

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه پلکانی روزنه‌دار بر مشخصات پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز اوجی

حسن سعدی<sup>۱</sup> و سیدمحسن سجادی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲ به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیک؛ و استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۳

### چکیده

حوضچه‌های آرامش به‌عنوان سازه‌های هیدرولیکی مؤثر برای استهلاک انرژی جنبشی جریان فوق بحرانی در پایین دست سرریز قرار می‌گیرند و در بعضی موارد برای دستیابی به طرحی اقتصادی از اجزایی مانند بلوک‌های کف، آستانه انتهایی و ... استفاده می‌کنند. بنابراین، برای تثبیت و کاهش طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش، احداث دیواره‌ای کوتاه به‌صورت آب پایه پیوسته می‌تواند مؤثر باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی، اثر روزنه‌دار بودن آستانه پلکانی بر خصوصیات پرش در پایین دست سرریز اوجی بررسی شده است. آزمایش‌ها برای چهار اندازه بازشدگی (۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درصد) در سه فاصله نسبی (۸/۱۰، ۶/۱۴ و ۷۵/۱۸) اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آستانه پلکانی روزنه‌دار اثری مثبت بر کنترل و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش دارد و آستانه با ۲۵ درصد بازشدگی در فاصله نسبی ۱۰/۴، نسبت به سایر آستانه‌ها، بیشترین اثر را در کاهش طول پرش دارد و طول پرش را به‌طور متوسط ۴۰/۸ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش می‌دهد. همچنین از بین گزینه‌های آزمایش شده، مناسب‌ترین موقعیت قرارگیری آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی بر مبنای کاهش طول پرش هیدرولیکی، در فاصله نسبی بیشتر از ۶/۱۴ به دست آمده است. کاهش توأم درصد بازشدگی و فاصله نسبی آستانه اثری مثبت بر افزایش افت نسبی انرژی دارد به‌طوری‌که آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی در فاصله نسبی ۱۰/۴ به‌طور متوسط افت نسبی انرژی را ۱۱ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

آستانه پلکانی روزنه‌دار، استهلاک انرژی، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش

### مقدمه

می‌روند. از جمله این سازه‌ها می‌توان به حوضچه آرامش از نوع پرش هیدرولیکی اشاره کرد. در طراحی حوضچه‌های آرامش، تعیین دقیق موقعیت پرش اهمیت ویژه‌ای دارد و از این‌رو یکی از راه‌های کم هزینه برای تثبیت پرش هیدرولیکی، احداث دیواره‌ای کوتاه در حوضچه آرامش به‌صورت آب پایه پیوسته است.

اولین مطالعات در مورد کنترل پرش هیدرولیکی با آب پایه را شگری (Shukry, 1957) انجام داد. وی با

به‌منظور جلوگیری از خسارات ناشی از انرژی آب در سرعت‌های فوق بحرانی و از بین بردن انرژی جنبشی اضافی موجود در چنین آبی، لازم است از سازه‌هایی خاص به نام سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده شود. این گونه سازه‌ها بر از بین بردن انرژی آب وسیله‌ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی و به وجود آوردن شرایط برای وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص به‌شمار

بعدی روی حوضچه‌های آرامش با یک و دو آب‌پایه را بیرامی و ایلاقی‌حسینی (Beyrami & Ilaghi-Hoseiny, 2004) ادامه و به کمک آزمایش‌هایی نشان دادند که با افزایش ارتفاع آب‌پایه پیوسته و کاهش فاصله قرارگیری فاصله آن از پنجه پرش، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. آب‌پایه با ارتفاع کم نیز تغییر محسوسی در میزان عمق نسبی ثانویه و افت نسبی انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک ایجاد نمی‌کند و در چنین شرایطی، طول پرش هیدرولیکی اجباری نیز با طول پرش در شرایط بدون آب‌پایه تقریباً برابر است. علیخانی و همکاران (Alikhani *et al.*, 2010) نیز با بررسی و کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از آستانه انتهایی پیوسته، به آزمایش‌هایی برای عدد فرود ۴ تا ۱۲ و ارتفاع نسبی ۲ تا ۸ دست زدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که آستانه انتهایی پیوسته تأثیری قابل توجه در کاهش طول پرش هیدرولیکی، در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد، دارد. این محققان همچنین معیارهایی برای طراحی حوضچه آرامش با آستانه انتهایی ارائه دادند. خورشیدی و همکاران (Khorshidi *et al.*, 2015) اثر آستانه انتهایی بر عملکرد پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش دوزنقه‌ای شکل را بررسی کردند؛ نتایج این بررسی‌ها حاکی از تغییرات شدید در وضعیت پرش پس از نصب آستانه انتهایی در حوضچه آرامش است که در موقعیتی معین موجب وقوع پرش هیدرولیکی می‌گردد. فتحی‌مقدم و همکاران (Fathi-Moghadam *et al.*, 2011) نیز در محدوده  $0.02 \leq \frac{h}{L_s} \leq 0.14$  به ایجاد همه انواع پرش دست زدند و در نهایت محدوده  $0.02 \leq \frac{h}{L_s} \leq 0.06$  را برای ایجاد پرش نوع B مناسب اعلام کردند که در آن نسبت‌های بدون بعد عمق جریان یعنی  $\frac{y_m - y_2^*}{y_1}$  و  $\frac{y_2 - y_2^*}{y_1}$  در محدوده  $0/5 -$  تا  $0/5 +$  تغییر می‌کند. پارسامهر و همکاران (Parsamehr *et al.*, 2013) با بررسی اثر آب‌پایه و زبری مصنوعی بر خصوصیات پرش روی شیب معکوس

آزمایش‌هایی نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش، فاصله قرارگیری دیواره از ابتدای پرش، ارتفاع نسبی دیواره و عمق پایاب در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی دیواره مؤثرند. رند (Rand, 1965) طبقه‌بندی گسترده‌ای از انواع جریان روی آب‌پایه را مهیا کرد که بر ارتباط بین ارتفاع آب‌پایه و عمق پایاب با عمق جریان ورودی و عدد فرود در مقطع اولیه پرش استوار بود؛ وی نشان داد که با افزایش ارتفاع آب‌پایه و کاهش فاصله از پنجه پرش، عمق آب در پایاب کاهش می‌یابد. این پژوهشگر همچنین با مقایسه میزان افت انرژی روی تک آب‌پایه‌های ممتد و دنداندار نتیجه گرفت که آب‌پایه‌های ممتد نسبت به آب‌پایه‌های دنداندار افت انرژی بیشتری ایجاد می‌کنند. کارکی (Karki, 1976) با قرار دادن یک آب‌پایه در مسیر پرش هیدرولیکی، جریان را بر اساس تشکیل شدن پرش در بالادست یا پایین‌دست آب‌پایه و یا مستغرق شدن پرش هیدرولیکی بررسی کرد. وی همچنین با اندازه‌گیری نیروهای فشاری وارد بر آب‌پایه در انواع جریان‌های مختلف نشان داد که توزیع ضریب دراگ ( $C_d$ ) روی سطح بالادست آب‌پایه با افزایش عدد فرود، کاهش می‌یابد در حالی که توزیع فشار بر سطح پایین‌دست آب‌پایه خطی است. نارایانان و شویزاس (Narayanan & Schizas, 1980) با قرار دادن یک آب‌پایه در مسیر پرش، جریان را بر اساس تشکیل شدن پرش در بالادست یا پایین‌دست آب‌پایه و یا مستغرق شدن پرش، بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش فاصله قرارگیری آب‌پایه از ابتدای پرش ضریب دراگ وارد بر آب‌پایه کاهش می‌یابد.

هگر و لی (Hager & Li, 1992) برای نسبت اعماق مزدوج در پرش‌های تحت تأثیر آستانه انتهایی، رابطه‌ای ارائه دادند که در آن اثر آستانه به صورت پارامتری که خود متأثر از محل قرارگیری آستانه و نوع پرش بود، از نسبت اعماق مزدوج در حالت کلاسیک کاسته می‌شد. تحقیقات

تأثیر آستانه انتهایی پلکانی را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در ارتفاعی ثابت افزایش تعداد پله‌های آستانه اثر منفی بر ماندگاری پرش دارد، و نیز اینکه افزایش ارتفاع و کاهش فاصله قرارگیری آستانه انتهایی اثر مثبت بر ماندگاری پرش دارد. حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar & Omid, 2016) با بررسی اثر آستانه انتهایی لبه‌پهن بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی به این نتیجه رسیدند که به‌زای یک عدد فرود مشخص جت ورودی، عمق پایاب مورد نیاز در مقطع مثلثی تا ۷۰ درصد کمتر از مقدار متناظر آن در مقطع مستطیلی است.

از مجموع نتایج به‌دست آمده از این مطالعات می‌توان گفت که وجود آستانه در حوضچه آرامش اثری مثبت بر کاهش نسبت اعماق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی دارد. انتظار می‌رود که استفاده از آستانه پلکانی روزنه‌دار موجب کاهش هرچه بیشتر طول حوضچه آرامش شود. تاکنون درباره اثر آستانه پلکانی روزنه‌دار در حوضچه آرامش سرریز اوجی مطالعه نشده است، از این‌رو در تحقیق حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی کنترل شده با آستانه پلکانی روزنه‌دار در آزمایشگاه بررسی گردیده است.

## مواد و روش‌ها

### آنالیز ابعادی

مشخصات پرش هیدرولیکی کنترل شده با آستانه

پلکانی روزنه‌دار، تابعی است از پارامترهای رابطه ۱:

$$\emptyset = f(v_1, y_1, y_2, L_s, L_j, g, \mu, \rho, \varepsilon) \quad (1)$$

که در آن،

$v_1$  = عمق اولیه پرش هیدرولیکی؛  $y_2$  = عمق ثانویه پرش هیدرولیکی؛  $L_s$  = فاصله قرارگیری آستانه از محل شروع پرش (انتهای سرریز)؛  $L_j$  = طول پرش هیدرولیکی؛

نشان دادند که به‌کارگیری آب‌پایه و زبری در حوضچه آرامش باعث تثبیت پرش روی شیب معکوس و کاهش عمق مزدوج و بهبود خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌شود.

احمدی و هنر (Ahmadi & Honar, 2015) اثر شکل‌های مختلف آب‌پایه بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را بررسی کردند و سه شکل مختلف مستطیل، مربعی و پلکانی آب‌پایه را به‌کار بردند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که وجود آب‌پایه و افزایش ارتفاع آن اثر مثبت بر کاهش طول پرش و افزایش افت انرژی نسبی دارد و آب‌پایه انتهایی با مقطع مربعی، به‌دلیل ممانعت بیشتر در مقابل جریان، اثر بیشتری در کاهش اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی و افزایش افت نسبی انرژی، در مقایسه با آب‌پایه کم‌عرض، دارد. تیواری و آرون (Tiwari & Arun, 2014) تأثیر شکل آستانه انتهایی بر عملکرد حوضچه آرامش را بررسی و از یک جت مربعی شکل و چهار شکل مختلف آستانه (دوزنقه‌ای، مربعی، مستطیلی و مثلثی) استفاده کردند که در پایین‌دست جت قرار داشتند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که تغییر در شکل بر الگوی جریان عبوری و میزان آبشستگی در پایین‌دست آستانه تأثیر می‌گذارد و آستانه مثلثی شکل بیشترین تأثیر را در استهلاک انرژی دارد. عبدالعظیم و یاسر (Abdelazim & Yaser, 2010) به بررسی تأثیر شکل و فاصله آستانه انتهایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. این پژوهشگران از دو شکل مختلف آستانه دوزنقه‌ای: یکی بالادست قائم - پایین‌دست شیب‌دار و دیگری بالادست شیب‌دار - پایین‌دست قائم استفاده کردند. نتایج پژوهش‌های این پژوهشگران نشان داد که آستانه دوزنقه‌ای به شکل نخست (بالادست قائم - پایین‌دست شیب‌دار) بیشترین تأثیر را در کاهش طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی دارد. گیگلو و قدسیان (Gigloo et al., 2016)

یک سرریز اوجی به روش استاندارد USBR با دبی طرح ۳۰ لیتر بر ثانیه طراحی شد که بخش پایین دست آن از رابطه ۶ پیروی می‌کند.

$$\frac{y}{H_d} = -K\left[\frac{x}{H_d}\right]^n \quad (6)$$

که در آن،

$H_d$  = بار طراحی؛  $x$  و  $y$  = مختصات هر نقطه از منحنی؛ و  $n$  و  $K$  ضرایبی هستند که مقادیر آنها به شیب وجه بالادست سرریز و سرعت جریان در بالادست بستگی دارد. پارامترهای طراحی سرریز اوجی در جدول ۱ و پروفیل طراحی سرریز اوجی در شکل ۱ آورده شده است.

مدل سرریز با ورق گالوانیزه ساخته و در فاصله ۶ متری از انتهای فلوم قرار داده شد. ارتفاع سرریز ۲۹/۳ و عرض آن ۲۵ سانتی‌متر است. در شکل ۲، نمای جانبی فلوم ۲۵ سانتی‌متری و تجهیزات آن و محل قرارگیری سرریز اوجی نشان داده شده است. در این تحقیق از یک آستانه پلکانی دو پله‌ای با ارتفاع و عرض ۶/۴ سانتی‌متر استفاده شد که ۱/۳۵ برابر عمق اولیه پرش هیدرولیکی کلاسیک دبی طراحی ( $y_{1design} = ۴/۸cm$ ) است. همچنین، ارتفاع و عرض پله در تمام آستانه‌ها برابر ۳/۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. قرارگیری آستانه در حوضچه آرامش به نحوی بود که سطح قائم آستانه در مقابل جریان و سطح پلکانی آن در پایین دست باشد، میزان بازشدگی آستانه‌ها ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درصد سطح کل ( $۲۵cm \times ۶/۴cm$ ) در نظر گرفته شد. تمامی روزنه‌های ایجاد شده مستطیلی شکل اند و آستانه‌ها در سه فاصله ۹۰، ۷۰ و ۵۰ سانتی‌متری از انتهای سرریز مورد آزمایش قرار گرفتند. محل قرارگیری آستانه با توجه به رابطه هگر و همکاران (Hager *et al.*, 1990) برای محاسبه طول غلتاب پرش هیدرولیکی کلاسیک تعیین شد.

$$\frac{Lr}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) \quad (7)$$

$g$  = شتاب ثقل؛  $\mu$  = لزوجت کینماتیکی آب؛  $\rho$  = جرم مخصوص آب؛ و  $\varepsilon$  = درصد بازشدگی آستانه. آنالیز ابعادی به روش باکینگهام نشان می‌دهد که خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌تواند بر حسب پارامترهای بی بعد زیر (رابطه ۲) بیان شود.

$$\emptyset = f(Fr_1, Re, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \varepsilon) \quad (2)$$

با توجه به اینکه عدد رینولدز در این تحقیق از ۵۸۹۸۰ تا ۱۱۴۴۹۸ است می‌توان از اثر نیروی لزوجت صرف نظر کرد که در این حالت پارامترهای بی بعد مؤثر به ۵ عدد کاهش خواهد یافت (رابطه ۳).

$$\emptyset = f(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \varepsilon) \quad (3)$$

با استفاده از رابطه ۳ می‌توان عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش را به صورت دو رابطه ۴ و ۵ بیان کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{L_s}{y_1}, \varepsilon) \quad (4)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = f(Fr_1, \frac{L_s}{y_1}, \varepsilon) \quad (5)$$

از این دو رابطه نتیجه می‌شود که عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی بستگی دارد به عدد فرود اولیه، درصد بازشدگی و فاصله نسبی آستانه از ابتدای پرش.

### تجهیزات آزمایشگاهی

برای دستیابی به هدفهای این تحقیق، آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر به اجرا درآمد. شیب کف فلوم در تمامی آزمایش‌ها مساوی صفر در نظر گرفته شد. در این تحقیق برای ایجاد جریان فوق بحرانی

بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه پلکانی روزنه‌دار بر...

سطح آب در نظر گرفته شد که در آن ۹۰ درصد حباب‌های ایجاد شده تمام شوند. در مجموع، ۶۵ آزمایش در محدوده اعداد فرود  $3/41$  تا  $4/13$  در سه فاصله نسبی با چهار درصد بازشدگی مختلف اجرا شد. در همه آزمایش‌ها، تعداد پلکان‌های آستانه ثابت و برابر ۲ در نظر گرفته شد زیرا برابر نتایج تحقیقات گیگلو و قدسیان (Gigloo et al., 2016)، افزایش تعداد پلکان در ارتفاع ثابت اثر منفی بر ماندگاری پرش هیدرولیکی در حوضچه آزمایش دارد. شکل ۳ نمونه‌ای از پرش هیدرولیکی تشکیل شده و شکل ۴ نمایی از آستانه‌های پلکانی روزنه‌دار و نحوه قرارگیری آنها را در پایین دست سرریز اوجی نشان می‌دهد. در جدول ۲ نیز محدوده پارامترهای بدون بعد ارائه شده است.

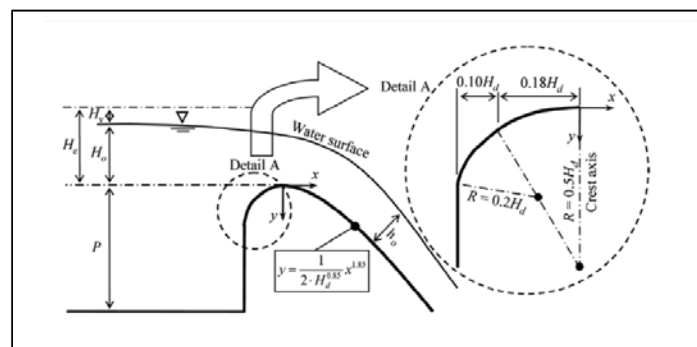
موقعیت پرش هیدرولیکی در همه آزمایش‌ها با استفاده از دریچه انتهایی فلوم به گونه‌ای تنظیم شد که پرش دقیقاً در محل پنجه سرریز تشکیل شود. در هر آزمایش، ابتدا آستانه در محل مورد نظر نصب شد؛ پس از آن، برای مقادیر دبی مشخص، پارامترهای کیفی و کمی پرش نظیر عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش اندازه‌گیری شد. دبی‌های مورد آزمایش در محدوده ۱۸-۴۴ لیتر بر ثانیه و با سرریز مثلثی ۵۳ درجه اندازه‌گیری شدند که در انتهای فلوم قرار گرفته و منحنی دبی اشل آن تعیین شده بود. در این تحقیق برای تعیین اعماق مزدوج پرش، از یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد؛ معیار اندازه‌گیری طول پرش هیدرولیکی برابر با فاصله افقی از شروع پرش تا نقطه‌ای بر

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریز اوجی

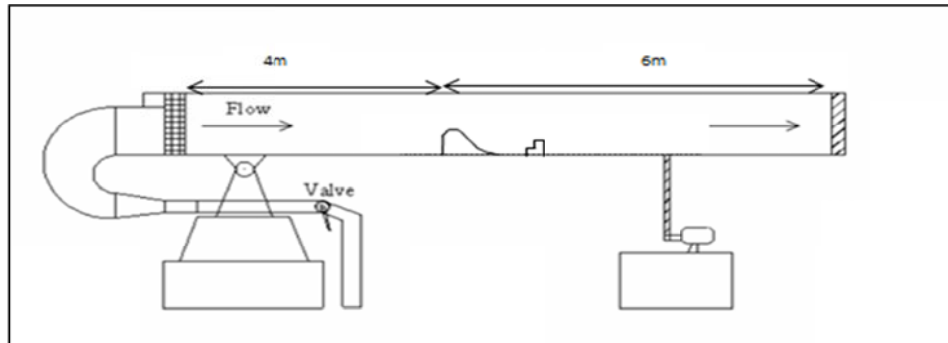
پارامتر	دبی طراحی (لیتر بر ثانیه)	ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)	ضریب دبی سرریز	ارتفاع طراحی (سانتی‌متر)	عمق اولیه پرش (سانتی متر)	عدد فرود در مقطع اولیه پرش	عمق ثانویه پرش (سانتی‌متر)
مقدار	۳۰	۲۳/۹	۲/۲	۱۳/۷	۴/۸	۳/۷۶	۲۳/۲

جدول ۲- محدوده پارامترهای بی‌بعد

پارامتر بدون بعد	عدد فرود اولیه	عدد رینولدز	فاصله نسبی	نسبت اعماق مزدوج
محدوده تغییرات	۳/۴۱-۴/۱۳	۵۸۹۸۰-۱۱۴۴۹۸	۱۰/۴-۱۴/۶-۱۸/۷۵	۴/۳۷۵-۵/۶۲۵



شکل ۱- پروفیل طراحی سرریز اوجی بر اساس جداول USBR



شکل ۲- فلوم ۲۵ سانتی‌متری و محل قرارگیری سرریز اوجی



شکل ۴- نمایی از آستانه پلکانی با ۲۵ درصد بازشدگی و نحوه قرارگیری آن در حوضچه آرامش



شکل ۳- پرش هیدرولیکی تثبیت شده توسط آستانه با بازشدگی ۲۵ درصد در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_1} = 10/4$  ( $L_s = 50 \text{ cm}$ )

## نتایج و بحث

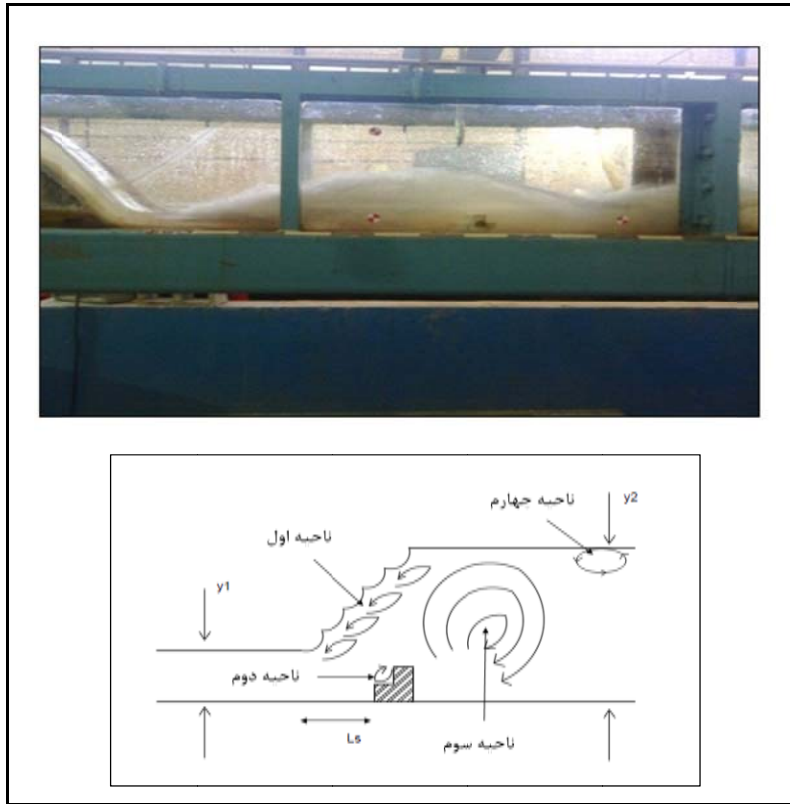
### بررسی الگوی جریان در حوضچه آرامش

در اثر عبور جریان از روی آستانه روزنه‌دار چهار ناحیه گردابی مشاهده شد:

- ۱- گرداب سطحی تشکیل شده قبل از آستانه.
- ۲- گرداب‌های کوچک تشکیل شده روی پله آستانه.
- ۳- گرداب کف تشکیل شده در پشت آستانه.
- ۴- گرداب‌های سطحی کوچک تشکیل شده در ابتدای شروع جریان یکنواخت.

تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در فاصله نسبی ثابت با افزایش دبی، گرداب‌های ناحیه اول به دیواره

نزدیکتر و به‌طور همزمان گرداب‌های نواحی سوم و چهارم گستردگی بیشتری پیدا می‌کنند (شکل ۵). در آستانه روزنه‌دار با افزایش درصد بازشدگی از شدت همه گرداب‌ها به‌میزان قابل توجهی کاسته می‌شود ولی در مقابل، استهلاك انرژی چندانی توسط آستانه ایجاد نمی‌شود زیرا در این حالت سطح مقطع مؤثر در مقابل جریان با افزایش بازشدگی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش دبی، گستردگی گرداب تشکیل شده روی پله آستانه ثابت باقی می‌ماند و شدت گستردگی آن تابعی از ارتفاع و عرض پله است؛ در این تحقیق آزمایشگاهی، این ابعاد ثابت در نظر گرفته شدند.



شکل ۵- انواع گرداب تشکیل شده در حوضچه آرامش ( $Q = 35/53 \frac{L^3}{s}$  و  $\frac{L_j}{y_1} = 14/6$ )

$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad (8)$$

### بررسی طول پرش هیدرولیکی

در این تحقیق با اجرای آزمایش‌های متعدد، طول پرش برای حالت‌های مختلف بررسی و اندازه‌گیری شد. برای مقایسه طول پرش هیدرولیکی در حوضچه با آستانه و بدون آستانه، مقادیر طول پرش توسط عمق اولیه پرش بی‌بعد شدند. همچنین، برای حصول اطمینان از درستی اندازه‌گیری طول پرش هیدرولیکی، مقادیر به‌دست آمده در حالت بدون آستانه با رابطه هگر و لی (Hager & Li, 1992) مقایسه شدند.

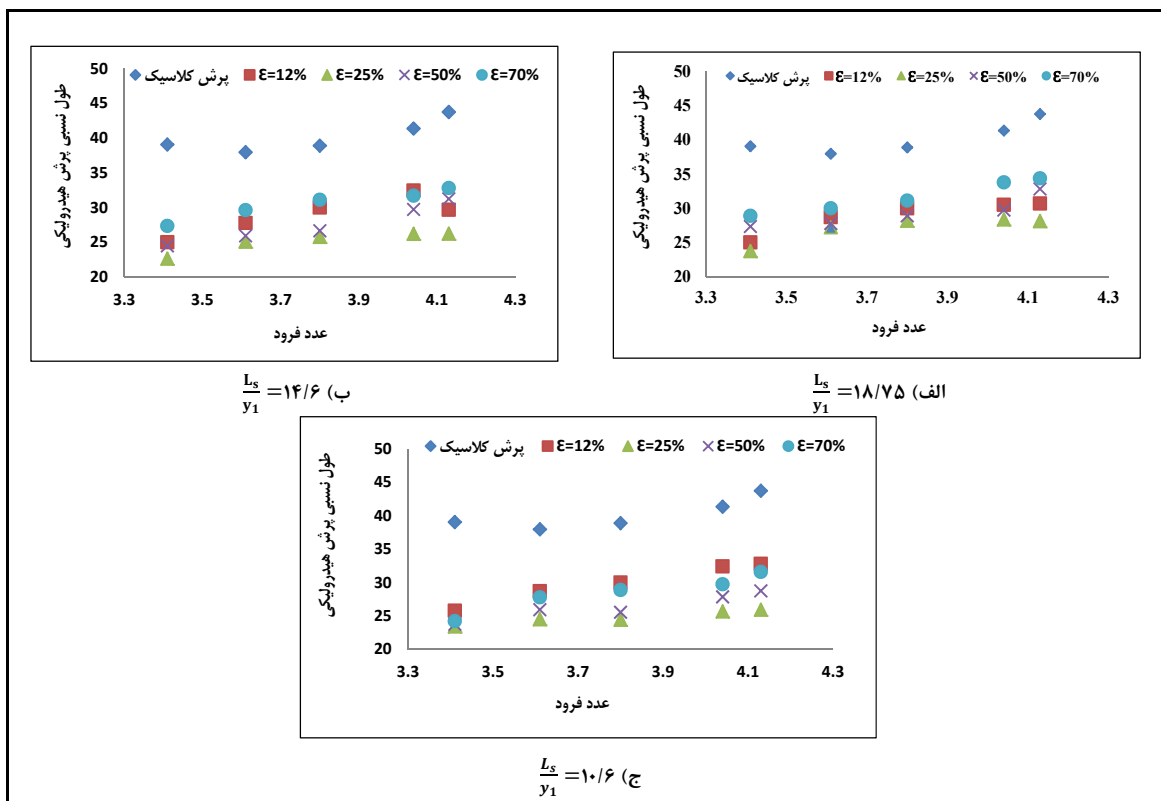
تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود در شکل ۶ نشان داده شده است. در یک دیدگاه کلی می‌توان گفت که وجود آستانه در حوضچه آرامش اثر مثبت بر کاهش طول پرش هیدرولیکی دارد. همچنین، تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که آستانه با ۲۵ درصد بازشدگی ( $\varepsilon = 25\%$ ) در سه فاصله نسبی ( $\frac{L_s}{y_1}$ ) مختلف و نسبت به سایر آستانه‌ها، بیشترین اثر را در کاهش طول پرش هیدرولیکی دارد (جدول ۳).

جدول ۳- متوسط درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک

ردیف	درصد بازشدگی (ε)	متوسط کاهش طول پرش در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ (درصد)	متوسط کاهش طول پرش در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ (درصد)	متوسط کاهش طول پرش در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 10/4$ (درصد)
۱	۱۲	۲۵/۹	۳۲/۶	۳۰/۳
۲	۲۵	۳۱/۷	۳۰/۰	۴۰/۸
۳	۵۰	۲۶/۵	۳۱/۴	۳۵/۷
۴	۷۰	۲۰/۴	۲۴/۹	۲۹/۵

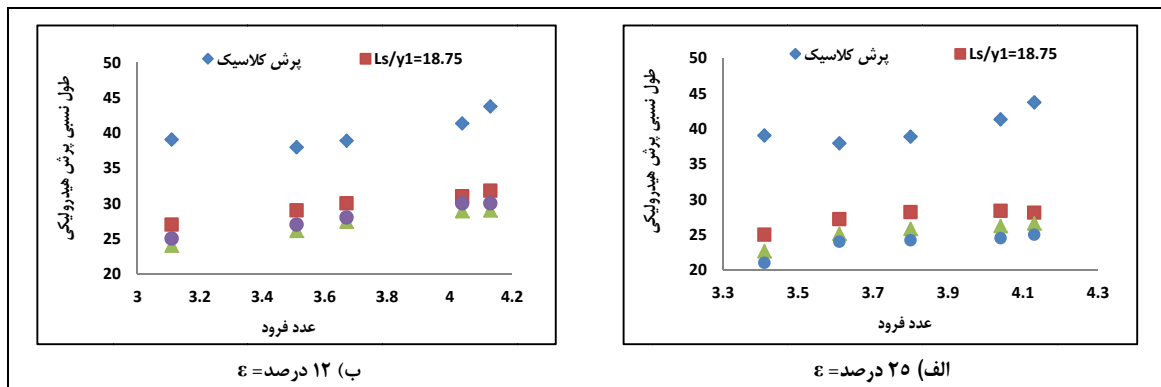
سبب افزایش طول حوضچه آرامش می‌شود. بنابراین، بهترین محل قرارگیری این آستانه در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$  است. در سایر آستانه‌ها کاهش فاصله قرارگیری همواره اثری کاهنده بر طول حوضچه آرامش دارد و قسمت اعظم آشفتگی ایجاد شده در فاصله بین آستانه و محل شروع پرش مشاهده می‌شود. در شکل ۷، اثر فاصله نسبی آستانه بر طول پرش هیدرولیکی برای آستانه‌های با ۱۲ و ۲۵ درصد بازشدگی بررسی شده است.

با توجه به داده‌های جدول ۳ مشاهده می‌شود که در همه آستانه‌ها کاهش فاصله همواره اثری مثبت بر کاهش طول پرش هیدرولیکی دارد. ولی در آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی این امر صادق نیست زیرا اگر آستانه خیلی به محل شروع پرش نزدیک شود باعث خواهد شد جریان عبوری از آن با حالت فروریزش شدیدی وارد حوضچه آرامش شود که این امر تلاطم و شدت گرداب‌های تشکیل شده از آستانه را به‌طور چشمگیر افزایش می‌دهد و



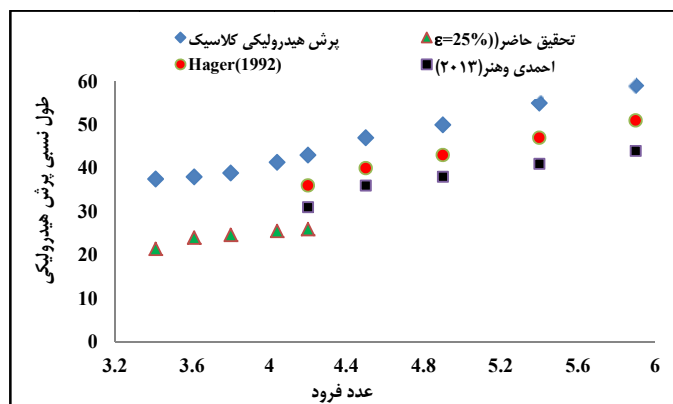


بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه پلکانی روزنه‌دار بر...



شکل ۷- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در فاصله‌های نسبی مختلف

با توجه به شکل ۸ که مقایسه طول پرش هیدرولیکی پژوهش حاضر با برخی از نتایج به دست آمده توسط سایر پژوهشگران را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که پرش هیدرولیکی تشکیل شده با به کارگیری آستانه با ۲۵ درصد بازشدگی در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_1} = 10/4$  دارای نتایجی چشمگیر است.

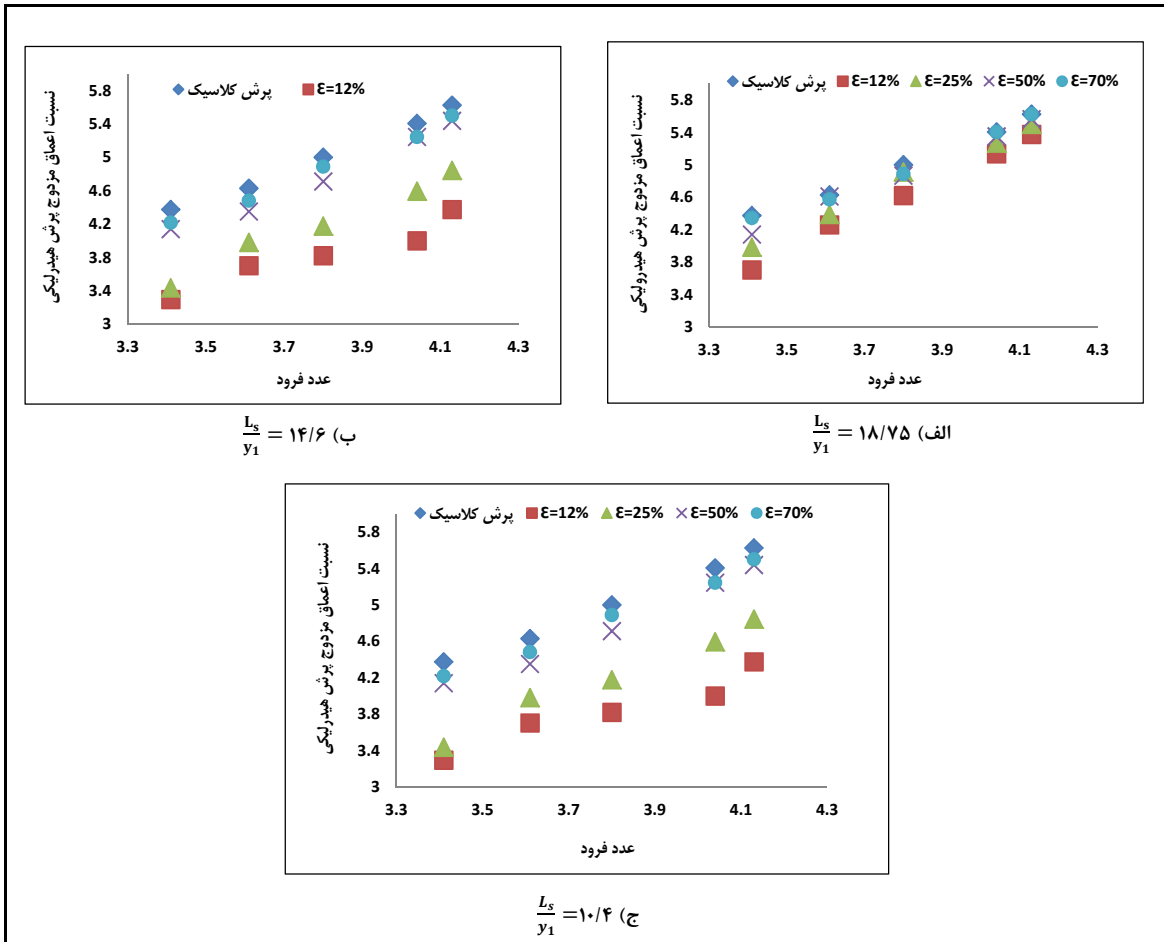


شکل ۸- مقایسه تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در پژوهش حاضر با سایر پژوهشگران

ثابت، با افزایش درصد میزان بازشدگی، سطح مقطع مؤثر در آستانه که باید در مقابل جریان قرار گیرد کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش مانع در مقابل جریان و افزایش نسبت اعماق ثانویه می‌شود. همچنین، کاهش فاصله قرارگیری آستانه از ابتدای پرش اثری مثبت بر کاهش نسبت اعماق ثانویه دارد، به طوری که آستانه پلکانی با ۱۲ درصد بازشدگی در فاصله‌های نسبی مختلف ( $\frac{L_s}{y_1}$ ) ۱۴/۶، ۱۸/۷۵ و ۱۰/۱۴ به طور متوسط به ترتیب ۸، ۱۳/۳ و ۲۳/۲ درصد عمق ثانویه را نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌دهد.

### بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی است؛ کاهش نسبت اعماق ثانویه می‌تواند اصلی در طراحی حوضچه آرامش باشد. در شکل ۹، تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود اولیه در فاصله‌های نسبی مختلف نشان داده شده است. تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که آستانه پلکانی روزنه‌دار با ۱۲ درصد بازشدگی بیشترین اثر را در کاهش نسبت اعماق ثانویه پرش هیدرولیکی، در مقایسه با سایر آستانه‌ها، دارد و نیز اینکه در فاصله‌ای

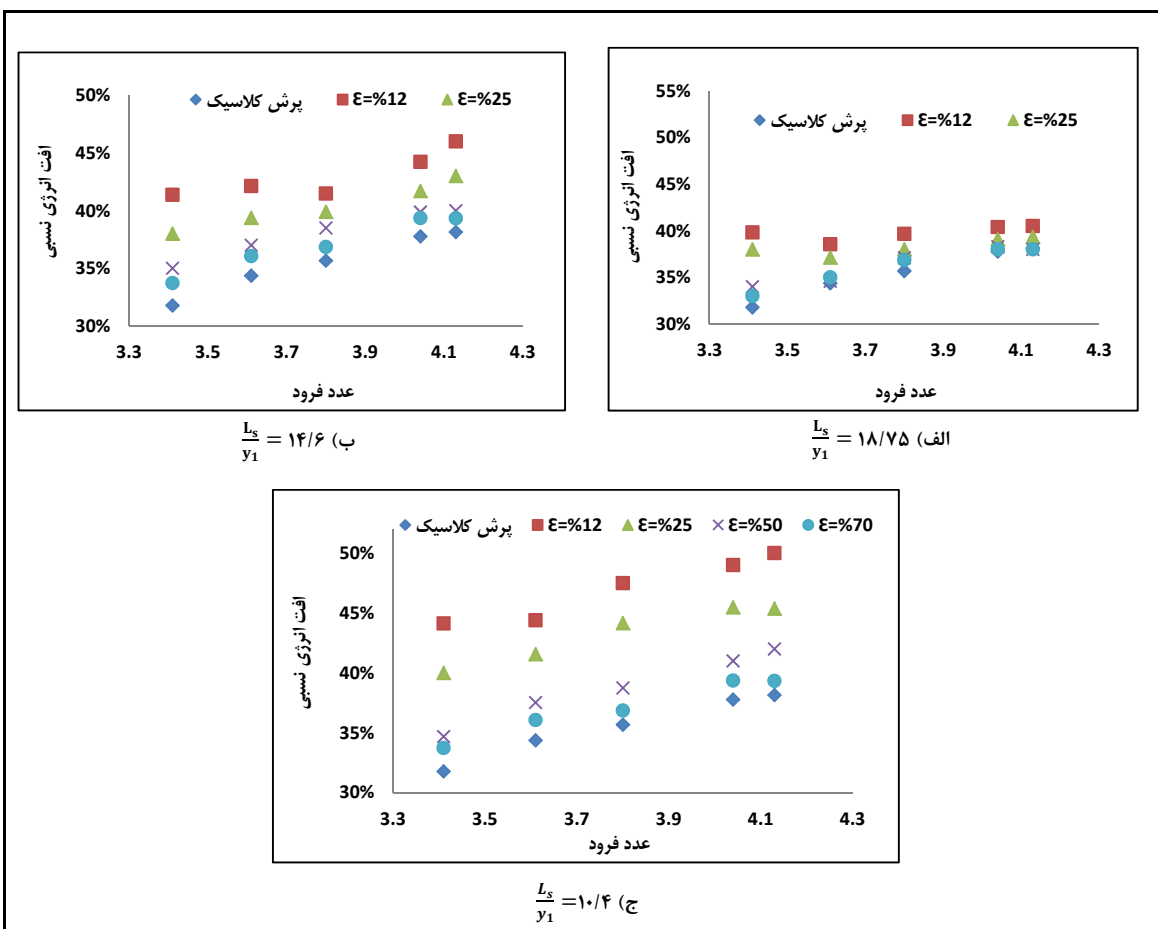


شکل ۹- تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در فاصله‌های نسبی مختلف

### بررسی افت نسبی انرژی

استهلاک انرژی دارد به طوری که در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_1} = 10/4$  افت نسبی انرژی را به طور متوسط ۱۱ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می‌دهد. در مجموع وجود مانع در مقابل جریان باعث جداسازی جت ورودی به حوضچه و استهلاک انرژی بیشتر حاصل از افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی رانشی فشاری (نیروی دراگ) می‌گردد، بنابراین در یک فاصله نسبی ثابت افزایش میزان بازشدگی در آستانه به دلیل کاهش شدت گرداب‌های تشکیل شده در حوضچه آرامش و کم شدن سطح مؤثر آستانه اثری منفی بر اتلاف انرژی دارد.

در این تحقیق افت نسبی انرژی به صورت نسبت تغییرات انرژی کل ( $\Delta E = E_1 - E_2$ ) به انرژی در مقطع اولیه پرش ( $E_1$ ) محاسبه شده است. در شکل ۱۰ تغییرات افت نسبی انرژی در مقابل عدد فرود به ازای بازشدگی‌های مختلف در سه فاصله نسبی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها برمی‌آید، وجود آستانه در حوضچه آرامش باعث افزایش افت نسبی انرژی نسبت به پرش کلاسیک می‌شود و آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی همواره در فاصله‌های نسبی مختلف بیشترین اثر را در



شکل ۱۰- تغییرات افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی به‌ازای عدد فرود در فاصله‌های نسبی مختلف

### نتیجه‌گیری

دارد. با کاهش فاصله نسبی نیز انحنای خطوط جریان عبوری از آستانه شدیدتر خواهد شد به‌طوری که در پایین‌دست آستانه گرداب‌های کفی ایجاد می‌شود که باعث افزایش اغتشاش و تلاطم در حوضچه آرامش می‌شود و این امر با وجود آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_{ides}} = 10/4$  بسیار محسوس است.

- با کاهش فاصله قرارگیری آستانه از پنجه پرش، عمق ثانویه کاهش می‌یابد و آستانه پلکانی با ۱۲ درصد بازشدگی در فاصله نسبی برابر  $\frac{L_s}{y_{ides}} = 10/4$  به‌طور متوسط ۲۳/۲ درصد عمق ثانویه را نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش می‌دهد.

در این تحقیق کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سرریز اوجی استاندارد با استفاده از آستانه پلکانی روزنه‌دار در فاصله‌های نسبی مختلف آزمایش شده است. تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که:

- وجود آستانه پلکانی روزنه‌دار اثری مثبت بر کنترل و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش دارد.

- در اثر عبور جریان از روی آستانه پلکانی، چهار ناحیه گردابی مختلف مشاهده می‌شود که گستردگی این نواحی رابطه‌ای مستقیم با افزایش دبی و کاهش درصد بازشدگی

- بیشترین کاهش در طول پرش هیدرولیکی به‌طور متوسط ۴۰/۸ درصد و مربوط است به آستانه پلکانی با ۲۵ درصد بازشدگی در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_{1des}} = ۱۰/۴$ .  
 - مناسب‌ترین موقعیت قرارگیری آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_{1des}} \geq ۱۴/۶$  یا به عبارتی دیگر  $L_s \geq ۳/۸ (y_2 - y_1)_{design}$  است زیرا در فاصله‌های نسبی کمتر، به دلیل شدید بودن فروریزش آب و افزایش تلاطم، طول حوضچه آرامش به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.  
 - کاهش توأم میزان بازشدگی و فاصله نسبی قرارگیری آستانه، اثری مثبت بر افزایش افت نسبی انرژی دارد و آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی در فاصله نسبی  $\frac{L_s}{y_{1des}} = ۱۰/۴$ ، به‌طور متوسط ۱۱ درصد افت نسبی انرژی را نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می‌دهد.  
 یادآوری می‌شود که در این تحقیق فقط آزمایش‌ها درباره اثر آستانه بر مشخصات پرش هیدرولیکی اجرا شد و پیش‌بینی می‌شود که جت خروجی از روزنه‌ها می‌تواند در آبستگي پایین دست حوضچه آرامش نقش داشته باشد. با این حال ارائه نتیجه‌ای قطعی‌تر مستلزم اجرای آزمایش‌های بیشتر با آستانه‌های با درصد بازشدگی مختلف در فواصل نسبی متفاوت است.

## مراجع

- Abdelazim, M. A. and Yaser, A. M. 2010. Effect of stilling basin shape on the hydraulic characteristics of the flow downstream radial gates. *J. Hydraul. Res.* 49(5): 393-400.
- Ahmadi, A., Honar, T. 2015. Assessing effect of end sill with different forms on hydraulic jump characteristics. *J. Water Soil Sci.* 18(70): 135-145. (in Persian)
- Alikhani, A., Behrozi-Rad, R. and Fathi-Moghadam, M. 2010. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *J. Physic. Sci.* 5, 25-29.
- Beyrami, M. K. and Ilaghi-Hoseiny, M. 2004. Forced hydraulic jump by one and two continuous sill in a horizontal stilling basin. *J. Adv. Mater. Eng.* 1(1): 97-119. (in Persian)
- Fathi-Moghadam, M., Haghightapour, S., Lashkar-Ara, B. and Aghtouman, P. 2011. Reduction of stilling basin with length tall end sill. *J. Hydrol.* 23, 498-502.
- Gigloo, A. M., Ghodsian, M. and Mehraein, M. 2016. Experimental investigation of hydraulic jump in stilling basin with stepped sill. *J. Iranian Water Res.* 16(1): 145-155. (in Persian)
- Hager, W. H. and Li, D. 1992. Sill-controlled energy dissipation. *J. Hydraul. Div.* 30, 165-181.
- Hager, W. H., Bremen, R. and Kawagoshi, N. 1990. Classical hydraulic jump length of roller. *J. Hydraul. Res.* 28(5): 591-608.
- Hamidifar, H. and Omid, M. H. 2016. Hydraulic jump in a Traingular channel and its control using a broad crested end sill. *J. Irrig. Sci. Eng.* 17(66): 43-54. (in Persian)
- Karki, K. S. 1976. Supercritical flow over sills. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 102, 1449-1459.
- Khorshidi, M., Vatankhah, A. and Omid, M. H. 2015. An explicit equation for calculating sill height in trapezoidal stilling basins. *J. Iranian Water Res.* 18, 13-22. (in Persian)
- Narayanan, R. and Schizas, L. S. 1980. Forced fluctuations on sill of hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 106, 589-599.
- Parsamehr, P., Farsadizadeh, D. and Hosseinzadeh-Dalir, A. 2013. Effect of end sill and artificial roughness on the characteristics of hydraulic jump over adverse slopes. *J. Water Soil Res.* 27(3): 581-591. (in Persian)

بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه پلکانی روزنه‌دار بر...

Shukry, A. 1957. The efficiency of floor sill under drowned hydraulic jump. J. Hydraul. Eng. ASCE. 83, 1-18.

Tiwari, H. L. and Arun, G. 2014. Effect of end sill in the performance of stilling basin models. J. American Civil Eng. Architec. 2(2): 60-63.

## **Experimental Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Ogee Spillway Stilling Basin by Perforated Stepped Sill**

**H. Saadi and S. M. Sajadi\***

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.sadjadi@scu.ac.ir  
Received: 18 October 2016, Accepted: 24 June 2017

Stilling basin as an efficiently hydraulic structure to dissipate the kinetic energy of supercritical flow generated at the downstream of a spillway and in some cases to get an economic design use baffle blocks, end sill is used in stilling basin. For control of and reducing the length of hydraulic jump, build a short sill in a stilling basin as a continuous sill can be effective. The present study focuses on the effects of a perforated stepped sill on the characteristics of hydraulic jump in ogee spillway stilling basin was. Experiments were performed for four ratios of opening of holes equal to 12, 25, 50 and 70% at three relative distance equal to 10.4, 14.6 and 18.75. The results showed that using Perforated stepped sill in a stilling basin has a positive effect on control and would fix the position of hydraulic jump in a stilling basin, and that the sill with ratio of opening equal to 25% at relative distance equal to 10.4 showed a maximum effect on reduction of the length of hydraulic jump compared to other sills and length of hydraulic jump reduction of 40.8% on an average in case of classical hydraulic jump. Also the best position for the sill with ratio of opening equal to 12%, based on reduction of the length of hydraulic jump is the relative distance more than 14.6. also decrease the ratio of opening and the relative distance have a positive effect on the relative energy dissipation, so that the sill with ratio of opening equal to 12% at relative distance of equal to 10.4, increased the relative energy dissipation of 11% on an average as compared to the classical hydraulic jump.

**Key Words:** Perforated Stepped Sill, Hydraulic Jump, Energy Dissipation, Stilling Basin