

## مقاله پژوهشی

# تأثیر کاربرد آستانه هم‌عرض و غیر هم‌عرض بر ضریب‌دبی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری آستانه نسبت به دریچه کشویی

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

۱-استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
۲-دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
۳-دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: daneshfaraz@maragheh.ac.ir

## چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی تأثیر میزان بازشدگی دریچه و وجود آستانه‌های هم‌عرض و غیر هم‌عرض بر ضریب‌دبی می‌باشد. بدین منظور آستانه‌های مستطیلی با عرض‌های مختلف و در موقعیت‌های زیر دریچه، مماس در بالادست و پائین‌دست دریچه مورد بررسی قرار گرفتند. در حالت بدون آستانه، ضریب‌دبی با افزایش بازشدگی دریچه کاهش می‌یابد. به‌طور میانگین ضریب‌دبی بازشدگی ۱ cm در مقایسه با بازشدگی‌های ۵ و ۲، ۱ به‌ترتیب ۷۵/۷٪، ۱۶٪/۵۱ و ۱۸٪/۳۵ بیشتر می‌باشد. با افزایش عرض آستانه در تمامی شرایط قرارگیری آستانه، ضریب‌دبی در مقایسه با حالت بدون آستانه افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که وجود آستانه با حداقل عرض در مقایسه با حالت بدون آستانه در یک بازشدگی مشخص، منجر به افزایش ضریب‌دبی می‌گردد. ضریب‌دبی آستانه هم‌عرض در موقعیت بالادست در مقایسه با حالت بدون آستانه در بازشدگی یکسان ۱ cm، ۱۰٪/۳۴ بیشتر بوده و این میزان برای بازشدگی یکسان ۲ cm، ۱۷٪/۸۶ می‌باشند. نتایج حاکی از آن است که در حالت با آستانه‌های غیر هم‌عرض، با افزایش میزان بازشدگی دریچه، ضریب‌دبی در مقایسه با با بازشدگی‌های کمتر کاهش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد که ضریب‌دبی مربوط به آستانه در موقعیت مماس بر دریچه در بالادست آن بیشتر از موقعیت مماس بر دریچه در پائین‌دست و موقعیت قرارگیری آستانه در زیر دریچه است. روابط چند جمله‌ای غیرخطی رگرسیونی برای پیش‌بینی ضریب‌دبی در حالت با آستانه و بدون آستانه ارائه گردید. نتایج شاخص‌های آماری RMSE و KGE برای حالت با آستانه به‌ترتیب ۰/۰۱۴ و ۰/۹۵۱ و برای حالت بدون آستانه ۰/۰۰۶۷ و ۰/۹۸۷ می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آستانه هم‌عرض، آستانه غیر هم‌عرض، بازشدگی دریچه، دریچه کشویی، ضریب‌دبی، موقعیت آستانه

# The Effect of Applying Suppressed and Non-Suppressed Sill on Discharge Coefficient in Different Positions of the Sill Relative to the Sluice Gate

R Daneshfaraz<sup>1\*</sup>, R Norouzi<sup>2</sup>, H Abbaszadeh<sup>3</sup>

Received: January 04, 2022

Accepted: May 01, 2022

1- Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

2- Ph.D., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

\* Corresponding Author Email: daneshfaraz@maragheh.ac.ir

## Abstract

### Background and Objectives

The gate is one of the hydraulic structures in which water passes through it. The most common types of these structures are sluice gates that move up and down in a vertical plane to adjust the opening. Estimating the discharge coefficient and consequently determining the flow rate under the gate is one of the basic and important issues in hydraulic engineering. Daneshfaraz et al. (2016) numerically investigated the effect of sluice gate edge shapes on flow characteristics. Their results showed that the flow contraction coefficient for sharp edges and round-edge gates decreases when the ratio of gate opening to upstream specific energy is less than 0.4 and increases for ratios greater than 0.4. The results of the research (Alhamid 1999) showed that the discharge coefficient increased in the sill mode compared to the no-sill mode. Salmasi and Abraham (2020) conducted an experimental study of sluice gate discharge coefficient with polygonal and non-polygonal sills. In the present study, general formula for calculating the flow rate under the sluice gate for the suppressed sill state has been developed for the non-suppressed sill and presented for the first time. The discharge coefficient was investigated in no-sill state at different openings and with the suppressed and non-suppressed sills in two openings in different positions relative to the sluice gate.

### Methodology

In this study, a laboratory flume with a rectangular cross-section of 5 meters long, 0.3 meters wide and 0.5 meters high with walls and floors made of transparent Plexiglas has been used for experiments. The experiments were performed in two states without sill at different gate openings and with sill at two openings. In this research, experiments using polyethylene sills with a thickness of 5 cm and a height of 3 cm in different widths of 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 and 30 cm was done at different positions relative to sluice gate. In total, 377 experiments were performed in the flow rate range of 150 to 850 L min<sup>-1</sup>

### Findings

In without sill state, discharge coefficient is inversely related to the gate opening. Applying the sill below and tangentially to the gate leads to an increase in discharge coefficient. Also, with increasing the ratio of the upstream flow depth to the sill width, the discharge coefficient has an increasing trend. By comparing the discharge coefficient in different situations, the discharge coefficient in the upstream tangential position is higher than the sill in the below position of the sluice gate. The reason is related to the position of the sill. For the downward tangent model compared to the sill below the

gate, the discharge coefficient is higher, and compared to the upward tangent model is lower. In the upstream tangential model, the amount of water depth upstream of the gate is lower than the below and downward model, and the highest amount is related to the sill state below the gate. At the same opening in the without sill and suppressed sill state, the maximum discharge coefficient is related to the sill state. In the stage-discharge diagram at constant discharge, the water head upstream of the sluice gate is lower in all suppressed sill positions than the no-sill state. In this study, equations were presented for predicting discharge coefficient in with and without sill state.

## Conclusion

The results showed that in no-sill state and in different gate openings, the discharge coefficient is inversely related to the gate opening. In the present study, the general equation of discharge calculation was developed for the non-suppressed sill and the calculations were performed based on the new relation presented for the case with the non-suppressed sill. This equation can be used for symmetric and asymmetric sills. Comparison of the results obtained for the discharge coefficient, with sill, and without sill condition indicates the better performance of the existence of a sill in all positions in terms of increasing the discharge coefficient. In addition, the comparison of the results of discharge coefficients between the suppressed sill and no-sill state in the opening of 1 and 2 cm indicates an increase of the discharge coefficient in the suppressed sill state. In this condition, the discharge coefficient of the gate opening of 1 cm is higher than 2 cm. However, the discharge coefficient is higher in both opening modes than in the without sill mode.

**Keywords:** Discharge coefficient, Gate opening, Non-suppressed sill, Sill position, Sluice gate, Suppressed sill.

## مقدمه

عملکرد هیدرولیکی و راندمان توزیع آب در شبکه‌های آبیاری می‌گردد.

تاکنون مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی در این خصوص انجام یافته است. سوامی (۱۹۹۲) ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی در حالت جریان آزاد را تابعی از عمق آب بالادست و میزان بازشدگی دریچه عنوان نمود. ردا (۲۰۱۶) به مدل‌سازی ویژگی‌های جریان زیر دریچه‌های عمودی و مایل با استفاده از شبکه‌های مصنوعی پرداخت. ایشان مدل هوش ANN را مدلی مناسب برای پیش‌بینی ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی عمودی و مایل عنوان کرد. دانشفران و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی عددی تأثیر شکل لبه دریچه‌های کشویی بر خصوصیات جریان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انقباض جریان برای لبه‌های تیز به سمت بالا و پائین و برای دریچه‌های لبه گرد، زمانی که نسبت بازشدگی دریچه به انرژی مخصوص در بالادست کوچک‌تر از  $0/4$  باشد، کاهش و برای نسبت‌های

دریچه‌ها سازه‌های هیدرولیکی هستند که در آن‌ها حرکت آب از زیر دریچه صورت می‌پذیرد. دریچه‌ها باید با توجه به شرایط هر منطقه به‌طور صحیح و اصولی انتخاب شوند تا در آینده در بهره‌برداری دچار مشکل نشوند. تخمین ضریب‌دبی و به‌تبع آن تعیین میزان دبی عبوری از زیر دریچه یکی از مسائل اساسی و مهم در علم مهندسی هیدرولیک است. در مواقعی که ارتفاع دریچه از یک معیار خاص طراحی تجاوز نماید، از دریچه‌های دوتایی یا سه‌تایی استفاده می‌شود (نگم و همکاران ۱۹۹۸). در حالی که استفاده از دریچه‌های دوتایی و یا سه‌تایی هزینه‌های زیادی در بردارد. یکی از راه‌حل‌های اساسی به‌منظور حل این مسئله، استفاده از ترکیب دریچه-آستانه می‌باشد. بنابراین شناخت رفتار جریان در موقعیت‌های مختلف قرارگیری آستانه منجر به افزایش

در تحقیق حاضر فرمول عمومی برای محاسبه میزان دبی عبوری از زیر دریچه کشویی برای حالت آستانه هم‌عرض کانال، برای آستانه‌های غیر هم‌عرض توسعه و برای نخستین بار ارائه شده است. همچنین با دقت در پیشینه تحقیق نیاز به مطالعه در زمینه آستانه با اندازه‌های مختلف در عرض و موقعیت‌های مختلف قرارگیری نسبت به دریچه کشویی در بازشدگی‌های مختلف و تأثیر آن بر ظرفیت هیدرولیکی و ضریب‌دبی متناظر مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### تجهیزات آزمایشگاهی

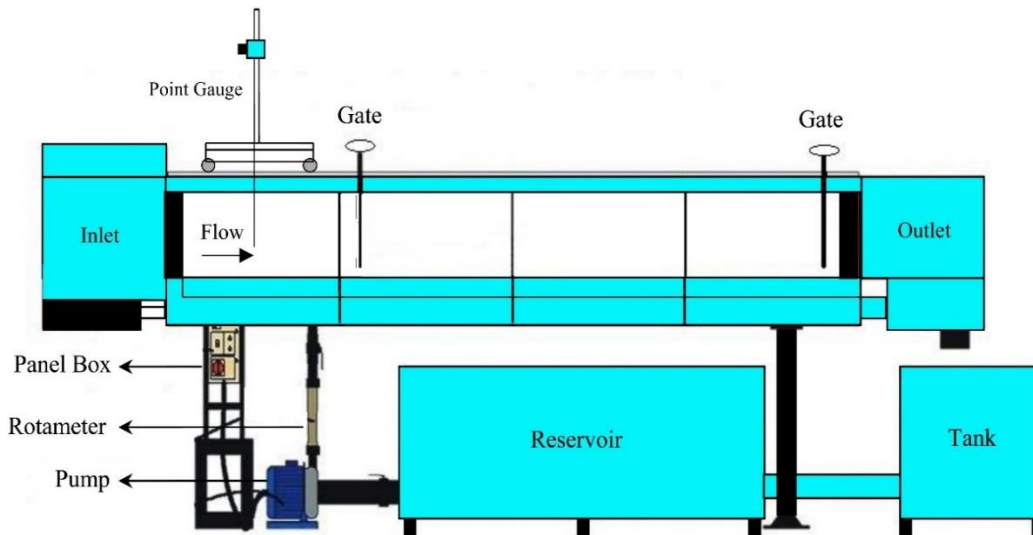
در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌ها از یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۵ m، عرض ۰/۳ m و ارتفاع ۰/۵ m با دیواره‌ها و کف از جنس پلکسی گلس شفاف که مشاهده دقیق‌تر جزئیات جریان در داخل فلوم را تسهیل می‌کند، استفاده شده است. شیب کف کانال قابل تغییر بوده و برای انجام آزمایش‌ها روی صفر تنظیم شد. به‌منظور تأمین جریان ورودی به فلوم از دو پمپ هر یک با توان اسمی  $450 \text{ L min}^{-1}$  و به‌منظور قرائت دبی ورودی از روماترهای نصب شده روی فلوم با خطای نسبی  $\pm 2\%$  استفاده شد. برای کاهش تلاطم آب ورودی از مخزن به داخل فلوم، از چند صفحه آرام‌کننده جریان در ابتدای فلوم استفاده شد. در تحقیق حاضر، برای اندازه‌گیری عمق آب در فلوم از یک عمق سنج نقطه‌ای با خطای  $\pm 1 \text{ mm}$  که بر روی ریل متحرک نصب شده است، استفاده شد. اعماق در ۴ نقطه از مقطع عرضی در فاصله نیم‌متری از دریچه در بالادست آن اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به‌عنوان عمق نهایی در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در دو حالت بدون آستانه و با آستانه در بازشدگی‌های مختلف انجام یافته است. در این تحقیق آزمایش‌ها با استفاده از آستانه‌هایی از جنس پلی اتیلن در موقعیت‌های زیر دریچه، مماس بر دریچه در بالادست و پائین‌دست آن انجام پذیرفت. در پژوهش حاضر با مبنای قرار دادن آستانه

بزرگ‌تر از  $0/4$ ، افزایش می‌یابد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عددی دریچه‌های کشویی مایل به سمت بالادست و پائین‌دست کانال و دریچه‌های مورب در زوایای مختلف قرارگیری پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین مقدار ضریب‌دبی مربوط به حالت دریچه مایل به سمت بالادست است.

در زمینه وجود آستانه و ترکیب آن با دریچه می‌توان به بررسی آزمایشگاهی الحمید (۱۹۹۹) اشاره کرد. نتایج تحقیق ایشان حاکی از افزایش میزان ضریب‌دبی در حالت استفاده از آستانه نسبت به حالت بدون آستانه بود. سلماسی و نوروزی (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر شکل آستانه‌های هم‌عرض کانال بر ضریب‌دبی جریان در دریچه کشویی پرداختند. نتایج نشان داد که آستانه دایره‌ای ضریب‌دبی را حداقل  $23\%$  و حداکثر  $31\%$  افزایش می‌دهد. کرمی و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر پارامترهای آستانه همچون ارتفاع و شکل آستانه بر ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی در جریان آزاد را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که آستانه نیم‌دایره‌ای تأثیر بیشتری بر ضریب‌دبی دارد و باعث افزایش  $20\%$  درصدی ضریب‌دبی می‌شود. سلماسی و آبراهام (۲۰۲۰) به بررسی آزمایشگاهی ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی با آستانه‌های چند وجهی و غیر چند وجهی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که آستانه دایره‌ای بیشترین تأثیر و آستانه‌های نوزنقه‌ای کم‌ترین تأثیر را بر ضریب‌دبی دارد. قربانی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش  $H_2O$  و مدل‌های هوشمند از جمله  $DL$ ،  $RF$ ،  $GBM$  و  $GLM$  به تجزیه و تحلیل ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی با آستانه پرداختند. نتایج نشان داد که روش یادگیری ماشین  $H_2O$  عملکرد خوبی در تخمین ضریب‌دبی دریچه کشویی دارد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر چیدمان آستانه‌های تکی، دوتایی و همچنین آستانه در فواصل مختلف نسبت به دریچه کشویی در بالادست آن را بررسی و گزارش نمودند که ضریب‌دبی آستانه تکی بیشتر از آستانه دوتایی است.

برای ارتفاع، با نسبت اندازه ارتفاع آستانه به اندازه آستانه هم عرض کانال به صورت عدد بی بعد  $0/1$  می‌باشد. در تحقیق حاضر در مجموع ۳۷۷ آزمایش در محدوده دبی  $L$   $1$  تا  $850 \text{ min}^{-1}$  صورت گرفت. در شکل ۱ نمای شماتیک فلوم تحقیق حاضر نشان داده شده است.

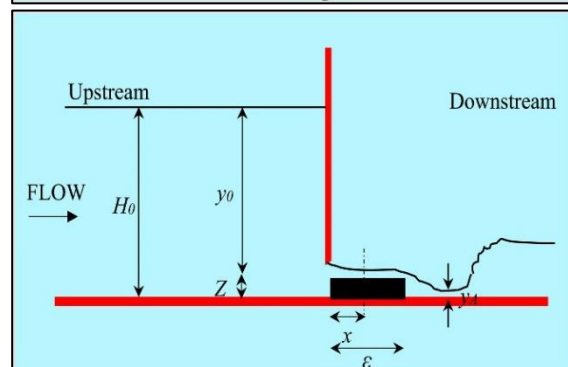
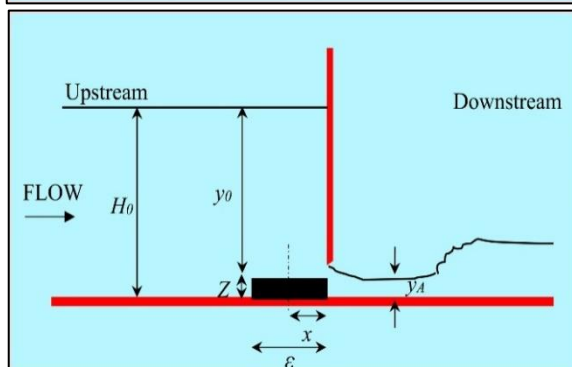
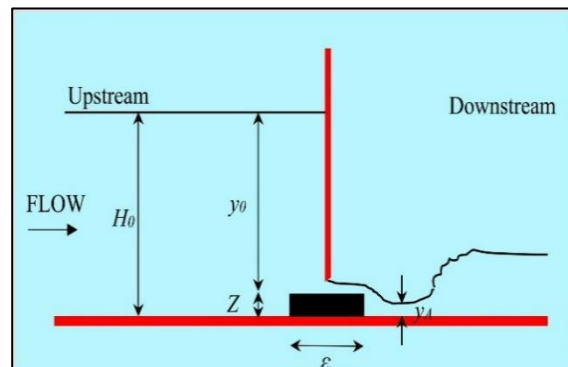
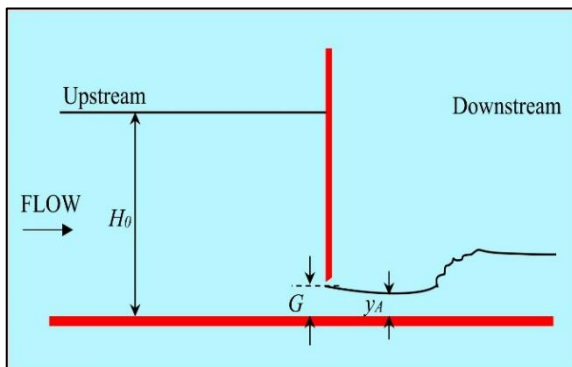
هم عرض کانال، اندازه آستانه‌ها به صورت بی بعد با نسبت اندازه آستانه غیر هم عرض به آستانه هم عرض به ترتیب به صورت  $0/083$ ،  $0/167$ ،  $0/25$ ،  $0/334$ ،  $0/5$ ،  $0/667$ ،  $0/834$  و  $1$  می‌باشند. نسبت اندازه ضخامت آستانه به اندازه آستانه هم عرض کانال،  $0/167$  بوده و این مقدار

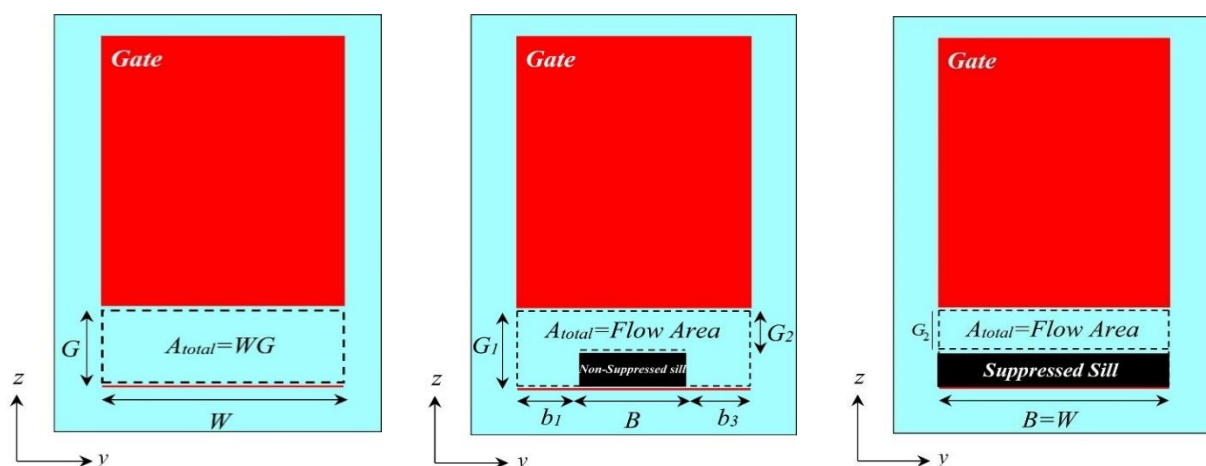


شکل ۱- نمای شماتیک فلوم تحقیق حاضر.

مختلف قرارگیری آستانه‌های هم عرض و غیر هم عرض آورده شده است.

در شکل ۲ مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان درپچه‌های کشویی در موقعیت‌های





شکل ۲- نمای شماتیک دریچه-آستانه.

که در آن  $b_1$  و  $b_3$  عرض قسمتی از کانال ( $L$ ) که در آن آستانه وجود ندارد و  $B$  عرض آستانه ( $L$ ) می‌باشد. در رابطه  $\gamma$ ،  $A_{total}$  مساحت کل جریان عبوری از زیر دریچه کشویی ( $L^2$ ) می‌باشد. مقدار ضریب دبی در حالت بدون آستانه تابعی از عمق جریان بالادست و میزان بازشدگی دریچه کشویی است (سوامی ۱۹۹۲)، بنابراین مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر آن به صورت رابطه ۸، قابل بیان است:

$$f_1(C_d, H_0, G, \rho, g, \mu) = 0 \quad [8]$$

در رابطه ۸،  $\rho$  جرم مخصوص آب ( $ML^{-3}$ ) و  $\mu$  لزوجت دینامیکی ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) می‌باشند. طبق نظریه  $-\pi$  باکینگهام پارامترهای بی بعد مطابق رابطه ۹ خواهند بود:

$$f_2\left(C_d, \frac{H_0}{G}, Re\right) = 0 \quad [9]$$

در رابطه ۹،  $Re$  بیانگر عدد بی بعد رینولدز می‌باشد. در مطالعه حاضر جریان متلاطم و  $11111 \leq Re \leq 47222$  است، لذا می‌توان از تأثیر این پارامتر صرف نظر نمود. بنابراین رابطه ۹ را می‌توان به صورت رابطه ۱۰ نشان داد:

$$C_d = f_3\left(\frac{H_0}{G}\right) \quad [10]$$

در تحقیق حاضر برای حالت با آستانه مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی عبارتند از:

$$f_1(C_d, A_{total}, H_0, B, Z, \varepsilon, W, X, \rho, g, \mu) = 0 \quad [11]$$

مطابق رابطه ۱، در حالت بدون آستانه میزان دبی

عبوری از دریچه کشویی محاسبه می‌گردد:

$$Q = C_d W G \sqrt{2gH_0} \quad [1]$$

که در آن  $Q$  دبی ( $L^3T^{-1}$ )،  $C_d$  ضریب دبی جریان (-)،  $W$  عرض کانال ( $L$ )،  $G$  میزان بازشدگی دریچه ( $L$ )،  $g$  شتاب گرانش زمین ( $LT^{-2}$ ) و  $H_0$  عمق آب بالادست دریچه کشویی ( $L$ ) می‌باشند. میزان دبی عبوری از زیر دریچه برای حالت آستانه هم‌عرض کانال از طریق رابطه ۲، به دست می‌آید:

$$Q = C_d W G \sqrt{2g(H_0 - Z)} \quad [2]$$

در رابطه ۲،  $Z$  ارتفاع آستانه ( $L$ ) و  $WG$  مساحت جریان عبوری ( $L^2$ ) می‌باشد. بر این اساس، رابطه ۲ را برای حالت آستانه‌های غیر هم‌عرض به صورت رابطه ۳ نشان داد:

$$Q = C_d \left( (A_1 \sqrt{2gH_0}) + (A_2 \sqrt{2g(H_0 - Z)}) + (A_3 \sqrt{2gH_0}) \right) \quad [3]$$

در رابطه ۳،  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  به ترتیب مساحت جریان عبوری در نواحی بدون آستانه و بالای آستانه می‌باشند که با توجه به روابط (۴) الی (۷)، محاسبه می‌گردد:

$$A_1 = b_1 \times G_1 \quad [4] \quad A_2 = B \times G_2 \quad [5]$$

$$A_3 = b_3 \times G_1 \quad [6] \quad A_{total} = A_1 + A_2 + A_3 \quad [7]$$

رضایت بخش  $0.5 < KGE \leq 0.6$

قابل قبول  $0.4 < KGE \leq 0.5$

غیر رضایت بخش  $KGE \leq 0.4$

مقادیر روابط ۱۴ و ۱۵، هرچه به عدد صفر نزدیک باشند، بیانگر دقت بالای روابط ارائه شده می‌باشد. (دانشفراز و همکاران ۲۰۲۱). در رابطه ۱۶، 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 بر اساس تقسیم‌بندی این شاخص به خیلی خوب، خوب، رضایت بخش، قابل قبول و غیر رضایت بخش می‌تواند بیانگر دقت روابط ارائه شده باشد.

### نتایج و بحث

شکل ۳-الف میزان تغییرات ضریب دبی در بازشدگی‌های مختلف دریچه کشویی در حالت بدون آستانه را نشان می‌دهد که در آن محور افقی پارامتر بی‌بعد نسبت عمق آب بالادست به بازشدگی دریچه و محور قائم ضریب دبی جریان می‌باشد. باتوجه به شکل ۳-الف، مقادیر ضریب دبی با میزان بازشدگی دریچه کشویی رابطه عکس دارد و با افزایش میزان بازشدگی دریچه، ضریب دبی کاهش می‌یابد که مطابق نتایج به دست آمده از تحقیق راث و هاگر (۱۹۹۹) می‌باشد. 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 ضریب دبی می‌گردد. همچنین با افزایش نسبت عمق آب 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 ۳-ب، نمودار دبی-اشل برای میزان بازشدگی‌های مختلف دریچه کشویی ارائه شده است. در یک دبی مشخص، میزان بازشدگی دریچه با عمق آب بالادست دریچه رابطه عکس داشته و با افزایش آن، عمق

در رابطه ۱۱،  $\varepsilon$  ضخامت آستانه (L)، X فاصله محور دریچه تا محور مرکزی آستانه (L) که برای حالت آستانه در زیر دریچه کشویی برابر با صفر و برای حالت مماس در بالاست و پائین‌دست دریچه به ترتیب برابر با  $\frac{1}{2} - \varepsilon$  و  $\frac{\varepsilon}{2}$  (L) می‌باشند. با در نظر گرفتن  $\rho$ ، g و B به عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش  $\pi$ -باکینگهام، می‌توان رابطه بی‌بعد ۱۲ را ارائه کرد:

$$f_2 \left( C_d, \frac{A_{total}}{B^2}, \frac{H_0}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{\varepsilon}{B}, \frac{W}{B}, \frac{X}{B}, Re \right) = 0 \quad [12]$$

با توجه به اینکه عرض کانال و ضخامت آستانه مقدار ثابتی بوده و از اهداف تحقیق حاضر نیستند، بنابراین از بررسی تاثیر این پارامترها نیز چشم‌پوشی شد. طبق نظریه وایت (۲۰۱۶) پارامترهای بی‌بعد را می‌توان بر هم تقسیم، ضرب، جمع و یا از هم تفریق نموده و پارامترهای بی‌بعد معنی‌دار دیگری را به دست آورد. بنابراین پارامترهای مورد بررسی در مطالعه حاضر به صورت رابطه ۱۳، ارائه گردید:

$$C_d = f_3 \left( \frac{A_{total}}{B^2}, \frac{H_0}{B}, \frac{(H_0 - Z)}{G_2}, \frac{X}{\varepsilon} \right) \quad [13]$$

### پارامترهای ارزیابی

در تحقیق حاضر از شاخص‌های آماری درصد خطای نسبی (RE%)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، و شاخص کلینگ گوپتا (KGE) جهت ارزیابی روابط بهره گرفته شد (دانشفراز و همکاران ۲۰۲۳).

$$RE\% = \frac{(C_d)_{obs} - (C_d)_{cal}}{(C_d)_{obs}} \times 100 \quad [14]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((C_d)_{obs} - (C_d)_{cal})^2}{n}} \quad [15]$$

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

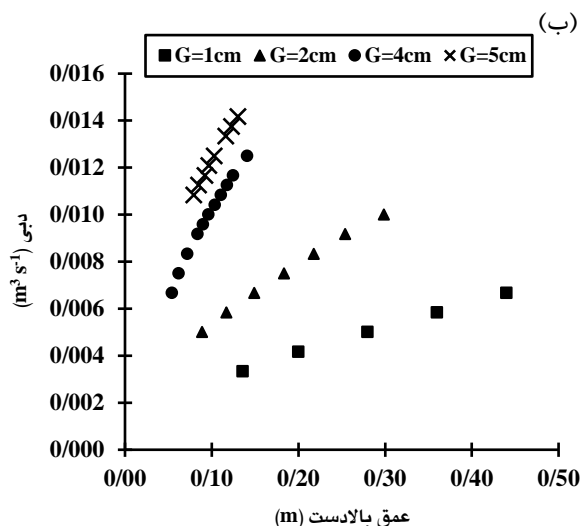
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((C_d)_{obs} - (C_d)_{obs}) \times ((C_d)_{cal} - (C_d)_{cal})}{\sum_{i=1}^n ((C_d)_{obs} - (C_d)_{obs}) \times \sum_{i=1}^n ((C_d)_{cal} - (C_d)_{cal})}$$

$$\beta = \frac{\overline{Cal}}{\overline{Obs}}, \gamma = \frac{CV_{cal}}{CV_{obs}} = \frac{\sigma_{cal}/\overline{Cal}}{\sigma_{obs}/\overline{Obs}} \quad [16]$$

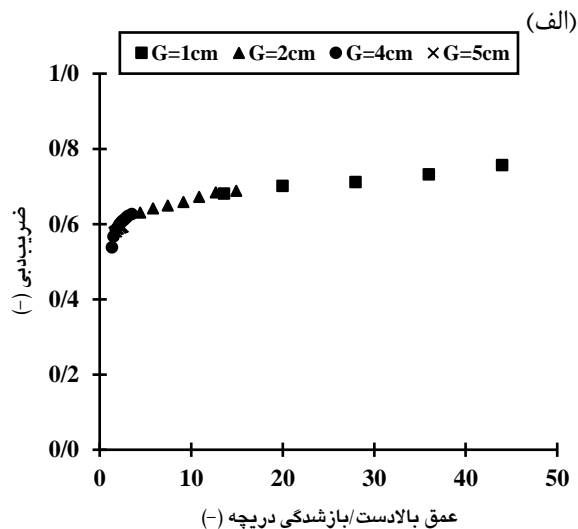
خوب خیلی  $0.7 < KGE \leq 1$

خوب  $0.6 < KGE < 0.7$

۵ و ۲ و ۱، به ترتیب ۰/۷/۷۵، ۱۶/۵۱ و ۱۸/۳۵٪ و حداکثر ۱۶/۶۲، ۲۸/۹ و ۲۳/۵۱٪ بیشتر می‌باشد.



جریان کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر به‌طور میانگین ضریب‌دبی بازشدگی ۱ cm در مقایسه با بازشدگی‌های



شکل ۳- نمودار الف) ضریب‌دبی دریاچه کشویی ب) دبی-اشل در بازشدگی‌های مختلف دریاچه کشویی برای حالت بدون آستانه.

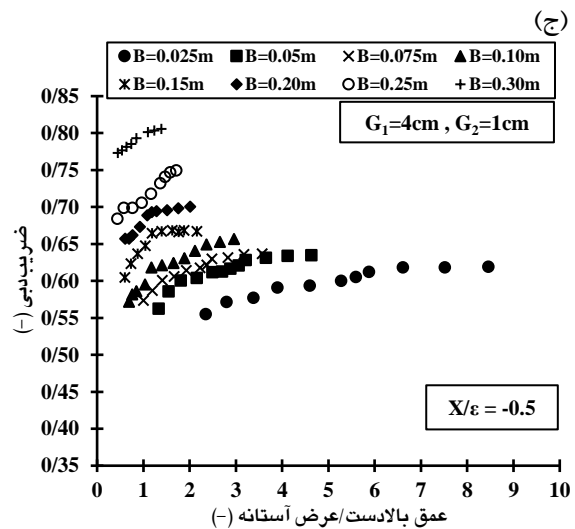
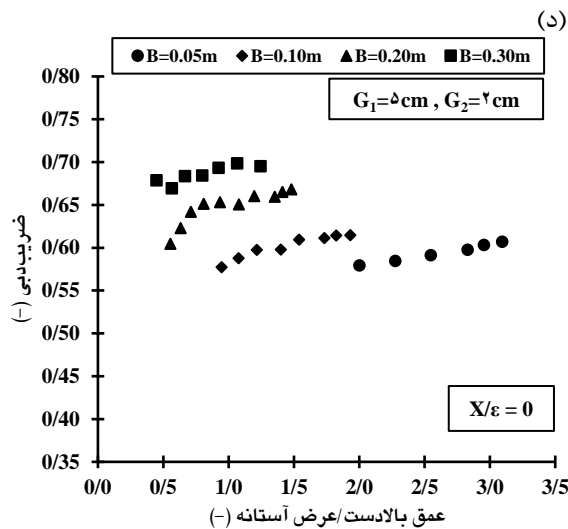
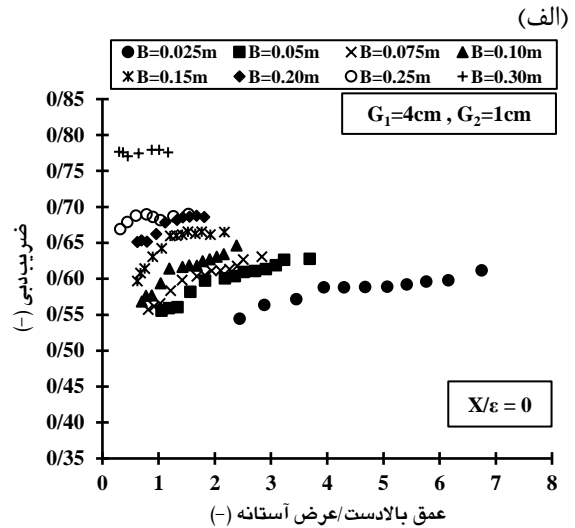
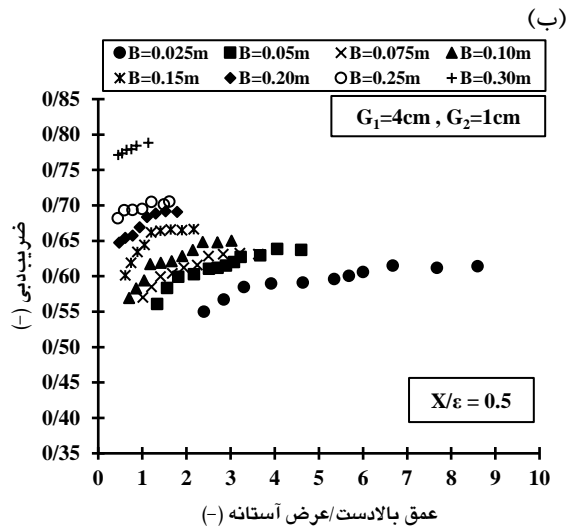
به کم‌ترین میزان می‌رسد که منجر به کاهش اتلاف انرژی و تلاطم جریان خروجی از زیر دریاچه شده و باعث افزایش ضریب‌دبی می‌شود. در جدول ۱، به‌منظور مقایسه ضرایب‌دبی در موقعیت‌های قرارگیری مختلف آستانه نسبت به دریاچه، دبی‌های آزمایشگاهی به‌همراه ضرایب‌دبی متناظر برای برخی از آستانه‌ها با عرض‌های متفاوت آورده شده است. در یک دبی یکسان، ضریب‌دبی حاصل از به‌کارگیری آستانه، بیشتر از حالت بدون آستانه می‌باشد. با مقایسه ضریب‌دبی در موقعیت‌های مختلف، ضریب‌دبی در حالت مماس بر دریاچه در بالادست آن، بیشتر از حالت زیر دریاچه کشویی می‌باشد. علت این امر را می‌توان به قرارگیری آستانه اشاره نمود. به‌طوری که در حالت مماس، کل ضخامت آستانه در پشت دریاچه قرار داشته و بعد از آن حجم بیشتری از آب از زیر دریاچه با الگوی جریان یکنواخت، جریان می‌یابد. در مدل مربوط به حالت زیر آستانه، نصف آستانه در موقعیت بعد از دریاچه قرار دارد که به‌صورت مانع عمل کرده و باعث افزایش ضریب اصطکاک جریان با آستانه و به‌تبع آن افزایش

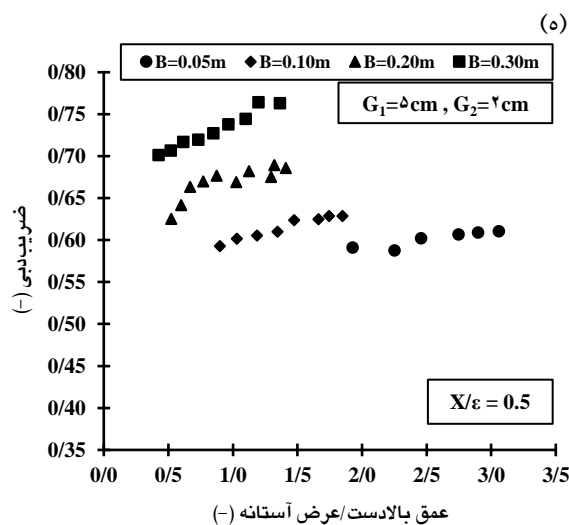
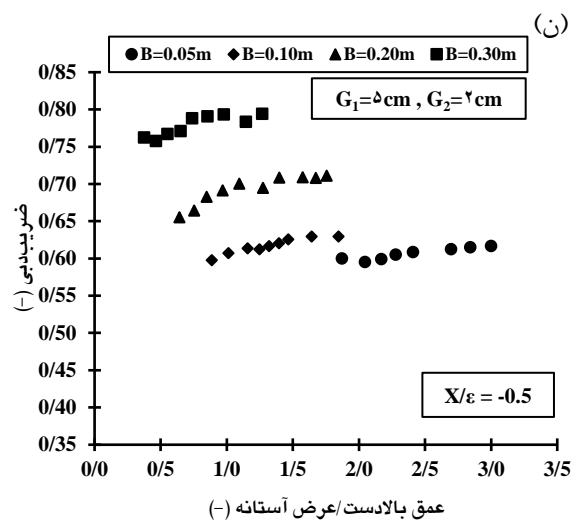
در شکل ۴، تأثیر وجود آستانه هم‌عرض و غیر هم‌عرض بر ضریب‌دبی دریاچه کشویی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری آستانه بررسی شده است. در شکل ۴- الف، ب و ج آستانه‌ها در بازشدگی کل ۵ cm و در نمودارهای د، ه و ن آستانه‌ها در بازشدگی ۵ cm قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۴، در مدل‌های آستانه در زیر و مماس بر دریاچه در بالادست و پائین‌دست آن با افزایش عرض آستانه و نسبت عمق جریان بالادست دریاچه به عرض آستانه، ضریب‌دبی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در یک بازشدگی مشخص، آستانه با کم‌ترین عرض دارای حداقل مقدار ضریب‌دبی بوده و بیشتر از حالت بدون آستانه در همان بازشدگی می‌باشد. دلیل افزایش ضریب‌دبی با افزایش عرض آستانه را می‌توان به توزیع یکنواخت جریان به سمت دریاچه و کاهش مساحت جریان عبوری از دریاچه، عنوان نمود. به‌طوری‌که با افزایش عرض آستانه جریان به‌صورت یکنواخت همراه با افزایش سرعت از روی آستانه و دریاچه جریان پیدا می‌کند. همچنین جریان برگشتی به سمت آستانه با افزایش عرض



به طوری که در مدل مماسی بالادست میزان عمق آب در بالادست دریاچه در مقایسه با مدل زیر دریاچه و پائین‌دست دریاچه کمتر بوده و بیشترین میزان آن مربوط به حالت آستانه زیر دریاچه است.

بیشتر عمق جریان در بالادست دریاچه نسبت به حالت مماس می‌شود. برای مدل مماسی بعد دریاچه در مقایسه با حالت آستانه زیر دریاچه، ضریب‌دبی بیشتر و در مقایسه با مدل مماسی بالادست دریاچه کمتر است.





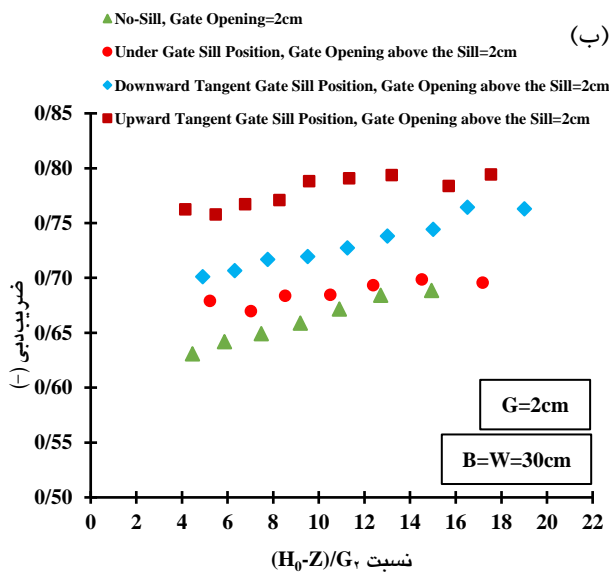
شکل ۴- تغییرات ضریب‌دبی نسبت به قرارگیری آستانه در حالت الف-د) زیر دریچه ب-ه) مماس بر دریچه در جلوی آن ج-ن) مماس بر دریچه در پشت آن.

ضریب‌دبی (-)

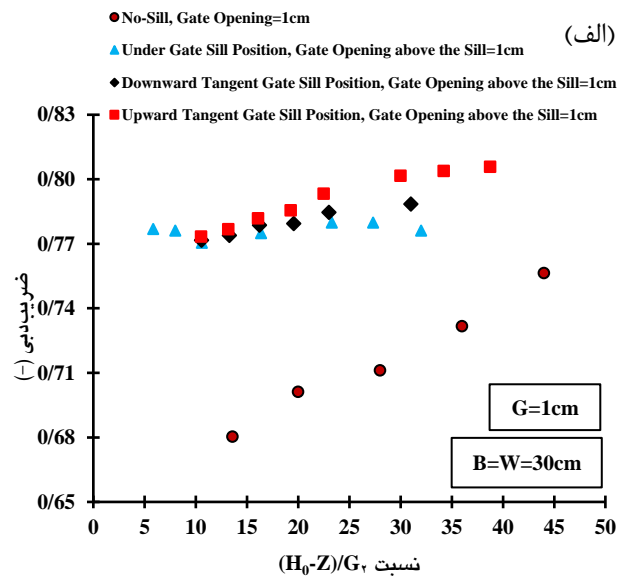
| عرض آستانه                 | No Sill<br>G <sub>1</sub> =5cm | B=5cm   |            |           | B=10cm  |            |           | B=20cm  |            |           | B=30cm  |            |           |        |
|----------------------------|--------------------------------|---------|------------|-----------|---------|------------|-----------|---------|------------|-----------|---------|------------|-----------|--------|
|                            |                                | X/ε = 0 | X/ε = -0.5 | X/ε = 0.5 | X/ε = 0 | X/ε = -0.5 | X/ε = 0.5 | X/ε = 0 | X/ε = -0.5 | X/ε = 0.5 | X/ε = 0 | X/ε = -0.5 | X/ε = 0.5 |        |
| دبی (L min <sup>-1</sup> ) | ۳۵۰                            | -       | -          | -         | -       | -          | -         | -       | -          | -         | ۰/۶۷۸۸  | ۰/۷۶۲۲     | ۰/۷۰۱۱    |        |
|                            | ۴۰۰                            | -       | -          | -         | -       | -          | -         | -       | -          | -         | ۰/۶۶۹۵  | ۰/۷۵۷۷     | ۰/۷۰۶۷    |        |
|                            | ۴۵۰                            | -       | -          | -         | -       | -          | -         | ۰/۶۰۴۶  | ۰/۶۵۵۴     | ۰/۶۲۵۲    | ۰/۶۸۳۵  | ۰/۷۶۶۹     | ۰/۷۱۶۸    |        |
|                            | ۵۰۰                            | -       | -          | -         | -       | -          | -         | ۰/۶۲۲۹  | ۰/۶۶۴۱     | ۰/۶۴۱۶    | ۰/۶۸۴۴  | ۰/۷۷۰۸     | ۰/۷۱۹۴    |        |
|                            | ۵۵۰                            | -       | -          | -         | ۰/۵۷۷۳  | ۰/۵۹۷۸     | ۰/۵۹۳۰    | ۰/۶۴۱۹  | ۰/۶۸۳۰     | ۰/۶۶۳۲    | ۰/۶۹۳۲  | ۰/۷۸۸۱     | ۰/۷۲۷۱    |        |
|                            | ۶۰۰                            | -       | -          | -         | ۰/۵۸۸۰  | ۰/۶۰۷۳     | ۰/۶۰۱۵    | ۰/۶۵۱۳  | ۰/۶۹۱۶     | ۰/۶۶۹۸    | ۰/۶۹۸۳  | ۰/۷۹۰۷     | ۰/۷۳۷۹    |        |
|                            | ۶۵۰                            | ۰/۵۷۸۶  | ۰/۵۷۹۵     | ۰/۶۰      | ۰/۵۹۰۹  | ۰/۵۹۷۶     | ۰/۶۱۳۵    | ۰/۶۰۵۴  | ۰/۶۵۳۳     | ۰/۷۰۰۴    | ۰/۶۷۶۶  | ۰/۶۹۵۳     | ۰/۷۹۳۴    | ۰/۷۴۴۲ |
|                            | ۶۷۵                            | ۰/۵۸۰۵  | -          | ۰/۵۹۵۳    | -       | -          | ۰/۶۱۲۵    | -       | -          | -         | -       | -          | -         |        |
|                            | ۷۰۰                            | ۰/۵۷۸۰  | ۰/۵۸۴۵     | ۰/۵۹۹۱    | ۰/۵۸۷۴  | ۰/۵۹۸۱     | ۰/۶۱۶۵    | ۰/۶۱۰۱  | ۰/۶۵۰۸     | ۰/۶۹۴۸    | ۰/۶۶۹۰  | -          | ۰/۷۸۳۵    | ۰/۷۶۴۲ |
|                            | ۷۲۵                            | ۰/۵۸۴۸  | -          | ۰/۶۰۴۸    | -       | -          | ۰/۶۲۰۴    | -       | -          | -         | -       | -          | -         |        |
|                            | ۷۵۰                            | ۰/۵۸۵۷  | ۰/۵۹۱۲     | ۰/۶۰۸۳    | ۰/۶۰۱۹  | ۰/۶۰۹۷     | ۰/۶۲۵۶    | ۰/۶۲۳۷  | ۰/۶۶۰۲     | ۰/۷۰۸۴    | ۰/۶۸۲۰  | -          | ۰/۷۹۴۱    | ۰/۷۶۳۰ |
|                            | ۸۰۰                            | ۰/۵۸۸۶  | ۰/۵۹۷۶     | ۰/۶۱۲۵    | ۰/۶۰۶۷  | ۰/۶۱۱۶     | ۰/۶۲۹۳    | ۰/۶۲۴۸  | ۰/۶۵۹۸     | ۰/۷۰۸۸    | ۰/۶۷۵۱  | -          | -         | -      |
|                            | ۸۲۵                            | ۰/۵۹۰۴  | ۰/۶۰۳۱     | ۰/۶۱۵۱    | ۰/۶۰۸۸  | ۰/۶۱۴۶     | -         | ۰/۶۲۸۷  | ۰/۶۶۵۳     | ۰/۷۰۷۹    | ۰/۶۸۹۲  | -          | -         | -      |
| ۸۵۰                        | ۰/۵۹۰۷                         | ۰/۶۰۶۸  | ۰/۶۱۶۵     | ۰/۶۱۰۳    | ۰/۶۱۴۸  | ۰/۶۲۹۴     | ۰/۶۲۸۵    | ۰/۶۶۸۲  | ۰/۷۱۱۲     | ۰/۶۸۵۹    | -       | -          | -         |        |

جدول ۱- ضریب‌دبی دریچه کشویی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری آستانه.

مماسی پشت دریچه بلافاصله پس از طی مسیر روی آستانه با حالت ملایم‌تری بعد از آستانه به مسیر خود ادامه می‌دهد و لذا افت انرژی کم‌تری را باعث می‌شود. در حالی‌که در مدل مماسی بعد از دریچه و مدل زیر دریچه جریان به صورت جت آبی از روی آستانه رها گشته و جریان‌های گردابی در جلوی دریچه منجر به افت بیشتر انرژی می‌شود. همچنین افزایش طول تماس جریان با آستانه باعث افزایش اصطکاک و مقاومت جریان خروجی از دریچه می‌گردد که منجر به افزایش عمق در پشت دریچه می‌شود. در حالت آستانه غیر هم‌عرض قسمتی از دریچه بدون آستانه می‌باشد لذا جریان عبوری از کنارها و از روی آستانه به دلیل متفاوت بودن میزان بازشدگی، منجر به تشکیل جریان‌های  $V$  شکل در پائین‌دست دریچه می‌گردد.



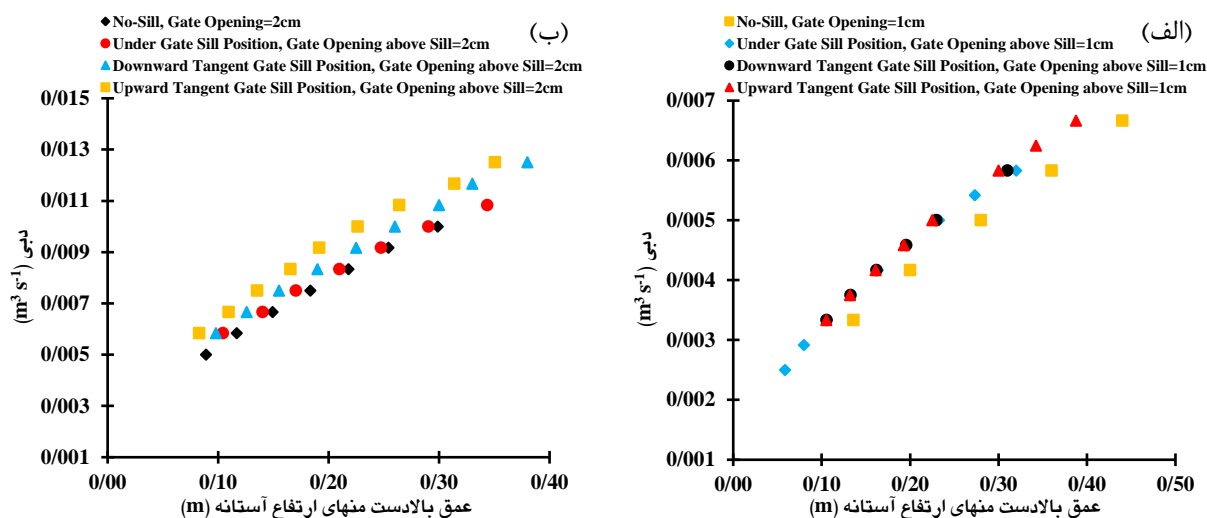
در شکل ۵، مقایسه‌ای بین ضریب‌دبی دریچه کشویی در حالت بدون آستانه و با آستانه هم‌عرض کانال در بازشدگی یکسان صورت پذیرفت. در شکل ۵-الف و ب، میزان بازشدگی در حالت بدون آستانه و با آستانه برای هر دو شکل به ترتیب ۲ و ۱ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد وجود آستانه در زیر و مماس بر دریچه کشویی نسبت به بالادست و پائین‌دست آن در مقایسه با حالت بدون آستانه، باعث افزایش ضریب‌دبی و منجر به عملکرد بهتر سیستم از نظر میزان آبگذری می‌شود. بیشترین مقدار ضریب‌دبی مربوط به حالت مماسی آستانه در بالادست دریچه (پشت دریچه) است. با توجه به اینکه موقعیت آستانه باعث تغییر شکل خطوط جریان می‌گردد، بنابراین تأثیر به‌سزایی بر ضریب‌دبی جریان می‌گذارد. به طوری که خطوط جریان در مدل



شکل ۵- مقایسه ضریب‌دبی بین حالت بدون آستانه و با آستانه هم‌عرض کانال (الف) بازشدگی ۱ cm (ب) بازشدگی ۲ cm.

دارای فشار بیشتری بوده و باعث ایجاد جریان‌های چرخشی بعد از دریچه می‌شود که منجر به کاهش ضریب‌دبی می‌گردد. آستانه باعث می‌گردد تا فشار وارد بر دریچه به کمتر از  $\gamma H_0$  برسد. بنابراین این کاهش فشار و مکش جریان منجر به افزایش ضریب‌دبی می‌گردد.

در نمودار دبی-اشل شکل ۶، همان‌طور که مشخص است، به ازای دبی ثابت بار آبی بالادست دریچه کشویی در تمامی موقعیت‌های آستانه کم‌تر از حالت بدون آستانه است. با افزایش عمق، جریان عبوری از زیر دریچه



شکل ۶- نمودار دبی-اشل برای دریچه با بازشدگی (الف) ۱ cm (ب) ۲ cm.

در شکل ۷-الف نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی ضریب دبی رسم شده است. نتایج حاکی از آن است که روند میزان تغییرات ضریب دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی همانند مقادیر به دست آمده از رابطه ۱۹ می باشد. به طوری که مقدار پارامتر KGE برابر با ۰/۹۸۷ است که بیانگر قرار گرفتن این شاخص در بازه خیلی خوب می باشد در شکل ۷-ب، با جایگذاری ضرایب دبی به دست آمده از رابطه پیشنهادی ۱۹، در رابطه ۱، مقایسه ای بین میزان دبی عبوری حاصل از نتایج آزمایشگاهی با رابطه ۱، انجام یافت. ملاحظه می گردد که دامنه گسترده ای از داده ها در باند خطای  $\pm 1/5\%$  قرار گرفته اند. این مسئله بیانگر این است که فرمول پیشنهادی دقت بسیار مناسبی دارد، به طوری که بیش از ۷۸٪ داده ها دارای خطایی کمتر از  $\pm 1/5\%$  هستند.

در تحقیق حاضر فرم کلی معادلات پیشنهادی برای حالت بدون آستانه و با آستانه به ترتیب به صورت روابط ۱۷ و ۱۸، برای پیش بینی ضریب دبی در نظر گرفته شد:

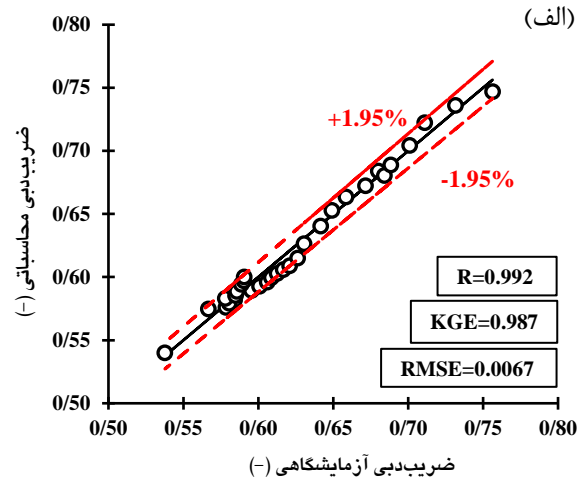
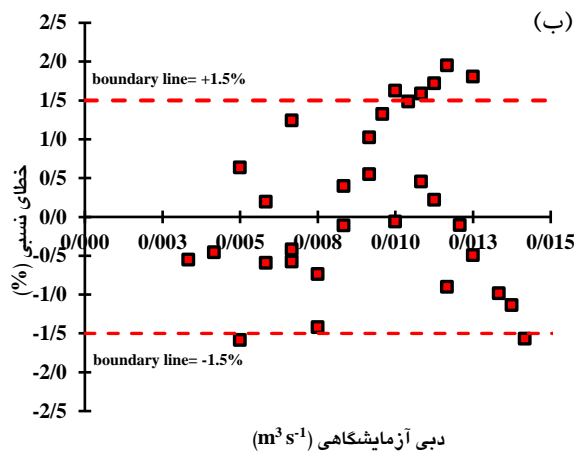
$$C_d = a \times \left(\frac{H_0}{G}\right)^b - c \quad [17]$$

$$C_d = a \left(\frac{A_{total}}{B^2}\right)^b + c \left(\frac{H_0}{B}\right)^d + e \left(\frac{H_0-Z}{G_2}\right)^f + z \left(\frac{X}{\varepsilon}\right) \quad [18]$$

با بهره گیری از Solver در نرم افزار اکسل، معادلات پیشنهادی به منظور دستیابی به فرم مناسب آن با کمترین میزان خطا مطابق روابط ۱۹ و ۲۰، ارائه گردید:

$$C_d = 1.226 \times \left(\frac{H_0}{G}\right)^{0.039} - 0.672 \quad [19]$$

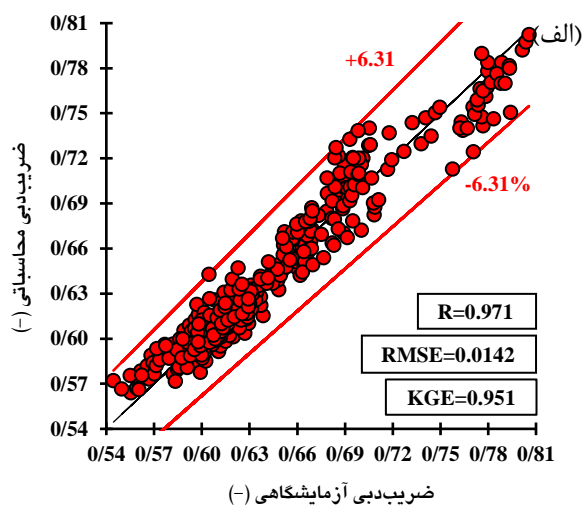
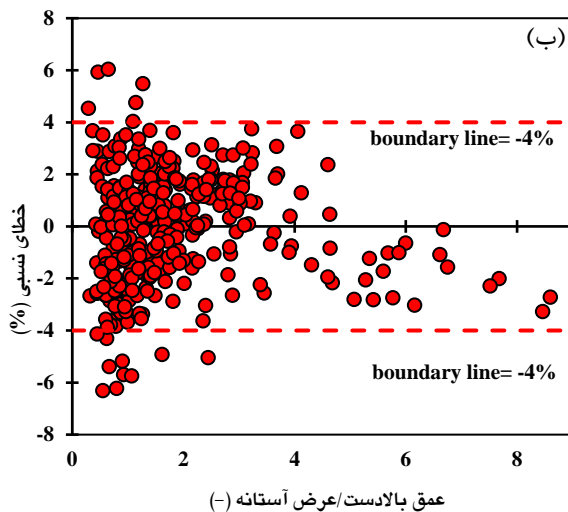
$$C_d = 0.1723 \left(\frac{A_{total}}{B^2}\right)^{-0.2267} + 0.3247 \left(\frac{H_0}{B}\right)^{0.1583} + 0.1223 \left(\frac{H_0-Z}{G_2}\right)^{-0.1060} - 0.0096 \left(\frac{X}{\varepsilon}\right) \quad [20]$$



شکل ۷- نمودار الف) مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی ب) درصد خطای نسبی در برابر دبی آزمایشگاهی.

برای این رابطه برابر با  $0.951$  و قرار گرفتن آن در محدوده خیلی خوب است. با توجه به شکل ۸-ب ملاحظه می‌گردد که  $95\%$  داده‌ها در باند خطای  $\pm 4\%$  قرار دارند که نشانگر دقت بالای رابطه پیشنهادی می‌باشد که با اطمینان بالا می‌تواند به کار گرفته شود.

بررسی شکل ۸-الف، حاکی از روند مطلوب نتایج بین مقادیر محاسباتی با آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج شاخص‌های آماری حداکثر درصد خطای نسبی، میانگین درصد خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعات مقایسه نتایج بین داده‌های آزمایشگاهی با رابطه ۲۰ به ترتیب  $31/6\%$ ،  $73/1\%$  و  $14/0\%$  می‌باشد. شاخص آماری KGE



شکل ۸- نمودار الف) مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی ضریب‌دبی در بازشدگی‌ها، عرض و موقعیت‌های مختلف قرارگیری آستانه ب) نمودار پراکنندگی خطای نسبی داده‌ها.

نتیجه گرفت که در بین حالات مختلف روابط ارائه شده، هنگامی که تمامی پارامترها به کار برده می‌شود خطا به کم‌ترین میزان خود می‌رسد. همچنین پارامتر  $A_{total}/B^2$  تأثیر بیشتری داشته و با حذف آن میزان خطا افزایش پیدا می‌کند. این قیاس در پارامترهای دیگر نیز حاکم بوده و بر

رابطه ۲۰ براساس پارامترهای موثر بر ضریب‌دبی و رگرسیون چند متغیره ارائه شده است. در تحقیق حاضر دستور Solver با حالت‌های مختلفی اجرا شد یعنی هربار با حذف پارامترهای موثر میزان تأثیر هر پارامتر بر رابطه کلی ۲۰ ارزیابی شد (جدول ۲). براساس جدول ۲، می‌توان

اساس حذف هر یک از پارامترهای بی‌بعد میزان خطا افزایش می‌یابد.

جدول ۲- آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر ضریب‌دبی.

| روابط  | RMSE (-) | Max RE (%) | R <sup>2</sup> |
|--|----------|------------|----------------|
| $C_d = 0.1723 \left(\frac{A_{total}}{B^2}\right)^{-0.2267} + 0.3247 \left(\frac{H_0}{B}\right)^{0.1583} + 0.1223 \left(\frac{H_0 - Z}{G_2}\right)^{-0.1060} - 0.0096 \left(\frac{X}{\varepsilon}\right)$ | ۰/۰۱۴۲   | ۶/۳۱       | ۰/۹۴           |
| $C_d = 0.1721 \left(\frac{A_{total}}{B^2}\right)^{-0.2270} + 0.3296 \left(\frac{H_0}{B}\right)^{0.1564} + 0.1175 \left(\frac{H_0 - Z}{G_2}\right)^{-0.1104}$   | ۰/۰۱۶۹   | ۸/۱۱       | ۰/۹۱           |
| $C_d = 0.1147 \left(\frac{A_{total}}{B^2}\right)^{-0.2852} + 0.4846 \left(\frac{H_0}{B}\right)^{0.0831} - 0.0095 \left(\frac{X}{\varepsilon}\right)$   | ۰/۰۱۶۷   | ۸/۱۸       | ۰/۹۰           |
| $C_d = 0.0264 \left(\frac{A_{total}}{B^2}\right)^{-0.5555} + 0.5425 \left(\frac{H_0 - Z}{G_2}\right)^{0.0395} - 0.0097 \left(\frac{X}{\varepsilon}\right)$   | ۰/۰۱۹۲   | ۹          | ۰/۸۹           |
| $C_d = 0.0887 \left(\frac{H_0}{B}\right)^{-0.7506} + 0.4370 \left(\frac{H_0 - Z}{G_2}\right)^{0.1147} - 0.0110 \left(\frac{X}{\varepsilon}\right)$   | ۰/۰۳۲۷   | ۱۳/۹۱      | ۰/۶۹           |

### نتیجه‌گیری کلی

نشان داد که میزان بازشدگی در حالت با آستانه در همه حالات قرارگیری آستانه با افزایش بازشدگی کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه ضرایب‌دبی در حالت بدون آستانه و با آستانه هم‌عرض در یک بازشدگی یکسان و در موقعیت‌های مختلف قرارگیری آستانه، میزان عمق جریان در بالادست دریاچه در حالت مماسی بر دریاچه در بالادست آن کم‌ترین میزان را در مقایسه با سایر حالات قرارگیری آستانه دارد که منجر به کاهش نیروی فشاری وارد بر دریاچه و افزایش ضریب‌دبی می‌گردد. ضریب‌دبی آستانه هم‌عرض در موقعیت بالادست دریاچه در مقایسه با حالت بدون آستانه در بازشدگی یکسان ۱ cm، ۱۰/۳۴٪ بیشتر بوده و این میزان برای بازشدگی یکسان ۲ cm، ۱۷/۸۶٪ می‌باشند. در تحقیق حاضر بر اساس پارامترهای بی‌بعد حاصل از آنالیز ابعادی روابط غیر خطی رگرسیونی برای پیش‌بینی مقدار ضریب‌دبی در حالت بدون آستانه و با آستانه در موقعیت‌ها و ابعاد مختلف در عرض آستانه با نتایج مناسب شاخص‌های آماری RE، KGE و RMSE ارائه گردید.

در تحقیق حاضر رابطه عمومی محاسبه دبی (رابطه ۲)، برای آستانه غیر هم‌عرض توسعه داده شد و محاسبات بر اساس رابطه جدید که برای حالت با آستانه غیر هم‌عرض ارائه شده است (رابطه ۳) در تحقیق حاضر انجام پذیرفت. مقایسه نتایج به‌دست آمده برای ضریب‌دبی در حالت با آستانه و بدون آستانه حاکی از عملکرد بهتر وجود آستانه زیر دریاچه و مماس بر دریاچه کشویی در بالادست و پائین‌دست دریاچه از نظر افزایش ضریب‌دبی دارد. به‌طور میانگین ضریب‌دبی آستانه با عرض ۳۰ cm در موقعیت زیر دریاچه و مماس بر دریاچه در پائین‌دست و بالادست آن به‌ترتیب ۱۱/۹۱، ۱۰/۶۳ و ۸/۹۶٪ بیشتر از آستانه با عرض ۲۵ cm در حالت مشابه قرارگیری آستانه است. مقایسه نتایج ضرایب‌دبی حاصل از کاربرد آستانه در زیر دریاچه و مماس بر دریاچه کشویی حاکی از بالا بودن ضریب‌دبی در حالت مماس بر دریاچه در تمامی دبی‌ها و عرض‌های آستانه دارد و بیشترین مقدار آن مربوط به مدل مماسی در بالادست دریاچه است. نتایج

### منابع مورد استفاده

Alhamid AA, 1999. Coefficient of discharge for free flow sluice gate: Journal of King Saud University - Engineering Sciences 11(1):33-47.

- Daneshfaraz R, Abbaszadeh H, Gorbanvatan P and Abdi M, 2021. Application of sluice gate in different positions and its effect on hydraulic parameters in free-flow conditions: *Journal of Hydraulic Structures* 7(3):72-87.
- Daneshfaraz R, Ghahramanzadeh A, Ghaderi A, Joudi AR and Abraham J, 2016. Investigation of the effect of edge shape on characteristics of flow under vertical gates: *Journal of American Water Works Association* 108(8):425-432.
- Daneshfaraz R, Norouzi R, Abbaszadeh H and Azamathulla HM, 2022. Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients: *Water Supply* 22(10):7767–7781. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.354>.
- Daneshfaraz R, Norouzi R, Ebadzadeh P, Di Francesco S and Abraham JP, 2023. Experimental study of geometric shape and size of sill effects on the hydraulic performance of sluice gates: *Water* 15(2):314.
- Ghorbani MA, Salmasi F, Saggi MK, Bhatia AS, 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: *Journal of Hydroinformatics* 22(6):1603-1619.
- Karami S, Heidari MM. and Adib Rad MH, 2020. Investigation of free flow under the sluice gate with the sill using flow-3D model: *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 44:317–324.
- Negm AM, Alhamid AA and El-Saiad AA, 1998. Submerged flow below sluice gate with sill. *Proceedings of International Conference on Hydro-Science and Engineering Hydro-Science and Engineering ICHE98, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol.III, Published on CD-Rom and A Booklet of Abstracts, 31 Aug.-3 Sep., Cottbus/Berlin, Germany.*
- Reda AER, 2016. Modeling of flow characteristics beneath vertical and inclined sluice gates using artificial neural networks: *Ain Shams Engineering Journal* 7(2):971-924.
- Roth A and Hager WH, 1999. Underflow of standard sluice gate: *Experiments in Fluids* 27:339-350.
- Salmasi F and Abraham J, 2020. Prediction of discharge coefficients for sluice gates equipped with different geometric sills under the gate using multiple non-linear regression (MNL): *Journal of Hydrology* DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125728.
- Salmasi F and Norouzi Sarkarabad R, 2018. Investigation of different geometric shapes of sills on discharge coefficient of vertical sluice gate: *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 52(1):2-2. Doi: 10.22060/ceej.2018.14232.5596. (In Persian with English abstract).
- Swamee PK, 1992. Sluice gate discharge equations: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(1):56-60.
- White Frank M, 2016. *Fluid Mechanics* (8th ed). Secacus, United State: McGraw Hill Education.