

تأثیر زبری بستر و واگرایی تدریجی دیواره‌های حوضچه آرامش بر خصوصیات پرش هیدرولیکی

ساجده حاجی عزیزی^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، اکرم عباس پور^۳ و هادی ارونقی^۴

چکیده

مطالعه روی کاهش انرژی جریان به منظور کاهش خسارت بر ابنیه پایین دست همواره از موضوعات مورد توجه محققان بوده است. یکی از عمده ترین مباحث در این زمینه، بررسی پرش هیدرولیکی و نحوه کنترل آن است. همانند هر سازه دیگری در ساخت سازه‌های کاهنده انرژی جریان نیز، منظور کردن عوامل اقتصادی و سهولت اجرا موضوعی اساسی است؛ بنابراین در این تحقیق اثر زبری بستر و واگرایی دیواره‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی در نسبت‌های واگرایی $(B=b_1/b_2)$ ، ۱، ۰/۶ و ۰/۴ و زبری‌هایی با ارتفاع‌های ۱/۴ و ۲/۸ سانتی‌متر (۰/۶۷ و $h/y_1=1/33$) در محدوده اعداد فرود ۵-۱۳ مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اندازه‌گیری شده با همدیگر و مقادیر متناظر خود در پرش کلاسیک مقایسه و مشخص شد که در حوضچه با واگرایی تدریجی و بستر زبر مقادیر طول نسبی پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق مزدوج به طور متوسط ۳۹ و ۴۴ درصد کمتر از مقادیر متناظر خود در حوضچه مستطیلی با بستر صاف (پرش کلاسیک) هستند. همچنین مشخص شد که اجزای زبر نقش مؤثری در تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی دارند. آنالیز مقادیر افت انرژی نشان داد که پرش هیدرولیکی در حوضچه واگرایی تدریجی با بستر زبر بسیار مؤثرتر از پرش کلاسیک است؛ به طوری که می‌توان شاهد رشد متوسط ۴۷ درصدی آن بود. به منظور تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی، براساس داده‌های آزمایشگاهی روابطی تجربی بر مبنای نرخ واگرایی دیواره‌های حوضچه، ارتفاع نسبی اجزای زبر و عدد فرود بالادست ارائه شد که می‌تواند منجر به طراحی اولیه یک حوضچه واگرایی تدریجی شود.

واژه‌های کلیدی: اعماق مزدوج، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش واگرا، عدد فرود.

ارجاع: حاجی عزیزی س. فرسادی زاده د. عباس پور ا. و ارونقی ه. ۱۴۰۱. تأثیر زبری بستر و واگرایی تدریجی دیواره‌های حوضچه آرامش بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۶: ۹۵-۱۰۶. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.13916.2408>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز.

* نویسنده مسئول: sajedeh.azizi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

مقدمه

کنترل انرژی در جریان‌های با سرعت بالا، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسان در طراحی سازه‌های هیدرولیکی است و ساخت حوضچه آرامش و ایجاد پرش هیدرولیکی در آن، از جمله روش‌های پیشنهادی آن‌ها برای استهلاک انرژی جریان بوده‌است. پرش هیدرولیکی پدیده‌ای از نوع جریان متغیر سریع است که در طول آن جریان از حالت فوق‌بحرانی به حالت زیر بحرانی تبدیل می‌شود. در اثر این پدیده، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش، سرعت به‌صورت محسوسی کاهش و میزان افت انرژی به اندازه قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. از طرفی عملکرد بهینه حوضچه‌های آرامش مستلزم این است که پرش کاملاً در داخل حوضچه رخ دهد که این خود به عمق پایاب بستگی دارد. اگر به هر دلیلی تأمین عمق پایاب مناسب برای وقوع پرش هیدرولیکی میسر یا مقرون‌به‌صرفه نباشد، تغییر شکل مقطع و پلان حوضچه به‌صورت واگرایی ناگهانی یا تدریجی، یک راه‌حل اجرایی مناسب است. مطالعات انجام‌گرفته توسط محققان نیز حاکی از این است که زبربودن کف حوضچه‌های آرامش باعث کاهش طول پرش و به‌تبع آن کاهش طول حوضچه و همچنین کاهش عمق پایاب مورد نیاز می‌شود. اربهابهیراما و ابلا (۱۹۷۱) ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی واگرا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که واگرایی باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش و افزایش افت انرژی می‌شود. خلیفه و کروکودل (۱۹۷۹) بررسی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای تدریجی را مدنظر قرار دادند. نتایج گویای این بود که نسبت به پرش کلاسیک، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش، اتلاف انرژی ۱۵ درصد افزایش و طول پرش هیدرولیکی حدود ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. امید و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در کانال ذوزنقه‌ای واگرا پرداخته و دریافتند برای یک شیب جانبی معین، با افزایش زاویه واگرایی، جهش در حوضچه آرامش به‌ویژه در اعداد فرود بزرگ‌تر، ثابت است و واگرایی حوضچه برای یک شیب جانبی مشخص باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش و افزایش اتلاف انرژی در پرش نسبت به پرش در کانال‌های با مقطع مستطیلی یا ذوزنقه‌ای یکنواخت می‌شود. امید و اسمعیلی ورکی (۱۳۸۴) تأثیر شیب جانبی

و واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که کاهش شیب جانبی در هر زاویه واگرایی موجب کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش طول پرش و افت انرژی در مقایسه با مقطع مستطیلی در همان زاویه واگرایی می‌شود. همچنین افزایش زاویه واگرایی موجب کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای مستقیم شد. میزان این تغییرات با افزایش زاویه واگرایی، در مقطع مستطیلی افزایش و در مقاطع ذوزنقه‌ای برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی افزایش و برای طول پرش کاهش یافت. ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) مطالعه‌ای روی چهار بستر موج‌دار نواری با مقطع ذوزنقه‌ای شکل هم‌عرض کانال در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۲ انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز برای ایجاد پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار کوچک‌تر از عمق پایاب مربوط به پرش هیدرولیکی مشابه روی بسترهای صاف است. گوهری و فرهودی (۲۰۰۹) آزمایشات خود را روی بستر زبر با زبری‌های نواری مستطیلی با دو ارتفاع و پنج فاصله زبری در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ انجام داده و مشاهده کردند عمق ثانویه پرش روی بستر زبر نسبت به بستر صاف کاهش یافته و مقدار کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها افزایش می‌یابد. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) نیز به بررسی تأثیر بستر موج‌دار سینوسی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در محدوده عدد فرود اولیه ۳/۸ تا ۸/۶ پرداختند. آن‌ها نشان دادند مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه است و به شیب موج بستر بستگی ندارد. نصراصفهان‌ی و شفافی بجستان (۲۰۱۲) تأثیر زبری‌های مصنوعی را بر پرش هیدرولیکی روی پله معکوس مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج به‌دست‌آمده افزایش طول زبری تأثیر زیادی در کاهش افت انرژی نداشته، اما ارتفاع زبری در خصوصیات پرش هیدرولیکی تأثیر بسزایی دارد. کاظمیان‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) پرش هیدرولیکی در بستر زبر با زبری‌های مربع و مستطیل شکل در کانال مستطیلی افقی با سه ارتفاع زبری متفاوت ۰/۸، ۱/۶ و ۳/۲ سانتی‌متر را در اعداد فرود ۴ تا ۱۲/۵ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بهترین ارتفاع زبری در کاهش عمق و طول غلتاب، زبری با ارتفاع ۱/۶ سانتی‌متر است. عباسپور و همکاران (۱۳۹۶) تأثیر بستر زبر

مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان است. پارامترهای مؤثر بر این پدیده شامل ρ (جرم واحد حجم آب)، ν (ضریب لزجت سینماتیکی آب)، y_1 (عمق اولیه پرش هیدرولیکی)، y_2 (عمق ثانویه پرش هیدرولیکی)، v_1 (سرعت در عمق y_1)، h (ارتفاع اجزای زبری)، L_j (طول پرش هیدرولیکی)، b_1 (عرض فلوم در مقطع قبل از پرش)، b_2 (عرض فلوم در مقطع بعد از پرش) و g (شتاب ثقل زمین) هستند. معادله آن‌ها را می‌توان به صورت تابع زیر بیان کرد:

$$f_1(\rho, u, y_1, y_2, v_1, h, L_j, b_1, b_2, g) = 0 \quad (۱)$$

معادله (۱) را می‌توان به صورت تابع بدون بُعد زیر ساده کرد:

$$f_2\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{u}{v_1 y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{g y_1}{v_1^2}, \frac{b_1}{y_1}, \frac{b_2}{y_1}\right) = 0 \quad (۲)$$

$\frac{u}{v_1 y_1}$ معکوس عدد رینولدز و نشان‌دهنده تأثیر نیروهای لزجت است. در جریان‌های متلاطم تأثیر نیروی لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز است؛ بنابراین می‌توان تأثیر عدد رینولدز را ناچیز و آن را از معادلات حذف کرد.

همچنین با تقسیم $\frac{b_1}{y_1}$ بر $\frac{b_2}{y_1}$ خواهیم داشت:

$$f_3\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, Fr_1, B\right) = 0 \quad (۳)$$

در معادله (۳)، $\frac{y_2}{y_1}$ نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی، $\frac{h}{y_1}$ ارتفاع نسبی زبری بستر، $\frac{L_j}{y_1}$ طول نسبی پرش هیدرولیکی و B نسبت واگرایی کانال است؛ بنابراین می‌توان خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل نسبت عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی را با استفاده از تئوری باکینگهام به‌عنوان تابعی از پارامترهای بدون بُعد زیر تعریف کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_4\left(\frac{h}{y_1}, Fr_1, B\right) \quad (۴)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = f_5\left(\frac{h}{y_1}, Fr_1, B\right) \quad (۵)$$

مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس شیشه بوده و به‌منظور تسهیل در رصد نیم‌رخ سطح آب، حوضچه آرامش در فاصله ۱/۵۸ متری از

نیمه‌استوانه‌ای را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با زاویه‌های صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۸ درجه بررسی و گزارش کردند که زاویه ۸ درجه دارای بیشترین میزان کاهش عمق مزدوج نسبی و طول پرش هیدرولیکی به‌ترتیب برابر با ۲۶/۲ و ۶۸/۲ درصد بود.

در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی تأثیر زبری و واگرایی دیواره حوضچه آرامش بر خصوصیات پرش هیدرولیکی، آزمایش‌هایی با تغییر مشخصات فیزیکی کانال (میزان واگرایی دیواره‌ها و زبری کف) و شرایط هیدرولیکی (تغییر دبی در اعداد فرود مختلف) انجام شد. هدف از این مطالعه شناخت بهتر مکانیسم پرش در حوضچه واگرا و ایجاد روابطی برای پیش‌بینی خصوصیات آن نظیر طول پرش، عمق پایاب مورد نیاز و میزان استهلاك انرژی در طول پرش بوده‌است؛ زیرا برآورد دقیق این خصوصیات کمک می‌کند تا سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، اقتصادی‌تر و ایمن‌تر طراحی شوند. برای محاسبه مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر و به‌منظور مقایسه کارایی حوضچه‌های واگرا، در این مطالعه از روابط ارائه‌شده توسط دیگر محققان نیز استفاده شده‌است که این روابط را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

جدول ۱- روابط مورد استفاده در این تحقیق

منبع	رابطه
(۱۹۵۵) USBR	$L_j/y_2^2 = 6.1$
هاگر (۱۹۹۲)	$L_j/y_1 = 220 * \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right)$
دانشفراز و همکاران (۱۳۹۸)	$L_j/y_1 = 5.3587 Fr_1 - 0.3581$
ترکمانزاد (۱۳۹۸)	$L_j/y_1 = 10.675 Fr_1 - 10.709 \left(\frac{h}{y_1}\right) - 20.927$
اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)	$\varepsilon = 0.16 Fr_1^2 - 0.8 Fr_1 + 1$ (بستر صاف)
ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷)	$\varepsilon = (Fr_1 - 1)^2$ (بستر زبر)
صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳)	$\varepsilon = 0.058 \times Fr_1^{3.035}$
	$\varepsilon = 0.428 \times Fr_1^{2.256}$

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

به‌طور کلی، مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع واگرای تدریجی و بستر زبر تابعی از خصوصیات جریان،

اجزای زبر با سه تراکم $۸/۷۳$ ، $۹/۷$ و $۱۰/۶۷$ درصد با توجه به ابعاد اجزای زبر و حوضچه آرامش انتخاب شدند و آرایش زبری ۶، ۷ و ۶ آزمایش و تراکم زبری مؤثرتر مورد بررسی قرار گرفت. منظور از میزان تراکم نسبت مساحت اجزای زبر به مساحت کل بستر زبر بوده که با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{a \times N}{A} \times 100 \quad (۶)$$

در معادله بالا، a مساحت هر جز زبری، N تعداد کل زبری‌ها و A مساحت حوضچه آرامش است. در نهایت تراکم $۱۰/۶۷$ درصد به‌عنوان تراکم مؤثر انتخاب شد. انتخاب شکل، ارتفاع و نحوه آرایش زبری‌ها به ترتیب نتیجه مطالعات انجام‌شده توسط محمدعلی (۱۹۹۱)، کاظمیان‌زاده و همکاران (۱۳۸۷)، نیسی و شفاعی بجنستان (۱۳۸۸) و پارسامهر (۱۳۹۶) است؛ بدین ترتیب محل کارگذاری اولین ردیف زبری‌ها از محل تشکیل عمق y_1 ، برابر با ارتفاع اجزای زبر، فاصله زبری‌ها از یکدیگر نیز در ردیف‌های عرضی، $۱/۸$ برابر با عمق اولیه پرش هیدرولیکی و فواصل طولی آن‌ها از یکدیگر، $۲/۲$ برابر عمق اولیه پرش هیدرولیکی بود (پارسامهر، ۱۳۹۶). در پرش هیدرولیکی تشکیل‌شده، برای جلوگیری از برخورد مستقیم جت آب ورودی با اجزای زبر، تاج زبری‌ها با سطح بستر در بالادست و پایین دست هم‌تراز قرار داده شدند (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲). این امر همچنین باعث می‌شود فرورفتگی‌های ایجادشده در کف، مجموعه‌ای از جریان‌های گردابی را ایجاد کرده و تنش برشی بستر را افزایش دهد. برای این منظور از کف کاذب در بالادست و پایین دست حوضچه آرامش استفاده شد. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی و نیم‌رخ سطح آب، از دو سنسور اولتراسونیک دیتالاجیک US30 با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر که روی ریل متحرک نصب شده و امکان جابه‌جایی در طول فلوم را داشت، استفاده شد. طول پرش هیدرولیکی با استفاده از یک نوار متری (با دقت ۱ میلی‌متر) نصب‌شده روی بدنه کانال اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

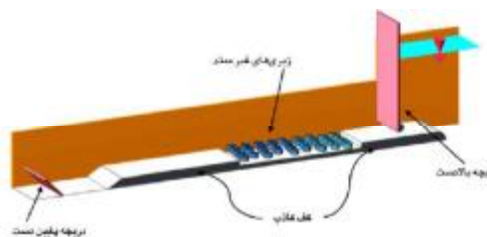
نیم‌رخ سطح آب

طبق نظر چاو (۱۹۵۹) نیم‌رخ سطح آب در پرش هیدرولیکی را می‌توان یک منحنی در نظر گرفت که از مقطع اولیه تا ثانویه امتداد دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت

دریچه بالادست قرار گرفته بود. در این آزمایش‌ها به‌منظور تشکیل جریان فوق‌بحرانی از یک دریچه کشویی در ابتدای فلوم استفاده شد. همچنین برای جلوگیری از انقباض خطوط جریان خروجی از لبه دریچه بالادست، پشت دریچه سازه‌ای به شکل نیم‌دایره به قطر $0/۲$ متر ساخته و نصب شده بود. ارتفاع بازشدگی دریچه در همه آزمایش‌ها ثابت ($۲/۱$ سانتی‌متر) بود و تغییرات عدد فرود اولیه با تغییر دبی و هد آب داخل مخزن صورت گرفت. همچنین به‌منظور تثبیت موقعیت پرش و ایجاد پرش آزاد، از دریچه پایینی دست که در فاصله نیم‌متری از انتهای فلوم تعبیه شده بود، استفاده شد. شکل ۱ و ۲ به ترتیب نمایی از فلوم آزمایشگاهی و طرح شماتیک این تجهیزات را نشان می‌دهند.



شکل ۱- نمایی از آزمایشگاهی

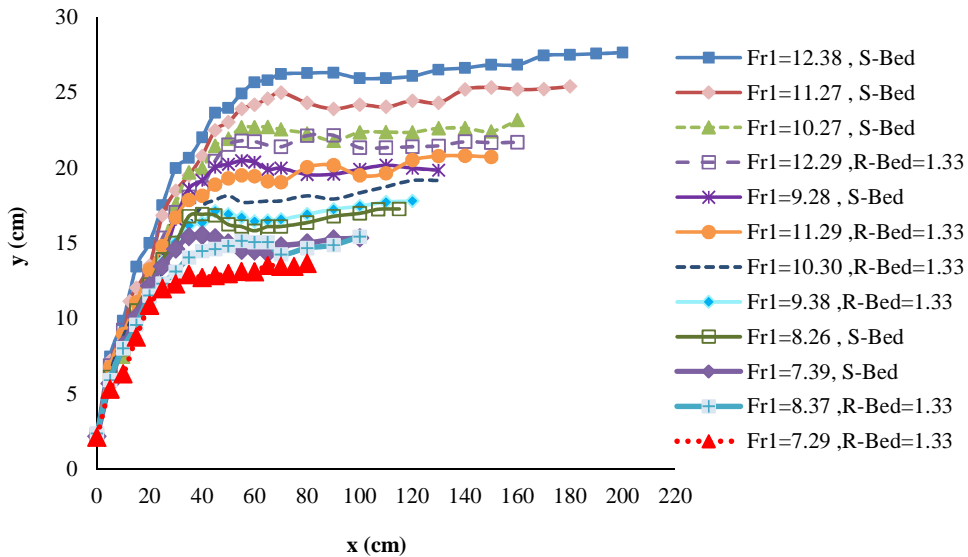


شکل ۲- طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی

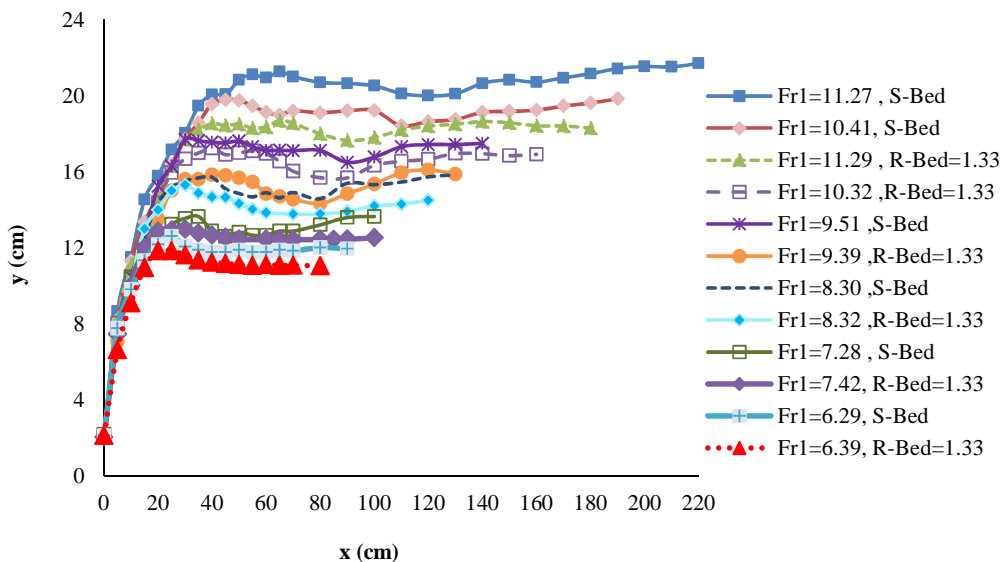
در این آزمایش‌ها به‌منظور ایجاد واگرایی از ورق‌های پلکسی‌گلس با طول $۱/۲$ متر و ارتفاع $0/۵$ متر استفاده شد. در این مطالعه سه نسبت واگرایی (b_1/b_2) برابر با ۱، $0/۴$ و $0/۶$ به ترتیب برای عرض‌های $0/۵$ ، $0/۳$ و $0/۲$ متر در مقطع بالادست کانال در نظر گرفته شده‌است. برای تهیه اجزای زبر غیرممتد مورد نیاز نیز از پلی‌اتیلن استفاده شد. المان‌های زبری با مقطع عمود بر جریان به شکل لوزی و در دو ارتفاع $۱/۴$ و $۲/۸$ سانتی‌متری ساخته شدند.

یکدیگر فاصله گرفته‌اند. همچنین ملاحظه می‌شود که زبری بستر و نسبت‌های واگرایی کانال تأثیر قابل توجهی بر کاهش عمق آب در امتداد نیم‌رخ طولی جریان داشته و به‌طور متوسط باعث کاهش ۴۳ درصدی آن نسبت به پرش کلاسیک شده‌اند. در شکل‌های ۶ تا ۸ نیز به‌منظور مقایسه بهتر، نیم‌رخ‌های سطح آب بدون بُعد در زبری نسبی $0/67$ و نسبت‌های واگرایی مختلف ترسیم شده‌اند. مقادیر y با استفاده از رابطه $Y = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}$ و مقادیر X با استفاده از رابطه $X = \frac{x}{L_j}$ بی‌بُعد شدند.

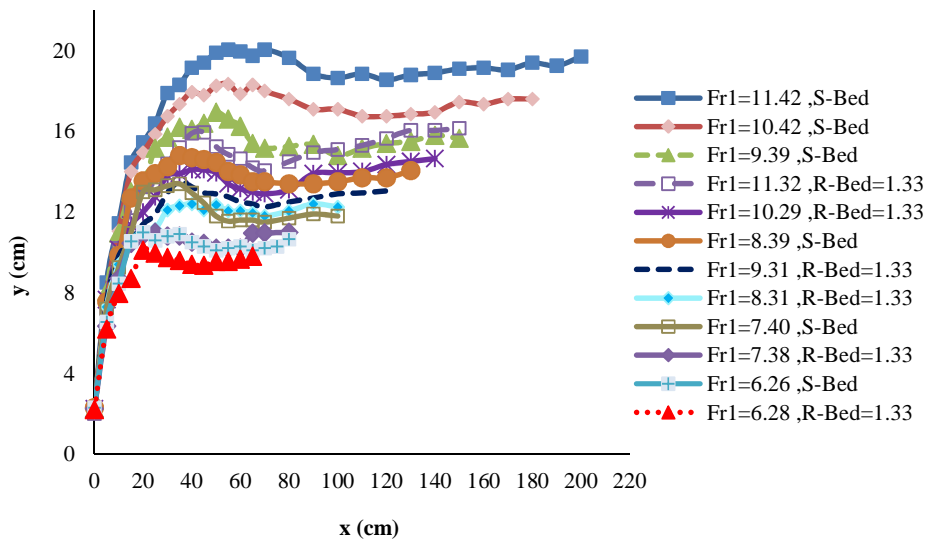
که اگر در مسیر جریان، عاملی باعث تغییر در میزان افت انرژی، عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی شود، تبعاً روی نیم‌رخ سطح آب نیز تأثیرگذار است. در شکل‌های ۳ تا ۵ تعدادی از نیم‌رخ‌های سطح آزاد آب در زبری نسبی $1/33$ و نسبت‌های واگرایی مختلف نمایش داده شده‌اند که در آن‌ها (y) نشان‌دهنده عمق آب در مقاطع مختلف و (x) فاصله از دریچه بالادست است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، در ابتدای پرش تقریباً نیم‌رخ‌ها بر هم منطبق هستند؛ اما با شروع پرش و تبدیل جریان فوق‌بحرانی به زیربحرانی، به‌دلیل افت انرژی زیاد، از



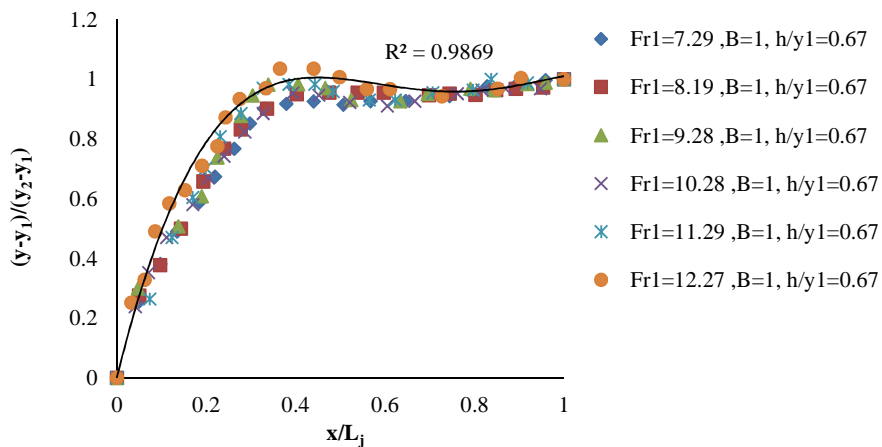
شکل ۳- مقایسه نیم‌رخ سطح آب در کانال با بستر صاف و زبر با زبری نسبی $h/y_1 = 1/33$ و نسبت واگرایی $B=1$



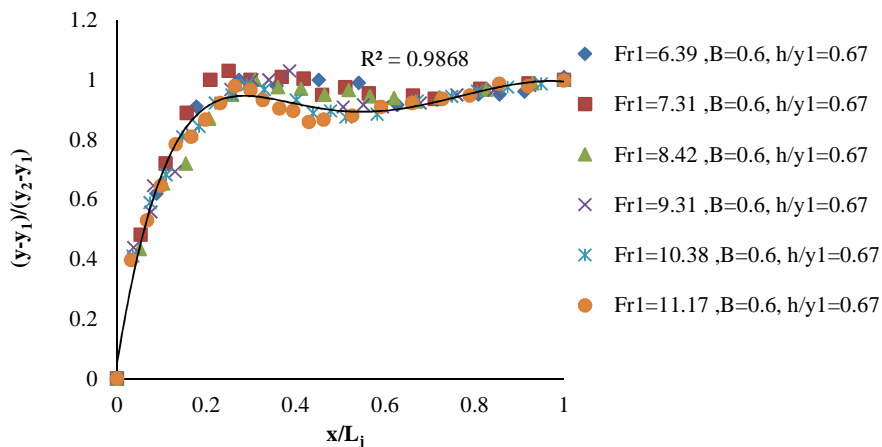
شکل ۴- مقایسه نیم‌رخ سطح آب در کانال با بستر صاف و زبر با زبری نسبی $h/y_1 = 1/33$ و نسبت واگرایی $B=0/6$



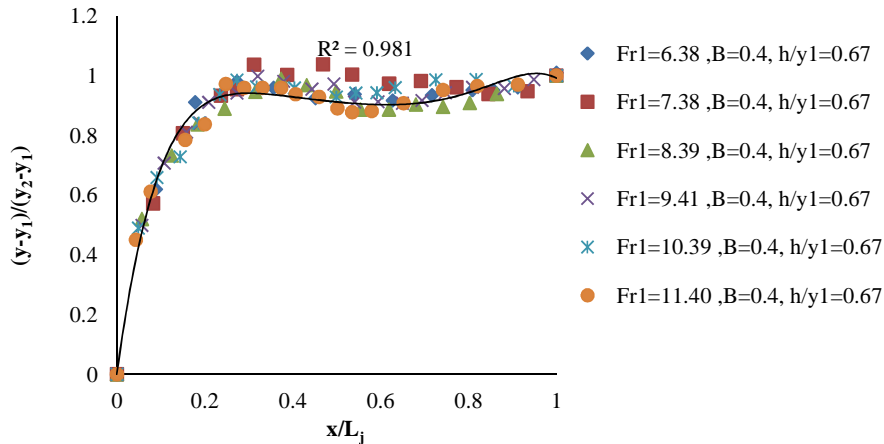
شکل ۵- مقایسه نیمرخ سطح آب در کانال با بستر صاف و زبر با زبری نسبی $h/y_1 = 1/33$ و نسبت واگرایی $B = 0/4$



شکل ۶- مقایسه نیمرخ سطح آب بدون بُعد در بستر با زبری نسبی $h/y_1 = 0/67$ و نسبت واگرایی $B = 1$



شکل ۷- مقایسه نیمرخ سطح آب بدون بُعد در بستر با زبری نسبی $h/y_1 = 0/67$ و نسبت واگرایی $B = 0/6$



شکل ۸- مقایسهٔ نیم‌رخ سطح آب بدون بُعد در بستر با زبری نسبی $h/y_1 = 0.67$ و نسبت واگرایی $B = 0.4$

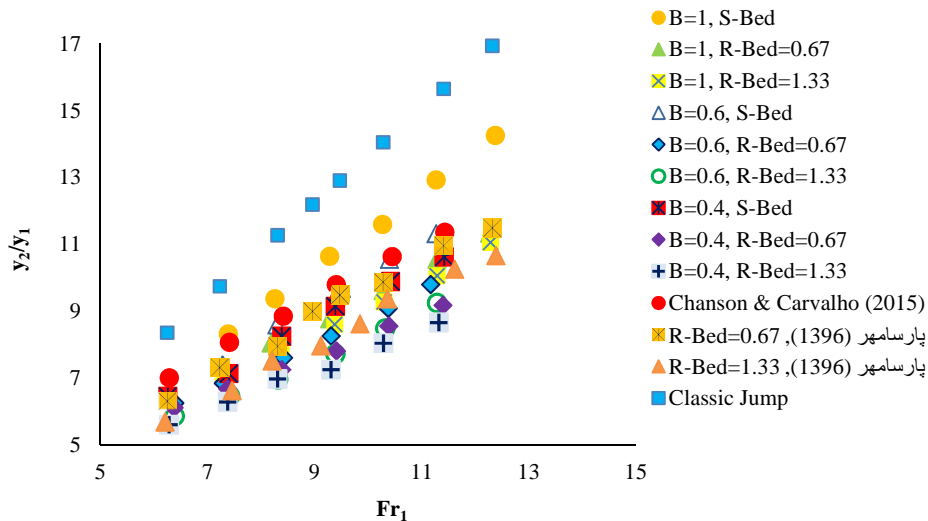
بسترهای زبر مطابقت داشته و با افزایش عدد فرود اولیه مقادیر عمق مزدوج نسبی نیز افزایش می‌یابد. بررسی ضریب کاهش عمق ثانویه (معادلهٔ (۷)) نیز مؤکداً نشان داد که تأثیر نسبت واگرایی روی ضریب کاهش عمق ثانویه با کاهش نسبت واگرایی افزایش می‌یابد. همچنین در هر نسبت واگرایی افزایش ارتفاع زبری در کاهش عمق ثانویه مؤثرتر واقع شده‌است.

$$D = y_2^* - y_2/y_2^* \quad (7)$$

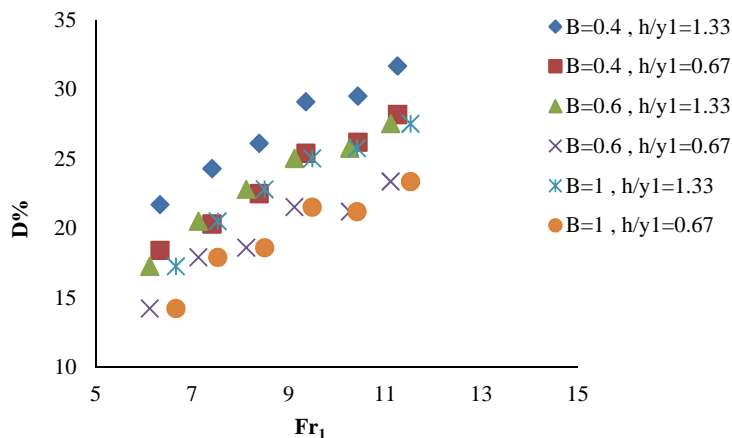
در معادلهٔ بالا، y_2^* عمق ثانویهٔ پرش روی بستر صاف و y_2 عمق ثانویهٔ پرش روی بستر زبر است.

نسبت اعماق مزدوج

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات نسبت اعماق مزدوج و ضریب کاهش عمق ثانویه در برابر عدد فرود اولیه ترسیم شده‌است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، در همهٔ نسبت‌های واگرایی مقادیر نسبت اعماق مزدوج با افزایش ارتفاع زبری‌ها کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش ارتفاع زبری‌ها جریان‌های گردابی مابین آن‌ها شدت یافته و در نتیجه به‌ازای هریک از نسبت‌های بازشدگی دیواره‌ها، نسبت اعماق مزدوج در بستر زبر با نسبت زبری $1/33$ کمتر از نسبت زبری 0.67 است. از شکل ۹ می‌توان دریافت نتایج این تحقیق با نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر محققان روی



شکل ۹- مقایسهٔ تغییرات نسبت اعماق مزدوج در کانال با زبری و نسبت‌های واگرایی مختلف



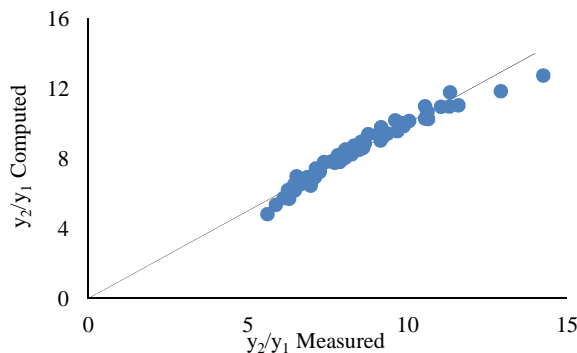
شکل ۱۰- تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه در کانال با نسبت‌های واگرایی و زبری‌های نسبتی مختلف

در شکل ۱۱ مقادیر محاسبه‌شده عمق مزدوج نسبی براساس معادله (۸) در مقابل داده‌های واقعی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، نمایش داده شده‌است. با توجه به این شکل، مشخص است که معادله (۸) برازش قابل‌قبولی را ارائه می‌دهد.

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.802Fr_1 - 1.292 h/y_1 + 2.176B + 0.636 \quad (8)$$

$$R^2=0.949$$

برای نشان‌دادن تأثیر توأم زبری بستر، عدد فرود اولیه جریان و نسبت واگرایی دیواره‌های کانال روی مقادیر عمق مزدوج نسبی، رابطه رگرسیون خطی زیر ارائه شده‌است. این معادله نشان می‌دهد که عمق مزدوج نسبی با افزایش نسبت واگرایی و عدد فرود اولیه، افزایش و با افزایش ارتفاع نسبی اجزای زبر، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر عمق مزدوج نسبی محاسباتی از معادله (۸) با مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده

نسبت‌های واگرایی با افزایش ارتفاع نسبی اجزای زبر، کاهش می‌یابد.

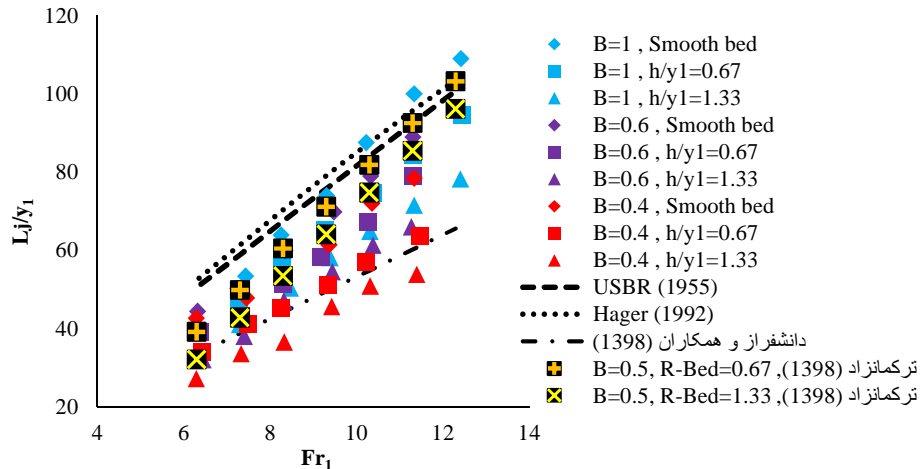
معادله (۹) نیز به‌منظور تعیین طول نسبی پرش هیدرولیکی در بازه مختلف اعداد فرود اولیه جریان، ارتفاع نسبی اجزای زبر بستر و نسبت واگرایی تدریجی دیواره‌های کانال ارائه شده‌است.

$$\frac{y_2}{L_j} = 7.841Fr_1 - 12.626 h/y_1 + 13.043B - 12.514 \quad (9)$$

$$R^2=0.994$$

طول پرش هیدرولیکی

یکی از اهداف اصلی از اعمال زبری و واگرایی تدریجی، کاهش طول پرش هیدرولیکی است. شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در این مطالعه و همچنین مقادیر محاسباتی از روابط ارائه‌شده توسط هاگر (۱۹۹۲)، USBR (۱۹۵۵)، دانشفراز و همکاران (۱۳۹۸) و ترکمانزاد (۱۳۹۸) است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، هم‌راستا با دیگر مطالعات، طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود اولیه جریان، افزایش یافته و در همه

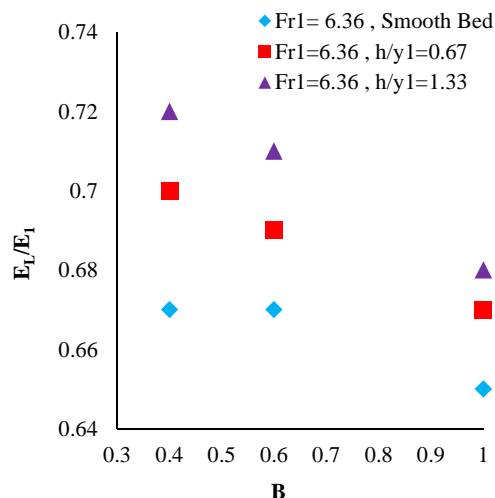


شکل ۱۲- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در کانال با نسبت‌های واگرایی و زبری‌های نسبی مختلف

(معادله ۱۱) محاسبه کرد. در این معادله (F_r) نیروی برشی بستر ناشی از وجود اجزای زبر است که با استفاده از معادله مومنوم برای مقاطع واگرایی تدریجی محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon = F_r / 0.5 \gamma b_1 y_1^2 \quad (11)$$

همان‌طور که قابل‌مشاهده است، با افزایش عدد فرود اولیه مقادیر ضریب تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. همچنین مقدار این پارامتر در بسترهای زبر و در همه نسبت‌های واگرایی در مقایسه با بستر صاف افزایش داشته‌است. با مقایسه داده‌ها در دو حالت بستر زبر می‌توان دریافت که زبری نسبی ۱/۳۳ در افزایش ضریب تنش برشی بستر موفق‌تر عمل کرده است.



شکل ۱۳- تغییرات میزان اتلاف انرژی در اعداد فرود مختلف

اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی

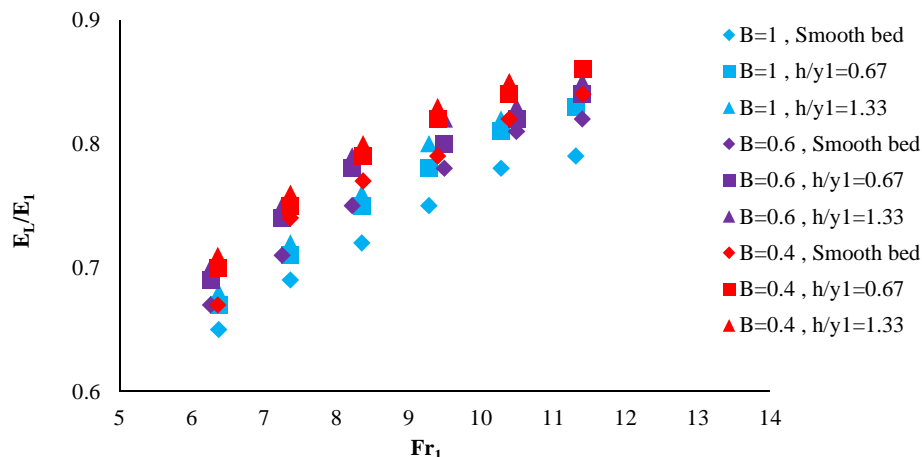
اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی عبارت است از اختلاف میزان انرژی جریان در بالادست و پایین‌دست پرش. مطابق با نمودارهای ارائه‌شده در زیر (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) به‌ازای اعداد فرود اولیه یکسان میزان افت انرژی در بستری‌ها با زبری نسبی بزرگ‌تر، بیشتر بوده و با افزایش نسبت واگرایی مقادیر این پارامتر کاهش می‌یابد. با استفاده از معادله زیر، می‌توان روند تغییرات افت انرژی نسبی را در شرایط مختلف از نظر نسبت واگرایی، ارتفاع نسبی زبری‌ها و اعداد فرود اولیه بررسی کرد. با توجه به این معادله نیز می‌توان دریافت که میزان افت انرژی نسبی با افزایش عدد فرود اولیه جریان و ارتفاع نسبی اجزای زبر، افزایش و در مقابل با افزایش نسبت واگرایی تدریجی دیواره‌ها، کاهش می‌یابد.

$$\frac{E_L}{E_1} = 0.031 F_r + 0.031 h/y_1 - 0.053 B + 0.517 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.96$$

تنش برشی

در شکل ۱۵ تغییرات ضریب تنش برشی بستر بررسی و به‌منظور مشاهده تأثیر واگرایی تدریجی دیواره کانال و همچنین زبری‌های نسبی، نتایج این تحقیق با مقادیر محاسباتی حاصل از معادلات ارائه‌شده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) و صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳) برای پرش کلاسیک و بستر زبر مقایسه شده‌است. براساس مطالعات راجاراتنام (۱۹۶۵) ضریب تنش برشی را می‌توان به‌صورت زیر

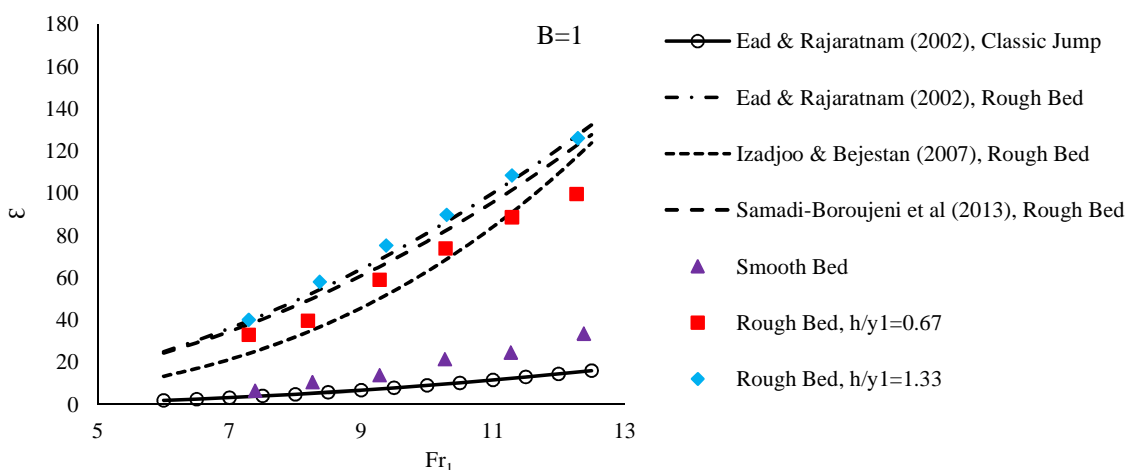


شکل ۱۴- مقایسه تأثیر زاویه واگرایی بر میزان اتلاف انرژی

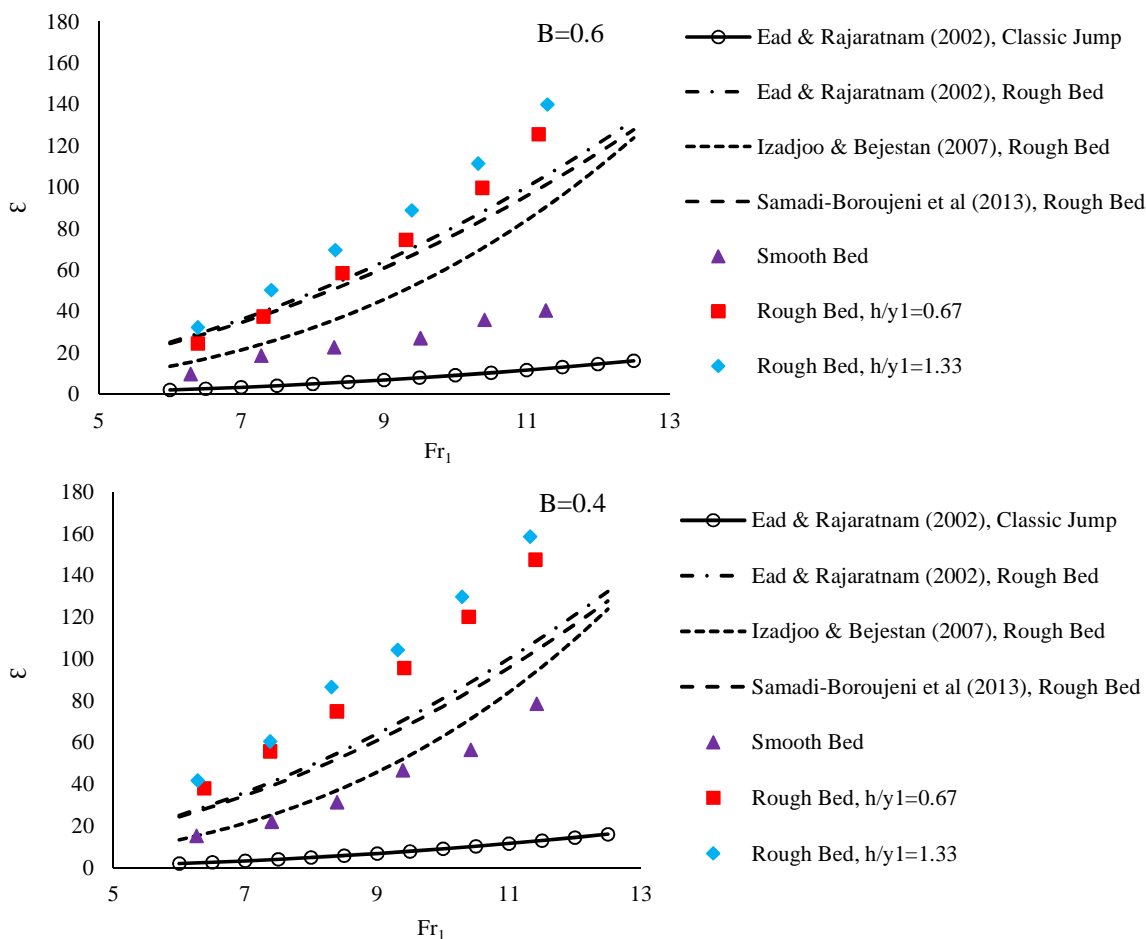
نسبت به پرش کلاسیک و تثبیت پرش داخل حوضچه آرامش شد. همچنین کاهش نسبت واگرایی دیواره‌ها و افزایش ارتفاع زبری‌ها توأمان باعث افزایش تنش برشی بستر شده و در نتیجه با افزایش تلاطم جریان، انرژی جریان بیشتر مستهلک شد و شاهد رشد متوسط ۴۷ درصدی در افت انرژی نسبی پرش بودیم. همچنین مشاهده شد که نیم‌رخ طولی سطح پرش در مقاطع واگرایی تدریجی (همه نسبت‌ها) با بستر صاف و زبر، پایین‌تر از نیم‌رخ سطح آب پرش کلاسیک بود و با کاهش بیشتر نسبت واگرایی و افزایش ارتفاع زبری‌ها، عمق جریان در طول پرش کاهش یافت، به‌نحوی که به‌طور متوسط کاهشی ۴۳ درصدی در این پارامتر رخ داد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق گویای تأثیر قابل‌توجه زبری و واگرایی تدریجی بر مشخصات پرش هیدرولیکی بوده و روابط ارائه‌شده نیز به پیش‌بینی هرچه‌بہتر رفتار پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرایی زبر کمک شایانی می‌کند. در بررسی‌ها مشخص شد که استفاده از اجزای زبر در بستر به‌دلیل ایجاد جریان‌های گردابی باعث کاهش عمق ثانویه پرش شده و با افزایش ارتفاع این زبری‌ها، قدرت این جریان‌ها نیز در بین اجزای زبر شدت یافته و میزان کاهش عمق مزدوج نسبت به پرش کلاسیک بیشتر می‌شود. به‌نحوی که با اعمال زبری در کف و واگرایی تدریجی در دیواره‌ها می‌توان به‌طور متوسط باعث کاهش ۴۴ درصدی نسبت اعماق مزدوج و ۳۹ درصدی طول پرش هیدرولیکی



شکل ۱۵- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی بستر در اعداد فرود اولیه مختلف برای زبری‌های نسبی ۰/۶۷ و ۱/۳۳ و نسبت‌های واگرایی ۰/۴ و ۰/۶ و ۱



ادامه شکل ۱۵- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی بستر در اعداد فرود اولیه مختلف برای زبری‌های نسبی ۰/۶۷ و ۱/۳۳ و نسبت‌های واگرایی ۰/۴ و ۰/۶ و ۱

منابع

۴. دانشفراز ر.، ماجدی اصل م. و میرزایی ر. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی تأثیر واگرایی و بستر زبرشده با شن بر مشخصات پرش هیدرولیکی. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۴): ۸۸۵-۸۹۶.
۵. عباس‌پور ا.، فرسادی‌زاده د. و عبدیان رکنی م. ر. ۱۳۹۶. تأثیر بستر نیمه‌استوانه‌ای بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستطیلی واگرا. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۱۱): ۹۹۸-۹۹۸.
۶. کاظمیان‌زاده ا.، الله‌دادی ک. و شفافی بجستان م. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع زبری بر نسبت اعماق مزدوج و طول غلتاب پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. تبریز.
۱. امید م. ح. و اسمعیلی ورکی م. ۱۳۸۴. مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای شکل. مجله علوم آب و خاک. ۹(۲): ۱۷-۳۰.
۲. پارسامهر پ. ۱۳۹۶. بررسی اثر زبری روی نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس. رساله دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۳. ترکمانزاد ن. ۱۳۹۸. تأثیر اجزای زبر روی مشخصات پرش هیدرولیکی و نوسانات فشار دینامیکی در حوضچه‌های آرامش با واگرایی ناگهانی نامتقارن. رساله دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

Reclamation, Hydraulic Laboratory Report
No. Hyd- 399.

۷. نیسی ک. و شفای بجستان م. ۱۳۸۸. بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تأثیر اجزای زبر کف. مجله دانش آب و خاک. ۹(۲): ۱۶۵-۱۷۶.

8. Abbaspour A. Hosseinzadeh Dalir A. Farsadizadeh D. and Sadraddini A.A. 2009. Effect of a sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-Environment*. 3(2): 109-117.
9. Arbbabhirama A. and Abella A.U. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *Journal of hydraulics division*. 97(1): 31-42.
10. Chow V.T. 1959. *Open Channel Hydraulic*. McGraw-Hill, New York. 700 p.
11. Ead S. A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jump on corrugated bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(7): 656-663.
12. Gohari A. and Farhoudi J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver, British Columbia.
13. Hager W. H. 1992. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Water Science and Technology Library. Kluwer Academic Publishers. 302 p.
14. Izadjoo F. and Shafai Bejestan M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Science*. 7: 1164-1169.
15. Khelifa A. M. and McCorquodale J. A. 1979. Radial Hydraulic Jump, *Journal of Hydraulic Division*. 105(9): 1065-1078.
16. Mohammad Ali H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117(1): 83-93.
17. Nasr Esfahani M.J. and Shafai Bejestan M. 2012. Design of stilling basins using artificial roughness. *Journal of Civil Engineering Urban*. 2(4): 159-163.
18. Omid M. H. Esmaeeli Varaki M. and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*. 45(4): 512-518.
19. Rajaratnam N. 1965. Hydraulic jump as a wall jet. *Journal of Hydraulic Division*. 91(5): 107-132.
20. Samadi-Boroujeni H. Ghazali M. Gorbani B. and Fattahi Nafchi R. 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil engineering*. 40(9): 841-847.
21. U.S.B.R. 1955. *Research Studies on Stilling Basins. Energy Dissipators and Associated Appurtenances*. U.S. Bureau of