

## اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر خصوصیات پرش نوع B

منوچهر شکریان\*<sup>۱</sup> و محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۰۶

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.shokrian65@gmail.com

### چکیده

سازه تندآب سنگی و گابیونی در مجاری طبیعی و مصنوعی کاربرد زیادی دارد و میزان انرژی جنبشی اضافی در پایین‌دست این سازه توسط پرش هیدرولیکی مستهلک می‌گردد. یکی از انواع پرش هیدرولیکی در پایین‌دست تندآب‌ها، پرش نوع B است که ابتدای آن در کانال بالادست با شیب مثبت و انتهای طول غلتابی در کانال پایین‌دست با کف افقی قرار می‌گیرد. تعیین مشخصات پرش از جمله نسبت عمق‌های مزدوج، طول پرش و طول غلتابی بر روی تندآب با بستر زبر به طراحی مناسب و اقتصادی دیواره‌ها و طول حوضچه آرامش پایین‌دست کمک خواهد کرد. در این مقاله ابتدا با استفاده از تئوری باکینگهام و نظریه خود تشابهی ناقص رابطه‌ای کلی جهت برآورد نسبت عمق‌های مزدوج بر روی بستر زبر بدست آمد. همچنین روابطی کلی برای برآورد طول پرش و طول غلتابی استخراج شد. آزمایش‌ها در محدوده وسیعی از زبری نسبی (نسبت ارتفاع زبری به عمق بحرانی)، دبی و عدد فرود انجام شد. نتایج نشان داد که زبری نسبی می‌تواند تا حدود زیادی نسبت عمق‌های مزدوج، طول پرش و طول غلتابی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: پرش نوع B، پرش هیدرولیکی، تندآب، زبری، عمق ثانویه

## Effect of the chute bed roughness height on the B-jump characteristics

M Shokrian<sup>1\*</sup> and M Shafai Bajestan<sup>2</sup>

Received: 21 May 2012 Accepted: 28 September 2013

<sup>1</sup>M.Sc. Student., Dept. of Water Structure., Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz.Iran

<sup>2</sup>Prof., Dept. of Water Structure., Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz.Iran

\* Corresponding Author Email: m.shokrian65@gmail.com

### Abstract

Rock and gabion types of chute structures are used in many natural and artificial channels. The excess kinetic energy downstream of this structure is dissipated through hydraulic Jump. One type of the hydraulic jump is the B-jump. A B-jump is defined as the jump having the toe section located on a positively sloping upstream channel and the roller length end on a downstream horizontal channel. Determination of hydraulic jump characteristics such as the sequent depth ratio, jump length and roller length which occur at the roughened bed chute can help to design a safe and economic stilling basin. In this study, to estimate sequent depth ratio on the rough bed, using Buckingham theorem and incomplete self similarity theory a general non-dimensional relation was developed. Also general equations were developed for estimating jump and roller lengths. Then tests were conducted for a wide range of relative roughness, flow discharge and Froude numbers. The results showed that relative roughness could reduce the sequent depth ratio, jump length and roller length.

**Keywords:** B-Jump, Chute, Hydraulic jump, Roughness, Sequent depth

### مقدمه

پایین دست این گونه سازه‌ها انرژی جنبشی اضافی توسط پرش هیدرولیکی مستهلک می‌شود. نسبت عمق های مزدوج پرش هیدرولیکی از جمله مشخصات مهم پرش هستند که دانستن آنها برای طراحی حوضچه‌های آرامش ضروری است (کارلو و همکاران ۲۰۱۱). چنانچه عمق پایاب بیشتر از عمق مزدوج باشد معمولاً پرش به بالادست منتقل خواهد شد بدین معنی که پرش هیدرولیکی مستغرق بوده و بخشی از طول غلتابی آن روی تندآب و بخشی دیگر بر روی سطح افقی قرار می‌گیرد که پرش نوع B نامیده می‌شود (کیندزواتر ۱۹۴۴). درچنین شرایطی ضروری است تا دیواره‌های

تندآب‌ها از جمله متداول‌ترین ساختمان‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراهه های آبرفتی و سیستم های جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب می‌باشند. کاهش انرژی جنبشی بر روی تندآب‌ها توسط زبری قبل از آن که جریان به پایین دست منتقل شود، یکی از راه‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان از تخریب احتمالی خود سازه، سازه‌های پایین دست و نیز از هزینه‌های مازادی که به خاطر ایجاد سازه‌های حفاظتی مستحکم بر سازندگان سازه‌های هیدرولیکی تحمیل می‌شود جلوگیری به عمل آورد.

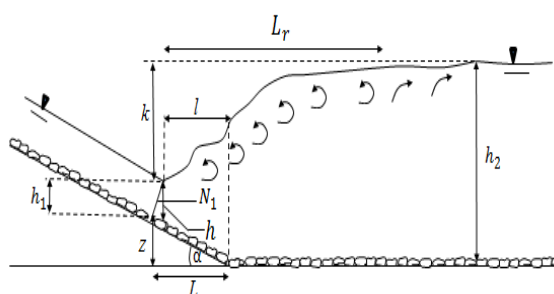
در شکل ۱،  $h_1$ ،  $N_1$  و  $h_2$  به ترتیب هد پیزومتریک، عمق عمود بر سطح شیب‌دار و عمق ثانویه پرش است.  $L_r$  معرف طول غلتابی و  $L$  فاصله افقی محل تشکیل پرش از ابتدای تندآب است. همچنین  $\alpha$  زاویه شیب کف تندآب با سطح افقی،  $l$  فاصله افقی بین محل عمق اولیه پرش و تقاطع سطح شیب‌دار و سطح افقی،  $z$  ارتفاع محل تشکیل پرش از کف کانال است. همچنین هاگر (۱۹۸۸) و کاواگوشی و هاگر (۱۹۹۰) طول غلتابی پرش نوع B را در یک شیب و بر روی بستر صاف مورد مطالعه قرار دادند. این معادله به دلیل اینکه در یک شیب استخراج شده است قابل کاربرد در شیب‌های دیگری نیست. آدام و همکاران (۱۹۹۳) مطالعات خود را در سه شیب  $۱۱/۳$ ،  $۱۴$  و  $۱۸/۴$  درجه و بر روی بستر صاف انجام دادند و رابطه زیر را ارائه کردند که مستقل از شیب است:

$$\frac{L_r}{H_L} = 42.67 \exp\left(-4.462 \frac{H_L}{H_1}\right) \quad [1]$$

در رابطه فوق  $H_1$  انرژی کل جریان در محل تشکیل پرش،  $H_L$  افت انرژی بین بالادست و پایین‌دست پرش ( $H_1 - H_2$ ) و  $H_2$  انرژی کل در پایین‌دست پرش می‌باشد. مشاهدات آدام و همکاران (۱۹۹۳) نشان داد که با افزایش انرژی بالادست، طول غلتابی افزایش پیدا می‌کند.

کارلو و همکاران (۲۰۱۲) طول غلتابی را در چهار شیب  $۸/۵$ ،  $۱۲$ ،  $۱۷/۵$  و  $۳۰$  درجه بر بستر صاف مورد مطالعه قرار دادند و رابطه ۲ را ارائه کردند که وابسته به شیب تندآب است:

تندآب به اندازه کافی مرتفع باشند تا جریان آب به خارج از تندآب هدایت نشده و باعث آبشستگی خاکریز-ها و در نهایت باعث تخریب سازه نشود. ضمن اینکه دانستن تراز سطح آب در طول پرش به منظور تعیین نیروهای وارده و طراحی سازه‌های دیوارها مورد نیاز می‌باشد. از طرفی تعیین نسبت عمق‌های مزدوج در پرش هیدرولیکی نوع B نیازمند آن است که موقعیت شروع پرش بر روی تندآب مشخص شود. به عبارتی برای کانال با هندسه و دبی مشخص، اگر یکی از عمق‌های مزدوج معلوم باشد، تعیین عمق دیگر تنها زمانی امکان‌پذیر است که موقعیت پرش بر روی تندآب نیز مشخص شود (کارلو و همکاران ۲۰۱۱). از این رو محققین به کمک معادلات تجربی روابطی را برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج استخراج کرده‌اند. پرش نوع B در عمل بیشتر از سایر پرش‌ها در سطح شیب‌دار تشکیل می‌شود (هاگر ۱۹۸۸، آدام و همکاران ۱۹۹۳). از این رو محققین (بردلی و پیترکا ۱۹۵۷، هاگر ۱۹۸۸، هاگر و برمن ۱۹۸۹، کاواگوشی و هاگر ۱۹۹۰، آتسو و یاسودا ۱۹۹۱، هاگر ۱۹۹۲، آدام و همکاران ۱۹۹۳، کارلو و همکاران ۲۰۱۱) به کمک معادلات تجربی روابطی را بین نسبت اعماق مزدوج و سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر روی بستر صاف استخراج کرده‌اند.



شکل ۱- نمایش پرش نوع B و متغیرهای آن بر روی بستر زبر.

$$\frac{L_r}{H_L} = \left[ 7.965 + 20.72 (\tan \alpha)^{0.39} \right] \left( \frac{H_L}{H_1} \right)^{-0.534} \exp\left( -\frac{H_L}{H_1} \frac{1}{0.168} \right) \quad \dots$$

$$\dots - \left[ 1 - \exp\left( -\frac{H_L}{H_1} \frac{1}{0.168} \right) \right] 4.124 \ln\left( \frac{H_L}{H_1} \right) \quad [2]$$

در این رابطه  $\alpha$  شیب تندآب و  $\tan$  معرف تانژانت می‌باشد. با توجه به اینکه تمامی مطالعات در این زمینه بر روی بستر صاف صورت گرفته است و نیز با توجه به تاثیر ارتفاع زبری بستر تندآب بر خصوصیات پرش (کارلو و همکاران ۲۰۰۷)، مطالعه حاضر صورت گرفته است. هدف اصلی این مقاله، بررسی اثر ارتفاع اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر خصوصیات کاربردی پرش B از جمله نسبت عمق‌های مزدوج، طول غلتایی و طول پرش و استخراج روابط کلی جهت محاسبه آنها بر روی بستر زبر است.

**مواد و روش‌ها**

استخراج رابطه کلی برای محاسبه نسبت عمق‌های مزدوج با توجه به شکل ۱ می‌توان پارامترهای موثر را بصورت زیر در نظر گرفت:

$$Y = f\left(M, \frac{k_s}{y_c}, N, \alpha\right) \quad [5]$$

با توجه به نظریه خود تشابهی<sup>۱</sup>، جهت یک پدیده فیزیکی، بعد از مشخص شدن  $n$  گروه بی‌بعد  $\Pi$  خواهیم داشت:

$$\Pi_1 = \psi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad [6]$$

یک پدیده فیزیکی برای یک گروه بی‌بعد مشخص و معین  $\Pi_n$  دارای شرایط خودتشابهی کامل است اگر  $\Pi_1$  مستقل از  $\Pi_n$  گردد. زمانی که  $\Pi_n$  به سمت صفر یابی‌نهایت میل می‌کند، اگر تابع  $\psi$  دارای مقداری مخالف با صفر و همچنین بی‌نهایت شود گوییم  $\Pi_n$  دارای شرط خودتشابهی کامل است (بارنبلت ۱۹۷۹، فرو ۲۰۰۶). اما اگر تابع  $\psi$  به سمت صفر یا بی‌نهایت میل کند، گوییم  $\Pi_n$  دارای شرط خود تشابهی ناقص<sup>۲</sup> است. در این حالت پدیده فیزیکی فوق را می‌توان توسط رابطه زیر بیان نمود:

بصورت زیر در نظر گرفت:

با توجه به شکل ۱ می‌توان پارامترهای موثر را بصورت زیر در نظر گرفت:

$$F(V, g, \rho, h_1, h_2, \mu, k, e, \alpha, k_s) = 0 \quad [3]$$

که در این رابطه  $V$  سرعت،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  جرم حجمی آب،  $\mu$  لزجت دینامیکی آب،  $k_s$  ارتفاع متوسط زبری،  $\alpha$  معرف شیب،  $y_c$  معرف عمق بحرانی و  $e = z + h_1$  می‌باشد. با استفاده از تئوری  $\Pi$  باکینگهام تحلیل ابعادی و انتخاب  $\rho$ ،  $V$  و  $h_1$  به عنوان پارامترهای تکراری رابطه بی بعد زیر حاصل می‌شود:

$$Y = f(\text{Re}, \text{Fr}_1, M, \frac{k_s}{y_c}, N, \alpha) \quad [4]$$

که در آن:

$$M = \frac{e}{h_1} = \frac{h_2 - k}{h_1}$$

$$N = \frac{k}{h_2} = 1 - \frac{z + h_1}{h_2}, \quad 0 < \frac{z + h_1}{h_2} \leq 1$$

مقدار پارامتر  $k$  در کمترین حالت صفر می‌باشد. در شیب بحرانی مقدار آن برابر صفر است و سطح آب را می‌توان افقی در نظر گرفت. در یک شیب ثابت بیشترین مقدار برای  $k$  زمانی اتفاق می‌افتد که پرش نوع A تشکیل گردد. یعنی پرش در پای تندآب شروع شود. پارامتر بی بعد  $M$  معرف موقعیت پرش بر روی سطح شیبدار است. مقدار حداقل آن برابر واحد است که در

<sup>1</sup> Self similarity theory

<sup>2</sup> Incomplete self similarity

دانه‌بندی یکنواخت بودند. نحوه قرار دادن زبری به این صورت بود که ابتدا زبری‌ها توسط چسب آهن بر روی کف پوش بصورت کاملاً تصادفی چسبانده شده و سپس بر روی تندآب و کف افقی به وسیله چسب آکواریوم تثبیت می‌شد. طولی از کف افقی که باید زبر می‌شد از طریق آزمایشات شاهد بر روی بستر صاف بدست می‌آمد. به این صورت که در هر شیب بیشترین طول پرش در سطح صاف مبنا قرار می‌گرفت. جهت تنظیم عمق پایاب به منظور تشکیل پرش از یک دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده شد. برای اندازه‌گیری سطح آب نیز از عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر که بر روی ریل‌های فلوم نصب شده بود استفاده گردید. به منظور انجام آزمایشات برای دبی‌های مختلف، در ابتدای آزمایش پرش به فاصله حدود ۱۰ الی ۲۰ سانتی‌متر پایین تر از تندآب تشکیل می‌شد و با بستن دریچه به آرامی پرش به روی تندآب منتقل می‌شد تا پرش‌های نوع B در موقعیت‌های مختلف تندآب قرار گیرد (شکل ۳). پس از تثبیت موقعیت پرش، نیمرخ سطح آب پرش و بخصوص عمق‌های مزدوج با دقت در چندین مرحله از آزمایش برداشت می‌گردید و متوسط اعداد اندازه‌گیری شده مبنای تحلیل داده‌ها قرار می‌گرفت. جهت اندازه‌گیری عمق‌های اولیه و ثانویه در بستر زبر، مبنا متوسط ارتفاع زبری‌ها در نظر گرفته می‌شد که بوسیله قرار دادن یک صفحه صاف بر روی زبری‌ها بدست آمد. جدول ۱ دامنه تغییرات پارامترهای بی‌بعد این مطالعه را نشان می‌دهد.

$$\Pi_1 = \Pi_n^\varepsilon \zeta (\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}) \quad [7]$$

که  $\zeta$  نماد تابع و  $\varepsilon$  ضریبی است که با توجه به آزمایشات بدست می‌آید (بارنبلت ۱۹۷۹، فرو ۲۰۰۶). با در نظر گرفتن شیب بحرانی به عنوان شرایط مرزی و با فرض شرط خود تشابهی ناقص رابطه ۵ نسبت به گروه بی‌بعد N می‌توان نوشت:

$$Y - M = m(M, \alpha, \frac{k_s}{y_c}) N^\varepsilon \quad [8]$$

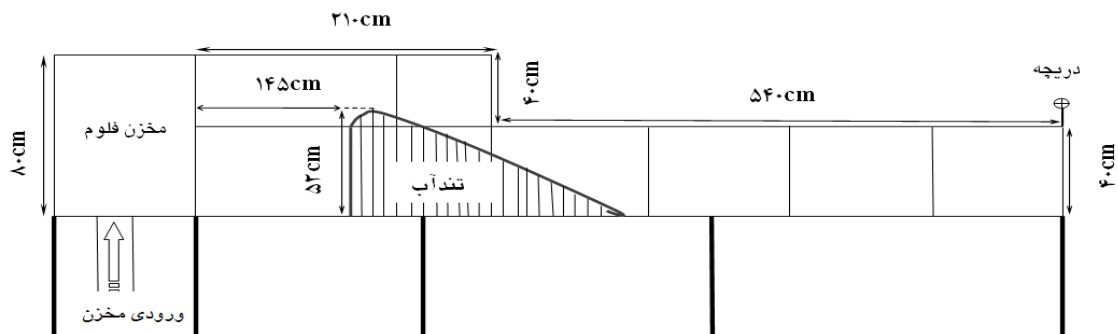
در شیب بحرانی رابطه  $h_2 = z + h_1$  برقرار می‌شود. مقدار N نیز در چنین حالتی برابر صفر می‌باشد و بنابراین مقدار Y برابر M می‌شود و با در نظر گرفتن این نکته که  $k$  هم در شیب بحرانی صفر است مقدار Y برابر  $\frac{h_2}{h_1}$  خواهد شد.

#### تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور انجام این تحقیق، آزمایشات در فلومی به طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر از جنس شیشه و پلاکسی گلاس و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید (شکل ۲). دبی جریان قبل از ورود به مخزن آرام کننده توسط دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت یک هزارم لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد. در ابتدای فلوم برای تشکیل پرش، سرریزی از نوع اوچی (با ارتفاع ۵۲ سانتی‌متر) با توجه به استانداردهای USBR طراحی و نصب گردید. تندآبی نیز در پایین‌دست سرریز فوق با شیب‌های مختلف (۱۴/۵، ۲۰/۵ و ۲۷/۵ درجه) و زبری‌های ۰/۳۵، ۱/۱، ۱/۷، ۲/۴ و ۲/۹ سانتی‌متر و همچنین سطح صاف نصب شد. زبری‌ها بصورت طبیعی و شکسته و دارای

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد این مطالعه.

نوع بستر	شیب (درجه)	$Fr_1$	$Y$	$M$	$K_S/y_c$
	۱۴/۵	۲/۵۷ - ۵/۵۸	۵/۳۳ - ۱۲/۴۵	۱/۰۶ - ۱۰/۶۲	صفر
صاف	۲۰/۵	۳/۸۵ - ۶/۶۳	۶/۳۴ - ۱۵/۶۱	۱/۰۸ - ۷/۰۶	صفر
	۲۷/۵	۴/۰۹ - ۷/۸۶	۷/۱۱ - ۱۱/۸۶	۱/۱۱ - ۹/۱۳	صفر
	۱۴/۵	۱/۶۸ - ۴/۱۱	۲/۳۱ - ۸/۲۷	۱/۱۸ - ۷/۳۳	۰/۰۳۲ - ۰/۴۵۲
زبر	۲۰/۵	۱/۸۱ - ۴/۸۳	۲/۱۱ - ۶/۹۶	۱/۱۳ - ۶/۴۸	۰/۰۲۵ - ۰/۵۸۱
	۲۷/۵	۲/۱۵ - ۵/۲۵	۲/۸۰ - ۹/۱۶	۱/۰۹ - ۷/۸۴	۰/۰۲۶ - ۰/۵۸۲



شکل ۲- مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه.



شکل ۳- یک نمونه پرش نوع B در آزمایشگاه بر روی بستر با ارتفاع زبری ۱/۷ سانتی متر.

**نتایج و بحث**

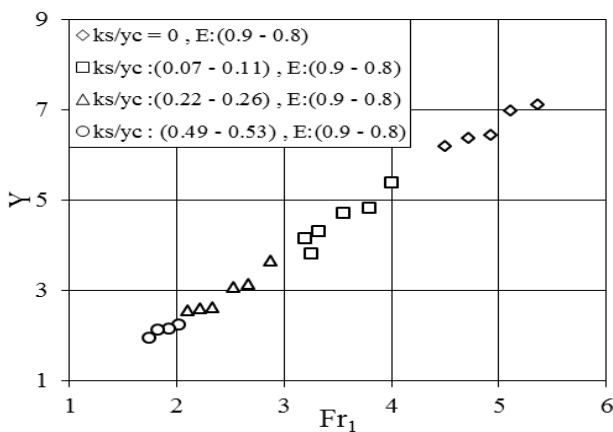
اثر ارتفاع زبری نسبی بر نسبت عمق‌های مزدوج پرش

**نوع B**

برای این منظور، نسبت عمق‌های مزدوج در مقابل عدد فرود اولیه جریان در بازه کوتاهی از E و سه بازه مختلف زبری نسبی برای شیب ۱۴/۵ درجه رسم شد که در شکل ۴ نمایش داده شده است. E پارامتری است که معرف موقعیت پرش بر روی سطح شیبدار است و اولین بار توسط هاگر (۱۹۸۸) بیان شد و از رابطه

$$E = \frac{h_2 - z}{h_2}$$

محاسبه می‌شود. حداکثر پارامتر E برابر واحد است که در پای تندآب (Z=0) اتفاق می‌افتد. با حرکت پرش به سمت بالادست سطح شیبدار، مقدار پارامتر E کاهش می‌یابد و نسبت عمق‌های مزدوج افزایش پیدا می‌کند (کارلو و همکاران ۲۰۱۱). با توجه به شکل ۴ همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع زبری نسبی در بازه کوتاه و ثابتی از E، عدد فرود و نسبت اعماق مزدوج کاهش می‌یابد.

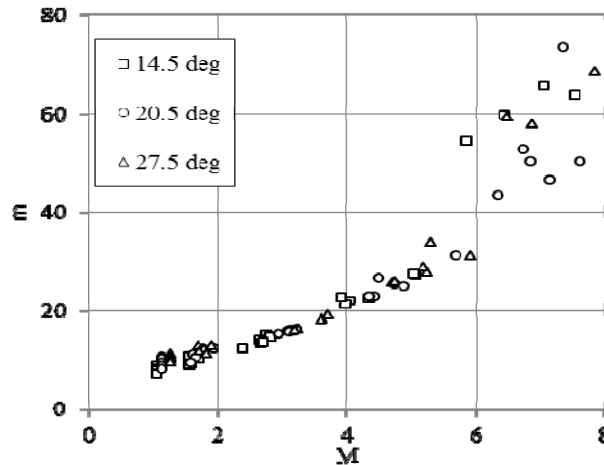


شکل ۴- اثر ارتفاع زبری نسبی بر نسبت عمق‌های مزدوج در شیب ۱۴/۵ درجه.

## تعیین ضرایب رابطه کلی

ابتدا برای محاسبه ضرایب رابطه ۸ در سطح صاف، مقدار  $m(\alpha, M) = \frac{Y-M}{N^\varepsilon}$  به ازای مقادیر مختلف  $\varepsilon$  محاسبه و سپس مقادیر  $m$  در مقابل  $M$  در

شیب‌های ۱۴/۵، ۲۰/۵ و ۲۷/۵ درجه رسم گردید. ملاحظه شد که به ازای توان‌های مختلف، داده‌های مربوط به هر سه شیب کاملاً بر هم منطبق می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۵- تغییرات تابع  $m$  به ازای عدد بی‌بعد  $M$  در شیب‌های مختلف و در سطح صاف.

برای بستر زبر، تغییرات تابع  $m$  به ازای  $M$  در اندازه‌های مختلف زبری نیز رسم شد و ملاحظه شد که مقدار ضرایب  $a$  و  $b$  وابسته به تغییرات زبری نسبی و مستقل از شیب تندآب است. شکل‌های ۶ و ۷ نشان دهنده این مطلب است. همانگونه که ملاحظه می‌شود همانند سطح صاف تغییرات تابع  $m$  به ازای  $M$  در تمامی زبری‌های نسبی بصورت نمایی است.

با توجه به شکل فوق ملاحظه می‌شود که تابع  $m$  مستقل از شیب و رابطه آن با عدد بی‌بعد  $M$  بصورت نمایی است. لذا می‌توان نوشت:

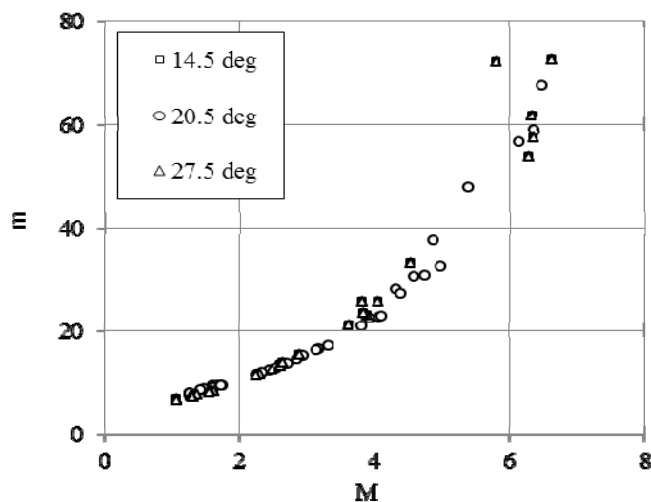
$$m(\alpha, M) = aM^b \quad [9]$$

بنابراین رابطه ۸ را می‌توان بصورت زیر نوشت:

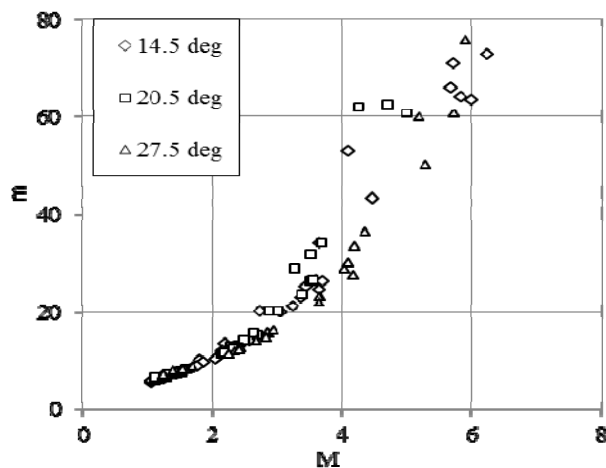
$$Y - M = aM^b \times N^\varepsilon \quad [10]$$

با استفاده از داده‌های سطح صاف، ضرایب رابطه فوق تعیین شد:

$$Y - M = 7.9M^{0.73} \times N^{2.37} \quad [11]$$



شکل ۶- تغییرات تابع  $m$  به ازای عدد بی بعد  $M$  در ارتفاع زبری ۰/۳۵ سانتی متر و در شیب‌های مختلف.



شکل ۷- تغییرات تابع  $m$  به ازای عدد بی بعد  $M$  در ارتفاع زبری ۱/۱ سانتی متر و در شیب‌های مختلف.

با توجه به مطالب فوق، رابطه کلی جهت برآورد نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B بصورت زیر می‌شود:

$$Y = \left[ 7.9 - 10.82 \left( \frac{k_s}{y_c} \right) \right] M^{\left[ 0.73 + 1.86 \left( \frac{k_s}{y_c} \right) \right]} \times N^{2.37} + M \quad [14]$$

با توجه به معادله فوق ملاحظه می‌شود که برای یک زبری ثابت وقتی  $y_c$  افزایش پیدا می‌کند معادله به

با استفاده از داده‌های بستر زیر مشخص شد که ضرایب  $a$  و  $b$  وابسته به عدد بی بعد  $\frac{k_s}{y_c}$  بوده و بصورت زیر بدست آمدند:

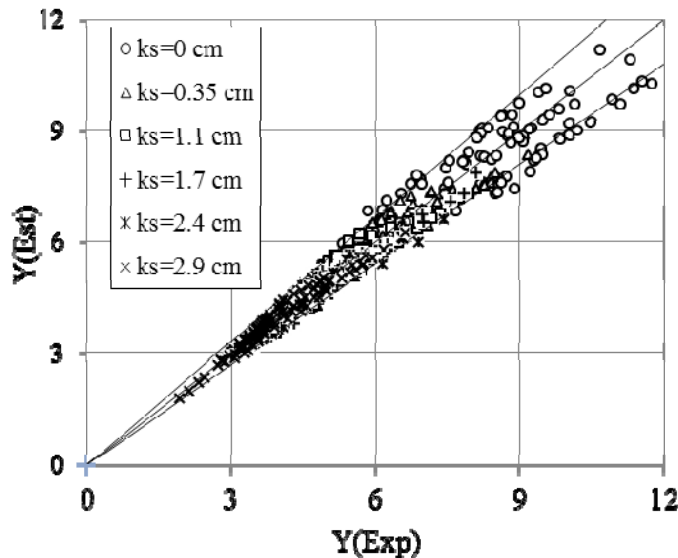
$$a = 7.9 - 10.82 \left( \frac{k_s}{y_c} \right) \quad [12]$$

$$b = 0.73 + 1.86 \left( \frac{k_s}{y_c} \right) \quad [13]$$



به منظور بررسی دقت رابطه، ابتدا عمق‌های اولیه و ثانویه (نسبت عمق‌های مزدوج) برای تمامی زبری‌های نسبی از رابطه ۱۴ محاسبه شد و در مقابل داده‌های مشاهداتی حاصل از آزمایش‌ها ترسیم گردید. نتایج ترسیمی در شکل ۸ نشان داده شده است. بر روی این شکل همچنین خط ۴۵ درجه و نیز خطوط با خطای  $\pm 10\%$  درصد نیز ترسیم شده‌اند.  $Y_{Est}$  و  $Y_{Exp}$  بترتیب نشان دهنده نسبت عمق‌های آزمایشگاهی و محاسباتی می‌باشد.

بستر صاف نزدیک می‌شود چون با افزایش هر چه بیشتر عمق جریان از اثر زبری بر جریان کاسته می‌شود. شکریان و شفاعی بجزستان (۲۰۱۳) نشان دادند که میزان خطای روابط موجود در برآورد نسبت عمق-های مزدوج پرش نوع B، وابسته به تغییرات شیب می‌باشد. ولی رابطه ۱۴ را می‌توان برای هر شیبی استفاده کرد. ضمن اینکه نیازی نیست سرعت جریان به منظور محاسبه عدد فرود در اختیار باشد.



شکل ۸- رسم داده‌های آزمایشگاهی در مقابل داده‌های محاسباتی از معادله ۱۴.

برخوردار است. میزان انحراف مقادیر محاسبه شده در هر زبری با داده‌های آزمایش نیز از رابطه

$$H_1 = z + k_s \cos \alpha + h_1 + Q^2 [2gB^2 (h \cos \alpha)^2]^{-1} \quad [15]$$

$$H_2 = h_2 + Q^2 [2gB^2 h_2^2]^{-1} \quad [16]$$

$$H_L = H_1 - H_2 \quad [17]$$

در روابط [۱۵] و [۱۶]، B معرف عرض فلوام است. با توجه به مطالعات آدام و همکاران (۱۹۹۳) و

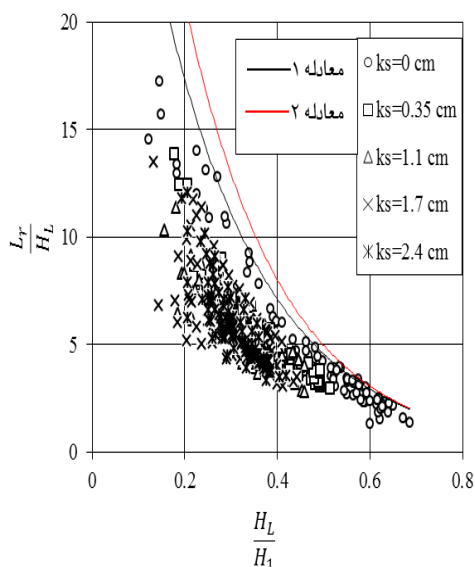
کارلو همکاران (۲۰۱۲)، نسبت  $\frac{H_L}{H_1}$  در مقابل  $\frac{L_r}{H_L}$  و

شکل ۸ به وضوح بیانگر این نکته است که معادله بدست آمده برای تمامی زبری‌ها از دقت بالایی برخوردار است. بدست آمد و سپس میانگین قدر مطلق این خطاها به عنوان متوسط خطا در نظر گرفته شد. متوسط خطای رابطه ۱۴ برای تمامی زبری‌های نسبی ۶/۴ درصد بدست آمد.

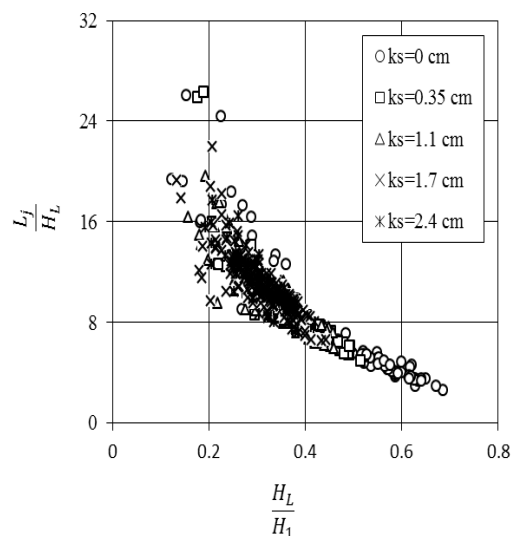
#### طول پرش و طول غلتابی

به منظور استخراج رابطه برای برآورد طول غلتابی و طول پرش، مقادیر انرژی بالادست و پایین-دست پرش و نیز مقدار استهلاك انرژی، از روابط زیر محاسبه شدند:

و در زبری‌های نسبی متفاوت رسم شد که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است:



شکل ۱۰- نمایش رابطه  $\frac{H_L}{H_1}$  در مقابل  $\frac{L_r}{H_L}$  در زبری‌های مختلف.



شکل ۹- نمایش رابطه  $\frac{H_L}{H_1}$  در مقابل  $\frac{L_j}{H_L}$  در زبری‌های مختلف.

سرریز و عمق بحرانی رابطه واحدی وجود دارد، می‌توان از زبری نسبی (ارتفاع زبری به عمق بحرانی) برای استخراج رابطه برای محاسبه طول غلتابی استفاده کرد. با استدلالی مشابه برای طول پرش، با استفاده از

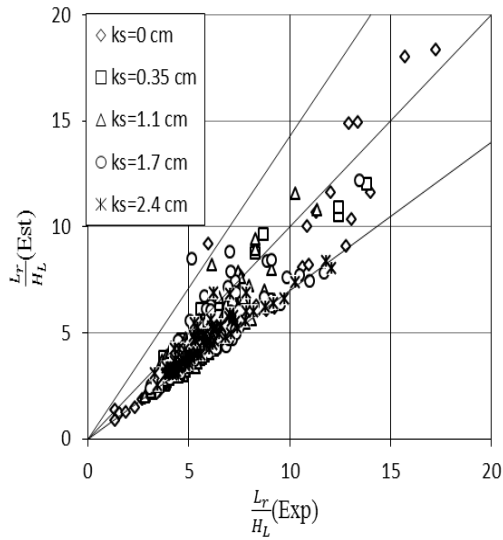
روابط فوق، مقادیر  $\frac{L_r}{H_L}$  و  $\frac{L_j}{H_L}$  محاسباتی از روابط ۱۸ و ۱۹ در مقابل مقادیر آزمایشگاهی آنها رسم شد که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، خط انطباق کامل و خطوط مربوط به خطای ۳۰ درصد نیز رسم شده است.

با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که با افزایش زبری، میزان انطباق داده‌های آزمایشگاهی با معادلات ۱ و ۲ کاهش پیدا می‌کند که نشان از اثر زبری نسبی بر کاهش طول غلتابی دارد. از طرفی افزایش دبی جریان باعث افزایش طول غلتابی می‌گردد. از آنجا که بین دبی داده‌های آزمایشگاهی، روابط زیر جهت محاسبه طول پرش و طول غلتابی پرش نوع B بدست آمد:

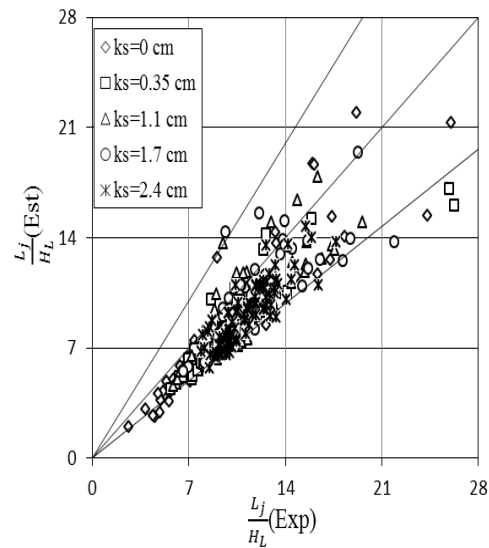
$$\frac{L_j}{H_L} = 422 \left[ 1 - 0.24 \left( \frac{k_s}{y_c} \right)^{0.281} \right] \exp \left( -4.48 \frac{H_L}{H_1} \right) \quad [18]$$

$$\frac{L_r}{H_L} = 422 \left[ 1 - 0.61 \left( \frac{k_s}{y_c} \right)^{0.349} \right] \exp \left( -5.71 \frac{H_L}{H_1} \right) \quad [19]$$

روابط فوق برای زبری نسبی صفر، تبدیل به معادلات سطح صاف می‌شوند. برای بررسی دقت



شکل ۱۲- نمایش  $\frac{L_r}{H_L}$  آزمایشگاهی در مقابل  $\frac{L_r}{H_L}$  محاسباتی از معادله ۱۹.



شکل ۱۱- نمایش  $\frac{L_j}{H_L}$  آزمایشگاهی در مقابل  $\frac{L_j}{H_L}$  محاسباتی از معادله ۱۸.

بالایی برخوردار است. طول غلتابی و طول پرش نوع B نیز مورد بررسی قرار گرفت و روابط کلی برای برآورد آنها در سطح صاف و زبر استخراج شد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش زبری نسبی، نسبت عمق‌های مزدوج، طول پرش و طول غلتابی کاهش پیدا می‌کند.

#### سپاسگزاری

این تحقیق با کمک مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم تامین شده است که بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تشکر و قدردانی می‌شود.

متوسط خطای رابطه ۱۸ و ۱۹ برای تمامی زبری‌های نسبی بترتیب برابر ۲۱/۱ و ۲۴/۳ درصد بدست آمد.

#### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تحلیل ابعادی و نظریه خود تشابهی ناقص و منظور نمودن پارامتر جدیدی بجای عدد فرود، رابطه‌ای کلی برای برآورد نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B بر روی بستر زبر استخراج گردید. ملاحظه شد که رابطه بدست آمده بر خلاف تمامی روابط موجود، مستقل از شیب و عدد فرود و فقط وابسته به ابعاد هندسی پرش، عمق بحرانی و زبری نسبی می‌باشد. رابطه بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و نشان داده شد که از دقت

#### منابع مورد استفاده

- Adam A, Ruff J, AlQaser G and Abt R, 1993. Characteristics of B-jump with different toe locations. J Hydraul Eng 119(8): 938-948.
- Barenblatt G, 1979. Similarity, Self-Similarity and Intermediate Asymptotics, Consultants Bureau, New York, 218p.
- Ferro V, 2006. The Arrangement of The River Basins, 2nd Ed, McGraw-Hill, Milano, Italy in Italian. Bradley J, Peterka A, 1957. Hydraulic design of stilling basins: Stilling basin with sloping apron (Basin V). J Hydraul Div 83(5): 1-32.
- Carollo F, Ferro V and Pampaloni V, 2007. Hydraulic jumps on rough beds. J Hydraul Eng 133(9): 989-999.
- Carollo F, Ferro V and Pampaloni V, 2009. New solution of classical hydraulic jump. J Hydraul Eng 135(6): 527-531.

- Carollo F, Ferro V and Pampalone V, 2012. A new expression of the hydraulic jump roller length. J Hydraul Eng 138(11): 995–999.
- Carollo F, Ferro V and Pampalone V, 2011. Sequent depth ratio of a B- jump. J of Hydraul Eng 137(6): 651–658.
- Hager W, 1988. B-jump in sloping channel. J Hydraul Res 26(5): 539–558.
- Hager W, 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump, Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands. 295p.
- Hager W and Bremen R, 1989. Classical hydraulic jump: Sequent depths. J Hydraul Res 27(5): 565–585.
- Kawagoshi N and Hager W, 1990. B-jump in sloping channel, II. J Hydraul Res, 28(4): 461–480.
- Kindsvater C, 1944. The hydraulic jump in sloping channels. Trans ASCE 10(9): 1107–1120.
- Ohtsu I and Yasuda Y, 1991. Hydraulic jump in sloping channels. J Hydraul Eng 117(7): 905–921.
- Shokrian M and Shafai Bejestan M, 2013. Sensitive analysis of all available relations for sequent depth calculation of B-jump on smooth bed. Pp. 234-242. 9<sup>th</sup> Int River Eng Conference. 22-24 Jan, Ahvaz, Iran.