

تأثیر بستر موج‌دار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی

محبوبه غزالی^{۱*}، حسین صمدی بروجنی^۲، بهزاد قربانی^۳ و روح اله فتاحی نافچی^۴

چکیده

حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی برای استهلاک انرژی جنبشی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از قبیل دراپ‌ها، سرریزها، شوت‌ها و دریچه‌ها استفاده می‌شوند. در این تحقیق مشخصات پرش هیدرولیکی روی شش نوع بستر موج‌دار مثلثی در فلومی با مقطع مستطیلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد بررسی شد. فلوم دارای عرض و ارتفاع ۰/۴ متر و طول ۱۲ متر بود. در مجموع ۴۲ آزمایش در محدوده اعداد فرود اولیه ۶/۱ تا ۱۳/۱ انجام شد. در همه آزمایش‌ها، مشخصات اصلی پرش هیدرولیکی شامل نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و طول غلتاب اندازه‌گیری شد و پارامترهای بی‌بعد هیدرولیکی به صورت تابعی از عدد فرود تعیین شد. نتایج نشان داد که عمق پایاب و طول پرش روی بسترهای موج‌دار مثلثی نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان به ترتیب ۲۵ و ۵۴/۷ درصد کوچکتر است. بررسی و مقایسه ضریب تنش برشی نشان داد که تنش برشی در بستر زبر به طور متوسط ۸/۵ برابر بستر صاف است. نتایج این تحقیق انطباق زیادی با نتایج محققان قبلی داشت و نشان داد که از بسترهای با زبری‌های مثلثی برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با کارایی بهتر می‌توان استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، بسترهای موج‌دار مثلثی، عمق مزدوج و طول پرش.

ارجاع: غزالی م. صمدی بروجنی ح. قربانی ب. و فتاحی نافچی ر. ا. ۱۳۸۹. تأثیر بستر موج‌دار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. (۷)۴: ۹۹-۱۰۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

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

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

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

* نویسنده مسئول: ghazali_v_1365@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۹/۲۷

مقدمه

پرش یا جهش هیدرولیکی، یک جریان متغیر سریع در کانال‌های روباز است و پدیده‌ای است که در آن جریان از حالت فوق‌بحرانی به حالت زیربحرانی تبدیل می‌شود. در اثر پدیده پرش هیدرولیکی عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان زیادی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی، از میزان سرعت جریان به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. سازه‌هایی که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت به حد قابل قبولی می‌شوند، سازه‌های مستهلک کننده انرژی نامیده می‌شوند و حوضچه‌های آرامش از نوع پرشی، معمول‌ترین مستهلک کننده انرژی‌اند که در سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شوند.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در مورد انواع حوضچه‌های آرامش اجرا شده است و چند نوع از این حوضچه‌ها استاندارد شده، که مشهورترین آنها حوضچه‌های آرامش USBR (I, II, III, IV) و حوضچه SAF است. نکته قابل توجه در مورد حوضچه‌های آرامش با توجه به بتنی بودن این سازه‌ها، ابعاد حوضچه است. پارامترهایی چون طول حوضچه و عمق پایاب موردنیاز از جمله پارامترهای مهمی هستند که بر اقتصادی‌تر کردن سازه حوضچه آرامش تأثیر فراوانی دارند. برای کاهش ابعاد حوضچه آرامش اقداماتی چون ساخت بلوک‌های پای تنداب و یا بلوک‌های میانی به منظور اتلاف بیشتر انرژی جنبشی جریان در محدوده پرش و کاهش مشخصات آن در گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که بلوک‌ها مستقیماً در معرض جریان با انرژی بالا هستند نیاز به استحکام زیاد برای مقابله در برابر نیروهای وارده و پایداری زیادی دارند که این امر منجر می‌شود تا ابعاد آنها بزرگ گردد و در مواقعی در معرض کاویتاسیون نیز قرار گیرند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌ها شود ایجاد زبری مصنوعی در بستر جریان است. زبر کردن کف باعث می‌شود که در یک حجم کنترل مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومتی زبری‌ها، کمتر از مومنتم ورودی شود. تفاوت زبری با بلوک این است که سطح فوقانی آنها کاملاً در زیر عمق اولیه پرش قرار گرفته و هم تراز با کف کانال بالادست است. از این روشی برای کاهش طول و عمق ثانویه پرش است.

تحقیقات اولیه توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) نشان می‌دهد که اگر کف کانالی که پرش هیدرولیکی در آن رخ می‌دهد به بستر زبر تبدیل شود، عمق پایاب موردنیاز برای تشکیل پرش می‌تواند به‌طور محسوسی کوچکتر از عمق مزدوج پرش در حالت کلاسیک که از معادله زیر محاسبه می‌شود، باشد:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (1)$$

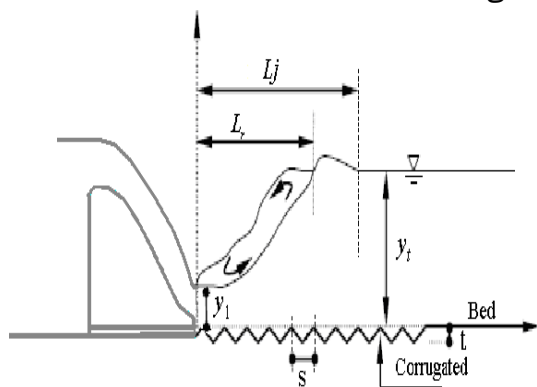
اید و همکاران (۲۰۰۰) تحقیقات آزمایشگاهی خود را در خصوص تعیین میدان سرعت در جریان‌های توربولنت در یک لوله موج‌دار سینوسی به قطر ۰/۶۲۲ متر، با شیب‌ها و دبی‌های مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که تنش‌های برشی رینولدز روی بسترهای موج‌دار به‌وجود آمده و این، میدان‌های سرعت روی بستر را کاهش می‌دهد و از آنجا که تاج سطح موج‌دار هم تراز با کف کانال است کاویتاسیون را نیز مقداری کم می‌کند. مقادیر سرعت در نواحی مرزی لوله‌ها نسبتاً کم است و برای عبور ماهی‌ها به بالادست در کالورت‌ها، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ و ارتفاع نسبی موج t/y_1 (t ارتفاع موج بستر و y_1 عمق اولیه پرش) برابر ۰/۲۵، ۰/۴۳ و ۰/۵ بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف است و میزان کاهش عمق ثانویه در بستر موج‌دار تقریباً برابر ۲۵ درصد است. توکیای (۲۰۰۵)، اثرات بستر موج‌دار سینوسی را بر پرش هیدرولیکی به‌صورت تجربی بررسی کرد. نتایج با اطلاعات موجود برای بسترهای موج‌دار و نیز پرش هیدرولیکی روی بسترهای صاف، مقایسه شدند. مشخص شد که عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش و طول پرش روی بستر موج‌دار به‌طور محسوسی کوچکتر از مقادیر متناظر روی بسترهای صاف است. ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷)، با انجام ۴۲ آزمایش روی ۶ نوع بستر با زبری‌های دوزنقه‌ای شکل در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ نشان دادند که تحت تأثیر زبری‌های موجی شکل با مقطع دوزنقه‌ای، طول پرش ۵۰ درصد و عمق مزدوج پرش، ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، روی زبری‌های سینوسی شکل نشان داد که برای

جریان ورودی از شبکه‌های توری فلزی و لاستیکی استفاده می‌شود و پس از طی طول ۱۲ متری کانال و عبور از روی دریچه متحرک انتهایی کانال و ریزش به حوضچه رسوب‌گیر، به صورت ثقلی وارد مخزن اصلی می‌شود.

در این تحقیق برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی و عمق اولیه پرش هیدرولیکی از یک سرریز WES که به سرریز استاندارد نیز معروف است، استفاده شده است. این سرریز نسبت به سرریزهای مشابه افت کمتر و در نتیجه ضریب دبی بیشتری دارد. سرریز مورد نظر مطابق با استاندارد USBR با ارتفاع و عرض ۴۰ سانتیمتر و برای حداکثر دبی عبوری ۴۰ لیتر بر ثانیه، با شعاع انحنای ۲۰ سانتیمتر طراحی شده و مدل اولیه آن تهیه و با انتقال مدل به کارگاه، سرریز مورد نظر از جنس گالوانیزه ساخته شد.

برای مشخص کردن طولی از حوضچه که زبری‌ها باید در آن نصب شوند، طول پرش هیدرولیکی کلاسیک و اعماق اولیه و ثانویه با توجه به اعداد فرود و شرایط حاکم بر جریان روابط تئوری محققین پیشین بدون حضور زبری‌ها، به دست آمد و طول مورد نیاز کف‌بندها در جهت اطمینان ۱/۵ متر منظور شد. برای ایجاد زبری، از ۶ کف بند گالوانیزه با موج‌های مثلثی با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر استفاده شد و برای جلوگیری از جداسدگی خطوط جریان و پدیده کاپیتاسیون، سطح بالایی زبری‌ها با سطح بستر بالادست که در آن جریان فوق‌بحرانی ایجاد می‌شود در یک تراز قرار داده شدند. شکل ۱ چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر با زبری‌های مثلثی و جدول ۱ مشخصات زبری‌های ایجاد شده در کف را ارائه می‌کند.



شکل ۱- چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر با زبری‌های مثلثی

یک عمق فوق‌بحرانی y_1 ، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود $3/6$ تا $8/6$ و برای شیب موج مختلف در محدوده $0.286 \leq t/s \leq 0.625$ طول موج زبری است. حدود ۵ تا ۲۶ درصد کوچکتر از بسترهای صاف است. همچنین مقدار طول نسبی پرش (L_j / y_2^*) که y_2^* عمق مزدوج پرش در بستر صاف است به‌ازای اعداد فرود کمتر از ۶ در حدود ۳ و برای اعداد فرود بالاتر از ۶ در حدود $3/5$ است. شفاعی بجستان و نیسی (۲۰۰۹)، با انجام ۴۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود بین $4/9$ تا $12/4$ روی مدل فیزیکی حوضچه آرامش با زبری‌های لوزی شکل مشاهده کردند که این زبری‌ها می‌توانند طول حوضچه را ۴۱ درصد و طول غلتاب را ۳۴ درصد کاهش دهند. همچنین حداقل ۱۸ درصد و حداکثر ۳۱ درصد و به‌طور متوسط ۲۴/۲ درصد کاهش در عمق مزدوج پرش حاصل می‌شود. السبایه و شبایک (۲۰۱۰)، یک مطالعه آزمایشگاهی در محدوده عدد فرود ۳ تا $7/5$ روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت و مستطیلی انجام دادند. نتایج بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش روی بستر زبر در مقایسه با پرش روی بستر صاف بود.

هدف اصلی در این تحقیق بررسی تأثیر زبری‌های ممتد مثلثی بر عمق مزدوج، طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی و مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی در خصوص پرش هیدرولیکی روی سایر بسترهای زبر و نیز پرش روی بستر صاف است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال (Flume) آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع $0/4$ متر، واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، اجرا شد. فلوم شیب‌پذیر با کف فلزی و دیواره‌های شفاف از جنس فایبرگلاس است. در این کانال، آب از مخزن بیرون آزمایشگاه به کمک یک پمپ سانتریفوژ و از طریق لوله ورودی کانال به مخزن ابتدایی وارد می‌شود. در انتهای مخزن یک سرریز مثلثی قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌کند و آب پس از عبور از آن وارد حوضچه آرامش ابتدای فلوم می‌شود و برای کند کردن

جدول ۲ برنامه کلی آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای وابسته را ارائه می‌کند (s: طول و t: ارتفاع موج).

پارامترهای اندازه‌گیری شده در هر آزمایش عبارتند از: دبی (Q)، سرعت در مقطع اولیه پرش (u_1)، عمق ثانویه پرش (y_2)، عمق پایاب (TW)، طول پرش (L_j)، طول غلتاب پرش (L_r) و پروفیل سطح آب در طول پرش. عمق آب پایاب با استفاده از دریچه مستطیلی در انتهای فلوم به‌نحوی تنظیم شد که پرش هیدرولیکی دقیقاً در ابتدای زبری‌ها تشکیل شود. برای اندازه‌گیری عمق جریان از عمق‌سنج استفاده شد و پروفیل سطح آب برای تمامی اعداد فرود و با فواصل طولی ۲/۵ تا ۵ سانتیمتر، از پنجه تا انتها برداشت و ثبت شد. محدوده دبی جریان ۵ تا ۳۵ لیتر بر ثانیه با فواصل ۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده و به‌وسیله سرریز مثلثی ابتدای فلوم دبی اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- مشخصات زبری‌های ایجاد شده در کف

شماره زبری	نام زبری	شیب وجه بالادست	شیب وجه پایین‌دست
۱	Sheet I	۱:۱/۵	۱:۱/۵
۲	Sheet II	۱:۰/۹۸	۱:۰/۹۸
۳	Sheet III	۱:۰/۶۶	۱:۰/۶۶
۴	Sheet IV	۱:۰/۶۶	۱:۰/۶۶
۵	Sheet V	۱:۰/۹۸	۱:۰/۹۸
۶	Sheet VI	۱:۰/۹۸	۱:۰/۹۸

به‌طورکلی در اجرای این تحقیق تعداد ۴۲ آزمایش روی بستر زبر در محدوده اعداد فرود ۶/۱ تا ۱۳/۱ اجرا شد.

جدول ۲- برنامه کلی آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای وابسته

تعداد آزمایش	مشخصات بستر			محدوده متغیرهای پرش		مشخصات کلی فلوم		
	T (cm)	s (cm)	جنس بستر	Fr ₁	دبی l/s	عمق (cm)	طول (m)	عرض (cm)
۴۲	۲/۵	۸/۶ تا ۱۱/۳	گالوانیزه	۱۳/۱ تا ۶/۱	۳۵ تا ۵	۴۰	۱۲	۴۰

استفاده شد. مقدار عمق زیر بحرانی در انتهای پرش به‌عنوان عمق مزدوج انتخاب شد. اگر y_1 عمق فوق‌بحرانی پرش روی بستر زبر و u_1 سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش و y_2 عمق مزدوج پرش باشد، می‌توان نوشت:

$$y_2 = f_1(y_1, u_1, g, \mu, \rho, s, t) \quad (2)$$

که در آن: g شتاب ثقل، ρ دانسیته و ν لزجت آب است. بنابراین با توجه به تئوری باکینگهام رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2\left(\text{Re} = \frac{u_1 y_1}{\nu}, Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}\right) \quad (3)$$

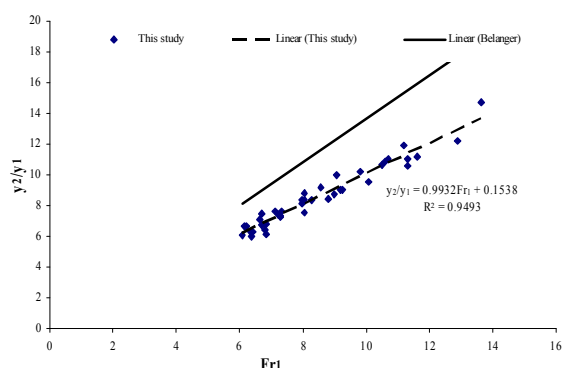
در این مطالعه مقدار عدد رینولدز در محدوده ۱۲۵۰۰ تا ۸۹۴۳۵ می‌باشد که بیانگر جریان آشفته است. بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر کرد. $s/y_1, t/y_1$ مقادیر نسبی ارتفاع موج و طول موج هستند که با توجه به یکسان

برای شناسایی انتهای گرداب (غلتاب) پرش، نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن جریان به‌صورت چشمه جوشیده و یک وضعیت ایستایی را ایجاد کند. طول پرش هیدرولیکی در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که تلاطم از بین رفته و سطح آب با پایاب برابر باشد. بنابراین طول غلتاب و طول پرش به‌وسیله مش‌بندی (به‌صورت میلی‌متری و سانتی‌متری) روی دیواره شیشه‌ای فلوم اندازه‌گیری شد. سرعت در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه پیوستگی عمق اولیه پرش محاسبه شد (ایزدجو، ۱۳۸۳).

نتایج و بحث

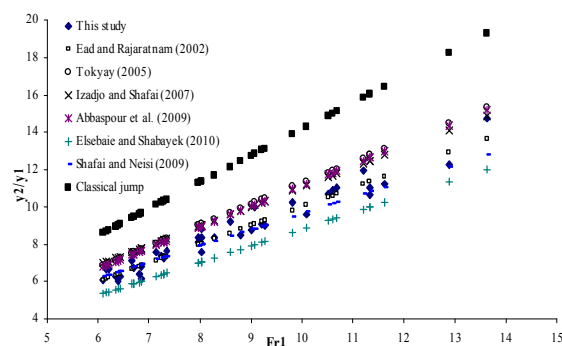
عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

برای بررسی میزان تأثیر زبری‌های بستر بر کاهش یا افزایش عمق مزدوج پرش، داده‌های حاصل از پروفیل سطح آب



شکل ۲- نسبت y_2 / y_1 در برابر Fr_1 درپرش کلاسیک و پرش روی بسترهای زبر

شکل ۳ نسبت اعماق مزدوج حاصل از نتایج این تحقیق به همراه نتایج سایر تحقیقات روی بسترهای زبر و نیز پرش کلاسیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققین روی بسترهای زبر مطابقت دارد. مقایسه نسبت اعماق مزدوج برای پرش هیدرولیکی روی بستر با زبری‌های مثلی و سایر بسترهای زبر بیانگر تأثیر بیشتر این زبری‌ها در کاهش نسبت اعماق مزدوج در مقایسه با تحقیقات توکیای (۲۰۰۵) روی بستر سینوسی، ایزدجو و شفافی بجمستان (۲۰۰۷) روی بستر دوزنقه‌ای و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) روی بستر سینوسی و توافق بالا با نتایج اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) روی زبری‌های سینوسی و شفافی بجمستان و نیسی (۲۰۰۹) روی زبری‌های لوزی شکل است.



شکل ۳- مقایسه نسبت y_2 / y_1 در برابر Fr_1 در پرش کلاسیک و پرش روی زبری‌های مختلف

بودن ارتفاع موج (t) برای کلیه بسترهای زبر، می‌توان t / y_1 را حذف کرد و نوشت:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3(Fr_1, \frac{S}{y_1}) \quad (4)$$

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در نظر گرفتن y_2 / y_1 به عنوان متغیر وابسته و S / y_1 و Fr_1 به عنوان متغیرهای مستقل، فرض وابسته بودن نسبت عمق‌های مزدوج به عدد ثابت، عدد فرود و طول موج نسبی تأیید و در این حالت معادله برازش داده شده به صورت زیر حاصل گردید:

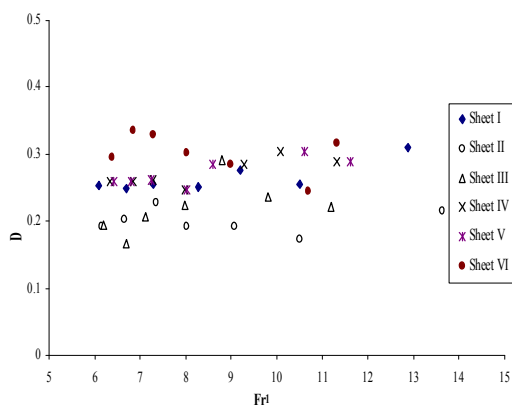
$$\frac{y_2}{y_1} = 1.272Fr_1 - 0.0914 \frac{S}{y_1} - 1.386, \quad R^2 = 0.95 \quad (5)$$

در حالت بعد، y_2 / y_1 فقط تابعی از Fr_1 در نظر گرفته شد. در هر ابعاد زبری بستر، تغییرات نسبت عمق ثانویه به اولیه در مقابل عدد فرود اولیه متناظر با آنها ترسیم و با پرش کلاسیک مقایسه شد. شکل ۲ رابطه بین y_2 / y_1 در برابر عدد فرود اولیه را برای پرش کلاسیک و پرش روی بسترهای زبر این تحقیق در مقادیر مختلف طول موج نسبی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که S / y_1 تأثیر زیادی بر نسبت اعماق مزدوج ندارند و می‌توان از اثر آن صرف نظر کرد که با نتایج گزارش شده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، توکیای (۲۰۰۵)، ایزدجو و شفافی بجمستان (۲۰۰۷)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد. معادله ۴ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_4(Fr_1) \quad (6)$$

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، با افزایش عدد فرود نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد و در تمام اعداد فرود خط حاصل از این تحقیق زیر خط پرش کلاسیک (معادله بلانگر) است. یا به عبارتی در شرایط یکسان جریان ورودی، مقدار عمق مزدوج پرش کمتر است. البته این میزان کاهش به شرایط جریان بالادست پرش (عدد فرود اولیه) بستگی دارد. برای تعیین رابطه بین اعماق مزدوج و عدد فرود معادله ۶، اطلاعات به دست آمده و به کار بردن رگرسیون خطی، رابطه زیر با ضریب همبستگی $R^2 = 0.9493$ حاصل شد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.993Fr_1 + 0.1538 \quad (7)$$



شکل ۴- مقادیر D به دست آمده از آزمایشات مختلف بر حسب عدد فرود

طول پرش

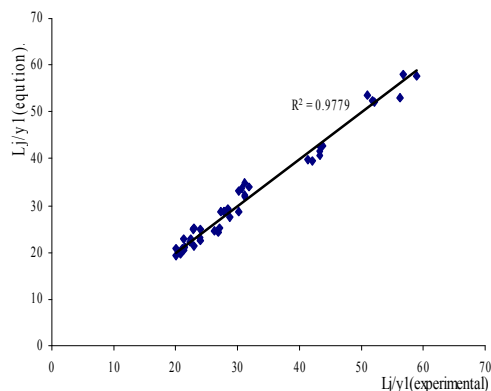
اگر Y_1 عمق فوق بحرانی پرش روی بستر زبر و Fr_1 عدد فرود در مقطع اولیه پرش و L_j طول پرش باشد مشابه تحلیل ابعادی ارائه شده برای عمق مزدوج پرش، می‌توان نوشت:

$$\frac{L_j}{Y_1} = f\left(Fr_1, \frac{S}{Y_1}\right) \quad (10)$$

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در نظر گرفتن L_j / Y_1 به عنوان متغیر وابسته و Fr_1 و S / Y_1 به عنوان متغیرهای مستقل، فرض وابسته بودن نسبت L_j / Y_1 به عدد ثابت، عدد فرود و طول موج نسبی تأیید می‌شود. در این حالت معادله برازش داده شده به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{L_j}{Y_1} = 3.214 Fr_1 + 0.878 \frac{S}{Y_1} - 3.183, \quad R^2 = 0.978 \quad (11)$$

در شکل ۵، نتایج حاصل از معادله ۱۱ در برابر داده‌های حاصل از آزمایش‌ها ترسیم شده است.



شکل ۵- مقادیر L_j / Y_1 حاصل از رابطه (۱۱) در برابر داده‌های آزمایشگاهی

در شکل ۳ از معادله ۸ برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی روی بسترهای صاف استفاده شده است (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲):

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \sqrt{2} Fr_1 - 1 \cong \sqrt{2} Fr_1 \quad (8)$$

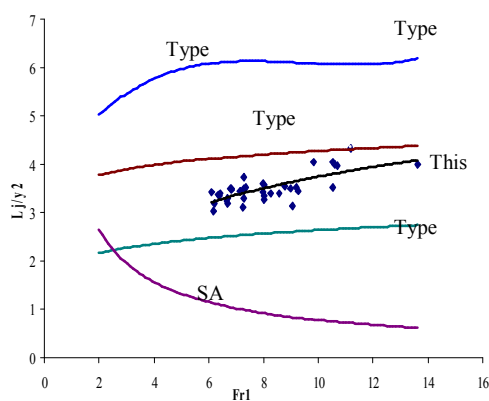
برای نشان دادن میزان اختلاف عمق مزدوج پرش روی بستر زبر و صاف، از یک ضریب بدون بعد بنام ضریب کاهش عمق نسبی (D) استفاده می‌شود. این فاکتور در پرش‌های هیدرولیکی کلاسیک برابر صفر است و از معادله ۹ محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{Y_2^* - Y_2}{Y_2^*} \quad (9)$$

در این معادله Y_2^* عمق ثانویه پرش در بستر صاف به ازای عمق اولیه Y_1 و عدد فرود اولیه Fr_1 یکسان با بستر موج‌دار است. در آزمایش‌های انجام شده متوسط مقدار D برای بسترهای زبر I, II, III, IV, V, VI به ترتیب برابر با ۰/۱۹۹، ۰/۲۲۱، ۰/۲۷۲، ۰/۲۵۶، ۰/۳۰۱ و به طور کلی برابر ۰/۲۵ می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این مطلب است که زبری شماره ۶ بالاترین و زبری شماره ۲ پایین‌ترین تأثیر را در کاهش عمق پایاب داشته است. بنابراین عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش در حوضچه‌های آرامش با زبری‌های مثلثی شکل برابر $0.75 Y_2^*$ است که در مقایسه با عمق پایاب مورد نیاز در حوضچه‌های آرامش نوع II و III، که به ترتیب برابر $0.83 Y_2^*$ و $0.97 Y_2^*$ است، می‌توان دریافت که اثر زبری‌ها زیاد است.

مقایسه متوسط مقدار ضریب D حاصل از نتایج این تحقیق با مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین از جمله اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، ($D = 0.25$)، توکیای (۲۰۰۵)، ($D = 0.2$)، ایزدجو و شفاعی بجزستان (۲۰۰۷)، ($D = 0.2$)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، ($D = 0.2$) و شفاعی بجزستان و نیسی (۲۰۰۹)، ($D = 0.24$)، بیانگر تأثیر خوب این زبری‌ها در کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و توافق نتایج حاصله با دیگر تحقیقات در این رابطه است. مقادیر به دست آمده برای D در شکل ۴ نشان داده شده است.

به دست آوردند که شباهت زیادی با نتایج این تحقیق برای پرش‌ها در محدوده اعداد فرود کمتر از ۹/۵ دارد. شکل ۷ منحنی‌های ارائه شده توسط پترکا (۱۹۸۳) در خصوص طول پرش کلاسیک و پرش روی حوضچه‌های آرامش نوع I, II, III, IV و SAF برحسب عدد فرود اولیه و این تحقیق را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مقایسه با حوضچه‌های آرامش استاندارد، طول حوضچه با بستر مثلثی شکل در اعداد فرود کمتر از ۹/۵ بین منحنی تیپ ۲ و ۳ قرار دارد و با افزایش عدد فرود اولیه به منحنی تیپ ۲ نزدیکتر می‌شود و از آنجا که زبری‌ها در مقابل جت ورودی آب قرار نمی‌گیرند مشکلی از نظر کاویتاسیون ندارند که این موجب پایداری بیشتر آنها نسبت به بلوک‌های موجود در حوضچه تیپ ۲ می‌شود.



شکل ۷- مقایسه طول پرش هیدرولیکی این مطالعه با حوضچه‌های USBR

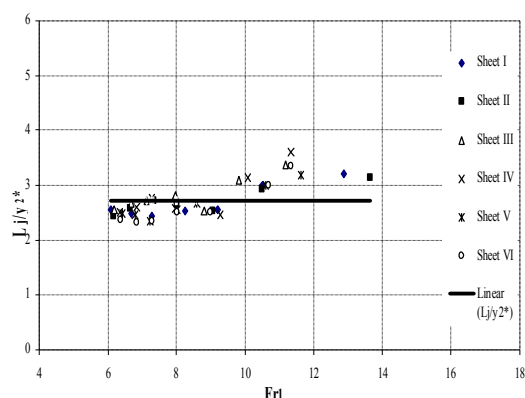
در نهایت، معادله زیر بین طول پرش با عدد فرود در مقطع اولیه استخراج شد:

$$\frac{L_j}{y_2} = 1.3757 \ln(Fr_1) + 0.714, \quad R^2 = 0.7544 \quad (12)$$

طول غلتایی پرش

به منظور بررسی روند تغییرات طول غلتاب پرش در هر نوع زبری بستر، منحنی تغییرات طول نسبی غلتاب (L_T/Y_1) در مقابل عدد فرود اولیه ترسیم شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. برای مقایسه نتایج این تحقیق با طول و عمق مزدوج در پرش بدون زبری، مقادیر تغییرات طول نسبی غلتاب در پرش کلاسیک با استفاده از معادله ۱۳ ارائه شده توسط هاگر (۱۹۹۲)، که در آن b عرض کانال است،

برای بررسی و مقایسه طول پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر با حالت کلاسیک، طول پرش روی بستر زبر (L_j) اندازه‌گیری شده و با استفاده از مقادیر محاسباتی عمق ثانویه پرش در حالت کلاسیک از رابطه بلانگر (y_2^*) بی‌بعد گردیدند. شکل ۶ مقادیر طول نسبی پرش (L_j/y_2^*) به‌ازای اعداد فرود اولیه را نمایش می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به‌ازای اعداد فرود کمتر از ۹/۵ نسبت L_j/y_2^* در حدود ۲/۵ و به‌ازای اعداد فرود بالاتر از ۹/۵ نسبت L_j/y_2^* در حدود ۳/۱۷ است. به‌طور کلی متوسط مقدار نسبت L_j/y_2^* برای محدوده اعداد فرود این تحقیق در حدود ۲/۷۲ است که در مقایسه با مقدار مشابه برای حالت کلاسیک ($L_j = 6y_2^*$)، نشان می‌دهد که در مجموع، درصد کاهش طول پرش در ۶ نوع زبری موردنظر به‌ترتیب ۵۵/۳۶، ۵۴/۸۱، ۵۳، ۵۳/۲۲، ۵۵/۳۹ و ۵۶/۲۷ درصد و به‌طور متوسط ۵۴/۷ درصد است.



شکل ۶- مقادیر طول نسبی پرش (L_j/y_2^*) به‌ازای اعداد فرود اولیه

طول نسبی پرش هیدرولیکی در بررسی‌های آید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) تقریباً برابر ۳، در تحقیق توکیای (۲۰۰۵) برابر ۴، در آزمایش‌های عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) برای اعداد فرود کمتر از ۶ برابر ۳ و برای اعداد فرود بالاتر از ۶ برابر ۳/۵ است. همچنین مطالعات شفافی بجستان و نیسی (۲۰۰۹) نشان داد که زبری‌ها به‌طور متوسط باعث کاهش ۴۱ درصدی طول پرش هیدرولیکی می‌گردند. السبایه و شبایک (۲۰۱۰) نسبت L_j/y_2^* را برای محدوده اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ در حدود ۲/۱

مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی است. با صرفه‌نظر از نیروهای تنش نرمال در معادله فوق، مجموع نیروهای برشی بستر با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$F_\tau = \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (16)$$

که در آن: $M_1 = \rho u_1^2 y_1$ ، $P_2 = 0.5\gamma y_2^2$ ، $P_1 = 0.5\gamma y_1^2$ و $M_2 = \rho u_2^2 y_2$ بوده و به ازای مقادیر عمق و سرعت در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی به دست می‌آید. مقدار ضریب نیروی برشی ε در بستر موج‌دار و صاف از رابطه ارائه شده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) که به صورت زیر است، قابل ارزیابی است:

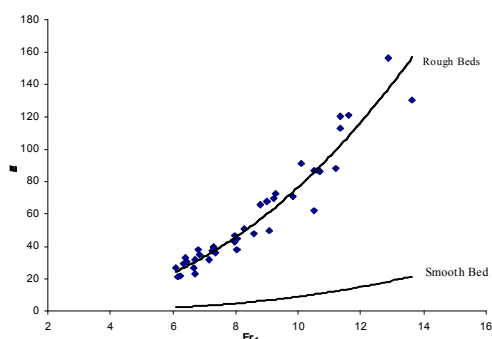
$$\varepsilon = \frac{F_\tau}{\gamma y_1^2 / 2} \quad (17)$$

معادله ضریب تنش برشی برای پرش روی بستر با زبری‌های مثلثی این تحقیق و بستر صاف که توسط راجاراتنام (۱۹۶۵) ارائه شده است به ترتیب به صورت زیر است:

$$\varepsilon = 0.428 Fr_1^{2.256}, \quad R^2 = 0.93 \quad (18)$$

$$\varepsilon = 0.16 Fr_1^2 - 0.8 Fr_1 + 1 \quad (19)$$

به منظور بررسی تأثیر زبری‌های مثلثی بر ضریب تنش برشی بستر، مقدار ضریب تنش برشی بستر در کلیه آزمایش‌ها از معادله ۱۷ محاسبه شده است. همچنین این نتایج همراه منحنی به دست آمده برای ضریب تنش برشی روی بسترهای صاف در پرش کلاسیک (راجاراتنام، ۱۹۶۵) ارائه شده است (شکل ۹). نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که مقدار ε در پرش‌های هیدرولیکی بر روی بستر زبر به طور میانگین ۸/۵ برابر ضریب نیروی برشی در بسترهای صاف است و مقادیر ضریب نیروی برشی در تمام زبری‌های استفاده شده بالای منحنی پرش کلاسیک قرار می‌گیرد.



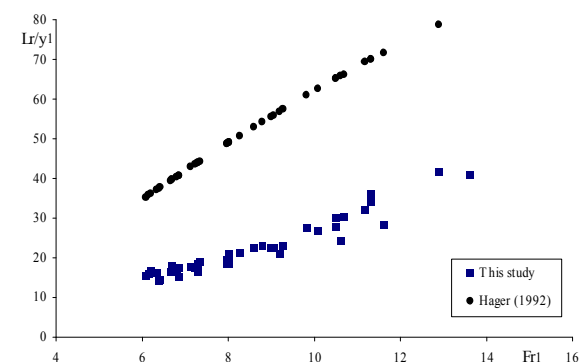
شکل ۹- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی ε در بستر زبر مثلثی و صاف

محاسبه و در این شکل ترسیم شد که با خط ممتد نشان داده شده است و نقاط مربوط به داده‌های آزمایشگاهی است. در نهایت معادله ۱۴ بین طول غلتاب با عدد فرود در مقطع اولیه استخراج شد:

$$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right), \quad \frac{y_1}{b} < 0.1 \quad (13)$$

$$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 100 \tanh\left(\frac{Fr_1}{12.5}\right), \quad 0.1 < \frac{y_1}{b} < 0.7$$

$$\frac{L_r}{y_1} = 3.42 Fr_1 - 6.931, \quad R^2 = 0.925 \quad (14)$$



شکل ۸- نسبت L_r / y_1 در برابر Fr_1 برای بسترهای زبر

به منظور مقایسه کمی مقادیر طول غلتاب در پرش کلاسیک محاسبه شده از معادله هاگر (معادله ۱۳) و طول غلتاب حاصل از آزمایش‌ها، درصد کاهش طول غلتاب محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در مجموع، درصد کاهش طول غلتابی پرش در ۶ نوع زبری موردنظر به ترتیب ۵۶/۹۵، ۵۶/۳۱، ۵۶/۱۸، ۵۷/۲۱، ۵۹/۷۸ و ۵۹/۲۲ درصد و به طور متوسط ۵۷/۶۱ درصد است.

تنش برشی بستر

دلیل اصلی کاهش عمق پایاب (y_2) و طول پرش هیدرولیکی در پرش روی بسترهای زبر، افزایش تنش برشی بستر است (ایزدجو، ۱۳۸۳). تنش برشی بستر در پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار با استفاده از رابطه مومنتم تعیین می‌شود. معادله مومنتم در بازه ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی به فرم زیر است:

$$(M_2 + P_2 - S_2) = (M_1 + P_1 - S_1) - \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx \quad (15)$$

در این معادله $S_2, S_1, M_2, M_1, P_2, P_1$ به ترتیب نیروهای فشاری، مومنتم و نیروهای تنش نرمال در واحد طول در

- 2- Abbaspour A. Hosseinzadeh Dalir A. Farsadizadeh D. and Sadraddini A.A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Applied Sciences* 9(11): 2045-2055.
- 3- Ead S.A. Rajaratnam N. Katopodis C. and Ade F. 2000. Turbulent open channel flow in circular corrugated culverts. *Hydraulic Engineering* 126(10): 750-757.
- 4- Ead S.A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. *Hydraulic Engineering* 128(2): 656-663.
- 5- Elsebaie I.H. and Shabayek Sh. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *Civil & Environmental Engineering*, 10(1): 40-50.
- 6- Hager W.H. 1992. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Kluwer academic Publishers.
- 7- Izadjoo F. and Shafai Bejestan M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Applied Sciences* 7(8):1164-1169.
- 8- Peterka A. J. 1983. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Engineering Monograph No. 25, U.S. Bureau of Reclamation, Denver. Seventh Printing.
- 9- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Trans. Eng. Inst. Canada* 11:1-8.
- 10- Shafai Bejestan M. and Neisi K. 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Applied Sciences* 2(5): 436-445.
- 11- Tokyay N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI, Water & Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, USA.

نتیجه گیری

این تحقیق به منظور بررسی تأثیر زبری‌های مثلثی در حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی اجرا شد. نتایج حاصل بیانگر این مطلب بود که زبری‌های مثلثی می‌توانند باعث کاهش عمق پایاب موردنیاز برای ایجاد پرش در مقایسه با پرش کلاسیک به مقدار حدود ۱۹/۹ تا ۳۰/۱ درصد و به طور متوسط ۲۵ درصد گردند. همچنین در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک روی بستر صاف، نتایج نشان می‌دهد که زبری‌ها می‌توانند طول پرش هیدرولیکی را تا ۵۴/۷ درصد و طول غلتاب پرش را به طور میانگین در حدود ۵۷/۶۱ درصد کاهش دهند. مقادیر ضریب نیروی برشی در بسترهای زیر پیشنهادی در این تحقیق حدود ۸/۵ برابر بستر صاف است. در نهایت زبری شماره ۶ با درصد کاهش عمق پایاب، طول پرش و طول غلتابی پرش به ترتیب به میزان ۳۰/۱، ۵۶/۲۷ و ۵۹/۲۲ درصد، مؤثرترین زبری در کنترل و کاهش ابعاد پرش بوده است.

منابع

۱- ایزدجو ف. ۱۳۸۳. تأثیر موج بودن بستر روی طول پرش و نوسانات زیر فشار در حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی. پایان‌نامه‌ی دکترای سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

