

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری بستر بر طول پرش و غلتاب در حوضچه‌های آرامش با شیب کف معکوس

ناهید پورعبدالله^{۱*}، تورج هنر^۲ و روح‌الله فتاحی^۳

چکیده

پرش هیدرولیکی یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که در آن جریان از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌یابد و با استهلاك انرژی زیاد همراه است. در این پژوهش، خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل طول پرش و طول غلتاب پرش در حوضچه آرامش با شیب کف منفی مختلف (صفر، $-۰/۶$ ، $-۱/۳$ و -۲ درصد) با سه نوع زبری متفاوت (۱، ۴ و ۱۰ میلی‌متر) بررسی شد. نتایج نشان داد که مقادیر طول پرش و طول غلتاب پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف منفی و با بستر زبر نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. این زبری‌ها در شرایط متفاوتی با عددهای فرود در محدوده بین $۴/۹$ تا $۷/۸$ آزمایش شدند. در این پژوهش به طور متوسط کاهش طول پرش $۳۹/۶$ درصد و طول غلتاب پرش $۳۲/۳$ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، زبری، طول پرش، طول غلتاب پرش، کف شیب‌دار.

ارجاع: پورعبدالله ن. و هنر ت. و فتاحی ر. ا. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری بستر بر طول پرش و غلتاب در حوضچه‌های آرامش با شیب کف معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۱۵۵-۱۶۴.

۱- کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: Nahid7760@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۹

$$L_j = Ky_2 = \left(\frac{6.1 + \frac{4}{m}}{1 + \frac{11.2}{m^{\frac{3}{2}}}} \right) \times y_2 \quad (۳)$$

در این معادله $m = ctg\theta$ و θ زاویه کف حوضچه با افق است. چنانچه $\theta = 0$ باشد $m = \infty$ و $L_j = 6.1y_2$ خواهد بود. راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش بر روی بسترهای زبر انجام داد. او با معرفی پارامتر زبری $k = \frac{k_e}{y_1}$ که در آن K_e

ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق جریان بالادست بر روی زبری‌ها است، نشان داد که طول غلتاب (L_r) و طول پرش (L_j) بر روی بسترهای زبر کاهش زیادی نسبت به حالت کلاسیک خواهد داشت. هاگز و فلک (۱۹۸۳) نیز در خصوص پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بسترهای زبر پژوهش کردند، نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که ناهمواری‌های مرزی به طور حتمی طول پرش و طول غلتاب پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهند و میزان این کاهش به عدد فرود اولیه و میزان ناهمواری نسبی مربوط است. محمدعلی (۱۹۹۱) با انجام یک سری آزمایش‌ها بر روی بسترهای زبر با استفاده از المان مکعبی نشان داد که طول نسبی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر نسبت به حالت کلاسیک از $۳۷/۴$ تا $۶۷/۴$ درصد تغییر می‌کند. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود $۱۰-۴$ و ارتفاع نسبی موج $\frac{t}{y_1}$ ارتفاع موج بستر و y_1 عمق اولیه

پرش) برابر $۰/۲۵$ ، $۰/۴۳$ و $۰/۵$ بررسی کردند. نتایج بررسی آنان نشان داد که طول پرش به طور تقریبی نصف طول آن روی بستر صاف است. السبایه و شبایک (۲۰۱۰) نیز مطالعه‌ای آزمایشگاهی در محدوده عدد فرود ۳ تا $۷/۵$ بر روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت و مستطیلی انجام دادند. نتایج بیانگر کاهش زیاد طول پرش بر روی بستر زبر در مقایسه با پرش بر روی بستر صاف بود. نیسی و شفاعی بجستان (۱۳۸۷) نیز با انجام ۴۸ آزمایش در محدوده عددهای فرود $۴/۹$ تا $۱۲/۴$ بر روی مدل فیزیکی حوضچه آرامش با زبری لوزی شکل مشاهده کردند که این زبری‌ها می‌توانند طول حوضچه آرامش را ۴۱ درصد و طول غلتاب

مقدمه

جریان‌های فوق‌بحرانی ناشی از عبور آب از روی سرریزها، تندآب‌ها یا زیر دریاچه‌ها با انرژی جنبشی زیاد همراه است. چنانچه این جریان با همان میزان انرژی جنبشی وارد رودخانه یا کانال پایین‌دست شود موجب اعمال نیروی هیدرودینامیکی بر بستر و دیواره‌های مسیر جریان، فرسایش، آب‌شستگی و در نهایت تخریب سازه‌های پایین‌دست خواهد شد، پس باید انرژی اضافی آب قبل از ورود به رودخانه مستهلک شود. از آنجایی که موضوع پرش در مسیر کانال‌ها و یا حوضچه‌های با شیب منفی هنوز در سطح وسیع مورد مطالعه و بررسی نشده است، این موضوع می‌تواند بررسی شود و نتایج آن در کاهش هزینه‌های اجرایی کنترل و تبدیل جریان‌های فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی مؤثر باشد. به دلیل این که شیب منفی در مسیر به‌عنوان یک مانع عمل می‌کند کاهش نسبت عمق‌های مزدوج و کاهش طول پرش و نیز افزایش راندمان اتلاف انرژی نسبت به حالت افقی را به همراه دارد. نتایج حاصل از پژوهش پیرامون این موضوع امکان ساخت سازه‌های کنترل پرش هیدرولیکی با هزینه کمتر را ممکن می‌کند. با توجه به نتایج USBR طول پرش هیدرولیکی را پژوهشگران به گونه‌های مختلف تجزیه و تحلیل می‌کنند. بسیاری از پژوهشگران معتقدند که در حوضچه‌های آرامش افقی که در آن‌ها هیچ‌گونه موانعی پیش‌بینی نشده باشد، طول پرش به صورت زیر قابل محاسبه است (به نقل از بیرامی، ۱۳۸۵):

$$L_j = 6.9(y_2 - y_1) \quad (۱)$$

همچنین نتایج USBR نشان داد چنانچه در انتهای حوضچه آرامش فقط یک دیوار سرتاسری قرار گیرد، طول حوضچه کوتاه‌تر شده و به صورت زیر محاسبه می‌شود (به نقل از بیرامی، ۱۳۸۵) در این معادله y_2 عمق ثانویه و y_1 عمق اولیه و L_j طول پرش م است:

$$L_j = 5.9(y_2 - y_1) \quad (۲)$$

با توجه به نتایج USBR چنانچه پرش هیدرولیک روی سطح شیب‌دار (در جهت جریان) رخ دهد طول پرش هیدرولیکی را می‌توان از معادله زیر به دست آورد (به نقل از بیرامی، ۱۳۸۵) در این معادله y_2 عمق ثانویه و y_1 عمق اولیه و L_j طول پرش است:

را ۳۴ درصد کاهش دهند و به دلیل عدم استفاده از بلوک مشکل کاویتاسیون نیز ایجاد نمی‌شود. به طور مشابه کاظمیان و شفاعی بجستان (۱۳۸۸) در مقاله‌ای نتایج مدل آزمایشگاهی روی مشخصات پرش هیدرولیکی تحت تأثیر آرایش‌های مختلف زبری را ارائه دادند. بدین منظور زبری‌های هم ارتفاع مکعب مربع با آرایش‌های مختلف در بستر فلوم طوری نصب کردند که زیر جت ورودی قرار گیرند. مقایسه نتایج بستر با زبری و بدون زبری نشان داد که زبری‌ها می‌توانند مقدار زیادی طول پرش را کاهش دهند. شجاعیان و همکاران (۱۳۸۸) نیز در مطالعه خود در مورد تأثیر شیب معکوس بر پارامترهای پرش هیدرولیکی در مقطع واگرا نشان دادند که نسبت عمق‌های مزدوج و طول پرش در کانال واگرا با شیب معکوس از مقادیر به دست آمده در کانال واگرای بدون شیب معکوس کوچک‌تر است. با توجه به مطالب ذکر شده عدم کفایت پژوهش بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی سطح شیب‌دار همراه با زبری بستر احساس می‌شود. علاوه بر این کنترل پرش هیدرولیکی در کانال‌های آبیاری در محل‌هایی همچون بعد از دریاچه‌ها، سرریزها و یا دراپ‌ها برای جلوگیری از خسارت به بناهای پایین‌دست مورد نیاز است، این در حالی است که استفاده از حوضچه‌های آرامش مرسوم که در پایین‌دست سدها استفاده می‌شوند به دلیل محدودیت فضا و هزینه در چنین شرایطی ممکن نیست. در این پژوهش علاوه بر زبری بستر تأثیر شیب معکوس بر نسبت عمق‌های پرش و طول آن توجه شده است.

مواد و روش‌ها

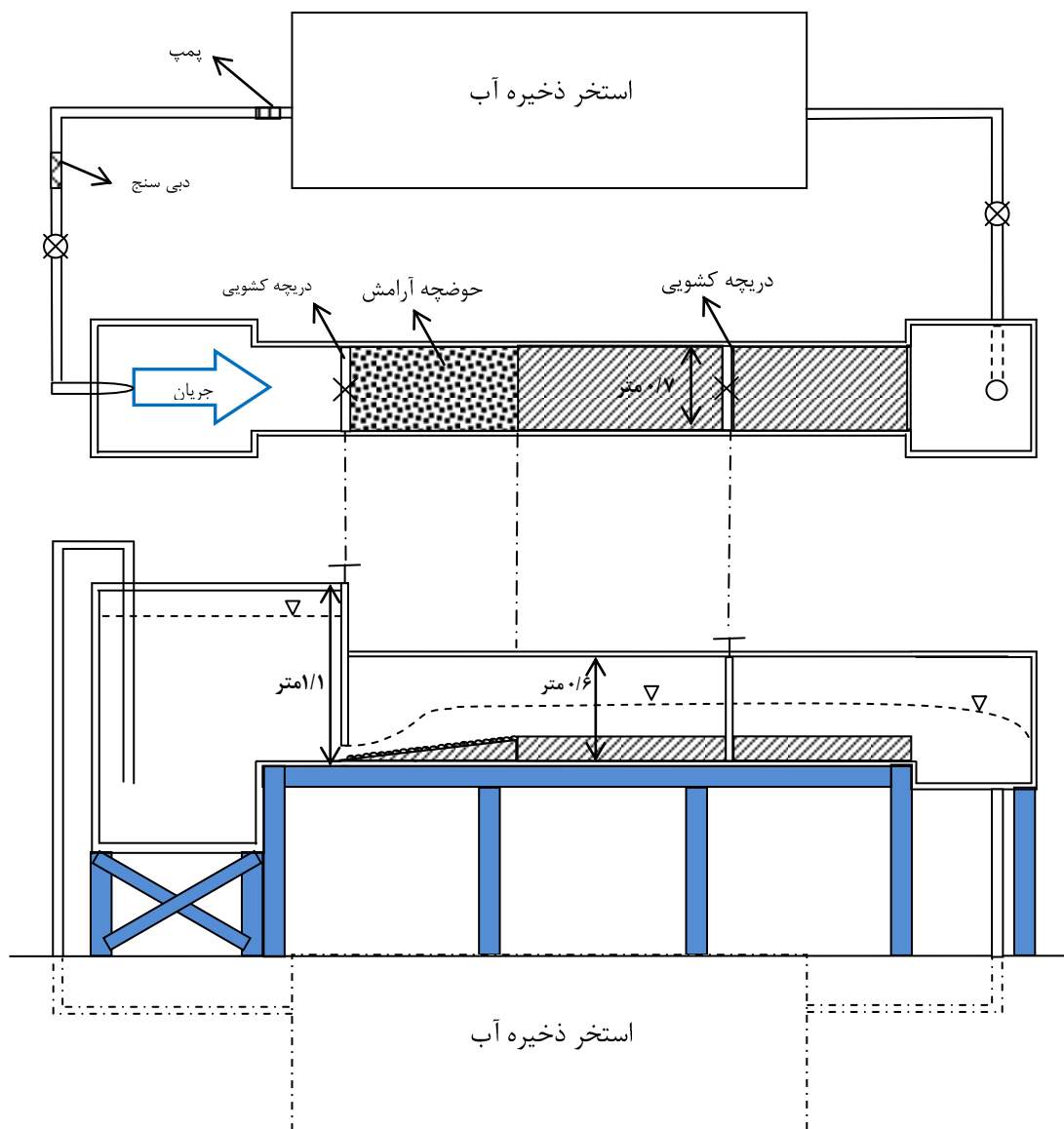
این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز در فلومی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۰/۶ متر با طول ۱۵ متر و دیوارهای شفاف انجام شد. مطابق شکل ۱ برای افزایش عدد فرود اولیه در ۲ متر از طول کانال (قبل از دریاچه بالادست) ارتفاع کانال از ۰/۶ متر به

۱/۱ متر افزایش یافت. همچنین برای ایجاد پرش از دریاچه کشویی که در فاصله ۲ متری از منبع ورودی و برای تثبیت پرش از دریاچه‌ای کشویی دیگری که در فاصله ۵ متری از دریاچه ابتدایی قرار داشت، استفاده شد. پرش هیدرولیکی پس از باز کردن دریاچه اول و با تغییر میزان بازشدگی آن ایجاد و با استفاده از دریاچه دوم در موقعیت دلخواه تثبیت شد. برای تغییر شیب حوضچه آرامش در زیر آن تسمه‌های فلزی متناسب با شیب مورد نظر جوش داده شد. با استفاده از این تسمه‌ها که دارای ارتفاع متفاوتی بودند تغییر شیب در حوضچه آرامش انجام شد. در این پژوهش آزمایش‌ها در ۳ شرایط بدون زبری و همچنین زبری با دانه‌بندی ۱، ۴ و ۱۰ میلی‌متر و شیب‌های بستر صفر، ۰/۶-، ۱/۳- و ۲- درصد انجام شد. در نهایت در این مطالعه ۱۴۴ آزمایش در محدوده عددهای فرود ۴/۹ تا ۷/۸ طراحی و انجام شد. در این آزمایش‌ها دبی با دبی‌سنج الکترونیکی که در مسیر جریان پس از پمپ و قبل از کانال قرار داشت اندازه‌گیری شد. در پرش‌های آبی، به طور عموم عمق اولیه و ثانویه و دو طول مختلف توجه می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه پرش از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. همچنین اندازه‌گیری طول پرش و طول غلتاب با مدرج کردن جداره فلوم توسط نوار متر با دقت ۱ میلی‌متر انجام شد. لازم به ذکر است طول چرخش (L_r) عبارت است از فاصله شروع پرش تا آخرین موج غلطان و طول پرش (L_f) برابر با فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان که در این صورت ارتفاع این نقطه به طور تقریبی با ارتفاع پایاب برابر است. دامنه متغیرهای این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

بنابراین در این مطالعه مقدار عدد رینولدز در محدوده ۳۶۱۴۷ تا ۹۷۵۸۸ است که بیانگر جریان آشفته است، پس می‌توان از اثر لزجت صرفه‌نظر کرد (مدنی، ۱۳۸۳).

جدول ۱- دامنه متغیرها

متغیر	Fr_1	$Q(Lps)$	$D_1(cm)$	$t(mm)$	$\theta(^{\circ})$	Re
دامنه تغییرات	۴/۹-۷/۸	۴۰-۵۰	۱/۷-۳/۷	۱-۱۰	۰-۲	۳۶۱۴۷-۹۷۵۸۸



شکل ۱- پلان و پروفیل طولی فلوم مورد استفاده

نتایج و بحث

بررسی طول پرش هیدرولیکی

طول پرش هیدرولیکی تابعی از پارامترهای مختلفی است که می‌توان آن را به صورت زیر نشان داد:

$$L_j = f(D_1, D_2, u_1, g, \mu, \rho, t, \theta) \quad (4)$$

که در این معادله D_1 عمق اولیه پرش، D_2 عمق ثانویه پرش، u_1 سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش و L_j طول پرش هیدرولیکی، g شتاب ثقل، ρ دانسیته، μ لزجت دینامیکی آب، t قطر زبری و θ زاویه شیب کف است. بر اساس تئوری آنالیز ابعادی و قضیه باکینگهام خواهیم داشت:

$$\frac{L_j}{D_1} = f_1(\text{Re}, Fr_1, \frac{t}{D_1}, \theta) \quad (5)$$

با نرم‌افزار SPSS و در نظر گرفتن $(\frac{L_j}{D_1})$ به‌عنوان متغیر

وابسته و Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و θ به‌عنوان متغیرهای مستقل،

معادله برازش داده شده به صورت زیر حاصل شد:

$$\frac{L_j}{D_1} = -36.75 \frac{t}{D_1} + 8.36 Fr_1 - 11.2 \tan \theta, \quad R^2 = 0.98 \quad (6)$$

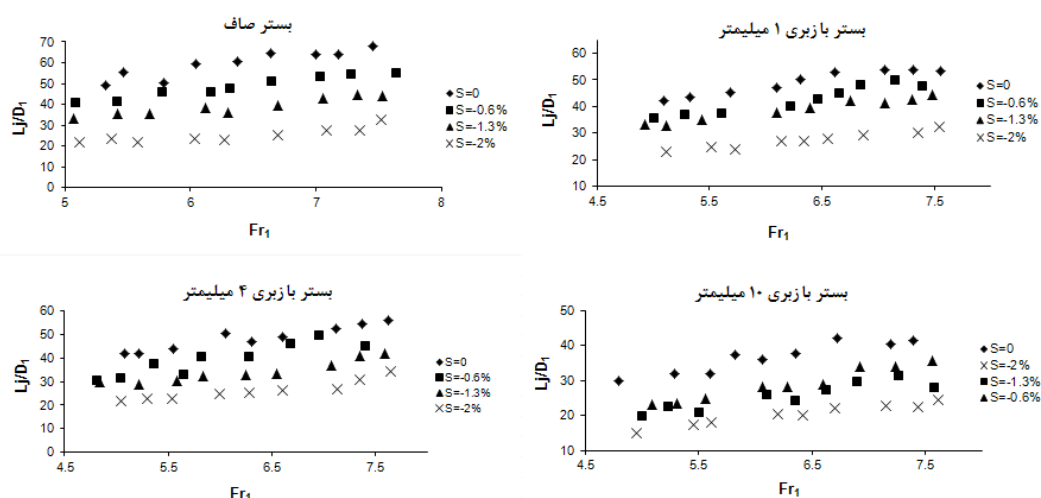
همچنین با در نظر گرفتن $(\frac{L_j}{D_2})$ به‌عنوان متغیر وابسته و

Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و $\tan \theta$ به‌عنوان متغیرهای مستقل، معادله

برازش داده شده به صورت زیر حاصل شد:

$$\frac{L_j}{D_2} = 0.94Fr_1 - 0.49\frac{t}{D_1} - 0.85 \tan g, \quad R^2 = 0.97 \quad (7)$$

معادله‌های ۶ و ۷ برای محدوده $4.9 < Fr_1 < 7.8$ و $0 \leq \theta \leq 2\%$ و $0 < t < 10mm$ به دست آمده‌اند که می‌توان بدون انجام آزمایش‌ها و با داشتن متغیرهای لازم نسبت $(\frac{L_j}{D_1})$ و $(\frac{L_j}{D_2})$ را با دقت خوبی محاسبه کرد. با مقایسه نتایج طول پرش هیدرولیکی در آزمایشگاه و محاسبه طول پرش با استفاده از معادلات ارائه شده میزان خطا $\pm 5\%$ درصد حاصل شد که دقت خوبی است.



شکل ۲- نسبت $(\frac{L_j}{D_1})$ در برابر Fr_1 برای بستر صاف و انواع زبری و شیب منفی

افزایش می‌یابد، پس نسبت $(\frac{L_j}{D_2})$ تغییرات خاصی نداشته است.

همچنین معادله ۸ میزان این نسبت را بر اساس نتایج این پژوهش در حالت بدون زبری و بدون شیب نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود معادله ۸ اختلاف کمی با معادله ارائه شده با USBR در شرایط مشابه دارد، که نشان دهنده دقت مناسب نتایج به دست آمده در آزمایش‌های این پژوهش است.

$$\frac{L_j}{D_2} = 6.11, \quad R^2 = 0.98 \quad (8)$$

بررسی طول غلتاب پرش هیدرولیکی

پس از بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن $(\frac{L_r}{D_1})$ (طول نسبی غلتاب پرش) به عنوان متغیر

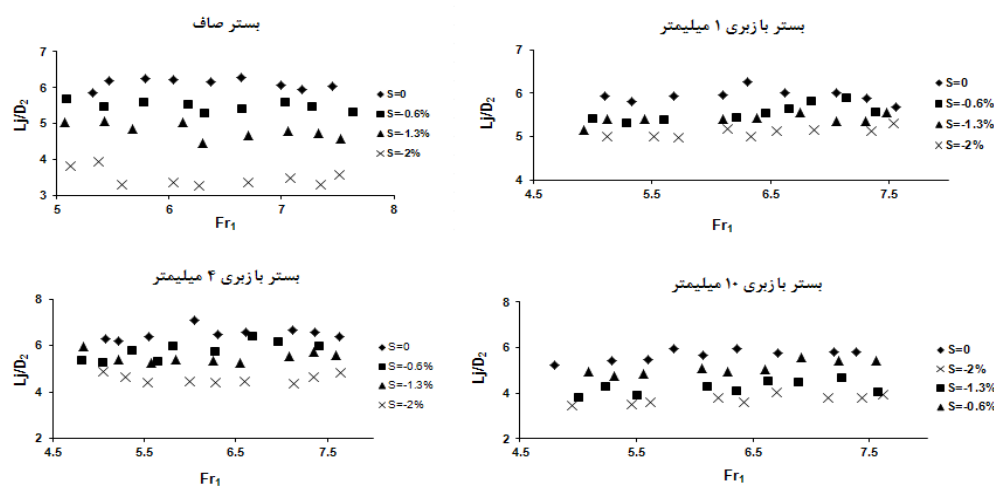
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده با قرار دادن زبری بر روی شیب‌های معکوس مختلف طول پرش هیدرولیکی کاهش یافته است، به طوری که در هر شیب منفی با افزایش زبری کاهش این نسبت محسوس‌تر شده است. این مطلب را می‌توان به صورت مشابه برای ثابت در نظر گرفتن زبری و افزایش شیب منفی نیز بیان کرد. با توجه به اثر کاهشی هر یک از متغیرهای شیب و زبری بر روی طول پرش هیدرولیکی می‌توان نتیجه گرفت اثر متقابل این دو بر روی طول پرش هیدرولیکی نیز کاهشی بوده به طوری که افزایش شیب کف منفی و یا اندازه زبری هر دو باعث کاهش اعماق نسبی پرش می‌شود. شدیدترین کاهش طول پرش به دست آمده در این پژوهش مربوط به زبری ۱ سانتی‌متر با شیب حداکثر ۲٪- است. از آنجا که با افزایش عدد فرود اولیه طول پرش و عمق ثانویه هر دو

پژوهش‌های قبلی نشان داد که کاهش طول نسبی غلتاب پرش در این آزمایش‌ها از کاهش طول نسبی غلتاب پرش در آزمایش‌های هاگر (۱۹۹۲) که در حالت بدون شیب و بدون زبری انجام شده، شدیدتر بوده است. همچنین مقایسه‌های صورت گرفته نشان داد که روند تغییرات طول نسبی غلتاب پرش در هر شکل مشابه است، یعنی با افزایش عدد فرود اولیه طول نسبی غلتاب پرش افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده با افزایش زبری و شیب معکوس کاهش طول نسبی غلتاب پرش شدیدتر شده است. با این روش می‌توان طول حوضچه آرامش و در نتیجه هزینه‌های اجرایی را کاهش داد.

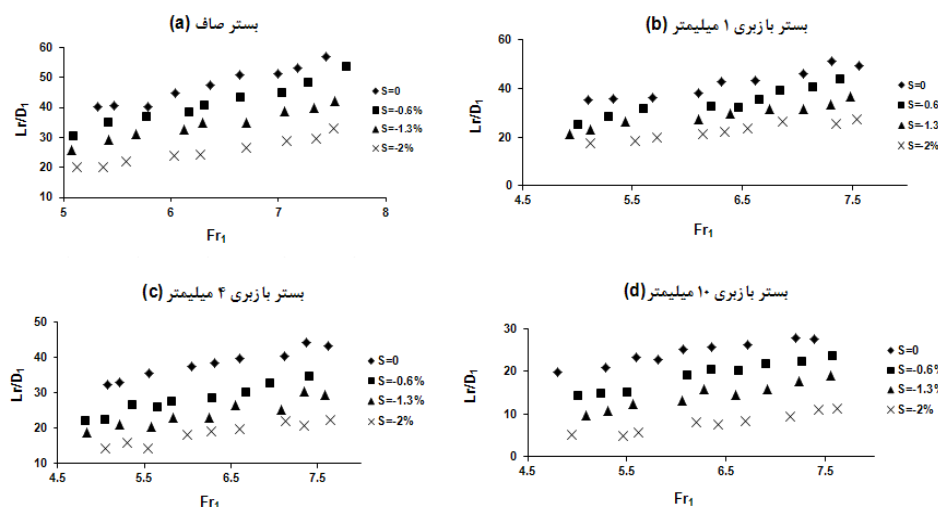
وابسته و Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و $tg\theta$ به‌عنوان متغیرهای مستقل، معادله نهایی به‌صورت زیر برازش داده شد:

$$\frac{L_r}{D_1} = 7.105 Fr_1 - 51.128 \frac{t}{D_1} - 9.76 \tan g, \quad R^2 = 0.99 \quad (9)$$

معادله ۹ برای محدوده $4.9 < Fr_1 < 7.8$ و $0 \leq \theta \leq 2\%$ به دست آمده است. با مقایسه نتایج طول غلتاب پرش هیدرولیکی در آزمایشگاه و محاسبه طول غلتاب پرش با استفاده از معادله ارائه شده میزان خطا $\pm 3/2\%$ درصد حاصل شد که دقت خوبی است. این معادله نشان می‌دهد با افزایش شیب بستر طول نسبی غلتاب پرش کاهش می‌یابد که بیانگر اثر کاهشی شیب معکوس بر طول نسبی غلتاب پرش هیدرولیکی است. همچنین مقایسه نتایج این پژوهش با



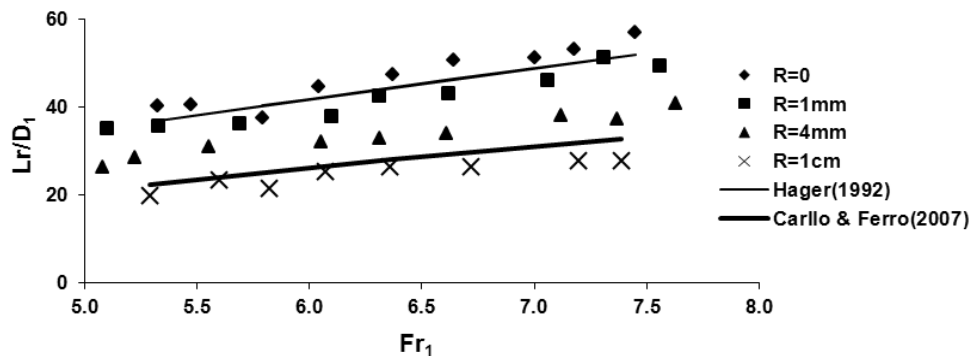
شکل ۳- نسبت $(\frac{L_j}{D_2})$ در برابر Fr_1 برای بستر صاف و انواع زبری و شیب منفی



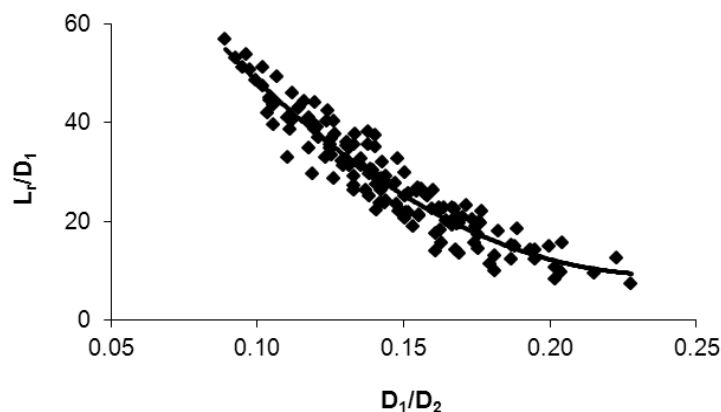
شکل ۴- نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ در برابر Fr_1 برای بستر صاف و انواع زبری و شیب منفی

منفی در کاهش طول غلتاب پرش است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها شکل ۶ ترسیم و معادله ۱۰ بر داده‌های آن برازش داده شده است که هر دو به خوبی نشان می‌دهند با افزایش نسبت $\frac{D_2}{D_1}$ مقدار نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ کاهش می‌یابد:

$$\frac{L_r}{D_1} = 2034.1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 - 972.06 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) + 125.41 \quad R^2 = 0.9 \quad (10)$$



شکل ۵- مقایسه نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ در برابر Fr_1 برای انواع زبری و بدون شیب



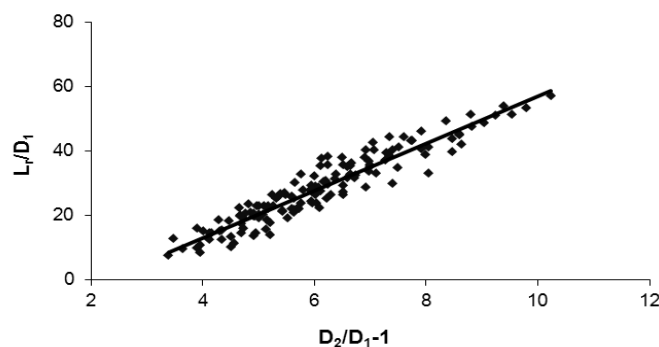
شکل ۶- نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ در برابر $\frac{D_2}{D_1}$ برای تمامی داده‌های آزمایش

افزایش می‌یابد:

$$\frac{L_r}{D_1} = 7.3186 \left(\frac{D_2}{D_1} - 1 \right) - 16.288, \quad R^2 = 0.897 \quad (11)$$

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ با افزایش زبری کاهش پیدا کرده است و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج کارلو و فرو (۲۰۰۷) در زبری ۱۰ میلی‌متر در سطح صاف هماهنگی خوبی داشته است که با افزایش شیب منفی نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ از مقادیر کارلو و فرو (۲۰۰۷) فاصله خواهند گرفت که نشان دهنده تأثیر شیب

به همین ترتیب شکل ۷ و معادله ۱۱ نشان می‌دهند که با افزایش نسبت $1 - \frac{D_2}{D_1}$ مقدار نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ به طور خطی



شکل ۷- نسبت $\frac{L_r}{D_1}$ در برابر $D_2/D_1 - 1$ برای تمامی داده‌های آزمایش

در جدول ۲ میزان کاهش نسبی طول پرش و طول غلتاب پرش ارائه شده، بر اساس نتایج این جدول مشخص است که هر چه درصد شیب و میزان زبری افزایش یابد درصد کاهش طول پرش و نیز درصد کاهش طول غلتاب پرش نیز افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین کاهش مربوط به زبری ۱ سانتی‌متر و شیب ۲- درصد است. این نتیجه با توجه به این که شیب منفی و زبری هر دو باعث کاهش طول پرش و طول غلتاب می‌شوند و نظر به این که در این مطالعه بیشترین شیب ۲- درصد و بیشترین زبری ۱ سانتی‌متر بوده است، دور از انتظار نیست. همچنین در

محدوده فرود اولیه (۴/۹ تا ۷/۸) به طور متوسط درصد کاهش طول پرش در این پژوهش ۳۹/۶ و درصد کاهش طول غلتاب به طور متوسط ۳۲/۳ است. نیسی و شفافی بجستان (۱۳۸۷) در پژوهش‌های خود کاهش طول پرش و طول غلتاب را به ترتیب ۴۱ و ۳۴ درصد گزارش کردند. به طور مشابه ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) نیز کاهش طول پرش را ۵۰ درصد و نصرآبادی و همکاران (۱۳۸۹) کاهش طول پرش را در جهش آزاد ۲۱ درصد و در جهش مستغرق ۱۴ درصد اعلام کردند.

جدول ۲- درصد کاهش طول و غلتاب پرش در شرایط مختلف زبری و شیب منفی این پژوهش

درصد کاهش L_r	درصد کاهش L_g	نوع بستر و شیب منفی
۰	۰	بدون زبری و شیب صفر
۱۰/۷	۷/۸	بدون زبری و شیب ۰/۶٪
۱۸/۵	۲۱/۷	بدون زبری و شیب ۱/۳٪
۳۷	۳۷/۳	بدون زبری و شیب ۲٪
۸/۹	۱۶	زبری ۱ میلی‌متر و شیب صفر
۱۴/۸	۳۱/۸	زبری ۱ میلی‌متر و شیب ۰/۶٪
۲۵	۲۹/۵	زبری ۱ میلی‌متر و شیب ۱/۳٪
۴۰/۵	۵۰/۲۷	زبری ۱ میلی‌متر و شیب ۲٪
۱۰/۳	۳۳/۷	زبری ۴ میلی‌متر و شیب صفر
۲۵/۴	۴۱	زبری ۴ میلی‌متر و شیب ۰/۶٪
۳۱/۸	۴۶/۷	زبری ۴ میلی‌متر و شیب ۱/۳٪
۴۷	۵۸/۳	زبری ۴ میلی‌متر و شیب ۲٪
۳۳/۶	۴۲/۳	زبری ۱ سانتی‌متر و شیب صفر
۴۵/۸	۵۹	زبری ۱ سانتی‌متر و شیب ۰/۶٪
۵۸	۵۲	زبری ۱ سانتی‌متر و شیب ۱/۳٪
۷۷	۶۶/۳	زبری ۱ سانتی‌متر و شیب ۲٪

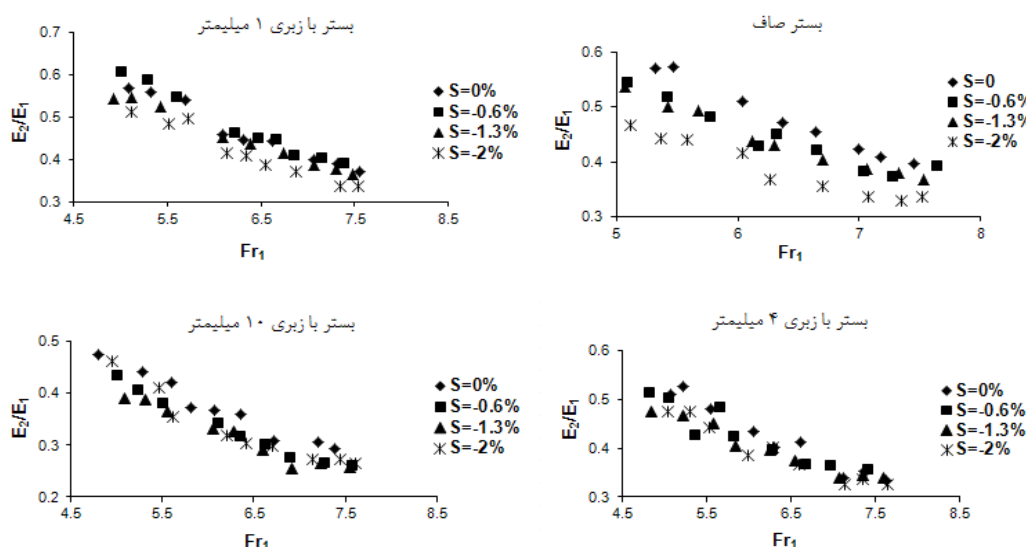
بررسی اتلاف انرژی

برای بررسی تأثیر شیب منفی و زبری بر نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش بر روی بسترهای صاف و افقی، منحنی تغییرات افت نسبی انرژی $(\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود اولیه برای هر زبری و شیب در شکل ۸ ترسیم شده است. بر اساس این منحنی‌ها، در هر زبری با افزایش شیب و عدد فرود اولیه افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است با افزایش زبری این تغییرات بیشتر بوده که نشان دهنده

$$R^2 = 0.997 \quad (12)$$

تأثیر زبری و شیب منفی در افزایش افت نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به حالت کلاسیک است و به ازای یک عدد فرود اولیه یکسان اتلاف انرژی در بسترهای زبر و با شیب‌های مختلف بیشتر از بستر با زبری بدون شیب است. این نتایج با گزارش‌های توکیای (۲۰۰۵) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) دارد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌توان رابطه بین $\Delta E/E_1$ بر حسب Fr_1 ، $\tan \theta$ و t/D_1 را به صورت معادله ۱۲ ارائه کرد:

$$\Delta E/E_1 = 8.668Fr_1 - 30.408t/D_1 + 11.36tg\theta$$



شکل ۸- تغییرات افت نسبی پرش در بستر صاف، شیب‌های منفی و زبری‌های مختلف

متوسط مقدار افت انرژی نسبی در حالت شیب منفی و زبری حدود ۲۱٪ بیشتر از حالت کلاسیک به دست آورده شد.

منابع

۱. بیرامی م. ک. ۱۳۸۵. سازه‌های انتقال آب. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۶۲ص.
۲. شجاعیان ز. و حسین‌زاده دلیر ع. ۱۳۸۸. تأثیر شیب معکوس بر پارامترهای پرش هیدرولیکی در مقطع واگرا. هشتمین سمینار بین المللی رودخانه. ۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۸۸، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. کاظمیان‌زاده ا. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آرایش زبری بر مشخصات هیدرولیکی پرش در حوضچه‌های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب تبریز.

نتیجه‌گیری

۱- زبری بستر همراه با شیب کف منفی، طول پرش را نسبت به حالت کلاسیک کاهش می‌دهد. در این پژوهش (شرایط ذکر شده) به طور متوسط کاهش طول پرش ۳۹/۶ درصد بوده است. همچنین بیشترین کاهش طول پرش مربوط به زبری ۱ سانتی‌متر و شیب کف منفی ۲٪ بود.

۲- طول غلتاب پرش هیدرولیکی نیز نسبت به حالت کلاسیک کاهش یافت. در این پژوهش به طور متوسط ۳۲/۳ درصد کاهش طول غلتاب مشاهده شد. همچنین کاهش طول غلتاب در زبری ۱ سانتی‌متر و شیب کف منفی ۲٪ بیشترین مقدار را داشت.

۳- مقدار افت انرژی نسبی در حالت‌های مختلف شیب و زبری بیشتر از حالت کلاسیک بود. با افزایش شیب و اندازه زبری مقدار افت انرژی نسبی نیز افزایش یافت به طور

۴. نصرآبادی م. و امید م. ح. ۱۳۸۹. مقایسه بین جهش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در پایین دست دریچه‌های کشویی. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. آبان‌ماه ۸۹، دانشگاه تربیت مدرس.
۵. نیسی ک. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. مطالعه آزمایشگاهی طول حوضچه آرامش بر روی بستر زبر. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. ۱ بهمن‌ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
6. Abaspour A. and Hosseinzadeh D. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Applied Sciences* 9(11): 2045-2055. Ead S. A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(2):656-663.
7. Elsebaie I. H. and Shabayek Sh. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS* 10(1):40-50.
8. Hager W. H. 1992. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Kluwer academic Publishers.
9. Hughes W. C. and Flake J. E. 1983. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(12):1755-1771.
10. Izadjoo F. and Shafai Bejestan M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences* 7(8):1164-1169.
11. Mohamed Ali H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering* 117(1):83-93.
12. Tokyay N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Water & Environmental Resources Congress*. Anchorage, Alaska, USA.