

## تاثیر آبیایه و زبری‌های مصنوعی روی شیب معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۱۶

### چکیده

پرش هیدرولیکی نقش مؤثری در استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین دست سازه‌های آبی در حوضچه‌های آرامش ایفا می‌کند. در این تحقیق خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل و آبیایه‌ی مستطیلی بر روی دو بستر با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و بستر افقی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۳۳۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ انجام گرفت. نتایج نشان داد طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد بر روی آبیایه بطور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زبر بطور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵٪ بر روی آبیایه حداکثر ۲۴/۴ درصد و بر روی بستر زبر حداکثر ۴۴ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافت. بنابراین در مواقعی که تثبیت پرش با کاهش طول آن مدنظر باشد، بکارگیری یک آبیایه پیوسته روی شیب معکوس دارای نتیجه مطلوب و مقرون به صرفه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، تثبیت پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، شیب معکوس

### مقدمه

راجاراتنام (۱۷) اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر شامل ۴ بستر از تورهای سیمی مختلف و ۱ بستر از سنگریزه را در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ مورد بررسی قرار داد. وی نشان داد که طول پرش و طول غلتاب کاهش چشمگیری نسبت به بستر صاف داشت. اید و راجاراتنام (۱۲)، توکیای (۱۸) و عباسپور و همکاران (۹) و بدیع‌زادگان و همکاران (۲) خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار سینوسی شکل را با ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  (که  $t$  ارتفاع موج بستر و  $y_1$  عمق اولیه پرش می‌باشد) و اعداد فرود مختلف بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش بر روی بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف کمتر و ضریب تنش برشی در پرش هیدرولیکی در بستر موج دار نسبت به بستر صاف افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.

خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای با زبری‌های نواری مستطیلی با دو ارتفاع ( $t=1/5$  و  $2/5$  cm) و پنج فاصله زبری ( $s=1/5$  و  $3$  و  $4$  و  $6$  و  $7/5$  cm) در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ توسط گوهری و فرهودی (۱۳) مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، با افزایش فاصله بین زبری‌ها عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد. همچنین تغییر ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی ندارد.

پرش هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است. این پدیده به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر دریچه‌های آبیاری، سرریزها و تندآبها استفاده می‌شود. ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بخصوص طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بستگی دارد. تلاش محققین همواره بر ایجاد تمهیداتی بوده است که بتوانند عمق ثانویه و طول پرش را کاهش و افت انرژی را افزایش 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. همچنین از روش‌هایی که می‌تواند باعث افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی شود، ایجاد زبری در کف حوضچه‌های آرامش می‌باشد. در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر زبر، آبیایه و پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس مطالعاتی توسط محققین مختلف انجام گرفته که به چند مورد از آنها اشاره می‌شود.

۲، ۱ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشیار و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
\* - نویسنده مسئول: (Email: parastoo.parsamehr@gmail.com)

محاسبه نیروی دراگ وارده را برای حالات مختلف جریان بر روی آبپایه ارائه نمودند.

حمیدی فر و همکاران (۵) خصوصیات پرش هیدرولیکی تحت تاثیر آستانه لبه پهن در یک کانال با مقطع مثلثی را به ازای دو بازشدگی متفاوت و زاویه داخلی  $4/94$  درجه بررسی کردند. آنها روابط تجربی و نمودارهایی برای تشکیل پرش هیدرولیکی کنترل شده با استفاده از آستانه لبه پهن در شرایط عدم کافی بودن عمق پایاب در کانالهای مثلثی ارائه کردند.

ابریشمی و صانعی (۱۰) پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آزمایشاتی بر روی حوضچه‌ای با شیب‌های معکوس تا  $2/5$  درصد در محدوده اعداد فرود ۲ تا ۱۰ انجام دادند. نتایج تحقیق تجربی آنها نشان داد که امکان ایجاد پرش پایدار بر روی شیب‌های منفی وجود دارد. این پایداری تابعی از عدد فرود اولیه، عمق پایاب و طول حوضچه است.

پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس کنترل شده بوسیله آبپایه، توسط پاگلبارا و پراگینلی (۱۶) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق پرش هیدرولیکی از دیدگاه تئوری و آزمایشگاهی بر روی شیب‌های معکوس در کانال‌های مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت.

بیرامی و چمنی (۱۱) پرش هیدرولیکی در کانال‌های شیب‌دار را بر روی پنج شیب کف معکوس تا شیب  $10$  درصد بررسی کردند. تحلیل نتایج آزمایشات نشان داد که شیب منفی حوضچه نسبت عمق ثانویه را کاهش می‌دهد در صورتی که شیب‌های مثبت آن را افزایش می‌دهد.

اسماعیلی و ابریشمی (۱) تاثیر توام پله و شیب معکوس بر روی پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی که در آن پله‌ها به صورت مثبت و منفی در مسیر پرش بر روی شیب‌های منفی  $0/5$ ،  $1$ ،  $1/3$  و  $2$  درصد قرار گرفته، وجود پله مثبت و منفی در شیب معکوس نقش مهمی در ایجاد پرش پایدار، که از جمله مسائل حساس و قابل تأمل در شیب‌های معکوس است، داشته و باعث کاهش بیشتر طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه می‌گردد و پله منفی در جهت پایداری و ایجاد پرش تثبیت شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای موثر می‌باشد.

نیک مهر و تاب بردبار (۱۴) پرش هیدرولیکی را در دو حالت بستر صاف و زبر روی چهار شیب معکوس بررسی کردند. نتایج نشان دادند که عمق ثانویه و طول پرش بر روی بستر صاف بیشتر از بستر زبر، با شیب و عدد فرود یکسان بوده و در مقایسه درصد اتلاف انرژی، اتلاف انرژی بیشتری در بستر زبر نسبت به بستر صاف ایجاد می‌شود. دستورانی و نصر آبادی (۴) اثر چهار ضریب زبری بستر را بر مشخصات پرش هیدرولیکی روی سه شیب معکوس در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۶ بررسی نمودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه و طول جهش هیدرولیکی کاهش

نیسی و شفاعی (۸) اثر اجزای زبر با شکل‌های مختلف بر تنش برشی بستر و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی را در محدوده اعداد فرود  $4/5$  تا  $12$  بررسی کردند. اجزای زبر منشوری شامل مقاطع مختلف مستطیلی، مثلثی، دایره‌ای، لوزی و شش‌ضلعی بود. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق مزدوج به دلیل وجود اجزای زبر کاهش یافته و میزان این کاهش بستگی به عدد فرود و شکل اجزای زبر دارد. کمترین و بیشترین میزان کاهش عمق مزدوج به ترتیب مربوط به اجزای زبر مستطیلی و مثلثی شکل بود.

نژندعلی و همکاران (۷) اثر زبری‌های عرضی مثلثی را در کف حوضچه بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود  $4$  تا  $13/7$  با  $3$  ارتفاع زبری (t) و چهار فاصله متفاوت (s) بین زبری‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر  $18$  درصد افزایش یافته و مقادیر تنش برشی بر روی بسترهای زبر حداکثر  $11$  برابر بستر صاف است.

اولین مطالعه در زمینه کنترل پرش هیدرولیکی با یک آبپایه ممتد توسط شکری در سال  $1957$  انجام گرفت. رند در سال  $1965$  با قرار دادن یک آبپایه در مسیر جریان نشان داد که با افزایش ارتفاع آبپایه و کاهش فاصله قرارگیری آبپایه از ابتدای پرش، عمق آب در پایاب کاهش می‌یابد. همچنین وی در سال  $1967$  میزان افت انرژی روی آبپایه‌های ممتد و دنداندار را بررسی و نتیجه گرفت که آبپایه ممتد نسبت به آبپایه دنداندار افت انرژی بیشتری را ایجاد می‌کند (بیرامی و ایلاقی حسینی، (۳)).

کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از یک و دو آبپایه در حوضچه آرامش افقی توسط بیرامی و ایلاقی حسینی (۳) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چنانچه دو آبپایه در مسیر پرش قرار گیرد، در صورتی که ارتفاع آبپایه دوم نسبتاً بلندتر از ارتفاع آبپایه اول باشد، در مقایسه با حالت قرارگیری آبپایه اول به تنهایی، عمق ثانویه کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد، اما طول گرداب به دلیل تشکیل گرداب‌های کف در پشت آبپایه‌های با ارتفاع نسبتاً زیاد افزایش می‌یابد.

در تحقیق انجام گرفته توسط گردنوشهری و همکاران (۶) اثر آبپایه لبه تیز بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا در محدوده اعداد فرود  $3/1$  تا  $10/3$  مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، نصب آبپایه لبه تیز تأثیر ناچیزی در عمق مزدوج نسبی و در نتیجه افت انرژی پرش هیدرولیکی واگرا دارد ولی باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در طول پرش می‌شود.

اوتسو و همکاران (۱۵) جریان بر روی آبپایه را به سه حالت تقسیم بندی کرده و با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی عمق پایین دست و نسبت ارتفاع آبپایه بر عمق اولیه پرش، مقادیر بحرانی این پارامترها را برای تبدیل جریان به حالات مختلف را بیان نمودند. همچنین با اندازه‌گیری فشار بر روی آبپایه، روابط تجربی برای

مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام گرفت. فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی متر، ارتفاع ۵۰ سانتی متر و شیب کف ۰/۰۲ بود. در همه آزمایشات بازشدگی دریاچه ثابت و برابر ۳ سانتی متر بود. جهت جلوگیری از انقباض جریان ورودی، شکل بالادست دریاچه بصورت نیم‌دایره استفاده گردید (شکل ۱). با تغییر دبی (۱۴/۶ تا ۱۸/۹ لیتر بر ثانیه)، پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ ایجاد گردید. در هر آزمایش ابتدا شیب بستر تنظیم و بستر مورد نظر در محل حوضچه آرامش نصب شده و سپس برای مقادیر دبی مشخص، پارامترهای هیدرولیکی پرش نظیر عمق اولیه، ثانویه و طول پرش اندازه‌گیری گردید. نمایی از فلوم، تجهیزات آن و شکل شماتیک بستر زبر در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

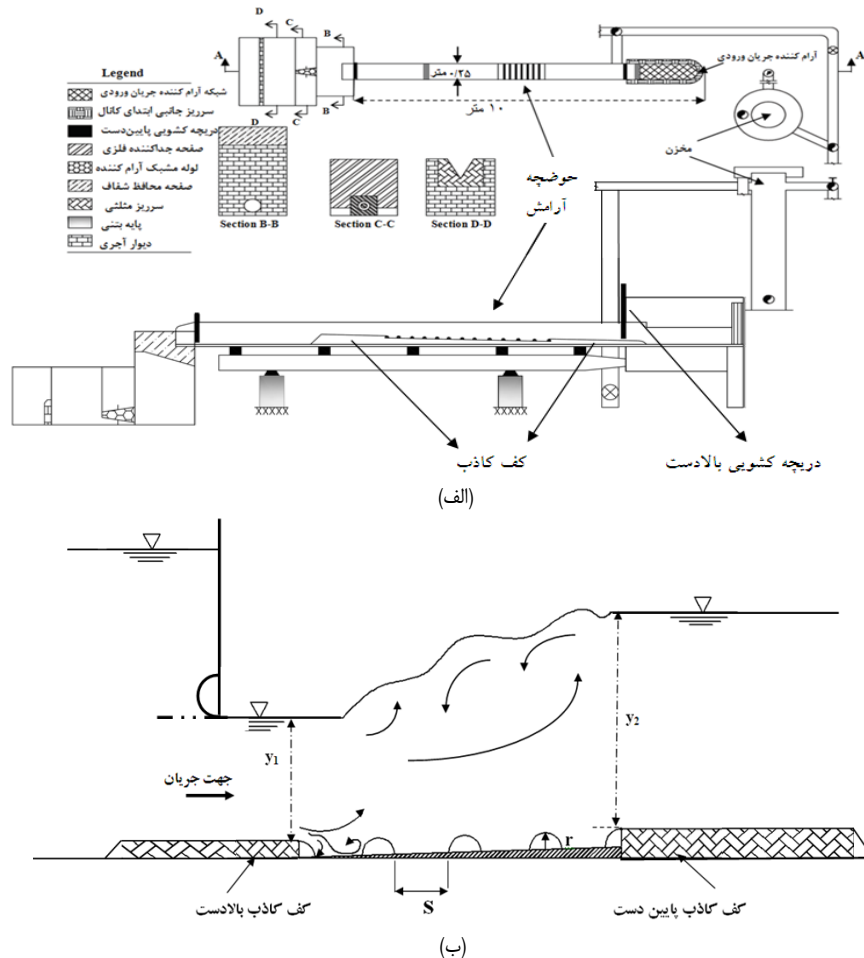
در تحقیق حاضر آبیابه‌ها از جنس چوب با مقطع مستطیلی با ۳ ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی متر و ضخامت ۲ سانتی متر می‌باشند (شکل ۲).

می‌یابد و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس روی طول پرش می‌شود.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی روی آبیابه و همچنین بسترهای زبر بر روی بستر افقی انجام گرفته است، با توجه به تأثیر شیب معکوس بر روی بهبود خصوصیات پرش هیدرولیکی از جمله کاهش طول و عمق ثانویه، لذا لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه بنظر میرسد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر شیب معکوس بر روی پرش هیدرولیکی بر روی شکل جدیدی از بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه با ارتفاع و فواصل مختلف و همچنین پرش بر روی آبیابه ممتد در عرض کانال و مقایسه آن با پرش کلاسیک می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه



شکل ۱- (الف) پلان سیستم تأمین آب و اجزای تجهیزات فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک، (ب) طرح شماتیک مقطع عرضی مدل بستر زبر



شکل ۲- آبپایه و زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر و نمونه ای از تشکیل پرش هیدرولیکی

شیب‌دار معکوس با آبپایه را می‌توان بصورت رابطه زیر بیان نمود:

$$f_1(\rho, v, y_1, y_2, V_1, g, h, L_s, \theta) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  جرم مخصوص،  $v$  لزوجت سینماتیکی آب،  $g$  شتاب ثقل،  $h$  ارتفاع آبپایه،  $L_s$  فاصله آبپایه از ابتدای پرش،  $V_1$  سرعت اولیه،  $y_1$  عمق اولیه و  $y_2$  عمق ثانویه پرش،  $\theta$  شیب بستر می‌باشند. رابطه بدون بعد با استفاده از روش باکینگهام بصورت زیر بدست می‌آید:

$$f_2\left(\frac{y_2}{y_1}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, Re_1 = \frac{V_1 y_1}{\nu}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \theta\right) = 0 \quad (2)$$

از آنجایی که اعداد رینولدز در آزمایش‌ها در محدوده  $Re_1 < 74983$  قرار داشته و در این محدوده جریان کاملاً متلاطم می‌باشد، لذا می‌توان از اثر لزوجت صرف نظر کرد، همچنین با تقسیم دو پارامتر  $L_s/y_1$  و  $h/y_1$  می‌توان عمق مزدوج نسبی پرش بر روی شیب معکوس با آبپایه را بصورت تابعی از عدد فرود اولیه، ارتفاع آبپایه، فاصله قرارگیری آن از ابتدای پرش و همچنین شیب بستر با رابطه زیر بیان نمود:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3\left(Fr_1, \frac{L_s}{h}, \theta\right) \quad (3)$$

پارامتر  $\frac{L_s}{h}$  (نسبت فاصله قرارگیری آبپایه از ابتدای پرش به ارتفاع آن) تأثیر ابعاد آبپایه را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. رابطه بی بعد طول نسبی پرش هیدرولیکی نیز در این حالت با استفاده از آنالیز ابعادی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{L_j}{y_1} = f_4\left(Fr_1, \frac{L_s}{h}, \theta\right) \quad (4)$$

همچنین پارامترهای مؤثر بر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیب‌دار و زیر را می‌توان بصورت تابع زیر بیان نمود:

$$f_5(\rho, v, y_1, y_2, V_1, g, s, r, \theta) = 0 \quad (5)$$

در همه آزمایشات موقعیت پرش به کمک دریچه کشویی در انتهای فلوم بگونه‌ای تنظیم شد که ابتدای پرش در فاصله ۳۴ سانتی متری از محل قرارگیری آبپایه باشد. فاصله قرارگیری آبپایه با معیارهای مطرح شده توسط رند (۱۹۶۵) مطابقت دارد. زبری‌ها همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، از جنس EPS با مقطع نیم-دایره به طول ۲۵ سانتی‌متر و سه ارتفاع زبری (۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ cm) ساخته شده‌اند. برای ایجاد بسترهای زیر، زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل ساخته شده با ارتفاع مشخص در فاصله یک تا چهار برابر قطر نیم استوانه‌ها ( $s = d, 2d, 3d, 4d$ ) قرار گرفتند که تاج زبری اول همتراز کف بالادست و تاج زبری آخر همتراز کف پایین دست باشد که باعث جلوگیری از ایجاد جداشدگی در خطوط جریان و پدیده کاویتاسیون شود.

مشخصات فیزیکی بسترهای زیر در جدول ۱ مشاهده می‌شود. در مجموع ۸۴ آزمایش پرش بر روی آبپایه و ۲۵۴ آزمایش پرش بر روی بستر زیر با شیب‌های مختلف در محدوده عدد فرود اولیه ۴/۶ تا ۷/۴ انجام گرفت. اندازه گیری دبی با استفاده از سرریز مثلثی لبه تیز واستجی شده که در انتهای فلوم تعبیه شده بود، انجام گرفت. عمق آب با استفاده از عمق سنج با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر و عکسبرداری دیجیتال از پرش هیدرولیکی و رقومی کردن آن توسط نرم‌افزار گرافر<sup>۱</sup> اندازه‌گیری و میانگین دو مقدار بدست آمده به عنوان عمق آب در محل مورد نظر ثبت گردید. طول پرش هیدرولیکی معادل فاصله از ابتدای پرش تا مکانی که غلظت حباب‌های هوا کم و سطح آب تقریباً افقی شود، در نظر گرفته شد و از طریق اشل نواری نصب شده بر روی بدنه فلوم با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری گردید.

#### آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر بر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی بسترهای زبر

r/s	s (cm)	d=2r (cm)	r (cm)	نام بستر	r/s	s (cm)	d=2r (cm)	r (cm)	نام بستر
۰/۱۶۷	۱۵ (S=۲d)	۵	۲/۵	I <sub>2</sub> S <sub>3d</sub>	۰/۵	۳ (S=d=2r)	۳	۱/۵	I <sub>1</sub> S <sub>d</sub>
۰/۱۲۵	۲۰ (S=۴d)	۵	۲/۵	I <sub>2</sub> S <sub>4d</sub>	۰/۲۵	۶ (S=۲d)	۳	۱/۵	I <sub>1</sub> S <sub>2d</sub>
۰/۵	۷ (S=d)	۷	۳/۵	I <sub>3</sub> S <sub>d</sub>	۰/۱۶۷	۹ (S=۳d)	۳	۱/۵	I <sub>1</sub> S <sub>3d</sub>
۰/۲۵	۱۴ (S=۲d)	۷	۳/۵	I <sub>3</sub> S <sub>2d</sub>	۰/۱۲۵	۱۲ (S=۴d)	۳	۱/۵	I <sub>1</sub> S <sub>4d</sub>
۰/۱۶۷	۲۱ (S=۳d)	۷	۳/۵	I <sub>3</sub> S <sub>3d</sub>	۰/۵	۵ (S=d)	۵	۲/۵	I <sub>2</sub> S <sub>d</sub>
۰/۱۲۵	۲۸ (S=۴d)	۷	۳/۵	I <sub>3</sub> S <sub>4d</sub>	۰/۲۵	۱۰ (S=۲d)	۵	۲/۵	I <sub>2</sub> S <sub>2d</sub>

### نتایج و بحث

#### طول نسبی پرش هیدرولیکی بر روی آبپایه و بستر زبر

##### روی شیب معکوس

مقادیر طول پرش توسط عمق اولیه پرش بی بعد شدند. در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب مقادیر طول نسبی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه برای همه آبپایه‌ها در شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد نشان داده شده است. با توجه به نتایج میزان متوسط کاهش نسبی طول پرش هیدرولیکی بر روی آبپایه در شیب ۱٪- برابر ۳۴/۴ درصد و در شیب معکوس ۱/۵٪ برابر ۴۵ درصد بدست آمد.

شکل‌های ۴-الف، ۴-ب و ۴-ج تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی،  $L_j/y_1$ ، بر روی بستر زبر در مقابل عدد فرود اولیه به ترتیب در شیب افقی، معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و مقایسه آن‌ها با پرش هیدرولیکی بستر افقی (پرش کلاسیک) را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده طول پرش بر روی بستر زبر با شیب معکوس نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک، پرش بر روی بستر زبر افقی و بستر صاف با شیب معکوس کاهش دارد و با افزایش عدد فرود میزان کاهش طول پرش بیشتر می‌شود. این کاهش طول بدلیل وجود زبری‌ها در بستر و شیب معکوس با جهت جریان و در نتیجه افزایش تلاطم و تنش‌های رینولدزی بوده که باعث می‌شود پرش در طول کوتاهتری نسبت به پرش کلاسیک به عمق ثانویه خود برسد.

طول نسبی پرش هیدرولیکی تحقیق حاضر و نتایج برخی محققین در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان کاهش طول پرش هیدرولیکی بر روی آبپایه در شیب معکوس قابل ملاحظه و اختلاف کمی با پرش در بستر زبر روی شیب معکوس داشته و در مقایسه با نتایج سایر محققین نتیجه تحقیق حاضر مطلوب می‌باشد.

در این رابطه  $r$  ارتفاع زبری و  $s$  فاصله بین زبری‌ها می‌باشند. رابطه ۵ را با استفاده از روش باکینگهام بصورت تابع بدون بعد زیر می‌توان ساده کرد:

$$f_6 \left( \frac{y_2}{y_1}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, Re_1 = \frac{V_1 y_1}{\nu}, \frac{r}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta \right) = 0 \quad (6)$$

با صرف نظر کردن از اثر لزوجت و تقسیم دو پارامتر بی بعد  $r/y_1$  و  $s/y_1$  بر یکدیگر می‌توان عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی را بصورت زیر بیان نمود:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_7 \left( Fr_1, \frac{r}{s}, \theta \right) \quad (7)$$

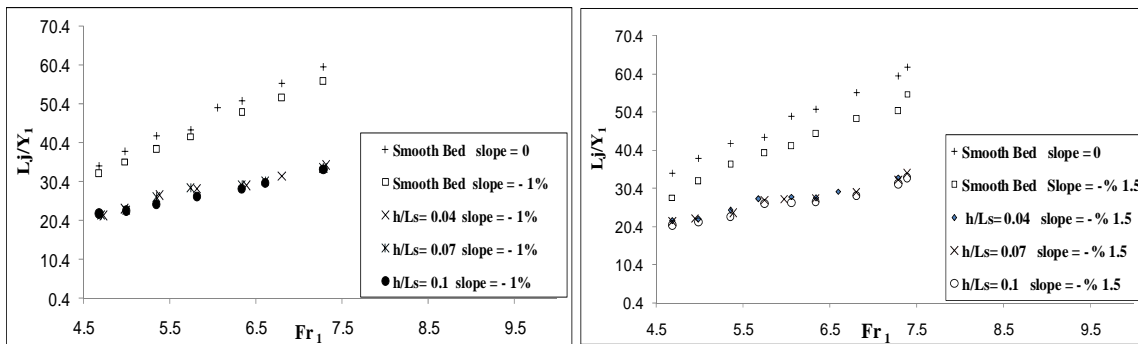
پارامتر  $r/s$  نسبت ارتفاع زبری بر فاصله بین زبری‌ها است و تأثیر ابعاد زبری‌ها را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. رابطه بی بعد طول نسبی پرش هیدرولیکی نیز برای بستر شیب دار معکوس و زبر با استفاده از آنالیز ابعادی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{L_j}{y_1} = f_8 \left( Fr_1, \frac{r}{s}, \theta \right) \quad (8)$$

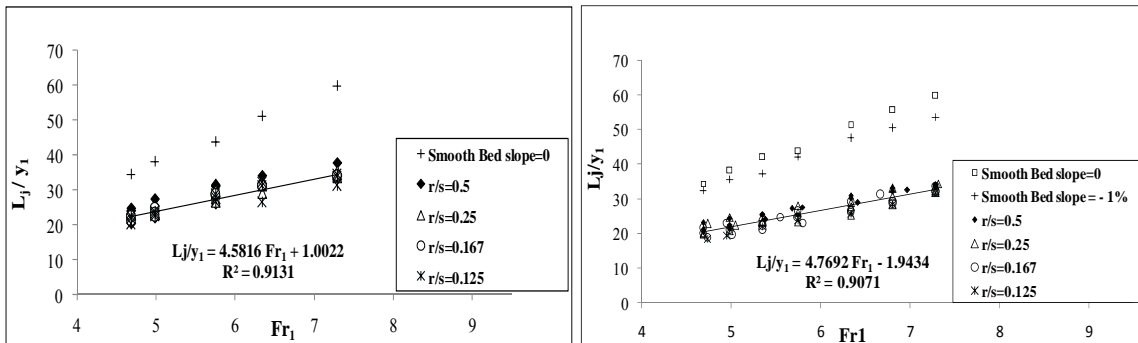
همچنین محدوده پارامترهای بی‌بعد در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲- محدوده پارامترهای بی بعد

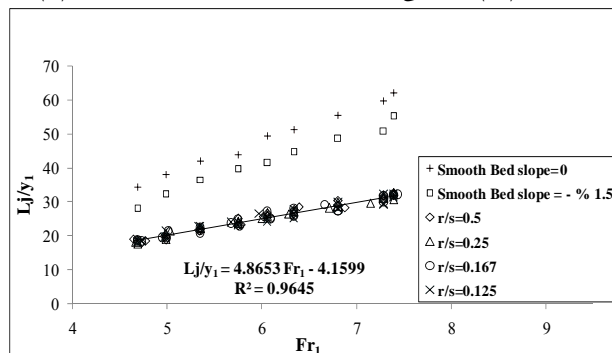
پارامترهای بی بعد	دامنه تغییرات
$Fr_1$	۴/۶ - ۷/۴
$Re_1$	۵۷۶۷۳ - ۷۴۹۸۳
$h/Ls$	۰/۰۴ - ۰/۱
$r/s$	۰/۱۲۵ - ۰/۵
$y_2/y_1$	۴/۵ - ۹/۶
$\theta$	۰ - ۱۸۶°



شکل ۳- تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای آبیایه‌ها در شیب‌های معکوس



(ب) شیب ۱٪ (الف) شیب افقی



(ج) شیب ۱/۵٪

شکل ۴- تغییرات طول نسبی پرش بر روی بستر زبر به ازای اعداد فرود اولیه

طول پرش در بستر صاف (پرش کلاسیک) با همان عدد فرود می‌باشد. با توجه به اینکه بیشترین کاهش طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد رخ داده است، تغییرات  $T$  با  $Fr_1$  برای همه آزمایش‌ها در حالت پرش بر روی آبیایه (شکل ۶-الف) و پرش روی بستر زبر با نسبت  $r/s$  مختلف (شکل ۶-ب) در شیب معکوس ۱/۵ درصد مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود شیب معکوس تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول پرش دارد، بطوریکه

#### درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی

درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی ( $T$ ) با استفاده از رابطه ۹ ارائه شده توسط توکیای (۱۸) محاسبه گردید.

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \times 100 \quad (9)$$

که  $L_j$  طول پرش در حالت پرش بر روی آبیایه یا بستر زبر و  $L_j^*$

تغییرات مقادیر  $D$  در محدوده اعداد فرود اولیه  $4/6$  تا  $7/4$  برای شیب  $1/5\%$  - نشان داده شده است.

$$D = \frac{y_2^* - y_1}{y_2^*} \quad (10)$$

در این رابطه،  $y_2$  عمق ثانویه پرش در بستر زبر و  $y_1$  عمق ثانویه پرش در بستر صاف افقی (پرش کلاسیک) به ازای عمق اولیه  $y_1$  و عدد فرود یکسان با بستر زبر می‌باشد. متوسط کاهش نسبی عمق ثانویه در بستر زبر بر روی شیب معکوس  $1/5\%$  برابر  $36\%$  درصد بدست آمد.

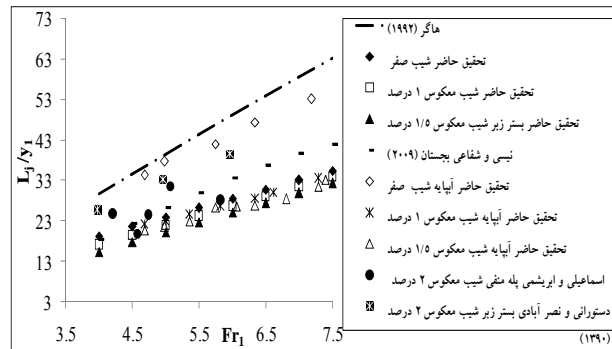
شکل ۸- الف تغییرات نسبت عمق ثانویه پرش با آبیایه به ازای اعداد فرود اولیه را نشان می‌دهد. با افزایش ارتفاع آبیایه بر روی شیب معکوس عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در شکل ۸- ب تغییرات مقادیر  $D$  در محدوده اعداد فرود  $4/6$  تا  $7/4$  برای شیب  $1/5\%$  - نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع آبیایه از  $1/5$  به  $3/5$  سانتی‌متر میزان کاهش عمق ثانویه نسبت به پرش کلاسیک بطور متوسط در شیب معکوس  $1/5$  درصد از  $13$  به  $33/2$  درصد افزایش می‌یابد.

در پرش بر روی آبیایه  $3/5$  سانتی‌متر بر روی شیب معکوس  $1/5\%$  طول پرش هیدرولیکی بطور متوسط  $46\%$  درصد و در پرش بر روی بستر زبر بطور متوسط  $49\%$  درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد.

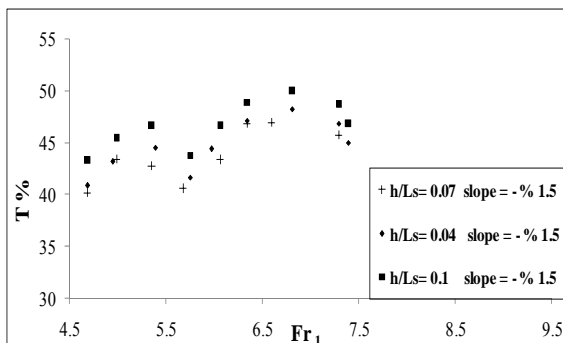
### نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی آبیایه و بستر زبر روی شیب معکوس

در شکل ۷- الف تغییرات نسبت عمق ثانویه پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای  $0/5 < \frac{r}{s} < 0/125$  در بیشترین شیب معکوس ( $1/5\%$ ) - نشان داده شده است. از آنجایی که در شیب معکوس، مولفه نیروی وزن در امتداد بستر در جهت عکس با جهت جریان بوده، عاملی در کوتاه کردن طول پرش و به تبع آن کاهش نسبت  $y_2/y_1$  می‌باشد و لذا پرش در فاصله کوتاهتر و با افت انرژی بیشتر شکل می‌گیرد. در اثر زبری بستر در مسیر پرش بر روی شیب معکوس، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش می‌یابد.

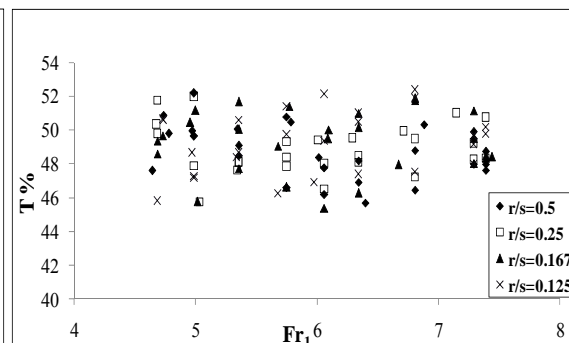
پارامتر کاهش نسبی عمق ثانویه پرش ( $D$ ) با استفاده از رابطه ۱۰ ارائه شده توسط اید و راجاراتنام (۱۲) محاسبه گردید. در شکل ۷- ب



شکل ۵- مقایسه تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی تحقیق حاضر و نتایج سایر محققین

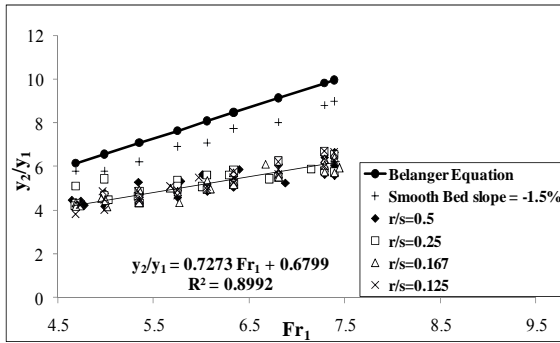


(ب) بستر زبر

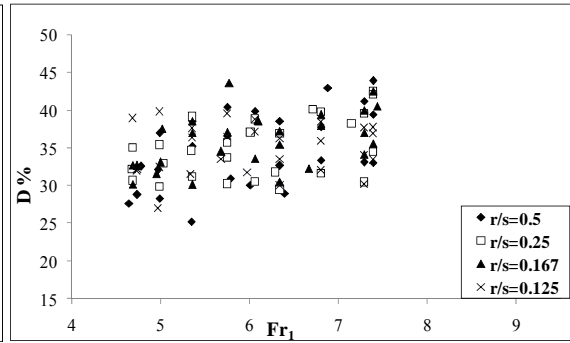


(الف) آبیایه

شکل ۶- تغییرات درصد کاهش طول پرش به ازای عدد فرود اولیه در شیب  $1/5\%$

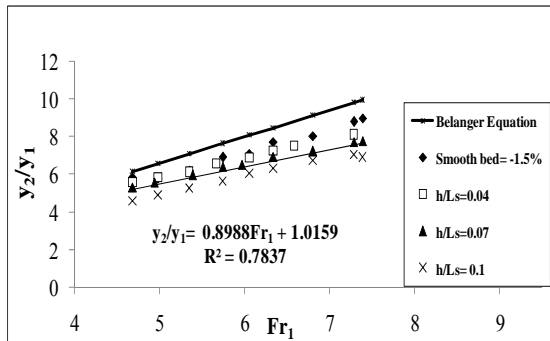


(ب) کاهش نسبی عمق ثانویه

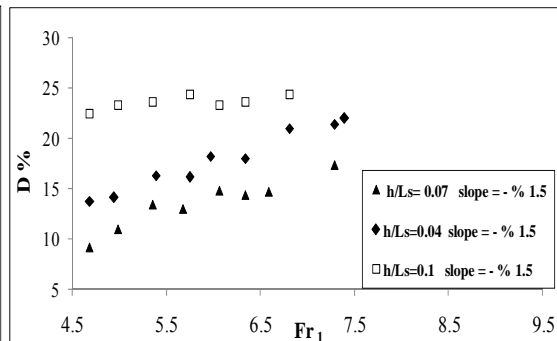


(الف) عمق مزدوج نسبی

شکل ۷- تغییرات نسبت عمق ثانویه پرش و میزان کاهش نسبی عمق ثانویه پرش بر روی بستر زیر به ازای اعداد فرود اولیه در شیب ۱/۵-%

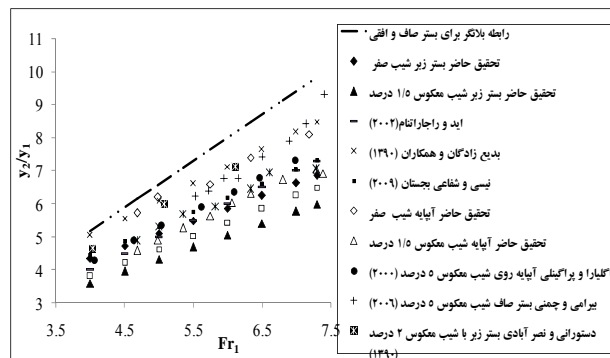


(ب) کاهش نسبی عمق ثانویه



(الف) عمق مزدوج نسبی

شکل ۸- تغییرات عمق مزدوج نسبی و میزان کاهش نسبی عمق ثانویه پرش بر روی آبپایه‌های مختلف به ازای اعداد فرود اولیه در شیب ۱/۵-%



شکل ۹- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی تحقیق حاضر و نتایج سایر محققین

مقادیر بی بعد  $\frac{X}{L_j}$  و  $\frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_1}$  در مقابل یکدیگر، پروفیل بی بعد

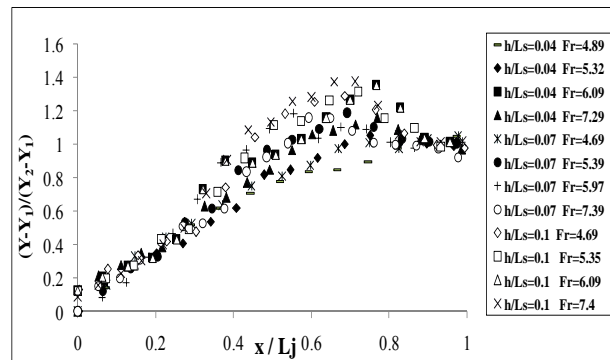
سطح پرش هیدرولیکی بدست آمد که در شکل ۱۰-الف بر روی آبپایه‌ها و در شکل ۱۰-ب بر روی بسترهای زیر در شیب معکوس ۱/۵ درصد مشاهده می‌شود. که نشان دهنده روند مشابه تمامی آزمایشات می‌باشد. پروفیل‌های بی بعد سطح پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس در مورد بستر زیر نسبت به آبپایه یکنواختی بیشتری دارند.

با توجه به مقایسه عمق مزدوج نسبی در تحقیق حاضر و برخی از نتایج سایر محققین (شکل ۹)، در بستر زیر با شیب معکوس ۱/۵ درصد میزان کاهش عمق مزدوج نسبی قابل ملاحظه می‌باشد.

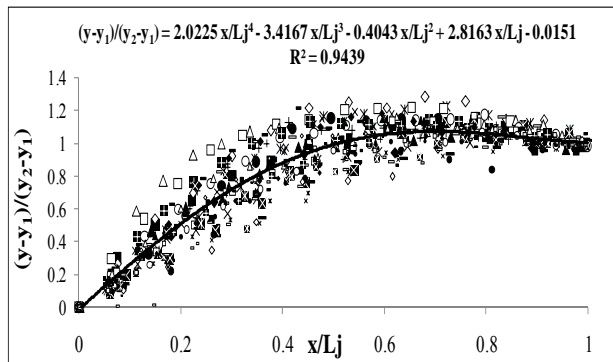
### پروفیل‌های سطح آب

پروفیل‌های سطح آب با استفاده از تصاویر ثبت شده از نیمرخ طولی پرش هیدرولیکی، برای همه آزمایش‌ها بدست آمد. با رسم





(الف) آبپایه



(ب) بستر زبر

شکل ۱۰- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب برای آبپایه‌ها و بسترهای زبر در شیب ۱/۵٪

## نتیجه گیری

در مقایسه با پرش کلاسیک، طول پرش هیدرولیکی با آبپایه روی شیب‌های مختلف بطور متوسط از ۶/۳ تا ۴۶ درصد کاهش نشان می‌دهد. این نرخ کاهش با افزایش ارتفاع آبپایه، شیب معکوس و عدد فرود بیشتر می‌شود. بطوریکه با افزایش ارتفاع آبپایه ( $h/L_s=0/1$ )، طول پرش حداکثر ۹ درصد بیشتر نسبت به کمترین ارتفاع آبپایه ( $h/L_s=0/0.4$ ) کاهش یافته و با افزایش شیب معکوس، نرخ کاهش طول پرش هیدرولیکی بطور متوسط از ۷/۸ درصد به ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.

زبری بستر در حوضچه آرامش طول پرش را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. میانگین درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس ۱ درصد و ۱/۵ درصد به‌ترتیب برابر ۴۵/۴ و ۴۹ درصد بدست آمد. طول پرش در بستر زبر و روی شیب معکوس در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ حداکثر تا ۵۲ درصد کاهش داشت.

عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در شیب معکوس

۱/۵٪ حداکثر ۴۴ درصد و در پرش بر روی آبپایه در شیب معکوس ۱/۵٪ حداکثر ۲۴/۴ درصد نسبت به پرش بر روی بستر صاف و افقی کاهش یافت.

در پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس، از آنجاییکه مولفه نیروی وزن در امتداد بستر در جهت عکس با جهت جریان بوده، لذا عامل موثری در کوتاه کردن طول پرش و به تبع آن کاهش نسبت  $y_2/y_1$  می‌باشد و لذا پرش در فاصله کوتاهتر شکل می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد تاثیر شیب معکوس و بستر زبر در کاهش عمق ثانویه پرش بیشتر از تاثیر شیب معکوس و آبپایه بود. میزان کاهش طول پرش هیدرولیکی بر روی آبپایه در شیب معکوس قابل ملاحظه و اختلاف کمی با پرش در بستر زبر و روی شیب معکوس داشته و لذا در مواقعی که بیشتر کاهش طول پرش مدنظر باشد بنظر می‌رسد بکارگیری یک آبپایه پیوسته روی شیب معکوس دارای نتیجه مطلوب و مقرون به صرفه می‌باشد.

## منابع

- ۱- اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. ۱۳۸۰. تعیین ارتباط بین عمق‌های قبل و بعد از پرش و ارتفاع پله به منظور کنترل پرش هیدرولیکی روی حوضچه‌های با شیب معکوس و با پله (مثبت یا منفی). کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی مهندسی عمران، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ۲- 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 ۲۵ (۴): ۶۷۶-۶۸۷.
- ۳- بیرامی م. ک. و ایلاقی حسینی م. ۱۳۸۳، کنترل پرش هیدرولیکی با یک و دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی، مجله استقلال، ۲۴: ۹۷ - ۱۱۹.
- ۴- دستورانی م. و نصرآبادی م. ۱۳۹۰. اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران، ۵: ۹۱-۱۰۰.
- ۵- حمیدی فرح، امید م. و شکرانی م. ۱۳۸۸. بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی و کنترل آن با استفاده از آستانه لبه‌پهن. هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه شیراز.
- ۶- گرد نوشهری ا.، امید م. ح. و کوچک زاده ص. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی کنترل شده توسط آستانه لبه تیز در حوضچه‌های آرامش واگر. مجله پژوهش آب ایران، ۳: ۳۱-۳۹.
- ۷- نژدعلی ع.، اسماعیلی ک.، فرهودی ج. و راور ز. ۱۳۹۰. تاثیر زبری‌های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۵: ۲۳۴-۲۴۱.
- ۸- نیسی ک. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۸. بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تاثیر اجزای زبر کف. مجله دانش آب و خاک. ۱۹: ۱۶۵-۱۷۶.
- 9- Abbaspour A., Hosseinzadeh Dalir A., Farsadizadeh D., and Sadraddini A.A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environmental Research* 3: 109-117.
- 10- Abrishami J., and Saneie M. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. *Int. Journal of Water Research Engineering* 2(1): 51-63.
- 11- Beirami M.K., and Chamani M.R. 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 132(10): 1051-1068.
- 12- Ead S.A., and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 128 (7): 656-663.
- 13- 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: 9-14.
- 14- Nikmehr S., and Tabebordbar A. 2009. Hydraulic jumps on adverse slope in two cases of rough and smooth bed. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, ISSN, 2(1): 19-22.
- 15- Ohtsu I., Yasuda, Y., and Hashiba H. 1996. Incipient Jump Conditions for Flows over a Vertical sill. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 122 (8): 465-469.
- 16- Pagliara S., and Peruginelli A. 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 126(11): 847-851.
- 17- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transactions of the Engineering Institute of Canada*, 11(A-2): 1-8.
- 18- Tokyay N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Global Climate Change Conference, EWRI, May 15-19, Anchorage, Alaska, USA*, 408-416.



## Influence of Sill and Artificial Roughness over Adverse Bed Slopes on Hydraulic Jump Characteristics

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

Received: 24-12-2012

Accepted: 07-07-2013

### Abstract

Hydraulic jump plays a significant role in dissipation of kinetic energy downstream of hydraulic structures in a stilling basin. In the present research, hydraulic jump characteristics on roughened bed with half cylindrical shape bars and rectangular bed sill on two adverse slopes of 1 and 1.5 % and horizontal bed were investigated. In total 338 experiments were performed for Froude numbers ranging from 4.6 to 7.4. The results indicated that the length of the hydraulic jump on the adverse slope of 1.5% decreased 46% with sill and 49% on rough bed. Also maximum reduction of sequent depth on the adverse slope of 1.5 % with sill and on rough bed was 24.4% and 44%, respectively, compared with the classic jump. Furthermore, application of a continuous sill on adverse slope to stabilize hydraulic jump with decreasing its length will be economical.

**Keywords:** Energy Loss, Stabilization of Hydraulic Jump, Stilling Basin, Adverse Slope

---

1,2,3- PhD Student, Associate Professor and Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran, Respectively

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