



## Research Paper

## Experimental Investigation of Hydraulic Parameters of Flow in Sluice Gates with Different Openings

Rasoul Daneshfaraz<sup>1\*</sup>, Reza Norouzi<sup>2</sup> and Hamidreza Abbaszadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>2</sup>Ph.D. Alumni, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>M.Sc. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

### Article information

**Received:** December 23, 2021

**Revised:** January 27, 2022

**Accepted:** January 28, 2022

### Keywords:

Contraction Coefficient

Discharge Coefficient

Energy Dissipation

Gate Opening

Hydrodynamic Force

\*Corresponding author:

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



### Abstract

Here, the contraction coefficient, discharge coefficient, hydraulic jump length, and relative energy dissipation in which the gate acts as a supercritical flow generator were investigated at different openings. The maximum value of the contraction coefficient is related to the gate with the lowest amount of opening. The amount of gate opening is inversely related to the discharge coefficient. At a certain discharge, increasing opening leads to a decrease in relative energy dissipation. Moreover, with increasing Froude number, relative energy dissipation increases. Here, the amplitude of the Froude number changed from 2.2 to 14.2, which has a direct effect on the hydraulic jump length, and with increasing opening, the Froude number and jump length decreased. The amount of opening is inversely related to the upstream water depth and the hydrodynamic force applied to the gate. Regression nonlinear polynomial relationships were presented to predict relative energy dissipation and discharge coefficient with appropriate statistical indicators of root mean square error and Kling Gupta. For the discharge coefficient, more than 78% of the data have an error of less than  $\pm 1.5\%$ . In addition, for energy dissipation relative to the upstream and downstream, more than 88% of the data have a relative error of less than  $\pm 5$  and  $\pm 1\%$ , respectively.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



### Introduction

Sluice gates are among the hydraulic structures that are widely used in irrigation networks due to their ease of use. These structures are used to measure flow and regulate the upstream water level in open channels. Determining the flow rate and estimating the discharge coefficient is one of the most important issues in hydraulic

engineering and provides great help to engineers and users in order to design the structure and be aware of the flow situation. To prevent water wastage, the control and distribution of water in irrigation networks should be done with utmost care and control structures such as gates should be selected correctly and in accordance with the conditions of each area. In addition, the



performance of hydraulic structures in terms of energy dissipation can affect the stability and strength of the structure in the bed of rivers and channels. As hydraulic jump with oscillating waves destroys the structure and the floor of the channel, thus understanding the hydraulic parameters is a fundamental aid to the design of the structure. Therefore, in the present study, with a careful approach to advance the mentioned cases, the need to study sluice gates in order to accurately understand the flow behavior, understanding the effective relationships, and also its effect on hydraulic capacity in different sluice gate openings in supercritical flow conditions was investigated. Also, its effect on contraction coefficient, discharge coefficient, relative energy dissipation, hydraulic jump length, and Froude number in different openings in a wide range of Froude number from 2.2 to 14.2 was studied.

### Material and Methods

Here, an experimental flume with a rectangular cross-section 5 m long, 0.3 m wide and 0.5 m high with walls and floors made of transparent Plexiglas has been used for experiments. The slope of the channel floor can be changed and set to zero degrees with the horizon level for experiments. The inlet flow to the flume was provided by two pumps, each with a nominal capacity of 450 liters per minute. To read the input flow, Rotameters installed on the flume with a relative error of  $\pm 2\%$  were used. In the present study, a point gauge with an accuracy of  $\pm 1$  mm was used to measure the water depth in the flume. Depths were measured at 4 points of cross-section and their average was considered as the final depth. In order to stabilize the hydraulic jump inside the flume and the formation of the free jump, the end sluice gate was used.

The outlet flow from the sluice gates in the case of free-flow conditions is supercritical. The contraction coefficient is calculated using Eq. (1):

$$C_c = \frac{y_A}{G} \quad (1)$$

Where,  $C_c$  is the contraction coefficient,  $y_A$  is the initial depth,  $G$  is the gate opening. The flow rate through the sluice gate is calculated based on Eq. (2):

$$q = C_d G \sqrt{2gy_0} \quad (2)$$

Where,  $q$  is the discharge per unit width,  $C_d$  is the discharge coefficient,  $g$  is the gravitational

acceleration and  $y_0$  is the fluid depth at upstream of the gate.

In the present study, the important effective parameters of energy dissipation are presented in Eq. 3:

$$f_1(Q, W, G, y_A, y_B, E_A, E_B, L_j, g, \rho, \mu) = 0 \quad (3)$$

where,  $Q$  is the discharge,  $W$  is the channel width,  $y_B$  is the sequent depth,  $E_A$  is the specific energy in section A,  $E_B$  is the specific energy in section B,  $L_j$  is the length of hydraulic jump,  $\rho$  is the water density and  $\mu$  is the dynamic viscosity. Dimensional analysis of the relative energy dissipation was summarized and calculated as Eq. 4:

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = f_3\left(Fr_A, \frac{G}{y_A}, \frac{y_B}{y_A}, \frac{L_j}{y_A}\right) \quad (4)$$

In which,  $Fr_A$  is the Froude number in section A. In the present research, statistical indicators of percentage Relative Error (RE%), Root Mean Square Error (RMSE) and Kling Gupta Efficiency (KGE) were used to evaluate the relationships.

### Results

In Fig. 1 diagram of discharge coefficient and contraction coefficient is shown. The flow contraction coefficient is inversely related to the gate opening. In all openings, contraction coefficient decreases with increasing water depth upstream of the gate. The values of the discharge coefficient decrease with increasing the opening of the sluice gate. On average, the discharge coefficient of 1 cm opening is higher compared to the openings of 2, 4 and 5 cm, 7.75, 16.51, and 18.35% and maximum 16.62, 28.9, and 23.51%, respectively.

The results showed that with increasing the Froude number due to decreasing the opening, the relative energy dissipation increases. The results indicated that the relative energy dissipation at the opening of 5 cm had the lowest value and with decreasing the opening, the relative energy dissipation increased. The average energy dissipation relative to the upstream of the hydraulic jump at 1 cm opening is 21.01, 58.58, and 63.54% more than 2, 4, and 5 cm openings, respectively. Also, this amount is 55.41, 87.08, and 89.54% for the downstream, respectively. By reducing the amount of opening, the sequent depth at the same discharge is greater than the gate with the larger opening.

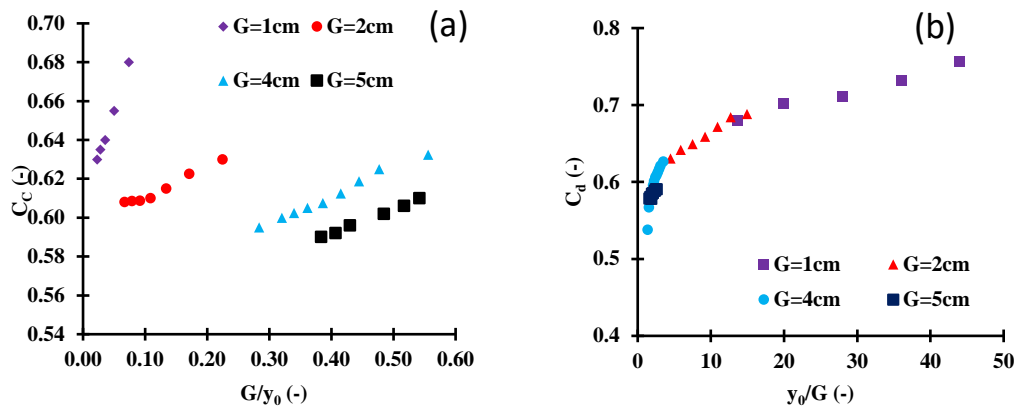


Fig. 1 Diagram of a) Contraction coefficient b) Discharge coefficient

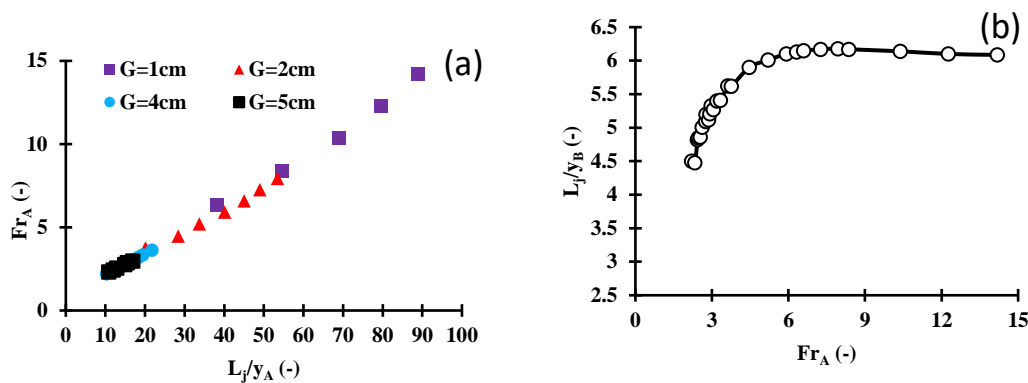


Fig. 2 Diagram of relative length of hydraulic jump relative to a) initial depth of hydraulic jump b) sequent depth of hydraulic jump

In Fig. 2(a), a diagram of the hydraulic jump length measured in terms of the initial jump depth is drawn for all gate openings in different Froude numbers. Moreover, in Fig. 2(b), the jump length curve relative to the sequent depth is shown. Increasing the Froude number leads to increasing turbulence and eddy currents at the start of the jump and increasing the hydraulic jump length.

**Conclusions**

The results showed that in different sluice gate openings, the discharge coefficient is inversely related to the gate opening. As the pressure upstream of the gate increases due to the increase in flow, the contraction coefficient decreases. As the sluice gate opening increases, the relative energy dissipation decreases due to the increase in initial depth and consequently the decrease in

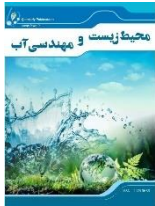
specific energy in section A, as well as the decrease in sequent depth compared to the gate with lower opening. At the same flow rate, the hydrodynamic force on the gate is inversely related to the amount of gate opening. To calculate the relative energy dissipation and discharge coefficient, non-linear regression polynomial relations were presented in the scope of the present study using Solver in Excel software.

**Data Availability**

The data can be sent on request by the corresponding author via email.

**Conflicts of interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: [www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

مقاله پژوهشی

## بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیک جریان در دریاچه‌های کشویی با بازشدگی‌های مختلف

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، رضا نوروزی<sup>۲</sup> و حمیدرضا عباس‌زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
<sup>۲</sup>آ دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۳</sup>آ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۱۰/۰۲]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۱۱/۰۷]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۱۱/۰۸]

### واژه‌های کلیدی:

استهلاک انرژی

بازشدگی دریاچه

ضریب انقباض

ضریب دبی

نیروی هیدرودینامیکی

### \*نویسنده مسئول:

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

در پژوهش حاضر ضریب انقباض، ضریب دبی، طول پرش هیدرولیکی و افت انرژی نسبی که در آن دریاچه به‌عنوان مولد جریان فوق بحرانی عمل می‌کند، در بازشدگی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بیش‌ترین مقدار ضریب انقباض مربوط به دریاچه با کم‌ترین مقدار بازشدگی می‌باشد. میزان بازشدگی دریاچه با ضریب دبی جریان رابطه معکوس دارد. در یک دبی مشخص، افزایش بازشدگی منجر به کاهش استهلاک انرژی نسبی می‌گردد. همچنین با افزایش عدد فرود بعد از دریاچه افت انرژی نسبی افزایش پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر دامنه عدد فرود بعد از دریاچه از  $2/2$  تا  $14/2$  تغییر کرده است که تأثیر مستقیمی بر طول پرش هیدرولیکی دارد و با افزایش بازشدگی، عدد فرود و طول پرش کاهش می‌یابد. میزان بازشدگی دریاچه با عمق آب بالادست و نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریاچه رابطه عکس دارد. روابط چندجمله‌ای غیرخطی رگرسیونی برای پیش‌بینی افت انرژی نسبی و ضریب دبی با نتایج مناسب شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات و شاخص کلینگ گوپتا ارائه شد. برای ضریب دبی بیش از  $78\%$  داده‌ها دارای خطایی کم‌تر از  $1/5 \pm\%$  هستند. همچنین برای افت انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست، بیش از  $88\%$  داده‌ها به‌ترتیب دارای خطای نسبی کم‌تر از  $5 \pm\%$  و  $1 \pm\%$  می‌باشند.

### ۱- مقدمه

کنترل عمق در بالادست دریاچه براساس بازشدگی دریاچه از کف کانال و تعیین ضریب دبی و ضریب انقباض جریان صورت می‌پذیرد. شناخت رفتار جریان در دریاچه‌های کشویی به‌عنوان مولد جریان فوق بحرانی، بر اساس تنظیم بازشدگی و عدد فرود در مقطع شروع پرش هیدرولیکی و به‌تبع آن

دریاچه‌های کشویی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به‌دلیل سهولت استفاده از آن کاربرد گسترده‌ای در شبکه‌های آبیاری دارند. این سازه‌ها جهت اندازه‌گیری جریان و تنظیم سطح آب بالادست در کانال‌های روباز مورد استفاده قرار می‌گیرند. میزان دقت جریان عبوری از زیر دریاچه و



ضریب دبی دریچه‌های کشویی مایل را بررسی و نتیجه گرفتند که با افزایش زاویه قرارگیری دریچه، ضریب دبی افزایش می‌یابد.

جهت جلوگیری از هدر رفت آب بایستی در کنترل و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری نهایت دقت به عمل آید و سازه‌های کنترل جریان مانند دریچه‌ها با توجه به شرایط هر منطقه به‌طور صحیح و اصولی انتخاب شوند. علاوه بر این عملکرد سازه‌های هیدرولیکی از نظر افت انرژی می‌تواند بر پایداری و مقاومت سازه در بستر رودخانه‌ها و کانال‌ها تأثیرگذار باشد. به‌طوری‌که پرش هیدرولیکی با امواج نوسانی موجب تخریب سازه و کف کانال می‌گردد، به‌این‌ترتیب شناخت پارامترهای هیدرولیکی کمک اساسی به طراحی سازه می‌کند.

در پژوهش حاضر با نگرشی دقیق در جهت پیشبرد موارد ذکرشده، لزوم بررسی دریچه‌های کشویی به‌منظور شناخت دقیق رفتار جریان، شناخت روابط تأثیرگذار و همچنین تأثیر آن بر ظرفیت هیدرولیکی در شرایط جریان فوق بحرانی بررسی شد. همچنین اثر آن بر ضریب انقباض، ضریب دبی، افت انرژی نسبی، طول پرش هیدرولیکی و عدد فرود اولیه مقطع شروع پرش در بازشدگی‌های مختلف در بازه وسیع عدد فرود ۲/۲ الی ۱۴/۲ بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر آزمایش‌ها در بازه زمانی اردیبهشت الی آذرماه سال ۱۴۰۰ انجام پذیرفت. برای انجام فرآیند آزمایش‌ها از یک فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه با مقطع مستطیلی به طول ۵ m، عرض ۰/۳ m و ارتفاع ۰/۵ m با دیواره‌ها و کف از جنس پلکسی‌گلس شفاف که مشاهده دقیق جزئیات جریان در داخل فلوم را تسهیل می‌کند، استفاده شده است. شیب کف کانال قابلیت تغییر داشته و برای انجام آزمایش‌ها روی صفر درجه با سطح افق تنظیم شد. جریان ورودی به فلوم توسط دو پمپ هر یک با توان اسمی ۴۵۰ l/min تأمین شد. به‌منظور قرائت دبی ورودی از روتامترهای نصب‌شده روی

طول و نوع پرش هیدرولیکی صورت می‌گیرد. Swamee (1992) میزان ضریب دبی دریچه کشویی را به عمق بالادست و میزان بازشدگی دریچه کشویی مرتبط دانست. Shivapur and Prakash (2005) نحوه قرارگیری دریچه کشویی در زوایای مختلف نسبت به حالت قائم را بررسی و برای تعیین مقدار ضریب دبی رابطه‌ای را ارائه کردند. Nasehi Oskuyi and Salmasi (2012) با استفاده از نرم‌افزار Mathematica داده‌هایی را برای محاسبه ضریب دبی دریچه‌های کشویی عمودی به‌دست آوردند. Mohammed and Moayed (2013) تأثیر مدل لبه دریچه و انحراف آن در جهت جریان و خلاف جهت جریان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضریب دبی در دریچه با زاویه ۴۵° در جهت جریان و با لبه افقی و تیز به‌ترتیب ۱۷/۸٪ و ۱۷٪ بیشتر از حالت دریچه قائم است. Bijankhan and Kouchakzadeh (2014) خصوصیات پرش هیدرولیکی آزاد دو دریچه کشویی مجاور هم را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به پروفیل‌های سرعت ثبت‌شده در تحقیق آن‌ها، نتایج نشان داد که جریان در قسمت پایاب بسیار غیریکنواخت می‌باشد. Daneshfaraz et al. (2016) به بررسی عددی تأثیر شکل لبه دریچه‌های کشویی بر خصوصیات جریان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انقباض جریان برای لبه‌های تیز به‌سمت بالا و پائین و برای دریچه‌های لبه‌گرد، زمانی که نسبت بازشدگی دریچه به انرژی مخصوص در بالادست کوچک‌تر از ۰/۴ باشد، کاهش و برای نسبت‌های بزرگ‌تر از ۰/۴، افزایش می‌یابد. نتایج تحقیق Ashkan et al. (2019) نشان داد که دریچه‌های متوالی در تحویل دبی تقریباً ثابت به ازای تغییرات عمق جریان در بالادست کانال با دقت قابل‌قبولی عمل می‌کنند. Habibzadeh et al. (2019) ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بعد دریچه را مورد بررسی قرار داده و افزایش نوسانات سطح آب با افزایش عدد فرود را گزارش نمودند. Ghaderi et al. (2020) به بررسی عددی پرش هیدرولیکی در پائین‌دست دریچه با اشکال مختلف زبری در آرایش‌های متفاوت قرارگیری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت لایه‌مرزی در پرش هیدرولیکی با افزایش فاصله بین زبری‌ها کاهش می‌یابد. Salmasi et al. (2021) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری مدل‌های هوش SVM<sup>۱</sup>، ANN<sup>۲</sup>، GRNN<sup>۳</sup>، RF<sup>۴</sup>، GP<sup>۵</sup> و RT<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> Support Vector Machine

<sup>۲</sup> Artificial Neural Networks

<sup>۳</sup> Generalized Regression Neural Network

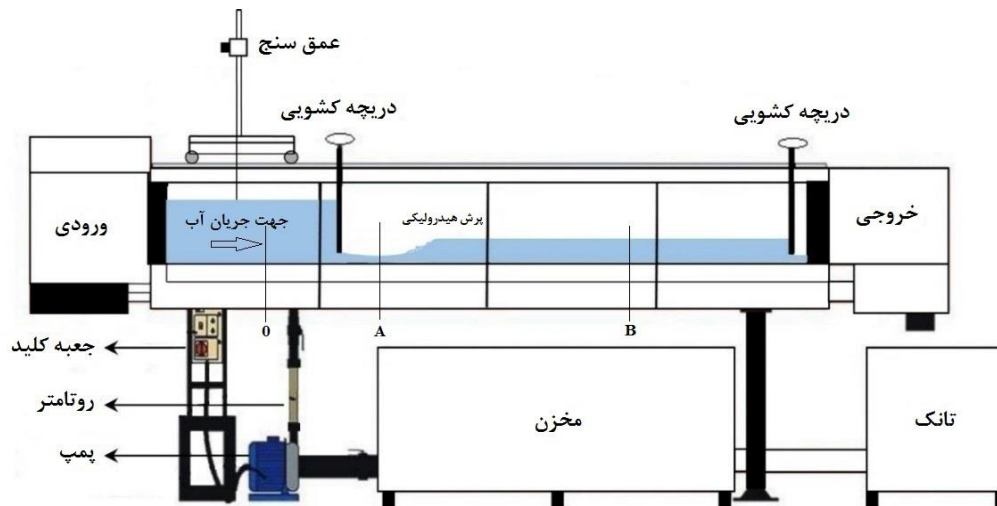
<sup>۴</sup> Random Forest

<sup>۵</sup> Gaussian Process

<sup>۶</sup> Random Tree



از یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 1$  mm که بر روی ریل متحرک نصب شده است، استفاده شد. اعماق در ۴ نقطه از مقطع عرضی در مقاطع 0 (بالادست دریچه)، A (بعد از دریچه و مقطع شروع پرش هیدرولیکی) و B (پائین دست کانال و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی) اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به عنوان عمق نهایی در نظر گرفته شد. نمای کلی فلوم آزمایشگاهی در شکل (۱)، نشان داده شده است. در جدول (۱) مشخصات هندسی، هیدرولیکی و محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده برای مدل‌های به کاررفته ارائه شده است.



شکل ۱- نمای کلی فلوم آزمایشگاهی

Fig. 1 Schematic view of experimental flume

فلوم با خطای نسبی  $\pm 2\%$  استفاده شد. همچنین برای کاهش تلاطم آب ورودی از مخزن، از چند صفحه آرام‌کننده موازی در ابتدای فلوم استفاده شد. به منظور تثبیت پرش هیدرولیکی در داخل فلوم و تشکیل پرش آزاد از دریچه کشویی انتهایی استفاده گردید. پرش هیدرولیکی با توجه به میزان بازشدگی دریچه اول و همچنین مقدار دبی ورودی به کانال، توسط دریچه دوم با چرخش غریبک دوار نصب‌شده روی آن تنظیم می‌گردید تا پرش هیدرولیکی آزاد تشکیل گردد. در پژوهش حاضر، برای اندازه‌گیری عمق آب در فلوم

۲-۲- تشابه ابعادی  
در پرش هیدرولیکی به تناسب قدرت شکل‌گیری آن، جریان‌های گردابی و متلاطم در سطح آب به وجود می‌آید که با پیشروی جریان به سمت انتهای پرش از شدت آن کاسته می‌شود. در شکل (۲-الف و ب)، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد آورده شده است. به هنگام خروج جریان از زیر دریچه سطح آزاد آب سریعاً پائین می‌آید تا جایی که عمق آب به حداقل عمق خود رسیده و خطوط جریان موازی کف بستر کانال می‌شود. جریان چرخشی در بالادست دریچه و نزدیکی آن و همچنین مقطع شروع پرش هیدرولیکی به وجود می‌آیند.

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های به کاررفته در پژوهش حاضر

Table 1 Geometric and hydraulic characteristics of the used models in the present study

Hydraulic Characteristics		
Variables	Range	
Gate Upstream	0.053-0.44	
Depth (m)	Initial of Hydraulic	0.0063-0.033
	Sequent of Hydraulic	0.032-0.105
Discharge (l/min)	150-850	
Reynolds Number	11111-47222	
Geometric Characteristics		
Variables	Range	
Channel Dimensions (m)	Length	5
	Width	0.3
	Height	0.5
Gate Opening (m)	0.01, 0.02, 0.04, 0.05	

$$f_2 \left( C_C, \frac{G}{y_0}, Re \right) = 0 \quad (3)$$

که،  $Re$  بیانگر عدد بی‌بعد رینولدز می‌باشد. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر جریان متلاطم و  $11111 \leq Re \leq 47222$  است لذا می‌توان از تأثیر عدد رینولدز چشم‌پوشی نمود (Murzyn and Chanson 2008; Nasrabadi et al. 2021). بنابراین رابطه (۳) را می‌توان به صورت رابطه (۴) نشان داد:

$$C_C = f_3 \left( \frac{G}{y_0} \right) \quad (4)$$

به‌منظور تعیین دبی عبوری از دریچه، با نوشتن معادله برنولی مابین مقاطع  $A$  و  $B$  و صرف‌نظر از افت انرژی بین این مقاطع رابطه (۵) نتیجه می‌شود:

$$y_0 + \frac{q^2}{2gy_0^2} = C_C \cdot G + \frac{q^2}{2gC_C^2 G^2} \quad (5)$$

که،  $q$  دبی در واحد عرض کانال ( $L^2T^{-1}$ ) می‌باشد. دبی عبوری از زیر دریچه کشویی بر اساس رابطه (۶)، محاسبه می‌شود (Lauria et al. 2020; Ghorbani et al. 2020):

$$q = C_d G \sqrt{2gy_0} \quad (6)$$

که،  $C_d$  ضریب دبی جریان (-) می‌باشد. پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی دریچه کشویی در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

$$f_1(C_d, y_0, G, W, \rho, g, \mu) = 0 \quad (7)$$

که،  $W$  طول دریچه یا عرض کانال ( $L$ ) می‌باشد. با استفاده از روش  $\pi$ -باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد به صورت رابطه (۸) ارائه شد:

$$f_2 \left( C_d, \frac{y_0}{G}, \frac{W}{y_0}, Re \right) \quad (8)$$

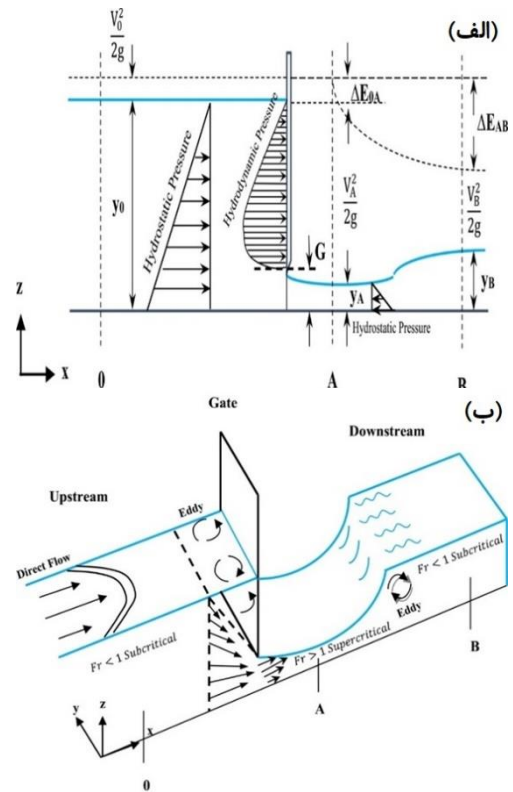
در این پژوهش با توجه به اینکه عرض کانال مقداری ثابت بوده و از اهداف پژوهش حاضر نیست بنابراین از بررسی تأثیر این پارامتر صرف‌نظر شد. مهم‌ترین پارامترهای موردبررسی در پژوهش حاضر به صورت رابطه (۹)، خواهند بود:

$$C_d = f_3 \left( \frac{y_0}{G} \right) \quad (9)$$

### ۲-۲-۲- استهلاک انرژی

میزان استهلاک انرژی بین مقاطع  $A$  و  $B$  با استفاده از اصل انرژی مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود (Daneshfaraz et al. 2020)

$$\Delta E_{AB} = E_A - E_B = \left( y_A + \frac{V_A^2}{2g} \right) - \left( y_B + \frac{V_B^2}{2g} \right) \quad (10)$$



شکل ۲- نمای کلی الف) پارامترهای هیدرولیکی در بالادست و پایین‌دست دریچه ب) رفتار و خطوط جریان در دریچه  
Fig. 2 Schematic view of a) Hydraulic parameters upstream and downstream of the gate b) Behavior and flow lines in the gate

### ۲-۲-۱- ضریب انقباض و ضریب دبی

جریان خروجی از دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد، دارای حالت فوق بحرانی است. ضریب انقباض جریان با استفاده از رابطه (۱)، محاسبه می‌گردد (Daneshfaraz et al. 2016)

$$C_C = \frac{y_A}{G} \quad (1)$$

که،  $C_C$  ضریب انقباض جریان (-)،  $y_A$  عمق جریان در مقطع  $A$  ( $L$ ) و  $G$  میزان بازشدگی دریچه از کف کانال ( $L$ ) می‌باشند. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب انقباض جریان را می‌توان طبق رابطه (۲)، نشان داد:

$$f_1(C_C, y_0, G, \rho, g, \mu) = 0 \quad (2)$$

که،  $y_0$  عمق جریان بالادست دریچه ( $L$ )،  $\rho$  جرم مخصوص آب ( $ML^{-3}$ )،  $g$  شتاب گرانش زمین ( $LT^{-2}$ ) و  $\mu$  لزوجت دینامیکی ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) می‌باشند. با در نظر گرفتن  $y_0$  و  $g$  به‌عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش  $\pi$ -باکینگهام، می‌توان رابطه بی‌بعد (۳) را ارائه نمود:

$$\frac{1}{2}\gamma y_0^2 - \frac{1}{2}\gamma y_A^2 - R = \rho q(V_A - V_0) \quad (14)$$

که،  $V_0$  سرعت جریان در بالادست دریچه کشویی ( $LT^{-1}$ )،  $\gamma$  وزن مخصوص آب ( $ML^{-2}T^{-2}$ ) و  $R$  نیروی عکس‌العمل است.

### ۲-۳- شاخص‌های آماری

در پژوهش حاضر از شاخص‌های آماری درصد خطای نسبی (RE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کلینگ گوپتا (KGE) جهت ارزیابی روابط بهره گرفته شد. مقادیر روابط (۱۵) و (۱۶) هرچه به عدد صفر نزدیک باشند بیانگر دقت بالای روابط ارائه شده می‌باشد. شاخص KGE با قرارگیری در هر یک از محدوده‌ها بیانگر دقت روابط ارائه شده می‌باشد (Daneshfaraz et al. 2021a).

$$RE\% = \frac{\left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d\right)_{Obs} - \left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d\right)_{Cal}}{\left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d\right)_{Obs}} \times 100 \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d\right)_{Obs} - \left(\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d\right)_{Cal_i}\right)^2}{n}} \quad (16)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}$$

$$\beta = \frac{\overline{Cal}}{\overline{Obs}}, \gamma = \frac{CV_{Cal}}{CV_{Obs}} = \frac{\sigma_{Cal}/\overline{Cal}}{\sigma_{Obs}/\overline{Obs}}$$

$0.7 < KGE < 1$  very good

$0.6 < KGE < 0.7$  good

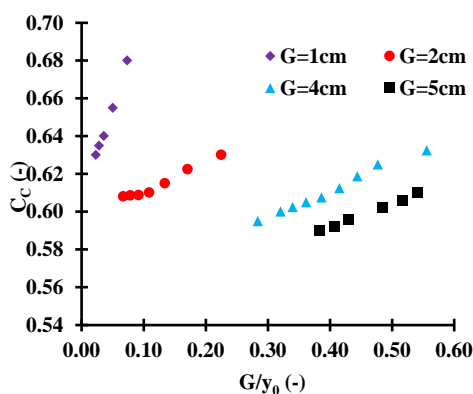
$0.5 < KGE \leq 0.6$  satisfactory

$0.4 < KGE \leq 0.5$  acceptable

$KGE \leq 0.4$  unsatisfactory

(17)

$$R = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Obs_i} - \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Obs} \right) \times \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Cal_i} - \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Cal} \right]}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Obs_i} - \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Obs} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Cal_i} - \left( \frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B}, C_d \right)_{Cal}}$$



شکل ۳- تغییرات ضریب انقباض در برابر نسبت بازشدگی به عمق بالادست

Fig. 3 Contraction coefficient variations against the ratio of opening to the upstream depth

افزایش سرعت منجر به کاهش عمق در مقطع بعد دریچه می‌شود. در یک دبی ثابت بیشترین مقدار ضریب

که در آن  $E_A$  انرژی مخصوص آب در مقطع A ( $L$ )،  $E_B$  انرژی مخصوص آب در مقطع B ( $L$ ) و  $V_A$  و  $V_B$  به ترتیب نمایانگر سرعت جریان در مقطع A و B ( $LT^{-1}$ ) می‌باشند. در پژوهش حاضر پارامترهای مؤثر بر استهلاک انرژی جریان عبارت‌اند از:

$$f_1(Q, W, G, y_A, y_B, E_A, E_B, L_j, g, \rho, \mu) = 0 \quad (11)$$

که،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی ( $L$ ) می‌باشد. با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $g$  و  $y_A$  به عنوان متغیرهای تکراری می‌توان رابطه بی‌بعد (۱۲) را ارائه کرد:

$$f_2\left(Fr_A, \frac{W}{y_A}, \frac{G}{y_A}, \frac{y_B}{y_A}, \frac{E_A}{y_A}, \frac{E_B}{y_A}, \frac{L_j}{y_A}, Re\right) = 0 \quad (12)$$

که،  $Fr_A$  عدد فرود در مقطع A (-) می‌باشد. تشابه ابعادی پژوهش حاضر به صورت رابطه (۱۳) خلاصه و محاسبه شد.

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = f_3\left(Fr_A, \frac{G}{y_A}, \frac{y_B}{y_A}, \frac{L_j}{y_A}\right) \quad (13)$$

طبق رابطه (۱۴)، با نوشتن معادله حرکت بین مقاطع 0 و A، قابل محاسبه خواهد بود.

که،  $R$  ضریب همبستگی،  $\beta$  نسبت میانگین داده‌های محاسباتی به میانگین داده‌های مشاهداتی و  $\gamma$  بیانگر نسبت انحراف استاندارد مقادیر محاسباتی به انحراف استاندارد مقادیر مشاهداتی می‌باشند. شاخص آماری KGE براساس تقسیم‌بندی این شاخص به خیلی خوب، خوب، رضایت‌بخش، قابل قبول و غیر رضایت‌بخش می‌تواند بیانگر دقت روابط ارائه شده باشد.

### ۳- یافته‌ها و بحث

در شکل (۳)، با افزایش نسبت  $G/y_0$ ، ضریب انقباض روند افزایشی دارد. در یک بازشدگی ثابت با افزایش دبی و به تبع آن افزایش عمق جریان ضریب انقباض روند کاهشی به خود می‌گیرد. علت این موضوع را می‌توان به افزایش فشار در بالادست دریچه ناشی از افزایش عمق جریان مرتبط دانست که باعث افزایش سرعت جریان خروجی از دریچه می‌گردد.



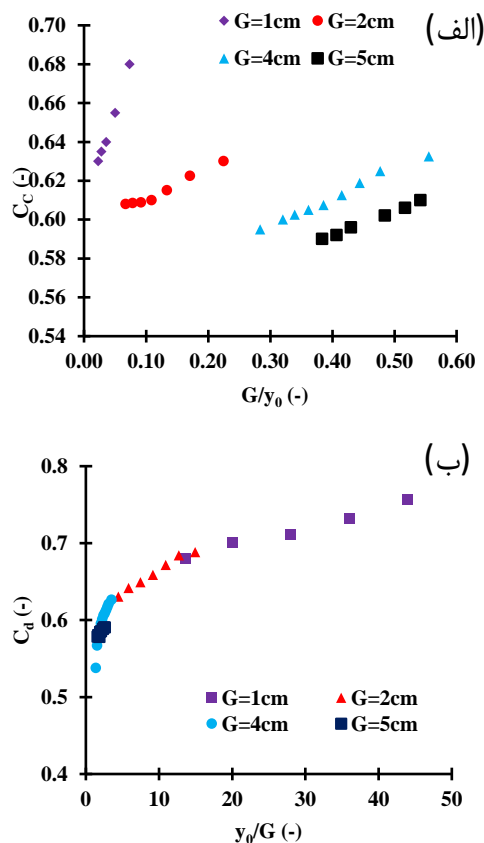
انقباض مربوط به دریچه با کم‌ترین میزان بازشدگی دریچه می‌باشد به عبارت دیگر ضریب انقباض جریان با میزان بازشدگی رابطه عکس دارد. در جدول (۲) محدوده تغییرات

جدول ۲- محدوده تغییرات ضریب انقباض در بازشدگی‌های مختلف

Table 2 Range of contraction coefficient variations at different openings

Gate Openings (m)	Discharge (l/min)	$G/y_0$ (-)	$C_c$ (-)	$C_c$ (-)
0.01	200 - 400	$0.023 \leq G/y_0 \leq 0.074$	0.630 ~ 0.680	0.648
0.02	300 - 600	$0.067 \leq G/y_0 \leq 0.224$	0.608 ~ 0.630	0.614
0.04	400 - 750	$0.284 \leq G/y_0 \leq 0.556$	0.595 ~ 0.633	0.611
0.05	650 - 850	$0.384 \leq G/y_0 \leq 0.542$	0.590 ~ 0.610	0.599

مقایسه با بازشدگی ۵ cm، ۱۸/۳۵٪ و حداکثر ۲۳/۵۱٪ بیشتر می‌باشد.



شکل ۴- نمودار الف) ضریب دبی (ب) دبی-اشل  
Fig. 4 Diagram of a) Contraction coefficient b) Discharge coefficient

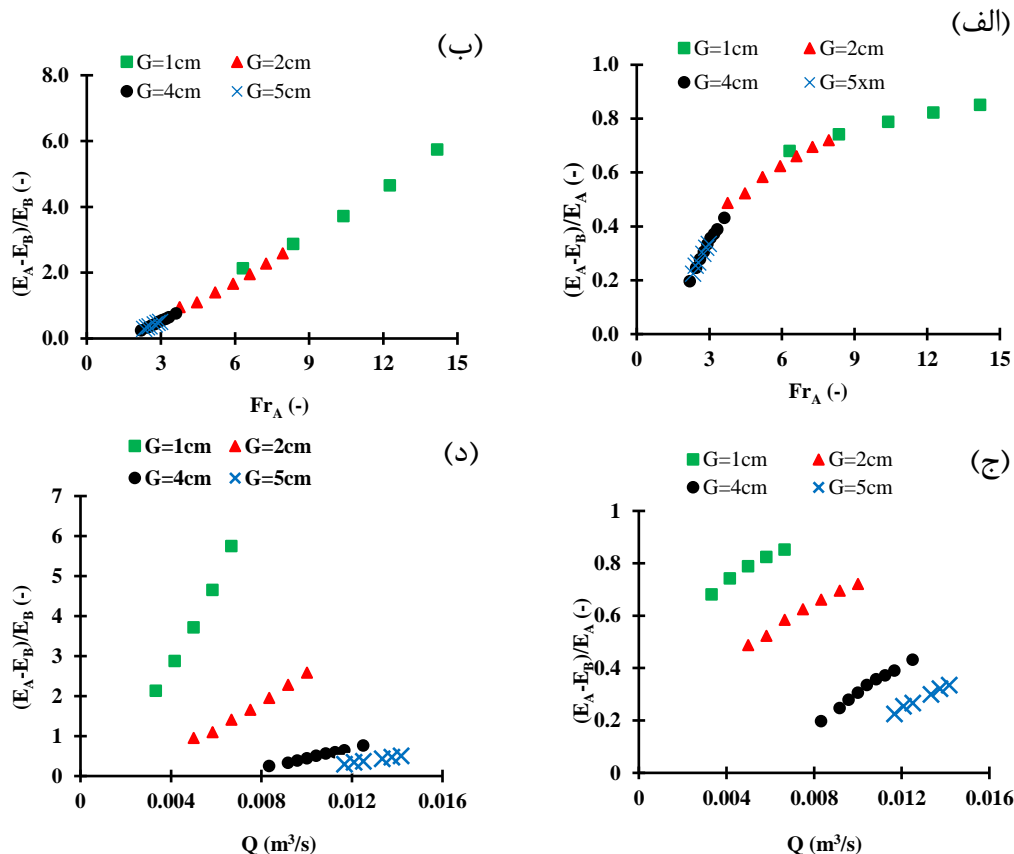
در شکل (۵-الف) و (۵-ب)، میزان تغییرات افت انرژی نسبی ارائه شده است که در آن محور افقی، پارامتر بدون بعد  $Fr_A$  و محور قائم، بیانگر نسبت میزان استهلاک انرژی بین مقاطع A و B به انرژی جریان در مقاطع A و B می‌باشد. با توجه

یکی از مشخصه‌های جریان که در رابطه با شناخت رفتار جریان اهمیت بالایی دارد، ضریب دبی جریان است. شکل (۴-الف) میزان تغییر ضریب دبی در بازشدگی‌های مختلف دریچه کشویی را نشان می‌دهد که در آن محور افقی پارامتر بی‌بعد  $y_0/G$  و محور قائم  $C_d$  می‌باشد. با توجه به شکل (۴-الف)، ضریب دبی با میزان بازشدگی دریچه کشویی رابطه عکس دارد و با افزایش میزان بازشدگی دریچه، ضریب دبی کاهش می‌یابد. از جمله پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی دریچه‌های کشویی، عمق آب بالادست دریچه می‌باشد، بنابراین افزایش میزان بازشدگی دریچه سبب کاهش عمق آب در بالادست دریچه شده و همین عامل سبب کاهش ضریب دبی در بازشدگی‌های بیشتر می‌شود. همچنین با کاهش بازشدگی دریچه، جریان عبوری از زیر دریچه همگرا شده و مساحت جریان عبوری از زیر دریچه کاهش می‌یابد که این کاهش منجر به افزایش سرعت و در نتیجه ضریب دبی می‌گردد. همچنین با افزایش نسبت عمق بالادست به بازشدگی دریچه، که حاکی از کاهش میزان بازشدگی و به تبع آن افزایش عمق بالادست دریچه است، ضریب دبی روند افزایشی دارد. در شکل (۴-ب)، نمودار دبی-اشل برای بازشدگی‌های مختلف دریچه کشویی ارائه شده است. در یک دبی مشخص، بازشدگی دریچه با عمق آب بالادست دریچه رابطه عکس داشته و با افزایش آن، عمق جریان کاهش می‌یابد. به‌طور میانگین ضریب دبی بازشدگی ۱ cm در



بازشدگی ۵ cm کم‌ترین میزان را دارا بوده و با کاهش میزان بازشدگی درپچه، افت انرژی نسبی افزایش پیدا کرده است. به‌طوری‌که با افزایش میزان بازشدگی سرعت جریان عبوری از زیر درپچه کاهش و در نتیجه عمق اولیه جریان افزایش پیدا می‌کند که این خود باعث کاهش انرژی مخصوص در مقطع A می‌شود. افزایش عمق اولیه منجر به کاهش عمق ثانویه در مقایسه با بازشدگی‌های کوچک‌تر شده و در نتیجه انرژی مخصوص در مقطع B همانند مقطع A کاهش پیدا می‌کند. بنابراین اختلاف انرژی مخصوص بین مقاطع A و B مقدار کوچکی خواهد بود. همانند شکل (۵-ج) و (۵-د)، در دبی ثابت، میزان استهلاک انرژی نسبی در بازشدگی ۱ cm به‌ترتیب بیش‌تر از بازشدگی‌های ۲ cm، ۴ cm و ۵ cm می‌باشد. به‌طوری‌که میانگین افت انرژی نسبت به انرژی مخصوص در بالادست پرش هیدرولیکی در بازشدگی ۱ cm، ۶۳/۵۴٪ بیش‌تر از بازشدگی ۵ cm است. این در حالی است که این میزان برای پائین‌دست ۸۹/۵۴٪ می‌باشد.

به شکل (۵-الف) و (۵-ب)، مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود ناشی از کاهش میزان بازشدگی، افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۵-الف) و (۵-ب)، مشاهده می‌شود افت انرژی نسبی با یک روند مشخص با افزایش عدد فرود در حال افزایش است. در یک دبی ثابت با افزایش بازشدگی درپچه به دلیل افزایش عمق در مقطع A ناشی از افزایش میزان بازشدگی در مقایسه با بازشدگی‌های کوچک‌تر، و به تبع آن کاهش سرعت جریان در مقطع A، عدد فرود کاهش پیدا می‌کند. دلیل محدب و مقعر بودن منحنی در شکل (۵)، را می‌توان به رژیم جریان در مقطع A و B مرتبط دانست به‌طوری‌که جریان در مقطع A فوق بحرانی و در مقطع B زیر بحرانی است که منجر به بالا بودن انرژی مخصوص در مقطع A نسبت به انرژی مخصوص در مقطع B می‌شود. به‌منظور ارائه نتایج و برازش بهتر داده‌ها میزان استهلاک انرژی در دبی‌ها و بازشدگی‌های مختلف در شکل (۵-ج) و (۵-د) آورده شده است. افت انرژی نسبی در

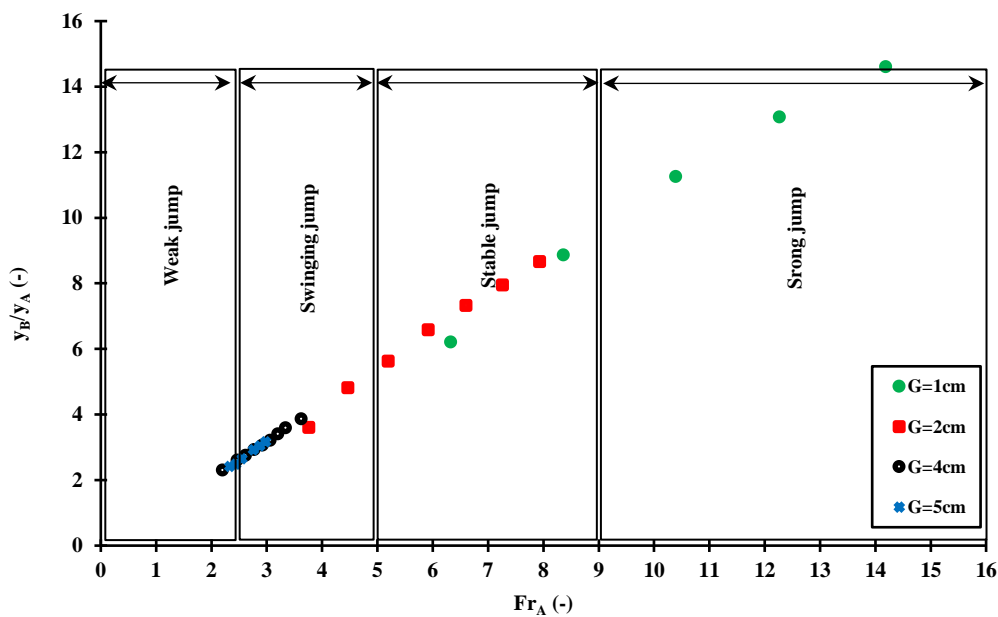


شکل ۵- افت انرژی نسبت به الف) انرژی مخصوص بالادست پرش، ب) انرژی مخصوص پائین‌دست پرش، ج) انرژی مخصوص بالادست پرش در دبی‌های مختلف، و د) انرژی مخصوص پائین‌دست پرش در دبی‌های مختلف

Fig. 5 Energy dissipation relative to a) specific energy upstream of the jump, b) specific energy downstream of the jump, c) specific energy upstream of the jump at different discharges, and d) specific energy downstream of the jump at different discharges

یک دبی یکسان بیشتر از دریچه با بازشدگی بزرگ‌تر است. قدرت و شدت پرش هیدرولیکی به عدد فرود مقطع شروع پرش هیدرولیکی (مقطع A)، بستگی دارد. با افزایش عدد فرود نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه  $(y_B/y_A)$  و به عبارتی ارتفاع موج  $(y_B - y_A)$ ، افزایش می‌یابد که ارتباط مستقیم استهلاک انرژی با توان سوم عبارت  $(y_B - y_A)$  باعث می‌شود تا میزان استهلاک انرژی نسبت به شدت و قدرت پرش از حساسیت بالایی برخوردار باشد.

عمق نسبی پرش هیدرولیکی  $(y_B/y_A)$ ، تابعی از عدد فرود در مقطع A  $(Fr_A)$ ، می‌باشد. برای بررسی تأثیر میزان بازشدگی بر عمق ثانویه جریان، نمودار عمق نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل پارامتر بی‌بعد عدد فرود اولیه برای تمامی بازشدگی‌ها در شکل (۶)، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد فرود، عمق نسبی پرش هیدرولیکی به صورت خطی بین داده‌ها افزایش می‌یابد. علت آن تأثیر قابل توجه میزان بازشدگی دریچه بر افزایش عمق ثانویه می‌باشد. به طوری که با کاهش میزان بازشدگی عمق ثانویه در



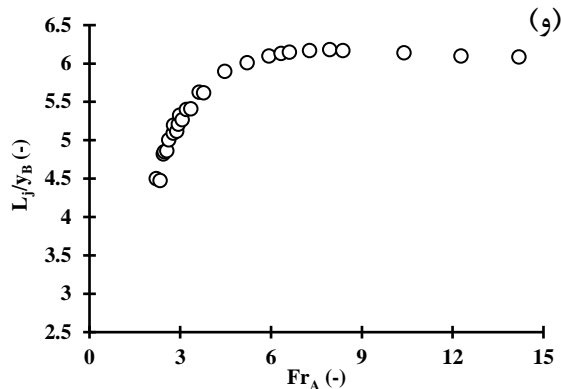
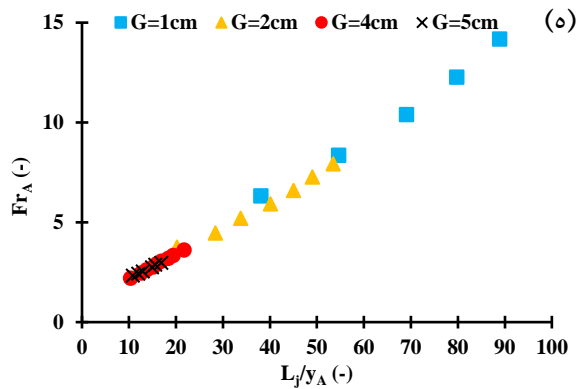
شکل ۶- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود و تشکیل انواع مختلف پرش هیدرولیکی

Fig. 6 Relative depth changes of hydraulic jump versus Froude number and different types of hydraulic jumps

اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۷-ب)، نمودار طول پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شده برحسب نسبت عمق اولیه پرش، برای تمامی بازشدگی‌های دریچه در اعداد فرود مختلف رسم شد. همچنین در شکل (۷-ن)، منحنی طول پرش نسبت به عمق ثانویه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، طول پرش با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش عدد فرود منجر به افزایش تلاطم و جریان‌های گردابی در مقطع شروع پرش می‌شود.

در شکل (۷-الف، ب، ج، د)، پروفیل طولی جریان برای بازشدگی‌های مختلف دریچه کشویی در دبی‌های مختلف ارائه شده است. در یک دبی یکسان عمق ثانویه پرش هیدرولیکی با افزایش بازشدگی دریچه، کاهش می‌یابد. همچنین کاهش بازشدگی دریچه باعث می‌شود عدد فرود در مقطع A کاهش یابد که منجر به تشکیل پرش ضعیف می‌شود، بنابراین افت انرژی زیاد وجود نخواهد داشت. یکی از پارامترهای اساسی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی طول پرش هیدرولیکی می‌باشد که به صورت فاصله مابین ابتدای پرش و آخرین موج جریان گردابی

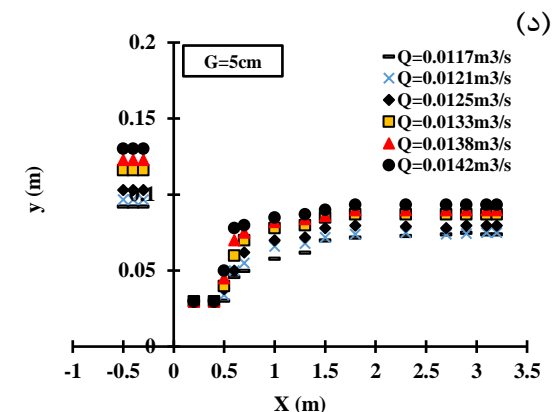
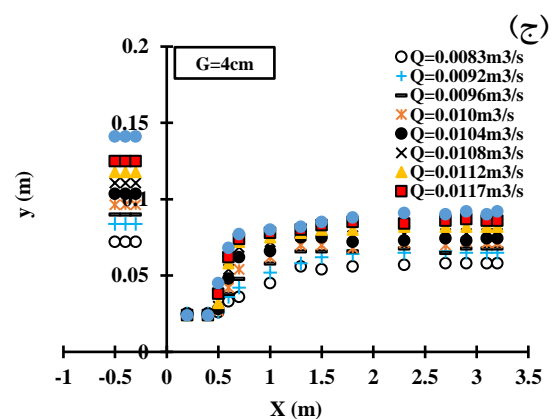
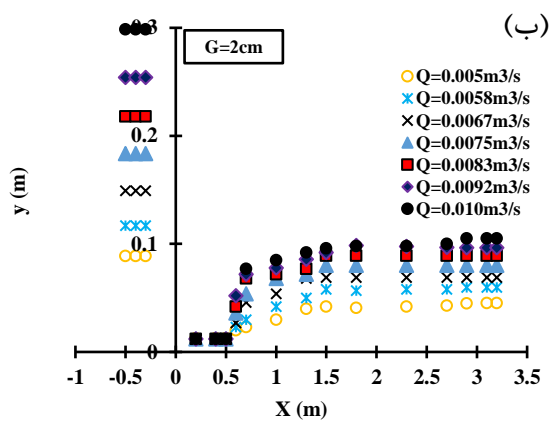
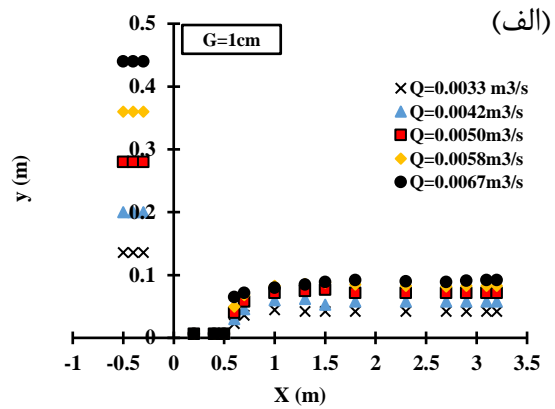




شکل ۷- پروفیل طولی جریان در بازشدگی: الف) ۱ cm، ب) ۲ cm، ج) ۴ cm، د) ۵ cm، ه) طول نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به عمق اولیه پرش، و و) طول نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به عمق ثانویه پرش

Fig. 7 Longitudinal profile of the flow at openings of: a) 1 cm, b) 2 cm, c) 4 cm, and d) 5 cm, e) Relative length of hydraulic jump relative to initial depth of jump, and f) Relative length of hydraulic jump relative to second depth of jump

در جدول (۳)، مقدار نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریچه کشویی در دبی و بازشدگی‌های مختلف آورده شده است. با توجه به جدول (۳)، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان دبی، نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریچه افزایش می‌یابد. همچنین در یک دبی یکسان نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریچه با میزان بازشدگی رابطه عکس دارد. علت این مسئله را می‌توان به افزایش عمق بالادست اشاره نمود که منجر به افزایش فشار و نیروی وارد بر دریچه می‌شود. برای مثال در دبی ۶۰۰ l/min در بازشدگی ۲ cm مقدار عمق آب بالادست دریچه تقریباً ۰/۳ m می‌باشد درحالی‌که همین مقدار دبی برای بازشدگی ۴ cm توان تأمین عمق آب ۰/۹۶ در بالادست دریچه را دارد که به‌ترتیب ۳۵/۶ و ۰/۹ kg/m را بر دریچه وارد می‌نمایند.



جدول ۳- نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریچه

Table 3 Hydrodynamic force on the gate

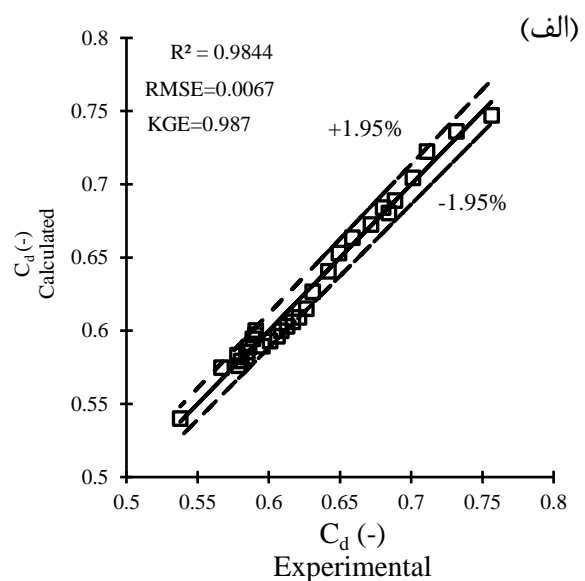
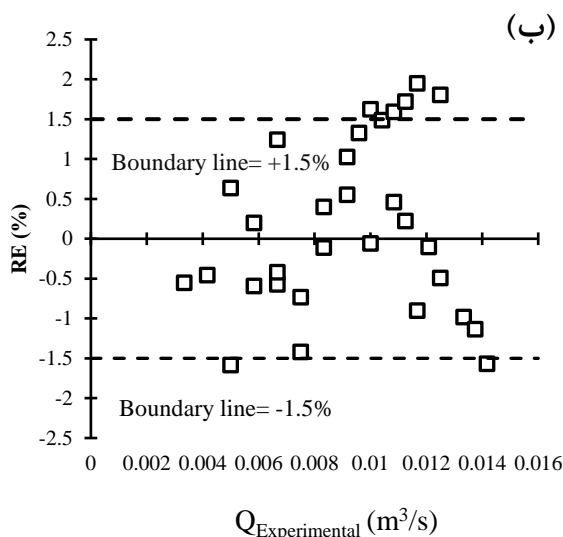
Dataset	Gate Openings (m)											
	0.01			0.02			0.04			0.05		
	Q (l/min)	q (m <sup>3</sup> /s-m)	R (kg/m)	Q (l/min)	q (m <sup>3</sup> /s-m)	R (kg/m)	Q (l/min)	q (m <sup>3</sup> /s-m)	R (kg/m)	Q (l/min)	q (m <sup>3</sup> /s-m)	R (kg/m)
1	200	0.01111	7.47	300	0.01667	1.95	500	0.02778	0.26	700	0.03889	0.41
2	250	0.01389	17.07	350	0.01944	4	550	0.03056	0.53	725	0.04028	0.47
3	300	0.01667	34.86	400	0.02222	7.32	575	0.03194	0.70	750	0.04167	0.71
4	350	0.01944	58.82	450	0.02500	11.90	600	0.03333	0.90	800	0.04444	1.29
5	400	0.02222	88.90	500	0.02778	17.58	625	0.03472	1.20	825	0.04583	1.62
6	-	-	-	550	0.03056	24.78	650	0.03611	1.54	850	0.04722	2.09
7	-	-	-	600	0.03333	35.60	675	0.03750	1.92	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	700	0.03889	2.32	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	750	0.04167	3.48	-	-	-

در این پژوهش به منظور پیش‌بینی ضریب دبی و افت انرژی در این معادلات غیرخطی رگرسیونی با بهره‌گیری از ابزار Solver در نرم‌افزار MS-Excel و با تلفیق تمامی داده‌ها مطابق روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) ارائه شد.

$$C_d = 1.226 \times \left(\frac{y_0}{G}\right)^{0.039} + 0.672 \quad (18)$$

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} = -1.617 Fr_A^{-0.574} + 1.212 \left(\frac{G}{y_A}\right)^{0.00031} + 0.487 \left(\frac{y_B}{y_A}\right)^{-12.355} - 19.697 \left(\frac{L_j}{y_A}\right)^{-81.497} \quad (19)$$

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = 0.817 Fr_A^{1.003} - 0.0003 \left(\frac{G}{y_A}\right)^{0.582} - 0.371 \left(\frac{y_B}{y_A}\right)^{0.957} - 0.485 \left(\frac{L_j}{y_A}\right)^{0.185} \quad (20)$$



(۸-ب)، با جایگذاری ضرایب دبی از رابطه پیشنهادی (۱۸)، در رابطه (۶)، مقایسه‌ای بین میزان دبی عبوری حاصل از نتایج آزمایشگاهی با رابطه (۶)، انجام یافت. در شکل (۸-ب)، ملاحظه می‌گردد که دامنه گسترده‌ای از داده‌ها در باند خطای  $\pm 1/5\%$  قرار گرفته‌اند. این مسئله بیانگر این است که فرمول پیشنهادی دقت بسیار مناسبی دارد، به طوری که بیش از ۷۸٪ داده‌ها دارای خطایی کم‌تر از  $\pm 1/5\%$  هستند. در شکل (۸-ج) مقایسه‌ای بین ضرایب انقباض پژوهش حاضر با نتایج سایر مطالعات صورت پذیرفت. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نتایج همخوانی مطلوبی داشته و با یک روند مشخص قرار دارند. به طوری که ضریب انقباض در بازه  $0/59$  الی  $0/7$  قرار دارد و با کاهش بازشدگی افزایش می‌یابد.

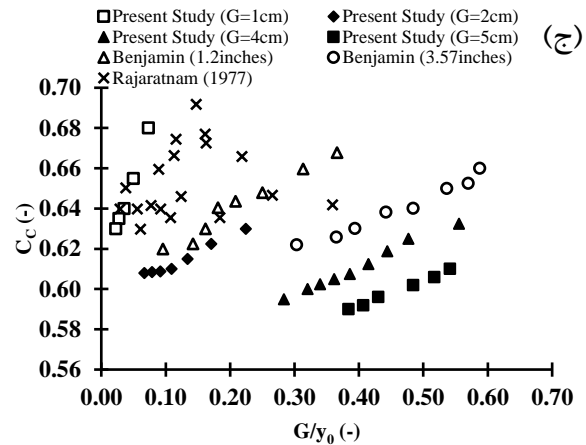
در جدول (۴) مقایسه‌ای بین نتایج ضرایب دبی پژوهش حاضر با احتساب ضرایب دبی تمامی بازشدگی‌ها، با نتایج آزمایشگاهی مطالعات گذشته صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که نتایج پژوهش حاضر با تلفیق تمامی داده‌های حاضر صورت پذیرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد تطابق خوبی بین نتایج پژوهش حاضر با نتایج دیگر پژوهشگران وجود دارد.

جدول ۴- مقایسه ضریب دبی پژوهش حاضر با مطالعات گذشته

Table 4 Results of the discharge coefficient of the present study with previous studies

Gate	Discharge Coefficient (-)														
	Present Study (Integration of All Openings)			Rajaratnam (1977)			Hager (1999)			Shivapur & Prakash (2005)			Daneshfaraz et al. (2021b)		
	Max	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max	Min	Avr
Vertical	0.75	0.53	0.62	0.64	0.60	0.62	0.59	0.53	0.55	0.63	0.52	0.61	0.73	0.55	0.65

در شکل (۹-الف) و (۹-ج)، نمودار درصد خطای نسبی در برابر پارامتر بی‌بعد مؤثر  $y_B/y_A$  نشان داده شده است. در شکل (۹-ب) طیف وسیعی از داده‌ها در باند خطای نسبی  $\pm 5\%$  قرار گرفته‌اند. به طوری که بیش از ۸۸٪ داده‌ها دارای خطای نسبی کم‌تر از  $\pm 5\%$  هستند. همچنین در شکل (۹-د) نیز بیش از ۸۸٪ داده‌ها در محدوده خطای نسبی  $\pm 1\%$  قرار دارند. این موضوع بیانگر این است که روابط پیشنهادی دقت بسیار مطلوبی در پیش‌بینی افت انرژی نسبی دارد.

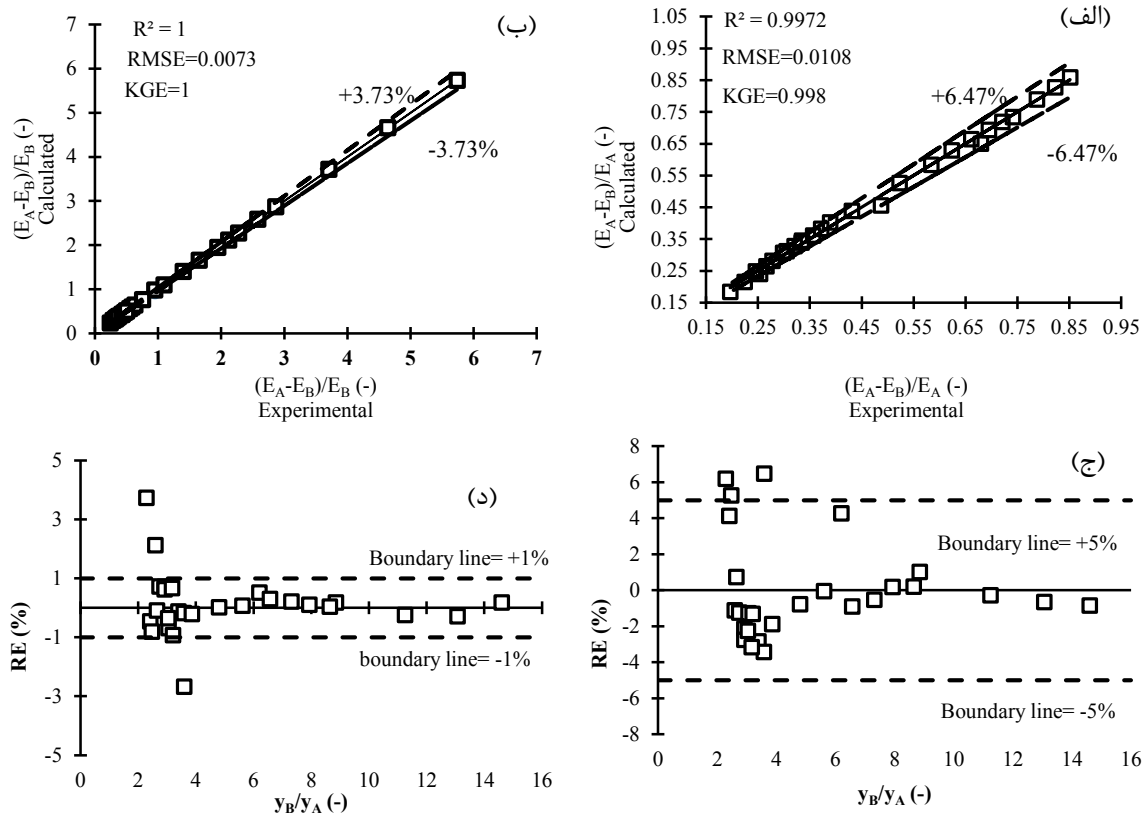


شکل ۸- نمودار الف) مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی ب) درصد خطای نسبی در برابر دبی آزمایشگاهی ج) ضرایب انقباض پژوهش حاضر با سایر مطالعات

Fig. 8 Diagram of a) Comparison of calculated and experimental values b) Percentage of relative error versus experimental discharge c) Contraction coefficients of the present study with other studies

شکل (۸-الف) نشان می‌دهد که روند میزان تغییرات ضریب دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی همانند مقادیر به دست آمده از رابطه (۱۸) می‌باشد. به طوری که حداکثر RE، میانگین RE و RMSE به ترتیب  $1/95\%$ ،  $0/9\%$  و  $0/067$  می‌باشد. همچنین مقدار پارامتر KGE برابر با  $0/987$  است که بیانگر قرار گرفتن این شاخص در بازه «خیلی خوب» می‌باشد که حاکی از بالا بودن دقت رابطه پیشنهادی می‌باشد. در شکل

در شکل (۹-الف) و (۹-ج)، به ترتیب نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی افت انرژی نسبی رسم شده است. روند میزان تغییرات افت انرژی نسبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی همانند مقادیر به دست آمده از روابط می‌باشد. نتایج شاخص‌های آماری بر روی شکل‌های (۹-الف) و (۹-ج) نشان داده شده است. مطابق شکل (۹-ب) و (۹-د)، پارامتر مستقل  $y_B/y_A$  و پارامتر وابسته  $\Delta E_{AB}/E_B$  و  $\Delta E_{AB}/E_A$  جهت بررسی دقت معادلات (۱۹) و (۲۰)، بررسی شده است.



شکل ۹- مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی افت انرژی نسبت به انرژی مخصوص در: الف) بالادست و ب) پایین دست پرش؛ پراکندگی خطای نسبی داده‌ها در حالت افت انرژی نسبت به: ج) بالادست و د) پایین دست پرش

Fig. 9 Comparison of calculated and experimental values of energy dissipation relative to specific energy at: a) upstream and b) downstream of the jump; Scatter plot of percentage relative error of data in energy dissipation mode relative to the: c) upstream and d) downstream jump

بازشدگی‌های ۲ cm، ۴ cm و ۵ cm است. این در حالی است که این میزان برای پائین دست به ترتیب ۵۵/۴۱٪ و ۸۷/۰۸٪ می‌باشد.

۴- مقایسه دریاچه کشویی با بازشدگی‌های متفاوت، حاکی از افزایش نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریاچه با کاهش میزان بازشدگی در یک دبی یکسان دارد.

۵- روابط چندجمله‌ای غیرخطی رگرسیونی برای افت انرژی نسبت به بالادست و پائین دست پرش هیدرولیکی با ضریب تبیین ۰/۹۹۷ و ۱ که تابعی از پارامترهای بدون بعد مؤثر عمق نسبی، نسبت طول پرش به عمق اولیه، نسبت بازشدگی به عمق اولیه و عدد فرود مقطع بعد دریاچه، حاصل از تشابه ابعادی هستند، به دست آمد. همچنین رابطه غیرخطی رگرسیونی برای پیش‌بینی ضریب دبی با ضریب تبیین ۰/۹۸۴ در محدوده پژوهش حاضر ارائه شد.

با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاهی، در پژوهش حاضر آزمایش‌ها تا دبی ۸۵۰ l/min صورت پذیرفت. پیشنهاد

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- در بازشدگی‌های مختلف دریاچه کشویی، ضریب دبی با میزان بازشدگی دریاچه رابطه عکس داشته و با افزایش میزان بازشدگی کاهش می‌یابد.

۲- میزان بازشدگی دریاچه با عمق آب بالادست دریاچه رابطه معکوس دارد. همچنین بیش‌ترین مقدار ضریب انقباض مربوط به دریاچه با کم‌ترین میزان بازشدگی بوده و با افزایش فشار در بالادست دریاچه ناشی از افزایش دبی، ضریب انقباض روند کاهشی دارد.

۳- با افزایش میزان بازشدگی دریاچه کشویی، افت انرژی نسبی به دلیل افزایش عمق اولیه و به تبع آن کاهش انرژی مخصوص در مقطع A و همچنین کاهش عمق ثانویه در مقایسه با دریاچه با بازشدگی کم‌تر که منجر به کاهش انرژی مخصوص در مقطع B می‌گردد، کاهش می‌یابد. به طوری که میانگین افت انرژی نسبت به بالادست در بازشدگی ۱ cm به ترتیب ۲۱/۰۱٪، ۵۸/۳۸٪ و ۶۳/۵۴٪ بیشتر از

### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشد.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

می‌شود که در صورت فراهم بودن امکانات لازم، دبی‌های بیشتر و شرایط جریان مستغرق نیز مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاهی، در پژوهش حاضر آزمایش‌ها تا دبی  $850 \text{ l/min}$  صورت پذیرفت. پیشنهاد می‌شود که در صورت فراهم بودن امکانات لازم، دبی‌های بیشتر و شرایط جریان مستغرق نیز مورد بررسی قرار گیرد.

## References

- Ashkan, F., Daneshfaraz, R., Ghaffarinik, A., Gahramanzadeh, A. and Minaei, O. (2019). Numerical investigation of the successive sluice gates performance in regulating flow rate through channels using Flow-3D software. *Water Soil Sci.*, 29(4), 85-96 [In Persian].
- Bijankhan, M. and Kouchakzadeh, S. (2014). Free hydraulic jump due to parallel jets. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 141(2). Doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000797
- Daneshfaraz, R., Ghahramanzadeh, A., Ghaderi, A., Joudi, A. R. and Abraham, J. (2016). Investigation of the effect of edge shape on characteristics of flow under vertical gates. *J. Am. Water Works Assoc.*, 108(8), 425-432. Doi:10.5942/jawwa.2016.108.0102
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaeli, R., Sadeghfam, S. and Abraham, J. (2020). Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *J. Groundwater Sci. Eng.*, 8(4), 396-406. Doi: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2020.04.009
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E. and Abbaszadeh, H. (2021a). Numerical simulation of energy dissipation in crescent-shaped contraction of the flow path. *Iran. J. Soil Water Res.*, 52(5), 1299-1314. Doi:10.22059/ijswr.2021.318989.668895 [In Persian].
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P. and Abbaszadeh, H. (2021b). Numerical investigation on effective parameters on hydraulic flows in a sluice gate with sill on free-flow condition. *Environ. Water Eng.*, DOI: 10.22034/jewe.2021.295538.1596 [In Persian].
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F. and Ghahramanzadeh, A. (2020). Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses. *J. Hydroinform.*, 22 (6), 1554-1572. Doi:10.2166/hydro.2020.298
- Ghorbani, M. A., Salmasi, F., Saggi, M. K., Bhatia, A. S., Kahya, E. and Norouzi, R. (2020). Deep learning under H<sub>2</sub>O Framework: A novel approach for quantitative analysis of discharge coefficient in sluice gates. *J. Hydroinform.*, 22 (6), 1603-1619. Doi:10.2166/hydro.2020.003
- Hager, W. H. (1999). Underflow of standard sluice gate. *Exp. Fluid.*, 27(4), 339-350. Doi:10.1007/s003480050358.
- Habibzadeh, A., Rajaratnam, N. and Loewen, M. (2019) Characteristics of the flow field downstream of free and submerged hydraulic jumps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 172 (4), 180-194. Doi:10.1680/jwama.17.00004
- Lauria, A., Calomino, F., Alfonsi, G. and D'Ippolito, A. (2020). Discharge coefficients for sluice gates set in weirs at different upstream wall inclinations. *Water*, 12(1), 245. Doi:10.3390/w12010245
- Murzyn, F. and Chanson, H. (2008). Experimental Assessment of Scale Effects Affecting Two-Phase Flow Properties in Hydraulic Jumps. *Exp Fluid.*, 45(3), 513-521. DOI:10.1007/s00348-008-0494-4
- Mohammed, A. and Moayed, K. (2013). Gate lip hydraulics under sluice gate. *Modern Instrument.* 2(1), 16-19. DOI: 10.4236/mi.2013.21003.
- Nasehi Oskuyi, N. and Salmasi, F. (2012). Vertical sluice gate discharge coefficient. *J. Civil Eng. Urban.*, 2(3), 108-114.
- Nasrabadi, M., Mehri, Y., Ghassemi, A. and Omid, M. H. (2021). Predicting submerged hydraulic jump characteristics using machine





- learning methods. *Water Suppl.*, 21(8), 4180–4194. Doi:10.2166/ws.2021.168
- Rajaratnam, N. (1977). Free flow immediately below sluice gates. *J. Hydraul. Division*, 103(4), 345-351. Doi:10.1061/JYCEAJ.0004729
- Swamee, P. K. (1992). Sluice gate discharge equations. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 118(1), 56-60. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:1(56)
- Shivapur, A. V. and Shesha Prakash, M. N. (2005). Inclined sluice gate for flow measurement. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 11(1), 46-56. Doi:10.1080/09715010.2005.10514768
- Salmasi, F., Nouri, M., Sihag, P. and Abraham, J. (2021). Application of SVM, ANN, GRNN, RF, GP and RT models for predicting discharge coefficients of oblique sluice gates using experimental data. *Water Suppl.*, 21(1), 232-248. DOI:10.2166/ws.2020.226

---

**How to cite this paper:**

Daneshfaraz, R., Norouzi, R. and Abbaszadeh, H. (2022). Experimental investigation of hydraulic parameters of flow in sluice gates with different openings. *Environ. Water Eng.*, 8(4), 922–939. DOI: 10.22034/jewe.2022.321259.1700

---

