

تأثیر شکل زبری بستر بر طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی

محمود شفاعی بجستان^۱، کبری نیسی^۲

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

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز

m_shafai@yahoo.com

چکیده- در مطالعه حاضر اثر زبری‌های تصنعی با شکلهای مختلف بر طول پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیل افقی مطالعه شده است. زبری‌های مطالعه شده در این تحقیق به خلاف مطالعات قبلی در مقابل جریان ورودی قرار نگرفته، بلکه در زیر جت ورودی آب قرار دارند. مطالعات در فلومی به طول ۷/۵ متر و عرض ۰/۳ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران انجام شد. جریان فوق بحرانی با احداث سرریز اوجی شکل در فلوم ایجاد و آزمایشها در محدوده عدد فرود ۴/۵ تا ۱۲/۰ انجام شد. در این مطالعه تعداد ۴۸ آزمایش بر روی بستر صاف و بستر با زبری‌های مستطیل، لوزی، مثلثی، دایره و شش ضلعی انجام گرفت. سطح مقطع زبری‌ها در مقابل جریان در تمام زبری‌ها ثابت بودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که زبری‌ها باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شوند و میزان کاهش تابعی از عدد فرود اولیه است. بیشترین کاهش مربوط به زبری‌های لوزی شکل با ۴۰٪ کاهش نسبت به شرایط بستر صاف بوده است. در این تحقیق روابطی برای تعیین طول پرش، طول غلتابی و میزان استهلاك انرژی برای زبری‌های متفاوت ارائه شده است.

کلیدواژگان: پرش هیدرولیکی، زبری، طول غلتابی، طول پرش، استهلاك انرژی، حوضچه آرامش.

۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی پدیده‌ای است که در اثر تغییر رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی اتفاق می‌افتد و با افت انرژی جنبشی زیادی همراه است. از این رو از این پدیده به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست دریچه‌های آبیاری، سرریزها و تندابها استفاده می‌شود. سازه‌هایی که وظیفه کنترل و محدود کردن پرش هیدرولیکی را دارند، حوضچه‌های آرامش می‌نامند. ابعاد

حوضچه‌های آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. به منظور کاهش هزینه‌های اجرایی این سازه‌ها، در گذشته سعی شده با تمهیداتی، مشخصات پرش هیدرولیکی کاهش یافته و در نتیجه آن طول حوضچه کاهش یابد. از میان این تمهیدات می‌توان به در نظر گرفتن موانع (بلوک) در ابتدا، میانه و انتهای حوضچه آرامش اشاره کرد. بر این اساس حوضچه‌های مختلفی توسط پیترکا (۱۹۷۸) معرفی شده است.

نشان داد که طول پرش تابعی از عدد فرود جریان ورودی و طول پوشش شده با مانع است. محمدعلی رابطه زیر را برای طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر پوشش شده با مانع برای محدوده عدد فرود چهار تا ده ارائه کرد:

$$\frac{L_{JR}}{y_1} = -43.88 + 38.7 \ln(F_1) \quad (1)$$

در این رابطه F_1 و y_1 به ترتیب عمق جریان و عدد فرود قبل از پرش هیدرولیکی و \ln لگاریتم طبیعی است. آل حمید (۱۹۹۴) نیز اثر تراکم موانع مکعب مستطیلی به ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 3$ سانتیمتر را بر مشخصات پرش هیدرولیکی مطالعه کرد. فاصله عرضی بین موانع $1/2$ سانتی متر، اما فواصل طولی موانع متفاوت بود، به طوری که هفت تراکم متفاوت در محدوده بین ۶ تا ۲۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که طول پرش با افزایش تراکم موانع اندکی کاهش یافته تا در تراکم ۱۲ درصد به حداقل برسد. سپس طول پرش افزایش می یابد. آل حمید در این تراکم روابط زیر را برای طول پرش هیدرولیکی روی بستر با مانع ارائه کرد:

$$\frac{L_{JR}}{y_1} = 8.3792 F_1 - 9.6816 \quad (2)$$

اید و همکاران (۲۰۰۰) در مطالعه آزمایشگاهی روی میدان سرعت در جریانهای آشفتنه در لوله موجدار نیم دایره ای شکل نتیجه گرفتند که سرعتها در نزدیک بستر بسیار کم است. با این نتایج 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 می توانند تا حد قابل ملاحظه ای طول پرش و عمق مزدوج را کاهش دهند.

ایزدجو و شفاعی بجنستان (۲۰۰۷) نیز به بررسی اثر پرش هیدرولیکی روی بسترهای موجی شکل ذوزنقه ای پرداختند. نتایج آنها حاکی است که تنش برشی روی این بسترها، ۱۰ برابر تنش برشی روی بسترهای صاف است.

وجود مانع در برابر جریان آب باعث جداسدگی جت ورودی و استهلاک انرژی بیشتر در نتیجه افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی درگ می شود و در نتیجه طول پرش و عمق مزدوج کاهش می یابد. این موانع چون بطور مستقیم در مقابل جت ورودی قرار دارند، علاوه بر اینکه باید از نظر سازه ای مقاوم باشند، در صورت افزایش سرعت جریان ورودی بیش از ۱۷ متر در ثانیه، باعث پدیده کاویتاسیون نیز خواهند شد (پترکا، ۱۹۷۸). عامل دیگری که می تواند باعث کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی شود، زبری های کف است. راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین مطالعات سیستماتیک را در باره پرش هیدرولیکی در بستر زیر انجام داد. او پارامتر عامل زبری $K_s = \frac{K_s}{y_1}$ را که در آن K_s ارتفاع زبری و y_1 عمق جریان ورودی است را معرفی کرد. در مطالعه ای که راجاراتنام در بستر با زبری های ممتد مثلثی انجام داد، نشان داد که طول پرش (L_{JR}) به طور قابل ملاحظه ای کمتر از طول پرش در بسترهای صاف (L_J) است. نتایج فوق توسط محققین دیگری مانند خاپاوف، میخالوف و کیسلوف، به نقل از هاگر (۱۹۹۲)، مورد تأیید قرار گرفته است. لوث هاووزر و اشکیله (به نقل از هاگر، ۱۹۹۲) نیز مطالعاتی را روی جریان ورودی به سطح زبر انجام دادند. آنها نشان دادند که جریان ورودی توسعه یافته که در آن ضخامت لایه مرزی با عمق جریان برابر است، تلاطم بیشتری دارد. همچنین نتایج آنها نشان داد که بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف، جریانهای فوق بحرانی در طول کمتری به شرایط توسعه یافته می رسند، زیرا زبری ها باعث رشد سریع لایه مرزی می شوند.

محمدعلی (۱۹۹۱) به مطالعه اثر موانع مکعبی شکل به ابعاد $1/6 \times 1/6 \times 1/6$ سانتی متر بر طول پرش هیدرولیکی پرداخت. در این مطالعه اثر طول بستر پوشش شده با مانع و شرایط جریان مطالعه شده است. نتایج مطالعات وی

مطالعه حاضر، بررسی اثر شکلهای مختلف زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی است.

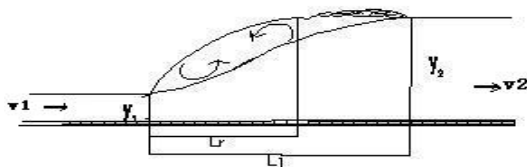
۲- تئوری

۲-۱- طول پرش

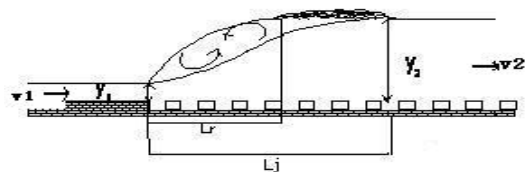
با در نظر گرفتن شکل ۱، رابطه کلی طول پرش را می توان به متغیرهای زیر مرتبط کرد:

$$L_{TR} \text{ or } L_{JR} = f(y_1, y_2, q, h_R, \psi, b_R, \rho, \mu, g, \phi) \quad (5)$$

که L_{TR} و L_{JR} به ترتیب طول پرش و طول غلتاب می باشند. h_R ارتفاع زبری، b_R عرض زبری در مقابل جریان، ψ نوع آرایش قرارگیری زبری، ρ و μ به ترتیب جرم واحد حجم و لزجت آب، g شتاب ثقل، q دبی در واحد عرض و ϕ نیز نوع شکل زبری است.



الف- بستر صاف



ب - بستر زبر

شکل ۱ مشخصات پرش هیدرولیکی الف- بستر صاف

(پرش کلاسیک) ب- بستر زبر

رابطه (۵) با استفاده از تئوری باکینگهام و با انتخاب q ، y_1 و ρ بعنوان متغیرهای تکراری به شکل معادله بدون بعد زیر در می آید:

$$\frac{L_{TR}}{y_1}, \frac{L_{JR}}{y_1} = f\left(\frac{y_2}{y_1}, F_1, R_{el}, \frac{h_R}{y_1}, \frac{b_R}{y_1}, \psi, \phi\right) \quad (6)$$

طول پرش هیدرولیکی در این بسترها تا ۵۰ درصد کاهش می یابد. آنها همچنین روابط زیر را برای محاسبه طول پرش ارائه کردند:

$$\frac{L_{JR}}{y_{2R}} = 3.0 \quad (3)$$

که y_{2R} عمق مزدوج پرش با بستر زیر است. کارولو و همکاران (۲۰۰۷) نیز مطالعاتی روی اثر ارتفاع زبری های طبیعی (قلوه سنگ) بر مشخصات پرش هیدرولیکی انجام دادند. در این مطالعه شش نوع اندازه سنگ با اندازه متوسط ۰/۴۶ تا ۳/۲۰ سانتی متر در اعداد فرود ۴ تا ۱۲ آزمایش شده است. نتایج آنها نشان داد که زبری های طبیعی می توانند طول پرش و عمق مزدوج را کاهش دهند. آنها رابطه زیر را برای برآورد طول پرش ارائه کردند:

$$\frac{L_{TR}}{y_1} = \left[6.525 \text{Exp}\left(-0.60 \frac{K_s}{y_1}\right) \right] (F_1 - 1) \quad (4)$$

که L_{TR} طول غلتاب پرش بر روی بستر زبر و K_s اندازه زبری های طبیعی است.

بررسی مطالعات گذشته نشان می دهد که بیشتر مطالعات بر بررسی اثر موانع بر خصوصیات پرش هیدرولیکی متمرکز بوده است. مطالعات مربوط به اثر زبری به سالهای اخیر مربوط می شود و مطالعه سیستماتیک را فقط کارولو و همکاران (۲۰۰۷) انجام داده اند که مربوط به زبری های طبیعی است. در مورد زبری های مصنوعی می توان به مطالعات مربوط به موج بودن بستر حوضچه ها اشاره کرد (اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و ایزدجو و شفافی بجزستان (۲۰۰۷)). در رابطه با اثر زبری های مصنوعی غیرممتد مطالعه اندکی انجام شده است. باید توجه شود که در اینجا زبری به برآمدگیهایی گفته می شود که زیر جت ورودی آب و نه در مقابل آن قرار دارند. از این رو هدف اصلی

$$\frac{L_r}{y_1} = b_0 (F_1 - 1) \quad (11)$$

که ضرایب a (رابطه ۹)، a_0 (رابطه ۱۰) و b_0 رابطه (۱۱) توسط هافس و فلک (۱۹۸۴) برای بستر با زبری های با ارتفاع در محدوده ۰/۳۲ تا ۱/۰۴ سانتی متر و توسط کارولو و همکاران (۲۰۰۷) برای زبری های طبیعی با اندازه ای در محدوده صفر تا ۱/۴۶ سانتی متر به شرح جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مقادیر ضرایب a ، a_0 و b_0

در معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱)

محقق	K_s اندازه زبری cm	a	a_0	b_0
هافس و فلک (۱۹۸۴)	۰/۳۲	۴/۵۳	۲/۲۵	۵/۹
	۰/۴۹	۴/۶۶	۲/۲۳	۶/۰
	۰/۶۱	۴/۰۶	۲/۰	۴/۹۲
	۱/۰۴	۴/۰۷	۲/۰۱	۴/۷۹
	۰/۶۴	۴/۴۳	۲/۲۲	۵/۴۴
کارولو و همکاران (۲۰۰۷)	۰/۴۶	۴/۲۶	۲/۱۵	۵/۰۲
	۰/۸۲	۳/۹۲	۱/۹۸	۴/۶۷
	۱/۴۶	۳/۸۶	۱/۹۴	۴/۱۶
	صاف	۴/۱۲	۲/۰۴	۵/۷۳

۲-۳- مواد و روشها

برای رسیدن به اهداف این مطالعه، آزمایشهای متعددی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران انجام شد. 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 می شود. به منظور تأمین بار آبی لازم برای ایجاد جریان فوق بحرانی از سرریز اوجی استفاده شده است.

که پس از تقسیم $\frac{L_{JR}}{y_1}$ و یا $\frac{L_{rR}}{y_1}$ بر $\frac{y_2}{y_1}$ و نیز با تقسیم دو پارامتر بدون بعد $\frac{h_R}{y_1}$ و $\frac{b_R}{y_1}$ بر یکدیگر می توان نوشت:

$$\frac{L_{rR}}{y_2}, \frac{L_{JR}}{y_2} = f\left(F_1, Re_l, \frac{h_R}{b_R}, \psi, \phi\right) \quad (7)$$

در مطالعات پرش هیدرولیکی، نیروهای لزجت در مقایسه با نیروهای ثقل بسیار ناچیز بوده، لذا می توان از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر کرد. عدد رینولدز در آزمایشهای این تحقیق بین ۱۶۶۶۴ تا ۱۳۳۳۰۰ بوده است. در این مطالعه ارتفاع و عرض زبری ها ثابت و آرایش زبری ها در تمامی آزمایشها یکسان بوده است. لذا رابطه (۷) به معادله زیر تبدیل می شود:

$$\frac{L_{rR}}{y_2}, \frac{L_{JR}}{y_2} = f(F_1, \phi) \quad (8)$$

۲-۲- طول غلتاب

برای محاسبه طول غلتاب (L_r) بر روی بستر صاف روابطی توسط محققان ارائه شده که این روابط را به صورت زیر می توان ارائه کرد:

$$\frac{L_r}{y_1} = a \left(\frac{y_2}{y_1} - 1 \right) \quad (9)$$

ضریب a توسط اسمتانا برابر ۶، توسط سیتزینی برابر ۵/۵ و توسط مادیس و لوکسر برابر ۵/۲ بدست آمده است (از هاگر (۱۹۹۲)). هافس و فلک (۱۹۸۴) و کارولو و فرو (۲۰۰۷) علاوه بر ارائه رابطه ای به شکل رابطه (۹)، روابطی را به صورت زیر برای برآورد طول غلتابی پیشنهاد کرده اند:

$$\frac{L_r}{y_1} = \frac{a_0}{\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^{1.272}} \quad (10)$$

این کار آنقدر ادامه می‌یافت که دبی ورودی به دبی مورد نظر و عمق پایاب نیز به عمق مورد نظر برسد. این شرایط برای مدت زمان کافی تا برداشت کامل داده‌ها ثابت نگاه داشته می‌شد.

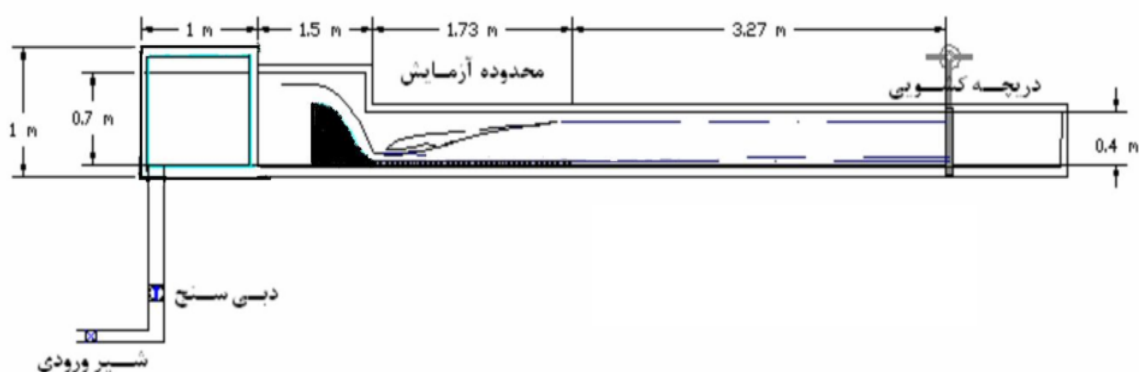
در طول این مدت نیمرخ سطح آب در طول پرش هیدرولیکی، طول پرش و طول غلتاب اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. طول غلتاب عبارت است از فاصله ابتدای پرش تا محلی که گردابهای برگشتی مشاهده می‌شوند. تشخیص مسیر گردابها با استفاده از مواد رنگی یا حبابهای هوا امکان‌پذیر بود.

طول پرش، فاصله ابتدای پرش تا مکانی که حبابهای هوا دیگر مشاهده نمی‌شوند و جریان نسبتاً آرام باشد در نظر گرفته شد. برای برداشت نیمرخ سطح آب از ژرفاسنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای طول غلتاب و طول پرش از خط‌کشی با دقت یک میلی‌متر استفاده شده است. برای این مطالعه در مجموع ۴۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴/۹ تا ۱۲/۴ انجام شده است.

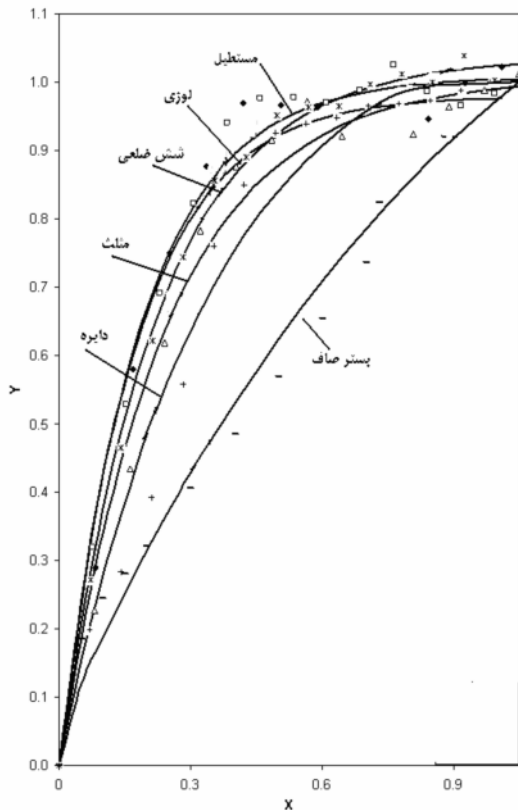
شکل ۲، پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد. زبری‌های مورد استفاده از جنس پلکسی گلاس با ارتفاع ۱/۶ سانتی‌متر و عرض (بعد عمود بر جریان) ۲/۲۶ سانتی‌متر، به شکلهای مثلثی، لوزی، مربع، استوانه‌ای و شش‌ضلعی بودند.

این شکلهای با کمک نرم‌افزار اتوکد طراحی و با لیزر برش داده شده و در ردیفهایی به فواصل ۳/۲ سانتیمتر از یکدیگر در طول ۱۶۸ سانتی‌متر در کف فلوم به‌وسیله چسب آکوارיום چسبانده شد، زبری‌ها طوری در کف فلوم قرار گرفته بود که تراز بالای آنها معادل تراز پایین دست سرریز بود، به طوری که لبه پایین جت ورودی، هم‌تراز با سطح بالای زبری‌ها بود. شکل ۳ زبری‌های آزمایش شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

نحوه انجام آزمایش چنین بود که پس از نصب زبری‌ها به نحوی که اشاره شد، پمپ روشن و اجازه داده می‌شد که جریان آب به‌آهستگی به فلوم وارد شود. در این مدت دریچه پایین‌دست بسته بود. سپس به تدریج دبی ورودی اضافه و در همین زمان دریچه پایین‌دست نیز باز می‌شد.



شکل ۲ پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۴ نیمرخ سطح آب بی بعد شده
پرش هیدرولیکی در زبری های مختلف

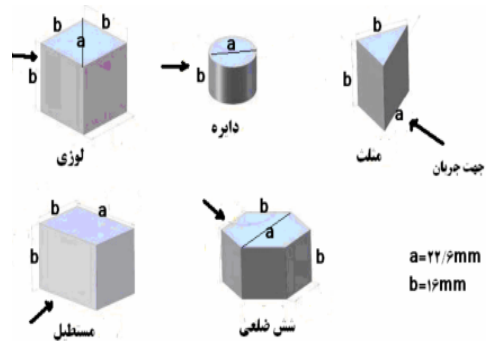
جدول ۳ ضرایب a, b و درجه همبستگی R^2

معادله (۱۴)، برای زبری های 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	مستطیلی
۰/۹۹	۴/۵۰	۱/۰۴	شش ضلعی

۳-۲- توزیع سرعت و تنش برشی

در این تحقیق برای هر زبری و برای یک عدد فرود، سرعت افقی جریان در فواصل افقی ده سانتی متری از ابتدای پرش و در فواصل عمودی ده سانتی متری با میکرومولینه برداشت شد. بدین ترتیب پروفیل توزیع قائم



شکل ۳ انواع زبری مطالعه شده در این تحقیق

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نیمرخ سطح آب پرش هیدرولیکی

به منظور بررسی اثر زبری های لوزی، دایره ای، مثلثی، مستطیلی و شش ضلعی بر وضعیت نیمرخ سطح آب و مقایسه آن با نیمرخ سطح آب در پرش صاف، نتایج برداشت ها در شکل ۴ ترسیم شده است.

در شکل ۴ محور طول و قائم به صورت زیر بی بعد می شود.

$$X = \frac{x}{L_{JR}} \quad (12)$$

$$Y = \frac{y - y_1}{y_{2R} - y_1} \quad (13)$$

که در آن x و y به ترتیب فاصله از ابتدای پرش و عمق آب در آن فاصله است. X و Y پارمترهای فاصله و عمق بدون بعد است. در

صورتی که بین نقاط بی بعد شده، معادله ای به صورت زیر برآزش داده شود:

$$Y = a(1 - e^{-bx}) \quad (14)$$

ضرایب a, b و همچنین R^2 برای هر معادله به شرح جدول ۳ است.

ملاحظه می شود که بی بعد کردن توانسته داده ها را به نحو دقیقتری به هم نزدیک سازد. همان طور که ملاحظه می شود نیمرخ های ایجاد شده بر اثر زبری، بالاتر از نیمرخ بستر زیر است و این نشان می دهد که بر اثر وجود زبری، پرش در طول کمتری اتفاق افتاده است.

است، یا به بیان دیگر، در طول کمتری انرژی پخش مستهلک می‌شود. در صورتی که از بین داده‌های به‌دست آمده معادله‌ای به‌صورت زیر برازش داده شود:

$$\frac{\tau}{\rho} = e^{(a'+b'x)} \quad (16)$$

آنگاه مقادیر a' و b' و نیز R^2 به شرح جدول ۴ برای زبری‌های مختلف به‌دست خواهد آمد.

۳-۳- طول غلتابی و طول پرش

به‌منظور بررسی اثر زبری‌ها بر طول غلتابی شکل ۶ ترسیم شده است. در این شکلها مقدار L_{PR}/Y_1 در مقابل عدد فرود F_1 ترسیم شده است. همچنین به‌منظور مقایسه با پرش بر روی بستر صاف، معادله‌هاگر نیز روی این شکل ترسیم شده است.

جدول ۴ ضرایب معادله (۱۶)

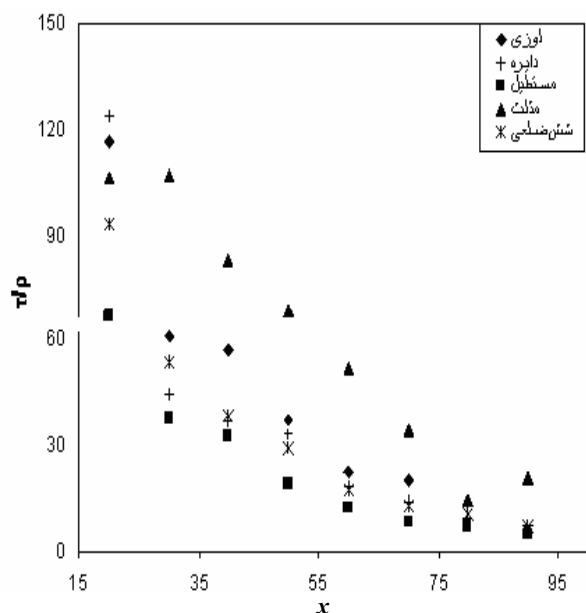
R^2	b'	a'	شکل زبری
۰/۹۶	-۳/۹	۵/۵	لوزی
۰/۹۲	-۵/۵	۵/۸	دایره
۰/۹۲	-۲/۳	۵/۲	مثلث
۰/۹۹	-۴/۲	۵/۵	مستطیل
۰/۹۹	-۰/۰۴	۵/۳	چندضلعی
۰/۸۵	-۳/۵۶	۵/۴	کل داده‌ها

این شکل نشان می‌دهد که به‌طور کلی مقدار طول غلتاب روی بستر زبر کاهش می‌یابد. البته میزان کاهش به شکل زبری و برای هر زبری مقدار آن به عدد فرود بستگی دارد. در صورتی که بین طول بی‌بعد غلتابی و عدد فرود و نیز بین طول بی‌بعد غلتابی و نسبت اعماق مزدوج روابطی مشابه روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) برازش داده شود، مقادیر ضرایب a_0 و b_0 این معادلات برای شکل‌های مختلف زبری به شرح جدول ۵ خواهد بود.

سرعت در فواصل ده سانتی‌متری را می‌توان ترسیم کرد. با استفاده از این داده‌ها مقادیر سرعت متوسط در هر مقطع محاسبه و با استفاده از رابطه توزیع لگاریتمی سرعت اینشتین مقدار تنش برشی بستر محاسبه شد:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{V^2}{\left[5.75 \log\left(12.27 \frac{V}{k_s}\right) \right]^2} \quad 15$$

در این رابطه τ تنش برشی بستر در هر مقطع، ρ جرم واحد حجم آب و V سرعت متوسط در هر مقطع است. سپس مقادیر تنش برشی بستر در مقابل x فاصله از ابتدای پرش، ترسیم شد که نتایج در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵ تنش برشی بستر در مقابل فاصله بر حسب سانتی‌متر از ابتدای پرش

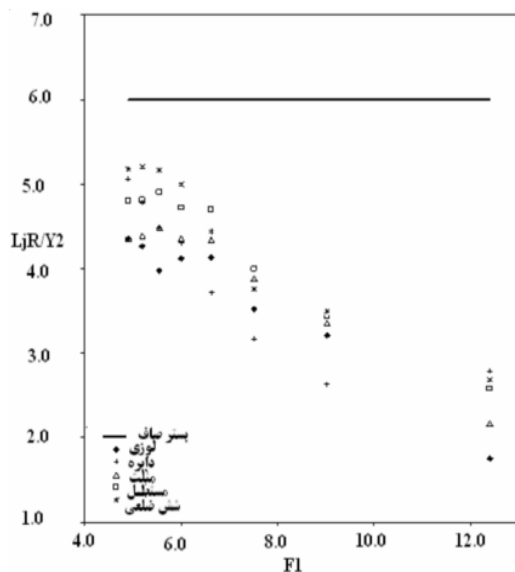
همان‌طور که ملاحظه می‌شود تنش برشی ابتدا زیاد بوده و سپس با شیب نسبتاً تندی کاهش می‌یابد. با ملاحظه این شکل می‌توان دریافت که تنش برشی مربوط به زبری مستطیل شکل، معمولاً پایین‌تر از سایر زبری‌ها است که این نشان‌دهنده استهلاک انرژی بیشتر این نوع زبری

در تحقیق حاضر برای زبری به ارتفاع $1/6$ سانتی متر برای زبری لوزی شکل - که کمترین طول غلتابی را داشته - به ترتیب برابر $3/64$ ، $1/84$ و $3/74$ به دست آمده است. برای بررسی میزان تأثیر زبری بر طول پرش هیدرولیکی، شکل ۷ ترسیم شده است.

جدول ۵ ضرائب a ، a_0 و b_0 معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱)

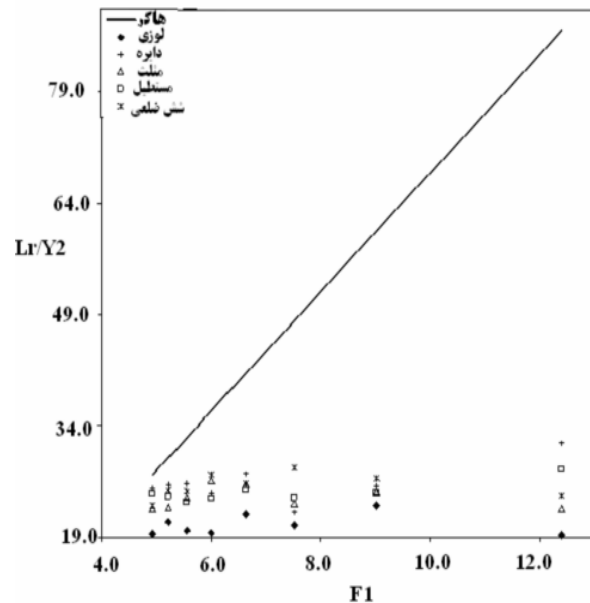
به دست آمده در تحقیق حاضر

شکل زبری	a	a_0	b_0
صاف	۴/۵۳	۲/۲۵	۵/۷۵
لوزی	۳/۶۴	۱/۸۴	۳/۷۴
دایره	۴/۵۴	۲/۳۰	۴/۷۳
مثلثی	۴/۴۵	۲/۲۶	۳/۷۰
مستطیلی	۴/۱۶	۲/۱	۴/۵۰
شش ضلعی	۴/۳۵	۲/۲	۴/۷۰



شکل ۷ تغییرات طول پرش بی بعد شده در مقابل عدد فرود

در این شکل طول پرش بی بعد شده در مقابل عدد فرود نشان داده شده است. خط ترسیم شده مربوط به پرش روی بستر صاف یا همان معادله (۹) است.



شکل ۶ تغییرات طول غلتابی تابعی از عدد فرود در زبری های مختلف در مقایسه با رابطه ی هاگر

با مقایسه ضرائب به دست آمده در تحقیق حاضر (جدول ۵) با ضرائب حاصل از محققان قبلی (جدول ۱)، ملاحظه می شود که به طور کلی روند یکسانی مشاهده می شود، اما مقادیر دقیقاً یکسان نیستند، زیرا شرایط آزمایش با آزمایشهای دیگران متفاوت است.

یک دلیل این مقایسه، اطلاع از صحت نتایج و این موضوع است که زبری ها مانند بلوکها می توانند در کاهش ابعاد پرش مؤثر باشند، بدون اینکه در معرض مستقیم جت قرار داشته باشند. برای مثال برای بستر صاف مقادیر به دست آمده توسط کارولو و همکاران (۲۰۰۷) به ترتیب برابر $4/12$ ، $2/04$ و $5/73$ است اما در تحقیق حاضر به ترتیب برابر $4/53$ ، $2/25$ و $5/75$ است. اختلاف مشاهده شده بین مقادیر نیز ناشی از نوع زبری و نحوه آرایش زبری ها است.

همچنین برای زبری با ارتفاع $1/46$ سانتی متری (نزدیک به ارتفاع زبری در این تحقیق) کارولو و همکاران ضرائب را به ترتیب برابر $3/86$ ، $1/94$ و $4/16$ به دست آورده اند که

مربوط به زبری لوزی شکل است که دارای S_* برابر ۴۰/۹۱ درصد است؛ یعنی در این زبری به طور متوسط طول پرش ۴۱ درصد نسبت به پرش روی بستر صاف کاهش نشان می دهد. نتایج اید و راجا اتنام (۲۰۰۲) و ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) نیز نشان داد که زبری های پیوسته موجی دایره ای و دوزنقه ای، طول پرش را به اندازه ۵۰ درصد کاهش می دهند.

جدول ۷ مقدار متوسط S_*

نوع زبری	S_* %
لوزی	۴۰/۹۰۷
دایره	۳۶/۹۱۳
مثالی	۳۳/۰۳۵
مستطیلی	۳۱/۲
شش ضلعی	۲۹/۱۹

به منظور مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات محمدعلی (۱۹۹۱) و آل حمید (۱۹۹۴) - که هر دو روی انواع (بلوک) بوده - شکل ۸ ترسیم شده است. تحقیقات محمدعلی (۱۹۹۱) و آل حمید (۱۹۹۴) بر روی بلوکهای مکعبی شکل انجام شده است. نتایج این تحقیق با نتایج محمد علی (۱۹۹۱) همخوانی بیشتری نشان می دهد و دلیل آن می تواند این باشد که در تحقیق محمد علی از زبری هایی با ارتفاع ۱/۶ سانتی متری استفاده شده که با ارتفاع زبری در این تحقیق برابر است. در اعداد فرود کم نتایج آل حمید که از بلوک های مکعبی استفاده کرده به نتایج حاصل از زبری های مستطیل نزدیک است اما با افزایش عدد فرود معادله ارائه شده توسط آل حمید از نتایج این تحقیق و نیز نتایج محمدعلی فاصله زیادی می گیرد. دلیل آن این است که ارتفاع بلوک در تحقیق آل حمید کوچکتر از تحقیق حاضر و تحقیق محمد علی بوده است. همچنین نحوه قرارگیری زبری ها و نحوه

همان طور که ملاحظه می شود طول پرش هیدرولیکی برای تمامی زبری ها کمتر از طول پرش روی بستر صاف بوده و میزان کاهش به عدد فرود نیز بستگی دارد. اکنون با توجه به معادله کلی (۸)، چنانچه رابطه (۱۷) برای زبری های مختلف برآزش داده شود:

$$\frac{L_{JR}}{Y_2} = a_2 F_1^{b_2} \quad (17)$$

آنگاه ضرایب a_2 و b_2 برای انواع زبری های آزمایش شده به شرح جدول ۶ می باشد. ملاحظه می شود که طول پرش در تمامی زبری ها با افزایش عدد فرود کاهش می یابد و در تمامی حالتها میزان طول پرش هیدرولیکی کمتر از مقدار آن برای بستر صاف است.

جدول ۶ ضرایب a_2 ، b_2 و R^2 برای انواع زبری ها

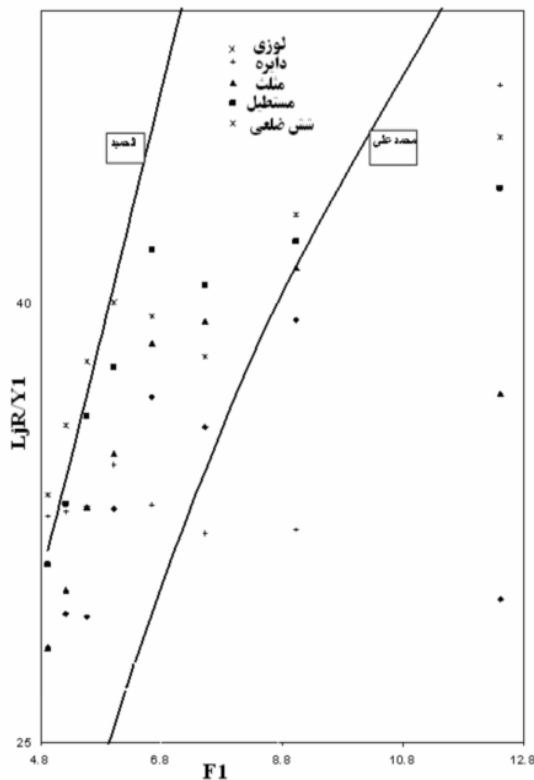
نوع زبری	a_2	b_2	R^2
لوزی	۱۱/۳۵۵	-۰/۵۸۱۹	۰/۹۳۸۹
دایره	۱۵/۸۲۹	-۰/۷۴۷۴	۰/۸۶۳۲
مثالی	۷/۵۴۰۸	-۰/۳۲۲	۰/۷۹۰۹
مستطیلی	۱۶/۱۶۲	-۰/۷۰۶۴	۰/۹۲۸۸
شش ضلعی	۱۸/۴۶۴	-۰/۷۶۲۶	۰/۹۷۱۵

به منظور بررسی میزان کاهش طول پرش هیدرولیکی می توان ضریب S_* را به شرح زیر محاسبه کرد:

$$S_* = \frac{L_J - L_{JR}}{L_J} \times 100 \quad (18)$$

مقدار S_* محاسبه شده برای زبری های مختلف با استفاده از رابطه (۱۸) نشان می دهد که این پارامتر تابعی از عدد فرود است. مقدار متوسط S_* برای هر زبری در جدول ۷ ارائه شده است.

همان طور که ملاحظه می شود S_* بین ۲۹/۲ تا ۴۰/۹ درصد تغییر می کند و بیشترین مقدار کاهش طول پرش،



شکل ۸ تغییرات L_{rj}/Y_1 در مقابل عدد فرود در مقایسه با نتایج آلحمید (۱۹۹۴) و محمدعلی (۱۹۹۱)

۴- نتیجه گیری

اهم نتایجی که از این تحقیق می توان گرفت عبارتند از:
 ۱- نیمرخ سطحی آب در طول پرش به وسیله معادله بی بعد با دقت خوبی برای تمامی زبری ها برازش شد و نشان داده شد که در مقایسه با پرش روی بستر صاف، طول کمتری دارند.
 ۲- رابطه کلی برای برآورد طول پرش با استفاده از نظریه باکینگهام ارائه شده است. این رابطه نشان می دهد که طول پرش به عدد فرود و شکل زبری بستگی دارد. از این رو با استفاده از داده های آزمایشگاهی روابطی برای محاسبه طول پرش برای هر یک از زبری ها ارائه شده است.

آرایش زبری ها در این سه تحقیق یکسان نبوده است. به طور کلی از این مقایسه ها می توان استنباط کرد که با قرار گیری زبری در زیر جت آب می توان طول پرش هیدرولیکی را تا حد قابل قبولی کاهش داد و به قرار دادن زبری ها در مقابل جت آب - که مشکلاتی را مانند کاویتاسیون ایجاد می کند - نیاز نیست.

۳-۴- استهلاك انرژی

پرش هیدرولیکی به هدف استهلاك انرژی جنبشی مورد استفاده قرار می گیرد. از این رو به منظور بررسی میزان استهلاك انرژی جنبشی بر اثر زبری ها و با استفاده از معادله انرژی به صورت زیر:

$$\Delta E = \left[\frac{q^2}{2gY_1^2} + Y_1 \right] - \left[\frac{q^2}{2gY_{2r}^2} + Y_{2r} \right] \quad (19)$$

- که در آن q دبی در واحد عرض است - مقادیر ΔE

برای تمامی آزمایشها محاسبه شد

سپس این نتایج در قالب شکل ۹ ترسیم شد. در این شکل مقدار بی بعد انرژی یا نسبت $\Delta E/E_1$ - که E_1 مقدار انرژی ویژه جریان قبل از پرش است - در مقابل عدد فرود برای تمامی زبری ها ترسیم شده است. خط ترسیم شده مربوط به شرایط بستر صاف است.

نتایج نشان می دهد که به طور کلی مقدار استهلاك انرژی در بستر زبر بیشتر از استهلاك انرژی در بستر صاف بوده و البته میزان استهلاك انرژی به عدد فرود بستگی دارد. برای مثال برای عدد فرود ۹/۰ میزان استهلاك انرژی برای بستر صاف برابر ۷۰ درصد و برای زبری های لوزی، دایره، مثلثی، مستطیل و شش ضلعی به ترتیب ۷۹، ۷۸، ۷۹ و ۷۷ درصد است. یعنی زبری ها می توانند تا نه درصد استهلاك انرژی را افزایش دهند.

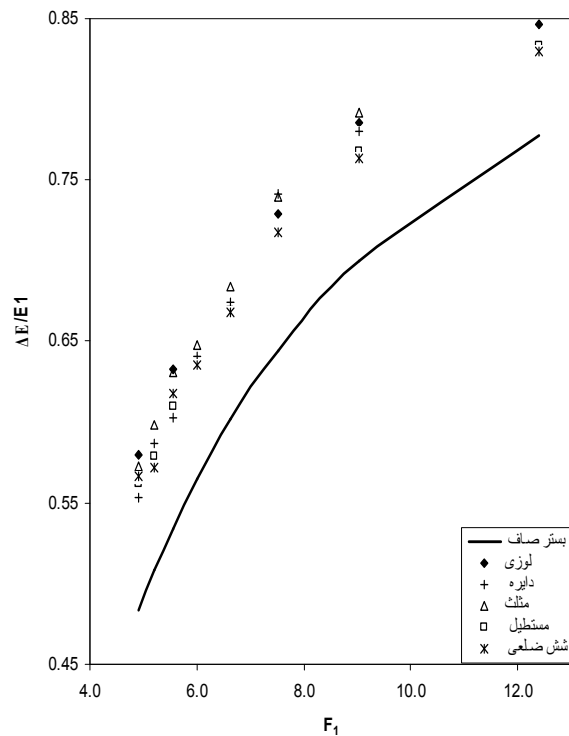
۵- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میزان استهلاک انرژی بر اثر وجود زبری بیشتر از میزان استهلاک انرژی برای بستر صاف است.

۵- تشکر و قدردانی

هزینه این مطالعه از محل اعتبارات قطب علمی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز تأمین شده که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- فهرست علائم

b_o, a_o, a	ضرایب معادلات
b_R	عرض زبری
E_1	انرژی ویژه جریان قبل از پرش
F_1	عدد فرود اولیه (قبل از پرش)
g	شتاب ثقل
h_R	ارتفاع زبری
K_s	اندازه یا ارتفاع زبری
L_J	طول پرش بر روی بستر صاف
L_{JR}	طول پرش بر روی بستر زبر
L_r	طول غلتابی در پرش با بستر صاف
L_{rR}	طول غلتابی در پرش روی بستر زبر
q	دبی در واحد عرض
x	فاصله از ابتدای پرش
X	پارامتر بی‌بعد فاصله
y	عمق آب در آن فاصله
Y	پارامتر بی‌بعد عمق
Ψ	نشان‌دهنده اثر نوع آرایش قرارگیری بری
ϕ	نشان‌دهنده اثر شکل ذره
ρ	جرم واحد سیال
μ	لزجت سیال



شکل ۹ تغییرات افت انرژی بی‌بعد شده در مقابل عدد فرود

۳- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طول پرش در تمامی زبری‌های آزمایش شده کمتر از طول پرش روی بستر صاف است. میزان کاهش برای هر شکل به عدد فرود بستگی دارد. بیشترین کاهش طول مربوط به مقایسه زبری لوزی شکل با ۴۰ درصد کاهش است.

۴- با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی، روابطی برای طول غلتابی مشابه روابط سایر محققان نیز ارائه شده است. مقایسه این روابط نشان می‌دهد که علی‌رغم استفاده از زبری در زیر جت آب، به خلاف سایر محققان - که زبری را در مقابل جت جریان قرار داده بودند - طول غلتابی کاهش یافته است؛ به طوری که در مقایسه با مقادیر طول غلتابی حاصل از مطالعات نتایج آل حمید (۱۹۹۴) و محمدعلی (۱۹۹۱) افزایش کمی را نشان می‌دهند.

۷- منابع

- Hughes, W.C. and Flack, J.E. (1984). "Hydraulic jump properties over a rough bed". J. of Hydraulic Engrg., ASCE, 110 (12), pp. 1755-1771.
- Izadjoo, F. and Shafai-Bejestan, M. (2007). "Corrugated bed hydraulic jump stilling basin". J. of Applied Sciences, 7(8) pp. 1164-1169.
- Mohamed Ali, H.S. (1991). "Effect of roughened bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump". J. of Hydraulic Engrg., ASCE, 117 (1), pp. 83-93.
- Peterka, A.J. (1978). "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, pp. 197-280.
- Rajaratnam, N. (1968). "Hydraulic jump on rough bed". Transaction of the Engineering Institute of Canada, 11 (A-2), pp. 1-8.
- Alhamid, A.A. (1994). "Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins". Transaction on Ecology and the Environment, Vol. 8, Hydraulic Engineering Software, pp. 39-46.
- Carolo, F.G., Ferro, V., and Pam Palone, V. (2007). "Hydraulic jumps on rough beds". J. of Hydraulic Engrg., ASCE, 133 (9), pp. 989-999.
- Ead, S.A., Rajaratnam, N. and Katopodis, C. (2000). "Turbulent open-channel flow in circular corrugate culverts". J. of Hydraulic Engrg., ASCE, 126 (10), pp. 750-757.
- Ead, S.A. and Rajaratnam, N. (2002). "Hydraulic jumps on corrugated beds". J. of Hydraulic Engrg, ASCE, 128 (7), pp. 656-663.
- Hager W.H. (1992). "Energy dissipaters and hydraulic jump". Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherland.