

مقاله پژوهشی

بررسی نیروی برشی، لایه مرزی و پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر

بشیر فلاحی^{۱*} و منوچهر حیدرپور^۲

چکیده

پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در فاصله کوتاهی، جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌کند. در سال‌های اخیر مشخص شده است ایجاد واگرایی، حضور زبری یا ایجاد شیب در کف حوضچه آرامش، در کاهش ابعاد پرش، مؤثر و از نظر اقتصادی نیز به صرفه است. در این پژوهش، تأثیر واگرایی ناگهانی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حضور زبری سنگ‌ریزه‌ای در کانال مستطیلی به طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر بررسی شد. یب. نسبت واگرایی در این مطالعه در محدوده $1 \leq B \leq 2$ و زبری نسبی در محدوده $0 \leq k_s/d_1 \leq 0.9$ بود. اعداد فرود در محدوده ۴/۹ تا ۹/۵ و دبی ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/b) در حالت بستر واگرا و زبر، ۰/۵۱ محاسبه شد که در مقایسه با مقدار ۰/۱۶ برای بستر صاف، قابل ملاحظه بود. در صورتی که از هر دو متغیر زبری و واگرایی ناگهانی استفاده شود، مقدار ضریب نیروی برشی در بهترین حالت (در نسبت واگرایی ۲ و اندازه زبری ۲/۲ سانتی‌متر) به‌طور میانگین، ۱۴/۷ برابر ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک است. نوسانات آب و تغییرات فشار توسط پیزومترهای نصب‌شده کف حوضچه آرامش اندازه‌گیری شد. یب. نتایج، نبود کاویتاسیون در این آزمایش‌ها را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، پروفیل سرعت، ضخامت لایه مرزی، کاویتاسیون، واگرایی ناگهانی.

ارجاع: فلاحی ب. و حیدرپور م. ۱۴۰۰. بررسی نیروی برشی، لایه مرزی و پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵: ۴۱-۹.

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

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

* نویسنده مسئول: fallahi.bashir73@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

مقدمه

پرش هیدرولیکی، پدیده‌ای است که در اثر تغییر جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی رخ می‌دهد. در ساختمان‌های مستهلک‌کننده انرژی آب یا همان حوضچه‌های آرامش، معمولاً از روش‌هایی برای کنترل پرش در حوضچه‌ها استفاده می‌شود که به کاربرد آنها در تثبیت، کنترل، کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌توان اشاره کرد. در یک حوضچه آرامش، متغیرهای اصلی مختلف به صورت هندسه کف (شامل پله‌های ابتدایی و انتهایی و ...)، هندسه پلان (شامل واگرایی تدریجی و یا ناگهانی)، ناهمواری‌های دیوار (برای افزایش نیروی برشی) و تغییر در بده جریان (با افزودن موضعی آن و یا به صورت استخراج آب) است (نصر اصفهانی و شفاعی بجستان، ۱۳۹۲). روشی مناسب برای کنترل پرش هیدرولیکی، ایجاد زبری در مسیر جریان است. زبری، علاوه بر اینکه پرش را در موقعیت مد نظر تثبیت می‌کند، باعث کاهش طول پرش نیز می‌شود. همچنین، اگر به هر علتی تأمین عمق لازم برای وقوع پرش هیدرولیکی کلاسیک میسر نباشد یا هزینه‌های حفاری برای پایین آوردن کف حوضچه مقرون به صرفه نباشد، یکی از راه‌های اطمینان از تشکیل پرش در حوضچه، استفاده از واگرایی مقطع است (برمن و هاگر، ۱۹۹۳). مشکل اصلی حوضچه‌های واگرا تمایل به جریان نامتقارن است که به بزرگی منطقه آب ساکن و گستردگی کم جت ورودی بستگی دارد.

تاکنون، مطالعات گسترده‌ای درباره پرش هیدرولیکی در بستر زبر یا بستر موج‌دار انجام شده است که از جمله آنها به مطالعات راجاراتنام (۱۹۶۸)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، کارولو و همکاران (۲۰۰۷)، پاگلیارا و پالمو (۲۰۱۵)، ایزدجو (۱۳۸۳)، نیسی و شفاعی بجستان (۱۳۸۸)، پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۸)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۰)، نصر اصفهانی و شفاعی بجستان (۱۳۹۲)، نیسی و همکاران (۱۳۹۳)، پورعبدالله و همکاران (۱۳۹۴) و بنی‌طبا (۱۳۹۷) می‌توان اشاره کرد. نتایج این مطالعات نشان داده است زبری بستر باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. همچنین، زبری بستر باعث افزایش ضخامت لایه مرزی و تنش برشی می‌شود.

پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرا را هربرند و کنوز (۱۹۷۳)، هاگر (۱۹۸۵)، ناشتا و گاردی (۱۹۸۸)، برمن و هاگر (۱۹۹۳)، ویو و راجاراتنام (۱۹۹۵)، الحمید (۲۰۰۴)، امید و همکاران (۲۰۰۷)، کردی و آبوستن (۲۰۱۱)، گاندهی (۲۰۱۴)، ترکمن‌زاد و همکاران (۲۰۱۹) و کریمی و همکاران (۱۳۹۳)، بررسی کرده‌اند.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، با مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار برای اعداد فرود ۴ تا ۱۰ و ۳ مقدار نسبت اندازه زبری به عمق اولیه (k_s/d_1) برابر با ۰/۵، ۰/۴۳ و ۰/۲۵ به این نتیجه رسیدند که پروفیل‌های سرعت در بخش‌های مختلف پرش با یکدیگر تفاوت دارد. ضخامت لایه مرزی نرمال $-\delta/b$ که در آن، b مقیاس طول پروفیل سرعت است - برای پرش روی بستر موج‌دار برابر ۰/۴۵ و برای جت دیوار ساده برابر ۰/۱۶ بود. تنش برشی یکپارچه روی بستر موج‌دار، حدود ده برابر یک بستر صاف است.

نصر اصفهانی و شفاعی بجستان (۱۳۹۲)، ۱۲۴ آزمایش در کانال با زبری‌های شش‌ضلعی همراه با پله ناگهانی در ابتدای کانال و محدوده عدد فرود ۲/۹۸ تا ۱۱/۸۱ انجام دادند. آنها با نصب پیژومترهایی در محل پرش هیدرولیکی به این نتیجه رسیدند که پیژومترهای قرارگرفته در معرض برخورد مستقیم با جت آب، کمترین فشار و حتی فشارهای منفی را داشت. آنها وقوع کاویتاسیون را برای بحرانی‌ترین پیژومترها محاسبه کردند و نتیجه گرفتند در بحرانی‌ترین نقطه، ضریب کاویتاسیون از ۲/۷۸ کمتر نمی‌شود؛ بنابراین، از نظر هیدرولیکی، سازه با مشکل کاویتاسیون مواجه نیست.

پورعبدالله و همکاران (۱۳۹۴)، اثر زبری و شیب معکوس بستر را بر پروفیل سرعت و سطح آب پرش هیدرولیکی در اعداد فرود اولیه، ۴/۹ تا ۷/۸ و بر ۳ نوع بستر زبر و شیب‌های صفر و معکوس، ۰/۶ درصد، ۱/۳ درصد و ۲ درصد بررسی کردند. نتایج، نشان‌دهنده تشابه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری‌شده و تفاوت آنها با پروفیل جت آب روی بستر صاف بود. همچنین، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد، برابر ۰/۶۶ محاسبه شد که در مقایسه با بستر صاف، که برابر با ۰/۱۶ بود، قابل ملاحظه بود. ضمن آنکه تنش برشی در بستر زبر، همواره با شیب منفی کف، حداقل ۱۰ برابر تنش برشی بر روی بستر صاف به دست آمده است.

بر پروفیل سرعت و امکان وقوع کاویتاسیون در مقطع ثابت بررسی شده است، در این پژوهش، تأثیر واگرایی سطح مقطع جریان در حضور بستر زبر بر پروفیل سرعت و امکان وقوع کاویتاسیون بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

کانال آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. کانال استفاده‌شده در این پژوهش، کانالی مستطیلی به طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر است. دیواره‌ها و کف این کانال از جنس ورق پلاکسی گلاس شفاف است. این کانال با یک پمپ با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌شود (شکل ۱). برای افزایش عدد فرود اولیه قبل از دریچه کشویی بالادست، ارتفاع مخزن به ۱/۲۵ متر افزایش داده شد و برای ایجاد واگرایی، جعبه‌هایی از جنس پلاکسی گلاس در دو طرف مقطع به دیواره‌های کانال چسبانده شد و نسبت واگرایی‌های ۱/۳۳، ۱/۶۶ و ۲ ایجاد شد. در این پژوهش، دو اندازه مختلف زبری به کار رفت که متوسط اندازه دانه‌ها ۱/۳۳ و ۲/۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۲). برای ایجاد پرش، دریچه کشویی، که در ورودی فلوم تعبیه شده است، و برای تثبیت پرش، دریچه دیگری در انتهای فلوم به کار رفت. در آزمایش‌های مربوط به واگرایی ناگهانی، دریچه پایین دست به گونه‌ای تنظیم شد که شروع پرش در محل تغییر عرض کانال رخ دهد. در این پژوهش، ۳ دبی در محدوده ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه و در هر دبی، ۳ بازشدگی از دریچه اول، ۹ عدد فرود مختلف در محدوده ۴/۵ تا ۹/۵ ایجاد می‌کند.

برای اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج الکترونیکی استفاده شد که در مسیر جریان پس از پمپ و پیش از کانال قرار داشت. در پرش هیدرولیکی، به‌طور عمومی به عمق اولیه و ثانویه و دو طول پرش و غلتاب توجه می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه، عمق‌سنج ریلی به کار رفت. قطر میله عمق‌سنج، ۳/۵ میلی‌متر و دقت اندازه‌گیری آن، ۱ میلی‌متر است. در طول آزمایش، سرعت نقطه‌ای با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری شد (شکل ۳-ب). به این صورت که پس از تثبیت پرش، در چند مقطع از طول پرش، سرعت جریان اندازه‌گیری و در هر مقطع برای رسم پروفیل سرعت در عمق جریان، از کف

پورعبدالله و همکاران (۱۳۹۹)، اثر شیب منفی، زبری بستر و پله انتهایی را بررسی کردند. آنها، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در بستر زبر با شیب کف منفی همراه با پله مثبت انتهایی را ۴/۴۴ برابر بستر صاف به دست آوردند. همچنین، مقادیر ضریب نیروی برشی (ε) در این پژوهش به‌طور متوسط، ۱۲/۴ برابر حالت کالسیک بود.

در پژوهش پارسامهر و همکاران (۱۳۹۲)، پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل روی شیب معکوس ۱/۵ درصد، ضریب تنش برشی به‌طور متوسط، ۱۶ برابر بستر صاف و افقی به دست آمد.

صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه‌های پرش را روی شش نوع بستر موج‌دار مثلثی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که نیروی برشی روی بستر موج‌دار مثلثی، حدود ۸/۵ برابر بستر صاف است.

غزالی و همکاران (۱۳۹۱)، مطالعاتی را روی پنج نوع بستر موج‌دار مثلثی انجام دادند. آنها مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد روی بستر موج‌دار را برابر ۰/۳۹ به دست آوردند؛ در حالی که این مقدار در بستر صاف، ۰/۱۶ است.

عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، با اندازه‌گیری پروفیل سرعت در ۲۰ آزمایش بر بستر موج‌دار به این نتیجه رسیدند که در این پروفیل‌ها، تغییرات سرعت به‌صورت جت دیواره است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصله از ابتدای پرش، ضخامت لایه مرزی رشد می‌کند و سرعت بیشینه کاهش می‌یابد.

خاتسوریا (۲۰۰۵)، نشان داد فشار در کف حوضچه آرامش در بعضی اعداد فرود، مقادیر منفی دارد. این مقادیر، نشان‌دهنده احتمال وقوع کاویتاسیون در حوضچه آرامش است. وی همچنین بیان کرد هنگامی که سرعت جریان در قسمتی از یک سازه هیدرولیکی از حد ۲۰ متر در ثانیه تجاوز کند، سازه در معرض خسارت ناشی از کاویتاسیون قرار می‌گیرد.

همانگونه که از بررسی منابع مشخص است، تاکنون مطالعات متعددی درباره پرش هیدرولیکی روی بستر زبر حوضچه‌های آرامش و بررسی پروفیل سرعت و نوسانات فشار و احتمال وقوع کاویتاسیون انجام شده است. در تمام این مطالعات، عرض مقطع جریان در طول تشکیل پرش هیدرولیکی ثابت است. واگرایی مقطع، یکی از راه‌های حصول تشکیل پرش در حوضچه آرامش است. در حالی که در مطالعات پیشین، تأثیر زبری کف حوضچه آرامش

اصفهان از سطح دریا برابر $9/3$ متر ستون آب در نظر گرفته می‌شود، مقدار P_0/γ مقدار هد فشار بخار مایع است که در دمای حدود 25 درجه سانتی‌گراد معادل 0.33 متر ارتفاع آب است. در محاسبات برای در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب، این مقدار معادل یک متر ارتفاع آب در نظر گرفته شد، P_0/γ مقدار هد فشار (فشار نظیر ارتفاع آب) که روی سازه در قسمت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است و $v_0^2/2g$ ارتفاع نظیر سرعت (برحسب متر) در مقطع مدنظر است؛ بنابراین، σ نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب است. خوردگی هنگامی آغاز می‌شود که σ برابر و یا کوچک‌تر از ضریب بحرانی کاویتاسیون σ_{cr} شود. اگر این ضریب، کوچک‌تر از یک باشد ($\sigma_{cr} < 1$)، بروز کاویتاسیون دور از انتظار نخواهد بود (فالوی، ۱۹۹۰).

ضریب نیروی برشی

افزایش تنش برشی بستر، یکی از موارد اصلی کاهش عمق پایاب و طول پرش و افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی بر بستر زبر است (ایزدجو و شفافی بجستان، ۲۰۰۷). تنش برشی بستر در پرش هیدرولیکی با استفاده از معادله مومنتم به دست آمده است. معادله مومنتم در مقاطع پیش و پس از پرش به صورت ذیل نوشته می‌شود:

$$F_T = \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (2)$$

که در آن، P_1, P_2 فشار در مقاطع ۱ و ۲ و M_1, M_2 مقدار اندازه حرکت در دو مقطع اولیه و ثانویه است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). F_T نیروی برشی متوسط وارد بر بستر پرش و برابر با مجموع نیروهای برشی بستر است. مقدار نیروی برشی در کانال واگرایی ناگهانی در بستر زبر به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$F_T = \frac{1}{2} \gamma b_1 d_1^2 - \frac{1}{2} \gamma b_2 d_2^2 + \frac{\gamma}{g} Q (V_1 - V_2) \quad (3)$$

در معادله مذکور، d_1 و d_2 به ترتیب، عمق اولیه و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، b_1 و b_2 به ترتیب، عرض در مقطع اول و مقطع دوم کانال، γ وزن مخصوص آب، g شتاب گرانش، Q دبی جریان و V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۲ است. با جایگذاری معادلات مذکور در معادله (۳)، مقدار نیروی برشی از معادله ذیل به دست می‌آید:

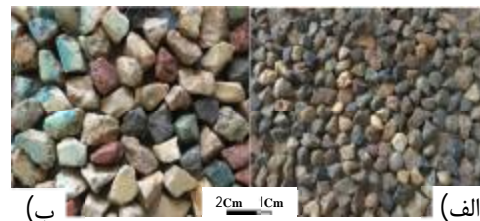
$$F_T = \frac{1}{2} \gamma b_1 d_1^2 \left(1 - B \cdot D^2 + 2Fr_1^2 \left(1 - \frac{1}{B \cdot D} \right) \right) \quad (4)$$

که در آن، B : نسبت واگرایی $\left(\frac{b_2}{b_1} \right)$ و D : نسبت اعماق مزدوج $\left(\frac{d_2}{d_1} \right)$ است. ویو و راجاراتنام (۱۹۹۵)، ضریب نیروی

کانال تا سطح آب با میانگین‌گیری از سه مقطع در عرض کانال ترسیم شد. در طول کانال و در محل وقوع پرش هیدرولیکی، کف کاذبی و در طول آن، ۲۵ پیژومتر نصب شد. ۲۰ پیژومتر به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر در ۲ متر اول کانال و به دنبال آن، ۵ پیژومتر به فاصله ۲۰ سانتی‌متر قرار گرفت (شکل ۳- الف). با استفاده از این پیژومترها، پدیده کاویتاسیون در طول پرش بررسی شد.



شکل ۱- فلوم استفاده شده در پژوهش الف) پروفیل ب) پلان



شکل ۲- زبری‌های سنگ‌ریزه‌ای دانه‌بندی شده
الف) $17/2 \text{ mm} \leq k_s \leq 11 \text{ mm}$ ب) $16/6 \leq k_s \leq 26/7 \text{ mm}$



شکل ۳- وسایل اندازه‌گیری الف) فشار و ب) سرعت

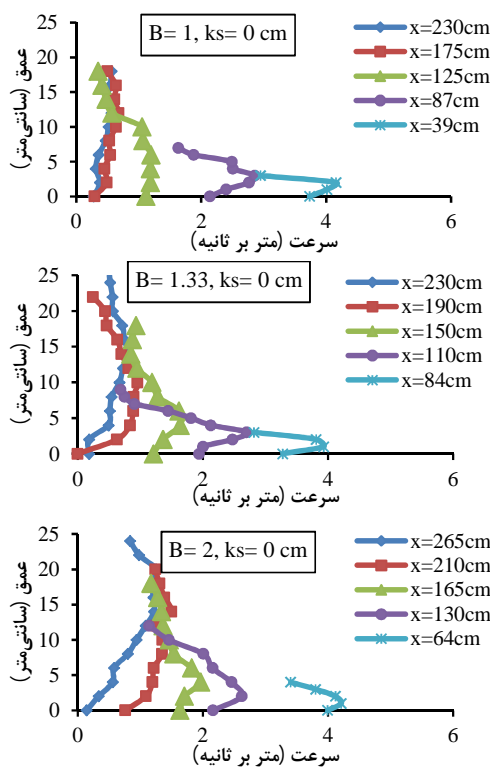
معیار وقوع کاویتاسیون

برای دستیابی به معیاری کمی برای وقوع یا عدم وقوع کاویتاسیون از ضریب کاویتاسیون استفاده شد (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲):

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} = \frac{P_{atm} - P_v + P_0}{\gamma \frac{v_0^2}{2g}} \quad (1)$$

در این معادله، σ : ضریب کاویتاسیون، P_{atm}/γ : فشار محیط اطراف، که در شرایط آزمایشگاه، معادل یک اتمسفر یا $10/33$ متر ستون آب در سطح آب‌های آزاد است؛ در حالی که این مقدار به علت ارتفاع 1580 متری استان

عمقی است که در آن، سرعت جریان نصف سرعت بیشینه، به عبارت دیگر $(u = 0.5u_m)$ و $\partial u/\partial y < 0$ است (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲). شکل ۴، پروفیل‌های بی‌بعد سرعت را برای تمامی داده‌های واگرایی و زبری در آزمایش‌هایی نشان می‌دهد که در آن، پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده است. این شکل، به‌وضوح نشان می‌دهد پروفیل‌های سرعت در جریان رو به جلو تا حدودی مشابه، اما با مشخصات جت دیواری کلاسیک متفاوت است. سرعت حداکثر در کانال واگرایی ناگهانی همراه با زبری بستر نسبت به نازل دیواری کلاسیک در نقطه بالاتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۴- پروفیل‌های سرعت در طول پرش هیدرولیکی

ضخامت لایه مرزی (δ) در هر مقطع از پرش هیدرولیکی، برابر عمقی است که در آن، سرعت حداکثر است. شکل ۶، ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/b) را در کانال واگرایی ناگهانی همراه با زبری بستر نشان می‌دهد. براساس این شکل، مقدار ضخامت لایه مرزی در پژوهش حاضر، برابر با ۰/۵۱ است؛ در حالی که اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) در پژوهش خود درباره بستر با زبری مصنوعی، این مقدار را برابر ۰/۴۵ به دست آوردند. راجاراتنام (۱۹۶۸)، ضخامت

برشی را به‌صورت ذیل ارائه کردند (ویو و راجاراتنام، ۱۹۹۵):

$$\varepsilon = \frac{F_\tau}{M_1} = \frac{F_\tau}{\gamma d_1^2/2} \quad (5)$$

در نهایت، با جایگذاری معادله (۴) در (۵)، ضریب نیروی برشی به‌صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = 1 - BD^2 + 2Fr_1^2 \left(1 - \frac{1}{B.D}\right) \quad (6)$$

تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی انجام‌شده برای یافتن متغیرهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی همراه با بستر زبر، تابعی از متغیرهای ذیل است:

$$f_1(\varepsilon, g, d_1, d_2, b_1, b_2, V_1, \rho, \mu, k_s) = 0 \quad (7)$$

در این معادله، ρ جرم حجمی سیال، μ گرانیوی دینامیکی سیال، d_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، d_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، g شتاب ثقل، ε ضریب نیروی برشی بستر، V_1 سرعت جریان در مقطع تنگ، k_s اندازه زبری، b_1 مقطع تنگ ابتدایی و b_2 مقطع بزرگ‌تر بعد از پرش هیدرولیکی است. با استفاده از نظریه باکینگهام (π) و استفاده از V_1, d_1, ρ به‌عنوان متغیرهای تکرارشونده، معادلات ذیل را می‌توان استخراج کرد (بارنبلات، ۱۹۸۷):

$$f_1\left(\frac{d_2}{d_1}, \frac{V_1^2}{d_1 g}, \frac{V_1 d_1}{\rho}, \frac{k_s}{d_1}, \frac{b_2}{b_1}, \varepsilon\right) = 0 \quad (8)$$

$V_1 d_1/\rho$ عدد رینولدز در مقطع اولیه است. مقادیر عدد رینولدز در محدوده ۷۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰ بود؛ بنابراین، از اثر آن می‌توان صرف‌نظر کرد (هاگر و برمن، ۱۹۸۹ و راجاراتنام، ۱۹۶۸):

$$\varepsilon = \left(\frac{d_2}{d_1}, \frac{V_1^2}{d_1 g}, \frac{k_s}{d_1}, \frac{b_2}{b_1}\right) \quad (9)$$

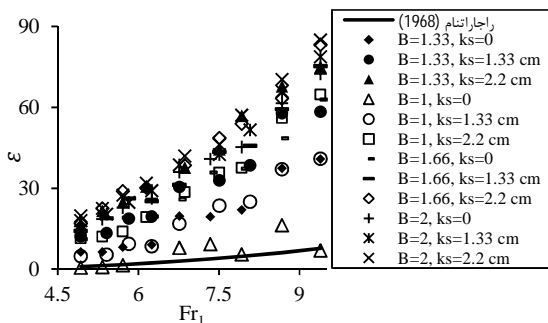
نتایج و بحث

پروفیل سرعت

شکل ۴ پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی با بستر زبر را در چهار آزمایش نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله از دریچه (x) از میزان حداکثر سرعت در پروفیل‌های سرعت کاسته می‌شود که این موضوع نشان می‌دهد میزان سرعت در طول پرش کم می‌شود و لایه مرزی با افزایش فاصله از ابتدای پرش رشد می‌کند.

برای بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت، از متغیرهای بی‌بعد u/u_m و y/b استفاده شد که y برابر عمق آب از بستر زبر، u سرعت جریان، u_m سرعت بیشینه و مقیاس طولی b .

آورده شده است. مطابق این شکل، بیشترین مقدار ضریب نیروی برشی در کانال واگرایی ناگهانی با نسبت واگرایی، ۲ است که به طور میانگین، ۱۲/۱۵ برابر ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک بود. همچنین، بیشترین مقدار ضریب نیروی برشی در کانال با بستر زبر بوده که به طور میانگین، ۹/۲۳ برابر ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک است. در صورتی که هر دو متغیر زبری و واگرایی ناگهانی استفاده شود، مقدار ضریب نیروی برشی در بهترین حالت (در نسبت واگرایی ۲ و اندازه زبری ۲/۲ سانتی متر) به طور میانگین، ۱۴/۷ برابر ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک است.



شکل ۸- تغییرات ضریب نیروی برشی ϵ در بستر زبر و نسبت واگرایی‌های مختلف

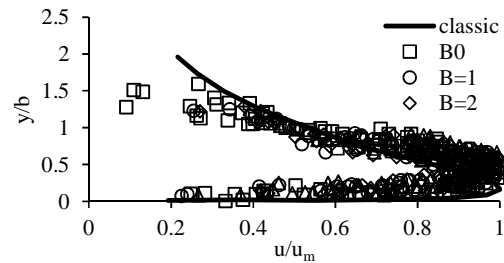
مقدار ضریب نیروی برشی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها و معادله (۶) به دست می‌آید و نشان می‌دهد مقدار ضریب نیروی برشی در پرش هیدرولیکی بر بستر زبر در کانال واگرایی ناگهانی، بیشتر از ضریب نیروی برشی در کانال منشوری با بسترهای صاف است.

معادله (۱۰)، ضریب نیروی برشی برای بستر صاف را، که Rajaratnam (۱۹۶۸) ارائه کرده است، و معادله (۱۱) ضریب نیروی برشی برای پرش هیدرولیکی بر بستر زبر در کانال واگرایی ناگهانی را در پژوهش حاضر نشان می‌دهد. همانگونه که تحلیل ابعادی انجام شده در معادله (۹) نشان می‌دهد، ضریب نیروی برشی در پژوهشی حاضر علاوه بر عدد فرود به نسبت واگرایی، زبری نسبی و نسبت اعماق مزدوج نیز بستگی دارد.

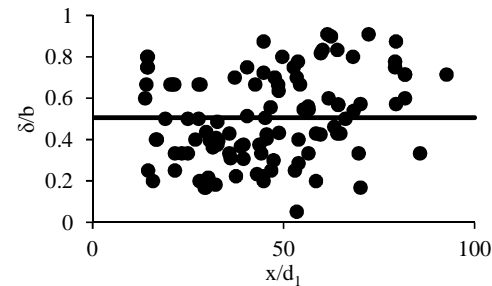
$$\epsilon^* = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1, \quad R^2 = 1 \quad (10)$$

$$\epsilon = 21.46Fr_1 - 16.6B - 12.3D + 0.00076 \frac{k_s}{d_1} - 16.9, \quad R^2 = 0.98 \quad (11)$$

لایه مرزی بی‌بعد در بستر صاف را ۰/۱۶ گزارش کرد.

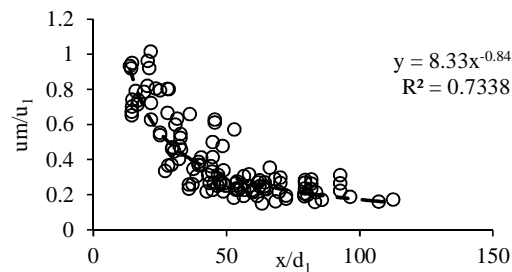


شکل ۵- منحنی تجمعی پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت در نسبت واگرایی‌های مختلف



شکل ۶- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b به ازای x/d_1

با توجه به اینکه پروفیل‌های سرعت در جریان رو به جلو مشابه است، تغییرات مقیاس سرعت u_m با فاصله طولی x باید بررسی شود. سرعت در جریان فوق بحرانی، درست قبل از پرش، u_1 و از ۴/۰۲ تا ۵/۶۸ متر در ثانیه، متغیر و حداکثر سرعت در محدوده ۰/۶۴ تا ۴/۳ متر بر ثانیه است. تغییرات u_m/u_1 در برابر x/d_1 در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار u_m/u_1 با تغییر فاصله طولی به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.



شکل ۷- تغییرات u_m/u_1 در مقابل x/d_1 در پرش در کانال واگرایی ناگهانی با بستر زبر

ضریب نیروی برشی

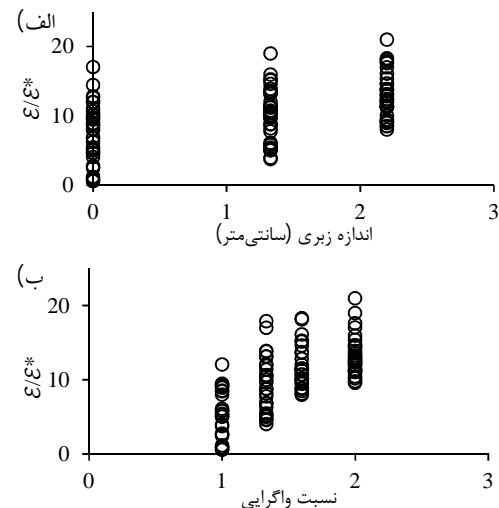
با توجه به معادله (۶)، مقدار ضریب نیروی برشی برای هر نسبت واگرایی با زبری‌های متفاوت در نمودارهای شکل ۸

بررسی پدیده کاویتاسیون

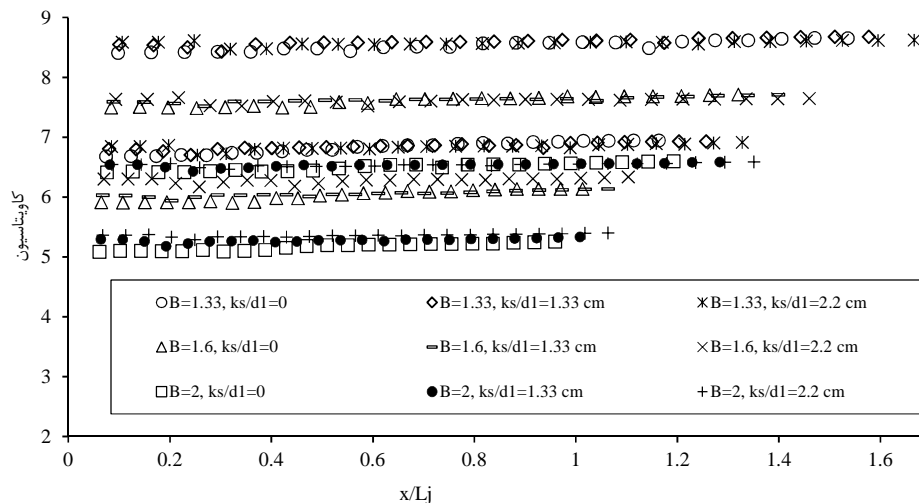
همانگونه که اشاره شد، در بعضی از اعداد فرود، فشار، مقادیر منفی را نیز در برمی گیرد. این مقادیر، نشان دهنده احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در این قسمت از حوضچه آرامش است؛ از این رو، باید وقوع پدیده کاویتاسیون در این منطقه بررسی شود.

با استفاده از مقادیر فشار و سرعت مورد آزمایش به ازای دبی های مختلف، مقادیر ضریب کاویتاسیون برای پیرومترهای نصب شده در محور مرکزی محاسبه شد. منحنی تغییرات ضریب کاویتاسیون در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش نسبت واگرایی و اندازه زبری ها، مقدار ضریب کاویتاسیون کاهش می یابد؛ در حالی که با اعمال هم زمان واگرایی و زبری در کانال، تغییر زیادی در مقدار ضریب کاویتاسیون ایجاد نمی شود. در بحرانی ترین حالت، ضریب کاویتاسیون در سازه از ۵/۰۸ پایین تر نیامده است؛ بنابراین، گفتنی است از نظر هیدرولیکی، سازه با مشکل کاویتاسیون مواجه نیست.

شکل ۹ نسبت ضریب نیروی برشی در پرش هیدرولیکی بر بستر زبر به ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک ($\varepsilon/\varepsilon^*$) را در برابر اندازه زبری و نسبت واگرایی نشان می دهد. براساس شکل، مقدار ضریب نیروی برشی، با افزایش اندازه زبری و نسبت واگرایی افزایش می یابد.



شکل ۹- نسبت ضریب نیروی برشی در پرش بر بستر زبر به ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک



شکل ۱۰- تغییرات کاویتاسیون در طول پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی با بستر زبر

شده است سرعت حداکثر در عمق بیشتری رخ دهد. همچنین، با نزدیک شدن به ابتدای پرش، سرعت افزایش می یابد. ضخامت لایه مرزی بی بعد δ/b در کانال واگرایی ناگهانی همراه با زبری به طور متوسط، برابر با ۰/۵۱ به دست آمد که این مقدار در پرش بر بستر صاف، ۰/۱۶ است. با افزایش عدد فرود، ضریب نیروی برشی ε در

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر واگرایی ناگهانی کانال بر پرش هیدرولیکی با حضور زبری در حالت های مختلف، بررسی آزمایشگاهی شد. پروفیل های سرعت در هر مدل برای دو عدد فرود در دبی های ۵۰ و ۳۰ لیتر بر ثانیه رسم شد پروفیل ها، شکل یکسانی دارد. وجود واگرایی و زبری باعث

۷. غزالی م. صمدی بروجنی ح. قربانی ب. و رحمتی ا. ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های مثلثی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۲(۴): ۱۱۷-۱۲۸.

۸. کریمی م. موسوی جهرمی س.ح. و شفاعی بجستان م. ۱۳۹۳. اثر زبری بر شدت نوسانات فشار در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۴: ۶۳-۷۷.

۹. نصرافهانی م.ج. و شفاعی بجستان م. ۱۳۹۲. بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زیر و پله ناگهانی. نشریه هیدرولیک. ۸: ۲۹-۴۰.

۱۰. نیسی ک. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۸. بررسی اثر زبری‌های لوزی شکل بر عمق متناوب پرش هیدرولیکی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت‌ماه، دانشگاه شیراز. ۸ ص.

۱۱. نیسی ک. شفاعی بجستان م. قمشی م. و کاشفی پور س. م. ۱۳۹۳. بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی با بستر زیر. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۷: ۳۷-۸۳. ۹۳

12. Abbaspour A. Dalir A. H. Farsadizadeh D. and Sadraddini A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-environment Research. 3: 109-117.
13. Alhamid A. A. 2004. S-jump characteristics on sloping basins. Journal of Hydraulic research. 42: 657-662.
14. Barenblatt G. I. 1987. Dimensional Analysis. New York: Gordon and Breach.
15. Bremen R. and Hager W. H. 1993. T-jump in abruptly expanding channel. Journal of Hydraulic research. 31: 61-78.
16. Carollo F. G. Ferro V. and Pampalone V. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. Journal of Hydraulic Engineering. 133: 989-999.
17. Ead S. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. Journal of Hydraulic Engineering. 128: 656-663.
18. Falvey H. T. 1990. Cavitation in chutes and spillways. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation Denver.
19. Gandhi S. 2014. Characteristics of hydraulic jump. International Journal of Mathematical,

مقایسه با حالت کلاسیک، افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. مقدار ضریب نیروی برشی در بهترین حالت، به‌طور میانگین، ۱۴/۷ برابر ضریب نیروی برشی در پرش کلاسیک است. با پیرومترهای نصب‌شده در کف بستر، کاویتاسیون در طول پرش اندازه‌گیری شده است. ضریب کاویتاسیون برای نسبت واگرایی‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. با توجه به نتایج برای تمام آزمایش‌ها مقدار σ بزرگ‌تر از ۱ است و هیچ‌گونه کاویتاسیون در طول پرش اتفاق نیفتاده است.

منابع

۱. ایزدجو ف. ۱۳۸۳. تأثیر مواج‌بودن بستر بر روی طول پرش و نوسانات زیر فشار در حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی. پایان‌نامه دکترای سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۳۹ ص.
۲. بدیع‌زادگان ر. اسماعیلی ک. فغفور مغربی م. و صانعی م. ۱۳۹۰. مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج‌دار. آب و خاک. ۲۵(۳): ۶۷۶-۶۸۷.
۳. بنی‌طبا ش. ۱۳۹۷. تحلیل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب معکوس و زبری مصنوعی دوزنقه‌ای با ارتفاع مختلف در مقیاس آزمایشگاهی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۲۶ ص.
۴. پارسامهر پ. حسین‌زاده دلیر ع. فرسادی‌زاده د. و عباسپور ا. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر آب‌پایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳): ۸۹-۹۶.
۵. پورعبدالله ن. هنر ت. و فتاحی ر.ا. ۱۳۹۴. بررسی پروفیل سطح آب و سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر با شیب معکوس. دانش آب و خاک. ۲۵: ۱۴۳-۱۵۲.
۶. پورعبدالله ن. حیدرپور م. عابدی کوپایی ج. و محمدزاده هابیلی ج. ۱۳۹۹. اثر شیب منفی، زبری بستر و پله انتهایی بر پروفیل سرعت و نوسانات فشار پرش هیدرولیکی. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۳(۱): ۱۷۳-۱۸۸.

- Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering. 8: 692-697.
20. Hager W. 1985. Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels. *Journal of Hydraulic Research*. 23: 21-35.
 21. Hager W. H. and Bremen R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*. 27(5): 565-585.
 22. Herbrand K. and Knauss J. 1973. Computation and design of stilling basins with abruptly or gradually enlarged boundaries. XI ICOLD Congress Madrid, Q.41, R. 4: 57-79
 23. zadjo F. and Shafai-Bejestan M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*. 7: 1164-1169.
 24. Khatsuria R. M. 2005. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Boca Raton: CRC Press, Marcel Dekker. Atlanta, USA: Boca Raton.
 25. Kordi E. and Abustan I. 2011. Transitional expanding hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138: 105-110.
 26. Nashta C. F. and Garde R. 1988. Subcritical flow in rigid-bed open channel expansions. *Journal of hydraulic research*. 26: 49-65.
 27. Omid M. Esmaeeli Varaki M. and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*. 45: 512-518.
 28. Pagliara S. Lotti I. and Palermo M. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2: 29-38.
 29. 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: 243-252.
 30. Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. *Trans. Eng. Inst. Canada*. 11: 1-8.
 31. Samadi-Boroujeni H. Ghazali M. Gorbani B. and Nafchi R. F. 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 40(9): 841-847.
 32. Torkamanzad N. Hosseinzadeh Dalir A. Salmasi F. and Abbaspour A. 2019. Hydraulic Jump below Abrupt Asymmetric Expanding Stilling Basin on Rough Bed. *Water*. 11(9): 1-29.
 33. Wu S. and Rajaratnam N. 1995. Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research*. 33: 197-212.

