

## مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب معکوس و پله منفی ابتدایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی

کیخسرو صیادی<sup>۱</sup>، منوچهر حیدرپور<sup>۲\*</sup> و زهرا قدمپور<sup>۳</sup>

### چکیده

حوضچه‌های آرامش، قسمت کوتاهی از یک کانال کف سازی شده‌اند که به صورت سازه‌ای خاص در انتهای سرریزها و هر سازه دیگری که جریان فوق‌بحرانی ایجاد می‌کند، برای کنترل پرش هیدرولیکی ساخته می‌شوند و هرچه طول آن‌ها کوتاه‌تر باشد، از نظر اقتصادی مناسب‌تر خواهند بود. هدف از این تحقیق، بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانال با شیب معکوس و پله منفی ابتدایی است. در این پژوهش اثر همزمان سه شیب معکوس و سه ارتفاع پله منفی ابتدایی بر اعماق مزدوج، طول پرش و افت انرژی در اعداد فرود ۴/۵ تا ۹/۵ بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب معکوس کانال، مقدار نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افت انرژی به ترتیب ۱۲/۶، ۱۳/۹ و ۱۶/۸ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که پله منفی نسبت اعماق مزدوج و طول پرش را به ترتیب ۵/۶۶ و ۶/۲ درصد افزایش و افت انرژی را ۲/۶ درصد کاهش می‌دهد. ترکیب دو عامل شیب معکوس و پله منفی نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افت انرژی را به ترتیب ۱۲/۴۲، ۱۴/۸ و ۳ درصد کاهش می‌دهد و تنش برشی نیز ۱۲/۵۶ برابر شرایط بستر صاف به دست آمد؛ بنابراین نقش پله منفی در تثبیت پرش در محل حوضچه آرامش بوده و شیب معکوس، این تثبیت پرش را سخت‌تر می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** پرش هیدرولیکی، پله منفی ابتدایی، تنش برشی بستر، شیب معکوس، عدد فرود.

ارجاع: صیادی ک. حیدرپور م. و قدمپور ز. ۱۴۰۰. مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب معکوس و پله منفی ابتدایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۳: ۳۵-۴۳.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

\* نویسنده مسئول: [heidar@iut.ac.ir](mailto:heidar@iut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴

## مقدمه

پرش هیدرولیکی یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است و زمانی رخ می‌دهد که جریان در قسمتی از مسیر خود بنا به شرایط کانال از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تبدیل شود. این پدیده باعث افزایش عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاه و همچنین افزایش تلاطم در جریان می‌شود و ضمن ایجاد آفت انرژی محسوس، از میزان سرعت جریان به مقدار قابل توجهی کاسته می‌شود. محققان همیشه سعی کرده‌اند پرش هیدرولیکی را کنترل کنند تا از صدمات سنگین به سازه‌های هیدرولیکی پایین‌دست جلوگیری کنند. هزینه‌های بالای ساخت حوضچه‌های آرامش، محققان را ترغیب کرده است تا در ساخت حوضچه آرامش، بتوانند عمق ثانویه و طول پرش را کاهش دهند و آفت انرژی بیشتری در پرش هیدرولیکی به وجود آید (محمد علی، ۱۹۹۱). روش‌های متعددی برای کاهش عمق ثانویه و طول پرش علاوه بر افزایش اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی وجود دارد؛ مانند افزایش شیب معکوس بستر (بیرامی و چمنی، ۲۰۰۶؛ بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰؛ مک کروکدال و محمد، ۱۹۹۴ و پورعبدالله و همکاران، ۲۰۲۰) یا استفاده از زبری در کف کانال (کارولو و همکاران، ۲۰۰۷؛ فلاحی و همکاران، الف و ب ۱۳۹۸؛ فلاحی و حیدرپور، ۱۴۰۰).

مک‌کروکدال و محمد (۱۹۹۴)، آزمایشاتی را در مورد پرش‌های هیدرولیکی در شیب‌های معکوس با اعداد فرود بین ۴ تا ۹ انجام دادند. نتایج مطالعه نشان داد که نسبت عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در شیب‌های معکوس در مقایسه با پرش کلاسیک به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل تجربی بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) نشان داد که شیب‌های منفی بستر در محدوده صفر تا ۰/۱- در کانال مستطیلی با عرض ۰/۴۰۴ متر و طول ۱۱ متر با اعداد فرود ۴/۵ تا ۱۲، منجر به کاهش عمق ثانویه و شیب‌های مثبت، باعث افزایش نسبت عمق ثانویه می‌شود. بیرامی و چمنی (۲۰۱۰) طول غلطاب و آفت انرژی طیف وسیعی از پرش هیدرولیکی در شیب‌های منفی بستر در محدوده صفر تا ۰/۱- در کانال مستطیلی با عرض ۰/۴۰۴ متر و طول ۱۱ متر با اعداد فرود ۴/۵ تا ۱۲ را بررسی کردند. براساس اصل انرژی، یک معادله کلی نیمه تجربی برای تعیین طول نسبی غلطاب ارائه شد. مقادیر مشاهده شده طول غلطاب نسبی با مقادیر تجربی سایر

تحقیقات مطابقت خوبی داشت. پاگیارا و پارمو (۲۰۱۵) برای پیش‌بینی خصوصیات پرش در شیب‌های معکوس تا ۰/۱- در کانال مستطیلی با عرض ۰/۳۵ و طول ۶ متر برای طیف وسیعی از شرایط هیدرولیکی، اعداد فرود در محدوده ۲ تا ۹/۵ و هندسی یک معادله پیش‌بینی نیمه نظری ارائه داده‌اند که بسترهای ناهموار و صاف را پوشش می‌دهد. یک معادله کلی برای نسبت اعماق مزدوج به‌عنوان تابعی از عدد فرود ایجاد شد. پارسامهر و همکاران (۲۰۱۷) ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۵ متر در شیب‌های معکوس در محدوده ۱/۵- تا ۲/۵- درصد با بسترهای زیر با اندازه زبری بین ۱/۴ تا ۲/۸ سانتی‌متر را بررسی کردند. نتایج به‌وضوح نشان داد که آفت نسبی انرژی ۱۴ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی کلاسیک است و حداکثر کاهش در عمق ثانویه ۴۴ درصد بود. پورعبدالله و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که نسبت عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی آزاد در شیب معکوس، زبری بستر و ارتفاع پله مثبت بیشتر از پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. میانگین کاهش نسبت عمق ثانویه و طول پرش آزاد به ترتیب ۳۳ و ۴۷ درصد بود. فلاحی و همکاران (۱۳۹۸) اثر شیب منفی بستر در کانال واگرای ناگهانی با نسبت واگرایی ۰/۷۵ بر مشخصات پرش هیدرولیکی در اعداد فرود اولیه ۴/۹ تا ۹/۵ در شیب‌های صفر، ۱/۵- و ۳%- درصد بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقادیر عمق ثانویه و طول پرش در یک کانال با واگرای ناگهانی و شیب کف منفی نسبت به حالت افقی کاهش یافت. مقدار آفت انرژی نسبی در حالت‌های مختلف شیب معکوس در کانال واگرای ناگهانی بیشتر از حالت کلاسیک بود. طول پرش و عمق ثانویه به ترتیب ۱۲/۴۵ و ۲۵/۳ درصد کاهش یافت.

علاوه بر کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی در جهت ساخت مقرون به صرفه حوضچه آرامش، تثبیت پرش هیدرولیکی در محل حوضچه نیز بسیار مهم است. یک آفت ناگهانی در بستر (پله منفی) یک کانال افقی پرش هیدرولیکی را در مجاورت پله برای طیف گسترده‌ای از عمق ثانویه تثبیت می‌کند. پله‌های منفی در تثبیت پرش تأثیر بیشتری دارند و پله‌های مثبت ابعاد پرش را کاهش می‌دهند (قریشی و البراهیم، ۱۹۹۲).

اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹) خصوصیات پرش بر روی شیب‌های معکوس و پله منفی انتهایی را مورد بررسی قرار

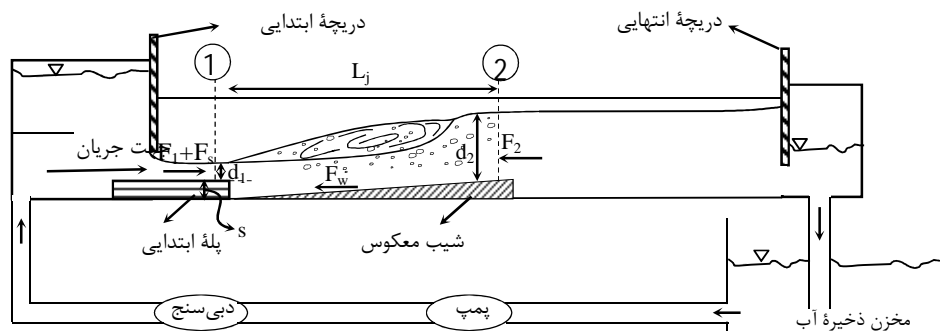
این کانال از جنس ورق پلاکسی گلاس شفاف است. این کانال به وسیله یک پمپ با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شود (شکل ۱). به منظور افزایش عدد فرود اولیه قبل از دریچه کشویی بالادست، ارتفاع مخزن ۱/۲۵ متر در نظر گرفته شد. برای ایجاد پله در ابتدای کانال از ورقه‌های پلی‌اتیلن به ضخامت‌های ۳ و ۶ سانتی‌متری استفاده شد، با احتساب ارتفاع صفر که در مجموع ۳ ارتفاع مختلف برای پله استفاده شد. در این تحقیق از سه زاویه ۰، ۳ و ۶ درجه برای شیب معکوس استفاده شد. برای تغییر شیب از یک صفحه کاذب به طول ۳ متر که بخش شیبدار آن تا فاصله ۲ متری از دریچه ادامه دارد و می‌توان شیب آن را تغییر داد. این صفحه در کف کانال و دقیقاً بعد از دریچه ابتدایی قرار گرفته که پرش، کاملاً در این قسمت از کانال اتفاق می‌افتد. برای ایجاد پرش از دریچه کشویی - که در ورودی فلوم تعبیه شده است - و به منظور تثبیت پرش از دریچه دیگری در انتهای فلوم استفاده شد. در آزمایش‌های انجام‌شده، دریچه پایین‌دست به گونه‌ای تنظیم شد که شروع پرش در محل تغییر ارتفاع کانال رخ دهد. برای انجام این مطالعه در مجموع ۸۱ آزمایش در محدوده عدد فرود ۴/۵ تا ۹/۵ انجام شد (شکل ۲).

دادند. نتایج نشان داد که پله‌های منفی نقش مهمی در پایداری پرش داشته و کنترل و تثبیت پرش نسبت به پله‌های مثبت مشابه آسان‌تر است. نسبت اعماق مزدوج و طول پرش در صورت وجود پله منفی افزایش می‌یابد و در شیب منفی کاهش می‌یابد. در حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس و پله منفی انتهایی، میزان افت انرژی تفاوت چندانی با حالت پرش کلاسیک نداشت. اگرچه چندین مطالعه بر روی شیب معکوس و پله منفی ابتدایی انجام شده است، اما تأثیرات همزمان این عناصر بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی مطالعه نشده است. در مواردی تأثیر همزمان شیب معکوس و پله منفی در انتهای حوضچه آرامش بررسی شده است. در این پژوهش تأثیر همزمان شیب معکوس (برای کاهش ابعاد پرش) و پله منفی (برای تثبیت پرش هیدرولیکی) در محل حوضچه آرامش بر نسبت اعماق مزدوج ( $d_2/d_1$ )، طول پرش، افت نسبی انرژی و ضریب نیروی برشی بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات مدل آزمایشگاهی

کانال مورد استفاده در این تحقیق، یک کانال مستطیلی به طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر است. دیواره‌ها و کف



شکل ۱- تصویر شماتیک از سطح شیبدار و پله منفی ابتدایی

ثانویه پرش به صورت عرضی در سه نقطه اندازه‌گیری و میانگین آن در محاسبات به کار گرفته شد. عمق اولیه ( $d_1$ ) بر روی پله اندازه‌گیری می‌شود و برای روابط به ارتفاع پله اضافه شده که در صورت نبود پله (حالت کلاسیک) ارتفاع پله صفر است (هاگر، ۱۹۸۵). برای اندازه‌گیری ارتفاع آب پشت دریچه ورودی کانال از یک متر نواری با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شد؛ بدین صورت که پس از تأمین عدد

برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی‌سنج الکترونیکی که در مسیر جریان پس از پمپ و قبل از کانال قرار داشت استفاده شد. در پرش هیدرولیکی، عموماً به اعماق اولیه و ثانویه و دو طول پرش و غلطاب توجه می‌شود. برای اندازه‌گیری اعماق اولیه و ثانویه از عمق‌سنج ریلی استفاده شد. قطر میله عمق‌سنج ۳/۵ میلی‌متر و دقت اندازه‌گیری آن ۱ میلی‌متر است. جهت افزایش دقت عمق اولیه و

$$f(g, s, d_1, d_2, V_1, \theta, \rho, \mu) = 0 \quad (۴)$$

در این معادله  $g$ : شتاب ثقل،  $\rho$ : دانسیته (جرم مخصوص)،  $\mu$ : لزجت دینامیکی آب،  $d_1$ : عمق اولیه،  $d_2$ : عمق مزدوج پرش (مقدار عمق زیربحرانی در مقطع واگرا)،  $V_1$ : سرعت جریان در مقطع اول،  $\theta$ : شیب کف کانال نسبت به افق و  $s$ : ارتفاع پله ابتدایی است. با توجه به تئوری باکینگهام (بارنلت، ۱۹۸۷) نسبت اعماق مزدوج به صورت تابعی از پارامترهای زیر به دست می آید:

$$f\left(\frac{d_2}{d_1}, \frac{V_1^2}{d_1 g}, \frac{V_1 d_1}{\rho}, \frac{s}{d_1}, \theta\right) = 0 \quad (۵)$$

مقدار عدد رینولدز بوده و برای تمامی آزمایشات در محدوده  $۷/۵ \times ۱۰^۴$  تا  $۲/۵ \times ۱۰^۵$  تغییر می کند که بیانگر جریان آشفته است؛ بنابراین می توان از اثر لزجت صرف نظر و عدد رینولدز را از محاسبات حذف کرد (هاگر و برمن، ۱۹۸۹؛ مک کروکودال و محمد، ۱۹۹۴)؛ بنابراین می توان تأثیر عدد فرود، ارتفاع پله منفی و شیب معکوس را بر نسبت اعماق مزدوج و به طور مشابه، طول نسبی پرش هیدرولیکی و آفت انرژی به شرح زیر به دست آورد:

$$\frac{d_2}{d_1} = f\left(Fr_1, \frac{s}{d_1}, \theta\right) \quad (۶)$$

$$\frac{L_j}{d_1} = f\left(Fr_1, \frac{s}{d_1}, \theta\right) \quad (۷)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f\left(Fr_1, \frac{s}{d_1}, \theta\right) \quad (۸)$$

### معادله تحلیلی

محاسبه نسبت اعماق مزدوج با استفاده از معادله

#### مومنتم

یکی از مهم ترین روابطی که در پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار می گیرد، معادله مومنتم است. مطابق با شکل ۱ معادله مومنتم با توجه به حجم کنترل بین مقاطع ۱ و ۲ می تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$F_1 - F_2 - W \sin \theta + F_s = \rho q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (۹)$$

که  $F_2 =$  و  $F_1 + F_s = 0.5 \gamma (d_1 + s)^2 \cos \theta$  حجم کنترل اعمال می شوند و  $W = 0.5 K \gamma L_j ((d_1 + s) + d_2)$  وزن آب محصور شده بین دو بخش ۱ و ۲ است (پاگلیارا و پالرمو، ۲۰۱۵)؛ بنابراین، معادله مومنتوم می تواند به صورت زیر تنظیم شود:

فرود اولیه مورد نظر و تثبیت پرش هیدرولیکی در محل مورد نظر، ارتفاع آب داخل مخزن ورودی قرائت شد. طول پرش یکی از پارامترهای حساس در طراحی حوضچه آرامش است، اما در حالت کلی محاسبه از طریق تحلیل های ریاضی امکان پذیر نبوده و لازم است تا در هر مورد از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده شود. اندازه گیری طول پرش با مدرج کردن جداره فلوم توسط متر نواری با دقت ۱ میلی متر اندازه گیری شد.



شکل ۲- نمونه پرش تثبیت شده بر سطح شیبدار و پله منفی ابتدایی

### معیار ارزیابی

ارزیابی کارایی روابط تحلیلی ارائه شده در این مقاله با استفاده از سه شاخص آماری مورد بررسی قرار گرفت: R: ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، DC: همبستگی خطی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و RMSE: ریشه میانگین مربعات خطاها است. هرچه مقدار R و DC به یک نزدیک تر و مقدار RMSE برای یک مدل کوچک تر باشد، به معنی مطلوب بودن آن مدل است (روشنگر و قاسم پور، ۲۰۱۸).

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (l_o - l_p)^2}{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_p)^2} \quad (۱)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_o) \times (l_p - \bar{l}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (l_o - \bar{l}_o)^2 \times \sum_{i=1}^N (l_p - \bar{l}_p)^2}} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(l_o - l_p)^2}{N}} \quad (۳)$$

که در این معادلات  $l_o$ : مقادیر اندازه گیری شده،  $l_p$ : مقادیر محاسبه شده،  $\bar{l}_o$ : میانگین مقادیر اندازه گیری شده و  $\bar{l}_p$ : میانگین مقادیر محاسبه شده هستند.

### آنالیز ابعادی

به طور کلی، ویژگی های پرش هیدرولیکی در یک کانال با شیب منفی ( $\theta$ ) و ارتفاع پله ابتدایی ( $s$ ) عمق مزدوج پرش هیدرولیکی ( $d_2$ ) تابعی از پارامترهای زیر است:

$$F_T = \frac{1}{2}\gamma(d_1 + s)^2 \cos\theta - \frac{1}{2}\gamma d_2^2 \cos\theta + \frac{\gamma}{g}q(V_1 - V_2) \quad (15)$$

در معادله بالا  $d_1$  و  $d_2$  به ترتیب، عمق اولیه و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی،  $s$ : ارتفاع پله،  $\theta$ : زاویه شیب معکوس،  $\gamma$ : وزن مخصوص آب،  $g$ : شتاب گرانش،  $q$ : دبی در واحد عرض جریان و  $V_1$  و  $V_2$ : سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۲ هستند. ویو و راجاراتنام (۱۹۹۵)، ضریب نیروی برشی را به صورت زیر ارائه کرد:

$$\varepsilon = \frac{F_T}{M_1} = \frac{F_T}{\gamma d_1^2 / 2} \quad (16)$$

اگر  $D = d_2/d_1$  باشد، با جای گذاری معادله (۱۵) در (۱۶)، ضریب نیروی برشی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\varepsilon = \left( \frac{(d_1 + s)^2}{d_1^2} - D^2 \right) \cos\theta + 2Fr_1^2 \left( \frac{D-1}{D} \right) \quad (17)$$

### نتایج و بحث

در این مطالعه، خصوصیتی مانند نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی در یک کانال افقی با ارتفاع زبری ( $k_s$ ) و ارتفاع پله ابتدایی ( $s$ ) ارزیابی شد. نتایج در بخش‌های بعدی بحث شده است.

### نسبت اعماق مزدوج

شکل ۳ مقایسه مقادیر مشاهده شده نسبت به اعماق مزدوج در مطالعه حاضر که در کانال با شیب معکوس و پله منفی ابتدایی بوده، با مقادیر پرش هیدرولیکی کلاسیک (بلانگر، ۱۸۲۸) را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش شیب معکوس نسبت به اعماق مزدوج کاهش می‌یابد که با نتایج پاگلیارا و پالرمو (۲۰۱۵) مطابقت دارد؛ اما همانطور که گفته شد، شیب معکوس باعث می‌شود که پرش هیدرولیکی در محل حوضچه آرامش تثبیت نشود. برای تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از پله منفی ابتدایی استفاده شد و پله منفی، نسبت اعماق مزدوج را افزایش می‌دهد. این نتایج نیز مشابه مطالعه اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹) است.

$$\frac{1}{2}\gamma(d_1 + s)^2 \cos\theta - \frac{1}{2}\gamma d_2^2 \cos\theta - \frac{1}{2}K\gamma L_j((d_1 + s) + d_2)\sin\theta \quad (10)$$

در این معادله،  $q$ : دبی جریان،  $\gamma$ : وزن مخصوص آب،  $V_2$ : سرعت جریان در مقطع ثانویه،  $k$ : ضریب تصحیح پروفیل سطح آب نسبت به پروفیل واقعی و دخالت اثر هوای مخلوط شده با آب است.  $\beta_1$  و  $\beta_2$ : ضرایب توزیع سرعت در معادله مومنتم است و با فرض  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  ساده سازی معادله (۱۰) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} & ((d_1 + s)^2 - d_2^2)\cos\theta \\ & - K L_j ((d_1 + s) + d_2)\sin\theta \\ & = \frac{2}{\gamma}\rho q(V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (11)$$

پس از ساده سازی، معادله (۱۱) را می‌توان به شرح زیر ارائه داد:

$$\begin{aligned} & \frac{(d_1^2 + 2sd_1 + s^2 - d_2^2)(d_2)}{2(d_1^3 - d_1^2 d_2)} \\ & = \frac{Fr_1^2}{\cos\theta - \frac{K L_j \sin\theta}{(d_1 + s) - d_2}} \end{aligned} \quad (12)$$

با جایگزینی:

$G_1^2 = Fr_1^2 / (\cos\theta - (K L_j \sin\theta / (d_1 + s) - d_2))$   
 $D = d_2/d_1$ ,  $S = s/d_1$  در معادله (۱۲)، این معادله به شرح زیر ارائه می‌شود:

$$D^3 - D(S^2 + 2S + 2G_1^2 + 1) + 2G_1^2 = 0 \quad (13)$$

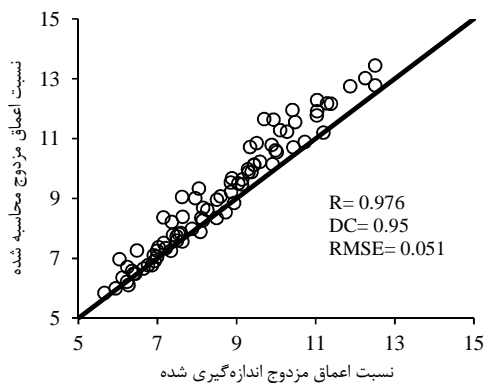
### ضریب نیروی برشی

دلیل اصلی کاهش عمق پایین دست ( $d_2$ ) در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار، افزایش تنش برشی بستر است (آید و راجاراتنام، ۲۰۰۲). تنش برشی بستر با استفاده از انتگرال معادله مومنتم به دست می‌آید. اگر  $F_T$  به عنوان تنش برشی بستر در طول پرش و برابر با مجموع نیروهای برشی بستر فرض شود، مقدار آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F_T = \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx = (F_1 - F_2) + (M_1 - M_2) \quad (14)$$

که در آن  $F_1, F_2$  نیروی فشاری در مقاطع ۱ و ۲،  $M_1, M_2$  مقدار اندازه حرکت در دو مقطع اولیه و ثانویه است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). مقدار  $F_T$  در پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس و پله منفی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

نسبت اعماق مزدوج به ازای عدد فرود اولیه، پله منفی و شیب معکوس‌های متفاوت به کار برده شود.



شکل ۴- مقایسه نسبت اعماق مزدوج اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با استفاده از معادله (۱۳)

پس از به دست آوردن معادله تحلیلی، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نسبت اعماق مزدوج با استفاده از داده‌های به دست آمده پرداخته می‌شود. با استفاده از معادله (۶) و با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات، تحلیل رگرسیون انجام شد. با توجه به مقدار  $R^2$  فرض وابسته بودن نسبت اعماق مزدوج به عدد فرود اولیه، ارتفاع نسبی پله منفی و شیب معکوس تأیید می‌شود.

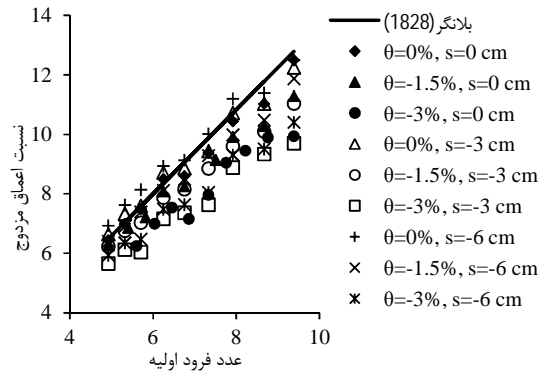
$$\frac{d_2}{d_1} = 1.11Fr_1 + 0.126\frac{s}{d_1} - 29.2\theta \quad (11)$$

$+1.48$ ,  $R^2 = 0.97$ ,  $RMSE = 0.045$

ضرایب فوق نشان می‌دهند که با افزایش زاویه شیب معکوس، نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش عدد فرود اولیه و ارتفاع نسبی پله منفی، باعث افزایش نسبت اعماق مزدوج پرش می‌شود.

### طول نسبی پرش هیدرولیکی

طول پرش هیدرولیکی در مطالعات گذشته به روش‌های مختلفی تعریف و اندازه‌گیری شده است؛ به عنوان مثال، راجاراتنام و سوپرامانیا (۱۹۶۸) از پنجه پرش تا بخشی را که توزیع سرعت در آن یکنواخت می‌شود، به عنوان تعریف طول پرش هیدرولیکی در نظر گرفتند. همچنین، اهو تسو و همکاران (۱۹۹۹) طول پرش را تا کمی بالاتر از انتهای غلطاب تعریف کردند. از طرف دیگر، برمن و هاگر (۱۹۹۳) طول پرش هیدرولیکی را در انتهای بخش تخمین زدند که فقط حباب‌های کوچک هوا به سطح آب رسیدند. در این



شکل ۳- تغییرات نسبت اعماق مزدوج در مقابل عدد فرود برای اندازه‌های مختلف شیب معکوس و پله منفی

### درصد کاهش عمق ثانویه

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) برای مقایسه عمق پایاب مورد نیاز  $d_2$  و عمق ثانویه در پرش کلاسیک  $d_2^*$ ، پارامتر بدون بُعد درصد کاهش عمق ثانویه  $Y$  را معرفی کردند. درصد کاهش عمق ثانویه از معادله (۱۰) قابل محاسبه است:

$$Y = \frac{d_2^* - d_2}{d_2^*} \times 100 \quad (10)$$

این پارامتر برای تمامی آزمایشات انجام شده در مطالعه اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) که بر روی بستر با زبری موج‌دار انجام گرفت، برابر با ۰/۲۵ به دست آمد. همچنین با توجه به معادله (۱۰) این مقدار در پرش کلاسیک برابر با صفر است. مطابق با معادله مذکور، شیب معکوس ۱۲/۶۲ درصد نسبت به اعماق مزدوج را کاهش می‌دهد و پله منفی ۵/۶۶ درصد، افزایش اعماق مزدوج را حاصل شد. همچنین با ترکیب شیب معکوس و پله منفی، تأثیر پله منفی در افزایش نسبت اعماق مزدوج ناچیز می‌شود و در این حالت ۱۲/۴۲ درصد نسبت اعماق مزدوج را کاهش می‌یافت.

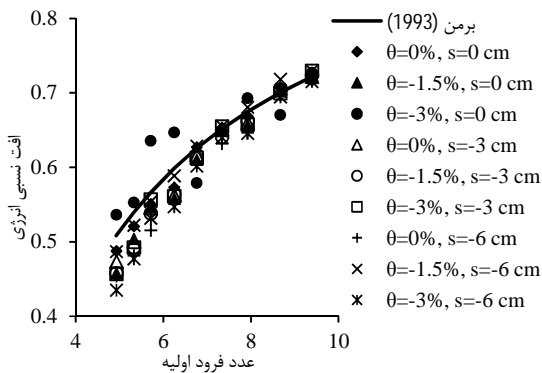
برای بررسی درستی معادله تحلیلی به دست آمده (۱۳) با استفاده از معادله مومنتوم که نسبت اعماق مزدوج را محاسبه می‌کند، باید مقدار نسبت اعماق مزدوج را محاسبه کرده و با نسبت اعماق مزدوج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه کرد. در این رابطه مقدار ضریب تصحیح پروفیل سطح آب نسبت به پروفیل واقعی و دخالت اثر هوای مخلوط شده با آب  $(k)$ ، با توجه به نتایج تجربی در این مطالعه، برابر با ۱/۰۴ محاسبه شد. نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. میزان دقت معادله تحلیلی به دست آمده، قابل قبول است که نشان‌دهنده دقت مطلوب آن است؛ بنابراین این رابطه می‌تواند برای محاسبه

### اُفت نسبی انرژی

اتلاف انرژی در پرش  $(\Delta E)$  برابر است با تفاوت بین انرژی قبل و بعد از پرش  $(E_1 - E_2)$  (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، اُفت نسبی انرژی  $(\Delta E/E_1)$  در مقابل اعداد فرود برای تمامی آزمایشات رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که برای اعداد فرود یکسان، اُفت نسبی انرژی با افزایش ارتفاع پله منفی و زاویه شیب معکوس کاهش می‌یابد و با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد که با نتایج اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹) و پاگلیارا و پالمو (۲۰۱۵) مطابقت داشت. این نتیجه از معادله (۱۳) (که از رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی و با توجه به معادله (۸) به دست آمده است) نیز نتیجه‌گیری می‌شود.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 0.058Fr_1 - 0.0023\frac{s}{d_1} - 0.061\theta \quad (13)$$

$$+0.21, R^2 = 0.95, RMSE = 0.1$$



شکل ۶- تغییرات اُفت نسبی انرژی در مقابل عدد فرود برای مقادیر مختلف شیب معکوس و پله منفی

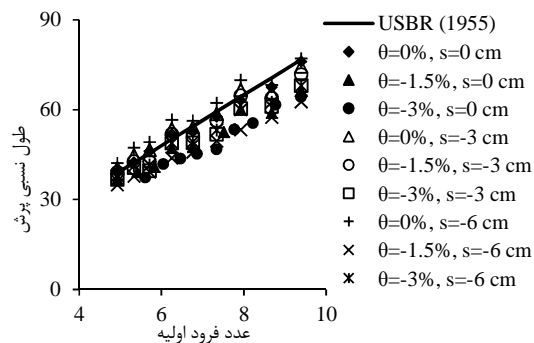
### ضریب نیروی برشی در پرش هیدرولیکی

با استفاده از معادله (۱۷)، مقدار ضریب نیروی برشی بستر برای شرایط مختلف آزمایش محاسبه شد و سپس منحنی تنش برشی بستر در مقابل عدد فرود اولیه جریان ترسیم شدند. نمودار ضریب نیروی برشی مطالعات فعلی به‌ازای اعداد فرود اولیه در شکل ۷ ترسیم شده است.

نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که مقدار  $\varepsilon$  در پرش هیدرولیکی بر روی پله منفی با شیب‌های منفی مختلف به‌طور میانگین ۱۲/۵۶ برابر ضریب نیروی برشی در بسترهای صاف است. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که همیشه ضریب نیروی برشی در تمام آزمایشات بالای منحنی پرش کلاسیک قرار می‌گیرد. ضریب نیروی برشی

مطالعه، تعریف پیشنهادی برمن و هاگر (۱۹۹۳) برای اندازه‌گیری طول استفاده شد.

شکل ۵ مقایسه مقادیر مشاهده‌شده طول نسبی پرش هیدرولیکی  $(L_j/d_1)$  در مطالعه حاضر است که در کانال با شیب معکوس و پله منفی ابتدایی با مقادیر طول پرش هیدرولیکی کلاسیک (USBR, 1955) را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، با افزایش زاویه شیب معکوس، طول نسبی پرش ۱۳/۹ درصد کاهش می‌یابد که با نتایج پاگلیارا و پالمو (۲۰۱۵) مطابقت داشت. همچنین با افزایش ارتفاع پله منفی ابتدایی، طول نسبی پرش ۶/۲ درصد افزایش می‌یابد؛ در نتیجه مطابق با پژوهش حاضر و اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹)، نقش پله منفی ابتدایی و درحالی‌که ترکیب شیب معکوس و پله منفی، ۱۴/۸ درصد طول نسبی پرش را کاهش می‌دهد.



شکل ۵- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود برای اندازه‌های مختلف شیب معکوس و پله منفی

برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر طول پرش هیدرولیکی در کانال با شیب معکوس و پله منفی، با توجه به معادله (۶) و نتایج حاصل از آزمایشات، تحلیل رگرسیون انجام شد. با توجه به مقدار  $R^2$  فرض وابسته بودن طول نسبی پرش هیدرولیکی به عدد فرود اولیه، ارتفاع نسبی پله منفی و شیب معکوس تأیید می‌شود.

$$\frac{L_j}{d_1} = 6.91Fr_1 + 0.79\frac{s}{d_1} - 135.4\theta \quad (12)$$

$$+7.04, R^2 = 0.92, RMSE = 0.072$$

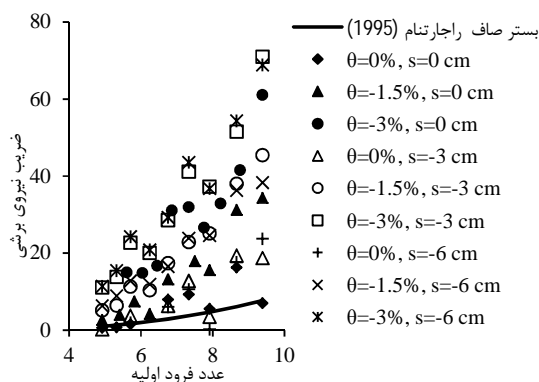
ضرایب فوق نشان می‌دهند که با افزایش زاویه شیب معکوس، طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش عدد فرود اولیه و ارتفاع نسبی پله منفی، باعث افزایش طول نسبی پرش می‌شود.

بنابراین نقش پله منفی در تثبیت پرش در محل حوضچه آرامش است و شیب معکوس این تثبیت پرش را سخت‌تر می‌کند.

### منابع

- اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. ۱۳۷۹. پرش هیدرولیکی بر روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی. نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی. ۱۹(۲): ۹۷-۱۱۰.
- فلاحی ب. حیدرپور م. پورعبدالله ن. و منتظری ا. ۱۳۹۸ (الف). بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با شیب معکوس، یازدهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۹ ص.
- فلاحی ب. حیدرپور م. پورعبدالله ن. و منتظری ا. ۱۳۹۸ (ب). بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی و مستقیم همراه با زبری بستر، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۹ ص.
- فلاحی ب. و حیدرپور م. ۱۴۰۰. بررسی نیروی برشی، لایه مرزی و پدیده کویتاسیون در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵(۲).
- Abbaspour A. Dalir A. H. Farsadizadeh D. and Sadraddini A. A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-environment Research. 3(2): 109-117.
- Barenblatt G. I. 1987. Dimensional Analysis. New York. Gordon and Breach Science, Amsterdam, the Netherlands, CRC Press. pp. 31-38.
- Beirami M. K. and Chamani M. R. 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. Journal of Hydraulic Engineering. 132(10): 1061-1068.
- Beirami M. K. and Chamani M. R. 2010. Hydraulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. Canadian Journal of Civil Engineering. 37(4): 535-543.
- Belanger J. B. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilan-Goeury. France.
- Bremen R. and Hager W. H. 1993. T-jump in abruptly expanding channel. Journal of Hydraulic Research. 31(1): 61-78.
- Carollo F. G. Ferro V. and Pampalone V. 2007. Hydraulic jumps on rough beds.

در پرش هیدرولیکی در کانال با شیب معکوس، ۱۰/۶ برابر پرش کلاسیک و در کانال با پله منفی ابتدایی، ۱۲/۱۲ برابر پرش کلاسیک بود.



شکل ۷- تغییرات ضریب نیروی برشی در مقابل عدد فرود برای اندازه‌های مختلف شیب معکوس و پله منفی

همچنین معادله (۱۴) ضریب تنش برشی برای پرش بر روی پله منفی با شیب‌های منفی در تحقیق حاضر و معادله (۱۵) برای بستر صاف که توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) ارائه شده است، به صورت زیر است.

$$\varepsilon = 7.43Fr_1 + 2.35 \frac{s}{d_1} + 478.9\theta \quad (14)$$

$$-48.1, \quad R^2 = 0.86$$

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1, \quad R^2 = 1 \quad (15)$$

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر توأم شیب معکوس و پله منفی ابتدایی بر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش، آفت انرژی و تنش برشی بستر بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش شیب معکوس کانال، نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و آفت انرژی به ترتیب ۱۲/۶، ۱۳/۹ و ۱۶/۸ درصد کاهش می‌یابد. براساس مشاهدات تجربی، شیب معکوس تثبیت پرش هیدرولیکی در محل حوضچه آرامش را دشوار می‌کند؛ درحالی‌که پله منفی نسبت اعماق مزدوج و طول پرش را به ترتیب ۵/۶۶ و ۶/۲ درصد افزایش و آفت انرژی را ۲/۶ درصد کاهش می‌یافت. ترکیب در عامل شیب معکوس و پله منفی نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و آفت انرژی را به ترتیب ۱۲/۴۲، ۱۴/۸ و ۳ درصد کاهش می‌داد و تنش برشی نیز ۱۲/۵۶ برابر شرایط بستر صاف به دست آمد؛



25. Wu S. and Rajaratnam N. 1995. Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal Hydraulic Research*. 33: 197-212.
- Journal of Hydraulic Engineering. 133(9): 989-999.
12. Ead S. A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(7): 656-663.
13. Hager W. H. 1985. B-jumps at abrupt channel drops. *Journal of hydraulic Engineering*. 111(5): 861-866.
14. Hager W. H. and Bremen R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*. 27(5): 565-585.
15. McCorquodale J. A. and Mohamed M. S. 1994. Hydraulic jumps on adverse slopes. *Journal of Hydraulic Research*. 32(1): 119-130.
16. Mohamed Ali H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117(1): 83-93.
17. Ohtsu I. Yasuda Y. and Ishikawa M. 1999. Submerged hydraulic jumps below abrupt expansions. *Journal of hydraulic engineering*. 125(5): 492-499.
18. Pagliara S. and Palermo M. 2015. Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-sloped beds. *Journal of Hydraulic Research*. 53(2): 243-252.
19. Parsamehr P. Farsadzadeh D. Hosseinzadeh Dalir A. Abbaspour A. and Nasr Esfahani M. J. 2017. Characteristics of hydraulic jump on rough bed with adverse slope. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 23(3): 301-307.
20. Pourabdollah N. Heidarpour M. and Abedi Koupai J. 2020. Characteristics of free and submerged hydraulic jumps in different stilling basins. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. 173(3): 121-131.
21. Quraishi A. A. and Al-Brahim A. M. 1992. Hydraulic jump in sloping channel with positive or negative step. *Journal of Hydraulic Research*. 30(6): 769-782.
22. Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. *Trans. Eng. Inst. Canada*. 11(A-2): 1-8. Rajaratnam N. and Subramanya K. 1968. Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions. *J. Hydraul. Div.* 94: 481-504.
23. Roushangar K. and Ghasempour R. 2018. Explicit prediction of expanding channels hydraulic jump characteristics using gene expression programming approach. *Hydrology Research*. 49(3): 815-830.
24. USBR. 1955. Research studies on stilling basins, energy dissipators and associated appurtenances. *Hydraulic Laboratory Report*. 393-438.

