مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۷/ شماره ۴/ پیاپی ۵۱/ زمستان ۱۴۰۲ (۹۳-۱۰۱)
https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14471.2544

مقاله پژوهشی

مطالعهٔ آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ معین بر مشخصات پرش‌هیدرولیکی

حمیدرضا باقری[۱] و منوچهر حیدرپور[۲*]

چکیده

پرش‌هیدرولیکی 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 به‌جا می‌گذارد؛ به‌گونه‌ای‌که سبب تخریب بستر و دیواره‌های مجرای انتقال جریان در محدودهٔ وقوع پرش می‌شود. به‌منظور کنترل و کاهش اثرات مخرب پرش‌هیدرولیکی، حوضچه‌های آرامش در سازه‌های آبی طراحی و اجرا می‌شوند. در این پژوهش، ۲۷ آزمایش در کانال آزمایشگاهی با استفاده از صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه که به‌منظور 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 به‌صورت گروه صفحات سه‌تایی و با دو آرایش قرارگیری متفاوت نسبت‌به یکدیگر، به‌منظور کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش هیدرولیکی بر بستر حوضچهٔ آرامش قرار داده شدند. فاصلهٔ هریک از گروه صفحات مستغرق در این پژوهش نسبت‌به یکدیگر ۰/۲ و ۰/۳ متر در بازهٔ $4/58 \leq F_{r1} \leq 9/14$ در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد استفاده از صفحات مستغرق در بستر، می‌تواند موجب کاهش طول نسبی و عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی به‌ترتیب تا مقدار ۱۵/۵ و ۴/۹ درصد نسبت‌به پرش کلاسیک شود. همچنین به‌کارگیری 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. مطالعهٔ آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ معین بر مشخصات پرش‌هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۹۳-۱۰۱. https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14471.2544

۱- کارشناسی‌ارشد 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**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

مقدمه

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[1] بوده و در طی آن با تغییر رژیم جریان از حالت فوق‌بحرانی به زیربحرانی در بازهٔ 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 حوضچهٔ آرامش ایجاد می‌شود. در تحلیل این نوع جریان از معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده می‌شود. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینهٔ انواع حوضچه‌های آرامش در کانال‌های مستطیل‌شکل یا سایر اشکال کانال (هاگر، ۱۹۸۵؛ اید و همکاران، ۲۰۰۰) با موضوع پرش هیدرولیکی صورت گرفته است. هدف همهٔ این مطالعات، به‌وجودآوردن حوضچه‌های اقتصادی بوده است. پارامترهایی چون طول حوضچه، عمق پایاب و افت نسبی انرژی ازجمله پارامترهای مهمی هستند که در طراحی اقتصادی حوضچهٔ 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 محدودهٔ پرش هیدرولیکی و کاهش مشخصات آن استفاده شده است. نکتهٔ 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 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 اندازهٔ 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 اولیهٔ پرش هیدرولیکی قرار گرفته و هم تراز با کف کانال است؛ ازاین‌رو روشی برای کاهش طول و عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی به‌شمار می‌آید و مشکلاتی ازجمله کاویتاسیون نیز به حداقل خواهد رسید.

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

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) با بررسی اثر بستر مواج بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در بازهٔ $4 \le F_{r1} \le 10$ و زبری‌های نسبی (t/y_1) ۰/۵، ۰/۴۳ و ۰/۲۵ که در آن‌ها t مقدار ارتفاع موج‌ها و y_1 عمق اولیهٔ جریان است، نشان دادند عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی بر بستر مواج کوچک‌تر از عمق ثانویهٔ پرش بر بستر صاف است. آن‌ها همچنین نشان دادند که طول پرش هیدرولیکی در بستر زبر تقریباً سه برابر عمق ثانویهٔ پرش کلاسیک ($\frac{L_j}{y^*_2}=3$) است. در حالی که در پرش کلاسیک این نسبت شش برابر ($\frac{L_j}{y^*_2}=6$) 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 ذوزنقه‌ای نشان داد با استفاده از زبری ذوزنقه در بستر در محدودهٔ $4 \le F_{r1} \le 10$، طول و عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی به‌ترتیب تا ۵۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، با انجام آزمایش روی زبری‌های سینوسی‌شکل، نشان دادند عمق ثانویهٔ مورد نیاز

1- Rapidly Varied Flow

برای تشکیل پرش هیدرولیکی در محدودهٔ اعداد فرود $3.6 \le F_{r1} \le 8.6$ و برای شش شیب موج مختلف در بازهٔ $0/286 \le t/s \le 0/625$، ۵ تا ۲۶ 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، ۳/۵ است. آن‌ها نتیجه گرفتند که طول پرش بر بستر سینوسی تقریباً نصف طول پرش بر بسترهای کلاسیک است. همچنین رابطهٔ بین عدد فرود اولیه و اعماق مزدوج را به‌صورت زیر به‌دست آوردند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1146 F_{r_1} \quad (۱)$$

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

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.88 F_{r1}, R^2 = 0.94 \quad (۲)$$

$$\frac{L_j}{y^*_2} = 2.1 \quad (۳)$$

سلطانی (۱۳۹۵) به تأثیر صفحات مستغرق با ارتفاع و نحوهٔ 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 به‌ترتیب ۲۵ و ۵۴/۷ درصد نسبت‌به سطح صاف کاهش می‌یابد.

پارسامهر و همکاران (۱۳۹۵)، با انجام آزمایش روی زبری‌های غیرممتد لوزی‌شکل در محدودهٔ اعداد فرود اولیه ۴/۳ تا ۱۲/۴ نشان دادند، افزایش تراکم زبری‌های بستر باعث افزایش استهلاک انرژی و درنتیجه کاهش عمق ثانویه می‌شود. در حالت تراکم ۱۰/۶۷ درصدی بیشترین کاهش عمق ثانویه به مقدار ۲۹/۳۹ به‌وقوع می‌پیوندد.

اسدی و همکاران (۱۳۹۸)، با انجام آزمایش بر ۲۴ بستر زبر مکعبی با آرایش زیگزاگی و ردیفی، با ردیف‌ها و زاویه‌های مختلف در محدودهٔ اعداد فرود ۵/۵ تا ۹ در فلوم آزمایشگاهی نشان دادند عمق و طول نسبی در آرایش زیگزاگی در مقایسه با ردیفی نسبت‌به 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 به‌دست آمد.

پورعبدالله و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر شیب معکوس بستر و پلهٔ مثبت انتهایی در تغییر مشخصات پرش هیدرولیکی ازجمله کاهش طول و عمق ثانویه پرداختند. نتایج نشان داد اثر شیب معکوس بستر از پلهٔ 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 ازجمله طول و نسبت اعماق ثانویهٔ آن کاهش می‌یابد.

با وجود مطالعات انجام‌شده بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف کنترل جریان، تاکنون اثر زاویهٔ حملهٔ صفحات مستغرق در کنترل پرش هیدرولیکی بررسی نشده است؛ ازاین‌رو، مطالعهٔ حاضر به بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حضور صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ معین در دو آرایش قرارگیری متفاوت پرداخته است. اثرات چندین پارامتر، ازجمله طول، اعماق مزدوج و افت نسبی پرش هیدرولیکی مورد بحث قرار گرفته است. علاوه‌براین، با استفاده از داده‌های تجربی و تحلیل ابعادی، معادلاتی برای تخمین ویژگی‌های پرش‌هیدرولیک ارائه شده است.

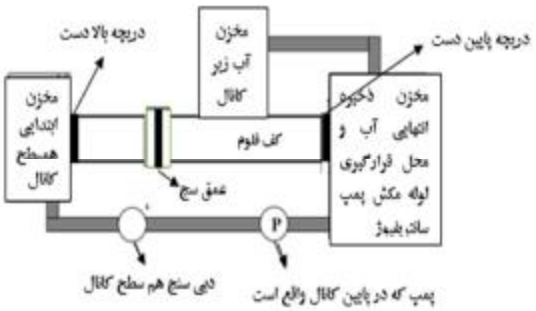
مواد و روش‌ها

مشخصات فلوم آزمایشگاه

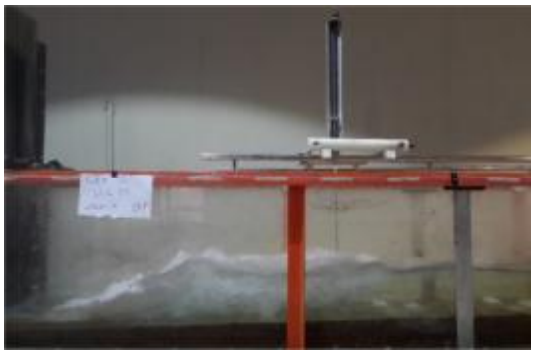
مطالعهٔ حاضر در فلوم مستطیل‌شکل آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان به طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. جنس دیواره‌ها و کف کانال پلاکسی‌گلس شفاف بوده که منجر به سهولت در برداشت داده‌ها شده است. مطابق با شکل ۱ کانال دارای دو دریچهٔ ابتدایی و انتهایی است. میزان آب ورودی به کانال و عبوردادن جریان با عدد فرود اولیه لازم برای انجام آزمایش‌ها به‌وسیلهٔ بالا و پایین شدن دریچهٔ ابتدایی انجام شده است. با استفاده از دریچهٔ پایین‌دست کانال که

به‌صورت مکانیکی و به‌واسطهٔ چرخ‌دنده‌های تعبیه‌شده اطراف آن بالا و پایین می‌رود، می‌توان پرش هیدرولیکی را در محل دلخواه در طول کانال تثبیت کرد.

کانال دارای دو مخزن، یکی انتهایی در انتهای کانال و زیر آن، و دیگری ابتدایی همسطح کانال و در ابتدای آن است. آب از منبعی که در زیر کانال تعبیه شده، توسط پمپ به مخزن ابتدایی پمپاژ و پس از عبور از دریچهٔ ابتدایی، وارد کانال خواهد شد و پس از عبور از دریچهٔ انتهایی مجدداً وارد مخزن و از آنجا به سمت منبع ذخیره هدایت می‌شود. در شکل ۲، محل ایجاد پرش‌هیدرولیکی در کانال مستطیل‌شکل آزمایشگاه هیدرولیک نشان داده شده است.



شکل ۱- پلان فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان



شکل ۲- محل ایجاد پرش هیدرولیکی در کانال مستطیل‌شکل آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان و عمق سنج ریلی نصب‌شده روی آن

ایجاد و تثبیت پرش هیدرولیکی

در ابتدا پمپ روشن و هر دو دریچهٔ ابتدایی و انتهایی کانال بسته نگه داشته شد تا آب در مخزن قبل از دریچهٔ اول بالا بیاید. سپس به‌واسطهٔ میزان باز و بسته کردن دریچهٔ ابتدایی، عدد فرود مورد نظر هر آزمایش ایجاد شد تا پرش هیدرولیکی بعد از آن ایجاد شود. برای کنترل پرش هیدرولیکی و تثبیت آن در محل مورد نظر از دریچهٔ دیگری که در انتهای کانال قرار دارد، استفاده شد که با بالاآوردن آن پرش به سمت پایین‌دست و با پایین‌آوردن آن پرش به سمت بالادست (دریچهٔ ابتدایی کانال) جابه‌جا شد.

وسیلهٔ اندازه‌گیری عمق آب

برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویهٔ پرش هیدرولیکی، از عمق‌سنج ریلی با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شد.

اندازه‌گیری دبی جریان

دبی جریان به کمک دبی‌سنج الکترومغناطیسی که پس از پمپ سانتریفیوژ و هم‌سطح با کانال آزمایشگاهی واقع شده است، اندازه‌گیری شد.

مشخصات صفحات مستغرق

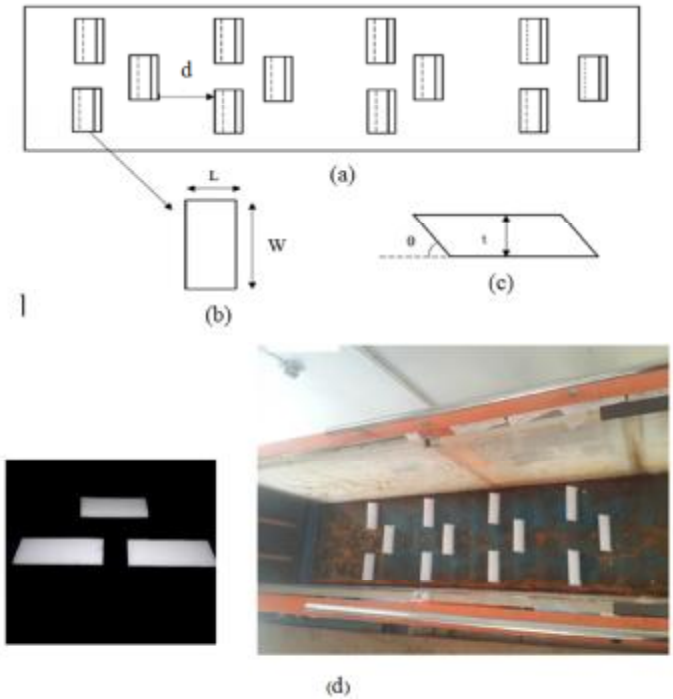
در این مطالعهٔ آزمایشگاهی، از صفحات مستغرق به‌عنوان زبری مصنوعی در بستر کانال آزمایشگاهی استفاده شد. صفحات از جنس تفلون بوده که به‌وسیلهٔ دستگاه واترجت به‌صورت شکل ۳ برش داده شده و گروه صفحات به‌صورت سه‌تایی و با دو شکل آرایی‌شی مختلف به فواصل ۰/۲ و ۰/۳ متر از گروه صفحات متوالی قرار گرفته بودند.

در جدول ۱ مشخصات فیزیکی نمادهای معرفی‌شده در شکل ۳ از صفحات مستغرق ارائه شده است:

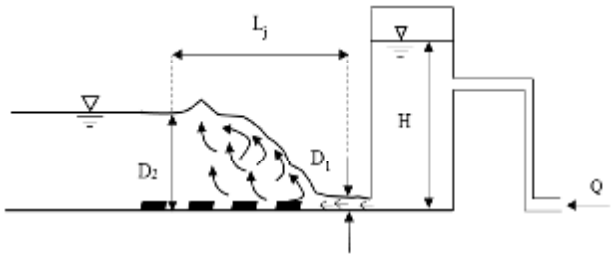
پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از: دبی (Q)، ارتفاع آب پشت دریچه (H)، عمق اولیهٔ پرش هیدرولیکی (D_1)، عمق ثانویهٔ پرش (D_2) و طول پرش‌هیدرولیکی (L_j) که شمای کلی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در شکل ۴ قابل‌مشاهده است. در این مطالعهٔ آزمایشگاهی، مجموعاً ۲۷ آزمایش با دبی‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه انجام شده است.

جدول ۱- مشخصات صفحات مستغرق به‌کاررفته در بستر کانال

W (متر)	L (متر)	θ (درجه)	t (متر)	d (متر)
۰/۱۲	۰/۰۴	۳۰	۰/۰۱	۰/۲ و ۰/۳



شکل ۳- (a)آرایش قرارگیری صفحات مستغرق در حوضچهٔ آرامش، (b) دید از بالا صفحهٔ مستغرق، (c) دید جانبی صفحات و (d) نصب صفحات با زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه در بستر محل تشکیل پرش هیدرولیکی



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

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 ثانویهٔ پرش (D_2)، عمق اولیهٔ پرش (D_1)، شتاب ثقل (g)، عرض کانال (B)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، سرعت اولیهٔ جریان (V_1)، جرم مخصوص آب (ρ)، فاصلهٔ گروه صفحات مستغرق کار گذاشته نسبت‌به هم (d) و همچنین زاویهٔ حملهٔ صفحات مستغرق (θ) که ارتباط این پارامترها را با عمق ثانویهٔ پرش می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$D_2 = f_1(D_1, V_1, B, g, \rho, \mu, d, \theta) \qquad (۴)$$

سپس با استفاده از تئوری π باکینگهام می‌توان به معادلهٔ زیر دست یافت:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_2\left(\mathrm{Re} = \frac{\rho v_1 D_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gD_1}}, \frac{d}{D_1}, \tan\theta\right) \qquad (۵)$$

در این معادله Fr_1 عدد فرود اولیه و Re عدد رینولدز است. با توجه به اینکه در شرایط آزمایشی این پژوهش عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۵۰۰۰ است، درنتیجه 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.

معادلهٔ (۵) به‌صورت معادلهٔ (۶) خلاصه می‌شود:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_3\left(Fr_1, \frac{d}{D_1}, \tan\theta\right) \qquad (۶)$$

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

$$\frac{L_j}{D_1} = f_4(Fr_1, \frac{d}{D_1}, \tan q) \qquad (۷)$$

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

جدول ۲- نمونه‌ای از محاسبات انجام‌شده درجهت محاسبهٔ عدد رینولدز

R(m)	P(m)	A(m^2)	V_1(m/s)	D_1(m)	Re
۰/۰۲۹	۰/۴۶۸	۰/۰۱۳	۲/۹۱۲	۰/۰۳۴	۳۴۱۳۹۴
/۰۳۴	۰/۴۸۲	۰/۰۱۶	۳/۰۲۴	/۰۴۱	۴۱۴۳۶۴
۰/۰۲۱	۰/۴۴۹	۰/۰۰۹	۳/۰۴۰	۰/۰۲۴	۲۶۷۰۶۲

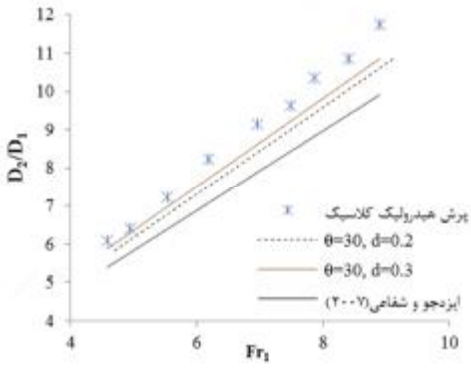
نتایج و بحث

بررسی اعماق مزدوج پرش‌هیدرولیکی

در شکل ۵ نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در حالت حوضچه دارای صفحات مستغرق در مقایسه با حوضچهٔ صاف ارائه شده است. برای مقایسهٔ نتایج این تحقیق با کارهای محققان پیشین، نتایج تحقیق ایزدجو و شفاعی (۲۰۰۷) که بر بستر موجدار ذوزنقه‌ای انجام شده نیز در این شکل نمایش داده شده است. همان‌طور که از روند نتایج در شکل مشخص است، به‌کارگیری صفحات مستغرق در بستر فلوم 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 F_{r1}=۹، θ=۳۰ و d=۰/۲ متر مقدار کاهش عمق مزدوج پرش هیدرولیکی ۸/۸ درصد است. این کاهش به‌دلیل ایجاد مانع در مسیر جریان بوده که باعث حبس‌شدن حباب‌های هوا در زائده‌ها شده و درنتیجه در رابطهٔ مومنتم به‌عنوان یک نیروی مقاوم در برابر حرکت جریان باعث افت مومنتم خروجی جریان و درنتیجه افت انرژی می‌شود. همچنین با نزدیک‌شدن گروه صفحات مستغرق به یکدیگر، نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش بیشتری یافته است. درواقع نزدیک‌ترشدن صفحات مستغرق در ابتدای مسیر جریان، تأثیر بیشتری در پراکندگی جریان فوق‌بحرانی و کاهش اعماق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی داشته است. با افزایش عدد فرود اولیهٔ 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 اولیهٔ جریان به‌صورت معادلهٔ (۸) ارائه شده است. همچنین با توجه به معادلهٔ (۶)، ارتباط بین عوامل مؤثر بر عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی در این آزمایش به‌صورت معادلهٔ (۹) با NRMSE= ۳/۱ درصد ارائه شده است.

$$\frac{D_2}{D_1} = 1.15F_{r1} + 0.59, R^2 = 0.99 \qquad (۸)$$

$$\frac{D_2}{D_1} = 1.08\,Fr_1 - 0.04\frac{d}{D_1} - 0.17\tan q + 1.55 \qquad (۹)$$



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

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

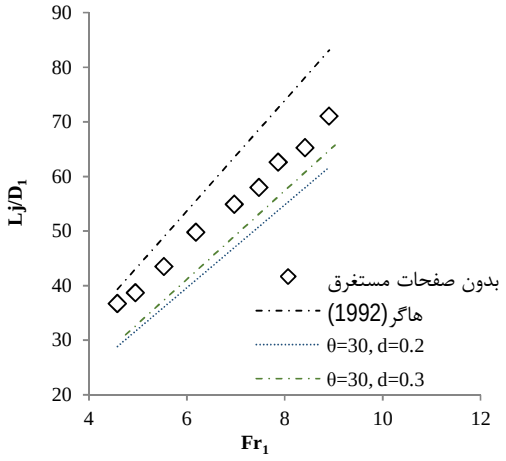
$$Y = \frac{D_2^* - D_2}{D_2^*} \qquad (۱۰)$$

در این معادله D_2^* عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی

کلاسیک و D_2 عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی در مطالعهٔ حاضر است. از مجموع ۲۷ آزمایش صورت‌گرفته، مقدار کاهش نسبت اعماق مزدوج در حالت به‌کارگیری صفحات مستغرق در مقایسه با حالت کلاسیک به‌ترتیب برای فواصل صفحات مستغرق ۰/۲ و ۰/۳ متر برابر با ۴/۹ و ۲/۸ درصد است. با توجه به‌اینکه صفحات مستغرق تنها قسمتی از سطح بستر کانال آزمایشگاهی را می‌پوشانند، درصدهای بالا قابل‌توجه هستند.

بررسی طول پرش هیدرولیکی

برای بررسی و مقایسهٔ طول پرش هیدرولیکی، طول پرش با عمق اولیه به‌صورت L_j/D_1 بی‌بُعد 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 حوضچهٔ صاف ارائه شده است. برای مقایسهٔ 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 حملهٔ ۳۰ درجه صفحات مستغرق، برای فواصل گروه صفحات مستغرق ۰/۲ و ۰/۳ متر به‌ترتیب 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 زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه

رابطهٔ خطی نسبت بی‌بُعد پرش هیدرولیکی همراه با صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه در مقابل عدد فرود اولیهٔ جریان برای d=۰/۲ و d=۰/۳ به‌ترتیب به‌صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) است:

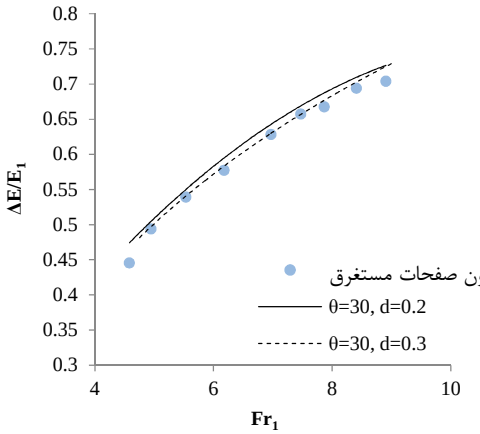
$$L_j / D_1 = 7.59F_{r1} - 5.93, R_2 = 0.98 \qquad (11)$$

$$L_j / D_1 = 8.121F_{r1} - 7.59, R_2 = 0.98 \qquad (12)$$

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 نشان‌دهندهٔ مقادیر افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی در حضور صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه با دو آرایش متفاوت است. در این شکل افت نسبی انرژی برای همهٔ 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. به‌طورکلی میانگین تغییرات افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی همراه با صفحات مستغرق بستر برای دو آرایش ۰/۲ و ۰/۳ متری به‌ترتیب 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 زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه

نتیجه‌گیری

این تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر صفحات مستغرق بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداخته‌است. براین‌اساس ۱۲ صفحهٔ مستغرق با زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه به‌صورت ۴ گروه سه‌تایی که در فواصل d=۰/۲ و d=۰/۳ کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تعداد ۲۷ آزمایش در بازهٔ $4/58 \leq F_{r1} \leq 9/14$ انجام شد. در طول آزمایش‌ها مشاهده شد که وقتی جریان با صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ 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 آزادشدن انرژی آب همراه است، منجر به کاهش طول و عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی نسبت‌به 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 زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه، نسبت‌به حالت کلاسیک کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود اولیه (Fr_1) و همچنین نزدیک‌شدن گروه صفحات مستغرق به یکدیگر (کم‌شدن d) این نسبت کاهش بیشتری یافته است. به‌طور میانگین کاهش عمق ثانویه برای دو آرایش متفاوت ۰/۲ و ۰/۳ متر به‌ترتیب برابر با ۴/۹ و ۲/۸ درصد است و بیشترین کاهش در Fr_1=۹، θ=۳۰ و d=۰/۲ اتفاق می‌افتد که برابر با ۸/۸ درصد است.

۲- طول پرش هیدرولیکی نسبی با وجود صفحات مستغرق در بستر، در مقایسه با حالت کلاسیک کاهش یافته است. به‌طور میانگین برای دو آرایش متفاوت d=۰/۳ و d=۰/۲ این کاهش به‌ترتیب برابر با ۱۴/۴ و ۱۵/۵ درصد است. افزایش عدد فرود اولیه منجر به کاهش بیشتر طول نسبی پرش هیدرولیکی تا ۲۳ درصد در آزمایش Fr_1=۷، θ =۳۰ و d=۰/۲ می‌شود.

۳- افت نسبی پرش هیدرولیکی با وجود صفحات مستغرق با زاویهٔ حملهٔ 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 به‌طور میانگین برابر با ۳/۳ درصد است.

در پایان، مطالعهٔ حاضر و روابط ارائه‌شدهٔ آن که حاصل ۲۷ آزمایش تجربی برای استفاده از پرهٔ 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 ازجمله ۴۵ و ۶۰ درجه و همچنین نصب تعداد صفحات بیشتر بر بستر و آرایش‌های متنوع دیگر از گروه صفحات.

منابع

۱. اسدی ف، فضل‌اولی ر، و عمادی ع، ۱۳۹۸، بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر جریان بر مشخصات پرش هیدرولیکی، مجلهٔ پژوهش آب ایران، ۱۳(۴): ۳۹-۴۹.

۲. باقری ح، و حیدرپور م، ۱۳۹۸، بررسی اثر صفحات مستغرق بر اعماق مزدوج و طول پرش‌هیدرولیکی، یازدهمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، شیراز.

۳. پارسامهر پ، فرسادی‌زاده د، حسین‌زاده‌دلیر ع، عباسپور ا، و نصر اصفهانی م.ج، ۱۳۹۵، بررسی مشخصات پرش‌هیدرولیکی بر بستر زبر با تراکم و آرایش‌های مختلف زبری، مجلهٔ دانش آب و خاک، ۲۶(۱): ۱۳-۲۴.

۴. سلطانی ح، و قربانی ب، ۱۳۹۵، بررسی تأثیر ابعاد صفحات مستغرق بر تغییر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران.

5. 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.
6. Beirami M. K. and Chamani M. R. 2006. Hydraulic jump in sloping channels: Sequent Depth Ratio. J. Hydraul. Eng. 132: 1061-1068.
7. 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.
8. Belanger J. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilan-Goeury. Paris.
9. 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.
10. 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. 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. Farsadizadeh 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.