مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و دوم، شماره۶، سال۱۴۰۱

بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در تنگ‌شدگی ناگهانی با بستر زبر

رسول دانشفراز [۱*]، میرامیر نجیبی [۲]

۱- استاد بخش مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه
۲- کارشناسی ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه

*daneshfaraz@maragheh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین معضلاتی که در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی وجود دارد، انرژی مخرب جنبشی جریان است. همواره کارشناسان سعی در طراحی مناسب و کاهش اثر این نیروی مخرب در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی را دارند. تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر انقباض ناگهانی همراه با زبری کف مقطع تنگ‌شدگی برمیزان استهلاک انرژی درجریان فوق بحرانی در کانال مستطیلی شکل انجام شد. سه نوع تنگ‌شدگی با عرض‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و سه زبری با قطرهای متوسط 2.08, 1.28, 0.8 =D_{50} سانتی‌متر و محدوده عدد فرود ۷/۵ ≤ Fr_A ≤ ۲/۵ و انقباض نسبی ۰/۵تا ۰/۸۳مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، استهلاک انرژی نسبی بالادست ($\Delta E/E_A$) افزایش می‌یابد. همچنین با بکارگیری زبری در کف هرسه مقطع تنگ‌شدگی مشاهده شد که استهلاک انرژی بطور چشم‌گیری افزایش یافت بطوریکه بیشترین استهلاک انرژی با ۷۸/۳۵ درصد افزایش مربوط به تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر و کمترین استهلاک انرژی با ۴۳/۳۵ درصد افزایش مربوط به تنگ‌شدگی ۵ سانتی‌متری است. روابط استخراج شده برای تخمین استهلاک انرژی نسبی نشان داد که نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی هماهنگی خوبی با ضریب همبستگی ۰/۹۲۷ و خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده ۰/۰۲ دارند.

واژگان کلیدی: استهلاک انرژی نسبی، تنگ‌شدگی ناگهانی، زبری کف، عدد فرود.

۱- مقدمه

یکی از اساسی‌ترین مشکلات هیدرولیکی در پایین‌دست سازه-های هیدرولیکی انرژی جنبشی بسیار زیاد و مخرب جریان است. امروزه پژوهشگران سعی دارند، با طراحی سازه‌های الحاقی اثر مخرب جریان را کاهش داده و از فرسایش و تخریب دیواره‌ها و بستر پایین‌دست کانال جلوگیری کنند. ایجاد مقطع تنگ‌شدگی به همراه زبری کف بستر کانال می‌تواند یکی از سازه‌هایی باشد که با تشکیل پرش هیدرولیکی، بخش قابل توجهی از انرژی جریان را مستهلک می‌کند. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی تنگ‌شدگی با زبری‌کف‌بستر می باشد که تاکنون بصورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. محدوده مطالعات تحقیق حاضر را می‌توان به دو بخش اساسی، تحقیقات مربوط به پرش هیدرولیکی با مقطع تنگ‌شدگی و زبری در مسیر جریان تقسیم کرد.

تحقیقات اولیه در خصوص انقباض مربوط به مطالعات هاگر و همکاران [1] و یاسودا و هاگر [2] است. رینائور و هاگر [3] با مطالعه آزمایشگاهی شوت انقباض‌یافته به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی و عدد فرود بالادست، به‌ترتیب عمق نسبی جریان و انقباض نسبی جریان افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه آزمایشگاهی وو و مولیناس [4] روی کانال روباز با انقباض کوتاه نشان داد که ضریب دبی از نسبت بازشدگی محل انقباض تاثیر می‌پذیرد. جان و چانگ [5] پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی را در یک شوت مایل مستطیلی با انقباض تدریجی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود، استهلاک انرژی نسبی در تمامی زوایا و انقباض‌ها افزایش و با افزایش شیب کف کانال طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. صادقی و همکاران [6] با بررسی آزمایشگاهی تاثیر دیواره‌ها در تبدیل واگرا به این نتیجه رسیدند که، به ازاء طول ثابت دیواره تبدیل، انحنای دیواره‌ها باعث کاهش سرعت و کاهش نرخ استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی می‌شود. دانشفراز و همکاران [7] با مطالعه آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی، در تنگ‌شدگی و واگرایی، به این نتیجه رسیدند که اتلاف انرژی در تنگ‌شدگی در مقایسه با واگرایی به طور متوسط ۸/۷۴ درصد کاهش می‌یابد. دانشفراز و همکاران [8] با بررسی عددی تنگ‌شدگی ناگهانی، رفتار جریان درپیچ ۹۰ درجه با حضور و عدم حضور تنگ‌شدگی در محل پیچ پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از تنگ‌شدگی در محل پیچ ۹۰ درجه باعث افزایش افت فشار در این ناحیه است. مطالعه آزمایشگاهی استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ناگهانی توسط دانشفراز و همکاران [9] نشان داد که میزان استهلاک انرژی ناشی از تنگ‌شدگی ناگهانی بیشتر از پرش هیدرولیکی است. بطوریکه استهلاک انرژی نسبت به بالادست به میزان ۱۱/۴۳ درصد و نسبت به پایین‌دست به میزان ۶۵/۰۳ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد است. دانشفراز و همکاران [10] تاثیر میزان واگرایی تدریجی و بستر زبرشده با شن را روی مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حوضچه‌های آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر در تمامی نسبت‌های بازشدگی، عمق مزدوج پرش را در مقایسه با واگرای با بستر صاف به طور متوسط ۱۲ تا ۱۶ درصد کاهش می‌دهد.

نائب‌زاده و همکاران [11] با بررسی شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با واگرایی تدریجی به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحات مشبک و واگرایی دیواره‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق استخر و عمق پایین دست می‌شود. استفاده از صفحات مشبک و دیواره واگرایی و استفاده هم‌زمان از آنها به ترتیب باعث افزایش ۲۵، ۴۴ و ۴۸ درصدی راندمان استهلاک انرژی می‌شود. دانشفراز و همکاران [12] با بررسی عددی تاثیر انقباض ناگهانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر برمیزان استهلاک انرژی درجریان فوق بحرانی، به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان تنگ‌شدگی استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین دانشفراز و همکاران [13] با بررسی عددی به تاثیر تغییر عرض کانال با تنگ‌شدگی با دیواره صاف ناگهانی پرداختند. به دنبال این تحقیق، دانشفراز و همکاران [14] به بررسی عددی تاثیر تنگ‌شدگی هلالی شکل با عرض‌های مختلف پرداختند. در هر دو تحقیق فوق، نتایج نشان از افزایش استهلاک انرژی در استفاده از انواع تنگ‌شدگی‌ها را دارد. نائب-زاده و همکاران [15] به بررسی عددی شیب‌شکن‌های قائم در حضور صفحات مشبک و واگرایی تدریجی دیواره پرداختند. مدل آشفتگی بکار رفته در این تحقیق مدل *RNG* انتخاب شد چرا که نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی نتایج بهتری ارائه داده بود. همچنین نتایج آنها نشان داد، استهلاک انرژی نسبی به دلیل شدت برخورد جت با کف، افزایش و عمق نسبی استخر کاهش می‌یابد.

دسته دیگر مطالعات، مربوط به استهلاک انرژی در بستر زبر است، از میان آن‌ها می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد.

اولین مطالعه زبری کف بستر مربوط به تحقیق راجاراتنام [16] است که با مطالعه آزمایشگاهی نشان داد، طول غلتاب و طول پرش و عمق ثانویه پرش روی بستر زبر در مقایسه با بسترصاف کاهش می‌یابد. ایزدجو [17] با بررسی آزمایشگاهی بستر زبر شده با زبری‌های ذوزنقه‌ای نشان دادند که، طول نسبی پرش و استهلاک انرژی کل، افزایش می‌یابد. عباسپور و همکاران [18]، توکیای و همکاران [19] والزبا وهمکاران [20] با مطالعه روی انواع بسترهای زبر و مقایسه آنها به این نتیجه رسیدند که در اعداد فرود بالاتر، میزان کاهش عمق نسبی در بسترهای زبر،

نسبت به پرش کلاسیک بیشتر می‌شود.

توکیای و همکاران [21] با مطالعه روی تعیین آثار زبری موج‌دار و زبری منشوری با آرایش زیگزاگی و نواری برمشخصات پرش هیدرولیکی دریافتند که طول پرش هیدرولیکی در زبری-های مختلف کاهش می‌یابد و بستر زبر میزان افت انرژی را نسبت به پرش کلاسیک ۳ تا۱۰ درصد افزایش می‌دهد. اصفهانی و همکاران [22] با مطالعه روی بستر زبر نشان دادند که بستر زبر حوضچه آرامش می‌تواند طول پرش هیدرولیکی را تا حدود ۴۰ درصد کاهش دهد. نیسی و همکاران [23] برای اولین بار پرش گسسته را با بستر زبر مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نسبت عمق مزدوج ۱۶تا۲۰ درصد در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش یافته و راندمان پرش ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. بدیع‌زادگان و همکاران [24] با بررسی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی افقی نشان دادند، مقادیر مختلف زبری روی شیب موج‌دار در طول پرش هیدرولیکی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند ولی نسبت به طول پرش کلاسیک حدود ۳۵ الی ۵۰ درصد طول پرش را کاهش می‌دهد. دانشفراز و همکاران [25] به بررسی آزمایشگاهی تاثیر بستر زبر با المان‌های ذوزنقه‌ای غیرممتد در مشخصات پرش گسسته در کانال‌های مستطیلی غیر منشوری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که، درکانال‌های غیرمنشوری در مقایسه با کانال‌های منشوری باعث استهلاک انرژی بیشتر جریان، کاهش عمق ثانویه و افزایش طول پرش هیدرولیکی می‌شود. طبق مطالعه عددی دانشفراز و همکاران [26]، به بررسی سه بعدی اثر هندسه المان‌های زبری در شیب شکن های مایل پرداختند. نتایج نشان داد که وجود المان‌های زبری مختلف روی سطح شیبدار عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی را افزایش می‌دهد. دانشفراز و همکاران [27] به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی در تنگ-شدگی ناگهانی به همراه زبری دیواره پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش عرض مقطع تنگ‌شدگی استهلاک انرژی افزایش می‌یابد ولی تغییر قطر زبری‌ها تاثیر چندانی بر استهلاک انرژی ندارد.

با توجه به امکان تشکیل مقاطع انقباض‌یافته در مسیر جریان فوق‌بحرانی که ممکن است در اثر ایجاد عوامل طبیعی و عوامل انسانی چون پایه‌های پل ایجاد شود، ضرورت محاسبه میزان استهلاک انرژی در مواجهه جریان فوق‌بحرانی با تنگ شدگی را مشخص می سازد. با بررسی تحقیقات پیشین مشاهده شد که مطالعات انجام گرفته تنها در زمینه سازه‌های همگرا و واگرای تدریجی، شوت‌ها و استهلاک انرژی به وسیله سایر مستهلک‌کننده‌ها بوده و مطالعه‌ای در زمینه استفاده هم‌زمان تنگ‌شدگی ناگهانی و زبری‌کف بستر در مقطع تنگ‌شده تاکنون انجام نگرفته است. پس در این تحقیق تاثیر هم‌زمان تنگ‌شدگی ناگهانی و زبری‌کف بستر بر استهلاک انرژی جریان فوق‌بحرانی به صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج آن با تحقیقات سایر پژوهشگران مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- امکانات آزمایشگاهی

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، برای مدل‌سازی از فلوم آزمایشگاهی با مشخصات ابعادی به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر، جنس دیواره‌ها و کف از پلکسی‌گلس شفاف استفاده شد. همچنین برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی از دریچه قائم فلزی کشویی، با بازشدگی ۲ سانتی‌متر استفاده شد. در این فلوم جریان توسط ۲ پمپ هرکدام با توان ۴۵۰ لیتر بر دقیقه وارد کانال می‌شود. برای تنظیم دبی جریان از روتامترهای نصب شده روی پمپ‌ها با خطای اسمی ۲± درصد و اندازه-گیری طول پرش هیدرولیکی از متر بنایی با دقت ۱ میلی‌متر و عمق ها توسط یک عمق‌سنج نقطه‌ای با خطای اسمی ۱± میلی-متر استفاده شد. انجام آزمایش‌ها در ۳ مقطع تنگ‌شدگی به عرض ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر با طول مقطع تنگ‌شدگی ۵۰ سانتی‌متر، در فاصله ۱/۵ متری از دریچه مولد جریان فوق-بحرانی انجام شد. شکل (۱)، شماتیک کانال و تجهیزات نصب شده روی آن و شکل (۲)، نمونه‌ای از جایگذاری تنگ‌شدگی، پرش هیدرولیکی تشکیل شده در مسیر جریان و چگونگی جایگذاری زبری با سه قطر متوسط ۲/۰۸، ۱/۲۸، ۰/۸ سانتی‌متر در کف بستر را نشان می‌دهد. جدول (۱)، محدوده تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان را ارائه می‌دهد.

شکل ۱. شماتیک کانال و تجهیزات نصب‌شده روی آن

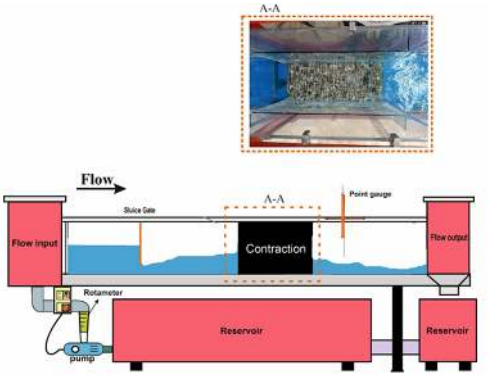


Fig. 1. Schematic of channel and equipment installed on it

شکل ۲. شماتیک جایگذاری تنگ‌شدگی و زبری

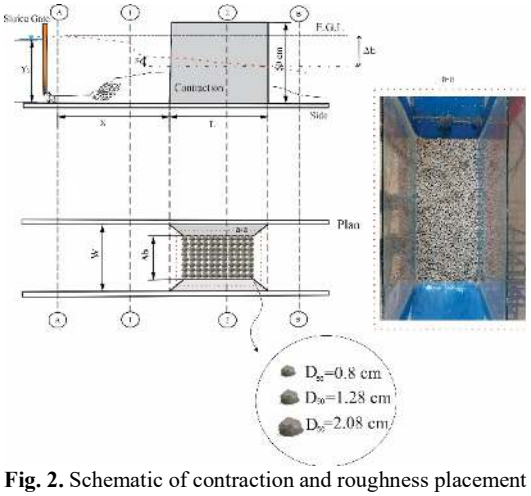


Fig. 2. Schematic of contraction and roughness placement

جدول ۱. محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده

Roughness (D_{50})	$D_{50}/\Delta b$	Q (L/min)	Y_B (cm)	Re ($\times 10^3$)
Plain contraction	---	300 - 600	1.2-7.31 4.55-7.63 4.94-8.54	75-141 76.5-159 59-238
0.8 cm	0.032 0.04 0.053		1.84-2.67 2.3-6.12 2.2-8.67	
1.28 cm	0.051 0.064 0.085		1.82-2.67 2.2-2.23 2.68-3.29	
2.08 cm	0.081 0.101 0.135		1.94-2.51 2-3.47 2.1-3.40	

Table 1. range of measured

۲-۲- آنالیز ابعادی

پارامترهای موثر در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن ویژگیهای هندسی و هیدرولیکی را می‌توان به صورت رابطه ۱، نوشت:

$$f1(Q,\rho,g,\mu,W,\Delta b,d,D_{50},y_A,y_B,y_h,L_j,L,x,V_A,V_B)=0 \quad (1)$$

که در آن، Q دبی جریان، ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش، μ ویسکوزیته دینامیکی، W عرض کانال، Δb عرض تنگ‌شدگی، d بازشدگی دریچه، D_{50} قطر متوسط زیری کف تنگ‌شدگی، y_A و y_B به‌ترتیب اعماق جریان در مقاطع A، و B، y_h عمق آب پشت دریچه، L_j طول پرش هیدرولیکی، E_A و E_B به‌ترتیب انرژی مخصوص در مقاطع A و B، x فاصله دریچه تا تنگ‌شدگی، L طول مقطع تنگ‌شده، V_A و V_B به ترتیب سرعت در مقاطع A و B است. با در نظرگرفتن پارامترهای ρ، g و y_A به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش آنالیز ابعادی پی‌باکینگهام پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه (۲) ارائه می‌شود.

$$f2(\mathrm{Re}_A,Fr_A,Fr_B,\frac{W}{y_A},\frac{d}{y_A},\frac{\Delta b}{y_A},\frac{D_{50}}{y_A},\frac{y_B}{y_A},\frac{y_h}{y_A},\frac{x}{y_A},\frac{L}{y_A},\frac{L_j}{y_A})=0 \quad (2)$$

همچنین با ساده‌سازی و تقسیم برخی از پارامترها بر یکدیگر، پارامترهای بدون‌بعد به صورت رابطه (۳) خلاصه می‌شود.

$$f3(\mathrm{Re}_A,Fr_A,Fr_B,\frac{W}{y_A},\frac{d}{y_A},\frac{D_{50}}{\Delta b},\frac{y_B}{y_A},\frac{x}{L},\frac{L_j}{y_A})=0 \quad (3)$$

به دلیل اینکه جریان در تحقیق حاضر متلاطم و محدوده عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ است،پس می‌توان از تاثیر پارامتر Re صرف‌نظر نمود [12, 30, 31]. همچنین پارامترهای d/y_A، W/y_A و x/L به ترتیب به دلیل ثابت بودن میزان بازشدگی دریچه، میزان عرض دریچه و فاصله دریچه تا تنگ‌شدگی از میان پارامترهای بدون بعد حذف و کمیت‌های بدون بعد موثر مطابق رابطه ۴ ارائه شد.

$$f4(Fr_A, Fr_B, \frac{D_{50}}{\Delta b}, \frac{\Delta b}{W}, \frac{y_B}{y_A}, \frac{E_A}{y_A}, \frac{E_B}{y_A}, \frac{L_j}{y_A}) = 0 \quad (4)$$

در پایان با ساده سازی رابطه ۴، پارامترهای وابسته به صورت تابعی از پارامترهای مستقل بدون‌بعد به صورت زیر ارائه شد.

$$\frac{\Delta E}{E_A}, \frac{y_B}{y_A}, \frac{L_j}{y_A}, Fr_B = f5(Fr_A, \frac{D_{50}}{\Delta b}, \frac{\Delta b}{W}) \quad (5)$$

۲-۳- معادلات کلاسیک هیدرولیکی

در برخی موارد وقتی عرض تنگ‌شدگی در مقطع طولی کانال نسبتا زیاد باشد با برخورد جریان فوق‌بحرانی به مقطع تنگ-شدگی، پرش مستغرق تشکیل می‌شود (شکل ۳). طبق رابطه ۶، می‌توان افت انرژی بین مقطع A و B را با استفاده از اصل انرژی محاسبه کرد. برای محاسبه عمق در مقطع A، از رابطه ۷ و برای محاسبه سرعت جریان در مقطع A از رابطه ۸ استفاده شد.

شکل ۳. پرش هیدرولیکی مستغرق

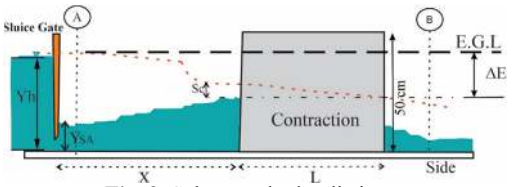


Fig. 3. Submerge hydraulic jump

در رابطه ۷، d میزان بازشدگی دریچه و C_c ضریب انقباض جریان است . (بلاد و همکاران [29]). ضریب انقباض (C_c) برحسب عمق آب پشت دریچه برای جریان‌های آزاد و مستغرق براساس شکل (۴) محاسبه شد.

$$\Delta E_{AB} = (y_A + \frac{V_A^2}{2g}) - (y_B + \frac{V_B^2}{2g}) \quad (6)$$

$$y_A = d \times C_c \quad (7)$$

$$V_A = \frac{Q}{A_A} \quad (8)$$

در مواقعی که پرش هیدرولیکی در کانال، مستغرق شود ، به دلیل تلاطم جریان در مقطع A، اندازه‌گیری عمق جریان مشکل است. بنابراین محاسبه عمق مستغرق بعد از دریچه طبق رابطه ۹ و براساس ارتفاع آب پشت دریچه محاسبه شد.(راجاراتنام و همکاران [28])

شکل ۴. ضریب انقباض دریچه کشویی برای جریان‌های آزاد و مستغرق.(بلاد و همکاران [29])

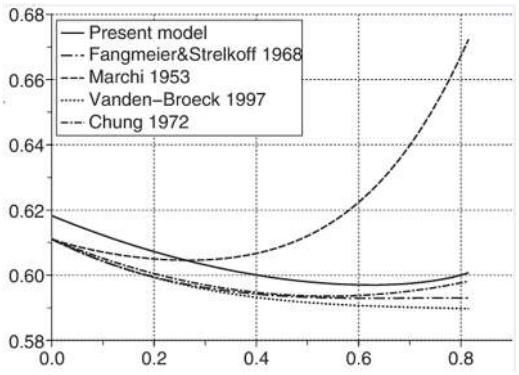


Fig. 4. Vertical sluice gate contraction coefficient for free and submerge flow

$$y_{SA} = y_h - \frac{V^2_A}{2g} \quad (9)$$

در رابطه ۹: y_h، ارتفاع آب پشت دریچه، y_{SA}، عمق استغراق دریچه و V_A، سرعت در مقطع A است.

۲-۴- روابط ارزیابی

در تحقیق حاضر روابطی برای تخمین استهلاک انرژی نسبی و اعماق مزدوج براساس عدد فرود بالادست ارائه و پارامتر وابسته به صورت تابعی از پارامترهای مستقل درنظر گرفته شده است. برای ارائه این روابط در اکسل به کمک دستور *Solver*، ۷۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها برای آزمون انتخاب شده است. از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی R^2، خطا جذر میانگین مربعات *RMSE* و خطا نسبی $E_{Relative\ error}$، برای ارزیابی روابط بهره گرفته شده است.

$$R^2 = \left(\frac{(N\sum E_{\exp}E_{cal}) - (\sum E_{\exp})(\sum E_{cal})}{\sqrt{N(\sum E_{\exp}^2) - (\sum E_{\exp})^2}\sqrt{N(\sum E_{cal}^2) - (\sum E_{cal})^2}}\right)^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_1^N (E_{\exp} - E_{cal})^2} \quad (11)$$

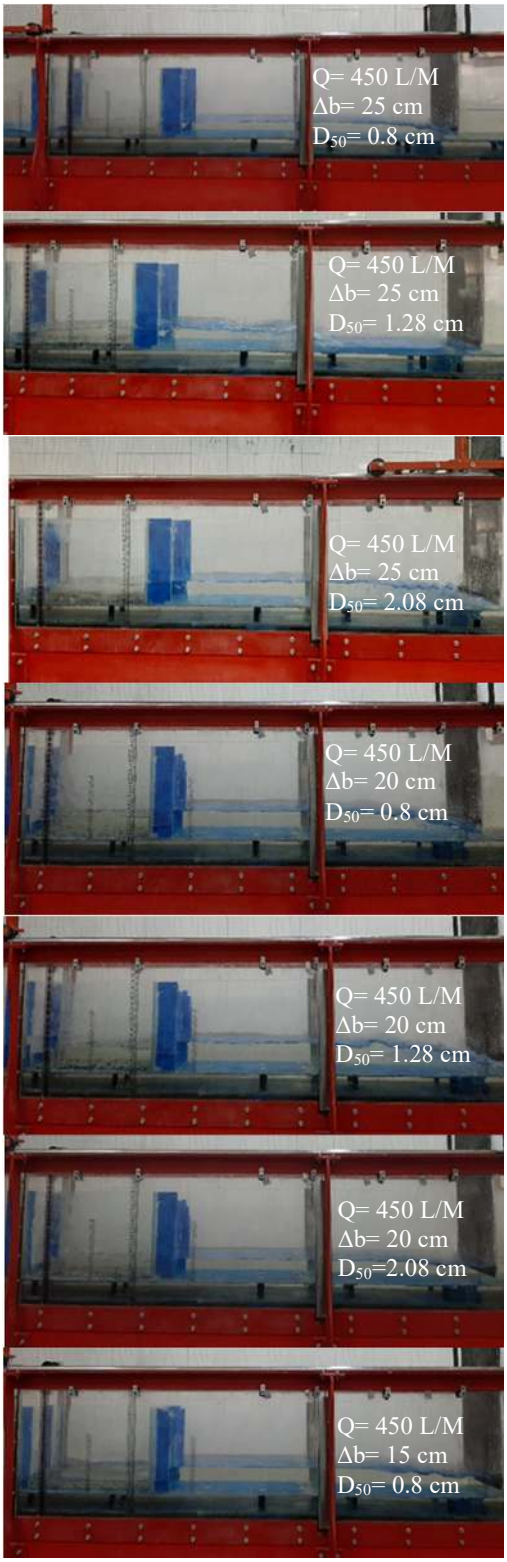
$$E_{Relativeerror} = \frac{|E_{\exp} - E_{cal}|}{E_{\exp}} \times 100 \quad (12)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

شکل ۵ نمایی از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک و چگونگی رفتار جریان جریان در برخورد با المان-های تنگ‌شدگی را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌ها می‌توان دریافت که، با کم شدن عرض مقطع تنگ‌شدگی، عمق بالادست افزایش یافته و پرش هیدرولیکی به سمت بالادست حرکت می‌کند و تاثیر به سزایی در استهلاک انرژی نسبی پایین‌دست دارد. مدل‌ها با استفاده از مصالح شن با قطرهای ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ و با درصد تخلخل ۳۰، ۱۸/۵ و ۱۱/۶ درصد و کف زبر در مقطع تنگ، اجراء شده است. تعداد ۲۷۰ آزمایش در محدوده عدد فرود ۲/۵ تا ۷/۵ و محدوده انقباض نسبی ۰/۵ تا ۰/۸۳ انجام گرفته است. با باز کردن پمپ، جریان بعد از عبور از زیر دریچه به صورت فوق بحرانی وارد کانال شده و به سمت مقطع تنگ‌شدگی حرکت می‌کند. با رسیدن جریان به مقطع تنگ-شدگی ناگهانی و برخورد با آن، پرش هیدرولیکی تشکیل شده و با برخورد جریان با المان‌های تنگ‌شدگی، پس‌زدگی جریان ایجاد شده و عمق آب در داخل مقطع انقباض‌یافته و افزایش می‌یابد. تشکیل پرش هیدرولیکی هم‌زمان باعث افزایش تلاطم و تداخل آب و هوا در داخل تنگ‌شدگی می‌شود (شکل ۶). طبق مشاهدات، ایجاد زبری در کف مقطع تنگ‌شدگی و افزایش قطر متوسط زبری کف، عمق آب بالا دست رفته رفته افزایش می‌یابد که باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود.

شکل ۵. نمایی از مدل‌های آزمایشگاهی



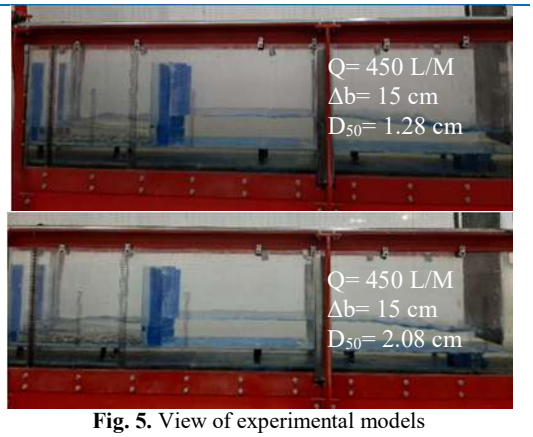


Fig. 5. View of experimental models

شکل ۶. نمایی از تداخل آب و هوا و جریان برگشتی

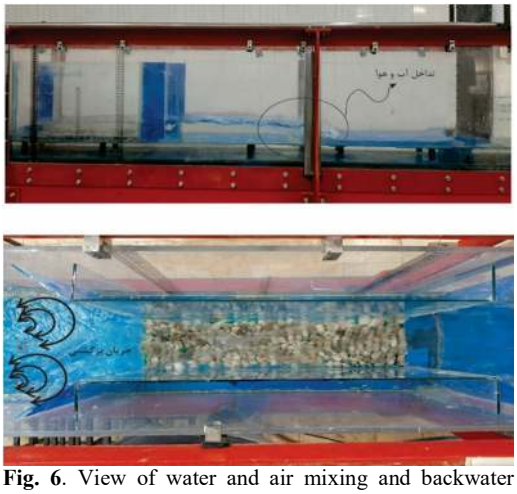


Fig. 6. View of water and air mixing and backwater profile

۳-۲- استهلاک انرژی نسبی

یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر، بررسی میزان استهلاک انرژی در انقباض ناگهانی به همراه زبری کف مقطع تنگ شده است. شکل (۷)، تغییرات استهلاک انرژی نسبی را در برابر عدد فرود بالادست نشان می‌دهد.

با افزایش عدد فرود، میزان استهلاک نسبی انرژی در تمامی مدل‌های تحقیق حاضر روند افزایشی و صعودی دارد. میزان استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر نسبت به تنگ-شدگی ۵ و ۱۰ سانتی‌متر به دلیل برخورد جریان فوق بحرانی به مقطع تنگ‌شدگی، جریان برگشتی در محل برخورد آب با کناره‌های المان‌های تنگ‌شدگی و همچنین تشکیل پرش هیدرولیکی در بالادست مقطع تنگ‌شدگی بیشتر است. پرش هیدرولیکی باعث افزایش تلاطم و تداخل آب و هوا شده و به دنبال آن استهلاک نسبی انرژی افزایش می‌یابد.

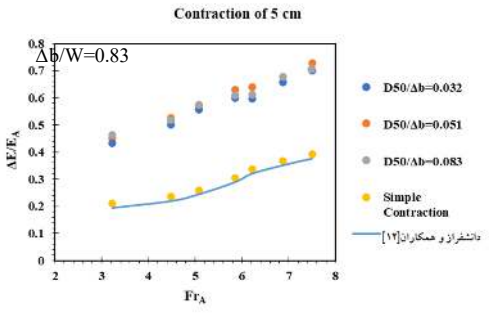
زبری کف مقطع تنگ‌شدگی با افزایش تنش برشی جریان، باعث افزایش میزان اصطکاک بین سنگدانه‌های کف مقطع تنگ‌شدگی و جریان شده و باعث کم شدن سرعت و افزایش عمق جریان می‌شود.

با افزایش میزان قطر متوسط مصالح کف تنگ‌شدگی، اصطکاک مابین جریان و سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که تاثیر قطر مصالح بر میزان استهلاک انرژی با کف زبر نسبت به حالت شاهد زیاد بوده ولی تغییر قطر مصالح کف نسبت به یکدیگر تاثیر کمی بر استهلاک انرژی دارد.

بطوریکه با کم شدن قطر متوسط ذرات زبری، به دلیل کاهش تخلخل میان سنگدانه‌ها، استهلاک انرژی و عمق پایین‌دست افزایش می‌یابند. به گونه‌ای که میزان استهلاک انرژی در تنگ-شدگی با بستر زبر در مقایسه با تنگ‌شدگی با بستر صاف و تحقیقات دانشفراز و همکاران [12]، نشان از افزایش ۵۳/۲۹ و ۵۵/۴۵ و ۵۴/۶۲ درصدی درتنگ‌شدگی ۵ سانتی‌متر و افزایش ۵۹/۴۶ و ۶۰/۵۲ و ۵۹/۴۶ درصدی در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر و افزایش ۶۰/۴۱ و ۶۱/۲۱ و ۶۰ درصدی به ترتیب برای مصالح با قطر متوسط ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی‌متری دارد.

نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات دانشفراز و همکاران [12]، که به بررسی آزمایشگاهی و عددی انقباض ناگهانی با بستر صاف بر استهلاک انرژی پرداخته‌اند، مقایسه شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از زبری، میزان استهلاک نسبی انرژی را به شدت در مقایسه با تحقیق دانشفراز و همکاران [12] و تنگ‌شدگی ساده (بدون زبری) افزایش داده است.

شکل ۷. تغییرات استهلاک انرژی نسبی در برابر عدد فرود جریان بالادست



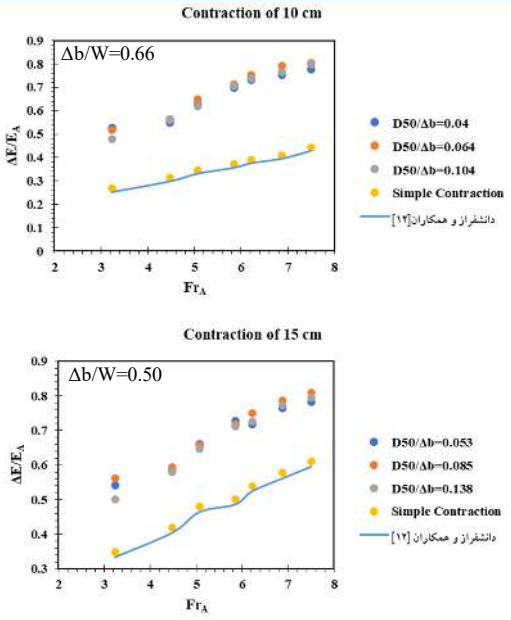


Fig. 7. Variation of relative energy dissipation versus upstream Froude number

مشاهده می‌شود که تاثیر زبری با قطر متوسط ۱/۲۸ سانتی‌متر در استهلاک انرژی به دلیل سطح تماس بیشتر با جریان و همچنین فضای خالی میان دانه‌ها که باعث افزایش اصطکاک و تنش‌برشی می‌شود کمی بیشتر از بقیه زبری‌ها است. پس مقداری از انرژی توسط پرش‌هیدرولیکی و مقدار دیگری از آن به واسطه پس‌زدگی جریان مستهلک می‌شود. شکل (۸) بیانگر این است که در یک دبی ثابت میزان افت انرژی نسبی در تنگ‌شدگی نسبی ۰/۰۸۵، به دلیل اینکه عرض مقطع تنگ‌شدگی کاهش یافته و با تشکیل پرش هیدرولیکی، پس‌زدگی جریان و تداخل آب و هوا، بیشتر از بقیه تنگ‌شدگی‌ها می‌باشد. همچنین برای تخمین استهلاک انرژی نسبی بالادست برای فاصله ثابت دریچه تا تنگ‌شدگی، در اکسل به کمک دستور *Solver* رابطه۱۳ ارائه شده است. برای استخراج این رابطه، ۷۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی به شکل تصادفی انتخاب و ۳۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی نیز برای درستی‌آزمایی رابطه فوق در نظر گرفته شده است.

$$\Delta E / E_A = 0.054(Fr_A)^{1.1029} \times (D_{50} / \Delta b)^{0.0201} + 0.2426(\Delta b / W)^{-0.5297} \quad (13)$$

بررسی مقادیر آزمایشگاهی استهلاک انرژی نسبی مقطع تنگ‌شدگی زبر با مقادیر پیش بینی شده توسط شاخص‌های ارزیابی، نشان داد که رابطه دارای ضریب تعیین $R^2=0.927$، خطا جذر میانگین مربعات $RMSE=0.027$ و درصد خطای نسبی ۸/۸۱± درصد است (شکل ۸).

شکل ۸ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی استهلاک انرژی نسبی آزمایشگاهی و محاسباتی

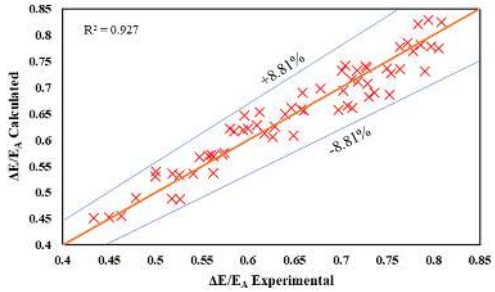


Fig. 8. Compare experimental with calculated relative energy dissipation

۳-۳- عدد فرود

شکل۹ بررسی عدد فرود در دو مقطع A و B، جدول ۲ تغییرات بازه عدد فرود را نشان می‌دهد. نتایج نشان می دهد که عدد فرود درپایین دست، بعد از هرسه تنگ‌شدگی به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. نتایج نشان دهنده این است که در یک دبی ثابت بیشترین افت عدد فرود، در مقطع تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متری است. دلیل این امر آن است که با افزایش دبی و برخورد جریان با المان‌های تنگ‌شدگی، با تشکیل پرش هیدرولیکی و جریان های متلاطم، سرعت جریان کاهش و عمق آن افزایش می‌یابد. با افزایش عمق، رژیم جریان در مقطع پایین‌دست تبدیل به زیربحرانی شده یا در بعضی از دبی‌ها، عدد فرود کاهش بسیار چشمگیری داشته است. از آثار موثر کاهش عدد فرود در طبیعت و پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی می‌توان به کاهش فرسایش و تخریب کانال، جلوگیری از ایجاد امواج مخرب در پایاب، پدیده آبشستگی و کاهش طول حوضچه آرامش اشاره کرد. دقت شود که کاهش چشمگیر عدد فرود در حضور زبری کف با افزایش استهلاک انرژی نیز همراه است. این در حالی است که تغییرات عدد فرود به واسطه مقطع تنگ‌شدگی دارای کاهش تقریبا ۸۰ درصدی در تنگ‌شدگی ۵

سانتی‌متر، کاهش تقریبی ۹۰ درصدی در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر و کاهش تقریبی ۹۴ درصدی در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد که علت افزایش میزان کاهش عدد فرود به دلیل تشکیل پرش مستغرق در مقطع کنترل است.

جدول ۲. محدوده متغیرهای عدد فرود پایین‌دست

	شاهد	D_{50}=0.8	D_{50}=1.28	D_{50}=2.08
Δb= 25	3.23	0.6~2	0.6~2.1	2~3.2
Δb= 20	~	1.4~1.5	1.16~2.1	1.88~2
Δb= 15	6.43	1.7~1.9	1.6~1.7	1.7~2.2

Table 2. range of down stream Froud number

شکل ۹. تغییرات اعداد فرود مقاطع در برابر دبی جریان

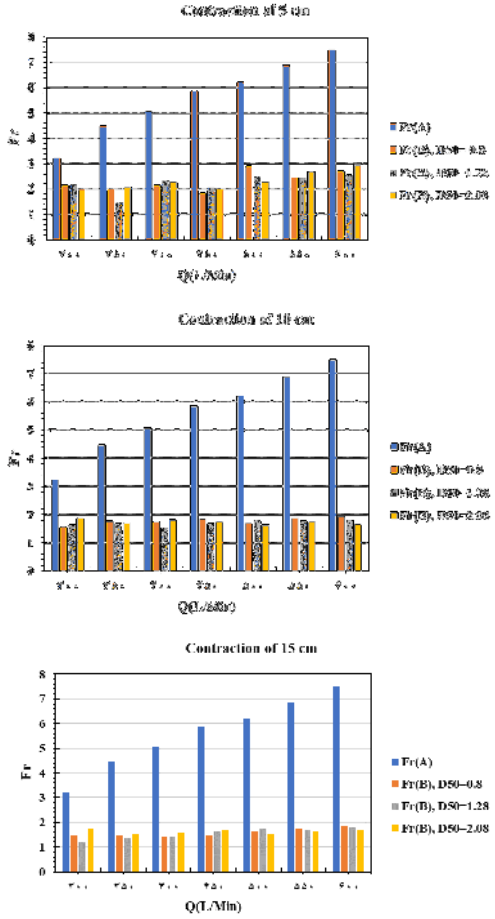


Fig. 9. Variation of Froude number versus discharge

۳-۴- اعماق مزدوج

طبق آنالیز ابعادی صورت گرفته نسبت اعماق پرش به عدد فرود اولیه و نسبت تنگ‌شدگی($\frac{\Delta b}{W}$ =0.5 ,0.66 ,0.83) و $\frac{D_{50}}{\Delta b}$ بستگی دارد.

شکل (۱۰)، تغییرات اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود جریان عبوری از زیر دریچه را نشان می‌دهد. نمودارهای الف، ب و ج به ترتیب بیانگر تغییرات اعماق مزدوج تنگ‌شدگی‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر را برای هر سه زبری بکار رفته در کف تنگ‌شدگی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱. تغییرات اعماق مزدوج در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه اشاره

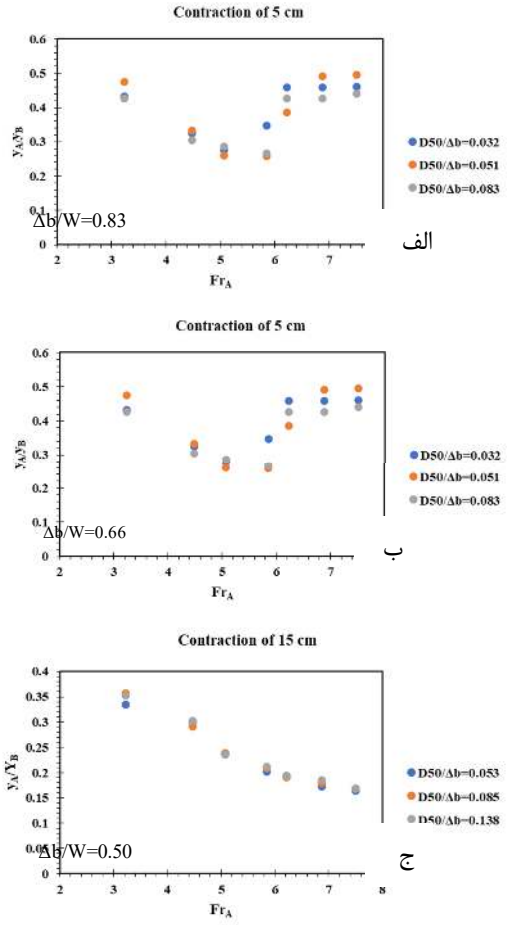


Fig. 10. Variation of conjugated depth versus vena contracta Froude number

با دقت در شکل‌ها می‌فهمیم که در تنگ‌شدگی ۵ سانتی‌متری، اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در دبی‌هایی که جریان بعد از دریچه مستغرق است، به صورت نزولی کاهش می‌یابد ولی با تبدیل پرش هیدرولیکی مستغرق به پرش هیدرولیکی آزاد، اعماق مزدوج تقریبا مقدار ثابتی به خود می‌گیرند و صعودی می‌شود. در تنگ‌شدگی ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر در اکثر دبی‌های بکار رفته پرش هیدرولیکی جریان از نوع مستغرق بوده و به

همین دلیل در هر سه زبری با افزایش دبی، اعماق مزدوج جریان کاهش می‌یابد. همچنین افزایش میزان تنگ‌شدگی باعث افزایش اعماق مزدوج جریان می‌شود. علت این امر آن است که با افزایش تنگ‌شدگی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد.

رابطه ۱۴، با استفاده از دستور *Solver* در اکسل که پس از استخراج ۷۰ درصد مقادیر اعماق مزدوج از میان تعداد کل ۱۸۹ داده در سیستم آزمایشگاهی و ۳۰ درصد اعماق مزدوج به صورت محاسباتی پارامتر وابسته مورد نظر به صورت تابعی از پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده و شکل (۱۱)، مربوط به نمودار آن است. بررسی مقادیر آزمایشگاهی عمق نسبی مقطع تنگ‌شدگی زبر با مقادیر پیش‌بینی شده توسط شاخص‌های ارزیابی، نشان داد که رابطه دارای ضریب تعیین $R^2=0.9817$، خطا جذر میانگین مربعات $RMSE=0.010$ و درصد خطای نسبی ۹/۰۰± درصد است (شکل ۱۲).

$$y_A / y_2 = 11.56(Fr_A)^{-2.88} \times (D_{50} / \Delta b)^{0.332} + 0.423(\Delta b / W)^{1.302} \quad (14)$$

شکل ۱۱. مقایسه مقادیر اعماق مزدوج آزمایشگاهی و محاسباتی

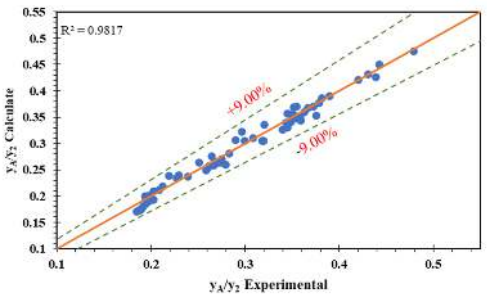


Fig. 11. Compare experimental with calculated relative Conjugated depth

۴-۳- طول پرش هیدرولیکی

براساس آنالیز ابعادی صورت گرفته نسبت طول پرش هیدرولیکی به عدد فرود اولیه و نسبت تنگ‌شدگی بستگی دارد. شکل (۱۲)، تغییرات طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی با Fr_A برای سه نوع تنگ‌شدگی و سه نوع زبری را نشان می‌دهد. در تنگ‌شدگی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری، عدد فرودهایی که پرش مستغرق است، طول پرش هیدرولیکی به صورت صعودی افزایش و بعد از تبدیل پرش هیدرولیکی مستغرق به پرش هیدرولیکی آزاد طول پرش هیدرولیکی تقریبا مقداری ثابتی به‌خود گرفته و تقریبا نزولی می‌شود.

شکل ۱۲. تغییرات طول پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه

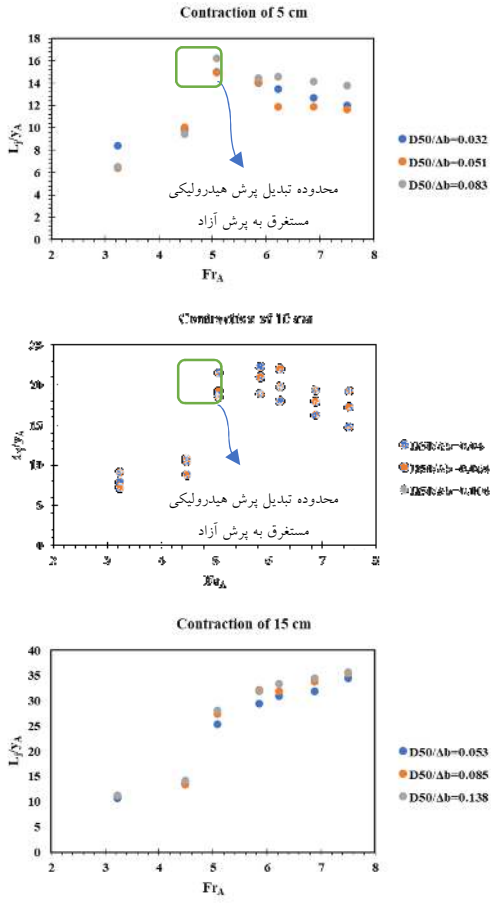


Fig. 12. Variation of hydraulic jump length *versus vena* contracta Froude number

در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متری به‌دلیل اینکه در تمامی زبری‌ها پرش مستغرق است، طول پرش هیدرولیکی مقداری ثابتی به‌خود گرفته و تقریبا حالت صعودی به خود می‌گیرد. دلیل این امر آن است که با افزایش عرض تنگ‌شدگی، پس‌زدگی جریان به طرف بالا دست افزایش یافته و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی افزایش یافته و پرش مستغرق تشکیل می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

تاکنون مطالعات دقیقی روی تنگ‌شدگی ناگهانی به همراه زبری کف مقطع تنگ‌شدگی صورت نگرفته است و به دلیل اهمیت این موضوع باید مورد توجه طراحان قرار بگیرد. در تحقیق حاضر تاثیر تنگ‌شدگی ناگهانی همراه با زبری کف بستر، بر استهلاک انرژی جریان فوق‌بحرانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی با ۳ انقباض ناگهانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری و ۳ نوع زبری با قطر متوسط ۰/۸، ۱/۲۸و ۲/۰۸ سانتی‌متر در کف مقطع تنگ‌شدگی، درفاصله ۱/۵ متری از دریچه مولد جریان فوق‌بحرانی با بازشدگی ثابت به اندازه ۲ سانتی‌متر انجام شد که در حالت کلی براساس نتایج آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی نسبت به بالادست با افزایش عدد فرود جریان بالادست، افزایش یافت. سایر نتایج به شرح زیر است:

۱- نتایج داده‌های آزمایشگاهی نشان دهنده این است که استهلاک انرژی با افزایش میزان تنگ‌شدگی عرض کانال، افزایش می‌یابد.

۲- براساس نتایج آزمایشگاهی استفاده از زبری در کف مقطع تنگ‌شدگی، میزان استهلاک انرژی نسبی را نسبت به بالادست بطور چشم‌گیری افزایش می‌دهد.

۳- استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر(حالت شاهد)، نسبت به تنگ‌شدگی ۱۵سانتی‌متر با زبری‌های ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی‌متر، به ترتیب ۲۳/۶۵، ۲۱/۷۹ و ۲۶/۸۵ درصد کمتر است.

۴- استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر(حالت شاهد)، نسبت به تنگ‌شدگی۱۰ سانتی‌متر با زبری‌های ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی‌متر، به ترتیب۴۵/۴۲، ۴۲/۲۲ و ۴۲/۹۳ درصد کمتر است.

۵- استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۵ سانتی‌متر(حالت شاهد)، نسبت به تنگ‌شدگی ۵ سانتی متر با زبری‌های ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی‌متر، به ترتیب ۵۰/۷۵، ۵۱/۱۹ و ۴۰ درصد کمتر است.

۶- اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی، با افزایش عدد فرود در جریان مستغرق روند کاهشی داشته ولی در جریان با پرش هیدرولیکی آزاد اعماق مزدوج تقریبا مقدار ثابت و صعودی را به خود گرفته است.

۷- طول پرش هیدرولیکی، با افزایش عدد فرود در جریان مستغرق روند صعودی داشته ولی با تبدیل پرش هیدرولیکی مستغرق به پرش هیدرولیکی آزاد کلاسیک روند ثابتی به خود گرفته و تقریبا نزولی می‌شود.

۵- منابع

[1] Hager, W.H., Dupraz, P.A. (1985). Discharge characteristics of local, discontinuous contractions. *Journal of Hydraulic*, 1985, 23(5), 421-433

[2] Yasuda, Y., Hager Willi, H. (1995). Hydraulic jump in channel contraction. Canadian *Journal of Civil Engineering*, 22(5), 925-933.

[3] Reinauer, R., Hager Willi, H. (1998). Supercritical flow in chute contraction. Journal of hydraulic Engineering, 124(1), 55-6

[4] Wu, B., Molinas, A. (2001). Choked flows through short contractions. Journal of hydraulic Engineering, 127(8), 657-6 .62

[5] Jan, C. D., Chang, C. J. (2009). Hydraulic jumps in an inclined rectangular chute contraction. Journal of hydraulic ngineering, 135(11), 949-958.

[6] Sadeghi, H., Daneshfaraz, R., Behmanesh, J., Nik pour, M. (2015). The effect of shape of walls of expansion on the characteristics of hydraulic jump. Sharif Journal of Civil Engineering, 31 (2), 57-62.

[7] Daneshfaraz, R., Sadeghi, H., RezazadehJoudi, A., & Abraham, J. (2017). Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in contractions and expansions. Sigma: *Journal of Engineering & Natural Sciences*, 35(1), p87-98. 12p .

[8] Daneshfaraz, R., Rezazadehjoudi, A. & Abraham, J. (2017). Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 90-degree bend. *KSCE J Civ Eng* 22, 603–612

[9] Daneshfaraz, R., Rezazadeh joudi, A., Sadeghfam, S. (2018). Experimental Investigation of Energy Dissipation in the Sudden Choked Flow with Free Surfaces. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48.2(91), 101-108.

[10] Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Mirzaeereza, R. (2019). Experimental Study of Expanding Effect and Sand-Roughened Bed on Hydraulic Jump Characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 885-896 (In Persian) .

[11] Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M., Daneshfaraz, R. (2019). Experimental study of Energy Dissipation at a Vertical Drop Equipped with Vertical Screen with Gradually Expanding at the Downstream. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12), 7-7. doi: 10.22060/ceej.2019.16493.6265 (In Persian).

[12] Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaeli, E., Sadeghfam, S., Abraham, J. (2020). Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *Journal of Groundwater Science and Engineering,* 8(4), 396-406

[13] Daneshfaraz, R., MajediAsl, M., Mirzaee, R., Tayfur, G. (2020). Hydraulic jump in a rough sudden symmetric expansion channel. *AUT Journal of Civil Engineering*, -. doi: 10.22060/ajce.2020.18227.5667 (In Persian).

[14] Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Abbaszadeh, H. (2021). Numerical Simulation of Energy Dissipation in Crescent-Shaped Contraction of the Flow Path. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1299-1314. (In Persian).

[15] Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M., Daneshfaraz, R. (2021). Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Vertical Drops with Screens and Gradually Wall Expanding. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(8), 4-4. doi: 10.22060/ceej.2020.17779.6671 (In Persian).

[16] Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic Jumps on Rough Beds, Trans. *Engineering Inst*. Canada, 11(a-2), 1-8.

[17] Izadjoo, F., Shafaei Bajestan, M., BINA, M. (2005). Hydraulic Jump Characteristics on A Trapezoidal Corrugated Bed. *The Scientific Journal of Agriculture (SJA)*, 27, 107-122

[18] Tokyay N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI. *Water & Environmental Resources Congress.* Anchorage. Alaska. USA. 8 p

[19] 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.

[20] Elsebaie I. H. and Shabayek Sh. (2010). Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. International *Journal of Civil & Environmental Engineering,* 10(01): 37-47.

[21] Tokyay, N.D., Evcimen, T.U., and Şimşek, C. 2011. Forced Hydraulic Jump on Nonprotruding Rough Beds. *Can. J. Civil Eng*. 38. 1136-1144

[22] Esfahani, M., & Bejestan, M. S. (2012). Effect of Roughness Height on the Length of B jump at an Abrupt Drop. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3, 2757-2762.

[23] Neisi, K., & Shafai, B. M. (2013). Characteristics of S-jump on Roughened Bed Stilling Basin. *Journal of Water Sciences Research*, 5(2), 25-34.

[24] Badizadegan, R., Saneie, M., and Esmaili, K. (2014). Comparison of Hydraulic Jump Characteristics on Different Types of Corrugated Beds. *Iran. J. Irrig. Drain*. 8(2), 220-232.

[25] Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Mirzaee, R., Parsamehr, P. (2020). Laboratory study of the effect of rough bed with non-continuous trapezoidal elements on hydraulic jump characteristics in non-prismatic rectangular channel. *Sharif Journal Civil Engineering,* 36 (2), 119-128 (In Persian).

[26] Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A., & Abraham, J. (2021). Three-Dimensional Study of the Effect of Block Roughness Geometry on Inclined Drop. *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering,* 6(1), 1-9.

[27] Daneshfaraz, R., Najibi, A. (2021). Experimental Investigation of Supercritical Flow Energy Dissipation in Sudden Contraction with Wall Roughness. *Journal of Hydraulics*.

[28] Rajaratnam N, Subramanya K, "Flow immediately below submerged sluice gate", *Journal of Hydraulic Engineering,* 1977, 93(HY4), 57-77.

[29] Belaud, G., Cassan, L., and Baume, J. P. (2009). Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*.

[30] Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Aminvash, E., and Abraham, J.P. (2022). Experimental Investigation of Multiple Supercritical Flow States and the Effect of Hysteresis on the Relative Residual Energy in Sudden and Gradual Contractions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering,* 46, 3843-3858.

[31] Aminvash, E., and Daneshfaraz, R. (2022). Experimental Study of Hysteretic Behavior on Residual Energy in Contractions of the Cross Section. *International Science and Innovation Congress, Turkey.*

Experimental investigation of hydraulic jump in sudden contraction with rough bed

Rasoul Daneshfaraz[*1], Mir Amir Najibi[2]

[1] Professor, Department of civil engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
[2] M.sc student, Department of civil engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

Daneshfaraz@maragheh.ac.ir

Abstract

One of the most important problems that exist downstream of hydraulic structures is the destructive kinetic energy of the flow. Experts always try to design properly and reduce the effect of this destructive force downstream of hydraulic structures. The present research was conducted with the aim of investigating the effect of sudden contraction along with the roughness of the bottom of the contracting section on the amount of energy dissipation in supercritical flow in a rectangular channel. Three types of contracting with widths of 5, 10 and 15 cm and three roughness with average diameters of D_{50} = 0.8, 1.28, 2.08 cm and the range of Froude number $2.5 \leq Fr_A \leq 5.7$ and relative contraction 0.5 to 0.83 and with the porosity percentage of 11.6, 18.5 and 30 percent and rough bed in the contracted section, it has been implemented with the increase of the average diameter of the material of the contracted bed, the friction between the flow and the aggregates increases. Meanwhile, the effect of material diameter on the amount of energy dissipation with rough bed is high compared to the control condition, but changing the diameter of the bed materials relative to each other has little effect on energy dissipation. As the average diameter of roughness particles decreases, due to the reduction of porosity between aggregates, energy dissipation and downstream depth increase. A number of 270 tests were analyzed in the Froude number range of 2.5 to 7.5. The laboratory results showed that with the increase of the descent number of the upstream flow, the upstream relative energy dissipation ($\Delta E/E_A$) increases. Also, by using roughness on the bed of all three contracting sections, it was observed that the energy dissipation increased significantly, so that the highest energy dissipation with 78.35% increase related to the contracting of 15 cm and the lowest energy dissipation with 43.35% increase related to the contracting is 5 cm. The reason for this is that with the increase in flow rate and the collision of the flow with the contracting elements, with the formation of hydraulic jumps and turbulent flows, the flow speed decreases and its depth increases. With the increase in depth, the flow regime in the downstream section has become subcritical or in some discharges, the Froude number has decreased significantly. Among the effective effects of reducing the number of landings in nature and downstream of hydraulic structures, we can mention the reduction of erosion and destruction of the channel, preventing the creation of destructive waves in the tailings, scouring phenomenon and reducing the length of the stilling pond. According to the dimensional analysis, the jump depth ratio depends on the initial landing number and the contracting ratio (0.83, 0.66 and 0.5). The relationships extracted to estimate the relative energy dissipation showed that its results are in good agreement with the laboratory data with a correlation coefficient of 0.927 and a normalized root mean square error of 0.02. And this indicates a very good agreement between the experimental data and the extraction of the presented relations.

.

Keywords: Relative energy dissipation; Sudden contraction; Rough bed; Froude number