

## پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل

پرستو پارسامهر<sup>۱\*</sup> - علی حسین زاده دلیر<sup>۲</sup> - داود فرسادی زاده<sup>۳</sup> - اکرم عباسپور<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۵

### چکیده

پرش هیدرولیکی متداول‌ترین روش برای استهلاک انرژی جنبشی آب در پایین‌دست سرریزها، شوت‌ها و دریچه‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر، خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی شکل جدیدی از بستر زبر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل مورد بررسی قرار گرفته است. زبری‌های مورد استفاده دارای ارتفاع ۳ به همراه چهار فاصله مختلف بین زبری‌ها می‌باشند. آزمایشات در محدوده اعداد فرود  $4/6$  تا  $7/3$  انجام شدند. نتایج نشان داد در مقایسه با پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف، عمق مزدوج نسبی و طول پرش به ترتیب بطور متوسط  $25/35$  و  $38/5$  درصد کاهش و افت انرژی بطور متوسط ۱۸ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد. ضریب تنش برشی در بستر زبر حداکثر در حدود ۱۳ برابر بستر صاف است. روند این تغییرات با افزایش فاصله، ارتفاع زبری‌ها و عدد فرود شدت می‌یابد. در این تحقیق روابطی برای عمق مزدوج نسبی، طول پرش هیدرولیکی، افت نسبی انرژی و ضریب تنش برشی ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** افت انرژی، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، ضریب تنش برشی

### مقدمه

از جمله موارد جایگزین بلوک‌ها می‌تواند بستر زبر باشد. اگر در بستر زبر سطح فوقانی زبری‌ها هم‌تراز کف بالادست و پایین‌دست باشد احتمال بروز کاویتاسیون کاهش یافته و به دلیل ایجاد گودال و افزایش جریان‌های گردابی، تلاطم جریان بیشتر شده و خصوصیات پرش هیدرولیکی بهبود می‌یابند.

در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر زبر مطالعاتی توسط محققین مختلف انجام گرفته است. تأثیر زبری‌های مکعبی شکل بر روی پرش هیدرولیکی و حوضچه آرامش توسط هاگز و فلک (۵)، محمدعلی (۷) و نجم (۸) بررسی شده است.

به دلیل ایجاد کاویتاسیون در زبری‌های کف، اید و راجاراتنام (۳) بسترهای موج دار را پیشنهاد کردند. آن‌ها پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ بررسی کرده و اعلام نمودند که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف می‌باشد.

توکای (۱۰) اثرات بستر موج دار را بر روی پرش هیدرولیکی بصورت تجربی در محدوده اعداد فرود ۵ تا ۱۲ بررسی نمود. وی نسبت عمق مزدوج را تابعی از عدد فرود اولیه ارائه کرد. نتایج تحقیقات نشان داد که طول پرش ۳۷ درصد و عمق مزدوج نسبی ۲۰ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد.

ایزدجو و همکاران (۶) پرش هیدرولیکی را بر روی چهار بستر

پرش هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است که مورد توجه مهندسين هیدرولیک می‌باشد. این پدیده به منظور استهلاک انرژی ناشی از سرعت زیاد در جریان‌های فوق بحرانی، در پایین‌دست سازه‌هایی نظیر سدها، تندآب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، به منظور حفاظت پایین‌دست حوضچه آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرد. تلاش محققین همواره بر ایجاد تمهیداتی در محل وقوع پرش بوده است که بتوانند عمق ثانویه و طول پرش را کاهش دهند تا ساخت حوضچه آرامش صرفه‌جویی اقتصادی به همراه داشته باشد. از جمله می‌توان به حوضچه‌های تیپ دو، سه و چهار USBR و SAF اشاره کرد که در آن‌ها از بلوک‌های ابتدایی، میانی و انتهایی استفاده شده است. از آنجایی که بلوک‌ها مستقیماً در معرض جریان با انرژی بالا بوده و باعث ایجاد جداشدگی جریان می‌شوند، نیاز به پایداری زیادی دارند و در صورتیکه سرعت جریان ورودی بیش از ۱۷ متر بر ثانیه باشد باعث پدیده کاویتاسیون نیز خواهند شد (۹).

۳، ۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشیاران و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
\* نویسنده مسئول : (Email: parastoo.parsamehr@gmail.com)

یافت.

تحقیق حاضر جهت بررسی اثر بستر زبر با شکل جدیدی از زبری‌ها بصورت نیم استوانه‌ای شکل و اثر ابعاد و فاصله بین زبری‌ها بر خصوصیات پرش هیدرولیکی انجام گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات آزمایش

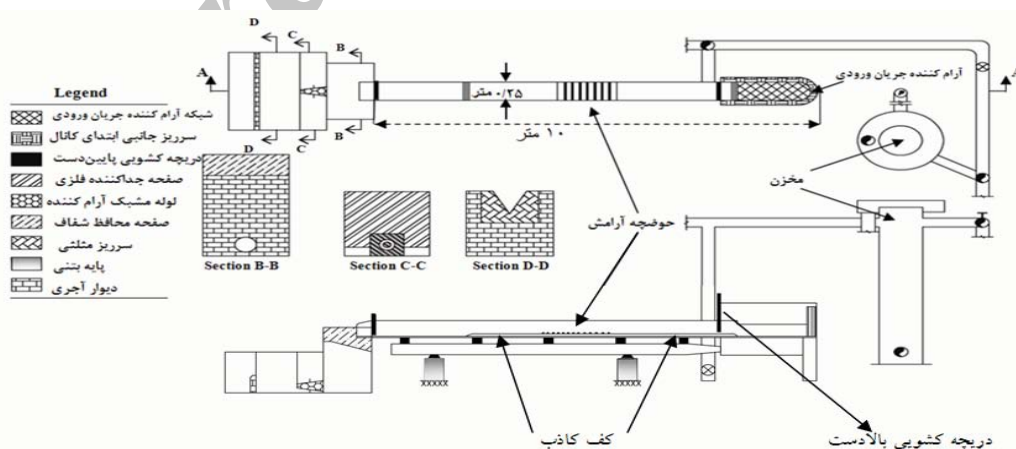
آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر با شیب کف ۰/۰۰۲ در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد. سیستم تأمین آب در شکل ۱ مشاهده می‌شود. جریان پس از عبور از فلوم به سمت یک سرریز مثلثی لبه تیز واسنجی شده هدایت و به کمک این سرریز اندازه‌گیری دبی جریان صورت گرفت. به منظور تأمین هد آب جهت تشکیل پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف، مخزنی به ارتفاع ۱ متر در بالادست دریچه کشویی بالادست احداث گردید. در تمامی آزمایش‌ها بازشدگی دریچه ثابت و برابر ۳ سانتی متر بود. با تغییر دبی، پرش هیدرولیکی در ۵ عدد فرود مختلف ایجاد گردید. دیواره‌های کانال در فاصله ۲ متری از مخزن، شفاف و از جنس شیشه بود، به همین دلیل حوضچه آرامش افقی در فاصله ۲/۲۱ متری از دریچه بالادست که امکان مشاهده پروفیل سطح آب و شرایط جریان وجود دارد، قرار گرفت. زبری‌های به کار رفته در این تحقیق، که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، از جنس EPS با مقطع نیم‌دایره به طول ۲۵ سانتی‌متر و سه ارتفاع زبری (سانتی‌متر ۳/۵ و ۲/۵ و ۱/۵) ساخته شدند. برای ایجاد بسترهای زبر، زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل ساخته شده و فاصله آن‌ها یک تا چهار برابر قطر نیم استوانه‌ها ( $s = d, 2d, 3d, 4d$ ) در نظر گرفته شد.

موج دار دوزنقه‌ای شکل در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز جهت ایجاد پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار کمتر از عمق پایاب مربوط به پرش هیدرولیکی مشابه بر روی بسترهای صاف می‌باشد. طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار به حدود نصف تقلیل پیدا کرد و طول بی بعد پرش هیدرولیکی ( $Lz/y_2^*$ ) مستقل از عدد فرود و برابر ۲/۲۵ بدست آمد.

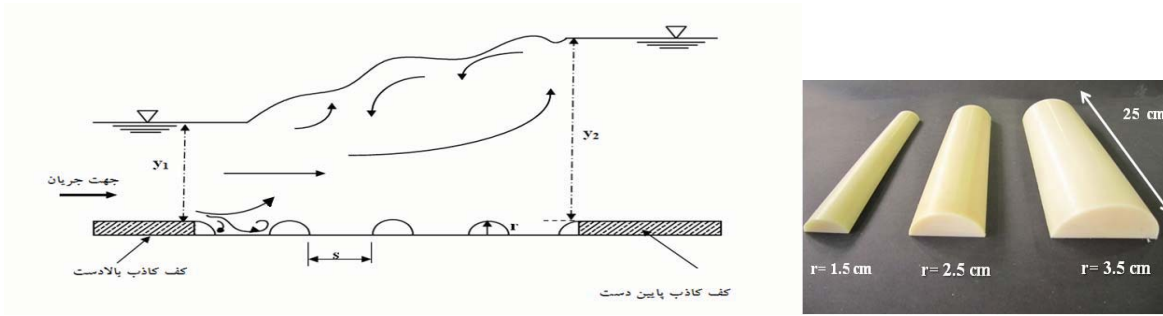
عباسپور و همکاران (۲) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار را بر روی شش نوع بستر موج دار در محدوده اعداد فرود ۳/۸ تا ۸/۶ بصورت تجربی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان کوچکتر است. بررسی نیروی برشی و ضریب تنش برشی در پرش هیدرولیکی نشان داد که تنش برشی در بستر موج دار حداقل ۱۰ برابر بستر صاف است.

خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای با زبری‌های نواری مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ توسط گوهری و فرهودی (۴) مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج تحقیق ایشان، با افزایش فاصله بین زبری‌ها عمق ثانویه پرش کاهش یافت. همچنین تغییر ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی نداشت. ضریب تنش برشی کف بر روی بسترهای زبر در حدود ۹ برابر بستر صاف بدست آمد.

بدیع‌زادگان و همکاران (۱) مشخصات پرش هیدرولیکی را در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج‌دار سینوسی در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۱۲/۲۶ مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش تقریباً به میزان ۲۰ درصد در بیشترین مقدار خود در حدود عدد فرود ۱۲ و طول پرش هیدرولیکی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش



شکل ۱- پلان سیستم تأمین آب و اجزای تجهیزات فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک



شکل ۲- زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر و نیم‌رخ طولی فلوم

### تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در حالت بستر افقی را می‌توان بصورت تابع زیر بیان نمود:

$$f_1(\rho, \nu, y_1, y_2, V_1, L_j, g, r, s) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  جرم مخصوص،  $\nu$  لزجت سینماتیکی آب،  $g$  شتاب ثقل،  $r$  ارتفاع زبری و  $s$  فاصله بین زبری‌ها،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی،  $V_1$  سرعت اولیه،  $y_1$  عمق اولیه و  $y_2$  عمق ثانویه پرش می‌باشند. رابطه ۱ را می‌توان به تابع بدون بعد زیر تبدیل کرد:

$$f_2 = \left( \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, Re_1 = \frac{V_1 y_1}{\nu}, \frac{r}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) = 0 \quad (2)$$

با صرف نظر کردن از اثر لزجت به دلیل مقادیر بالای عدد رینولدز در تحقیق حاضر، رابطه ۲ بصورت زیر ساده می‌شود:

$$f_3 \left( \frac{y_2}{y_1}, Fr_1, \frac{L_j}{y_1}, \frac{r}{s} \right) = 0 \quad (3)$$

اجزای زبر آن‌چنان در کف فلوم قرار داده شدند که لبه پایین جت ورودی هم‌تراز سطح بالای اجزای زبر باشد. جهت هم‌تراز نمودن تاج زبری‌ها با سطوح بالادست و پایین‌دست از کف کاذب در بالادست و پایین‌دست حوضچه آرامش استفاده شد (شکل ۲). مشخصات فیزیکی بسترهای زبر در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

محدوده دبی جریان از ۱۴/۶ تا ۱۸/۷ لیتر بر ثانیه بود. در مجموع ۶۰ آزمایش در محدوده عدد فرود اولیه ۴/۶ تا ۷/۳ انجام گرفت. عمق آب با استفاده از عمق سنج با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر و عکسبرداری دیجیتال از پرش هیدرولیکی و رقمی کردن آن توسط نرم‌افزار Grafer5 اندازه‌گیری و میانگین دو مقدار بدست آمده به عنوان عمق آب در محل مورد نظر ثبت گردید. طول پرش هیدرولیکی از طریق اشل نواری نصب شده بر روی بدنه فلوم و پروفیل سرعت با استفاده از سرعت سنج پره‌ای میکرو با دقت  $\pm 0.1$  سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری گردید.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی بسترهای زبر

نام زبری‌ها	ارتفاع زبری r(cm)	قطر زبری‌ها d=2r (cm)	فاصله بین زبری‌ها s(cm)	r/s	نام زبری‌ها	ارتفاع زبری r(cm)	قطر زبری‌ها d=2r (cm)	فاصله بین زبری‌ها s(cm)	r/s
I <sub>1</sub> S <sub>d</sub>	۱/۵	۳	۳	۰/۵	I <sub>2</sub> S <sub>3d</sub>	۲/۵	۵	۱۵	۰/۱۶۷
I <sub>1</sub> S <sub>2d</sub>	۱/۵	۳	۶	۰/۲۵	I <sub>2</sub> S <sub>4d</sub>	۲/۵	۵	۲۰	۰/۱۲۵
I <sub>1</sub> S <sub>3d</sub>	۱/۵	۳	۹	۰/۱۶۷	I <sub>3</sub> S <sub>d</sub>	۳/۵	۷	۷	۰/۵
I <sub>1</sub> S <sub>4d</sub>	۱/۵	۳	۱۲	۰/۱۲۵	I <sub>3</sub> S <sub>2d</sub>	۳/۵	۷	۱۴	۰/۲۵
I <sub>2</sub> S <sub>d</sub>	۲/۵	۵	۵	۰/۵	I <sub>3</sub> S <sub>3d</sub>	۳/۵	۷	۲۱	۰/۱۶۷
I <sub>2</sub> S <sub>2d</sub>	۲/۵	۵	۱۰	۰/۲۵	I <sub>3</sub> S <sub>4d</sub>	۳/۵	۷	۲۸	۰/۱۲۵

وجود دارد (شکل ۳). با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان با اطمینان به تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های بعدی پرداخت.

بر اساس تحلیل ابعادی ارائه شده، در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر عمق مزدوج نسبی  $(y_2/y_1)$  به عدد فرود اولیه  $(Fr_1)$  و پارامتر  $I/S$  بستگی دارد. مقادیر عمق مزدوج نسبی به ازای عدد فرود اولیه برای تمام زبری‌ها با نسبت‌های  $I/S$  مختلف در شکل ۳ رسم شده‌اند. تغییرات عمق مزدوج نسبی در اثر تغییر ارتفاع زبری‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

بطور کلی با توجه به این شکل‌ها نتیجه می‌شود که زبری بستر باعث کاهش عمق ثانویه حداقل ۱۸/۵ درصد نسبت به بستر صاف می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها عمق مزدوج نسبی کاهش یافته و این روند با افزایش عدد فرود بیشتر می‌گردد. همچنین رابطه بین نسبت عمق مزدوج نسبی و عدد فرود اولیه برای تمام آزمایش‌ها مطابق شکل ۳ بصورت رابطه زیر بدست آمد.

پارامتر  $r/s$  نسبت ارتفاع زبری به فاصله بین آن‌ها است و تأثیر ابعاد زبری‌ها را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه ۳ می‌توان عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی را بصورت زیر بیان نمود:

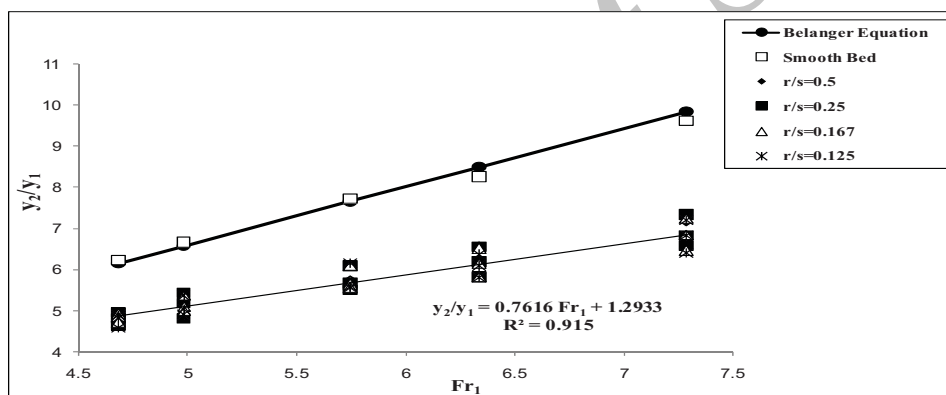
$$\frac{y_2}{y_1} = f\left(Fr_1, \frac{r}{s}\right) \quad (4)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = g\left(Fr_1, \frac{r}{s}\right) \quad (5)$$

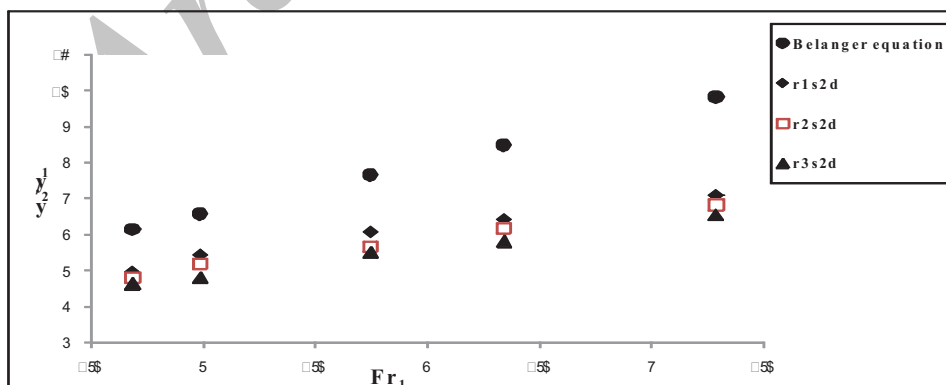
## نتایج و بحث

### عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی

به منظور ارزیابی دقت و صحت نتایج تحقیق حاضر، آزمایش‌هایی در رابطه با پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف انجام گرفت و مشاهده شد تطابق خوبی میان داده‌های آزمایشگاهی و رابطه بلانگر



شکل ۳- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف  $r/s$  شکل



شکل ۴- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای ارتفاع‌های مختلف زبری با فاصله  $2d$  شکل

این رابطه  $E_1$  و  $E_2$  به ترتیب انرژی مخصوص قبل و بعد پرش است. در شکل ۶ مقادیر افت نسبی انرژی به ازای اعداد فرود اولیه نشان داده شده که با مقادیر افت انرژی نسبی در بستر صاف افقی مقایسه شده است.

$$R_L = \frac{E_L}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \quad (۷)$$

مطابق این نمودار، به ازای اعداد فرود یکسان افت انرژی در بستر زبر بطور متوسط ۱۸ درصد بیشتر از بستر صاف است. رابطه بدست آمده بین  $E_L/E_1$  و  $Fr_1$  با استفاده از رگرسیون غیر خطی، با توجه به شکل ۶ به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{E_L}{E_1} = -0.0093 Fr_1^2 + 0.8146 Fr_1 - 0.186, R^2=0.976 \quad (۸)$$

می‌توان درصد نرخ افت انرژی پرش هیدرولیکی (G) در شرایط پرش بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف را با استفاده از رابطه ارائه شده توسط توکیای (۱۰)، بصورت زیر محاسبه کرد:

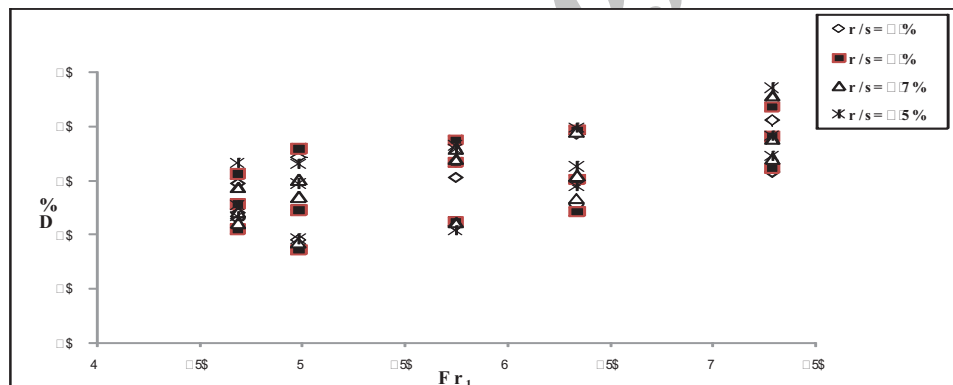
$$\frac{y_2}{y_1} = 0.7616 Fr_1 + 1.2933, R^2=0.915 \quad (۶)$$

رابطه ۶ نشان می‌دهد که مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه بوده و پارامتر  $r/s$  دارای تاثیر تقریباً یکسانی بر روی  $y_2/y_1$  می‌باشد.

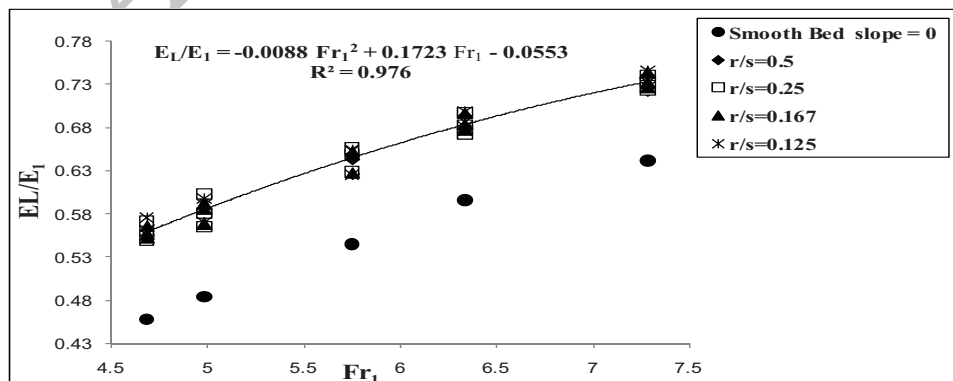
پارامتر کاهش عمق ثانویه (D)، برابر با  $(y_2^* - y_2)/y_2^*$  که در آن  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر و  $y_2$  عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف (پرش کلاسیک) می‌باشد (اید و راجاراتنام (۳))، محاسبه شده و در شکل ۵ تغییرات مقادیر D به ازای عدد فرود اولیه برای محدوده  $0.5 < r/s < 1.25$  نشان داده شده است. متوسط کاهش عمق ثانویه برابر ۳۵/۳۵ درصد بدست آمد که مقدار قابل ملاحظه‌ای بوده و از آنجایی که ارتفاع پرش معیار مهمی در طراحی حوضچه‌ها است، به نظر می‌رسد استفاده از زبری نیم استوانه‌ای شکل در طراحی حوضچه آرامش در مقایسه با بستر صاف مقرون بصرفه باشد.

### افت انرژی پرش هیدرولیکی

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی از رابطه ۷ محاسبه شد که در



شکل ۵- تغییرات پارامتر کاهش عمق ثانویه پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s



شکل ۶- تغییرات افت انرژی نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s

حدود ۳/۵ می‌باشد.

تأثیر فاصله زبری‌ها بر طول پرش بی بعد ( $L_j/y_1$ ) در شکل ۹ به همراه داده‌های بستر صاف USBR (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین زبری‌ها طول پرش هیدرولیکی حداکثر ۴۷/۶ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات طول پرش بی بعد به ازای اعداد فرود اولیه برای بستر زبر نیم استوانه‌ای با مقادیر مختلف  $r/s$  در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $r/s$  کاهش در طول پرش هیدرولیکی مشاهده می‌شود.

روند تغییرات بین طول پرش بی بعد با اعداد فرود اولیه با استفاده از رگرسیون خطی با توجه به شکل ۱۰ بصورت رابطه ۱۰ بدست آمد:

$$\frac{L_j}{y_1} = 4.5816Fr_1 + 1.0022, \quad R^2=0.913 \quad (10)$$

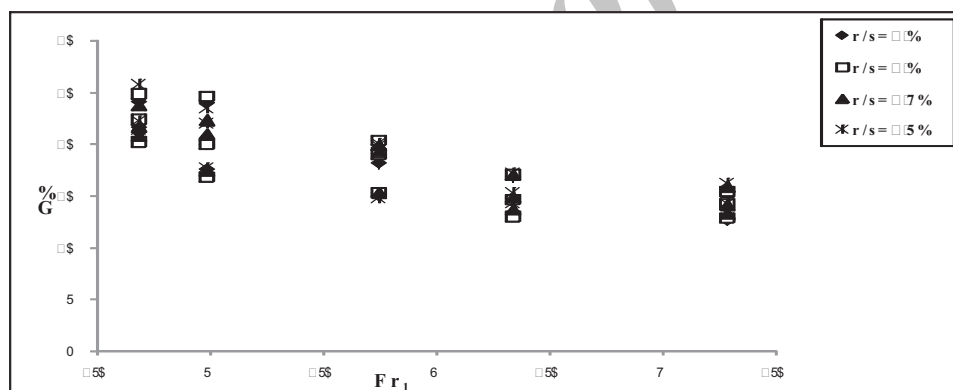
همچنین نرخ کاهش طول پرش هیدرولیکی ( $T$ ) با استفاده از رابطه ۱۱ ارائه شده توسط توکیای (۱۰) محاسبه شد. در این رابطه  $L_j^*$  و  $L_j$  به ترتیب طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و زبر می‌باشد.

$$G = \frac{E_L - E_L^*}{E_L^*} \quad (9)$$

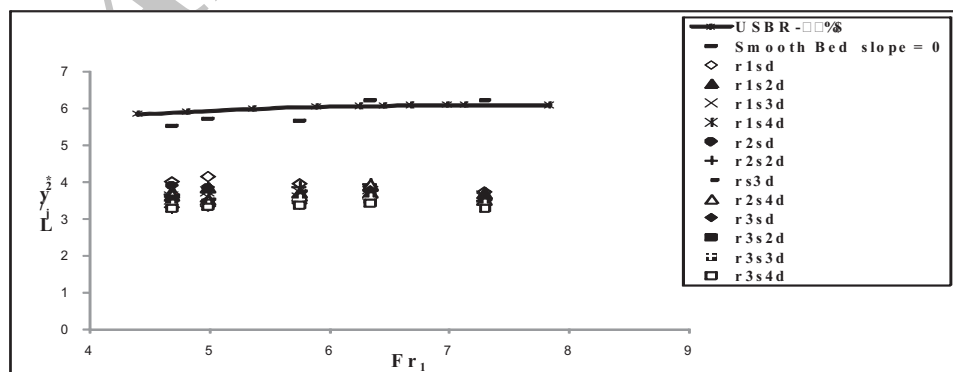
در رابطه فوق  $E_L$  و  $E_L^*$  به ترتیب افت انرژی در بستر صاف افقی و افت انرژی در پرش بر روی بستر زبر می‌باشد. با توجه به شکل ۷ که تغییرات درصد نرخ افت انرژی را به ازای اعداد فرود اولیه نشان می‌دهد، با افزایش عدد فرود درصد نرخ افت انرژی کاهش می‌یابد. این روند می‌تواند ناشی از یکنواخت‌تر شدن تأثیر زبری در اثر افزایش عدد فرود باشد.

### تغییرات طول پرش هیدرولیکی

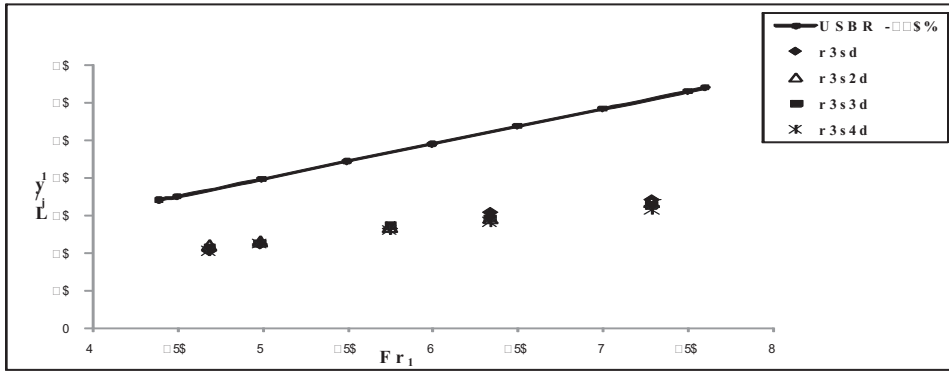
جهت بررسی و مقایسه طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با بستر صاف، مقادیر طول پرش هیدرولیکی با عمق ثانویه بستر صاف (پرش کلاسیک) ( $y_2^*$ ) و عمق اولیه پرش ( $y_1$ ) بی بعد شدند. در شکل ۸ تغییرات طول نسبی پرش ( $L_j/y_2^*$ ) در بسترهای زبر به ازای اعداد فرود اولیه، نتایج بستر صاف و داده‌های ارائه شده توسط USBR (۱۱) برای حوضچه نوع I نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار متوسط طول نسبی پرش روی شیب افقی در



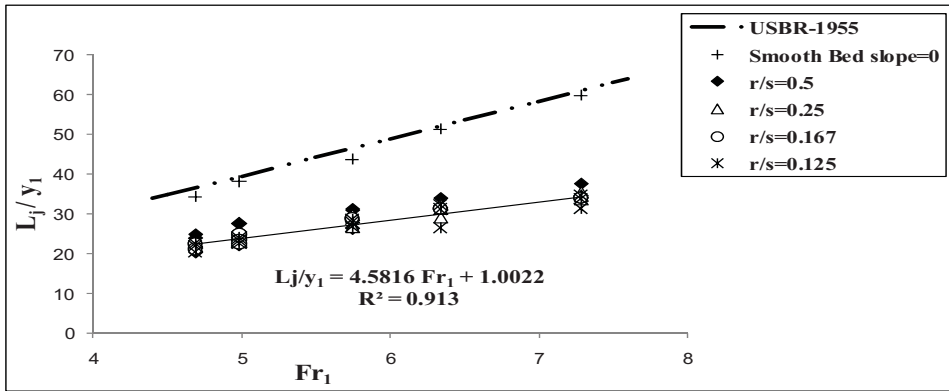
شکل ۷- تغییرات درصد افزایش افت انرژی پرش بی بعد با اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف  $r/s$



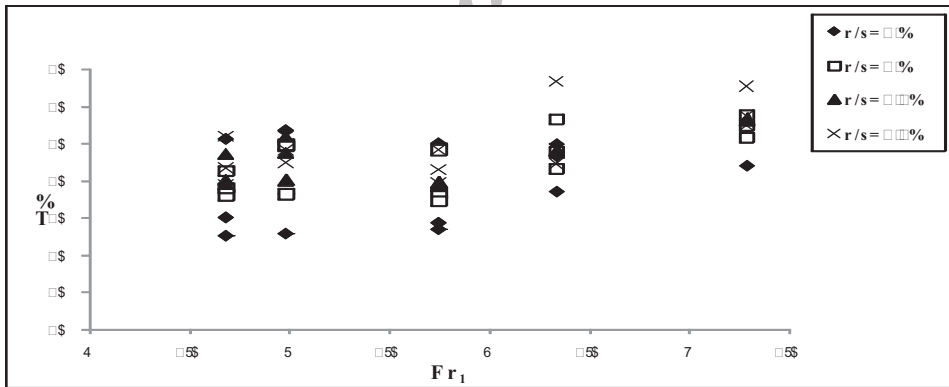
شکل ۸- تغییرات طول نسبی  $L_j/y_2^*$  به ازای اعداد فرود اولیه در بستر صاف USBR و بسترهای زبر



شکل ۹- مقایسه تغییرات طول نسبی  $L_j/y_1$  به ازای اعداد فرود اولیه برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات طول نسبی  $L_j/y_1$  به ازای اعداد فرود اولیه در بستر صاف و زبر برای مقادیر مختلف  $r/s$



شکل ۱۱- تغییرات نرخ کاهش طول پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف  $r/s$

### ضریب تنش برشی بستر

ضریب تنش برشی  $\varepsilon$  در بستر صاف و زبر با استفاده از رابطه ارائه شده توسط ارجاراتنام (۱۹۶۵) بصورت زیر قابل محاسبه است (۳).

$$\varepsilon = \frac{F\tau}{\gamma y_1^2 / 2} \quad (12)$$

که در آن  $F\tau$  نیروی برشی بستر است. در این تحقیق تنش برشی بستر زبر افقی با استفاده از رابطه ۱۲ تعیین گردید. ضریب تنش برشی

تغییرات  $T$  به ازای  $Fr_1$  برای تمامی آزمایش‌ها روی بستر زبر با نسبت  $r/s$  مختلف در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با زبر کردن کف حوضچه آرامش طول پرش بطور چشمگیری کاهش می‌یابد. میانگین نرخ کاهش طول پرش هیدرولیکی ۳۸/۵ درصد بدست آمد.

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \quad (11)$$

بستر با اعداد فرود اولیه با توجه به شکل ۱۲ بصورت رابطه زیر بدست آمد:

$$\varepsilon = 1.8761 Fr_1^2 - 9.9052 Fr_1 + 17.709, \quad R^2=0.968 \quad (14)$$

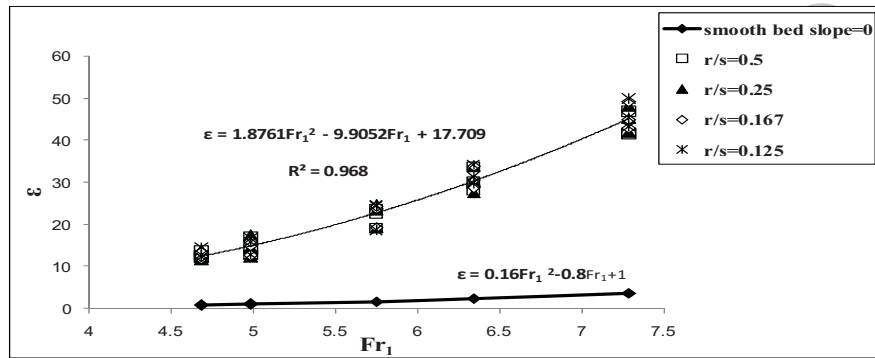
### پروفیل‌های سرعت

پروفیل‌های سرعت برای هر بستر زیر به ازای ۲ عدد فرود اولیه در طول پرش هیدرولیکی نسبت به کف بستر زیر اندازه‌گیری گردید که در شکل ۱۳ چند مورد از این پروفیل‌ها نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از ابتدای پرش (x) لایه مرزی رشد نموده، سرعت ماکزیمم کاهش می‌یابد.

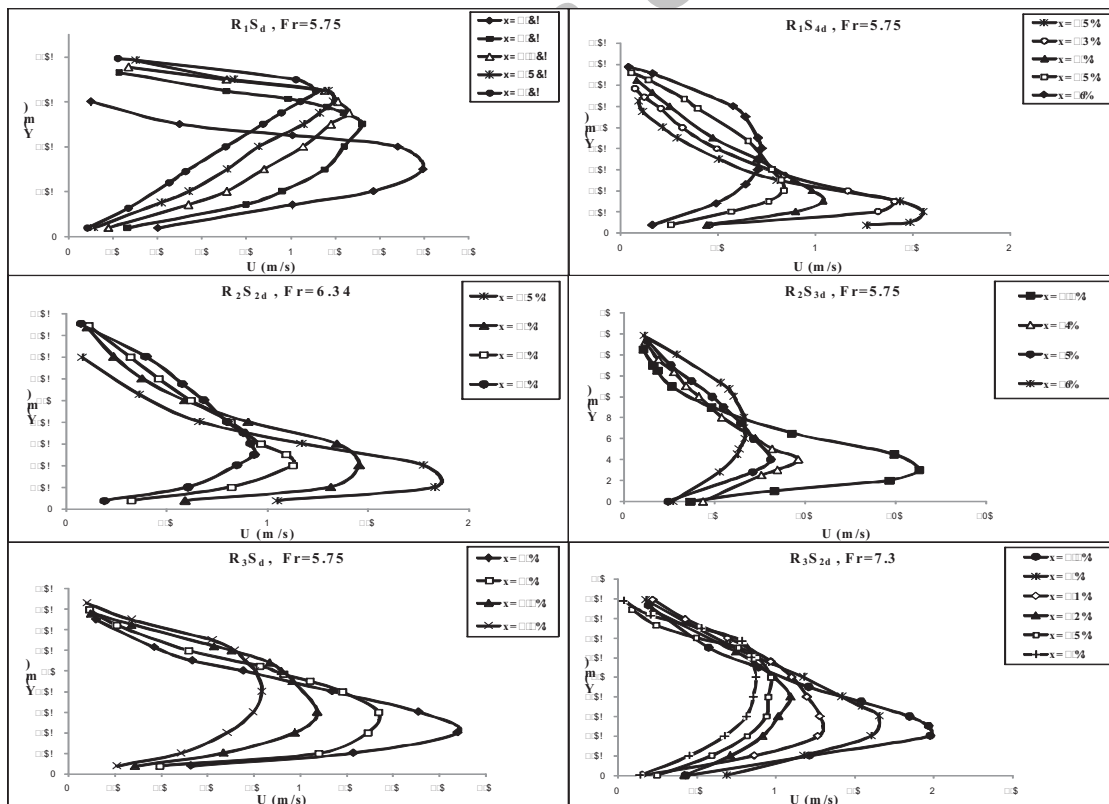
برای بستر صاف افقی با تجزیه تحلیل داده‌های تجربی توسط اید و راجاراتنام (۳) بفرم رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\varepsilon = 0.16 Fr_1^2 - 0.8 Fr_1 + 1 \quad (13)$$

تغییرات ضریب تنش برشی بستر به ازای اعداد فرود اولیه برای تمام آزمایش‌ها و نتایج ضریب تنش برشی پرش روی بستر صاف افقی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. به‌طور کلی ضریب تنش برشی بستر با افزایش عدد فرود در هر دو بستر صاف و زیر افزایش می‌یابد. مقدار متوسط ضریب تنش برشی بستر در بستر زیر افقی ۱۳ برابر بستر صاف بدست آمده است. با استفاده از رگرسیون غیرخطی روند تغییرات ضریب تنش برشی



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی بستر به ازای اعداد فرود اولیه برای مقادیر مختلف r/s



شکل ۱۳- پروفیل‌های سرعت جریان پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر

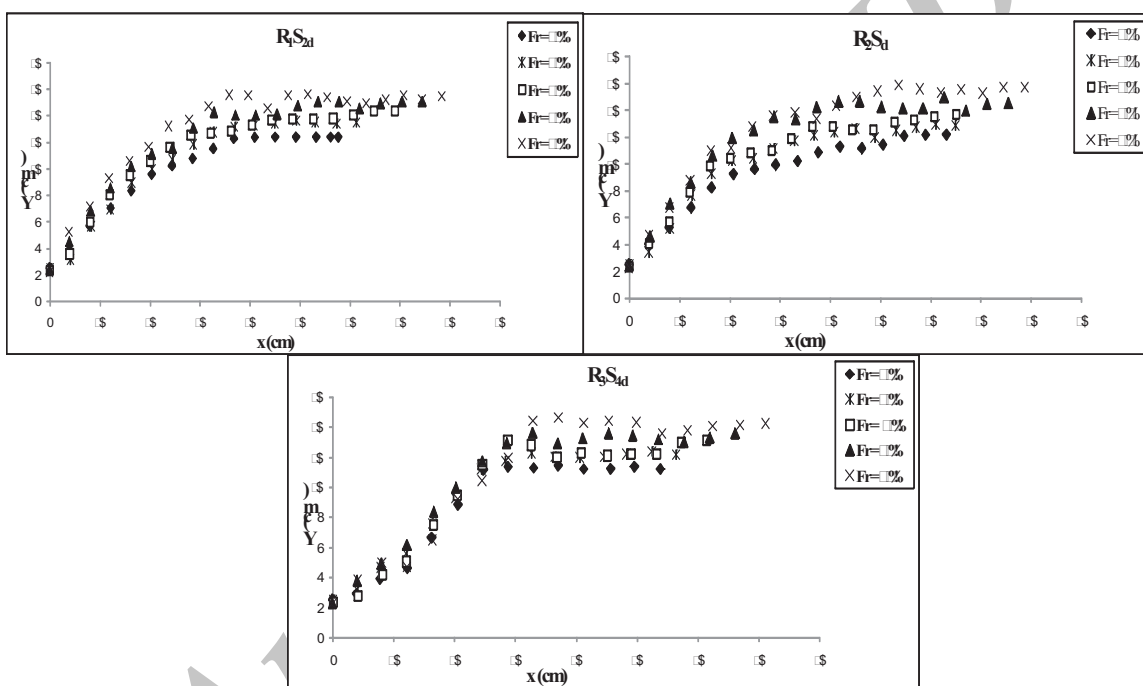


### نتیجه گیری

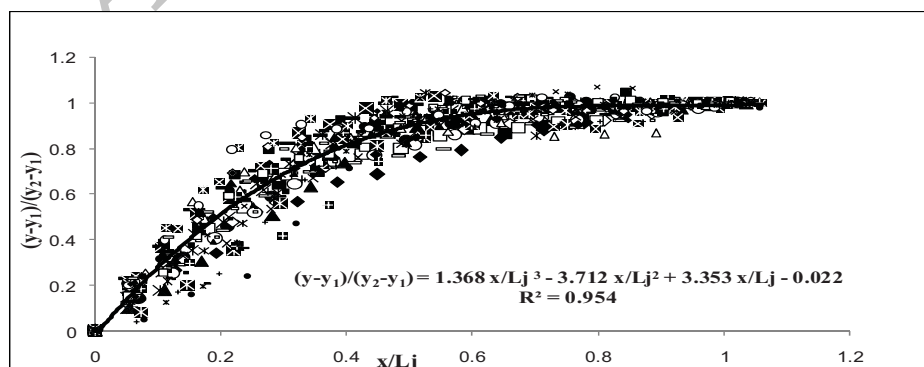
عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل حداکثر ۳۳/۵ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. روند کاهش با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری و افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود. بطوریکه با افزایش ارتفاع عمق ثانویه بطور متوسط ۶/۲ درصد بیشتر کاهش می‌یابد. افزایش فاصله بین زبری‌ها تاثیر کمتری بر کاهش عمق ثانویه داشته و مقدار آن در بیشترین فاصله بین زبری‌ها بطور متوسط ۱ درصد بیشتر (نسبت به کمترین فاصله) کاهش می‌یابد.

### پروفیل‌های سطح آب

پروفیل‌های سطح آب در پرش هیدرولیکی برای تعیین میزان عمق اولیه، ثانویه و طول پرش هیدرولیکی و در طراحی حوضچه‌های آرامش استفاده می‌گردد و با استفاده از تصاویر ثبت شده از رقوم سطح جریان پرش هیدرولیکی، برای تمام آزمایش‌ها بدست آمد که تعدادی از این پروفیل‌ها در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. در شکل ۱۵ پروفیل‌های بی بعد سطح آب  $(y-y_1)/(y_2-y_1)$  به ازای  $x/L_j$  برای بسترهای زبر نشان داده شده است که نشان دهنده روند مشابه تمامی آزمایشات بوده و با استفاده از رگرسیون غیر خطی یک منحنی متوسط برای تمامی نتایج برازش گردید.



شکل ۱۴- پروفیل‌های سطح آب پرش هیدرولیکی به ازای عدد فرود اولیه روی بسترهای با زبری نیم استوانه‌ای شکل



شکل ۱۵- پروفیل بی بعد سطح آب پرش هیدرولیکی به ازای  $x/L_j$  روی بسترهای با زبری نیم استوانه‌ای شکل

حداکثر ۱۷/۸ برابر بستر صاف بدست آمد. از جمله دلایل اصلی کاهش عمق ثانویه و کاهش طول پرش هیدرولیکی در پرش‌های تشکیل شده روی بسترهای زبر، افزایش نیروی برشی در بستر پرش می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان از بستر زبر با زبری-های نیم استوانه‌ای شکل برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با کارایی بهتر استفاده نمود.

طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه-ای شکل حداکثر ۴۷/۶ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. این روند با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری و افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود. با افزایش ارتفاع بطور متوسط ۵ درصد و با افزایش فاصله بین زبری‌ها بطور متوسط ۳ درصد بیشتر، طول پرش کاهش می‌یابد. افت انرژی بر روی بستر زبر حداقل ۱۲/۶ درصد و حداکثر ۲۵/۷ درصد نسبت به بستر صاف افزایش یافت. ضریب تنش برشی بر روی بستر زبر در این تحقیق، حداقل ۱۱ و

## منابع

- ۱- بدیع‌زادگان ر، اسماعیلی ک، فغفور مغربی م. و صانعی م. ۱۳۹۰. مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج‌دار. نشریه آب و خاک (۳)۲۵: ۶۷۶-۶۸۷.
- 2- Abbaspour A., Hosseinzadeh Dalir A., Farsadizadeh D., Sadraddini A.A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environmental Research*, 3: 109-117.
- 3- Ead S.A., and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128 (7): 656-663.
- 4- 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, August 9-14.
- 5- Hughes W.C., and Flack J.E. 1984. Hydraulic jump properties over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 110(12): 1751-1771.
- 6- Izadjoo F., and Shafai-Bejestan M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *J. Applied Sci.*, 7: 1164-1169.
- 7- Mohammad Ali H.S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(1): 83-93.
- 8- Negm A.M. 2002. Optimal roughened length of prismatic stilling basins. *Proceeding of the ICHE conference, Warsaw*.
- 9- Peterka A.J. 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters. *Engineering Monograph No. 25, USBR, Denver, Colorado, USA*.
- 10- Tokyay N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Global Climate Change Conference, EWRI, May 15-19, Anchorage, Alaska, USA, Doi: 1.1061/40792(173)408, pp.408-416*.
- 11- U.S.B.R. 1955. Research Studies on Stilling Basins. *Energy Dissipaters and Associated Appurtenances. U.S. Bureau of Reclamation, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd-399*.

## Hydraulic Jump on a Bed with Half Cylindrical Shape Bars

P. Parsamehr<sup>1\*</sup> - A. Hosseinzadeh Dalir<sup>2</sup> - D. Farsadizadeh<sup>3</sup> - A. Abbaspour<sup>4</sup>

Received: 16-10-2011

Accepted: 4-2-2012

### Abstract

Hydraulic jump is generally used for the dissipation of excess kinetic energy downstream of hydraulic structures such as spillway, chutes and gates. In the present research, hydraulic jump characteristics on a new rough bed -with half cylindrical shape bars- have been investigated experimentally. The roughness elements were used with three different heights and four different longitudinal spacing. Experiments were performed for a range of Froude numbers from 4.6 to 7.4. The results showed that the sequent depth ratio and the length of the jump on rough beds are 25.35% and 38.5% smaller and energy loss is 18% greater than classic jump. The bed shear stress coefficient on roughed bed is about 13 times of its corresponding smooth bed. These effects are intensified as the height, spacing of the rough bars and the Froude number of flow increased. Some empirical relations for sequent depth ratio, length of the hydraulic jump, relative energy loss and bed shear stress coefficient have been introduced.

**Keywords:** Bed Shear Stress Coefficient, Hydraulic Jump, Energy Loss, Rough Bed

1,2,3,4 - Former Msc Student, Associate Professors and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran, Respectively

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