

Experimental Investigation of Supercritical Flow Energy Dissipation in Sudden Contraction with Wall Roughness

Rasoul Daneshfaraz^{*1}, Mir Amir Najibi²

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

Received: 14 June 2021, Accepted: 2 August 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: One of the most important problems in hydraulic structures is the kinetic energy of the flow. If this destructive energy is not controlled, the structures downstream will be damaged and cause significant damage. One of the functions of energy dissipator structures is to change the flow regime, reduce the flow velocity and eliminate excess flow energy. One of the methods that can deplete the flow is to create a narrowing along with the roughness in the flow path. By creating a constriction in the flow path and using roughness in the constriction wall and forming a hydraulic jump, a significant part of the destructive energy of the flow can be dissipated. Hydraulic jump is a common phenomenon downstream of hydraulic structures that increases the flow depth by rapidly converting the flow from supercritical to subcritical and plays an important role in influencing hydraulic parameters. Examining previous studies on stenosis with natural wall roughness, what is certain is that no laboratory and numerical studies have been observed so far.

Methodology: To perform the experiments, a laboratory flume with a rectangular cross section 5 meters long, 0.3 meters wide, 0.5 meters high and with Plexiglas floors and walls was used. Two pumps each with a capacity of 450 liters per minute enter the flow into the flume and the flow inlet flow is read by two rotameters with an error of $\pm 2\%$. A point gauge with an accuracy of one millimeter was used to measure the water depth, and a construction meter with an accuracy of one millimeter was used to measure the length of the jump length. To create narrowing in the cross section of the channel from glass boxes with fixed height of 0.5 m, widths of 2.5, 5, 7.5 cm on each side and to create supercritical current upstream of the section Narrowing A valve with a width of 0.3 m, a thickness of 3 mm with an opening of 2 cm, which is located at a distance of 1.5 m from the narrowing, has been used.

Figure 1, schematic of the canal and the equipment installed on it and Figure 2, an example of stiffening placement, hydraulic jump formed in the flow path and rough placement method with three average diameters of 2.08, 1.28, 0.8 Shows centimeters on the wall.

Results and Discussion: In order to achieve the objectives of the present study, flow path constrictions have been provided using glass boxes and sand materials have been used to roughen the constriction walls. In total, 270 experiments were performed in the range of Froude number 2.5 to 7.5 and relative contraction range of 8.9 to 12.42. By adjusting the laboratory model and opening the pump, the flow enters the channel supercritically after

passing through the vertical valve and moves towards the narrowing section.

As the downstream Froude number increases, the relative energy dissipation increases and this amount is greater than the energy dissipation in the constriction of 15 cm. The reason for this is that due to the collision of supercritical flow with the constriction section, the backwater profile at the point of water collision with the sides of the constriction elements and also the formation of hydraulic jump upstream of the constriction section increase turbulence and climate interference and consequently it increases the relative energy dissipation.

Changing the diameter of the rough particles has little effect on the amount of flow energy dissipation. But it can be seen that the effect of roughness with an average diameter of 1.28 cm is slightly more than other roughnesses. The reason for this is that the roughness of 1.28 cm has more contact surface with the flow and also the empty space between the grains increases the surface tension and shear stress. Therefore, some of the energy is wasted by hydraulic jumping and some of it is consumed by the backflow of the flow.

Conclusion: Comparison of the models with each other as a control showed that with increasing the amount of narrowing of the channel width, the relative energy consumption increases. According to laboratory results, the use of roughness significantly increases the relative energy consumption relative to the upstream. Energy dissipation in 15 cm constriction is 25.48%, 20.88% and 23.83% less than 0.8, 1.28 and 2.08 cm roughnesses in control mode, respectively. Energy dissipation in 10 cm constriction is less than 44.34, 43.68 and 40.63% in roughness compared to 0.8, 1.28 and 2.08 cm roughnesses, respectively. Energy dissipation at 5 cm constriction is 50.75, 51.19 and 40% less than 0.8, 1.28 and 2.08 cm roughnesses in control mode, respectively.

Keywords: Relative energy dissipation, Sudden contraction, Roughness, Hydraulic jump.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان فرابحرانی در تنگ‌شدگی ناگهانی به همراه زبری دیواره

رسول دانشفراز^{۱*}، میرامیر نجیبی^۲

۱- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۲- دانشجو کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

* daneshfraz@maragheh.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: از جمله مسئله‌های آزاد سازی آب پشت دریچه‌ها و مخزن‌ها، انرژی بالای جریان بوده و در صورت مهار نشدن (کنترل) انرژی جریان آسیب‌ها و زیان‌های شایان توجهی به سازه‌های پایین دست وارد می‌شود. از سازه‌های مناسب برای استهلاک انرژی ایجاد تنگ‌شدگی در مقطع عرضی آبراهه می‌باشد که با تشکیل پرش هیدرولیکی در بالادست جریان انرژی جریان را کاهش می‌دهد. این تحقیق با هدف بررسی تاثیر انقباض ناگهانی همراه با زبری دیواره بر میزان استهلاک انرژی در جریان فرابحرانی انجام شد. سه نوع تنگ‌شدگی با عرض‌های نسبی ۰/۵، ۰/۶۷ و ۰/۸۳ و زبری با قطرهای نسبی میانگین ۰/۰۳۲، ۰/۰۵۱، ۰/۰۸۱، ۰/۰۴، ۰/۰۶۴، ۰/۱۰۱، ۰/۰۵۳، ۰/۰۸۵ و ۰/۱۳۵ و محدوده عدد فرود ۲/۵ تا ۷/۵ و انقباض نسبی ۸/۹ تا ۱۲/۴۲ بررسی شد. در آغاز استهلاک انرژی سه نوع تنگ‌شدگی بدون زبری به‌عنوان شاهد بررسی شد، آن‌گاه برای توسعه آزمایش برای هر تنگ‌شدگی، سه نوع زبری در دیواره تنگ‌شدگی آبراهه بکار برده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، استهلاک انرژی نسبی بالادست ($\Delta E/E0$) افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که استهلاک انرژی در انقباض ۱۵ سانتی‌متر بیشتر از انقباض ۱۰ و ۵ سانتی‌متری می‌باشد. همچنین استهلاک در زبری با قطرهای نسبی ۰/۰۵۱، ۰/۰۶۴ و ۰/۰۸۵ بیشتر از دیگر زبری‌ها می‌باشد. رابطه‌های استخراج شده برای برآورد استهلاک انرژی نسبی نشان داد که نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی خوبی با یکدیگر با ضریب همبستگی ۰/۹۰۳ و خطای جذر میانگین مربعات عادی (نرمال) شده ۰/۰۳ دارند.

کلیدواژگان: استهلاک انرژی نسبی، انقباض ناگهانی، زبری، پرش هیدرولیکی.

۱- مقدمه

بخش شایان توجهی از انرژی زیانبار جریان را مستهلک کرد. در عمل پایه‌های پل می‌توانند در مسیر جریان انقباض ناگهانی ایجاد کنند. از سویی تنگ‌شدگی به واسطه پایه‌های پل به همراه زبری دیواره بر روی استهلاک انرژی تاکنون انجام نگرفته و در کارهای عملی نیز تاکنون مشاهده نشده است. اما نویسندگان باور دارند که در آینده استفاده از زبری در محل تنگ‌شدگی به واسطه پایه‌های پل می‌تواند در کارهای عملی نیز مورد توجه قرار گیرد. پرش هیدرولیکی پدیده‌ای رایج در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد که با تبدیل سریع جریان از فرابحرانی به فروبحرانی، عمق جریان را افزایش داده و نقش مهمی در میزان اثر گذاری روی فراسنجه (پارامتر)های هیدرولیکی دارد. با مرور

از جمله مسئله‌های مهمی که در پایین دست در سازه‌های هیدرولیکی بایستی مورد توجه قرار بگیرد، انرژی جنبشی جریان می‌باشد. در صورتی‌که این انرژی زیانبار کنترل نشود، سازه‌های پایین دست دچار تخریب شده و آسیب و زیان‌های شایان توجهی به بار می‌آورد. از جمله کارکردهای سازه‌های مستهلک کننده انرژی، تغییر رژیم جریان، کاهش سرعت جریان و از بین بردن یا تعدیل انرژی مازاد جریان است. یکی از روش‌هایی که می‌توان جریان را مستهلک کرد ایجاد تنگ‌شدگی به همراه زبری در مسیر جریان است. با ایجاد تنگ‌شدگی در مسیر جریان و استفاده از زبری در دیواره تنگ‌شدگی و تشکیل پرش هیدرولیکی می‌توان

تحقیق عرض آبراهه از ۱۵۰ سانتی‌متر به ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر کاهش یافت به طوری که زاویه انقباض نسبت به دیواره در محدوده ۲۱/۳ تا ۳۷/۹۴ درجه بود. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود، استهلاک انرژی نسبی در همه زاویه‌ها و انقباض‌ها افزایش یافت. همچنین با افزایش شیب کف آبراهه طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. (Sadeghi et al. (2013) به بررسی تاثیر شکل دیواره‌های تبدیل واگرا در ویژگی‌های پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که، به ازاء طول ثابت دیواره‌ی تبدیل، انحنای دیواره‌ها باعث کاهش سرعت و کاهش نرخ استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی می‌شود. (Daneshfaraz et al. (2017a) با بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی، در تنگ‌شدگی و واگرایی، به این نتیجه رسیدند که هدررفت انرژی در تنگ‌شدگی در مقایسه با واگرایی به طور میانگین ۸/۷۴ درصد کاهش می‌یابد. (Daneshfaraz et al. (2017b) به صورت عددی انقباض ناگهانی بر رفتار جریان در پیچ ۹۰ درجه با بود و نبود تنگ‌شدگی در محل پیچ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از تنگ‌شدگی در محل پیچ ۹۰ درجه باعث افزایش افت فشار در این ناحیه شده است.

بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ناگهانی توسط (Daneshfaraz et al. (2018) نشان داد که میزان استهلاک انرژی ناشی از تنگ‌شدگی ناگهانی بیشتر از پرش هیدرولیکی می‌باشد. به طوری که استهلاک انرژی نسبت به بالادست به میزان ۱۱/۴۳ درصد و نسبت به پایین دست به میزان ۶۵/۰۳ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد است. (Daneshfaraz et al. (2019) تاثیر میزان واگرایی و بستر زبرشده با شن را بر روی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی مورد بررسی کردند. نتایج نشان داد که حوضچه‌های آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر در همه‌ی نسبت‌های بازشدگی، عمق مزدوج پرش را در مقایسه با واگرای با بستر صاف به طور میانگین ۱۲ تا ۱۶ درصد کاهش می‌دهد. (Nayebzadeh et al. (2019a) با بررسی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با واگرایی تدریجی به این نتیجه رسیدند که استفاده از صفحه‌های مشبک و واگرایی دیواره‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق استخر

بررسی‌های گذشته در مورد تنگ‌شدگی همراه با زبری طبیعی در دیواره، آنچه مسلم است تاکنون بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی مشاهده نشد. اما تحقیقات به نسبت گسترده‌ایی در زمینه پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی به وسیله دیگر مستهلک کننده‌های انرژی مانند حوضچه‌های آرامش صفحه‌های مشبک، تنگ‌شدگی، شیب‌شکن‌های قائم، مایل و پلکانی و انواع سرریزها انجام گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد.

(Hager et al. (1985) بررسی‌هایی را به صورت آزمایشگاهی بر روی تاثیر فراسنجه‌های هندسی مانند زاویه جریان ورودی و خروجی، نسبت و طول انقباض را بر دبی جریان بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد استهلاک انرژی با افزایش طول انقباض افزایش می‌یابد. (Yasuda & Hager (1995) با بررسی آزمایشگاهی، تنگ‌شدگی تدریجی برای جریان فرابحرانی با نسبت انقباض، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ با طول-های ۱۵۵۰، ۱۰۸۰ و ۲۰۸۰ میلی‌متر مشاهده کردند که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، عمق‌های ثانویه پرش و انتهای ناحیه انقباض افزایش می‌یابد. (Reinauer & Hager (1998) با بررسی آزمایشگاهی یک شوت (chute) انقباض یافته به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی میزان عمق نسبی جریان روند افزایشی داشت.

(Wu & Molinas (2001) با بررسی بر روی برخورد جریان زیر بحرانی با انقباض کوتاه در آبراهه روباز به این نتیجه رسیدند که، ضریب دبی از نسبت بازشدگی محل انقباض تاثیر زیادی می‌پذیرد که میزان ضریب دبی در بازه ۰/۲۹ الی ۰/۵۴ متغیر است. (Izadjoo et al. (2005) با بررسی پرش هیدرولیکی در بستر زبر شده با زبری‌های دوزنقه‌ای به این نتیجه رسیدند که، طول نسبی پرش و استهلاک انرژی کل، افزایش می‌یابد. (Dey & Raikar (2007) با بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در یک انقباض طولانی برای جریان فروبحرانی به این نتیجه رسیدند که، عمق متعادل آبشستگی با کاهش نسبت بازشدگی مقطع انقباض یافته و افزایش اندازه ذرات رسوبی، افزایش می‌یابد. (Jan & Chang (2009) پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی را در یک شوت مایل مستطیلی با انقباض تدریجی بررسی کردند. در این

Tokyay et al. (2011) با بررسی بر روی تعیین اثرگذاری‌های زبری موج‌دار و زبری منشوری با آرایش زیکزاک و نواری بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی دریافتند که طول پرش هیدرولیکی در زبری موج‌دار ۳۵ درصد، در آرایش نواری ۴۰ درصد و در آرایش زیکزاک بین ۳۵ تا ۵۵ درصد کاهش می‌یابد و بستر زبر میزان افت انرژی را نسبت به پرش کلاسیک ۳ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. Nasr Esfahani and Shafaei Bajestan (2012) روی بستر زبر نشان دادند که طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش کلاسیک ۴۱ درصد و در بستر صاف ۵۸ درصد کاهش می‌یابد. Neisi and Shafaei Bajestan (2013) برای نخستین بار با بررسی پرش گسسته با بستر زبر، به این نتیجه رسیدند که نسبت عمق مزدوج ۱۶ تا ۲۰ درصد در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش یافته و بازده ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. Badizadegan et al. (2014) با بررسی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی افقی نشان دادند که میزان‌های مختلف شیب موج زبری، تأثیر متفاوتی در کاهش نسبت عمق مزدوج نداشته و انواع مختلف زبری در حدود به یک میزان، باعث کاهش عمق ثانویه می‌شوند. Daneshfaraz et al. (2020b) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر بستر زبر با جسم‌های ذوزنقه‌ای غیرممتد در ویژگی‌های پرش گسسته در آبراه‌های مستطیلی غیر منشوری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که، در آبراه‌های غیر منشوری در مقایسه با آبراه‌های منشوری باعث استهلاک انرژی بیشتر جریان، کاهش عمق ثانویه و افزایش طول پرش هیدرولیکی می‌شود. با توجه به امکان تشکیل مقطع‌های انقباض یافته در مسیر جریان فرا بحرانی که ممکن است در اثر ایجاد عامل‌های چون پایه‌های پل و یا تغییرپذیری‌های محیطی که باعث تنگ‌شدگی مقطع عرضی آبراه می‌شود، ضرورت محاسبه میزان استهلاک انرژی در رویارویی جریان فرا بحرانی با تنگ‌شدگی را مشخص می‌سازد. با بررسی تحقیقات پیشین مشاهده شد که بررسی‌های انجام گرفته تنها در زمینه همگرا و واگرایی تدریجی، شوت‌ها و استهلاک انرژی به وسیله دیگر مستهلک‌کننده‌ها بوده است. در سالیان اخیر

و عمق پایین دست شود. استفاده از صفحه‌های مشبک و دیواره واگرایی و استفاده همزمان از آنها به ترتیب باعث افزایش ۲۵، ۴۴ و ۴۸ درصدی بازده استهلاک انرژی می‌گردد. Daneshfaraz et al. (2020a) با بررسی عددی تأثیر انقباض ناگهانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متر بر میزان استهلاک انرژی در جریان فرا بحرانی، در محدوده فرود ۲/۵ تا ۷، با استفاده از مدل آشفتگی RNG، به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان تنگ‌شدگی استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. Nayebzadeh et al. (2021b) به بررسی عددی شیب‌شکن‌های قائم در حضور صفحه‌های مشبک و واگرایی تدریجی دیواره پرداختند. مدل آشفتگی به کار رفته در این تحقیق مدل RNG بوده، که نتایج آنها نشان داد، استهلاک انرژی نسبی بدلیل شدت برخورد جت با کف، افزایش و عمق نسبی استخر کاهش می‌یابد. دسته دیگر بررسی‌ها، مربوط به استهلاک انرژی در بستر زبر می‌باشد و تأثیر دیواره زبر بر استهلاک انرژی در پیشینه مشاهده نشد. از میان آن‌ها می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد: Rajaratnam (1968) با بررسی بر روی آبراهه با بستر زبر، نشان داد که طول غلتاب و طول پرش و عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر در مقایسه با بستر صاف به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. Mohamed Ali (1991) با مطالعه بر روی طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری ناممتد مکعبی شکل با تراکم ثابت ۱۰ درصد به این نتیجه رسید که طول پرش هیدرولیکی ۲۷/۴ تا ۶۷/۴ کاهش می‌یابد. Tokyay et al. (2005)، Abbaspour et al. (2009) و Elsebaie et al. (2010) با بررسی بر 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. Pagliara et al. (2009) در بررسی‌های خود با ساخت مدل‌هایی در شیب‌های مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲) به صورت خشکه‌چین به بررسی افت انرژی بر روی شیب‌های سنگی با شیب بسیار کم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش اندازه زبری میزان افت انرژی افزایش می‌یابد.

هیدرولیکی تشکیل شده در مسیر جریان و چگونگی جایگذاری زبری با سه قطر میانگین ۰/۸، ۱/۲۸، ۲/۰۸ سانتی متر در دیواره را نشان می دهد. جدول ۱، محدوده متغیرهای اندازه گیری شده را نشان می دهد.

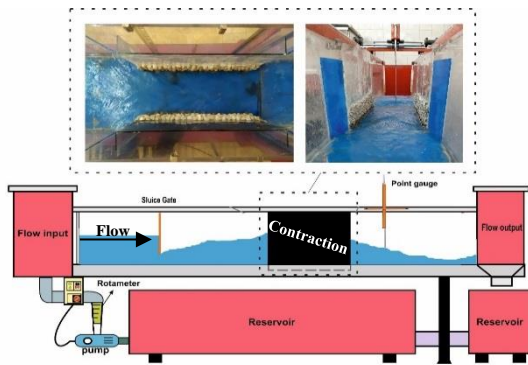


Fig. 1 Schematic of channel and equipment installed on it

شکل ۱ شمای کلی آبراهه و تجهیزات نصب شده بر روی آن

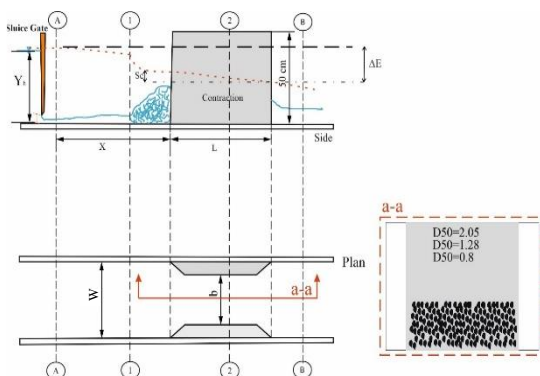


Fig. 2 Schematic of contraction and roughness placement

شکل ۲ شمای کلی آبراهه جایگذاری تنگ شدگی و زبری

جدول ۱ محدوده متغیرهای اندازه گیری شده

Table 1 Range of measured

Roughness (D ₅₀)	D ₅₀ /Δb	Q (L/min)	Y _B (cm)	Re (×10 ³)
Plain contraction	---	300	1.97-2.31	75-141
			4.55-7.63	
			4.94-8.54	
0.8 cm	0.032	600	3-4.26	76.5-159
			2.35-3.55	
			2.12-3.12	
1.28 cm	0.051	-	2.95-4.07	59-238
			1.85-4.38	
			2.12-3.49	
2.08 cm	0.081	-	1.89-2.22	
			1.86-3.17	
			2.1-2.82	

(Daneshfaraz et al. 2017) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر فاصله تنگ شدگی از دریچه در تنگ شدگی با دیواره صاف پرداختند. همچنین (Daneshfaraz et al. 2020) به بررسی عددی تاثیر تغییر عرض آبراهه با تنگ شدگی با دیواره صاف ناگهانی پرداختند. در ادامه این تحقیق، (Daneshfaraz et al. 2021d) به بررسی عددی تاثیر تنگ شدگی هلالی شکل با عرض های مختلف پرداختند. در هر سه تحقیق یادشده، نتایج نشان از افزایش استهلاک انرژی در استفاده از انواع تنگ شدگی ها را دارد. با توجه به تحقیقات پیشین که توسط (Daneshfaraz et al. 2017, 2020, 2021d) بررسی شده است، تاثیر زبری در دیواره محل تنگ شدگی، تاکنون بررسی فراسنجه های هیدرولیکی انجام نگرفته است. لذا در این تحقیق تاثیر هم زمان تنگ شدگی ناگهانی و زبری در دیواره آن بر استهلاک انرژی در جریان فرابحرانی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج آن با تحقیق (Daneshfaraz et al. 2020) مقایسه شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش ها، از فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و با کف و دیواره هایی از جنس پلکسی گلس، استفاده شده است. دو پمپ هر کدام با توان ۴۵۰ لیتر در دقیقه جریان را وارد فلوم می کند و دبی ورودی جریان توسط دو دبی سنج (روتامتر) با خطای ±۲ درصد خوانده می شود. برای اندازه گیری عمق آب از عمق سنج نقطه ای با دقت یک میلی متر استفاده شده است. برای ایجاد تنگ شدگی در مقطع عرضی آبراهه از جعبه (باکس) های شیشه ای با ارتفاع ثابت ۰/۵ متر، عرض های ۰/۵، ۲/۵، ۷/۵ سانتی متر از هر طرف و برای ایجاد جریان فرابحرانی در بالادست مقطع تنگ شدگی از یک دریچه به عرض ۰/۳ متر، ضخامت ۳ میلی متر با باز شدگی ۲ سانتی متر که در فاصله ۱/۵ متری از تنگ شدگی قرار گرفته، استفاده شده است.

شکل ۱، شمای کلی آبراهه و تجهیزات نصب شده بر روی آن و شکل ۲، نمونه ای از جایگذاری تنگ شدگی، پرش

۲-۲- تحلیل ابعادی

فراسنجه‌های موثر هندسی و هیدرولیکی برای بررسی استهلاک انرژی جریان در تنگ‌شدگی همراه با زبری دیواره، به صورت زیر است:

$$f1(Q, \rho, g, \mu, W, \Delta b, a, D_{50}, Y_A, Y_B, Y_h, E_A, E_B, L, x, V_A, V_B) = 0 \quad (1)$$

که در آن، Q دبی جریان، ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش، μ لزوجت پویا (ویسکوزیته دینامیکی)، W عرض آبراهه، Δb عرض تنگ‌شدگی، a بازشدگی دریچه، D_{50} قطر میانگین زبری دیواره، Y_A و Y_B به ترتیب اعماق جریان در مقطع‌های A و B ، Y_h عمق آب پشت دریچه، E_A و E_B به ترتیب انرژی مخصوص در مقطع‌های A و B ، x فاصله دریچه تا تنگ‌شدگی، L طول مقطع تنگ‌شده، V_A و V_B به ترتیب سرعت در مقطع‌های A و B می‌باشد. با در نظر گرفتن فراسنجه‌های ρ ، g و Y_A بعنوان فراسنجه‌های تکراری و با استفاده از روش تحلیل ابعادی پی‌باکینگهام می‌توان فراسنجه‌های بدون بعد را استخراج کرد.

$$f2(\text{Re}_A, Fr_A, Fr_B, \frac{W}{Y_A}, \frac{a}{Y_A}, \frac{\Delta b}{Y_A}, \frac{D_{50}}{Y_A}, \frac{Y_B}{Y_A}, \frac{Y_h}{Y_A}, \frac{Y_{cr}}{Y_A}, \frac{E_A}{Y_A}, \frac{E_B}{Y_A}, \frac{x}{Y_A}, \frac{L}{Y_A}) = 0 \quad (2)$$

با تقسیم برخی از فراسنجه‌ها بر یکدیگر و همچنین ساده‌سازی برخی از آنها، برابر رابطه ۳ خواهیم داشت:

$$f3(\text{Re}_A, Fr_A, Fr_B, \frac{W}{Y_A}, \frac{a}{Y_A}, \frac{D_{50}}{\Delta b}, \frac{y_B}{Y_A}, \frac{E_A}{Y_A}, \frac{E_B}{Y_A}, \frac{x}{L}) = 0 \quad (3)$$

با توجه به اینکه جریان در همه دبی‌های به کار رفته آشفته می‌باشد و محدوده عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ است، لذا از فراسنجه Re صرف نظر گردید (Daneshfaraz et al. (2021a,b,c,d)). همچنین فراسنجه‌های a/Y_A و W/Y_A به ترتیب به دلیل ثابت بودن میزان بازشدگی دریچه، x/L به ترتیب به دلیل ثابت بودن میزان بازشدگی دریچه، فراسنجه‌های بدون بعد حذف شدند و کمیت‌های بدون بعد موثر برابر رابطه ۴ ارائه شده است.

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

در نهایت فراسنجه‌های وابسته به صورت تابعی از فراسنجه‌های مستقل بدون بعد بر مبنای رابطه ۵ ارائه شده است.

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

۲-۳- رابطه‌های مورد استفاده

با توجه به شکل ۳، در برخی موارد با برخورد جریان فرابحرانی با مقطع تنگ‌شدگی، پرش مستغرق می‌شود. این پدیده بیشتر در زمان‌هایی که عرض تنگ‌شدگی به نسبت زیاد باشد، رخ می‌دهد. افت انرژی بین مقطع‌های A و B با استفاده از اصل انرژی و از طریق رابطه ۶، قابل محاسبه است.

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

که در رابطه ۶، V_A و V_B سرعت در مقطع A و B ، Y_A و Y_B به ترتیب عمق در مقطع A و B است. سرعت در مقطع B توسط عمق میانگین برداشت شده قابل محاسبه است ولی برای محاسبه سرعت در مقطع A ، در آغاز عمق جریان در مقطع A برابر رابطه ۷ محاسبه شده و میزان سرعت جریان در همان مقطع برابر رابطه ۸ و با جایگذاری عمق به دست آمده از رابطه ۷ به دست می‌آید.

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

$$V = \frac{Q}{(W \times Y_A)} \quad (8)$$

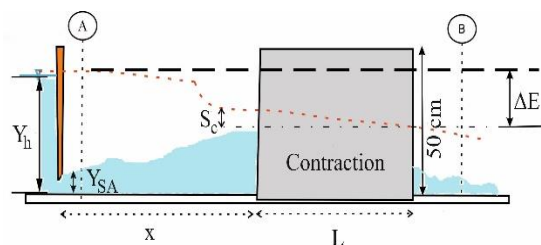


Fig. 3 Submerge hydraulic jump

شکل ۳ پرش هیدرولیکی مستغرق

که در آن: d میزان بازشدگی دریچه و C_c ضریب انقباض جریان است (Belaud et al. (2009)). ضریب انقباض (C_c) بر حسب عمق آب پشت دریچه برای جریان‌های آزاد و

$$R^2 = \left(\frac{N \sum E_{exp} E_{cal} - (\sum E_{exp})(\sum E_{cal})}{\sqrt{N(\sum E_{exp}^2) - (\sum E_{exp})^2} \sqrt{N(\sum E_{cal}^2) - (\sum E_{cal})^2}} \right)^2 \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (E_{exp} - E_{cal})^2} \quad (12)$$

$$E_{Relative\ error} = \frac{|E_{exp} - E_{cal}|}{E_{exp}} \times 100 \quad (13)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

برای دستیابی به هدفهای پژوهش، تنگ‌شدگی‌های مسیر جریان با استفاده از جعبه (باکس)‌های شیشه‌ای فراهم شده و برای زبر کردن دیواره‌های تنگ‌شدگی از مصالح شن با قطرهای میانگین نسبی ۰/۳۲، ۰/۵۱، ۰/۸۱، ۰/۴، ۰/۶۴، ۰/۱۰۱، ۰/۵۳، ۰/۸۵، ۰/۱۳۸ و با درصد تخلخل ۳۰، ۱۸/۵ و ۱۱/۶ درصد استفاده شده است. در حالت کلی شمار ۲۷۰ آزمایش در محدوده عدد فرود ۲/۵ تا ۷/۵ و محدوده انقباض نسبی ۸/۹ تا ۱۲/۴۲ انجام گرفته است. با تنظیم مدل آزمایشگاهی و باز کردن پمپ، جریان بعد از عبور از دریچه قائم به صورت فرابحرانی وارد آبراه می‌شود و همانند شکل ۵ به سمت مقطع تنگ‌شدگی حرکت می‌کند. در شکل ۵ می‌توان رفتار جریان در هنگام برخورد با جسم و عنصرهای تنگ‌شدگی و انواع پرش‌های هیدرولیکی تشکیل‌شده در سامانه آزمایشگاهی را مشاهده کرد. با رسیدن جریان به مقطع تنگ‌شدگی ناگهانی و برخورد با آن، پرش هیدرولیکی تشکیل شده و به واسطه برخورد جریان با جسم و عنصرهای تنگ‌شدگی پس‌زدگی جریان ایجاد شده و عمق آب در درون مقطع انقباض یافته، افزایش می‌یابد. تشکیل پرش هیدرولیکی باعث افزایش تلاطم و تداخل آب و هوا در درون تنگ‌شدگی می‌شود. برابر مشاهده‌های ایجاد زبری در دیواره و افزایش قطر میانگین مصالح دیواره، عمق آب بالا دست رفته رفته افزایش می‌یابد که باعث استهلاک انرژی بیشتری می‌شود.

۳-۲- استهلاک انرژی نسبی

بنابر تحلیل ابعادی، شکل ۶ تغییر پذیری‌های استهلاک انرژی نسبی را در برابر عدد فرود بالادست نشان می‌دهد.

مستغرق برمبنای شکل ۴ محاسبه شد. در زمان‌هایی که پرش، مستغرق است، بدلیل تلاطم جریان در مقطع A اندازه‌گیری عمق جریان دشوار است. بنابراین Rajaratnam et al. (1977)، برابر رابطه ۹ میزان عمق مستغرق دریچه را با استفاده از ارتفاع آب پشت دریچه به دست آوردند.

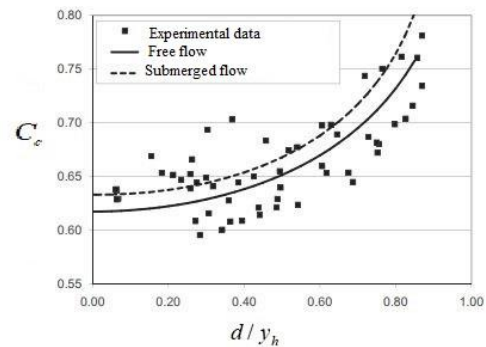


Fig 4. Vertical sluice gate contraction coefficient for free and submerged flow (Belaud et al., 2009)

شکل ۴ ضریب انقباض دریچه کشویی برای جریان‌های آزاد و مستغرق (Belaud et al., 2009)

$$Y_{SA} = y_h - \frac{V_A^2}{2g} \quad (9)$$

که در رابطه بالا Y_h ، ارتفاع آب پشت دریچه، Y_{SA} عمق استغراق دریچه و V_A ، سرعت در مقطع A است و در آخر افت انرژی برای پرش‌های مستغرق از طریق رابطه ۱۰، قابل محاسبه است.

$$\Delta E_{AB} = \left(Y_{SA} + \frac{V_A^2}{2g} \right) - \left(Y_B + \frac{V_B^2}{2g} \right) \quad (10)$$

۴-۲- معیارهای ارزیابی

در این تحقیق، رابطه‌هایی برای محاسبه استهلاک انرژی نسبی و عمق‌های مزدوج ارائه شده است که فراسنجه‌های وابسته به صورت تابعی از فراسنجه‌های مستقل در نظر گرفته شده است. برای ارائه این رابطه‌ها در اکسل به کمک دستور Solver، ۷۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها برای آزمون‌گزینش شده است. از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی R^2 ، خطا جذر میانگین مربعات $RMSE$ ، خطا نسبی $E_{Relative\ error}$ برای ارزیابی رابطه‌ها بهره گرفته شده است.

سانتی‌متر بیشتر است. علت این امر برخورد جریان فرابحرانی به مقطع تنگ‌شدگی، جریان برگشتی در محل برخورد آب با کناره‌های جسم و عنصرهای تنگ‌شدگی و همچنین تشکیل پرش هیدرولیکی در بالادست مقطع تنگ‌شدگی است. پرش هیدرولیکی باعث افزایش تلاطم و تداخل آب و هوا شده و به تبع آن استهلاک نسبی انرژی افزایش می‌یابد. استفاده از زبری بدلیل ایجاد تنش برشی میان جریان و زبری دیواره‌ها و همچنین افزایش میزان اصطکاک بین سنگدانه‌های دیواره‌ها و جریان، باعث کم شدن سرعت و افزایش عمق جریان شده و عدد فرود پایین‌دست را به شدت کاهش می‌دهد. با افزایش میزان میانگین مصالح دیواره تنگ‌شدگی، اصطکاک مابین جریان و سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که تاثیر قطر نسبی مصالح در استهلاک با زبری نسبت به شاهد زیاد بوده ولی تغییر قطر مصالح دیواره نسبت به یکدیگر تاثیر چندانی بر استهلاک انرژی ندارد. همچنین با کم شدن قطر میانگین ذرات زبری، بدلیل کاهش تخلخل میان سنگدانه‌ها استهلاک انرژی افزایش و عمق پایین‌دست افزایش می‌یابد. همچنین این نتایج تحقیق با تحقیقات (Daneshfaraz et al. (2020) که به بررسی آزمایشگاهی و عددی انقباض ناگهانی 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 (Daneshfaraz et al. (2020) افزایش داده است. نتایج نشان داد که تغییر قطر ذرات زبری تاثیر چندانی بر میزان استهلاک انرژی جریان ندارد. ولی می‌توان دید که تاثیر زبری با قطر میانگین ۱/۲۸ سانتی‌متر کمی بیشتر از بقیه زبری‌ها است. دلیل آن است که زبری ۱/۲۸ سانتی‌متر سطح تماس بیشتری با جریان داشته و همچنین فضای خالی میان دانه‌ها باعث افزایش اصطکاک و تنش برشی می‌شود. لذا میزانی از انرژی توسط پرش هیدرولیکی و میزان دیگری از آن به‌واسطه پس‌زدگی جریان مستهلک شود. شکل ۷ بیانگر این است که در یک دبی ثابت میزان افت انرژی نسبی در تنگ‌شدگی نسبی ۰/۰۸۵ در دیواره، بیشتر از بقیه تنگ‌شدگی‌ها می‌باشد.

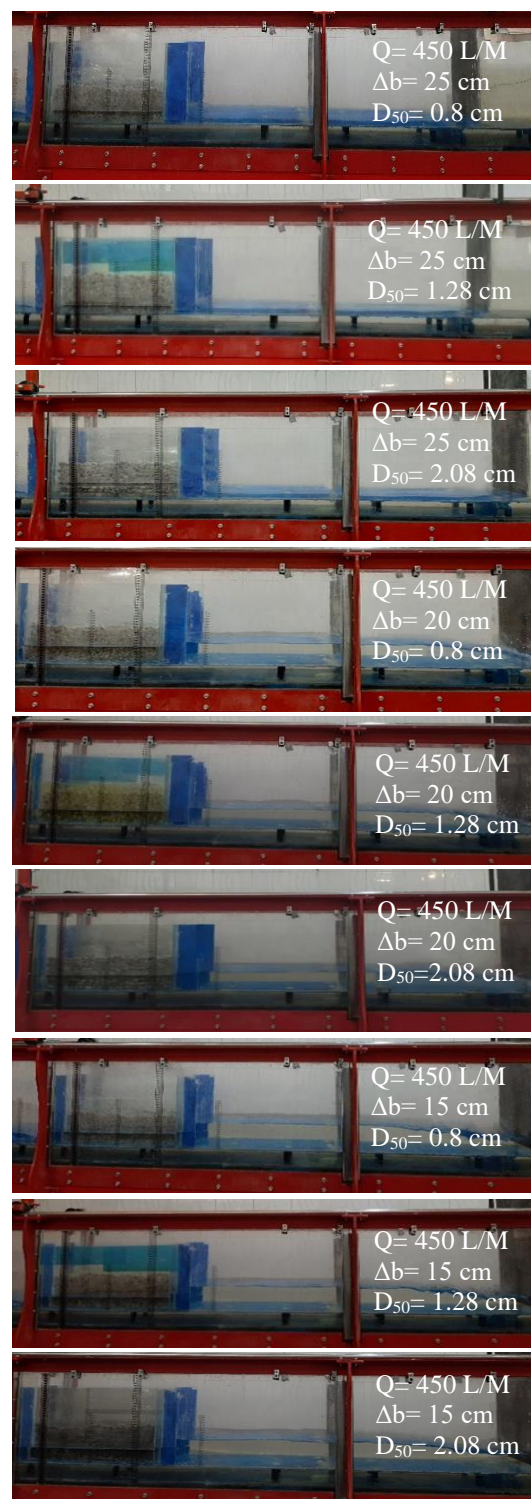


Fig. 5 View of experimental models

شکل ۵. نمای از مدل‌های آزمایشگاهی

چنانچه از شکل استنباط می‌گردد با افزایش عدد فرود، میزان استهلاک نسبی انرژی در همه مدل‌های این تحقیق روند افزایشی و صعودی دارد. این میزان از استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر نسبت به تنگ‌شدگی ۵ و ۱۰

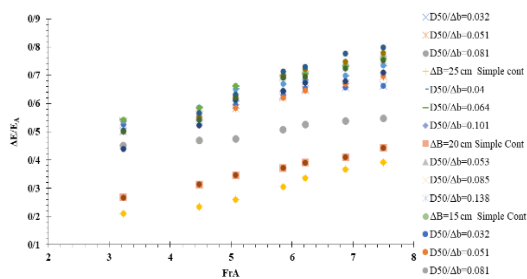


Fig. 7 Investigation of energy dissipation versus upstream Froude number in all models with rough wall

شکل ۷ بررسی استهلاک انرژی نسبت به عدد فرود بالادست همی مقطع‌ها همراه با زبری دیواره

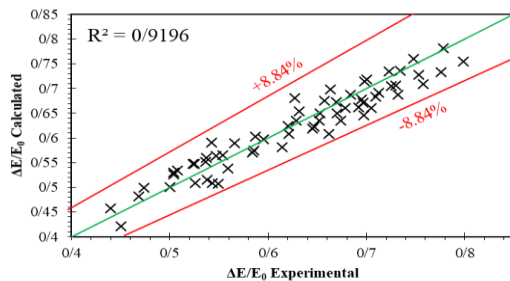


Fig. 8 Compare experimental with calculated relative energy dissipation

شکل ۸ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی استهلاک انرژی نسبی آزمایشگاهی و محاسباتی

۳-۳- عدد فرود

شکل ۹ بررسی عدد فرود در دو مقطع A و B ، را نشان می‌دهد که تغییر پذیری‌های بازه عدد فرود پایین‌دست به تفصیل در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که از شکل استنباط می‌شود عدد فرود در پایین دست پس از هر ۳ نوع تنگ‌شدگی ناگهانی، به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. افزون بر تاثیر تنگ‌شدگی، تاثیر همزمان زبری در دیواره تنگ‌شدگی نشان می‌دهد که در یک دبی ثابت بیشترین افت عدد فرود، در مقطع ۱۵ سانتی‌متری می‌باشد. دلیل این امر آن است که با افزایش دبی و برخورد جریان با جسم و عنصرهای تنگ‌شدگی، با تشکیل پرش هیدرولیکی و جریان‌های متلاطم، سرعت جریان کاهش و عمق آن افزایش می‌یابد. با افزایش عمق، رژیم جریان در مقطع پایین‌دست تبدیل به فروبرحانی شده یا در بعضی از دبی‌ها، عدد فرود کاهش بسیار چشمگیری داشته است. از جمله تاثیرهای کاهش چشمگیر عدد فرود در پایین‌دست

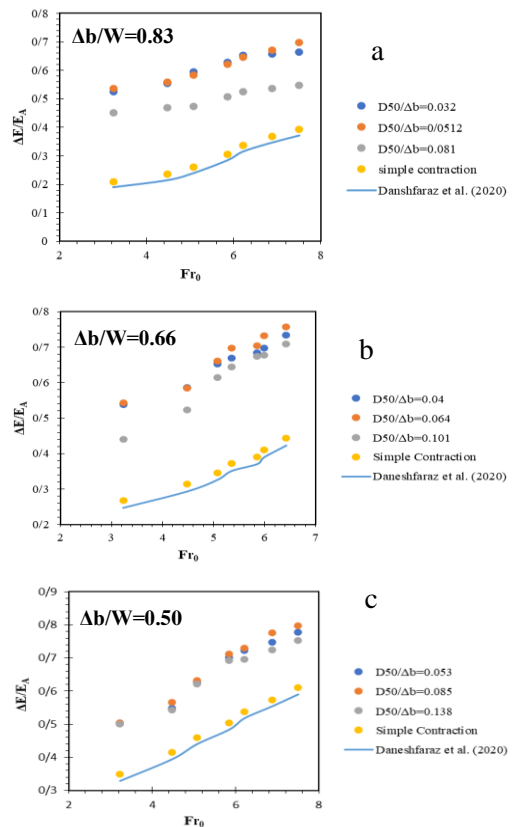


Fig. 6 Variation of relative energy dissipation versus upstream Froude number: a) contraction of 5 cm; b) contraction of 10 cm; c) contraction of 15 cm

شکل ۶ تغییر پذیری‌های استهلاک انرژی نسبی در برابر عدد فرود جریان بالادست: (a) تنگ‌شدگی ۵ سانتی‌متر، (b) تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر، (c) تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر

رابطه ۱۴، با استفاده از ۷۰٪ درصد داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت تصادفی، برای برآورد استهلاک انرژی نسبی بالادست ارائه شد و ۳۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی رابطه ارائه شده در نظر گرفته شده است. برای بررسی میزان‌های آزمایشگاهی استهلاک انرژی نسبی مقطع تنگ‌شدگی با میزان‌های پیش‌بینی شده توسط شاخص‌های ارزیابی، نشان داد که رابطه دارای ضریب تعیین $R^2=0.9196$ ، خطا جذر میانگین مربعات $RMSE=0.039$ و درصد خطای نسبی ± 8.84 می‌باشد (شکل ۸). رابطه ارائه شده برای فاصله ثابت دریچه تا تنگ‌شدگی استخراج شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_A} = -3.3536(Fr_A)^{-0.0981} \times (D_{50}/\Delta b)^{0.02185} + 3.2098(\Delta b/W)^{-0.0671} \quad (14)$$

هیدرولیکی در برابر عدد فرود جریان عبوری از زیر دریچه را نشان می‌دهد. نمودارهای الف، ب و ج به ترتیب بیانگر تغییر پذیری‌های عمق‌های مزدوج تنگ‌شدگی‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر را برای هر سه زبری به کار رفته در دیواره تنگ‌شدگی می‌باشد.

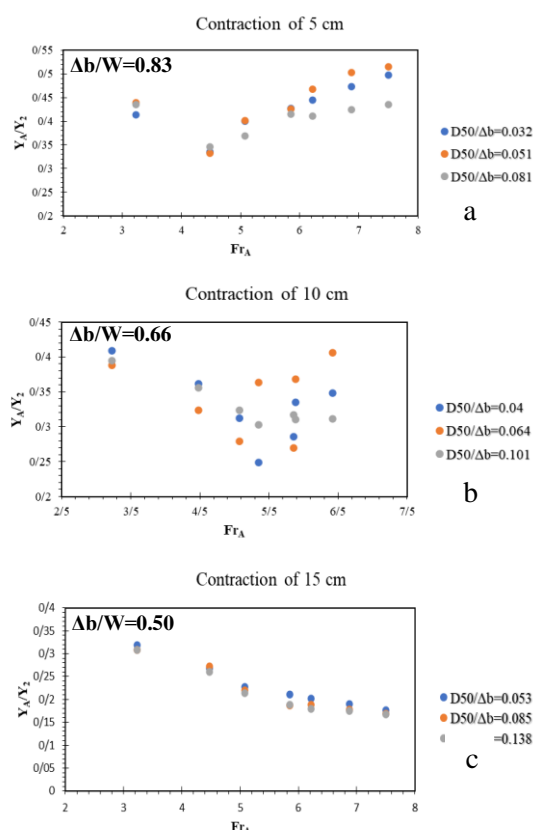


Fig. 10 Variation of conjugated depth versus vena contracta Froude number

شکل ۱۰ تغییر پذیری‌های عمق‌های مزدوج در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه

بادقت در شکل‌ها استنباط شود که در همه مدل‌های بررسی شده، عمق‌های 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 عمق‌های مزدوج تاحدودی میزان ثابتی به خود می‌گیرند و صعودی می‌شود. در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر در همه دبی‌های به کار رفته پرش هیدرولیکی جریان از نوع مستغرق بوده و به همین دلیل در هر سه زبری با افزایش دبی، اعماق مزدوج جریان افزایش می‌یابد. همچنین افزایش

سازه‌های هیدرولیکی می‌توان به کاهش فرسایش و تخریب آبراهه، مانع از ایجاد امواج زیانبار در پایاب، پدیده آبشستگی و کاهش طول حوضچه آرامش اشاره کرد.

جدول ۲ محدوده متغیرهای عدد فرود پایین‌دست

Table 2 range of down stream Froude number

	Simple channel	$D_{50}=0.8$	$D_{50}=1.28$	$D_{50}=2.08$
$\Delta B=25$	3.23	0.6~2	0.6~2.1	2~3.2
$\Delta B=20$	~	1.4~1.5	1.16~2.1	1.88~2
$\Delta B=15$	6.43	1.7~1.9	1.6~1.7	1.7~2.2

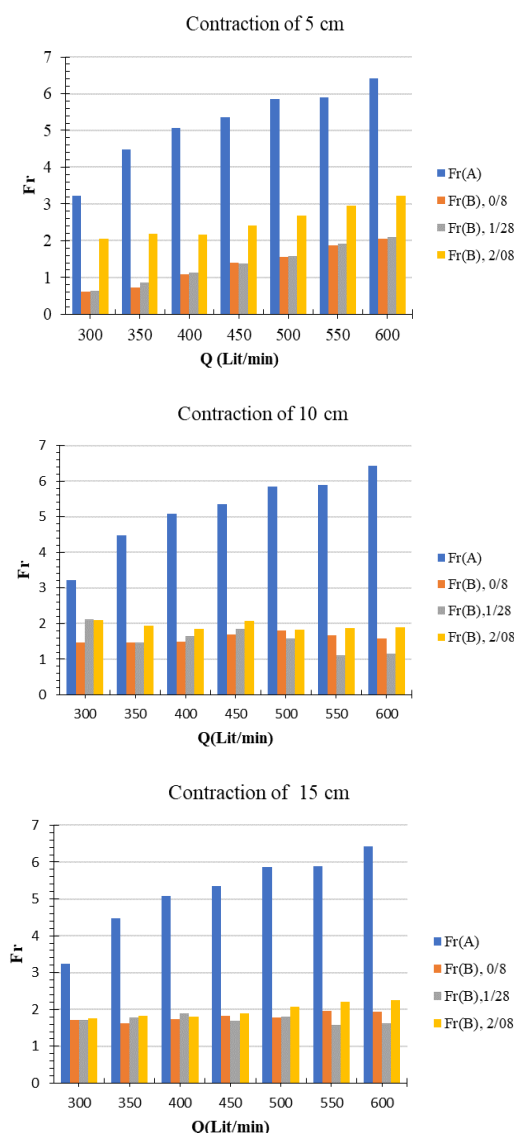


Fig. 9 Variation of Froude number versus discharge

شکل ۹ تغییر پذیری‌های اعداد فرود مقطع‌ها در برابر دبی جریان

۴-۳- اعماق مزدوج

شکل ۱۰، تغییر پذیری‌های عمق‌های مزدوج پرش

میزان تنگ‌شدگی باعث افزایش عمق‌های مزدوج جریان می‌گردد.

پس از استخراج میزان‌های اعماق مزدوج از سامانه آزمایشگاهی، با استفاده از روش *solver* در اکسل، رابطه‌ای برابر رابطه ۱۵ برای اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی استخراج شده و نمودار مربوط به آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. شاخص‌های ارزیابی نشان داد که رابطه ۱۵ دارای ضریب تعیین $R^2=0.9686$ ، خطا جذر میانگین مربعات $RMSE=0.097$ و درصد خطای نسبی $\pm 9.76\%$ می‌باشد. رابطه ارائه شده برای فاصله ثابت دریاچه تا تنگ‌شدگی استخراج شده است.

$$Y_A / Y_2 = 16(Fr_A)^{-2.301} \times 16(D_{50} / \Delta b)^{2.27} + 0.632(\Delta b / W)^{2.06} \quad (15)$$

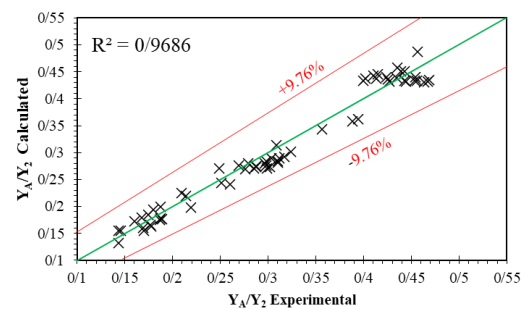


Fig. 11 Compare experimental with calculated relative Conjugated depth

شکل ۱۱ مقایسه میزان عمق‌های مزدوج آزمایشگاهی و محاسبه‌ای

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر انقباض ناگهانی بر استهلاک انرژی جریان فرابحرانی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. مدل آزمایشگاهی با ۳ انقباض ناگهانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری و ۳ نوع زبری با قطر میانگین ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی متر در دیواره، در فاصله ۱/۵ متری از دریاچه مولد جریان فرابحرانی با بازشدگی ثابت به اندازه ۲ سانتی متر انجام شد که در حالت کلی بنابر نتایج آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی نسبت به بالادست با افزایش عدد فرود جریان بالادست، افزایش یافت. دیگر نتایج به شرح زیر می‌باشد:

۱- مقایسه مدل‌ها با یکدیگر نشان داد که با افزایش میزان تنگ‌شدگی عرض آبراهه، استهلاک انرژی نسبی

افزایش می‌یابد.

۲- بنابر نتایج آزمایشگاهی استفاده از زبری، میزان استهلاک انرژی نسبی را نسبت به بالادست به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۳- استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی متر، در حالت شاهد (بدون زبری) نسبت به تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی متر با زبری‌های ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی متر، به ترتیب ۲۵/۴۸، ۲۰/۸۸ و ۲۳/۸۳ درصد کمتر می‌باشد.

۴- استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی متر، در حالت شاهد (بدون زبری) نسبت به تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی متر با زبری‌های ۰/۸، ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی متر، به ترتیب ۴۴/۳۴، ۴۳/۶۸ و ۴۰/۶۳ درصد کمتر می‌باشد.

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

۶- عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی، با افزایش عدد فرود در جریان مستغرق روند کاهشی داشته ولی در جریان با پرش هیدرولیکی آزاد عمق‌های مزدوج تا حدودی میزان ثابت و صعودی را به خود گرفته است.

۵- فهرست علائم

a	بازشدگی دریاچه (cm)
D_{50}	قطر میانگین مصالح (cm)
E_A	انرژی مخصوص مقطع A (m)
E_1	انرژی مخصوص مقطع ۱ (m)
E_2	انرژی مخصوص مقطع ۲ (m)
E_B	انرژی مخصوص مقطع B (m)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
L	طول مقطع تنگ‌شدگی (cm)
Q	دبی جریان (m^3s^{-1})
V_A	سرعت در مقطع A (ms^{-1})
V_1	سرعت در مقطع ۱ (ms^{-1})
V_2	سرعت در مقطع ۲ (ms^{-1})
V_B	سرعت در مقطع B (ms^{-1})
W	عرض آبراهه (cm)

Vertical Drop. Applied Sciences, 11(9), 4238.

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Kuriqi, A. and Abraham, J. (2021b). Three-Dimensional Investigation of Hydraulic Properties of Vertical Drop in the Presence of Step and Grid Dissipators. Symmetry. 13(5), 895.

Daneshfaraz, R., Kaya, B., Sadeghfam, S. and Sadeghi, H. (2014). Simulation of flow over ogee and stepped spillways and comparison of finite element volume and finite element methods. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering. 3(2), 37-47.

Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Mirzaee, R. and 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(2.1), 119-128. (In Persian)

Daneshfaraz, R., Rezazadeh Joudi, A. and 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. (In Persian)

Daneshfaraz, R., Rezazadeh Joudi, A. and Abraham, J. (2017). Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 90-degree bend. KSCE J. Civil Eng. 22, 603-612.

Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and 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)

Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Kashani, M. (2014). Numerical simulation of flow over stepped spillways. Research in Civil and Environmental Engineering, 2(04), 190-198.

Daneshfaraz, R., Sadeghi, H., Rezazadeh Joudi, A. and Abraham, J. (2017). Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in contractions and expansions. Sigma Journal of Engineering & Natural Sciences. 35(1), 87-98.

Dey, S. and Raikar, R.V. (2007). Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. Journal of Hydraulic Engineering. 133(4), 399-413.

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

x فاصله دریچه تا تنگ‌شدگی (cm)

Y_A عمق جریان در مقطع A (cm)

Y_I عمق جریان در مقطع ۱ (cm)

Y_2 عمق جریان در مقطع ۲ (cm)

Y_B عمق جریان در مقطع B (cm)

Y_h عمق آب پشت دریچه (cm)

μ لزوجت پویا ($\text{kg}\cdot\text{sm}^{-1}$)

ρ چگالی (kgm^{-3})

Δb عرض تنگ‌شدگی (cm)

۶- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از همه کسانی که در نگارش مقاله کمک کرده‌اند قدردانی می‌کنند.

۷- منابع

Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A. Farsadzadeh, D. and Sadraddini, A.A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-Environment Research. 3(2), 109-117.

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.

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

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

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaili, E., Sadeghfam, S. and 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.

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Abraham, J. and Bagheradeh, M. (2021a). SVM Performance for Predicting the Effect of Horizontal Screen Diameters on the Hydraulic Parameters of a

- Enlarged stilling basins. pp.5042-5050. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment. 4-9 Aug. Vancouver, Canada.
- Rahmanshahi Zahabi, M. and Shafai Bejestan, M. (2012). Experimental investigation of the effect of chute bed roughness height on energy dissipation. *Journal of Water and Soil Science*. 22(2), 96-101. (In Persian)
- Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic Jumps on Rough Beds, *Trans. Engineering Inst. Canada*, 11(a-2), 1-8.
- Reinauer, R. and Hager, W.H. (1998). Supercritical flow in chute contraction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(1), 55-6.
- Sadeghi, H., Daneshfaraz, R., Behmanesh, J. and 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.
- Tokyay, N.D. (2005). Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI. Water & Environmental Resources Congress. Anchorage. Alaska. USA. 8 p.
- Tokyay, N.D., Evcimen, T.U. and Şimşek, C. (2011). Forced Hydraulic Jump on Nonprotruding Rough Beds. *Can. J. Civil Eng.* 38, 1136-1144.
- Wu, B. and Molinas, A. (2001). Choked flows through short contractions. *Journal of hydraulic Engineering*. 127(8), 657-6 .62
- Yasuda, Y. and Hager Willi, H. (1995). Hydraulic jump in channel contraction. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 22(5), 925-933
- Hager, W.H. and Dupraz, P.A. (1985). Discharge characteristics of local, discontinuous contractions. *Journal of Hydraulic Res.* 23(5), 421-433.
- 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 .
- Jan, C.D. and Chang, C.J. (2009). Hydraulic jumps in an inclined rectangular chute contraction. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135(11), 949-958.
- Nasr Esfahani, M. and Shafaei Bejestan, M. (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.
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M. and 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. (In Persian)
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M. and 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. (In Persian)
- Neisi, K. and Shafai Bajestan, M. (2013). Characteristics of S-jump on Roughened Bed Stilling Basin. *Journal of Water Sciences Research*, 5(2), 25-34.
- Pagliara, S., Carnacina, L. and Palermo, M, (2009). Energy dissipation in presence of block ramps with