

## تأثیر بستر زبر دوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی

زینب راور<sup>۱\*</sup> - جواد فرهودی<sup>۲</sup> - عاطفه نژندعلی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۱۵

### چکیده

یکی از سازه‌های مؤثر بر کاهش انرژی در پایاب سازه‌های هیدرولیکی، حوضچه آرامش می‌باشد که با داشتن ضامن سازه‌ای خاص و تشکیل پرش هیدرولیکی، در آرام کردن جریان خروجی از سازه‌ها ایفای نقش می‌نماید. زبر نمودن بستر، عامل مؤثری در استهلاک انرژی و کنترل پرش هیدرولیکی به شمار می‌رود. در این مقاله نتایج بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستری با زبری‌های عرضی و یکپارچه دوزنقه‌ای قائم، گزارش شده است. تعداد ۱۲۶ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۳/۹ تا ۱۳/۷ انجام شد. زبری‌های انتخابی با سه ارتفاع مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و در هر ارتفاع چهار فاصله متفاوت بین بلوک‌ها در نظر گرفته شد. آنالیز داده‌ها نشان می‌دهد که پروفیل سطح جریان در پرش هیدرولیکی را می‌توان با یک منحنی میانگین نشان داد. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های حاصل از پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف نشان داد که مقادیر عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی و طول غلطاب، در بستر زبر نسبت به بستر صاف به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند؛ در حالی که تنش برشی کف و افت انرژی، افزایش پیدا می‌کنند. روند این تغییرات با افزایش عدد فرود و ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، شدت می‌یابد. مقادیر تنش برشی کف، بر روی بسترهای زبر بین ۳/۲ تا ۹/۶ برابر بستر صاف است. در نهایت روابطی برای به دست آوردن عمق مزدوج نسبی، افت نسبی انرژی و تنش برشی کف بر حسب عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی برای پرش‌های تشکیل شده بر روی بسترهای زبر، ارائه گردید.

**واژه‌های کلیدی:** پرش هیدرولیکی، بستر زبر، عمق مزدوج نسبی، طول پرش، افت انرژی

### مقدمه

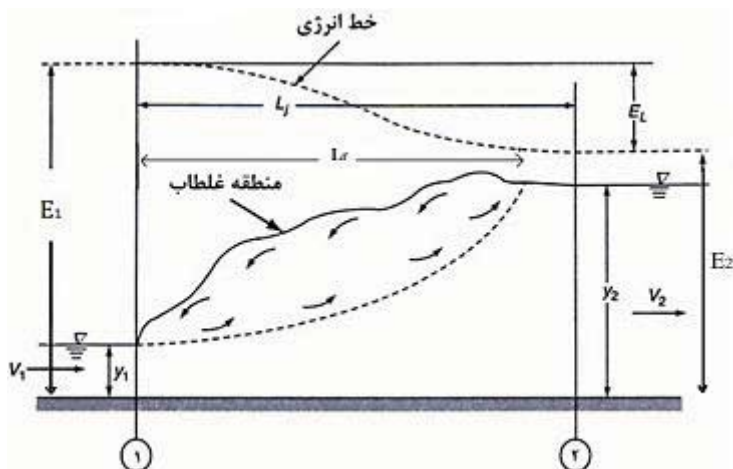
در این رابطه  $Fr_1 = v_1 / \sqrt{g y_1}$ ، عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی است.  $y_1$  و  $v_1$  به ترتیب عمق و سرعت متوسط فوق‌بحرانی در ابتدای پرش و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد. نمای کلی از پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف در شکل ۱ قابل ملاحظه است.  $y_1$  و  $y_2^*$  به ترتیب بیانگر عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و  $L_r$  و  $L_j$  به ترتیب نمایانگر طول پرش و طول غلطاب می‌باشند.

حوضچه‌های آرامش در پایاب سازه‌های هیدرولیکی، محل مناسبی برای ایجاد، کنترل و مهار پرش هیدرولیکی به‌شمار می‌آیند و بلوک‌های داخل حوضچه، باعث هدایت پرش به درون آن و استهلاک بخشی از انرژی جنبشی پرش هیدرولیکی و در نتیجه افزایش راندمان حوضچه‌های آرامش می‌شوند. در سال‌های اخیر، از المان‌های زبر در کف حوضچه‌ها استفاده شده است. محققانی از جمله اید و راجاراتنام (۳)، اید (۴)، گوهری و فرهودی (۵)، محمد علی (۹)، توکیای (۱۲) و ... اثر زبری‌ها را در افزایش کارایی حوضچه‌های آرامش و کاهش طول پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار داده‌اند. زبری کف می‌تواند به‌صورت سنگ‌چین، موج‌های سینوسی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی یکپارچه در عرض آبراهه باشد.

پرش هیدرولیکی پدیده‌ای رایج در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی، نظیر سرریزها و دریچه‌ها می‌باشد. تبدیل سریع جریان فوق‌بحرانی به شرایط زیربحرانی در بازه‌ای نسبتاً کوتاه، عمق جریان را افزایش می‌دهد و باعث افت قابل توجه انرژی می‌گردد. این پدیده به‌طور گسترده‌ای توسط محققان مختلف بر روی کانال‌های مستطیلی مستقیم و افقی با کف صاف (پرش هیدرولیکی کلاسیک)، مورد بررسی قرار گرفته است. به پیشنهاد بلانگر (۲) عمق ثانویه پرش کلاسیک در ناحیه زیربحرانی بر روی بستر صاف با مقطع مستطیلی ( $y_2^*$ ) به این صورت محاسبه می‌شود:

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

۲۰۱- دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی و فن‌آوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج  
(\*) نویسنده مسئول: (Email: ze6482@gmail.com)  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد



شکل ۱- شمای کلی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف

طول بی‌بعد پرش  $(L_j/y_2^*)$  برابر ۳ و متوسط مقادیر  $D$  برابر با  $0.7$  می‌باشد. اید (۴) از سه بستر موج‌دار سینوسی، دوزنقه‌ای و منشوری استفاده کرد و نتیجه گرفت که زبری نسبی  $(t/y_1)$  و همچنین شکل موج‌ها، تأثیر چندانی بر روی عمق مزدوج نسبی ندارد. همچنین نسبت  $y_2/y_1$ ، تقریباً ۸۰ درصد عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی می‌باشد. با توجه به اینکه تاج زبری‌ها هم‌سطح بستر بالادست می‌باشد، موج‌ها شبیه گودال عمل کرده و تغییر ارتفاع آنها تأثیر زیادی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی ندارد. اید میزان عدد بی‌بعد  $D$  را حدود  $0.4$  به‌دست آورد و نشان داد که ضریب نیروی برشی بر روی بسترهای زبر، ۱۵ برابر بستر صاف می‌باشد. گوهری و فرهودی (۵) خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی، در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که عمق ثانویه پرش بر روی سطوح زبر در مقایسه با سطوح صاف کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها، شدت می‌یابد. همچنین تغییر ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی ندارد. آنها نتیجه گرفتند که ضریب تنش برشی کف نیز بر روی بسترهای زبر به مراتب بیشتر از بسترهای صاف و در حدود ۹ برابر می‌باشد. عباسپور و حسین‌زاده (۱) با ایجاد بستر موج‌دار با محدوده شیب موج  $0.286 \leq t/s \leq 0.625$ ، مشخصات پرش هیدرولیکی را در محدوده اعداد فرود  $3/8$  تا  $8/6$  بررسی کردند. آنها نشان دادند که مقادیر عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی به‌ترتیب در حدود  $2.0$  و  $5.0$  درصد کمتر از بستر صاف می‌باشد. در این تحقیق برای طول بی‌بعد پرش  $(L_j/y_2^*)$  دو مقدار ثابت ۳ و  $3/5$  به‌ترتیب برای اعداد فرود کوچکتر و بزرگتر از ۶ به‌دست آمد. ابراهیم و شزی (۷) پرش هیدرولیکی را بر روی پنج نوع زبری به شکل‌های سینوسی، مثلثی،

راجاراتنام (۱۱) از اولین محققانی بود که به‌طور گسترده مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی کانال‌هایی با بستر زبر را مورد مطالعه قرار داد. وی نشان داد که طول غلطاب و طول پرش و عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند. وی پارامتری را به نام زبری نسبی  $(K = k_e/y_1)$  معرفی کرد که در آن  $k_e$  ارتفاع معادل زبری و  $y_1$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی بر روی سطح زبر می‌باشد و نشان داد  $y_2$  تابعی از عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی  $(Fr_1)$  و زبری نسبی می‌باشد. وی نشان داد که اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بستر زبر بیش از  $1/5$  برابر پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌باشد. هیو و فلاک (۶) بر اساس مطالعاتی که بر روی بسترهای زبر انجام دادند، کاهش عمق ثانویه و طول پرش را تأیید نمودند. محمدعلی (۹) در تحقیقات خود نشان داد که طول پرش هیدرولیکی به‌طور قابل ملاحظه‌ای با استفاده از زبری‌های مکعبی کاهش می‌یابد. اید و راجاراتنام (۳) در بررسی‌هایشان بیان کردند که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار، کوچکتر از بستر صاف است و برای نشان دادن اختلاف این دو عمق، ضریب بدون بعدی به نام پارامتر کاهش عمق  $(D = (y_2^* - y_2)/y_2^*)$  را تعریف کردند. آنها مقدار  $D$  را برابر با  $0.25$  به‌دست آوردند و توضیح دادند که دلیل کاهش عمق ثانویه پرش، زیاد شدن تنش برشی بستر است که در بستر زبر در حدود  $1.0$  برابر بستر صاف می‌باشد. طول پرش نیز در بستر موج‌دار نصف بستر صاف به‌دست آمد. ایزدجو و شفاعی بجستان (۸) مشخصات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری دوزنقه‌ای بررسی کردند. آنها گزارش کردند که نسبت‌های  $t/y_1$  و  $s/y_1$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی عمق ثانویه ندارند. نتایج مطالعات نشان داد که

تعداد ۱۲۶ آزمایش در محدوده اعداد فرود  $3/9$  تا  $13/7$  با دو عمق اولیه (سانتی‌متر  $1/55$  و  $1/18 = y_1$ ) و مقادیر  $(1.29 \leq t/y_1 \leq 3.39)$ ،  $(0.65 \leq s/y_1 \leq 6.78)$  انجام شد. به منظور تأمین ارتفاع استاتیک آب جهت ایجاد اعداد فرود مورد نظر،  $1/2$  متر از ورودی کانال با استفاده از پلکسی‌گلاس تا ارتفاع  $1/1$  متر افزایش داده شد و برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی و اعماق اولیه پرش، یک دریچه کشویی از جنس پلکسی‌گلاس در ابتدای کانال نصب گردید. با توجه به مشخصات هندسی لبه ورودی دریچه، ضریب دریچه  $0/6$  تعیین شد. یک دریچه کشویی کرکره‌ای در انتهای کانال نصب گردید و با کنترل عمق پایاب، پاشنه پرش آبی در طول آزمایش‌ها با بستر زبر، در فاصله تقریبی  $17$  سانتی‌متر از دریچه تثبیت گردید. دبی جریان توسط سرریزهای مثلثی و مستطیلی پایاب کانال، اندازه‌گیری شد. عمق ثانویه در انتهای پرش آبی، با استفاده از یک عمق‌سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد و برای اندازه‌گیری طول پرش آبی و طول غلطاب از یک نوار متری منصوب در بدنه کانال استفاده گردید. معرفی بسترهای زبر به همراه اطلاعات تعدادی از آزمایش‌ها در جدول ۱ موجود است.

## نتایج و بحث

### پروفیل سطح آب

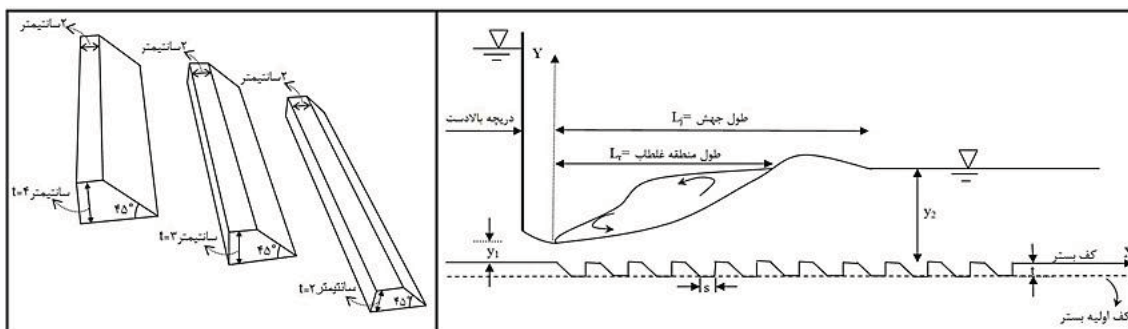
با عکس برداری به صورت مستقیم از نیمرخ طولی پرش آبی و رقمی کردن عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار گرافر، اطلاعات مربوط به پروفیل سطح آب در پرش ثبت شد. پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب در شکل ۳ نشان داده شده‌اند که در آن‌ها  $(y - y_1)/(y_2 - y_1)$  در برابر  $x/L_j$  رسم شده است.  $y$  عمق جریان و  $x$  فاصله از ابتدای پرش است. با توجه به این شکل می‌توان پروفیل سطح جریان در پرش هیدرولیکی را با یک منحنی میانگین ارائه نمود.

ذوزنقه‌ای و مستطیلی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که زبری نسبی و شکل زبری‌ها اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر نسبت  $y_2/y_1$  ندارد و این نسبت در بسترهای زبر در حدود ۸۸ درصد عدد فرود اولیه می‌باشد. در این بررسی مقدار عدد بی‌بعد  $D$  در حدود  $0/37$  به دست آمد و مقدار طول بی‌بعد پرش  $(L_j/y_2^*)$  تقریباً ثابت و در حدود  $2/1$  تخمین زده شد. آنها در مطالعات خود بیان کردند که تنش برشی بر روی بسترهای زبر، مستقل از شکل زبری‌هاست و می‌تواند توسط یک منحنی متوسط نشان داده شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده، زبری بستر عامل مؤثری در کاهش هزینه‌های حوضچه‌های استهلاک انرژی می‌باشد. از این رو در مطالعه حاضر شکل جدیدی از زبری‌ها، به صورت بلوک‌های یکپارچه ذوزنقه‌ای قائم، انتخاب گردیده و اثر ابعاد و فاصله بین زبری‌ها بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی، در محدوده گسترده‌ای از اعداد فرود مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

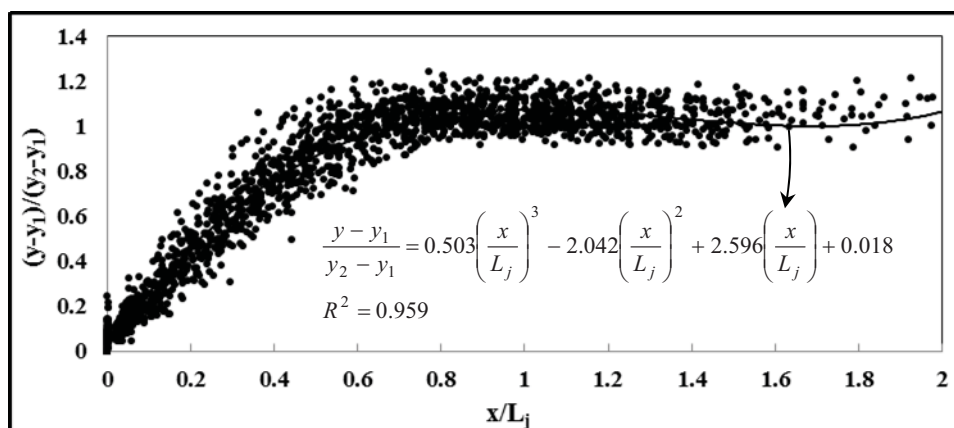
آزمایش‌های مورد نظر در کانالی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب  $12$ ،  $0/5$  و  $0/25$  متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران انجام گرفت. تعدادی نوار چوبی با مقطع ذوزنقه‌ای قائم به عرض  $25$  سانتی‌متر، پهنای تاج  $2$  سانتی‌متر و زاویه رأس  $45$  درجه در سه ارتفاع مختلف (سانتی‌متر  $4$  و  $3$  و  $2$ ) مورد بررسی قرار گرفتند و در هر ارتفاع چهار فاصله ( $s$ ) متفاوت بین بلوک‌ها در نظر گرفته شد؛ به طوری که در کل چهار مقدار برای نسبت فاصله به ارتفاع زبری‌ها به دست آمد ( $2$  و  $1/5$  و  $1$  و  $0/5 = s/t$ ) و  $12$  نوع کف زبر برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. کف‌های کاذب ایجاد شده طوری در کانال جایگذاری شدند که تاج زبری‌ها هم‌تراز با کف بستر بالادست و پایین‌دست باشد. در این حالت زبری‌ها به‌عنوان فرورفتگی‌هایی در کف بستر عمل کرده، مجموعه‌ای از جریان‌های گردابی را ایجاد می‌کنند و تنش برشی رینولدز در کف را افزایش می‌دهند (شکل ۲).



شکل ۲- نمای کلی کانال و کف زبر نصب شده (زبری‌های ذوزنقه‌ای با ارتفاع ۲ و ۳ و ۴ سانتی‌متر)

جدول ۱- مشخصات بسترهای زیر و تعدادی از آزمون‌های انجام شده بر روی بسترهای زیر

ردیف	آزمون	بستر	t(cm)	s(cm)	y <sub>1</sub> (cm)	s/t	Fr <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> (cm)	y <sub>2</sub> * (cm)	L <sub>r</sub> (cm)	L <sub>j</sub> (cm)	L <sub>j</sub> * (cm)
۱	A <sub>7</sub>	t <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	۲	۱	۱/۱۸	۰/۵	۱۳/۶۶	۱۸/۹۰	۲۲/۲۱	۴۵	۸۵	۱۳۳
۲	B <sub>7</sub>	t <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	۲	۴	۱/۱۸	۲	۱۳/۷۰	۱۷/۸۷	۲۲/۲۹	۴۶	۸۰	۱۳۴
۳	C <sub>4</sub>	t <sub>3</sub> S <sub>1.5</sub>	۳	۱/۵	۱/۱۸	۰/۵	۱۰/۰۹	۱۴/۱۲	۱۶/۲۶	۴۰	۶۳	۹۸
۴	D <sub>1</sub>	t <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	۳	۶	۱/۱۸	۲	۵/۱۶	۷/۵۴	۸/۰۵	۱۴	۲۶	۴۸
۵	E <sub>3</sub>	t <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۴	۲	۱/۱۸	۰/۵	۹/۰۹	۱۲/۷۸	۱۴/۶۰	۳۵	۵۸	۸۸
۶	F <sub>5</sub>	t <sub>4</sub> S <sub>8</sub>	۴	۸	۱/۱۸	۲	۱۱/۸۷	۱۶/۳۴	۱۹/۲۴	۲۸	۶۲	۱۱۵
۷	G <sub>7</sub>	t <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	۲	۱	۱/۵۵	۰/۵	۱۱/۹۰	۲۲/۰۳	۲۵/۳۳	۵۸	۹۷	۱۵۲
۸	H <sub>2</sub>	t <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	۲	۲	۱/۵۵	۱	۵/۰۱	۹/۴۶	۱۰/۲۴	۲۵	۴۴	۶۱
۹	I <sub>4</sub>	t <sub>2</sub> S <sub>8</sub>	۲	۳	۱/۵۵	۱/۵	۷/۰۴	۱۳/۰۳	۱۴/۶۸	۳۴	۵۷	۸۸
۱۰	J <sub>1</sub>	t <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	۲	۴	۱/۵۵	۲	۴/۱۵	۷/۸۲	۸/۳۵	۱۳	۳۰	۳۴
۱۱	K <sub>3</sub>	t <sub>3</sub> S <sub>1.5</sub>	۳	۱/۵	۱/۵۵	۰/۵	۶/۰۱	۱۱/۵۴	۱۲/۴۳	۲۶	۴۶	۷۵
۱۲	L <sub>6</sub>	t <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	۳	۳	۱/۵۵	۱	۹/۹۲	۱۷/۳۴	۲۰/۹۹	۴۰	۸۲	۱۲۶
۱۳	M <sub>5</sub>	t <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	۳	۴/۵	۱/۵۵	۱/۵	۹/۱۳	۱۶	۱۹/۲۶	۳۵	۷۰	۱۱۶
۱۴	N <sub>1</sub>	t <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	۳	۶	۱/۵۵	۲	۳/۹۸	۷/۶۰	۷/۹۹	۱۳	۲۶	۳۲
۱۵	O <sub>7</sub>	t <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	۴	۲	۱/۵۵	۰/۵	۱۲/۰۸	۲۰/۶۴	۲۵/۷۱	۵۲	۹۵	۱۵۴
۱۶	P <sub>7</sub>	t <sub>4</sub> S <sub>4</sub>	۴	۴	۱/۵۵	۱	۱۲/۰۴	۲۰/۱۰	۲۵/۶۳	۴۸	۹۲	۱۵۴
۱۷	Q <sub>3</sub>	t <sub>4</sub> S <sub>6</sub>	۴	۶	۱/۵۵	۱/۵	۸/۱۰	۱۴/۴۹	۱۶/۹۹	۳۰	۵۳	۱۰۲
۱۸	R <sub>7</sub>	t <sub>4</sub> S <sub>8</sub>	۴	۸	۱/۵۵	۲	۱۱/۹۱	۱۹/۹۳	۲۵/۳۳	۳۸	۷۵	۱۵۲



شکل ۳- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر برای کلیه آزمایش‌ها

### عمق مزدوج نسبی

عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$y_2 = f_1(y_1, v_1, g, \rho, U, t, s) \quad (2)$$

که در آن S فاصله زبری‌ها، t ارتفاع زبری‌ها U لزجت سینماتیک سیال، ρ چگالی متوسط، g شتاب ثقل و y<sub>1</sub> و v<sub>1</sub> به ترتیب عمق و سرعت جریان فوق‌بحرانی ورودی هستند. با به کارگیری قضیه π با کینگهام به رابطه ۳ می‌رسیم:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left( Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}, Re_1 = \frac{v_1 y_1}{\nu}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) \quad (3)$$

با در نظر گرفتن درجه حرارت آب در حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای این تحقیق (ν ≈ 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s)، حداقل عدد رینولدز ایجاد شده در آزمایش‌ها برابر با ۱۹۹۴۲ می‌باشد. بنابراین با توجه به متلاطم بودن جریان می‌توان از تأثیر عدد رینولدز و لزجت صرف‌نظر نمود و معادله ۳ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3 \left( Fr_1, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) \Rightarrow \frac{y_2}{y_1} = f_3 \left( Fr_1, \frac{s}{t} \right) \quad (4)$$

**طول پرش هیدرولیکی و طول غلطاب**

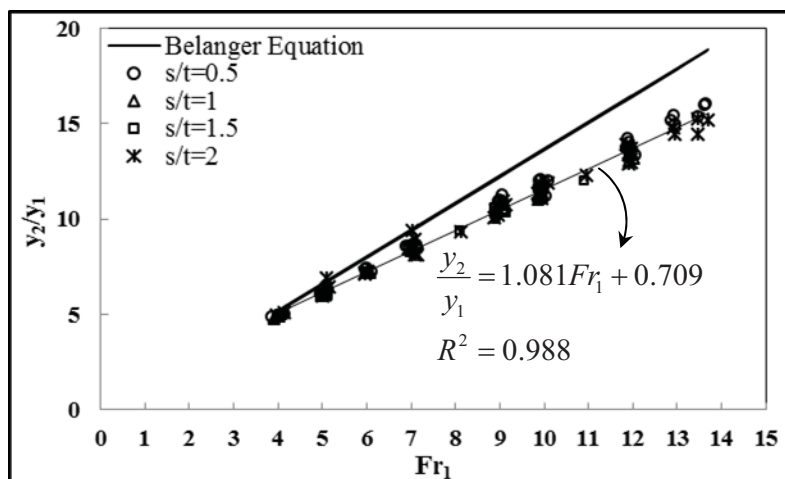
در شکل ۶ تغییرات طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی ( $L_j/y_1$ ) با  $Fr_1$ ، برای ارتفاع و فواصل مختلف زبری‌ها نشان داده شده است و بیانگر آن است که با افزایش فاصله زبری‌ها، طول پرش به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. افزایش ارتفاع زبری‌ها نیز باعث کاهش طول پرش می‌گردد. حداکثر این کاهش در حدود ۲۵ درصد می‌باشد.

شکل ۷ تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی ( $L_j/y_2^*$ ) را در مقابل اعداد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی برای کلیه آزمایش‌ها بر روی بستر زبر و داده‌های حاصل از USBR نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر  $L_j/y_2^*$  با تغییر اعداد فرود، نسبتاً ثابت و برای کل داده‌ها در حدود ۳/۵ می‌باشد.

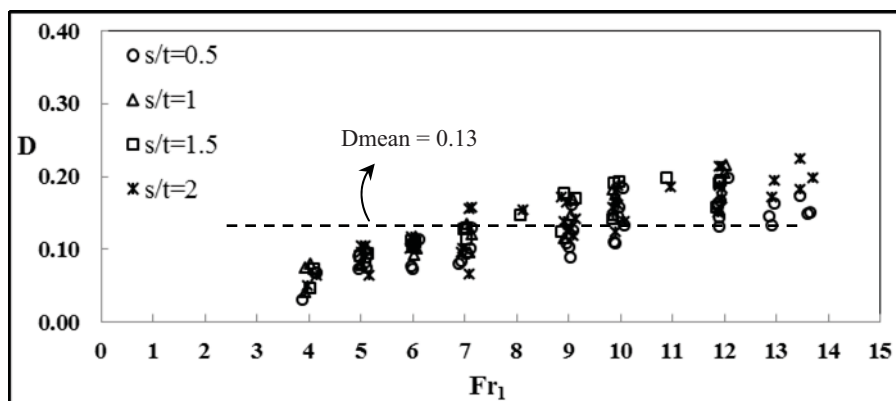
رابطه عمق مزدوج نسبی ( $y_2/y_1$ ) با  $Fr_1$  برای تمام آزمایش‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است و بیانگر این است که عمق مزدوج نسبی در بستر زبر نسبت به بستر صاف، با افزایش عدد فرود بالادست به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. رابطه بین  $Fr_1$  و  $y_2/y_1$  در بستر زبر، مطابق شکل ۴ با استفاده از رگرسیون خطی بررسی شد و رابطه ۵ با ضریب تبیین ۰/۹۸۸ به‌دست آمد.

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.081Fr_1 + 0.709 \quad (5)$$

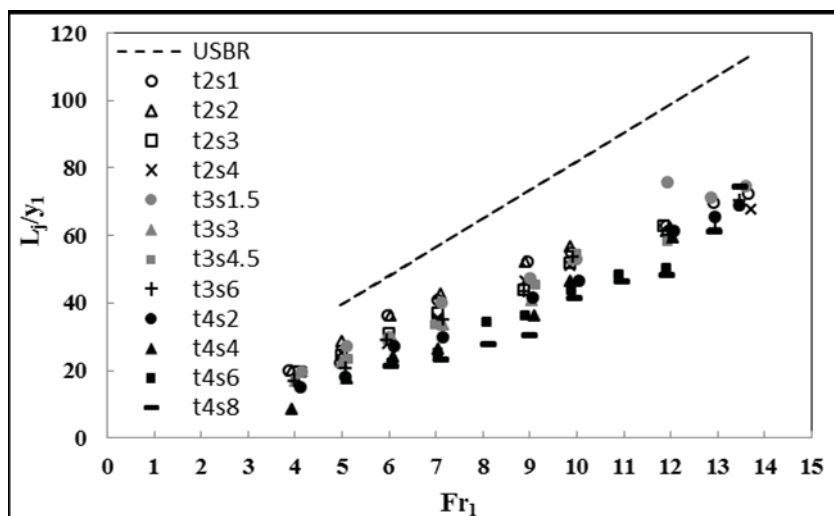
برای نمایش میزان اختلاف عمق ثانویه در بستر زبر ( $y_2$ ) و پرش کلاسیک ( $y_2^*$ )، پارامتر کاهش عمق ( $D = (y_2^* - y_2)/y_2^*$ ) در شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان،  $D$  افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش  $y_2^*$  نسبت به  $y_1$  می‌باشد. مقادیر حداکثر و میانگین پارامتر  $D$  به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۳ می‌باشد.



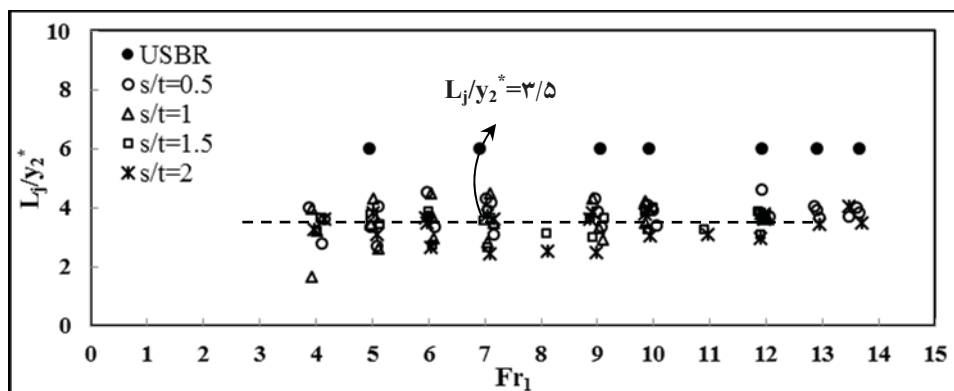
شکل ۴- تغییرات عمق مزدوج نسبی با عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زبر برای کلیه آزمایش‌ها



شکل ۵- تغییرات پارامتر کاهش عمق در مقابل عدد فرود



شکل ۶- تغییرات طول بی‌بعد پرش با عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زبر برای کلیه آزمایش‌ها



شکل ۷- تغییرات طول نسبی پرش با عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زبر برای کلیه آزمایش‌ها

$Fr_1$  نشان داده شده است. طول نسبی غلطاب با افزایش ارتفاع زبری‌ها کاهش می‌یابد. در ارتفاع ثابت، افزایش فاصله بین زبری‌ها نیز باعث کاهش طول پرش می‌گردد که حداکثر این کاهش ۳۷ درصد است.

#### افت نسبی انرژی

افت انرژی ( $E_L$ ) و افت نسبی انرژی ( $R_L$ ) در پرش هیدرولیکی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$E_L = E_1 - E_2 \quad \text{و} \quad R_L = \frac{E_L}{E_1} \quad (7)$$

که در آن  $E_1$  و  $E_2$  به ترتیب ارتفاع انرژی مخصوص جریان در ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی می‌باشند.

درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌تواند با  $T$  نشان داده شود (توکای، ۱۲).

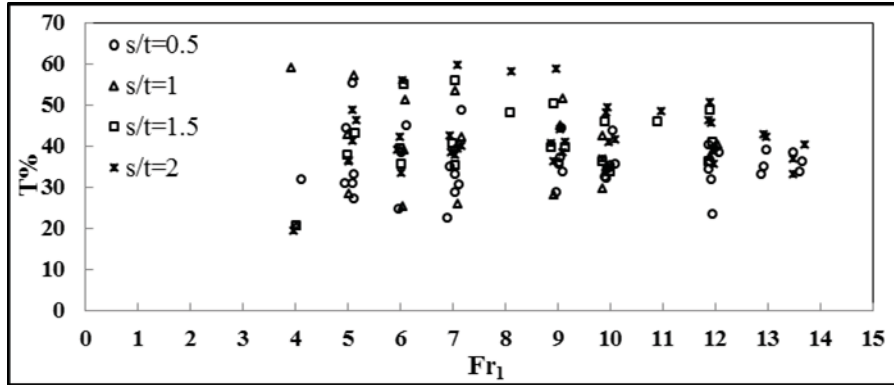
$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \times 100 \quad (6)$$

که در آن  $L_j$  طول پرش بر روی بستر زبر و  $L_j^*$  طول پرشی که روی بستر صاف با همان عدد فرود اتفاق می‌افتد (با توجه به اینکه داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی بستر صاف با داده‌های USBR نسبتاً منطبق می‌باشد از معادلات ارائه شده توسط USBR برای به دست آوردن طول پرش بر روی بستر صاف استفاده شد) می‌باشد.

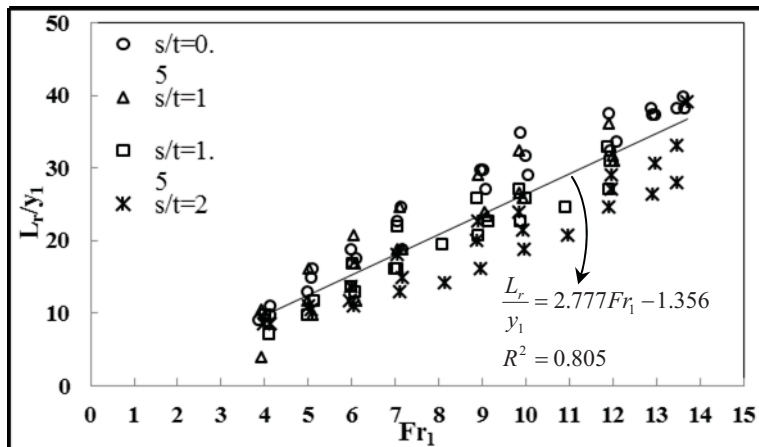
تغییرات  $T$  با  $Fr_1$  برای کلیه آزمایش‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد طول پرش با قرار دادن زبری‌ها در کانال، از ۱۹ تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد.

در شکل ۹ رابطه طول نسبی غلطاب پرش ( $L_r/y_1$ ) به ازای





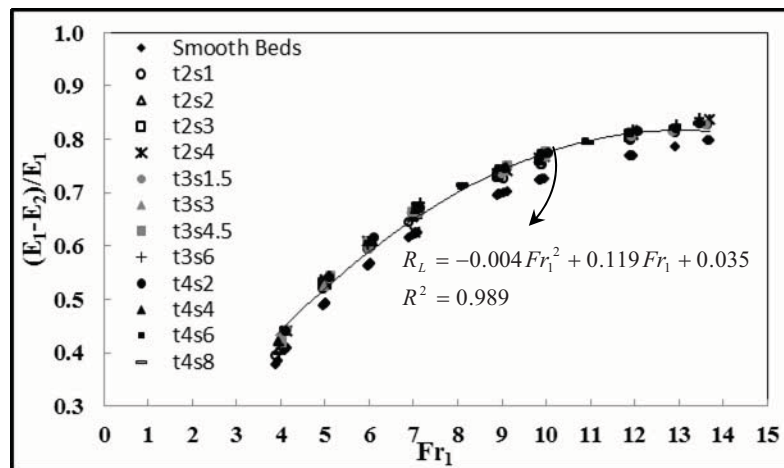
شکل ۸- تغییرات درصد کاهش طول پرش در مقابل عدد فرود



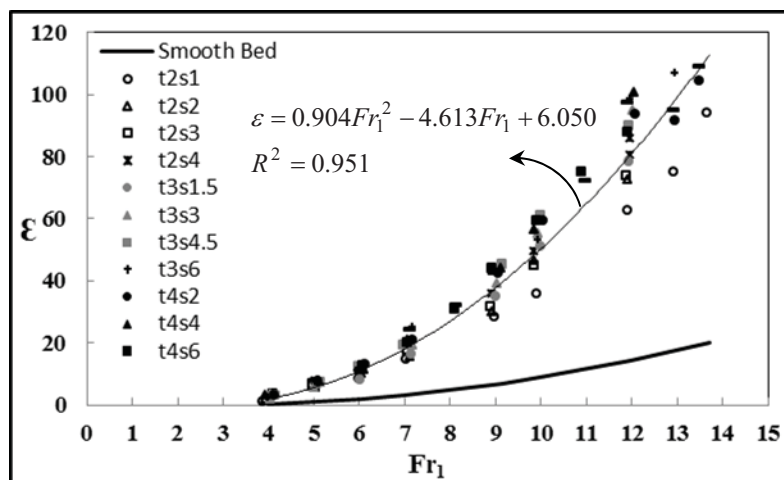
شکل ۹- تغییرات طول نسبی منطقه غلطاب با عدد فرود در بسترهای زبر برای کلیه آزمایش‌ها

۸۴ درصد می‌باشد که با توجه به شکل ۱۰، این مقدار نسبت به بستر صاف حداکثر ۹ درصد بیشتر است. تغییر فاصله و ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی در میزان اتلاف انرژی ندارد.

در شکل ۱۰ تغییرات افت نسبی انرژی ( $R_L$ ) در مقابل  $Fr_1$  رسم شده است. از این شکل مشخص است که مقادیر  $R_L$  در بسترهای زبر بزرگتر از بسترهای صاف است و این اختلاف با افزایش  $Fr_1$  اندکی بیشتر می‌شود. حداکثر افت انرژی در بستر زبر در حدود



شکل ۱۰- تغییرات افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی با عدد فرود در کلیه بسترها



شکل ۱۱- تغییرات ضریب تنش برشی کف با عدد فرود

### نتیجه گیری

مطالعات آزمایشگاهی در مورد خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی ۱۲ کف زبر با زبری‌های نواری دوزنقه‌ای قائم با ارتفاع و فواصل مختلف که به صورت عمود بر جهت جریان قرار گرفته بودند، انجام شد.

- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب را برای کلیه آزمایش‌ها می‌توان توسط یک منحنی میانگین نشان داد.
- مقادیر عمق مزدوج نسبی پرش بر روی سطوح زبر ( $y_2/y_1$ ) نسبت به سطوح صاف کمتر بوده و با افزایش عدد فرود این روند شدت می‌یابد. تغییر فاصله و ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی بر  $y_2/y_1$  ندارد.
- در بازه اعداد فرود ۳/۹ تا ۱۳/۷، حداکثر و میانگین پارامتر کاهش عمق  $D$  به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۳ می‌باشد.
- افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها باعث کاهش طول نسبی پرش ( $L_j/y_2^*$ ) تا حداکثر ۲۵ درصد می‌گردد. مقادیر  $L_j/y_2^*$  با تغییر اعداد فرود نسبتاً ثابت و در حدود ۳/۵ می‌باشد.
- درصد کاهش طول پرش بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف (T)، بین ۱۹ تا ۶۰ درصد تغییر می‌کند.
- با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، مقدار طول غلطاب حداکثر تا ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر فاصله زبری‌ها بر کاهش طول غلطاب بیشتر است و افزایش عدد فرود این روند را شدت می‌دهد.
- در بسترهای زبر افت نسبی انرژی پرش ( $R_L = E_L/E_1$ ) با افزایش عدد فرود اولیه افزایش می‌یابد. حداکثر افت انرژی در بستر زبر در حدود ۸۴ درصد می‌باشد و افزایش افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر ۹ درصد بیشتر است. تغییر فاصله و ارتفاع

### تنش برشی بستر

دلیل اصلی کاهش عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر در مقایسه با بسترهای صاف، وجود تنش برشی اضافه است. اگر  $F_\tau$  جمع نیروهای برشی بستر بر روی سطح افقی هم‌تراز با تاج زبری‌ها در طول پرش باشد، با استفاده از معادله مومنتم می‌توان بیان کرد:

$$F_\tau = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (8)$$

که P و M مقادیر فشار و مومنتم و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشانگر مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشند.

راجاراتنام (۱۰) در تحقیقات خود ضریب تنش برشی بستر ( $\varepsilon = F_\tau / (\rho y_1^2 / 2)$ ) را تعریف کرد. با به‌کارگیری رابطه ارائه شده توسط راجاراتنام و داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، تغییرات ضریب تنش برشی بستر ( $\varepsilon$ ) با  $Fr_1$  در شکل ۱۱ رسم شده است. رابطه بین  $\varepsilon$  و  $Fr_1$  را می‌توان به صورت معادله ۹ برآورد نمود:

$$\varepsilon = 0.904Fr_1^2 + 4.613Fr_1 + 6.050 \quad (9)$$

راجاراتنام (۱۱) مقدار  $\varepsilon$  در بستر صاف (در واحد عرض کانال) را به صورت تابعی از عدد فرود بالادست و به صورت زیر به‌دست آورده است:

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad (10)$$

از مقایسه رابطه ۹ و ۱۰ می‌توان دریافت که مقدار  $\varepsilon$  در پرش هیدرولیکی بر روی بسترهایی با زبری دوزنقه‌ای قائم، بین ۳/۲ تا ۹/۶ برابر بیشتر از بستر صاف است. همچنین با افزایش فاصله و ارتفاع زبری‌ها میزان تنش برشی نیز افزایش می‌یابد که این روند با افزایش عدد فرود شدت می‌یابد.



تنش برشی کف می‌گردد. بنابراین از بین مقادیر  $s/t$  بررسی شده در این تحقیق، مقدار  $s/t = 2$  به‌عنوان نسبت بهینه برای ابعاد زبری‌ها انتخاب شد که بیشترین اثر مثبت را در خصوصیات پرش هیدرولیکی دارا می‌باشد.

- زبری‌ها اثر چندانی در میزان اتلاف انرژی ندارد.
- ضریب تنش برشی کف، برای سطوح زبر بین  $3/2$  تا  $9/6$  برابر بزرگتر از بستر صاف است. افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، تنش برشی کف را افزایش می‌دهد.
- افزایش مقادیر بی‌بعد نسبت فاصله به ارتفاع زبری‌ها ( $s/t$ ) باعث کاهش ناچیز عمق ثانویه و طول پرش و غلطاب و افزایش

## منابع

- 1- Abbaspour A., and Hosseinzadeh Dalir A. 2009. Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics, Journal of Hydro-environment Research, 3:109-117.
- 2- Belanger J.B. 1828. Essai Sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes, Carulian-Goeury, Paris, France (in French).
- 3- Ead S.A., and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic Jump on Corrugated Beds, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(7):656-662.
- 4- Ead S.A. 2007. Effect of Bed Corrugations on The Characteristics of Hydraulic Jump, Research Center of College of Engineering of King Saud University, Final Research Report, No. 14/427.
- 5- Gohari A., and Farhoudi J. 2009. The Characteristics of Hydraulic Jump on Rough Bed Stilling Basins, 33<sup>rd</sup> IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, August 9-14.
- 6- Hughes W.C. and Flack J.E. 1984. Hydraulic Jump Properties over a Rough Bed. Journal of Hydraulic Engineering, 110(12):1755-1771.
- 7- Ibrahim H.E. and Shazy S. 2010. Formation of Hydraulic Jumps on Corrugated Beds, Journal of Civil & Environmental Engineering, IJCEE-IJENS, 10(01).
- 8- Izadjoo F., and Shafai-Bajestan M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin, Journal of Applied Sciences, 7(8):1164-1169.
- 9- Mohamed Ali H.S. 1991. Effect of Roughened Bed Stilling Basin on Length of Rectangular Hydraulic Jump, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(1):83-93.
- 10- Rajaratnam N. 1965. The Hydraulic Jump as a Wall Jet, Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineering, 91(5):107-132.
- 11- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic Jumps on Rough Beds, Trans. Engineering Inst. Canada, 11(a-2), 1-8.
- 12- Tokyay N.D. 2005. Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps, Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI, May, Anchorage, Alaska, USA, pp. 408-416. Doi: 1.1061/40792(173)408

## Effect of Vertical Trapezoidal Rough Bed on Hydraulic Jump Characteristics and Energy Loss

Z. Ravar<sup>1\*</sup> - J. Farhoudi<sup>2</sup> - A. Najandali<sup>3</sup>

Received: 12-1-2011

Accepted: 6-11-2011

### Abstract

Stilling basins with different layout of rough and appurtenances are commonly used to reduce the excessive energy of exiting flow downstream of hydraulic structures through the phenomenon of hydraulic jump. This paper deals with an experimental investigation on the effect of vertical trapezoidal cross bars on the characteristics of hydraulic jump. total of 126 runs are conducted where the Froude number of incoming flow to the basin ranged from 3.9 to 13.7. Three different heights (t) were selected for the rough elements with four different longitudinal spacing(s). The results showed that the non dimensional profile of the jump could be defined with a unique equation. It was also revealed that the sequent depth, length of hydraulic jump and roller length are reduced while the energy loss is increased, comparing with classic jump. These effects are intensified as the Froude number of incoming flow, the height and spacing of the rough bars increased. It is found the bed shear stress is 3.2-9.6 times bigger than that on smooth bed. The investigation resulted in some empirical relations to define the sequent depth, energy loss and bed shear stress for different flow conditions on used rough beds.

**Keywords:** Hydraulic jump, Rough bed, Sequent depth, Jump length, Energy loss

---

1,2- MSc Student and Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Engineering and Technology College, University of Tehran, Karaj

(\* - Corresponding Author Email: ze6482@gmail.com)

3- MSc Student, Department of Water Engineering, Agricultural College, Ferdowsi: University of Mashhad