****

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست و دوم، شماره6، سال1401

**بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در تنگ­شدگی ناگهانی با بستر زبر**

**رسول دانشفراز 1\*، میرامیر نجیبی2**

1- استاد بخش مهندسی عمران- سازه­های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه

2- کارشناسی ارشد عمران- سازه­های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه

[**daneshfaraz@maragheh.ac.ir\***](mailto:daneshfaraz@maragheh.ac.ir*)

**تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:**

**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 5، 10 و 15 سانتی­متر و سه زبری با قطرهای متوسط0.8 ,1.28 ,2.08 D50= سانتی­متر و محدوده عدد فرود 5/7 ≤ FrA ≤ 5/2 و انقباض نسبی 5/0تا 83/0مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، استهلاک انرژی نسبی بالا­دست ( ΔE/EA ) 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 35/78 درصد افزایش مربوط به تنگ­شدگی 15 سانتی­متر و کمترین استهلاک انرژی با 35/43 درصد افزایش مربوط به تنگ­شدگی 5 سانتی­متری است. روابط استخراج شده برای تخمین استهلاک انرژی نسبی نشان داد که نتایج آن با داده­های آزمایشگاهی هماهنگی خوبی با ضریب همبستگی 927/0 و خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده 02/0 دارند.

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

**1- مقدمه**

یکی از اساسی­ترین مشکلات هیدرولیکی در پایین­دست سازه­های 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 74/8 درصد کاهش می‌یابد. دانشفراز و همکاران [8] با بررسی عددی تنگ‌شدگی ناگهانی، رفتار جریان درپیچ 90 درجه با حضور و عدم حضور تنگ­شدگی در محل پیچ پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از تنگ­شدگی در محل پیچ 90 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 43/11 درصد و نسبت به پایین­دست به میزان 03/65 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 12 تا 16 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 25، 44 و 48 درصدی راندمان استهلاک انرژی می‌شود. دانشفراز و همکاران [12] با بررسی عددی تاثیر انقباض ناگهانی 5، 10 و 15 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. نائب­زاده 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 زبری­های مختلف کاهش می­یابد و بستر زبر میزان افت انرژی را نسبت به پرش کلاسیک 3 تا10 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 40 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 16تا20 درصد در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش یافته و راندمان پرش 20 درصد افزایش می­یابد. بدیع­زادگان و همکاران[24] با بررسی پرش هیدرولیکی روي بسترهاي 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 35 الی 50 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 تنگ­شدگی 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.

**2- مواد و روش­ها**

**1-2- امکانات آزمایشگاهی**

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، برای مدل­سازی از فلوم آزمایشگاهی با مشخصات ابعادی به طول 5 متر، عرض 3/0 متر و ارتفاع 5/0 متر، جنس دیواره­ها و کف از پلکسی­گلس شفاف استفاده شد. همچنین برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی از دریچه قائم فلزی کشویی، با بازشدگی 2 سانتی­متر استفاده شد. در این فلوم جریان توسط 2 پمپ هرکدام با توان 450 لیتر بر دقیقه وارد کانال می­شود. برای تنظیم دبی جریان از روتامترهای نصب شده روی پمپ­ها با خطای اسمی 2± درصد و اندازه­گیری طول پرش هیدرولیکی از متر بنایی با دقت 1 میلی­متر و عمق ها توسط یک عمق­سنج نقطه­ای با خطای اسمی 1± میلی­متر استفاده شد. انجام آزمایش­ها در 3 مقطع تنگ­شدگی به عرض 15، 20 و 25 سانتی­متر با طول مقطع تنگ­شدگی 50 سانتی­متر، در فاصله 5/1 متری از دریچه مولد جریان فوق­بحرانی انجام شد. شکل (1)، شماتیک کانال و تجهیزات نصب شده روی آن و شکل (2)، نمونه­ای از جایگذاری تنگ­شدگی، پرش هیدرولیکی تشکیل شده در مسیر جریان و چگونگی جایگذاری زبری با سه قطر متوسط 08/2، 28/1، 8/0 سانتی­متر در کف ­بستر را نشان می­دهد. جدول (1)، محدوده تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان را ارائه می­دهد.

|  |
| --- |
| **شکل 1.** شماتیک کانال و تجهیزات نصب­شده روی آن |
|  |
| **Fig. 1.** Schematic of channel and equipment installed on it |

|  |
| --- |
| **شکل 2.** شماتیک جایگذاری تنگ­شدگی و زبری |
|  |
| **Fig. 2.** Schematic of contraction and roughness placement |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | |
| محدوده متغیرهای اندازه­گیری شده **جدول 1**. | | | | |
| Re  (×103) | YB  (cm) | Q  (L/min) | D50/Δb | Roughness  (D50) |
| 75-141  76.5-159  59-238 | 1.2-7.31 | 300  -  600 | --- | Plain contraction |
| 4.55-7.63 |
| 4.94-8.54 |
| 1.84-2.67 | 0.032 | 0.8 cm |
| 2.3-6.12 | 0.04 |
| 2.2-8.67 | 0.053 |
| 1.82-2.67 | 0.051 | 1.28 cm |
| 2.2-2.23 | 0.064 |
| 2.68-3.29 | 0.085 |
| 1.94-2.51 | 0.081 | 2.08 cm |
| 2-3.47 | 0.101 |
| 2.1-3.40 | 0.135 |

**Table 1.** range of measured

**2-2- آنالیز ابعادی**

پارامترهای موثر در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن ویژگیهای هندسی و هیدرولیکی را می‌توان به صورت رابطه 1، نوشت:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

که در آن،دبی جریان،چگالی سیال، شتاب گرانش، *µ* ویسکوزیته دینامیکی، Wعرض کانال، *Δb* عرض تنگ­شدگی، *d* بازشدگی دریچه، *D50* قطر متوسط زیری کف تنگ­شدگی، *yA* و *yB* به­ترتیب اعماق جریان در مقاطع *A*، و *B*، *yh* عمق آب پشت دریچه، *Lj* طول پرش هیدرولیکی، *EA* و *EB* به­ترتیب انرژی مخصوص در مقاطع *A* و *B*، *x* فاصله دریچه تا تنگ­شدگی، *L* طول مقطع تنگ‌شده، *VA* و *VB* به ترتیب سرعت در مقاطع *A* و *B* است. با در نظرگرفتن پارامترهای،g وبه عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش آنالیز ابعادی پی‌باکینگهام پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه (2) ارائه می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

همچنین با ساده­سازی و تقسیم برخی از پارامترها بر یکدیگر، پارامترهای بدون­بعد به صورت رابطه (3) خلاصه می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

به دلیل اینکه جریان در تحقیق حاضر متلاطم و محدوده عدد رینولدز بیش از 2000 است،پس می­توان از تاثیر پارامتر *Re* صرف‌نظر نمود [12]. همچنین پارامترهای*d/yA ، W/yA* 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 4 ارائه شد.

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

در پایان با ساده سازی رابطه 4، پارامترهای وابسته به صورت تابعی از پارامترهای مستقل بدون­بعد به صورت زیر ارائه شد.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

**2-3- معادلات کلاسیک هیدرولیکی**

در برخی موارد وقتی عرض تنگ­شدگی در مقطع طولی کانال نسبتا زیاد باشد با برخورد جریان فوق‌بحرانی به مقطع تنگ­شدگی، پرش مستغرق تشکیل می­شود (شکل 3). طبق رابطه 6، می­توان افت انرژی بین مقطع *A* و *B* را با استفاده از اصل انرژی محاسبه کرد. برای محاسبه عمق در مقطع *A*، از رابطه 7 و برای محاسبه سرعت جریان در مقطع *A* از رابطه 8 استفاده شد.

Contraction coefficient, Cc

|  |
| --- |
| **شکل 3.** پرش هیدرولیکی مستغرق |
|  |
| **Fig. 3.** Submerge hydraulic jump |

در رابطه 7، *d* میزان بازشدگی دریچه و *Cc* ضریب انقباض جریان است . (بلاد و همکاران [29]). ضریب انقباض (*Cc*) برحسب عمق آب پشت دریچه برای جریان‌های آزاد و مستغرق براساس شکل (4) محاسبه شد.

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |
| (7) |  |
| (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 9 و براساس ارتفاع آب پشت دریچه محاسبه شد.( راجاراتنام و همکاران [28])

|  |
| --- |
| **شکل 4.** ضریب انقباض دریچه کشویی برای جریان‌های آزاد و مستغرق.( بلاد و همکاران [29]) |
| Relative Opening, |
| **Fig. 4.** Vertical sluice gate contraction coefficient for free and submerge flow |

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

در رابطه 9: *yh*، ارتفاع آب پشت دریچه، *ySA* ، عمق استغراق دریچه و *VA*، سرعت در مقطع *A* است.

**2-4- 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*،70 درصد داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش و 30 درصد داده­ها برای آزمون انتخاب شده است. از شاخص­های آماری ضریب همبستگی*،* خطا جذر میانگین مربعات *RMSE* و خطا نسبی *ERelative error*، برای ارزیابی روابط بهره گرفته شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (12) |  |

**3- نتایج و بحث**

**3-1- مشاهدات آزمایشگاهی**

شکل 5 نمایی از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک و چگونگی رفتار جریان جریان در برخورد با المان­های 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 8/0، 28/1 و 08/2 و با درصد تخلخل 30، 5/18 و 6/11 درصد و کف زبر در مقطع تنگ، اجراء شده است. تعداد 270 آزمایش در محدوده عدد فرود 5/2 تا 5/7 و محدوده انقباض نسبی 5/0 تا 83/0 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 تنگ­شدگی 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 6). 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 5.** نمایی از مدل­های آزمایشگاهی

|  |
| --- |
| Q= 450 L/M  Δb= 25 cm  D50= 0.8 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 25 cm  D50= 1.28 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 25 cm  D50= 2.08 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 20 cm  D50= 0.8 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 20 cm  D50= 1.28 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 20 cm  D50=2.08 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 15 cm  D50= 0.8 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 15 cm  D50= 1.28 cm |
| Q= 450 L/M  Δb= 15 cm  D50= 2.08 cm |
| **Fig. 5.** View of experimental models |
|  |
| **شکل 6.** نمایی از تداخل آب و هوا و جریان برگشتی | |
|  | |
| **Fig. 6**. View of water and air mixing and backwater profile | |

**3-2- 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 (7)، 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 15 سانتی­متر نسبت به تنگ­شدگی 5 و 10 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 تنگ­شدگی با بستر زبر در مقایسه با تنگ‌شدگی با بستر صاف و تحقیقات دانشفراز و همکاران [12]، نشان از افزایش 29/53 و 45/55 و 62/54 درصدی درتنگ­شدگی 5 سانتی­متر و افزایش 46/59 و 52/60 و 46/59 درصدی در تنگ­شدگی 10 سانتی­متر و افزایش 41/60 و 21/61 و 60 درصدی به ترتیب برای مصالح با قطر متوسط 8/0، 28/1 و 08/2 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 7.** تغییرات استهلاک انرژی نسبی در برابر عدد فرود جریان بالادست |
| Δb/W=0.83 |
| Δb/W=0.66 |
| Δb/W=0.50 |
| **Fig. 7.** Variation of relative energy dissipation versus upstream Froude number |

مشاهده می­شود که تاثیر زبری با قطر متوسط 28/1 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 (8) بیانگر این است که در یک دبی ثابت میزان افت انرژی نسبی در تنگ­شدگی نسبی 085/0، 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* رابطه13 ارائه شده است. برای استخراج این رابطه، 70 درصد داده­های آزمایشگاهی به شکل تصادفی انتخاب و 30 درصد داده­های آزمایشگاهی نیز برای درستی‌آزمایی رابطه فوق در نظر گرفته شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (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*R2=0.927* ، خطا جذر میانگین مربعات *RMSE=0.027* و درصد خطای نسبی 81/8± درصد است (شکل 8).

|  |
| --- |
| **شکل 8.** مقايسه مقادير آزمايشگاهی استهلاک انرژی  نسبی آزمایشگاهی و محاسباتی |
|  |
| **Fig. 8.** Compare experimental with calculated relative energy dissipation |

**3-3- عدد فرود**

شکل9 بررسی عدد فرود در دو مقطع *A* و *B* ، جدول 2 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 15 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 80 درصدی در تنگ‌شدگی 5 سانتی­متر، کاهش تقریبی 90 درصدی در تنگ‌شدگی 10 سانتی­متر و کاهش تقریبی 94 درصدی در تنگ‌شدگی 15 سانتی­متر می­باشد که علت افزایش میزان کاهش عدد فرود به دلیل تشکیل پرش مستغرق در مقطع کنترل است.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **جدول 2.** محدوده متغیرهای عدد فرود پایین­دست | | | | |
| D50=2.08 | D50=1.28 | D50=0.8 | شاهد |  |
| 2~3.2 | 0.6~2.1 | 0.6~2 | 3.23  ~  6.43 | b= 25Δ |
| 1.88~2 | 1.16~2.1 | 1.4~1.5 | b= 20Δ |
| 1.7~2.2 | 1.6~1.7 | 1.7~1.9 | b= 15Δ |

**Table 2.** range of down stream Froud number

|  |
| --- |
| شکل 9. تغییرات اعداد فرود مقاطع در برابر دبی جریان |
|  |
|  |
|  |
| **Fig. 9.** Variation of Froude number versus discharge |

**3-4- اعماق مزدوج**

طبق آنالیز ابعادی صورت گرفته نسبت­ اعماق پرش به عدد فرود اولیه و نسبت تنگ­شدگی(*0.5 ,0.66 ,0.83**=*) و  بستگی دارد.

شکل (10)، 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 5، 10 و 15 سانتی­متر را برای هر سه زبری بکار رفته در کف تنگ­شدگی را نشان می‌دهد.

**شکل 11.** تغییرات اعماق مزدوج در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه اشاره

|  |
| --- |
| الف  Δb/W=0.83 |
| Δb/W=0.66  ب |
| ج  Δb/W=0.50 |
| **Fig. 10.** Variation of conjugated depth versus vena contracta Froude number |
|  |

با دقت در شکل­ها می‌فهمیم که در تنگ­شدگی 5 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 15 و 10 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 14، با استفاده از دستور *Solver* در اکسل که پس از استخراج 70 درصد مقادیر اعماق مزدوج از میان تعداد کل 189 داده در سیستم آزمایشگاهی و 30 درصد اعماق مزدوج به صورت محاسباتی پارامتر وابسته مورد نظر به صورت تابعی از پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده و شکل (11)، 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*R2=0.9817*، خطا جذر میانگین مربعات *RMSE=0.010* و درصد خطای نسبی 00/9± درصد است (شکل 12).

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |

|  |
| --- |
| **شکل 11.** مقايسه مقادير اعماق مزدوج آزمایشگاهی و محاسباتی |
|  |
| **Fig. 11.** Compare experimental with calculated relative Conjugated depth |

**4-3- طول پرش هیدرولیکی**

براساس آنالیز ابعادی صورت گرفته نسبت طول پرش هیدرولیکی به عدد فرود اولیه و نسبت تنگ­شدگی بستگی دارد. شکل (12)، تغییرات طول بی­بعد پرش هیدرولیکی با *FrA*  برای سه نوع تنگ­شدگی و سه نوع زبری را نشان می­دهد. در تنگ­شدگی 5 و 10 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 12.** تغییرات طول پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه |
| محدوده تبدیل پرش هیدرولیکی مستغرق به پرش آزاد |
| محدوده تبدیل پرش هیدرولیکی مستغرق به پرش آزاد |
|  |
| **Fig. 12.** Variation of hydraulic jump length *versus vena* contracta Froude number |

در تنگ‌شدگی 15 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.

**4- 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 3 انقباض ناگهانی 5، 10 و 15 سانتی متری و 3 نوع زبری با قطر متوسط 8/0، 28/1و 08/2 سانتی­متر در کف مقطع تنگ­شدگی، درفاصله 5/1 متری از دریچه مولد جریان فوق­بحرانی با بازشدگی ثابت به اندازه 2 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:

1. نتایج داده­های آزمایشگاهی نشان دهنده این است که استهلاک انرژی با افزایش میزان تنگ‌شدگی عرض کانال، افزایش می­یابد.
2. براساس نتایج آزمایشگاهی استفاده از زبری در کف مقطع تنگ­شدگی، میزان استهلاک انرژی نسبی را نسبت به بالادست بطور چشم­گیری افزایش می­دهد.
3. استهلاک انرژی در تنگ­شدگی 15 سانتی‌متر(حالت شاهد)، نسبت به تنگ­شدگی 15سانتی­متر با زبری­های 8/0، 28/1 و 08/2 سانتی­متر، به ترتیب 65/23، 79/21 و 85/26 درصد کمتر است.
4. استهلاک انرژی در تنگ­شدگی 10 سانتی‌متر(حالت شاهد)، نسبت به تنگ‌شدگی10 سانتی­متر با زبری­های 8/0، 28/1 و 08/2 سانتی­متر، به ترتیب42/45، 22/42 و 93/42 درصد کمتر است.
5. استهلاک انرژی در تنگ­شدگی 5 سانتی‌متر(حالت شاهد)، نسبت به تنگ­شدگی 5 سانتی متر با زبری­های 8/0، 28/1 و 08/2 سانتی­متر، به ترتیب 75/50، 19/51 و 40 درصد کمتر است.
6. 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.
7. 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.

**5- 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., N‌i‌k‌p‌o‌u‌r, 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*.

**Experimental investigation of hydraulic jump in sudden contraction with rough bed**

نویسندگان؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟

1-؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟

چکیده انگلیسی کمتر از 500 لغت نباشد

**Abstract**

One of the most important problems in downstream hydraulic structures is the destructive kinetic energy of the flow. Experts always try to properly design and reduce the effect of this destructive force on the downstream of hydraulic structures in rectangular channel. The aim of this study was to investigate the effect of sudden contraction with the rough bed of contracted section on the relative energy dissipation in the supercritical flow. Three types of constrictions with widths of 5, 10 and 15 cm and three roughnesses with average diameters of D50=0.8, 1.28 and 2.08 cm and range of Froude number 2.5 to 7.5 and relative contracting 0.5 to 0.83 was examined. Experimental results showed that with increasing the upstream Froude number, the upstream relative energy dissipation (ΔE/EA) increases. Also, by applying roughness to the bed of all three sections of contracting, it was observed that energy dissipation increased significantly, so that the highest energy dissipation with 78.35% increase related to 15 cm contracting and the lowest energy dissipation with 43.35% increase related to the contracting of 5 cm. The relationships extracted to estimate the relative energy dissipation showed that the results are in good agreement with the experimental data with a correlation coefficient of 0.927 and a normalized square absorption line of 0.02.

.

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

77

.