

## خصوصیات پرش هیدرولیکی با پله معکوس تحت زبری‌های مصنوعی

محمد جواد نصر اصفهانی<sup>۱\*</sup> - محمود شفاعی بجنستان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۴/۴

### چکیده

پله معکوس، تغییر ناگهانی تراز کف کانال است که به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی، همچنین اطمینان از اینکه پرش هیدرولیکی تحت شرایط مختلف جریان از حوضچه آرامش خارج نمی‌شود، در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده می‌گردد. مهم‌ترین خصوصیت در مورد پرشهایی که بر پله معکوس تشکیل می‌گردد، موقعیت شروع پرش از محل پله است. از آنجا که زبری کف حوضچه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان طول حوضچه دارد، استفاده همزمان از پله معکوس به همراه زبری در کف کانال می‌تواند بر مشخصات پرش تأثیرگذار باشد. هدف از این پژوهش ارائه نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی در زمینه پرش هیدرولیکی با بستر زبر به منظور بررسی اثر زبری بر پارامترهای پرش هیدرولیکی در پله معکوس می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد وجود زبری در بستر باعث کاهش طول پرش به مقدار ۳۶ درصد نسبت به پرش کلاسیک و ۵۳ درصد نسبت به پرش در پله معکوس با بستر صاف گردیده است. مشاهدات و داده‌ها نشان می‌دهند که نسبت اعماق مزدوج تقریباً برابر همین نسبت در پرش کلاسیک بوده و اینکه نقطه شروع پرش در همه آزمایش‌ها ثابت می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پرش هیدرولیکی، بستر زبر، استهلاک انرژی، حوضچه آرامش، پله معکوس

### مقدمه

آرامش صرفاً با استفاده از موانع ممکن نیست، زیرا بعضی از پارامترهای با کاربرد مفید ممکن است در کاربردهای دیگر منجر به نارسائی در سازه شوند. چنانچه المان‌های زبری بطور یکنواخت بر روی سطح بستر و عمود بر جهت جریان قرار گرفته باشند، پرش ایجاد شده را پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر گویند و از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویتاسیون حائز اهمیت می‌باشد، بر اساس نظریه آید و راجاراتنام (۱۴) زبری‌ها در داخل حوضچه باید به نحوی قرار گیرند که تاج آنها هم سطح بستر بالادست بوده و نقش گودافتادگی را ایفا نمایند. از مطالعات انجام شده پرش هیدرولیکی بر بستر زبر و یا بستر موج‌دار می‌توان به مطالعات راجاراتنام (۲۷)، گیل (۱۶)، هاگ‌هز و فلک (۲۲)، آید و راجاراتنام (۱۴)، کارولو و همکاران (۱۳)، ایزدجو و همکاران (۲)، توکیای (۲۹)، انهدادی و همکاران (۳)، کاظمیان‌زاده و شفاعی بجنستان (۸)، پاگلیارا و همکاران (۲۵)، شفاعی بجنستان و نیسی (۶)، گوهری و فرهودی (۱۷)، عباسپور و همکاران (۱۰ و ۷)، بدیع زادگان و همکاران (۵) و نژندعلی و همکاران (۹) اشاره کرد. تا کنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر انجام گرفته است، اما با توجه به گستردگی شرایط و پیچیدگی رفتار جریان در حالات مختلف و گستردگی استفاده از پله‌های معکوس، لزوم تحقیقات بیشتر

پدیده پرش هیدرولیکی به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها و غیره استفاده می‌شود. ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی را که در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک<sup>۳</sup> می‌نامند که بطور وسیع توسط پترکا (۲۶)، راجاراتنام (۲۷)، هاگر و برمن (۱۹) و .. مورد بررسی قرار گرفته است. در ساختمان‌های مستهلک‌کننده انرژی آب یا همان حوضچه‌های آرامش، معمولاً از المان‌هایی برای کنترل پرش در حوضچه‌ها استفاده می‌شود که می‌توان به کاربرد آنها در تثبیت، کنترل، کاهش طول و عمق ثانویه پرش اشاره کرد. در یک حوضچه آرامش، المان‌های اصلی مختلف به صورت هندسه کف (شامل پله، آستانه و ...)، هندسه پلان (شامل انبساط تدریجی و یا ناگهانی)، ناهمواری‌های دیوار (برای افزایش نیروی برشی) و تغییر در دبی (به وسیله اضافه کردن موضعی آن و یا به صورت استخراج آب) می‌باشد. مطلوب سازی کامل یک حوضچه

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد دانشگاه شهید چمران اهواز

(\* - نویسنده مسئول: Email : mo.isfahani@gmail.com)

در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

$$Fr_1^2 = \frac{\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 - \left(1 + \frac{\Delta Z_0}{y_1}\right)^2 - 2 \frac{\Delta Z_0}{y_1} \left(\frac{h_D}{y_1} - \frac{\Delta Z_0}{y_1}\right)}{2\left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right)} \quad (1)$$

### پرش روی پله‌های معکوس

پله منفی، یک تغییر در تراز کف حوضچه آرامش است که می‌تواند به‌عنوان یک گزینه نهایی در انتخاب حوضچه آرامش در نظر گرفته شود. در شرایطی که عمق آب در پائین دست کانال کمتر از عمق ثانویه پرش باشد، پرش به کانال وارد شده و باعث تخریب شدید در پائین دست حوضچه آرامش و نهایتاً موجب آسیب‌دیدگی حوضچه آرامش می‌گردد. شناخت نوع پرش هیدرولیکی تشکیل شده درون حوضچه‌های آرامش امکان طراحی مناسب حوضچه آرامش را فراهم می‌سازد. به عقیده برخی از محققین از ایجاد پرش با طول زیاد به دلیل ابعاد بزرگ مورد نیاز برای دیواره‌های حوضچه آرامش باید جلوگیری کرد. فورستر و اسکریندا (۱۵) اولین کسانی بودند که مطالعاتی را در خصوص پرش هیدرولیکی بر پله‌های معکوس انجام دادند. مطالعه ایشان توسط ان-یون هو (۲۱) در همان سال مورد بحث و بررسی قرار گرفت؛ سپس مور و مورگان (۲۳) به بررسی این پدیده در پله‌های معکوس پرداختند. شکل ۱ انواع مختلف پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر پله معکوس را نشان می‌دهد.

همانگونه که در این شکل مشخص است، چنانچه عمق پایاب نسبتاً بزرگ باشد پرش در بالادست پله تشکیل خواهد شد که به پرش نوع A معروف است و با Az نشان داده می‌شود. با کاهش عمق پایاب پاشنه پرش به سمت لبه پله حرکت می‌کند و یک موج در لبه پله مشاهده می‌شود که به پرش موجی معروف بوده و در آن ارتفاع موج نسبت به عمق پایاب بیشتر است؛ این پرش را با Wz نشان می‌دهند. با کاهش مجدد عمق پایاب انحناهای جریان عبوری از لبه پله که در پرش موج به سمت سطح پایاب بوده عوض شده و به سمت کف کانال تغییر مسیر می‌دهد و پرش نوع B تشکیل می‌گردد. این پرش دقیقاً در محل پله تشکیل شده و با Bz نشان داده می‌شود. با کاهش بیشتر عمق پایاب نیز پرش حدی یا می‌نیم نوع B تشکیل می‌گردد. در مطالعه مور و مورگان (۲۳) مشخص گردید که توزیع فشار بر پله تحت ارتفاع پیژومتريک، به صورت هیدرواستاتیکی می‌باشد.  $h_D$  در شکل فوق نشان دهنده مقدار ارتفاع هیدرواستاتیکی (پیژومتريک) است. با تغییر پرش از یک حالت به حالت دیگر، مقدار  $h_D$  و فشار وارده از آن به سطح عمودی پله، از ماکزیمم خود در حالتی که پرش در بالادست پله تشکیل شده است (یعنی  $\gamma h_D = \gamma y_2$ ) به مقدار می‌نیمم خود در حالتی که پرش در پائین دست پله تشکیل می‌شود، خواهد رسید (یعنی  $\gamma h_D < \gamma(\Delta Z_0 + y_1)$ ). آنها با ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتم رابطه کلی زیر را برای بدست آوردن نسبت اعماق مزدوج در هر چهار نوع پرش بر پله معکوس ارائه کردند:

هاگر و کاواگوشی (۱۸) نیز به مطالعه پرش هیدرولیکی در یک پله منفی مدور (پله با لبه مدور) پرداختند و دریافتند که پرش بر پله منفی مدور بهتر از یک پله با لبه تیز رخ می‌دهد. در این مورد نیز احتمال وقوع همان چهار نوع پرش هیدرولیکی وجود دارد. ایشان همچنین در مطالعه خود دریافتند وجود پله باعث افزایش نسبت اعماق مزدوج به مقدار  $\Delta Y$  در مقایسه با پرش کلاسیک خواهد شد، یعنی  $Y = Y^* + \Delta Y$ . در این رابطه  $Y$  عبارتست از نسبت اعماق متناظر بر پله معکوس  $(y_2/y_1)$ ،  $Y^*$  نسبت اعماق متناظر پرش کلاسیک (با همان عمق اولیه  $y_1$ ) و  $\Delta Y$  افزایش میزان نسبت اعماق مزدوج می‌باشد که مقدار آن برای پرشهای مختلف به ترتیب عبارتست از:

$$\Delta Y / S = 1.1 - 0.074 S^{-1/2} (Fr_1 - 1) \quad \text{A-jump} \quad (2)$$

$$\Delta Y / S = 1 - 0.135 S^{-5/9} (Fr_1 - 1) \quad \text{Wave-jump} \quad (3)$$

$$\Delta Y / S = 0.9 - 0.3 S^{-2/3} (Fr_1 - 1) \quad \text{B-jump} \quad (4)$$

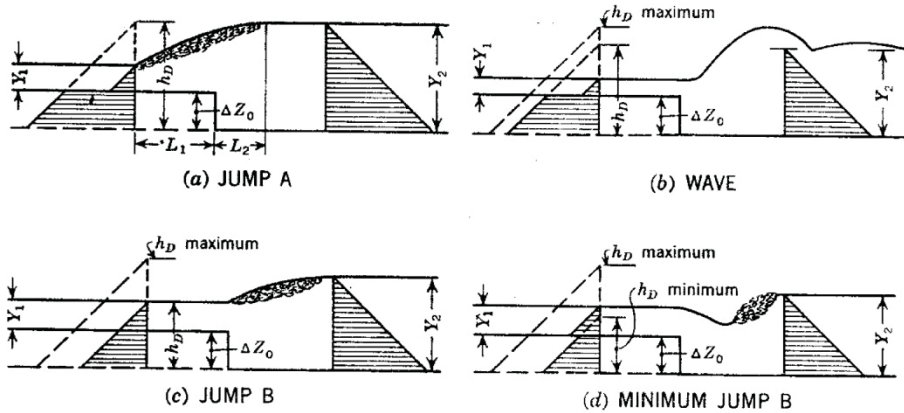
$$\Delta Y / S = S^{-3/4} - 0.35 S^{-1} (Fr_1 - 1) \quad \text{Minimum B-jump} \quad (5)$$

در روابط فوق  $S$  برابر  $\Delta Z_0 / y_1$  می‌باشد. ایشان در مطالعه خود پارامتر  $\Delta Z_0$  را با  $s$  نشان دادند. ایشان همچنین روابطی برای محاسبه طول پرش  $(L_j)$  و طول غلطابی  $(L_r)$  بر پله معکوس با لبه مدور برای هر چهار نوع پرش ارائه کردند. این روابط برای پرش نوع B به ترتیب عبارتند از:

$$\lambda_j = -9 + 5.5 S + 14.3 S^{-0.36} (Fr_1 - 1) \quad \text{B-jump} \quad (6)$$

$$\lambda_r = -8 + 6.5 S + \frac{8(Fr_1 - 1)}{1 + (0.15 S)^2} \quad \text{B-jump} \quad (7)$$

در این روابط  $\lambda_r = L_r / y_1$  و  $\lambda_j = L_j / y_1$  می‌باشد. اسماعیلی و ابریشمی (۱) نیز به بررسی پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی پرداختند و دریافتند تاثیر همزمان شیب معکوس و پله منفی در پرش هیدرولیکی می‌تواند نقش موثری در پایداری پرش داشته و موجب افزایش نسبی طول پرش و همچنین عمق ثانویه پرش گردد. از دیگر مطالعات انجام شده پرش هیدرولیکی بر پله‌ها می‌توان به مطالعه شارپ (۲۸) روی پرش بر پله‌های مدور، مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی بر روی پله با استفاده از PIV توسط آئین مهر و صالحی نیشابوری (۴) و مطالعه هاگر و برتز (۲۰) روی پرش بر پله‌های مثبت و منفی اشاره کرد.



شکل ۱- انواع پرش هیدرولیکی روی پله معکوس، مور و مورگان (۱۹۵۸)

همواره چنان تنظیم گردید که پرش نوع B در محل پله معکوس ایجاد گردد. به منظور جلوگیری از انقباض جریان خروجی و برای اینکه عمق اولیه پرش برابر با میزان بازشدگی درپچه باشد شکل بالادست درپچه، بصورت نیم‌دایره‌ای استفاده شد. روند انجام آزمایش بدین صورت بود که پس از نصب زبری‌ها (با آرایش زیگزاگ ۷-۶-۷)، پمپ روشن شده و اجازه داده می‌شد تا جریان آب به آهستگی وارد فلوم گردد. سپس به تدریج دبی ورودی را اضافه کرده تا دبی به مقدار مورد نظر برسد. با تنظیم دبی، درپچه پایین دست نیز طوری تنظیم می‌گردید تا عمق پایاب به عمق موردنظر رسیده و پرش هیدرولیکی دقیقاً در محل پله معکوس تشکیل گردد. این شرایط در مدت زمان کافی برای برداشت داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شد.

در حین آزمایش‌ها مقدار دبی جریان نیز هم توسط سرریز و هم توسط دبی سنخ اولتراسونیک با دقت  $0.01/1$  اندازه‌گیری می‌شد تا از ثابت بودن مقدار دبی اطمینان حاصل شود. عمق ثانویه پرش ( $y_2$ ) نیز در طول آزمایشات توسط یکدستگاه پوینت‌گیج دیجیتالی اندازه‌گیری گردید. قابل ذکر است که انتخاب شکل، ارتفاع و نحوه آرایش زبریها نتیجه مطالعات انجام شده در پرش بر بستر زبر توسط شفافی‌بجستان و نیسی (۶)، کاظمیان‌زاده و شفافی‌بجستان (۸) و الله‌دادی و همکاران (۳) بود. بر اساس همین مطالعات همچنین محل کارگذاری اولین ردیف زبری‌ها از محل تشکیل عمق  $y_1$  برابر ارتفاع بلوکها (s) در نظر گرفته شد. میزان تراکم عبارتست از مساحت زبری‌ها به مساحت کل منطقه زبر شده و از رابطه  $I = 100(aN / B.L.R)$  بدست می‌آید که در آن a مساحت هر زبری در پلان، N تعداد کل زبری‌ها در طول  $L_R$  و B عرض فلوم می‌باشد. طبق مطالعه الحمید (۱۱) و محمد علی (۲۴) میزان تراکم زبری‌ها می‌بایست در حدود ۱۰ تا ۱۲/۵ درصد باشد.

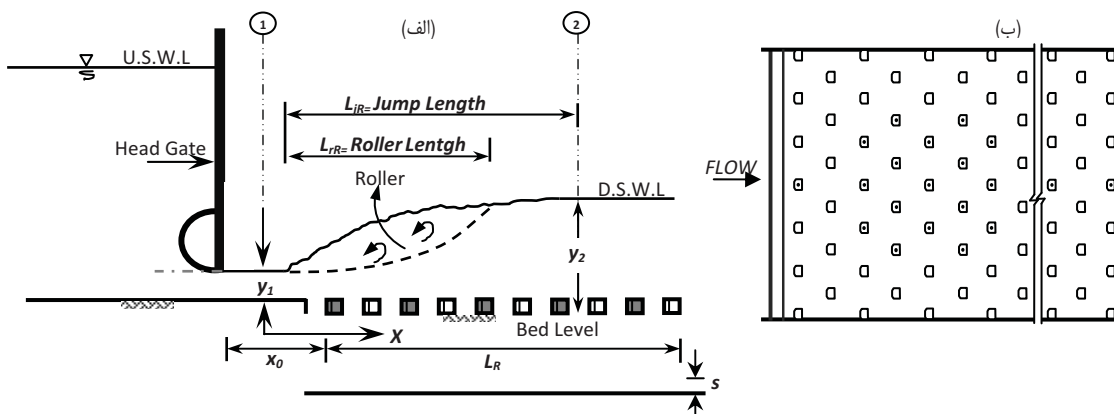
تاکنون در خصوص پرش بر پله‌های معکوس با بستر زیر تحقیقی صورت نگرفته است. پله معکوس خود موجب افزایش نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت کلاسیک می‌گردد. از آنجائیکه به علت بالا بودن نسبی ویسکوزیته و کشش سطحی در مدل، مقدار هوای ورودی به جریان قابل حل کردن نمی‌باشد، یک تلاطم سطحی کوچک که در مدل خود را به ظاهر به لایه اصلی آب چسبیده می‌نمایاند، ممکن است در پروتوتیپ<sup>۱</sup> جدا شده و به پراش<sup>۲</sup> بیش از حد آب منجر شود. از اینرو به منظور جلوگیری از تاثیر مقیاس، همچنین به علت آنکه جریان در حوضچه‌های آرامش به مقدار زیادی دارای مولفه قائم می‌باشد، لازم است مدل با مقیاس نسبتاً بزرگ ساخته شود. در صورت انتخاب مقیاس مناسب می‌توان از تاثیر نیروهای کشش سطحی و ویسکوزیته صرفنظر کرد. از اینرو لازم است قبل از معرفی حوضچه‌هایی با این خصوصیات، آزمایشات در دامنه وسیعتر و با مقیاس بزرگتر انجام شوند. هدف از این مطالعه، انجام آزمایش در فلوم عرض‌تر از کارهای قبلی و روی پرش بر پله معکوس با بستر زبر است تا بتوان اثر زبری بر طول پرش و نسبت اعماق مزدوج را در مقیاس بزرگ بررسی کرد.

## مواد و روش‌ها

### انجام آزمایشات و مدل فیزیکی

شکل ۲ شماتیک مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. در این مدل به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش، از درپچه‌ای کشویی از جنس پلکسی گلاس استفاده شد. همچنین به منظور تثبیت موقعیت پرش و ایجاد پرش آزاد درپچه‌ای کشویی در فاصله نیم‌متری از انتهای فلوم استفاده گردید. در این تحقیق عمق پایاب

1- Prototype  
2- Diffraction



شکل ۲- (الف) شماتیک مقطع عرضی مدل (ب) پلان مدل

زبری‌ها، (برآمدگی‌های موجود در بستر حوضچه آرامش) زیر جت ورودی آب و هم سطح با پله معکوس قرار گرفتند و عملاً در مقابل جریان ورودی قرار نداشتند. این موضوع به منظور ایجاد جداشدگی در خطوط جریان و ایجاد گردابه، همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد پدیده کاویتاسیون، در مقایسه با برخورد مستقیم جت آب با بلوک‌ها در حوضچه‌های آرامش استاندارد بود، شکل (۳).

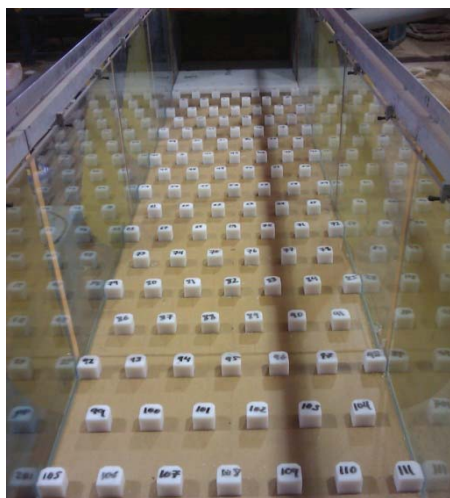
جزئیات و ابعاد زبری‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.

به همین دلیل فاصله زبری‌ها در این تحقیق در ردیف‌های عرضی از یکدیگر برابر ۷/۵ سانتی‌متر و فواصل طولی آنها از یکدیگر برابر ۱۵/۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با رعایت این ابعاد (یعنی  $B=80\text{ cm}$  و  $L_R=270\text{ cm}$ ،  $N=105$ ،  $a=24\text{ cm}^2$  تراکم زبری‌ها برابر  $11/6$  ( $I=11.6$ )، بدست آمد. محدوده متغیرهای مورد آزمایش بصورت جدول ۱ بود.

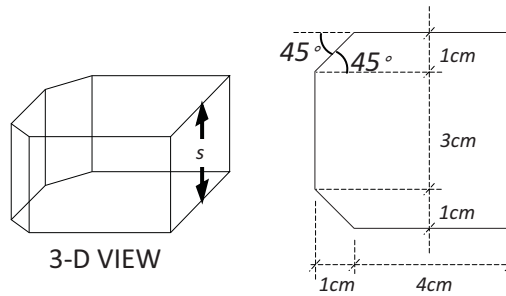
### زبری‌های مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات کانال آزمایشگاهی (فلوم) و محدوده متغیرهای مورد آزمایش

متغیرهای مورد اندازه‌گیری			مشخصات زبری			محدوده متغیرهای جریان			مشخصات کلی فلوم		
عمق	طول	طول	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	Re	Fr <sub>1</sub>	Q(l/s)	طول (m)	ارتفاع (cm)	عرض (cm)
مزدوج	غلطابی	پرش	۴/۵	۵	۵	۶۴۷۱۳ تا ۲۵۲۷۴۷	۳/۰۱ تا ۹/۱۴	۵۶ تا ۲۳۰	۱۵	۷۰	۸۰



شکل ۳- کانال آزمایشگاهی و نحوه آرایش زبری‌ها



شکل ۴- زبری مورد استفاده در این تحقیق

حوضچه کاسته شده است. این کاهش اندک عمق ثانویه را می‌توان مثبت تلقی کرد. زیرا برای اطمینان از عملکرد صحیح حوضچه آرامش، طراحی حوضچه باید به گونه‌ای صورت پذیرد که تراز عمق پایاب در پایین دست کانال بیشتر از تراز عمق مزدوج پرش هیدرولیکی باشد. عدم رعایت این موضوع باعث کشیده شدن پرش گردیده و در نتیجه کف بستر کانال تخریب خواهد شد. در صورتی که عمق پایاب بسیار زیاد باشد نیز، پرش مستغرق شده و عملکرد حوضچه به عنوان مستهلک کننده انرژی کاهش می‌یابد. جدول ۲ تعدادی از برداشتهای آزمایشگاهی این تحقیق را نشان می‌دهد.

طبق رابطه (۹) نسبت اعماق متناظر تابعی از  $Fr_1$  و  $s/y_1$  می‌باشد که تاثیر  $s/y_1$  در شکل ۵ به صورت عدد ثابت  $0.7945$  بدست آمد. درصد کاهش نسبت اعماق متناظر نیز  $3/1$  درصد بدست آمد.

با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که عمق نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک کاهش چشمگیری نداشته است. دلیل این موضوع آن است که فاصله بین اجزاء زبری می‌تواند بر تشکیل حرکت گردابه‌ای اثر گذار باشد. یعنی چنانچه فاصله بین اجزاء زبری زیاد باشد گردابه‌های عمودی و افقی به صورت مستقل تشکیل شده و باعث افزایش عمق، از عمق اولیه به ثانویه در طول بسیار کوتاهی خواهند شد.

در حین انجام آزمایشات، در اعداد فرود کمتر از ۳، پرش تشکیل شده از نوع موجی مشاهده شد که نمونه‌ای از آن در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این نوع پرش در این مقاله آورده نشده است.

### طول پرش هیدرولیکی

اکثر محققان بر این باورند که پایان پرش بخشی است که در آن سطح آب به بالاترین حد خود می‌رسد و فاصله افقی از پای پرش تا این بخش، به‌عنوان طول پرش دانسته می‌شود و توسط  $L_j^*$  نمایش داده می‌شود. اما بدلیل مسطح بودن سطح آب در نزدیکی بخش پایانی پرش، نتایج بررسی‌های افراد مختلف، متفاوت می‌باشد.

### آنالیز ابعادی

ویژگی‌های پرش هیدرولیکی روی بستر زبر متاثر از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد؛  $\rho_w$ : دانسیته جریان عبوری،  $U$ : لزجت سینماتیکی جریان عبوری،  $s$ : ارتفاع زبریهای بستر،  $I$ : تراکم زبری‌ها،  $y_1$ : عمق اولیه پرش،  $v_1$ : سرعت در عمق  $y_1$ ،  $L_j$ : طول پرش هیدرولیکی بر بستر زبر و  $g$ : شتاب ثقل زمین را می‌توان مهمترین پارامترها در مطالعه حاضر دانست. با استفاده از تئوری باکینگهام برای دستیابی به گروه‌های بی‌بعد خواهیم داشت:

$$f(\text{Re}, Fr_1, I, \frac{y_2}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}) = 0 \quad (8)$$

در این رابطه از پارامتر  $I$  بدلیل ثابت بودن، می‌توان صرفنظر کرد. همچنین بدلیل ماهیت پرش هیدرولیکی و تلاطم زیاد آن از اثرات لزجت و در نتیجه عدد رینولدز صرفنظر می‌شود. بنابراین رابطه فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

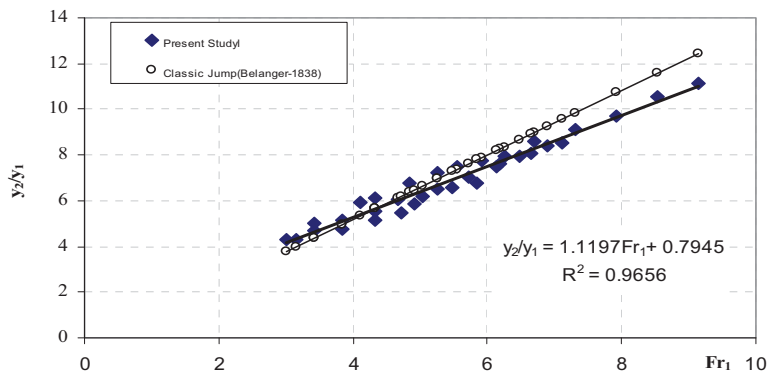
$$\frac{L_j}{y_1} \text{ یا } \frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{s}{y_1}) \quad (9)$$

### نتایج

#### نسبت اعماق مزدوج<sup>۱</sup>

مقادیر آزمایشگاهی عمق  $y_2$  به ازاء بستر زبر برای اعداد فرود مختلف و مقایسه آن با نسبت اعماق متناظر در پرش هیدرولیکی کلاسیک در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است در اعداد فرود پائین نسبت اعماق مزدوج تغییر محسوسی از خود نشان نداده است. در اعداد فرود بالا این مقدار کاهش می‌یابد. در تمامی آزمایش‌ها، پرش تشکیل شده، پرش نوع B بود که در پله‌های معکوس اتفاق می‌افتد، با این تفاوت که در اعداد فرود بالا اندکی از عمق ثانویه آن در اثر وجود زبری‌ها در کف





شکل ۵- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بستر زبر و صاف به ازای عدد فرود اولیه



شکل ۶- نمونه‌ای از پرش موجی تشکیل شده

کاهش این نسبت، قابل ملاحظه است. این بدان معناست که در تمامی آزمایش‌ها طول پرش نسبت به بستر صاف کاهش یافته است بدون آنکه زبری‌های کف در معرض مستقیم با جت آب قرار گرفته باشند.

مطابق رابطه (۹) مقدار  $L_j / y_1$  تابعی از  $Fr_1$  و  $s / y_1$  می‌باشد. بر این اساس برای بدست آوردن رابطه‌ای منطقی بین این پارامترها از روشهای آماری و آنالیز داده‌ها استفاده کرده که در نهایت رابطه زیر بدست آمد:

$$L_j / y_1 = 6.672Fr_1 - 9.998 \frac{s}{y_1} + 1.948 \quad (11)$$

شکل ۹ مقادیر محاسبه شده از رابطه (۱۱) را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را با خطای متوسط  $\pm 10\%$  درصد نشان می‌دهد.

با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مشخص گردید که طول پرش هیدرولیکی در مطالعه حاضر نسبت به پرش کلاسیک  $36/5\%$  درصد و نسبت به پرش در پله معکوس با لبه مدور  $53/14\%$  درصد کاهش نشان می‌دهد. پارامتر کاهش طول پرش را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد:

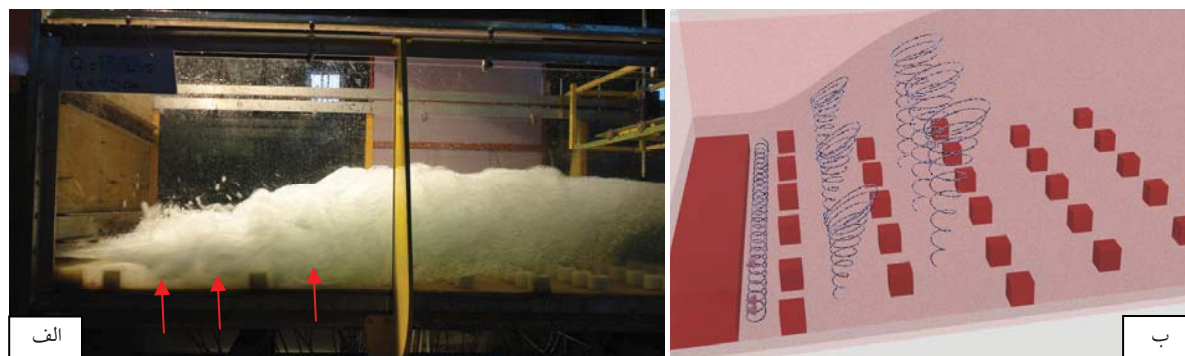
$$D_{L_j} = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \quad (10)$$

در این رابطه،  $L_j^*$  طول پرش بر بستر صاف و  $L_j$  طول پرش بر بستر زبر می‌باشد. این کاهش طول در پرش هیدرولیکی بدلیل وجود زبری‌ها در بستر و افزایش تنشهای رینولدزی است که باعث می‌شود جریان در طول بسیار کوتاهی نسبت به حالت کلاسیک (بستر صاف) به عمق ثانویه خود برسد، شکل ۷. در نتیجه طول پرش کوتاهتر شده و انرژی آن در مسیر کوتاهتری مستهلک می‌گردد. همانگونه که از شکل ۸ نیز مشخص است با افزایش عدد فرود

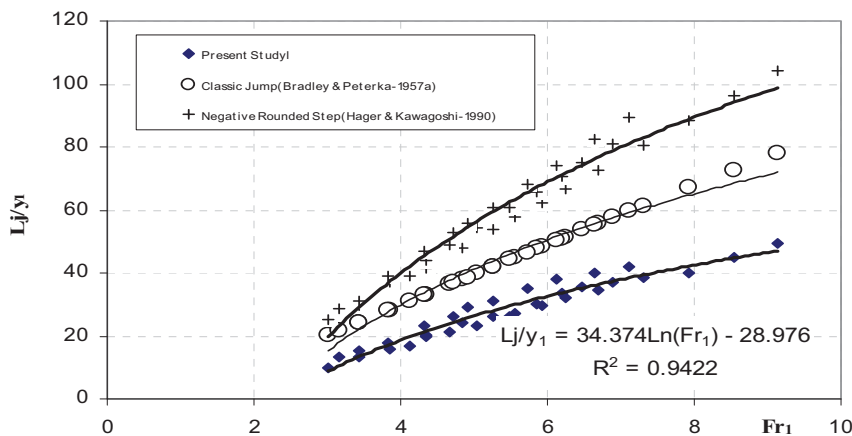
جدول ۲- تعدادی از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده

No	Experimental	Q(L/s)	$y_1$ (cm)	$Fr_1$	Re	$y_2$ (cm)	Lj(cm)	Jump Type	Roller type
۱	A1	۵۶	۳/۵	۳/۴۳	۶۴۷۱۳	۱۷	۴۶	B-jump	ND
۲	A2	۶۸	۳/۵	۴/۱۲	۷۷۶۹۰	۲۰	۵۹	B-jump	ND
۳	A3	۷۱	۳/۵	۴/۳۴	۸۱۷۵۹	۲۱	۷۱	B-jump	ND
۴	A4	۸۰	۳/۵	۴/۸۳	۹۱۱۴۹	۲۴	۸۴	B-jump	ND
۵	A5	۸۶	۳/۵	۵/۲۶	۹۹۱۲۶	۲۵	۹۲	B-jump	ND
۶	A6	۹۱	۳/۵	۵/۵۵	۱۰۴۷۴۷	۲۶	۹۵	B-jump	ND
۷	A7	۹۷	۳/۵	۵/۹۱	۱۱۱۵۴۰	۲۷	۱۰۴	B-jump	ND
۸	A8	۱۰۳	۳/۵	۶/۲۵	۱۱۷۸۳۹	۲۸	۱۱۲	B-jump	ND
۹	A9	۱۱۰	۳/۵	۶/۷	۱۲۶۲۸۷	۳۰	۱۲۰	B-jump	ND
۱۰	A10	۱۲۰	۳/۵	۷/۳۱	۱۳۷۹۳۱	۳۲	۱۳۴	B-jump	ND
۱۱	A11	۱۳۰	۳/۵	۷/۹۲	۱۴۹۴۲۵	۳۴	۱۴۰	B-jump	ND
۱۲	A12	۱۴۰	۳/۵	۸/۵۳	۱۶۰۹۲۰	۳۷	۱۵۸	B-jump	ND
۱۳	A13	۱۵۰	۳/۵	۹/۱۴	۱۷۳۴۱۴	۳۹	۱۷۲	B-jump	ND
۱۴	B1	۷۲	۴/۵	۳/۰۱	۸۰۸۶۵	۱۹	۴۵	B-jump	ND
۱۵	B2	۸۲	۴/۵	۳/۴۳	۹۲۱۳۵	۲۱	۶۸	B-jump	ND
۱۶	B3	۹۲	۴/۵	۳/۸۴	۱۰۳۲۲۵	۲۳	۷۲	B-jump	ND
۱۷	B4	۱۰۴	۴/۵	۴/۳۴	۱۱۶۵۰۶	۲۵	۹۰	B-jump	ND
۱۸	B5	۱۱۲	۴/۵	۴/۶۷	۱۲۵۴۶۱	۲۷	۹۵	B-jump	ND
۱۹	B6	۱۲۱	۴/۵	۵/۰۴	۱۳۵۵۰۶	۲۸	۱۰۴	B-jump	ND
۲۰	B7	۱۳۱	۴/۵	۵/۴۹	۱۴۷۵۰۶	۳۰	۱۱۷	B-jump	ND
۲۱	B8	۱۴۰	۴/۵	۵/۸۵	۱۵۷۳۰۳	۳۱	۱۳۵	B-jump	ND
۲۲	B9	۱۴۸	۴/۵	۶/۱۹	۱۶۶۲۹۲	۳۴	۱۵۱	B-jump	ND
۲۳	B10	۱۵۵	۴/۵	۶/۴۸	۱۷۴۱۵۷	۳۶	۱۶۰	B-jump	ND
۲۴	B11	۱۶۵	۴/۵	۶/۹۰	۱۸۵۳۹۳	۳۸	۱۶۶	B-jump	ND
۲۵	C1	۱۰۲	۵/۵	۳/۱۶	۱۱۲۰۹۹	۲۴	۷۲	B-jump	D
۲۶	C2	۱۲۴	۵/۵	۳/۸۴	۱۳۶۳۳۰	۲۶	۹۹	B-jump	D
۲۷	C3	۱۴۰	۵/۵	۴/۳۳	۱۵۳۷۶۹	۲۸	۱۲۷	B-jump	D
۲۸	C4	۱۵۳	۵/۵	۴/۷۳	۱۶۷۹۱۲	۳۰	۱۴۳	B-jump	D
۲۹	C5	۱۵۹	۵/۵	۴/۹۱	۱۷۴۵۰۵	۳۲	۱۶۰	B-jump	D
۳۰	C6	۱۷۰	۵/۵	۵/۲۶	۱۸۶۸۱۳	۳۶	۱۷۱	B-jump	D
۳۱	C7	۱۸۵	۵/۵	۵/۷۲	۲۰۳۲۹۷	۳۹	۱۹۳	B-jump	D
۳۲	C8	۱۹۸	۵/۵	۶/۱۳	۲۱۷۵۸۲	۴۱	۲۰۹	B-jump	D
۳۳	C9	۲۱۵	۵/۵	۶/۶۵	۲۳۶۲۶۴	۴۴	۲۲۰	B-jump	D
۳۴	C10	۲۳۰	۵/۵	۷/۱۲	۲۵۲۷۴۷	۴۷	۲۳۱	B-jump	D

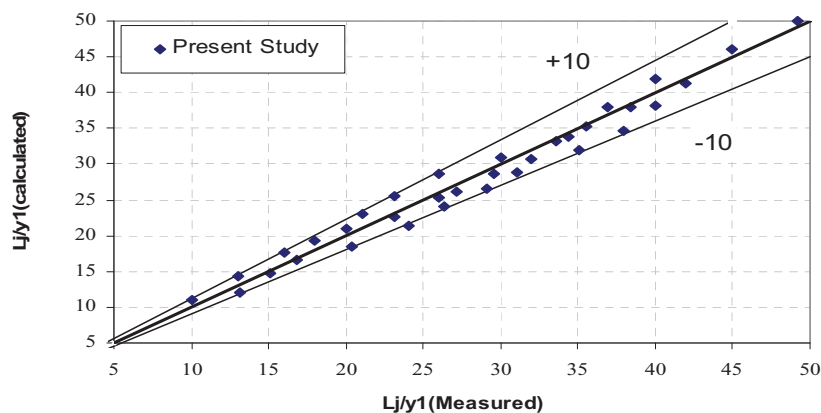
یادآوری: Q دبی؛  $y_1$  عمق اولیه پرش؛  $Fr_1$  عدد فرود؛ Re عدد رینولدز؛  $y_2$  عمق مزدوج؛ Lj طول پرش  
 پرش هیدرولیکی توسعه نیافته: ND؛ پرش هیدرولیکی توسعه یافته: D



شکل ۷- (الف) عکس و (ب) شماتیک تشکیل گردابه‌های مستقل افقی و عمودی (ترسیم توسط مشاهدات آزمایشگاهی و با استفاده از نرم افزار 3ds.max) تشکیل شده بین زیری‌ها در پرش هیدرولیکی



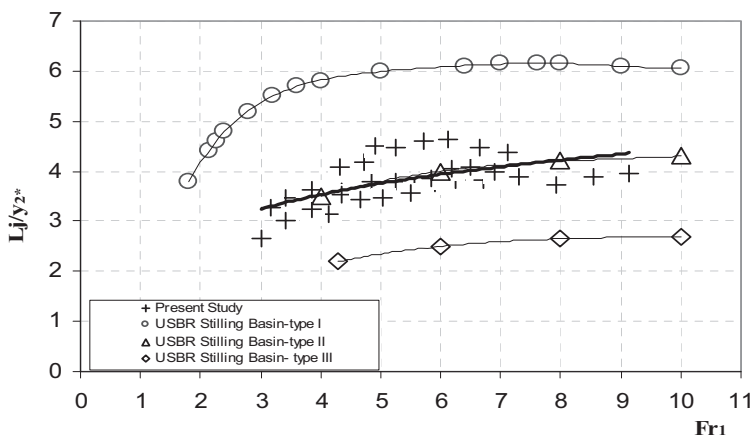
شکل ۸- تغییرات طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود اولیه



شکل ۹- مقادیر محاسباتی طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی (m) بر اساس رابطه (۱۱) و مقادیر اندازه‌گیری شده (p)

USBR شکل ۱۰ ترسیم گردید. در این شکل نشان داده شده است که حوضچه آرامش با بستر زبر مورد مطالعه در این تحقیق، تقریباً مشابه حوضچه USBR-Type II می‌باشد.

طول بی‌بعد پرش بصورت  $L_j / y_2$  نیز نشان داده می‌شود که این نسبت معمولاً تابعی از  $Fr_1$  در نظر گرفته می‌شود. از اینرو به منظور نشان دادن این پارامتر و مقایسه آن با حوضچه‌های آرامش استاندارد



شکل ۱۰- مقایسه طول پرش در حوضچه آرامش با بستر زبر با حوضچه‌های استاندارد USBR، ( $y_2^*$  عمق مزدوج در پرش کلاسیک متناظر می‌باشد که توسط رابطه بلانگر بدست می‌آید)



## نتیجه گیری

آرامش به نصف مقدار آن در حالت بدون زبری کف. کاهش طول پرش مربوط به گردابه افقی تشکیل شده بین پله و اولین ردیف زبری، همچنین گردابه‌های عمودی تشکیل شده بین سایر زبری‌ها است. رابطه‌ای نیز برای تخمین طول پرش هیدرولیکی در این نوع حوضچه بدست آمد.

## تشکر و قدردانی

بخشی از هزینه‌های این تحقیق توسط دفتر تحقیقات سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان تامین شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

در این تحقیق تاثیر زبری‌های مصنوعی منقطع بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بر پله‌های معکوس مورد بررسی قرار گرفت، که خلاصه نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

در اعداد فرود کمتر از ۳، پرش موجی Wz تشکیل گردید. اعماق اندازه‌گیری شده نشان داد که مقدار کاهش آن نسبت به پرش کلاسیک ناچیز است؛ با این تفاوت که عمق اولیه پرش در طول بسیار کوتاهتری نسبت به پرش کلاسیک به عمق  $1/2$  خواهد رسید. طول پرش هیدرولیکی در این روش نسبت به پله معکوس بدون زبری حدود ۵۳ درصد کاهش نشان داد و این یعنی کاهش طول حوضچه

## منابع

- ۱- اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. ۱۳۷۹. پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی. نشریه استقلال ۲: ۹۷-۱۱۰.
- ۲- ایزدجو ف.، شفاعی بجستان م. و بینا م. ۱۳۸۳. مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجدار دوزنقه‌ای شکل. مجله علمی کشاورزی ۲۷: ۱۰۷-۱۲۲.
- ۳- الله‌دادی ک.، کاظمیان ا. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تاثیر ارتفاع زبری بر نسبت اعماق مزدوج و طول غلطابی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه تبریز، ایران.
- ۴- آئین مهر م. و صالحی نیشابوری ع. ا. ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی بر روی پله با استفاده از PIV. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۱: ۸۷-۹۷.
- ۵- بدیع زادگان ر.، اسماعیلی ک.، فغفور مغربی م. و صناعی م. ۱۳۹۰. مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج دار. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۵: ۶۸۷-۶۷۶.
- ۶- شفاعی بجستان م. و نیسی ک. ۱۳۸۷. تاثیر شکل زبری بر طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی. مجله هیدرولیک، دوره ۳، شماره ۳: ۲۹-۴۰.
- ۷- عباسپور ا.، حسین زاده دلیر ع.، فرسادی زاده د. و صدرالدینی ع. ۱۳۸۸. تاثیر بستر موج دار سینوسی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله دانش آب و خاک ۱۹: ۲۶-۱۳.
- ۸- کاظمیان‌زاده ا. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تاثیر آرایش زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه تبریز، ایران.
- ۹- نژندعلی ع.، اسماعیلی ک.، فرهودی ج. و راور ز.، ۲۰۱۱. تاثیر زبری‌های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۵: ۲۳۴-۲۴۱.
- 10- Abbaspour A., Hosseinzadeh Dalir A., Farsadizadeh D. and Sadraddini A. A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-Environment Research 3(2):109-117.
- 11- Alhamid A. A. 1994. Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins. Transaction on Ecology and the Environment, Vol. 8:39-46.
- 12- Bradley J. N. and Peterka A. J. 1957a. The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on horizontal apron (Basin I). Proc. ASCE, J. Hydraulic Division 83(HY5), Paper No. 1401: 1-24.
- 13- Carolo F.G., Ferro V. and Pam Palone V. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. J. of Hydraulic Engineering ASCE 133(9): 989-999. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429 (2007) 133: 9(989).
- 14- Ead S. A., and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. Journal of hydraulic Engineering ASCE 128(7): 656-663. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429 (2002) 128:7 (656).
- 15- Forster J. W., and Skrinde R. A. 1950. Control of the Hydraulic Jump by Sills. Transactions ASCE, 115(2415):988-991.
- 16- Gill M. A. 1980. Effect of boundary roughness on hydraulic jump. Water Power and Dam construction: 22-24.

- 17- 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:1-9.
- 18- Hager W. H., and Kawagoshi N. 1990. Hydraulic jump at rounded drop. Journal of the Hydraulics Division: 443-470 .American Society of Civil Engineers.
- 19- Hager W. H., and Bremen R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths ratio. Journal of Hydraulic Research IAHR 27(5): 566-570.
- 20- Hager W. H., and Bretz N. V. 1987. Hydraulic jumps at positive and negative steps. Journal of Hydraulic Reasearch 24(4).
- 21- Hsu E. Y. 1950. Discussion of "control of the hydraulic jump by sills," by John W. Forster and Raymond A. Skrinde, Transactions, ASCE , Vol. 115, No. 2415: 988-991.
- 22- Hughes W. C., and Flack J. E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 110(12): 1755-1771.
- 23- Moore W. L., and Morgan.C.W. 1852. Hydraulic jump at an abrupt drop. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers.
- 24- 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.
- 25- Nasr Esfahani M.J and Shafai Bajestan M. 2012. Dynamic force measurement of roughened bed B-jump at an abrupt drop, Archives Des Science Journal, Vol. 65, n.
- 26- Pagliara S., Lotti I., and Palermo M. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structure. Journal of Hydro-Environment Research: 29-38.
- 27- Peterka A. J. 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering Monograph 25. US Bureau of Reclamation: Denver, Col.
- 28- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. Transactions of the Engineering Institute of Canada, 11(A-2): 1-8.
- 29- Sharp J. 1974. Observation on hydraulic jumps at rounded step. Journal of the Hydraulics Division 100( HY6).
- 30- Tokyay N. D. 2005. Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps. Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI, 15-19 May, Anchorage, Alaska, USA.

## Hydraulic Jump Characteristics at an Abrupt Drop under Influence of Artificial Roughness

M. J. Nasr Esfahani<sup>1\*</sup>- M. Shafai Bajestan<sup>2</sup>

Received:02-25-2012

Accepted 05-24-2012

### Abstract

Abrupt drop is a sudden lowering of the channel bed which is done for reduction of hydraulic jump length and to ensure that the jump will not be shifted outside the basin for various flow conditions. This type of basin is used in irrigation and drainage networks as an effective measure for dissipation of kinetic energy. Since the roughened bed of basin also can reduce the stilling basin length, the use of both abrupt drop on bed and roughness can reduce the jump length even more. Therefore it is the main goal of this study to conduct experimental tests on a large scale model to see how the roughness can affect on jump characteristics. To reach such goal tests conducted on a flume of 80cm wide, 15m long and 60cm high. The flow discharge ranged from 56lit/sec to 230l/sec providing Froude number in the range of 2.5 to 9.0. The results of this study show that the jump length reduces to about 36% of classical jump length. In comparison with jump in smooth bed of abrupt drop, the amount of reduction reaches as high as 53%. The observation al results show that the location in which the jump starts, is almost constant in all tests and the sequent depth ratios have almost the same value as in classical jump.

**Keywords:** Hydraulic jump, Roughened Bed, Energy Dissipation, Stilling Basin, Abrupt Drop

---

1,2- PhD Student and Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Iran

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