

بررسی پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی و کنترل پرش با آستانه انتهایی لبه‌پهن

حسین حمیدی‌فر* و محمدحسین امید**

* نگارنده مسئول: بخش مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. تلفن: ۰۷۱)۳۲۲۸۶۱۳۰،

پيام‌نگار: hamidifar@shirazu.ac.ir

** به‌ترتیب: استادیار بخش مهندسی علوم آب، دانشگاه شیراز؛ و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری

کشاورزی، دانشگاه تهران.

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۱۹

چکیده

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای استهلاک انرژی در پایین‌دست سازه‌ها در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، استفاده از پرش هیدرولیکی می‌باشد. برخلاف سایر مقاطع از قبیل مقطع مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای، پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی تاکنون چندان بررسی نشده است. در این مقاله، ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در یک کانال با مقطع مثلثی همراه با آستانه انتهایی لبه‌پهن مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به طول ۹، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۶ متر از جنس شیشه شفاف و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف شامل دبی‌های مختلف، دو بازشدگی دریچه و اعداد فرود ابتدای پرش در دامنه ۱۲/۵-۲/۵ انجام شدند. نتایج نشان داد که به‌ازای یک عدد فرود مشخص جت ورودی، عمق پایاب مورد نیاز در مقطع مثلثی تا ۷۰ درصد کمتر از مقدار متناظر در مقطع مستطیلی است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، روابط تجربی برای پارامترهای بی‌بعد نسبت عمق ثانویه و ارتفاع آستانه انتهایی لبه‌پهن برحسب عدد فرود جریان ورودی به‌دست آمد که می‌توان در طراحی‌ها از این روابط برای تشکیل پرش کنترل شده، در شرایطی که عمق پایاب کافی برای شکل‌گیری پرش هیدرولیکی در کانال‌های مثلثی وجود ندارد، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی

آستانه انتهایی، استهلاک انرژی، پرش هیدرولیکی، عمق پایاب، کانال مثلثی

مقدمه

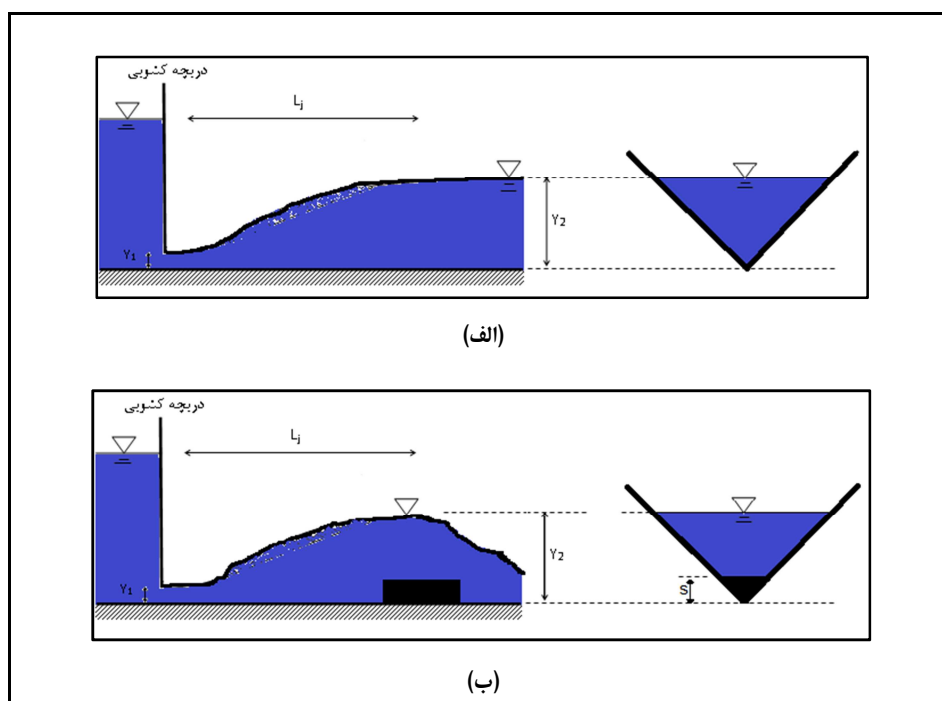
شبکه‌های آبیاری و زهکشی بعد از دریچه‌های تنظیم‌کننده جریان، در پنجه یک سرریز و یا در جایی که کانال شیب‌دار به طور ناگهانی به یک سطح افقی می‌رسد رخ می‌دهد. این پدیده به صورت گسترده به عنوان یک کاهنده انرژی در پایین‌دست سرریزها و خروجی سایر سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chow, 1959).

روش‌های مختلفی برای افزایش کارایی پرش هیدرولیکی پیشنهاد شده است. از جمله می‌توان به

یکی از پدیده‌های رایج در شبکه‌های آبیاری و زهکشی که در آن ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت جریان به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود، پرش هیدرولیکی است که طی آن وضعیت جریان در فاصله کوتاهی از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌یابد. در این پدیده، سطح آب از ابتدای پرش (پنجه) به تدریج افزایش یافته و در انتهای پرش به عمق پایاب متصل می‌شود (شکل ۱). پرش هیدرولیکی عمدتاً در

است زیرا با توجه به مایل بودن دیواره‌ها هزینه‌های ساخت کاهش می‌یابد (Esmaeili-Varaki *et al.*, 2013). از نقطه‌نظر افت انرژی نسبی و نسبت عمق ثانویه نیز مقطع دوزنقه‌ای و به‌ویژه مقطع مثلثی به ازای یک عدد فرود ثابت کارایی بیشتری نسبت به مقطع مستطیلی دارد. با این وجود، بررسی‌ها نشان می‌دهد که پرش هیدرولیکی در مقطع دوزنقه‌ای بسیار ناپایدار است (Sandover & Holmez, 1962).

استفاده از پله (مثبت یا منفی)، آستانه (پیوسته یا دنداندار)، بلوک‌های کف، شیب‌دار نمودن کف و افزایش عرض مقطع (واگرایی) اشاره کرد (Omid *et al.*, 2007, 2010; Esmaeili-Varaki & Omid, 2007; Abbaspour *et al.*, 2008; Gord-Noshahri *et al.*, 2009; Kasi *et al.*, 2013). سوالی در اینجا پیش می‌آید که آیا می‌توان مقطع معمول یعنی مستطیلی را به شکلی دیگر تغییر داد که بتواند کارایی پرش را افزایش دهد؟ از دیدگاه اجرایی، مقطع دوزنقه‌ای با دیواره‌های واگرا بسیار مطلوب



شکل ۱- (الف) تصویر شماتیک پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی و (ب) کنترل پرش با آستانه لبه‌پهن در شرایط عدم وجود عمق پایاب کافی

معدود تحقیقات انجام گرفته در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی نشان می‌دهد که مقطع مثلثی از جهاتی مانند حداقل عمق پایاب مورد نیاز، کارآمدتر از مقطع دوزنقه‌ای و مستطیلی می‌باشد و کمتر با مشکل ناپایداری مواجه است (Hamidifar *et al.*, 2011). از این رو می‌توان از قابلیت پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی برای بالا

پرش هیدرولیکی در مقاطعی مانند؛ مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای، به تفصیل توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته به‌گونه‌ای که حتی اشاره به نام آنها نیز خارج از حوصله و چارچوب اهداف پژوهش حاضر است. در مقابل، ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی تاکنون چندان بررسی نشده است. از طرفی

داد که به طور کلی معادله مومنتم برای ارزیابی نسبت عمق ثانویه پرش کارایی دارد؛ هرچند که داده‌های آزمایشگاهی وی تا حدی پایین‌تر از نسبت تئوری عمق ثانویه بودند. این اختلاف که حدود ۵ درصد برآورد شد، در تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده توسط هاگر و ونوسچک (Hager & Wanoschek, 1987) برای یک کانال مثلثی با زاویه داخلی ۹۰ درجه نیز مشاهده شده است. لازم به ذکر است که ایشان آزمایش‌های خود را در یک کانال نیمه مثلثی با یک دیواره عمودی و یک دیواره مایل با زاویه ۴۵ درجه انجام داده و نتایج را برای یک کانال کاملاً مثلثی برون‌یابی کردند. در هر حال این برون‌یابی تا حدی غیرواقعی است زیرا نمی‌توان از تاثیر دیواره عمودی بر مشخصات پرش در کانال مثلثی که ذاتاً سه‌بعدی است صرف‌نظر کرد.

همچنین هاگر و ونوسچک (Hager & Wanoschek, 1987) یک راه‌حل مجانبی برای نسبت عمق ثانویه و افت انرژی نسبی در طول پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی ارائه نمودند و چنین نتیجه گرفتند که افت انرژی نسبی در کانال مثلثی نسبت به کانال مستطیلی بیشتر، نسبت عمق ثانویه کمتر، طول پرش تا دو برابر کمتر، حجم پرش تقریباً ۳۰ درصد بیشتر، حساسیت نسبت به تغییرات دبی کمتر و نسبت به تغییر عمق پایاب بیشتر است. راشوان (Rashwan, 2013) روشی بر مبنای سعی و خطا برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج در کانال‌های با مقطع مثلثی ارائه داد. آچور و دباچ (Achour & Debabèche, 2003) تأثیر آستانه لبه‌تیز بر خصوصیات پرش در کانال مثلثی با زاویه ۹۰ درجه را بررسی و روابطی را برای نسبت عمق ثانویه و سایر خصوصیات پرش بر حسب خصوصیات آستانه لبه‌تیز ارائه کردند.

دباچ و آچور (Debabèche & Achour, 2007) به بررسی خصوصیات پرش کنترل شده پرداختند و روابطی برای کنترل پرش با استفاده از آستانه لبه‌تیز و لبه‌پهن

آوردن سطح آب و در نتیجه آبگیری و انحراف جریان مورد نیاز در شبکه‌های آبیاری و زهکشی بهره‌گرفت (Achour & Debabèche, 2003).

لازم به ذکر است استفاده از مقطع مثلثی برای سازه‌های بزرگ از قبیل حوضچه آرامش سرریزها و بندهای انحرافی چندان معمول نیست؛ اما چنانچه در موارد دیگر از قبیل شبکه‌های آبیاری و زهکشی به کار گرفته شود مزایای قابل توجهی خواهد داشت. چنانچه عمق پایاب کافی در کانال وجود نداشته باشد، جریان فوق‌بحرانی با حفظ وضعیت به سمت پایین‌دست حرکت کرده و انحراف جریان مقدور نخواهد بود. در این شرایط می‌توان با قرار دادن آستانه (آب پایه) انتهایی در فاصله مناسب از ابتدای پرش، یک پرش هیدرولیکی کنترل شده تشکیل داد و از قابلیت‌های آن برای منظورهای ذکر شده استفاده کرد (شکل ۱).

از دیگر مزایای آستانه علاوه بر کنترل پرش می‌توان به کاهش عمق پایاب مورد نیاز، افزایش استهلاک انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک و اصلاح الگوی جریان به‌منظور حفاظت پایین‌دست، بسته به موقعیت و هندسه آستانه و کاهش طول مورد نیاز اشاره کرد (Hager & Li, 1992). بررسی‌های تئوری و تجربی در خصوص تعیین ارتفاع آستانه در مقاطع با شکل‌های مختلف توسط محققین انجام شده است (Forester & Skrinde, 1950; Achour & Debabèche, 2003; Gord-Noshahri *et al.*, 2009; Parsamehr *et al.*, 2012; Khorshidi *et al.*, 2015).

نخستین پژوهش‌ها در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی توسط آرگیروپولوس (Argyropoulos, 1962) و راجاراتنام (Rajaratnam, 1964) گزارش شده است. همچنین سیلوستر (Silvester, 1964) آزمایش‌هایی را در دو کانال مثلثی به‌ترتیب با زوایای داخلی ۴۷ و ۶۰ درجه انجام داد. نتایج وی نشان

طول ۹، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۶ متر از جنس شیشه شفاف انجام شد (شکل ۲). مقطع این کانال در بازه‌ای به طول ۳/۶ متر از ابتدای کانال با قرار دادن دیواره‌های مایل با زاویه ۴۲/۸۵ درجه نسبت به افق به مقطع مثلثی تغییر داده شد و ادامه کانال به صورت مستطیلی می‌باشد.

در انتهای کانال با مقطع مثلثی یک دریچه کشویی به منظور کنترل عمق جریان در آزمایش‌های مختلف تعبیه گردید. زاویه داخلی کانال مثلثی برابر ۹۴/۴ درجه است. آزمایش‌ها در محدوده دبی $1/6 \leq Q \leq 6/8$ لیتر بر ثانیه و با دو بازشدگی دریچه کشویی به ترتیب برابر ۲/۵ و ۴/۳ سانتی‌متر که اعداد فرود ورودی در دامنه $12/46 \leq Fr \leq 2/57$ را ایجاد می‌کند، انجام شد.

لازم به ذکر است که به منظور کاهش تلاطم در جت ورودی و هم‌راستا شدن دیواره‌ها و کف کانال با خطوط جریان، از تبدیل‌های سهموی در مقطع قبل از دریچه کشویی استفاده شد. طول جهش L_j معادل فاصله از ابتدای جهش تا نقطه‌ای که سطح آب تقریباً افقی شود، در نظر گرفته شد. پروفیل سطح آب توسط یک عمق‌سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر برداشت و سایر مشخصه‌های جهش با توجه به آن استخراج شد.

پیشنهاد کردند. وطن‌خواه و امید (Vatankhah & Omid, 2010) روش حل مستقیمی برای پرش هیدرولیکی در مقاطع مثلثی با شیب کف افقی ارائه نمودند. حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar et al., 2011) با استفاده از اصل پایستگی اندازه حرکت، رابطه‌ای برای تعیین نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در مقاطع مثلثی ارائه نمودند و با انجام تحلیل حساسیت نشان دادند که در دامنه کاربردی اعداد فرود جریان ورودی (اعداد فرود بزرگ‌تر از ۴/۵)، میزان حساسیت روابط ارائه شده برای طول‌های مشخصه پرش هیدرولیکی چندان قابل توجه نیست.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی خصوصیات پرش هیدرولیکی در یک کانال با مقطع مثلثی و تعیین ارتفاع لازم برای آستانه انتهایی لبه‌پهن، که به لحاظ پایداری سازه‌ای و هزینه‌های تعمیر و نگهداری نسبت به آستانه لبه‌تیز برتری دارد، در راستای رفع مشکلات احتمالی در شرایط عدم وجود عمق پایاب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در یک کانال مستطیلی به



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر

به منظور کنترل جهش از آستانه‌های انتهایی مثلثی از جنس چوب به طول ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع متغیر استفاده شد (شکل ۳). برای افزایش دقت در تغییر ارتفاع آستانه ورقه‌های پلکسی‌گلاس با ضخامت ۴ میلی‌متر به کار رفت. بعد از حذف عمق پایاب، به گونه‌ای که جریان فوق‌بحرانی خارج شده از بازشدگی دریچه در طول کانال ادامه یابد، ابتدا آستانه با ارتفاع کم در انتهای جهش تعبیه و به تدریج ارتفاع آن افزایش داده می‌شد تا اینکه پنجه پرش تشکیل شده مشابه حالت بدون آستانه در فاصله ۵ سانتی‌متری از دریچه کشویی قرار گیرد. در این وضعیت ارتفاع آستانه و طول‌های مشخصه پرش در خط مرکزی کانال، توسط عمق سنج برداشت شد.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{m,i} - X_{o,i})^2}{n}}}{X_{o,max} - X_{o,min}} \quad (1)$$

که در آن، $n =$ تعداد داده‌ها، $X_{m,i}$ و $X_{o,i} =$ مقدار محاسبه شده و اندازه‌گیری شده پارامتر مورد نظر؛ و $X_{o,max}$ و $X_{o,min} =$ بیشترین و کمترین مقدار پارامتر مورد نظر.



شکل ۳ - نمایی از برخی آستانه‌های انتهایی لبه‌پهن با ارتفاع‌های مختلف به کار رفته در آزمایش‌ها

(Hager & Wanoschek, 1987) و آچور و دبایچ

(Achour & Debabèche, 2003) نشان داده شده است.

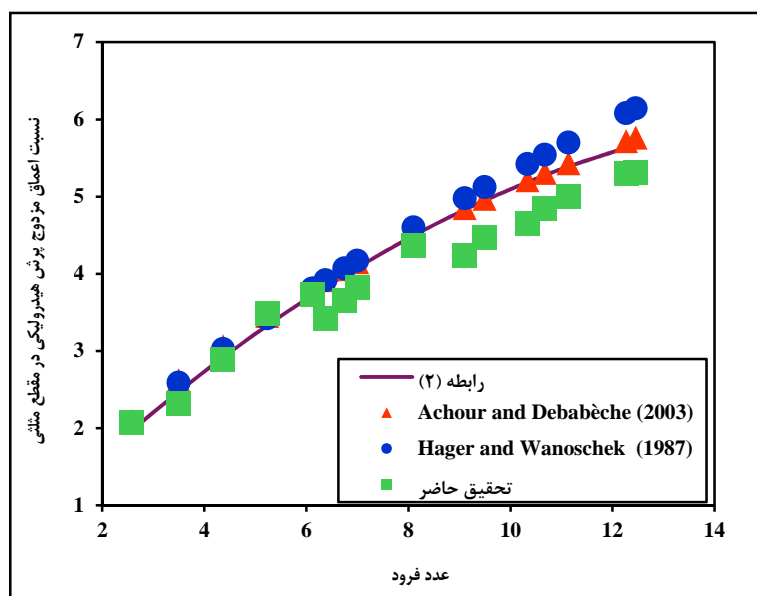
با توجه به انطباق نسبتاً مناسب داده‌های به‌دست آمده از تحقیق حاضر و همچنین تحقیقات فوق، رابطه ۲ با استفاده از رگرسیون به‌منظور محاسبه نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی در مقاطع مثلثی به‌دست می‌آید. ضریب همبستگی رابطه به‌دست آمده $R^2 = 0.98$ و $NRMSE = 0.11$ می‌باشد.

$$Y = -0.019Fr^2 + 0.660Fr + 0.396 \quad (2)$$

نتایج و بحث

در شکل ۴ تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی بر حسب عدد فرود جریان ورودی در مقطع مثلثی آورده شده است. به‌ازای تمامی اعداد فرود در دامنه آزمایش‌های تحقیق حاضر، نسبت اعماق مزدوج در کانال مثلثی به‌مراتب کمتر از کانال مستطیلی است؛ همچنین در این شکل رابطه تئوری، که بر مبنای اصل پایستگی اندازه حرکت توسط حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar et al., 2011) ارائه شده، همراه با نتایج ارائه شده توسط هاگر و ونوسچک

لازم به ذکر است که روابط ارائه شده در تحقیق حاضر بر اساس مجموعه‌ای از داده‌های موجود در منابع مختلف بوده است. از طرفی، یکی از پارامترهای مهم در مقاطع مثلثی زاویه رأس می‌باشد که در تحقیقات مختلف متفاوت است. بنابراین یکی از دلایل اختلاف بین نتایج پژوهش‌های مختلف که در تحقیق حاضر به آنها اشاره شده است، می‌تواند ناشی از همین مسأله باشد.



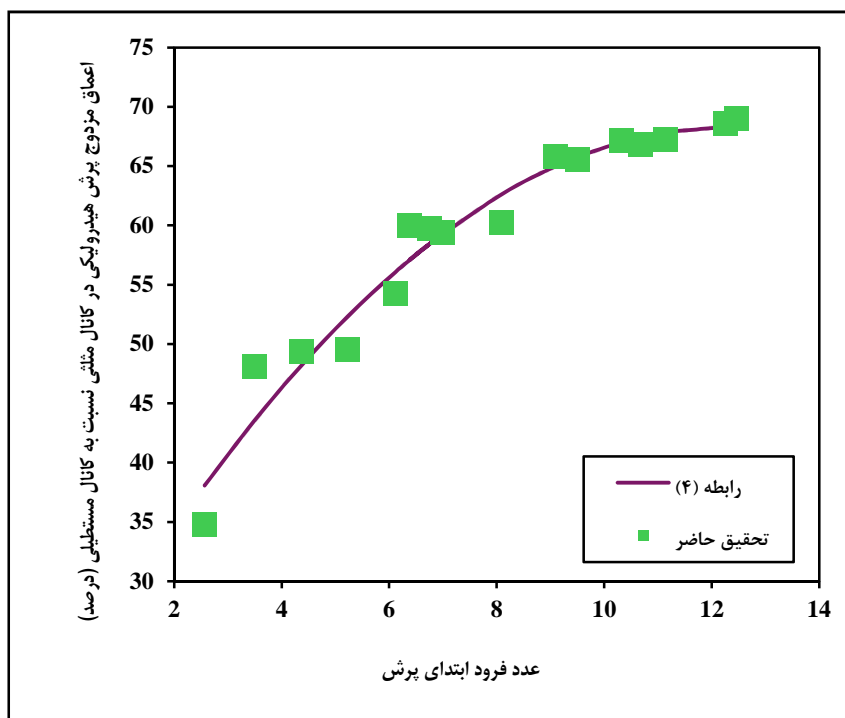
شکل ۴- تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی بر حسب عدد فرود جریان ورودی

با افزایش عدد فرود ابتدای پرش، میزان کاهش در اعماق مزدوج در مقطع مثلثی نسبت به مقطع مستطیلی (رابطه ۳) کاهش می‌یابد.

$$R_Y = \frac{Y_{rec} - Y_{tri}}{Y_{rec}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، Y_{tri} و Y_{rec} به ترتیب نسبت اعماق مزدوج در کانال‌های مستطیلی و مثلثی.

در شکل ۵ میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی و کانال مستطیلی بر حسب عدد فرود نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که همواره نسبت اعماق مزدوج در کانال مثلثی کمتر از مقدار متناظر در کانال مستطیلی می‌باشد. بنابراین، به‌ازای یک عدد فرود و عمق اولیه پرش یکسان، مقطع مثلثی در مقایسه با مقطع مستطیلی به عمق پایاب کمتری برای تشکیل پرش نیاز دارد. نتایج نشان می‌دهد



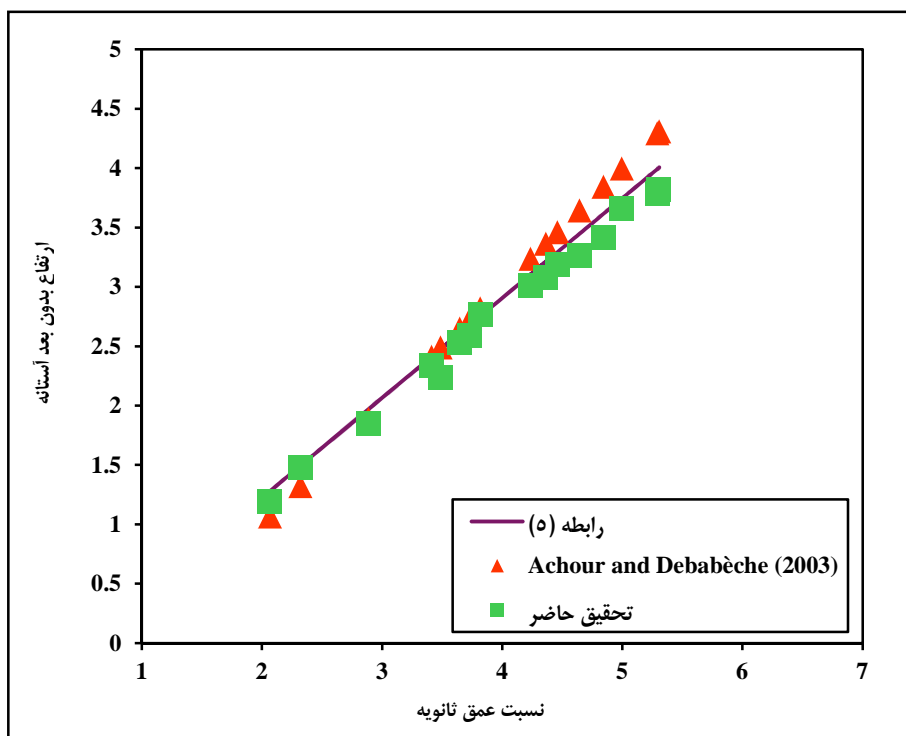
شکل ۵- میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی نسبت به کانال مستطیلی بر حسب عدد فرود ابتدای پرش

تغییرات پارامتر ارتفاع بدون بعد آستانه انتهایی لبه پهن بر حسب نسبت عمق ثانویه پرش در کانال مثلثی در شکل ۶ رسم شده است. بر اساس این شکل می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع بی‌بعد آستانه، نسبت عمق ثانویه نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با استفاده از آستانه انتهایی لبه پهن با ارتفاع مناسب می‌توان در شرایطی که به هر دلیلی عمق پایاب کافی در پایاب وجود ندارد، اقدام به تشکیل پرش هیدرولیکی کنترل شده نمود. با استفاده از نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر و همچنین داده‌های آچور و دبابج (Achour & Debabèche, 2003) رابطه جدیدی به صورت رابطه ۵ با استفاده از رگرسیون و با ضریب همبستگی $R^2=0/98$ و $NRMSE=0/05$ برای تعیین ارتفاع بدون بعد آستانه به دست آمده است:

$$S = -0.458 + 0.841Y \quad (5)$$

در محدوده اعداد فرود بررسی شده در تحقیق حاضر، این مقدار کاهش در دامنه ۳۵-۷۰ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد در مواردی که از نظر فنی و اجرایی استفاده از مقطع مثلثی امکان‌پذیر باشد، در مقایسه با مقطع مستطیلی صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی در ساخت مستهلک‌کننده انرژی قابل انتظار است. بر اساس داده‌های به دست آمده در تحقیق حاضر و با استفاده از رگرسیون، رابطه‌ای با ضریب همبستگی $R^2=0/96$ و $NRMSE=0/06$ برای تعیین میزان کاهش در اعماق مزدوج پرش در مقطع مثلثی در مقایسه با مقطع مستطیلی بر حسب عدد فرود جریان به صورت رابطه ۴ ارائه شده است:

$$R_Y = -0.318 Fr^2 + 7.837 Fr + 20.043 \quad (4)$$



شکل ۶- تغییرات پارامتر ارتفاع بدون بعد آستانه در مقابل نسبت عمق ثانویه

قبلی مشاهده می‌شود. در اعداد بزرگ‌تر از ۶ به نظر می‌رسد که به دلیل سرعت زیاد جریان و بیشتر بودن زاویه رأس مقطع مثلثی در تحقیق حاضر در مقایسه با پژوهش‌های قبلی، مقادیر پارامترهای مورد بررسی کمتر از مقادیر گزارش شده در تحقیقات پیشین می‌باشد.

به منظور بررسی تغییرات طول پرش تحت تأثیر حضور آستانه انتهایی لبه پهن و مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین، تغییرات پارامتر بدون بعد $X=L_j/Y_1$ در مقابل پارامتر بدون بعد $H=S+Fr^{0.4}$ در شکل ۸ ترسیم شده است.

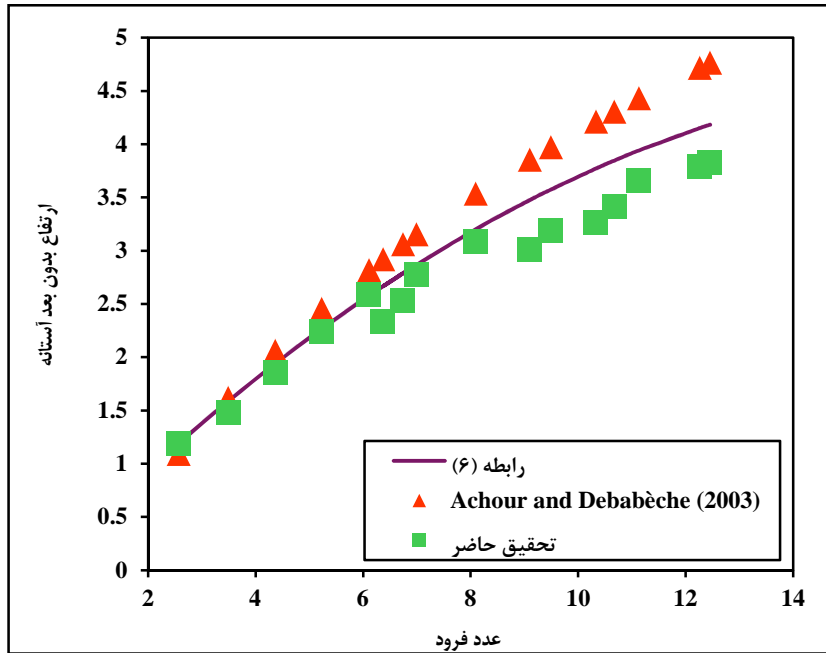
با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که با همبستگی مثبتی بین این دو پارامتر وجود دارد و با افزایش پارامتر H مقدار پارامتر X نیز افزایش می‌یابد. همچنین انطباق مناسبی بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج ارائه شده توسط آچور و دباچ (Achour & Debabèche, 2003) وجود دارد. با این وجود، به ازای یک مقدار مشخص H ، مقدار پارامتر X حدود ۱۰ درصد اختلاف سیستماتیک در مقایسه

تغییرات ارتفاع بدون بعد آستانه انتهایی لبه پهن در برابر عدد فرود ابتدای پرش هیدرولیکی در شکل ۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد فرود، ارتفاع آستانه بیشتری برای کنترل پرش هیدرولیکی نیاز است. با استفاده از رگرسیون بر داده‌های تحقیق حاضر و نتایج آچور و دباچ (Achour & Debabèche, 2003)، رابطه ۶ با ضریب همبستگی $R^2=0.96$ و $NRMSE=0.11$ برای تعیین ارتفاع بدون بعد آستانه بر حسب عدد فرود ابتدای پرش به دست آمده است:

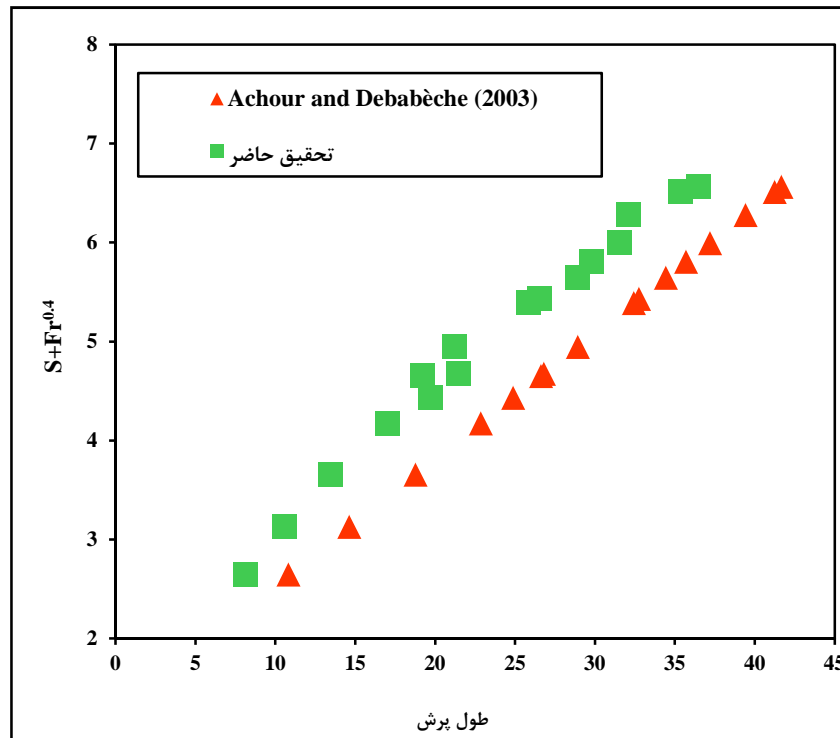
$$S = -0.014 Fr^2 + 0.513Fr - 0.034 \quad (6)$$

از این رابطه می‌توان در طراحی ارتفاع آستانه انتهایی لبه پهن برای تشکیل پرش هیدرولیکی کنترل شده در کانال مثلثی استفاده کرد. همچنین مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که به ازای اعداد فرود کمتر از ۶، انطباق مناسبی بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج محققان

با مقدار گزارش شده توسط آپور و دباچ نشان‌دهنده دقت اندازه‌گیری در آزمایش‌های مختلف در (Achour & Debabèche, 2003) مشاهده می‌شود که تحقیق حاضر است.



شکل ۷- تغییرات ارتفاع بی‌بعد آستانه انتهایی لبه پهن در مقابل عدد فرود ابتدای پرش



شکل ۸- تغییرات پارامتر ارتفاع بی‌بعد $S+Fr^{0.4}$ در مقابل طول پرش بدون بعد

نتیجه‌گیری

آب مورد نیاز را انحراف داد، اقدام به تشکیل یک پرش هیدرولیکی کنترل‌شده در کانال کرد و از قابلیت‌های آن برای منظوره‌های گوناگون استفاده کرد. نتایج به‌دست آمده به‌ویژه در اعداد فرود کمتر از ۶، مطابقت خوبی با محدود کارهای انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد. ارتفاع آستانه به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که تأثیری بر نسبت عمق ثانویه نداشته باشد. روابط تجربی برای پارامترهای بی‌بعد نسبت عمق ثانویه و ارتفاع بی‌بعد آستانه برحسب عدد فرود جریان ورودی پیشنهاد شده است که می‌توان در طراحی‌ها از این رابطه برای تشکیل یک پرش کنترل‌شده در شرایطی که عمق پایاب کافی برای شکل‌گیری پرش وجود ندارد استفاده کرد.

در این تحقیق به بررسی امکان تأمین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در یک مقطع مثلثی با استفاده از آستانه انتهایی لبه‌پهن پرداخته شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی در یک کانال آزمایشگاهی و با زاویه رأس ۹۴/۴ درجه انجام شد. نتایج نشان داد که مقطع مثلثی در مقایسه با مقطع مستطیلی به عمق پایاب بسیار کمتری نیاز دارد که با توجه به عدد فرود این مقدار می‌تواند تا ۷۰ درصد کمتر باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مشخص می‌شود که با قرار دادن یک آستانه لبه‌پهن در یک موقعیت مناسب در کانال مثلثی می‌توان در شرایطی که عمق پایاب به اندازه‌ای نیست که بتوان مقدار

مراجع

- Abbaspour, A., Hosseinzadeh-Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Sadradini, A. 2008. Effect of sinusoidal corrugated bed on characteristics of hydraulic jump. *Water Soil Sci.* 19, 13-26. (in Persian)
- Achour, B. and Debabèche, M. 2003. Control of hydraulic jump by sill in triangular channel. *J. Hydraul. Res.* 41(3): 319-325.
- Argyropoulos, P. A. 1962. General solution of the hydraulic jump in sloping channels. *J. Hydraul. Div.* 88(4): 61-75.
- Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. New York.
- Debabèche, M. and Achour, B. 2007. Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. *J. Hydraul. Res.* 45(1): 135-139.
- Esmaeili-Varaki, M. and Omid, M. H. 2007. Determination of characteristics of diverging hydraulic jump in rectangular and trapezoidal sections. *Iranian Water Res. J.* 2(2): 27-35. (in Persian)
- Esmaeili-Varaki, M., Sahebi, F., Navabian, M. and Amiri, Z. 2013. Economical optimization of diverging stilling basins with trapezoidal and rectangular sections. *J. Water Soil Conserv.* 21(5): 49-70. (in Persian)
- Forester, J. W. and Skrinde, R. A. 1950. Control of the Hydraulic Jump by Sills. *T. Am. Soc. Civil Eng. ASCE.* 115(1): 973-987.
- Gord-Noshahri, A., Omid, M. H. and Kouchakzadeh, S. 2009. Effect of broad crested sill on the characteristics of hydraulic jump in diverging stilling basins. *Iranian Water Res. J.* 41(1): 79-85. (in Persian)
- Hager, W. H. and Li, D. 1992. Sill-controlled energy dissipater. *J. Hydraul. Res.* 30(2): 165-181.
- Hager, W. H. and Wanoschek, R. 1987. Hydraulic jump in triangular channel. *J. Hydraul. Res.* 25(5): 549-564.

- Hamidifar, H., Omid, M. H. and Farhoudi, J. 2011. Hydraulic jump in a triangular section and comparison with rectangular section. *J. Water Soil Sci. (JWSS)*. 14(54): 27-36. (in Persian)
- Kasi, A., Esmaili-Varaki, M. and Farhoudi, J. 2013. Development of explicit equations for estimating sequent depth ratio on adverse slopes. *Iranian Water Res. J.* 8(15): 155-166. (in Persian)
- Khorshidi, M., Vatankhah, A. and Omid, M. H. 2015. An explicit equation for calculating sill height in trapezoidal stilling basins. *Iranian Water Res. J.* 18: 13-22. (in Persian)
- Omid, M. H., Esmaili-Varaki, M. and Narayana, R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *J. Hydraul. Res.* 45(4): 512-518.
- Omid, M. H., Gord-Noshahri, A. and Kouchakzadeh, S. 2010. Sill-controlled hydraulic jump in a gradually expanding channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*. 163(10): 515-522.
- Parsamehr, P., Farsadizadeh, D. and Hosseinzadeh-Dalir, A. 2012. Effect of end sill and artificial roughness on the characteristics of hydraulic jump over adverse slopes. *J. Water Soil*. 27(3): 581-591. (in Persian)
- Rajaratnam, N. 1964. The forced hydraulic jump. *Water Power*. 16(1): 14-19.
- Rajaratnam, N. 1967. *Hydraulic Jumps, Advances in Hydrosience*. Vol. 4. Academic Press. New York.
- Rashwan, I. M. H. 2013. Analytical solution to problems of hydraulic jump in horizontal triangular channels. *Ain Shams Eng. J.* 4(3): 365-368.
- Sandover, J. A. and Holmes, P. 1962. The hydraulic jump in trapezoidal channels. *Water Power*. 14(11): 445-449.
- Silvester, R. 1964. Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels. *J. Hydraul. Div.* 90(1): 23-56.
- Vatankhah, A. R. and Omid, M. H. 2010. Direct solution to problems of hydraulic jump in horizontal triangular channels. *Appl. Math. Lett.* 23(9): 1104-1108.

Hydraulic Jump in a Triangular Channel and Its Control Using a Broad Crested End Sill

H. Hamidifar* and M. H. Omid

* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.
Email: hamidifar@shirazu.ac.ir

Received: 20 January 2016, Accepted: 8 May 2016

Hydraulic jump has been used widely for dissipating excess energy downstream of hydraulic structures in irrigation and drainage networks. The characteristics of hydraulic jump in triangular sections have not been studied as much as those in rectangular, trapezoidal and circular sections. In this paper, the characteristics of hydraulic jump in a triangular channel with broad crested end sill is studied. The experiments are carried out in a laboratory flume of 9 m length, 0.5 m width and 0.6 m height with glass side walls. Different flow discharges and sluice gate openings with issuing jet Froude number in the range of 2.5-12.5 was studied. The results showed that for a given Froude number, the required tail water depth for the triangular section is up to 70% lower than that in a rectangular section. Based on the regression analysis, several empirical equations are proposed for determining sequent depth ratio and dimensionless sill height as a function of inflow Froude number. The proposed equations can be used in designing controlled hydraulic jump in triangular sections where tail water is not adequate for a classic hydraulic jump.

Keywords: End Sill, Energy Dissipation, Hydraulic Jump, Rectangular Channel, Tail Water