

## مقایسه آزمایشگاهی مدل‌های پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف جریان

فاطمه یوسفی<sup>۱</sup>، جواد مظفری<sup>۲\*</sup>، سید اسدا... محسنی موحد<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

## چکیده

حوضچه آرامش نقش مهمی در اتلاف انرژی جریان خروجی سازه‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند. در این مطالعه ۵ مدل پرش هیدرولیکی که در شرایط آزمایشگاهی مشخص نتایج مناسبی را داده‌اند، با یکدیگر مقایسه شده است. ۳۲ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۱/۰۲-۹/۱۹ با سه زبری بستر و تحت سه شیب و حداقل جریان یافتن سه دبی متفاوت انجام گردید. بسترهای انتخاب شده عبارت از بستر فلزی، بستر با زبری ۱/۶ میلیمتر و بستر با زبری ۳/۶ میلیمتر می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل‌های بررسی شده، دارای خطا در تخمین طول پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف جریان می‌باشند. در جریان صاف هیدرولیکی کمترین خطا برای مدل پارسامهر و همکاران با ۱۶ درصد خطا می‌باشد. در جریان انتقالی هیدرولیکی تمام مدل‌ها دارای خطای بالایی می‌باشد اما در صورت نیاز، می‌توان از مدل محسنی موحد و همکاران با خطای ۵۳/۷ درصد استفاده کرد. در شرایط زبر هیدرولیکی نیز هیچکدام از مدل‌ها خطای پایینی ندارد ولی به‌رحال مدل موحد با خطای تقریبی ۵۷ درصد قابل استفاده‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، زبری بستر

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، تلفن: ۰۹۱۸۶۰۱۳۳۷۳، ایمیل: Shima\_20\_10\_67@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، تلفن: ۰۹۳۵۲۱۸۰۹۱۶، ایمیل: Javad\_370@yahoo.com (نویسنده مسوول)

<sup>۳</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، تلفن: ۰۹۱۸۸۶۱۴۹۲۷، ایمیل: Movahed244@yahoo.com

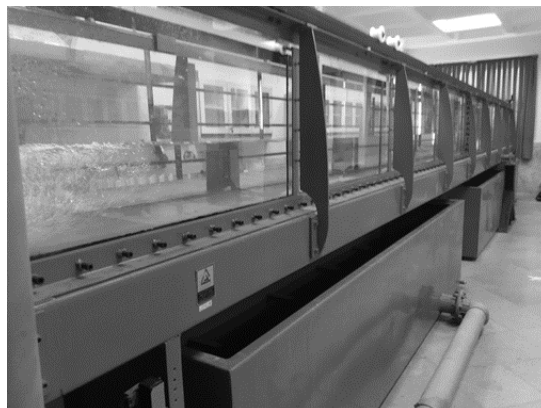
## مقدمه

تأثیر زبری‌های نیم‌دایره، ذوزنقه‌ای و تخت مثلثی پرداخت و به این نتیجه رسید که این زبری‌ها طول پرش هیدرولیکی را به ترتیب به اندازه ۱۰٪، ۱۱٪ و ۱۴٪ نسبت به بستر صاف کاهش می‌دهند. Riazi and Jafari (2014)، در تحقیقی تأثیر زبری بستر با شیب معکوس را روی مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کردند. آزمایش‌ها روی فلوم با ارتفاع ۰/۳ متر، عرض ۰/۴ متر و طول ۸ متر انجام شد. آزمایش‌ها در محدوده عدد فرود ۴/۵ - ۱۰/۹ و چند شیب متفاوت صورت گرفت. در پایان آن‌ها به این نتیجه رسیدند که طول پرش روی بستر زبر در مقایسه با بستر صاف کاهش یافت انرژی به میزان ۷٪ با افزایش شیب افزایش می‌یابد. تابه‌حال معادلاتی در زمینه‌ی طول پرش هیدرولیکی ارائه گردیده‌اند که از آن جمله می‌توان به محسنی موحد و همکاران (۱۳۹۳)، شکران و شفافی‌بجستان (۱۳۹۳)، پارسامهر و همکاران (۲۰۰۷)، Pagliara et al. (2008) و غیره اشاره نمود. هرکدام از این معادلات برای محدوده مشخصی از جریان و عدد رینولدز می‌باشند. هدف از این پژوهش بررسی کاربرد مدل‌های ارائه‌شده پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف جریان می‌باشد. به‌رحال برای مشخص شدن کاربرد این معادلات در محدوده‌های مختلف جریان و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نیاز به انجام تحقیقات بیشتری می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی با طول ۸ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۷ متر و در محدوده عدد فرود ۹/۱۹ - ۱/۰۲ و سه شیب ۰/۰۹، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۲۸ واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه اراک، انجام گردید. شکل ۱ تصویری از فلوم آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

پرش هیدرولیکی یک عامل مهم انرژی‌گیرنده در سازه‌های هیدرولیکی و از نوع جریان متغیر سریع می‌باشد، که با تغییر رژیم جریان از فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌یابد. این پدیده همراه با افزایش تلاطم و افت انرژی جنبشی فوق‌العاده در جریان می‌باشد و در پی آن با کاهش سرعت اولیه، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. طراحی حوضچه‌های آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. به‌عبارت‌دیگر مواقعی که یک پرش هیدرولیکی در روی یک سطح صاف افقی اتفاق می‌افتد، کوچک‌ترین تغییری در اعماق جریان بالادست و پایین‌دست آن می‌تواند باعث تغییر مکان پرش به یکی از دو سو گشته و چنانچه خواسته شود تا پرش در محلی خاص صورت پذیرد و حساسیت بیش‌ازحد آن در مقابل نوسانات عمق جریان، محدود گردد، می‌بایست از سازه‌هایی که به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی پرش هیدرولیکی مشهورند استفاده گردد. به همین جهت محققان در تلاش بوده‌اند تمهیداتی به عمل آورند که بتوانند عمق ثانویه و طول پرش را کاهش دهند تا ساخت حوضچه آرامش با صرفه اقتصادی همراه باشد. پرش هیدرولیکی کلاسیک، پرشی است که در یک کانال مستطیلی و عریض افقی با کف صاف تشکیل می‌گردد. میرزنده دل و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیق خود خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر طبیعی، با زبری‌های یکنواخت با قطر متوسط ۵/۳ و ۱۱ میلی‌متر در فلوم افقی مستطیلی به عرض ۳۰ سانتیمتر، طول ۱۱ متر، نرخ جریان از ۳ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه و اعداد فرود بین ۳ تا ۱۷/۷ انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که تنش برشی کف حوضچه در این حالت نسبت به حالت کلاسیک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد با استفاده از زبری بستر، طول پرش نسبت به حالت کلاسیک بین ۴۰ الی ۵۶ درصد کاهش می‌یابد. Ahmed et al. (2012) به بررسی



شکل (۱): تصویر فلوم آزمایشگاه

۳- رابطه Gundi and Yadav (2013) که به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال مستطیل شکل در محدوده عدد فرود  $1/3 - 2/3$  پرداختند.

$$\frac{L_j}{h_2} = -0.144Fr_1^2 + 1.782Fr_1 + 0.690 \quad (3)$$

که در این رابطه  $Fr_1$ ، عدد فرود اولیه،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی،  $h_2$  عمق ثانویه پرش می‌باشد.

۴- رابطه Pagliara et al. (2008) که به بررسی پرش هیدرولیکی بر بستر صاف و زبر با زبری‌های یکنواخت و غیریکنواخت در کانال‌های افقی پرداختند. آن‌ها طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی با بستر زبر را برای اعداد فرود  $2/2$  تا  $12$  برای هر دو حالت بستر زبر یکنواخت و غیریکنواخت به صورت زیر ارائه دادند:

$$\lambda_j = \frac{L_j}{y_1} = \frac{-5000}{Fr_1^{0.0086 \times e^{(-0.466/\square_{nu})}}} + 5000 \quad (4)$$

که در آن  $\square_{nu}$  پارامتر غیریکنواختی زبری،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی،  $y_1$  عمق قبل از پرش،  $Fr_1$  عدد فرود اولیه می‌باشد.

۵- رابطه Ead and Rajaratnam (2002) پرش هیدرولیکی را بر روی بستر موج آلومینیومی، برای اعداد فرود  $4$  تا  $10$  و سه زبری نسبی  $0/25$ ،  $0/43$  و  $0/5$  بررسی کردند. آن‌ها روابط زیر را به ترتیب برای محاسبه طول پرش در بستر زبر و صاف ارائه کردند:

$$L_{jR} = 1.74Fr_1 + 3.62 \quad (5)$$

که در این رابطه  $L_{jR}$  طول پرش هیدرولیکی در بستر زبر،  $y_1$  عمق قبل از پرش،  $Fr_1$  عدد فرود اولیه می‌باشد.

### مدل‌های پرش هیدرولیکی مورد بررسی

مدل‌های پرش هیدرولیکی که مورد بررسی قرار خواهند گرفت عبارتند از:

۱- رابطه محسنی موحد و همکاران (۱۳۹۳) که برای محاسبه طول پرش در بستر صاف و محدوده فرود  $4/6$  تا  $7/3$  ارائه شده است:

$$L_j = y_1 \left( 3.7 + 13.35 \tan \theta + \frac{3}{Fr_2^2} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی و  $Fr_2$  عدد فرود بعد از وقوع پرش و  $y_1$  عمق اولیه قبل از پرش هیدرولیکی و  $\tan \theta$  شیب کف فلوم می‌باشد. همچنین محدوده شیب کف از  $0$  تا  $0/003$  در نظر گرفته شده است.

۲- رابطه پارسا مهر و همکاران (۱۳۹۱) که برای پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل و محدوده فرود  $3/4$  تا  $4/12$  ارائه شده است و به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{L_j}{y_1} = 4.5816Fr_1 + 1.0022 \quad (2)$$

که در این رابطه  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی و  $Fr_1$  عدد فرود قبل از وقوع پرش و  $y_1$  عمق اولیه قبل از پرش هیدرولیکی می‌باشد. همچنین محدوده عدد فرود در این تحقیق  $4/6$  تا  $7/3$  می‌باشد.

که در روابط فوق  $E_i$ ، درصد خطا،  $L_0$ ، طول پرش مشاهداتی از طریق آزمایش‌ها،  $L_p$ ، طول پرش محاسباتی از طریق هر کدام از مدل‌ها،  $ME$ ، خطای میانگین و  $n$  تعداد آزمایش‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری طول پرش و قرارداد پارامترها در مدل‌های مذکور، طول پرش محاسباتی و طول پرش مشاهداتی با یکدیگر مقایسه و میانگین درصد خطای هر مدل محاسبه گردیده است. جدول ۱ درصد خطای هر مدل را نشان می‌دهد.

**تحلیل خطاها**  
به‌منظور برآورد خطای حاصل از مدل‌ها، از تحلیل خطا استفاده می‌گردد. این کار به روش میانگین خطای مدل صورت می‌گیرد. در این روش ابتدا درصد خطا محاسبه شده، سپس میانگین درصد خطا به‌عنوان میانگین خطای مدل مورداستفاده قرار می‌گیرد به‌صورت ذیل:

$$E_i = \frac{L_0 - L_p}{L_0} * 100 \quad (7)$$

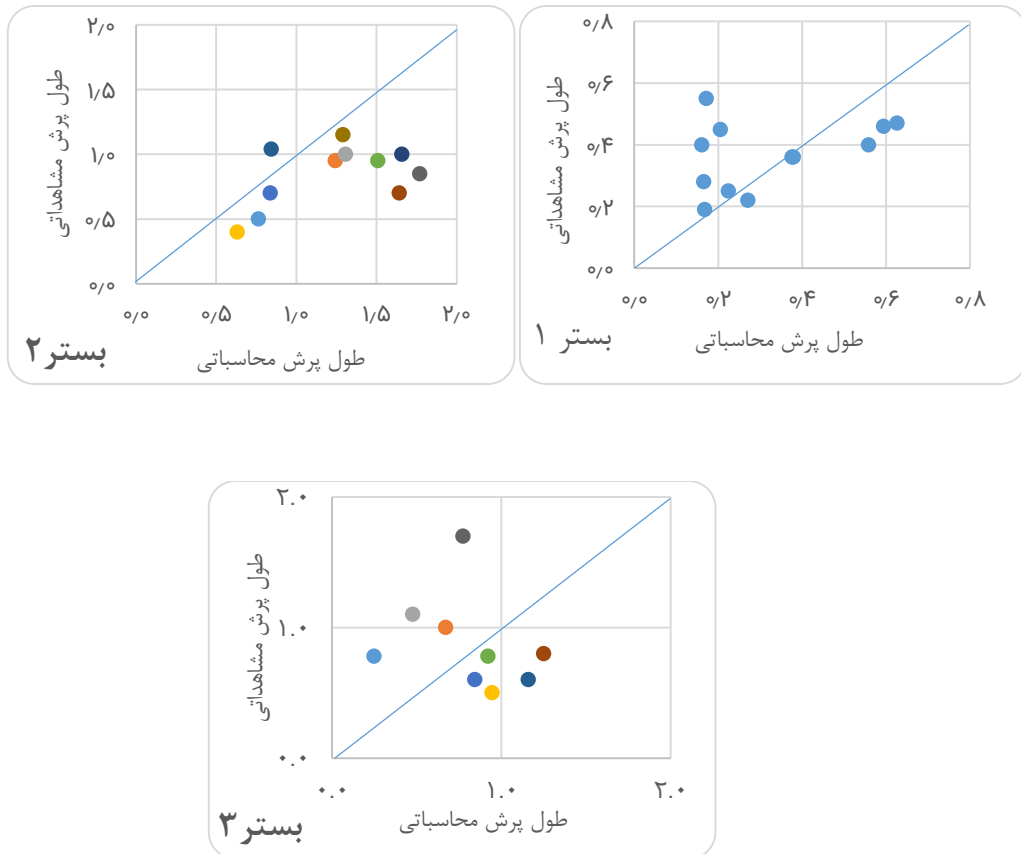
$$ME = \frac{1}{n} \sum |E_i| \quad (8)$$

جدول (۱): میانگین درصد خطای مدل‌ها

مدل‌ها	بستر صاف : $2Re^*$	بستر با زبری mm $1/6$ : $28Re^*$	بستر با زبری mm $3/6$ : $76Re^*$
محسنی موحد	۳۲	۵۳/۷	۵۷
پارسامهر	۱۶	۷۱/۱	۷۱/۳
گاندی و یاداو	۱۳/۸	۷۶/۹	۶۸/۴۵
پاگلیرا	۶۸	۶۹	۸۵
اید و راجاراتنام	۲۵	۶۳/۹	۶۱/۹

انتقالی هیدرولیکی می‌باشد. در این بستر، مقادیر محاسباتی بیشتر از مشاهداتی می‌باشد و با خطای ۵۳/۷ درصدی تمایل به سمت مقادیر محاسباتی است. در بستر سه با  $Re^*$  برابر با ۷۶، جریان در محدوده زیر هیدرولیکی است و با افزایش زبری بستر به میزان ۳/۶ میلی‌متر و با خطای ۵۷ درصد، روند خاصی در نسبت مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مشاهده نمی‌شود.

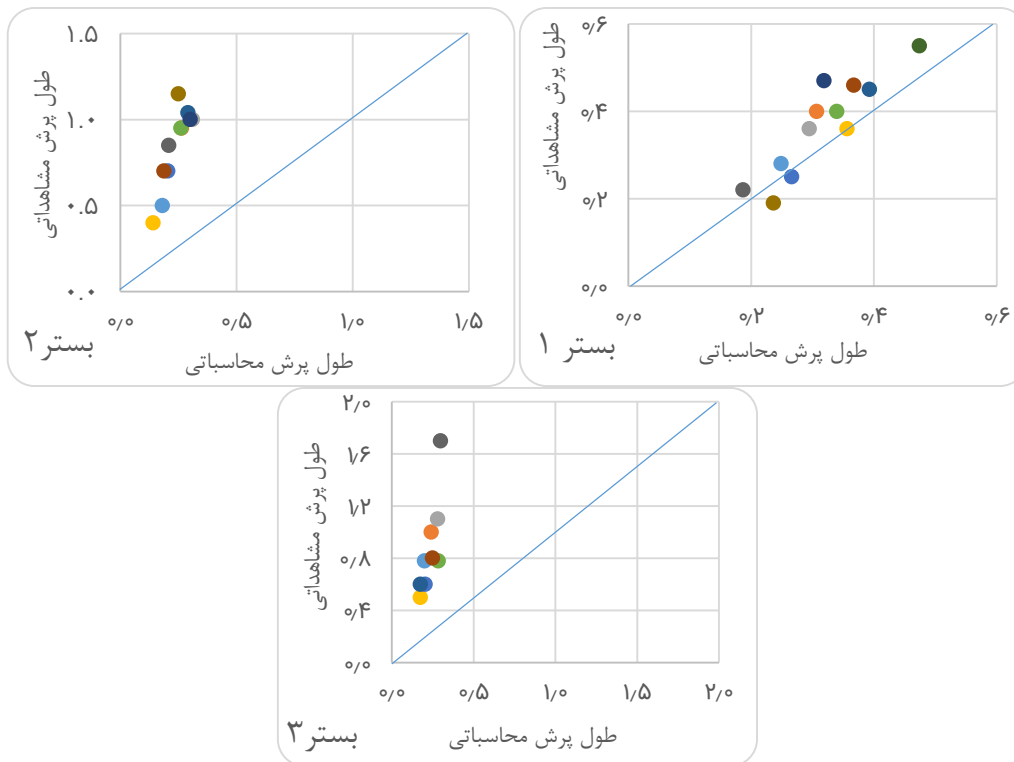
شکل ۲ نتایج آزمایش‌ها را برای مدل محسنی موحد و همکاران نشان می‌دهد. در بستر یک مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با میزان خطای ۳۲ درصدی تقریباً به هم نزدیک می‌باشند. همچنین با توجه به مقدار  $Re^*$  برابر با دو در این بستر، جریان صاف هیدرولیکی می‌باشد. در بستر دو با افزایش زبری بستر به میزان ۱/۶ میلی‌متر و  $Re^*$  برابر با ۲۸، جریان در محدوده جریان



شکل (۲): مقایسه طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها و طول پرش محاسباتی از طریق مدل محسنی موحد و همکاران

شکل ۳ طول پرش محاسباتی از مدل پارسامهر و همکاران و طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۲ به نظر می‌رسد تأثیر زبری بستر در این مدل دارای روند مشخصی نمی‌باشد و این مدل در جریان انتقالی و زبر هیدرولیکی کارآیی پایین، اما در جریان صاف هیدرولیکی کارآیی مناسب‌تری داراست.



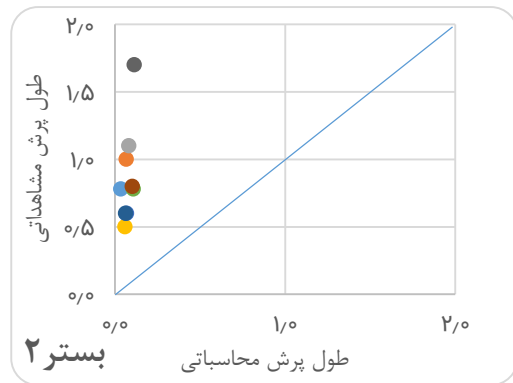
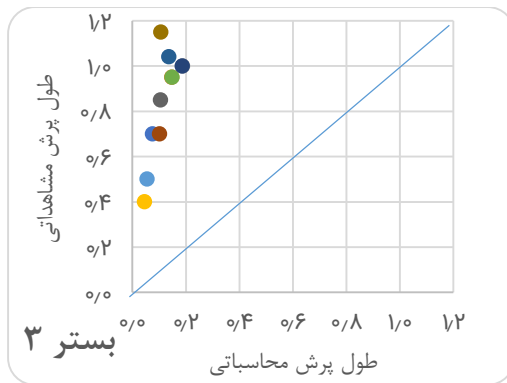
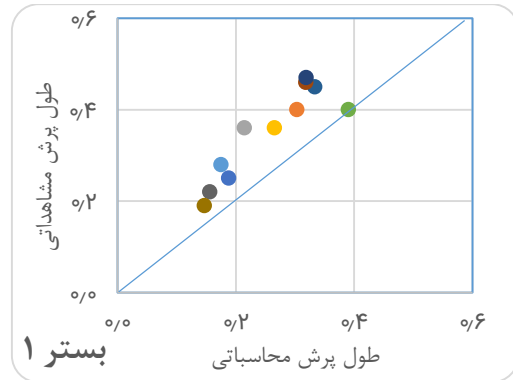
شکل (۳): مقایسه طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها و طول پرش محاسباتی از طریق مدل پارسا مهر

شکل ۴ طول پرش محاسباتی از مدل گاندی و یاداو و طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد. مشخص است که در بستر یک (بستر صاف)، با  $Re^*$  برابر با دو که در محدوده جریان صاف قرار می‌گیرد، مقادیر طول پرش مشاهده‌ای نسبت به محاسباتی بیشتر است و خطای مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌ای تقریباً ۱۳/۸ درصد می‌باشد. در بستر دو نیز با افزایش زبری و  $Re^*$  برابر با ۲۸ که در محدوده جریان بینابینی قرار می‌گیرد، مقادیر طول پرش مشاهده‌ای بیشتر از مقادیر محاسباتی بوده و بر طبق شکل ۴ این تمایل به سمت طول مشاهده‌ای بوده و نسبت به بستر یک بیشتر شده است. در بستر سه نیز روند تمایل به سمت طول‌های زبری‌های بیشتر می‌باشد و این تمایل نسبت به بستر یک بیشتر و نسبت به بستر دو کاهش یافته است و خطای مدل با زبرتر شدن بستر از ۷۶/۹ به ۶۸/۴۵ درصد رسیده است. همچنین در این بستر  $Re^*$  برابر با ۷۶ می‌باشد که در محدوده جریان زبر هیدرولیکی

همان‌طور که مشخص است در بستر یک (بستر صاف) که با  $Re^*$  برابر با دو در محدوده جریان صاف هیدرولیکی می‌باشد، مقادیر طول پرش مشاهده‌ای نسبت به محاسباتی بیشتر است و خطای مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌ای تقریباً ۱۶ درصد می‌باشد. در بستر دو نیز با افزایش زبری،  $Re^*$  برابر با ۲۸ و جریان انتقالی می‌باشد. در این بستر خطا برابر با ۷۱/۱ درصد شده است و مقادیر طول پرش مشاهده‌ای بیشتر از مقادیر محاسباتی بوده و بر طبق شکل، این تمایل به سمت طول مشاهده‌ای بوده و نسبت به زبری بستر یک بیشتر شده است. در بستر سه نیز روند تمایل به سمت طول‌های مشاهده‌ای می‌باشد و این تمایل نسبت به زبری‌های بستر یک و دو همچنان افزایش یافته است و خطای مدل با زبرتر شدن بستر از ۷۱/۱ به ۷۱/۳ درصد رسیده است که البته میزان افزایش خطا در بستر سه با زبری ۳/۶ میلی‌متر نسبت به بستر دو با زبری ۱/۶ میلی‌متر قابل توجه نمی‌باشد. همچنین میزان  $Re^*$  در این بستر برابر با ۷۶ می‌باشد که در محدوده جریان زبر هیدرولیکی است.

را شاهد نمی‌باشد. به‌هرحال این مدل در جریان انتقالی و زیر هیدرولیکی کارایی پایینی دارد. هرچند این مدل در بستر صاف دارای کمترین خطا نسبت به دیگر مدل‌ها می‌باشد.

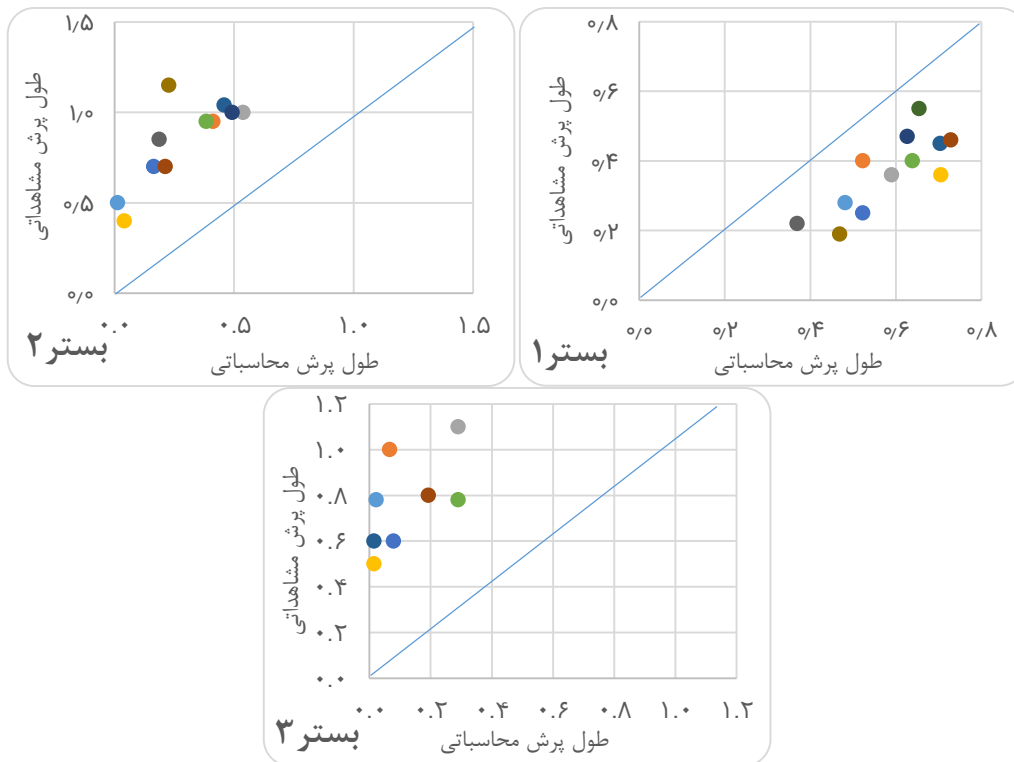
می‌باشد. با توجه به درصد خطای به‌دست‌آمده به نظر می‌رسد با افزایش زبری بستر و حرکت از جریان صاف هیدرولیکی به سمت جریان زبر هیدرولیکی، خطا افزایش یافته و تقریباً در محدوده مشخصی در حدود ۷۰ درصد رسیده و با افزایش زبری بیشتر تغییر زیادی



شکل (۴): مقایسه طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها و طول پرش محاسباتی از طریق مدل گاندی و یاداو

است، در بستر یک (بستر صاف) که با  $Re^*$  برابر با دو در محدوده جریان صاف هیدرولیکی قرار می‌گیرد، طول پرش محاسباتی بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد و خطای مقادیر محاسباتی نسبت به مشاهده‌ای ۶۸ درصد است.

شکل ۵ طول پرش محاسباتی از مدل پاگلیارا و همکاران و طول پرش مشاهده‌ای از طریق آزمایش‌ها را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص



شکل (۵): مقایسه طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها و طول پرش محاسباتی از طریق مدل پاکلیارا و همکاران

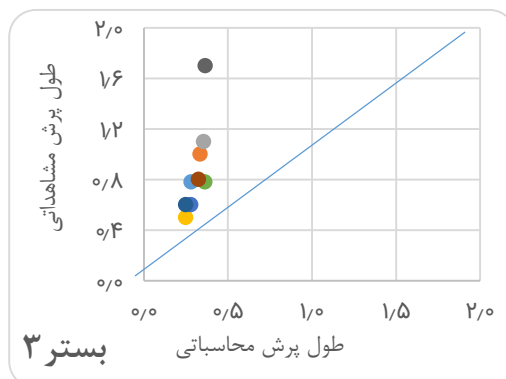
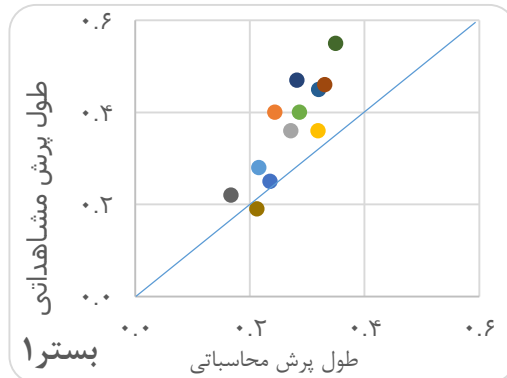
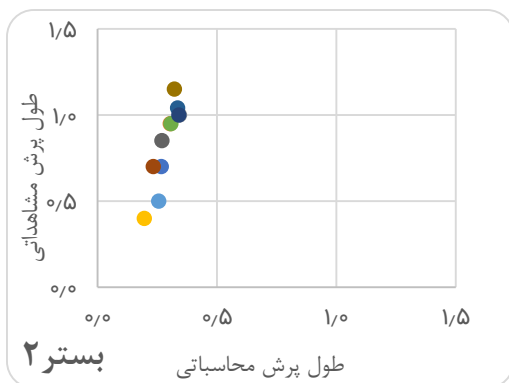
در محدوده جریان بینابینی قرار می‌گیرد، مقادیر طول پرش مشاهده‌ای بیشتر از مقادیر محاسباتی بوده و این تمایل به سمت طول مشاهده‌ای بوده و نسبت به بستر یک بیشتر شده است. درصد خطای بستر دو ۶۳/۹ درصد می‌باشد که افزایش پیدا کرده است. در بستر سه نیز روند تمایل به سمت طول‌های مشاهده‌ای می‌باشد و این تمایل نسبت به زبری‌های بستر یک بیشتر و نسبت به بستر دو کاهش یافته است و خطای مدل با زبرتر شدن بستر از ۶۳/۹ به ۶۱/۹ درصد رسیده است. همچنین با  $Re^*$  برابر با ۷۶ در محدوده جریان زبر هیدرولیکی قرار می‌گیرد. با توجه به درصد خطای به دست آمده به نظر می‌رسد با افزایش زبری خطا به حدود ۶۰ درصد رسیده است و در همین حدود بدون تغییر زیادی باقیمانده است. بنابراین با در نظرگیری و اضافه کردن ضریب زبری به مدل، می‌توان تاثیر افزایش زبری بر روی طول پرش هیدرولیکی را در نظر گرفت. این مدل در جریان انتقالی و زبر هیدرولیکی کارایی پایینی دارد. هرچند

در بستر دو با افزایش زبری و با  $Re^*$  برابر با ۲۸ که در محدوده جریان بینابینی قرار می‌گیرد، مقادیر طول‌های محاسباتی به مشاهده‌ای کمتر بوده و خطا به ۶۹ درصد افزایش می‌یابد. در بستر سه با افزایش زبری بستر به میزان ۳/۶ میلی‌متر و با  $Re^*$  برابر با ۷۶ که در محدوده جریان زبر هیدرولیکی قرار می‌گیرد، طول‌های پرش محاسباتی نسبت به مقادیر مشاهده‌ای بیشتر می‌باشد و خطا نیز به ۸۵ درصد افزایش می‌یابد. مدل مذکور در هر سه زبری و جریان بررسی شده کارایی مناسبی را از خود نشان نداده است.

شکل ۶ طول پرش محاسباتی از طریق مدل اید و راجاراتنام و طول پرش مشاهده‌ای از طریق آزمایش‌ها را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد. با توجه به شکل و جدول مذکور، مشخص است که در بستر یک (بستر صاف)، که با  $Re^*$  برابر با دو در محدوده جریان صاف هیدرولیکی قرار می‌گیرد، مقادیر طول پرش مشاهده‌ای نسبت به محاسباتی بیشتر است و خطای مدل نسبت به مقادیر مشاهده‌ای تقریباً ۲۵ درصد می‌باشد. در بستر دو نیز با افزایش زبری و با  $Re^*$  برابر با ۲۸ که



این مدل در بستر صاف هیدرولیکی تا حدی کاربرد خواهد داشت.



شکل ۶ مقایسه طول پرش مشاهده‌ای از آزمایش‌ها و طول پرش محاسباتی از طریق مدل اید و راجاراتنام

راجاراتنام و ت- موحد و همکاران قابل کاربرد می‌باشد. در جریان انتقالی هیدرولیکی تمام مدل‌ها دارای خطای بالایی می‌باشد اما در صورت نیاز، می‌توان از مدل محسنی موحد و همکاران با خطای ۵۳/۷ درصد استفاده کرد. در شرایط زبر هیدرولیکی نیز هیچکدام از مدل‌ها خطای پایینی ندارد ولی به-هرحال مدل محسنی موحد با خطای تقریبی ۵۷ درصد قابل استفاده‌تر می‌باشد. با توجه به اثر زبری کف در کاهش طول پرش هیدرولیکی و نهایتاً ایجاد خطای بیشتر در مدل‌ها، بایستی از پارامتر زبری کف در این مدل‌ها استفاده نمود.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه با مقایسه ۵ مدل آزمایشگاهی محاسبه طول پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف هیدرولیکی با یکدیگر مقایسه شدند. تعداد ۳۲ آزمایش در فلوم دانشکده فنی تحت سه شیب بستر و جریان یافتن حداقل سه دبی متفاوت انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نمایانگر آن است که هر ۵ مدل دارای خطا در محاسبه طول پرش هیدرولیکی در شرایط این آزمایش‌ها می‌باشند. همچنین در جریان صاف هیدرولیکی مدل‌های الف-پارسامهر و همکاران، ب- گاندی و یاداو، پ- اید و

## منابع

- پارسامهر، پ.، ع. حسین زاده دلیر، د. فرسادی زاده و ا. عباسپور. ۱۳۹۱. پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۳، ص ۷۷۵-۷۸۵.
- شکریان، م. و م. شفافی بجستان. ۱۳۹۳. اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر خصوصیات پرش نوع B. مجله علمی پژوهشی دانش آب و خاک. دوره ۲۴، شماره ۲، ص ۲۱۵-۲۲۶.
- محسنی موحد، ا.، م. اکبری، د. داوود مقامی و ج. مظفری. ۱۳۹۳. تعیین رابطه‌ای برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی بر مبنای آنالیز ابعادی و آزمایش‌های مدل فیزیکی. همایش کشاورزی و منابع طبیعی پایدار. تهران.
- میرزنده، د.، م. فغفور مغربی و س. خدائشناس. ۱۳۹۱. بررسی مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر درشت دانه پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد.
- Ahmed, A., M. Gendy, A. Mirdan, A. Mohamed Ali and F. Abdelhaleem. 2014. Effect of corrugated beds on characteristics of submerged hydraulic jump. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4):1033-1042.
- Ead, S. A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 128:656-663.
- Gandhi, S. and V. Yadav. 2013. Characteristics of supercritical flow in rectangular channel. *International Journal of Physical Sciences* 8(40):1934-43.
- Pagliara, S., I. Lotti and M. Palermo. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro-environment Research*. 30:2(1):29-38.
- Riazi, R. and S. Jafari. 2014. The characteristics of submerged hydraulic jump in sloped stilling basins with rough bed. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*. 3(6): 238-243.

## Laboratory comparison of hydraulic jump models in different flow regimes

<sup>1</sup> Fatemeh Yousefi , Javad Mozaffari\*<sup>۲</sup>, Seyed Asadolah Mohseni Movahed<sup>۳</sup>

### Abstract

Stilling basin plays an important role in the energy dissipation of hydraulic structures. In this study, five hydraulic jump models that have shown good results in certain laboratory conditions, are compared. 32 tests in Froude numbers ranging from 1.02-9.19 with three roughness and three slopes and minimum three discharges are done. Selected beds include a smooth bed, a bed with 1.6 mm roughness and bed with a roughness of 3.6 mm. The results showed that reviewed models have errors in hydraulic jump length prediction at different flow regimes. In hydraulically smooth flow, minimum error is 16 percent for the Parsamehr et al model. All models have high error in hydraulically transitional flow but if needed, can be used the model of Mohseni movahhed et al. with an error 53.7 percent. In hydraulically rough flow rough, none of the models have low error but mohseni movahed model with 57 percent error is more usable.

**Keywords:** Hydraulic jump, stilling basin, Bed roughness.

<sup>1</sup> MSc student, Water Sciences & engineering department, Arak University, E-mail: Shima\_20\_10\_67@yahoo.com

<sup>2</sup> Assistant professor, Water Sciences & engineering, Arak University, E-mail: Javad\_370@yahoo.com (corresponding author)

<sup>3</sup> Assistant professor, Water Sciences & engineering, Arak University, E-mail: Movahed244@yahoo.com