

بررسی اثر هندسه آستانه پلکانی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز اوجی

حسن سعدی^{۱*} و سید محسن سجادی^۲

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید

چمران اهواز، اهواز، ایران.

(۲) استادیار گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: h_saadi89@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۲۲

چکیده

حوضچه های آرامش به عنوان یک سازه هیدرولیکی موثر برای استهلاک انرژی جنبشی جریان فوق بحرانی در پایین دست سرریز قرار می گیرند و در بعضی موارد برای کنترل و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی و دستیابی به یک طرح اقتصادی از اجزایی مانند بلوک های کف، آستانه انتهایی و در حوضچه آرامش استفاده می شود. در این تحقیق تأثیر هندسه آستانه پلکانی در پایین دست سرریز اوجی بر خصوصیات پرش از جمله طول پرش، عمق ثانویه و افت نسبی انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش ها برای سه شکل مختلف آستانه به صورت پلکانی مثبت، منفی و مزدوج در دو فاصله نسبی از پنجه پرش انجام گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که وجود آستانه پلکانی منفی اثر بیشتری در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، کاهش طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی نسبت به سایر گزینه های مورد آزمایش دارد. آستانه پلکانی منفی طول پرش هیدرولیکی را به میزان ۱۴ تا ۳۲ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش می دهد. همچنین کاهش فاصله قرارگیری آستانه اثری مثبت بر افزایش افت نسبی انرژی دارد به طوری که در آستانه پلکانی منفی در فواصل قرارگیری نسبی ۱۸/۷۵ و ۱۴/۶ افت نسبی انرژی به ترتیب ۸ و ۱۱ درصد افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: افت نسبی انرژی، حوضچه آرامش، پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه و طول حوضچه آرامش.

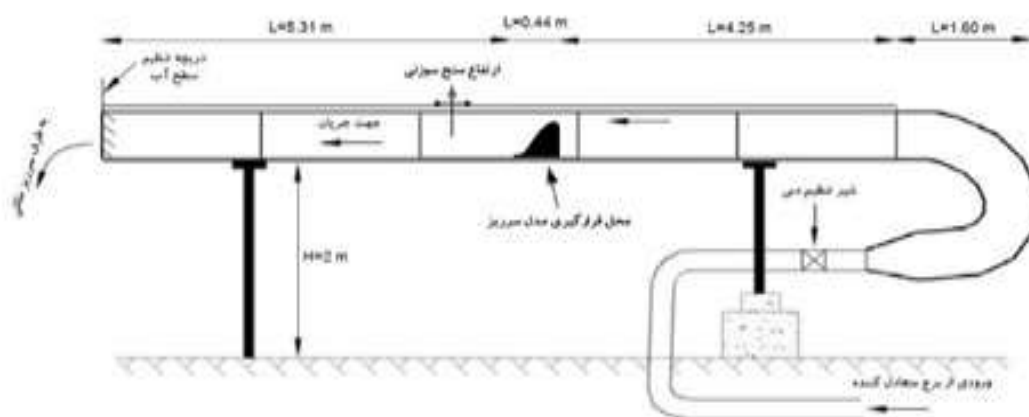
مقدمه

پرش هیدرولیکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که در آن عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌نماید. در طراحی حوضچه‌های آرامش تعیین دقیق موقعیت پرش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در بعضی از مطالعات در راستای تثبیت پرش هیدرولیکی، احداث یک دیواره کوتاه در حوضچه آرامش به صورت یک آستانه پیوسته اثر قابل قبولی در کاهش طول حوضچه آرامش داشته است. نخستین مطالعات در زمینه کنترل پرش هیدرولیکی با یک آستانه ممتد توسط Shukry (۱۹۵۷) انجام گرفت. وی با انجام یکسری آزمایش نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش، فاصله قرارگیری آستانه از پنجه پرش، ارتفاع نسبی آستانه و عمق آب در پایاب در چگونگی شکل‌گیری جریان از روی آستانه موثر می‌باشند. Rand (۱۹۶۵) به بررسی افت انرژی در اثر عبور جریان از روی تک آستانه ممتد پرداخت و نواحی گردابی تشکیل شده را به سه ناحیه طبقه‌بندی کرد: (۱) گرداب‌های سطحی تشکیل شده قبل از آستانه؛ (۲) گرداب‌های تشکیل شده در پشت آستانه؛ (۳) گرداب‌های سطحی کوچک تشکیل شده در ابتدای شروع جریان یکنواخت. وی معتقد بود به دلیل گرداب‌های شدید در ناحیه اول و انحنای خطوط جریان در ناحیه دوم، قسمت اعظم افت انرژی حاصل از وجود آستانه در مسیر پرش در اثر تشکیل گرداب‌های نوع اول و دوم می‌باشد. Schizas و Narayanan (۱۹۸۰) با قرار دادن یک آستانه در مسیر پرش، جریان را بر اساس تشکیل شدن پرش در بالادست یا پایین‌دست آستانه و یا مستغرق شدن پرش بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش فاصله قرارگیری آستانه از ابتدای پرش ضریب دراگ وارد بر آستانه کاهش می‌یابد. Hager و Li (۱۹۹۲) برای نسبت اعماق مزدوج در پرش‌های تحت تأثیر آستانه رابطه‌ای را ارائه دادند که در آن اثر آستانه به صورت پارامتری که خود متأثر از محل قرارگیری آبپایه و نوع پرش بود، از نسبت اعماق مزدوج در حالت کلاسیک کاسته می‌شد. Ohtsu (۱۹۹۶) با به‌کارگیری ارتفاع‌های مختلف آستانه انتهایی و استفاده از رابطه اندازه حرکت و در نظر گرفتن نیروهای وارد بر آستانه، روابطی را برای حد سرریزی شدن امواج غلتان ارائه دادند. بیرامی و ایلاقی (۱۳۸۴) با انجام یکسری آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش ارتفاع آستانه پیوسته و کاهش فاصله قرارگیری فاصله آن از پنجه پرش، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. علاوه بر این آستانه با ارتفاع کم، 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 تقریباً با طول پرش در شرایط بدون آستانه برابر است. Alikhani و همکاران (۲۰۱۰) نیز به بررسی و کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از آستانه انتهایی پیوسته پرداختند. آزمایش‌های ایشان برای عدد فرود ۴ تا ۱۲ و ارتفاع نسبی ۲ تا ۸ انجام گردید. نتایج ایشان نشان داد که آستانه انتهایی پیوسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد دارد.

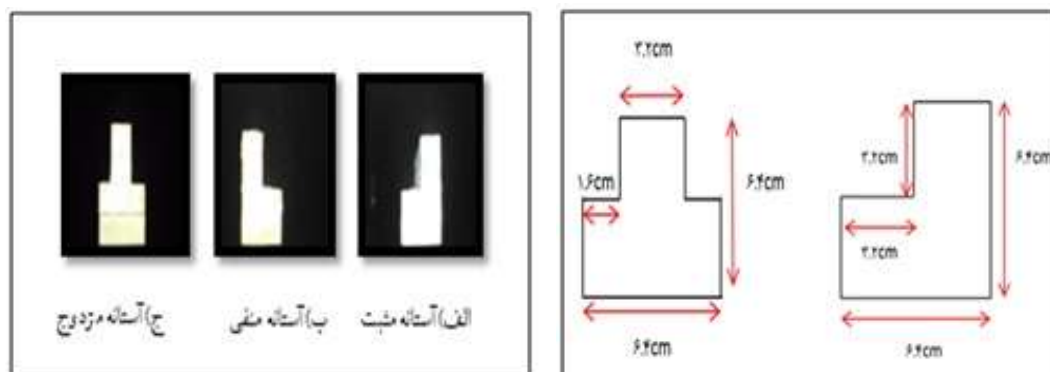
همچنین معیارهایی برای طراحی حوضچه آرامش با آستانه انتهایی ارائه نمودند. خورشیدی و همکاران (۱۳۸۵) اثر آستانه انتهایی بر عملکرد پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش دوزنقه‌ای شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از تغییرات شدید در وضعیت پرش پس از نصب آستانه انتهایی در حوضچه آرامش می‌باشد که موجب وقوع پرش هیدرولیکی در یک موقعیت معین می‌گردد. پارسامهر و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی اثر آستانه و زبری مصنوعی بر خصوصیات پرش روی شیب معکوس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که به به کارگیری آستانه و زبری در حوضچه آرامش باعث تثبیت پرش روی شیب معکوس و کاهش عمق مزدوج و بهبود خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌شود. احمدی و همکاران (۱۳۹۳) اثر اشکال مختلف آستانه بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از سه شکل مختلف آستانه به صورت مستطیل، مربعی و پلکانی استفاده شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که وجود آستانه و افزایش ارتفاع آن اثر مثبت بر کاهش طول پرش و افزایش افت انرژی نسبی دارد و آستانه انتهایی با مقطع مربعی به دلیل ممانعت بیشتر در مقابل جریان اثر بیشتری در کاهش اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی، افزایش افت نسبی انرژی نسبت به آستانه کم عرض دارد. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از تغییرات شدید در وضعیت پرش پس از نصب آستانه انتهایی در حوضچه و وقوع پرش هیدرولیکی در یک موقعیت معین می‌گردد. گیگلو و قدسیان (۱۳۹۵) تأثیر آستانه انتهایی پلکانی را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که در یک ارتفاع ثابت افزایش تعداد پله‌های آستانه اثر منفی بر ماندگاری پرش دارد، همچنین افزایش ارتفاع و کاهش فاصله قرارگیری آستانه انتهایی اثر مثبت بر ماندگاری پرش دارد. سعدی و سجادی (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر ارتفاع و موقعیت قرارگیری آستانه پلکانی بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌های ایشان نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آستانه در یک فاصله نسبی ثابت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهدات تجربی حاکی از ایجاد گردابه‌هایی با محور افقی روی پلکان‌های آستانه می‌باشد که می‌توان قسمتی از استهلاک انرژی را به آن‌ها نسبت داد. در مجموع از مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که وجود آستانه در حوضچه آرامش اثری مثبت بر کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی و افزایش افت نسبی انرژی دارد و در راستای رسیدن به ارتفاع مناسب آستانه و موقعیت قرارگیری آن نسبت به پنجه پرش، تحقیقات زیادی به‌طور گسترده صورت گرفته است، اما نسبت به تأثیر هندسه آستانه مطالعات کمتری انجام شده، لذا در این پژوهش آزمایشگاهی سعی بر این است که با تغییر در هندسه آستانه پلکانی به سه شکل آستانه پلکانی مثبت، آستانه پلکانی منفی و آستانه پلکانی مزدوج، خصوصیات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر، عمق ۵۰ سانتی‌متر و شیب صفر انجام گردید. (شکل ۱). در این تحقیق برای ایجاد جریان فوق بحرانی یک سرریز اوجی به روش استاندارد USBR با دبی طرح ۳۰ لیتر بر ثانیه طراحی و با ورق گالوانیزه ساخته و ارتفاع آن ۲۹/۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای حذف اثرات اغتشاش جریان ورودی، سرریز در فاصله ۴ متری از ابتدای فلوم نصب گردید. مقادیر پارامترهای طراحی سرریز در جدول ۱ آورده شده است. در این تحقیق از سه شکل مختلف آستانه پلکانی دو پله‌ای که ارتفاع و عرض آن‌ها با توجه به نتایج تحقیقات سعدی و سجادی (۱۳۹۵) برابر ۶/۴ سانتی‌متر که معادل ۱/۳۵ برابر عمق اولیه پرش هیدرولیکی کلاسیک دبی طراحی در نظر گرفته شد (شکل ۲).



شکل ۱: فلوم ۲۵ سانتی‌متری و محل قرارگیری سرریز اوجی



شکل ۲: مشخصات هندسی و طرح آستانه‌های پلکانی مورد آزمایش

جدول ۱: مشخصات هندسی سرریز اوجی

پارامتر	Q(L/S)	P(cm)	L(cm)	H _a (cm)	Y ₁ (cm)	Fr ₁	Y ₂ (cm)
مقدار	۳۰	۲۳/۹	۲۵	۱۳/۷	۴/۸	۳/۷۶	۲۳/۲

موقعیت قرارگیری آستانه با توجه به طول غلطاب محاسباتی از رابطه ۱ در میانه و انتهای طول غلطاب یعنی در فاصله ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متری از انتهای سرریز تعیین گردید (Hager, 1990):

$$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) \quad \text{رابطه ۱:}$$

موقعیت پرش هیدرولیکی در تمام 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 شده و سپس برای مقادیر دبی مشخص، پارامترهای پرش هیدرولیکی نظیر عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش اندازه‌گیری شد. دبی‌های مورد آزمایش در محدوده دبی ۱۸-۴۴ لیتر بر ثانیه بودند و به‌وسیله سرریز مثلثی ۵۳ درجه در انتهای فلوم که منحنی دبی اشل آن تعیین شده بود اندازه‌گیری گردید. برای تعیین اعماق مزدوج پرش، از یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد و فاصله افقی از شروع پرش تا نقطه‌ای بر روی سطح آب که در آن حباب‌های ایجاد شده تقریباً تمام می‌شوند به عنوان طول پرش هیدرولیکی در نظر گرفته شد. در مجموع ۳۵ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۳/۴۱ تا ۴/۱۳ در دو فاصله نسبی با سه شکل مختلف آستانه انجام شد. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها تعداد پلکان‌های آستانه ثابت و برابر ۲ در نظر گرفته شد، زیرا با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده توسط گیگلو و قدسیان (۱۳۹۵) افزایش تعداد پلکان در یک ارتفاع نسبی ثابت اثری منفی بر ماندگاری پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش دارد. مشخصات پرش هیدرولیکی کنترل شده به‌وسیله آستانه پلکانی، تابعی از پارامترهای زیر می‌باشد:

$$\emptyset = f(v_1, y_1, y_2, L_s, L_j, g, \mu, \rho, n) \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این رابطه: y_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، g شتاب ثقل، μ لزجت کینماتیکی آب، ρ جرم مخصوص آب و n تعداد پله می‌باشند. آنالیز ابعادی به روش باکینگهام نشان می‌دهد که خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌تواند بر حسب پارامترهای بی بعد زیر بیان شوند.

$$\emptyset = f(Fr_1, Re, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, n) \quad \text{رابطه ۳:}$$

با توجه به اینکه مقدار عدد رینولدز در این تحقیق از ۵۸۹۸۰ تا ۱۱۴۴۹۸ قرار داشت از اثر نیروی لزجت صرف نظر شد. همچنین تعداد پله های آستانه ثابت در نظر گرفته شد لذا تعداد پارامترهای بی بعد موثر به ۴ عدد کاهش یافت.

$$\emptyset = f(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}) \quad \text{رابطه ۴:}$$

با استفاده از رابطه ۴ می توان عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش را به صورت رابطه های ۵ و ۶ بیان کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{L_s}{y_1}) \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$\frac{L_j}{y_1} = f(Fr_1, \frac{L_s}{y_1}) \quad \text{رابطه ۶:}$$

از رابطه های ۵ و ۶ نتیجه می شود که عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی به عدد فرود اولیه و فاصله نسبی آستانه از ابتدای پرش بستگی دارد. در جدول ۲ محدوده پارامترهای بدون بعد ارائه شده است.

جدول ۲: محدوده پارامترهای بی بعد

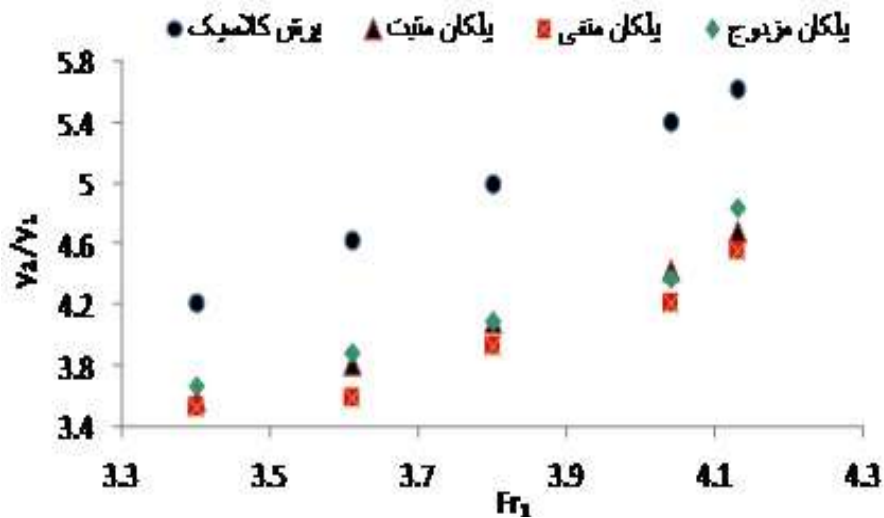
$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{L_s}{y_1}$	Re	Fr ₁	پارامتر بدون بعد
۴/۳۷۵-۵/۶۲۵	۱۴/۶-۱۸/۷۵	۵۸۹۸۰-۱۱۴۴۹۸	۳/۴۱-۴/۱۳	محدوده تغییرات

نتایج و بحث

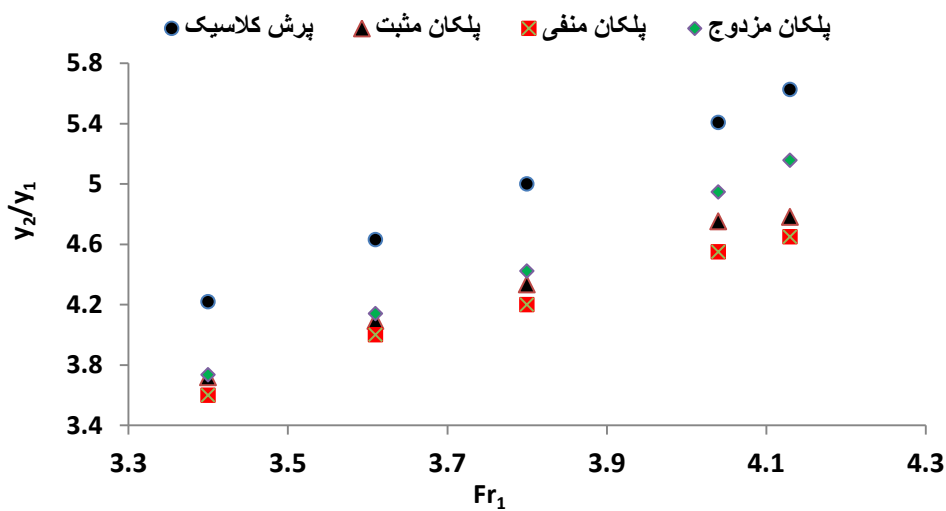
بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

یکی از پارامترهای مهم در محاسبات مربوط به پرش هیدرولیکی نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش می باشد و کاهش نسبت اعماق مزدوج پرش می تواند به عنوان یک اصل در طراحی حوضچه آرامش مورد استفاده قرار گیرد. شکل های ۳ و ۴ نسبت اعماق مزدوج پرش در مقابل عدد فرود را برای فواصل نسبی $(\frac{L_s}{y_1})$ ۱۸/۷۵ و ۱۴/۶ نشان می دهد، همان گونه که از شکل های ۳ و ۴ برمی آید، نصب آستانه با هر مقطع هندسی اثر مثبت بر کاهش اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی نسبت به حالت پرش کلاسیک دارد و اثر کاهندگی آستانه بر عمق ثانویه پرش در فاصله کمتر (نزدیک به ابتدای پرش) بیشتر می

باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ تغییر در شکل هندسی آستانه تأثیر چندانی در کاهش عمق پایاب ندارد و اثر کاهندگی تمام آستانه‌ها تقریباً یکسان و نزدیک به هم می‌باشد، اما در فاصله $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ آستانه پلکانی منفی اثر بیشتری در کاهش اعماق ثانویه نسبت به دو آستانه دیگر دارد و متوسط کاهش عمق ثانویه در این فاصله برای آستانه با پلکان نزولی ۲۱/۵ درصد است.



شکل ۳: تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$



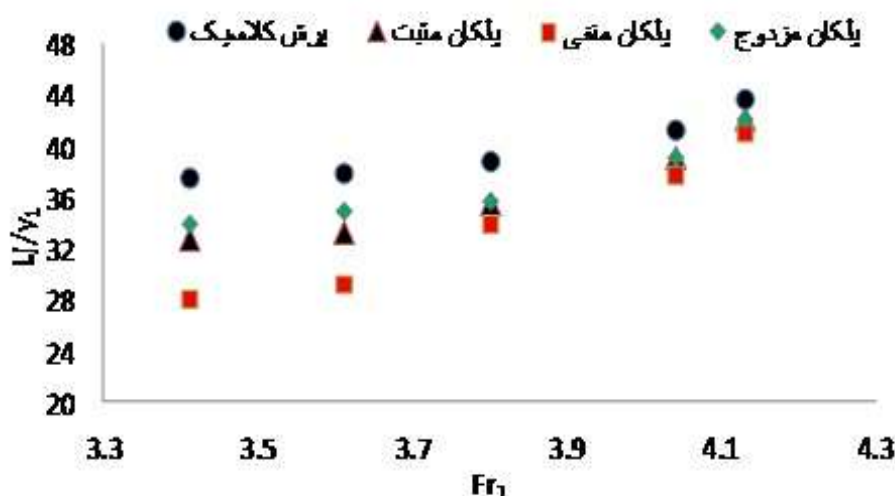
شکل ۴: تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در فاصله های نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$

بررسی طول پرش هیدرولیکی

در این تحقیق با انجام آزمایش‌های متعدد، طول پرش برای حالت‌های مختلف مورد مطالعه و اندازه‌گیری قرار گرفت. برای مقایسه طول پرش هیدرولیکی در حوضچه با بکارگیری آستانه، مقادیر طول پرش توسط عمق اولیه پرش بی‌بعد شدند. همچنین جهت اطمینان از اندازه‌گیری صحیح طول پرش هیدرولیکی کلاسیک مقادیر به‌دست آمده با رابطه ۷ (۱۹۹۲) مقایسه شدند (Hager and Li, 1992):

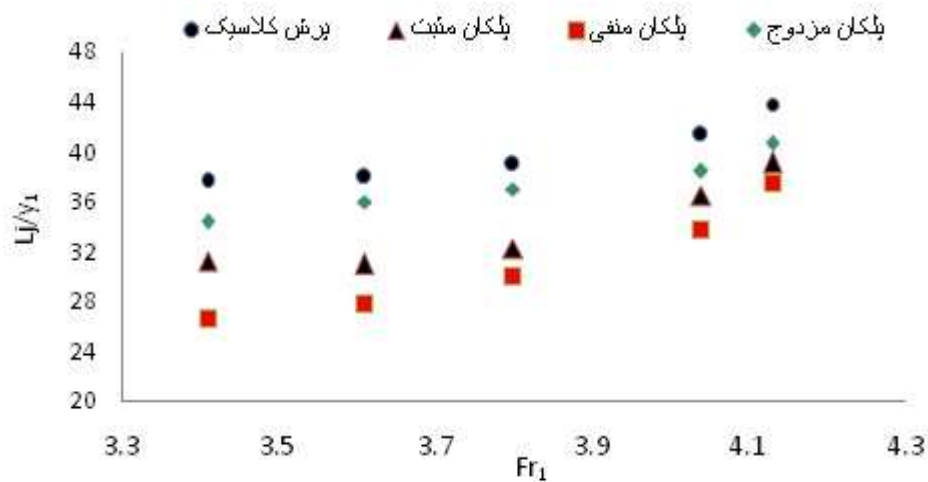
$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad \text{رابطه ۷:}$$

با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان گفت که آستانه پلکانی منفی همواره بیشترین اثر را در کاهش طول پرش هیدرولیکی از خود نشان داده است، زیرا زمانی که قسمت قائم آستانه در مقابل جریان ورودی قرار گیرد، ممانعت آن نسبت به حالت پلکانی بیشتر می‌باشد، زیرا زمانی که آستانه پلکانی مثبت یا مزدوج در حوضچه قرار گیرند گرابه‌های کوچکی روی پلکان‌های آستانه به‌صورت ساعتگرد شکل می‌گیرند و باعث می‌شود که قسمت پلکانی آستانه مانند یک سطح شیب‌دار عمل کند که این امر سبب می‌شود که جت ورودی به حوضچه به سمت بالا هدایت شده و با حالت فرو ریزش شدیدی به کف حوضچه (بعد از آستانه) برخورد کند که این امر تلاطم و اغتشاش در حوضچه آرامش را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. بنابراین برای مهار و کنترل پرش هیدرولیکی تشکیل شده به طول حوضچه بیشتری است. همچنین با کاهش فاصله نسبی آستانه طول نسبی پرش کاهش می‌یابد به‌طوری که در آستانه پلکانی منفی در فواصل نسبی ۱۸/۷۵ و $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ و $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ کاهش طول پرش نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک به ترتیب برابر ۲۰٪ و ۳۲٪ می‌باشد.

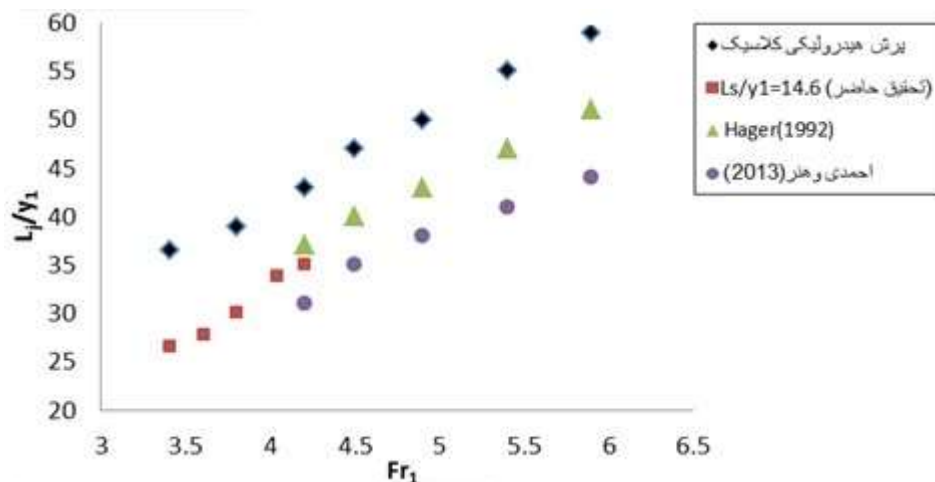


شکل ۵: تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در فاصله نسبی ۱۸/۷۵ $\frac{L_s}{y_1}$

همچنین به منظور ارزیابی و کنترل نتایج اثر آستانه بر خصوصیات پرش، نتایج طول پرش هیدرولیکی مطالعه حاضر با محققانی که در این زمینه کار کرده اند مقایسه و در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با مطالعات Hager (۱۹۹۲) اثر بهتری در کاهش طول پرش هیدرولیکی داشته است. لازم به ذکر است که تفاوت ایجاد شده در نمودارها به دلیل فاصله قرارگیری و شکل هندسی آستانه می باشد و برای ارائه یک نتیجه کلی انجام آزمایش ها در محدوده وسیعی از عدد فرود و تغییر در ابعاد هندسی آستانه لازم می باشد.



شکل ۶: تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در فاصله نسبی $L_s/y_1 = 14/6$

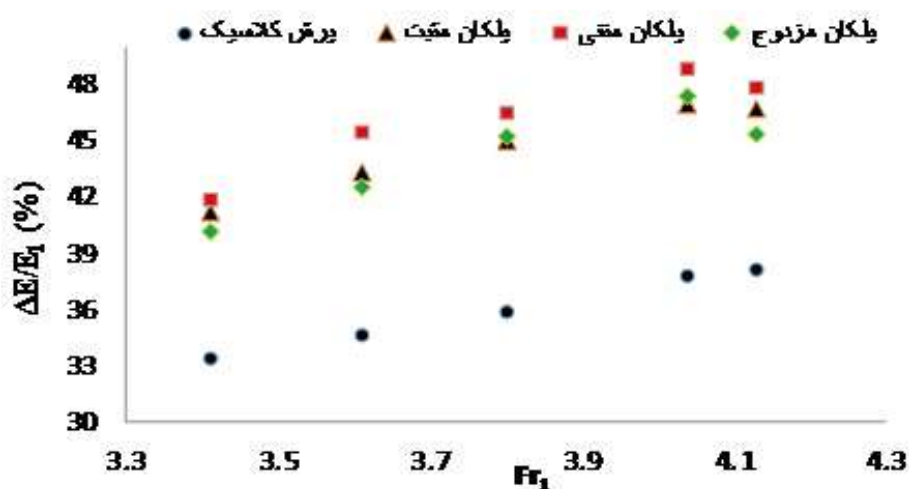


شکل ۷. مقایسه تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی پژوهش حاضر با سایر پژوهشگران

بررسی افت نسبی انرژی

در این تحقیق افت نسبی انرژی در حالت با و بدون آستانه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. افت انرژی با بکارگیری رابطه برنولی بین مقطع فوق بحرانی و زیر بحرانی محاسبه گردید. همچنین افت نسبی انرژی به صورت نسبت تغییرات

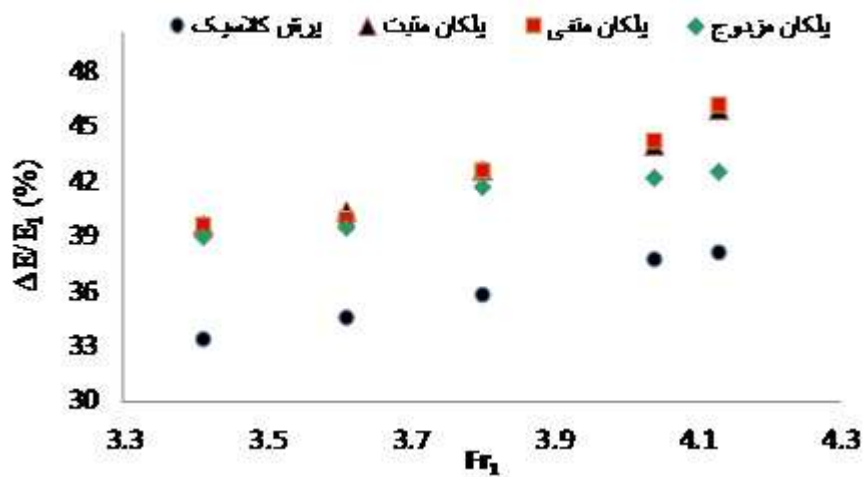
انرژی کل در حجم کنترل ($\Delta E = E_1 - E_2$) به انرژی در مقطع اولیه پرش (E_1) در نظر گرفته شد. شکل‌های ۸ و ۹ افت نسبی انرژی به ازای اعداد فرود در دو فاصله نسبی مورد آزمایش را نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که هر سه شکل آستانه مورد آزمایش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش افت نسبی و استهلاک انرژی نسبت به حالت پرش کلاسیک داشته‌اند. اما تغییر در هندسه آستانه در فاصله $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ تأثیر ناچیزی بر افزایش افت نسبی انرژی دارد. ضمناً با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در فاصله $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ آستانه پلکانی منفی تأثیر بیشتری در افزایش افت نسبی انرژی نسبت به دو شکل دیگر دارد، زیرا در این آستانه، سطح پلکانی در پایین دست و سطح قائم در مقابل جریان می‌باشد که در این صورت آستانه ممانعت بیشتری در مقابل جریان ایجاد می‌کند. همچنین مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که کاهش فاصله سبب افزایش استهلاک انرژی می‌شود به طوری که مطابق جدول ۳ در فاصله $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ میزان افزایش افت انرژی نسبی به طور متوسط ۸ درصد و در فاصله $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ به طور متوسط ۱۱ درصد می‌باشد. در مجموع وجود آستانه در حوضچه آرامش باعث کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و افزایش افت انرژی می‌شود که دلیل این امر وجود نیروی دراگ^۱ آستانه پلکانی می‌باشد.



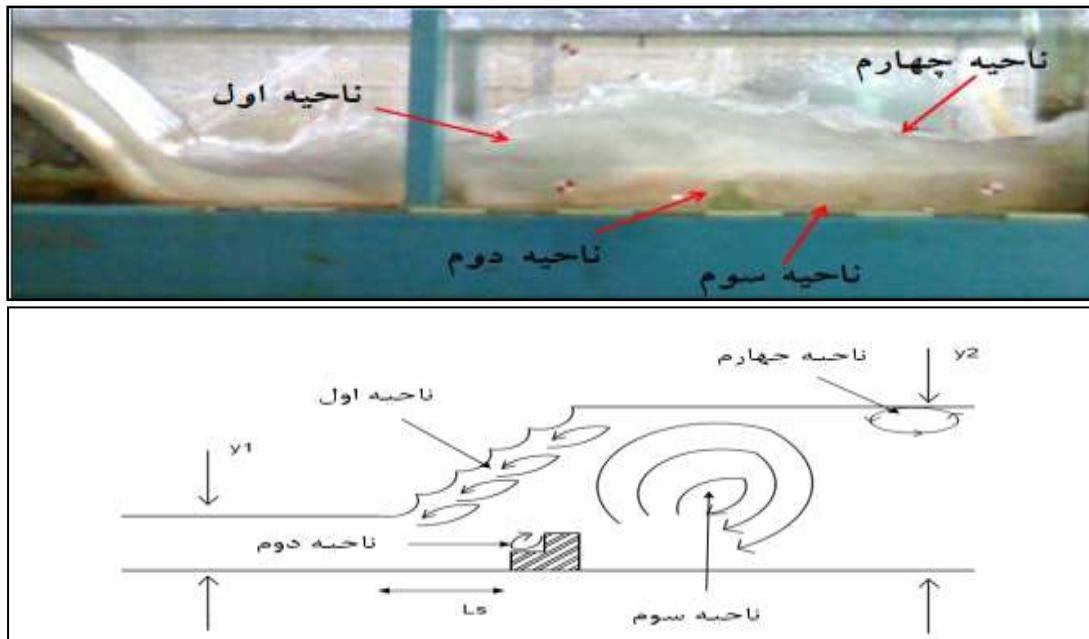
شکل ۸. تغییرات افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی به ازای عدد فرود در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$

جدول ۳: درصد افزایش افت نسبی انرژی برای آستانه‌های مورد آزمایش

نوع آستانه	آستانه پلکانی مثبت	آستانه پلکانی منفی	آستانه پلکانی مزدوج
$\frac{L_s}{y_1} = 18/75$	۷/۷۵	۸	۶
$\frac{L_s}{y_1} = 14/6$	۹/۱۵	۱۱	۹/۶۳



شکل ۹. تغییرات افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی به ازای عدد فرود در فاصله نسبی $L_s/y_1 = 14/6$



شکل ۱۰: انواع گرداب تشکیل شده در حوضچه آرامش ($L_s/y_1 = 14/6$ و $Q = 35/53 \frac{L}{S}$)

- بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده توسط Rand (۱۹۶۵) و گیگلو و قدسیان (۱۳۹۵) در اثر عبور جریان از روی آستانه پلکانی چهار ناحیه گردابی مختلف مطابق شکل ۱۰ مشاهده گردید که عبارتند از:
- ۱- گرداب سطحی تشکیل شده قبل از آستانه (غلطاب پرش هیدرولیکی تشکیل شده)
 - ۲- گرداب‌های کوچک تشکیل شده روی پله‌های آستانه (گرداب‌های عمودی که به صورت ساعتگرد روی پله‌های آستانه در اثر عبور جریان شکل گرفت)
 - ۳- گرداب کف تشکیل شده در پشت آستانه (گرداب عمودی نزدیک به کف حوضچه آرامش در پایین دست آستانه)

۴- گردابه‌های سطحی کوچک تشکیل شده در انتهای پرش هیدرولیکی (در ابتدای شروع جریان یکنواخت و بعد از آستانه).

شکل‌گیری این نواحی مختلف در تحقیق حاضر نیز مشاهده گردید به طوری که در هنگام تشکیل پرش هیدرولیکی در یک فاصله ثابت با افزایش دبی گردابه‌های ناحیه اول به آستانه نزدیکتر و به طور همزمان گردابه‌های نواحی سوم و چهارم گستردگی بیشتری پیدا خواهند کرد. با توجه به اینکه هدف اصلی تحقیق بررسی تأثیر هندسه آستانه بر خصوصیات پرش و الگوی جریان عبوری از آستانه می‌باشد، ملاحظه می‌گردد که پلکان در پایین دست آستانه پلکانی نزولی به عنوان نوعی زبری مصنوعی تلقی می‌شود که این امر می‌تواند اثر مثبت بر کاهش شدت گردابه‌های نوع سوم و چهارم داشته باشد. همچنین مشاهده شد که با عبور جریان از روی آستانه گردابه‌های کوچکی روی پله‌ها تشکیل می‌شود که می‌توان قسمت اندکی از افت انرژی را به آن‌ها نسبت داد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سرریز اوجی با استفاده از آستانه پلکانی و تغییر در شکل هندسی و موقعیت قرارگیری آن مورد آزمایش قرار گرفته است. در یک دیدگاه کلی می‌توان گفت که کاهش فاصله قرارگیری آستانه از پنجه پرش همواره اثری مثبت بر خصوصیات پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، عمق ثانویه و افزایش افت نسبی انرژی دارد. در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ تمام آستانه‌ها تقریباً اثر یکسانی در کاهش عمق ثانویه پرش دارند، اما در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ آستانه پلکانی منفی اثر بیشتری در کاهش عمق ثانویه پرش نسبت به دو آستانه دیگر (حدود ۲۲/۴ درصد) از خود نشان می‌دهد. بیشترین کاهش در طول پرش هیدرولیکی مربوط به آستانه پلکانی منفی در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ (۱۴ درصد تا ۳۲ درصد) می‌باشد. با کاهش فاصله افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد به طوری که در آستانه پلکانی منفی با فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 18/75$ ماکزیمم افزایش افت انرژی نسبی ۸ درصد و در $\frac{L_s}{y_1} = 14/6$ این مقدار به ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. در اثر عبور جریان از روی آستانه پلکانی چهار ناحیه گردابی مختلف مشاهده شد که گستردگی این نواحی رابطه مستقیمی با افزایش و کاهش عدد فرود و میزان جریان عبوری از روی سرریز دارد. همچنین با کاهش فاصله نسبی، انحنای خطوط جریان عبوری از آستانه شدیدتر خواهد شد به طوری که گردابه‌هایی در پایین دست آستانه بصورت گردابه‌های کف ایجاد می‌شود که باعث افزایش اغتشاش و تلاطم در حوضچه آرامش شده و این امر در تمامی آستانه‌ها در فاصله نسبی $\frac{L_s}{y_1} = 10/4$ بسیار محسوس می‌باشد.

منابع

- احمدی، ا. و هنر، ت. ۱۳۹۳. ارزیابی تأثیر آبپایه انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی. مجله علوم آب و خاک. ۷۰: ۱۴۵-۱۳۵.
- بیرامی، م.ک. و ایلاقی، م. ۱۳۸۳. کنترل پرش هیدرولیکی بایک و دو دیواره ممتد درحوضچه آرامش افقی. مجله مواد پیشرفته در مهندسی. ۱: ۱۱۹-۹۷.
- پارسا مهر، پ.، حسین زاده دلیر، ع.، فرسادی زاده، د. و عباسپور ا. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر آبپایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳: ۹۶-۸۹.
- خورشیدی، م.، امید، م.، ح. و کوچک زاده، ص. ۱۳۸۵. اثر آبپایه‌های انتهایی بر عملکرد جهش هیدرولیکی در مقطع دوزنقه‌ای. هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۸-۲۰ اردیبهشت، تهران، ایران.
- سعدی، ح. و سجادی، س.م. ۱۳۹۵. کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش افقی با آستانه پلکانی. اولین کنفرانس بین المللی آب، محیط زیست و توسعه پایدار، دانشگاه محقق اردبیلی. ۶-۸ مهر، اردبیل، ایران.
- گیگلو، ا. و قدسیان، م. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی درحوضچه آرامش با آستانه پلکانی. مجله عمران مدرس، ۱: ۱۵۵-۱۴۵.
- 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): 025-029.
- Hager, W. H. and Li, D. 1992.** Sill-Controlled energy dissipater. Journal of Hydraulic Division, 4 (30): 165-181.
- Narayanan, R. and Schizas, L.S. 1980.** Forced fluctuations on sill of hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering, 4 (106): 589-599.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Hashiba. 1996.** Incipient Jump Condition for flows Over a vertical Sill, Journal of of Hydraulic Division, Journal of Hydraulic Engineering, 122(8): 550-565.
- Rand, W. 1965.** Flow Over a Vertical Sill in an Open Channel. Journal of Hydraulic Engineering, 4 (91): 97-121.
- Shukry, A. 1957.** The Efficiency of Floor sill Under Droened Hydraulic jump . Journal of Hydraulic Engineering, 3 (83): 1-18.

The effect of stepped sill geometry on hydraulic jump characteristics at downstream of Ogee spillway

H. Saadi^{*1} and S. M. Sajjadi²

1) M.Sc. Graduate of Water and Hydraulic Structures Engineering Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2) Assistant Professor, Water Structures Department, faculty of Water Sciences Engineering Shahid Chamran University of Ahvaz.

* Corresponding author: h_saadi89@yahoo.com

Received Date: 2018.04.11

Accepted Date: 2018.06.18

Abstract

Stilling basin as an efficiently hydraulic structure to dissipation the kinetic energy of supercritical flow is located at the downstream of a spillway. In some cases to control and fix the position of hydraulic jump and to get an economic design baffle blocks with end sill are used in stilling basin. So to control and reduce the length of hydraulic jump, build a short sill in a stilling basin as a continuous sill can be effective. Extensive experiments were conducted for three different geometries of stepped sill at two positions from the hydraulic jump toe. The results show that the stepped sill with negative step had a significant effect on reducing tail water and length of hydraulic jump and increasing relative energy dissipation. Negative step reduced length of hydraulic jump in range of 14 to 32 percent. Also changes in the geometry of sill has an effect on the flow pattern through the sill as the negative stepped and duplex stepped sill could reduce the intensity of the vortexes that formed in the downstream of the sill and the risk of erosion downstream of stilling basin. also decrease the distance location of sill had a positive effect on the relative energy dissipation, so that the negative stepped sill in relative distances 18.75 and 14.6, relative energy dissipation increase respectively 8 and 11%.

Keywords: Hydraulic jump, Length of hydraulic jump, Relative energy dissipation, Secondary depth, Stepped sill and Stilling basin.