

بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی با بسترزبر

کبری نیسی^{۱*}، محمود شفاعی بجهستان^۲، مهدی قمشی^۳ و سید محمود کاشفی پور^۴

* - نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز Kobra.Neisi@Yahoo.com

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۰

چکیده

حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی از جمله سازه‌های مستهلک کننده انرژی است که با ایجاد پرش هیدرولیکی بخش مهمی از انرژی آب را با عمق مزدوج کمتر ولی با طول بیشتری مستهلک می‌کنند. این سازه‌ها در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد فراوانی دارند. از طرفی چون زبری می‌تواند هم باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز و هم طول پرش گردد و میزان تأثیر این ترکیب تاکنون مورد مطالعه قرارنگرفته است، این تحقیق انجام شد. در این مطالعه با انجام آزمایش‌هایی در یک فلوم نسبتاً بزرگ به عرض ۰/۸ و طول ۱۲ متر تأثیر زبری‌های بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی با نسبت بازشدگی ۰/۳۳ و در محدوده اعداد فرود بین ۲ تا ۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی زبر، باعث ایجاد پرش نامتقارن قوی تر نسبت به پرش واگرایی صاف شده، عمق مزدوج را به طور متوسط به میزان ۵۳ درصد کاهش و راندمان پرش را نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط به میزان ۲۵ درصد افزایش داد.

کلید واژه ها: پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، واگرایی ناگهانی، بسترزبر.

Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin

K. Neisi¹, M. Shafai Bejestan², M. Ghomshi³ and S.M. Kashefipoor⁴

- 1- Ph.D. Student, Water Sciences Faculty of Engineering, Shahid Chamran University.
- 2- Professor of Water Sciences Faculty of Engineering, Shahid Chamran University.
- 3- Professor of Water Sciences Faculty of Engineering, Shahid Chamran University.
- 4- Professor of Water Sciences Faculty of Engineering, Shahid Chamran University.

Received: 30 Dec 2012

Accepted: 16 June 2013

Abstract

Stilling basins of sudden expansion are one of the energy dissipater structures which can dissipate most of the kinetic energy of the flow through hydraulic jump. In this structure the sequent depth ratio is less and the jump length is more than in classical jump. Since the roughening on the stilling bed can reduce both sequent depth ratio and jump length and its effect have not been investigated before, this study was conducted. In this study many tests are conducted in a relatively large flume size of 80 centimeter wide and 12 meter length. The sudden expansion ratio was 0.33 and tests were conducted for Froude numbers in the range of 2-10. The final results of this study show that for roughened bed sudden expansion stilling basin, the sequent depth ratio is 53 percent and the jump length was found to be 25 lower than in classical jump.

Key words: Hydraulic jump, Stilling basin, Abruptly expansion, Roughened bed.

مقدمه

پرش هیدرولیکی از جمله روش های استهلاک انرژی جنبشی آب در پایین دست سازه‌هایی چون دریچه ها، سرریزها و تندآبها می باشد. که برای کنترل و محدودکردن آن از سازه ای به نام حوضچه آرامش استفاده می گردد. به منظور عملکرد بهینه حوضچه آرامش لازم است که پرش کاملاً در حوضچه رخ دهد که به عمق آب پایین دست بستگی دارد. اگر به هر دلیلی تأمین عمق مورد نیاز برای وقوع پرش هیدرولیکی کلاسیک میسر نباشد و یا هزینه های حفاری به منظور پایین آوردن کف حوضچه مقرون به صرفه نباشد یکی از راه های حصول اطمینان از تشکیل پرش درحوضچه استفاده از واگرایی مقطع می باشد(هاگر و برمن، ۱۹۹۳). مشکل اصلی حوضچه های واگرا تمایل به جریان نامتقارن می باشد که خود به دو عامل بزرگی منطقه آب ساکن و گستردگی کم جت ورودی بستگی دارد. جریان متقارن فقط زمانی می تواند رخ دهد که نسبت بازشدگی مقطع (نسبت عرض بالادست به عرض پایین دست) بیش از 0.71 تا 0.83 باشد (به نقل هاگر و برمن، ۱۹۹۳). پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با شرایط جریان ورودی که عبارتند از عمق اولیه پرش، عدد فرود جریان ورودی و پنجه پرش (فاصله عمق اولیه پرش از محل تغییر مقطع) توصیف می شود. در مقطع واگرا متغیر اصلی عمق پایاب است و بسته به نسبت عمق مزدوج به عمق اولیه برای هر نسبت بازشدگی و هر عدد فرودی پنجه پرش به سمت بالادست و یا پایین دست انتقال می یابد. پرش در مقاطع واگرای ناگهانی با توجه به موقعیت پنجه پرش که وابسته به عمق پایاب است، به چهار نوع پرش به شرح زیر تقسیم بندی می شود. شکل (۱) انواع این پرش ها را نشان می دهد(هاگر و برمن، ۱۹۹۳).

الف) پرش فرار: پرشی که کاملاً در پایین دست مقطع واگرا یعنی در مقطع عریض اتفاق بیفتد. در این نوع پرش پنجه پرش در پایین دست نقطه ای است که امواج عرضی به دیواره های کانال پایین

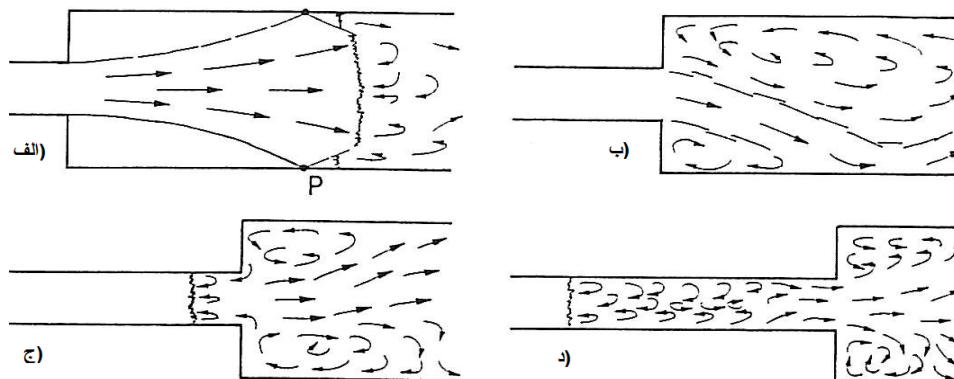
دست (کانال عریض) ضربه می زند.(پایین دست نقطه p در شکل ۱-الف). این نوع پرش شباهت زیادی با پرش کلاسیک دارد. افزایش عمق جریان در این پرش باعث جابجایی پنجه به سمت محل تغییر مقطع شده و در این صورت پرش نوع R شکسته شده و پرش به نوع S تبدیل می شود.

ب) پرش گسسته: در این جهش پنجه بین محل تغییر مقطع واگرا و نقطه ای که امواج عرضی دیواره های کانال پایین دست را قطع می کند قرار دارد. این نوع پرش بیشتر شبیه یک جت بوده و نامتقارن است. جهت تمایل آن به یک سمت دیواره کانال کاملاً تصادفی و ممکن است به سمت چپ و یا راست متمایل شود. این پرش نامتقارن، می تواند نامتقارن پایدار و یا نامتقارن نوسانی باشد. افزایش عمق پایاب باعث جابجایی پنجه به داخل مقطع واگرا شده و پرش را تبدیل به نوع T خواهد نمود.

ج) پرش انتقالی: پرشی است که پنجه پرش در بالادست مقطع واگرا و عمود بر خط مرکزی کانال و بخشی از آن در پایین دست رخ می دهد. همچنین در این نوع پرش غلتاب در کانال بالادست اتفاق می افتد. در این نوع پرش بسته به محل پرش و فاصله آن تا محل تغییر مقطع ممکن است متقارن و یا نامتقارن باشد. هرچه فاصله پنجه پرش تا محل تغییر مقطع بیشتر باشد تمایل به تقارن بیشتر خواهد شد.

د) پرش کلاسیک: پرشی که تمام طول پرش(عمق اولیه و مزدوج پرش) در بالادست محل تغییر مقطع واگرا رخ می دهد.

با توجه به اهمیت شناخت این نوع پرش ها، مطالعات متعددی از دیر باز توسط محققین مختلفی انجام شده است که از جمله می توان به مطالعات هربراند(۱۹۷۳) اشاره کرد. او در مطالعه خود



شکل ۱- انواع پرش در مقطع واگرای ناگهانی الف) پرش فرار ب) پرش گسسته ج) پرش انتقالی د) پرش کلاسیک

چاندرا و لال (۱۹۷۸) پرش واگرا را بررسی کرده، پارامتر بی بعدی به نام پارامتر حساسیت (ψ) معرفی نمود که این پارامتر حساسیت پذیری پنجه پرش نسبت به تغییرات عمق آب پایین دست را نشان می دهد (به نقل از هاگر و برمن، ۱۹۹۳):

$$\psi = \frac{D^* - D_B}{D^* - 1}, \quad 0 < \psi < 1 \quad (7)$$

هاگر و برمن (۱۹۹۳) با در نظر گرفتن پارامتر فوق برای یک نسبت مشخص $B=0.33$ نشان دادند که معادله منحصر به فردی به صورت معادله (۸) بین ψ و X_1 (فاصله بین پنجه پرش تا محل تغییر مقطع) وجود دارد:

$$\psi = f(B) [1 - tgh(1.9X_1)] \quad , \quad X_1 = \frac{x_1}{L_r^*} \quad (8)$$

آنها نشان دادند که $f(B) = 1 - \sqrt{B}$ و برای نسبت فوق و زمانی که پنجه در محل تغییر مقطع رخ می دهد ($x_1 \rightarrow 0$) ، $\psi = 0.423$ می باشد. این پارامتر نشان دهنده حساسیت جابجایی محل پنجه نسبت به تغییرات عمق پایاب می باشد. هرگاه پرش دارای مقدار کم x_1 و یا نسبت کم B باشد پرش پایدارتر و مقدار ψ به یک نزدیک می شود ولی اگر کانال منشوری باشد ($B=1$) مقدار ψ برابر با صفر خواهد شد. بنابراین اگر پرش از نوع S باشد به عبارت دیگر اگر پنجه پرش در محل تغییر مقطع رخ دهد ($x_1 \rightarrow 0$) ، آنگاه $\psi = 1 - \sqrt{B}$ حاصل شده و برای هر نسبت بازشدگی برابر یک عدد ثابت خواهد شد.

از آنجا که ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. در گذشته سعی شده به منظور کاهش هزینه های اجرایی با ایجاد تمهیداتی، پرش و به تبع آن طول حوضچه آرامش کاهش داده شود. از جمله این تمهیدات در نظر گرفتن بلوک می باشد. وجود بلوک در مقابل جریان آب باعث جداشدگی جت ورودی و استهلاک بیشتر انرژی می گردد. اما از آنجا که این بلوک ها مستقیماً در برابر جت ورودی قرار می گیرند نه تنها از نظر سازه ای باید مقاوم باشند بلکه در سرعت جریان ورودی بیش از ۱۷ متر بر ثانیه باعث پدیده کاویتاسیون می گردند، (پترکا، ۱۹۷۸). با توجه به مشکلات کاربرد بلوک ها، زبری بستر می تواند جایگزین مناسبی برای کاهش مشخصات پرش باشد. زبری ها در واقع المان هایی هستند که در کف کانال به گونه ای قرار خواهند گرفت که ممانعتی در برابر جریان ایجاد نمی نمایند. سطح فوقانی زبری ها می بایست کاملاً در زیر عمق اولیه پرش و هم تراز کف کانال بالادست باشد. وجود زبری های کف باعث می شود که در یک حجم کنترل مقدار مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومتی زبریها کمتر از مومنتم ورودی شود، (کارولو و

پرش گسسته را بر روی بستر صاف مورد بررسی قرارداد و معادله (۱) را برای پیش بینی اعماق مزدوج ارائه کرد:

$$D_B = D^* \cdot \sqrt{B} \quad (1)$$

که در این معادله D_B : نسبت اعماق مزدوج در کانال واگرا، نسبت بازشدگی مقطع $B = \frac{b_1}{b_2}$ و D^* : نسبت اعماق مزدوج در کانال منشوری است که از معادله معروف بلانگر برای پرش کلاسیک به دست می آید. هربراند (۱۹۷۳) همچنین برای نسبت اعماق مزدوج در کانال واگرا معادله دیگری را نیز ارائه کرده است که در محدوده اعداد فرود بین $3/1$ تا $9/6$ قابل کاربرد است:

$$D_B = \sqrt{2BF_{r1}} - \frac{B}{2} \quad (2)$$

متین و همکاران (۱۹۹۷) معادله بلانگر را برای مقطع واگرایی ناگهانی با بستر صاف با در نظر گرفتن ضریب اصلاحی K_s به صورت زیر تعریف نمودند. این معادله برای تمام انواع پرشهای واگرا با هر نسبت بازشدگی صادق است.

$$D_B = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8E_1^2} \right), \quad E_1^2 = \frac{F_{r1}^2}{K_s} \quad (3)$$

این ضریب مطابق با معادله (۴) به مشخصات مقطع واگرایی ناگهانی و نسبت اعماق مزدوج بستگی دارد.

$$K_s = \frac{(1 - D_B)}{B(B - D_B)} \quad (4)$$

عبدالمتین و همکاران (۲۰۰۸) با مطالعه پرش نوع S رابطه زیر را برای ضریب اصلاحی فوق ارائه دادند:

$$K_s = 1 + 4.243 \left[\log\left(\frac{1}{B}\right) \cdot \log F_{r1} \right] \quad (5)$$

اگر $B=1$ باشد آنگاه $K_s=1$ و $E_1 = F_{r1}$ و معادله (۳) به معادله معروف پرش (بلانگر) تبدیل می شود (الحمید، ۲۰۰۴). الحمید (۲۰۰۴) نیز با مطالعه پرش گسسته در نسبت های مختلف بازشدگی 0.67 ، 0.5 و 0.33 معادله ای را برای پارامتر K_s ارائه داد:

$$K_s = \frac{1}{[1 + 0.25 \ln(B)]^{(1 + \ln(F_{r1}))}} \quad (6)$$

تنوری تحقیق

تنوری پرش واگرای ناگهانی با بستر زبر

طرح پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای ناگهانی با بستر زبر در شکل (۲) نشان داده شده است. اگر در معادله مومنتم فرض شود که توزیع فشار هیدرواستاتیک، توزیع سرعت یکنواخت، مقاومت ناشی از هوا ناچیز و همچنین از اصطکاک دیواره ها صرف نظر شود می توان نوشت (عبدالمتین و حسن، ۲۰۰۹):

$$F_1 + F_e - F_2 - F_f = \frac{\gamma}{g} \cdot Q \cdot (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (۱۳)$$

که در آن F_e : نیروی فشاری وارد بر دیواره های مقطع واگرا، F_1 و F_2 : نیروی فشار هیدرواستاتیک در مقاطع قبل و بعد از پرش و F_f : نیروی اصطکاک در کف کانال هستند. اگر در معادله فوق $F_f = \frac{1}{2} \gamma (b_2 - b_1) y_1^2$ و $F_e = \frac{1}{2} \epsilon \gamma b_1 y_1^2$ باشد، آنگاه معادله (۱۳) به صورت زیر حاصل می شود:

$$D_{BR}^3 - D_{BR} [B(2F_{r1}^2 + 1 - \epsilon) + e^2(1 - B)] + 2F_{r1}^2 B^2 = 0 \quad (۱۴)$$

که در آن $D_{BR} = \frac{y_{2BR}}{y_1}$ ، $B = \frac{b_1}{b_2}$ و $e = \frac{y_e}{y_1}$ (نسبت عمق در محل تغییر مقطع به عمق اولیه پرش) و ϵ : ضریب اصطکاک می باشد. اگر پرش در محل تغییر مقطع رخ دهد (پرش از نوع S)، آنگاه $e = 1$ و معادله (۱۴) به صورت زیر اصلاح خواهد شد:

$$D_{BR}^3 - D_{BR} [B(2F_{r1}^2 - \epsilon) + 1] + 2F_{r1}^2 B^2 = 0 \quad (۱۵)$$

در روابط فوق F_{r1} : عدد فرود جریان ورودی، B: نسبت عرض مقطع اولیه به عرض مقطع ثانویه ($B = \frac{b_1}{b_2}$)، D_{BR} : نسبت عمق ثانویه در مقطع عریض به عمق اولیه پرش در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی زبر می باشد. معادله فوق برای بستر صاف توسط متین و همکاران (۱۹۹۷) بصورت زیر ارائه شد:

$$D_{BR}^3 - D_{BR} [2BF_{r1}^2 + 1] + 2F_{r1}^2 B^2 = 0 \quad (۱۶)$$

همکاران (۲۰۰۷). اولین مطالعات در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر، توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) با استفاده از زبری های ممتد مثلثی صورت گرفت. راجاراتنام (۱۹۶۸) رابطه ای را برای نیروی برشی زبری ها در برابر جریان ارائه داد که در آن ضریب نیروی برشی وابسته به بستر زبر نشان داده شده است. وی نیز با اندازه گیری تنش برشی در طول پرش، مشاهده نمود که تنش برشی در طول پرش کاهش می یابد و بر اساس آزمایش های خود معادله ای بین ϵ و F_{r1} برای بستر صاف به صورت زیر ارائه نمود:

$$\epsilon = 0.0082(F_{r1}^2 - 1)^{1.535} \quad (۹)$$

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) مطالعات آزمایشگاهی بر پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار سینوسی نیم دایره ای انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که بسترهای موج می توانند تا حد قابل ملاحظه ای عمق مزدوج را کاهش دهند. همچنین معادله زیر توسط آنها برای محاسبه ضریب نیروی برشی در بستر زبر ارائه شد:

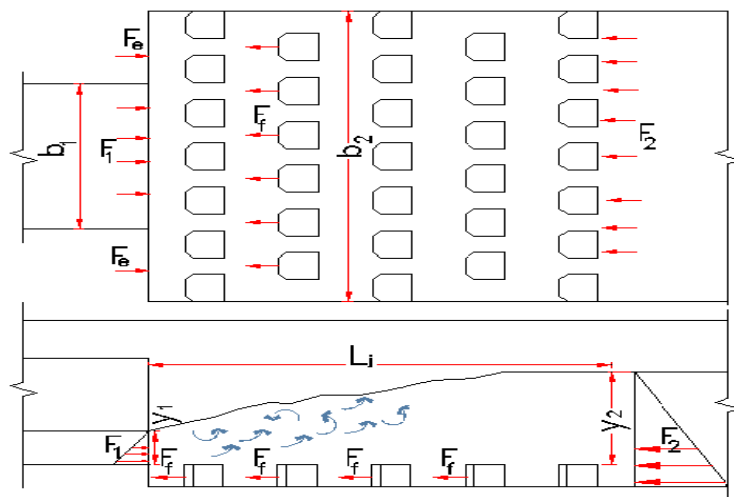
$$\epsilon = (F_{r1} - 1)^2 \quad (۱۰)$$

ایزدجو و همکاران (۱۳۸۳) نیز به بررسی اثر پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجی شکل دوزنقه ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که تنش برش بر روی این نوع بسترها ده برابر تنش برشی بر روی بسترهای صاف می باشد. در این بسترها عمق مزدوج تا ۲۰ درصد کاهش می یابد. آنها همچنین روابط زیر را برای محاسبه عمق مزدوج و ضریب نیروی برشی ارائه کردند:

$$D_R = 1.047 F_{r1} - 0.5902 \quad (۱۱)$$

$$\epsilon = 0.058 F_{r1}^{3.04} \quad (۱۲)$$

همان گونه که مطالعات گذشته در زمینه پرش واگرا نشان داده است پرش نوع S بیشترین تأثیر را در استهلاك انرژی جنبشی نسبت به دیگر انواع پرش های واگرا در مقایسه با پرش کلاسیک دارد و همچنین هرچه نسبت بازشدگی کمتر باشد راندمان پرش بیشتر خواهد بود، از سوی دیگر زبری بستر نیز تأثیر بسزایی در کاهش مشخصات پرش و افزایش تنش برشی دارد. بنابراین در این مطالعه هدف بررسی پرش هیدرولیکی نوع S با نسبت بازشدگی ۰/۳۳ با حضوری زبری و تعیین میزان تأثیر گذاری زبری بر مشخصات و راندمان پرش واگرا می باشد.



شکل ۲- طرح کلی از پرش انتقالی

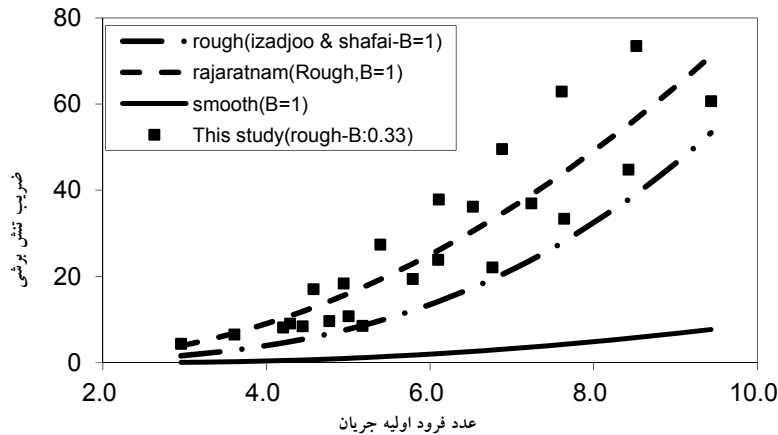


شکل ۳- نمایی از فلوم

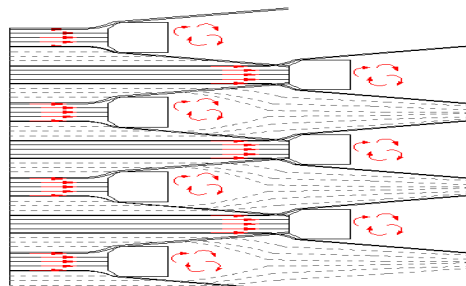
در تمام آزمایش‌ها دریاچه پایین دست همواره به گونه‌ای تنظیم می‌شد که عمق اولیه پرش در محل تغییر پرش رخ دهد. شکل ۳ تصویری از پرش در مقطع واگرای ناگهانی زبر را نشان می‌دهد. به منظور زبر کردن بستر از زبری‌های مصنوعی ناپیوسته‌ای با آرایش زیگزاگ ۷-۶-۷ با فواصل عرضی ۷/۵ و فواصل طولی ۱۵ سانتی‌متر در طول ۲/۴۵ متر از فلوم با تراکم تقریباً ۱۰/۴ درصد استفاده شد. این نوع آرایش، تراکم و ارتفاع زبری‌ها نتیجه مطالعات کاظمیان‌زاده و شفاعی بجنستان (۱۳۸۷) و الله دادی و همکاران (۱۳۸۷) می‌باشد. شکل زبری‌ها نیز براساس مطالعات شفاعی بجنستان و نیسی (۱۳۸۷) به صورت شش ضلعی می‌باشد. اولین ردیف از زبری‌ها مطابق با مطالعات محمدعلی (۱۹۹۱) به اندازه ارتفاع زبری‌ها از محل تشکیل عمق اولیه پرش (که در این پژوهش در محل تغییر مقطع بوده است) کارگذاری شد. به منظور

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که بیان شد هدف این مطالعه بررسی مشخصات پرش نوع S در کانال واگرا با نسبت بازشدگی ۰/۳۳ با حضور زبری می‌باشد. برای این منظور آزمایش‌هایی در فلومی به طول ۱۲، عرض ۰/۸ و ارتفاع ۰/۷ متر از جنس شیشه و پلاستیکی گلاس انجام شد. به منظور تشکیل پرش و ایجاد جریان فوق بحرانی از دریاچه کشویی استفاده گردید. به منظور جلوگیری از انقباض خطوط جریان خروجی از دریاچه و همچنین اینکه عمق اولیه پرش با بازشدگی دریاچه برابر باشد شکل بالادست دریاچه به صورت نیم دایره بوده است. در پایین دست فلوم به منظور تثبیت موقعیت پرش از دریاچه کشویی دیگری استفاده شد. طبق مطالعات الحمید (۲۰۰۴) و متین و همکاران (۱۹۹۷) از آنجا که پرش نوع S بیشترین استهلاک انرژی را ایجاد می‌نماید بنابراین



شکل ۴- مقایسه ضریب تنش برشی در بستر صاف و بستر زبر



شکل ۵- رفتار خطوط جریان در برخورد با زبری

ثابت $(B=0/33)$ ، این ضریب به عدد فرود اولیه وابسته است. در این شکل ضریب تنش برشی نیز برای بستر صاف و بستر زبر منشوری (غیر واگرا)، نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود تنش برشی در بستر زبر با مقطع واگرای ناگهانی با افزایش عدد فرود اولیه افزایش می یابد. در واقع در اعداد فرود پایین عمق جت ورودی روی زبری بیشتر شده و آرایش خطوط جریان در برخورد با زبری ها برهم خورده و تاثیر گرداب های پشت زبری ها در اتلاف انرژی کمتر می گردد. همین امر در اعداد فرود پایین باعث کاهش تاثیر زبری ها در ایجاد تنش برشی خواهند شد. شکل ۵ رفتار خطوط جریان در اثر برخورد با زبری ها را نشان می دهد. بین ضریب تنش برشی و عدد فرود اولیه جریان رابطه ای نمایی مشابه رابطه (۱۷) موجود است:

$$\varepsilon = a F_{r1}^b \quad (17)$$

مقادیر ضرائب معادله فوق، در جدول (۱) آمده است.

ایجاد واگرایی در کانال، می توان کانال را به صورت متقارن (تنگ شدگی در دو طرف کانال) و یا نامتقارن (تنگ شدگی در یک طرف کانال) واگرا نمود. به منظور ایجاد مقطع واگرای متقارن از جعبه هایی از جنس پلاکسی گلاس با طول ۱۲۰، عرض ۲۷ (به منظور ایجاد نسبت بازشدگی $0/33$) و ارتفاع ۶۰ سانتی متر در دو طرف مقطع استفاده شد. در هر مرحله از آزمایش ها با تنظیم بازشدگی دریچه، پمپ روشن شده، دبی جریان به تدریج افزایش یافته تا به دبی مورد نظر برسد. سپس دریچه پایین دست به گونه ای تنظیم می گردید که پرش در محل تغییر مقطع رخ دهد. پس از پایداری شرایط مقدار دبی جریان به وسیله دبی سنج اولتراسونیک قرائت شده همچنین به منظور برداشت عمق ثانویه از عمق سنج دیجیتالی استفاده گردید.

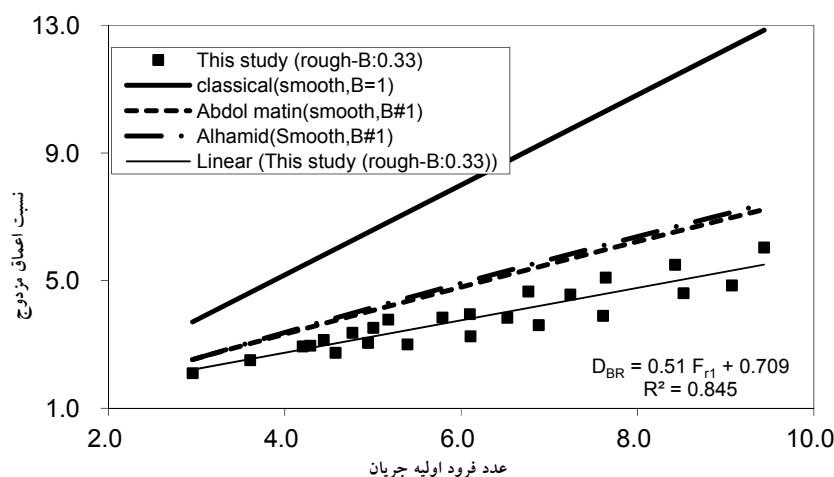
نتایج و بحث

ضریب تنش برشی

به منظور بررسی اثر زبری بر میزان تنش برشی بستر با توجه به معادله به دست آمده از تئوری تحقیق مطابق با معادله (۱۵) و داده های آزمایشگاهی، ضریب تنش برشی محاسبه شد. همان گونه که در شکل ۴ دیده می شود برای یک نسبت بازشدگی مقطع

جدول ۱- مقادیر a, b و R^2 در معادله 17

R^2	b	a	
۰/۹۹	۲/۴۶	۰/۲۹۶	راجاراتنام (۱۹۶۸- بستر زبر و مقطع منشوری)
۰/۹۹	۳/۰۴	۰/۴۷۷	ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷- بستر زبر و مقطع منشوری)
۰/۸۸	۲/۶۳	۰/۲۱۱	این مطالعه (بستر زبر و مقطع واگرای ناگهانی)



شکل ۶- مقایسه نسبت اعماق مزدوج

جدول ۲-مقایسه درصد کاهش عمق مزدوج در مقاطع واگرا نسبت به پرش کلاسیک

$\% D$	$\% D$	$\% D$
(مقطع واگرا و بستر صاف)	(مقطع واگرا و بستر صاف)	(مقطع واگرا و بستر زبر)
۳۸/۹	۳۷/۷	۵۲/۶

تشکیل شده در پشت زبری ها می شود، باعث کاهش تأثیر زبری در کاهش نسبت عمق مزدوج شده است.

همچنین با استفاده از معادله (۱۸)، میزان کاهش عمق مزدوج در مقاطع واگرای ناگهانی زبر و صاف نسبت به پرش کلاسیک محاسبه و در جدول (۲) نشان داده شده است.

$$D = 100 \times \frac{y_2^* - y_{2BR}^*}{y_2^*} \quad (18)$$

با توجه به جدول (۲)، مقدار عمده کاهش عمق مزدوج در مقطع واگرای زبر نسبت به پرش کلاسیک از واگرایی مقطع می باشد. همچنین با کاهش عدد فرود اولیه میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج کمتر می شود. در شکل (۷) نسبت عمق ثانویه پرش در مقطع واگرا با و بدون حضور زبری نسبت به عمق ثانویه در پرش

نسبت اعماق مزدوج

مقادیر نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه در مقابل عدد فرود در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین به منظور نشان دادن تأثیر حضور زبری در مقطع واگرا نسبت به مقطع واگرایی با بستر صاف مقادیر تئوری این نسبت با استفاده از معادله های (۳) و (۴) محاسبه و در شکل نشان داده شده است. با توجه به مطالعات عبدالمتین و همکاران (۲۰۰۹) و الحمید (۲۰۰۴) و روابط (۵) و (۶) ارائه شده توسط هریک برای پرش نوع S این نسبت نیز محاسبه و با بستر زبر این مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت.

همان گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه در بستر زبر حوضچه واگرا کمتر از مقدار متناظر آن در پرش کلاسیک می باشد و همچنین نسبت به پرش واگرایی صاف و مطالعات دیگر محققین کمتر می باشد که نشان دهنده تأثیر زبری ها در کاهش نسبت اعماق مزدوج می باشد. فاصله طولی بین زبرها که خود مانع گستردگی گرداب های

معادله (۱۹) قابل محاسبه است (هاگر و برمن، ۱۹۹۳)، مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (۸) رابطه افت نسبی را نسبت به عدد فرود نشان می دهد.

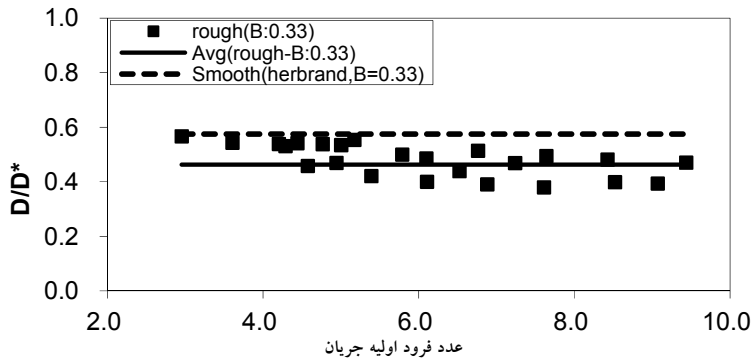
$$\eta^* = \frac{\Delta H}{H_1} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_{r1}}\right)^2 \quad (19)$$

در روابط فوق η^* : افت نسبی پرش کلاسیک، ΔH : استهلاک انرژی (افت انرژی) و H_1 : انرژی در ابتدای پرش است. همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده افت نسبی انرژی در پرش با مقطع واگرایی ناگهانی زبر نسبت به پرش کلاسیک ($B=1$) بیشتر است و در جدول (۳) مقدار متوسط افت انرژی نشان داده شده است. در اعداد فرود پایین تأثیر گرداب ها در افت انرژی کمتر شده و افت نسبی انرژی کمتر می شود.

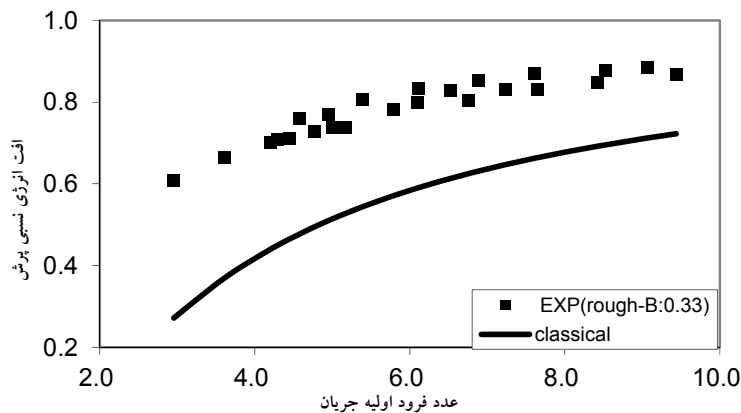
کلاسیک نشان داده شده است. در این شکل مطابق با معادله ارائه شده توسط هربراند (۱۹۷۳) برای پرش نوع S با بستر صاف، در نسبت بازشدگی مقطع ۰/۳۳، این نسبت حدود ۵۷ درصد (طبق معادله ۱) می باشد در حالی که این نسبت برای پرش زبر نوع S در همان نسبت بازشدگی مقطع، به طور متوسط برابر ۴۶/۳ درصد خواهد بود. این مقدار کاهش فقط در اعداد فرود بالاتر از ۴ صورت گرفته در حالی که در اعداد فرود کوچک تر از ۴، به دلیل افزایش عمق جت ورودی روی زبری ها، تأثیر زبری در کاهش نسبت اعماق مزدوج کاهش می یابد.

افت انرژی نسبی پرش

اختلاف انرژی ویژه در مقطع جریان ورودی و انرژی ویژه در مقطع جریان خروجی افت انرژی پرش گفته می شود و اگر با ΔH نشان داده شود، نسبت افت انرژی پرش به انرژی اولیه را افت نسبی ($\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$) گویند. در این مطالعه افت نسبی انرژی محاسبه و با افت نسبی متناظر با آن در پرش کلاسیک که از



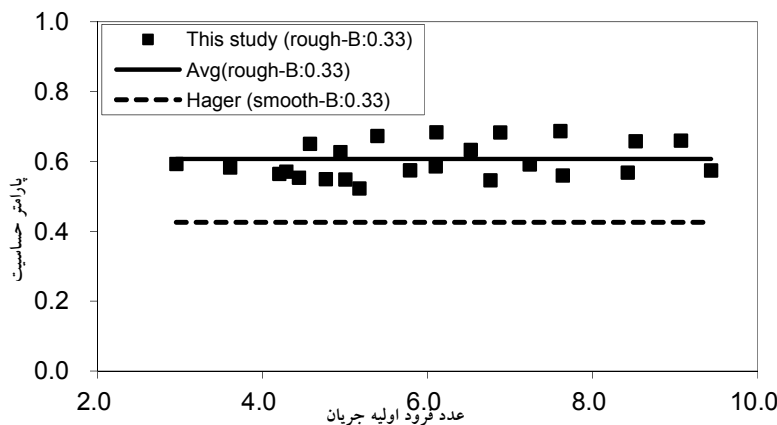
شکل ۷- نسبت عمق مزدوج پرش واگرایی ناگهانی زبر به عمق مزدوج پرش کلاسیک در برابر عدد فرود



شکل ۸- مقایسه راندمان پرش واگرایی ناگهانی زبر با راندمان پرش کلاسیک

جدول ۳- مقایسه متوسط افت نسبی پرش در مقطع واگرای زبر با پرش کلاسیک و پرش واگرای صاف

نوع پرش و نام محقق	% η
پرش کلاسیک (-)	۵۳/۳
واگرای ناگهانی صاف - (عبدالمتین و همکاران، ۲۰۰۹)	۷۰/۷
واگرای ناگهانی صاف - (الحمد، ۲۰۰۴)	۷۰/۲
واگرای ناگهانی زبر - (این مطالعه)	۷۸



شکل ۹- مقایسه پارامتر حساسیت در پرش واگرای زبر و واگرای صاف

باشد پرش نامتقارن قوی تری تشکیل می شود. (به نقل از هاگر و برمن، ۱۹۹۳) با توجه به اینکه در این مطالعه نسبت بازشدگی مقطع ثابت است لذا عامل متغیر وجود زبری است. زبری بستر باعث افزایش مقدار پارامتر حساسیت نسبت به بستر صاف از مقدار $0/423$ به $0/615$ شده و در نتیجه عدم تقارن پرش را بیشتر می نماید.

نتیجه گیری

در این تحقیق پرش هیدرولیکی در بستر زبر در مقطع واگرای ناگهانی با نسبت بازشدگی $0/33$ مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج زیر حاصل شد:

با منظور کردن نیروی برشی حاصل از زبری ها و نیروی حاصل از دیواره های مقطع واگرا در معادله‌ی ممنت، رابطه‌ای برای محاسبه عمق مزدوج در پرش واگرا بر بستر زبر به دست آمد. مقدار ضریب نیروی برشی این رابطه برای یک نسبت بازشدگی مقطع ثابت، با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی به صورت تابعی از عدد فرود نشان داده شد. این ضریب همچنین نشان داد که زبری ها در مقطع واگرا قادر خواهند بود تنش را 12 برابر نسبت به پرش کلاسیک افزایش دهند.

همان گونه که در جدول (۳) ملاحظه می شود حضور زبری در مقطع واگرای ناگهانی حدوداً 8 درصد، راندمان پرش را نسبت به پرش واگرای صاف و حدود 25 درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می دهد.

پارامتر حساسیت ψ

مقدار این پارامتر که حساسیت جابجایی محل پنجه نسبت به تغییرات عمق پایاب را نشان می دهد برای پرش نوع S طبق مطالعات هاگر و برمن (۱۹۹۳) برای اعداد فرود بین $2/5$ تا 12 ، فقط تابع نسبت بازشدگی مقطع و برابر با یک مقدار ثابت خواهد بود. مقدار این پارامتر از صفر تا یک متغیر است، اگر کانال منشوری ($B=1$) و یا مقدار فاصله پنجه از محل تغییر مقطع زیاد باشد مقدار ψ به صفر متمایل شده و پرش متقارنی را تشکیل می دهد اما در کانال واگرا با کاهش نسبت بازشدگی این ضریب افزایش می یابد. در صورتی که پنجه پرش در محل تغییر مقطع باشد (پرش نوع S) در آن صورت پرش تشکیل شده نامتقارن و قوی تر خواهد بود. در این مطالعه مقدار این پارامتر طبق معادله (۸) برابر $0/423$ می باشد. مقدار این پارامتر برای بستر زبر با استفاده از معادله (۷) محاسبه و در شکل (۹) تغییرات آن در برابر عدد فرود اولیه نشان داده شده است. همان گونه که گفته شد پرش نوع S پرشی نامتقارن بوده و هرچه نسبت بازشدگی کمتر

پارامتر حساسیت برای پرش واگرای ناگهانی با بستر زبر محاسبه شده و نشان داده شد که بستر زبر نسبت به همین نوع پرش در بستر صاف باعث نامتقارن تر شدن و قوی تر شدن پرش می گردد.

پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای زبر عمق مزدوج را ۵۳ درصد نسبت به پرش کلاسیک و ۱۵ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی واگرا با بستر صاف می تواند کاهش دهد.

پرش هیدرولیکی واگرا با بستر زبر راندمان پرش را نسبت به پرش کلاسیک به میزان ۲۵ درصد و نسبت به پرش واگرای صاف تقریباً ۸ درصد افزایش خواهد داد که این خود نشان دهنده تأثیر بیشتر واگرایی در افزایش راندمان نسبت به حضور زبری می باشد.

منابع

- ۱- الله دادی. ک. ا. کاظمیان زاده، و م. شفاعی بجستان. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع زبری بر نسبت اعماق مزدوج و طول غلغایی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ایران.
- ۲- ایندجو، ف. م. شفاعی بجستان و م. بینا. ۱۳۸۳. مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجدار دوزنقه ای شکل. مجله علمی کشاورزی جلد ۲۷ (۳): ۱۰۷-۱۲۲.
- ۳- کاظمیان زاده، ا و م. شفاعی بجستان. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آرایش زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز.
- ۴- شفاعی بجستان. م و ک. نیسی. ۱۳۸۷. تأثیر شکل زبری بستر بر طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی. مجله هیدرولیک، انجمن هیدرولیک ایران، ۳ (۳): ۲۹-۴۰.
- 5- Abdulmatin, M. and Rezaul hasan, M. 2009. Experimental study for Sequent depth ratio of hydraulic jump in horizontal expanding channel. Journal of Civil Engineering (IEB, 37):1-9
- 6- Abdulmatin, M., Rabiqul Hasan, M, M. and Ashraful Islam, M.2008. Experimental on hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel. Journal of Civil Engineering (IEB,36): 65-77.
- 7- Alhamid, A. A. 1994. Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins. Transaction on Ecology and the Environment, Vol. 8. DOI: 10.2495/HY 940052.
- 8- Alhamid, A. A. 2004. S-jump characteristics on sloping basins. Journal of Hydraulic research.
- 9- Carolo, F.G , Ferro, V. and Pam Pallone, V. 2007. Hydraulic Jumps on rough beds. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 133 (9): 989-999.
- 10- Ead, S. A., Rajaratnam, N. 2002, Hydraulic Jumps on corrugated Beds. Journal of hydraulic Engineering, ASCE, 128(7): 656-663.
- 11- Hager, W. H. and R. Bremen, 1993. T-jump in abruptly expanding channel. Journal of Hydraulic Research, 31(1):
- 12- Hager, W. H. and R. Bremen, 1989. Classical hydraulic jump Sequent Depths Ratio. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 27(5): 566-585.
- 13- Herbrand, K. 1973, "The spatial hydraulic jump", Journal of Hydraulic Research, 11: 205-218.
- 14- Matin, M.A., Negm, A.M., El-Saiad, A.A. and A. A Alhamid. 1997, Prediction of sequent depth ratio of free hydraulic jump in abruptly enlarged channels, Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology, 2: 31-36.
- 15- 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.

- 16- Peterka, A. J. 1978. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. USBR. Engineering Monograph No.25.
- 17- Rajaratnam, N.1968. Hydraulic Jump on rough bed. Transaction of the Engineering Institute of Canada, 11 (A-2): 1-8.