

بررسی نیروی برشی و لایه مرزی در حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی با پله منفی ابتدایی

امیراسماعیل حمیدی نژاد^۱، منوچهر حیدرپور^{۲*} و زهرا قدمپور^۳

چکیده

یکی از عمده‌ترین مباحث در زمینه مطالعه کاهش انرژی مخرب جریان به‌منظور کاهش خسارت بر ابنیه پایین‌دست، بررسی پرش هیدرولیکی و نحوه کنترل آن است. در پژوهش حاضر، خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل ضریب تنش برشی بستر، لایه مرزی و نیمرخ‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی با پله منفی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در کانال مستطیلی به طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شده‌است. اعداد فرود در محدوده ۴/۹ تا ۹/۵ در نسبت واگرایی‌های ۱، ۱/۳۳، ۱/۶۶ و ۲ و سه ارتفاع پله منفی، صفر، ۳ و ۶ سانتی‌متر انجام شد. عمق اولیه و ثانویه به‌وسیله عمق‌سنج دستی و نیمرخ‌های سرعت به‌وسیله لوله پیتوت اندازه‌گیری شده‌است. نتایج حاکی از تشابه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و تفاوت آن‌ها با پروفیل جت آب روی بستر صاف بود. ضخامت لایه مرزی بی‌بُعد شده (δ/b) برابر با ۰/۵۶ برای پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی با پله منفی به‌دست آمد و در مقایسه با ۰/۱۶ برای پرش هیدرولیکی کلاسیک، افزایش زیادی داشته‌است. ضمن آنکه تنش برشی در کانال واگرایی ناگهانی با پله منفی حدود ۱۴ برابر تنش برشی روی بستر صاف به‌دست آمده‌است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی پله منفی ابتدایی، ضخامت لایه مرزی، نیمرخ سرعت، واگرایی ناگهانی.

ارجاع: حمیدی نژاد ا.، حیدرپور م. و قدمپور ز. ۱۴۰۱. بررسی نیروی برشی و لایه مرزی در حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی با پله منفی ابتدایی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۴۶-۵۱. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.13774.2383>

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

۲- استاد گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان.

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

* نویسنده مسئول: heidar@iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

مقدمه

پرش هیدرولیکی، پدیده‌ای است که در اثر تغییر جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی رخ می‌دهد. در ساختمان‌های مستهلک‌کننده انرژی آب یا همان حوضچه‌های آرامش، معمولاً از روش‌هایی برای کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌ها استفاده می‌شود که سبب تثبیت، کنترل، کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی شوند. در یک حوضچه آرامش، متغیرهای اصلی مختلف به صورت هندسه کف (شامل پله‌های ابتدایی و انتهایی و...)، هندسه پلان (شامل واگرایی تدریجی یا ناگهانی)، ناهم‌واری‌های دیوار (برای افزایش نیروی برشی) و تغییر در بده جریان (با افزودن موضعی آن یا به صورت استخراج آب) است (نصراصفهانی و شفافی‌بجستان، ۱۳۹۲). اولین داده‌های تجربی درباره نیمرخ‌های سطح آب بی‌بعد، در سال ۱۹۳۶ توسط باخمتاف و ماتزکه اندازه‌گیری شد. آن‌ها دریافتند که با افزایش عدد فرود، طول و عمق ثانویه نیز در یک پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می‌یابد (برمن و هاگر، ۱۹۹۳).

روش مناسب برای کنترل پرش هیدرولیکی، ایجاد زبری در مسیر جریان است. زبری، علاوه بر اینکه پرش هیدرولیکی را در موقعیت مد نظر تثبیت می‌کند، باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی نیز می‌شود. همچنین، اگر به هر دلیلی تأمین عمق لازم برای وقوع پرش هیدرولیکی کلاسیک میسر نباشد یا هزینه‌های حفاری برای پایین‌آوردن کف حوضچه مقرون‌به‌صرفه نباشد، یکی از راه‌های اطمینان از تشکیل پرش هیدرولیکی 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. مطالعات زیادی برای بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی انجام شده است که می‌توان به برمن و هاگر (۱۹۹۳)، پاکلیارا و همکاران (۲۰۰۹)، نیسی و همکاران (۲۰۱۴)، ترکمن‌زاد و همکاران (۲۰۱۹) و فلاحی و حیدرپور (۱۴۰۰) اشاره کرد. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده روی پرش هیدرولیکی در کانال واگرا به بررسی مشخصاتی از جمله، نسبت اعماق مزدوج، طول پرش هیدرولیکی و غلظت و افت نسبی انرژی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که واگرایی ناگهانی کانال باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج،

طول پرش هیدرولیکی و غلظت و همچنین افزایش افت نسبی انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌شوند.

حوضچه آرامش اغلب برای کاهش انرژی جنبشی جریان در یک پرش هیدرولیکی طراحی می‌شود؛ اما گاهی برای جلوگیری از اثرات مخرب در پایین‌دست و تثبیت محل پرش هیدرولیکی، از پله منفی استفاده می‌شود (دی‌پادوا و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات روی پله منفی توسط هاگر و برتز (۱۹۸۶)، قریشی و البراهیم (۱۹۹۲)، اهوئسو و یاسودا (۱۹۹۳)، نصراصفهانی و شفافی‌بجستان (۱۳۹۲) و دی‌پادوا و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد که نتایج نشان داد پله منفی باعث افزایش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش هیدرولیکی و غلظت و همچنین کاهش افت نسبی انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌شود. این تغییرات در مشخصات پرش هیدرولیکی کم است و دلیل مهم‌تر استفاده از پله منفی در تثبیت پرش هیدرولیکی در محل حوضچه آرامش است.

نیسی و همکاران (۲۰۱۴) با انجام آزمایش‌هایی در یک فلوم نسبتاً بزرگ به عرض $0/8$ و طول 12 متر تأثیر زبری‌های بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی با نسبت بازشدگی 3 و در محدوده اعداد فرود بین 2 تا 10 را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی زبر، باعث ایجاد پرش هیدرولیکی نامتقارن قوی‌تر نسبت به پرش هیدرولیکی واگرایی صاف شده است. مقدار ضریب نیروی برشی این رابطه برای یک نسبت بازشدگی، با به‌کاربردن داده‌های آزمایشگاهی به صورت تابعی از عدد فرود نشان داده شد. این ضریب همچنین نشان داد که زبری‌ها در مقطع واگرا قادر خواهند بود تنش را 12 برابر نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش دهند.

ترکمن‌زاد و همکاران (۲۰۱۹) یک مطالعه آزمایشگاهی از پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی نامتقارن با عناصر زبری مصنوعی در یک کانال به طول 10 متر، عرض $0/5$ و عمق $0/5$ متر برای اعداد فرود بالادست (Fr_1) در محدوده 5 تا 11 انجام دادند. نتایج نشان داد که ارتفاع زبری $2/8$ سانتی‌متر در افزایش ضریب نیروی برشی در همه نسبت‌های انبساط مؤثرتر است. در نتیجه، حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی نامتقارن با عناصر زبری مصنوعی نه تنها باعث افزایش کارایی در اتلاف

کانال پایین دست و s ارتفاع پله ابتدایی است. با توجه به تئوری باکینگهام (بارنبلت، ۱۹۸۷) نسبت اعماق مزدوج به صورت تابعی از پارامترهای زیر به دست می آید:

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

مقدار عدد رینولدز بوده و برای همه آزمایش ها در محدوده $7/5 \times 10^4$ تا $2/5 \times 10^5$ تغییر می کند که بیانگر جریان آشفته است؛ پس 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 نسبت واگرایی را بر ضریب نیروی برشی (ε) و به طور مشابه، طول نسبی پرش هیدرولیکی و افت انرژی به شرح زیر به دست آورد:

$$\varepsilon = f \left(Fr_1, \frac{s}{d_1}, B, D \right) \quad (3)$$

کانال آزمایشگاهی

کانال استفاده شده در این پژوهش، کانالی مستطیلی به طول ۸، عرض $0/4$ و ارتفاع $0/6$ متر است. دیواره ها و کف این کانال از جنس ورق پلاکسی گلاس شفاف است. این کانال با یک پمپ با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می شود. برای افزایش عدد فرود اولیه قبل از دریچه کشویی بالادست، ارتفاع مخزن به $1/25$ متر افزایش داده شد و برای ایجاد واگرایی، جعبه هایی از جنس پلاکسی گلاس در دو طرف مقطع به دیواره های کانال چسبانده شد و تا ۶۰ سانتی متر ابتدایی کانال ادامه یافت، این امر سبب یکنواختی جریان در مقطع تنگ شده کانال و فراهم شدن امکان اندازه گیری عمق اولیه در این فاصله می شود. نسبت واگرایی های ایجاد شده $1/33$ ، $1/66$ و 2 در نظر گرفته شد. در این پژوهش، پله منفی ابتدایی که تا محل بازشدگی عرض کانال (مقطع واگرایی ناگهانی) ادامه دارد، با ارتفاع های صفر، ۳ و ۶ سانتی متر بعد از دریچه نصب شد (شکل ۱). برای ایجاد پرش هیدرولیکی، دریچه کشویی در ورودی فلوم تعبیه شد و برای تثبیت پرش هیدرولیکی، دریچه دیگری در انتهای فلوم به کار رفت. در آزمایش های مربوط به واگرایی ناگهانی، دریچه پایین دست به گونه ای تنظیم شد که شروع پرش هیدرولیکی 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 $4/5$ تا $9/5$ ایجاد می کند.

انرژی اضافی و کاهش عمق توالی و همچنین طول حوضه می شود؛ همچنین تأثیر قابل توجهی در شکل گیری جریان های متقارن پایین دست دارد.

فلاحی و حیدریور (۱۴۰۰) تأثیر واگرایی ناگهانی کانال بر پرش هیدرولیکی با حضور زبری در حالت های مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود واگرایی و زبری باعث شده است سرعت حداکثر در عمق بیشتری رخ دهد. همچنین، با نزدیک شدن به ابتدای پرش هیدرولیکی، سرعت افزایش می یابد. ضخامت لایه مرزی بی بُعد (δb)، که در آن (δ) ضخامت لایه مرزی در هر مقطع از پرش هیدرولیکی - برابر با عمقی است که در آن سرعت حداکثر و (b) مقیاس طول پروفیل سرعت است، در کانال واگرایی ناگهانی همراه با زبری به طور متوسط، برابر با $0/51$ به دست آمد که این مقدار در پرش هیدرولیکی بر بستر صاف، $0/16$ است. با افزایش عدد فرود، ضریب نیروی برشی ε در مقایسه با حالت کلاسیک، افزایش بیشتری را نشان می دهد.

با توجه به اینکه در مورد نیمرخ سرعت و ضخامت لایه مرزی برای هر کدام از پارامترهای واگرایی ناگهانی و پله منفی مطالعات زیادی صورت نگرفته است و همچنین پژوهشی درباره استفاده توأم این دو پارامتر یافت نشد؛ بنابراین این پژوهش برای بررسی نیمرخ سرعت و ضخامت لایه مرزی در پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی و پله منفی انجام شد. این پژوهش بر این فرضیه استوار است که واگرایی و پله منفی ابتدایی به طور همزمان می تواند باعث افزایش ضخامت لایه مرزی و افزایش ضریب نیروی برشی بستر شود.

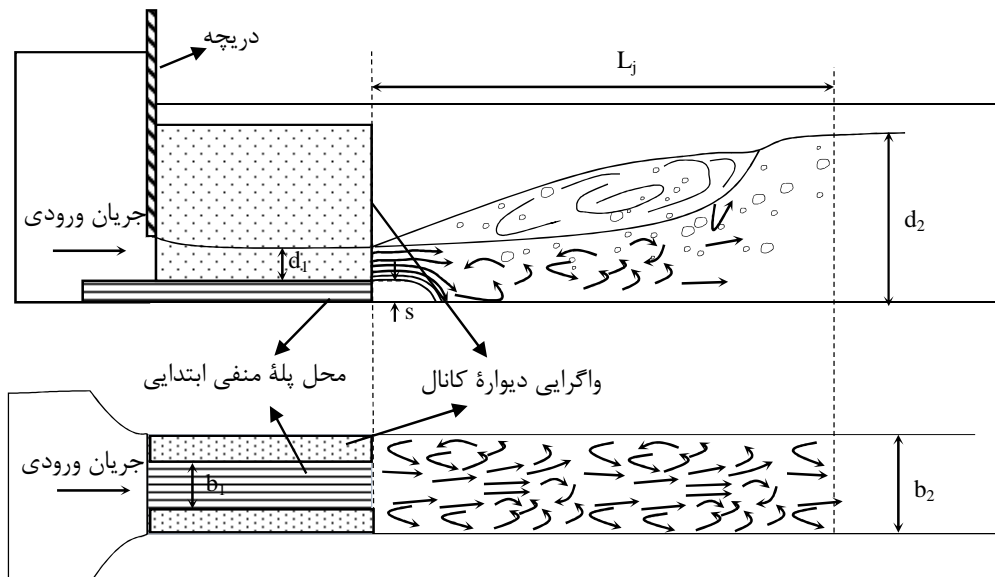
مواد و روش ها

آنالیز ابعادی

به طور کلی، ویژگی های پرش هیدرولیکی در یک کانال واگرایی ناگهانی (B) همراه با ارتفاع پله ابتدایی (s) و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (d_2) تابعی از پارامترهای زیر است:

$$f(g, s, d_1, d_2, V_1, b_1, b_2, \rho, \mu) = 0 \quad (1)$$

در این معادله g شتاب ثقل، ρ دانسیته (جرم مخصوص)، μ لزجت دینامیکی آب، d_1 عمق اولیه، d_2 عمق ثانویه پرش (مقدار عمق زیر بحرانی در مقطع واگرا)، V_1 سرعت جریان در مقطع اول، b_1 عرض کانال بالادست، b_2 عرض



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

نصف سرعت بیشینه و یا به عبارت دیگر $(u = 0.5u_m)$ و $\partial u / \partial y < 0$ است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). شکل ۲ پروفیل‌های بی‌بعد سرعت را برای همه داده‌های واگرایی و پله منفی ابتدایی در آزمایش‌هایی نشان می‌دهد که در آن، پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده است. این شکل، به وضوح نشان می‌دهد که نیمرخ‌های سرعت نسبت به طول پرش هیدرولیکی مشابه هستند؛ اما با پرش هیدرولیکی کلاسیک کمی متفاوت هستند. سرعت حداکثر در کانال واگرایی ناگهانی و پله منفی ابتدایی بستر نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک در نقاط بالاتری اتفاق می‌افتد. در شکل ۲ لایه مرزی در حضور پله و واگرایی بالاتر از حالت کلاسیک اتفاق افتاده است. با مقایسه نتایج این تحقیق با حالت کلاسیک، نتایج اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) روی بستر موجدار در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که سرعت ماکزیمم با اضافه کردن پارامترهای زبری، پله و واگرایی در نقطه بالاتری اتفاق می‌افتد.

شکل ۳ تغییر مقیاس طولی نرمال b را با فاصله طولی نرمال شده x نشان می‌دهد. رابطه بین b/d_1 و x/d_1 برای پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی با پله منفی ابتدایی را می‌توان با معادلات زیر توصیف کرد:

$$\frac{b}{d_1} = 0.0157 \left(\frac{x}{d_1} \right)^{1.4389}, \quad R^2 = 0.745 \quad (4)$$

برای اندازه‌گیری دبی از دی‌سنج 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 هیدرولیکی و غلتاب توجه می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه، عمق‌سنج ریلی با دقت اندازه‌گیری ۱ میلی‌متر به کار رفت. در طول آزمایش، سرعت نقطه‌ای با استفاده از لوله پیتوت اندازه‌گیری شد؛ به این صورت که پس از تثبیت پرش هیدرولیکی، در چند مقطع از طول پرش هیدرولیکی، سرعت جریان اندازه‌گیری و در هر مقطع پروفیل سرعت در عمق جریان، از کف کانال تا سطح آب با میانگین‌گیری از سه مقطع در عرض کانال ترسیم شد.

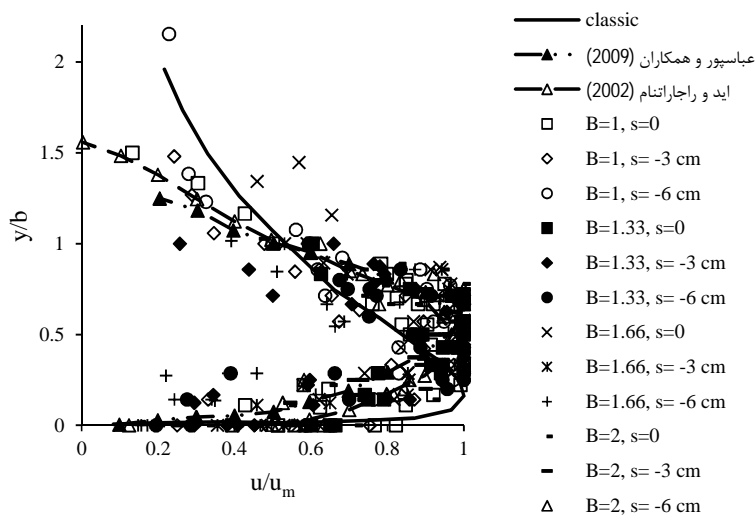
نتایج و بحث

نیمرخ سرعت

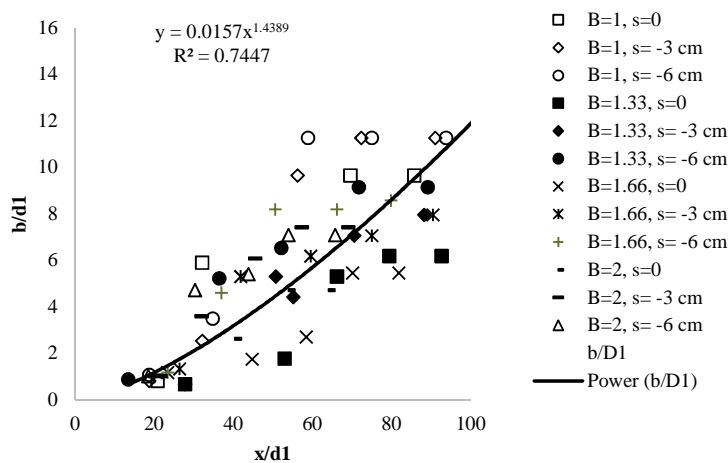
در این مطالعه، نیمرخ سرعت در پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی همراه با پله منفی ابتدایی اندازه‌گیری شد. رشد لایه مرزی و حداکثر سرعت، با افزایش فاصله طولی (x) از ابتدای پرش هیدرولیکی، کاهش می‌یابد. برای بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت، از متغیرهای بی‌بعد y/b و u/u_m استفاده شد که y برابر با عمق آب از بستر زبر، u سرعت جریان، u_m سرعت بیشینه و مقیاس طولی b ، عمقی است که در آن، سرعت جریان

هستند؛ بنابراین از مقیاس طول (L) به جای L_j و d_1 استفاده شد. مقیاس طول L ، فاصله طولی است که در آن $u_m = u_1$ و قبلاً توسط ویو و راجراتنام (۱۹۹۵) برای مطالعه پرش هیدرولیکی‌های کلاسیک استفاده شده است. شکل ۴ ج) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار x/L ($0 < x/L < 1$) اختلاف بین سرعت‌های نرمال شده $(u_m = u_1)$ پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با پله منفی و پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش می‌یابد؛ اما، برای مقادیر $(x/L > 1)$ این اختلاف افزایش می‌یابد.

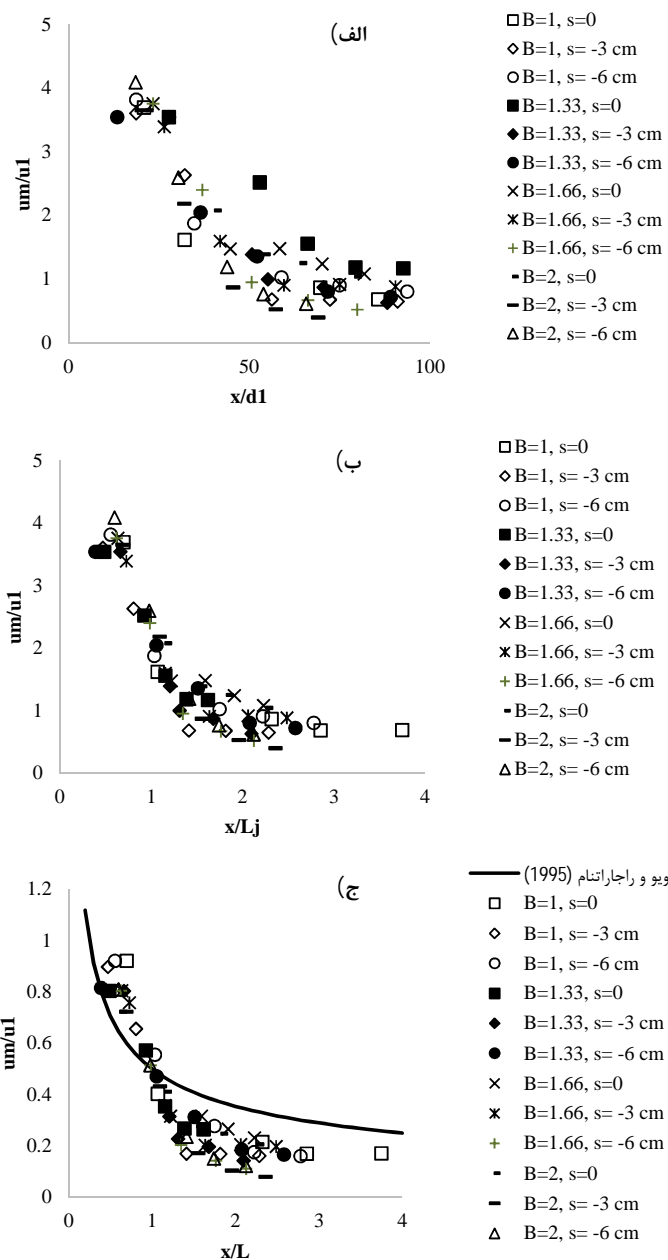
به دلیل شباهت نیمرخ‌های سرعت نسبت به طول پرش هیدرولیکی تغییرات مقیاس سرعت u_m با فاصله طولی x باید بررسی شود. تغییرات u_m/u_1 در برابر x/d_1 و x/L_j در شکل ۴ نشان داده شده است. در آزمایشات، سرعت فوق بحرانی قبل از پرش هیدرولیکی، u_1 و از $2/9$ تا $5/7$ متر در ثانیه، متغیر و حداکثر سرعت (u_m) در محدوده $0/4$ تا $4/1$ متر بر ثانیه است. مقدار u_m/u_1 با تغییر فاصله طولی به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۴ (الف و ب) پراکنده



شکل ۲- نیمرخ‌های بی‌بعد شده سرعت در کانال واگرای ناگهانی با پله منفی ابتدایی



شکل ۳- تغییرات b/d_1 در مقابل x/d_1 در پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی همراه با پله منفی ابتدایی



شکل ۴- تغییرات u_m/u_1 در مقابل الف) x/d_1 و ب) x/L_j و ج) x/L در پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی همراه با پله منفی ابتدایی

کلاسیک دارد همچنین فلاحی و حیدریور (۱۴۰۰) مقدار آن را برای پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی با زبری طبیعی برابر با ۰/۵۱ گزارش کردند.

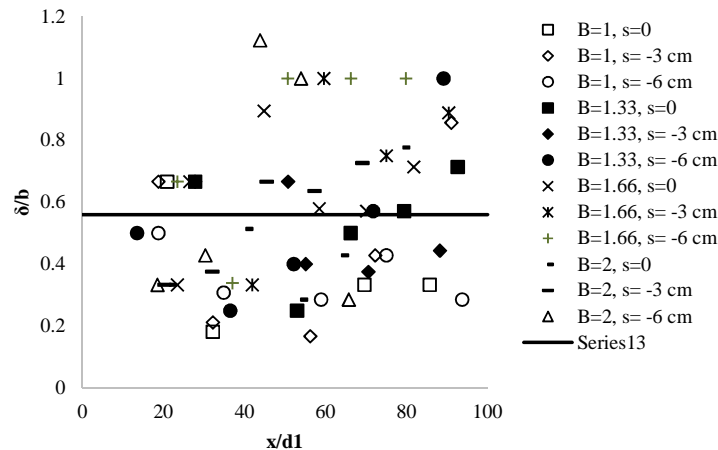
تغییرات ضخامت لایه مرزی نرمال (δ/d_1) در مقابل فاصله طولی نرمال (x/d_1) در شکل ۶ نشان داده شده است. رابطه بین ضخامت لایه مرزی نرمال شده و فاصله طولی نرمال برای پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی با پله منفی ابتدایی را می توان با معادلات زیر به دست آورد:

ضخامت لایه مرزی در هر مقطع از پرش هیدرولیکی، برابر با عمقی است که در آن، سرعت حداکثر است. راجاراتنام (۱۹۶۸) مقدار ضخامت لایه مرزی بی بُعد (δ/b) را در بستر صاف و کانال مستطیلی برابر با ۰/۱۶ گزارش کرد. شکل ۵ ضخامت لایه مرزی بی بُعد (δ/b) را در کانال واگرای ناگهانی همراه با پله منفی نشان می دهد. مطابق با این شکل، مقدار ضخامت لایه مرزی بی بُعد در پژوهش حاضر، برابر با ۰/۵۶ است که تفاوت قابل ملاحظه ای با حالت

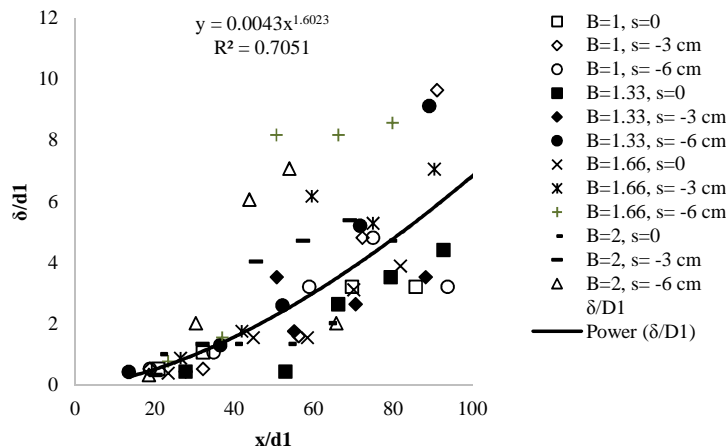
نشان می‌دهد ضخامت لایه مرزی با افزایش فاصله از دریچه کاهش می‌یابد.

$$\frac{\delta}{d_1} = 0.0043 \left(\frac{x}{d_1}\right)^{1.6023}, \quad R^2 = 0.7 \quad (5)$$

همان‌طور که گفته شد، لایه مرزی در حضور پله و واگرایی بالاتر از حالت کلاسیک اتفاق می‌افتد. همچنین شکل ۶



شکل ۵- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b به ازای x/d_1 در پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی همراه با پله منفی ابتدایی



شکل ۶- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/d_1 به ازای x/d_1 در پرش هیدرولیکی در کانال واگرایی ناگهانی همراه با پله منفی ابتدایی

ضریب نیروی برشی

تنش برشی بستر در پرش هیدرولیکی با استفاده از رابطه مومنتم به دست می‌آید. معادله حرکت در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی را می‌توان به شرح زیر نوشت (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹):

$$(M_2 + P_2 - S_2) = (M_1 + P_1 - S_1) - \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx \quad (6)$$

که در آن S_2, S_1 و M_2, M_1, P_2, P_1 به ترتیب نیروی فشاری، مقدار اندازه حرکت و نیروی برشی طبیعی در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی هستند (خان و

استفلا، ۱۹۹۶). با ساده‌سازی معادله (۶)، تنش برشی بستر در کانال واگرایی ناگهانی با پله منفی ابتدایی را می‌توان به شرح زیر به دست آورد:

$$F_\tau = \int_{x_1}^{x_2} \tau_b dx = (P_1 - P_2) + M_1 - M_2 \quad (7)$$

ضریب نیروی برشی معرفی شده توسط ویو و راجاراتنام (۱۹۹۵) به شرح زیر تعریف شده است:

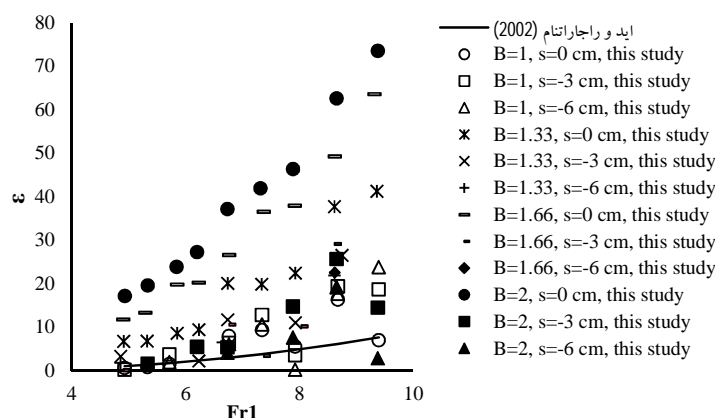
$$\varepsilon = \frac{F_\tau}{\gamma b_1 d_1^2 / 2} \quad (8)$$

در شکل ۷ تغییرات ضریب نیروی برشی ε با عدد فرود نشان داده شده است. ضریب نیروی برشی برای پرش

پارامترهای نسبت واگرایی، ارتفاع نسبی پله و نسبت اعماق مزدوج نیز بستگی دارد که با رگرسیون گرفتن از داده‌های به‌دست‌آمده، ضریب نیروی برشی معادله به‌صورت زیر است:

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1, \quad R^2 = 1 \quad (9)$$

$$\varepsilon = 24Fr_1 - 48.27B + 0.67\frac{s}{d_1} - 18.68D + 56.41, \quad R^2 = 0.9 \quad (10)$$



شکل ۷- تغییرات ضریب نیروی برشی در پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی همراه با پله منفی ابتدایی

منفی بیشتر است. مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بُعد شده (δ/b) در پژوهش حاضر برابر با 0.57 به‌دست آمد که بیشتر از مقدار مربوط در حالت کلاسیک (0.16) است.

منابع

۱. فلاحی ب. و حیدرپور م. ۱۴۰۰. بررسی نیروی برشی، لایه مرزی و پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر. پژوهش آب ایران. (۲): ۱۵: ۹-۱.
۲. نصرافهانی م. ج. و شفافی بجستان م. ۱۳۹۲. بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زبر و پله ناگهانی. نشریه هیدرولیک. (۲): ۴۰-۲۹.

3. 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.

هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی با پله منفی ابتدایی با استفاده از معادله (۷) به‌دست آمد و با معادله (۸) که برای حالت کلاسیک در کانال مستطیلی توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) ارائه شده، مقایسه شده‌است. از این شکل می‌توان دریافت که ضریب نیروی برشی برای پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی ۱۴ برابر پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی است و با نتایج فلاحی و حیدرپور (۱۴۰۰) مطابقت داشت. درحالی‌که پله منفی، مقدار ضریب نیروی برشی را کاهش می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، ضریب نیروی برشی علاوه بر عدد فرود، به

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نیمرخ‌های سرعت و ضریب نیروی برشی در پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی با پله منفی مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج به شرح زیر ارائه می‌شود:

به‌طورکلی ضریب تنش برشی بستر با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب نیروی برشی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت تابعی از عدد فرود، نسبت واگرایی و ارتفاع نسبی پله ارائه شده‌است. ضریب تنش برشی بستر در کانال واگرای ناگهانی با پله منفی ۱۴ برابر حالت کلاسیک است.

نیمرخ‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی با پله منفی مشابه حالت کلاسیک هستند؛ اما سرعت بیشینه در این آزمایش‌ها نسبت به جت دیواری کلاسیک در نقطه بالاتری است و ضخامت لایه مرزی در پرش هیدرولیکی در کانال واگرای ناگهانی با پله

4. Barenblatt G. I. 1987. Dimensional Analysis. Gordon and Breach Science, Amsterdam, The Netherlands. 51 p.
5. Bremen R. and Hager W. H. 1993. T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*. 31(1): 61-78.
6. De Padova D. Mossa M. and Sibilla S. 2017. SPH modelling of hydraulic jump oscillations at an abrupt drop. *Water*. 9(10): 790.
7. Ead S.A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(7): 656-663.
8. Hager W. H. and Bretz N. V. 1986. Hydraulic jumps at positive and negative steps. *Journal of Hydraulic Research*. 24(4): 237-253.
9. Hager W.H. and Bremen R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*. 27(5): 565-585.
10. Khan A. A. and Steffler P. M. 1996. Physically based hydraulic jump model for depth-averaged computations. *Journal of Hydraulic Engineering*. 122(10): 540-548.
11. McCorquodale J. A. and Mohamed M. S. 1994. Hydraulic jumps on adverse slopes. *Journal of Hydraulic Research*. 32(1): 119-130.
12. Neysi K. Shafaeabajestan M. Ghomeshi M. and Kashefipoor S. 2014. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 37(2): 83-93.
13. Ohtsu I. and Yasuda Y. 1993. Hydraulic jump in sloping channel with positive or negative step. *Journal of Hydraulic Research*. 31(5): 712-716.
14. Pagliara S. Palermo M. and Carnacina I. 2009. Scour and hydraulic jump downstream of block ramps in expanding stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*. 47(4): 503-511.
15. 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.
16. Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. *Trans. Eng. Inst. Canada*. 11(A-2): 1-8.
17. 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): 1756.
18. Wu S. and Rajaratnam N. 1995. Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research*. 33(2): 197-212.

