل برای انجام این مرحله از آزمایش‌ها، انتخاب درستی بوده و تشکیل یک پرش پایدار و کامل ارجحیت دارد. به طوری که در زوج دیواره با فواصل نسبی ($\frac{L_{S1}}{Y_1} = 16/7$ و $\frac{L_{S2}}{Y_1} = 23/3$) طول نسبی پرش تا $1/89$ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد رسیده است. لازم به ذکر است که چند آزمایش جهت اطمینان برای زوج دیواره با فواصل ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر از پنجه پرش در موقعیت‌های ذکر شده در نمودار شکل (۱۱) انجام شد و نشان داد که، هم‌چنان زوج دیواره با فواصل نسبی ($\frac{L_{S1}}{Y_1} = 16/7$ و $\frac{L_{S2}}{Y_1} = 23/3$) بیشترین اثر در کاهش طول نسبی پرش را داشته‌اند.

با توجه به تحلیل ابعادی و ۴۰ داده آزمایشگاهی برای حالت وجود دو دیواره روزنه‌دار، رابطه زیر برای محاسبه طول حوضچه آرامش با وجود دو دیواره روزنه‌دار در شرایطی که $\frac{S_1}{y_1} = 2/3$ و $\frac{S_2}{y_1} = 4/3$ به‌دست آمد.

$$\frac{L_B}{y_2^*} = 1.825 + \exp(-0.266Fr_1 + 0.04\frac{L_{S1}}{Y_1} + 0.06\frac{L_{S2}}{Y_1} - 0.461) \quad (3)$$

$$R^2 = 0.898$$

در این معادله $\frac{L_B}{y_2^*}$ طول نسبی حوضچه آرامش، Fr_1 عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی (در حالت فوق بحرانی)، $\frac{L_{S1}}{Y_1}$ ، فاصله نسبی دیواره روزنه‌دار اول از پنجه پرش و $\frac{L_{S2}}{Y_1}$ ، فاصله نسبی دیواره روزنه‌دار دوم از پنجه پرش می‌باشد. در شکل (۱۲) نتایج حاصله از معادله (۲) در برابر نتایج داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. همچنین مقدار RMSE (خطای جذر میانگین مربعات)، داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از معادله (۲) برابر 0.15 است.

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از فرمول پیشنهادی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. این مطابقت تا طول نسبی پرش برابر ۳ بیشتر از مقادیر طول نسبی بیشتر از ۳ می‌باشد، که دلیل آن ناشی از تشکیل

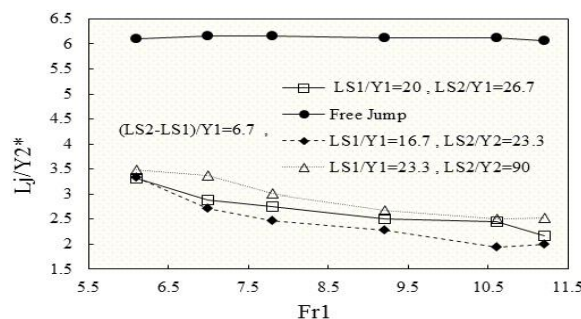


Fig. 11-Variation of Relative jump length ($\frac{L_j}{Y_{2^*}}$) versus Froude number for different relative distances in two perforated sills mode and ($L_{S2} - L_{S1} = 200 \text{ mm}$)

شکل ۱۱- تغییرات طول نسبی پرش ($\frac{L_j}{Y_{2^*}}$) در مقابل عدد فرود برای فواصل نسبی متفاوت در حالت دو دیواره روزنه‌دار و ($L_{S2} - L_{S1} = 200 \text{ mm}$)

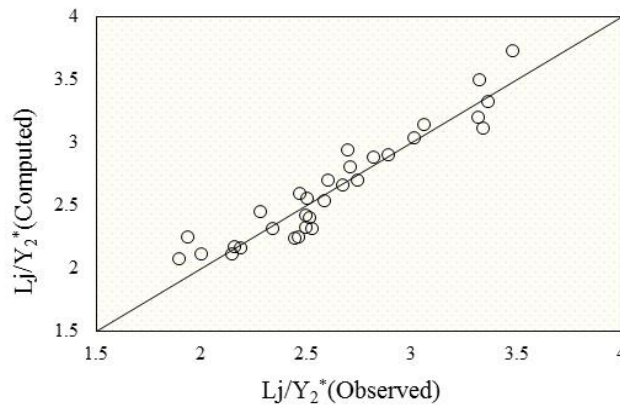


Fig.12- Comparison of laboratory results with proposed formula for two perforated sills state
شکل ۱۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با فرمول پیشنهادی برای حالت دو دیواره روزنه‌دار

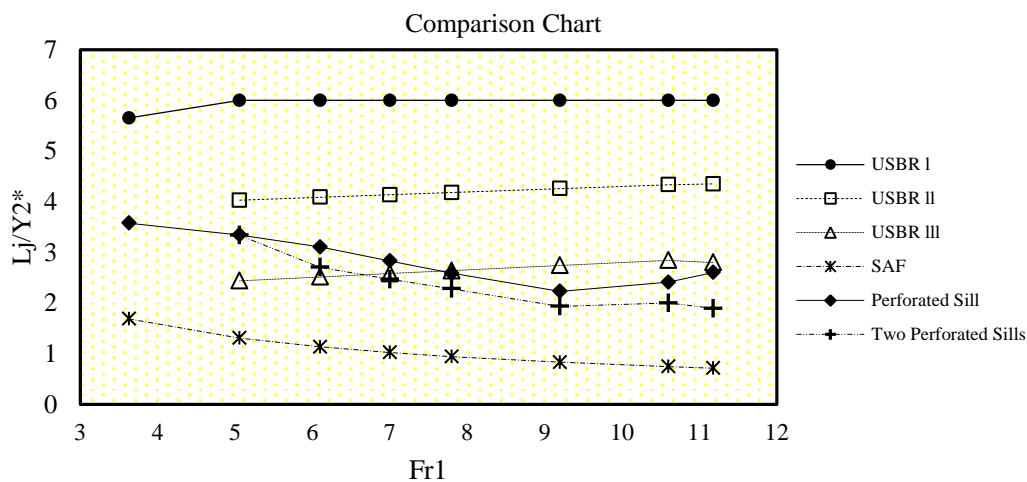


Fig. 13- Diagram of Comparison of Relative Length of stilling basin in the Presence of Two perforated sills with Standard USBR basins and stilling basin with Single perforated sill
شکل ۱۳- نمودار مقایسه طول نسبی حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار با حوضچه‌های استاندارد USBR و حوضچه آرامش با تک دیواره روزنه‌دار

طول نسبی حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار تا ۱/۸۹ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد رسیده است. در مقایسه با حوضچه آرامش USBR III و SAF، حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه‌دار با مشخصات ذکر شده در شرح این تحقیق، طول نسبی کمتری را به‌دست می‌دهد.

با داشتن مقادیر فواصل نسبی دیواره اول و دوم از پنجه پرش هیدرولیکی و عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی (جریان فوق بحرانی)، بر اساس رابطه (۲) می‌توان طول نسبی بهینه حوضچه آرامش در حالت وجود دو دیواره روزنه‌دار را به‌دست آورد.

تشکر و قدردانی

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

نتیجه‌گیری

در افزایش افت نسبی انرژی در حضور یک و دو دیواره روزنه‌دار نتایج زیر حاصل شد:

در حالت تک دیواره، دیواره روزنه‌دار با فاصله نسبی $(\frac{Ls1}{Y1} = 20)$ ، افت انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد را تا ۴/۹ درصد افزایش می‌یابد و میزان افت انرژی در حالت تک دیواره را به ۸۰/۳ درصد می‌رساند.

در حوضچه آرامش در حضور دو دیواره روزنه دار، زوج دیواره با فواصل نسبی $(\frac{Ls1}{Y1} = 16/7)$ و $(\frac{Ls2}{Y1} = 23/3)$ افت انرژی نسبت به پرش آزاد را تا ۶/۳۳ درصد افزایش می‌دهد. این زوج دیواره افت نسبی انرژی را ۸۱/۷ رسانده است.

طول نسبی حوضچه آرامش نیز در حالت وجود یک و دو دیواره روزنه‌دار نیز بررسی شد که نتایج زیر حاصل شد:

در حالت وجود تک دیواره روزنه‌دار طول نسبی حوضچه آرامش تا ۲/۲ برابر عمق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

References

- 1- Alikhani, A., Behrozi-rad, R., and Fathi Moghadam, M., 2010; Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International Journal of Physical Sciences*, 5 (1), pp. 25-29.
- 2- Ashour. M.A, Sayed. T., El-Attar. S., 2015; Impact of curved shaped energy dissipaters downstream diversion head structures on the dissolved oxygen content in irrigation canals and enhancement of irrigation water quality. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 2(2), pp. 14-26.
- 3- Behrouzi-Rad, R., Fathi-Moghadam, M., Ghafouri, H_ R, and Alikhani, A., 2013. Generation of hydraulic jump with sill, *A Scientific Journal of the Regional Museum of Carinthia*, 20 (2), pp. 300-309.
- 4- Chow, V.T., 1973, *Open channel hydraulic*, McGraw-Hill, New York, pp. 8-12 and 396-400.
- 5- Beirami, M.k, Eylaghi, M., 2004. Hydraulic jump control with one and two continuous walls in horizontal relaxation pond. *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, 24(1), pp. 97-119. (In persian).
- 6- Farhoudi, J., and Narayanan, R., 1991. Force on slab beneath hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1), pp. 64-82.
- 8- Hager, W. H, and Bertz, N. V., 1986. *Journal of Hydraulic Research*, 24(4), pp.237-253. Doi: 10.1080/0021688609499303.
- 7- Hager, W. H, and Li, d., 1992. Sill-controlled energy dissipator. *Journal of Hydraulic Research*, 30 (2), pp. 165-181.
- 8- Karki, K.S., 1976. Supercritical flow over sills. *Journal of Hydraulic Division*. ASCE, 102, pp. 1449-1459.
- 9- Lin, C., Yen, J and Tsai, C., 2002. Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128(4), pp. 249-252.
- 10- Payervand, H., 2015. *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. Ahvaz. Iran. (in Persian).
- 11- Rajaratnam, N. and Hurtig, k., 2000. Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), pp. 310-312.
- 12- Rand, W. 1965. Flow over a vertical sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 9, pp.97-122.
- 13- Rand, W., 1967. Flow over a dentaited sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 9, pp. 135-153.
- 14- Shukry, A., 1957. The efficiency of floor sills under drowned hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 83, pp. 1-8.