

تأثیر زبری طبیعی پیوسته بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در رمپ‌های سنگی

محمود فغفور مغربی*^۱ - بهجت میرزنده‌دل^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۱

چکیده

درگذر جریان از رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی که معمولاً با تشکیل پرش هیدرولیکی همراه است میزان قابل ملاحظه‌ای از انرژی آب مستهلک می‌گردد. یکی از راه‌هایی که می‌تواند باعث افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی شود، ایجاد زبری در کف حوضچه آرامش می‌باشد. از طرفی در پایین‌دست رمپ‌ها و شوت‌های سنگی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با افت زیاد انرژی می‌تواند رخ دهد. این سازه‌ها با توجه به اثرات زیست محیطی کم امروزه مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به کمبود مطالعات در این زمینه از این‌رو در این تحقیق اثرات زبری بر مشخصات پرش مورد بررسی قرار گرفت و روابطی برای تخمین برخی پارامترها استخراج گردید. در این پژوهش خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستریهای زبر درشت دانه با زبری‌های یکنواخت در فلووم مستطیلی افقی به عرض ۳۰ سانتیمتر، طول ۱۱ متر، ارتفاع ۸۰ سانتیمتر، نرخ جریان از ۳/۵ تا ۲۹ l/s و اعداد فرود بین ۲/۴۶ تا ۱۷/۷ انجام گرفته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که عمق مزدوج پرش بر روی سطوح زبر نسبت به سطوح صاف کاهش یافته و طول پرش نیز نسبت به بستر صاف بین ۲۸/۵ تا ۴۷ درصد کاهش دارد.

واژه‌های کلیدی: استهلاك انرژی، بستر زبر درشت دانه، نسبت عمق مزدوج، طول پرش

مقدمه

آن و یا به صورت استخراج آب) می‌باشد. مطلوب سازی کامل یک حوضچه 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. از مطالعات انجام شده پرش هیدرولیکی بر بستر زبر و یا بستر موج‌دار می‌توان به مطالعات راجاراتنام (۱۴)، گیل (۷)، هاگ‌هز و فلک (۱۰)، اید و راجاراتنام (۶)، کارولو و همکاران (۵)، پالیارا و همکاران (۱۲)، ایزدجو و همکاران (۲)، الله‌دادی و همکاران (۱)، نصراصفهان‌ی و شفافی بجزستان (۳)، گوهری و فرهودی (۸) اشاره کرد. تا کنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستریهای زبر انجام گرفته است، اما با توجه به اینکه استفاده از سازه‌های استهلاك انرژی با طول کوتاه، بستر زبر و مطابق با شرایط زیست محیطی در مقوله استهلاك انرژی اخیراً مورد توجه قرار گرفته اند و کمبود میزان تحقیقات، لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

پرش روی بستر زبر درشت دانه

پرش هیدرولیکی کلاسیک پرشی است که در یک کانال

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^۳ می‌نامند که به‌طور وسیع توسط پترکا (۱۳)، راجاراتنام (۱۴)، هاگر و برمن (۹)، محمد علی (۱۱)، الحمید (۴) و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در سازه‌های 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 مزدوج 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

۱ و ۲- استاد و کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران،

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: maghrebi@um.ac.ir)

* - نویسنده مسئول:

الف) برای زبری‌های نسبی (۰/۰۲۱ تا ۰/۰۳۱) ≈ 0.3 :

$$J = \frac{y_2}{y_1} = 1.3Fr_1 - 0.3 ; \quad \frac{k_s}{y_1} \approx 0.03 \quad (3)$$

ب) برای زبری‌های نسبی (۰/۰۵۱ تا ۰/۱۱۵) ≈ 0.08 :

$$J = \frac{y_2}{y_1} = 1.22Fr_1 - 0.24 ; \quad \frac{k_s}{y_1} \approx 0.08 \quad (4)$$

ج) برای زبری‌های نسبی (۰/۱۵۶ تا ۰/۴۲۵) ≈ 0.29 :

$$J = \frac{y_2}{y_1} = 1.1Fr_1 - 0.1 ; \quad \frac{k_s}{y_1} \approx 0.29 \quad (5)$$

کارولو و همکاران (۵) با استفاده از یک کانال مستطیل شکل و زبری های طبیعی شن و قلوه سنگ با پنج دانه بندی یکنواخت آزمایشاتی در محدوده دبی ۱۷/۴ تا ۷۳/۱ لیتر بر ثانیه انجام دادند. در این تحقیق ارتفاع زبری معادل قطر میانه (d_{50}) فرض شده است. آنها نشان دادند که اندازه زبری‌ها بر مشخصات پرش، از جمله عمق مزدوج مؤثر است و نهایتاً معادله ۶ را جهت تخمین نسبت عمق مزدوج ارائه نمودند.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + 8 \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(0.8 \left(\frac{k_s}{y_1} \right)^{0.75} \right) \right) Fr_1^2} \right] \quad (6)$$

پالیارا و همکاران (۱۲) پرش هیدرولیکی را روی بستر صاف و زبر با زبریهای یکنواخت و غیریکنواخت و d_{50} در محدوده ۶/۲۶ تا ۴۵/۶ میلی‌متر در یک فلوم مستطیلی شکل افقی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که زبری‌ها باعث کاهش عمق مزدوج و طول پرش می‌گردند. ایشان ضریب پیشنهادی اصلاح مومنتم کارولو و همکاران (۵)، در معادله ۲ را به شکل زیر استخراج نمودند:

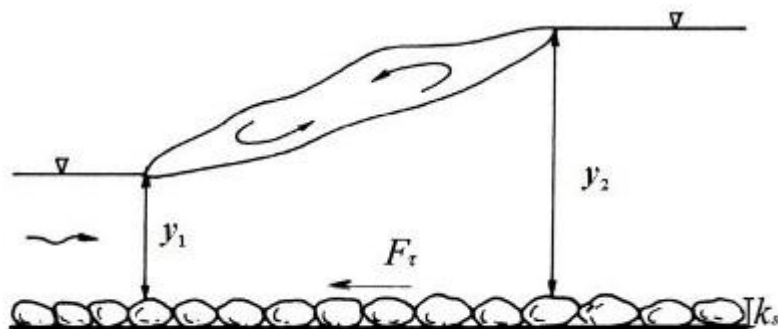
مستطیلی و عریض افقی با کف صاف تشکیل می‌گردد. بلانگر برای عمق مزدوج پرش هیدرولیکی کلاسیک در ناحیه زیربحرانی معادله ۱ را ارائه نمود. اگر زبری‌ها بطور یکنواخت بر روی سطح بستر قرار گرفته باشند، پرش ایجاد شده را پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر می‌گویند. این نوع پرش، شباهتهایی با پرش‌های اجباری ایجاد شده بوسیله بلوکها دارد. تفاوت زبری با بلوک این است که سطح فوقانی آنها کاملاً در زیر عمق اولیه پرش قرار گرفته، از این رو روشی برای کاهش طول و عمق ثانویه پرش است. زبر کردن کف باعث می‌شود که در یک حجم کنترل مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومتی زبری‌ها، کمتر از مومنتم ورودی شود. کارولو و همکاران (۵) با استفاده از اختلاف مومنتم بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی معادله بلانگر را برای بستر زبر به صورت معادله ۲ اصلاح نمودند که در آن β ضریب تنش برشی بستر عددی مثبت و کمتر از یک می‌باشد.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8(1 - \beta)Fr_1^2} \right) \quad (2)$$

شکل ۱ پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر بستر زبر را نشان می‌دهد.

راجاراتنام (۱۴) با استفاده از پارامتر زبری نسبی $k = k_s / y_1$ که در آن k_s ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق جریان ورودی روی تاج زبریها است تحقیقاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که طول غلطابی L_r و طول پرش L_z بر روی بسترهای زبر بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. وی در سال ۱۹۶۸ با توجه به آزمایشات مختلف بر روی ۵ زبری مختلف با مقادیر زبری نسبی ۰/۰۲ تا ۰/۴۳ و اعداد فرود ۳ تا ۱۰ نشان داد که y_2 / y_1 تابعی از Fr_1 و زبری نسبی می‌باشد و نتایج زیر حاصل گردید:



شکل ۱- پرش هیدرولیکی روی بستر زبر، کارولو و همکاران (۲۰۰۷)
Figure 1-Hydraulic jump on rough bed, Carollo et.al (2007)

گردید. در این تحقیق به منظور جلوگیری از انقباض جریان خروجی و برای اینکه عمق اولیه پرش برابر با میزان بازشدگی دریچه باشد یک صفحه فلزی تقویت شده مطابق با شکل ۲ روی دریچه نصب گردیده است. روند انجام آزمایش بدین صورت بود که پس از جایگذاری زبری‌ها به صورت یکنواخت در کف کانال 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، دریچه پایین دست نیز طوری تنظیم می‌گردید تا پرش هیدرولیکی در محل ۲ سانتیمتر از صفحه فلزی تشکیل گردد. این شرایط در مدت زمان کافی برای برداشت داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شد.

در حین آزمایش‌ها وقتی جریان به حالت پایدار رسید، مقدار دبی جریان توسط سرریز لبه تیز کالیبره شده مطابق با شکل ۳ و معادله استخراجی (۹) اندازه‌گیری می‌شد. عمق مزدوج پرش (y_2) نیز در طول آزمایشات توسط یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت $\pm 0.1mm$ اندازه‌گیری گردید. قابل ذکر است که انتخاب شکل، ارتفاع و نحوه آرایش زبریها نتیجه مطالعات انجام شده در پرش بر بستر زبر توسط پالیارا و همکاران (۱۲) و کارولو و همکاران (۵) بود. بر اساس همین مطالعات سطح مبنای اندازه‌گیری‌ها به اندازه $0.2k_s = 0.2d_{50}$ پایین تر از تاج زبری در نظر گرفته شده است. محدوده متغیرهای مورد آزمایش بصورت جدول ۱ می‌باشد.

$$Q = 0.569 (H_d)^{1.575} \quad R^2 = 0.98 \quad (9)$$

که در آن H_d ارتفاع آب روی تاج سرریز برحسب سانتیمتر و Q دبی حجمی بر حسب lit/s می‌باشد.

$$\beta = 0.05 \frac{k_s}{y_1} \left[0.256 \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 1.256 \left(\frac{y_2}{y_1} \right) + 1 \right]; \quad 0 \leq \frac{k_s}{y_1} \leq 1.6 \quad (7)$$

در نهایت طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی با بستر زبر را برای اعداد فرود بین ۲/۲ تا ۱۲ برای هر دو حالت بستر زبر یکنواخت و غیر یکنواخت به صورت زیر ارائه کردند:

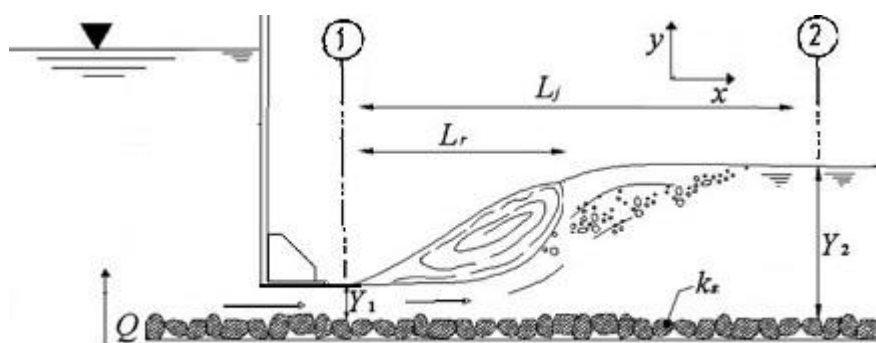
$$\lambda_j = \frac{L_j}{y_1} = \frac{-5000}{Fr_j^{0.0086} * e^{(-0.466/\psi nu)}} + 5000 \quad (8)$$

که در آن ψnu پارامتر غیر یکنواختی و تابعی از توزیع دانه‌ها در ترکیب بستر و بیشترین میزان برآمدگی می‌باشد. تا کنون روی بسترهای زبر درشت دانه مطالعات محدودی صورت گرفته است، لذا برای شناخت بیشتر خصوصیات جریان و تعیین مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین شکل زبری‌ها نیاز به مطالعات بیشتری می‌باشد. از اینرو در این تحقیق سعی شده اثر زبری‌های سازگار با طبیعت و تغییرات عمق اولیه جریان بر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی بستر زبر درشت دانه با دو قطر میانه ۳/۵ و ۱۱ میلی‌متر بررسی شود.

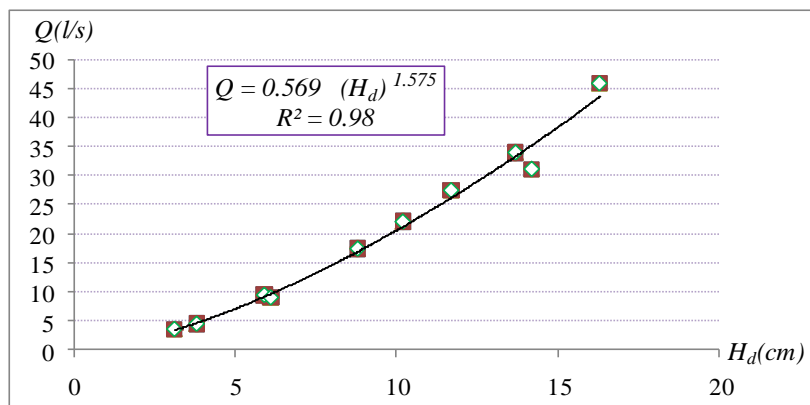
مواد و روش‌ها

انجام آزمایشات و مدل فیزیکی

کلیه آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی صورت گرفته است. شکل ۲ بطور شماتیک مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. در این مدل به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و سه عمق ثابت اولیه پرش شامل ۱، ۱/۵ و ۲ سانتیمتر در طول آزمایش‌ها، از یک دریچه کشویی فولادی استفاده شد. همچنین به منظور تثبیت موقعیت پرش و ایجاد پرش آزاد از یک سرریز لبه تیز هم عرض کانال و نصب شده در انتهای فلوم استفاده



شکل ۲- شماتیک مقطع عرضی مدل
Figure 2-schematic cross section of channel



شکل ۳- نمودار دبی اشکل
Figure 3-Stage-Discharge curve

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

Table 1- Characteristics of channel and Range of application of experimental tests

مشخصات کلی فلوم			مشخصات زبری d_{50}			متغیرهای مورد اندازه گیری				
عرض (cm)	ارتفاع (cm)	طول (m)	Q(l/s)	Fr ₁	A (mm)	B (mm)	C (mm)	طول پرش Length of jump	طول غلطابی Roller Length	عمق متناوب Conjugate depth
۳۰	۴۰	۱۱	۳/۵۰۲ تا ۲۹	۲/۴۶ تا ۱۷/۷	۰	۳/۵	۱۱			



شکل ۴- کانال آزمایشگاهی و نحوه آرایش زبری ها

Figure 4- Laboratory channel and grains arrangement

زبری های مورد استفاده

برای ایجاد زبری ها سنگدانه ها بر روی شیشه به طور یکنواخت چسبانده شده و سپس در کف کانال جایگذاری شده است. بنابراین زبری ها در معرض برخورد مستقیم با جت آب نیستند و از پدیده کاویتاسیون جلوگیری شده است (شکل ۴). سنگدانه های مورد استفاده به عنوان زبری های طبیعی که از بستر رودخانه طبیعی نمونه برداری شده بودند و دارای اشکال تقریباً کروی شکل بوده که در آن ها d_{50} به عنوان بارزترین مشخصه طولی سنگدانه ها لحاظ می گردد. مشخصات بسترهای مورد آزمایش نیز در جدول ۲ عنوان شده است.

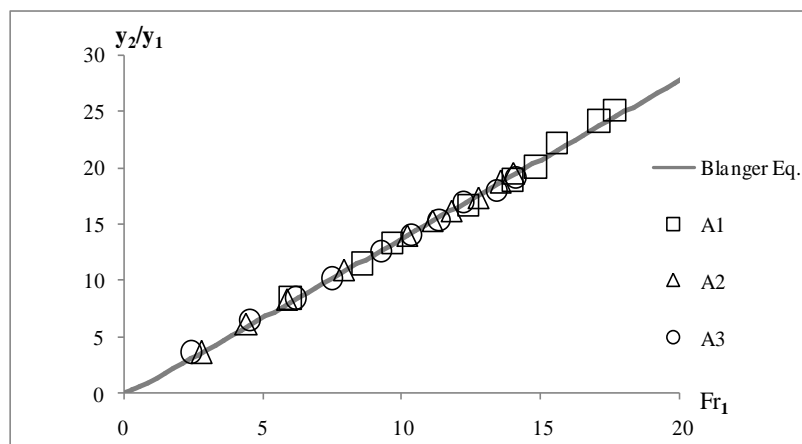
جدول ۲- مشخصات بسترهای مورد استفاده

Table 2- Characteristic data of bed materials

بستر	d50 (mm)	میزان بازشدگی دریچه (cm)		
		1	1.5	2
A	صاف	A1	A2	A3
B	3.5	B1	B2	B3
C	11	C1	C2	C3

آنالیز ابعادی

ویژگی های پرش هیدرولیکی روی بستر زبر متأثر از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می باشد؛ ρ_w : دانسیته جریان عبوری، U : لزجت سینماتیکی جریان عبوری، k_s : ارتفاع زبری های بستر، y_1 : عمق اولیه پرش، v_1 : سرعت در عمق y_1 و L_j : طول پرش هیدرولیکی بر بستر زبر را می توان مهمترین پارامترها در مطالعه حاضر دانست.



شکل ۵- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بستر صاف به ازای عدد فرود اولیه
Figure 5- Measured conjugate depth as function of Froude number

مزدوج به پرش کلاسیک نزدیک است. این یک نکته بسیار مهم در طراحی است، چرا که اگر این عمق نسبت به عمق پایاب کمتر یا بیشتر گردد، پرش ممکن است به پایین دست یا بالادست حرکت کند و از قسمت زبر خارج گردد. لذا نکته مثبت استفاده از این نوع زبری‌ها این است که عمق مزدوج را در حد عمق پایاب نگه داشته و تنها طول پرش را کاهش می‌دهد.

از طرفی کاهش نسبت عمق مزدوج با افزایش زبری از بستر B تا عدد فرود تقریباً برابر با $7/5$ نسبت به یکدیگر تفاوت چندانی ندارند اما با افزایش فرود بالاتر از 10 تفاوت چشمگیری در کاهش نسبت عمق مزدوج در بسترهای زبر دیده می‌شود. توجه شود همانطور که قبلاً اشاره شد $A1$ داده‌های برداشت شده برای بستر صاف با عمق اولیه پرش برابر 1 سانتیمتر می‌باشد و به همین ترتیب $A2$ مربوط به عمق اولیه پرش برابر $1/5$ سانتیمتر و $A3$ برابر 2 سانتیمتر است.

طبق معادله ۱۱ نسبت اعماق متناظر تابعی از Fr_1 و k_s / y_1 می‌باشد. بر این اساس به کمک تحلیل‌های آماری معادله ۱۲ که برای مقادیر زبری نسبی $0/18, 0/23, 0/35, 0/55, 0/73, 1/1$ که در گستره $0.18 \leq k_s / y_1 \leq 1.1$ و اعداد فرود بین 2 تا 17 قرار دارند استخراج شده، معتبر می‌باشد.

شکل ۷ مقایسه بین مقادیر بدست آمده از معادله ۱۲ و مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌شود دارای خطایی در گستره ± 8.8 درصد است.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left[-0.415 \left(\frac{k_s}{y_1} \right) + 0.983 \right] Fr_1 + \left[1.641 \left(\frac{k_s}{y_1} \right)^2 + 0.399 \left(\frac{k_s}{y_1} \right) + 1.158 \right], R^2 = 0.98$$

(۱۲)

با استفاده از قضیه پی باکینگهام برای دستیابی به گروه‌های بی‌بعد خواهیم داشت:

$$f \left(Re, Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{k_s}{y_1}, \frac{L_j}{y_1} \right) = 0 \quad (10)$$

در این معادله بدلیل ماهیت پرش هیدرولیکی و تلاطم زیاد آن از اثرات لزجت و در نتیجه عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. بنابراین معادله فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

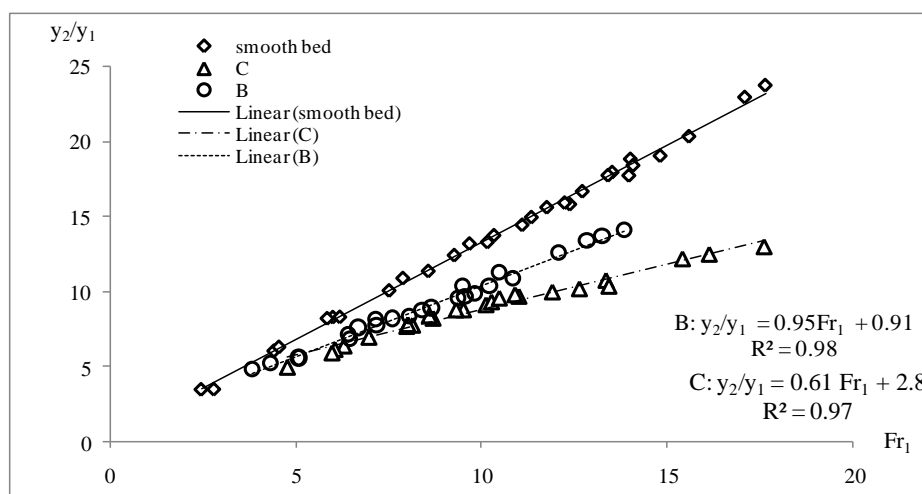
$$\frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f \left(Fr_1, \frac{k_s}{y_1} \right) \quad (11)$$

نتایج

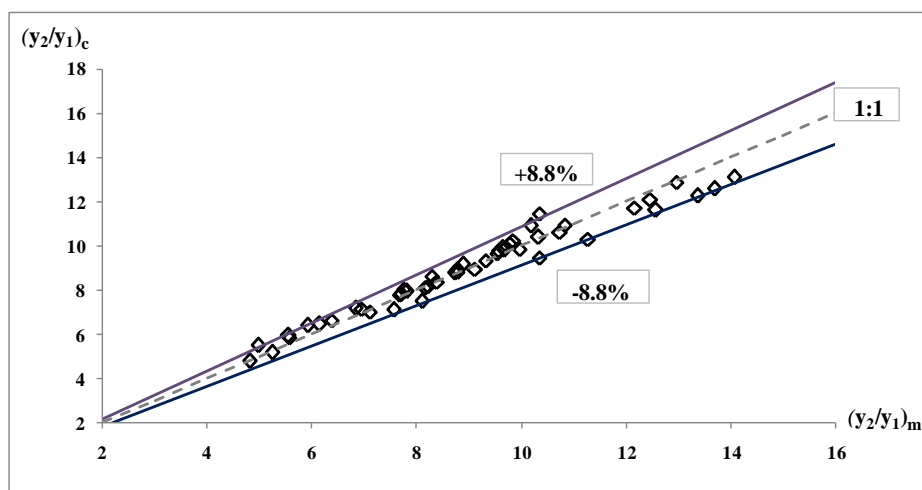
نسبت اعماق مزدوج^۱

مقادیر آزمایشگاهی عمق y_2 به ازای عدد فرود فوق بحرانی در بستر صاف با معادله بلانگر در شکل ۵ مقایسه شده است که نشان می‌دهد از تطابق خوبی برخوردار می‌باشند و تغییرات در عمق اولیه اثری در کاهش نسبت عمق مزدوج ندارد.

همچنین مقادیر آزمایشگاهی عمق مزدوج در بستر زبر برای اعداد فرود مختلف و مقایسه آن با نسبت اعماق متناظر در پرش هیدرولیکی کلاسیک در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است نسبت اعماق مزدوج با زبری کاهش می‌یابد. با نگاهی به نمودارهای ارائه شده می‌توان مشاهده نمود که تفاوت بستر زبر B و بستر زبرتر C از عدد فرود حدود $7/5$ ظاهر می‌شود. در حالی که حتی در اعداد فرود پایین‌تر می‌توان تفاوت بین نسبت اعماق مزدوج در بستر زبر را با بستر صاف مشاهده نمود. نسبت اعماق



شکل ۶- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر به ازای عدد فرود اولیه
 Figure 6- Measured conjugate depth as function of Froude number for rough bed



شکل ۷- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه با مقادیر بدست آمده از معادله (۱۲)
 Figure 7- Comparison between the measured and calculated conjugate depth ratio (Eq. 12).

هیدرولیکی در مطالعه حاضر نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط بین ۲۸/۵ تا ۴۷ درصد کاهش نشان می‌دهد. پارامتر کاهش طول پرش را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد:

$$D_{Lj} = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \quad (13)$$

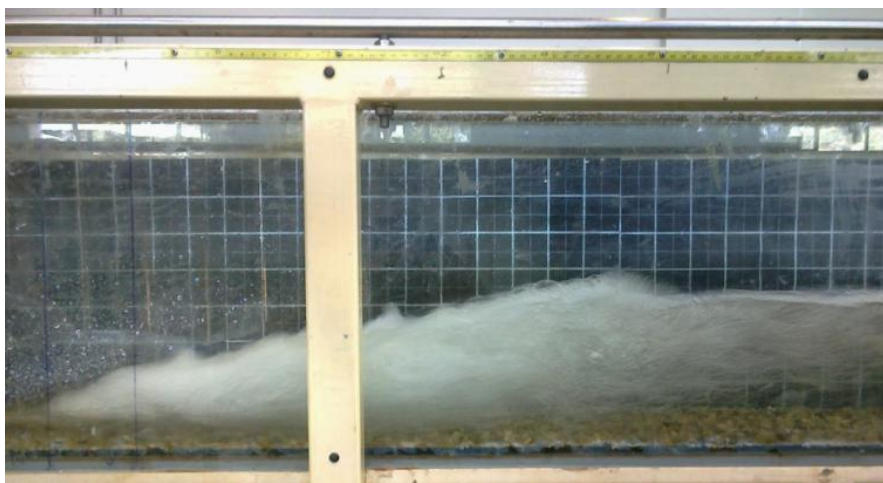
در این معادله، L_j^* طول پرش بر بستر صاف و L_j طول پرش بر بستر زبر می‌باشد. این کاهش طول در پرش هیدرولیکی بدلیل وجود زبری‌ها در بستر و افزایش تنشهای رینولدزی است که باعث می‌شود جریان در طول بسیار کوتاهی نسبت به حالت کلاسیک (بستر صاف) به عمق مزدوج خود برسد.

طول پرش هیدرولیکی

بنا به نظر اکثر محققان از جمله پالیارا و همکاران (۱۲) پایان پرش بخشی است که در آن سطح آب به بالاترین حد خود می‌رسد و فاصله افقی از پای پرش تا این بخش، بعنوان 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.

در شکل ۸ نمایی از پرش هیدرولیکی مدل شده در فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است.

با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مشخص گردید که طول پرش



شکل ۸- نمایی از پرش هیدرولیکی در بستر زبر ۳/۵ میلی‌متر

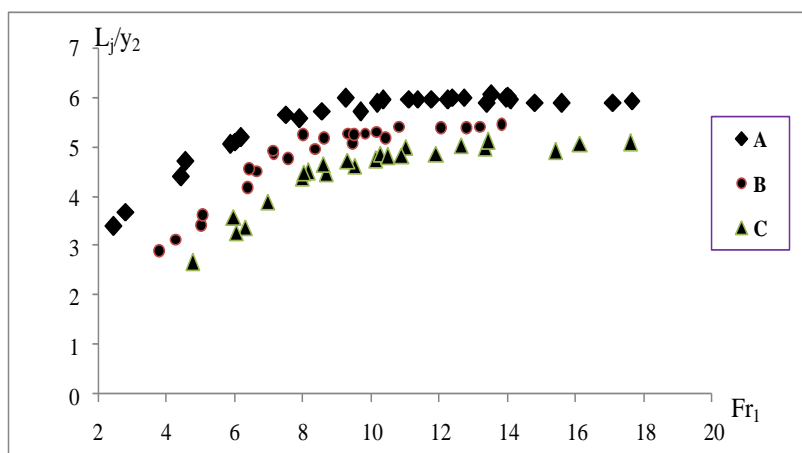
Figure 8- Hydraulic jump on rough bed 3.5 mm

مطابق معادله ۱۱ مقدار L_j / y_1 تابعی از Fr_1 و k_s / y_1 می‌باشد. بر این اساس برای بدست آوردن معادله‌ای منطقی بین این پارامترها از روشهای آماری و آنالیز داده‌ها استفاده کرده که در نهایت معادله زیر برای محدوده‌ی زبری نسبی $0 \leq k_s / y_1 \leq 1.1$ بدست آمد:

شکل ۱۰ مقادیر محاسبه شده از معادله ۱۱ را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را با گستره خطای $\pm 10\%$ نشان می‌دهد.

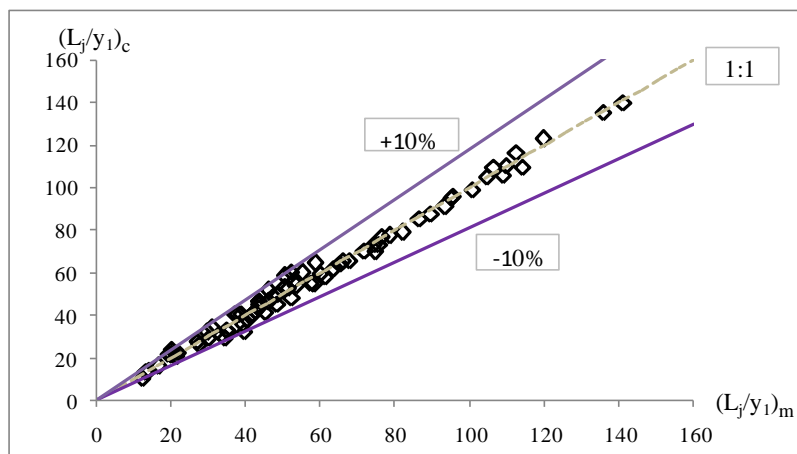
در نتیجه طول پرش کوتاهتر شده و انرژی آن در مسیر کوتاهتری مستهلک می‌گردد. طول بی‌بعد پرش بصورت L_j / y_2 نیز نشان داده می‌شود که این نسبت معمولاً تابعی از Fr_1 در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که از شکل ۹ نیز مشخص است برای اعداد فرود بزرگتر از ۱۰ مقدار طول پرش بی‌بعد شده تقریباً ثابت می‌باشد؛ بنابراین نسبت L_j / y_2 برای اعداد فرود بزرگتر از ۱۰، مستقل از عدد فرود فوق بحرانی و فقط تابعی از زبری ها می‌باشد. همچنین افزایش زبری باعث کاهش طول بی‌بعد پرش گردیده است. در تمامی آزمایش‌ها طول پرش نسبت به بستر صاف کاهش یافته است بدون آنکه زبری‌های کف در معرض مستقیم برخورد با جت آب قرار گرفته باشند.

$$\frac{L_j}{y_1} = \left[-6.084 \left(\frac{k_s}{y_1} \right) + 10.112 \right] (Fr_1)^{0.947} + 54.785 \left(\frac{k_s}{y_1} \right)^2 - 35.196 \left(\frac{k_s}{y_1} \right) - 13.543 \quad R^2 = 0.98 \quad (14)$$



شکل ۹- تغییرات طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود اولیه

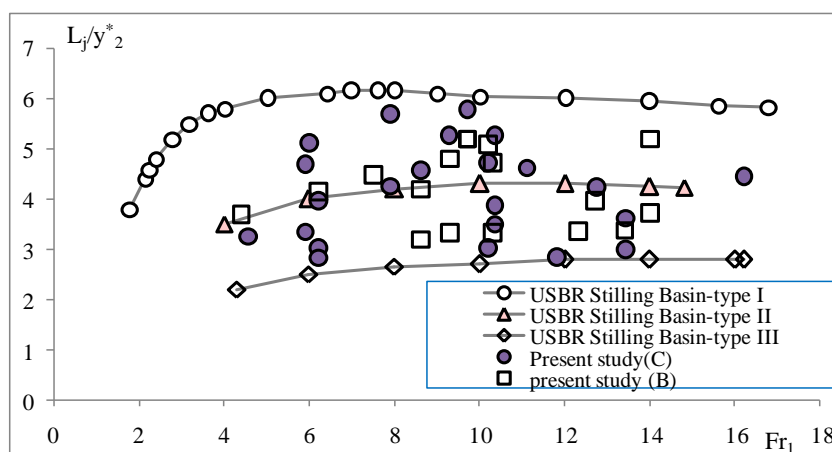
Figure 9- Measured dimensionless length of jump as function of Froude number



شکل ۱۰- مقادیر محاسباتی طول بی بعد پرش هیدرولیکی بر اساس معادله (۱۴) و مقادیر اندازه گیری شده
Figure 10- Comparison between the measured values of the ratio L_j/y_1 and the ones calculated by Eq(14)

شکل نشان داده شده است که بستر زبر مورد مطالعه در این تحقیق، در محدوده حوضچه های استاندارد عمل می کنند.

به منظور نشان دادن پارامتر L_j/y_2 و مقایسه آن با حوضچه های آرامش استاندارد USBR شکل ۱۱ ترسیم گردید. در این



شکل ۱۱- مقایسه طول پرش در حوضچه آرامش با بستر زبر با حوضچه های استاندارد USBR،

(y_2^* عمق مزدوج در پرش کلاسیک متناظر می باشد که توسط معادله بلانگر بدست می آید)

Figure 11- Comparison length of the jump in stilling basins with rough bed with standard USBR

(y_2^* Is conjugate depth in classic jump by Blanger equation)

حالت کلاسیک بین ۲۸/۵ تا ۴۷ درصد کاهش دارد و این به معنای کاهش طول حوضچه آرامش در حالت بدون زبری کف می باشد. کاهش طول پرش مربوط به گردابه تشکیل شده بین خلل و فرج زبری ها و اصطکاک کف می باشد که به علت استهلاک انرژی عمق اولیه در طول کوتاهی از مسیر به مقدار عمق مزدوج می رسد. روابطی نیز برای تخمین نسبت عمق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی در این نوع حوضچه بدست آمد. نسبت L_j/y_2 برای اعداد فرود بزرگتر از ۱۰، مستقل از عدد فرود فوق بحرانی و فقط تابعی از زبری ها

نتیجه گیری کلی

در این تحقیق تأثیر زبری های مصنوعی پیوسته بر ویژگی های پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت، که خلاصه نتایج آن در ادامه ذکر می گردد.

اعماق اندازه گیری شده نشان داد که مقدار آن با افزایش زبری نسبت به پرش کلاسیک کاهش می یابد. همچنین تغییرات عمق اولیه جریان تأثیری در کاهش نسبت عمق مزدوج و طول بی بعد پرش هیدرولیکی ندارد. طول پرش هیدرولیکی در این روش نسبت به

می‌باشد. همچنین افزایش زبری باعث کاهش طول بی بعد پرش گردیده است.

منابع

- 1- Allah Dadi, K., Kazemian, A., and Shafae Bajestan, M. 2008. Experimental investigation of the effect of roughness on the conjugate depths and the length of rolled hydraulic jump in stilling basins. 3rd Conference of Iran Water Resources Management, Tabriz, Iran. (In Persian)
- 2- Izadjo, F., Shafae Bajestan, M., and Bina, M. 2004. Characteristics of hydraulic jump on the bed with trapezoidal wave form. *J. of Agriculture* 27:107-122. (In Persian)
- 3- Nasr Esfhani, M., and Shafae Bajestan, M. 2012. Characteristics of hydraulic jumps on reverse step with artificial roughness. *J. of Water and Soil* 26(4). (In Persian)
- 4- Alhamid, A. A. 1994. Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins. *Transaction on Ecology and the Environment*, Vol. 8:39-46.
- 5- Carollo, 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).
- 6- 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).
- 7- Gill, M. A. 1980. Effect of boundary roughness on hydraulic jump. *Water Power and Dam construction*: 22-24.
- 8- 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.
- 9- Hager, W. H., and Bremen, R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths ratio. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 27(5): 566-570.
- 10- Hughes, W. C., and Flack, J. E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 110(12): 1755-1771.
- 11- 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.
- 12- Pagliara, S., Lotti, I., and Palermo, M. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structure. *Journal of Hydro-Environment Research*: 29-38.
- 13- Peterka, A. J. 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Engineering Monograph* 25. US Bureau of Reclamation: Denver, Col.
- 14- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transactions of the Engineering Institute of Canada*, 11(A-2): 1-8.



The Effect of Continuous Natural Roughness on *hydraulic jump* Characteristics on The Stone Ramps

M. F. Maghrebi^{1*}-B. Mirzendehtel²

Received: 20-01-2014

Accepted: 22-06-2015

Introduction: The hydraulic jump happens when flow transfers from supercritical regime to subcritical regime. The hydraulic jump on smooth bed is called the classic hydraulic jump. One way to increase the energy dissipation in a hydraulic jump is to roughen the bed. Elements including stabilizers and baffle blocks are commonly used as the energy dissipators in stilling basins to stabilize the location and decrease the length and conjugate depths of the hydraulic jumps. If roughness elements are placed uniformly on the bed and orthogonal to the flow direction, the formed jump is addressed as the hydraulic jump on rough bed. Recently, implementing short energy dissipators and environment friendly rough beds have attracted attention and justify more research in these fields. Recent studies have addressed hydraulic jump on rough beds ([14], [5], and [12]). Relative roughness parameter first defined by Rajaratnam to investigate the jump characteristics and other researchers then used this parameter to investigate the characteristics of jump on rough bed. In this research, similar experiments to Pagliara et al (5) are designed to study continuous and natural rough beds.

Materials and Methods: All the experiments have been arranged and carried out in the hydraulic laboratory of Ferdowsi University, Mashhad Iran. Hydraulic jump characteristics were measured in a horizontal rectangular flume, 0.30 m wide, 0.50 m deep, and 11 m long, with smooth glass side walls. The rough bed was simulated by gluing a layer of uniform gravel material with middle diameter 3.5mm and 11mm on a glass plate which was placed on the flume, throughout its length. In the physical model, to simulate a supercritical flow with three constant initial depths including 1, 1.5 and 2cm, a steel sluice gate is installed. Furthermore, to stabilize the location of hydraulic jump and create a free-surface jump, a sharp-crested weir with the same width as the channel width is installed at the end of the flume. Water contraction usually occurs after the sluice gate is avoided by a steel plate welded on the sluice gate. So, the initial depth y_1 equals the gate opening. According to the experimental procedure, after placing the uniform roughness heights on channel bed, the pump runs and water flows slowly into the flume. Then, discharge increases to reach the desired value and the sluice gate opening is set up to have the hydraulic jump formed at a distance of 2cm ahead of the gate. These circumstances maintain enough for data recording. The parameter d_{50} of gravel particles considered as the most sensible characteristic. The subcritical depth y_2 was measured from the profile survey, where the water surface began to be essentially level.

Results and discussions: In the smooth and rough beds experiments show that variation in initial depth does not have any effect on decreasing the conjugate depths ratio. The conjugate depths ratio decreases as the roughness increases. The difference between conjugate depths ratio of rough beds with middle diameter 3.5mm (B) and 11mm (C) appears when the Froude number exceeds 7.5 and for Froude numbers greater than 10, a significant drop can be observed in the conjugate depths ratio diagrams from rough bed B to C. The horizontal distance between the beginning and end point of a hydraulic jump is considered as the length of the hydraulic jump. Dimensionless length of the hydraulic jump is presented as L_j / y_2 which is usually considered as a function of Fr_1 . For Froude number greater than 10, the dimensionless length of the hydraulic jump is nearly constant. Then, the ratio of L_j / y_2 for Froude numbers greater than 10 seems to be independent of supercritical Froude number and is just a function of roughness. In all experiments the length of the hydraulic jump decreases compared with the smooth bed under conditions that bed roughness is not subjected to water jet.

Conclusions: Experiments demonstrated that in the rough bed by increasing roughness, the conjugated depths ratio decreased compared with the classical hydraulic jump. The variation of initial depth of flow does not have any effect on reducing conjugate depths ratio and dimensionless length of the hydraulic jump. The length of the hydraulic jump in rough beds on average reduced between 28.5% and 47% with respect to the classical hydraulic jump which causes reduction in length of the stilling basin without bed roughness.

Keywords: Roughened Bed, Coarse grained channels, Conjugate depth, Length of jump