

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر جت مستغرق در بستر موج‌دار با مقطع واگرای تدریجی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی نامتقارن

مسعود حکمی<sup>۱</sup>، جواد احدیان<sup>۲\*</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۳</sup> و سید محسن سجادی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۲- نویسنده مسئول، استاد دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، عضو هسته قطب علمی بهسازی و بهره برداری از شبکه های آبیاری و زهکشی
- ۳- استاد دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۴- دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

J.ahadiyan@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

## چکیده

یکی از معروف‌ترین پدیده‌های هیدرولیکی برای کاهش انرژی جریان، پرش هیدرولیکی می‌باشد که در پایین‌دست سرریز سدها در مقاطع رودخانه‌ها و سازه‌های تاسیس شده در کانال‌های آبیاری و زهکشی به‌کار می‌رود. کنترل و کاهش انرژی جنبشی حاصل از این پدیده در فواصل کمتر از محل تشکیل اهمیت فراوانی دارد. از نمونه سازه‌های استهلاک می‌توان به زبری بستر و احداث حوضچه‌های آرامش و ایجاد واگرایی اشاره کرد اما باید گفت که موجب نوسان فشار شده و سبب آسیب رسیدن به بستر کانال و رودخانه می‌شود. وجود جت مقابل ب I صورت مستغرق می‌تواند این نوسان فشار را کاهش دهد و جریان را در پایین‌دست به زیربهرانی تغییر دهد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی وجود سیستم جت مستغرق بر ویژگی پرش هیدرولیکی نامتقارن در بستر موج‌دار بوده‌است تا بتوان این پدیده را کنترل کرد و از ایمنی سازه‌ها و بستر در پایین‌دست اطمینان حاصل نمود. به این لحاظ آزمایش‌ها در یک فلوم با سرریز اوجی ثابت با محدوده دبی اصلی ۲۶ الی ۶۷ لیتر بر ثانیه و ۳ دبی جت مستغرق متقابل انجام گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که بستر موج‌دار در محدوده مقطع واگرای تدریجی، طول پرش را نسبت به عدم وجود آن کاهش داده و تغییرات عمق جریان نیز کمتر شده‌است. همچنین، تاثیر جت مقابل به شکل مستغرق، این روند را بهبود بخشید؛ بطوریکه استهلاک انرژی بطور میانگین ۲۵ الی ۳۰ درصد و طول پرش، تا ۵۰ درصد کاهش یافت. پس نقش موثر این ترکیب سیستم جت و بستر موج‌دار پیوسته نشان داده‌شد.

**واژگان کلیدی:** پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، افت انرژی، مقطع واگرای و جت مستغرق.

## ۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی به عنوان یک پدیده در علم هیدرولیک موجب تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی می شود تا بتواند از انرژی جنبشی تولید شده در پایین دست سازه های هیدرولیکی و آبی بسیاری چون تندآب ها و سرریزها که در مقاطع رودخانه ها و شبکه های آبرسانی ساخته می شوند، بکاهد و در برابر فرسایش از بستر حفاظت کند [1]. با احداث سازه های گوناگونی مانند انواع حوضچه های آرامش و مقاطع واگرایی و ایجاد زبری بستر می توان به کنترل جریان و کاهش طول پرش پرداخت. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا، اشکال متفاوتی نسبت به محل شروع آن داشته و به صورت متقارن و یا نامتقارن می باشد. همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، محل تشکیل پنجه پرش متأثر از عمق پایین دست جریان انواع آن را به ترتیب به چهار نوع پرش فرار، گسسته، انتقالی و کلاسیک تقسیم می کنند [2].

شکل ۱. انواع پرش در مقطع واگرای ناگهانی

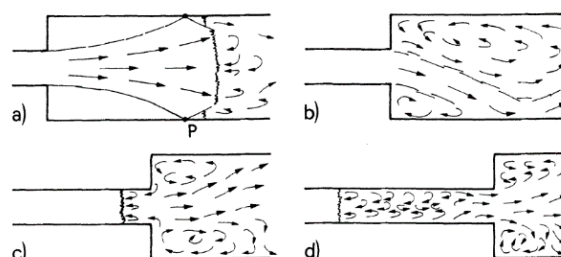


Fig. 1. Types of jumps in the section of sudden expansion

مطالعات و پژوهش های بسیاری روی ویژگی های پرش هیدرولیکی و چگونگی کنترل آن صورت گرفت. بررسی ها در مورد حوضچه آرامش با مقطع واگرای ناگهانی نشان دادند که با تغییر ابعاد هندسی دیواره ها و زبری بستر، می توان انرژی را مستهلک نمود [3]. در تحقیق دیگری بررسی پرش هیدرولیکی در مقطع واگرا با بازشدگی های متفاوت، طول پرش را در رابطه با پرش کلاسیک تحت تاثیر قرار داد [4]. پرش نوع گسسته مورد بررسی در این مطالعه، هنگامی رخ می دهد که پرش در انتهای عرض و ابتدای مقطع واگرایی تشکیل شود [5]. این نوع پرش بیشتر شبیه جت بوده و می تواند نامتقارن پایدار یا نامتقارن نوسانی باشد [6]. در

رابطه با استفاده از زبری بستر و کارگذاری موانع در راستای استهلاک انرژی، پژوهش هایی با بررسی ویژگی پرش نامتقارن بر روی بستر صاف انجام شد و میزان طول پرش هیدرولیکی را بهبود بخشید. با استفاده از موانع و صفحات مستغرق در برابر جریان نیز می توان موجب کاهش مومنتم در کانال شد [7, 8]. نتایج بررسی کنترل پرش نامتقارن در کانال با واگرایی ناگهانی نشان داد که استفاده از تیرک و موانع باعث بهبود الگوهای جریان در کانال می شود [9].

تحقیقات عمده و بسیاری درباره زبری بستر با شکل های هندسی مختلفی چون مثلثی و مکعبی و سینوسی نشان دادند که نقش مهمی در اتلاف انرژی و کاهش طول پرش دارند [10, 11]. با توجه به نتایج پیشین می توان گفت که استفاده از زبری بستر در مقاطع واگرا برای کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن موثر بوده و هرچه نسبت واگرایی کمتر باشد، راندمان و کارایی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک بیشتر است [12, 13]. همچنین با بررسی پرش هیدرولیکی در بستر سینوسی نشان داده شد که مقادیر اعماق نسبی پرش تابعی از دبی ورودی بوده و با طول موج بستر رابطه عکس دارد [14]. در بررسی پرش در بستر زبر با شیب معکوس نیز، نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع، فاصله بین زبری ها، شیب معکوس و عدد فرود، عمق مزدوج پرش کاهش و افت انرژی و تنش برشی افزایش خواهد یافت و در کل، بستر زبر روی شیب معکوس می تواند جایگزین مناسبی در حوضچه آرامش باشد تا کارایی بهتری دارا باشد [15].

تزریق جت های مقابل و جانبی به صورت مستغرق از دیگر راه کارهایی برای کنترل پرش می باشد که استهلاک انرژی را افزایش می دهد. در بررسی های متعددی این موضوع ثبت و گزارش شده است که تا میزان ۱۲ درصد نیز به اتلاف انرژی کمک کرده است [16, 17]. در مطالعه ای با بررسی اثر تزریق جت مستغرق بر روی پرش هیدرولیک کلاسیک نشان داده شد که جت ها در هر زاویه تمایل به کاهش انرژی دارند. بررسی جت آب در یک کانال افقی با دبی جریان های مختلف بر ویژگی های پرش هیدرولیکی حاکی از کاهش تلاطم سطح جریان، طول غلتاب، اتلاف انرژی در طول پرش هیدرولیکی

موج‌دار سینوسی با طول ۱,۲ متر برای این آزمایش با ۳ طول موج و ابعاد متفاوت کارگذاری می‌شود (شکل ۳). همان‌گونه که در شکل (۴) مشخص است، با قرارگیری یک دریچه قائم در محل پایانی فلوم می‌توان عمق پایاب را کنترل کرده و پرش هیدرولیکی را به‌وجود آورد که این مهم با تنظیم دریچه حاصل می‌شود.

شکل ۲. نمایی از فلوم و سیستم جت



Fig. 2. A view of the flume and jet system

شکل ۳. شمایی از بستر موج‌دار سینوسی

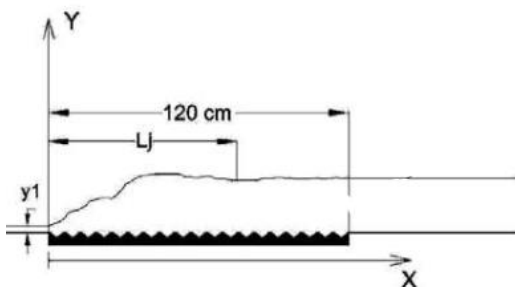


Fig. 3. A view of the sinusoidal corrugated bed

شکل ۴. نمایی از دریچه پایین دست فلوم



Fig. 4. A view of the downstream gate of the flume

بود [18, 19]. همچنین در مطالعه دیگری نقش جت مستغرق در انتهای حوضچه آرامش بر ویژگی پرش هیدرولیکی ارزیابی شد و نشان داده شد که استفاده از جت مستغرق سبب افزایش افت انرژی، کاهش طول پرش و عمق ثانویه پرش می‌شود. همچنین میزان کاهش عمق ثانویه با افزایش تعداد جت، کاهش می‌یابد [20]. در پژوهشی با بررسی تاثیر فاصله جت مستغرق متقابل در مقطع با بازشدگی ناگهانی، پرش با تزریق جت، تثبیت و طول آن نیز کاهش یافت. نتایج عملکرد خوب سیستم تزریق جت علاوه بر موارد فوق نشان داد که مشخصات هیدرودینامیکی جریان مانند: میانگین و نوسانات سرعت، انرژی جنبشی تلاطمی و تنش‌های رینولدزی با افزایش عمق پایاب، کاهش یافتند [21].

با توجه به اهمیت بالای پایداری سازه‌ها، تاثیر توام پارامترهای هیدرولیکی و انجام اقدامات سازه‌ای بر یکدیگر می‌تواند همدیگر را تحت پوشش خود قرار دهند تا بتوان به بازدهی بالاتری دست یافت؛ این پژوهش در راستای کنترل بهتر پرش هیدرولیکی و بهبود ویژگی‌های آن و تحلیل تاثیر سیستم جت بر ویژگی‌های پرش نامتقارن می‌باشد تا به پایداری جریان و یکنواختی مطلوب دست‌یافت و اقدامات حفاظتی را به بهترین شکل ممکن انجام داده و از ایمنی اطمینان خاطر نمود. بنابراین در این بررسی، ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در بستر زبر موج‌دار در مقطع واگرایی تدریجی همراه با جت مقابل جریان به‌صورت مستغرق و چندگانه مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی به‌طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰,۸۷ متر انجام شد (شکل ۲). مخزن ذخیره فلوم با ابعاد ۱ متر عرض، ۲,۴ متر طول با بدنه فلزی و دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس می‌باشد. جریان پس از عبور از سرریز اوجی با ارتفاع ۰,۶ متر و عرض ۰,۶۷ متر، وارد شده و از ابتدای مقطع واگرایی که با زاویه ۲۲,۵ درجه نسبت به طول فلوم ساخته شده‌است، پرش هیدرولیکی نامتقارن پدید می‌آید. بستر

جدول ۱. مشخصات و متغیرهای آزمایش در پژوهش

Fr	Corrugated bed dimensions (cm)	Name of corrugated bed	Jet discharge (L/s)	Abb. name of jet
10.8	S = 3 t = 1	B1	4.5	J1
9.5	S = 5 t = 3	B2	6	J2
8.7	S = 10 t = 6	B3	8	J3

Table 1. Characteristics and test variables of the research

شکل ۶. نمایی از جریان در بستر موجدار

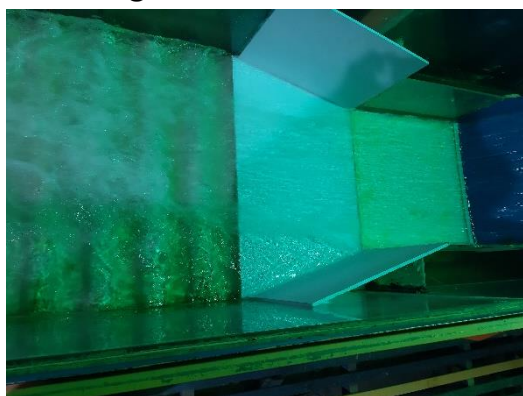


Fig. 6. A view of the flow in corrugated bed

با استفاده از دبی‌سنج الکترومغناطیسی، دبی‌های سیستم جت مستغرق که ۳ تعداد در بازه ۴٫۵ الی ۸ لیتر بر ثانیه بودند، اندازه‌گیری شدند. با داده‌برداری از پارامترهای هیدرولیکی جریان مثل سرعت جریان، عمق پایاب، عمق دوم پرش هیدرولیکی، طول غلتاب و طول پرش می‌توان به بررسی شرایط این آزمایش پرداخته و بازدهی آن را سنجید و در مقایسه با روش‌های دیگر آن را در عمل به بهره‌برداری رسانید.

شکل ۷. نمایی از جریان در بستر موجدار و جت مستغرق

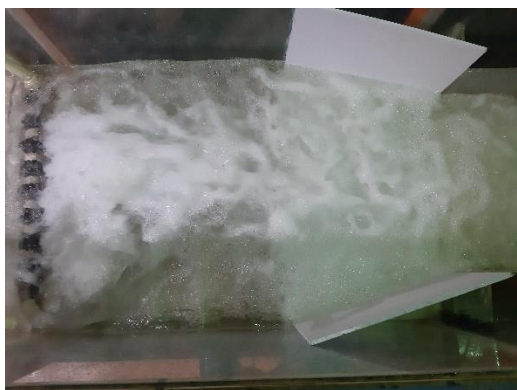


Fig. 7. A view of the flow in corrugated bed and submerged jet

میزان دبی جریان ورودی متناسب با اعداد فرود و بازه قابل بهره‌برداری برای فلوم با استفاده منحنی دبی - اشل سرریز اوجی مورد استفاده در این آزمایش تنظیم و در محدوده تقریبی ۲۵ الی ۶۷ لیتر بر ثانیه معین شد. با استفاده از یک عمق‌سنج با دقت یک میلی‌متر، اعماق در طول فلوم و به صورت عرضی اندازه‌گیری شدند. همچنین برداشت سرعت در طول فلوم با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج و برداشت میزان طول پرش و طول غلتاب حاصل از آن صورت پذیرفت.

به طور کلی، شیوه انجام این آزمایش‌ها بدین شکل بود که با قرارگرفتن و جای‌گذاری بسترهای موجدار پیوسته پس از مقطع واگرایی تدریجی که با زاویه ۲۲٫۵ درجه نسبت به راستای طولی فلوم نصب شده بود، آزمایش با تنظیم دبی و اعداد فرود در بازه‌های ۶٫۲ الی ۱۰٫۸ انجام شد (شکل ۵).

شکل ۵. نمایی از بستر موجدار و واگرایی



Fig. 5. A view of corrugated bed and expansion

تعداد ۵ عدد فرود مطابق با جدول (۱) در محدوده معین انتخاب شد و همچنین بدون استفاده از سیستم جت طبق شکل (۶) و در ادامه با تزریق جت به صورت مستغرق با استفاده از سیستم جت چندگانه که در مقابل جریان قرار داشت، پرش هیدرولیکی کنترل و تثبیت شد. با توجه به این که پرش نامتقارن گسسته در محدوده واگرایی شروع می‌شود، قرارگیری بستر موجدار پیوسته موجب کاهش طول پرش نسبت به عدم وجود زبری بستر می‌شود و به هنگام استفاده از سیستم جت این مهم، بهبود می‌یابد (شکل ۷).

## ۲-۲ آنالیز ابعادی

جدول ۲. شیوه نام‌گذاری مدل‌های آزمایش

Delineation sample	Model
S = 3; t = 1 (cm)	S1
S = 5; t = 3 (cm)	B1
S = 10; t = 6 (cm)	B2
Jet disch.:4.5 (l/s) S = 3; t = 1	B3
Jet disch.:6 (l/s) S = 3; t = 1	B1-J1
Jet disch.:8 (l/s) S = 3; t = 1	B1-J2
Jet disch.:4.5 (l/s) S = 5; t = 3	B1-J3
Jet disch.:6 (l/s) S = 5; t = 3	B2-J1
Jet disch.:8 (l/s) S = 5; t = 3	B2-J2
Jet disch.:4.5 (l/s) S = 10; t = 6	B2-J3
Jet disch.:6 (l/s) S = 10; t = 6	B3-J1
Jet disch.:8 (l/s) S = 10; t = 6	B3-J2
Jet disch.:4.5 (l/s) S = 10; t = 6	B3-J3

Table 2. The process of naming experimental models

در رابطه (۲)،  $Re$  عدد رینولدز جریان و  $Fr$  عدد فرود می‌باشند که به دلیل اینکه مقدار عدد رینولدز از ۲۰۰۰ بیشتر بوده و در بازه شرایط توربولنت و آشفته قرار می‌گیرد، قابل صرف نظر است [21]. همین‌طور باید گفت که به دلیل اینکه برخی پارامترها، در طول آزمایش مقادیر ثابتی هستند، مانند فاصله جت از مقطع واگرایی، عرض فلوم و یا طول موج یک بستر نسبت به دبی‌ها و اعداد فرود متفاوت و همچنین  $\frac{P}{B}$  و  $\frac{b}{B}$  نیز، می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرده و بدین شکل در رابطه (۳)، با ساده‌سازی رابطه پایانی حاصل می‌شود؛

$$\frac{\Delta E}{E_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_r}{y_1} = F \left( Fr, \frac{Q}{Q_j}, \frac{S}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{l}{y_2}, \frac{t}{y_1} \right) \quad (3)$$

با استفاده از شرایط موجود و پارامترهای قابل برداشت در این بررسی، به منظور یافتن استهلاك انرژی باید میزان اعماق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی را به دست آورده تا بتوان اتلاف انرژی را محاسبه نمود. در این خصوص، رابطه (۴) که به رابطه بلانگر معروف است، کاربردی بوده و می‌توان با یافتن عمق دوم پرش، به عمق اول آن دست یافت. همچنین درصد اتلاف انرژی نسبی با رابطه (۵) حاصل می‌شود [22]؛

در راستای تحقق اهداف در این مطالعه، شناخت پارامترهای هیدرولیکی و آگاهی از نقش آن‌ها بر پرش هیدرولیکی و مومنت جریان اهمیت دارد تا بتوان به بهینه‌سازی و راندمان بالاتر و کارایی بهتر در این موارد دست یافت. با استفاده از تحلیل ابعاد پارامترهای مهم در دستگاه آحاد و آنالیز ابعادی، روابط اساسی در علم هیدرولیک حاصل شدند. استخراج این پارامترهای بدون بعد، موجب شناسایی بهتر پدیده‌ها و وجود شبیه‌سازی‌هایی دقیق‌تر در آزمایشگاه نسبت به پروژه‌های عمرانی و واقعی می‌شود. بنابراین به بررسی پارامترهای موثر بر این تحقیق پرداخته شد که مطابق با رابطه (۱) ارائه شده است؛

$$(1) F(\Delta E, E_1, L_j, L_r, \rho, \mu, g, Q, Q_j, y_t, y_1, y_2, v, l, B, b, P, S, t)$$

با توجه به رابطه بالا،  $\Delta E$  اتلاف انرژی،  $E_1$  انرژی نخست،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی،  $L_r$  طول غلتاب،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت مطلق سیال،  $g$  میزان شتاب ثقل،  $v$  سرعت جریان،  $Q$  دبی جریان در کانال اصلی،  $Q_j$  دبی جت،  $y_t$  عمق پایاب،  $y_1$  عمق اول پرش و  $y_2$  عمق دوم پرش هیدرولیکی،  $B$  عرض فلوم،  $b$  عرض فلوم پای سرریز و قبل از مقطع واگرایی تدریجی،  $P$  فاصله سیستم جت چندگانه از مقطع واگرایی تدریجی،  $l$  طول بستر زبر،  $S$  فاصله دو قله متوالی در بستر موج‌دار و  $t$  ارتفاع بستر موج‌دار هستند.

با توجه به این که برخی پارامترها مانند زاویه واگرایی، عرض فلوم و فاصله سیستم جت، ثابت لحاظ شده‌اند، مطابق با جدول (۲)، ترکیب این آزمایش‌ها متناسب با ۵ عدد فرود، ۳ دبی جت مستغرق و ۳ زبری بستر موج‌دار است. براساس جدول (۲)، هر کدام از بسترهای موج‌دار پس از مقطع واگرایی تدریجی قرار گرفته و به نوبت سیستم جت با ۳ مقدار دبی به مجرای اصلی در جهت مقابل آن تزریق می‌شود که با ۵ دبی ورودی همراه شد.

با به کارگیری آنالیز ابعادی و قضیه  $\pi$  باکینگهام و برگزیدن ۳ پارامتر  $v, y_1, \rho$  به عنوان متغیرهای تکراری، رابطه (۲) ارائه گردید.

$$F \left( \frac{\Delta E}{E_1}, Fr, Re, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{Q}{Q_j}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{l}{B}, \frac{t}{y_1}, \frac{S}{y_1}, \frac{b}{B}, \frac{P}{B} \right) = 0 \quad (2)$$

آزمایشگاهی برای ایجاد شرایط مشابه با نمونه واقعی، از مقایسه متغیرهای هیدرولیکی جریان با اعداد بدون بعد و معروفی که در علم هیدرولیک وجود دارند، استفاده می‌شود. نسبت تغییرات عدد فرود و نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در طراحی حوضچه‌های آرامش و دیگر سازه‌های استهلاک انرژی اهمیت بسزایی دارند. طبق نمودار رسم در شکل (۸) میزان تغییرات این دو متغیر نشان داده شده است. با قرار داشتن بستر موج‌دار با طول موج‌های کوتاه‌تر پس از واگرایی تدریجی، عمق دوم در فواصل طولانی‌تر و کمتری تشکیل شده است؛ این در حالی است که در زبری بستر با طول موج بلندتر، این میزان در فاصله کمتر بوجود آمده و عمق مزدوج بیشتری تشکیل و به دنبال آن سرعت جریان بعد از پرش، کاهش یافت. به طور متوسط میزان نسبی عمق دوم به عمق اول پرش در اعداد فرود یکسان نسبت به حالت شاهد بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته‌اند. در بهترین حالت آن که ترکیب زبری بستر با ابعاد بیشتر و تزریق دبی بالای جت مستغرق در فرود بیشینه است نیز، به ۸۰ درصد رسیده است.

شکل ۸. مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود در بستر موج‌دار و جت مستغرق

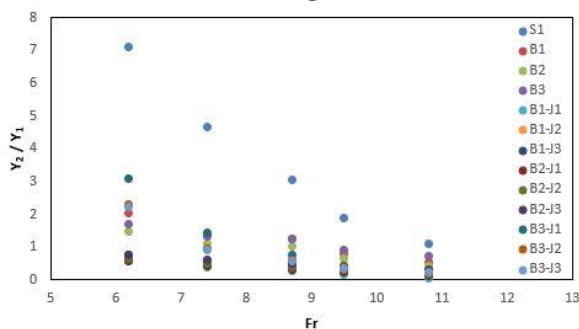


Fig. 8. Comparison of hydraulic jump conjugate depths ratio against Froude number in the corrugated bed and submerged jet

### ۲-۳ طول پرش هیدرولیکی

از دیگر موارد مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش، میزان طول پرش هیدرولیکی می‌باشد. بدین منظور برای بررسی طول آن، متناسب با حالت‌های مختلفی که در این بررسی صورت پذیرفت، نتایج براساس شکل (۹) به دست آمد. نمودار ترسیم شده میزان تغییرات نسبت طول پرش به عمق ثانویه را به عدد

$$y_1 = \frac{y_2}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (5)$$

با مدل‌سازی تجربی پرش هیدرولیکی نامتقارن در مقطع واگرای تدریجی در بستر موج‌دار، ویژگی و ویژگی‌های آن شامل پروفیل سطح آب، طول پرش هیدرولیکی، طول غلتاب، استهلاک انرژی و اعماق مزدوج در محدوده اعداد فرود ۶,۲ الی ۱۰,۸ سنجش و ارزیابی شدند. بنابراین در ادامه به بررسی نتایج حاصل از این آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

طبق تحقیقات گذشته، پرش هیدرولیکی از نوع گسسته در مقاطع واگرا با توجه به نسبت بازشدگی آن، کارایی متفاوتی دارد. در این مطالعه، آزمایش‌ها برای تعداد پنج دبی اصلی با ترتیب ۲۶، ۳۷، ۴۵، ۵۶ و ۶۷ لیتر بر ثانیه روی فلوام انجام شدند. با توجه به اینکه مقاطع واگرا، پرشی نامتقارن را به وجود خواهند آورد و در طول جریان، جهت آن دو نوع غلتاب در جهت جریان و در خلاف جهت جریان و بزرگ‌تر می‌باشد، پس بررسی استهلاک انرژی و طول غلتاب و طول پرش اهمیت خاصی دارد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، برداشت عمق آب و سرعت جریان در طول مجرای اصلی انجام شد و با توجه به این مقادیر، محاسبات داده‌ها صورت پذیرفت. با استفاده از رابطه (۴) عمق اول پرش محاسبه شد و سپس میزان انرژی در دو حالت اولیه و بعد از وقوع پرش هیدرولیکی به دست آمد. در ادامه، این میزان اتلاف انرژی محاسبه شد. همچنین لازم به ذکر است که برداشت میزان طول پرش و طول غلتاب نیز صورت پذیرفت که به تفسیر و تحلیل آن پرداخته شد.

### ۳-۱ اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی

عمق‌های مزدوج از شاخصه‌های اصلی به هنگام وقوع پرش هیدرولیکی می‌باشند و در صورت وجود عمقی پایاب است که این پدیده می‌تواند به وجود آید و حالت جریان را به زیربحرانی تغییر دهد. در طراحی و مدل‌سازی‌های

حال آن که با افزودن جت مستغرق این میزان کمتر شده و در ترکیب با بستر موج دار، راندمان و کارایی بهتری از خود نشان داده است. با توجه به شکل (۱۰)، طول غلتاب از حالت شاهد و بستر صاف نسبت به بستر موج دار به طور میانگین تا ۳۵ الی ۴۰ درصد کاهش یافته است؛ همچنین در حالتی که دبی افزایش یافته است، این مقدار کمتر نزول داشته است و در عدد فرود پایین تر نسبت به اعداد فرود بالاتر این موضوع با مشاهده نمودار، واضح و آشکار می باشد.

### ۳-۴ استهلاك انرژی

همان طور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است در این پژوهش، میزان اتلاف انرژی بیشتری در استفاده از سیستم تزریق جت نسبت به عدم استفاده از آن می باشد. با قرار گرفتن بستر موج دار با طول موج های بلندتر میزان استهلاك انرژی که بر اساس رابطه (۵) حاصل شد، بیشتر از زبری بستر با طول موج کمتر بوده است. علاوه بر آن تزریق جت در مقطع واگرای تدریجی در طول مناسبی انجام شده و در نتیجه تثبیت پرش به شکل بهتری صورت پذیرفته است. به همین لحاظ آنچه که از شکل (۱۱) برمی آید، نشان از استهلاك و اتلاف انرژی اولیه جریان می دهد. با افزایش دبی سیستم جت مستغرق در مقابل جریان و افزایش طول موج های بستر، افت انرژی بیشتری نیز به ثبت رسیده است. همچنین با افزایش دبی جریان اصلی و دبی های کمتر جت مستغرق، میزان استهلاك انرژی درصدی رو به کاهش بوده است. این میزان تغییرات در اعداد فرود بالاتر بیشتر دیده می شود، در حالی که در اعداد فرود پایین تر و دبی های بالاتر، این مقادیر کاهشی کمتر دیده می شوند. پس تزریق به وسیله سیستم جت به مجرای اصلی، سبب هدایت جریان به بالادست شده و صورت می گیرد، جریان به سمت بالادست هدایت شده و عمق جریان به طرز قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

شکل (۱۲) نشان دهنده تغییرات نسبی انرژی در اعماق مزدوج پرش می باشد که با بررسی آن می توان به راندمان بهتر این مطالعه در قیاس با یکدیگر متوجه شد. آثار مثبت و درصد استهلاك انرژی نسبت به بازه عدد فرود در این نمودار ترسیم شده است.

فرود سنجیده است. طبق این نمودار، میزان طول پرش در بستر موج دار با طول موج بیشتر به ۶۰ الی ۶۵ درصد هم کاهش یافته است. همچنین این مقادیر با استفاده از تزریق سیستم جت مستغرق کمتر شده و تثبیت جریان بهتری صورت گرفته است. پس تزریق توامان جت و زبری بستر، پرش را از حالت نامتقارن خارج و کنترل کرده است. به طور کلی، با افزایش دبی جت، میزان طول پرش کاهش یافته است.

شکل ۹. مقایسه طول پرش هیدرولیکی در بستر موج دار و جت

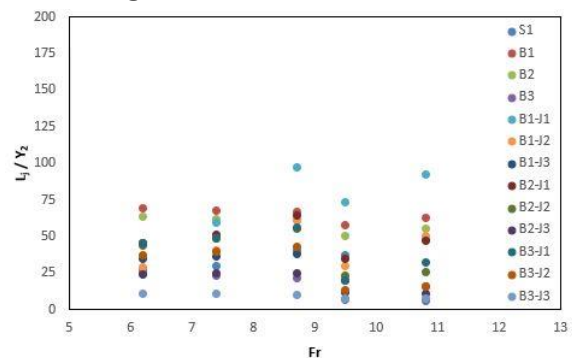


Fig. 9. Comparison of hydraulic jump length in the corrugated bed and jet

### ۳-۳ طول غلتاب

از دیگر پارامترهای با اهمیت در طراحی، طول غلتاب می باشد؛ به این دلیل که ضخامت دال در قسمت حوضچه در بستر مورد بحث بوده و با توجه به این ارتباط، ملاحظات طراحی انجام می شود تا از بستر حفاظت شود. غلتاب، طول کمتری را نسبت به طول پرش دارد. در این تحقیق، اندازه گیری با توجه به ترکیب آزمایش ها مطابق با جدول (۲) انجام شدند. براساس نتایج نشان داده شد که در اعداد فرود بیشتر و دبی های اصلی کمتر، میزان غلتاب کم و با افزایش دبی افزایش داشت.

شکل ۱۰. قیاس طول غلتاب در بستر موج دار و جت مستغرق

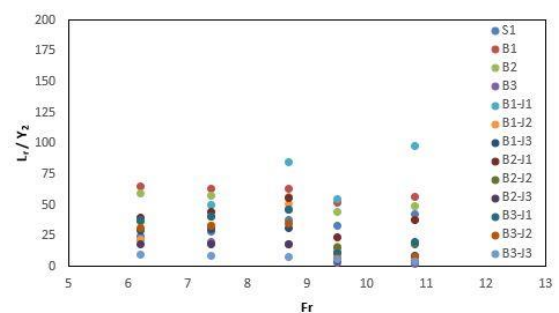


Fig.10. Comparison of rolling length in the corrugated bed and submerged jet

ادامه با تزریق جت مستغرق به مجرای اصلی این روند صعودی می‌باشد. به طور میانگین استهلاک انرژی تا ۲۵ درصد و به کمک سیستم جت تا ۵۲ درصد افزایش داشت.

(ج) از آنجایی که طول غلتاب با طول پرش رابطه مستقیمی دارد ولی از مقادیر آن کمتر است، روندی مشابه با طول پرش هیدرولیکی داشته و تا ۳۵ درصد طول آن را کاهش داده‌است. طول نسبی پرش هیدرولیک با افزایش عدد فرود اولیه یعنی فاصله جت افزایش می‌یابد.

(د) سیستم جت مستغرق چندگانه در مقابل با پرش نامتقارنی که در حالت شاهد ایجاد شده‌بود، باعث پایداری و کنترل یکنواختی جریان شد. افت انرژی در اعداد فرود کمتر و دبی بالاتر تاثیر کمتری داشته و سیستم جت در طول پرش به طور میانگین تا ۳۰ درصد بیشتر از پرش در حالات زبری‌های موج‌دار موثر بود.

در کل، نتایج حاصل از تحقیق مورد مطالعه نشان داد که ترکیب بستر موج‌دار و جت چندگانه مقابل جریان به عنوان یک سازه استهلاک انرژی، برای کنترل الگوی جریان و پرش هیدرولیکی به‌طرز چشم‌گیری کارایی داشته‌است. در نتیجه، استفاده از این سیستم ترکیبی به‌خوبی پرش هیدرولیکی را کنترل و از پیامدهای منفی احتمالی به سازه‌های پایین‌دست جلوگیری کرده و بستر را حفاظت می‌کند.

## مراجع

- [1] Chanson, H. 2015 Energy Dissipation in Hydraulic Structures. Taylor & Francis, London, UK.
- [2] Roger Bremen & Willi H. Hager, 1993. T-jump in abruptly expanding channel, *Journal of Hydraulic Research*, 31:1, 61-78.
- [3] Torkamanzad, N., et al. (2019). Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed, *Water*, vol. 11, No. 9, p. 1756.
- [4] Matin M.A., et al. (1997). Prediction of Sequent Depth Ratio of Free Hydraulic Jump in Abruptly enlarged Channels. *Egyptian Journal for Engineering Sciences & Technology*. Pages 31-36.
- [5] Habibzadeh, A., et al. (2011). Exploratory study of submerged hydraulic jumps with blocks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 706- 710.

شکل ۱۱. درصد استهلاک انرژی نسبی پرش هیدرولیکی ناشی از حضور

بستر موج‌دار و جت مستغرق

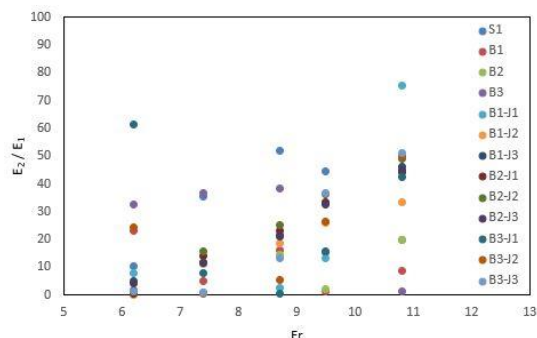


Fig. 11. The percentage energy consumption of hydraulic jump caused by the presence of corrugated bed and submerged jet

شکل ۱۲. اتلاف انرژی نسبی در مقابل عدد فرود

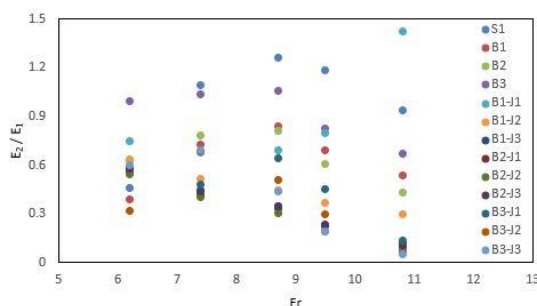


Fig. 12. The relative energy loss against Froude number

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر هم‌زمان جت مستغرق در ترکیب با بستر موج‌دار در برابر جریان عبوری از روی یک سرریز اوجی و پرش هیدرولیکی ناشی از این روند بررسی شد. نتایج نشان دادند که استفاده از بستر موج‌دار بر طول پرش هیدرولیکی و طول غلتاب ناشی از آن موثر است. هرچه بستر موج‌دار، طول موج‌های بلندتر و ابعاد بیشتری دارا باشد، کاهش طول پرش و همین‌طور استهلاک انرژی بیشتر خواهد بود. به‌طور کلی، مشاهده نتایج نشان می‌دهد که:

(الف) میزان کاهش طول پرش هیدرولیکی در حالت بستر موج‌دار به‌طور میانگین تا ۵۰ درصد نسبت به‌حالت بستر صاف می‌شود. این مقدار درحالتی که از جت مستغرق استفاده می‌شود، به‌طور متوسط بالای ۶۰ درصد نیز می‌رسد.

(ب) اتلاف انرژی به‌ترتیب در حالات بستر صاف، بستر موج‌دار به مراتب با طول موج‌هایی بیشتر افزایش می‌یابد و در



- [14] Abbaspour, A. et al. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environment Research*, 3, pp.109-117.
- [15] Parsamehr, P. and Hosseinzadehdalir, A. (2012). Experimental Study of Effect of Rough Bed on Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump on Adverse Slope. *Irrigation Sciences and Engineering*, 36(1): 89-101.
- [16] Haghdoost, M. et al. (2022). Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply*. 1 November; 22 (11): 8337-8352.
- [17] Sharoonizadeh, S., et al. (2022). Experimental investigation on the characteristics of hydraulic jump in expanding channels with a water jet injection system. *Journal of Hydraulic Structures*, 2022; 7(4): 58-75.
- [18] Varol, F. et al. (2009). The effect of water jet on the hydraulic jump. In *Thirteenth International Water Technology Conference*, IWTC (Vol13, pp895-910).
- [19] Wali, UG. (2013). Kinetic energy and momentum correction coefficients for a small irrigation channel. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(9), 1- 8.
- [20] Sharoonizadeh, S. et al. (2021). Experimental Analysis on the Use of Counterflow Jets as a System for the Stabilization of the Spatial Hydraulic Jump. *Water*, 2021, 13, 2572.
- [21] Chow VT, 1959. Open Channel Hydraulics. Mc Grow Hill Book Co, New York, NY.
- [22] Chanson, H. (2009). Development of the Bélanger equation and backwater equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). *Hydraulic Engineering ASCE* 135 (3), 159-163.
- [6] Abdelhaleem, F. (2013). Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 675-684.
- [7] Herbrand, K. 1973. The Spatial Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*. Pages 205-2018.
- [8] Hajjaligol, S., et al. (2021). Cross-beams dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of the flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147, 06021012.
- [9] Scorzini, AR., Di Bacco, M., & Leopardi, M. (2016). experimental investigation on a system of crossbeams as energy dissipator in abruptly expanding channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2), 06015018.
- [10] Neisi, K. and Shafai Bajestan, M. (2013). Characteristics of S-jump on roughened bed stilling basin. *Water Sciences Research* 5 (2), 25-34.
- [11] Shafai Bajestan M. and Neisi K. (2004). Effect Shape of Roughness on the Sequent Depth Ratio of Hydraulic Jump. *Water and Soil Science Journal*. Tabriz University, Iran. Pages 165- 176.
- [12] Izadjoo F. and Shafai Bajestan M. (2007). Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Journal of Applied Sciences*. volume 7, issue 8, pp. 1164-1169.
- [13] 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.

# Experimental investigation of the effect of a submerged jet in a Corrugated bed with a gradually diverging cross-section on the characteristics of asymmetric hydraulic jump

M. Hakami<sup>1</sup>, J. Ahadiyan<sup>2\*</sup>, M. Shafaei Bajestan<sup>3</sup>, S. M. Sajadi<sup>4</sup>

j.ahadiyan@scu.ac.ir

1. Ph.D. in Hydraulic Structures of Water and Environmental Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz
2. \*- Corresponding Author, Professor of Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz
3. Professor of Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz
4. Associate professor of Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

j.ahadiyan@scu.ac.ir

## Abstract

One of the most famous hydraulic phenomena to reduce flow energy is hydraulic jump, which is used downstream of dam overflows in river sections and structures established in irrigation and drainage canals. It is very important to control and reduce the kinetic energy resulting from this phenomenon at smaller distances from the place of formation. Among the examples of depreciation structures, we can mention the roughness of the bed and the construction of stilling basin and making expansion, but it must be said that it causes pressure fluctuations and damage to the bed of the canals and river. The existence of the submerged jet can reduce this pressure fluctuation and change the flow downstream to subcritical. The purpose of this research was to investigate the existence of a submerged jet system on the characteristic of asymmetric hydraulic jump in a corrugated bed so that this phenomenon can be controlled and ensure the safety of structures and beds downstream. For this reason, the experiments were carried out with a main flow rate range of 26 to 67 L/s and 3 mutual submerged jet flow rates. They were carried out in a flume with a length of 12 meters, a width of 1 meter, and a height of 0.87 meters. After passing through the peak spillway with a height of 0.6 meters and a width of 0.67 meters, the flow enters, and from the beginning of the divergence section, which is made at an angle of 22.5 degrees compared to the length of the flume, an asymmetric hydraulic jump occurs. A 1.2m long sinusoidal corrugated bed is used for this experiment with 3 different corrugated dimensions. The results of this investigation showed that the corrugated bed in the region of gradual expansion has reduced the length of the jump compared to its absence and the changes in the flow depth have also decreased. Also, the impact of the opposite jet in the submerged shape improved this process; So dissipating energy was reduced by 25-30 percent and jump length by 50 percent. Another important parameter in design is the roll length or retaining length; This is because the thickness of the slab in the basin part of the bed is discussed and according to this connection, design considerations are made to protect the bed. It has a shorter length than the length of the hydraulic jump. In this research, measurements were made according to the combination of tests. The results showed that in higher Froude numbers and lower flow rates, the rate is low and increases with increasing flow rate. However, with the addition of the submerged jet, its amount is reduced and in combination with the wavy bed, it shows better efficiency and effectiveness. The rolling length from the control state and the smooth bed compared to the corrugated bed has been reduced by 35% on average. Therefore, the effective role of this combination of jet system and continuous corrugated bed was shown. Finally, the results showed that the combination of a corrugated bed and multiple jets against the flow as an energy-dissipating structure was effective to control the flow pattern and hydraulic jump significantly. As a result, the use of this combined system controls the hydraulic jump well and prevents possible negative consequences to the downstream structures, and protects the bed.

**Keywords:** Hydraulic jump, Stilling basin, Energy loss, Expansion section and submerged jet.