

## مطالعه آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق با زاویه حمله معین بر مشخصات پرش هیدرولیکی

حمیدرضا باقری<sup>۱</sup> و منوچهر حیدرپور<sup>۲\*</sup>

### چکیده

پرش هیدرولیکی پدیده‌ای است که هنگام وقوع آن، انرژی بسیار زیاد و مخرب جریان آب آزاد می‌شود و اثرات بسیار مخربی بر بستر رودخانه‌ها و سازه‌های هیدرولیکی از خود به جا می‌گذارد؛ به گونه‌ای که سبب تخریب بستر و دیواره‌های مجرای انتقال جریان در محدوده وقوع پرش می‌شود. به منظور کنترل و کاهش اثرات مخرب پرش هیدرولیکی، حوضچه‌های آرامش در سازه‌های آبی طراحی و اجرا می‌شوند. در این پژوهش، ۲۷ آزمایش در کانال آزمایشگاهی با استفاده از صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه که به منظور کنترل پرش هیدرولیکی در بستر کانال چسبانده شده‌اند، انجام شده است، تا با قرارگیری مقابل جریان فوق‌بحرانی آب، از آثار مخرب آن بکاهند. صفحات مستغرق به صورت گروه صفحات سه تایی و با دو آرایش قرارگیری متفاوت نسبت به یکدیگر، به منظور کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش هیدرولیکی بر بستر حوضچه آرامش قرار داده شدند. فاصله هریک از گروه صفحات مستغرق در این پژوهش نسبت به یکدیگر ۰/۲ و ۰/۳ متر در بازه  $4/58 \leq F_{r1} \leq 9/14$  در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد استفاده از صفحات مستغرق در بستر، می‌تواند موجب کاهش طول نسبی و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به ترتیب تا مقدار ۱۵/۵ و ۴/۹ درصد نسبت به پرش کلاسیک شود. همچنین به کارگیری صفحات مستغرق در بستر کانال موجب افزایش ۳/۹ درصدی افت انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک (بستر صاف) شد.

**واژه‌های کلیدی:** افت انرژی، پرش هیدرولیکی، صفحات مستغرق، طول پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه.

ارجاع: باقری ح. ر. و حیدرپور م. ۱۴۰۲. مطالعه آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق با زاویه حمله معین بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۴۴-۴۴. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14471.2544>

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

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

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵

## مقدمه

کاویتاسیون نیز قرار گیرند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌ها شود، ایجاد زبری مصنوعی در بستر جریان است. زبرکردن کف باعث می‌شود که در یک حجم کنترل، مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومت زبری‌ها، کمتر از مومنتم ورودی شود (بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰؛ اید و همکاران، ۲۰۰۰).

یکی از اساسی‌ترین تفاوت‌های زبری با بلوک این است که سطح فوقانی آن‌ها بر خلاف بلوک‌ها کاملاً در زیر عمق اولیه پرش هیدرولیکی قرار گرفته و هم تراز با کف کانال است؛ از این رو روشی برای کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به‌شمار می‌آید و مشکلاتی از جمله کاویتاسیون نیز به حداقل خواهد رسید.

راجاراتنام (۱۹۶۸) با انجام تحقیق‌های خود نشان داد در بسترهای دارای زبری، عمق ثانویه پرش می‌تواند کوچک‌تر از عمق ثانویه پرش ( $y_2$ ) در حالت صاف باشد.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) با بررسی اثر بستر موج بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در بازه  $4 \leq F_{r1} \leq 10$  و زبری‌های نسبی  $(t/y_1)$  ۰/۵، ۰/۴۳، ۰/۲۵ که در آن‌ها  $t$  مقدار ارتفاع موج‌ها و  $y_1$  عمق اولیه جریان است، نشان دادند عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر بستر موج کوچک‌تر از عمق ثانویه پرش بر بستر صاف است. آن‌ها همچنین نشان دادند که طول پرش هیدرولیکی در بستر زبر تقریباً سه برابر عمق ثانویه پرش کلاسیک ( $\frac{L_p}{y_2} = 3$ ) است. در

حالی که در پرش کلاسیک این نسبت شش برابر ( $\frac{L_p}{y_2} = 6$ ) است و این بدان معناست که طول پرش هیدرولیکی بر بسترهای سینوسی تقریباً نصف مقدار طول پرش در حالت کلاسیک است. همچنین آن‌ها اعلام کردند میزان عمق ثانویه در بستر موجدار تقریباً ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

نتایج آزمایش‌های ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷) روی ۴ نوع بستر موجدار دوزنقه‌ای نشان داد با استفاده از زبری دوزنقه در بستر در محدوده  $4 \leq F_{r1} \leq 10$ ، طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به ترتیب تا ۵۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، با انجام آزمایش روی زبری‌های سینوسی شکل، نشان دادند عمق ثانویه مورد نیاز

پرش هیدرولیکی یکی از انواع حالت‌های آزادشدن انرژی زیاد آب است و به‌عنوان زیرشاخه‌ای از علم هیدرولیک طبقه‌بندی می‌شود. در پرش هیدرولیکی، جریان از نوع متغیر سریع<sup>۱</sup> بوده و در طی آن با تغییر رژیم جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی در بازه زمانی کوتاه، جریان آب از عمق کم و سرعت زیاد به عمق زیاد و سرعت کم تبدیل می‌شود و انرژی زیاد و مخرب آب که عمدتاً مربوط به تبدیل انرژی جنبشی به گرمایی است، آزاد و از اثرات تخریبی آن تا حد زیادی کاسته می‌شود (چانسون، ۲۰۱۱).

پرش هیدرولیکی به‌طور گسترده‌ای در علم هیدرولیک رودخانه بررسی شده و دارای پیچیدگی‌های زیادی در هنگام بررسی است (چانسون، ۲۰۰۹؛ لنون و هیل، ۲۰۰۶) و تاکنون به‌طور کامل شناخته نشده است (چانسون، ۲۰۱۰؛ راجاراتنام، ۱۹۶۸).

در مستهلک‌کننده‌های انرژی از نوع پرش هیدرولیکی، پرش معمولاً با کمک بافل در داخل حوضچه آرامش ایجاد می‌شود. در تحلیل این نوع جریان از معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده می‌شود. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه انواع حوضچه‌های آرامش در کانال‌های مستطیل‌شکل یا سایر اشکال کانال (هاگر، ۱۹۸۵؛ اید و همکاران، ۲۰۰۰) با موضوع پرش هیدرولیکی صورت گرفته است. هدف همه این مطالعات، به‌وجود آوردن حوضچه‌های اقتصادی بوده است. پارامترهایی چون طول حوضچه، عمق پایاب و افت نسبی انرژی از جمله پارامترهای مهمی هستند که در طراحی اقتصادی حوضچه آرامش تأثیر فراوان دارند (بیرامی و چمنی، ۲۰۰۶؛ بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰).

در گذشته، برای کاهش ابعاد حوضچه‌های آرامش اقداماتی چون ساخت بلوک‌های پای شوت یا بلوک‌های میانی به‌منظور اتلاف بیشتر انرژی جنبشی جریان در محدوده پرش هیدرولیکی و کاهش مشخصات آن استفاده شده است. نکته حائز اهمیت این است که بلوک‌ها مستقیماً در معرض جریان با انرژی بالا قرار داشته، بنابراین نیازمند استحکام زیاد برای مقابله با نیروهایی هستند که از هر سو به آن‌ها وارد می‌شوند که باعث بزرگی ابعاد آن‌ها شده و همین امر موجب می‌شود در برخی مواقع در معرض

زاویه‌های مختلف در محدوده اعداد فرود  $0.5$  تا  $0.9$  در فلوم آزمایشگاهی نشان دادند عمق و طول نسبی در آرایش زیگزاگی در مقایسه با ردیفی نسبت به بستر صاف کاهش بیشتری یافته است. ضریب نیروی برشی که عامل اصلی کاهش عمق و طول نسبی پرش است، در هر دو آرایش ۶ درصد بیشتر از بستر صاف به دست آمد.

پورعبدالله و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر شیب معکوس بستر و پله مثبت انتهایی در تغییر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله کاهش طول و عمق ثانویه پرداختند. نتایج نشان داد اثر شیب معکوس بستر از پله مثبت انتهایی بیشتر است.

پارسامهر و همکاران (۲۰۲۲) اثر ارتفاع زبری و شیب معکوس بستر در کنترل پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع زبری‌ها و شیب کف معکوس مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله طول و نسبت اعماق ثانویه آن کاهش می‌یابد.

با وجود مطالعات انجام شده بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف کنترل جریان، تاکنون اثر زاویه حمله صفحات مستغرق در کنترل پرش هیدرولیکی بررسی نشده است؛ از این رو، مطالعه حاضر به بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حضور صفحات مستغرق با زاویه حمله معین در دو آرایش قرارگیری متفاوت پرداخته است. اثرات چندین پارامتر، از جمله طول، اعماق مزدوج و افت نسبی پرش هیدرولیکی مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، با استفاده از داده‌های تجربی و تحلیل ابعادی، معادلاتی برای تخمین ویژگی‌های پرش هیدرولیک ارائه شده است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات فلوم آزمایشگاه

مطالعه حاضر در فلوم مستطیل شکل آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان به طول ۸، عرض  $0.4$  و ارتفاع  $0.6$  متر انجام شد. جنس دیواره‌ها و کف کانال پلاکسی گلس شفاف بوده که منجر به سهولت در برداشت داده‌ها شده است. مطابق با شکل ۱ کانال دارای دو دریچه ابتدایی و انتهایی است. میزان آب ورودی به کانال و عبوردادن جریان با عدد فرود اولیه لازم برای انجام آزمایش‌ها به وسیله بالا و پایین شدن دریچه ابتدایی انجام شده است. با استفاده از دریچه پایین دست کانال که

برای تشکیل پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود  $3.6 \leq F_{r1} \leq 8.6$  و برای شش شیب موج مختلف در بازه  $0/625 \leq t/s \leq 0/286$  تا ۵ درصد کوچک‌تر از بسترهای صاف است. همچنین مقدار طول نسبی پرش  $(L_j / y_2^*)$  به‌ازای اعداد فرود کمتر از ۶، ۳ و برای اعداد فرود بالاتر از ۶،  $3/5$  است. آن‌ها نتیجه گرفتند که طول پرش بر بستر سینوسی تقریباً نصف طول پرش بر بسترهای کلاسیک است. همچنین رابطه بین عدد فرود اولیه و اعماق مزدوج را به صورت زیر به دست آوردند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1146 F_{r1} \quad (1)$$

السبایه و شبایک (۲۰۱۰)، با انجام آزمایش بر بسترهای دارای زبری‌های سینوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای با دو شیب دیواره متفاوت و مستطیلی نشان دادند که استفاده از زبری می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک شود. آن‌ها معادله (۲) را برای نسبت اعماق مزدوج و معادله (۳) را برای طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر پیشنهاد کردند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.88 F_{r1}, R^2 = 0.94 \quad (2)$$

$$\frac{L_j}{y_2} = 2.1 \quad (3)$$

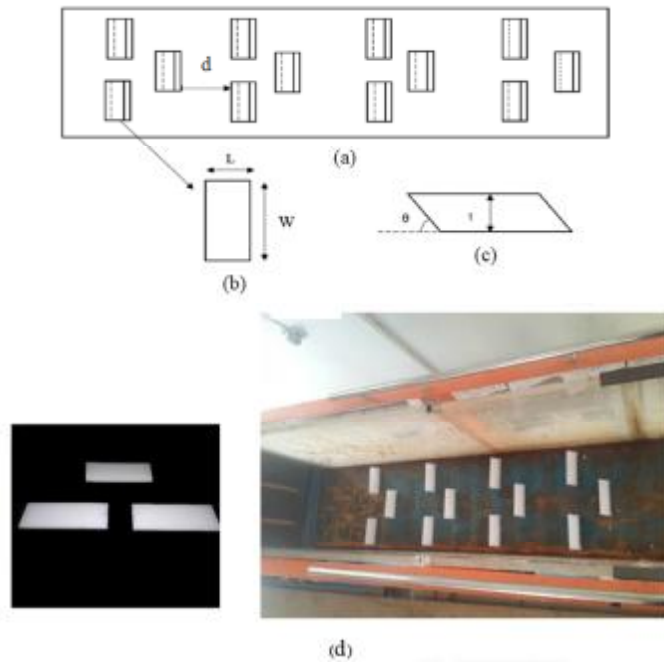
سلطانی (۱۳۹۵) به تأثیر صفحات مستغرق با ارتفاع و نحوه قرارگیری مختلف در بستر پرداخت. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع صفحات و در نتیجه بالارفتن نیروی مقاومت در برابر جریان، نسبت اعماق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳) با انجام آزمایش روی بسترهای موج‌دار مثلثی نشان دادند عمق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی به ترتیب ۲۵ و  $54/7$  درصد نسبت به سطح صاف کاهش می‌یابد.

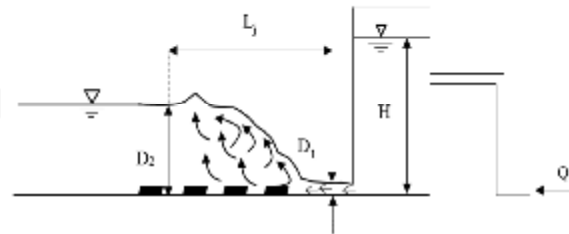
پارسامهر و همکاران (۱۳۹۵)، با انجام آزمایش روی زبری‌های غیرممتد لوزی شکل در محدوده اعداد فرود اولیه  $4/3$  تا  $12/4$  نشان دادند، افزایش تراکم زبری‌های بستر باعث افزایش استهلاک انرژی و در نتیجه کاهش عمق ثانویه می‌شود. در حالت تراکم  $10/67$  درصدی بیشترین کاهش عمق ثانویه به مقدار  $29/39$  به وقوع می‌پیوندد.

اسدی و همکاران (۱۳۹۸)، با انجام آزمایش بر ۲۴ بستر زبر مکعبی با آرایش زیگزاگی و ردیفی، با ردیف‌ها و





شکل ۳- (a) آرایش قرارگیری صفحات مستغرق در حوضچه آرامش، (b) دید از بالا صفحه مستغرق، (c) دید جانبی صفحات و (d) نصب صفحات با زاویه حمله ۳۰ درجه در بستر محل تشکیل پرش هیدرولیکی



شکل ۴- چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی بر بستر با صفحات مستغرق (باقری و حیدرپور، ۱۳۹۸)

سپس با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام می‌توان به معادله زیر دست یافت:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_2 \left( \text{Re} = \frac{v_1 D_1}{\nu}, Fr_1 = \frac{v_1}{g D_1}, \frac{d}{D_1}, \tan \theta \right) \quad (5)$$

در این معادله  $Fr_1$  عدد فرود اولیه و  $\text{Re}$  عدد رینولدز است. با توجه به اینکه در شرایط آزمایشی این پژوهش عدد رینولدز بزرگتر از ۵۰۰۰ است، در نتیجه جزو جریان‌های آشفته طبقه‌بندی می‌شود و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. تعدادی از محاسبات عدد رینولدز تحقیق حاضر به عنوان نمونه در جدول ۲ آورده شده است.

معادله (۵) به صورت معادله (۶) خلاصه می‌شود:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_3 \left( Fr_1, \frac{d}{D_1}, \tan \theta \right) \quad (6)$$

#### تحلیل ابعادی

مشخصات پرش هیدرولیکی بر بسترهای زبر از نوع صفحات مستغرق، تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان است. مهم‌ترین پارامترهایی که در تحلیل ابعادی در شرایط حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از: عمق ثانویه پرش ( $D_2$ )، عمق اولیه پرش ( $D_1$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، عرض کانال ( $B$ )، لزجت دینامیکی سیال ( $\mu$ )، سرعت اولیه جریان ( $V_1$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho$ )، فاصله گروه صفحات مستغرق کار گذاشته نسبت به هم ( $d$ ) و همچنین زاویه حمله صفحات مستغرق ( $\theta$ ) که ارتباط این پارامترها را با عمق ثانویه پرش می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$D_2 = f_1(D_1, V_1, B, g, \rho, \mu, d, \theta) \quad (4)$$

با برداشت مقادیر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی از طریق میانگین‌گیری عمق آب در مقطع عرضی انتهای پرش هیدرولیکی، می‌توان نسبت عمق ثانویه به اولیه را به‌دست آورد.

و به‌طور مشابه برای طول پرش هیدرولیکی با استفاده از تحلیل ابعادی معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{L_j}{D_1} = f_4(Fr_1, \frac{d}{D_1}, \tan q) \quad (7)$$

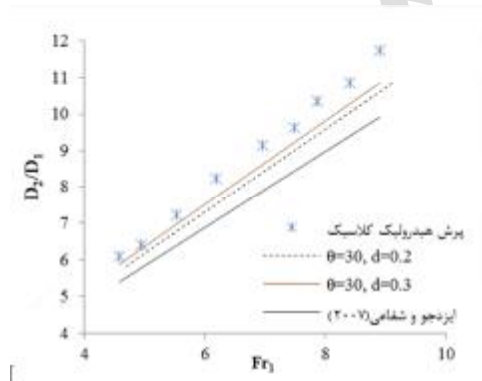
جدول ۲- نمونه‌ای از محاسبات انجام‌شده در جهت محاسبه عدد رینولدز

R(m)	P(m)	A(m <sup>2</sup> )	V <sub>i</sub> (m/s)	D <sub>1</sub> (m)	Re
۰/۰۲۹	۰/۴۶۸	۰/۰۱۳	۲/۹۱۲	۰/۰۳۴	۳۴۱۳۹۴
۰/۰۳۴	۰/۴۸۲	۰/۰۱۶	۳/۰۲۴	۰/۰۴۱	۴۱۴۳۶۴
۰/۰۲۱	۰/۴۴۹	۰/۰۰۹	۳/۰۴۰	۰/۰۲۴	۲۶۷۰۶۲

(۸) ارائه شده است. همچنین با توجه به معادله (۶)، ارتباط بین عوامل مؤثر بر عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی در این آزمایش به‌صورت معادله (۹) با  $NRMSE = 3/1$  درصد ارائه شده است.

$$\frac{D_2}{D_1} = 1.15Fr_1 + 0.59, R^2 = 0.99 \quad (8)$$

$$\frac{D_2}{D_1} = 1.08Fr_1 - 0.04\frac{d}{D_1} - 0.17\tan q + 1.55 \quad (9)$$



شکل ۵- نسبت  $\frac{D_2}{D_1}$  در مقابل  $Fr_1$ ، صفحات مستغرق با دو آرایش متفاوت و با زاویه حمله ۳۰ درجه

اختلاف اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی بر بستر دارای صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه و صاف را می‌توان به‌صورت رابطه‌ای بی‌بعد به‌نام پارامتر کاهش عمق نسبی (Y) بیان کرد. این مؤلفه در پرش‌های هیدرولیکی کلاسیک برابر با صفر است و از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$Y = \frac{D_2^* - D_2}{D_2^*} \quad (10)$$

## نتایج و بحث

### بررسی اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی

در شکل ۵ نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در حالت حوضچه دارای صفحات مستغرق در مقایسه با حوضچه صاف ارائه شده است. برای مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای محققان پیشین، نتایج تحقیق ایزدجو و شفاعی (۲۰۰۷) که بر بستر موجدار دوزنقه‌ای انجام شده نیز در این شکل نمایش داده شده است. همان‌طور که از روند نتایج در شکل مشخص است، به‌کارگیری صفحات مستغرق در بستر فلوام به‌طور میانگین باعث کاهش ۳/۹ درصدی نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی می‌شود و نمودار مربوط به آن در خطی پایین‌تر از حالت کلاسیک قرار می‌گیرد که این کاهش در اعداد فرود بزرگ‌تر مشهودتر است؛ به‌طوری‌که برای آزمایش با  $Fr_1 = 9$ ،  $\theta = 30^\circ$  و  $d = 0/2$  متر مقدار کاهش عمق مزدوج پرش هیدرولیکی ۸/۸ درصد است. این کاهش به‌دلیل ایجاد مانع در مسیر جریان بوده که باعث حبس شدن حباب‌های هوا در زائده‌ها شده و در نتیجه در رابطه مومنتم به‌عنوان یک نیروی مقاوم در برابر حرکت جریان باعث افت مومنتم خروجی جریان و در نتیجه افت انرژی می‌شود. همچنین با نزدیک شدن گروه صفحات مستغرق به یکدیگر، نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش بیشتری یافته است. در واقع نزدیک‌تر شدن صفحات مستغرق در ابتدای مسیر جریان، تأثیر بیشتری در پراکندگی جریان فوق‌بحرانی و کاهش اعماق ثانویه پرش هیدرولیکی داشته است. با افزایش عدد فرود اولیه جریان، نسبت اعماق مزدوج در حالت صفحات مستغرق نیز افزایش یافته است. نسبت بین اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی همراه با صفحات مستغرق و عدد فرود اولیه جریان به‌صورت معادله

رابطه خطی نسبت بی‌بعد پرش هیدرولیکی همراه با صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه در مقابل عدد فرود اولیه جریان برای  $d=0/2$  و  $d=0/3$  به ترتیب به صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) است:

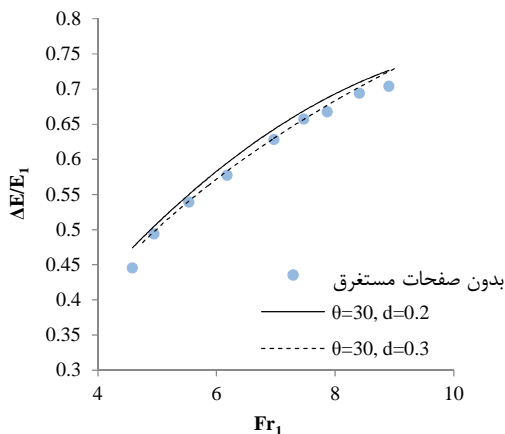
$$L_j / D_1 = 7.59Fr_1 - 5.93, R_2 = 0.98 \quad (11)$$

$$L_j / D_1 = 8.121Fr_1 - 7.59, R_2 = 0.98 \quad (12)$$

### بررسی افت نسبی انرژی

با استفاده از مقادیر عمق و سرعت جریان در مقاطع اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی، مقادیر افت نسبی انرژی  $\frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{\Delta E}{E_1}$  محاسبه می‌شود (بلانگر، ۱۸۲۸).

شکل ۷ نشان‌دهنده مقادیر افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی در حضور صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه با دو آرایش متفاوت است. در این شکل افت نسبی انرژی برای همه حالت‌های آزمایش با حالت کلاسیک مقایسه شده است. با افزایش عدد فرود اولیه پرش قوی‌تری اتفاق می‌افتد و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل مشخص است، افت نسبی انرژی پرش در بستر دارای صفحات مستغرق بیشتر از پرش هیدرولیکی روی بستر صاف است. به‌طور کلی میانگین تغییرات افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی همراه با صفحات مستغرق بستر برای دو آرایش ۰/۲ و ۰/۳ متری به ترتیب ۳/۹ و ۲/۸ درصد بیشتر از حالت صاف است.

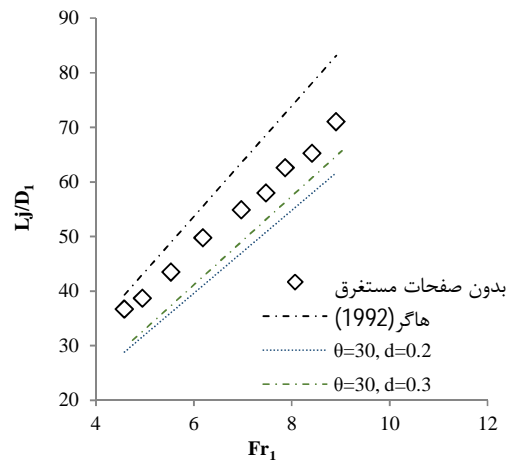


شکل ۷- نسبت  $\Delta E / E_1$  در مقابل  $Fr_1$ ، سطح همراه با صفحات با زاویه حمله ۳۰ درجه

در این معادله  $D_2^*$  عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی کلاسیک و  $D_2$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در مطالعه حاضر است. از مجموع ۲۷ آزمایش صورت‌گرفته، مقدار کاهش نسبت اعماق مزدوج در حالت به‌کارگیری صفحات مستغرق در مقایسه با حالت کلاسیک به ترتیب برای فواصل صفحات مستغرق ۰/۲ و ۰/۳ متر برابر با ۴/۹ و ۲/۸ درصد است. با توجه به اینکه صفحات مستغرق تنها قسمتی از سطح بستر کانال آزمایشگاهی را می‌پوشانند، درصد‌های بالا قابل توجه هستند.

### بررسی طول پرش هیدرولیکی

برای بررسی و مقایسه طول پرش هیدرولیکی، طول پرش با عمق اولیه به صورت  $L_j / D_1$  بی‌بعد و سپس مقادیر آن در مقابل عدد فرود اولیه متناظر با هر آزمایش ترسیم شد. در شکل ۶ نسبت اعماق مزدوج پرش در حالت حوضچه دارای صفحات مستغرق در مقایسه با حوضچه صاف ارائه شده است. برای مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای محققان پیشین، نتایج تحقیق هاگر (۱۹۹۲) نیز در این شکل نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با حضور صفحات مستغرق در بستر کانال آزمایشگاه، نسبت طول پرش هیدرولیکی کاهش یافته است. به‌طور میانگین، کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی برای آزمایش‌ها با زوایای حمله ۳۰ درجه صفحات مستغرق، برای فواصل گروه صفحات مستغرق ۰/۲ و ۰/۳ متر به ترتیب برابر با ۱۵/۵ و ۱۴/۴ درصد است.



شکل ۶- نسبت  $L_j / D_1$  در مقابل  $Fr_1$ ، سطح همراه با صفحات با زاویه حمله ۳۰ درجه

## نتیجه‌گیری

این تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر صفحات مستغرق بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداخته‌است. براین اساس ۱۲ صفحه مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه به صورت ۴ گروه سه‌تایی که در فواصل  $d=0/2$  و  $d=0/3$  کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تعداد ۲۷ آزمایش در بازه  $4/58 \leq Fr_1 \leq 9/14$  انجام شد. در طول آزمایش‌ها مشاهده شد که وقتی جریان با صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه برخورد می‌کند، تغییر اساسی در الگوی حرکت جریان رخ می‌دهد و یک جریان حبابی به سمت سطح آب ایجاد و باعث می‌شود حباب‌های هوا با سرعت بیشتری به سمت سطح آب حرکت کنند. این روش که با آزاد شدن انرژی آب همراه است، منجر به کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی نسبت به حالت کلاسیک می‌شود. در پایان نتایج این پژوهش آزمایشگاهی با نتایج سایر محققان مقایسه شد که نتایج کلی تحقیق به شرح زیر است:

۱- عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه، نسبت به حالت کلاسیک کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود اولیه  $(Fr_1)$  و همچنین نزدیک شدن گروه صفحات مستغرق به یکدیگر (کم شدن  $d$ ) این نسبت کاهش بیشتری یافته است. به طور میانگین کاهش عمق ثانویه برای دو آرایش متفاوت  $0/2$  و  $0/3$  متر به ترتیب برابر با  $4/9$  و  $2/8$  درصد است و بیشترین کاهش در  $Fr_1=9$ ،  $\theta=30$  و  $d=0/2$  اتفاق می‌افتد که برابر با  $8/8$  درصد است.

۲- طول پرش هیدرولیکی نسبی با وجود صفحات مستغرق در بستر، در مقایسه با حالت کلاسیک کاهش یافته است. به طور میانگین برای دو آرایش متفاوت  $d=0/3$  و  $d=0/2$  این کاهش به ترتیب برابر با  $14/4$  و  $15/5$  درصد است. افزایش عدد فرود اولیه منجر به کاهش بیشتر طول نسبی پرش هیدرولیکی تا ۲۳ درصد در آزمایش  $Fr_1=7$ ،  $\theta=30$  و  $d=0/2$  می‌شود.

۳- افت نسبی پرش هیدرولیکی با وجود صفحات مستغرق با زاویه حمله ۳۰ درجه در بستر، در مقایسه با حالت کلاسیک افزایش یافته است. افزایش عدد فرود اولیه منجر به افزایش بیشتر افت نسبی انرژی شده است. این افت به طور میانگین برابر با  $3/3$  درصد است.

در پایان، مطالعه حاضر و روابط ارائه شده آن که حاصل ۲۷ آزمایش تجربی برای استفاده از پره مستغرق زاویه‌دار

است، می‌توانند در طراحی سازه‌های هیدرولیکی استفاده شوند و همچنین زمینه‌ای باشند برای پژوهش‌های بیشتر با موضوع صفحات مستغرق زاویه‌دار با زوایای دیگر از جمله ۴۵ و ۶۰ درجه و همچنین نصب تعداد صفحات بیشتر بر بستر و آرایش‌های متنوع دیگر از گروه صفحات.

## منابع

- اسدی ف. فضل‌اولی ر. و عمادی ع. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر جریان بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران، ۱۳(۴): ۳۹-۴۹.
- باقری ح. و حیدرپور م. ۱۳۹۸. بررسی اثر صفحات مستغرق بر اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی. یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، شیراز.
- پارسامهر پ. فرسادی‌زاده د. حسین‌زاده‌دلیر ع. عباسپور ا. و نصر اصفهانی م.ج. ۱۳۹۵. بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر بستر زبر با تراکم و آرایش‌های مختلف زبری. مجله دانش آب و خاک. ۲۶(۱): ۱۳-۲۴.
- سلطانی ح. و قربانی ب. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر ابعاد صفحات مستغرق بر تغییر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی. پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران.
- Abbaspour A. Hosseinzadeh Dalir A. 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.
- Beirami M. K. and Chamani M. R. 2006. Hydraulic jump in sloping channels: Sequent Depth Ratio. J. Hydraul. Eng. 132: 1061-1068.
- Beirami M.K. Chamani M.R. 2010. Hydraulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. Can J Civil Eng. 37(4): 535-543.
- Belanger J. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilan-Goeury. Paris.
- Chanson H. 2009. Advective diffusion of air bubbles in hydraulic jumps with large froude numbers: an experimental study. Hydraulic Model Report CH Series. CH75/09. The University of Queensland. Australia.
- Chanson H. 2010. Convective transport of air bubbles in strong hydraulic jumps. International Journal of Multiphase Flow. 36(10): 798-814.



11. Chanson H. 2011. Hydraulic jumps: turbulence and air bubble entrainment. *La Houille Blanche* 3: 5-16.
12. Ead S. Rajaratnam N. Katopodis C and Ade F. 2000. Turbulent open channel flow in circular corrugated culverts. *J. Hydraul. Eng.* 126: 750-757.
13. Ead S. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. *J. Hydraul. Eng.* 128: 656-663.
14. Elsebaie I.H. and Shabayek S. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *Civ. Envir. Eng. IJCEE-IJENS* 10: 40-50.
15. Hager W. H. 1985. Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels. *J. Hydraul. Res.* 23: 21-35.
16. 17- Hager W.H. 1992. *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Springer Science & Business Media dordrecht.
17. Izadjoo F. Shafai-Bejestan M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*. 7(8): 1164-1169.
18. Lennon J. M. and Hill D. F. 2006. Particle image velocity measurements of undular and hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(12): 1283-1294.
19. Parsamehr P. Kuriqi A. Farsadzadeh D. Hosseinzadeh-Dalir A. Daneshfaraz R. and Ferreira R. 2022. Hydraulic jump over an adverse slope controlled by different roughness elements. *Water Resources Management*.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-022-03330-x>.
20. Pourabdollah N. Heidarpour M. Abedi-Koupai J. Mohamadzadeh-Habili J. 2020. Hydraulic jump control using stilling basin with adverse slope and positive step. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*.  
<https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1812008>.
21. Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Trans. Eng. Inst. Canada* 11: 1-8.
22. Samadi-Boroujeni M. Ghazali M. and Ghorbani Bet al. 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*.  
<https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0019>.

## Research paper

# Laboratory investigations on hydraulic jump characteristics using submerged vanes with a certain angle of attack

H. Bagheri<sup>1</sup> and M. Heidarpour<sup>2\*</sup>

## Extended Abstract

Hydraulic jump is a rapid energy-dissipation phenomenon, categorized as a sub-branch of hydraulic science. It involves a transformation of water flow from a shallow and high-velocity state to a deep and low-velocity state, leading to substantial energy dissipation. This energy dissipation primarily occurs through the conversion of kinetic energy into thermal energy, resulting in a significant reduction in destructive effects. To control hydraulic jumps, energy dissipaters, such as baffles are used in the stilling basins. One possible alternative to the use of baffles is the implementation of artificial roughness on the channel bed. This approach involves introducing roughness elements that disrupt the water flow, which leads to unequal momentum at the inlet and outlet. Specifically, the resistance forces exerted by the roughness elements reduce the momentum at the outlet. The effect of wavy beds on hydraulic jump characteristics has also studied. Moreover, it was found that the use of sinusoidal-shaped roughness elements could result in a decrease in the length and depth of hydraulic jumps. In other research the impact of submerged vanes with different heights and placements in the channel bed was investigated. The findings indicated that increasing the height of the vanes resulted in a decrease of up to 9% in secondary depths and up to 18.6% in the length of the hydraulic jump. In another study, the influence of bed slope and inverse bed slope was examined. Additionally, researchers examined the effect of inverse bed slope and positive end sill on hydraulic jump characteristics. Both laboratory studies demonstrated a reduction in length and secondary depth, with the inverse bed slope having a greater impact on reducing hydraulic jump characteristics.

The experiments were conducted at the Hydraulic Laboratory of Isfahan University of Technology, Iran. A Plexiglas flume was used with dimensions of 8, 0.4, and 0.6 meters in length width and depth, respectively. Submerged vanes with a fixed attack angle of 30° and varying arrangements (d=0.2, 0.3 meters) were employed as roughness elements on the channel bed. The flow rate and initial Froude number were controlled by adjusting the upper and lower initial gates. Furthermore, the position of the hydraulic jump could be regulated along the channel using the lower outlet gate. The channel consisted of two reservoirs: the first one was located at the beginning of the channel and in front of it, while the second situated at the end of the channel and beneath. Water was pumped from a reservoir below the channel to the upstream reservoir and then directed into the channel. To start the experiment, the pump was turned on, and both gates (the initial and outlet) were kept closed until the water level rose above the first gate. Then, the desired initial Froude number for the experiment was achieved by adjusting the opening of the initial gate to create the hydraulic

---

1- Graduate Student, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\* Corresponding author: [heidar@iut.ac.ir](mailto:heidar@iut.ac.ir)

Received: 2023/07/27

Accepted: 2023/09/13

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14471.2544>

jump. The jump could be controlled and fixed at the desired location using the outlet gate. The depths of the initial and secondary hydraulic jumps were measured using a depth gauge, while the flow rate was measured using an electromagnetic flow meter. The research involved 27 experiments with flow rates of 30, 40, and 50 l/s. The parameters such as flow rate ( $Q$ ), upstream water depth ( $H$ ), initial depth of hydraulic jump ( $D1$ ), secondary depth of the jump ( $D2$ ), and length of hydraulic jump ( $L_j$ ) were measured.

The research and experiments were divided into three stages. Initially, variations in the depths of hydraulic jump were examined in the presence of submerged vanes. These vanes had an attack angle of 30 degrees and were arranged at two different distances: 0.2 and 0.3 meters between each vanes groups. The results showed that the presence of submerged vanes caused a reduction in the secondary depth of the hydraulic jump. This reduction was due to the obstruction of flow and the trapping of air bubbles in the protrusions created by the vanes. As a result, there was a decrease in energy dissipation, leading to a decrease in the secondary depth of the jump. To compare the relative length of the hydraulic jump, it was non-dimensionalized with respect to the initial depth. Then, corresponding points for each experiment were plotted versus the initial Froude number. The presence of submerged vanes in the channel bed was found to cause a decrease in the relative length of the hydraulic jump. On average, the relative length of the hydraulic jump decreased by 15.5% and 14.4% for experiments with attack angles of 30 degrees and vane distances of 0.2 and 0.3 meters, respectively. The reduction in the hydraulic jump was also greater compared to the classical condition. Additionally, the corresponding equations for each section were derived and presented.

**Keywords:** Energy dissipation, Hydraulic jump, Submerged vanes, Length of the hydraulic jump; Sequent depth.

**Citation:** Bagheri H. and Heidarpour M. 2024. Laboratory investigations on hydraulic jump characteristics using submerged vanes with a certain angle of attack. Iranian Water Research Journal. 51: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14471.2544>