

بررسی آزمایشگاهی اثر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن در بستر سینوسی

فتح‌الله داوری دهکردی^۱، جواد احدیان^{۲*}، سید محسن سجادی^۳، آناریتا اسکورزینی^۴ و ماریو دیباکو^۵

- ۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۲- نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۴- دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معماری، دانشگاه لاکویلا، لاکویلا، ایتالیا
- ۵- دانشکده مهندسی عمران، محیط زیست و معماری، دانشگاه لاکویلا، لاکویلا، ایتالیا

دریافت: بازنگری: پذیرش:

چکیده

حوضچه‌های آرامش، سازه‌های اتلاف انرژی می‌باشند که همواره جریان را از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌دهد. نوسانات فشار منفی موجب آسیب‌رسانی قابل توجه در محل حوضچه می‌شود. تزریق جت مستغرق تاثیر فشار منفی موجود در جریان فوق‌بحرانی را تقریباً از بین برده و سبب کاهش تلاطم و سرعت جریان در پایین دست می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر توام سیستم جت مستغرق چندگانه و زبری موج‌دار پیوسته بر کنترل پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرایی ناگهانی انجام شد. بدین منظور، آزمایش‌ها در یک ابراهه آزمایشگاهی با ۳ ترکیب بستر موج‌دار پیوسته و تزریق سیستم جت مستغرق انجام شدند. نتایج نشان داد پرش هیدرولیکی با ۳ دبی تزریق جت مستغرق و در محدوده اعداد فرود ورودی ۶ الی ۱۱، شدت نوسان و تغییر سطح جریان را در محدوده پس از واگرایی مقطع کاهش می‌دهد. همچنین موجب افزایش اتلاف انرژی می‌شود. میزان استهلاک انرژی برای جت‌های افقی مستغرق تقریباً به‌طور میانگین ۲۰ الی ۲۵ درصد بیشتر از مقدار نظیر آن در پرش کلاسیک و گسسته می‌باشد که به ترتیب طول پرش، طول غلتاب و اعماق مزدوج در فرود ۶، ۵۰ درصد، ۴۴ درصد و ۶۳ درصد کاهش داشتند و نشان از تاثیر مثبت این سیستم بر پایداری جریان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: جهش آبی، پرش نامتقارن، استهلاک انرژی، طول پرش هیدرولیکی و بستر موج‌دار.

مقدمه

کنترل جریان در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد؛ چرا که با عبور جریان از روی سرریزها، سرعت جریان افزایش می‌یابد و در پایین دست می‌تواند موجب تخریب و آسیب شود، لذا باید این نیروی حاصل از انرژی جنبشی را مستهلک نمود. سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی شامل دو نوع ضربه‌ای و پرش هیدرولیکی هستند که نوع ضربه‌ای آب را به سمت مواعی هدایت می‌کند که جریان را از مسیر منحرف کرده و با ایجاد تلاطم بیشتر، انرژی را مستهلک می‌کند. همچنین با تشکیل پرش هیدرولیکی در صورت وجود عمق پایاب، می‌توان از رخدادهای منفی جریان فوق‌بحرانی کاست. پرش هیدرولیکی به‌عنوان یک پدیده اتلاف انرژی در دانش هیدرولیک می‌باشد که طی یک روند سریع، جریان از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌کند (Bahrami et al., 2017). سازه‌های استهلاک انرژی متعددی برای کنترل پرش هیدرولیکی وجود دارند که در راستای افزایش بازدهی و تثبیت آن استفاده می‌شوند. رایج‌ترین سازه، حوضچه آرامش با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌باشد که

در نتیجه تلاطم و آشفتگی جریان، انرژی اضافی خنثی می‌گردد. با توجه به اینکه هزینه و زمان بسیاری برای ساخت حوضچه‌های آرامش در انتهای سرریزها و سدهای انحرافی می‌شود، پس کاهش طول پرش از جوانب متعددی چون پایداری و طراحی استاندارد مهم می‌باشد. لذا برای رفع این مشکل از واگرایی به‌عنوان یک روش اقتصادی و اصولی در طرح این سازه می‌توان نام برد (Hager and Bremen, 1989). از طرف دیگر در حوضچه‌های آرامش واگرا، جریان نامتقارن خواهد بود و پارامتر اساسی در این ناحیه، عمق پایاب می‌باشد و با نسبت عمق مزدوج به عمق اولیه برای هر نسبت بازشدگی، پنجه پرش به سوی سراب و یا پایاب منتقل می‌شود. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با توجه به محل تشکیل و پنجه پرش متاثر از عمق پایاب به ترتیب به چهار نوع پرش فرار، گسسته، انتقالی و کلاسیک مطابق با شکل (۱)، تقسیم می‌شوند (Hager and Bremen, 1993)؛ اهمیت این موضوع تحقیق و پژوهش‌های بسیاری را در پی داشته‌است. Herbrand (1973) با بررسی ویژگی پرش گسسته

بر روی بستر صاف، میزان طول پرش بصورت تجربی طبق رابطه (۱) آمده است.

$$\frac{L_j B}{L_j} = 0.8 ; B < 0.64 \quad (1)$$

Matin et al. (2016) با بررسی پرش در مقطع واگرا با نسبت‌های بازشدگی گوناگون، طول پرش را در رابطه (۲) مطابق با رابطه پرش کلاسیک یافت.

$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad (2)$$

بررسی‌هایی دیگر در رابطه با پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد که در صورت وقوع پرش در موقعیت تغییر مقطع، نوع پرش گسسته بوده و طول پرش تحت اثر نسبت بازشدگی مطابق با جدول (۱) خواهد بود (Hager et al., 1990; Hager and Bremen, 1993). از سازه‌هایی چون بسترهای زبر، بیم‌ها، صفحات و موانع مستغرق می‌توان به عنوان مستهلک‌کننده استفاده کرد. زبری‌ها در کف کانال‌ها مانعی در برابر جریان بوده و اثر آن‌ها در بستر موجب کاهش مومتم در خروج نسبت به ورودی در کانال می‌شود (Carolo et al., 2007; Hajialigol et al., 2021). نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آستانه در عرض‌های مختلف، با افزایش عرض، افزایش سرعت و در نتیجه کاهش عمق پرش، باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود (Daneshfaraz et al., 2023).

بررسی‌های فراوان در رابطه با تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر با شکل‌های مختلفی همچون مثلثی، مکعب، مستطیلی و دوزنقه‌ای و بسترهای سینوسی انجام شده است (Ead and Rajaratnam, 2002; Mohamed Ali, 1991; Shafai Bajestan and Neisi, 2009; Rajaratnam, 1968; Alhamid, 2004). نتایج حاصل از این پژوهش‌ها نشان دادند که بستر زبر تاثیر بسزایی در کاهش طول پرش هیدرولیکی داشته است؛ روابط ارائه شده متناسب با طول پرش و طول غلتاب و شرایط موجود در این آزمایش‌ها به‌طور مختصر در جدول (۱) آمده‌اند. نتایج تحقیقاتی بر ویژگی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار نشان دادند که نسبت اعماق مزدوج با اعداد فرود بر روی بسترهای موج‌دار یک رابطه خطی بوده و با افزایش عدد فرود، مقدار ضریب نیروی برشی بسترهای موج‌دار افزایش می‌یابد که حدود ۶/۵ الی ۱۰ برابر بستر صاف می‌باشد (Badizadegan et al., 2014). با توجه به اینکه مهندسان طراح برای هماهنگی بالادست و پایین‌دست و افزایش راندمان، اقدام به حذف سازه تبدیل نموده تا تاثیر مثبتی بر پرش هیدرولیکی داشته باشد، استفاده از بستر زبر در مقطع واگرایی عملکردی مفید برای کنترل طول پرش خواهد داشت. با توجه به تحقیقات پیشین می‌توان گفت که هرچه نسبت بازشدگی کمتر باشد، بازدهی پرش هیدرولیکی بیشتر

است ولی این میزان نسبت به پرش کلاسیک دارای طول بیشتری خواهد بود (Kazemianzadeh and Shafai Bajestan, 2008; Izadjoo and Shafai Bajestan, 2007; Izadjoo et al., 2005). نتایج بررسی‌های پرش پایدار بر روی بستر موجی شکل با اعداد فرود مختلف نشان داد که به‌طور تقریبی طول پرش نیمی از طول آن روی بستر صاف بوده و عمق ثانویه ۲۵ درصد کاهش یافت (Ead and Rajaratnam, 2002). همچنین تحقیقاتی دیگر نشان دادند که نقش بستر موج‌دار بر روی پرش هیدرولیکی پایدار و قوی به‌صورت تجربی در محدوده اعداد فرود آن‌ها و طول موج‌های متفاوت نشان‌دهنده اثر مثبت زبری بر طول غلتاب و پرش بوده است (Tokyay, 2005). Abbaspour et al. (2009) با بررسی بستر موج‌دار سینوسی و ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه می‌باشد و به شیب یا طول موج بستر وابسته نمی‌باشد. این در حالی است که نتایج دیگری نشان می‌دهد با به کارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه آرامش، می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه تا میزان ۲۰ درصد در حدود عدد فرود ۱۲ و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک بود (Badizadegan et al., 2010).

از سازه‌های استهلاک انرژی دیگری که می‌توان نام برد، تزریق جت‌های مستغرق است که همراه با پرش هیدرولیکی به‌صورت افقی یا زاویه‌دار در راستای مقابل یا عمود بر جریان ممکن است وارد شوند و استهلاک انرژی را در پایین‌دست انجام می‌دهد. نتیجه پژوهشی نشان داد که ورود جت به پرش با زاویه‌های بزرگتر، موجب کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش استهلاک انرژی و نیروهای برشی کف می‌شود (Dastourani et al., 2016). با افزایش تعداد جت خروجی و تزریق آن به جریان به‌صورت افقی سبب افزایش استهلاک شده و فشار منفی در کف بستر و تلاطم سطح جریان آب را کمتر می‌کند (Deng et al., 2008). در بررسی دیگری که میزان تاثیر جانمایی و موقعیت مکانی تزریق جت مستغرق را بررسی می‌کرد، نتایج حاکی از اتلاف انرژی در فاصله یک‌سوم ابتدایی حوضچه آرامش رخ می‌دهد و در اعداد فرود بیشتر از ۸، میزان ۷۰ درصد سنجیده شد (Chen et al., 2014).

Hassanpour et al. (2017) با بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی با نسبت واگرایی‌های مختلف (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) و اعداد فرود ورودی در بازه ۶ الی ۱۱ با یکدیگر و همچنین مقایسه با مقادیر مربوطه اندازه‌گیری شده برای پرش هیدرولیکی کلاسیک نشان دادند که عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل یک پرش هیدرولیکی و نیز طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی روی یک مقطع واگرایی تدریجی با بستر ناهموار به‌طور محسوسی کمتر از پرش‌های هیدرولیکی اولیه بود. نتایج نشان می‌دهد که این سازه، انرژی جریان را از بین برده و طول

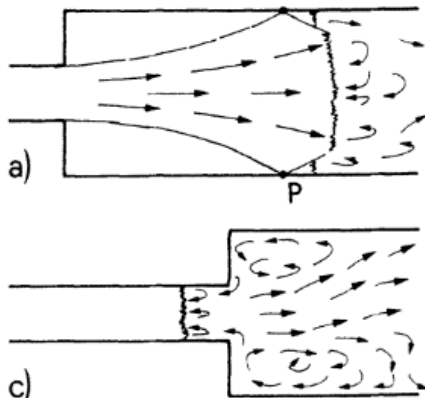
در رابطه فوق، ΔE افت انرژی، E_1 انرژی اولیه، L_j طول پرش هیدرولیکی، L_r طول غلتابی، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال، g شتاب گرانش، V سرعت جریان، Q دبی جریان در کانال اصلی، Q_j دبی جت، B عرض کانال اصلی، b عرض کانال در مقطع واگرا، P فاصله سیستم جت مستغرق از مقطع واگرایی، y_e عمق پایاب، y_1 عمق نخست پرش و y_2 عمق دوم پرش هیدرولیکی، S فاصله هر دو قله متوالی از یکدیگر در بستر سینوسی و t ارتفاع قله‌های بستر سینوسی هستند. با توجه به ارتفاع قله‌ها و طول موج یا فاصله هر دو قله که متفاوت می‌باشند، میزان سه بستر با ابعاد مختلف مطابق با جدول (۲) لحاظ شده‌اند؛ همچنین میزان پنج دبی ورودی به کانال و مجرای اصلی در بازه اعداد فرود ۶ الی ۱۱ انتخاب و ۳ دبی جت مستغرق، ۴/۵، ۶ و ۸ لیتر بر ثانیه برای تزریق به کانال اصلی اتخاذ شد که در جدول (۲) نیز آمده‌است. با آنالیز ابعادی و با استفاده از قضیه π باکینگهام و انتخاب ρ, V, y_1 به‌عنوان متغیرهای تکراری، رابطه (۴) به‌صورت پایین حاصل گردید:

$$F \left(\frac{\Delta E}{E_1}, Fr, Re, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{b}{B}, \frac{P}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{y_1} \right) = 0 \quad (4)$$

در این رابطه، Re عدد رینولدز جریان و Fr عدد فرود هستند که با توجه به اینکه میزان عدد رینولدز از ۲۰۰۰ بیشتر بوده و در محدوده وضعیت آشفته و متلاطم است، می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Chow, 1959). همچنین از مقادیر ثابتی چون $\frac{P}{B}$ و $\frac{b}{B}$ نیز صرف‌نظر گردید؛ بنابراین، رابطه نهایی به‌صورت رابطه (۵) ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = F \left(Fr, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1} \right) \quad (5)$$

دامنه تغییرات پارامترهای بدون بعد در آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌است.



حوضچه‌های آرامش را کاهش می‌دهند و جت‌های پرسرعت را از کف حوضچه‌های آرامش منحرف می‌کنند (Hassanpour et al., 2020; Aal et al. 2018). (Sharoonizadeh et al., 2021) نیز با بررسی تزریق جت مستغرق چندگانه در مقطع واگرایی ناگهانی و در فواصل و اعداد فرود معین و با تعداد منافذ خروجی سیستم جت مستغرق، پرش هیدرولیکی را کنترل کرده و در انتقال از جریان فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی، با کاهش قابل توجه طول آن، ناپایداری پرش برطرف کرده‌است.

از آنجایی که سلامت و ایمنی سازه‌ها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی و همچنین حفاظت رودخانه و بستر و سواحل آن مدنظر می‌باشد، لذا باید با اتلاف و استهلاک انرژی از وقوع آسیب‌ها و تخریب‌های ناشی از انرژی جنبشی بیش‌ازحد و سرعت بالای جریان آب در رودخانه و کانال‌های آبرسانی جلوگیری نمود. حال آن‌که این مهم در راستای بهبود راندمان حوضچه آرامش و کنترل پرش هیدرولیکی و حفظ بستر از فرسایش باشد. در این بررسی هدف اصلی کاهش طول پرش و غلتاب و همچنین ایجاد عمق ثانویه و مزدوج پرش در بازه کمتری از فاصله طولی و استهلاک انرژی بیشتر نسبت به دیگر حالات و انواع پرش‌های هیدرولیکی می‌باشد تا به پایداری جریان و یکنواختی مطلوب دست یافت.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

برای دستیابی به اهداف این پژوهش، ابتدا باید به شناخت و آگاهی پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی پرداخت تا بتوان عمق ثانویه پرش، طول پرش هیدرولیکی و طول غلتابی را به‌دست آورد. با تجزیه و تحلیل و آنالیز ابعادی، رابطه اساسی تحقیق که شامل متغیرهای بدون بعد هستند، استخراج گردید. پارامترهای موثر در این آزمایش در رابطه (۳) ارائه گردیده‌است:

$$F(\Delta E, E_1, L_j, L_r, \rho, \mu, g, V, Q, Q_j, B, b, P, y_e, y_1, y_2, S, t) = 0 \quad (3)$$

Fig. 1- Types of jumps in the sudden expansion of the section

شکل ۱- انواع پرش در انبساط ناگهانی مقطع

جدول ۱- تعدادی روابط پیش بینی طول پرش و طول غلتایی در بستر زبر

Table 1- A number of relationships predict the length of the jump and the length of the swell in the rough bed

No.	Researcher	Equation
(1)	Herbrand, 1973	$\frac{L_{jB}}{L_j} = 0.8 ; B < 0.64$
(2)	Matin et al., 1997	$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right)$
(3)	Hager et al., 1990	$\frac{L_{jB}}{L_j} = 2 - \sqrt{B}$
(4)	Hager et al., 1990	$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right)$
(5)	Hager and Bremen, 1993	$\frac{L_j}{y_1} = 8(Fr_1 - 1.5)$

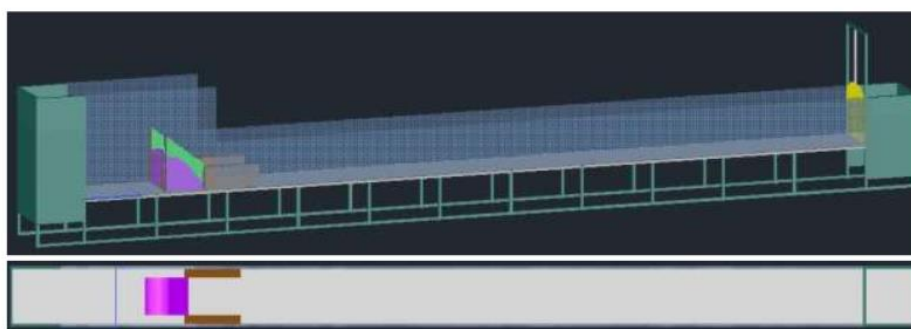


Fig. 2- The laboratory experimental section used in this study

شکل ۲- شمایی از فلوم مورد استفاده در این پژوهش

در بازه ۶/۲ الی ۱۰/۸ جریان برقرار شد. پس از ورود دبی معین به عنوان جریان اصلی و برقراری جریان، با تنظیم دریچه در پایین دست می توان میزان عمق پایاب مورد نظر برای تشکیل پرش هیدرولیکی را به دست آورد و برداشت داده های عمقی جریان را با عمق سنج و میزان سرعت جریان در طول مسیر را با استفاده از سرعت سنج پروانه ای یک بعدی اندازه گیری کرد. همچنین این آزمایش ها برای بسترهای موج دار که هرسه حالت آن با ابعاد متفاوت از یکدیگر طبق جدول (۳) هستند، نسبت به حالت نامتقارن پرش گسسته و بدون وجود زبری پیوسته در بستر سنجیده شدند. در ادامه با ورود جت مستغرق توسط سیستمی که با اتصال به مخزن ذخیره ای فلوم تامین شده بود، تزریق جت صورت گرفت. دبی های انتخابی جت ورودی به سیستم به صورت مستغرق، ۴/۵، ۶ و ۸ لیتر بر ثانیه توسط دبی سنج آلتراسونیک اندازه گیری شدند و استقرای جریان و طول غلتاب و پرش هیدرولیکی در بازه طولی بستر موج دار پیوسته سنجیده شدند. شکل (۴) و (۵) نمایی از تزریق جت به سیستم و پرش هیدرولیکی در مقطع بستر موج دار را نشان می دهد. با توجه به آشفته گی بسیار بالا در پنجه سرریز می توان با استفاده از رابطه بلانگر، رابطه (۶) و عمق پایین دست، عمق اولیه را یافت و همچنین درصد استهلاک انرژی با رابطه (۷) به دست آمد (Chanson, 2015):

روش انجام آزمایش و امکانات آزمایشگاهی

آزمایش ها در یک فلوم در آزمایشگاه مدل های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلوم شامل یک مخزن ذخیره با ابعاد یک متر عرض و ۲/۴ متر طول، یک سرریز اوجی با ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر است. یک مجرای افقی با سطح مقطع مستطیل به طول ۱۲ متر، عرض یک متر و عمق ۰/۸۷ متر می باشد. شکل (۲) مقطع طولی فلوم مورد نظر را نشان می دهد. دو دیوار پلکسی در نوک سرریز در دو طرف کانال نصب شد تا یک قسمت باریک به طول ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر ایجاد شود تا بتوان یک مقطع با انبساط ناگهانی و با نسبت انبساط عرض بالادست به پایین دست ۰/۶۷ متر داشت. همچنین یک دریچه عمودی در قسمت انتهایی فلوم برای کنترل عمق پایاب و محل تشکیل پرش هیدرولیکی تعبیه شد (شکل ۳). با استفاده از یک شیر فلکه کشویی، میزان دبی ورودی به فلوم با توجه به منحنی دبی - اشل سرریز تنظیم می شود. با استفاده از یک شاخص مدرج به عنوان عمق سنج با دقت یک دهم سانتی متر، عمق آب اندازه گیری گردید. نحوه انجام آزمایش بدین صورت بود که با قرارگیری بسترهای موج دار پیوسته بلافاصله پس از مقطع واگرای ناگهانی و ورود دبی هایی به میزان ۲۵ الی ۶۷ لیتر بر ثانیه و با تعداد ۵ عدد فرود

$$y_1 = \frac{y_2}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (7)$$

پذیرفته شده، قبیل از انتشار

جدول ۲- مشخصات و متغیرهای آزمایش در پژوهش

Table 2- Characteristics and test variables of the research

Froud Number	Main discharge (L/s)	Jet discharge (L/s)	Abb. name of jet	Corrugated bed dimensions (cm)	Name of corrugated bed
10.8	26				
9.5	37	4.5	J1	S = 3; t = 1	C1
8.7	45	6	J2	S = 5; t = 3	C2
7.4	56	8	J3	S = 10; t = 6	C3
6.2	67				



Figure 3- A view of the gate of the flume (a) and the ogee spillway (b)

شکل ۳- نمایی از دریچه فلوم (الف) و سرریز اوجی (ب)

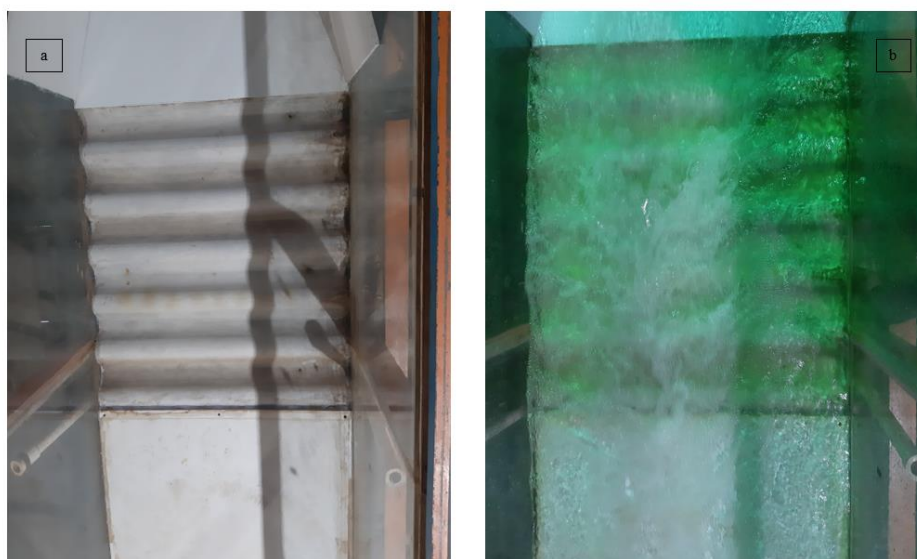


Figure 4- A view of the bed roughness (a) and hydraulic jump in the bed (b)

شکل ۴- نمایی از شکل زبری بستر (الف) و پرش هیدرولیکی در بستر (ب)

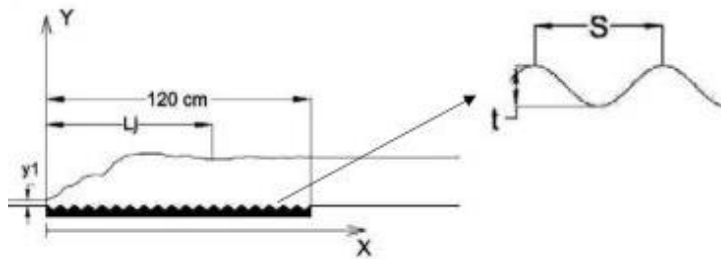


Figure 5- A view of the sinusoidal corrugated bed after the expansion

شکل ۵- شمایی از بستر موج‌دار پس از واگرایی

جدول ۳- روند نام‌گذاری و ترکیب مدل‌های آزمایشی در تحقیق

Table 3- The process of naming and combining experimental models in research

Model	t (cm)	S (cm)	Discharge of jet (L/s)
C1-J1	1	3	4.5
C1-J2	1	3	6
C1-J3	1	3	8
C2-J1	3	5	4.5
C2-J2	3	5	6
C2-J3	3	5	8
C3-J1	6	10	4.5
C3-J2	6	10	6
C3-J3	6	10	8
C1	1	3	-
C2	3	5	-
C3	6	10	-

انرژی برای سه حالت بستر موج‌دار را نشان می‌دهد. با یافتن محل تشکیل پرش هیدرولیکی میزان نقش‌آفرینی آن بر میزان اتلاف انرژی مشخص شده و می‌توان افت انرژی بیشتری داشت. همانطور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۴)، میزان افت انرژی در بستر سینوسی با طول موج‌های بلندتر و عمیق‌تر بیشتر بوده و تاثیر بهتری در کاهش سرعت جریان داشته‌است و انرژی را مستهلک کرده و همچنین عمق ثانویه را در طول کمتری از بستر موج‌دار مهار و کنترل کرده‌است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تاثیر تزریق جت در همه حالات و ترکیب‌های قرارگیری با افزایش دبی جت مستغرق بیشتر بوده و در استهلاک انرژی نقش بسزایی دارد. در شکل (۶) تاثیر همزمان زبری بستر و تزریق جت نسبت به حالات بدون جت و همچنین بدون بستر موج‌دار پیوسته به‌هنگام تشکیل پرش نوع گسسته در مقطع واگرایی نشان داده شده‌است. همانطور که پیداست با افزایش دبی جت مستغرق متقابل و افزایش طول موج زبری در بستر، اتلاف انرژی بیشتری را نیز به ثبت رسانده شده‌است. البته با افزایش دبی جریان اصلی و دبی‌های کمتر جت مستغرق، مقدار درصد استهلاک انرژی نیز کاهش داشته‌است.

نتایج و بحث

با توجه به شرایط جریان ورودی و پژوهش‌های پیشین در این زمینه نشان داده‌است که پرش نوع گسسته در مقطع واگرا، نقش پررنگ‌تری در استهلاک انرژی در قیاس با انواع دیگر پرش‌های هیدرولیکی در این‌گونه مقاطع دارد و بازدهی آن رابطه مستقیمی با نسبت بازدهی بیشتر واگرایی خواهد داشت. لذا برای کنترل پرش هیدرولیکی در مقطع واگرایی ناگهانی از ترکیب زبری موج‌دار در بستر همراه با جت مستغرق استفاده شد که نتایج به‌ترتیب ارائه خواهند شد.

الف) استهلاک انرژی سرریز

در این پژوهش، آزمایش‌ها برای پنج دبی اصلی ۲۶، ۳۷، ۴۵، ۵۶ و ۶۷ لیتر بر ثانیه بر روی مدل مذکور انجام شد و با سنجش میزان عمق بالادست سرریز، میزان انرژی اولیه حاصل گردید. همچنین با اندازه‌گیری عمق پایاب در پایین‌دست سرریز، میزان عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به‌دست آمد. سپس با استفاده از رابطه (۷)، عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پای سرریز محاسبه گردید. همچنین محاسبات مربوط به استهلاک انرژی از طریق رابطه (۸) انجام شد و درصد افت انرژی به‌دست آورده شد. روند ترکیب آزمایش‌ها در جدول (۳) به اختصار بیان شده‌است و همین‌طور جدول (۴) خلاصه نتایج محاسباتی درصد استهلاک

جدول ۴- نتایج میزان درصد استهلاک انرژی در حالات گوناگون

Table 4- The results of the percentage of energy consumption in different situations

Model	Froude Number				
	6.2	7.4	8.7	9.5	10.8
S1: Sample	19.246	44.446	61.081	53.599	29.032
C1	26.305	8.031	19.185	4.522	11.642
C2	11.48	13.277	16.495	4.073	21.584
C3	34.457	38.822	40.490	17.468	1.743
C1-J1	9.710	2.940	4.278	14.967	77.195
C1-J2	2.365	13.716	20.742	28.145	35.576
C1-J3	6.974	20.799	30.341	42.103	55.367
C2-J1	9.500	23.106	32.040	42.314	53.002
C2-J2	10.885	24.928	34.295	45.522	57.969
C2-J3	7.090	20.843	30.115	41.569	53.939
C3-J1	70.371	17.126	0.849	19.903	51.369
C3-J2	33.429	3.492	14.425	35.390	58.852
C3-J3	5.008	4.291	21.239	45.608	60.026

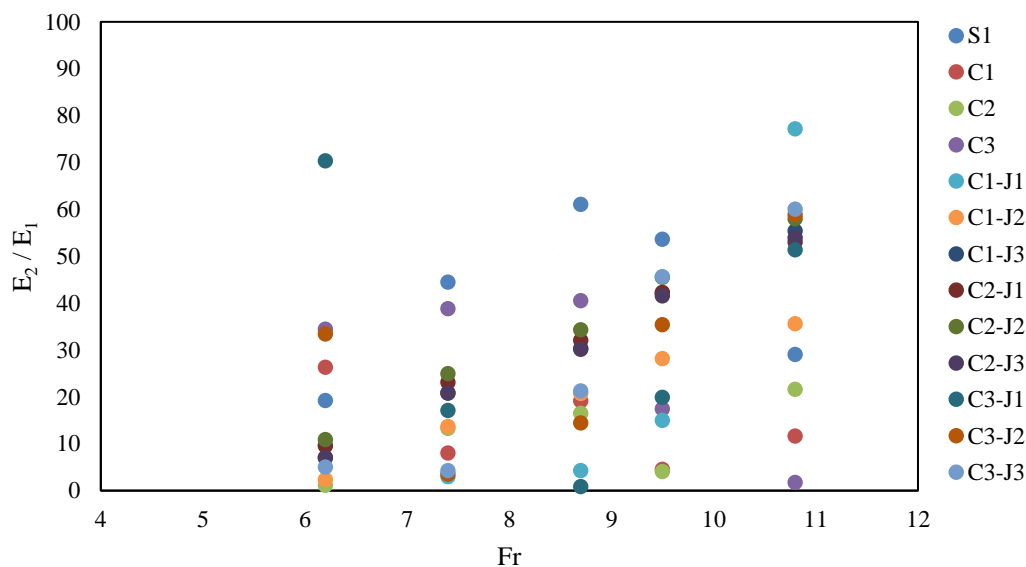


Figure 6- The relative energy consumption of hydraulic jump caused by the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل ۶- استهلاک انرژی نسبی پرش هیدرولیکی ناشی از حضور بستر موج‌دار و جت مستغرق

جت این میزان بهبود یافته و انرژی بیشتری مستهلک گردیده‌است. در فرود پایین، این تغییرات نسبت به حالت بدون جت برابر ۲۵ درصد بوده و با تزریق جت مقابل جریان به ۴۵ درصد می‌رسد. با افزایش عدد فرود، این میزان کمتر شده و ۳۰ درصد می‌باشد.

ج) طول پرش هیدرولیکی

برای بررسی میزان طول پرش هیدرولیکی، حالت‌های گوناگون مورد آزمایش و سنجش قرار گرفتند. برای تحقق این هدف و تحلیل

ب) بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

یکی از دیگر شاخصه‌های مهم در پرش هیدرولیکی، نسبت عمق دوم به عمق نخستین پرش می‌باشد؛ چرا که کاهش این نسبت اعماق مزدوج پرش، در طراحی حوضچه‌های آرامش موثر خواهد بود. شکل (۷) نسبت عدد فرود جریان در مقابل اعماق مزدوج پرش را برای هر یک از حالات مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. مطابق با این نمودارهای رسم‌شده، قرارگیری بستر موج‌دار با ابعاد هندسی بزرگ‌تر نسبت به حالات دیگر تاثیر بیشتری داشته‌است. همچنین با تزریق

صورت می‌گیرد، جریان به سمت بالادست هدایت شده و بر اثر تلاطم و اغتشاش، جریان در حوضچه آرامش به‌طور چشم‌گیر و قابل‌ملاحظه‌ای افزایش عمق می‌دهد؛ بنابراین برای مهار پرش هیدرولیکی شکل‌گرفته به طول بیشتری از حوضچه آرامش نیاز است. با مقایسه این حالات نسبت به تحقیق‌های پیشین مشابه، نشان از افزایش استهلاک انرژی و کاهش طول پرش می‌دهند که با اشاره به این مورد می‌توان به آثار مثبت این پژوهش اشاره نمود.

این روش‌های طراحی در هندسه، میزان مقادیر طول پرش نسبت به عمق اولیه سنجیده شده و در مقابل عدد فرود جریان در شکل (۸) به نمایش درآمده‌است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش دبی جت، میزان طول پرش کاهش یافته‌است؛ نظر به نمودار ترسیم‌شده، در حالتی که زبری بستر ابعاد بیشتری از نظر طول موج خود داشته‌است، طول پرش نیز کاهش یافته‌است. این مقادیر برای فرودهای پایین تا ۵۰ درصد کمتر شده و برای فرودهای بالا، ۳۰ درصد کاهش گردیده‌است. در زمانی که تزریق جت به مجرای اصلی

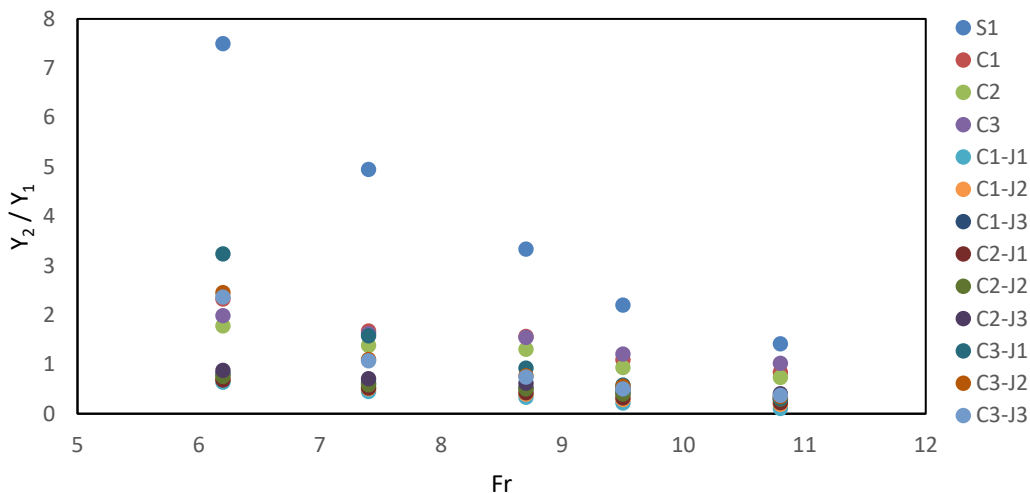


Figure 7- Comparison of hydraulic jump conjugate depths ratio against Froude number in the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل ۷- مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود در حضور بستر موج‌دار و جت مستغرق

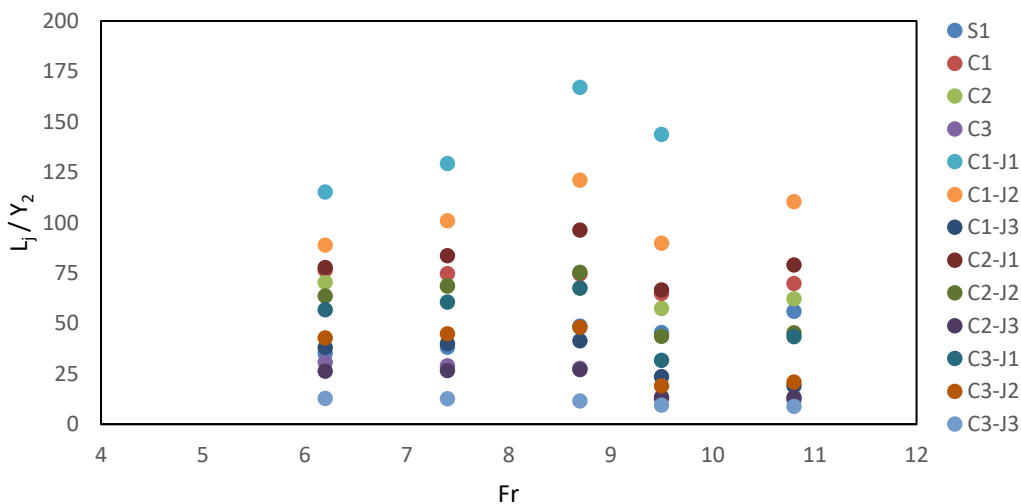


Figure 8- Comparison of the Froude number against the length of the hydraulic jump to its conjugated depth in the corrugated bed

شکل ۸- مقایسه عدد فرود در برابر طول پرش هیدرولیکی نسبت به عمق مزدوج آن در بستر موج‌دار

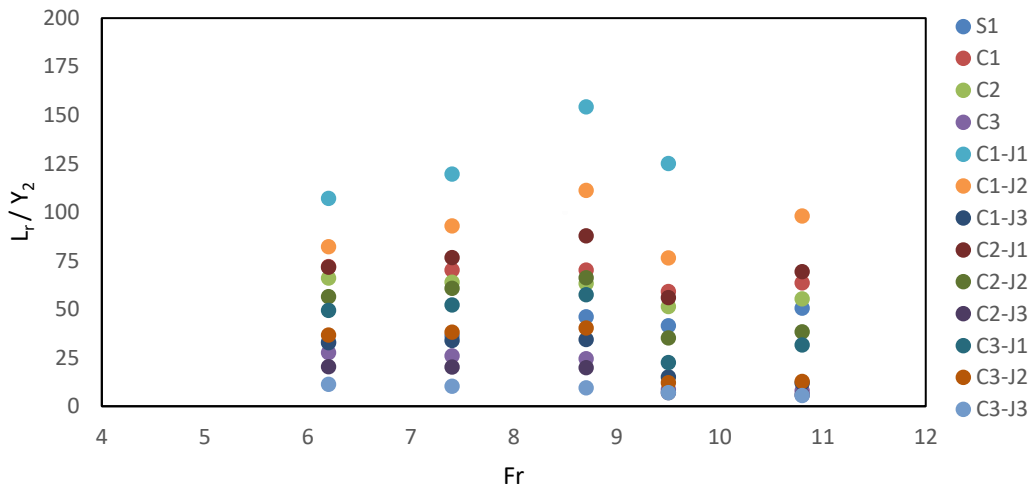


Figure 9- Variations of the relative jump length against Froude number for bed with different roughness
 شکل ۹- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود برای بستر با زبری های مختلف

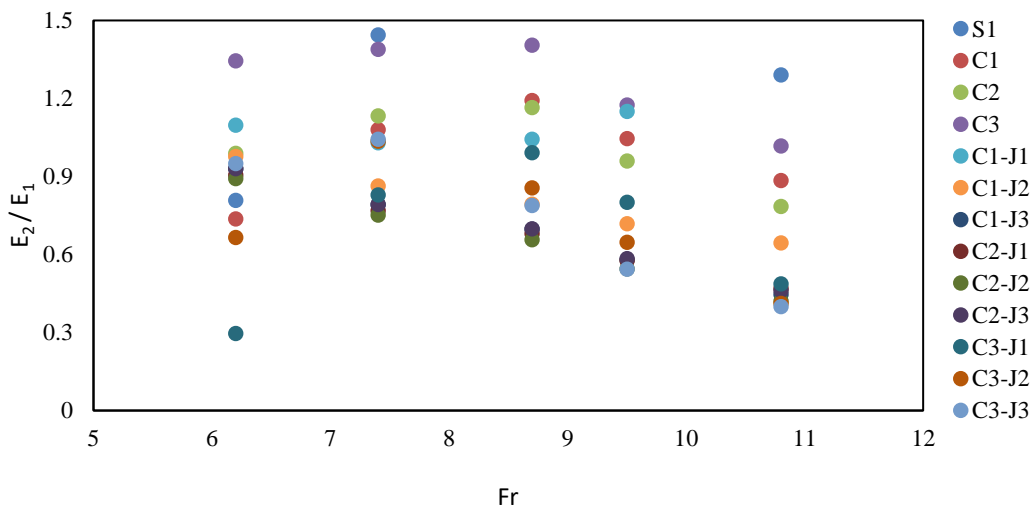


Figure 10- Relative energy loss versus Froude number relative to each other
 شکل ۱۰- اتلاف انرژی نسبی در مقابل عدد فرود نسبت به یکدیگر

۴۰ تا ۶۰ درصد و در بیشترین حالت تا ۶۳ درصد نسبت به حالت کلاسیک، کاهش داشته است. همچنین در شکل (۱۰)، میزان اتلاف انرژی نیز نمایش داده شده است که نقش مثبت این سیستم استهلاک را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

سرعت بالای جریان عبوری در پایین دست سرریزها باعث تخریب بستر طبیعی رودخانه و کانال‌های آبرسانی می‌شود. با استفاده از اتلاف‌کننده‌های انرژی همانند حوضچه‌های آرامش، موانع و بلوک‌ها

د طول غلتاب

از پارامترهای مهم دیگری که در طراحی حوضچه‌های آرامش با اهمیت است، طول غلتاب می‌باشد؛ زیرا در بازه آن ضخامت قسمت دال را باید بیشتر لحاظ کرد و حفاظت بستر را تامین کرد. پس از اهمیت بسزایی برخوردار است و شاخصی برای بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی خواهد بود. لذا در این پژوهش، طول غلتاب در شرایط مختلف اندازه‌گیری شد. از شکل (۹) استنباط می‌شود در دبی‌ها و اعداد فرود پایین، طول غلتاب جت مستغرق بیشتر از حالت پرش نوع گسسته و همین‌طور کلاسیک است و در دبی‌های بالاتر این میزان با یکدیگر برابر می‌شوند. میزان طول غلتاب در محدوده

ترکیب آن با جت مستغرق موجب کاهش سرعت ثانویه و افزایش عمق مزدوج پرش در طول کمتری از مسیر می‌شود. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان داد که ترکیب زبری بستر و جت‌های مستغرق به‌عنوان یک سیستم اتلاف انرژی، الگوی جریان و ویژگی‌های اولیه پرش هیدرولیک را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشند. در نتیجه، استفاده از جت مستغرق می‌تواند به جلوگیری از آسیب شدید به سازه‌های هیدرولیکی و حفظ بستر رودخانه در پایین‌دست کمک کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل نتایج پایان‌نامه دکترای نویسنده اول و با حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه و پژوهانه نویسنده دوم به شماره SCU-WH1399.260 تهیه شده‌است که بدین‌وسیله از حمایت دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌گردد.

و واگرایی‌ها می‌توان انرژی جنبشی جریان را کاهش داد و به استهلاک انرژی و کاهش طول غلتاب و پرش پرداخت. از آزمایش‌های صورت‌گرفته مشخص شد که میزان استهلاک انرژی در حوضچه‌هایی که با افزایش ابعاد بستر موج‌دار همراه هستند، حدوداً ۱۵ درصد از حالات کوچک‌تر، بیشتر بوده و همچنین با اضافه‌شدن جت مستغرق مقابل این مقدار تا ۳۰ درصد نسبت حالات پرش نوع گسسته نیز می‌رسد. تزریق جت آب موجب اتلاف انرژی در دبی‌های بالاتر جت مستغرق در طول پرش به‌طور میانگین ۲۰ درصد بیشتر از پرش در حالات زبری‌هایی با ابعاد کوچکتر می‌باشد. طول نسبی پرش هیدرولیک با افزایش عدد فرود اولیه یعنی فاصله جت افزایش می‌یابد. بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی طول غلتاب نشان‌دهنده این است که در دبی‌های کمتر، ۵۵ الی ۶۰ درصد کاهش داشته و با افزایش دبی، این تغییرات به ۴۰ درصد رسید. مقایسه داده‌های حاصل از این بررسی با دیگر تحقیقات پیشین نشان دادند که زبری موج‌دار تاثیر بسزایی در کنترل پرش و همچنین

References

- 1- Aal, G.M.A., Sobeah, M., Helal, E. and El-Fooly, M., 2018. Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), pp.1887-1896. Doi: 10.1016/j.asej.2017.01.008
- 2- Abbaspour, A., Dalir, A.H., Farsadzadeh, D. and Sadraddini, A.A., 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research*, 3(2), pp.109-117. Doi:10.1016/j.jher.2009.05.003.
- 3- Alhamid, A.A., 2004. S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic research*, 42(6), pp.657-662. Doi: 10.1080/00221686.2004.9628319.
- 4- Badizadegan, R., Esmaili, K., Faghfour Maghrebi, M., Saneie, M. (2011). 'Hydraulic Jump Properties in Irrigation Canals with Corrugated Bed', *Water and Soil*, 25(3), pp. - . doi: 10.22067/jsw.v0i0.9702
- 5- Badizadegan, R., Saneie, M. and Esmaili, K., 2014. Comparison Of Hydraulic Jump Characteristics On Different Types of Corrugated Beds. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(2), pp.220-232.
- 6- Bahrami, H., Ghomeshi, M., Kashefi Por, S.M. and Salehi Neyshabouri, S.A.A., 2017. Investigation of characteristics of density current because of regime changes. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(1), pp.112-121. Doi: 10.22113/jmst.2017.7773.1390.
- 7- Carollo, F.G., Ferro, V. and Pampalone, V., 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), pp.989-999. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:9(989).
- 8- Chanson, H. 2015 *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. Taylor & Francis, London, UK.
- 9- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L. and Peng, Y., 2014. Characteristics of the velocity distribution in a hydraulic jump stilling basin with five parallel offset jets in a twin-layer configuration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), pp.208-217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000817](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000817)
- 10- Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics McGraw-Hill Book Company, 1959*. ISBN 07-010776-9.

- 11- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P., Di Francesco, S. and Abraham, J.P., 2023. Experimental study of geometric shape and size of sill effects on the hydraulic performance of sluice gates. *Water*, 15(2), p.314. <https://doi.org/10.3390/w15020314>
- 12- Dastourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S.R., 2016. The impact of water jet angle on the characteristics of hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), pp.225-239. <https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3195> (in persian).
- 14- Deng, J., Xu, W.L., Zhang, J.m., Qu, J. and Y.q. Yang, 2008. A new type of plunge pool—Multi horizontal submerged jets. *Science in China Series (E: Technological Sciences)*, 51(12): 2128-2141.
- 15- Ead, S.A. and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), pp.656-663. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).
- 16- Hager, W. H. and Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths Ratio. *Journal of Hydraulic Research IAHR*, Vol. 27, No. 5, PP. 566-585. Doi: 10.1080/00221688909499111.
- 17- Hager W.H., Bermen R. and Kawagoshi N. 1990. Classic Hydraulic Jump: Length of Roller. *Journal of Hydraulic Research*, Pages 591-608. Doi: 10.1080/00221689009499048.
- 18- Hager, W. H. and Bremen, R. 1993. T-jump in abruptly expanding channel, *Journal of Hydraulic Research*, 31:1, 61-78. Doi: 10.1080/00221689309498860.
- 19- Hajjaligol, S.; Ahadiyan, J.; Sajjadi, M.; Scorzini, A.R.; Di Bacco, M.; Shafai Bejestan, M. 2021. Cross-beams dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of the flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147, 06021012. Do: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622.
- 20- Hassanpour, N.; Hosseinzadeh Dalir, A.; Farsadizadeh, D.; Gualtieri, C. 2017. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9, 945. Doi: 10.3390/w9120945.
- 21- Hassanpour, N.; Hosseinzadeh Dalir, A.; Bayon, A.; Abdollahpour, M. 2020. Pressure Fluctuations in the Spatial Hydraulic Jump in Stilling Basins with Different Expansion Ratio. *Water*, 13, 60. Doi: 10.3390/w13010060.
- 22- Helal, E.; Abdelhaleem, F.S.; Elshenawy, W.A. 2020. Numerical Assessment of the Performance of Bed Water Jets in Submerged Hydraulic Jumps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146, 04020014. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000147.
- 23- Herbrand, K. 1973. The Spatial Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*. Pages 205-218. Doi: 10.1080/00221687309499774.
- 24- Izadjoo F., Shafai Bajestan M., Bina M. 2005. Hydraulic Jump Characteristics on a Trapezoidal Corrugated Bed. *The scientific journal of agriculture (SJA)*. Page(s) 107-122. Doi: 10.3923/jas.2007.1164.1169.
- 25- Izadjoo F., Shafai Bajestan M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Journal of Applied Sciences*. volume 7, issue 8, pp. 1164-1169.
- 26- Kazemianzadeh A., Shafai Bajestan M. 2008. Experimental study of the effect of roughness arrangement on hydraulic jump characteristics in stilling basin, *3rd Iran Water Resources Management Conference*, Tabriz University, Iran.
- 27- Matin M.A., Negm A.M. El-Said A.A, and Alhamid A.A. 2016. Prediction of Sequent Depth Ratio of Free Hydraulic Jump in Abruptly enlarged Channels. *Egyptian Journal for Engineering Sciences & Technology*. Pages 31-36.

- 28- Mohamed Ali, H.S., 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1), pp.83-93. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1(83).
- 29- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic Jump on Rough Bed. *Transactions of the Engineering Institute of Canada*. Pages 1-8.
- 30- Shafai Bajestan M., Neisi K. 2008. Effect of Bed Roughness Shape on Hydraulic Jump Length in Rectangular Channels, *Iranian Hydraulic Association*. Page 29-40.
- 31- Shafai Bajestan M., Neisi K. 2009. Effect Shape of Roughness on the Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump. *Water and Soil Science Journal*. Tabriz University, Iran. Pages 165- 176.
- 32- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., Di Bacco, M., Sajjadi, M. and Moghadam, M.F., 2021. Experimental analysis on the use of counterflow jets as a system for the stabilization of the spatial hydraulic jump. *Water*, 13(18), p.2572. doi: /10.3390/w13182572.
- 33- Tokyay, N. D. 2012. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Impacts of Global Climate Change*, pp.1-9.

Experimental investigation of the effect of submerged jet on the characteristics of asymmetric hydraulic jump in corrugated bed

F. Davari Dehkordi¹, J. Ahadiyan^{2*}, S.M.Sajjadi³, A. Rita Scorzini⁴ and M. Di Bacco⁵

1- Ph.D. in Hydraulic Structures of Water Sciences, Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2* - Corresponding Author, Associated professor of Department of Water Structures Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (j.ahadiyan@scu.ac.ir)

3- Assistant professor of Department of Water Structures Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

4- Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, L'Aquila, Italy

5- Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, L'Aquila, Italy

Keywords: Hydraulic jump, Asymmetric jump, Energy dissipation, Hydraulic jump length and Corrugated bed.

Introduction

Hydraulic jump is a phenomenon in which the flow changes from a supercritical state to a subcritical state. As a result of the phenomenon of hydraulic jump, the flow depth is significantly increased in a relatively short way and according to its increasing, the flow speed and energy is reduced. Dropping down the energy of the flow before to transfer downstream is a solution to prevent possible damages to the canal bed and downstream structures (Katourani & Kashefipour, 2014).

The formation of hydraulic jump was done on rough beds with different shapes such as triangular, cubic, rectangular and trapezoidal and sinusoidal beds and the results showed that the rough bed had a significant effect in reducing the length of hydraulic jump (Shafai Bajestan and Neisi, 2009). Also, the hydraulic jump property in sinusoidal beds showed that the ratio of conjugate depths with Froude numbers on sinusoidal beds is a linear relationship and with the increase of Froude number, the value of shear force coefficient of sinusoidal beds increases (Badizadegan et al., 2014). Among other energy consumption structures is the injection of submersible jets, which enter horizontally or at an angle along with the hydraulic jump from the front or side of the current, and consumes the energy dissipation of downstream and reduces the conjugate depth ratio, jump length, and bottom shear forces (Dastourani et al., 2016).

The purpose of this study is to investigate the effect of the counterflow jet and bed roughness on the energy dissipation of the structure. Certainly, increasing the energy loss of the structure is affected the downstream hydraulic jump conditions and the length of the stilling basin.

Methodology

The experiments were carried out in a flume in the hydraulic models laboratory of the Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz. The flume consists of a storage tank with dimensions of 1 meter wide and 2.4 meters long, a peak spillway with a height of 0.6 meters and a width of 0.67 meters. It is a horizontal channel with a rectangular cross-section, 12 meters long, 1 meter wide and 0.87 meters deep. These tests were measured for corrugated beds, all three states of which are different from each other according to table (1), compared to the asymmetric state of discrete jump and without continuous roughness in the bed. Next, with the entry of the submerged jet, jet injection was done by the system that was connected to the flume storage tank. The flow rate of the jet entering the system was measured in the amount of 3 in the range of 4.5 to 8 liters per second by an ultrasonic flow meter, and the flow absorption and the length of rolling and hydraulic jump were measured in the longitudinal range of the continuous corrugated bed. Due to the very high disturbance in the overflow leg, the initial depth can be found by using Belanger's relation,

Equation (1) and downstream depth, and also the percentage of energy consumption can be obtained with Equation (2) (Chanson, 2015);

$$y_1 = \frac{y_2}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (2)$$

where E_1 is the flow energy at the upstream, y_1 is the first depth of hydraulic jump measured using Equation (1), and y_2 is the second depth of jump measured by point gauge and Fr_2 is Froude No. of the second depth.

Table 1- Characteristics and test variables of the research

Name of corrugated bed	Corrugated bed dimensions (cm)	Abb. name of jet	Jet discharge (L/s)	Main discharge (L/s)	Froud Number
				26	10.8
C1	S = 3; t = 1	J1	4.5	37	9.5
C2	S = 5; t = 3	J2	6	45	8.7
C3	S = 10; t = 6	J3	8	56	7.4
				67	6.2

Results and Discusspn

In this research, experiments were conducted for five main flow rates of 26, 37, 45, 56, and 67 liters per second on the mentioned model, and by measuring the depth of the overflow, the amount of primary energy was obtained. Also, by measuring the depth of the aquifer downstream of the spillway, the secondary depth of the hydraulic jump was obtained. Then, using equation (1), the initial depth of the hydraulic jump at the spillway foot was calculated. Also, calculations related to energy consumption were performed through equation (2) and the percentage of energy loss was obtained. The process of combining tests is briefly stated in table (2) shows the summary of the calculation results of the percentage of energy consumption for three types of corrugated bed. By finding the location of the hydraulic jump, its role on the amount of energy loss is determined and the optimal hydraulic jump with the maximum energy loss can be identified.

Table 2- The results of the percentage of energy consumption in different situations

Model	Froud Number				
	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
S1: Sample	19.246	44.446	61.081	53.599	29.032
C1	26.305	8.031	19.185	4.522	11.642
C2	11.48	13.277	16.495	4.073	21.584
C3	34.457	38.822	40.490	17.468	1.743
C1-J1	9.710	2.940	4.278	14.967	77.195
C1-J2	2.365	13.716	20.742	28.145	35.576
C1-J3	6.974	20.799	30.341	42.103	55.367
C2-J1	9.500	23.106	32.040	42.314	53.002
C2-J2	10.885	24.928	34.295	45.522	57.969
C2-J3	7.090	20.843	30.115	41.569	53.939
C3-J1	70.371	17.126	0.849	19.903	51.369
C3-J2	33.429	3.492	14.425	35.390	58.852
C3-J3	5.008	4.291	21.239	45.608	60.026

Conclusions

This was figured out of the experiment that the amount of energy consumption in basins that are associated with an increase in the dimensions of the corrugated bed is about 15% more than in smaller cases, and also, with the addition of a submerged jet, this value reaches 30% in the case of discrete jumping cases. The counterflow jet system has been affected on the asymmetric jump and caused stability of the jump, controlled of the uniformity of the flow. The energy loss, length of hydraulic jump and length of rolling at $Fr=6$ are respectively 50%, 44% and 63%. So, as the flow rate increases, the relative percentage decrease in the hydraulic jump length decreases.

Totally, the results obtained from the present research showed that the combination of bed roughness and submerged jets as an energy dissipation system significantly improve the flow pattern and the primary characteristics of the hydraulic jump. As a result, the use of submersible jets can help preventing severe damages to hydraulic structures and preserve the river bed downstream.

Acknowledgement

This article is the result of the PhD thesis of the first author and has been prepared with the support of the research and technology department thanks to the follow-up of the second author, which is hereby thanked and appreciated for the support of Shahid Chamran University of Ahvaz. (Grant No.: SCU-WH1399.260).

References

- 1- Katorani, S., Kashefipoor, S. Effect of the Geometric Characteristics of Baffled and Bed Slopes of Drop on Hydraulic Flow Conditions in Baffled Apron Drop. *Irrigation Sciences and Engineering*, 2014; 37(2): 51-59.
- 2- Shafai Bajestan M., Neisi K. 2009. Effect of roughness shape on the sequent depth ratio of hydraulic jump. *Water and Soil Science Journal*. Tabriz University, Iran. Pages 165- 176.
- 3- Badizadegan, R., Saneie, M. and Esmaili, K., 2014. Comparison of hydraulic jump characteristics on different types of corrugated beds. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(2), pp.220-232 (in Persian).
- 4- Dastourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S.R., 2016. The impact of water jet angle on the characteristics of hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), pp.225-239. <https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3195> (in persian).
- 5- Chanson, H. 2015 *Energy dissipation in Hydraulic Structures*. Taylor & Francis, London, UK.