

بررسی آزمایشگاهی تأثیر بستر زبر با المان‌های دوزنقه‌یی غیرممتد در مشخصات پرش گسسته در کانال مستطیلی غیرمنشوری

رسول دانش‌فراز* (استاد)

مهدی ماجدی اصل (استادیار)

رضا میزایی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه براغه

پرستو پارسامهر (دکتر)

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره ۲، شماره ۱، ص. ۱۱۹-۱۲۸

پرش هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین عوامل استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست سرریزها و دریاچه‌هاست، تشکیل و کنترل پرش در حوضچه‌های آرامش، اهمیت بسیاری دارد. از این رو واگرایی مقطع می‌تواند یکی از روش‌های حصول اطمینان از تشکیل پرش در حوضچه‌ی آرامش باشد. کانال‌های غیرمنشوری (مقطع واگرا) در مقایسه با کانال‌های منشوری باعث استهلاک انرژی بیشتر جریان، کاهش عمق ثانویه و افزایش طول پرش هیدرولیکی می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر، مجموعاً ۹۹ آزمایش در بستر زبر با المان‌های دوزنقه‌یی غیرممتد با دوارتقاع و صاف برای کانال منشوری و غیرمنشوری با نسبت‌های واگرایی ۰/۶۷، ۰/۵، ۰/۳۳ و ۰/۲۳ و محدوده‌ی فرود ۴ تا ۱۲ انجام شد و نتایج نشان داد که المان‌های زبری دوزنقه باعث افزایش ضریب تنش برشی در حدود ۱۳/۲ برابر ضریب تنش برشی کانال منشوری با بستر صاف می‌شود. همچنین نسبت واگرایی ۰/۳۳ با بستر زبر، باعث کاهش ۵۹/۵ درصدی عمق ثانویه و افزایش ۲۹ درصدی راندمان پرش در مقایسه با کانال منشوری با بستر صاف شده است.

واژگان کلیدی: المان دوزنقه‌یی، پرش هیدرولیکی، مقطع واگرا، نسبت اعماق، استهلاک انرژی.

daneshfaraz@yahoo.com
mehdi.majedi@gmail.com
mirzaeereza.10@gmail.com
parastoo.parsamehr@gmail.com

۱. مقدمه

انرژی، تمایل به جریان نامتقارن و عمق پایاب کم، از جمله ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در کانال غیرمنشوری نسبت به کانال منشوری است. در مقطع واگرایی ناگهانی، بسته به محل قرارگیری پنجه‌ی پرش و عمق پایاب، چهار نوع پرش فرار (R-jump)^۱، پرش گسسته (S-jump)^۲، پرش انتقالی (T-jump)^۳ و پرش کلاسیک (C-jump)^۴ شکل می‌گیرد. پرش گسسته، پرشی است که در آن پنجه‌ی پرش در محل تغییر مقطع رخ می‌دهد و بیشتر شبیه به جت نامتقارن و نوسانی است و بدون غلظت‌های سطحی تشکیل می‌شود. جهت تقارن آن به یک سمت دیواره‌ی کانال پایین‌دست، کاملاً تصادفی است و احتمال دارد به سمت یکی از دیواره‌های کانال متمایل شود (شکل ۱).^[۳] با توجه به اهمیت شناخت پرش در مقطع واگرایی ناگهانی، تاکنون مطالعات زیادی در این خصوص صورت پذیرفته است. در سال‌های گذشته، پرش گسسته بر روی بستر صاف با توجه به خصوصیات فضایی و پیچیدگی در محاسبات آن بررسی و مطالعه شده و بر اساس پارامترهای دخیل معادله‌یی برای پیش‌بینی نسبت اعماق پرش ارائه شده است (جدول ۱).^[۷-۳]

پرش هیدرولیکی یک جریان متغیر سریع است، که به موجب آن جریان در فاصله‌ی کوتاهی از حالت فوق بحرانی به حالت زیربحرانی تبدیل می‌شود، که با تلاطم زیادی همراه است و باعث استهلاک انرژی جنبشی جریان فوق بحرانی می‌شود. بر همین اساس، با ایجاد پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش، انرژی مازاد مذکور مستهلاک می‌شود و از فرسایش پایین‌دست کانال جلوگیری می‌کند. از آنجایی که تشکیل و تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش به عمق آب پایین‌دست کانال بستگی دارد، در مواردی که عمق پایاب کانال برای تشکیل پرش کم باشد، به دلیل محدودیت‌های تأمین عمق موردنیاز و مشکلات موجود در خاک‌برداری کف حوضچه‌ی آرامش، واگرایی مقطع می‌تواند یکی از روش‌های حصول اطمینان از تشکیل پرش باشد.^[۱] کاهش نسبت اعماق، افزایش طول پرش، افزایش استهلاک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۶/۱۳۹۷، اصلاحیه ۲۴/۹/۱۳۹۷، پذیرش ۱۰/۱/۱۳۹۷.

DOI:10.24200/J30.2018.51630.2423

جدول ۱. روابط ارائه شده‌ی پژوهش‌گران پیشین برای نسبت اعماق پرش گسسته.

توضیحات	رابطه	پژوهش‌گر
$D^* = \frac{Fr_1^2}{\sqrt{1 + \lambda Fr_1^2}}$ $B = \frac{b_1}{b_2}$	$D_B = D^* \sqrt{B}$	هربراند (۱۹۷۳) ^[۱]
$E_1^2 = Fr_1^2 / K_s$ $K_s = 1 - 4.23 [\log(B) \log(Fr_1)]$	$D_B = \frac{1}{4}(-1 + \sqrt{1 + \lambda E_1^2})$	متین و همکاران (۱۹۹۸) ^[۵]
$E_1^2 = \frac{Fr_1^2}{k_1(1-k_2) \cos \theta}$ $k_1 = 1 - 0.37 \ln(B)(1.23 + \ln(Fr_1))$ $k_2 = 0.52(0.1 + 0.35 Fr_1 - 0.5 Fr_1^2) \sin \theta(\theta)^{-1}$	$D_B = \frac{1}{4}(-1 + \sqrt{1 + \lambda E_1^2})$	عبدالمتین و همکاران (۲۰۰۸) ^[۷]
$E_1^2 = \frac{Fr_1^2}{\cos \theta} (\frac{C_s}{Fr_1} + C_e)$ $C_e = (1 + 0.25 \ln(B))^{1+Ln(Fr)}$ $C_s = 9.94 (\tan \theta)^2 (1 - 0.44 \ln B Fr_1^{0.5})$	$D_B = \frac{1}{4}(-1 + \sqrt{1 + \lambda E_1^2})$	الحمدید (۲۰۰۴) ^[۶]

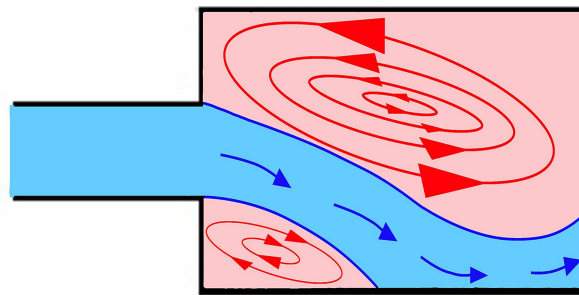
به صورت تابعی از عدد فرود اولیه‌ی جریان (Fr_1) به شکل رابطه‌ی ۱ ارائه شد:^[۸]

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

بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با المان‌های T شکل و درصد‌های تراکم مختلف نیز در سال ۲۰۱۱ صورت گرفت و نتایج نشان دادند که المان‌های زبری T شکل در مقایسه با المان‌های زبری مکعبی، نتایج بهتری دارند.^[۱۰] بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر گوه‌ی شکل نیز انجام و نتایج حاصل، کاهش عمق ثانویه و طول پرش به ترتیب ۱۶/۵٪، ۳٪ و ۳٪ الی ۵۳٪ بیان شد.^[۱۱] همچنین تأثیر شیب معکوس در بستر زبر همراه با دوارتفاع زبری و دوشیب معکوس در مشخصات پرش هیدرولیکی مطالعه و بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع زبری و شیب معکوس باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی می‌شود.^[۱۲] اثر آب پایه با ارتفاع و محل قرارگیری متفاوت بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی گسسته در واگرایی ناگهانی متقارن و نامتقارن بررسی شد و با در نظر گرفته شدن پارامتر بی بعد ارتفاع و محل قرارگیری آب پایه نتایج نشان دادند که با افزایش پارامتر مذکور، عمق ثانویه‌ی پرش کاهش می‌یابد.^[۱۳] همچنین برای اولین بار تأثیر بستر زبر در مشخصات پرش هیدرولیکی گسسته در ۴ نسبت واگرایی، محدوده‌ی فرود ۲ تا ۱۰ و ارتفاع نسبی المان زبری ۰/۵ تا ۱ در سال ۲۰۱۳ بررسی شد و نتایج نشان داد که ایجاد بستر زبر باعث کاهش عمق مزدوج پرش گسسته در حدود ۱۶٪ تا ۲۰٪ می‌شود. برای پیش‌بینی ضریب تنش برشی در مقطع واگرایی ناگهانی با بستر زبر نیز رابطه‌ی ۲ ارائه شد:^[۱۴]

$$\varepsilon = 0.72 Fr_1^{2.102} - 3.7076 Ln B \quad (2)$$

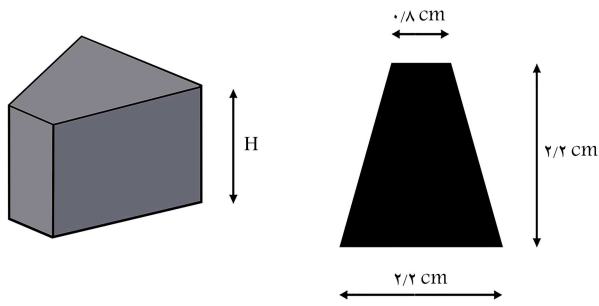
تأثیر مقطع واگرایی تدریجی با بستر زبر لوزی شکل در ۴ نسبت واگرایی در مشخصات پرش هیدرولیکی نیز مطالعه و بررسی شد و نتایج نشان داد که طول غلتاب، طول پرش هیدرولیکی و عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش بر روی بستر زبر واگرا کاهش می‌یابد.^[۱۵] میزان استهلاک انرژی ناشی از عوامل پرش هیدرولیکی، بلوک و صفحات مشبک نیز در سال ۲۰۱۷ مطالعه شد. بررسی استهلاک انرژی برای مدل‌ها نشان داد که صفحه‌ی مشبک با تخلخل ۴۰٪ به نسبت مدل ۵۰٪ انرژی بیشتری را در حوضچه‌ی آرامش مستهلک می‌کند. همچنین



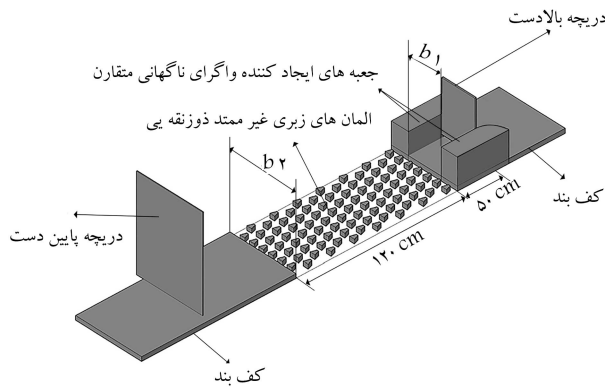
شکل ۱. پرش گسسته در مقطع واگرایی ناگهانی.

در جدول ۱، $D_B = \frac{y_2}{y_1}$ نسبت اعماق پرش گسسته، y_1 و y_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش، B نسبت واگرایی مقطع، b_1 و b_2 به ترتیب عرض کانال بالادست و پایین دست، Fr_1 عدد فرود اولیه‌ی جریان، D^* نسبت اعماق معادله‌ی بلانگر، E_1 عدد فرود اصلاحی، K_s ، k_1 ، k_2 ، C_s و C_e ضرایب اثر واگرایی مقطع و θ شیب کف کانال است.

با توجه به این‌که در ساخت حوضچه‌های آرامش از مصالح بتنی استفاده می‌شود، برای کاهش هزینه‌های اجرایی سعی بر این است که با استفاده از روش‌هایی مانند بلوک‌ها و آب‌پایه‌ها در ابتدا، میانه و انتهای حوضچه‌ها، ابعاد حوضچه‌ی آرامش کاهش یابد. زبری بستر حوضچه نیز از دیگر روش‌هایی است که برای کاهش ابعاد حوضچه مورد توجه است و در سال‌های اخیر، تأثیر شکل المان‌های زبری مختلف با تراکم و ارتفاع‌های متفاوت بررسی شده است. از آنجایی‌که اجزاء زبر به گونه‌ی قرار می‌گیرند که تاج آن‌ها هم تراز سطح بالادست و پایین دست کانال است، این المان‌ها علاوه بر کاهش ابعاد حوضچه، در مقایسه با بلوک و آب‌پایه، در سرعت‌های بالای جریان از خطر پدیده‌ی حفره‌زایی به دور هستند.^[۸] استفاده از بستر زبر برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ بررسی و رابطه‌ی برای بیان ضریب تنش برشی بستر زبر ارائه شد.^[۹] در سال ۲۰۰۲ نیز بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار انجام شد و نتایج نشان دادند که ضریب تنش برشی بستر زبر، تقریباً ۱۰ برابر بستر صاف است.^[۸] همچنین در همان سال با در نظر گرفتن تنش برشی به صورت مضربی از نیروی هیدرواستاتیکی قبل از پرش، ضریب تنش برشی (ε) برای بستر صاف



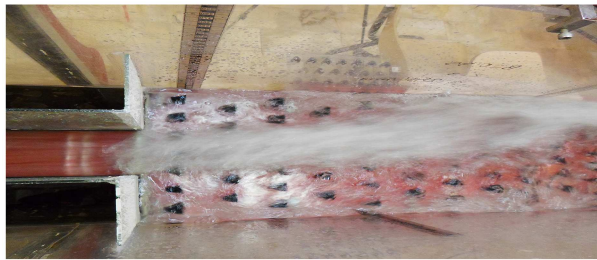
شکل ۲. ابعاد و نمای سه بعدی المان زبری.



شکل ۳. نمای سه بعدی از بستر زبر و مدل فیزیکی آزمایش.



الف) نمای کناری؟



ب) نمای بالا.

شکل ۴. پرش گسسته بر روی بستر زبر.

۲.۲. آنالیز ابعادی

پارامترهای مختلفی در مشخصات پرش در بازشدگی ناگهانی با بستر زبر تأثیرگذار هستند. با بررسی شرایط آزمایشگاهی، پارامترهای مؤثر را می توان به صورت رابطه ی ۳ نوشت:

$$f \backslash (\rho, Q, \mu, g, b_1, b_2, y_1, y_2, H, L_j, I, \eta, \epsilon) = \circ \quad (3)$$

بررسی ها نشان دادند مدل هایی که در آنها بلوک های مانع قبل از صفحات مشبک استفاده شده است، استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل های متناظر بدون بلوک ایجاد می کنند. [۱۶]

بر اساس مطالعات انجام گرفته و مشاهداتی که از تأثیر شکل و ارتفاع المان زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی و ابعاد حوضچه ی آرامش به دست آمده است، مشاهده شد که تاکنون تأثیر المان های زبری دوزنقه غیرممتد بر خصوصیات پرش بررسی نشده است. از طرفی به دلیل خصوصیات ویژه فضایی و پیچیدگی محاسبات در پرش گسسته، هدف از مطالعه ی حاضر، بررسی اثر المان های دوزنقه یی غیرممتد در مشخصات پرش گسسته در حوضچه های واگرایی ناگهانی متقارن و نیز مقایسه ی نتایج مطالعه ی حاضر با نتایج حاصل از بستر صاف واگرا و نتایج مطالعات پیشین است.

۲. مواد و روش ها

۱.۲. مشخصات آزمایشگاهی

آزمایش ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۵ متر، عرض ۰٫۳ متر و ارتفاع ۰٫۴۵ متر و با شیب کف صفر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه انجام شد. جنس کف و دیواره های فلوم از جنس پلکسی گلس شفاف بود. جهت ایجاد جریان فوق بحرانی در مطالعه ی حاضر از یک دریچه ی فلزی به ضخامت ۳ میلی متر، به فاصله ی ۰٫۷ متر از محل بستر زبر (تشکیل پرش) جهت حذف تأثیر انقباض دریچه بر عمق اولیه ی جریان استفاده شد. برای ایجاد محدوده ی فرود ۴ تا ۱۲، ارتفاع بازشدگی دریچه به میزان ۱٫۳ و ۱٫۷ سانتی متر در نظر گرفته شد. دریچه با ارتفاع بازشدگی ۱٫۳ سانتی متر برای کانال منشوری و غیرمنشوری با نسبت های واگرایی ۰٫۶۷ و ۰٫۵ و با ارتفاع بازشدگی ۱٫۷ سانتی متر، برای نسبت واگرایی ۰٫۳۳ منظور شد. به منظور ایجاد نسبت های واگرایی ناگهانی ۰٫۶۷، ۰٫۵ و ۰٫۳۳ به صورت متقارن در مقطع، [۱۶] از جعبه هایی به جنس شیشه، با عرض های ۵، ۷٫۵ و ۱۰، طول ۵ و ارتفاع ۲ سانتی متر در دو طرف فلوم (قبل و بعد از دریچه) استفاده شد. همچنین جهت زبر ساختن بستر المان های زبر غیرممتد با مقطع عمود بر جریان به شکل دوزنقه (شکل ۲) با ارتفاع ۱٫۵ و ۳ سانتی متر، تراکم ۱۰٪ و آرایش زیگزاگ [۷-۱۲، ۱۳] در حوضچه ی آرامش به طول ۱۲ سانتی متر استفاده شد (بیشینه ی طول پرش تشکیل یافته در کانال غیرمنشوری با بستر صاف در نسبت واگرایی ۰٫۳۳ رخ داد و مقدار آن ۱٫۱۱ متر بود، بر همین اساس طول بستر زبر ۱٫۲ متر در نظر گرفته شد). فاصله ی اولین ردیف المان های زبری از پنجه ی پرش (در محل تغییر مقطع برای تشکیل پرش گسسته) نیز به اندازه ی ارتفاع المان ها (۱٫۵ و ۳ سانتی متر) قرار داده شد. [۱۷، ۱۴] المان های زبری به گونه یی قرار داده شدند که تاج آنها هم تراز سطح بالادست و پایین دست حوضچه باشند. در پایین دست فلوم نیز برای تشکیل و تثبیت محل پنجه ی پرش در محل تغییر مقطع از یک دریچه ی کشویی به فاصله ی ۲٫۳ متر از محل اتمام بستر زبر استفاده شد. شکل ۳، نمای کلی از بستر زبر در فلوم آزمایشگاهی و نحوه ی قرارگیری المان های زبری را نشان می دهد. در مجموع، ۹۹ آزمایش مختلف بر روی مدل های فیزیکی متفاوت ساخته شده در آزمایشگاه برای کانال های منشوری و غیرمنشوری با نسبت های واگرایی مذکور انجام و مقادیر دبی، عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی برای هر آزمایش اندازه گیری شد. محدوده ی دبی آزمایش ها ۲٫۵ تا ۹٫۱۷ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شد. در شکل ۴، نمای یک پرش گسسته بر روی بستر زبر در مقطع واگرا مشاهده می شود.

جدول ۲. روابط معیارهای ارزیابی.

$$NRMSE = \left[\sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (X_{exp} - X_{cal})^2} \right] \times \frac{100}{M}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_1^n X_{exp} X_{cal} - (\sum_1^n X_{exp})(\sum_1^n X_{cal})}{\sqrt{[n \sum_1^n X_{exp}^2 - (\sum_1^n X_{exp})^2][n \sum_1^n X_{cal}^2 - (\sum_1^n X_{cal})^2]}} \right)^2$$

جدول ۲. روابط معیارهای ارزیابی مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. روابط تجربی ارائه شده با استفاده از دستور Solver در نرم‌افزار اکسل و با سعی و خطا تعیین شده است. در جدول ۲، x_{exp} مقادیر آزمایشگاهی، x_{cal} مقادیر محاسبه شده، n تعداد داده‌های آزمایشگاهی و M میانگین مقادیر آزمایشگاهی هستند.

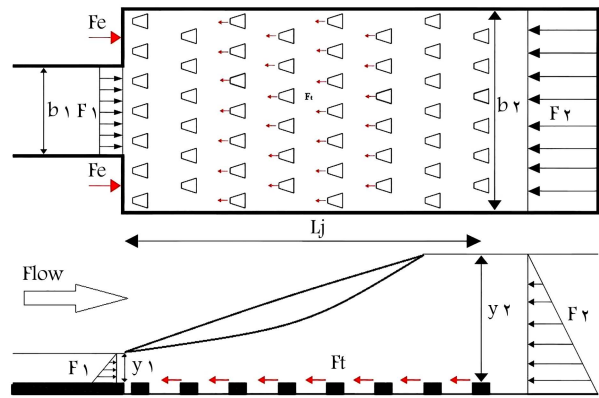
۳. نتایج و بحث

۱.۳. ضریب تنش برشی

تشکیل پرش هیدرولیکی در بستر زبر با افزایش تنش برشی همراه است و باعث افزایش استهلاک انرژی، کاهش عمق ثانویه و طول پرش می‌شود. به همین دلیل بررسی تنش برشی و پارامتر ضریب تنش برشی (نسبت نیروی برشی ناشی از حضور زبری بر نیروی فشار هیدرواستاتیکی در مقطع قبل از پرش)، اهمیت زیادی دارد. نیروی تنش برشی بستر زبر در پرش هیدرولیکی، که با در نظر گرفتن معادله‌ی مومنتم حاصل می‌شود، به صورت $F_T = 0.5 \varepsilon \gamma y_1^3$ و نیز معادله‌ی مذکور با احتساب مقطع واگرایی ناگهانی با پرش گسسته و اعمال نیروی فشاری وارد بر دیواره‌های مقطع واگرا f_e (شکل ۵)، پس از ساده‌سازی به صورت رابطه‌ی ۸ ارائه شده است: [۱۴]

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right) [B(2Fr_1 - \varepsilon) + 1] + 2Fr_1 B^2 = 0 \quad (8)$$

در مطالعه‌ی حاضر، ضریب تنش برشی بستر زبر در مقطع واگرا با استفاده از رابطه‌ی ۸ و مقادیر تنش برشی بستر صاف بر اساس رابطه‌ی ۱ محاسبه شدند. با در نظر گرفتن آنالیز ابعادی صورت‌گرفته، ضریب تنش برشی بستر زبر واگرا به عدد فرود اولیه‌ی جریان، نسبت واگرایی مقطع و ارتفاع بی‌بعد المان زبری بستگی دارد. در شکل ۶، ضریب تنش برشی در مقابل عدد فرود به ازاء تمامی نسبت‌های واگرایی و ارتفاع بی‌بعد زبری مشاهده می‌شود، که مطابق آن افزایش عدد فرود و کاهش نسبت واگرایی مقطع، باعث افزایش ضریب تنش برشی شده و تأثیر واگرایی مقطع در افزایش ضریب تنش برشی ناچیز بوده است. همچنین با مقایسه‌ی شکل‌های (۶ الف) و (۶ ب)، افزایش ارتفاع زبری نیز ضریب تنش برشی را افزایش می‌دهد. خطوط جریان هنگام عبور از روی المان‌های زبری، دچار برهم‌خوردگی و ایجاد گردابه در پشت المان‌های زبری می‌شوند (شکل ۷). با افزایش عدد فرود، گردابه‌های مذکور در پشت المان‌های متعددی تشکیل می‌شوند. در نتیجه افزایش ارتفاع المان‌های زبری و به تبع آن افزایش ارتفاع گردابه‌ی تشکیل یافته در پشت آن‌ها، باعث تلاطم بیشتر جریان، افزایش تنش برشی بستر و در نهایت افزایش ضریب تنش برشی می‌شود. همچنین ضریب تنش برشی بستر زبر در محدوده‌ی ارتفاع زبری $1/68 \leq H/y_1 \leq 1/15$ و در کانال منشوری و غیرمنشوری با



شکل ۵. طرح کلی از پرش گسسته بر روی بستر زبر.

که در آن، η راندمان پرش (افت انرژی نسبی)، Q دبی، ρ جرم مخصوص آب، μ لزجت دینامیکی، ε ضریب تنش برشی، g شتاب گرانش، b_1 عرض بالادست کانال، b_2 عرض پایین‌دست کانال، y_1 عمق اولیه‌ی پرش، y_2 عمق ثانویه‌ی پرش، H ارتفاع زبری، L_j طول پرش و I درصد تراکم المان‌های زبری (منظور از درصد تراکم زبری، نسبت مساحت اجزاء زبر به مساحت کل بستر حوضچه‌ی آرامش است و با استفاده از رابطه‌ی $I = \left(\frac{aN}{A}\right) \times 100$ تعیین می‌شود، که در آن، a مساحت یک جزء المان زبری، N تعداد المان‌های زبری و A مساحت کل حوضچه‌ی آرامش هستند). در شکل ۵، شماتیکی از پرش گسسته در واگرایی ناگهانی بر روی بستر زبر به همراه نیروی وارد مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن روش تحلیل ابعادی پی - باکینگهام و انتخاب μ و g به عنوان پارامترهای تکراری می‌توان به صورت رابطه‌ی ۴ نوشت:

$$f_2(Fr_1, Re_1, \frac{b_1}{y_1}, \frac{b_2}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{H}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, I, \eta, \varepsilon) = 0 \quad (4)$$

با تقسیم دو پارامتری بعد $\frac{b_2}{y_1}$ و $\frac{b_1}{y_1}$ بر هم، پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه‌ی ۵ خواهد بود:

$$f_3(Fr_1, Re_1, \frac{b_1}{b_2}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{H}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, I, \eta, \varepsilon) = 0 \quad (5)$$

با توجه به ثابت بودن تراکم زبری و این‌که مقادیر عدد رینولدز در مطالعه‌ی حاضر بسیار بزرگ (بازه‌ی عدد رینولدز در محدوده‌ی 13029 و 33875) هستند، می‌توان از اثر لزجت و تراکم صرف‌نظر کرد، [۱۹، ۱۸] و رابطه‌ی ۵ را به شکل رابطه‌ی ۶ بیان کرد:

$$f_4(Fr_1, \frac{b_1}{b_2}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{H}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \eta, \varepsilon) = 0 \quad (6)$$

پارامترهای η ، ε ، $\frac{L_j}{y_1}$ و $\frac{y_2}{y_1}$ جزء پارامترهای وابسته‌ی مورد بررسی مطالعه‌ی حاضر هستند، بنابراین می‌توان رابطه‌ی ۶ را به صورت رابطه‌ی ۷ نوشت:

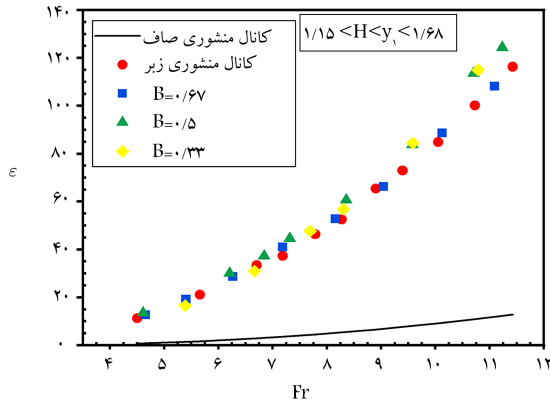
$$\eta, \varepsilon, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1} = f_5(Fr_1, B = \frac{b_1}{b_2}, \frac{H}{y_1}) \quad (7)$$

۳.۲. معیارهای ارزیابی

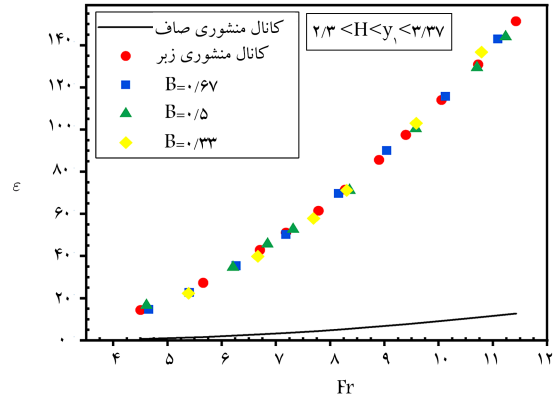
در مطالعه‌ی حاضر، برای ارائه‌ی روابط تجربی جهت پیش‌بینی مشخصات پرش گسسته بر روی بستر زبر، از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R^2) و خطای

جدول ۳. روابط ارائه شده برای ضریب تنش برشی بستر زیر واگرایی ناگهانی.

ارتفاع زبری	رابطه	R^2	$NRMSE$ (%)
$1/15 \leq \frac{H}{y_1} \leq 1/68$	$\varepsilon = 0.3593 Fr_1^{2.4} - 5.2927 \ln(B) - 3.95$	0.992	6.4
$2/3 \leq \frac{H}{y_1} \leq 3.37$	$\varepsilon = 0.7738 Fr_1^{2.1874} - 0.464 \ln(B) - 7.125$	0.999	2.1
$1/15 \leq \frac{H}{y_1} \leq 3.37$	$\varepsilon = 0.506 \left(\frac{H}{y_1}\right)^{0.4292} Fr_1^{2.1468} - 8.065 \ln(B) - 9.983$	0.993	5.4



(ب)



(الف)

شکل ۶. ضریب تنش برشی بستر در مقابل عدد فرود جریان در نسبت‌های بازشدگی مختلف.

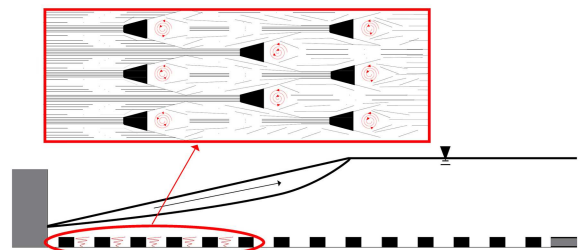
مربعات نرمال‌سازی شده ($NRMSE$) مقایسه شده است. مطابق جدول ۳، (R^2) و ($NRMSE$) برای روابط ارائه شده، مقادیر قابل قبولی دارد.

۲.۳. نسبت اعماق

نسبت عمق ثانویه به عمق اولیهی پرش گسسته در بستر زیر به ازاا اعداد فرود مختلف و نسبت‌های بی‌بعد ارتفاع اجزاء زیر، برای تمامی نسبت‌های واگرایی در مقطع مطالعه‌ی حاضر را می‌توان در شکل ۹ مشاهده کرد. مطابق قسمت‌های الف و ب در شکل ۹، افزایش عدد فرود موجب افزایش نسبت اعماق پرش و کاهش نسبت واگرایی، سبب کاهش نسبت اعماق شده است. لذا کمترین مقادیر مربوط به نسبت اعماق پرش در بستر زیر برای تمامی اعداد فرود و هر دو ارتفاع بی‌بعد زبری به نسبت واگرایی ۰/۳۳ اختصاص یافته است. همچنین با توجه به شکل ۹ چنین استنباط می‌شود که در واگرایی ناگهانی (کانال غیرمنشوری) برای بستر زیر، نسبت اعماق پرش بسیار کمتر از مقادیر حاصل برای کانال‌های منشوری با هر دو بستر صاف و زیر است. از آنجایی که عامل اصلی کاهش عمق ثانویهی پرش، افزایش تنش برشی بستر است و از طرفی با توجه به این‌که با افزایش ارتفاع المان زبری، تنش برشی افزایش می‌یابد؛ افزایش ارتفاع زبری، سبب کاهش بیشتر عمق ثانویهی پرش می‌شود. مقدار متوسط کاهش عمق مزدوج پرش بستر زیر در مقایسه با بستر صاف برای تمامی نسبت‌های بازشدگی و محدوده‌های ارتفاع بی‌بعد المان زبری $1/68 \leq H/y_1 \leq 1/15$ و $2/3 \leq H/y_1 \leq 3.37$ به ترتیب ۱۲٪، ۱۷٪ و ۲۰٪ الی ۳۰٪ به دست آمده است.

همچنین برای مقایسه‌ی نسبت اعماق پرش مطالعه‌ی حاضر در دو نسبت بی‌بعد ارتفاع زبری با مطالعات پیشین، پارامتر کاهش نسبی عمق ثانویه بر اساس رابطه‌ی ۹ محاسبه شد: [۸]

$$D(\%) = \frac{D^* - D_B}{D^*} * 100 \quad (9)$$

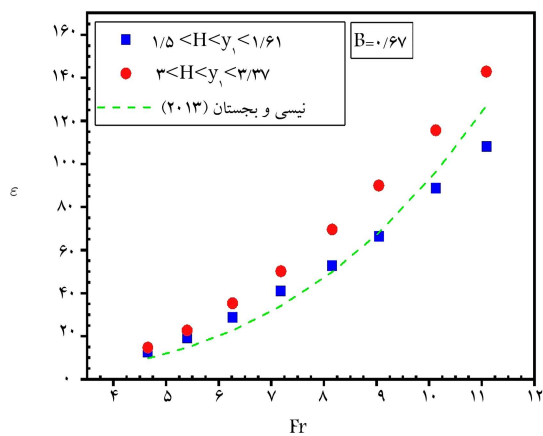


شکل ۷. تشکیل جریان گردابه‌یی در پشت المان‌های زبری با عبور خطوط جریان از روی آن‌ها.

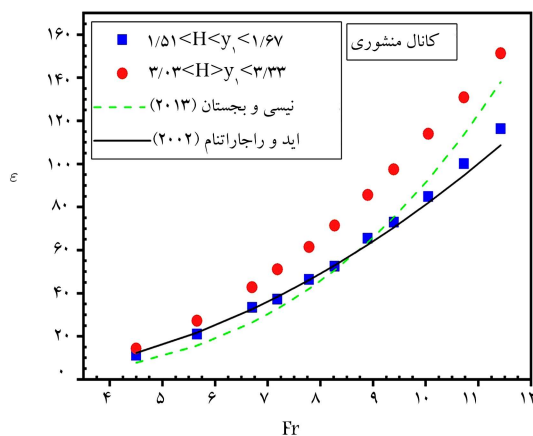
نسبت‌های بازشدگی ۰/۶۷، ۰/۵، ۰/۳۳ به ترتیب و به صورت متوسط ۰/۸۹، ۱۰/۰۲، ۱۰/۹۹، ۱۱/۱۲ برابر و برای $2/3 \leq H/y_1 \leq 3.37$ نیز در کانال منشوری و نسبت‌های بازشدگی مذکور، ضریب تنش برشی بستر زیر به ترتیب و به صورت متوسط ۱۳/۰۷، ۱۳/۱۹، ۱۳/۱۳، ۱۳/۲ برابر ضریب تنش برشی کانال منشوری با بستر صاف محاسبه شده است.

برای مقایسه‌ی ضریب تنش برشی بستر زیر مطالعه‌ی حاضر با مطالعات پیشین، مقادیر ضریب تنش برشی در مقابل عدد فرود در شکل ۸ (الف، ب، ج و د) مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها برای کانال منشوری و غیرمنشوری با بستر زیر ضریب تنش برشی مطالعه‌ی حاضر در محدوده‌ی ارتفاع زبری $1/68 \leq H/y_1 \leq 1/15$ هم‌پوشانی نزدیک‌تری با تحقیقات انجام شده دارد. [۱۳] همچنین مقادیر ضریب تنش برشی مطالعه‌ی حاضر با ارتفاع نسبی زبری $2/3 \leq H/y_1 \leq 3.37$ برای کانال منشوری و غیرمنشوری (مطابق شکل ۸ الف، ب، ج و د) به ازاا تمامی اعداد فرود، مقادیر بیشتری نسبت به مطالعات اخیر، [۱۳] دارد.

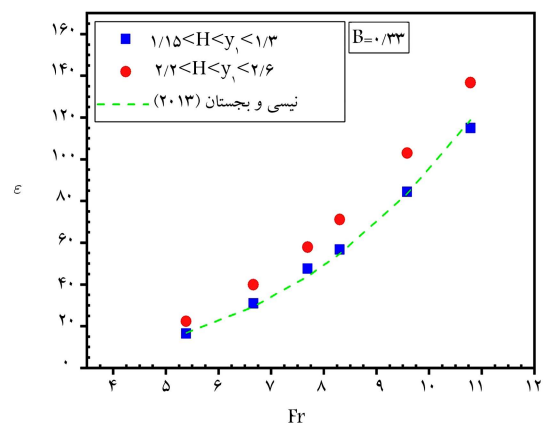
در جدول ۳، روابط غیرخطی حاصل در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن داده‌های آزمایشگاهی در ارتفاع‌های زبری متفاوت ارائه شده است. روابط مذکور با استفاده از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R^2) و خطای جذر میانگین



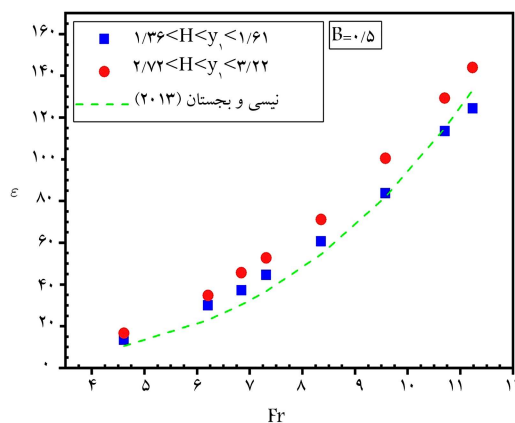
ب) کانال غیر منشوری با نسبت بازشدگی ۰/۶۷



الف) کانال منشوری

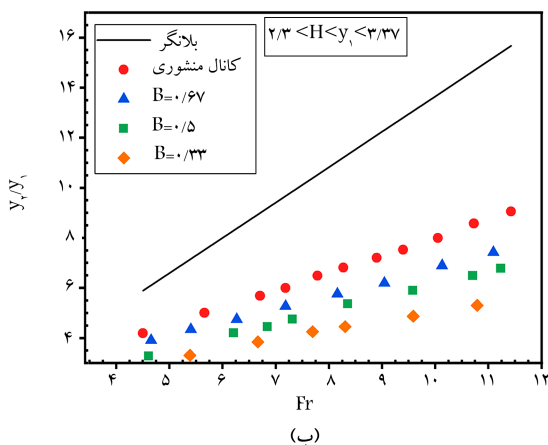


د) کانال غیر منشوری با نسبت بازشدگی ۰/۳۳

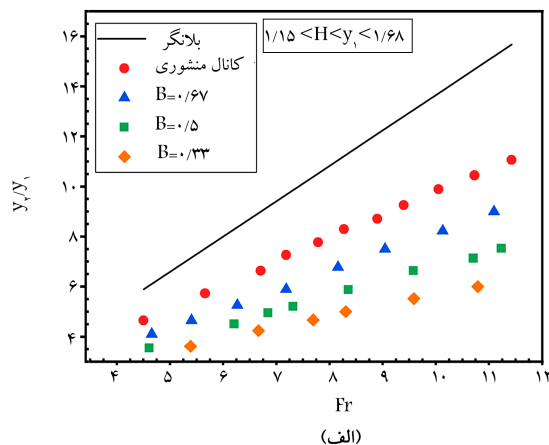


ج) کانال غیر منشوری با نسبت بازشدگی ۰/۵

شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب تنش برشی با پژوهش‌های پیشین.



ب)



الف)

شکل ۹. نسبت اعماق پرش در مقابل عدد فرود جریان در نسبت‌های واگرایی مختلف.

با مطالعات هربراند (۱۹۷۳)^[۱]، الحمید (۲۰۰۴)^[۶]، متین و همکاران (۱۹۹۸)^[۵]، پرش کلاسیک مقادیر بیشتری دارد و مطابقت و هم‌پوشانی نزدیکی با مطالعات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)^[۸]، نیسی و بجهستان (۲۰۱۳)^[۱۲] دارد. همچنین برای ارتفاع بی‌بعد المان‌های زبری در محدوده $2/3 \leq H/y_1 \leq 3/37$ ، پارامتر مذکور در تمامی نسبت‌های واگرایی مقادیر بیشتری نسبت به نتایج سایر پژوهش‌گران و پرش

که در آن، D^* نسبت اعماق حاصل از رابطه‌ی بلانگر (جدول ۱) و D_B نسبت اعماق پرش گسسته در بستر زبر و صاف است. مقادیر متوسط پارامتر کاهش نسبی عمق ثانویه برای نسبت‌های واگرایی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، که مطابق آن پارامتر کاهش نسبی عمق ثانویه‌ی مطالعه‌ی حاضر، در ارتفاع بی‌بعد المان زبری با محدوده‌ی $1/15 \leq H/y_1 \leq 1/68$ برای تمامی نسبت‌های واگرایی در مقایسه

جدول ۴. روابط ارائه شده برای نسبت اعماق بر روی بستر زبر.

ارتفاع زبری	نوع کانال	رابطه	R^2	$NRMSE$ (%)
$1/15 \leq \frac{H}{y_1} \leq 3/37$	غیرمنشوری	$\frac{y_1}{y_2} = 0.6736 \left(\frac{H}{y_1}\right)^{-0.1992} Fr_1 + 2.0576 \ln(B) + 2.0559$	۰٫۹۶۸	۴٫۷
$1/51 \leq \frac{H}{y_1} \leq 3/33$	منشوری	$\frac{y_1}{y_2} = 1.0615 \left(\frac{H}{y_1}\right)^{-0.296} Fr_1 + 0.573$	۰٫۹۹۸	۱٫۲

جدول ۵. روابط ارائه شده برای طول پرش بر روی بستر زبر.

ارتفاع زبری	نوع کانال	رابطه	R^2	$NRMSE$ (%)
$1/15 \leq \frac{H}{y_1} \leq 3/37$	غیرمنشوری	$\frac{L_j}{y_1} = 8.6976 \left(\frac{H}{y_1}\right)^{-0.138} Fr_1 - 2.0677 \ln(B) - 1.4655$	۰٫۹۹۴	۲
$1/51 \leq \frac{H}{y_1} \leq 3/33$	منشوری	$\frac{L_j}{y_1} = 7.539 \left(\frac{H}{y_1}\right)^{-0.2125} Fr_1 - 6.13$	۰٫۹۹۲	۲٫۷

۱۱ (ب، ج و د) کاهش نسبت واگرایی سبب افزایش طول پرش شده است، به گونه‌یی که نسبت واگرایی ۰٫۳۳، مقادیر طول پرش بزرگ‌تری در مقایسه با دیگر نسبت‌ها دارد. وسعت کم جت ورودی جریان، گستردگی آب ساکن و نیز برخورد جت ورودی با دیواره‌ی کانال در پرش گسسته می‌تواند از دلایل افزایش طول پرش در کانال غیرمنشوری باشد. برخورد جت ورودی جریان به دیواره‌ی کانال به مرور زمان می‌تواند باعث فرسایش دیواره شود. همچنین وجود بستر زبر موجب افزایش تنش برشی بستر و کاهش شدت برخورد جت ورودی با دیواره‌ی کانال شده و کاهش طول پرش را به دنبال داشته است. همچنین طول پرش مربوط به المان‌های زبری با ارتفاع نسبی $2/3 \leq H/y_1 \leq 3/37$ در مقایسه با بستر صاف مطالعه‌ی حاضر، USBR (کانال منشوری با بستر صاف) و بستر زبر با ارتفاع المان‌های زبری $1/68 \leq H/y_1 \leq 1/15$ مقادیر کمتری دارد. این در حالی است که نسبت طول پرش به عمق اولیه‌ی بستر زبر و صاف، با کاهش عدد فرود همگرا تر می‌شود و این موضوع در کانال منشوری، بیشتر به چشم می‌خورد. متوسط کاهش طول پرش در کانال منشوری و غیر منشوری زبر با نسبت‌های واگرایی ۰٫۶۷، ۰٫۵، ۰٫۳۳ و برای ارتفاع المان‌های زبری $1/68 \leq H/y_1 \leq 1/15$ به ترتیب ۶٫۸٪، ۲۹٪، ۶٪ و ۷٫۵٪ و برای ارتفاع المان‌های زبری $3/37 \leq H/y_1 \leq 2/3$ به ترتیب ۴۳٪، ۱۴٫۴٪، ۱۲٫۶٪ و ۱۲٫۸٪ محاسبه شده است.

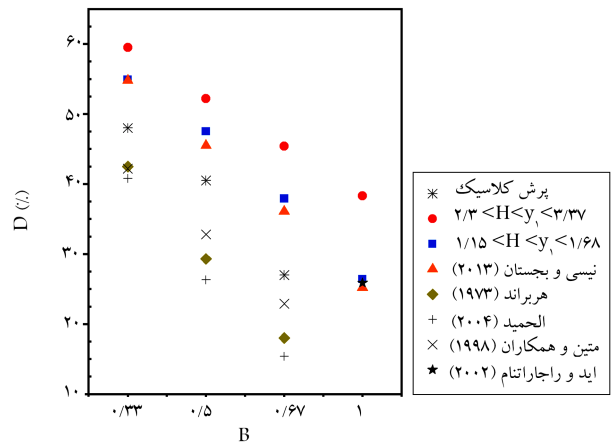
در جدول ۵، روابط ارائه شده مربوط به طول پرش بر روی بستر زبر ارائه شده است، که مطابق آن مشخص است هر دو رابطه می‌توانند تخمین دقیقی از طول پرش را ارائه دهند. قابل توجه است که در کانال غیرمنشوری، نتایج حاصل از رابطه‌ی مرتبط، همبستگی دقیق‌تری با نتایج آزمایشگاهی طول پرش داشته است.

۴.۳. راندمان پرش

افت انرژی نسبی جریان یا همان راندمان پرش از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید، که در آن (E_1) و (E_2) به ترتیب انرژی مخصوص بالادست و پایین دست جریان هستند.

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} * 100 \quad (10)$$

در شکل ۱۲، راندمان پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود برای نسبت‌های واگرایی و ارتفاع‌های مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن در تمام حالت‌های واگرایی مطالعه‌ی حاضر و مطالعات پیشین، روند افزایش راندمان پرش با افزایش عدد فرود، در مقادیر فرودهای کمتر با شیب بیشتری خود را نشان داده است. از مقایسه‌ی نتایج راندمان مطالعه‌ی حاضر با مطالعات الحمید (۲۰۰۴) [۶] و



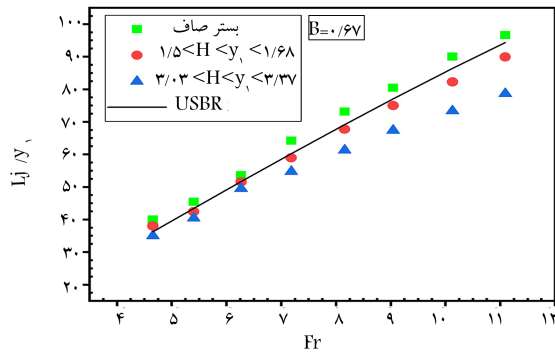
شکل ۱۰. مقایسه‌ی مقادیر متوسط کاهش نسبی عمق ثانویه مطالعه‌ی حاضر با پژوهش‌گران پیشین در نسبت‌های واگرایی مختلف.

کلاسیک دارد. علت این امر می‌تواند وجود بستر زبر با شکل المان‌های متفاوت نسبت به مطالعات سایر پژوهش‌گران و تأثیر ارتفاع در افزایش تنش برشی بستر باشد. متوسط بیشینه‌ی مقدار پارامتر کاهش نسبی عمق ثانویه در محدوده‌ی ارتفاع زبری $2/3 \leq H/y_1 \leq 3/37$ و در نسبت بازشدگی ۰٫۳۳ رخ داده و مقدار آن برابر ۵۹٫۵٪ بوده است.

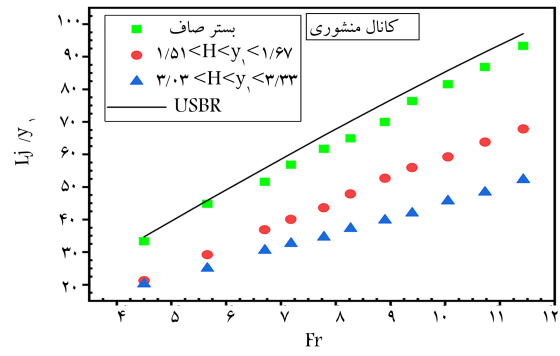
همچنین در جدول ۴، روابط خطی نسبت اعماق پرش برای کانال منشوری $(B = 1)$ و غیرمنشوری با بستر زبر ارائه شده است، که مطابق آن، ضریب همبستگی (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌سازی شده $(NRMSE)$ مقادیر مورد قبولی دارد و صحت و دقت روابط ارائه شده را نشان می‌دهد.

۳.۳. طول نسبی پرش

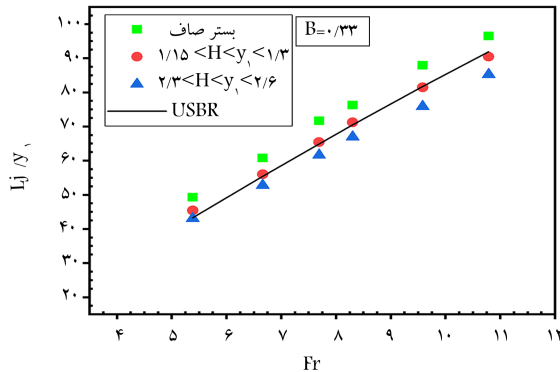
برای بررسی و مقایسه‌ی طول پرش در واگرایی ناگهانی با بستر زبر و صاف، مقادیر طول نسبی پرش در مقابل عدد فرود، برای نسبت‌های واگرایی و ارتفاع المان‌های زبری مختلف در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، مقادیر طول نسبی پرش به صورت خط ممند (طول پرش کانال منشوری با بستر صاف USBR) طبق رابطه‌ی $\frac{L_j}{y_1} = 220 \tan h \left(\frac{Fr_1 - 1}{22} \right)$ [۶] تعیین شده است. با توجه به شکل اخیر، مقادیر طول نسبی پرش در تمامی نسبت‌های واگرایی با افزایش عدد فرود افزایش یافته است. با مقایسه‌ی طول نسبی پرش مربوط به بستر صاف مطالعه‌ی حاضر و USBR (کانال منشوری) مشاهده می‌شود که در کانال غیرمنشوری مطابق شکل



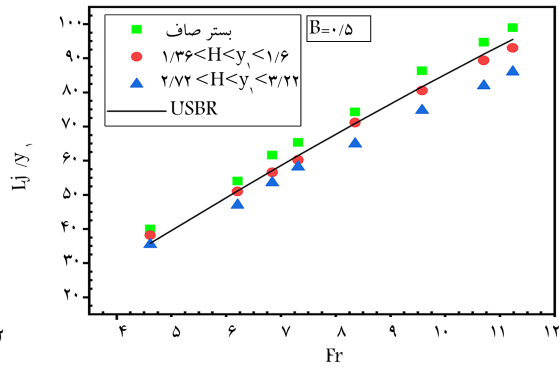
(ب) نسبت واگرایی ۰/۶۷



(الف) کانال منشوری؛

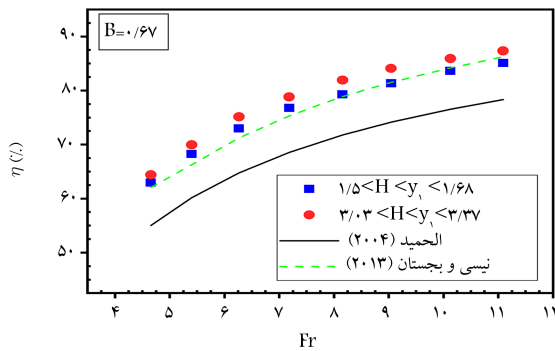


(د) نسبت واگرایی ۰/۳۳

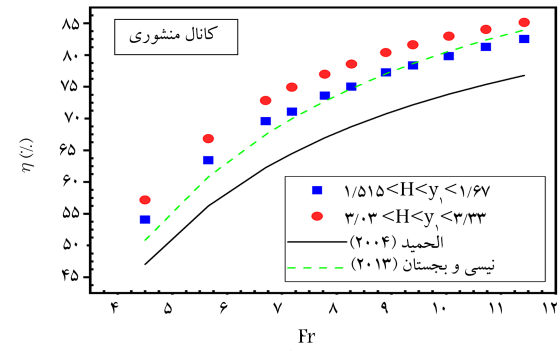


(ج) نسبت واگرایی ۰/۵

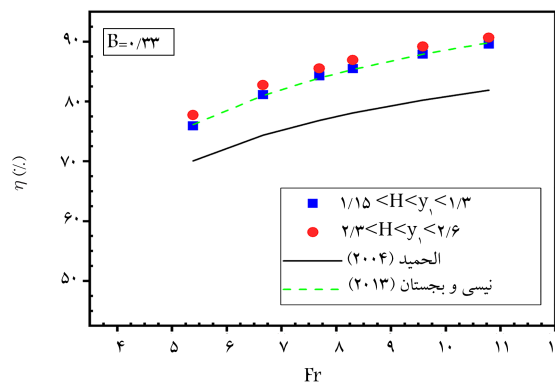
شکل ۱۱. طول نسبی پرش در مقابل فرود به ازاء تمامی نسبت‌های بازشدگی.



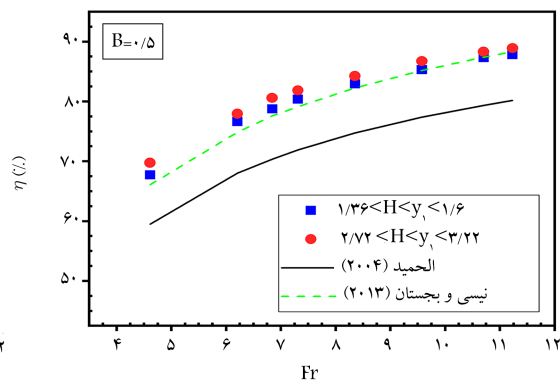
(ب) نسبت واگرایی ۰/۶۷



(الف) کانال منشوری؛



(د) نسبت واگرایی ۰/۳۳



(ج) نسبت واگرایی ۰/۵

شکل ۱۲. راندمان پرش در مقابل فرود به ازاء تمامی نسبت‌های بازشدگی و مقادیر ارتفاع نسبی.

شدن جریان در کانال‌های غیرمنشوری شد، از شدت برخورد جت ورودی جریان به دیواره‌ی کناری کانال در پرش گسسته، که به مرور زمان می‌تواند باعث فرسایش دیواره‌ی کانال شود، کاهش یافته است. نتایج کلی به این صورت به دست آمده است:

۱. ضریب تنش برشی بستر زبر در محدوده‌ی ارتفاع زبری $1/15 \leq H/y_1 \leq 1/68$ برای کانال منشوری و غیرمنشوری با نسبت‌های واگرایی $0/5, 0/67, 0/33$ و به ترتیب $9/89, 10/02, 10/99, 11/12$ برابر و در محدوده‌ی $3/37 \leq H/y_1 \leq 2/3$ نیز ضریب تنش برشی بستر زبر به ترتیب $13/07, 13/19, 13/13, 13/2$ برابر ضریب تنش برشی کانال منشوری با بستر صاف بوده است.

۲. افزایش تنش برشی بستر موجب کاهش عمق مزدوج پرش شده است. مقادیر متوسط کاهش عمق مزدوج پرش بستر زبر در مقایسه با بستر صاف برای تمامی نسبت‌های بازشدگی در محدوده‌ی ارتفاع بی‌بعد المان‌های زبری $1/15 \leq H/y_1 \leq 1/68$ و $H/y_1 \leq 3/37$ به ترتیب 12% تا 17% و 20% تا $30/4\%$ به دست آمده است. همچنین کانال غیرمنشوری با بستر زبر در نسبت بازشدگی $0/33$ در مقایسه با کانال منشوری با بستر صاف، سبب کاهش عمق مزدوج در حدود $59/5\%$ شده است.

۳. طول پرش هیدرولیکی در کانال منشوری و غیرمنشوری با بستر زبر در ارتفاع نسبی $1/15 \leq H/y_1 \leq 3/37$ و $1/68 \leq H/y_1 \leq 2/3$ برای تمامی نسبت‌های واگرایی نسبت به بستر صاف به ترتیب 6% تا 29% و $6/12\%$ تا 43% کاهش یافته است.

۴. راندمان پرش در کانال منشوری و غیرمنشوری با بستر زبر برای تمامی نسبت‌های واگرایی در هر دو محدوده‌ی ارتفاعی، نسبت به کانال منشوری با بستر صاف در حدود 10% تا 29% افزایش یافته است، که بیشینه‌ی مقدار آن در نسبت واگرایی $0/33$ رخ داده است.

۵. با توجه به موارد ذکر شده، حوضچه‌های واگرا با بستر زبر با امکان تشکیل پرش گسسته در آن‌ها علاوه بر این‌که از خطر پدیده‌ی حفره‌زایی به دور هستند، بر حسب نیاز می‌توانند جایگزین مناسبی برای حوضچه‌های تیپ USBR باشند.

نیسی و بجستان (۲۰۱۳)^[۱۴] می‌توان نتیجه گرفت که افت انرژی نسبی با افزایش ارتفاع زبری افزایش یافته است، به طوری که بستر زبر با محدوده‌ی ارتفاع نسبی $3/37 \leq H/y_1 \leq 2/3$ در مطالعه‌ی حاضر، بیشترین راندمان پرش را نسبت به دو مطالعه‌ی اخیر داشته و در محدوده‌ی $1/68 \leq H/y_1 \leq 1/15$ ، بیشترین راندمان نسبت به پژوهش الحمید (۲۰۰۴)^[۶] و با نتایج مطالعات نیسی و بجستان (۲۰۱۳)^[۱۴] همبستگی بسیار نزدیکی داشته است. با در نظر گرفتن شکل ۱۲ (الف، ب، ج و د) و بررسی تأثیر نسبت واگرایی در راندمان پرش هیدرولیکی مشاهده شد که کانال‌های واگرا با بستر زبر، در مقایسه با کانال منشوری با بستر صاف و زبر در هر دو ارتفاع زبری، راندمان پرش بیشتری دارند و در بین نسبت‌های واگرایی، نسبت $0/33$ از آن‌جایی که به ازاء تمامی مقادیر فرود در مقایسه با سایر نسبت‌های واگرایی، کمترین مقدار عمق پایاب را داشته است، بیشترین مقادیر راندمان پرش را نیز شامل شده است. همچنین مقدار متوسط راندمان پرش در $1/15 \leq H/y_1 \leq 3/37$ و در کانال منشوری و غیرمنشوری با نسبت‌های واگرایی $0/5, 0/67, 0/33$ به ترتیب برابر 74% ، 77% و 84% بوده است.

در ارتفاع زبری $3/37 \leq H/y_1 \leq 2/3$ نیز برای نسبت‌های واگرایی ذکر شده‌ی اخیر، متوسط راندمان پرش به ترتیب برابر 78% ، 80% ، $85/5\%$ بوده است. از آن‌جایی که متوسط راندمان پرش در کانال منشوری با بستر صاف $66/8\%$ است، در مقایسه با کانال منشوری با بستر صاف ($B = 1$)، کانال منشوری و غیرمنشوری با بستر زبر در تمامی نسبت‌های واگرایی سبب افزایش راندمان پرش در حدود 10% تا 29% شده است، که بیشینه‌ی مقدار آن در نسبت واگرایی $0/33$ رخ داده است.

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، ۹۹ مدل آزمایشگاهی مختلف با بستر زبر برای کانال منشوری و غیرمنشوری با نسبت‌های واگرایی $0/5, 0/67, 0/33$ با دو ارتفاع المان‌های زبری آزمایش شد. بستر زبر علاوه بر این‌که باعث افزایش تنش برشی کف و متلاطم

پانویس‌ها

1. repelled hydraulic jump
2. spatial hydraulic jump
3. transitional hydraulic jump
4. classical hydraulic jump

منابع (References)

1. Herbrand, K. "The spatial hydraulic jump", *Journal of Hydraulic Research*, **11**(3), pp. 205-218 (1973).
2. Rajaratnam, N. and Subramanya, K. "Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions", *Journal of the*

Hydraulics Division, **94**(2), pp. 481-504 (1968).

3. Bremen, R. and Hager, W.H. "T-jump in abruptly expanding channel", *Journal of Hydraulic Research*, **31**(1), pp. 61-78 (1993).
4. Unny, T.E. "The spatial hydraulic jump", Proc. 10th Congress of IAHR, London, pp. 32-42 (1963).
5. Matin, M.A., Alhamid, A.A. and Negm, A.M. "Prediction of sequent depth ratio of hydraulic jump in abruptly expanding channel", *Egyptian Journal for Engineering Sciences & Technology*, **2**(1), pp. 31-36 (1998).
6. Alhamid, A.A. "S-jump characteristics on sloping basins", *Journal of Hydraulic Research*, **42**(6), pp. 657-662 (2004).

7. Matin, M.A., Hasan, M.R. and Islam, M.A. "Experiment on a hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel", Department of Water Resources Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, 1000, pp. 65-77 (2008).
8. Ead, S.A. and Rajaratnam, N. "Hydraulic jumps on corrugated beds", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(7), pp. 656-663 (2002).
9. Rajaratnam, N. "Hydraulic jump on the rough bed", *Transaction of the Engineering Institute of Canada*, **11**(A-2), pp. 1-8 (1968).
10. AboulAtta, N., Ezizah, G., Yousif, N. and et al. "Design of stilling basins using artificial roughness", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, **3**(2), pp. 65-71 (2011).
11. Ellayn, A.F. and Sun, Z.L. "Hydraulic jump basins with wedge-shaped baffles", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, **13**(7), pp. 519-525 (2012).
12. Parsamehr, P., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A. and et al. "Characteristics of hydraulic jump on the rough bed with the adverse slope", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **23**(3), pp. 301-307 (2017).
13. Zare, H.K. and Doering, J.C. "Forced hydraulic jumps below abrupt expansions", *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**(8), pp. 825-835 (2010).
14. Neisi, K. and Shafai, B.M. "Characteristics of S-jump on roughened bed stilling basin", *Journal of Water Sciences Research*, **5**(2), pp. 25-34 (2013).
15. Hassanpour, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and et al. "An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed", *Water*, **9**(12), p. 945 (2017).
16. Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Ghahramanzadeh, A. "Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **44**(10), pp. 850-859 (2017).
17. Mohamed Ali, H.S. "Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump", *Journal of Hydraulic Engineering*, **117**(1), pp. 83-93 (1991).
18. Rajaratnam, N. "Turbulent jets (Vol. 5)", Elsevier (1976).
19. Hager, W.H. and Bremen, R. "Classical hydraulic jump: sequent depths", *Journal of Hydraulic Research*, **27**(5), pp. 565-585 (1989).