

بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تأثیر اجزای زبر کف

محمود شفاعی بجستان^{۱*} و کبری نیسی^۲

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۸۸/۴/۲۴

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*مسئول مکاتبه E-mail: m_shafai@yahoo.com

چکیده

در تحقیق حاضر اثر اجزای زبر با شکل‌های مختلف بر تنش برشی بستر و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی افقی بررسی شده است. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۵ متر و عرض ۰/۳ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. برای این منظور اجزای زبر منشوری با مقاطع مختلف مستطیلی، مثلثی، دایره‌ای، لوزی و شش‌ضلعی بررسی شد. در این تحقیق، اجزای زبر بر روی کف فلوم در پایین دست سرریز اوجی به‌نحوی قرار داده شد که سطح فوقانی آنها در زیر جت ورودی آب قرار گرفت. عدد فرود جریان ورودی در محدوده ۴/۵ الی ۱۲/۰ بود. پروفیل سطح آب، طول غلتان و طول پرش هیدرولیکی در هر آزمایش و همچنین سرعت جریان طولی و عمقی در تعدادی از آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق مزدوج به دلیل وجود اجزای زبر کاهش می‌یابد. میزان این کاهش بستگی به عدد فرود و شکل اجزای زبر دارد. بیشترین کاهش عمق مزدوج مربوط به وجود اجزای زبر مثلثی شکل بود. در این تحقیق روابطی برای تعیین عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و ضریب نیروی برشی بستر بر اساس عدد فرود در مورد اجزای زبر ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: اجزای زبر، پرش هیدرولیکی، حوضچه‌ی آرامش، عمق مزدوج

Effect of Roughness Shape on the Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump

M Shafai Bejestan^{1*} and K Nici²

^{1,2}Associate Professor and Former MSc Student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, University of Shahid Chamran Ahwaz, Iran

*Corresponding author: [E-mail:m_shafai@yahoo.com](mailto:m_shafai@yahoo.com)

Abstract

In this study, the effect of shape of roughness elements on the bed shear stress and sequent depth of hydraulic jump have been investigated. Experiments are conducted in a rectangular flume of 7.5 m long and 0.3 m wide in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. For the purpose of this study, prismatic roughness elements with different shapes: rectangular, triangular, circular, lozenge and hexangular were tested. The roughened elements are glued on the bed of flume downstream of ogee spillway in such a way that the incoming water jet is just above the element surface. The incoming Froude number was in the range of 4.5 to 12. During each tests the water surface profile, the roller length and the jump length were measured. In few tests the longitudes and vertical flow velocity were measured. The results indicated that the presence of rough elements can reduce the sequent depth ratio. The amount of reduction would depend on the Froude number and the roughness shape. The triangular element can produce lesser sequent depth ratio. Relations have been presented in this study for the sequent depth of hydraulic jump and shear force coefficient of bed as a function of the Froude number for each roughness shape.

Key words: Hydraulic jump, Roughness elements, Sequent depth, Stilling basin

مقدمه

طول پرش هیدرولیکی را کاهش داده که در نتیجه آن طول حوضچه کاهش یابد. از جمله این تمهیدات می توان به در نظر گرفتن موانع (بلوک) در ابتدا، میانه و انتهای حوضچه آرامش اشاره کرد. بر این اساس حوضچه های مختلفی توسط پیترکا (۱۹۵۸) معرفی شده است. وجود موانع در مقابل جریان آب باعث جداسدگی جت ورودی و استهلاک انرژی بیشتر در نتیجه افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی درگ می گردد. در نتیجه طول پرش و عمق مزدوج کاهش می یابد. این موانع چون بصورت مستقیم در مقابل جت ورودی قرار دارند علاوه بر اینکه باید از نظر سازه ای

پرش هیدرولیکی پدیده ای است که در اثر تغییر رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی اتفاق می افتد و همراه با افت انرژی جنبشی زیادی می باشد. از این رو از این پدیده به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست دریچه های آبیاری، سرریزها و تندآبها استفاده می شود. سازه هایی که وظیفه کنترل و محدود کردن پرش هیدرولیکی را دارند، حوضچه های آرامش می گویند. ابعاد حوضچه های آرامش بستگی به مشخصات پرش هیدرولیکی دارد. به منظور کاهش هزینه های اجرایی این سازه ها، در گذشته سعی شده است تا با ایجاد تمهیداتی

موانع متفاوت بود به طوری که هفت تراکم متفاوت در محدوده بین ۶ تا ۲۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. آل حمید نشان داد که عمق مزدوج در اثر وجود بلوک کاهش می یابد و رابطه ی زیر را ارائه کرد.

$$\frac{y_{2R}}{y_1} = 1.3284 F_1 - 0.7512 \quad [1]$$

در این رابطه y_{2R} عمق مزدوج بر روی بستر زبر می باشد. اید و همکاران (۲۰۰۰) در مطالعه آزمایشگاهی بر روی میدان سرعت در جریان های آشفته در لوله موجدار نیم دایره ای شکل نتیجه گرفتند که سرعت ها در نزدیک بستر بسیار کم است. هم چنین اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) مطالعات آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موجدار سینوسی نیم دایره ای انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که بسترهای موج دار می توانند تا حد قابل ملاحظه ای عمق مزدوج را کاهش دهند. رابطه ی زیر توسط آنها برای محاسبه ی ضریب نیروی برشی ارائه شد:

$$e = (F_1 - 1)^2 \quad [2]$$

ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷) نیز به بررسی اثر پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجی شکل نوزنقه ای پرداختند. نتایج آنها حاکی است که تنش برش بر روی این نوع بسترها ده برابر تنش برشی بر روی بسترهای صاف می باشد. طول پرش هیدرولیکی در این بسترها تا ۵۰ درصد و عمق مزدوج نیز تا ۲۰ درصد کاهش می یابد. آنها همچنین روابط زیر را برای محاسبه عمق مزدوج و ضریب نیروی برشی ارائه کردند:

$$\frac{y_{2R}}{y_1} = 1.047 F_1 + 0.5902 \quad [3]$$

$$e = 0.058 F_1^{3.04} \quad [4]$$

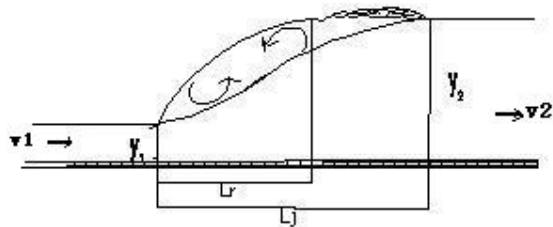
کارولو و همکاران (۲۰۰۷) نیز مطالعاتی بر روی اثر ارتفاع زبری های طبیعی (قلوه سنگ) بر روی

مقاوم باشند، اگر سرعت جریان ورودی بیش از ۱۷ متر بر ثانیه باشد باعث پدیده کاویتاسیون نیز خواهند شد (پیتراکا ۱۹۵۸). عامل دیگری که می تواند باعث کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی گردد، زبری های کف می باشد. راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر انجام داد.

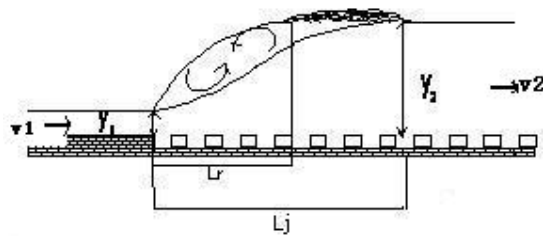
او پارامتر عامل زبری $K = \frac{K_s}{y_1}$ که در آن K_s ارتفاع

زبری و y_1 عمق جریان ورودی است را معرفی کرد. در مطالعه ای که راجاراتنام بر روی بستر با زبری های ممتد مثلثی انجام داد، نشان داد که طول پرش بر روی بسترهای زبر (L_{JR}) به طور قابل ملاحظه ای کمتر از طول پرش بر روی بسترهای صاف (L_J) می باشد. نتایج فوق توسط محققین دیگری چون خاپاوف، میاخالوف و کیسلوف (به نقل از هاگر، ۱۹۹۲)، مورد تأیید قرار گرفته است. لوث هاوزر و اشکیله (به نقل از هاگر، ۱۹۹۲)، نیز بر روی جریان ورودی به سطح زبر مطالعاتی را انجام دادند. آنها نشان دادند که جریان ورودی توسعه یافته که در آن ضخامت لایه ی مرزی برابر با عمق جریان است تلاطم بیشتری دارد. هم چنین نتایج آنها نشان داد که بر روی بستر با اجزای زبر، جریان های فوق بحرانی در طول کمتری به شرایط توسعه یافته می رسند تا بر روی بستر صاف. زیرا اجزای زبر باعث رشد سریع لایه مرزی می شود.

محمدعلی (۱۹۹۱) به مطالعه اثر موانع مکعبی شکل به ابعاد $۱/۶ \times ۱/۶ \times ۱/۶$ سانتی متر بر طول پرش هیدرولیکی پرداخت در این مطالعه اثر طول بستر پوشش شده با مانع و شرایط جریان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات وی نشان داد که طول پرش تابعی از عدد فرود جریان ورودی و طول پوشش شده با مانع می باشد. آل حمید (۱۹۹۴) نیز در مطالعه ای آزمایشگاهی اثر تراکم موانع مکعب مستطیلی به ابعاد $۱/۲ \times ۱/۲ \times ۳$ سانتیمتر را بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد مطالعه قرار داد. فاصله عرضی بین موانع $۱/۲$ سانتیمتر ولی فواصل طولی



الف- بستر صاف



ب - بستر زبر

شکل ۱- مشخصات پرش هیدرولیکی الف) بستر صاف (پرش کلاسیک) ب) بستری با اجزای زبر

در صورتی که کانال مستطیلی با شیب کف ناچیز فرض گردد در آن صورت برای پرش با بستر صاف $F_f \cong 0$ است که پس از ساده سازی رابطه‌ی ۶، رابطه‌ی زیر استخراج می‌گردد:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right) - 2F_1^2 = 0 \quad [7]$$

که y_1 ، y_2 و F_1 قبلاً تعریف شده‌اند. و از حل آن می‌توان رابطه زیر را استخراج کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad [8]$$

برای پرش بر روی بستر با اجزای زبر، مقدار نیروی اصطکاکی را می‌توان از رابطه‌ای که راجاراتنام (۱۹۶۷) به شرح زیر پیشنهاد داده‌است، استفاده کرد:

مشخصات پرش هیدرولیکی انجام دادند. در این مطالعه ۶ نوع اندازه سنگ با اندازه متوسط بین ۰/۴۶ تا ۳/۲۰ سانتیمتر در اعداد فرود بین ۴ تا ۱۲ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آنها نشان داد که زبری‌های طبیعی می‌توانند میزان عمق مزدوج را کم کنند. آنها رابطه زیر را برای برآورد عمق مزدوج ارائه کردند:

$$\frac{y_{2R}}{y_1} = \frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + 8 \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(0.8 \left(\frac{K_s}{y_1} \right)^{0.75} \right) \right) F_1^2} \right] \quad [5]$$

که K_s اندازه اجزای زبر می‌باشد.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که عمده مطالعات انجام شده متمرکز بر بررسی اثر موانع (بلوک‌های مستطیلی) بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بوده است. در خصوص اثر اجزای زبر می‌توان به مطالعه کارولو و همکاران (۲۰۰۷) مربوط به اجزای زبر طبیعی و مطالعات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) مربوط به اجزای زبر ممتد، اشاره کرد. با توجه به منابع مرور شده و در رابطه با اثر شکل‌های مختلف اجزای زبر مصنوعی غیر ممتد بر خصوصیات پرش هیدرولیکی تا کنون مطالعه‌ای صورت نگرفته است. باید توجه شود که در اینجا اجزای زبر به برآمدگی‌هایی اطلاق می‌گردد که زیر جت ورودی آب و نه در مقابل آن قرار دارند. از این رو هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تاثیر شکل‌های مختلف اجزای زبر بر عمق مزدوج و تنش برشی در پرش هیدرولیکی می‌باشد.

تئوری

شکل ۱ نمایی از پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و بستر با اجزای زبر را نشان می‌دهد. در صورتی که رابطه مومنتم بین مقاطع ۱ و ۲ در این شکل نوشته شود:

$$F_1' - F_2' - F_f + F_w = \rho Q (V_2 - V_1) \quad [6]$$

که F_1' و F_2' نیروهای هیدرواستاتیک در مقطع (۱) و (۲)، F_f نیروی اصطکاک، F_w نیروی مؤلفه وزن Γ جرم واحد حجم آب، Q دبی جریان و V_1 و V_2 نیز به ترتیب سرعت جریان در مقاطع ۱ و ۲ می‌باشد.

از آزمایش‌های متعدد نشان دادند که رابطه (۴) صادق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

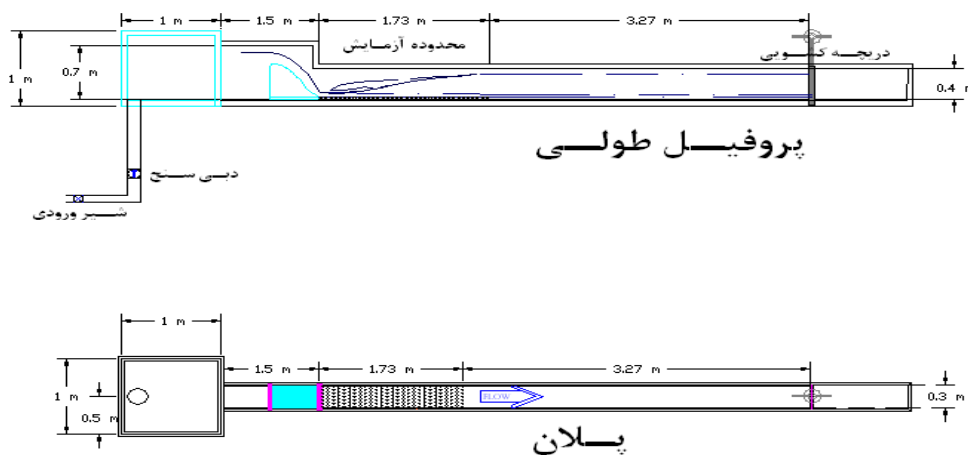
برای رسیدن به اهداف این مطالعه، آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران انجام گرفت. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴ متر از جنس شیشه و پلاکسی گلاس انجام شده است. آب توسط پمپ از مخزن ذخیره به مخزن آرام کننده ابتدای فلوم وارد می‌شود. به منظور تأمین بار آبی لازم برای ایجاد جریان فوق بحرانی از سرریز اوجی استفاده شده است. شکل ۲، پلان و مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

$$F_f = eg \frac{y_1^2}{2} \quad [9]$$

که پس از قرار دادن در رابطه (۶) با همان فرضیات اشاره شده می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{y_{2R}}{y_1}\right)^3 - [1 - e + 2F_1^2] \frac{y_{2R}}{y_1} + 2F_1^2 = 0 \quad [10]$$

با استفاده از رابطه فوق و در صورتیکه e و شرایط جریان ورودی نظیر F_1 و y_1 معلوم باشد، می‌توان مقدار عمق مزدوج بر روی بستر با اجزای زیر را بدست آورد. مقدار e برای بسترهای با اجزای زیر موج جدار دایره‌ای توسط اید و همکاران (۲۰۰۰)، رابطه‌ی ۴ استخراج گردید. همچنین ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) نیز برای بستر با اجزای زیر موج نوزنقه ای پس



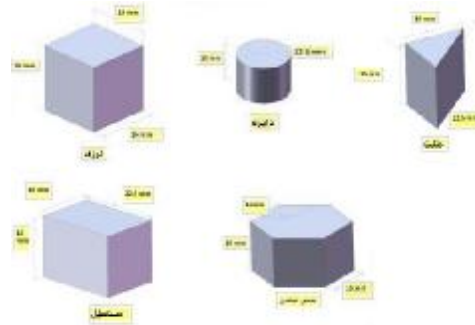
شکل ۲- پلان و مقطع فلوم آزمایشگاهی

هایی به فواصل ۳/۲ سانتیمتر از یکدیگر به طول ۱۶۸ سانتیمتر در کف فلوم بوسیله چسب آکواریوم چسبانده شدند. اجزای زیر آن‌چنان در کف فلوم قرار گرفته بودند که تراز بالای آنها معادل تراز پایین دست سرریز بود بطوریکه لبه‌ی پایین جت ورودی هم‌تراز سطح بالای

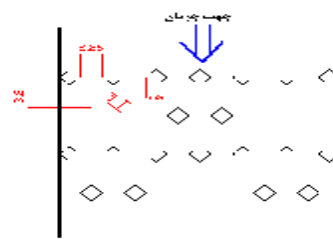
اجزای زیر مورد استفاده از جنس پلکسی گلاس با ارتفاع ۱/۶ سانتیمتر، دارای مقطع عمود بر جریان به شکل‌های مثلثی، لوزی، مربع، استوانه ای و شش ضلعی با عرض (بعد عمود بر جریان) ۲/۲۶ سانتیمتر با کمک نرم افزار اتوکد طراحی و با لیزر، برش داده شده و در ردیف

پریش تا محلی که گردابه‌های برگشتی مشاهده می‌شوند. مسیر گرداب‌ها با استفاده از مواد رنگی و یا از طریق حباب‌های هوا امکان‌پذیر بود. طول پریش نیز فاصله ابتدای پریش تا مکانی که حباب‌های هوا دیگر مشاهده نمی‌شوند و جریان نسبتاً آرام می‌باشد. برای برداشت نیم‌رخ سطح آب از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلیمتر و برای طول غلتاب و طول پریش از خط‌کش با دقت یک میلیمتر استفاده شده است. برای این مطالعه جمعاً ۴۸ آزمایش در محدوده عدد فرود بین ۴/۹ تا ۱۲/۴ انجام گردیده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

اجزای زیر بود. شکل ۳ اجزای زیر آزمایش شده و شکل ۴ نحوه آرایش اجزای زیر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- اجزای مختلف زیر آزمایش شده در این تحقیق



شکل ۴- نحوه آرایش اجزای زیر

نحوه‌ی انجام هر آزمایش بدین صورت بود که پس از نصب اجزای زیر به نحوی که اشاره شد، پمپ روشن و اجازه داده می‌شد تا جریان آب به آهستگی وارد فلوم گردد. در این مدت دریچه پایین دست بسته بود. سپس به تدریج دبی ورودی را اضافه کرده و در همین زمان دریچه پایین دست نیز باز می‌گردید. این عمل آنقدر ادامه داشت تا دبی ورودی به دبی مورد نظر و عمق پایاب نیز به عمق مورد نظر برسد. این شرایط برای مدت زمان کافی برای برداشت داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شد. در طول این مدت نیم‌رخ سطح آب در طول پریش هیدرولیکی، طول پریش و طول غلتاب اندازه‌گیری و ثبت می‌گردید. طول غلتاب عبارت است از فاصله ابتدای

۶/۵۲	۶/۶۴	شش ضلعی	۴۵
۵/۸۲	۷/۵۲۴	شش ضلعی	۴۶
۵/۸۵	۹/۰۳	شش ضلعی	۴۷
۵/۲۳	۱۲/۴	شش ضلعی	۴۸

جدول ۱- نتایج حاصل از این تحقیق

شماره آزمایش	شکل اجزای زیر	F_1	Y_{2R}/Y_1
۱	صاف	۴/۹۲	۶/۵۰۴
۲	صاف	۵/۲۱	۶/۴۷۲
۳	صاف	۵/۵۶	۶/۸۹۱
۴	صاف	۶/۰۰	۷/۳۸۷
۵	صاف	۶/۶۴	۷/۹۱
۶	صاف	۷/۵۲	۹/۰۴
۷	صاف	۹/۰۳	۱۰/۸۲
۸	صاف	۱۲/۴	۱۴/۱۰
۹	لوزی	۴/۹۲	۱۱/۸۶
۱۰	لوزی	۵/۲۱	۸/۳۷
۱۱	لوزی	۵/۵۶	۷/۴۲
۱۲	لوزی	۶/۰۰	۷/۲۳
۱۳	لوزی	۶/۶۴	۶/۴۱
۱۴	لوزی	۷/۵۲	۵/۵۳
۱۵	لوزی	۹/۰۳	۵/۶۲
۱۶	لوزی	۱۲/۴	۵/۰۲
۱۷	مثلث	۴/۹۲	۱۰/۱۴
۱۸	مثلث	۵/۲۱	۸/۰۷
۱۹	مثلث	۵/۵۶	۷/۰۵
۲۰	مثلث	۶/۰۰	۶/۸۰
۲۱	مثلث	۶/۶۴	۶/۲۳
۲۲	مثلث	۷/۵۲	۵/۵۶
۲۳	مثلث	۹/۰۳	۵/۳۹
۲۴	مثلث	۱۲/۴	۵/۱۳
۲۵	مستطیل	۴/۹۲	۱۲/۱۴
۲۶	مستطیل	۵/۲۱	۹/۲۳
۲۷	مستطیل	۵/۵۶	۷/۸۲
۲۸	مستطیل	۶/۰۰	۷/۲۰
۲۹	مستطیل	۶/۶۴	۶/۵۶
۳۰	مستطیل	۷/۵۲۴	۵/۹۷
۳۱	مستطیل	۹/۰۳	۵/۷۲
۳۲	مستطیل	۱۲/۴	۵/۳۰
۳۳	دایره	۴/۹۲	۱۰/۲۵
۳۴	دایره	۵/۲۱	۸/۶۳
۳۵	دایره	۵/۵۶	۶/۹۹
۳۶	دایره	۶/۰۰	۷/۰۶
۳۷	دایره	۶/۶۴	۶/۳۹
۳۸	دایره	۷/۵۲۴	۶/۱۱
۳۹	دایره	۹/۰۳	۵/۵۹
۴۰	دایره	۱۲/۴	۵/۴۴
۴۱	شش ضلعی	۴/۹۲	۱۱/۶۵
۴۲	شش ضلعی	۵/۲۱	۹/۴۲
۴۳	شش ضلعی	۵/۵۶	۷/۸۲
۴۴	شش ضلعی	۶/۰۰	۷/۲۱

نتایج و بحث

نیم رخ سطح آب در بستر با اجزای زیر

به منظور بررسی اثر اجزای زیر مختلف بر نیم رخ سطح آب، شکل ۵ رسم شده است. در این شکل نیم رخ سطح آب بی بعد شده توسط معادلات ۱۱ و ۱۲ مربوط به اجزای زیر، لوزی، دایره ای، مثلثی، مستطیلی و شش ضلعی ترسیم شده است.

$$X = \frac{x}{L_{JR}} \quad [11]$$

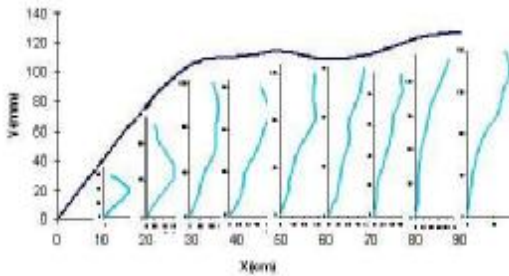
$$Y = \frac{y - y_1}{y_{2R} - y_1} \quad [12]$$

که در این روابط X و Y به ترتیب فاصله از محل شروع پرش و عمق آب می باشد. X و Y به ترتیب طول و عمق بی بعد شده است و L_{JR} طول پرش بر روی بستر با اجزای زیر می باشد. در صورتیکه از بین نقاط بی بعد شده، معادله ای به صورت زیر برآزش داده شود،

$$Y = a(1 - e^{-bX}) \quad [13]$$

در آن صورت ضرائب a, b و همچنین R^2 هر معادله به شرح جدول (۲) خواهد بود:

نشان می دهد. این شکل به خوبی تغییرات سرعت جریان در جهت قائم و نیز کاهش شدید سرعت را در طول پرش نشان می دهند. همان طور که ملاحظه می شود رشد و توسعه لایه مرزی برای اجزای زیر مختلف متفاوت است.



شکل ۶- توزیع قائم سرعت در طول پرش در بستر زیر با زبری مثلث

عمق مزدوج

به منظور بررسی اثر اجزای زیر بر عمق مزدوج و با استفاده از نتایج جدول ۲، مقادیر نسبت y_{2R}/y_1 در مقابل عدد فرود ترسیم گردید. شکل ۷ این نتایج را نشان می دهند. بر روی این شکل‌ها نمودار معادله ۸ مربوط به پرش بر روی بستر صاف نیز ترسیم شده است. هم-چنین رابطه بین نسبت عمق مزدوج و عدد فرود به صورت کلی زیر بر روی هر شکل برآزش داده شده است:

$$\frac{y_{2R}}{y_1} = a' F_1 + b' \quad [14]$$

که مقادیر a' و b' و همچنین میزان همبستگی R^2 رابطه در جدول ۳ برای اجزای زیر مختلف مشخص شده است:

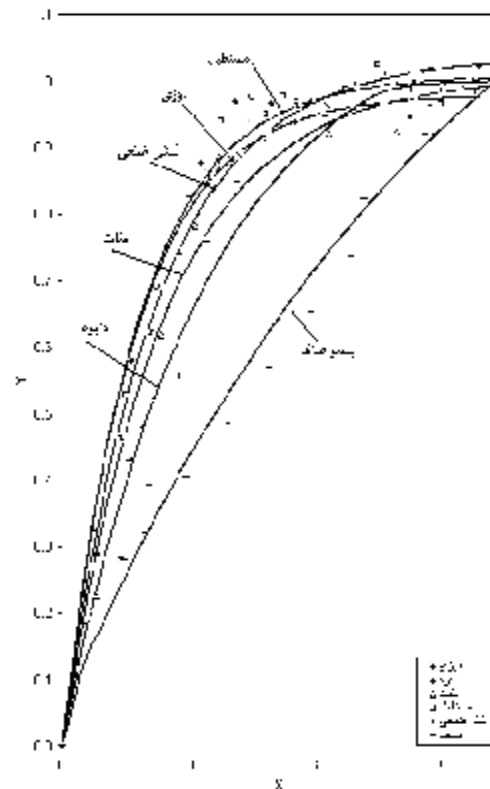
جدول ۳- ضرایب a' ، b' و R^2 معادله ۱۴ برای اجزای زیر مختلف

R^2	b'	a'	نوع زبری
۰/۹۸	۰/۴۳	۰/۹۴	لوزی
۰/۹۵	۱/۱	۰/۸۲	دایره
۰/۹۷	۰/۹۱	۰/۸۱	مثلثی
۰/۹۹	۰/۴۵	۰/۹۸	مسطحی
۰/۹۹	۰/۵۷	۰/۹۵	شش ضلعی

جدول ۲- ضرایب a ، b و درجه همبستگی R^2 معادله (۱۳)، برای اجزای زیر مختلف

R^2	b	a	نوع زبری
۰/۹۹	۵/۶۵	۰/۹۸	لوزی
۰/۹۸	۲/۸۷	۱/۱۱	دایره
۰/۹۹	۴/۱۴	۱/۱۰	مثلثی
۰/۹۹	۵/۴۴	۱/۱۰	مسطحی
۰/۹۹	۴/۵۰	۱/۰۴	شش ضلعی

منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۵ نمودار معادله هر جزء زبر می‌باشد.



شکل ۵- نیمرخ سطح آب بی بعد شده‌ی پرش هیدرولیکی در زبری‌های مختلف

میدان سرعت

در طول انجام این تحقیق برای هر جزء زیر و در یک عدد فرود، توزیع قائم سرعت در طول پرش هیدرولیکی برداشت گردید. شکل ۶ نمونه‌ای از نتایج این برداشت را

همان‌طور که از شکل‌های ترسیم شده مشخص است، کلیه منحنی‌های مربوط به اجزای زبر پایین‌تر از منحنی پرش بر روی بستر صاف قرار دارند و این بدان معنی است که اجزای زبر باعث کاهش عمق مزدوج می‌شوند. برای نشان دادن میزان کاهش عمق مزدوج بسترهای با اجزای زبر با عمق مزدوج بستر صاف، از ضریب بدون بعد D_* به شرح زیر استفاده شده است:

$$D_* = \frac{y_2 - Y_{2R}}{y_2} \quad [15]$$

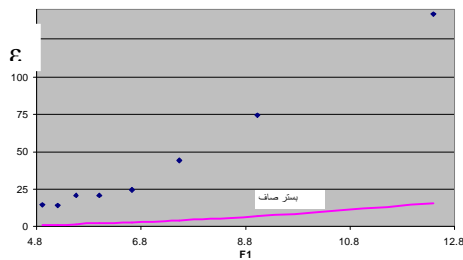
مقادیر متوسط D_* محاسبه شده برای اجزای زبر مختلف به شرح جدول ۴ می‌باشد. توضیح اینکه D_* برای هر جزی زبر تابع عدد فرود می‌باشد. مقدار متوسط آن برای هر جزی زبر در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر متوسط D_* یا میزان کاهش عمق مزدوج برای اجزای زبر مختلف

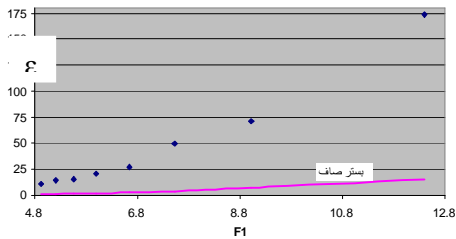
D_*	نوع زبری
۱/۰	صاف
۰/۲۴۲	لوزی
۰/۲۴۱۸	دایره
۰/۲۷۲۷	مثلی
۰/۲۰۹۸	مسطحی
۰/۲۱۳۴	شش ضلعی

شکل ۷- تغییرات اعماق مزدوج (Y_2 / Y_1) با عدد فرود (F_1)

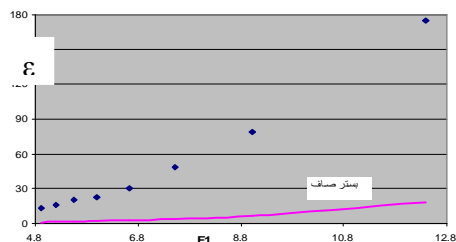
برای بستر صاف و بستر با اجزای مختلف



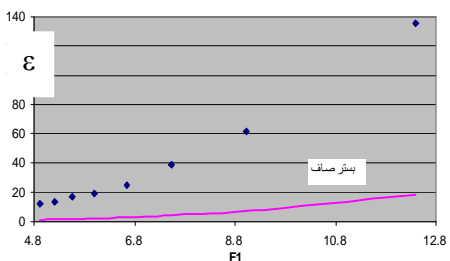
الف- لوزی



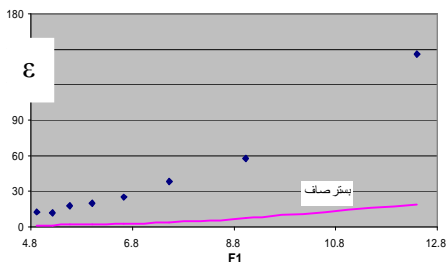
ب- دایره



پ- مثلثی



ت- مستطیل



ث- شش ضلعی

همانطور که از جدول ۴ مشخص است، کمترین مقدار D_* مربوط به اجزای زیر مستطیل شکل برابر 0.21 و بیشترین مقدار D_* مربوط به اجزای زیر مثلثی شکل برابر 0.27 می باشد. این بدین معنی است که در اجزای زیر مثلثی شکل به طور متوسط مقدار عمق پایاب مورد نیاز Y_2 0.73 می باشد که با مقایسه با عمق پایاب مورد نیاز حوضچه‌های آرامش نوع *II* و *III* که به ترتیب Y_2 0.83 و Y_2 0.97 می باشد (پیترکا ۱۹۵۸) کمتر است. می توان ملاحظه کرد که عمق پایاب اجزای زیر مثلثی شکل کمتر از عمق پایاب مورد نیاز حوضچه نوع دو و سه می باشد. همچنین اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) در مطالعات خود بر روی بستر موج دایره ای مقدار متوسط D_* را 0.25 و ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) نیز در آزمایشهای انجام شده بر روی بستر نوزنقه ای مقدار متوسط D_* را 0.20 بدست آوردند. این مقایسه نشان می دهد که می توان حوضچه ای آرامشی با بستر با اجزای زیر احداث کرد که عمق پایاب مورد نیاز آن ۲۱ تا ۲۷ درصد کمتر از عمق پایاب مورد نیاز حوضچه آرامش با بستر صاف باشد و از نظر کوایتاسیون نیز مشکل نداشته باشد.

تنش برشی بستر

برای بررسی اثر اجزای زیر بر میزان تنش برشی بستر و با توجه به معادله ۹ مقدار e یا ضریب نیروی برشی، با استفاده از داده های آزمایشگاهی جدول ۲ و بکار بردن معادله ۱۰ محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده نشان می دهد که e به عدد فرود بستگی دارد که شکل ۸ این روابط را نشان می دهد. بر روی این شکلها نمودار رابطه e مربوط به بستر صاف که توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) ارائه شده است نیز نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن شکل ۸، ملاحظه می شود بین F_1 و e می توان رابطه ای نمایی به صورت زیر برقرار کرد:

$$e = a'' F_1^{b''} \quad [16]$$

مقادیر a'' ، b'' و R^2 برای اجزای زیر مختلف در جدول ۵ ارائه شده است.

شکل ۸ - تغییرات ضریب نیروی برشی (e) با عدد فرود (F_1)

برای بستر صاف و بستر با اجزای مختلف

نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر اجزای زبر با شکل‌های لوزی، دایره، مثلثی، مستطیل و شش ضلعی بر روی عمق مزدوج در پرش هیدرولیکی و میزان ضریب نیروی برشی بررسی شده است. در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شد که اهم نتایج حاصله بشرح زیر است:

۱- نیم‌رخ سطح آب در طول پرش بوسیله معادله‌ی بی بعد با دقت خوبی برای کلیه اجزای زبر برآزش شد.

۲- با منظورکردن نیروی برشی در معادله‌ی مومنتم، رابطه‌ای برای محاسبه عمق مزدوج در پرش بر روی بستر با اجزای زبر مختلف بدست آمد. مقدار ضریب نیروی برشی این رابطه نیز با بکاربردن داده‌های آزمایشگاهی به صورت تابعی از عدد فرود برای هر شکل از اجزای زبر ارایه شده است.

۳- مقایسه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عمق مزدوج پرش در تمام اجزای زبر آزمایش شده کمتر از عمق مزدوج پرش بر روی بستر صاف می‌باشد. میزان کاهش برای هر شکل به عدد فرود بستگی دارد. بیشترین کاهش عمق مزدوج مربوط به زبری مثلثی شکل با ۲۷ درصد کاهش می‌باشد.

تشکر و قدردانی

هزینه این مطالعه از محل اعتبارات پژوهانه معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تامین شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۵- مقادیر a'' ، b'' و R^2 رابطه (۱۶)

نوع زبری	a''	b''	R^2
لوزی	۰/۳۲۲	۳/۱۶۴	۰/۹۵۷۷
دایره	۰/۳۷۰	۲/۲	۰/۹۶۲۲
مثلثی	۰/۱۶۴	۲/۷۸۶	۰/۹۹۶۲
مستطیلی	۰/۱۶۶	۲/۶۷۱	۰/۹۹۷۶
شش ضلعی	۰/۱۵۸	۲/۷۰۴	۰/۹۹۰۱

مقایسه‌ی ضرایب بدست آمده در تحقیق حاضر با معادله‌ی ۴ بیانگر مشابهت دو رابطه است. با قرار دادن رابطه‌ی ۱۶ در رابطه‌ی ۱۰، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\left(\frac{y_{2R}}{y_1}\right)^3 - [1 - a'' F_1^{b''} - 2 F_1^2] \frac{y_{2R}}{y_1} + 2 F_1^2 = 0 \quad [17]$$

از این معادله می‌توان مقدار عمق پایاب مورد نیاز (Y_{2R}) را در صورتی که شرایط جریان بالادست (V_1, y_1) و شکل اجزای زبر معلوم باشد تعیین کرد. توضیح اینکه معادله ۱۷ دارای سه ریشه است که یکی از آنها منفی است و یکی هم کوچکتر از یک است که هر دو غیر قابل قبول هستند و تنها ریشه‌ی ای که بزرگتر از یک

است قابل قبول می‌باشد زیرا از نظر فیزیکی $\frac{y_{2R}}{y_1}$ نمی‌

تواند منفی و یا کوچکتر از واحد باشد.

منابع مورد استفاده

- Alhamid AA, 1994. Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins. Transaction on Ecology and the Environment, Vol. 8
- Carolo FG, Ferro V and Pam Palone V, 2007. Hydraulic Jumps on rough beds. J of Hydraulic Engrg ASCE 133 (9): 989-999.
- Ead SA, Rajaratnam N and Katopodis C, 2000. Turbulent open-channel flow in circular corrugate culverts". J of Hydraulic Engrg ASCE 126 (10): 750-757.

- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. J of Hydraulic Engrg ASCE, 128 (7): 656-663.
- Hager WH, 1992. Energy dissipaters and hydraulic jump. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherland.
- Izadjoo F and Shafai-Bejostan M, 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. J of Applied Sciences 7(8): 1164-1169.
- Mohamed Ali HS, 1991. Effect of roughened bed stilling basin on length of rectangular hydraulic Jump J of hydraulic Engrg ASCE 117 (1): 83-93.
- Peterka AJ, 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters. Engineering Monograph No. 25, USBR, Denver, Colorado, USA.
- Rajaratnam N, 1967. Hydraulic jumps. Advances in Hydro Science, 4: 197-280.
- Rajaratnam N, 1968. Hydraulic Jump on rough bed. Transaction of the Engineering Institute of Canada, 11 (A-2): 1-8