

## بررسی آزمایشگاهی اثر تخلیه تحتانی سد انحرافی روی مشخصات پرش هیدرولیکی

محمد توزنده جانی\* و سید محمود کاشفی پور<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۲)

### چکیده

یکی از روش‌های معمول استهلاک انرژی در پایین دست سد، بهره جستن از پدیده پرش هیدرولیکی می‌باشد. پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌یابد و با استهلاک انرژی قابل توجهی همراه است. در این مطالعه به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی و نیز کاهش عمق مزدوج پرش از ترکیب دو جت آبی که ترکیبی از جریان عبوری از روی سرریز اوجی با استاندارد USBR و جریان خروجی از شکاف در بدنه سد است، استفاده شد. در این آزمایش جت آب خروجی از شکاف ایجاد شده در بدنه سد با سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق با جریان عبوری از روی سد در نسبت‌های متفاوتی از دبی که در هر زاویه برخورد، شش نسبت دبی از شکاف عبور داده می‌شد، تلاقی داده شد و تأثیر هر یک بر روی میزان کاهش طول و عمق مزدوج پرش بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تلاقی جت‌های آب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق بیشترین تأثیر را در کاهش طول و عمق مزدوج پرش دارد و هنگامی که ۲۶ درصد دبی از شکاف عبور می‌کند، طول پرش نسبت به حالت کلاسیک در حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. این سازه هم‌چنین می‌تواند باعث تخلیه رسوبات پشت سرریز و نیز عدم تجمع رسوبات در بالادست آبگیر و افزایش ضریب دبی سرریز شود.

واژه‌های کلیدی: کاهش طول پرش هیدرولیکی، جریان ترکیبی، سرریز اوجی، تخلیه رسوبات، ضریب دبی سرریز

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: toozandeh.m.986@gmail.com

## مقدمه

به منظور جلوگیری از خسارات ناشی از انرژی آب در سرعت‌های فوق بحرانی و نیز به منظور از بین بردن انرژی جنبشی اضافی موجود در چنین آبی، عموماً لازم است از سازه‌های خاصی به نام انرژی گیرنده که در پایین دست جریان ساخته می‌شوند استفاده نمود. این گونه سازه‌ها علاوه بر از بین بردن انرژی آب و سیله‌ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی و به وجود آوردن شرایط جهت وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص نیز به شمار می‌روند. به عبارت دیگر موقعی که یک پرش هیدرولیکی در روی یک سطح صاف افقی اتفاق می‌افتد، کوچک‌ترین تغییری در اعماق جریان بالادست و پایین دست آن می‌تواند باعث تغییر مکان پرش به یکی از دو سو گشته و چنانچه خواسته شود تا پرش در محلی خاص صورت پذیرد و حساسیت بیش از حد آن در مقابل نوسانات عمق جریان محدود گردد، می‌بایست از سازه‌هایی که به کنترل‌کننده پرش هیدرولیکی مشهورند استفاده شود (۶).

از جمله این سازه‌ها می‌توان حوضچه‌های آرامش از نوع جهش آبی را نام برد که سازه‌هایی هیدرولیکی هستند، با کف غیر قابل فرسایش و طول کوتاه که در پایین دست سازه‌های کنترل احداث می‌شوند. در اثر پدیده جهش در حوضچه آرامش، مقدار زیادی انرژی جنبشی مستهلک، و در نتیجه جریان خروجی از حوضچه آرامش نسبتاً آرام است. مهم‌ترین مسأله در طراحی حوضچه آرامش این است، که جهش در درون حوضچه اتفاق افتد، جهش پایدار باشد و طول حوضچه نیز تا آنجا که ممکن است کوتاه باشد (۷). ابعاد حوضچه تابعی از طول و عمق ثانویه پرش می‌باشد لذا به منظور کاهش ابعاد حوضچه آرامش و هزینه‌های زیادی که این سازه بر پروژه تحمیل می‌کند، بایستی طول پرش هیدرولیکی و نیز عمق ثانویه پرش را کاهش داد. تاکنون تحقیقات متفاوتی به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی صورت گرفته است و روش‌های گوناگونی برای بهبود و افزایش کارایی پرش از سوی محققین مختلف پیشنهاد شده است که می‌توان به استفاده از بلوک‌های

کف، آستانه انتهایی، پله‌های مثبت یا منفی، شیب‌دار کردن کف و افزایش عرض مقطع اشاره کرد. در حوضچه‌های آرامش به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی از بلوک‌ها و ایجاد موانع در برابر جریان استفاده می‌کنند که وجود مانع در مقابل جریان باعث جداشدگی خطوط جریان و استهلاک بیشتر انرژی و افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی رانش (Drag force) می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند باعث کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی گردد بدون آن‌که کاویتاسیونی رخ دهد افزایش زبری‌های کف می‌باشد (۹). در ادامه برخی از تحقیقاتی که توسط محققین مختلف در این زمینه صورت گرفته است بیان می‌شود.

پوزی و هسینگ (۱۵)، تأثیر شیب جانبی را بر طول جهش در حوضچه دوزنقه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی که بر روی یک مدل آزمایشگاهی با شیب‌های جانبی ۱/۵ تا ۲/۱ (عمودی: افقی) صورت گرفت، مشخص شد که کاهش شیب جانبی باعث افزایش طول جهش نسبت به جهش کلاسیک می‌شود. ماسی (۱۴)، رابطه تئوری برای تعیین نسبت عمق ثانویه در مقطع دوزنقه‌ای ارائه کرد. او هم‌چنین نتایج کار خود را به صورت نموداری که با داشتن مقادیر دبی، عمق اولیه، عرض کف و شیب جانبی، می‌توان نسبت عمق ثانویه را برآورد کرد، ارائه نمود. امید (۱)، خصوصیات و عملکرد جهش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش دوزنقه‌ای را به صورت تئوری و روابط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، روابط تئوری برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه شد و با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌هایی که روی یک مدل آزمایشگاهی با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی مختلف و اعداد فرود ۲ تا ۹ انجام شد، پارامترهای مهم جهش، از جمله طول آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش شیب جانبی باعث افزایش افت نسبی انرژی، کاهش نسبت عمق ثانویه و افزایش طول نسبی جهش در مقایسه با جهش کلاسیک می‌شود. کلوسیوس و احمد (۱۳)،

و هم‌زمان عمل تخلیه رسوب و هم‌چنین کاهش بار آبی روی تاج سرریز را موجب می‌شود. در این مطالعه، تأثیر برخورد جریان خروجی از روزنه با جت آب ریزشی از روی دیواره سرریز و تغییر محل برخورد آنها در فاصله جهش از دیواره سرریز، در دبی‌ها و عمق‌های پایاب مختلف تعیین گردید.

در مطالعه حاضر به منظور کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و به تبع آن کاهش ابعاد حوضچه آرامش و نیز عدم تجمع رسوبات در بالادست سد، جریان عبوری از روی سد را با جت آبی که از شکاف ایجاد شده در بدنه سد خارج می‌شد با سه زاویه مختلف و نیز دبی‌های متفاوت طلاق داده شد و تأثیر آن روی کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و عدد فرود بررسی شد. در بررسی‌های اولیه، معمولاً به نظر می‌رسد که برخورد جت‌های آب در روی سرریز، موجب کاهش طول حوضچه آرامش می‌شود. ولی مناسب‌ترین زاویه برخورد جت‌های آب باید با بررسی محل تشکیل جهش، طول جهش، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل جهش پایدار و اثرات متقابل جریان ریزشی از روی سرریز و خروجی از شکاف سد بر یکدیگر، و شرایط جریان بالادست و پایین دست تعیین شد.

### طول پرش

فاصله افقی بین شروع و انتهای پرش هیدرولیکی را طول پرش گویند و آن را با  $L_p$  نشان می‌دهند. معمولاً شروع پرش کاملاً مشخص است و انتهای آن محلی است بعد از غلتاب‌ها که سطح آب اصولاً افقی، جریان زیر بحرانی و ارتفاع سطح آب در آن جا با ارتفاع پایاب برابر است. تخمین طول پرش با فرمولی که اساس تئوری داشته باشد، امکان‌پذیر نمی‌باشد. عده‌ای از پژوهشگران با جمع‌آوری داده‌های تجربی طول پرش را به صورت تابعی از  $Fr_1$  (عدد فرود در ابتدای پرش) و عمق  $y_1$  و  $y_2$  در یک منحنی نشان داده‌اند. در این منحنی طول پرش در محدوده  $Fr_1 < 13$  و  $4/5 < Fr_1$  تقریباً ثابت و برابر با  $y_2$  است (۸). هاگر (۱۰)، رابطه تجربی زیر را برای تخمین طول پرش در کانال مستطیلی پیشنهاد کرده است.

خصوصیات جهش هیدرولیکی دایره‌ای را بررسی کردند. در این پژوهش با فرض تغییرات خطی بین عمق اولیه تا ثانویه جهش و به‌کارگیری اصول پیوستگی، انرژی و مومنتوم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت انرژی ارائه گردید. هم‌چنین، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل آزمایشگاهی صورت گرفت که ضمن تأیید فرضیات انجام گرفته، این نتیجه به‌دست آمد که نسبت عمق ثانویه و طول جهش در کانال دایره‌ای در مقایسه با جهش در کانال مستطیلی کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد. شفاعی بجستان و ایزدجو (۱۲)، پرش بر بستر زبر موج با سطح مقطع ذوزنقه‌ای را بررسی نمودند و نشان دادند که در بستر موج، طول پرش به نصف می‌رسد. هاگ هس و فلک (۱۱)، با مطالعه‌ای بر روی پرش هیدرولیکی بر بستر زبر نشان دادند که زبری‌ها می‌توانند عمق ثانویه و طول پرش را کاهش دهند و میزان این کاهش به عدد فرود اولیه و زبری نسبی وابسته است. شفاعی بجستان و نیسی (۱۶)، با بررسی شکل زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی دریافتند که زبری‌ها با شکل‌های متفاوت می‌توانند به‌طور متوسط عمق مزدوج پرش را تا ۲۳/۳ درصد کاهش و استهلاک نسبی انرژی را نیز تا ۵ درصد افزایش دهند. این تحقیق هم‌چنین نشان داد که مؤثرترین شکل در کاهش طول پرش و طول غلطاب زبری با سطح مقطع لوزی شکل است.

ایلخانی پور (۲)، با مطالعه بر روی سازه‌ای با نام آرام‌کننده فیفر، به منظور کاهش طول پرش از ترکیب جت‌های آبی استفاده کرد که ترکیبی از جریان ورودی از روی سرریز اوجی با استاندارد USBR و جریان خروجی از روزنه کف حوضچه می‌باشد، نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که این حالت می‌تواند طول حوضچه آرامش را به میزان زیادی کوتاه کند. ایلخانی پور (۳)، با معرفی مدلی با نام مدل ایلخانی پور اعلام کرد که، مدل ایلخانی پور مدل یک سد انحرافی جدید است که با تعبیه یک روزنه در بدنه سد و ترکیب جریان ورودی از روی سرریز اوجی با استاندارد USBR و جریان خروجی از روزنه، بدون استفاده از بلوک‌های حوضچه آرامش انرژی آب را تلف کرده

که در آن Q دبی، C<sub>d</sub> ضریب دبی، L<sub>e</sub> طول مؤثر تاج سرریز عمود بر جهت جریان و H<sub>d</sub> بار آبی موجود روی سرریز است.

### مواد و روش‌ها

به منظور به دست آوردن اطلاعاتی در زمینه میزان تأثیر جریان خروجی از تخلیه تحتانی و زاویه برخورد در کاهش طول پرش هیدرولیکی، عمق مزدوج پرش، ارتفاع آب روی تاج سرریز و نیز افزایش دبی عبوری از سرریز، پروفیل سرریز اوجی به روش استاندارد USBR [۵] مطابق شکل ۱ براساس مشخصات فلوم و دبی طرح ۳۰ لیتر بر ثانیه طراحی شد، سپس قالب آن از چوب ساخته شد و در نهایت خود مدل با استفاده از قالب از جنس فایبر گلاس ساخته شد. آزمایش‌های اولیه بر روی مدل بدون تخلیه تحتانی در شش دبی مختلف انجام شد. در هر آزمایش پس از ثابت شدن شرایط آزمایش و برقراری دبی مورد نظر در فلوم، طول پرش و ارتفاع آب بالای تاج سرریز برداشت می‌شد، سپس با استفاده از ارتفاع تراز سطح آب روی سرریز و داشتن دبی کل، معادله دبی اشل سرریز تعیین شد که در آزمایشات بعدی به منظور تعیین میزان دبی عبوری از مجرای تخلیه تحتانی استفاده شد. این دبی‌ها که عبارت بودند از ۱۶/۶۱، ۲۳/۸۵، ۲۸/۴۳، ۴۴/۶۲، ۳۵/۵۳، و ۵۳/۷۶ لیتر بر ثانیه، توسط سرریز مثلثی ۵۳ درجه‌ای که در انتهای فلوم بود و منحنی دبی اشل آن تعیین شده بود، اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در فلومی به عرض ۲۵ سانتی‌متر و طول ۱۱/۹ متر با قابلیت تغییر شیب و دبی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. پس از اتمام آزمایش‌های اولیه با مدل بدون تخلیه تحتانی، مدل‌های دیگری مشابه مدل قبلی ساخته شد با این تفاوت که این بار در بدنه پایین دست مدل شکافی ایجاد شده بود و پره‌هایی در داخل مدل نصب شده بودند که خطوط جریان را با سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق با جریان عبوری از روی سد تلاقی می‌دادند (شکل ۲). آزمایش‌ها در سه سری انجام شد و در هر سری عرض شکاف به گونه‌ای تغییر داده می‌شد که سطح

$$\frac{L_j}{y_1} = 22 \cdot \tanh \frac{Fr_1 - 21}{22} \quad [1]$$

با توجه به نتایج به دست آمده توسط USBR (۱۷)، می‌توان مقدار L<sub>j</sub> را از روابط زیر تعیین نمود:

$$\sqrt{Fr_1} < 2/5 \Rightarrow L_j = 3y_1 Fr_1^{3/2} \quad [2]$$

$$2/5 \leq Fr_1 < 4/5 \Rightarrow L_j = 5(y_1 - y_2) \quad [3]$$

$$4/5 \leq Fr_1 < 9 \Rightarrow L_j = 6y_1 \quad [4]$$

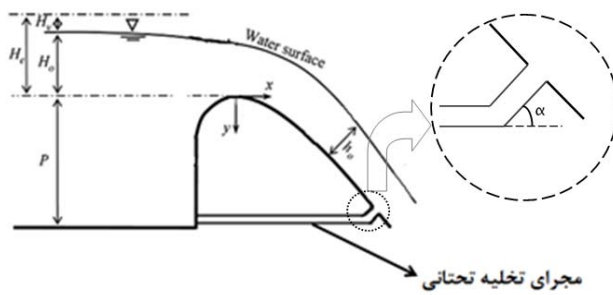
### سرریز اوجی (Ogee spillway)

این سرریزها براساس محاسبات هیدرولیکی مربوط به سرریزهای با تاج مدور به گونه‌ای طراحی می‌گردند که پروفیل تاج و جلو ساختمان آنها منطبق بر سطح زیرین آب لبریز شده از یک سرریز لبه تیز مستطیلی با همان مشخصات مورد نیاز در بالادست سرریز اصلی باشد. معمولاً شکل تاج را از روابط تجربی که توسط USBR و USAWES تهیه شده، تعیین می‌نمایند. این روابط بر پایه مطالعات و بررسی‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. بخشی از نیم‌رخ که در بالادست قله تاج سرریز قرار دارد، یک منحنی دایره‌ای مرکب است در حالی که بخش پایین دست آن یک منحنی است که از رابطه زیر پیروی می‌کند:

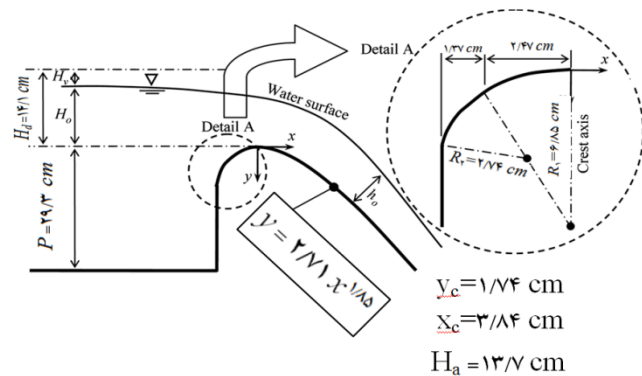
$$\frac{y}{H_d} = -K \left[ \frac{x}{H_d} \right]^n \quad [5]$$

در رابطه فوق H<sub>d</sub>، بار طراحی، x و y مختصات هر نقطه از منحنی، n و k ضرایبی هستند که مقادیر آنها به شیب وجه بالادست و سرعت جریان در بالادست بستگی دارد. USBR (۱۹۸۷) نمودارهای مختلفی برای تعیین n، k، R<sub>1</sub>، R<sub>2</sub>، y<sub>c</sub> و x<sub>c</sub> که در شکل ۱ نشان داده شده ارائه نموده است (۱۷). با توجه به این که نیم‌رخ سرریز از سطح زیرین سفره آب بر روی سرریز لبه تیز مستطیلی استخراج شده است، رابطه دبی سرریز نیز مشابه رابطه دبی سرریز لبه تیز مستطیلی است. بنابراین معادله دبی سرریز روگذر ساده به صورت زیر است:

$$Q = C_d L_e \sqrt{2g} H_d^{3/2} \quad [6]$$



شکل ۲. ترکیب جریان با زاویه  $\alpha=45$  درجه



شکل ۱. پروفیل طراحی سرریز اوجی

S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> و در سه زاویه انجام شد، داده‌ها و نمودارهای درصد کاهش طول پرش در برابر درصد دبی عبوری از مجرای تحتانی، درصد کاهش طول پرش در برابر عدد فرود در محل عمق اولیه پرش، درصد کاهش عدد فرود اولیه در برابر نسبت دبی عبوری از شکاف و بالاخره نرخ اتلاف انرژی در برابر عدد فرود اولیه ترسیم شد. نتایج آزمایش‌هایی که از سرریز بدون شکاف به ازای شش دبی مطرح شده به دست آمد در جدول ۱ آمده است. در ادامه هم چنین در جدول ۲ اطلاعات مربوط به مدل ۴۵ درجه با عرض شکاف ۱۶ میلی‌متر (با سطح مقطع S<sub>1</sub>) و نیز نمودار کاهش طول پرش در مدل S<sub>1</sub> نسبت به دبی آمده است (شکل ۳).

چنانچه از جدول ۲ و شکل‌های ۳ و ۴ مشهود است و نیز نتایج سایر آزمایش‌ها، با افزایش نسبت دبی عبوری از مجرای تحتانی میزان کاهش طول پرش بیشتر می‌شود چرا که با افزایش میزان دبی عبوری از شکاف، عمق اولیه پرش افزایش بیشتری یافته و با افزایش بیشتر عمق اولیه، عدد فرود اولیه نیز کاهش بیشتری می‌یابد که این امر منجر به کاهش بیشتر طول پرش می‌گردد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان دبی کل، دبی عبوری از شکاف کاهش می‌یابد، این امر به دلیل کاهش اختلاف هد آب روی شکاف در اثر افزایش دبی و نیز پس زدگی جریان خروجی از شکاف توسط جریان عبوری از روی سرریز با افزایش دبی عبوری از روی آن می‌باشد. بنابراین در دبی‌های

مقطع عمود بر جریان در سه زاویه برخورد یکسان باشد. این سه سطح مقطع خروجی که S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> نامیده شدند به ترتیب عبارت بودند از: ۴۰، ۱۰۰ و ۱۲۳ سانتی‌مترمربع. هدف از تغییر سطح مقطع جریان خروجی، عبور دادن نسبت‌های متفاوت دبی از شکاف سرریز بود. هر مدل با گشودگی و زاویه خاص خود در فلوم نصب و شش دبی یاد شده از آن عبور داده شد. با معلوم بودن معادله دبی اشل مدل و تراز سطح آب در هر آزمایش میزان دبی عبوری از روی سد مشخص شده و با کسر آن از دبی کل، دبی عبوری از شکاف و در نتیجه درصدی از دبی کل که از شکاف عبور می‌کرد مشخص شد. سپس طول پرش و عمق مزدوج پرش، ارتفاع آب روی تاج سرریز و نیز عدد فرود برداشت و با نتایج آزمایش‌های شاهد و مدل‌های دیگر مقایسه شد.

در تمام آزمایش‌های با استفاده از دریچه‌ای که در انتهای فلوم قرار داشت عمق پایاب به گونه‌ای تنظیم می‌شد که پرش در محل پنجه سرریز تشکیل شود.

## نتایج و بحث

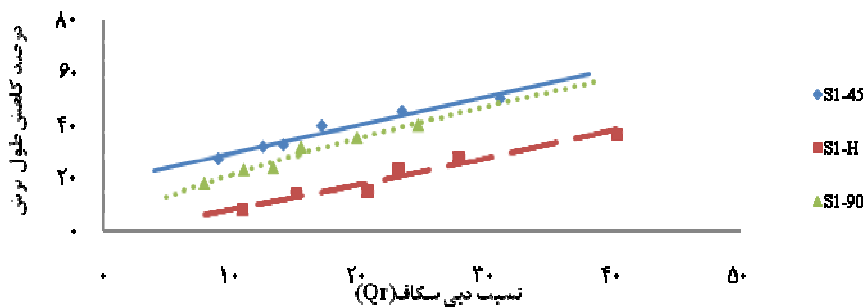
در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر جریان ترکیبی بر روی طول و افت انرژی پرش هیدرولیکی، ۶۰ آزمایش با زوایای مختلف و نسبت‌های متفاوتی از دبی انجام شد. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، برای هر سری از آزمایش‌ها که با سه سطح

جدول ۱. اطلاعات آزمایش سرریز بدون تخلیه تحتانی

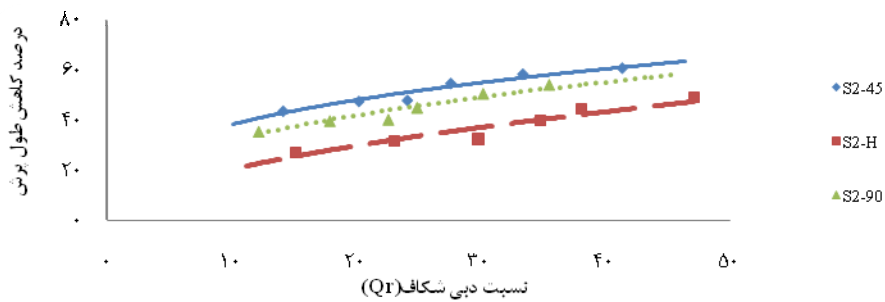
افت انرژی پرش (cm)	$Fr_1$	هد آب روی سرریز $H_e$ (cm)	$L_j$ (cm)	دبی کل (لیتر بر ثانیه)
۱۱/۳	۴/۰۸	۱۰/۸	۱۳۰	۱۶/۶۱
۱۲/۲	۳/۸۴	۱۲/۹	۱۴۶	۲۳/۸۵
۱۳/۹	۳/۸	۱۴/۳	۱۶۳	۲۸/۴۳
۱۳/۰	۳/۵۱	۱۶/۵	۱۷۹	۳۵/۵۳
۱۳/۷	۳/۴۴	۱۷/۷	۲۰۵	۴۴/۶۲
۱۴/۰	۳/۲۱	۲۰/۱	۲۲۱	۵۳/۷۶

جدول ۲. اطلاعات آزمایش سرریز با شکاف با زاویه ۴۵ درجه و عرض ۱۶ میلی متر

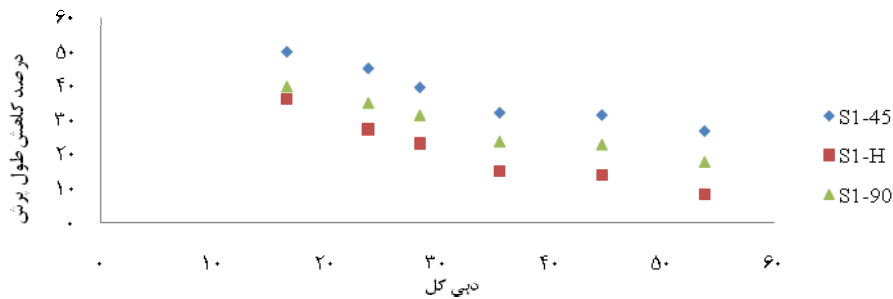
افت انرژی پرش (cm)	$Fr_1$	درصد کاهش طول پرش	$H_e$ (cm)	$L_j$ (cm)	درصد دبی عبوری از شکاف	دبی کل (لیتر بر ثانیه)
۱/۸	۲/۱	۵۰/۰۰	۷/۵	۶۵	۳۱/۱۰	۱۶/۶۱
۱/۸	۲/۰	۴۵/۱۸	۱/۰۳	۸۰	۲۳/۴۰	۲۳/۸۵
۲/۵	۲/۲	۳۹/۶۳	۱۲/۲	۹۸	۱۷/۱۰	۲۸/۴۳
۳/۶	۲/۳	۳۲/۲۸	۱۴/۵	۱۲۱	۱۴/۱۰	۳۵/۵۳
۴/۳	۲/۳	۳۱/۶۱	۱۷/۱	۱۴۰	۱۲/۵۰	۴۴/۶۲
۴/۸	۲/۳	۲۶/۹۵	۱۹/۹	۱۶۱	۹/۰۰	۵۳/۷۶



شکل ۳. تغییرات درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف (Qr) در مدل  $S_1$



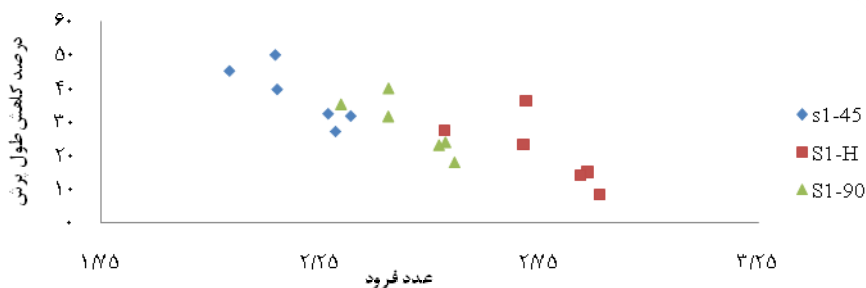
شکل ۴. تغییرات درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف (Qr) در مدل  $S_2$



شکل ۵. تغییرات نسبت کاهش طول پرش به دبی کل در مدل S<sub>۱</sub>

جدول ۳. میانگین مقادیر کاهش طول پرش هیدرولیکی

نوع مدل	S <sub>۱</sub> -۴۵	S <sub>۲</sub> -۴۵	S <sub>۳</sub> -۴۵	S <sub>۱</sub> -H	S <sub>۲</sub> -H	S <sub>۳</sub> -H	S <sub>۱</sub> -۹۰	S <sub>۲</sub> -۹۰	S <sub>۳</sub> -۹۰
میانگین کاهش طول پرش (درصد)	۳۷/۶۱	۵۱/۸۸	۶۵/۷۳	۲۰/۶۸	۳۷/۲۷	۵۲/۰۸	۲۸/۶۶	۴۴/۰۸	۵۸/۹۶
میانگین نسبت دبی شکاف به دبی کل (درصد)	۱۷/۸۷	۲۶/۸۰	۳۴/۷۰	۲۳/۰۶	۳۱/۳۵	۳۹/۷۸	۱۵/۳۸	۲۳/۸۸	۳۰/۴۸

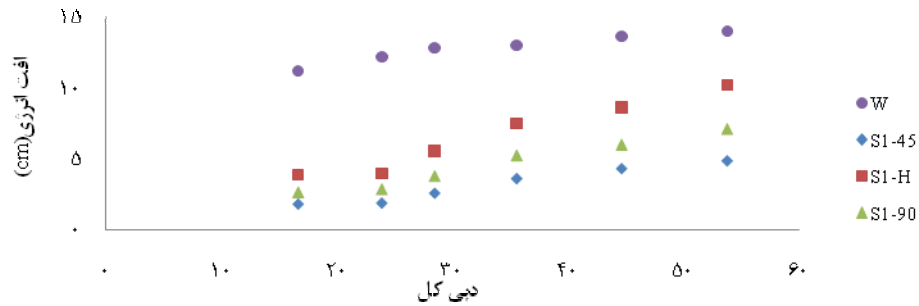


شکل ۶. تغییرات کاهش طول پرش به عدد فرود در مدل S<sub>۱</sub>

تأثیر را روی کاهش طول پرش هیدرولیکی و کاهش عدد فرود اولیه دارد. میزان متوسط کاهش طول پرش در هر سری از آزمایشات و در زوایای مختلف در جدول ۳ آمده است. در شکل ۶ نیز تغییرات کاهش طول پرش در برابر عدد فرود در مدل S<sub>۱</sub> نشان داده شده است. این نمودار و نتایج سایر آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش عدد فرود میزان کاهش طول پرش کاهش می‌یابد چرا که اعداد فرود زمانی افزایش می‌یافتند که سهم مجرای تحتانی در دبی کاهش یافته و بیشتر دبی از روی سرریز عبور کند، بنابراین با کاهش اثر شکاف میزان کاهش طول پرش نیز کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۳ بیشترین کاهش طول پرش مربوط به

بالا تأثیر شکاف در عبور جریان کاهش یافته و درصد کمتری از دبی از آن عبور می‌کند این نکته در جدول ۲ نیز مشهود است. به همین دلیل با افزایش دبی کل، دبی عبوری از مجرای تحتانی کاهش یافته و تأثیر تداخل جریان در کاهش طول پرش، کمتر می‌شود. این نکته در شکل ۵ که برای مدل S<sub>۱</sub> رسم شده است نشان داده شده است.

در شکل ۵ درصد کاهش طول پرش نسبت به آزمایش‌ها با سرریز بدون شکاف به ازای دبی یکسان محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ تا ۵ مشخص است و نیز نتایج دو سری دیگر از آزمایش‌ها با سطح مقطع‌های خروجی S<sub>۲</sub> و S<sub>۳</sub> نشان داد که تداخل جریان با زاویه ۴۵ درجه بیشترین



شکل ۷. تغییرات افت انرژی پرش به دبی کل در مدل  $S_1$

می‌دهد و هر چه میزان دبی عبوری از شکاف افزایش یابد میزان کاهش عمق ثانویه نیز افزایش می‌یابد (شکل‌های ۸ و ۹). هم‌چنین به‌طور متوسط زاویه ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را روی کاهش عمق ثانویه پرش دارد.

همان‌طور که از نمودار شکل ۱۰ مشهود است و نیز نتایجی که از دو سری دیگر از آزمایش‌ها که با سطح مقطع‌های عمود بر جریان  $S_1$  و  $S_3$  انجام شد، نشان داد که با افزایش عدد فرود میزان کاهش عمق ثانویه کاهش می‌یابد چون افزایش عدد فرود به دلیل کاهش دبی شکاف و افزایش جریان عبوری از روی سرریز و نهایتاً افزایش سرعت در پای سرریز رخ می‌دهد، بنابراین با کاهش تأثیر شکاف، میزان کاهش عمق ثانویه نیز کاهش می‌یابد. نتایج هم‌چنین نشان داد که با افزایش عدد فرود نسبت اعماق مزدوج ( $y_2/y_1$ ) نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین بیشترین کاهش عمق مزدوج مربوط به مدل ۴۵ و ۹۰ درجه می‌باشد که در مدل ۴۵ درجه به ازای عبور میانگین ۴۵ درصد دبی از شکاف ۲۷ درصد عمق مزدوج کاهش می‌یابد.

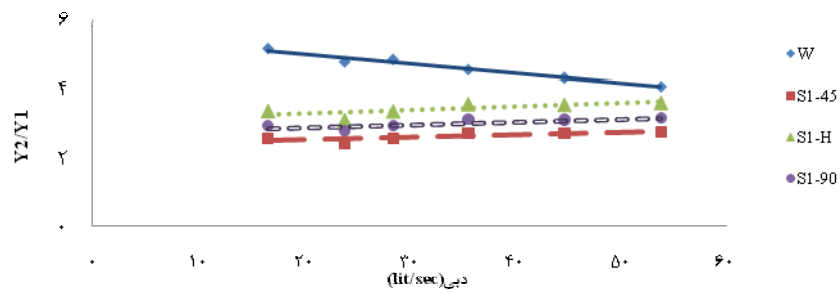
در این مطالعه هم‌چنین به منظور بررسی تأثیر جریان ترکیبی بر روی میزان کاهش تراز سطح آب، داده‌ها و نمودارهای درصد کاهش ارتفاع آب در برابر درصد دبی عبوری از مجرای تحتانی و ارتفاع تراز سطح آب در برابر دبی (منحنی دبی اشل) ترسیم شد. نتایج آزمایشاتی که از سرریز بدون شکاف به ازای شش دبی مطرح شده به دست آمد و نیز مقادیر درصد کاهش تراز سطح آب در مدل‌های مختلف در جدول ۴ آمده است.

مدل با زاویه تلاقی ۴۵ درجه می‌باشد. در هر زاویه نیز با افزایش نسبت دبی عبوری از شکاف میزان کاهش طول پرش بیشتر می‌شود به‌عنوان مثال مدل ۴۵- $S_3$  که میانگین درصد دبی عبوری از آن ۳۴/۷۰ درصد می‌باشد، بیشترین مقدار کاهش طول را (۶۵/۷۳ درصد) داراست.

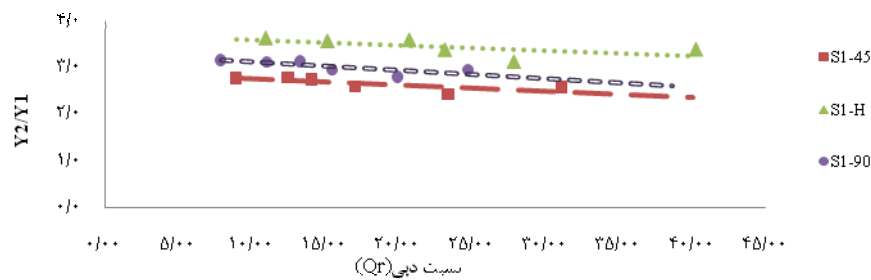
به منظور مقایسه میزان اتلاف انرژی در مدل‌های شکافدار با مدل شاهد نمودارهای افت انرژی پرش در برابر دبی در شکل ۷ رسم شد. نتایج نشان داد که بر خلاف سایر روش‌های کاهش طول پرش که با ایجاد موانع و بلوک‌ها در داخل حوضچه‌های آرامش باعث افزایش اتلاف انرژی و کاهش طول پرش می‌گردند، این روش میزان اتلاف انرژی را برای دبی‌های یکسان کاهش داده و مکانیزم کاهش طول آن با استفاده از افزایش عمق اولیه پرش و کاهش عدد فرود اولیه است، به این ترتیب که با افزایش عمق اولیه، عمق ثانویه پرش نیز کاهش یافته و با کم شدن اختلاف دو عمق مزدوج پرش، طول آن کاهش می‌یابد.

مشاهده می‌شود که مدل ۴۵ درجه کمترین اتلاف انرژی را در پرش هیدرولیکی ایجاد کرده است چون در این حالت اعماق مزدوج بیشتر به یکدیگر نزدیک شده و طول پرش را بیشتر کاهش داده است و بیشتر افتی که در سیستم رخ داده توسط تداخل جریان از طریق شکاف ایجاد شده است. در شکل ۷ نمودار W مربوط به سرریز بدون مجرای تخلیه می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که برای دبی‌های یکسان، جریان ترکیبی در زوایای مختلف بین ۱۰ تا ۳۵ درصد عمق ثانویه پرش را کاهش

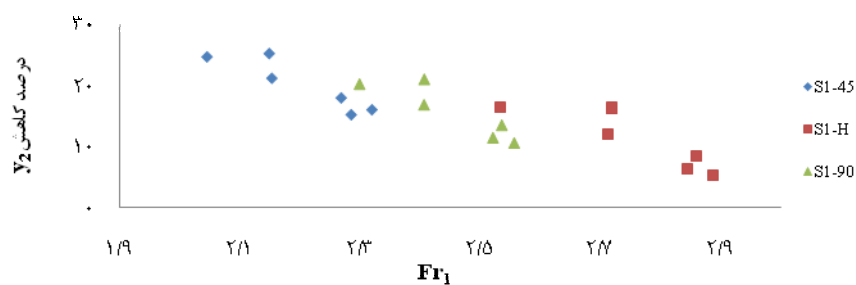




شکل ۸. تغییرات نسبت اعماق مزدوج به دبی در مدل  $S_1$



شکل ۹. تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی به نسبت دبی شکاف در مدل  $S_1$



شکل ۱۰. تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به اعداد فرود اولیه در مدل  $S_2$

در عبور دبی با افزایش دبی کل می‌باشد، چون با افزایش دبی کل و عمق آب روی سد، جریان عبوری از روی سرریز موجب پس‌زدگی جریان خروجی از شکاف شده و دبی شکاف را کاهش می‌دهد، هم‌چنین چون دبی عبوری از سرریز با ارتفاع آب به توان  $1/5$  رابطه مستقیم دارد ولی دبی عبوری از شکاف با توجه به فرمول روزنه با ارتفاع آب به توان  $5/2$  رابطه دارد. بنابراین با افزایش تراز سطح آب، میزان دبی عبوری از روی سرریز نسبت به دبی شکاف بیشتر شده و اثر شکاف در عبور دبی کاهش می‌یابد.

همان‌طور که از جدول ۴ دریافت می‌شود در هر سه مدل  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  بیشترین درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب مربوط به جریان ترکیبی با زاویه برخورد مستقیم (H) می‌باشد که در بیشترین حالت درحالی که ۵۷ درصد دبی از شکاف عبور می‌کند، ۱۰/۷۳ درصد عمق آب را کاهش می‌دهد. در تمام منحنی‌های دبی اشل با افزایش دبی کل منحنی دبی اشل مدل‌های دارای شکاف به منحنی دبی اشل سرریز بدون شکاف نزدیک می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده کاهش تأثیر شکاف در کاهش تراز سطح آب به دلیل کاهش سهم شکاف

جدول ۴. اطلاعات مربوط به کاهش تراز سطح آب در بالادست سرریز

دبی کل (لیتر بر ثانیه)	۱۶/۶۱	۲۳/۸۵	۲۸/۴۳	۳۵/۵۳	۴۴/۶۲	۵۳/۷۶
ارتفاع تراز سطح آب در مدل بدون شکاف (cm)	۹۶/۶	۱۲۳/۰	۱۳۸/۳	۱۶۰/۴	۱۸۶/۸	۲۱۱/۵
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۱</sub> -۴۵	۷/۲۱	۵/۷۹	۵/۱۷	۵/۰۷	۴/۰۶	۳/۱۳
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۱</sub> -H	۶/۴۸	۳/۰۵	۳/۹۸	۵/۱۶	۳/۲۵	۱/۲۲
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۱</sub> -۹۰	۴/۲۶	۴/۰۶	۳/۴۱	۳/۲۰	۲/۹۲	۲/۲۴
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۲</sub> -۴۵	۷/۴۲	۷/۰۲	۶/۲۱	۵/۹۳	۵/۴۴	۴/۰۴
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۲</sub> -H	۸/۵۷	۸/۱۰	۷/۹۵	۷/۴۳	۶/۲۵	۴/۳۶
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۲</sub> -۹۰	۶/۲۹	۶/۳۰	۵/۵۶	۵/۵۴	۴/۷۹	۳/۴۹
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۳</sub> -۴۵	۹/۴۲	۹/۲	۸/۴۶	۸/۲۳	۷/۷۵	۴/۲۸
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۳</sub> -H	۱۰/۷۳	۱۰/۸۷	۱۰/۰۴	۹/۶۴	۹/۱۳	۵/۰۷
درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب در مدل S <sub>۳</sub> -۹۰	۷/۹۶	۸/۴۴	۷/۳۵	۷/۱۲	۶/۶۳	۳/۹۶

### نتیجه گیری

به منظور کاهش ابعاد حوضچه آرامش و کاهش هزینه‌ها بایستی پارامترهای پرش هیدرولیکی را کاهش داد در مطالعه حاضر به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی و به تبع آن کاهش طول حوضچه آرامش و نیز عدم تجمع رسوبات در بالادست سد، جریان عبوری از روی سد را با جت آبی که از شکاف ایجاد شده در بدنه سد خارج می‌شد با سه زاویه مختلف و نیز دبی‌های متفاوت طلاق داده شد و تأثیر آن روی کاهش طول پرش هیدرولیکی و عدد فرود بررسی و نتایج زیر حاصل شد.

- مطالعه حاضر نشان داد جریان ترکیبی با جت ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش طول پرش و کاهش عدد فرود دارد و جریان ترکیبی با جت ۹۰ و ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق ثانویه پرش دارد.
- با افزایش مقدار دبی کل میزان کاهش طول پرش کاهش می‌یابد، هم‌چنین با افزایش عدد فرود نیز میزان کاهش طول پرش کمتر می‌شود.
- هر چه نسبت دبی عبوری از مجرای تحتانی بیشتر باشد

میزان کاهش طول پرش افزایش می‌یابد، از طرفی با افزایش میزان دبی کل میزان دبی عبوری از شکاف کاهش می‌یابد.

- به منظور افزایش دبی عبوری از سرریزها می‌توان با استفاده از جریان ترکیبی سد و مجرای تخلیه تحتانی، برای هدهای یکسان در روی سرریز، دبی عبوری از سیستم را افزایش داد. با این روش می‌توان در مواقع وقوع سیلاب از ایجاد بار اضافی و کاویتاسیون روی سرریز جلوگیری نمود و در سدهای انحرافی از افزایش سطح آب بالادست و به زیر آب رفتن اراضی بالادست جلوگیری کرد.

پیشنهاد می‌گردد به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی در ساختمان سرریزها و سدهای انحرافی از جریان ترکیبی سد و مجرای تخلیه با زاویه برخورد ۴۵ درجه استفاده شود، این روش هم‌زمان موجب کاهش تراز سطح آب نیز می‌شود. استفاده از این نوع جریان ترکیبی هم‌چنین باعث جلوگیری از تجمع رسوبات در بالادست سدهای انحرافی شده و در افزایش عمر مفید سد نیز مؤثر است.

### منابع مورد استفاده

۱. امید، ح. ۱۳۷۶. جهش هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه‌ای. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۸(۳):۱۱۳-۱۲۱.

۲. ایلخانی پور، ر. ۱۳۸۵. تأثیر محل استقرار روزنه و جریان خروجی از آن در جهش هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی فیفر با روزنه با فشردگی جانبی جزئی. اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. ایلخانی پور، ر. ۱۳۸۷. بررسی عملکرد مدل ایلخانی پور برای سدهای انحرافی در حالت پنجه شیب‌دار. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. ایلخانی پور، ر. ۱۳۸۹. بررسی عملکرد مدل ایلخانی پور برای سدهای انحرافی بدون پایه و با تکیه گاه‌های عریض در بالای تاج. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۵. بیرامی، م. ک. ۱۳۸۵. *سازه‌های انتقال آب*. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
۶. حسینی، م. و ج. ابریشمی. ۱۳۸۴. *هیدرولیک کانال‌های باز*. چاپ نهم، انتشارات دانشگاه امام رضا. مشهد.
۷. شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۴. *جریان در کانال‌های باز*. چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۸. محمودیان شوشتری، م. ۱۳۸۵. *اصول جریان در مجاری باز*. جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۹. نیسی، ک. ۱۳۸۷. تأثیر شکل زبری بستر بر طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی. *مجله هیدرولیک* ۳: ۲۹-۴۰.
10. Hager, W. H. 1992. Energy Dissipaters and Hydraulic Jump. Water Science and Technology Library. Kluwer Academic Pub., Netherlands.
11. Hughes, W.C. and J.E Flack. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 110(12): 1755-1771. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(1984) 110:12 (1755).
12. Izadjoo, F. and M. Shafai-Bejostan. 2007. corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *J. Appl. Sci.* 7(8): 1164-1169.
13. Kouluseus, H. J. and D. Ahmad. 1961. Circular hydraulic jump. *J. Hydraul. Div. ASCE* 105(9): 1065-1078.
14. Massey, B. S. 1966. Hydraulic jump in trapezoidal channel an improved method. *Water Power* 13: 232.
15. Posey, C. J. and P. S. Hsing. 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. *Eng. News – Record*. p. 797.
16. Shafai- Bejostan, M. and K. Neisi. 2009. A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Asian J. Appl. Sci.* 1: 436-445.
17. U.S. Bureau of Reclamation (USBR). 1977/1987. Design of small dams, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.