

# Experimental Investigation of Non-Suppressed Sill Effect with Different Geometry on Flow Pattern and Discharge Coefficient of The Sluice Gate


Rasoul Daneshfaraz<sup>1\*</sup>, Reza Norouzi<sup>2</sup>, Parisa Ebadzadeh<sup>3</sup>

1- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

2- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

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

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

Received: 24 November 2021, Accepted: 12 March 2022  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** The ease of installing sluice gates and simplicity of their equations makes sluice gates one of the most widely used hydraulic structures in the regulating and controlling water level. Several factors has been discussed on the discharge coefficient of the sluice gate, including the effect of sill under the gate. The most important application of sill under sluice gate is to increase its discharge coefficient. Geometry and widths of sill is one of the important factors on discharge coefficient. Also, the use of non-suppressed sills changes the flow pattern and the general equation of discharge coefficient. Discharge coefficient of sluice gate with sill was studied by Jalil et al. (2016). In this study, the effect of sill under sluice gate was experimentally investigated on flow discharge coefficient. Results showed that the coefficient of discharge decreases with an increase of relative sill height to the head upstream. Rezavand (2018) investigated the effects of the hydraulic parameters on the flow discharge coefficient by Fluent software. Results showed that the sill under the gate has a positive effect on the flow discharge coefficient. The goal of this study is to investigate the geometry of sill with changes in its width on flow pattern and discharge coefficient in free-flow conditions. According to the previous studies, the effect of sill width parameter with different geometric shapes on discharge coefficient and flow pattern has not been studied.

**Methodology:** The experiments were performed in a hydraulic laboratory with flume dimensions of 5 m in length, 0.30 m in width, and 0.45 m in height. The walls are made of Plexiglass in order to provide good visibility. The inlet flow were measured by two rotameters with  $\pm 2\%$  accuracy. Rotameters were installed at the outlet of the pump and measured with a point gauge with an accuracy of 1 mm. A sluice gate with a 1 cm thickness is installed with the distance of 1.5 m away from the inlet of flow. The gate opening was fixed at 4 cm in all the experiments. Sills including cylindrical, semi-cylindrical, pyramidal, and rectangular cubic were prepared in order to investigate the shape effect. To study the effect of sill width under the gate, all four sill shapes were prepared with the widths of 5, 7.5, 10, 15, and 20 cm. The height of all sills in this study was considered to be a fixed value of 3 cm. A total of 20 physical models were tested during experiments. In this study, flow discharge in the range of 475 to 700 liters per minute was applied to all models. A total of 200 experiments were performed in order to investigate the effect of sill shape and width on flow

pattern and discharge coefficient in free conditions.

**Results and Discussion:** Results of sluice gate patterns with sill and without sill situations were investigated. The results of these experiments, similar to the previous studies, show that a sluice gate with sill increases the discharge coefficient. The results showed that sills with different geometries affect flow under the gate. Also, using non-suppressed sills under the gate breaks the flow lines. As the downstream progress, v-shaped sections are formed. Investigation of flow patterns in cylindrical and semi-cylindrical and pyramidal sills showed pyramidal sill causes a significant uniformity flow lines compared to other geometric shapes due to its sloping side at downstream. While sill with rectangular cube geometry improves rotational flows at downstream of sill. The results of placing sill in different geometric shapes under sluice gate indicate that using semi-cylindrical sill compared to other shapes, increases in discharge coefficient and the highest values of discharge coefficient after this sill are allocated to the cylindrical, pyramidal and rectangular cubic sills, respectively. Semi-cylindrical average discharge coefficient increased 19.1 percent compared with the gate without sill. According to the laboratory findings, it was observed that increased sill width with decreased gate opening, increases the discharge coefficient. Placing a sill with a width of 20 cm in all geometric shapes increases the discharge coefficient by an average of 10% compared to the sill with a width of 5 cm.

**Conclusion:** The study of discharge coefficient in 20 physical models showed that the highest values of discharge coefficient after semicircular sill are allocated to circular, triangular, and square sills, respectively. This increase is expressed because the semicircular, circular, triangular, and square sills at the smallest width ( $b = 5$  cm) increased discharge coefficient by 6.5, 5.6, 3.5, and 1.6% compared to the non-sill state, respectively. Changing sill width from 5 to 20 cm showed that discharge coefficient of semi cylindrical, cylindrical, pyramidal, and rectangular cubic increased by an average of 19.1, 17.2, 14.7, and 12.1% compared to non- sill state.

**Keywords:** Discharge, Flow Velocity, Flow Lines, Sluice Gate, Free Flow Condition.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه غیر هم‌عرض با هندسه متفاوت بر الگوی جریان و ضریب‌دبی در یچه کشویی

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، رضا نوروزی<sup>۲</sup>، پریسا عبادزاده<sup>۳</sup>

۱- استاد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲- دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

\* daneshfaraz@maragheh.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر اشکال هندسی و عرض‌های مختلف آستانه بر ضریب‌دبی در یچه کشویی عمودی به صورت آزمایشگاهی است. در این راستا، آستانه‌های استوانه‌ای، نیم‌استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی در عرض‌های مختلف ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. میزان بازشدگی در یچه در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴ سانتی‌متر تنظیم شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که حضور آستانه در هندسه‌های متفاوت، الگوی جریان عبوری از زیر در یچه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین استفاده از آستانه‌های غیرهم‌عرض در زیر در یچه، باعث شکستگی خطوط جریان عبوری می‌گردد. به طوری که با پیشروی به سمت پایین‌دست، جریان‌های ۷ شکل تشکیل می‌گردد. بررسی ضریب‌دبی نشان داد که حداقل افزایش آن در آستانه با هندسه مکعب‌مستطیلی و حداکثر مقدار آن به آستانه با هندسه نیم‌استوانه‌ای مربوط می‌شود. آستانه‌های مذکور در کم‌ترین عرض (b=5 cm)، به طور میانگین ضریب‌دبی را حداقل ۱/۶ و حداکثر ۶/۵ درصد نسبت به حالت بدون آستانه افزایش دادند. این در حالی است که با افزایش عرض آستانه به ۲۰ سانتی‌متر، مقادیر ذکر شده به ترتیب به ۱۲/۱ و ۱۹/۱ درصد افزایش یافت.

**کلیدواژه‌گان:** دبی، سرعت جریان، خطوط جریان، در یچه کشویی، جریان آزاد.

## ۱- مقدمه

می‌توان به تأثیر آستانه در زیر در یچه اشاره کرد. جاگذاری آستانه در زیر در یچه کشویی، با کاهش در میزان بازشدگی در یچه، ارتفاع طراحی در یچه را کاهش می‌دهد. همین امر وزن در یچه و در پی آن، نیروهای هیدرواستاتیکی وارد بر آن را نیز کاهش خواهد داد. افزون بر موارد یاد شده، مهم‌ترین کاربرد آستانه در زیر در یچه کشویی، افزایش ضریب‌دبی آن است. شکل هندسی آستانه، از دیگر مسئله‌های تأثیرگذار بر دبی عبوری از در یچه می‌باشد. چرا که الگوی جریان تحت تأثیر هندسه آستانه دستخوش تغییر شده و در نهایت مشخصه‌های آن از جمله دبی و سرعت عبوری از زیر در یچه تغییرپذیری متفاوتی خواهد داشت. آستانه‌های تعبیه شده در زیر در یچه به دو حالت

با توجه به ضرورت استفاده درست از منع‌های آب در سطح جهان، کنترل جریان‌های عبوری از شبکه‌های آبیاری و همچنین در پشت سدها، نیازمند به‌کارگیری روش‌هایی به‌روز و بهینه می‌باشد. در این میان احداث سازه‌های هیدرولیکی مناسب، نقش عمده‌ای را در پراکنش جریان خواهند داشت. آسانگری ساخت و نصب در یچه‌های کشویی و سادگی معادله‌های حاکم بر آن، سبب شده است تا در یچه‌های کشویی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین سازه‌های هیدرولیکی در تنظیم و کنترل سطح آب مطرح شوند. عامل‌های چندی در گذردهی جریان در یچه کشویی مورد بحث می‌باشد که از آن جمله

یک معادله واحد و دارای دقت بالا در دامنه استغراق پایین معرفی شد. (Jalil et al. (2016) به بررسی تأثیر آستانه در زیر دریچه کشویی بر ضریب‌دبی جریان پرداختند. آنان در این بررسی ارتفاع آستانه و بازشدگی دریچه را ارزیابی کردند. بررسی ضریب‌دبی بر حسب فراسنجه بی‌بعد نسبت ارتفاع آستانه به عمق آب بالادست نشان داد که با افزایش این میزان، ضریب‌دبی کاهش می‌یابد. (Daneshfaraz et al. (2016) تأثیر هندسه لبه انتهایی دریچه کشویی بر ضریب‌دبی جریان را به صورت عددی و با بهره‌گیری از روش حجم‌محدود بررسی کردند. در بررسی یاد شده دریچه کشویی در ۵ شکل متفاوت شامل لبه تخت، لبه تیز در بالادست، لبه تیز در پایین‌دست، دنداندار و لبه گرد طراحی شد. تأثیر کمتر دریچه کشویی با انتهای لبه تیز نسبت به دیگر هندسه‌ها بر ضریب‌دبی جریان از نتایج این بررسی بود. (Rezavand (2018) به بررسی عددی جریان عبوری از زیر دریچه کشویی با آستانه پرداخت. ایشان با استفاده از نرم‌افزار FLUENT، شکل و ارتفاع آستانه را بررسی کرد. افزایش ضریب‌دبی در حالت با آستانه نسبت به حالت بدون آستانه از جمله نتایج این تحقیق بود. (Ashkan et al. (2019) با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D رفتار دریچه‌های کشویی متوالی را به روش حجم‌محدود بر ضریب‌دبی جریان ارزیابی کردند. محققان در این تحقیق پس از شبیه‌سازی ۴ مدل متفاوت، برای هر کدام ۵ دبی ورودی متفاوت اعمال کردند. نتایج نشان داد که دبی خروجی از این سازه‌های هیدرولیکی در مقایسه با فاصله بین دریچه‌ها، بیشتر وابسته به بازشدگی دریچه می‌باشد. (Karami et al. (2020) به مقایسه رفتار آستانه مستطیلی و نیم‌دایره‌ای با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. آنان در نتایج خود، افزایش ضریب‌دبی جریان را با افزایش ارتفاع آستانه تا یک حد مشخص، گزارش دادند. نتایج گویای این است که ضریب‌دبی جریان بعد از یک ارتفاع مشخص آستانه کاهش می‌یابد. (Salmasi and Norouzi (2020) تأثیر شکل آستانه بر ضریب‌دبی جریان عبوری از دریچه کشویی را در حالت آزاد و به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. محققان در این بررسی از ۱۲ آستانه در شکل‌های هندسی متفاوت استفاده کردند. در

هم‌عرض و غیر هم‌عرض با دریچه کشویی تفکیک‌پذیر می‌باشند. تغییر در عرض آستانه، با تغییر در سطح بازشدگی دریچه، سبب تغییر در میزان ضریب‌دبی می‌شود. بررسی‌های گذشته گویای آن است که دبی عبوری از این نوع دریچه‌ها از مسئله‌های مهم در مهندسی هیدرولیک می‌باشد. (Shivapur and Shesha Prakash (2005) در مطالعه آزمایشگاهی ضریب‌دبی جریان دریچه کشویی قائم و مایل را بررسی کردند. آزمایش‌ها با در نظر گرفتن ۴ زاویه انحراف ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در امتداد قائم و مایل به سمت بالادست دریچه صورت گرفت. نتایج نشان داد که هر عامل از جمله تغییر در زاویه انحراف دریچه که همگرایی جریان زیر دریچه را افزایش دهد، ضریب‌دبی عبوری را افزایش خواهد داد. (Golmohammadi et al. (2011) با بهره‌گیری از معادله‌های انرژی و مفهوم افزایش فشار، رابطه‌های نیمه تجربی برای برآورد دبی عبوری از دریچه کشویی در شرایط جریان آزاد ارائه دادند. آنان در این تحقیق عمق آب بالادست و میزان بازشدگی دریچه را فراسنجه‌های مؤثر بر ضریب‌دبی جریان عنوان کردند. (Shayan Khalili et al. (2014) در پژوهشی آزمایشگاهی، ضریب‌دبی جریان عبوری از دریچه کشویی را بررسی کردند. این محققان در نتیجه، رابطه‌ای برای برآورد ضریب‌دبی دریچه کشویی در حالت آزاد ارائه دادند. در رابطه پیشنهادی، ضریب فشردگی دریچه کشویی را در شرایط جریان آزاد تابع میزان بازشدگی دریچه بیان کردند. (Ilkhanipour Zeinali et al. (2015) در پژوهشی آزمایشگاهی، تأثیر زاویه انحراف دریچه کشویی را بر ضریب‌دبی جریان بررسی کردند. این گروه در نتیجه تحقیق خود رابطه‌ای پیشنهادی برای برآورد ضریب‌دبی ارائه کردند. مقایسه نتایج حاصل از رابطه ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی سازگاری قابل قبولی را نشان داد. (Barghi Khezerloo al. (2016) روشی برای برآورد ضریب‌دبی دریچه کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند. در این تحقیق ضریب‌دبی مستقل از شرایط جریان، بازشدگی دریچه و عمق پایاب بیان شد. این روش به دلیل عدم وابستگی ضریب‌دبی به عمق پایاب به عنوان

$$f_1(C_d, \rho, Q, g, \mu, H, G, Z, b, B, \Phi) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $C_d$  ضریب دبی جریان (-)،  $\rho$  جرم مخصوص آب ( $ML^{-3}$ )،  $Q$  دبی جریان ( $L^3T^{-1}$ )،  $g$  شتاب گرانش زمین ( $LT^{-2}$ )،  $\mu$  لزوجت پویایی آب ( $ML^{-1}T^{-1}$ )،  $H$  عمق آب پشت دریچه ( $L$ )،  $G$  بازشدگی دریچه ( $L$ )،  $Z$  ارتفاع آستانه ( $L$ ) و  $b$  عرض آستانه ( $L$ )،  $B$  عرض فلوم آزمایشگاهی ( $L$ ) و  $\Phi$  ضریب تابع شکل می‌باشد که خود وابسته به محیط خیس شده آستانه ( $P$ ) بوده و به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$\Phi = f_2(P) \quad (2)$$

بنابر قضیه پی-باکینگهام و با در نظر گرفتن ( $H, g, \rho$ ) به عنوان متغیرهای تکراری، فراسنجه‌های بی‌بعد برای دریچه با آستانه به صورت رابطه ۳، ارائه می‌شود:

$$f_2\left(C_d, \frac{1}{Fr}, \frac{1}{Re}, \frac{G}{H}, \frac{Z}{H}, \frac{b}{H}, \frac{B}{H}, \frac{P}{H}\right) = 0 \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $Fr$  معرف عدد فرود جریان و  $Re$  بیانگر عدد رینولدز می‌باشد. باتوجه به این که  $26286 < Re < 38866$  لذا جریان آشفته بوده و از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر شد (Daneshfaraz et al. 2021b). فراسنجه  $G/H$  به دلیل ثابت بودن بازشدگی دریچه، در همه آزمایش‌ها، از رابطه ۳ حذف شد. از تأثیر فراسنجه بی‌بعد  $Z/H$  به دلیل ثابت بودن ارتفاع آستانه‌ها در همه مدل‌ها چشم‌پوشی شد و عرض آبراهه به عنوان فراسنجه ثابت در همه آزمایش‌ها، از بین عوامل مؤثر حذف شد. در نهایت رابطه ۳ با در نظر گرفتن عامل‌های یاد شده، به صورت رابطه ۴ بازنویسی شد:

$$C_d = f_3\left(\frac{b}{H}, \frac{P}{H}\right) \quad (4)$$

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه با فلوم به ابعاد طول ۵ متر، عرض ۰/۳۰ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر انجام گرفت. فلوم آزمایشگاهی دارای کف و دیواره‌هایی از جنس پلاکسی گلاس بوده و مجهز به یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر می‌باشد. جریان ورودی به وسیله دو پمپ تأمین می‌شود که هر کدام ظرفیت تولید ۰/۰۰۸۳ مترمکعب بر ثانیه را دارد.

تحقیق یاد شده آستانه نیم‌دایره‌ای و در بین چندضلعی‌ها آستانه مثلثی بهترین شکل هندسی در افزایش ضریب دبی جریان دریچه‌کشویی گزارش شد. (Daneshfaraz et al. 2021) تأثیر زاویه انحراف قرارگیری دریچه‌کشویی بر ضریب دبی را با به کارگیری روش حجم محدود بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه انحراف دریچه‌کشویی به سمت بالادست، ضریب دبی افزایش می‌یابد. (Daneshfaraz et al. 2022) با تغییر در میزان بازشدگی دریچه‌کشویی، افت انرژی و ضریب دبی دریچه‌کشویی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش در بازشدگی دریچه‌کشویی، سبب افزایش در میزان ضریب دبی و افت انرژی جریان می‌شود.

با توجه به کاربرد گسترده دریچه‌کشویی، برآورد دقیق ضریب دبی آن بسیار ضروری است. جریان عبوری از دریچه‌کشویی به میزان شایان توجهی از هندسه آستانه تأثیر می‌پذیرد. چرا که آستانه در شکل‌های هندسی متفاوت سبب تغییر در خطوط جریان، سرعت و در پی آن دبی جریان می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی هندسه آستانه توأم با تغییرپذیری عرض آن بر الگو جریان و ضریب دبی دریچه‌کشویی در شرایط جریان آزاد می‌باشد. نتایج بررسی‌های گذشته نشان داد تاکنون تأثیر فراسنجه عرض آستانه در هندسه‌های متفاوت بررسی نشده است. به کارگیری آستانه غیرهم‌عرض فلوم سبب تغییر در الگوی جریان عبوری و در نتیجه شکل کلی رابطه دبی عبوری از دریچه‌کشویی می‌شود. بنابراین نیاز است تا با اعمال تغییر در بازشدگی دریچه، شکل کلی معادله را بازنویسی کرد. همچنین در این تحقیق برای افزایش دقت در برآورد ضریب دبی، با تأثیر دادن فراسنجه بی‌بعد محیط خیس شده و عرض آستانه، رابطه پیشنهادی جهت برآورد ضریب دبی در شکل‌های هندسی متفاوت آستانه ارائه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل ابعادی

فراسنجه‌های مؤثر بر ضریب دبی جریان عبوری از دریچه‌کشویی با حضور آستانه در جریان آزاد، به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Daneshfaraz et al. 2021a):

۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آستانه‌ها به دلیل سبکی و آسانگری کاربرد از جنس پلی‌اتیلن انتخاب شدند. فلوم آزمایشگاهی و آستانه‌های به‌کاررفته به شرح شکل ۱ می‌باشد. در مجموع ۲۰ مدل آزمایشگاهی آستانه آزمایش شد. در این پژوهش دبی جریان در محدوده ۰/۰۷۹ تا ۰/۱۱ مترمکعب بر ثانیه بر هر کدام از مدل‌ها اعمال شد. در کل ۲۰۰ آزمایش برای بررسی تأثیر هندسه و عرض آستانه بر ضریب‌دبی جریان در شرایط آزاد انجام شد.

دریچه‌کشویی به ضخامت ۱ سانتی‌متر در فاصله یک متری از ابتدای فلوم نصب شده است. در همه آزمایش‌ها بازشدگی دریچه ثابت و برابر ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای بررسی تأثیر هندسه، آستانه‌های استوانه‌ای، نیم‌استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی تهیه شد. هر چهار آستانه در عرض‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به‌منظور ارزیابی تأثیر عرض آستانه در زیر دریچه آماده شد. ارتفاع همه آستانه‌ها در این تحقیق برابر میزان ثابت

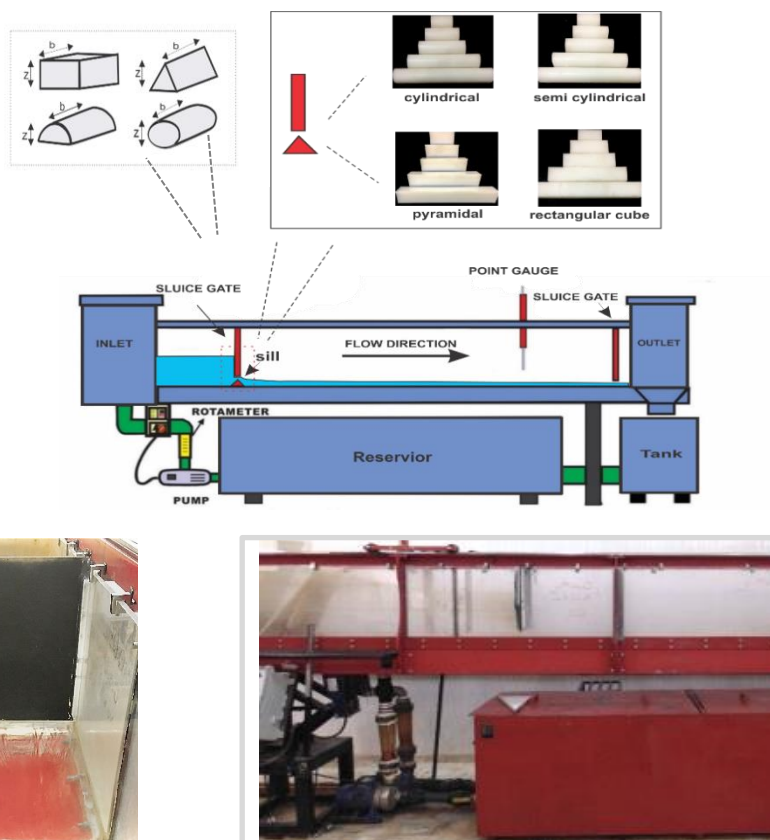


Fig. 1 view of channel and sills in present study

شکل ۱ نمای کلی فلوم آزمایشگاهی و آستانه‌ها در این تحقیق

گستره کل بازشدگی زیر دریچه می‌باشد.

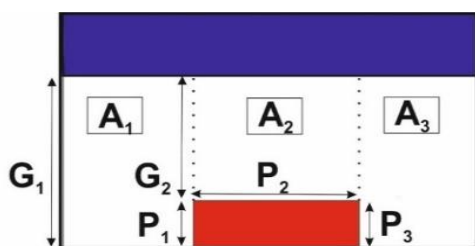


Fig. 2 Cross section of sluice gate

شکل ۲ مقطع عرضی دریچه

قرارگیری آستانه‌های غیر هم‌عرض در کف فلوم سبب تشکیل سه سطح مقطع جریان  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  می‌شود. جاگذاری آستانه به‌گونه‌ای است که در همه حالت‌ها  $A_1$  برابر  $A_3$  باشد. با توجه به تجزیه و تحلیل ابعادی صورت گرفته محیط خیس شده آستانه ( $P$ )، از جمله فراسنجه‌های مؤثر در این تحقیق می‌باشد. مقدار این فراسنجه در یک مقطع عرضی از دریچه در شکل ۲ مشخص شده است. در این پژوهش برای برآورد مقادیر  $A_T$  و  $P$  رابطه‌های ۵ و ۸ به‌کار گرفته شد که در آن  $A_T$  معرف

$0.7 < KGE < 1.00$	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

$$A_T = (A_1 + A_2 + A_3) \quad (5)$$

$$A_1 = A_3 \quad (6)$$

$$A_T = (2 A_1 + A_2) \quad (7)$$

$$P_T = (P_1 + P_2 + P_3) \quad (8)$$

در رابطه‌های شاخص‌های آماری  $C_{d_o}$  ضریب‌دبی آزمایشگاهی،  $C_{d_e}$  ضریب‌دبی رابطه پیشنهادی،  $\overline{C_{d_o}}$  ضریب‌دبی میانگین حاصل از داده‌های آزمایشگاهی،  $\overline{C_{d_e}}$  ضریب‌دبی میانگین رابطه ارائه شده،  $\sigma_e$  انحراف معیار داده‌های حاصل از رابطه ارائه شده،  $R^2$  ضریب همبستگی داده‌ها و  $n$  معرف تعداد داده‌ها می‌باشد.

### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش با به‌کارگیری آستانه‌های غیرهم‌عرض در زیر دریچه کشویی، تأثیر شکل و عرض آستانه بر ضریب‌دبی دریچه کشویی بررسی شد. قرارگیری آستانه به‌گونه‌ای است که مرکز سطح بالایی آستانه دقیقاً در زیر دریچه قرار گرفته است. در آغاز ضریب‌دبی و الگوی جریان دریچه کشویی در حالت بدون آستانه بررسی شد. آن‌گاه آستانه با مقطع نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی برای بررسی تأثیر شکل در زیر دریچه تعبیه شد. آستانه‌ها در ۵ عرض متفاوت از ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در همه شکل‌ها به‌منظور آزمایش‌های عرض آستانه در زیر دریچه جاگذاری شد. ارتفاع آستانه‌ها و میزان بازشدگی دریچه در همه آزمایش‌ها ثابت و به‌ترتیب برابر ۳ و ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر آزمایش عمق آب بالادست خوانده شده و ضریب‌دبی محاسبه شد. نتایج نشان داد که قرارگیری آستانه در زیر دریچه کشویی سبب ایجاد تغییر در الگوی جریان می‌شود. شکل ۳، خطوط جریان در حالت با آستانه و بدون آستانه را نشان می‌دهد. قرارگیری آستانه غیرهم‌عرض، در زیر دریچه سبب شده است تا شکستگی خطوط جریان در اثر عبور آن از پیرامون آستانه به‌وجود آید. به‌طوری‌که با پیشروی جریان به سمت پایین‌دست، مقطع  $\gamma$  شکل در جریان پایین‌دست تشکیل شود. مشاهده‌های آزمایشگاهی در این تحقیق، گویای این است که در این مقطع با توسعه جریان به سمت دیواره‌های فوم، تشکیل خطوط جریان  $\gamma$

در همه‌ی آزمایش‌ها پس از تثبیت شرایط، عمق جریان در سه نقطه از عرض آبراهه در بالادست دریچه کشویی اندازه‌گیری شد و میانگین عمق، به‌عنوان عمق نهایی ( $H$ ) ثبت شد (Daneshfaraz et al. 2019). با داشتن عمق آب بالادست ضریب‌دبی جریان محاسبه گردید. محاسبه‌ها با بازنویسی رابطه کلی دبی عبوری از دریچه کشویی صورت گرفت. با توجه به رابطه ۹،  $B \times G$  بیانگر سطح مقطع جریان عبوری از زیر دریچه می‌باشد. لازم به یادآوری است این رابطه در حالت بدون آستانه درست می‌باشد. چرا که کاهش در عرض آستانه در یک مقطع عرضی از فوم میزان بازشدگی دریچه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در صورت کاربرد آستانه‌های غیرهم‌عرض، رابطه ۹، ملزم به اعمال مقدار بازشدگی می‌باشد. در نهایت رابطه نهایی به صورت رابطه ۱۰ بازنویسی می‌شود.

$$C_d = \frac{Q}{BG \sqrt{2g(H)}} \quad (9)$$

$$C_d = \frac{Q}{2A_1 \sqrt{2g(H)} + A_2 \sqrt{2g(H-z)}} \quad (10)$$

### ۲-۲- شاخص‌های آماری

برای ارزیابی دقت رابطه برآورد ضریب‌دبی و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی، از معیارهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص گوپتا (KGE) و ضریب همبستگی داده‌ها ( $R^2$ ) استفاده شد. شاخص‌های آماری یاد شده به ترتیب روابط ۱۱ و ۱۲ را شامل می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{d_{oi}} - C_{d_{ei}})^2}{n}} \quad (11)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (12)$$

$$R = \frac{[\sum_{i=1}^n (C_{d_{oi}} - \overline{C_{d_o}})(C_{d_{ei}} - \overline{C_{d_e}})]}{\sum_{i=1}^n (C_{d_{oi}} - \overline{C_{d_o}}) \sum_{i=1}^n (C_{d_{ei}} - \overline{C_{d_e}})}$$

$$\beta = \frac{\overline{C_{d_e}}}{\overline{C_{d_o}}} \quad \gamma = \frac{CV_e}{CV_o} = \frac{\frac{\sigma_e}{\overline{C_{d_e}}}}{\frac{\sigma_o}{\overline{C_{d_o}}}}$$

به سمت پایین دست را با افزایش دبی نشان می دهد. با افزایش دبی از ۰/۰۰۷۹ به ۰/۰۱۱ مترمکعب بر ثانیه برآمدگی به وجود آمده حاصل از تنش برشی دیواره ها به سمت پایین دست انتقال یافته است.

شکل تشدید می شود تا جاییکه این خطوط به حالت متوالی در سطح جریان ادامه پیدا می کند. بررسی خطوط جریان نشان داد که محل تشکیل این مقطع با افزایش دبی جریان تغییر می کند. شکل ۵، توسعه مقطع  $v$  شکل

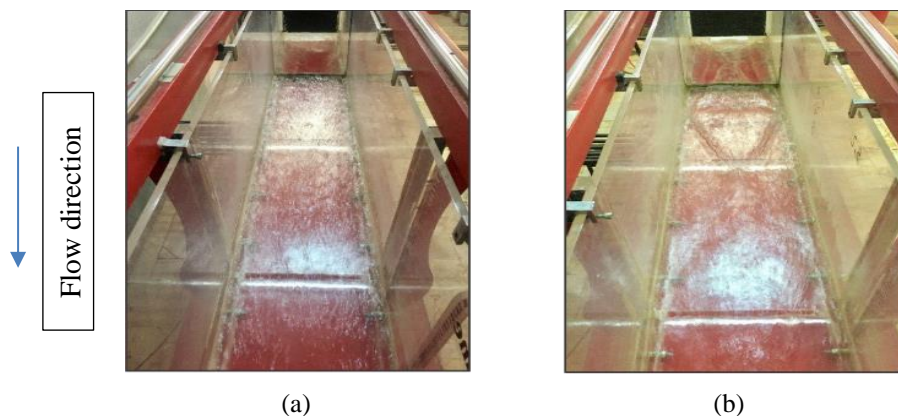


Fig. 3 Flow pattern a) non silled gate b) silled gate

شکل ۳ الگوی جریان (a) بدون آستانه (b) با آستانه

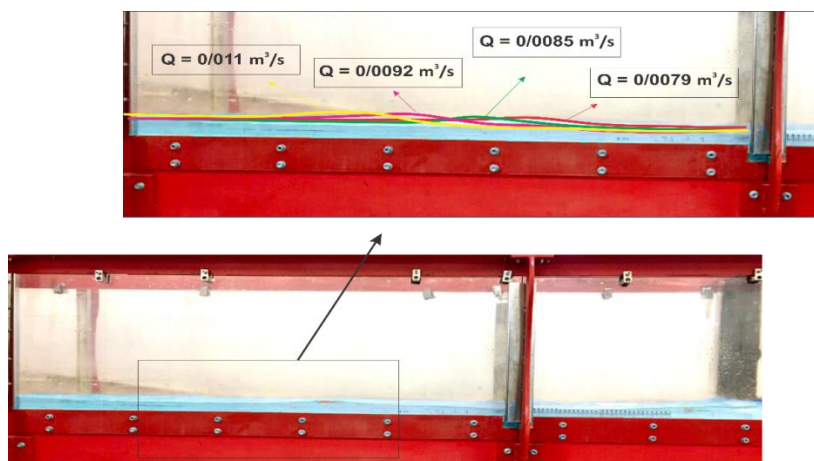


Fig. 4 Flow pattern at downstream of sluice gate

شکل ۴ الگوی جریان در پایین دست دریچه کشویی

پایین دست آستانه می شود. در این حالت تشکیل جریان های چرخشی، سبب جهت گیری بخشی از خطوط جریان به سمت بالادست می شود. این ویژگی جریان در شکل ۵، با خطوط قرمز رنگ مشخص شده است. این امر در همه شکل های به کار گرفته شده در این تحقیق مشاهده شد. بنابراین می توان گفت، شکل هندسی آستانه تأثیر مهمی بر نیروهای اینرسی جریان خواهد داشت. بررسی الگوی جریان در آستانه استوانه ای و نیم استوانه ای و هر می نشان داد که آستانه هر می به دلیل شیب دار بودن

جاگذاری آستانه در شکل های هندسی متفاوت، الگوی جریان عبوری از دریچه کشویی را تحت تأثیر قرار داد. در این تحقیق، با توجه به بالابودن عدد رینولدز، تأثیر لزوجت در قسمت های کمتری مشاهده می شود و تغییر مسیر جریان اندک است. در واقع افزایش عدد رینولدز سبب می شود تا نیروهای اینرسی غالب بر نیروی لزوجت شوند. همین امر سبب می شود تا جریان عبوری از سطح آستانه، قادر به حفظ الگوی جریان متناسب با شکل آستانه نباشد. در نتیجه، سبب پیدایش پدیده جدایش جریان در



می‌شود. عدم تابعیت خطوط جریان از شکل هندسی، در آستانه مکعب‌مستطیلی به وضوح قابل رؤیت می‌باشد. تا جاییکه سبب ایجاد جریان‌های پرتابی شده است. همین عامل سبب ایجاد افت انرژی بیشتری در مقایسه با دیگر شکل‌های آستانه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت این آستانه با ایجاد ویژگی جدایش در الگوی جریان، سبب کاهش شایان ملاحظه‌ی سرعت در پایین‌دست آستانه می‌شود. شکل ۶، الگوی جریان در شکل‌های هندسی متفاوت آستانه را نشان می‌دهد.

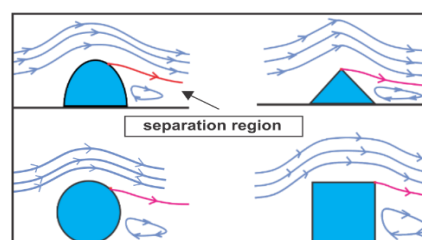


Fig. 5 Schematic view of flow lines

شکل ۵ حالت شماتیک خطوط جریان

ضلع آن در پایین‌دست سبب یکنواختی چشمگیری در خطوط جریان عبوری نسبت به دیگر شکل‌های هندسی

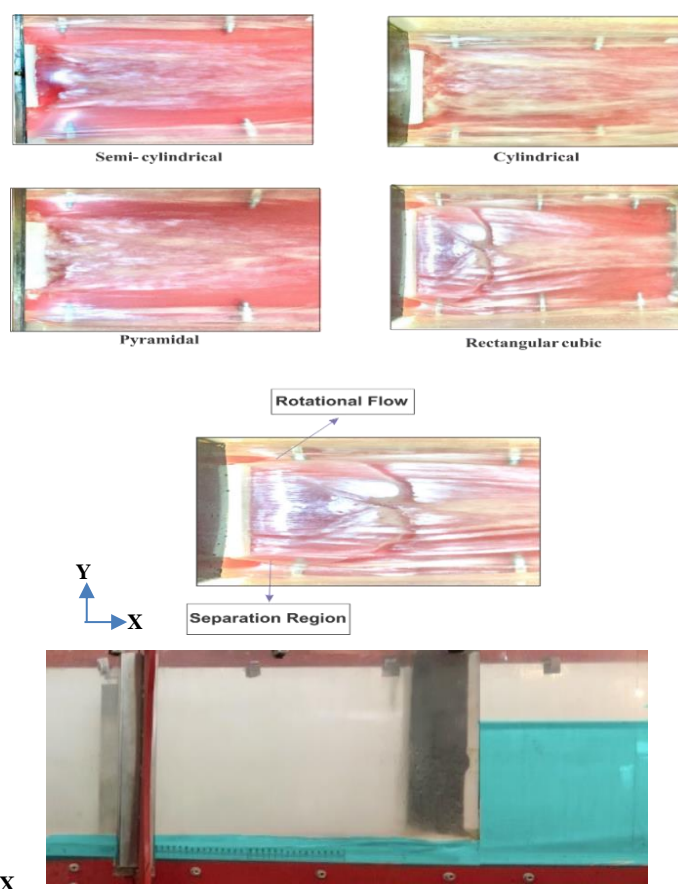


Fig. 6 Flow pattern at different geometry of sill

شکل ۶ جریان عبوری از تاج آستانه با هندسه متفاوت در جهات مختلف

به طوری که با افزایش عرض آستانه، زاویه مقطع ۷ کاهش می‌یابد. افزایش عرض آستانه از ۵ به ۲۰ سانتی‌متر با هندسه مکعب‌مستطیلی، برابر شکل ۷، با کاهش در میزان بازشدگی دریچه، جریان‌های پرتابی عبوری از سطح آستانه را نیز تشدید می‌کند.

با توجه به الگوی جریان در آستانه با شکل‌های هندسی متفاوت، آشکار است که مشخصه‌های آن به شکل آستانه مرتبط است. در حالت دوم با ثابت در نظر گرفتن هندسه آستانه، الگوی جریان با تغییر در عرض آستانه بررسی شد. در هندسه ثابت با افزایش عرض آستانه، زاویه خطوط جریان در مقطع ۷ شکل در پایین‌دست تغییر می‌کند.

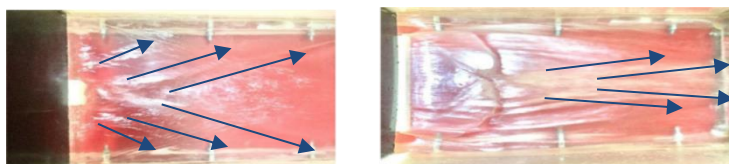


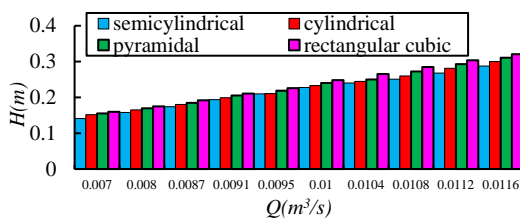
Fig. 7 Flow pattern at different widths of sil

شکل ۷ خطوط جریان با آستانه در عرض‌های متفاوت

می‌توان گفت در این شکل هندسی سرعت در پایین دست آستانه نسبت به آستانه هرمی کاهش چشمگیری می‌یابد. برای درک تأثیر شکل و هندسه آستانه بر عمق آب بالادست، آستانه با عرض ثابت ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد. بررسی عمق آب بالادست در ریچه‌کشویی ( $H$ )، بیانگر این است که در یک عرض و دبی ثابت، عمق آب بالادست در آستانه مکعبی در مقایسه با شکل‌های دیگر بیشترین میزان را دارد. در شکل ۹، محور افقی و قائم به ترتیب بیانگر دبی ورودی و عمق آب بالادست در ریچه می‌باشد. با توجه به نتایج بیشترین عمق آب بالادست، پس از آستانه مکعبی، به ترتیب برای آستانه هرمی، استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای اختصاص می‌یابد.

تغییرپذیری عمق آب بالادست در ریچه بیانگر تأثیر شکل آستانه بر ویژگی‌های جریان می‌باشد. با توجه به تغییر این فراسنجه، سرعت و در پی آن عدد فرود نیز در بالادست در ریچه بررسی شد. مقایسه تغییرپذیری سرعت در آستانه نیم‌استوانه‌ای با آستانه استوانه‌ای، نشان داد که جریان با آستانه نیم‌استوانه‌ای، بیشترین سرعت در بالادست در ریچه را دارد. کاهش عمق آب پشت در ریچه در این شکل، نسبت به آستانه‌های دیگر نیز این موضوع را تأیید می‌کند. علت کاهش سرعت در آستانه استوانه‌ای نسبت به آستانه نیم‌استوانه‌ای چنانچه پیشتر نیز بحث شد، فرورفتگی شکل هندسی آستانه استوانه‌ای در قسمت پایین آن می‌باشد. بررسی سرعت در آستانه مکعبی و هرمی شکل، گویای این است که جریان در آستانه هرمی شکل، دارای سرعت بیشتری نسبت به آستانه مکعبی می‌باشد. دلیل هیدرولیکی این امر، شیب‌دار بودن ضلع هرم در پایین دست در ریچه‌کشویی می‌باشد که سبب می‌شود جریان پس از عبور از سطح بالایی آستانه، با حرکت بر سطح شیب‌دار دارای سرعت بیشتری باشد. درحالی‌که در

در شکل ۸، محور افقی نسبت بی بعد عرض آستانه بر عمق آب بالادست و محور عمودی ضریب‌دبی جریان می‌باشد. بررسی ضریب‌دبی در شکل‌های هندسی مختلف نشان داد که ضریب‌دبی جریان، از شکل هندسی آستانه تأثیر می‌پذیرد. به طوری که آستانه نیم‌استوانه‌ای بیشترین ضریب‌دبی را در مقایسه با دیگر هندسه‌ها دارد. مقایسه ضریب‌دبی در آستانه نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای نشان داد که با توجه به همانندی هندسی این دو آستانه در سطح بالایی، تأثیر متفاوتی بر ضریب‌دبی جریان دارند. به طوری که ضریب‌دبی آستانه نیم‌استوانه‌ای در مقایسه با آستانه استوانه‌ای، بیشتر برآورد شد. با توجه به شکل هندسی این دو آستانه، روشن می‌شود که قسمت پایین آستانه استوانه‌ای به علت قوس دار بودن، سبب افت زیاد جریان در این ناحیه می‌شود. همین علت باعث کاهش ضریب‌دبی این آستانه نسبت به آستانه نیم‌استوانه‌ای می‌شود. در آستانه هرمی، شیب‌دار بودن ضلع در قسمت بالادست آستانه، سبب جداسازی جریان در پشت آستانه می‌شود. این موضوع باعث به وجود آمدن خطوط جریان نامتقارن در زیر در ریچه می‌شود. در واقع می‌توان گفت، این شکل آستانه، همگرایی جریان در بالادست در ریچه را نسبت به آستانه استوانه‌ای کاهش می‌دهد. از سویی جریان پس از عبور از بالاترین قسمت این آستانه، با عبور از روی شیب ضلع آن در پایین دست در ریچه افزایش سرعت را به دنبال دارد. بررسی ضریب‌دبی در آستانه با هندسه مکعب مستطیلی، بیانگر کاهش ضریب‌دبی در این آستانه نسبت به دیگر شکل‌های یاد شده می‌باشد. با توجه به الگوی جریان، این آستانه سبب تشدید جریان‌های چرخشی در پایین دست آستانه می‌شود. همین امر و از سویی شکل‌گیری جریان‌های پرتابی در جلوی این آستانه سبب کاهش سرعت در این ناحیه می‌شود. بنابراین

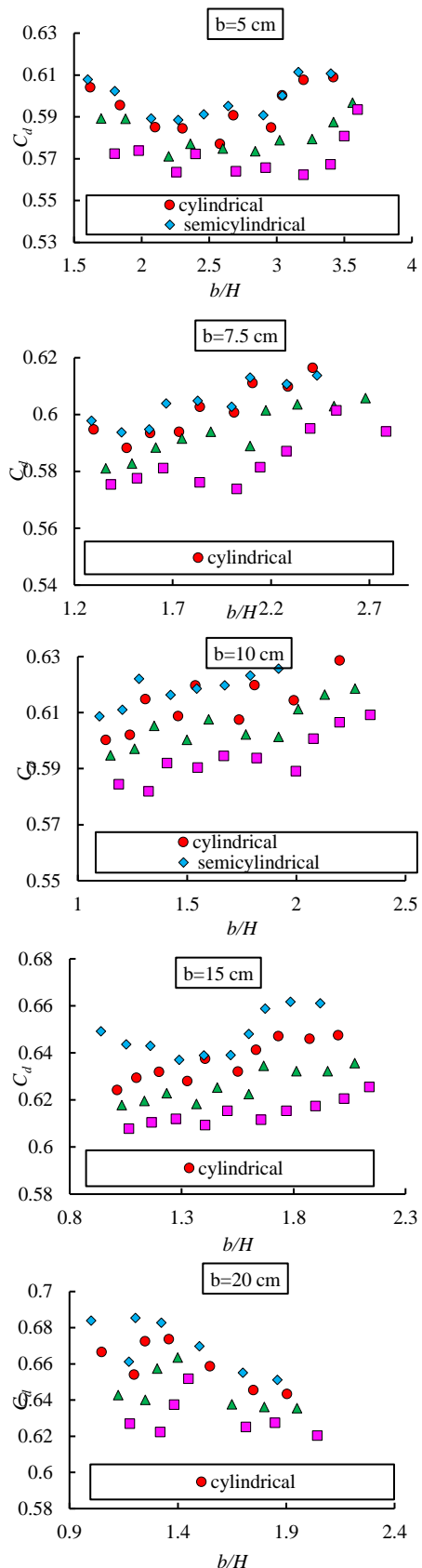


**Fig. 9** Changes in upstream flow depth of sluice gate at different geometric shapes of sill

شکل ۹ تغییرپذیری عمق آب بالادست دریچه در هندسه‌های متفاوت آستانه

آستانه مکعبی، جریان به یکباره از روی آستانه به کف فلوم برخورد کرده و سبب ایجاد جریان‌های چرخشی می‌شود. در واقع پراکنش یکنواخت جریان در پایین دست آستانه هرمی، سبب افزایش سرعت در مقایسه با آستانه مکعبی می‌شود. تأثیر شکل آستانه بر سرعت و عدد فرود جریان در بالادست دریچه کشویی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج، آستانه مکعبی شکل کمترین سرعت و آستانه نیم‌استوانه‌ای بیشترین سرعت جریان را در بین شکل‌های هندسی آستانه دارد. جدول ۱، بیانگر محدوده تغییرپذیری عدد فرود و سرعت در بالادست دریچه کشویی و ضریب دبی جریان با به کارگیری آستانه در شکل‌های متفاوت هندسی می‌باشد. با توجه به نتایج، محدوده عدد فرود جریان در آستانه مکعبی شکل پایین‌ترین میزان را در مقایسه با دیگر شکل‌ها دارد. بررسی این فراسنجه با تغییر در شکل آستانه نشان داد که در یک عرض و دبی ثابت، بیشترین میزان عدد فرود جریان برای آستانه نیم‌استوانه‌ای و کمترین آن به آستانه مکعبی شکل مربوط می‌شود.

بررسی نتایج به دست آمده از جاگذاری آستانه در شکل‌های هندسی متفاوت در زیر دریچه کشویی، گویای این است که به کارگیری آستانه نیم‌استوانه‌ای نسبت به دیگر شکل‌ها، سبب افزایش چشمگیری در میزان ضریب دبی می‌شود. این آستانه در کمترین عرض (  $b=5$  cm)، ضریب دبی را به طور میانگین  $0.1/2$ ،  $0.8/2$  و  $0.5/4$  درصد نسبت به آستانه استوانه‌ای، هرمی و مکعب مستطیلی افزایش می‌دهد. این در حالی است که در بیشترین عرض



**Fig. 8** Effect of sill different geometry on Discharge coefficient

شکل ۸ تأثیر هندسه آستانه بر ضریب دبی

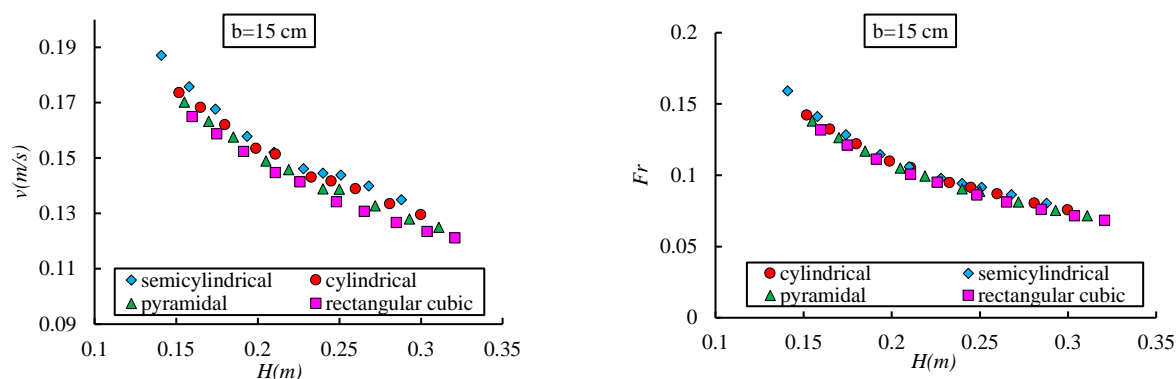


Fig. 10 Changes in upstream velocity and froud number at different geometry of sill

شکل ۱۰ تغییرپذیری سرعت و عدد فرود بالادست دریچه در آستانه با هندسه متفاوت

جدول ۱ تغییرپذیری عدد فرود و سرعت در بالادست دریچه و ضریب دبی با تغییر در هندسه آستانه در عرض ۱۵ سانتی متر

Table 1 Changes in upstream velocity and froud number and discharge coefficient at different geometric shapes of sill at (b=15 cm)

Sill Geometry	Fr (-)	V(m/s)	Ca (-)
Semi cylindrical	0.08- 0.15	0.13- 0.18	0.649- 0.661
Cylindrical	0.075- 0.14	0.129- 0.173	0.647- 0.624
Pyramidal	0.071- 0.138	0.124- 0.170	0.617- 0.635
Rectangular cubic	0.06- 0.131	0.121- 0.164	0.607- 0.625

با توجه به جدول ۲، با افزایش عرض آستانه از ۵ به ۲۰ سانتی متر، محیط خیس شده آن به اندازه ۱۵ سانتی متر افزایش می یابد. در حالی که بررسی سطح بازشدگی زیر دریچه نشان داد که افزایش عرض، گستره بازشدگی زیر دریچه را ۴۲ درصد کاهش می دهد. همین علت سبب تغییر در میزان ضریب دبی جریان خواهد شد. چرا که افزایش عرض آستانه، گستره مقطع جریان عبوری از زیر دریچه را کاهش می دهد. در شکل های ۱۱ و ۱۲ محیط خیس شده و تأثیر سطح بازشدگی زیر دریچه بر ضریب دبی نشان داده شده است.

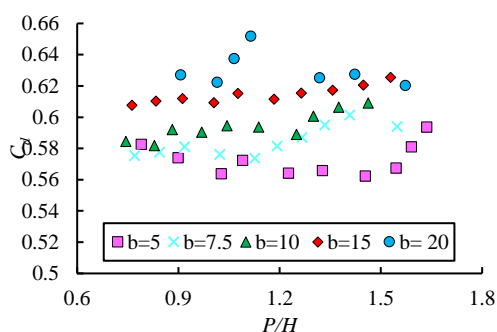


Fig. 11 Effect of sill wetted perimeter on Discharge coefficient

شکل ۱۱ تغییرپذیری ضریب دبی با محیط خیس شده آستانه

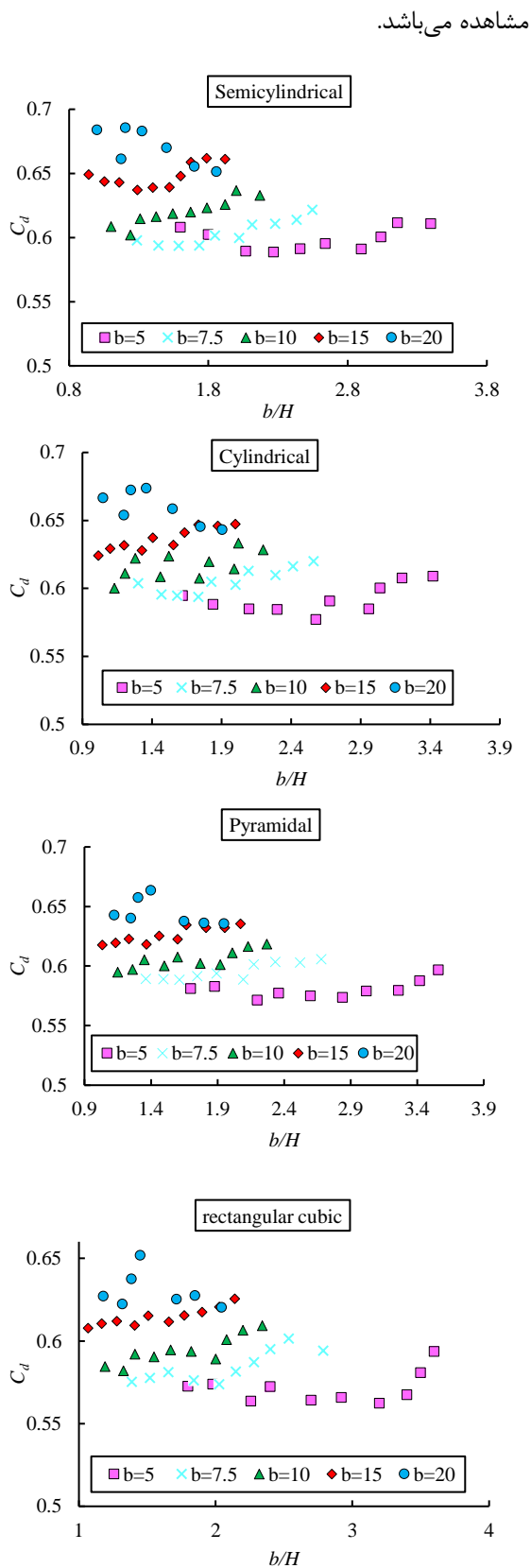
نسبت به شکل های یاد شده به ترتیب برابر ۱/۶، ۳/۷، ۵/۹ برآورد شد.

در این تحقیق فراسنجه عرض آستانه به عنوان دیگر عامل تأثیرگذار بر ضریب دبی جریان عبوری از دریچه کشویی مطرح شد. روش کار به این صورت قابل توضیح است که آستانه غیر هم عرض سبب تقسیم مقطع عرضی دریچه، به سه ناحیه برابر شکل ۲ می شود. ناحیه (A<sub>1</sub> و A<sub>3</sub>) که در آن دریچه کشویی بدون آستانه می باشد و ناحیه A<sub>2</sub> که در آن آستانه هم عرض دریچه تعبیه شده است. با اعمال میزان ارتفاع آستانه در حالت با آستانه، شکل نهایی به صورت رابطه ۱۰ به دست آمد.

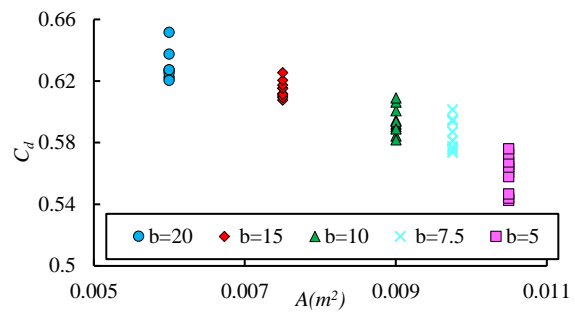
جدول ۲ محیط خیس شده آستانه و گستره بازشدگی در عرض های متفاوت آستانه

Table 2 Gate opening area and wetted perimeter for different widths of sills

b (cm)	P (cm)	At (m <sup>2</sup> )
5	11	0.0105
7.5	13.5	0.00975
10	16	0.009
15	21	0.0075
20	26	0.006



**Fig. 13** Discharge coefficient for different widths of sills  
 شکل ۱۳ تأثیر عرض‌های مختلف آستانه بر ضریب‌دبی



**Fig. 12** Effect of gate opening area on Discharge coefficient

شکل ۱۲ تأثیر سطح بازشدگی زیر دریچه بر ضریب‌دبی

برای بررسی تغییرپذیری عرض بر ضریب‌دبی جریان، آستانه‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی در عرض‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر مقایسه شد. در شکل ۱۳ محور قائم ضریب‌دبی جریان و محور افقی بیانگر فراسنجه بی‌بعد نسبت عرض آستانه بر عمق آب بالادست می‌باشد.

آزمایش‌های مربوط به هندسه آستانه نشان داد که آستانه نیم‌استوانه‌ای بیشترین میزان ضریب‌دبی را در بین شکل‌های هندسی دارد. بیشینه ضریب‌دبی آستانه نیم‌استوانه‌ای نسبت به دیگر شکل‌ها، در شکل ۱۳ نیز قابل مشاهده می‌باشد. از سویی نتایج تغییر عرض آستانه نشان داد که بیشترین ضریب‌دبی به آستانه با بیشترین عرض مربوط می‌شود. در جدول ۳، عدد فرود و سرعت در بالادست دریچه و ضریب‌دبی جریان در عرض‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر گزارش شده است. نتایج گویای این است که افزایش عرض آستانه عدد فرود بالادست را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. به طوری که در کمترین دبی اعمال شده، با افزایش عرض آستانه از ۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر عدد فرود از ۰/۳۳۹ به ۰/۰۹۴ کاهش یافت. افزایش عرض آستانه با کاهش بازشدگی، سرعت جریان عبوری را در زیر دریچه افزایش می‌دهد. با بررسی نتایج می‌توان گفت، جاگذاری آستانه به عرض ۲۰ سانتی‌متر در همه شکل‌های هندسی، ضریب‌دبی را به طور میانگین ۱۰ درصد نسبت به آستانه با عرض ۵ سانتی‌متر افزایش می‌دهد. نتایج کاربرد آستانه در چهار شکل هندسی و در عرض متفاوت به شرح شکل ۱۴ می‌باشد. با توجه به نتایج، تأثیر شکل و عرض آستانه بر ضریب‌دبی جریان قابل

جدول ۳ محدوده عدد فرود، سرعت و ضریب دبی در بالادست دریچه در عرض‌های متفاوت آستانه

**Table 3** Changes in upstream velocity and froud number and discharge coefficient at different widths of sill

Sill width	Fr (-)	V (m/s)	Ca (-)
b = 5	0.339- 0.175	0.310- 0.227	0.572- 0.593
b = 7.5	0.281- 0.148	0.273- 0.203	0.575- 0.599
b = 10	0.230- 0.122	0.239- 0.179	0.584- 0.609
b = 15	0.159- 0.08	0.187- 0.134	0.607- 0.625
b = 20	0.094- 0.048	0.131- 0.093	0.614- 0.630

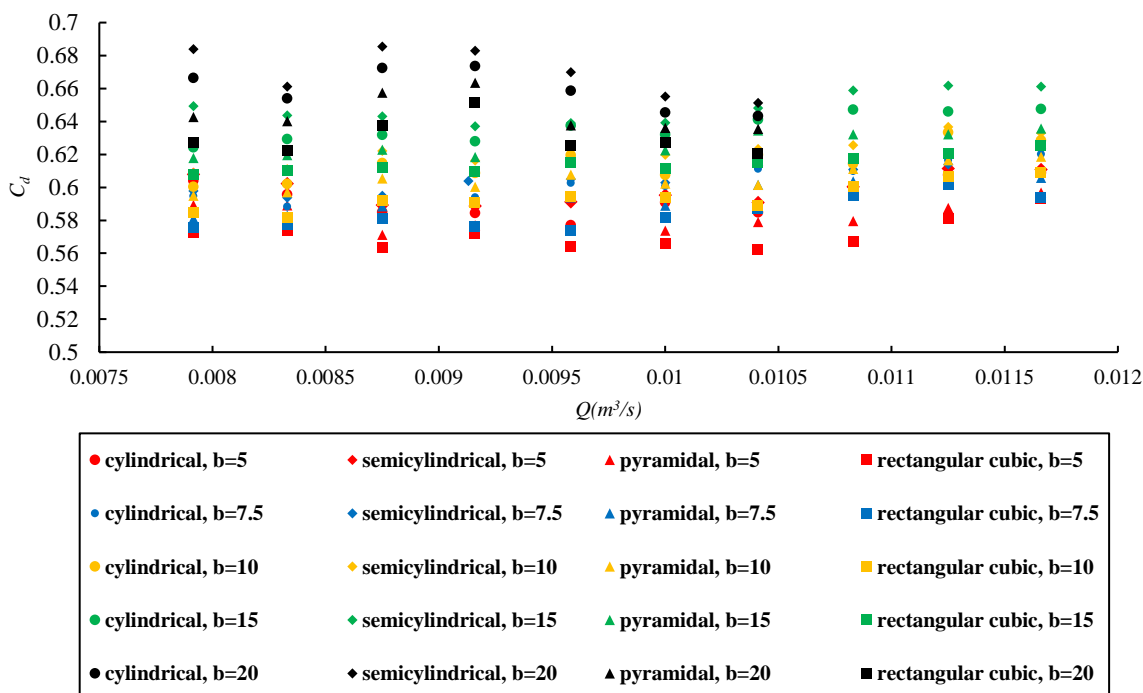


Fig. 14 Changes in Discharge coefficient for sills used in this study  
 شکل ۱۴ تغییرپذیری ضریب دبی در آستانه‌های به کاررفته در این تحقیق

عرض آستانه گویای این است که ضریب دبی در صورت به کارگیری آستانه با عرض بزرگتر افزایش می‌یابد. بنابراین در این تحقیق کمترین میزان ضریب دبی به آستانه مکعب‌مستطیلی با عرض ۵ سانتی‌متر و بیشترین میزان آن به آستانه نیم‌استوانه‌ای با عرض ۲۰ سانتی‌متر مربوط می‌شود.

در تکمیل نتایج، میانگین درصد افزایش ضریب دبی در ۲۰ مدل فیزیکی آستانه نسبت به حالت بدون آستانه در جدول ۴، بیان شد. بنابر نتایج بررسی‌های صورت گرفته بر شکل هندسی، بیشترین میزان ضریب دبی با جاگذاری آستانه نیم‌استوانه‌ای و کمترین مقدار آن در آستانه مکعب‌مستطیلی حاصل می‌شود. از سویی تغییرپذیری

جدول ۴ درصد افزایش ضریب دبی نسبت به حالت بدون آستانه در آستانه‌های به کار گرفته شده در تحقیق حاضر

**Table 4** Increase in discharge coefficient compared to non silled gate for sills used in this study

Sill width (cm)	Semi cylindrical	cylindrical	pyramidal	rectangular cubic
b = 5	6.5	5.6	3.5	1.6
b = 7.5	7.4	7.4	5.7	3.9
b = 10	10.2	9.7	7.7	5.7
b = 15	15.3	13.2	11.4	9.3
b = 20	19.1	17.2	14.7	12.1

نظر گرفته شد. ضریب‌های A، B، C و D به‌طور پیش‌فرض برابر یک لحاظ شد. برای افزایش دقت رابطه ارائه شده، تغییرپذیری‌هایی در شکل معادله پیشنهادی صورت گرفت و در نهایت معادله استخراج شده به صورت رابطه‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ ارائه شد.

$$C_d = A \times \left(\frac{b}{H}\right)^B + C \times \left(\frac{P}{H}\right)^D \quad (14)$$

جدول ۵ برآورد میزان ضریب‌های رابطه ۱۴

Table 5 Value of constant parameters of Equation 14

Sill Geometry	a	b	c	d	RMSE	KGE	R <sup>2</sup>	Equ
Semi cylindrical	0.302	-0.550	0.388	0.387	0.008	0.92	0.90	(15)
cylindrical	0.694	-0.199	0.155	0.243	0.0088	0.90	0.89	(16)
pyramidal	1.199	-0.102	-0.532	-0.262	0.0065	0.93	0.92	(17)
rectangular cubic	0.376	-0.370	0.279	0.451	0.006	0.95	0.91	(18)

مکعب‌مسططیلی، جریان‌های پرتابی در پایین‌دست دریچه مشاهده شد. از سویی خطوط جریان با تغییر در عرض آستانه، سبب ایجاد جریان‌های v شکل در سطح جریان می‌شود. بنابراین می‌توان گفت، الگوی جریان عبوری از دریچه‌کشویی تابع شکل هندسی آستانه و عرض آن می‌باشد. بررسی ضریب‌دبی در ۲۰ مدل فیزیکی آستانه نشان داد که بیشترین میزان ضریب‌دبی، پس از آستانه نیم‌استوانه‌ای به‌ترتیب به آستانه‌های استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مسططیلی اختصاص می‌یابد. این افزایش به‌این‌صورت بیان می‌شود که در کمترین عرض (b=5 cm) آستانه‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مسططیلی به ترتیب ضریب‌دبی را ۵/۶، ۳/۵ و ۱/۶ درصد نسبت به حالت بدون آستانه افزایش دادند. نتایج بررسی عرض آستانه‌ها در ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر گویای این است که افزایش عرض آستانه با کاهش در میزان بازشدگی دریچه، ضریب‌دبی را افزایش می‌دهد. چرا که با کاهش سطح مقطع جریان، سرعت و به تبع آن دبی عبوری از دریچه‌کشویی افزایش می‌یابد. تغییر عرض آستانه از ۵ به ۲۰ سانتی‌متر نشان داد که ضریب‌دبی در شکل‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مسططیلی به‌طور میانگین ۱۹/۱، ۱۷/۲، ۱۴/۷ و ۱۲/۱ درصد نسبت به حالت بدون آستانه افزایش داشته است. در نهایت رابطه چندجمله‌ای برای برآورد ضریب‌دبی عبوری از دریچه‌کشویی با آستانه در شکل‌های هندسی

### ۳-۱- برآورد رابطه ضریب‌دبی و شاخص‌های

#### ارزیابی

برای برآورد رابطه ضریب‌دبی عبوری از دریچه‌کشویی با آستانه، بنابر تجزیه و تحلیل ابعادی فراسنجه‌های بی‌بعد  $P/H$  و  $b/h$  به‌کار گرفته شد. نخست شکل کلی معادله با استفاده از Solver نرم‌افزار Excel به صورت رابطه ۱۴ در

بررسی میزان‌های مشاهده‌ای و داده‌های حاصل از رابطه پیشنهادی نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا در همه شکل‌های هندسی نزدیک به عدد صفر برآورد شد. لذا رابطه‌های ارائه شده دارای دقت بالایی می‌باشند. همچنین با توجه به محدوده  $0.7 < KGE < 1$  می‌توان گفت سازگاری بالایی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از رابطه‌های ارائه شده در هر چهار هندسه آستانه برقرار است. برآورد میزان  $R^2$  نزدیک به عدد یک گویای این است که همبستگی بالایی میان داده‌های رابطه‌های ارائه شده با داده‌های مشاهده‌ای وجود دارد. شاخص‌های آماری نشان داد که رابطه‌های پیشنهادی برای شکل‌های متفاوت هندسی دارای دقت بالایی می‌باشند. لذا رابطه‌های ۱۵ تا ۱۸ را می‌توان در برآورد ضریب‌دبی عبوری از دریچه با آستانه در شکل‌های هندسی یاد شده، با اثر دادن فراسنجه‌های بی‌بعد محیط خیس شده و عرض آستانه به کار گرفت.

### ۴- نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تأثیر شکل‌های هندسی متفاوت آستانه شامل نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مسططیلی، بر ضریب‌دبی و الگوی جریان بررسی شد. مقایسه خطوط جریان در بین آستانه‌های استوانه‌ای و هرمی نشان داد که شیب‌دار بودن ضلع هرم سبب همگرایی جریان در پایین‌دست دریچه می‌شود. درحالی‌که در آستانه

Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R. and Abraham, J. (2020). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *J. Environmental Science and Technology*. 17(5), 2927–2936.

Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Ebadzadeh, P. and Abbaszadeh, H. (2021a). Numerical investigation on effective parameters on hydraulic flows in a sluice gate with sill on free-flow condition. *J. Environment and Water Engineering*. doi: 10.22034/jewe.2021.295538.1596

Daneshfaraz, R., Norouzi, R. and Abbaszadeh, H. (2021b). Numerical investigation on effective parameters on hydraulic flows in chimney proportional weirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. doi: 10.22059/ijswr.2021.322751.668944. (In Persian)

Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Hasanniya, V. (2019). Experimental investigation of energy dissipation in vertical drops equipped with a horizontal screen under supercritical flow, *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(6), 1421-1436. (In Persian)

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. doi: 10.22055/jhs.2022.39208.1196.

Daneshfaraz, R., Norouzi, R. and Abbaszadeh, H. (2022). Experimental Investigation of Hydraulic Parameters of Flow in Sluice Gates with Different Openings. *Environment and Water Engineering*, doi: 10.22034/jewe.2022.321259.1700.

Golmohammadi, M.H. and Beyrami, M.K. (2011). Estimation of discharge for free flow under sluice and radial gates. *J. Water and wastewater*. 22(78), 94- 101. (In Persian)

Ilkhanipour Zeinali, R., Mousavi Jahromi, H., Kashefipour Dezfouli, M. and Fathi Mogaddam, M. (2015). Influence of gate plate slope on hydraulic characteristics of sluice gates. *J. water and soil resources conservation*. 4(4), 1-10. (In Persian)

Jalil, S., Serhan, S. and Subhi Ibrahim, S. (2016). Effect of prismatic sill on the performance of free flow under sluice gate. *J. University of Zhako*. 4(A)(1), 150-158.

Karami, S., Heidari, M.M. and Adib Rad, M.H. (2020). Investigation of Free Flow Under the Sluice

متفاوت ارائه شد. رابطه‌های پیشنهادی تابع شکل آستانه عرض آن می‌باشد. بررسی شاخص‌های آماری دقت بالای رابطه ارائه شده در برآورد دبی عبوری از دریچه‌کشویی را نشان داد. بنابراین می‌توان برای برآورد ضریب‌دبی در محدوده تحقیق حاضر به کار گرفته شوند.

## ۵ - سپاسگذاری

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

## ۶ - فهرست نشانه‌ها

A	مساحت بازشدگی زیر دریچه ( $m^2$ )
B	عرض آبراهه (cm)
b	عرض آستانه (cm)
$C_d$	ضریب‌دبی جریان (-)
g	شتاب گرانش زمین ( $ms^{-2}$ )
G	بازشدگی دریچه
H	عمق آب بالادست (cm)
Q	دبی جریان ( $m^3/s$ )
V	سرعت جریان (m/s)
Z	ارتفاع آستانه (cm)
$\mu$	گرانروی پویایی ( $kg.sm^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-1}$ )

## ۷ - منبع‌ها

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. *J. Water and Soil Science*. 29(4), 85-96. (In Persian)

Barghi Khezerloo, A., Khalili Shayan, H., Farhoudi, J. and Vatankhah, A. (2016). Developing a new method for estimating discharge coefficient of sluice gates under free and submerged flow conditions. *J. Water and soil science*. 26(4.1), 207-221. (In Persian)

Daneshfaraz, R., Ghahramanzadeh, A. and Ghaderi, A. (2016). Investigation of the Effect of Edge Shape on Characteristics of Flow Under Vertical Gates. *J. American water works association*. 108(8), E425- E432.



Pattern of the Gates. Master of Science. University of Tabriz, Tabriz, Iran. 104 p.

Shivapur, A.V. and Sessa Prakash, M.N. (2005). Incined sluice gate for free measurement. *ISH J. Hydraulic Engineering*. 11(1), 46- 56.

Salmasi, F. and Norouzi, R. (2020). Investigation of different geometric shapes of sills on the discharge coefficient of a vertical sluice gate. *J. Amirkabir Civil Engineering*. 5(2), 1-3. (In Persian)

Gate with the Sill Using Flow-3D Model. *J. Iran Sci Technol Trans Civ Eng*. 44, 317–324, Doi: 10.1007/s40996-019-00310-x.

Khalili Shayan, H., Farhodi, J. and Roshan, R. (2014). Estimation of flow discharge under the sluice and radial gates based on contraction coefficient. *J. Science and Technology Transactions of Civil Engineering*. 38(C2), 449-463.

Rezavand, N. (2018). Numerical Investigation of the Effect of Sill Height and Shape on the Flow

