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

حسین حمیدیفر* و محمدحسین امید**

^{*} نگارنـده مسـئول: بخـش مهندسـی علـوم آب، دانشـکده کشـاورزی، دانشـگاه شـیراز، شـیراز، ایـران. تلفـن: ۳۲۲۸۶۱۳۰(۷۱۰)، پیامنگار: hamidifar@shirazu.ac.ir **بهترتیب: استادیار بخش مهندسی علوم آب، دانشگاه شیراز؛ و استاد گروه مهندسـی آبیـاری و آبـادانی، دانشـکده مهندسـی و فنـاوری کشاورزی، دانشگاه تهران. تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۱۹

چکیدہ

یکی از رایج ترین روش ها برای استهلاک انرژی در پاییندست سازه ها در شبکه های آبیاری و زهکشی، استفاده از پرش هیدرولیکی میباشد. برخلاف سایر مقاطع از قبیل مقطع مستطیلی، ذوزنقه ای و دایره ای، پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی تاکنون چندان بررسی نشده است. در این مقاله، ویژگی های پرش هیدرولیکی در یک کانال با مقطع مثلثی همراه با آستانه انتهایی لبه پهن مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش ها در یک کانال مستطیلی به طول ۹، عرض ۰/۰ و ارتفاع ۲/۰ متر از جنس شیشه شفاف و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف شامل دبی های مختلف، دو باز شدگی در یچه و اعداد فرود ابتدای پرش در دامنه ۰/۲۱ – ۰/۲ انجام شدند. نتایج نشان داد که به ازای 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 به دست آمده، رواب قدر یی رای پارامترهای بیبعد نسبت عمق ثانویه و ارتفاع آستانه انتهایی لبه پهن بر حسب عدد فرود جریان ورودی به دست آمد که می توان در طراحی ها از این روابط برای تشکیل پرش کنترل شده، در شرایطی که عمق پایاب کافی برای هیدرولیکی در کانالهای مثلثی وجود نداره، استفاده کرد.

واژههای کلیدی

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

مقدمه

یکی از پدیده های رایج در شبکه های آبیاری و زهکشی که در آن ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت جریان به اندازهٔ قابل توجهی کاسته می شود، پرش هیدرولیکی است که طی آن وضعیت جریان در فاصله کوتاهی از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر مییابد. در این پدیده، سطح آب از ابتدای پرش (پنجه) به تدریج افزایش یافته و در انتهای پرش میدرولیکی عمدتاً در متصل می شود (شکل ۱). پرش هیدرولیکی عمدتاً در

شبکههای آبیاری و زهکشی بعد از دریچههای تنظیم کنندهٔ 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 می گیرد (Chow, 1959).

روش های مختلفی برای افزایش کارایی پرش هیدرولیکی پیشنهاد شده است. از جمله می توان به مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازههای آبیاری و زهکشی/جلد ۱۷/ شماره ۲۲/سال ۱۳۹۵/ص ٥٤-٤٣

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 ذوزنقهای 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 (Sandover & Holmez, است (میا استفاده از پله (مثبت یا منفی)، آستانه (پیوسته یا دندانهدار)، بلوکهای کف، شیبدار نمودن کف و افزایش عرض مقطع (واگرایی) اشاره کرد ,2007, 2007) 2010; Esmaeili-Varaki & Omid, 2007; Abbaspour et al., 2008; Gord-Noshahri et al., 2009; Kasi et al., 2013) مقطع معمول یعنی مستطیلی را به شکلی دیگر تغییر داد که بتواند کارایی پرش را افزایش دهد؟ از دیدگاه اجرایی، مقطع ذوزنقهای با دیوارههای واگرا بسیار مطلوب



شکل ۱-(الف) تصویر شماتیک پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی و (ب) کنترل پرش با استفاده از اَستانه 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 ذوزنقهای و مستطیلی میباشد و کمتر با مشکل ناپایداری مواجه است (Hamidifar *et al.*, 2011). از اینرو میتوان از قابلیت پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی برای بالا

پرش هیدرولیکی در مقاطعی مانند؛ مستطیلی، ذوزنقهای و دایرهای، به تفصیل توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته به گونهای 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

آوردن سطح آب و در نتیجه آبگیری و انحراف جریان مورد نیاز در شبکههای آبیاری و زهکشی بهره گرفت (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 فوق بحرانی 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 مناسب از اقابلیتهای آن برای منظورهای ذکر شده

از دیگر مزایای آستانه علاوه بر کنترل پرش می توان 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 هندسه آستانه و کاهش طول مورد نیاز اشاره کرد (Hager & Li, 1992). بررسیهای تئوری و تجربی در خصوص تعییین ارتفاع آستانه در مقاطع با خصوص تعییین ارتفاع آستانه در مقاطع با (Forester & Skrinde, 1950; Achour & Debabèche, 2003; Gord-Noshahri *et al.*, 2009; Parsamehr *et al.*, 2012; Khorshidi *et al.*, 2015).

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

داد که به طور کلی معادلهٔ مومنتم برای ارزیابی نسبت عمق ثانویه پرش کارایی دارد؛ هرچند که داده های آزمایشگاهی وی تا حدی پایین تر 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 هاگر و ونوسچک (Hager & Vanoschek, 1987) برای شده است. لازم به ذکر است که ایشان آزمایشهای خود را در یک کانال مثلثی با زاویهٔ داخلی ۹۰ درجه نیز مشاهده در یک کانال مثلثی با زاویهٔ داخلی دا در موره عمودی و یک در یک کانال کاملا مثلثی با یک دیواره عمودی و یک دیواره مایل با زاویه ۴۵ درجه انجام داده و نتایج را برای یک کانال کاملا مثلثی برونیابی کردند. در هر حال این برونیابی تا حدی غیرواقعی است زیرا نمی توان از تاثیر دیواره عمودی بر مشخصات پرش در کانال مثلثی که ذاتاً

(Hager & Wanoschek, وونوسچک , Manoschek & Wanoschek) (1987 یک راهحل مجانبی برای نسبت عمق ثانویه و افت انرژی نسبی در طول پرش هیدرولیکی درکانال 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 کمتر و نسبت ایماق مزدوج در کانالهای با مقطع مثلثی محاسبه نسبت اعماق مزدوج در کانالهای با مقطع مثلثی ارائه داد. آچور و دبابچ (Rashwan, 2013) محلسبه نسبت اعماق مزدوج در کانالهای با مقطع مثلثی تأثیر آستانه لبهتیز بر خصوصیات پرش در کانال مثلثی با تاثیر آستانه لبهتیز بر خصوصیات پرش در کانال مثلثی با

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

ییشنهاد کردند. وطن خواه 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 طول های مشخصه پرش هیدرولیکی چندان قابل توجه نیست.

ہــدف از انجــام ایــن تحقیــق، بررســی آزمایشــگاهی خصوصیات پرش هیدرولیکی در یک کانال با مقطع مثلثی و تعیمین ارتفاع لازم برای آسمتانه انتهایی لبه پهمن، کـه بـه لحـاظ پایـداری سـازهای و هزینـههـای تعمیـر و نگهداری نسبت به آستانه لبهتیـز برتـری دارد، در راسـتای رفع مشکلات احتمالی در شرایط عدم وجود عمق یایاب می باشد.

مواد و روشها

طول ۹، عرض ۵/۵ 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 زاویهٔ ۴۲/۸۵ درجه نسبت به افق به مقطع مثلثی تغییر داده شد و ادامه کانال به صورت مستطیلی می باشد.

در انتهای کانال با مقطع مثلثی یـک دریچـه کشـویی بهمنظور كنترل عمق جريان در آزمايشهاى مختلف تعبيه گردید. زاویه داخلی کانال مثلثی برابر ۹۴/۴ درجه است. آزمایشها در محدوده دبی ۱/۶≤Q≤۶/۸ لیتر بر ثانیـه و بـا دو بازشدگی دریچه کشویی بهترتیب برابر ۲/۵ و ۴/۳ سانتیمتر که اعداد فرود ورودی در دامنه ۲/۵۷≤*Fr*≤۱۲/۴۶ را ایجاد می کند، انجام شد.

لازم به ذکر است که بهمنظور کاهش تلاطم در جت ورودی و همراستا شدن دیوارهها و کف کانال با خطوط جریان، از تبدیل های سهموی در مقطع قبل از دریچـه کشـویی اسـتفاده شـد. طـول جهـش معادل فاصله از ابتدای جهش تـا نقطـهای کـه سـطح L_j آب تقريبا افقى شود، در نظر گرفته شد. پروفيل سطح آب توسط یک عمقسنج با دقت ۰/۱± میلیمتر برداشت و آزمایشهای تحقیق حاضر در یک کانال مستطیلی به سایر مشخصههای جهش با توجه به آن استخراج شد.



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

به منظور بررسی میزان دقت روابط ارائه شده در تحقیق حاضر از دو پارامتر آماری شامل ضریب همبستگی R² و ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) که به صورت رابطه ۱ تعریف می شود، استفاده گردید.

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

که در آن،

ا تعداد دادهها، $X_{m,i}$ و $X_{o,i}$ مقدار محاسبه شده و $= X_{o,min}$ و $X_{o,max}$ و $X_{o,min}$ و $X_{o,max}$ و اندازه گیری شده پارامتر مورد نظر؛ و مقدار بارامتر مورد نظر. به منظور کنترل جهش از آستانه های انتهایی مثلثی از جنس چوب به طول ۲۰ سانتی متر و ارتفاع متغیر استفاده شد (شکل ۳). برای افزایش دقت در تغییر ارتفاع آستانه ورقه های پلکسی گلاس با ضخامت ۴ میلی متر به کار رفت. بعد از حذف عمق پایاب، به گونه ای که جریان فوق بحرانی 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 می شد تا اینکه پنجه پرش تشکیل شده مشابه حالت بدون آستانه در فاصله مانتی متری از دریچه کشویی قرار گیرد. در این وضعیت ارتفاع آستانه و طول های مشخصه پرش در خط مرکزی کانال، توسط عمق سنج برداشت شد.



شکل ۳ – نمایی از برخی آستانههای انتهایی لبه پهن با ارتفاعهای مختلف به کار رفته در آزمایشها

نتایج و بحث

(Hager & Wanoschek, 1987) و آچور و دبابچ (Achour & Debabèche, 2003) نشان داده شده است. با توجه به انطباق نسبتاً مناسب دادههای بهدست آمده از تحقیق حاضر و همچنین تحقیقات فوق، رابطهٔ ۲ با امده از رگرسیون بهمنظور محاسبه نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی در مقاطع مثلثی بهدست میآید. ضریب همبستگی رابطه بهدست آمده ۸۹/۰=R و میباشد.

$$Y = -0.019Fr^2 + 0.660Fr + 0.396 \tag{(7)}$$

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 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 مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازههای آبیاری و زهکشی/جلد ۱۷/ شماره ٦٦/سال ۱۳۹۵/ص ٥٤ –٤٣

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 میاشد 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 ٤- 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 (رابطهٔ ۳) کاهش مییابد.

$$R_Y = \frac{Y_{rec} - Y_{tri}}{Y_{rec}} \times 100 \tag{(7)}$$

که در آن،

Y_{rec} و Y_{tri} بهترتیب 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

```
بررسی پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی و...
```



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 بی بعد 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 نایاب کافی در پایاب وجود ندارد، اقدام به پایاب کافی در پایاب وجود ندارد، اقدام به دادههای آچور و دبابچ (Achour & Debabèche, 2003) دادههای آچور و دبابچ الطه ۵ با استفاده از رگرسیون و با ضریب همبستگی ۸۹/۰۰=R و ۵۰/۰۰=*NRMSE* برای با ضریب همبستگی ۸۹/۰۰=R و ۵۰/۰۰

$$S = -0.458 + 0.841Y$$
 (Δ)

در محدوده اعداد فرود بررسی شده در تحقیق حاضر، این مقدار کاهش در دامنه ۷۰–۳۵ درصد میباشد که نشان میدهد در مواردی که از نظر فنی و اجرایی استفاده از مقطع مثلثی امکان پذیر باشد، در مقایسه با مقطع مستطیلی صرفه جویی اقتصادی قابل توجهی در ساخت مستهلک کننده انرژی قابل انتظار است. بر اساس دادههای به دست مده در تحقیق حاضر و با استفاده از رگرسیون، رابطهای با آمده در تحقیق حاضر و با استفاده از رگرسیون، رابطهای با مریب همبستگی ۹۶/۰۰=R و ۶۰/۰۶=0 از میروج برای تعیین میزان کاهش در اعماق میزدوج پرش در مقطع مثلثی در مقایسه با مقطع مستطیلی بر حسب عدد فرود جریان به صورت رابطه ۴ ارائه شده

$$R_{\rm v} = -0.318 \, Fr^2 + 7.837 Fr + 20.043 \tag{(f)}$$



شکل ٦- تغییرات پارامتر ارتفاع بدون بعد استانه در مقابل نسبت عمق ثانویه

تغییرات ارتفاع بدون بعد آستانه انتهایی لبهپهن 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 دبابچ (Achour & Debabèche, 2003)، نتایج آچور و دبابچ RP3E و ۲۰/۱۹=۳ و ۸۲/۱۰ ابطهٔ ۶ با ضریب همبستگی ۹۶/۹۰=۳ و ۲۰/۱۹

$$S = -0.014 \, Fr^2 + 0.513 Fr - 0.034 \qquad (9)$$

از این رابطه میتوان در طراحی ارتفاع آستانه انتهایی لبهپهن 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

قبلی مشاهده می شود. در اعداد فرود بزرگ تر از ۶ به نظر می رسد که به دلیل سرعت زیاد جریان و بیشتر بودن زاویه رأس مقطع مثلثی در تحقیق حاضر در مقایسه با پژوهش های قبلی، مقادیر پارامترهای مورد بررسی کمتر از مقادیر گزارش شده در تحقیقات پیشین می باشد.

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

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

با مقدار گزارش شده توسط آچور و دبابچ نشاندهنده دقت اندازه گیری در آزمایش های مختلف در (Achour & Debabèche, 2003) مشاهده می شود 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

نتيجهگيري

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

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 زاویهٔ 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 درکانال مثلثی میتوان در

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., Esmaeili-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., Esmaeili-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 Hydroscience. 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.

Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering/Vol.17/No.66/2016/P:43-54

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 were tail water is not adequate for a classic hydraulic jump.

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