

ارزیابی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با بستر دندان‌های همراه با شیب معکوس

آلاله احمدی^۱، تورج هنر^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۵

^۱ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شیراز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: toorajhonar@yahoo.com

چکیده

حوضچه‌های آرامش از متداول‌ترین سازه‌های کاهنده انرژی می‌باشند که جهت استهلاک انرژی آب در سرعت‌های فوق بحرانی در پایین‌دست سازه‌های آبی نظیر سدها و تنداب‌ها و نیز در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده می‌شوند. در این پژوهش به منظور بررسی توأم شیب کف معکوس و زبری کنگره‌ای شکل، آزمایش‌هایی با دامنه اعداد فرود در محدوده ۴/۴ تا ۷/۳۹ و شیب منفی صفر تا ۰/۰۲- در چهار زبری کنگره‌ای انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط فوق به‌طور میانگین ۳۵ و ۴۹ درصد در نسبت اعماق مزدوج و طول نسبی پرش کاهش ایجاد شده است و همچنین اجرای این روش موجب افزایش ۲۱ و ۱۴ درصدی در افت نسبی انرژی و ضریب تنش برشی بستر گردیده است که می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های اجرایی گردد.

واژه‌های کلیدی: بستر دندان‌های، پرش هیدرولیکی، جریان فوق بحرانی، حوضچه آرامش، شیب منفی

Assessment of Hydraulic Jump Characteristics in Stilling Basins with Indented Bed and Adverse Slope

A Ahmadi¹, T Honar^{*2}

Received: 14 March 2016 Accepted: 13 February 2017

¹- Former MS.c. Student, Water Eng. Department, Shiraz University, Iran

²- Assoc.Prof., Water Eng. Department, Shiraz University, Iran

* Corresponding Author, Email: toorajhonar@yahoo.com

Abstract

Stilling basins are the most common energy dissipator structures for depreciation of water energy at super critical speeds, typically are used at down stream of hydraulic structures such as dams and chutes and also in structures of irrigation and drainage networks. A new method using a stilling basin with indented bed and adverse slope, is proposed in this research. The experiments were carried out for upstream Froude numbers in the range of 4.4 to 7.39, with four adverse slopes in the range of zero to -0.02, and also four indented roughness values in the laboratory. The results showed the average decreases of 35 and 49 percent on sequential depths and the relative length of a hydraulic jump, also the average increases of 21 and 14 percent on energy loss and coefficient of bed shear stress of hydraulic jump, respectively, which could reduce the administrative costs of stilling basins.

Key words: Adverse slope, Hydraulic jump, Indented bed, Stilling basin, Supercritical flow

مقدمه

آبادانی ایالات متحده آمریکا (USBR)^۱ ارائه و معرفی گردیده است. در این میان به کارگیری برخی از حوضچه‌های USBR، در عین راندمان بالا، نیازمند صرف هزینه‌های بالای اجرایی خواهند بود. از این رو محققان همچنان به دنبال راه‌حلهایی می‌باشند که با به کارگیری آن بتوانند در شرایط خاص اقتصادی و یا کمبود امکانات اجرایی، به حوضچه‌هایی با هزینه اجرایی پایین با راندمانی بالا دست یابند که از نقطه نظر علمی نیز قابل توجیه باشد. اهمیت این مسئله خصوصاً در پروژه‌های کوچک‌تر نظیر حوضچه‌های آرامش مورد نیاز در پایین دست سدهای کوتاه، پایین دست دراپ‌ها و یا در تصفیه خانه‌ها بیشتر نمود پیدا می‌کند. در این تحقیق آزمایشگاهی سعی گردیده است که با به کارگیری حوضچه آرامش با شیب کف منفی و زبری دندان‌های شکل که اجرای آن کم هزینه می‌باشد، گامی جدید در

هنگامی که جریان در قسمتی از مسیر خود دارای حالت فوق بحرانی باشد و بنا به شرایط خاصی که در کانال ایجاد می‌گردد به زیر بحرانی تغییر حالت دهد، پدیده پرش یا جهش هیدرولیکی رخ خواهد داد. این وضعیت از انواع جریان‌های متغیر سریع می‌باشد که در بسیاری از کارهای اجرایی با آن روبرو هستیم که در آن، در مسیر نسبتاً کوتاهی عمق جریان به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و ضمن آن دست دادن مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی، از میزان سرعت به مقدار قابل توجهی کاسته می‌گردد. حوضچه آرامش از جمله متداول‌ترین مستهلک‌کننده‌های انرژی می‌باشد که تاکنون مطالعات زیادی بر روی آن انجام شده است. از مهمترین نتایج حاصل در راستای این تحقیقات، حوضچه‌های استاندارد می‌باشد که توسط دفتر

¹ - United states bureau of reclamation

نتیجه حاصل گردید که نیروی ثقل در پرش بر روی شیب منفی باعث می‌شود یک سری امواج غلتان در خلاف جهت گردش جریان ایجاد و پارامترهای پرش را کاهش دهد. رند (۱۹۶۷)، راجاراتنام (۱۹۶۸) و محمد علی (۱۹۹۱) نیز از جمله اولین افرادی بوده‌اند که پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر را مورد بررسی قرار داده و همگی به کاهش قابل توجهی در نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی در اثر به‌کارگیری بستر زبر اشاره نموده‌اند. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) آزمایش‌های خود را بر روی بستر موج دار سینوسی شکل در اعداد فرود ۴ تا ۱۰ و ارتفاع نسبی موج (t/d_1) (ت) ارتفاع موج بستر و d_1 عمق اولیه پرش)، ۰/۲۵ تا ۰/۵ انجام داده‌اند. به اعتقاد آنها فرورفتگی‌های روی ورق موجدار باعث ایجاد جریان‌های گردابی و افزایش تنش‌های برشی رینولدز می‌گردد که موجب می‌گردد که خلأ زایی نیز به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای کاسته گردد. کارولو و فرو (۲۰۰۷) آزمایش‌های خود را بر روی پرش هیدرولیکی در بسترهایی با زبری طبیعی شن و قلوه سنگ، با ۵ قطر متوسط در محدوده ۴/۶ تا ۳۲ میلی‌متر، انجام و در نهایت روابطی را برای نسبت عمق ثانویه ارائه داده‌اند. پس از آن پاگلیارا و لاتی (۲۰۰۸) اثر زبری‌های همگن و غیرهمگن را در پارامترهای پرش مورد بررسی قرار داده و بر اساس نوع زبری، روابطی را برای محاسبه طول غلتاب‌ها در پرش هیدرولیکی ارائه نموده‌اند. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) نیز آزمایش‌های خود را بر روی بسترهایی با زبری‌های سینوسی شکل با شش شیب موج در محدوده $0.285 \leq (t/s) \leq 0.625$ و $3.6 \leq Fr_1 \leq 8.6$ انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که عمق ثانویه برای یک عمق فوق بحرانی اولیه مشخص، حدود ۲۰ درصد کوچکتر و نسبت بدون بعد ضخامت لایه مرزی (δ/b) ، در بستر سینوسی ۴۱٪ بیشتر و ضریب نیروی برشی ۱۰ برابر بستر صاف خواهد بود. السبایه و شبایک (۲۰۱۰) آزمایش‌های خود را در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ بر روی پنج نوع بستر زبر، شامل زبری‌های سینوسی، نوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت دیواره، مثلثی و مستطیلی انجام داده‌اند.

راستای تحقق این اهداف برداشته گردد. زبری دندانه‌ای شکل در عمل می‌تواند از برش طولی لوله‌های فایبرگلاس یا GRP 'مازاد کارخانه (که تاییدیه‌های لازم در لوله گذاری‌های حساس را ندارند) یا تکه لوله‌های اضافی کوتاه و غیر قابل اجرا در لوله‌گذاری، فراهم گردند.

به‌طور کلی جهت تثبیت پرش هیدرولیکی بر روی شیب‌های منفی، نیازمند یک کمینه عدد فرود در مقطع اولیه، عمق پایاب و طول حوضچه خواهیم بود. در واقع هنگامی که عدد فرود اولیه پایین، طول حوضچه کوتاه و عمق پایاب نامناسب باشد، نیروی دینامیکی اولیه آب، قادر به حرکت دادن و خارج نمودن آبی با حجم و وزن زیاد از روی شیب معکوس را نخواهد داشت (صانعی ۱۹۹۱) کینسوآتر (۱۹۴۴) و راجاراتنام (۱۹۶۷) از جمله اولین افرادی می‌باشند که مطالعات ارزشمندی در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال‌های شیب‌دار (شیب مثبت و منفی) انجام داده‌اند و در نهایت به یک سری روابط تحلیلی- تجربی جهت محاسبه نسبت اعماق مزدوج دست یافته‌اند. خدر و راجاگوپال (۱۹۷۲) افت انرژی در کانال‌هایی با شیب منفی کمتر از ۱:۴۰ را مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که افت انرژی حاصل از پرش در بسترهایی با شیب منفی، تفاوت چندانی با پرش کلاسیک ندارد. مک کور کودال (۱۹۹۴) پرش را بر روی شیب منفی در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ بررسی کرد و با استفاده از معاملات مومنتوم به موازات آزمایش در بستر شیب‌دار، معادله‌ای تحلیلی- تجربی برای محاسبه اعماق مزدوج ارائه نمود. پاگلیارا (۲۰۰۰) نیز پرش را در شیب‌های منفی ۵ تا ۲۰ درصد در حوضچه‌ای به طول ۲ متر و عرض ۰/۴ متر در محدوده دبی‌های ۲۵ الی ۷۴ لیتر بر ثانیه با استفاده از یک دریچه کشویی بررسی و رابطه‌ای را برای تعیین نسبت عمق ثانویه به اولیه در محدوده شیب $(-0.25 \leq i \leq 0)$ ، به‌صورت تابعی از عدد فرود در بالادست و (i) شیب بستر ارائه نمود. از آزمایش‌های بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) بر روی شیب منفی در محدوده ۰/۱- تا صفر نیز این

نیروی لزجت صرف نظر نمود و رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ خلاصه می‌گردد. همچنین به طور مشابه برای طول پرش هیدرولیکی (L_j) با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه ۴ حاصل می‌گردد:

$$D_2 / D_1 = f_3(Fr_1, r / D_1, \tan \theta) \quad [۳]$$

$$L_j / D_1 = f_4(Fr_1, r / D_1, \tan \theta) \quad [۴]$$

۲. تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شیراز در کانالی با دیواره‌های شیشه‌ای که در کف جهت استحکام ورق فلزی کار گذاشته شده، با طول ۱۵ متر و عرض ۷۰/۵ سانتی‌متر انجام گردید. برای ایجاد جریان فوق بحرانی در ابتدای کانال، از یک دریچه کشویی قائم استفاده گردید. در نهایت جهت تثبیت پرش هیدرولیکی در محل مورد نظر، یک دریچه کشویی قائم در پایین دست (در فاصله ۵ متری از دریچه اول) در نظر گرفته شد. در این تحقیق دبی توسط دبی سنج الکترونیکی که پس از پمپ و قبل از کانال قرار داشت اندازه گیری و مقادیر مربوطه با یک سر ریز مثلثی ۹۰ درجه واسنجی گردید (شکل ۱). همچنین جهت اندازه‌گیری عمق اولیه پرش لازم دانسته شد که حدود ۳۰ سانتی‌متر آب بعد از دریچه کشویی اول، در حالت فوق بحرانی بر روی کف کانال جاری باشد و سپس بستری جهت ایجاد پرش هیدرولیکی به طول تقریبی ۲ متر با ترکیب‌های مختلف شیب منفی و زبری بعد از این فاصله ایجاد گردد (شکل ۲). بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل ابعادی، آزمایش‌ها با سه دبی ۴۰، ۴۵ و ۵۰ لیتر بر ثانیه در ۹ حالت از جریان با اعداد فرود اولیه متفاوت و چهار شیب کف صفر، ۰/۰۱، ۰/۱۵ و ۰/۰۲ انجام گردیده است. جهت ایجاد بستر دندان‌های شکل نیز، از لوله‌های پولیکا با مشخصات $2r = 32$ میلی‌متر، $2r = 40$ میلی‌متر و $2r = 50$ میلی‌متر به طور یک در میان یا به عبارتی با فاصله $4r$ استفاده شده است. در واقع (r) ارتفاع معادل زبری‌هایی است که در اثر برش طولی لوله حاصل شده که تقریباً با شعاع لوله برابر می‌باشد.

نتایج آنها بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر در مقایسه با پرش بر روی بستر صاف می‌باشد. دمتریو (۲۰۱۰) به مقایسه افت انرژی در مسیر پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب مثبت، با به‌کارگیری یک دیواره نازک و یک پله مثبت پرداخته و به این نتیجه رسیده است که به علت فضای جداشدگی جریان که بر روی پله مثبت اتفاق می‌افتد، افت بیشتری ایجاد می‌گردد. با مروری بر پژوهش‌های گذشته و بررسی دقیق‌تر این موضوع دریافتیم که محققان کمتر به مسئله پرش روی سطوح شیبدار منفی همراه با زبری پرداخته‌اند. لذا در تحقیق حاضر سعی گردیده است با بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی شیب منفی همراه با زبری‌های دندان‌های شکل، گامی جدید در جهت کاهش هزینه و افزایش راندمان در طراحی حوضچه‌های آرامش برداشته شود.

مواد و روش‌ها

۱. تحلیل ابعادی

مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر دندان‌های شکل همراه با شیب معکوس، تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. در چنین شرایطی، عمق ثانویه پرش (D_2)، به عمق اولیه پرش (D_1)، شتاب ثقل (g)، لزجت دینامیکی آب (μ)، سرعت اولیه جریان (V_1)، جرم مخصوص آب (ρ)، زبری کف یا به عبارتی شعاع لوله‌های کار گذاشته شده در کف حوضچه (r) و همچنین شیب منفی کف کانال ($\tan \theta$) ارتباط دارد که می‌توان آنرا به صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$D_2 = f_1(D_1, V_1, g, \rho, \mu, r, \tan \theta) \quad [۱]$$

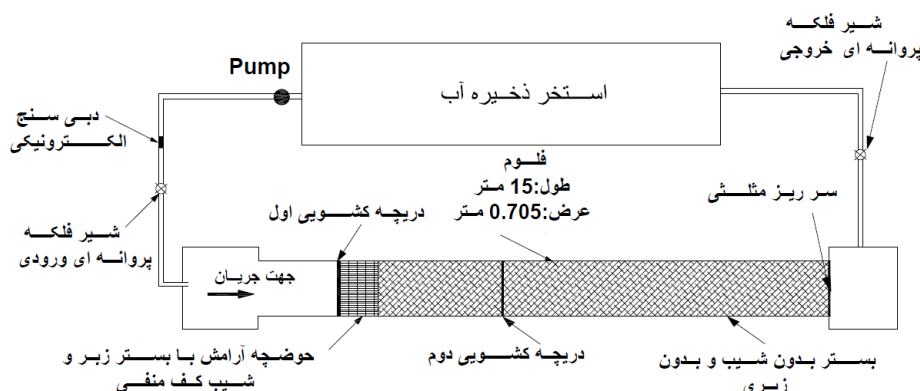
سپس با استفاده از روش با کینگهام می‌توان به رابطه زیر دست یافت:

$$D_2 / D_1 = f_2(Re, Fr_1, r / D_1, \tan \theta) \quad [۲]$$

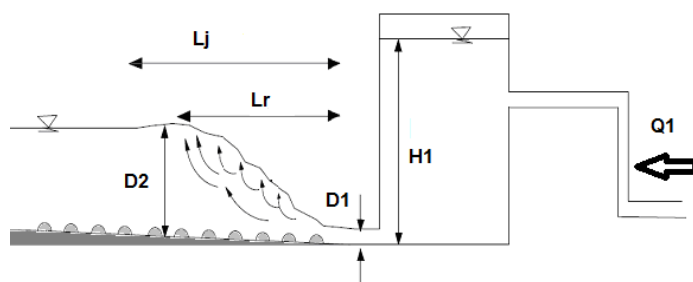
در این رابطه Fr_1 عدد فرود اولیه و Re عدد رینولدز جریان می‌باشد. با توجه به مقادیر عمق و سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها، جریان آشفتگی و دارای عدد رینولدز بالا می‌باشد، لذا می‌توان از اثر

(شکل ۳). همچنین از هر پرش هیدرولیکی تصاویری تهیه و به کمک نرم افزار Grapher 7، این تصاویر تحلیل گردید و در نهایت از نتایج حاصل جهت محاسبه دقیق‌تر عمق ثانویه و طول پرش استفاده شد.

در این تحقیق برای تعیین اعماق پرش، از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر و جهت اندازه‌گیری سرعت در مقطع ثانویه از سرعت‌سنج نقطه‌ای دوبعدی الکترومگنتیت با دقت ۰/۱ سانتی‌متر برثانیه استفاده شد.



شکل ۱- پلان فلوم آزمایشگاهی.



شکل ۲- تصویر شماتیک از سطح شیب‌دار منفی همراه با زبری دندانه‌ای شکل بستر.



شکل ۳- نمایی از فلوم آزمایشگاهی- نمونه پرش تثبیت‌شده بر روی شیب منفی و بستر کنگره‌ای.

صورت، پرتاب آب از روی موانع باعث می‌گردد که طول پرش بسیار بیشتر از حالت عادی گردد. همچنین با مشاهده ناحیه درگیری امواج غلتان با زبری‌های دندانه‌ای شکل، این نتیجه حاصل گردید که هر چه به سمت انتهای پرش نزدیک می‌شویم، از نقش زبری‌ها در ایجاد تلاطم بیشتر در پرش کاسته می‌گردد. از

نتایج و بحث

قبل از شروع آزمایش‌های اصلی، یک سری آزمایش اولیه جهت تعیین محدوده پارامترهای مربوطه انجام گردید. نتایج بیان‌گر این مطلب بود که در شرایط آزمایشگاهی، به‌ازای مقادیر $r/D_1 \leq 0.82$ ، در محدوده $4.4 \leq Fr_1 \leq 7.39$ پرش پایدار تشکیل و در غیر این

این رو با یک دیدگاه علمی - اقتصادی کافی است زبری‌ها فقط در طول ناحیه غلتابی کارگذاشته شود. رابطه ۵ طول نسبی غلتاب‌ها را در محدوده فوق‌الذکر پرش کلاسیک بیان می‌کند:

$$L_r / D_1 = 7.49(Fr_1) + 3.60 \quad [5]$$

$$R^2 = 0.951 \text{ و } NRMSE = 0.061$$

۱- بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی بر روی بستر با شیب معکوس همراه با زبری دندان‌ه‌ای شکل

اشکال ۴ تا ۶ نسبت اعماق مزدوج (D_2/D_1) در مقابل عدد فرود اولیه (Fr_1) را برای پرش بر روی شیب های منفی -0.1 ، -0.15 و -0.2 و تحت تأثیر زبری‌های دندان‌ه‌ای شکل با مشخصات $2r=32$ ، $2r=40$ و $2r=50$ میلی‌متر، نشان می‌دهد. همچنین مقادیر آزمایشگاهی تحقیق حاضر با نتایج حاصله از محققان قبلی از جمله پاگلیارا (۲۰۰۰) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) که به ترتیب، تنها اثر شیب منفی و تنها اثر زبری‌های سینوسی شکل را در پارامترهای پرش بررسی کرده‌اند، مقایسه شده است. همان‌گونه که از این اشکال برمی‌آید با افزایش شیب منفی و افزایش ارتفاع زبری‌ها، نسبت عمق مزدوج پرش هیدرولیکی نسبت به حالت پرش کلاسیک، به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد که این کاهش با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. حال آنکه در مقادیر آزمایشگاهی عمق ثانویه پرش که تحت تأثیر توأم شیب معکوس و زبری‌های دندان‌ه‌ای می‌باشند، کاهش بیشتری مشاهده گردیده است. در این راستا مقادیر ضریب کاهش عمق در حالت‌های به‌کارگیری فقط زبری و به‌کارگیری توأم شیب منفی و زبری به ترتیب 0.21 و 0.28 محاسبه گردیده است. این پدیده را می‌توان به تلاطم مضاعف ایجاد شده توسط زبری‌ها و همچنین ایجاد غلتابه‌هایی که در اثر شیب منفی در خلاف جهت جریان ایجاد و به سمت قسمت میانی پرش کشیده می‌شود و باعث اتلاف بیشتر انرژی جنبشی در حین پرش می‌گردد، نسبت داد. همچنین این نتیجه حاصل می‌گردد که مقادیر این پژوهش در حالت اثر توأم شیب منفی و زبری، از مقادیر پاگلیارا (۲۰۰۰)، بسیار کمتر و به مقادیر

عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) نزدیک‌تر می‌باشد که البته این موضوع در اعداد فرود بالاتر بیشتر نمایان است. در واقع می‌توان گفت اثر زبری در کاهش عمق ثانویه بسیار بیشتر از اثر شیب معکوس است و هر چه شیب بستر بیشتر گردد، اختلاف مقادیر این پژوهش از نتایج عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) که بر روی بستر سینوسی شکل با شیب صفر است، بیشتر می‌گردد و نسبت عمق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش بیشتری می‌یابد که این موضوع را نیز می‌توان به تأثیر توأم شیب معکوس و زبری دندان‌ه‌ای شکل نسبت داد. در این خصوص رابطه زیر جهت محاسبه نسبت اعماق مزدوج پرش در محدوده $4.4 \leq Fr_1 \leq 7.39$ ، $-0.02 \leq S < 0.00$ و $0.54 \leq r/D_1 \leq 0.82$ حاصل گردیده است:

$$D_2 / D_1 = 0.85 Fr_1 - 1.42(r / D_1) + 45.06 \tan \theta + 2.73 \quad [6]$$

$$R^2 = 0.935 \text{ و } NRMSE = 0.074$$

۲- بررسی طول نسبی پرش هیدرولیکی بر روی بستر با شیب معکوس همراه با زبری دندان‌ه‌ای شکل

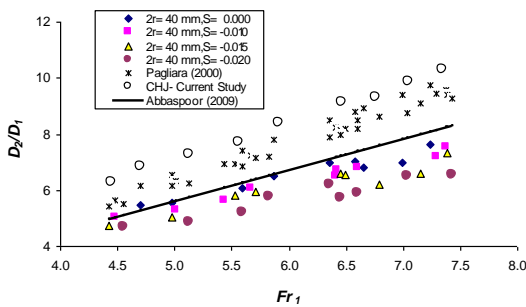
شکل‌های ۷ تا ۹ طول نسبی پرش هیدرولیکی (L_j/D_1) را در مقابل عدد فرود اولیه برای پرش بر روی شیب های منفی و تحت تأثیر زبری‌های دندان‌ه‌ای شکل متفاوت نشان می‌دهد. همچنین مقادیر آزمایشگاهی تحقیق حاضر در حالت کلاسیک (CHJ) با رابطه ارائه شده توسط هاگر (۱۹۹۲) مربوط به پرش کلاسیک مقایسه شده است. همان‌طورکه در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، کاهش قابل توجهی در طول نسبی پرش هیدرولیکی تحت تأثیر توأم شیب معکوس و زبری‌های دندان‌ه‌ای رخ داده است که این کاهش با افزایش عدد فرود اولیه افزایش یافته است. این پدیده را می‌توان به تلاطم مضاعف ایجاد شده توسط زبری‌ها و همچنین ایجاد غلتابه‌هایی که در اثر شیب منفی در خلاف جهت جریان ایجاد و به سمت قسمت میانی پرش کشیده می‌شوند، نسبت داد. زیرا مجموع این عوامل باعث می‌گردد جریان در مقطع کوتاه‌تری آرام و از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر حالت دهد. حال آن‌که همه موارد یادشده در عددهای فرود اولیه بالاتر که جریان دارای انرژی جنبشی اولیه بالاتری است، بیشتر نمود پیدا می‌کند. بیشترین کاهش مربوط به شیب

رابطه زیر جهت محاسبه طول نسبی پرش هیدرولیکی حاصل گردیده است. این رابطه در محدوده $0.54 \leq r/D_1 \leq 0.82$ و $4.4 \leq Fr_1 \leq 7.39$ و $-0.02 \leq S \leq 0.00$ کارایی لازم را دارد.

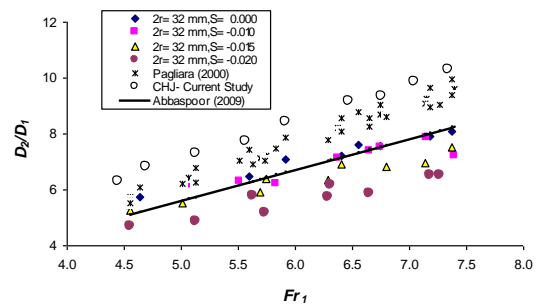
$$L_j/D_1 = 4.29Fr_1 - 4.66(r/D_1) + 214.82 \tan\theta + 7.26 \quad [V]$$

$$R^2 = 0.921 \quad \text{و} \quad NRMSE = 0.048$$

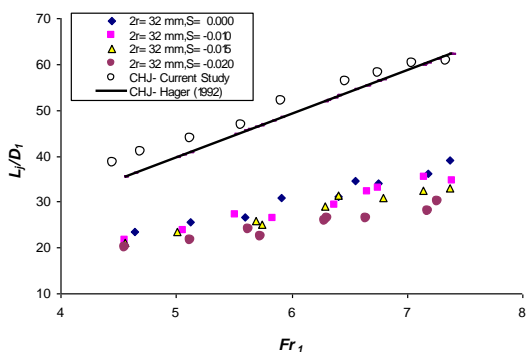
۰/۰۲- و در محدوده $0.54 \leq r/D_1 \leq 0.82$ ، به ازای عدد فرود اولیه ۶ تا ۷/۳۴ به‌طور میانگین ۵۲ درصد در اعداد فرود اولیه کمتر از ۶، به‌طور میانگین ۴۶ درصد می باشد. در این حالت تفاوت چشمگیری در مورد استفاده از لوله با قطرهای متفاوت مشاهده نشده است و در واقع در این شرایط، نسبت (r/D_1) عامل تعیین کننده طول پرش می باشد.



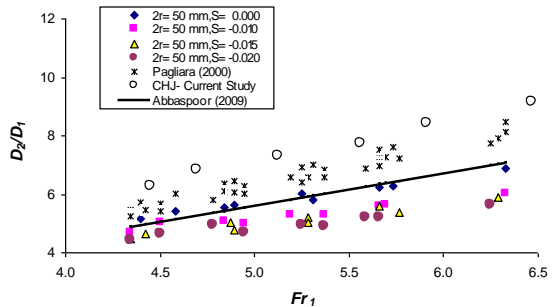
شکل ۵- نسبت (D_2/D_1) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۴۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



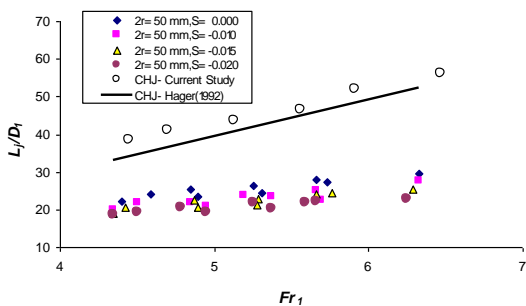
شکل ۴- نسبت (D_2/D_1) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۳۲ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



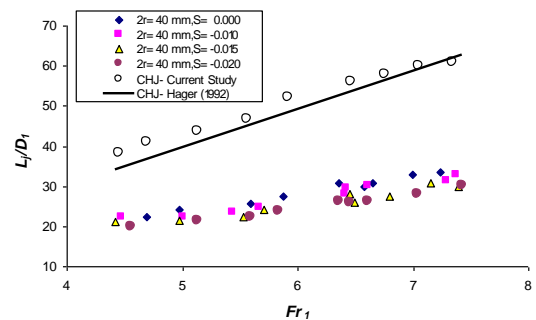
شکل ۷- نسبت (L_j/D_1) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۳۲ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



شکل ۶- نسبت (D_2/D_1) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۵۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



شکل ۹- نسبت (L_j/D_1) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۵۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



شکل ۸- نسبت (L_j/D_1) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۴۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.

استفاده هم‌زمان از شیب منفی و زبری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد بیشترین افت نسبی انرژی در حالات به‌کارگیری توأم شیب منفی و زبری دندان‌های شکل (حدود ۲۱ درصد) مشاهده شده است و این در حالی است که با به‌کارگیری فقط زبری دندان‌های حدود ۱۷ درصد افزایش در افت نسبی و در حالت به-کارگیری فقط شیب منفی این میزان افزایش در حدود ۵ درصد و فقط برای اعداد فرود اولیه بالای ۶ می‌باشد و در اعداد فرود اولیه کمتر، تفاوت چندانی با حالت کلاسیک مشاهده نمی‌گردد.

۴- بررسی ضریب نیروی برشی (ε)

جهت محاسبه ضریب نیروی برشی، از رابطه

$$\varepsilon = 2F_r / \gamma_w d_1^2 \quad \text{و} \quad F_r = \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2)$$

استفاده شده است که در آنها P_1 و P_2 نیروهای فشاری و M_1 و M_2 مقادیر اندازه حرکت در واحد عرض کانال می‌باشد که با در نظر گرفتن عمق و سرعت در مقطع اولیه و ثانویه پرش به‌صورت $P_1 = 0.5\gamma d_1^2$ ، $P_2 = 0.5\gamma d_2^2$ ، $M_1 = \rho V_1^2 d_1$ و $M_2 = \rho V_2^2 d_2$ محاسبه می‌گردد. همچنین مقادیر محاسبه شده ضریب نیروی برشی، با مقادیر اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) که به صورت $\varepsilon = (Fr_1 - 1)^2$ برای بستر موج‌دار و $\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1$ برای بستر صاف ارائه شده، مقایسه گردیده است. اشکال ۱۴ و ۱۵ به‌ترتیب ضریب نیروی برشی را به‌ازای عدد فرود اولیه در شیب‌های منفی و زبری‌های دندان‌های متفاوت، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقادیر این پژوهش در حالت کلاسیک با مقادیر اید و راجاراتنام در حالت کلاسیک (۲۰۰۲) نسبتاً هم‌خوانی دارد و این در حالی است که با افزایش شیب منفی و ارتفاع زبری‌های مورد بررسی، ضریب نیروی برشی افزایش می‌یابد. همچنین در مقایسه مقادیر این پژوهش با مقادیر اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) بر روی بستر سینوسی شکل، می‌توان نتیجه گرفت که این مقادیر در اعداد فرود اولیه بالا هم‌خوانی بیشتری دارد ولی در اعداد فرود پایین، بستر سینوسی شکل در افزایش تنش برشی و به دنبال

۳- بررسی افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی بر روی بستر با شیب معکوس همراه با زبری دندان‌های

جهت محاسبه افت انرژی در پرش بر روی سطوح شیب‌دار، از معادله انرژی (رابطه ۸) بین مقطع اولیه و ثانویه پرش استفاده گردیده است که در آن α ضریب تصحیح انرژی جنبشی به‌صورت $\alpha = \left(\sum_{i=1}^n V_i^3 \Delta A_i / V^3 A \right)$ قابل محاسبه می‌باشد (چاو

۱۹۶۴).

[۸]

$$\Delta E = E_1 - E_2 = (D_1 \cos \theta - D_2 \cos \theta)$$

$$+ [(\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2) / 2g] - L_f \sin \theta$$

از آنجایی که در آزمایش‌های این تحقیق عمق

اولیه پرش بسیار کم (کمتر از ۲/۵ سانتی‌متر) و امکان اندازه‌گیری سرعت در اعماق مختلف آن وجود نداشت، با اندازه‌گیری عمق اولیه توسط عمق‌سنج، سرعت میانگین در مقطع اولیه پرش از رابطه پیوستگی محاسبه گردیده و با در نظر گرفتن مقدار α_1 برابر با یک، سرعت میانگین به‌عنوان سرعت در مقطع اولیه در نظر گرفته شده است. سپس با داشتن مقادیر سرعت در اعماق مختلف در مقطع ثانویه، مقدار α_2 در اعداد فرود مختلف (محدوده ۴/۴ تا ۷/۳۹)، محاسبه گردیده است. اشکال ۱۰ تا ۱۲ افت نسبی انرژی ($\Delta E / E_1$) در مقابل عدد فرود اولیه را برای پرش بر روی شیب‌های منفی و تحت تأثیر زبری‌های دندان‌های شکل متفاوت، نشان می‌دهد. در این حالت نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای در افت نسبی انرژی با افزایش زبری و شیب منفی بستر، نسبت به حالت کلاسیک مشاهده می‌گردد. رابطه زیر نیز جهت محاسبه افت نسبی انرژی در محدوده $0.54 \leq r / D_1 \leq 0.82$ و $-0.02 \leq S \leq 0.00$ ، $4.4 \leq Fr_1 \leq 7.39$ حاصل گردیده است.

$$\Delta E / E_1 = 45.18 \ln(Fr_1) + 7.05(r / D_1)$$

[۹]

$$- 235.13 \tan \theta - 26.33$$

$$R^2 = 0.954 \quad \text{و} \quad NRMSE = 0.038$$

شکل ۱۳ نیز که برای همه داده‌های آزمایش رسم شده تفاوت میزان افت انرژی را در حالت‌های مختلف به‌کارگیری فقط شیب منفی، فقط زبری و

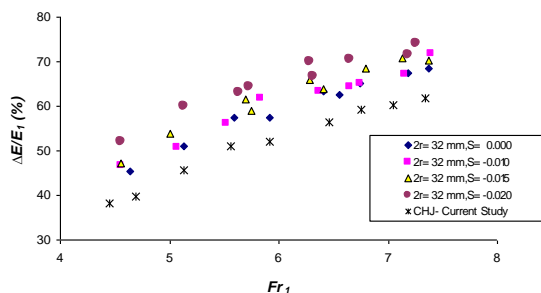
کاهش بیشتر عمق ثانویه و افزایش بیشتر افت انرژی در شرایط تأثیر توأم شیب منفی و ارتفاع زبری باشد که در فرودهای اولیه بالاتر، نمایان‌تر است. رابطه زیر جهت محاسبه ضریب تنش برشی بستر و در محدوده $0.54 \leq r/D_1 \leq 0.82$ و $-0.02 \leq S \leq 0.00$ ، $4.4 \leq Fr_1 \leq 7.39$ حاصل گردیده است:

$$\varepsilon = (Fr_1 - 1)^{2.157} + 14.67(r/D_1) - 547.55 \tan \theta - 20.44 \quad [10]$$

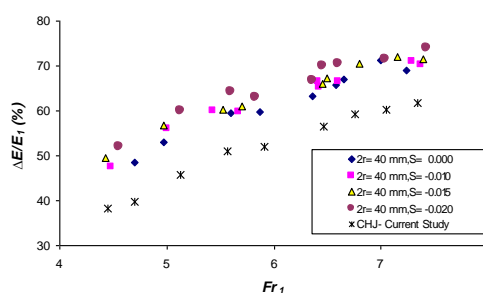
$R^2 = 0.937$ و $NRMSE = 0.174$

آن افزایش ضریب نیروی برشی عملکرد بهتری داشته است.

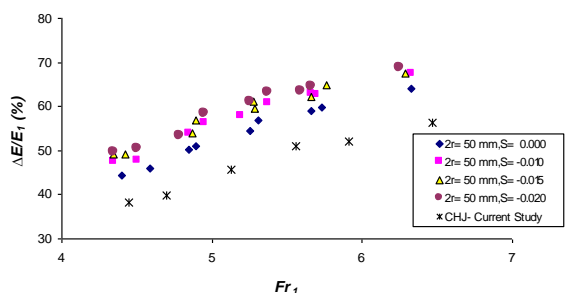
شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نیز اثر توأم ارتفاع زبری و شیب منفی را بر ضریب نیروی برشی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از اشکال بر می‌آید مقدار ضریب برشی در اکثر موارد نسبت به مقادیر اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) که پرش بر روی بستر سینوسی شکل است، افزایش یافته است که این افزایش در اعداد فرود بالاتر، چشمگیرتر است. (مقدار آن در محدوده $0.54 \leq r/D_1 \leq 0.82$ ، $-0.02 \leq S \leq 0.00$ ، $4.4 \leq Fr_1 \leq 7.39$ از $۱۰/۶۸$ تا $۵۵/۹۸$ متغیر می‌باشد). در واقع این افزایش در تنش برشی بستر می‌تواند دلیل قانع کننده‌ای بر



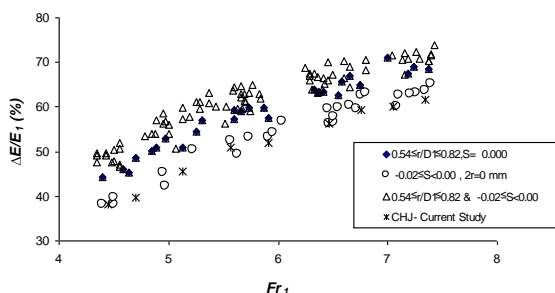
شکل ۱۱- نسبت $(\Delta E/E_1)$ در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۴۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



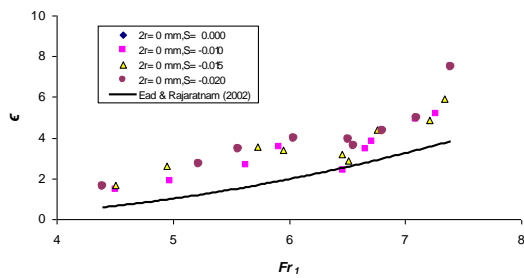
شکل ۱۰- نسبت $(\Delta E/E_1)$ در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۳۲ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



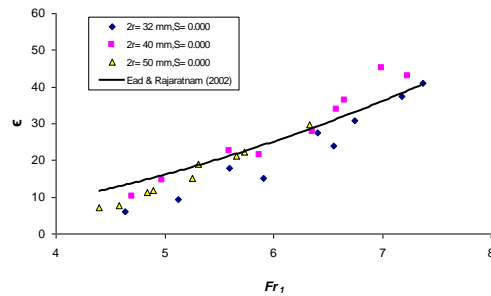
شکل ۱۳- مقایسه افت نسبی انرژی در حالت‌های مختلف به کارگیری شیب منفی، زبری و به صورت هم‌زمان شیب منفی و زبری.



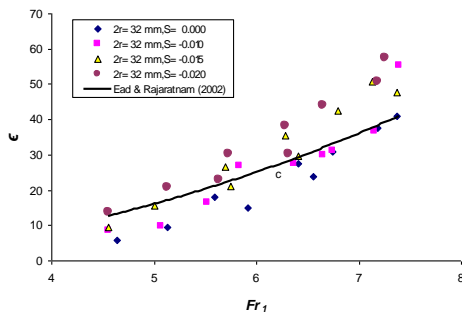
شکل ۱۲- نسبت $(\Delta E/E_1)$ در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۵۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



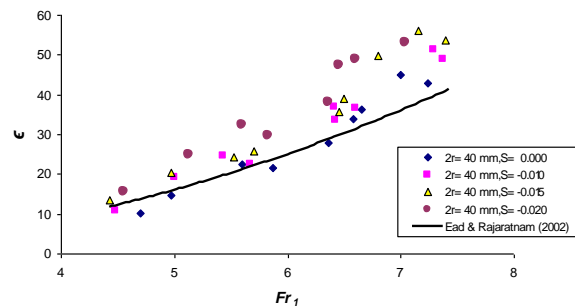
شکل ۱۵- ضریب تنش برشی (ε) در مقابل Fr_1 ، بستر بدون شیب و زبری با قطرهای متفاوت.



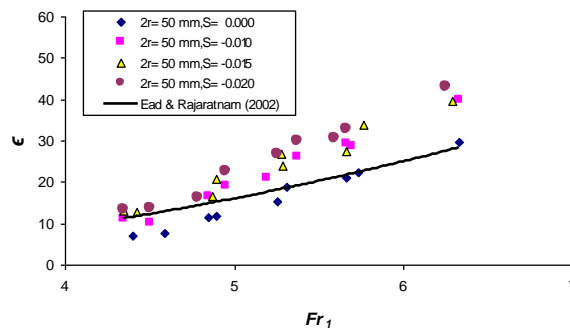
شکل ۱۴- ضریب تنش برشی (ε) در مقابل Fr_1 ، بستر بدون زبری و شیب‌های منفی متفاوت.



شکل ۱۷- ضریب تنش برشی (ε) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۳۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



شکل ۱۶- ضریب تنش برشی (ε) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۳۲ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.



شکل ۱۸- ضریب تنش برشی (ε) در مقابل Fr_1 ، زبری با قطر ۵۰ میلی‌متر و شیب‌های منفی متفاوت.

ایجاد می‌گردد که این میزان کاهش، در اعداد فرود بالاتر و زبری‌های بزرگتر نمایان‌تر است (بیشترین مقدار آن در زبری با قطر ۵۰ میلی‌متر، شیب ۰/۰۲- و عدد فرود اولیه ۶/۲۵، تقریباً ۲۸ درصد تعیین گردید). همچنین از سوی دیگر کاهش قابل توجهی در طول نسبی پرش هیدرولیکی حاصل می‌گردد که این کاهش با افزایش عدد فرود اولیه افزایش می‌یابد (بیشترین کاهش

نتیجه‌گیری کلی

به‌کارگیری زبری‌های کنگره‌ای شکل بر روی شیب معکوس، باعث ایجاد یک تلاطم مضاعف و امواج غلتان خلاف جهت جریان شده که به سمت میانه پرش کشیده می‌شود و بر روی پارامترهای پرش هیدرولیکی، تأثیر به‌سزایی می‌گذارد، لذا در این راستا کاهش قابل توجهی در نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت کلاسیک

مربوط به شیب 0.02 - و در محدوده $0.54 \leq r/D_1 \leq 0.82$ ، به ازای عدد فرود اولیه ۶ تا $7/34$ به طور میانگین ۵۲ درصد و در اعداد فرود اولیه کمتر از ۶، به طور میانگین ۴۶ درصد مشاهده گردید). در این حالت تفاوت چشمگیری در خصوص به‌کارگیری قطرهای متفاوت مشاهده نگردید، در واقع در این شرایط، نسبت (r/D_1) عامل تعیین کننده طول پرش می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- Abaspour A, Hosseinzadeh A, Farsadzadeh D and Sadraddini AA, 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Hydro-environment Research* 3(2):109-117.
- Berami MK and Chamani R, 2006. Hydraulic jump in sloping channel: sequent depth ratio. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(10):1061-1068.
- Carollo FG and Ferro V, 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 133: 989-999.
- Chow VT, 1964. *Open Channel Hydraulics*, New York, McGraw-Hill Book Co. NY. Inc. 680 p.
- Demetriou JD, 2010. A mechanical energy losses comparison in inclined hydraulic jump over a thin wall and a step. *Journal of Hydrodynamic* 22: 687-691.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 128: 656-663.
- Elsebaie IH and Shabayek SH, 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *Civil and Environmental Engineering* 10: 40-50.
- Hager WH, 1992. *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Kluwer Academic Publishers. 288 p.
- Khaddar, MHA and Rajagopal S, 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. *Irrigation and Power* 29: 77-82.
- Kindsvater CE, 1944. The hydraulic jump in sloping channel transactions. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 109:1107-1120.
- Mccorquodale JA, 1994. Hydraulic jump on adverse slope. *Journal of Hydraulic Research* 32:119-130.
- Mohamed Ali HS, 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 117: 83-93.
- Pagliara S, 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 126: 847-851.
- Pagliara S and Lotti L, 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro- environment Research* 2:29-38.
- Rajaratnam N, 1967. *Hydraulic Jumps*, Advances in Hydro Science, Academic Press, New York 4:197-280.
- Rajaratnam N, 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transit Engineering Institution Canada* 11:1-8.
- Rand W, 1967. Flow over a dented sill in an open channel. *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers* 9: 135-153.
- Saniee M, 1991. Hydraulic jump in adverse basin slopes. M. Sc. Thesis, University of Tehran. 203 pp.