

# The Laboratory Investigation of Rotary Gates to Control the Water Level and Measure the Discharge in Rectangular Canals

Mahshid Dowlatshad<sup>1</sup>, Hojjat Allah Yonesi<sup>2\*</sup>, Babak Shahinejad<sup>3</sup>, Hassan Torabipoudeh<sup>4</sup>,  
Ava Marashi<sup>5</sup>

1-MSc. Student of Hydraulic Structures, Department of Water Eng., Lorestan University, Khorramabad, Iran.

2,4-Associate Professor Department of Water Eng., Lorestan University, Khorramabad, Iran.

3-Assistance Professor Department of Water Eng., Lorestan University, Khorramabad, Iran.

5- PhD of Hydraulic Structures.

\* [yonesi.h@lu.ac.ir](mailto:yonesi.h@lu.ac.ir)

Received: 23 June 2023, Accepted: 4 July 2023  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** The importance of flow measurement in irrigation and drainage networks is not hidden from anyone. gates are one of the structures that can be adjusted while controlling the upstream (downstream) flow depth and play an important role in measuring the flow.

Up to now, very comprehensive studies have been carried out regarding the correction and development of the relationship between the upstream height and the discharge in free and submerged conditions. Among the researchers who have investigated this issue in rectangular channels, we can mention the researches of Henry (1950), Rajaratnam et al. (1967), Roth et al. (1999), Swamee (1992) pointed out.

In this research, a rotary gate along with a rectangular to semi-circular transition is used as a flow measurement and water level control structure.

**Methodology:** The experiments of this research in an inclined channel with a Plexiglas wall with a rectangular cross-section with length, width and height of 12, 0.6 and 0.5 m respectively with a longitudinal slope of 0.00088 in the Water Research Laboratory of Water Engineering Department of Lorestan University done.

The transition length is 0.9 m, which was done by fixing its upper edge to the walls and bottom of the main channel from upstream and fixing it to a semicircular frame with a diameter of 0.6 m at the gate construction site. It should be noted that this semi-circular cross-section has continued up to a distance of 0.3 meters (gate radius) to the end of the transition hand. Also, a semicircular plate with a diameter of 0.6 m was used as a rotary gate.

The tested discharges were from 20 to 38 lit/sec with 2-liter intervals and angles from 35-85 degrees with 5-degree intervals.

In order to carry out the experiments, firstly the flow with a certain discharge is established in the channel, and then the gate is fixed at a specific opening and the depth of the flow

using a depth gauge device at different points of the channel, from a distance of 4 m upstream to 3 m downstream of the gate with certain distances in the direction Measured lengthwise. Also, in order to ensure the correctness of the read depth, the water level has been measured in at least three and at most five points across the channel.

**Results and Discussion:** The results show that with the increase of the opening angle, the flow depth will have less fluctuations. In order to provide a general relationship, two dimensionless parameters of water surface width at each level ( $W_h$ ) and dimensionless flow parameter ( $Q_h$ ) which were used by Marashi et al. (2021) is used.

In this research, the flow through the valve has been calculated from three approaches:

- 1- The method of estimating flow at each opening angle
- 2- Use of all data
- 3- Division of flow-opening angle curve (breaking point method)

Comparing the results of flow estimation methods: to check and calculate the error values in each discharge estimation method, indexes such as: average relative error index (Error), root mean square error (RMSE), standard error (SE) and normal root mean square error (NRMSE) were used.

Choose the recommended method: The analysis of the results obtained using the statistical indicators of the three methods mentioned above shows that all three methods have high and acceptable accuracy. In the method of using all the data and the breaking point method, the discharge is calculated by having the depth of flow at upstream, the radius and opening of the gate. Since relatively short calculations are performed in these two methods, it is sufficient for initial estimates.

**Conclusion:** In this research, to measuring and control the flow, using the rotary gates in rectangular channels has been studied. This research is based on the results of Marashi et al. and the purpose of the authors is to investigate the efficiency and accuracy of the results obtained from the estimation of the discharge passing through rotary gates in rectangular channels. The results showed that the method of using each angle seems more accurate because the number of calculations in it is more. The error percentage index for the separation method is 1.30%, in the aggregated data method it is 3.29% and the breaking point method is 3.98%.

The formation of the lowest flow depth after passing through the gate occurs at a relatively short distance in the central axis of the canal, which can be considered as a criterion for the initial depth of the hydraulic jump. Investigating the amount of energy loss due to the hydraulic jump of the flow after the gate shows that: with the increase of the opening angle, the cross-sectional area of the flow increases and the difference in velocity before and after the hydraulic jump decreases. This factor reduces energy loss. The comparison between the amount of energy consumption in two sliding and rotary gates showed that the flow passing through the rotary gate produces about 5% more energy loss.

**Keywords:** Rectangular to semicircular transition, rotary gate, flow measurement, energy loss.



© 2023 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 و ارزیابی آزمایشگاهی دریاچه‌های دوار برای کنترل سطح آب و اندازه‌گیری جریان در کانال‌های مستطیلی

مهشید دولتشاد<sup>۱</sup>، حجت الله یونسی<sup>۲\*</sup>، بابک شاهی نژاد<sup>۳</sup>، حسن ترابی پوده<sup>۴</sup>، آوا مرعی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.

۳- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان

۵- دکتری سازه‌های آبی.

\* yonesi.h@lu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** در این تحقیق آزمایشگاهی از دریاچه دوار به همراه یک تبدیل مستطیلی - نیم دایره‌ای به منظور اندازه‌گیری و کنترل جریان، استفاده شده است. کارآیی این نوع تبدیل و دریاچه از نظر هیدرولیکی با استفاده از عامل‌هایی همچون تراز سطح آب جریان نزدیک شونده و زاویه بازشدگی دریاچه که بر مکان هندسی دیواره تبدیل موثر بوده، مورد بررسی قرار گرفته است. دبی جریان عبوری از دریاچه دوار نیز بر مبنای رابطه دبی-اشل و معادله‌های اساسی هیدرولیک و همچنین سه روش تفکیک زاویه‌ها، روش تجمیع داده‌ها و روش نقطه شکست برآورد شده است. دقت این روش‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هر سه روش تفکیک زاویه‌ها، روش تجمیع داده‌ها و روش نقطه شکست با دقت بالای ۹۰ درصد قادر به برآورد دبی عبوری از کانال می‌باشد. تغییرپذیری میزان هدررفت انرژی در اثر عبور جریان از دریاچه نشان می‌دهد که: با افزایش زاویه بازشدگی، به دلیل افزایش مساحت مقطع خروجی از هدررفت انرژی کاسته می‌شود.

**کلیدواژگان:** تبدیل مستطیلی - نیم دایره‌ای، دریاچه دوار، اندازه‌گیری دبی، افت انرژی.

## ۱- مقدمه

کانال‌های مستطیلی پرداخته‌اند می‌توان به تحقیقات Roth et al. (1950), Henry (1967), Rajaratnam et al. (1999) و Swamee (1992) اشاره کرد. همچنین Kim (2007) با حل عددی معادله‌های ناویر-استوکس، و Benjamin (1956), Vanden-Broeck (1997) و Daneshfaraz et al. (2016) با حل عددی تابع پتانسیل مختلط به بررسی محاسبه ضریب فشردگی جریان عبوری از دریاچه و تغییرپذیری‌های آن در بازشدگی‌های مختلف در پرش‌های هیدرولیکی آزاد و مستغرق بعد از دریاچه پرداختند. Belaud et al. (2009) با حل معادله‌های انرژی و مومنوم تحقیقی را در این زمینه انجام داده‌اند. دریاچه‌های دوار به دلیل حرکت در پیرامون لولای خط

امروزه با محدودیت منابع آب و اهمیت بهینه سازی میزان تحویل و مصرف آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، سازه‌های اندازه‌گیری جریان و کنترل سطح آب از جایگاه با اهمیت تری نسبت به گذشته برخوردار شده‌اند. دریاچه سازه‌ای است که به صورت قابل تنظیم ضمن کنترل عمق جریان بالادست (پائین دست) نقش مهمی را در اندازه‌گیری جریان عبوری ایفا می‌کند (Plan and Budget 2022). تاکنون بررسی و ارزیابی‌های بسیار جامعی در زمینه تصحیح و توسعه رابطه ارتفاع بالادست جریان با دبی عبوری در شرایط آزاد و مستغرق انجام شده است. از جمله محققینی که تاکنون به بررسی این مقوله در

مختلف اثرگذاری‌های تبدیل در نوع ورود جریان به دریچه و همچنین زاویه‌های بازشدگی و دیگر زمینه‌های هیدرولیکی پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در یک کانال شیب پذیر با بدنه‌ای از جنس پلکسی گلاس با مقطع مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۰/۶ و ۰/۵ متر با شیب طولی ۰/۰۰۸۸ در آزمایشگاه تحقیقات آب گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان انجام شده است (شکل ۲). برای ساخت تبدیل، از یک ورق گالوانیزه به ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. طول تبدیل ۰/۹ متر بوده که با ثابت کردن لبه بالایی آن به دیواره‌ها و کف کانال اصلی از بالادست و تثبیت آن به یک قاب نیم دایره به قطر ۰/۶ متر در محل ساخت دریچه این تغییر سطح مقطع انجام شده است. لازم به یادآوری است که این مقطع نیم دایره‌ای تا فاصله ۰/۳ متری (شعاع دریچه) تا پائین دست تبدیل ادامه پیدا کرده است.

همچنین از یک صفحه نیم دایره‌ای به قطر ۰/۶ متر، به عنوان دریچه دوار استفاده شد. این ورق فلزی با برش لیزری به شکل نیم دایره درآمده و توسط یک میله فلزی به عنوان محور به مرکز نیم دایره در بستر تبدیل متصل شده است. به منظور تنظیم زاویه‌های مختلف بازشدگی نیز، از دو بلبرینگ نصب شده در قاب مخصوص استفاده شده است (شکل ۲). جریان توسط یک پمپ گریز از مرکز با دبی اسمی ۵۳ لیتر بر ثانیه از یک منبع زیرزمینی به مخزن هوایی با ارتفاع ثابت ۴ متر به کانال آزمایشگاهی وارد می‌شود. عمق جریان توسط اندازه‌گیر نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر و دبی جریان نیز توسط یک جریان سنج الکترومغناطیسی با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه که بر روی لوله ورودی جریان به فلوم نصب شده بود اندازه‌گیری شده است. برای اطمینان از درستی عمق خوانده شده، اندازه‌گیری تراز سطح آب در سه و یا پنج نقطه در عرض کانال صورت گرفت.

سطح مقطع جریان در حین عبور از دریچه دوار به دو قسمت تقسیم می‌شود. بخشی از جریان در حد فاصل

مرکزی، عملیات بازشدگی به میزان دلخواه را ساده کرده و مانورهای سریع و آسانی را ارائه می‌دهد. به دلیل نیروهای جریان اعمال شده به نسبت مساوی به دو طرف صفحه در این دریچه برای چرخش آن، نیروی کمی نیاز است. نخستین تحقیق در زمینه دریچه‌های دوار در کانال‌های نیم‌دایره‌ای توسط Marashi et al. (2020) انجام شده است. ایشان تحقیق نسبتاً گسترده‌ای را به منظور بررسی کارایی هیدرولیکی این دریچه در کانال نیم دایره‌ای (کانالت) انجام داده و تأثیر فراسنجه‌های دبی جریان و زاویه بازشدگی این دریچه را بر عمق جریان در شرایط پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق گزارش کردند. در شکل ۱ نمایی از دریچه دوار به کار رفته در آزمایش‌های ایشان نشان داده شده است.

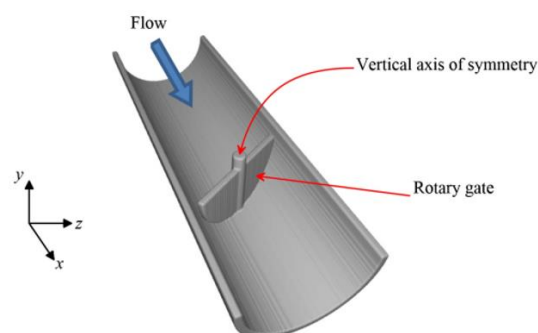


Fig. 1 3-D schematic view of the rotary gate in Semicircular Canal

شکل ۱ نمای کلی دریچه دوار در کانال نیم دایره‌ای

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری آب در کانال‌های آبرسانی و سختی کار با دریچه‌های کشویی به لحاظ بهره‌برداری، زنگ خوردگی و نیروی کار انسانی، در این پژوهش از دریچه دوار به همراه یک تبدیل مستطیلی-نیم دایره‌ای به عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان و کنترل سطح آب استفاده شده است. لذا با استفاده از یک تبدیل، سطح مقطع کانال مستطیلی به صورت تدریجی به یک مقطع نیم دایره‌ای در محل نصب دریچه دوار تبدیل می‌شود. تنظیم میزان بازشدگی دریچه جهت رسیدن به تراز جریان مناسب در بالادست توسط گشتاور مثبت و منفی ایجاد شده در محور دریچه باعث آسانگری در بهره‌برداری از این نوع دریچه‌ها می‌شود. این روش تاکنون بررسی و بهره‌برداری نشده است. لذا در این تحقیق به بررسی جنبه‌های

نویسندگان نیز از همان روابط برای تعیین دبی با سه دیدگاه: بررسی در هر زاویه بازشدگی با استفاده از نتایج همان زاویه به صورت مجزا، استفاده از همه داده‌ها و در نهایت روش تقسیم بندی ناحیه‌های منحنی دبی-بازشدگی و تحلیل زیر ناحیه‌ها استفاده کرده‌اند. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا جریان با دبی معینی در کانال برقرار شده و سپس دریچه در بازشدگی مشخصی تثبیت شده و عمق جریان با استفاده از دستگاه عمق سنج در نقطه‌های مختلف کانال، از فاصله ۴ متری بالادست تا ۳ متری پایین دست دریچه بدین صورت که از مرکز دریچه تا ۱ متری بالادست و پایین دست دریچه با فاصله‌های ۰/۰۵ متر و از ۱ متری تا ۴ متری بالادست و ۱ متری تا ۳ متری پایین دست با فاصله‌های ۰/۲۵ متری در راستای طولی اندازه‌گیری شده است.

دیواره تبدیل از بالادست تا لبه دریچه عبور کرده و بخش دیگر نیز از مابین دو منحنی تبدیل نیم دایره و لبه دریچه در قسمت پائین دست دریچه عبور می‌کند. در شکل‌های (۲ و ۳) نحوه عبور جریان در حدفاصل تبدیل و دریچه نشان داده شده است. در این تحقیق، با توجه به حساسیت نقش دبی در تعیین تراز سطح آب بالادست و پائین دست دریچه، دبی‌های مورد آزمایش از ۲۰ تا ۲۸ لیتر بر ثانیه با فاصله‌های دو لیتری و زاویه‌های ۳۵ تا ۸۵ درجه با فاصله‌های ۵ درجه انجام شده است (جدول ۱). برای مقایسه کارایی این دریچه با یک دریچه کشویی مفروض با همان سطح مقطع باز شدگی، از لحاظ ایجاد افت انرژی، منحنی‌های سطح مقطع دریچه دوار در برابر عمق‌های بالادست ترسیم شده است (شکل ۴). رابطه‌های ریاضی مورد استفاده در این تحقیق توسط Marashi et al. (2020) توسعه داده شده است و

جدول ۱ حدود فراسنجه‌های اندازه‌گیری شده در وضعیت جریان آزاد

Table 1 The domain of measured parameters in free flow

Opening angle (deg)	Discharge range (lit/s)	Depth rang (m)	No. of Exp.
35	0.02<Q<0.026	0.239<h<0.281	4
40	0.02<Q<0.026	0.220<h<0.257	4
45		0.195<h<0.287	
50		0.179<h<0.264	
55		0.162<h<0.238	
60		0.152<h<0.221	
65	0.02<Q<0.038	0.136<h<0.200	10
70		0.129<h<0.185	
75		0.125<h<0.178	
80		0.120<h<0.170	
85		0.118<h<0.166	



Fig. 2 The rectangular channel used in this research and the region of gate installation and transition in it

شکل ۲ کانال مستطیلی مورد استفاده در این تحقیق و محدوده نصب دریچه و تبدیل در آن

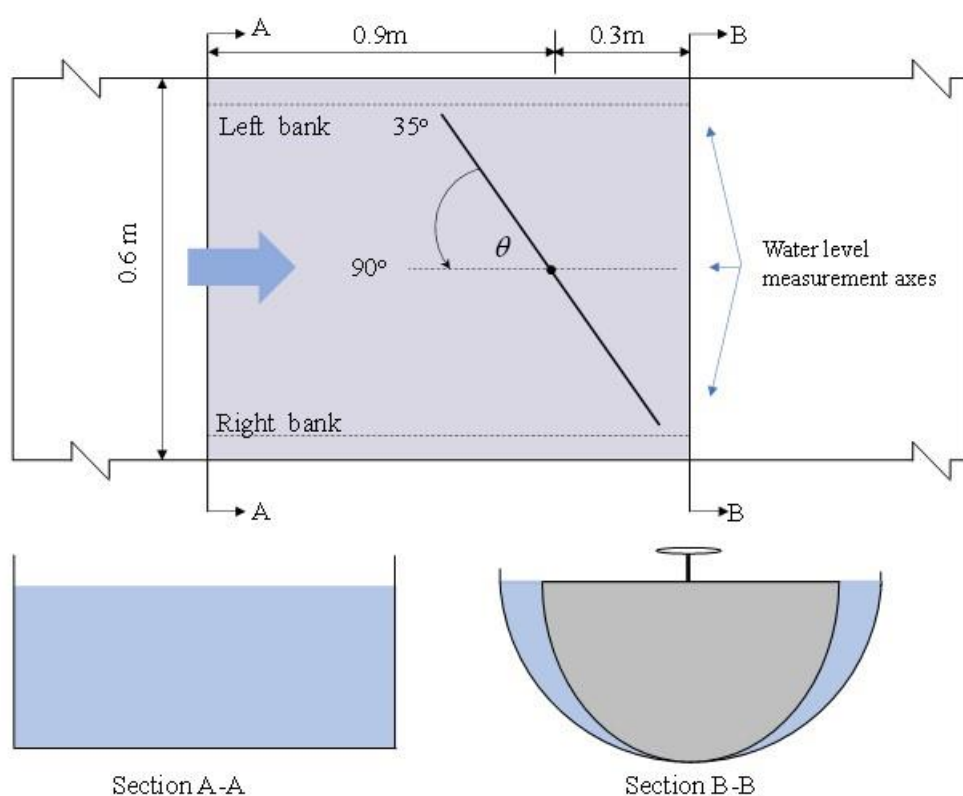


Fig. 3 Gate plan and transition in rectangular channel

شکل ۳ طرح دریچه و تبدیل در کانال مستطیلی

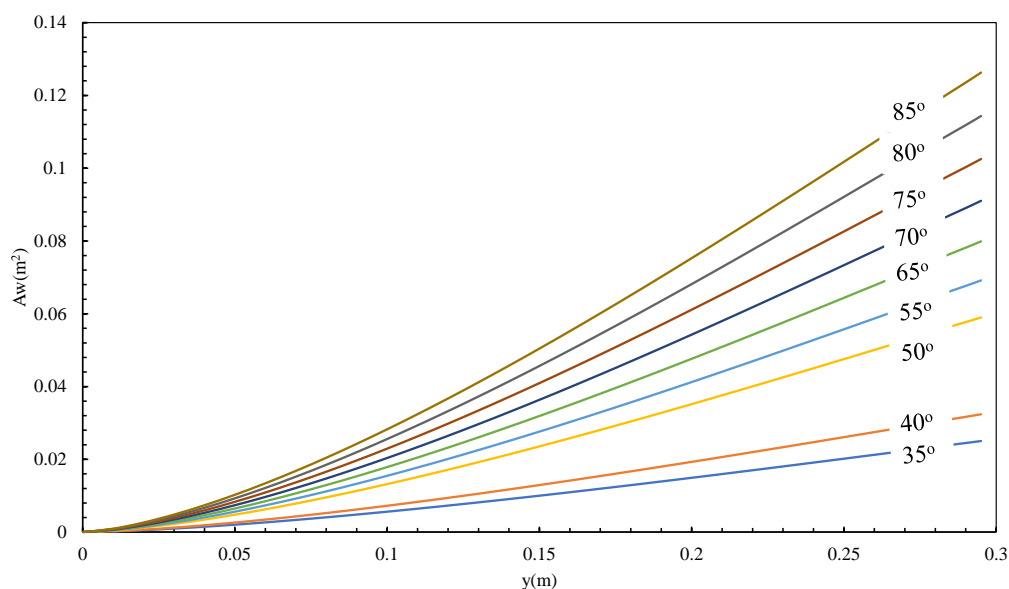


Fig. 4 Variations of the cross-section of flow through the rotary gate against the depth for different opening angles

شکل ۴ تغییرپذیری سطح مقطع جریان عبوری از دریچه دوار در برابر عمق برای زاویه‌های مختلف بازشدگی

### ۳- نتایج و بحث

در کلیه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، نیمرخ سطح آب در مجاورت دیواره‌های سمت چپ و راست و همچنین محور مرکزی کانال برداشت شده است. نتایج

به‌دست آمده نشان می‌دهد در بالادست دریچه، بیشترین طولی که تراز سطح آب دچار تغییر می‌شود در حدود ۰/۵ متر بوده و در سمت چپ جریان (جایی که دریچه دوار به سمت بالادست حرکت کرده است) می‌باشد.

$$\Pi_5 = \frac{W}{h_1}$$

$$\Pi_6 = \theta, \sin\theta, \cos\theta$$

با ترکیب دو فراسنجه بدون بُعد  $\Pi_3$  و  $\Pi_6$  فراسنجه بدون بُعدی حاصل می‌شود که می‌تواند نماینده زاویه بازشدگی باشد. در نتیجه می‌توان به رابطه زیر دست یافت:

$$\frac{Q}{\sqrt{gh_1^5}} = f\left(\frac{W}{h_1}\right) \quad (3)$$

به منظور ارائه یک رابطه عمومی، از دو فراسنجه بدون بُعد عرض سطح آب در هر تراز ( $W/h$ ) و فراسنجه دبی بدون بُعد جریان ( $Q_h$ ) که توسط (Marashi et al. (2020) به صورت زیر تعریف شده است، استفاده می‌شود:

$$W_h = \frac{W}{h_1} = 2(1 - \cos\theta) \sqrt{\frac{2R}{h_1} - 1} \quad (4)$$

$$Q_h = \frac{Q}{\sqrt{gh_1^5}} \quad (5)$$

#### ۴- روش‌های تعیین دبی عبوری

##### ۴-۱- روش بر آورد دبی در هر زاویه بازشدگی

با توجه به میزان برداشت شده در زاویه‌های مختلف بازشدگی دریاچه، می‌توان ارتباط دو فراسنجه  $Q_h$ ،  $W_h$  را به صورت زیر نشان داد.

$$Q_h = \alpha W_h^\beta \quad (6)$$

که در آن،  $\alpha, \beta$  ضریب‌های ثابت می‌باشد.

لازم به ذکر است که مقادیر  $\alpha, \beta$  در زاویه‌های مختلف بازشدگی، متفاوت است. شکل ۷ تغییرپذیری فراسنجه بدون بُعد دبی در برابر عرض نسبی سطح آب برای زاویه‌های مختلف بازشدگی را نشان می‌دهد پس از برازش یک منحنی توانی به نتایج به دست آمده در هر زاویه بازشدگی در این شکل، میزان توان و ضریب معادله (۶) استخراج و منحنی تغییرپذیری آنها نسبت به زاویه بازشدگی ترسیم شده است (شکل ۸). با استفاده از این شکل می‌توان مقادیر دو فراسنجه ضریب و توان را برای هر زاویه بازشدگی به دست آورد.

تغییرپذیری دو فراسنجه  $\alpha$  و  $\beta$  نسبت به زاویه بازشدگی

در شکل ۵ نمونه‌ای از نیمرخ‌های سطح آب اندازه‌گیری شده در دیواره‌های سمت چپ و راست و خط مرکزی کانال نشان داده شده است. با دقت در داده‌ها می‌توان دریافت که عمق جریان در مقطعی به فاصله ۱ متر از بالادست دریاچه را می‌توان به عنوان معیاری برای تعیین انرژی کل در بالادست دریاچه در نظر گرفت و می‌توان اطمینان داشت که میزان عمق جریان در این مقطع نسبت به مقطع‌های بالادست تغییری ندارد.

منحنی‌های دبی اشل برای زاویه‌های مختلف در شکل ۶ رسم شده است.

چگونگی تغییرپذیری میزان دبی در عمق‌های مختلف بیانگر آن است که با افزایش زاویه بازشدگی عمق جریان دچار نوسان‌های کمتری خواهد شد. به منظور تعمیم نتایج در شرایط و ابعاد هندسی مختلف، از دسته فراسنجه‌های بدون بُعد با استفاده از تئوری بی بعدسازی باکینگهام استفاده شده است.

$$F(Q, h_1, L, B, R, \rho, g, \mu, \theta) = 0 \quad (1)$$

که در آن:

$Q$  دبی جریان عبوری (مترمکعب بر ثانیه)،  $R$  شعاع دریاچه دوار (متر)،  $h_1$  تراز سطح آب در بالادست دریاچه (متر)،  $L$  طول تبدیل (متر)،  $W$  عرض کانال مستطیلی (عرض سطح آب-متر)،  $\rho$  چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $g$  شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)،  $\mu$  لزجت سیال (پاسکال-ثانیه) و  $\theta$  زاویه بازشدگی دریاچه (درجه) می‌باشد.

با در نظر گرفتن سه فراسنجه  $\rho, h$  و  $g$  به عنوان متغیرهای تکرارشونده، فراسنجه‌های بدون بُعد زیر به دست می‌آید:

$$\Pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{gh_1^5}}$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho \sqrt{gh_1^3}} = \frac{1}{Re} \quad (2)$$

$$\Pi_3 = \frac{R}{h_1}$$

$$\Pi_4 = \frac{L}{h_1}$$

تغییرپذیری یک تابع درجه دو بر روی آنها برآزش داده شد. با ساده سازی این معادله و جایگذاری عامل‌های هیدرولیکی می‌توان با اندازه‌گیری میزان عمق جریان بالادست دریاچه در زاویه‌های مختلف بازشدگی، دبی عبوری از دریاچه دوار را با معادله ۱۱ محاسبه کرد.

$$Q_h = -0.027W_h^2 + 0.47W_h \quad (10)$$

$$Q = -0.338(1 - \cos\theta)^2 \times (2R - h)h^{1.5} + 2.94 \times (1 - \cos\theta)h^2 \sqrt{2R - h} \quad (11)$$

#### ۳-۴- روش تقسیم بندی ناحیه‌های منحنی دبی- بازشدگی

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در روند نتایج یک نقطه شکست وجود دارد. این بدان معناست که در نقطه‌ای از منحنی، تغییرپذیری فراسنجه بدون بُعد دبی نسبت به عرض سطح آب که شیب داده‌ها تغییر پیدا می‌کند به عنوان نقطه شکست داده‌ها در نظر گرفته

به ترتیب از رابطه‌های ۷ و ۸ پیروی می‌کنند. با ساده سازی رابطه‌های ۴ تا ۶ می‌توان دبی عبوری از دریاچه دوار را با استفاده از رابطه ۹ برآورد کرد. روند این منحنی‌ها از معادله‌های توانی پیروی می‌کند که می‌توان آنها را به صورت معادله ۱۰ نمایش داد. در این معادله  $Q_h$  به صورت تابع توانی از  $W_h$  داده شده است.

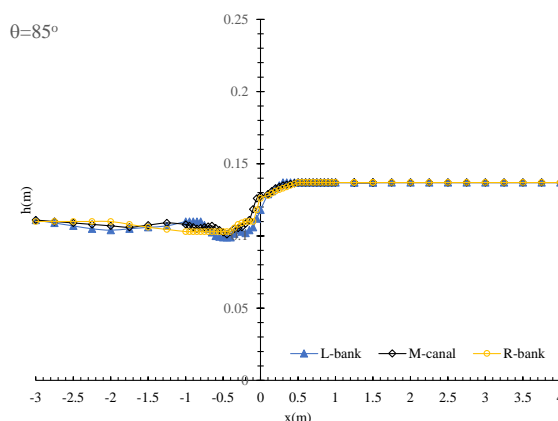
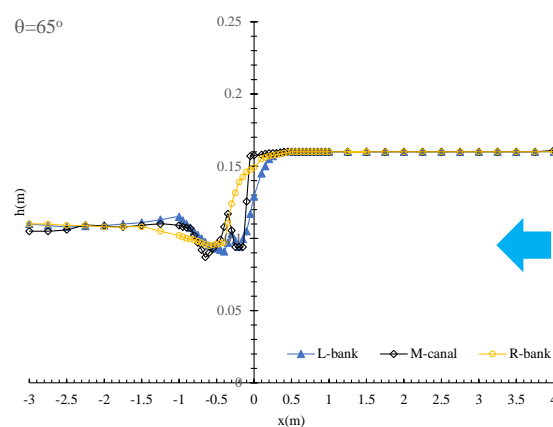
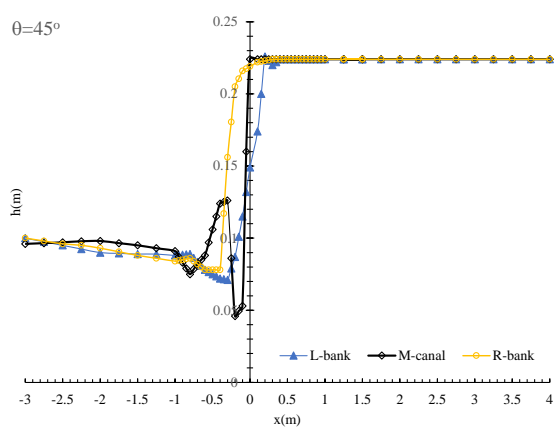
$$\alpha = 2.4714\cos^4\theta - 2.927\cos^3\theta + 0.9836\cos^2\theta + 0.1235\cos\theta + 0.3022 \quad (7)$$

$$\beta = -0.18666\cos^2\theta + 0.1298\cos\theta + 1.1065 \quad (8)$$

$$Q = 3.132\alpha h^{2.5} \times \left[ 2(1 - \cos\theta) \sqrt{\frac{2R}{h} - 1} \right]^\beta \quad (9)$$

#### ۲-۴- روش برآورد دبی با استفاده از همه داده‌ها

در همه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، تغییرپذیری فراسنجه بی بُعد دبی نسبت به عرض سطح آب ترسیم شده است (شکل ۹). با توجه به روند



**Fig. 5** The flow surface elevation at left and right bank and the center line of the canal with 26 lit/s  
شکل ۵ نیمرخ سطح آب در دیواره‌های سمت چپ و راست و خط مرکزی کانال با دبی ۲۶ لیتر بر ثانیه



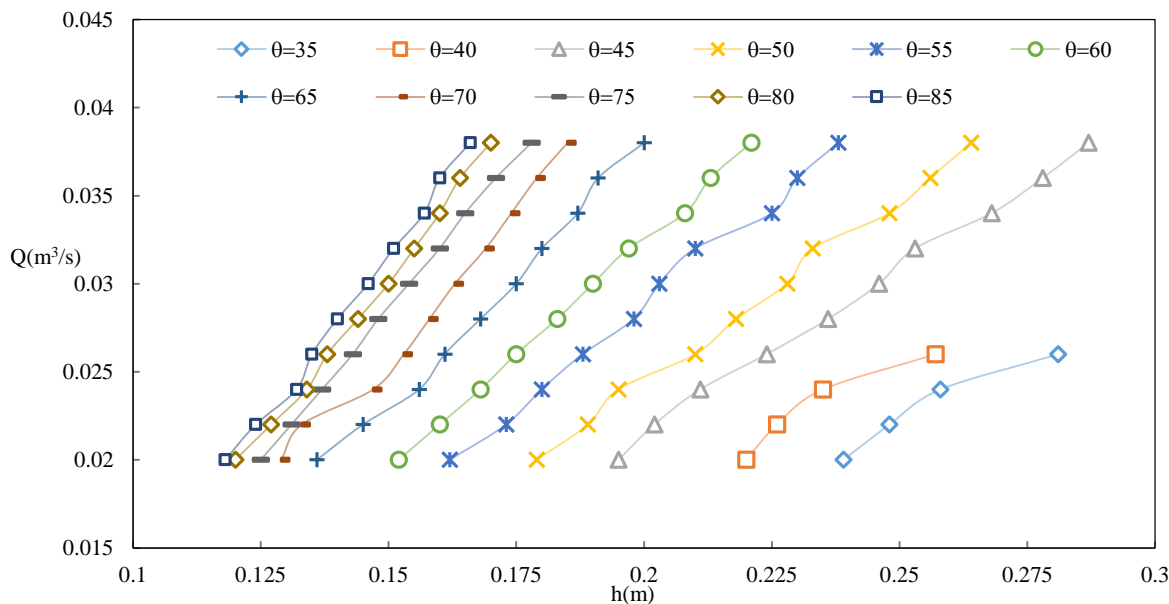


Fig. 6 Stage-discharge curve in different opening angles  
 شکل ۶ منحنی دبی-اشل در زاویه‌های مختلف بازشدگی

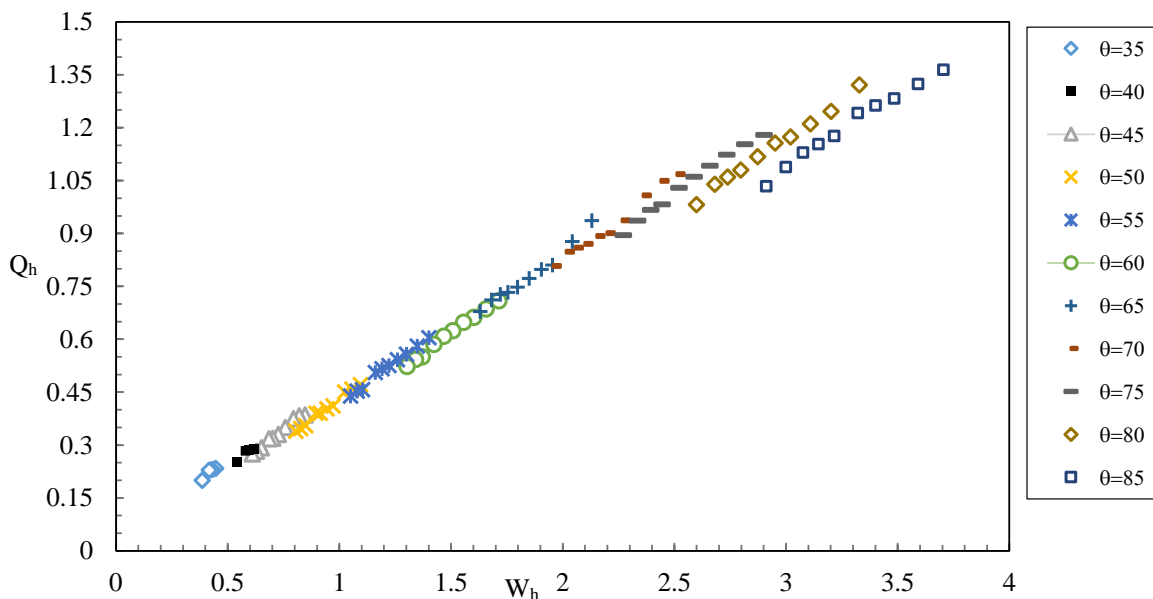


Fig. 7 Variations of the dimensionless parameter of discharge versus the relative width of the water surface for different opening angles

شکل ۷ تغییرپذیری فراسنجه بدون بُعد دبی در برابر عرض نسبی سطح آب برای زاویه‌های مختلف بازشدگی

که دریاچه در زاویه‌های کمتر از ۶۰ درجه و بیشتر از آن کارکردهای متفاوتی دارد. با ساده سازی معادله‌های ۱۲ و ۱۴ میزان دبی عبوری را با استفاده از رابطه‌های ۱۳ و ۱۵ با جایگذاری میزان عمق جریان بالادست در زاویه‌های مختلف بازشدگی می‌توان

می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در زاویه‌های بیشتر از ۶۰ درجه، افزایش دبی جریان سبب افزایش ناچیز در عمق بالادست می‌شود و در مقابل، در زاویه‌های کمتر از ۶۰ درجه افزایش دبی در کانال، عمق بیشتری را به بالادست دریاچه تحمیل می‌کند. این نتیجه بیانگر آن است

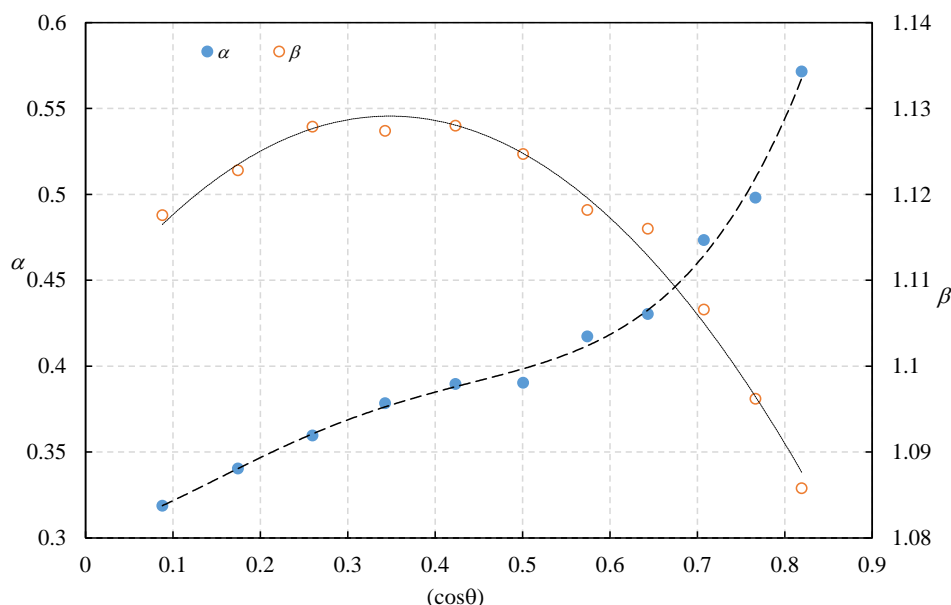


Fig. 8 Changes the coefficient and power of the exponential equation with respect to different opening angles

شکل ۸ تغییرپذیری ضریب و توان معادله نمایی نسبت به زاویه‌های مختلف بازشدگی

مربعیات خطای نرمال ( $NRMSE$ ) استفاده شده است (رابطه‌های ۱۶ تا ۱۹).

$$Error = \left( \sum \left| \frac{Q_0 - Q_C}{Q_0} \right| / N \right) \times 100 \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_0 - Q_C)^2}{N - 1}} \quad (17)$$

$$SE = \frac{RMSE}{Q_0} \times 100 \quad (18)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Q_{0-max} - Q_{0-min}} \times 100 \quad (19)$$

که در این رابطه‌ها:

$Q_0$  دبی مشاهده‌ای،  $Q_C$  دبی محاسبه شده و  $N$  شمار داده‌ها می‌باشند. میزان محاسبه شده شاخص‌های یادشده در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر این شاخص‌ها نشان می‌دهد که روش تفکیکی هر زاویه نسبت به روش تجمیع داده‌ها از دقت بالاتری برخوردار است.

#### ۴-۵- انتخاب روش پیشنهادی

تحلیل نتایج به دست آمده با استفاده از شاخص‌های آماری از سه روش گفته شده در بالا نشان می‌دهد که هر

محاسبه کرد. روند این نمودار در فراسنجه بدون بُعد عرض سطح آب برابر  $1/7$  با تغییر شیب همراه است. که برابر بررسی‌های انجام شده این بازشدگی مربوط به زاویه‌های بزرگتر یا مساوی  $60^\circ$  درجه می‌باشد.

$$Q_h = 0.43 W_h \quad (12)$$

$$Q = 2.67(1 - \cos\theta) h_1^2 \sqrt{2R - h_1} \quad W_h \leq 1.71 \quad (13)$$

$$Q_h = 0.031 W_h + 0.222 \quad (14)$$

$$Q = 1.95043 W_h(1 - \cos\theta) h_1^2 \sqrt{2R - h_1} + 0.69h_1^{2.5} \quad W_h > 1.71 \quad (15)$$

لازم به توضیح است که نتایج به دست آمده از این تحقیق همانندی نسبی خوبی با نتایج کار Marashi et al. (2020) دارد.

#### ۴-۴- مقایسه نتایج روش‌های برآورد دبی

در این تحقیق برای بررسی و محاسبه میزان خطاها در هر روش برآورد دبی، از شاخص‌هایی همچون شاخص متوسط خطای نسبی ( $Error$ )، مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، خطای استاندارد ( $SE$ ) و مجذور میانگین

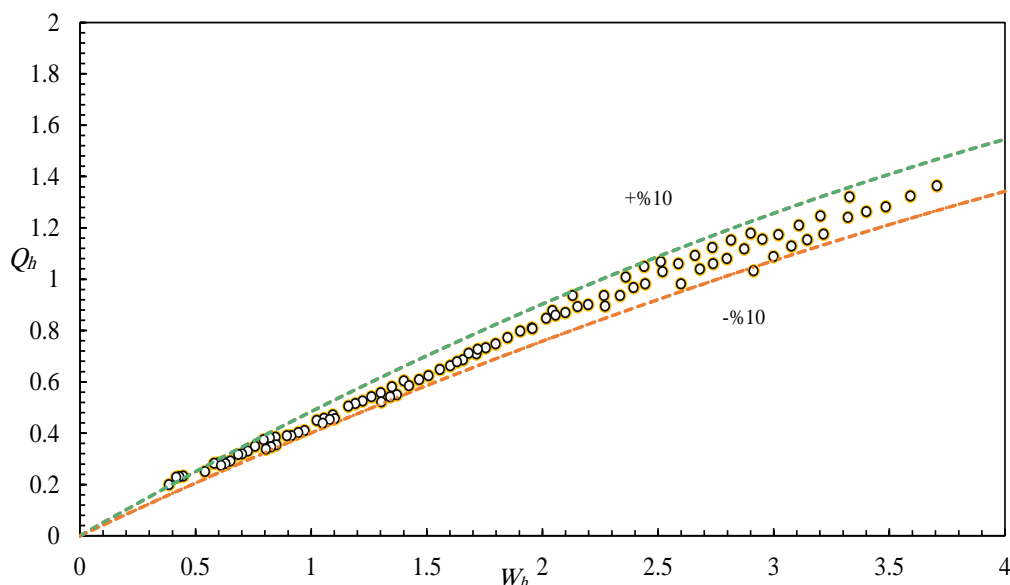


Fig. 9 Variations of the dimensionless parameter of discharge versus the relative width of the water surface

شکل ۹ تغییرپذیری فراسنجه بدون بُعد دبی نسبت به عرض نسبی سطح آب

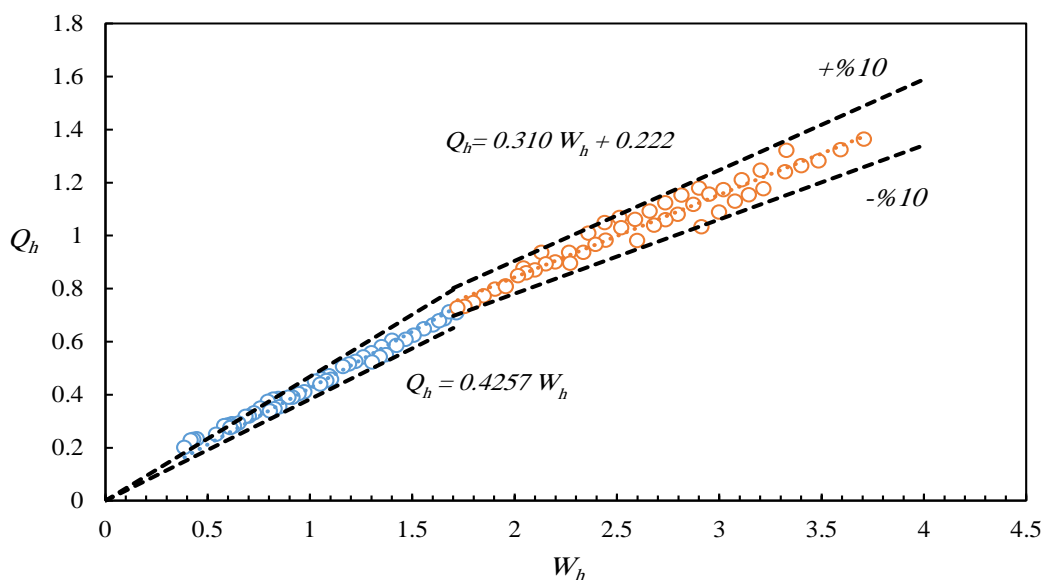


Fig. 10 Trendline on changing the dimensionless discharge parameter versus the relative width of the water surface

شکل ۱۰ برازش خطی بر روند تغییرپذیری فراسنجه بدون بُعد دبی نسبت به عرض نسبی سطح آب

جدول ۲ نتایج به دست آمده از بررسی خطای روش‌های محاسبه دبی بر مبنای شاخص‌های آماری

Table 2 The results of checking the error of discharge calculation methods based on statistical index

Approach	Error(%)	RMSE(cms)	SE(%)	NRSME(%)
Individual opening angle	1.30	0.0004	1.60	2.58
Using all Data	3.29	0.0013	4.50	7.25
Breaking point	3.98	0.0015	5.16	8.31

شعاع و بازشدگی دريچه، ميزان دبی جريان با استفاده از رابطه‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ محاسبه می‌شود. از آنجایی که در این دو روش محاسبه‌های به نسبت کوتاهی انجام می‌گیرد،

سه روش با دقت بالای ۹۰ درصد قادر به برآورد دبی عبوری از دريچه هستند. در روش استفاده از همه داده‌ها و روش نقطه شکست با داشتن عمق جريان در بالادست،

برای برآوردهای اولیه کفایت می‌کند. اما در روش استفاده از نتایج هر زاویه بازشدگی، در آغاز باید با استفاده از میزان زاویه بازشدگی دریچه، فراسنجه‌های  $\alpha$  و  $\beta$  محاسبه شود، آنگاه با داشتن شعاع دریچه و عمق جریان بالادست میزان دبی جریان از رابطه ۹ محاسبه شود. در این روش، محاسبه‌ها کمی پیچیده‌تر بوده ولی باعث بهبود در دقت نتایج خواهد شد. به همین علت در مدل‌های رایانه‌ای که به منظور مدیریت مانور دریچه تهیه می‌شوند استفاده از روش تفکیک زاویه توصیه می‌شود.

$$\Delta E = (y_1 + V_1^2/2g) - (y_2 + V_2^2/2g) \quad (20)$$

که در آن  $\Delta E$  میزان استهلاک انرژی در اثر پرش هیدرولیکی،  $y_1, y_2$  به ترتیب عمق‌های پیش و پس از پرش و  $V_1, V_2$  نیز میزان سرعت میانگین پیش و پس از پرش هیدرولیکی بوده و از رابطه پیوستگی ( $V = Q/(B \cdot y)$ ) در هر مقطع تعیین می‌شود.

تغییرپذیری میزان استهلاک انرژی در زاویه‌ها و دبی‌های مختلف عبوری از دریچه دوار در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با افزایش زاویه بازشدگی، به دلیل افزایش مساحت مقطع خروجی، سرعت جریان خروجی و در پی آن عدد فرود جریان کاهش یافته و بنابراین از میزان استهلاک انرژی نیز کاسته می‌شود. با ترسیم درصد تغییرپذیری میزان استهلاک انرژی جریان در برابر فراسنجه بدون بُعد دبی ( $Q_h$ ) می‌توان ارتباط مناسبی بین این فراسنجه با عمق جریان در بالادست دریچه و درصد استهلاک انرژی را به صورت رابطه زیر نتیجه‌گیری کرد (شکل ۱۴). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روند تغییرپذیری افت انرژی در این تحقیق با روند تغییرپذیری ارائه شده توسط Marashi et al. (2021) هم‌خوانی دارد.

$$\Delta E/y_1(\%) = 90.316 e^{-2.16(Q_h)} \quad (21)$$

همچنین نسبت بی بُعد افت انرژی به انرژی مخصوص اولیه در برابر فراسنجه بدون بُعد دبی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. روند تغییرپذیری نشان دهنده آن است که با افزایش  $Q_h$  و در نتیجه زاویه بازشدگی، از میزان افت انرژی به دلیل کاهش اختلاف سرعت بین جریان پیش و پس از پرش هیدرولیکی کاسته می‌شود.

$$\Delta E/E_1(\%) = 95.209 e^{-2.245(Q_h)} \quad (22)$$

که در آن،  $E_1$  میزان انرژی مخصوص پیش از پرش هیدرولیکی است.

میزان هدررفت انرژی ایجاد شده توسط این دریچه، از

#### ۴-۶- میزان استهلاک انرژی

با توجه به کاهش سطح مقطع عبوری جریان در حین عبور از دو طرف دریچه دوار، سرعت جریان و در پی آن عدد فرود افزایش یافته و رژیم جریان بدون فاصله پس از دریچه به صورت فوق بحرانی خواهد شد. نکته مهمی که در این آزمایش‌های وجود دارد آن است که جریان پس از تقسیم از دو بازشدگی چپ و راست عبور می‌کند. آن بخش از جریان که از سمت بازشدگی چپ خارج می‌شود با عمق کمتر و سرعت بیشتر در کف کانال به مسیر خود ادامه می‌دهد و جریان عبوری از سمت راست دریچه با ارتفاع بیشتر و سرعت کمتر در مقایسه با جریان سمت چپ به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل ۱۱). در فاصله به نسبت کوتاهی پس از دریچه، این دو جریان با هم برخورد کرده و باعث آشفتگی شدیدی خواهند شد. پس از اختلاط این دو جریان، جریانی به شکل کوهانی در وسط محور طولی کانال مستطیلی به وجود می‌آید (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). افزون بر این پدیده، در سمت چپ دریچه، گردابه‌هایی در صفحه افقی و در سمت راست دریچه نیز، گردابه‌هایی در صفحه عمود بر جهت جریان تشکیل می‌شود. این سه پدیده، در مجموع عامل اصلی استهلاک انرژی جریان در حین عبور از دریچه می‌باشد. در این تحقیق، با اندازه‌گیری کمترین تراز سطح آب (در خط مرکزی کانال) پیش از تشکیل کوهان به عنوان عمق اولیه پرش هیدرولیکی و همچنین عمق بعد از تشکیل کوهان (در فاصله قابل توجهی از پائین دست) به عنوان عمق

بحرانی پس از دریاچه، میزان بازشدگی و مقادیر عمق و انرژی در مقطع پایاب را محاسبه کرده و در نهایت درصد هدررفت انرژی را به دست آورد. در شکل ۱۶ درصد هدررفت انرژی ایجاد شده توسط دریاچه دوار با میزان همانند آن در دریاچه کشویی فرضی در کانال مستطیلی هم عرض، مقایسه شده است. همان طور که از این شکل نیز مشخص است، میزان هدررفت انرژی در دریاچه دوار در حدود ۵ درصد بیشتر از دریاچه کشویی می باشد. این امر را می توان به دلیل تشکیل کوهان جریان و همچنین تاثیر گردابه های به وجود آمده در دو طرف دیواره های کانال قلمداد کرد.

جمله معیارهایی است که می توان به کمک آن کارایی این سازه را ارزیابی و با سازه های همانند، مانند دریاچه های کشویی مقایسه کرد. بدین منظور با فرض یک دریاچه کشویی در یک کانال مستطیلی هم عرض با کانال آزمایشگاهی در این تحقیق و با شرایط هیدرولیکی همانند، مقادیر درصد هدررفت انرژی محاسبه شد. میزان بازشدگی دریاچه کشویی نیز از تقسیم سطح مقطع عبوری جریان از دریاچه دوار (شکل ۴) بر عرض کانال مستطیلی به دست می آید. از آنجا که هر میزان عمق و سرعت در بالادست دریاچه کشویی، مقادیر منحصر به فردی از عمق و سرعت در شرایط فوق بحرانی ایجاد می کند، لذا می توان با استفاده از این مقادیر، عمق و سرعت در شرایط فوق

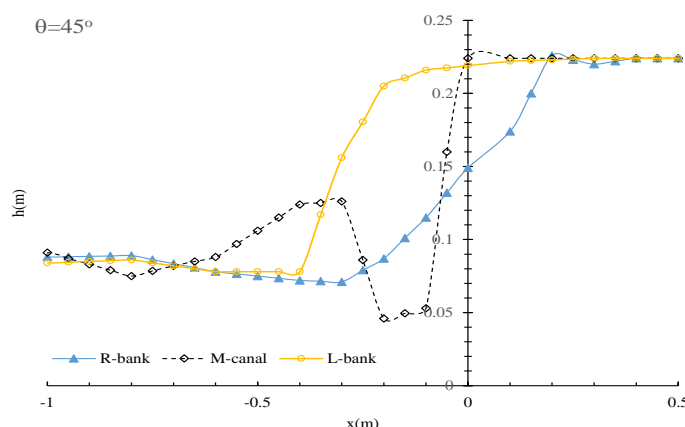


Fig. 11 Formation of the hydraulic jump of the flow after passing through the rotary gate  
 شکل ۱۱ چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی جریان پس از عبور از دریاچه دوار

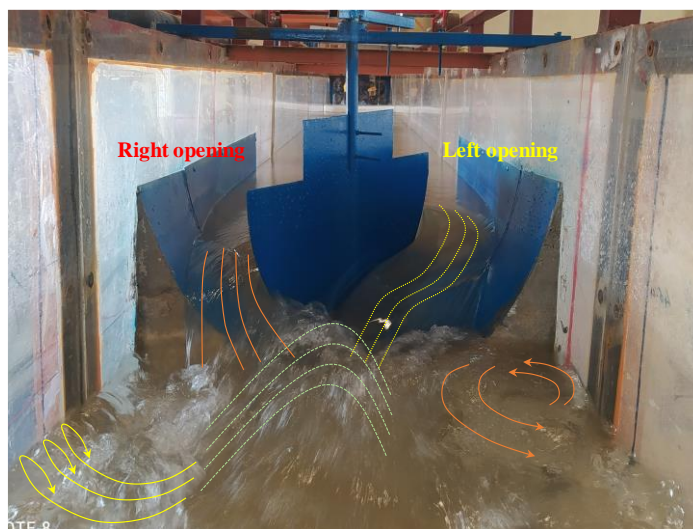


Fig. 12 formation of the hydraulic jump of the flow after passing through the rotary gate  
 شکل ۱۲ چگونگی تشکیل پرش هیدرولیکی جریان پس از عبور از دریاچه دوار

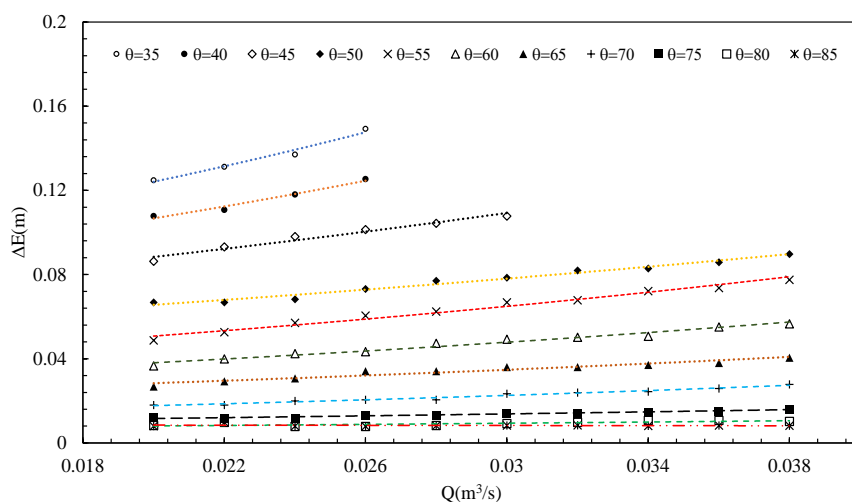


Fig. 13 The amount of energy loss of the flow passing through the rotary gate with different opening angles

شکل ۱۳ میزان هدررفت انرژی جریان عبوری از دریچه دوار با زاویه‌های بازشدگی مختلف

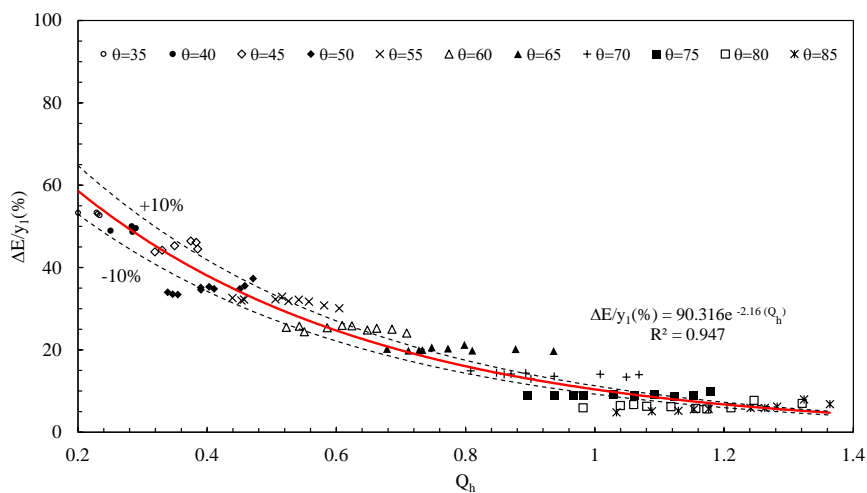


Fig. 14 Changes in the energy loss percentage against the dimensionless flow parameter

شکل ۱۴ تغییرپذیری درصد هدررفت انرژی جریان در برابر فراسنجه بدون بُعد دی

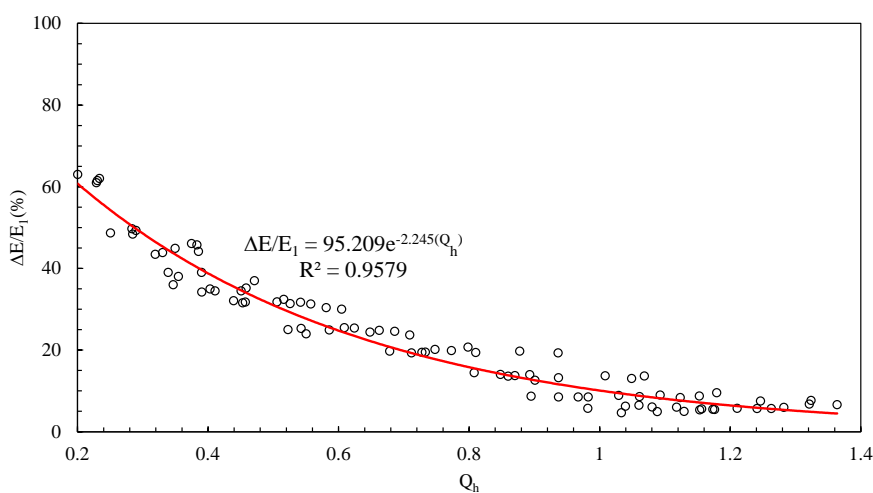
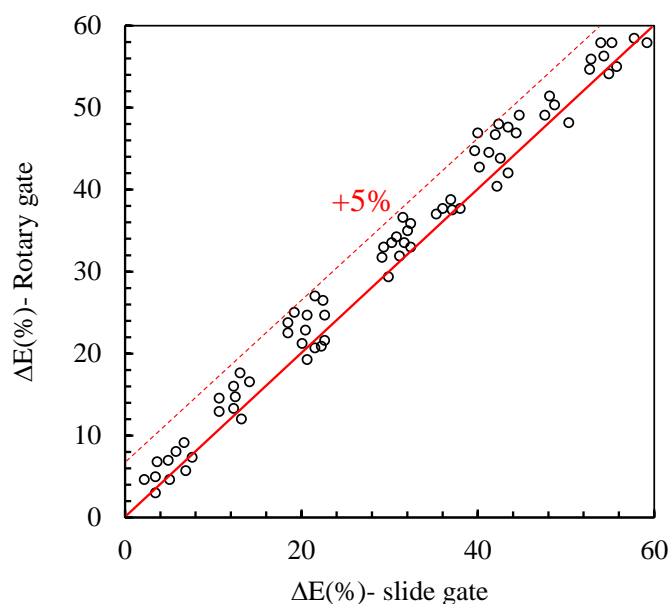


Fig. 15 Changes in the relative energy loss rate against the dimensionless flow parameter

شکل ۱۵ تغییرپذیری میزان هدررفت انرژی نسبی در برابر فراسنجه بدون بُعد دی



**Fig. 16** Comparison of percentage of energy losses downstream of two sliding and rotary gates with the same opening  
 شکل ۱۶ مقایسه درصد هدررفت انرژی در پایین دست دو دریچه کشویی و دوار با بازشدگی یکسان

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور اندازه گیری و کنترل جریان، کاربرد دریچه های دوار در کانال های مستطیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تحقیق بر مبنای نتایج کار Marashi et al. (2020) بوده و هدف نویسندگان بررسی کارایی و دقت نتایج به دست آمده از برآورد دبی عبوری از دریچه های دوار در کانال های مستطیلی می باشد. این نتایج نشان داد که روش استفاده از هر زاویه به صورت مجزا به دلیل اینکه شمار محاسبه ها در آن بیشتر است دقیق تر به نظر می رسد. شاخص درصد خطا برای روش تفکیکی (مجزا) ۱/۳۰، در روش تجمیعی داده ها ۳/۲۹ و روش نقطه شکست ۳/۹۸ درصد می باشد. محل تشکیل کمترین عمق جریان پس از عبور از دریچه در فاصله به نسبت کوتاهی در محور مرکزی کانال رخ می دهد که می تواند معیار برای عمق اولیه پرش هیدرولیکی به شمار آید. بررسی میزان هدررفت انرژی در اثر پرش هیدرولیکی جریان پس از دریچه نشان می دهد که با افزایش زاویه بازشدگی، سطح مقطع عبوری جریان افزایش و اختلاف سرعت پیش و پس از پرش هیدرولیکی کاسته می شود. این عامل باعث کاهش روند استهلاک انرژی می شود. مقایسه بین میزان استهلاک انرژی در دو دریچه کشویی و

دوار نشان داد که جریان عبوری از دریچه دوار در حدود ۵ درصد هدررفت انرژی بیشتری را تولید می کند.

### ۶- فهرست نشانه ها

$A_w$	سطح مقطع جریان عبوری از دریچه ( $m^2$ )
$B$	عرض کانال در بالادست (m)
$E_1$	انرژی جریان در بالادست دریچه (m)
$\Delta E$	افت انرژی (m)
$g$	شتاب ثقل ( $m.s^{-2}$ )
$h$	عمق جریان (m)
$L$	طول بازه مورد اندازه گیری (m)
$N$	تعداد داده ها
$Q$	دبی عبوری از کانال ( $m^3.s^{-1}$ )
$Q_h$	دبی بدون بُعد
$Q_0, Q_C$	به ترتیب دبی مشاهده ای و محاسباتی ( $m^3.s^{-1}$ )
$R$	شعاع دریچه دوار (m)
$V_1, V_2$	به ترتیب سرعت اولیه و ثانویه پرش ( $m.s^{-1}$ )
$W$	عرض کانال بالادست (m)
$W_h$	عرض سطح جریان بدون بُعد
$x, y$	به ترتیب محور طولی و عرضی
$y_1, y_2$	به ترتیب عمق های اولیه و ثانویه پرش (m)
$\theta$	زاویه بازشدگی دریچه
$\rho$	چگالی سیال ( $kg.m^{-3}$ )
$\mu$	لزجت سینماتیک سیال ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ )

Swamee, P.K. (1992). Sluice-gate discharge equations. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 118(1), 56–60.

Vanden-Broeck, J. (1997). Numerical calculations of the free-surface flow under a sluice gate. *Journal of Fluid Mechanics*, 330, 339–347.

 $\alpha, \beta$ 

ضرایب ثابت

## ۷- منابع

Belaud, G., Cassan, L. & Baume, J.P. (2009). Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1086-1091.

Benjamin, T.B. (1956). On the flow in channels when rigid obstacles are placed in the stream. *Journal of Fluid Mechanics*, 1, 227–248.

Daneshfaraz, R., Ghahramanzadeh, A., Ghaderi, A., Rezazadeh Joudi, A. & Abraham, J. (2016). Investigation the effect of edge shape on characteristics of flow under vertical gates. *Journal American Water Works Association*, 108(8), 425-432.

Henry, H.R. (1950). Discussion of 'Diffusion of submerged jets' by M.L. Albertson, Y.B. Dai, R.A. Jensen, and H. Rouse. *Trans. ASCE*, 115(1), 665–693.

Kim D.G. (2007). Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate. *Journal of Civil Engineering*, 11(2), 127-132.

Marashi, A. (2019). Hydraulics of butterfly gate: determination of specifications and application criteria in canal, PhD Thesis in Hydraulic Structures, University of Lorestan, 126 p.

Marashi, A., Yonesi, H.A., Koochakzadeh, S. & Torabi Poudeh, H. (2020). Evaluation of Efficiency the Butterfly Gate as a Structure for Control and Flow Measurement in Semicircular canals. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(42), 5-9.

Marashi, A., Koochakzadeh, S., Yonesi, H.A. & Torabi poudeh, H. (2021). Hydraulics of Rotary Gate: Novel Structure for Semicircular Canals. *J. Irrig. Drain Eng.*, 147(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000153](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000153).

Plan and Budget Organization (2020). Guideline for Design, Construction, Installation and Operation of Slide Gates, 151 p.

Rajaratnam, N. & K. Subramanya. (1967). Flow equation for the sluice gate. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 93(9), 167-186.

Roth, A. & Hager, W.H. (1999). Underflow of standard sluice gate. *Experiments in Fluids*, 27(4), 339-350.