

## کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار

سجاد کیانی<sup>۱</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۲</sup>، رضا بهروزی راد<sup>۳</sup>، لیلا داوودی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

### چکیده

حوضچه آرامش از جمله رایج‌ترین سازه هیدرولیکی در استهلاک انرژی در پایین‌دست سرریزها می‌باشد. طراحی صحیح حوضچه آرامش می‌تواند باعث استهلاک ۶۰ تا ۷۰ درصد انرژی در داخل حوضچه شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی عملکرد دیواره روزنه‌دار در پایین‌دست حوضچه آرامش و چگونگی تأثیر آن بر مشخصات پرش هیدرولیکی می‌باشد. به همین منظور دیواره‌هایی با ارتفاع مختلف و در چهار نسبت بازشدگی ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در سه عمق پایاب مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دیواره روزنه دار تأثیر بسزایی در استهلاک انرژی، کاهش طول حوضچه آرامش و همچنین کاهش وابستگی موقعیت پرش به عمق پایاب دارد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، در یک عدد فرود ثابت، کاهش عمق پایاب موجب حرکت پنجه پرش به سمت پایین‌دست می‌شود. در این حالت، برای کنترل پرش هیدرولیکی و جلوگیری از جاروب شدن پرش، فاصله قرارگیری دیواره روزنه‌دار از ابتدای پرش کاهش یافته است. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود یا کاهش عمق پایاب، ارتفاع دیواره روزنه‌دار افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هنگامی که مقدار عمق نسبی پایاب از ۱ به ۰/۸ کاهش داده می‌شود ارتفاع نسبی دیواره‌های روزنه‌دار، به طور میانگین حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. بعلاوه نتایج نشان داد که دیواره‌های با سطح بازشدگی ۵۰ درصد نسبت به سایر دیواره‌های روزنه‌دار عملکرد مناسب‌تری از نظر استهلاک انرژی و کاهش طول پرش هیدرولیکی دارد. مقایسه انجام شده بین عملکرد دیواره‌های روزنه‌دار و پرش هیدرولیکی آزاد نشان داد که دیواره روزنه‌دار با سطح بازشدگی ۵۰ درصد، موجب استهلاک ۶۰ تا ۹۰ درصد انرژی در محدوده عدد فرود ۴/۵-۱۲ می‌شود. همچنین، در عمق پایاب نسبی برابر ۱، با افزایش عدد فرود در محدوده مورد نظر، طول حوضچه آرامش در این دیواره حدود ۱۹ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع دیواره، افت انرژی، طول حوضچه آرامش، عمق پایاب، موقعیت دیواره.

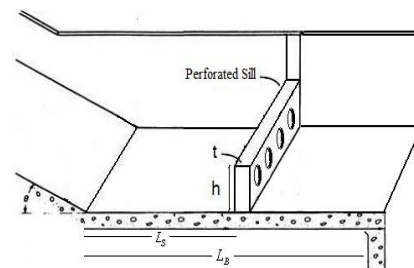
<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران\_اصفهان، بلوار کشاورزی، محله چهل توت. ۰۹۱۳۸۰۳۰۶۷۱. Sajad.kiani508@gmail.com  
<sup>۲</sup> استاد، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. ۰۶۱-۳۳۷۳۸۳۵۹. fathi49@gmail.com (مسئول مکاتبه).

<sup>۳</sup> استادیار، گروه عمران دانشگاه قم، قم. rad\_19811360@yahoo.com

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران\_اهواز، بلوار گلستان. Layla.davoodi@gmail.com

## مقدمه

در طراحی سیستم‌های هیدرولیکی، سرعت جریان آب نباید بیش از حد قابل قبولی باشد. زیاد بودن سرعت آب در یک کانال خاکی و یا رودخانه طبیعی، فرسایش بستر و جداره‌های کانال را به همراه داشته که ممکن است باعث خسارت جبران‌ناپذیری به تأسیسات مجاور رودخانه گردد. همچنین در بسیاری مواقع به دلایل مختلفی از قبیل شیب زیاد کف کانال، اختلاف زیاد انرژی بین دو مقطع و یا سقوط آزاد آب، انرژی جنبشی جریان آب بیش از حد انتظار بوده که به ناچار می‌باید سازه‌هایی را طراحی نموده تا انرژی جنبشی اضافی را مستهلک و سرعت جریان را به حداقل قابل قبولی کاهش دهد. این گونه تأسیسات هیدرولیکی را سازه‌های مستهلک کننده‌های انرژی<sup>۱</sup> می‌نامند. معمولاً انواع مختلفی از مستهلک کننده‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند که متداول‌ترین آن‌ها، حوضچه‌های آرامش<sup>۲</sup> می‌باشد به نحوی که انرژی جریان در اثر پرش هیدرولیکی و ایجاد تلاطم شدید در حوضچه آرامش مستهلک می‌گردد. به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی و کنترل بهتر آن در این حوضچه‌ها، می‌توان از بلوک‌ها (به صورت پیوسته یا دنداندار) و یا یک دیواره سرتاسری پیوسته<sup>۳</sup> در داخل حوضچه استفاده نمود. همچنین می‌توان به جای دیواره پیوسته، از دیواره روزنه‌دار<sup>۴</sup> نیز استفاده کرد که موضوع اصلی این تحقیق را تشکیل می‌دهد (شکل ۱).



شکل (۱): حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار

حوضچه‌های آرامش با دیواره پیوسته و یا دیواره روزنه‌دار به دلیل عدم نیاز به عمق پایاب زیاد، افت انرژی بیشتر، طول کوتاه‌تر و کنترل و تثبیت بهتر پرش هیدرولیکی قابل رقابت با حوضچه‌های کلاسیک (معمولی) می‌باشند و جایگزینی مناسبی برای این گونه حوضچه‌ها خواهند بود.

حوضچه‌های آرامش با دیواره سرتاسری پیوسته از بیش از نیم قرن پیش مورد توجه محققین قرار گرفت. اولین مطالعه روی حوضچه‌ها با دیواره پیوسته توسط Shukry (1957) انجام گرفت. او با انجام یکسری آزمایش‌ها نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی ( $Fr_1$ )، فاصله قرارگیری دیواره از ابتدای حوضچه ( $L_s$ ) و ارتفاع نسبی دیواره ( $h/y_1$ ) ارتفاع دیواره و  $y_1$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی و همچنین عمق آب پایاب ( $T_w$ ) در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی دیواره مؤثرند. (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 و 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 بر اساس عدد فرود در مقطع اولیه ( $Fr_1$ ) و ارتفاع نسبی دیواره  $h/y_1$  مورد بررسی قرارداد. پس از آن Narayanan, Schizas (1980) با قرار دادن یک دیواره در مسیر پرش هیدرولیکی، جریان را بر اساس تشکیل شدن پرش در بالادست یا پایین‌دست دیواره و یا مستغرق شدن پرش هیدرولیکی بررسی کردند. آن‌ها همچنین با اندازه‌گیری نیروهای فشاری وارده بر روی دیواره برای انواع جریان‌های مختلف نشان دادند که توزیع ضریب دراگ ( $C_p$ ) بر روی سطح بالادست دیواره کم‌وبیش یکنواخت است و با افزایش عدد فرود، کاهش می‌یابد

<sup>1</sup> Energy Dissipater structures

<sup>2</sup> Stilling Basin

<sup>3</sup> Continuous Sill

<sup>4</sup> Perforated Sill

ایلاقی (۱۳۸۲) ادامه یافت. او 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. بعلاوه، دیواره با ارتفاع کم، تغییر محسوسی در نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی و افت انرژی 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 او 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 باشد که دیواره دوم بلندتر از دیواره اول باشد.

Alikhani et al. (2010) نیز به بررسی و کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از دیواره پیوسته پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها برای عدد فرود ۴ تا ۱۲ و نسبت ارتفاع دیواره به عمق اولیه پرش هیدرولیکی ۲ تا ۸ انجام شد. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که دیواره پیوسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد دارد. آن‌ها همچنین معیارهای طراحی برای حوضچه آرامش با دیواره پیوسته ارائه نمودند. Ghordnooshahri et al. (2012) نیز به بررسی اثر دیواره‌های لبه پهن بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش واگرا پرداختند و امکان بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی به کمک آستانه لبه پهن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مجموع با انجام ۷۹ آزمایش در محدوده اعداد فرود اولیه ۳/۱ تا ۱۰/۳ در یک حوضچه آرامش واگرا با زوایای واگرایی ۳ تا ۵ درجه و استفاده از آستانه‌های با ارتفاع‌های مختلف و موقعیت‌های متفاوت نسبت به پنجه پرش هیدرولیکی دریافتند که نصب دیواره لبه پهن بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش واگرا اثری بر نسبت عمق ثانویه پرش ندارد، ولی باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شود. همچنین آزمایش‌های آن‌ها

در حالی که توزیع فشار بر روی سطح پایین دست دیواره خطی است. (Ohtsu et al. 1990, 1991) جریان عبوری از روی دیواره پیوسته را به سه دسته زیر 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. آن‌ها با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی  $y_2$  و  $h/y_1$  مقادیر بحرانی این پارامترها را برای تبدیل از یک حالت به حالت دیگر به دست آوردند و با اندازه‌گیری فشار بر روی دیواره، روابط تجربی برای محاسبه نیروی دراگ وارده بر دیواره در هر یک از سه حالات فوق ارائه کردند. همچنین (Farhoudi, Volker 1995) با ساخت مدل فیزیکی، تأثیرات نیروهای دراگ بر روی دیواره و بلوک‌های نصب شده در کف حوضچه‌های آرامش را بررسی کرده و رابطه‌ای جهت محاسبه نیروهای مؤثر در بلوک‌ها ارائه نمودند.

Rajaratnam, Hurtig (2000) ایده کنترل پرش هیدرولیکی به وسیله یک صفحه قائم روزه‌دار<sup>۱</sup> را مطرح نمودند و یک سری آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر صفحه با روزه‌های مختلف در کنترل پرش هیدرولیکی را انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که یک صفحه با روزه‌هایی به مساحت ۴۰ درصد سطح صفحه می‌تواند به عنوان جایگزینی برای بلوک‌ها یا سایر ضمایم موجود در حوضچه‌های آرامش در سازه‌های هیدرولیکی کوچک قرار گیرد. مطابق آزمایش‌ها، وقتی جت از روزه‌های صفحه قائم عبور می‌کنند، در اثر اصطکاک با دیواره‌های روزه‌ها افت انرژی شدیدی اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایش‌ها آن‌ها نشان داد که صفحه قائم روزه‌دار بایستی در فاصله ۲ برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ( $2y_2^*$ ) قرار گیرد. بعلاوه در پشت صفحه روزه‌دار نیز طول کف‌بند بتنی حوضچه آرامش بایستی تا ۰/۷ عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ادامه یابد. تحقیقات بعدی بر روی حوضچه‌های آرامش با یک دیواره سرتاسری به وسیله

<sup>1</sup>Screen or Porous Baffle

تنظیم و کنترل عمق پایاب<sup>۱</sup> مورد نیاز در پرش هیدرولیکی تعبیه گردید. جریان پس از عبور از روی دریچه بادبزی شکل، از فلوم خارج شده و وارد مخزن زمینی ذخیره آب فلوم می‌گردد. آب از مخزن زمینی فوق‌الذکر، توسط یک دستگاه پمپ و لوله‌های رابط به داخل مخزن فایبرگلاس ابتدای فلوم پمپ می‌گردد. بدین ترتیب سیستم چرخش آب در فلوم تکمیل می‌شود. این پمپ به گونه‌ای است که قابلیت تغییر دور موتور آن فراهم می‌باشد و با تغییر دور موتور، دبی فلوم افزایش یا کاهش داده می‌شود.

دبی جریان به وسیله یک سرریز مستطیلی در پایاب، با استفاده از رابطه سرریزهای مستطیلی اندازه‌گیری می‌شد. برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آب و عمق اولیه و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، شاخص مدرج با دقت ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای اندازه‌گیری بهتر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله موقعیت تشکیل شدن و طول آن، فلوم توسط مترهای پارچه‌ای مدرج گردید. برای اندازه‌گیری سرعت جریان در پایین دست پرش از یک دستگاه میکرو مولینه استفاده شد به طوری که جهت رسیدن به دقت مناسب در اندازه‌گیری و اجتناب از خطاهای ناشی از توزیع سرعت در عمق، اندازه‌گیری‌ها به روش سه نقطه‌ای در عمق انجام گردید. همچنین برای اندازه‌گیری سرعت جریان در ابتدا پرش از یک لوله پیتو استفاده شده است و در جهت اطمینان بیشتر با معادله پیوستگی نیز کنترل گردیده است. آزمایش‌ها در دبی‌های ۸/۵ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه و برای اعداد فرود در بازه ۴/۵ تا ۱۲ و با استفاده از دیواره‌های روزنه‌دار ساخته شده از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۸ میلی‌متر با ۴ نسبت بازشدگی سطح روزنه‌ها برابر ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد انجام شده است. ارتفاع دیواره‌ها برابر با ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی، اثر دیواره در کاهش طول پرش هیدرولیکی، افزایش می‌یابد. (Jamali (2013 مدلی عددی برای جریان غیر هیدرواستاتیک عبوری از روی دیواره‌های پیوسته ارائه داد. وی با به‌کارگیری روش‌های ساده و بدون نیاز به تکنیک‌های عددی پیچیده، به پیش‌بینی شرایط جریان بر روی دیواره‌های پیوسته پرداخت. مقایسه نتایج تحقیقات او با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که هم‌خوانی مناسبی بین نتایج محاسبات عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

با توجه به اینکه در مورد حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار تاکنون تحقیقاتی صورت نگرفته و تحقیقات صورت گرفته محدود به حوضچه آرامش با دیوار پیوسته می‌باشند، لذا تصمیم به انجام تحقیق حاضر گرفته شد. این پژوهش بر این فرضیه استوار گردید 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 که در نهایت می‌توان سازه‌های مستهلک کننده انرژی اقتصادی تری طراحی نمود.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر روی دیواره روزنه‌دار در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو در یک فلوم شیب پذیر با جداره شیشه‌ای و مخزن فایبرگلاس به انجام رسیده است. این فلوم دارای عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر می‌باشد. در ابتدای فلوم یک مخزن فایبرگلاس تعبیه شده که علاوه بر ذخیره بخشی از آب مورد نیاز، وظیفه تأمین هد جهت تشکیل پرش هیدرولیکی را نیز بر عهده دارد. همچنین یک دریچه کشویی برای ایجاد جریان فوق بحرانی در ابتدای فلوم نصب گردید. در انتهای فلوم، یک دریچه بادبزی شکل فلزی برای تأمین و

<sup>1</sup>Tailwater

اولیه و عدد فرود اولیه پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه تغییر داده می‌شود و سری جدید آزمایش‌ها برای عدد فرود جدید و شرایط جدید جریان برای تمامی دیواره‌های روزنه‌دار با ۳ عمق پایاب مختلف تکرار می‌گردد و ارتفاع دیواره‌های بهینه و فاصله بهینه قرارگیری برای هر یک از شرایط جدید استخراج می‌گردد.

### آنالیز ابعادی

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

$$f(h, y_1, v_1, T_w, y_2^*, L_B, L_S, A_0, A, S, g, \mu, \rho) = 0 \quad (1)$$

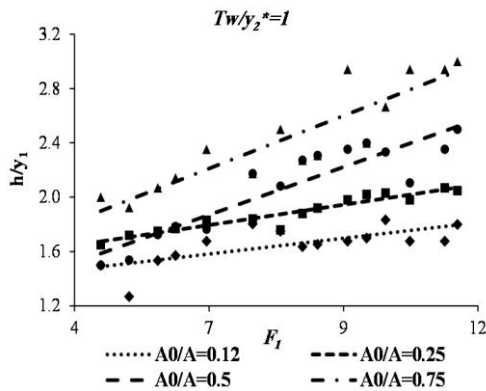
$h$  ارتفاع بهینه دیواره،  $y_1$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی،  $v_1$  سرعت متوسط ورودی،  $T_w$  عمق پایاب،  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد که از رابطه بلانگر به دست می‌آید،  $L_B$  طول بهینه حوضچه آرامش،  $L_S$  فاصله بهینه قرارگیری دیواره روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش،  $A$  مجموع سطح روزنه‌ها،  $A$  سطح کل دیواره،  $S$  شیب کف فلوم،  $g$  شتاب ثقل،  $\mu$  لزوجت دینامیک و  $\rho$  جرم واحد حجم سیال می‌باشد. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعادی زیر نوشت:

$$f\left(\frac{h}{y_1}, \frac{T_w}{y_2}, \frac{L_B}{y_2}, \frac{L_S}{y_2}, \frac{A_0}{A}, F_1, R_e, S\right) = 0 \quad (2)$$

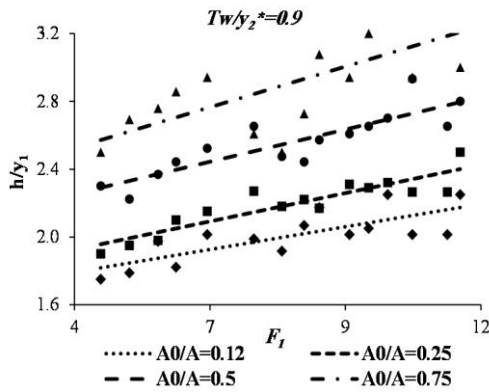
از میان پارامترهای بی‌بعد استخراج شده، از تأثیر شیب کف فلوم ( $S$ ) به دلیل اینکه در تمام آزمایش‌ها صفر بوده است صرف‌نظر شده است. همچنین اثر لزوجت که به شکل عدد رینولدز ( $R_e$ ) خود را نشان می‌دهد، به دلیل اینکه در تمام آزمایش‌ها، جریان در محدوده آشفتگی قرار دارد، حذف گردید. در نتیجه رابطه (۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

### روش انجام آزمایش‌ها

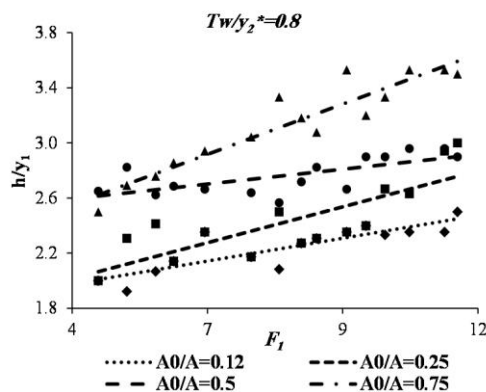
نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بوده که برای یک شرایط ثابت پرش هیدرولیکی (یک دبی مشخص و یک عدد فرود ثابت و عمق پایاب معین)، دیواره‌ای با سطح روزنه‌های ۱۲ درصد با ارتفاع ۰/۵ سانتیمتر در فواصل مختلف از ابتدای پرش قرار داده و شرایط پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، عمق جریان بر روی دیواره، الگوی جریان قبل و بعد از دیواره، عمق و سرعت ثانویه پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری و ثبت می‌گردید. با استفاده از معادله انرژی و مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی محاسبه می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که طول پرش برابر است با فاصله بین شروع نقطه پرش تا نقطه‌ای که در آن عمق جریان برابر با ارتفاع پایاب می‌باشد. از میان فواصل مختلف طولی، طولی که در آن طول حوضچه آرامش کمترین مقدار و افت انرژی حداکثر و کنترل پرش هیدرولیکی به نحو مناسبی صورت گیرد، به عنوان فاصله بهینه قرارگیری دیواره ( $L_S$ ) برای این ارتفاع دیواره انتخاب می‌شود. همین مراحل آزمایش را تا ارتفاع تیغه‌ای که پرش هیدرولیکی مستغرق نگردد انجام داده و نتایج ثبت می‌گردید. پس از بررسی همه نتایج، می‌توان ارتفاع بهینه دیواره و مناسب‌ترین محل قرارگیری آن را نیز استخراج نمود. در ادامه همین آزمایش‌ها، برای سایر دیواره‌ها با سطح بازشدگی‌های مختلف انجام می‌گیرد و به ازای هر سطح بازشدگی، ارتفاع دیواره بهینه و فاصله بهینه قرارگیری آن از ابتدای حوضچه آرامش و طول بهینه پرش هیدرولیکی مشخص و نتایج ثبت و برداشت می‌گردد. حال با استفاده از دریچه بادبزی انتهای فلوم، عمق پایاب به ترتیب به اندازه ۱۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و همه آزمایش‌های مذکور برای دیواره‌های روزنه‌دار انجام و مشخصات پرش هیدرولیکی برای شرایط جدید آزمایش اندازه‌گیری و برداشت می‌شود و ارتفاع دیواره بهینه و فاصله بهینه قرارگیری آن از ابتدای حوضچه آرامش برای دیواره با سطح بازشدگی ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد مشخص می‌گردد. در ادامه با تغییر در شرایط جریان، عمق



شکل (۱): تغییرات ارتفاع نسبی در عمق پایاب برابر با عمق ثانویه پرش هیدرولیکی



شکل (۲): تغییرات ارتفاع نسبی در عمق پایاب برابر با نود درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی



شکل (۳): تغییرات ارتفاع نسبی در عمق پایاب برابر هشتاد درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

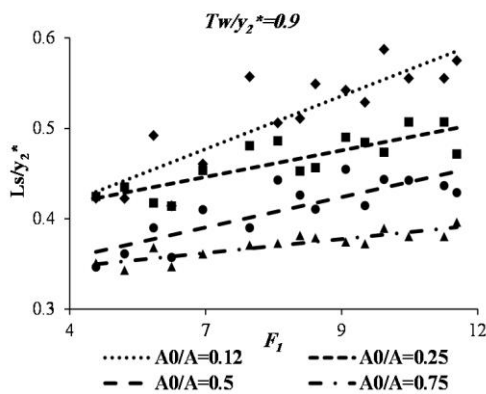
$$f\left(\frac{h}{y_1}, \frac{T_w}{y_2}, \frac{L_B}{y_2}, \frac{L_s}{y_2}, \frac{A_0}{A}, F_1\right) = 0 \quad (3)$$

## نتایج و بحث

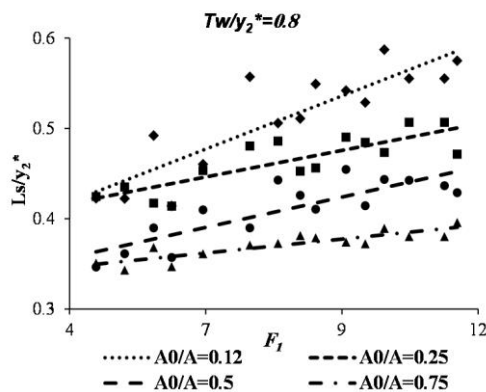
در زیر، نتایج آزمایش‌ها انجام شده پس از تحلیل‌های صورت گرفته و بر اساس آنالیز ابعادی انجام شده آورده شده است.

### ارتفاع نسبی بهینه دیواره‌های روزنه‌دار

در شکل‌های ۲، ۳ و ۴، ارتفاع نسبی بهینه دیواره‌های روزنه‌دار به ازای عمق‌های نسبی پایاب برابر ۱، ۰/۹ و ۰/۸ آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، به ازای تمامی نسبت‌های عمق پایاب، با افزایش درصد بازشدگی روزنه‌ها، ارتفاع نسبی دیواره بهینه افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، در عمق نسبی پایاب ۰/۹، متوسط افزایش ارتفاع دیواره در درصدهای بازشدگی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ برابر ۹، ۲۷ و ۴۵ درصد نسبت به ارتفاع دیواره در بازشدگی ۱۲٪ است. از طرفی با کاهش عمق پایاب، ارتفاع مورد نیاز دیواره روزنه‌دار جهت کنترل پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد بدین صورت که با کاهش عمق نسبی پایاب از ۱ به ۰/۹، ارتفاع دیواره در درصدهای بازشدگی ۰/۱۲، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ به‌طور متوسط ۲۱، ۱۷، ۲۲ و ۱۹ درصد افزایش یافته است. همچنین با کاهش عمق نسبی پایاب از ۰/۹ به ۰/۸، ارتفاع نسبی دیواره در همه بازشدگی‌ها ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع اثر دیواره را در جبران کمبود عمق پایاب نشان می‌دهد.



شکل (۵): تغییرات فاصله بهینه قرارگیری دیواره در عمق پایاب نود درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی



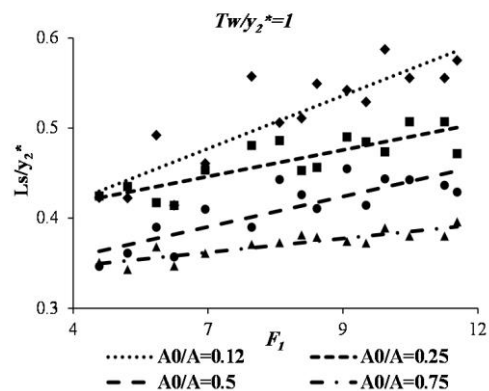
شکل (۶): تغییرات فاصله بهینه قرارگیری دیواره در عمق پایاب هشتاد درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

### طول بهینه حوضچه آرامش

در شکل‌های ۷، ۸ و ۹، طول بهینه حوضچه آرامش نسبت به عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به ازای عمق‌های نسبی پایاب برابر ۱، ۰/۹ و ۰/۸ آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، طول بهینه حوضچه آرامش با بازشدگی ۵۰ درصد از طول بهینه حوضچه آرامش با سایر دیواره‌های روزنه‌دار کمتر است. پس از آن، حداقل طول حوضچه به ترتیب مربوط به بازشدگی ۷۵، ۲۵ و ۱۲ درصد می‌باشد. مطابق با شکل‌های ۷، ۸ و ۹، در بازشدگی ۵۰ درصد، حداقل و حداکثر طول نسبی حوضچه آرامش ( $L_B/y_2^*$ ) در عمق نسبی پایاب برابر ۱، ۱/۹۲ و ۲/۲۸ است و حداکثر طول نسبی حوضچه آرامش در

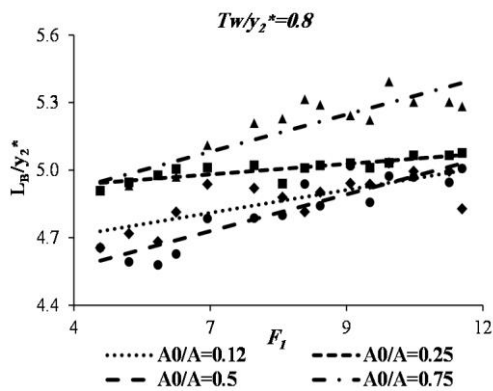
### فاصله بهینه قرارگیری دیواره‌ها

در شکل‌های ۵، ۶ و ۷، تغییرات فاصله بهینه قرارگیری دیواره‌های روزنه‌دار به ازای عمق‌های نسبی پایاب برابر ۱، ۰/۹ و ۰/۸ آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، به ازای تمامی نسبت‌های عمق پایاب، با افزایش درصد بازشدگی روزنه‌ها، فاصله بهینه قرارگیری دیواره‌های روزنه‌دار از ابتدای حوضچه آرامش به دلیل امکان یافتن عبور بخشی از جریان از روزنه‌های کاهش می‌یابد. همچنین به ازای تمامی مقادیر عدد فرود در بازه ۴/۵ تا ۱۲، با کاهش عمق نسبی پایاب ( $T_w/y_2^*$ )، نسبت فاصله بهینه قرارگیری دیواره از ابتدای حوضچه آرامش به عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. تحلیل این موضوع بدین شکل است که با کاهش عمق نسبی پایاب، پنجه پرش هیدرولیکی به طرف پایین‌دست حرکت می‌کند، در نتیجه برای کنترل و تثبیت پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش و جلوگیری از جاروب شدن<sup>۱</sup> پرش به پایاب، فاصله قرارگیری دیواره از ابتدای حوضچه آرامش کاهش می‌یابد.



شکل (۴): تغییرات فاصله بهینه قرارگیری دیواره در عمق پایاب صد درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

<sup>۱</sup> Sweep Out

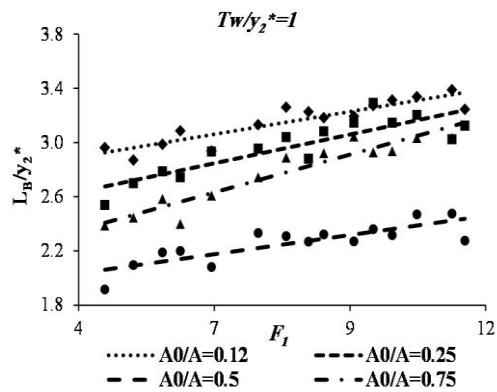


شکل (۹): تغییرات طول بهینه حوضچه آرامش در عمق پایاب هشتاد درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

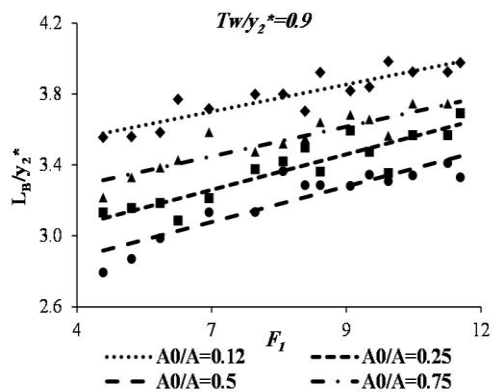
### افت نسبی انرژی

در شکل ۱۱، ۱۲ و ۱۳، نمودارهای افت نسبی انرژی برای دیواره‌های روزنه‌دار با سطح بازشدگی ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برای عمق‌های نسبی پایاب برابر ۱، ۰/۹ و ۰/۸ ارائه شده است. دیواره روزنه‌دار، به دلیل اضافه شدن افت روزنه، باعث افزایش افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد می‌گردد که این موضوع در کاهش قدرت فرساینده‌گی جریان خروجی از حوضچه آرامش بسیار مؤثر می‌باشد. از طرفی روند تغییرات افت نسبی انرژی به گونه‌ای است که با افزایش عدد فرود، افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد. به طوری که در تمام آزمایش‌ها، کمترین مقدار افت نسبی انرژی در عدد فرود ۴/۵ و بیشترین آن در عدد فرود ۱۲ رخ داد. همچنین آزمایش‌ها نشان می‌دهد که دیواره روزنه‌دار با سطح روزنه‌ها برابر ۵۰ درصد، بیشترین افت نسبی انرژی را دارد. به طوری که افت نسبی انرژی در این نوع دیواره در عدد فرود ۴/۵ و عمق نسبی پایاب ۱، برابر ۶۰ درصد است که این مقدار برای عدد فرود ۱۲ به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. این امر به دلیل این است که برای نسبت‌های بازشدگی سطح روزنه‌ها به سطح دیواره برابر ۱۲ و ۲۵ درصد، به دلیل سطح کم روزنه‌ها، شرایط جریان در این حوضچه بسیار شبیه دیواره پیوسته می‌باشد. همچنین برای نسبت سطح روزنه‌ها به سطح دیواره برابر ۷۵ درصد نیز از آنجا که سطح روزنه‌ها نسبت به سطح دیواره بسیار زیاد است

این بازشدگی مربوط به عمق نسبی پایاب برابر با ۰/۸ بوده و مقدار آن بین ۴/۷ تا ۵ متغیر است. همچنین طول حوضچه آرامش در دیواره روزنه‌دار به ازای همه بازشدگی‌ها و تمامی مقادیر عمق‌های نسبی پایاب، کمتر از طول حوضچه آرامش در پرش هیدرولیکی آزاد است به طوری که مطابق با ضوابط طراحی USBR، مقدار تقریبی طول حوضچه آرامش در پرش هیدرولیکی آزاد در محدوده فرود ۴/۵ تا ۱۷ برابر  $L_B/y_2^* = 6$  می‌باشد و با کاهش عمق پایاب مقدار طول حوضچه از مقدار ارائه شده بیشتر می‌شود.

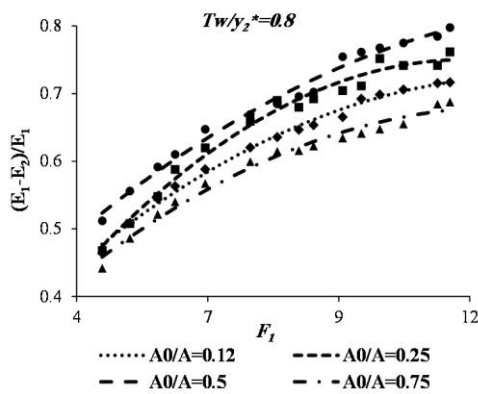


شکل (۷): تغییرات طول بهینه حوضچه آرامش در عمق پایاب برابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی



شکل (۸): تغییرات طول بهینه حوضچه آرامش در عمق پایاب نود درصد عمق ثانویه پرش





شکل (۱۲): تغییرات افت نسبی انرژی در عمق پایاب هشتماد درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

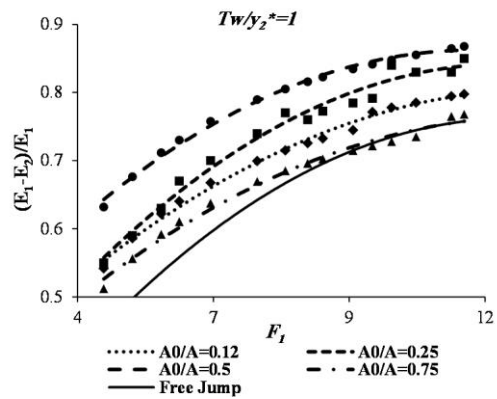
### نتیجه گیری

آزمایش‌های انجام شده در حوضچه آرامش با دیواره روزنه‌دار نشان داد که به ازای سطح روزنه‌ها برابر ۵۰ درصد سطح دیواره، بیشترین افت نسبی انرژی و کمترین طول مورد نیاز حوضچه آرامش اتفاق می‌افتد و این نسبت به‌عنوان سطح بهینه روزنه‌ها انتخاب گردید. همچنین وجود دیواره روزنه‌دار، نیاز به عمق پایاب را تا حدی کاهش دهد به‌طوری‌که اگر نسبت عمق پایاب به عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تا ۲۰ درصد کاهش یابد دیواره روزنه‌دار می‌تواند همچنان عملکرد مناسبی داشته باشد در نتیجه می‌توان به عنوان جایگزینی برای حوضچه‌های تیپ استاندارد USBR پیشنهاد گردد.

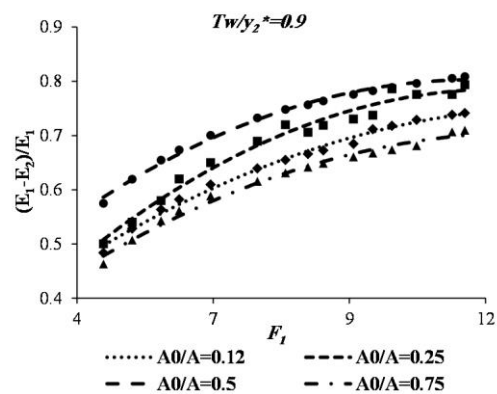
### تقدیر و تشکر

این پژوهش در راستای اهداف و مأموریت‌های قطب علمی مدیریت بهره برداری از شبکه های آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به انجام رسیده است.

بخش عمده جریان از روزنه‌ها عبور می‌کند و این حالت شبیه حالتی است که تقریباً مانع قابل توجهی بر سر راه جریان وجود ندارد.



شکل (۱۰): تغییرات افت نسبی انرژی در عمق پایاب سد درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی



شکل (۱۱): تغییرات افت نسبی انرژی در عمق پایاب نود درصد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

## منابع

- ایلاقی، م. ۱۳۸۲. کنترل پرش هیدرولیکی با یک و دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Alikhani, A., R. Behrouzi-Rad and M. Fathi-Moghadam. 2010. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International Journal of Physical Sciences*, 5(1):025-029.
- Farhoudi, J. and R. E. Volker. 1995. Drag force acting on baffle blocks in the stilling basin. *Iranian Journal of Water Resources Engineering*, 3(1):47-67.
- Ghordnooshahri, A., M. H. Omid and S. Koochakzadeh. 2012. The effect of broad-crested sill on the hydraulic jump characteristics in diverging stilling basins. *Law Research Quarterly (LAW & POLITICS Research Journal) FALL*, 3(10):85-79.
- Jamali, M. 2013. Non-hydrostatic layered flows over a sill. *Journal of Fluid Dynamics Research*, 2(2):118-126.
- Karki, K. S. 1976. Supercritical flow over sills. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 102(H410).
- Narayanan, R. and L. S. Schizas. 1980. Force on sill of forced jump. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 106(HY7).
- Ohtsu, I., Y. Yasuda and H. Hashiba. 1990. Drag on vertical sill of forced jump. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 122:465-469.
- Ohtsu, I., Y. Yasuda and Y. Yamanaka. 1991. Incipient jump condition for flows over a vertical sill. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 29(1):29-47.
- Rajaratnam, N. and K. I. Hurtig. 2000. Screen-type energy dissipation for hydraulic structures. *Journal of the Hydraulics Division*, 126(4):310-312.
- Rand, W. 1965. Flow over a vertical sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 9:97-122.
- Rand, W. 1967. Flow over a dentaited sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 9:135-153.
- Shukry, A. 1957. The efficiency of floor sills under drowned hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 83:1-8.
- U.S.B.R. 1987. *Design of Small Dams*. Third Edition, Government Printing Office. Washington. DC, USA, 860 pages.

## Control of hydraulic jump in the stilling basins with perforated sill

Sajad Kiani<sup>1</sup>, Manoochehr Fathi-Moghadam<sup>2</sup>, Reza Behrouzi-Rad<sup>3</sup>, Layla Davoodi<sup>4</sup>

### Abstract

Stilling basins are the most common structures for energy dissipation downstream of spillways. A properly designed stilling basin can ensure 60–70% dissipation of energy in the basin. The purpose of this study is to evaluate the performance of perforated end sill and effect of the sill on characteristics of hydraulic jump. The perforated sills with different heights and four ratios of opening 12, 25, 50 and 75% were tested for three tail water depths. Results of experiments confirmed significant effect of the perforated sill on dissipation of energy, reduction of the basin length and reducing dependence of jump location on tail water depth. Based on experimental observation, in a constant Froude number, decreasing of the tail water depth causes the hydraulic jump to move forward toward the end of the basin. In this case, to control the jump and to avoid the hydraulic jump being swept out of the basin, sill distance is decreased. Also, observation showed the sill height needs to be increased as inflow Froude number increases and tail water decreases. In the other words, relative sill height increases up to 30% as tail water depth ratio decreases from 1 to 0.8. Furthermore, the results showed that sills with the 50% opening in comparison with other openings have most effective in energy dissipation and reduction of the hydraulic jump length. The comparison of stilling basin with perforated sill and free jump indicated that the sill with perforation ratio of 50% dissipated 60–90% of water energy in inflow Froude number range of 4.5–12. Moreover, once Froude number increases from 4.5 to 12, stilling basin length increases about 19% for this perforated sill in the tail water depth ratio of 1.

**Keywords:** Sill height, Energy dissipation, Length of basin, Tail water, Sill position.

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate, PhD Student at Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, Mobile: +98 913 803 0671, E-mail: sajad.kiani508@gmail.com

<sup>2</sup> Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, Telephone: 061-33738359, E-mail: fathi49@gmail.com(\*Corresponding author)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Qom, Iran, E-mail: rad\_19811360@yahoo.com

<sup>4</sup> M.Sc. Graduate, PhD Student at Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, E-mail: Layla.davoodi@gmail.com.