

## Evaluation of Outflow Relationships from Sluice Gates

AMIN SEYEDZADEH<sup>1</sup>, MEHDI YASI<sup>1\*</sup>, JAVAD FARHOUDI<sup>1</sup>, ANDREAS MALCHEREK<sup>2</sup>

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Hydromechanics and Hydraulic Engineering, Bundeswehr University Munich, Munich, Germany.

(Received: June. 8, 2021- Revised: July. 1, 2021- Accepted: July. 5, 2021)

### ABSTRACT

One of the structures for controlling and measuring flow in open channels are the sluice gates. In this study, to estimate the outflow from the sluice gates, the existing relationships for orifices evaluated theoretically and experimentally. A new method was established for estimating the contraction coefficient and energy loss coefficient under free-flow condition. Some equations proposed to estimate the outflow from sluice gates under submerged flow conditions using the energy-moment principles and relationships for orifices. In order to evaluate the accuracy of recommended relationships, the outflow from the sluice gates was experimentally tested in a channel of 18 meters long and one meter wide. Comparison of the results showed that all the presented orifice relationships have similarly good capabilities to estimate the outflow from the sluice gates under free-flow conditions. It was concluded that the applying of Henry relationship would be the simplest one in determining the contraction coefficient. Under submerged flow conditions, all the orifice relationships have competent accuracy in estimating the flow rate, with an order of errors less than 10 percent. Under full ranges of free to submerged flow conditions, the discharge coefficient can be determined by the relationship of Rajaratnam and Subramanya as a function of the head loss coefficient, the contraction coefficient and the opening-to-depth ratio.

**Keywords:** Sluice Gate, Orifice Relationships, Contraction Coefficient, Head Loss Coefficient, Free and Submerged Flows.

## ارزیابی روابط برآورد بده جریان خروجی از دریچه‌های کشویی

امین سیدزاده<sup>۱</sup>، مهدی یاسی<sup>۱\*</sup>، جواد فرهودی<sup>۱</sup>، آندریاس مالچریک<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه مهندسی هیدرومکانیک و هیدرولیک، دانشگاه بوندسور مونیخ، مونیخ، آلمان.

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۳/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۱۴)

### چکیده

دریچه‌های کشویی از جمله سازه‌های کنترل و اندازه‌گیری جریان در آبراهه‌های روباز هستند. در این مطالعه، روابط موجود جریان از روزنه‌ها، برای تخمین بده جریان خروجی از دریچه کشویی، به صورت نظری و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای شرایط جریان آزاد، یک روش جدید جهت تخمین ضریب فشردگی و روابطی برای تعیین ضریب افت انرژی ارائه گردیده است. برای شرایط جریان مستغرق، با استفاده از روش انرژی-مومنتم و روابط روزنه‌ها، روابطی جهت تخمین جریان خروجی از دریچه‌های کشویی ارائه شد. به منظور ارزیابی درستی این روابط، جریان خروجی از یک دریچه کشویی در کانالی به طول ۱۸ متر و عرض حدود یک متر مورد آزمون تجربی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که تحت شرایط جریان آزاد، همه روابط روزنه‌ای موجود، قابلیت خوب و همسانی دارند. کاربرد رابطه هنری در تعیین ضریب فشردگی جریان ساده‌تر است. در شرایط جریان مستغرق، اختلاف برآورد ضریب بده جریان از روابط مختلف (نظیر روابط هنری، راجاراتنام-سابرامانیا) کمتر از ۱۰ درصد و در دامنه قابل قبولی قرار دارند. برای دامنه جریان آزاد تا مستغرق، کاربرد رابطه راجاراتنام-سابرامانیا برای برآورد ضریب بده جریان مناسب‌تر بوده و تنها وابسته به ضریب افت انرژی، ضریب فشردگی جریان و نسبت میزان بازشدگی دریچه به عمق بالادست جریان است.

**واژه‌های کلیدی:** دریچه کشویی، روابط روزنه، ضریب فشردگی جریان، ضریب افت انرژی، جریان آزاد و مستغرق.

### مقدمه

به منظور اعمال مدیریت در بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی و توزیع عادلانه آب بین مصرف‌کننده‌ها، اندازه‌گیری جریان در نقاط تحویل ضروری می‌باشد. با وجود پیشرفت‌های زیاد در زمینه ساخت دستگاه‌های پیشرفته اندازه‌گیری جریان، به دلیل بالا بودن هزینه‌های ساخت، نگهداری و بهره‌برداری و همچنین شرایط متفاوت اجتماعی در مناطق مختلف، استفاده از این سازه‌ها چندان متداول نبوده، و همچنان از سازه‌های سنتی استفاده می‌شود. دریچه‌ها از جمله سازه‌هایی هستند که علاوه بر استفاده از آن‌ها برای قطع و وصل جریان و کنترل سطح جریان، قابلیت استفاده به عنوان سازه‌های اندازه‌گیری جریان را نیز دارا هستند. دریچه‌های قطاعی به دلیل نیاز به نیروی بالابرنده کمتر، بیشتر در سرریز سدهای بزرگ و سدهای تنظیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما در سایر قسمت‌های شبکه‌های آبیاری استفاده از دریچه‌های کشویی بیشتر متداول است. با توجه به کاربرد گسترده این دریچه‌ها در سطح شبکه‌های آبیاری و اهمیت اندازه‌گیری جریان با استفاده از آنها، مطالعات زیادی بر روی آنها انجام شده است.

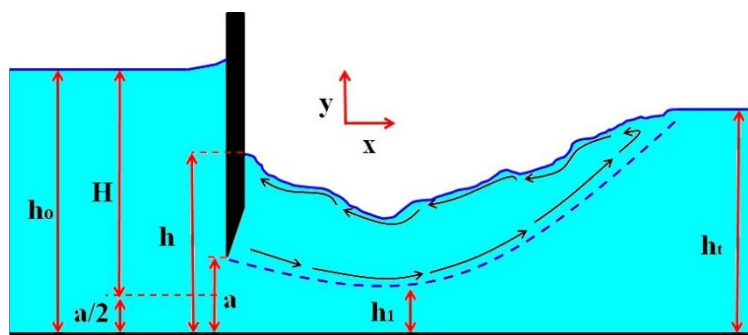
Ferro (2000) با تعیین پارامترهای موثر بر جریان عبوری

از روی سرریز و زیر دریچه تحت شرایط جریان آزاد و با بکارگیری تحلیل ابعادی و نظریه باکینگهام و مفهوم خودتشابهی ناقص، رابطه‌ای بین پارامترهای مورد نظر تعیین نمود. (2001) Ansar در پژوهش خود با تاثیر استغراق به صورت نسبت اختلاف بار آبی طرفین دریچه به بازشدگی دریچه، رابطه ارائه شده توسط Ferro (2000) را به جریان مستغرق عبوری از دریچه کشویی تعمیم داد. (2005) Shammaa et al. با توسعه حل معادلات جریان پتانسیل در جریان چاه‌ها، معادلاتی را برای برآورد سرعت جریان در مقطع بالادست دریچه کشویی ارائه نمودند. (2007) Kim با شبیه‌سازی جریان عبوری از زیر دریچه کشویی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، مقادیر ضریب فشردگی، ضریب بده و توزیع فشار بر روی دریچه کشویی و در طول کانال را در شرایط جریان آزاد تعیین کرد. (2009) Alminagorta and Merkley با بررسی جریان عبوری از زیر دریچه‌های کشویی لبه تیز در کانال‌های مستطیلی، محدوده‌ای از جریان را به عنوان محدوده انتقالی مطرح کردند که حد فاصل جریان روزنه ای و غیر روزنه‌ای است. (2009) Lozano et al. با استفاده از ۱۶۰۰۰ داده صحرایی

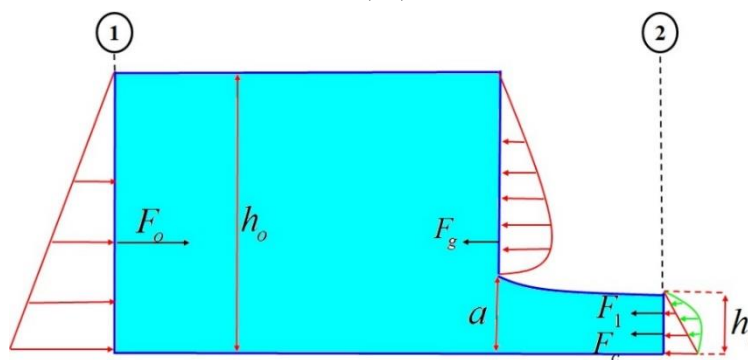
حل همراه با سعی و خطا جهت حل مسائل چهارگانه مربوط به دریاچه‌های کشویی را ارائه دادند. (Ghavidel *et al.* (2018) با استفاده از جعبه ابزار OpenFOAM به مدل‌سازی دو بعدی جریان عبوری از دریاچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق پرداخته و نتایج را با روابط موجود و داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. (Kubrak *et al.* (2020) به بررسی امکان استفاده از دریاچه کشویی به عنوان سازه اندازه گیری جریان تحت شرایط جریان مستغرق پرداختند و با بررسی آزمایشگاهی، نمودارها و روابطی تحلیلی برای ضریب بده آن ارائه کردند.

در حالت کلی جریان عبوری از دریاچه‌ها به صورت جریان از روزنه‌ها در نظر گرفته شده، و از روابط توسعه داده شده برای روزنه‌ها جهت تخمین بده جریان عبوری از دریاچه‌ها استفاده می‌شود. جریان خروجی از یک دریاچه کشویی بصورت شکل ۱ (الف) نمایش داده شده است. در این شرایط، با توجه به متغیر بودن عمق جریان در مقطع روزنه، توزیع عمقی سرعت جریان عبوری از روزنه به صورت رابطه ۱ است.

برداشت شده از ۴ دریاچه کشویی واقع در اسپانیا، به بررسی کارایی معادلات ضریب بده ارائه شده توسط محققین پیشین پرداختند. (Castro- Orgaz *et al.* (2010) با استفاده از روش انرژی- مومنتم و با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح انرژی و مومنتم روابطی را برای تخمین بده جریان عبوری از دریاچه کشویی ارائه دادند. آن‌ها در توسعه روابط خود به جای استفاده از مقطع فشردگی جریان و پایاب برای اعمال رابطه مومنتم، از مقطع مربوط به عمق چسبیده به دریاچه استفاده کردند. (Cassan and Belaud (2011) در پژوهش عددی خود بر روی جریان عبوری از دریاچه‌های کشویی تحت شرایط جریان مستغرق، به این نتیجه رسیدند که در بازشدگی‌های کم ضریب تصحیح انرژی افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده تأثیرات گرانیوی است. (Shayan and Farhoudi. (2013) با استفاده از روابط انرژی و مومنتم، روابطی جهت تعیین ضریب افت انرژی، ضریب بده و آستانه استغراق جریان عبوری از دریاچه کشویی توسعه دادند. (Wu and Rajaratnam (2015) راه‌حلی به صورت حل مستقیم و یا



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمایی از جریان روزنه‌ای از یک دریاچه کشویی و حجم کنترل در نظر گرفته شده تحت شرایط جریان آزاد

دریاچه،  $h_0$ ؛ عمق جریان در بالادست دریاچه،  $h_1$ ؛ عمق جریان در محل فشردگی جریان در پایین دست دریاچه،  $F_g$ ؛ نیروی وارد بر دریاچه،  $F_c$ ؛ اضافه نیروی وارد بر حجم کنترل در محل فشردگی جریان است.

$$V_y = \sqrt{2g(H - y)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در شکل ۱ (الف)،  $a$  میزان بازشدگی دریاچه،  $h_0$  میزان عمق بالادست دریاچه،  $H$  فاصله مرکز بازشدگی دریاچه تا سطح آب،  $x$  محور افقی و  $y$  محور قائم جریان است و در شکل ۱ (ب)،  $F_1$ ؛ نیروی هیدرواستاتیک در محل فشردگی جریان،  $F_o$ ؛ نیروی هیدرواستاتیک در بالادست دریاچه کشویی،  $a$ ؛ میزان بازشدگی

تخمین بده جریان عبوری از دریچه‌های کشویی مناسب‌تر است؟ در این مطالعه به منظور پاسخ به این سوال ابتدا با استفاده از روابط روزنه، روابطی جهت تخمین ضریب فشردگی و ضریب افت انرژی جریان تحت شرایط جریان آزاد توسعه داده شده است. سپس با استفاده از روش انرژی-مومنتم و روابط ارائه شده برای روزنه، روابط جدیدی جهت تخمین ضریب بده جریان عبوری از دریچه‌های کشویی تحت شرایط جریان مستغرق ارائه گردیده است. در نهایت با استفاده از نتایج مربوط به تعیین ضریب فشردگی، ضریب افت انرژی و ضریب بده جریان مستغرق، عملکرد روابط روزنه‌ای برای دریچه‌های کشویی مقایسه خواهد شد.

### مواد و روش‌ها

#### بررسی نظری:

در بخش نظری، به توسعه روابط مربوط به تعیین ضریب فشردگی، ضریب افت جریان عبوری و ضریب بده جریان تحت شرایط جریان مستغرق، به ترتیب زیر پرداخته می‌شود.

#### تعیین ضریب فشردگی جریان از دریچه کشویی قائم

در جریان عبوری از دریچه کشویی قائم تحت شرایط جریان آزاد، حجم کنترلی به صورت شکل ۱ (ب) در نظر گرفته شده است. برای ساده سازی در حل روابط، متغیرهای بی بعدی به صورت  $\omega = a/h_0$  (بازشدگی نسبی)،  $S = h/h_0$  (درجه استغراق نسبی بر اساس عمق چسبیده به دریچه در پایین دست)،  $S' = h_1/h_0$  (درجه استغراق نسبی با استفاده از عمق پایاب) و  $C_c = h_1/a$  (ضریب فشردگی جریان عبوری از دریچه) در نظر گرفته خواهد شد.

از آنجا که توزیع نیرو در مقطع فشردگی جریان، تحت شرایط جریان مستغرق، هیدرواستاتیکی نیست و مقدار آن بیشتر از نیروی هیدرواستاتیک است، بنابراین در این مقطع نیروی اضافه موجود با  $F_c$  نشان داده شده است. Rajaratnam and Subramanya (1967) رابطه‌ای را به صورت زیر برای اضافه بار فشار نسبت به بار فشار هیدرواستاتیکی، در هر عمق نسبت به کف کانال، به صورت زیر ارائه دادند:

$$\frac{\Delta P(y)}{\gamma} = \eta \left( 1 - \frac{y}{h_1} \right) \frac{V_1^2}{2g} \rightarrow 0 \leq y \leq h_1 \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن  $y$ ، فاصله از کف کانال و  $\eta$  ضریب ثابتی است که Rajaratnam and Subramanya (1967) مقدار آن را در فاصله ۱/۲۵ برابر میزان بازشدگی دریچه کشویی، برابر ۰/۰۸ تعیین کردند. با انتگرال گیری از رابطه فوق می‌توان مقدار نیروی اضافی نسبت به نیروی هیدرواستاتیک را در مقطع فشردگی جریان به صورت زیر بیان داشت:

که در آن  $V_y$  سرعت عمقی جریان عبوری از بازشدگی دریچه و  $g$  شتاب جاذبه است. با انتگرال گیری از رابطه فوق نسبت به سطح جریان و ساده سازی آن، رابطه بده عبوری از روزنه به صورت زیر حاصل خواهد شد.

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left[ h_o^{\frac{3}{2}} - (h_o - a)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

رابطه ۲، رابطه‌ای جامع جهت تخمین بده جریان عبوری از روزنه‌ها است، که برای دریچه‌ها نیز قابل کاربرد است. بر اساس این رابطه؛ روابطی با فرم ساده‌تر برای تخمین بده جریان عبوری از دریچه‌ها ارائه شده است. رابطه ۳ توسط Henry (1950) و رابطه ۴ توسط Wojcicki (1931) (که به رابطه Rajaratnam and Subramanya, 1967 نیز معروف است) از مشهورترین روابط ارائه شده برای تحلیل جریان عبوری از دریچه‌ها هستند. رابطه ۵ نیز از جمله روابط ارائه شده برای تخمین بده عبوری از روزنه‌ها و دریچه‌ها است.

$$q = C_d a \sqrt{2gh_o} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$q = C_d a \sqrt{2g(h_o - h)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$q = C_d a \sqrt{2g \left( h_o - \frac{a}{2} \right)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

رابطه ۴ جهت تخمین بده جریان عبوری از دریچه‌ها تحت شرایط جریان مستغرق ارائه شده است که پارامتر  $h$  در این رابطه عمق جریان چسبیده به پایین دست دریچه است و در شرایط جریان آزاد مقدار این پارامتر برابر با  $h_1$  در نظر گرفته خواهد شد. با بسط رابطه ۲ می‌توان اثبات کرد که به ازای مقادیر بزرگ نسبت  $h_0/a$  (جریان روزنه‌ای عبوری از دریچه‌ها) روابط ۳، ۴ و ۵ برابر با رابطه ۲ می‌باشند، که در رابطه زیر برابری رابطه ۲ و ۳ نشان داده شده است. برای سایر روابط نیز می‌توان به صورت مشابه این اثبات را انجام داد.

(رابطه ۶)

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left[ h_o^{\frac{3}{2}} - (h_o - a)^{\frac{3}{2}} \right] = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} h_o^{\frac{3}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a}{h_o} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

$$\xrightarrow{\text{if } m \rightarrow 0} (1 \pm m)^n = 1 \pm nm \pm \frac{1}{2}(n-1)nm^2 \pm \frac{1}{6}(n-2)(n-1)nm^3$$

$$\pm \frac{1}{24}(n-3)(n-2)(n-1)nm^4 \pm \dots$$

$$\xrightarrow{\frac{a}{h_o} \rightarrow 0} q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} h_o^{\frac{3}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3a}{2h_o} \right) \right] = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left[ h_o^{\frac{3}{2}} \frac{3a}{2h_o} \right] = C_d a \sqrt{2gh_o}$$

سوال مهم در مورد روابط روزنه‌ای مورد استفاده برای دریچه‌ها این است که کدام یک از این روابط جهت استفاده برای

(رابطه ۸)

$$P_g(y) = \frac{1}{2} \gamma (h_o - a)^2 - \frac{1}{2} \frac{\gamma q^2}{g \pi^2 h_o^2} \left( \frac{h_o}{a} \right)^2 \log 2 \left( \frac{\sin \pi (y + a) / 2 h_o}{\sin \pi (y - a) / 2 h_o} \right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$P_g(y) = \gamma (h_o - a) \left[ 1 - z - \left( 1 - \frac{1}{b} \right) \left( 1 + \frac{1}{b - 1 - bz} \right) \right] \quad \& \quad b = 1 - 0.053 \frac{a}{h_o}$$

اگر از رابطه ۹ نسبت به  $y$  انتگرال بگیریم، رابطه محاسبه

نیروی وارد بر دریچه به صورت زیر خواهد بود:

(رابطه ۱۲)

$$F_g = \int_a^{h_o} P_g(y) dy = 1.538 \gamma (h_o - a)^2 \left[ 1 - 0.3 \tanh \left( 2.3 \sqrt{\frac{a}{h_o}} \right) \right] \left( \frac{49}{120} \right)$$

حال چنانچه نیروی هیدرواستاتیک وارد بر دریچه به صورت

در نظر گرفته شود خواهیم داشت:

$$F_g \leq F_{g-hyd} \quad \rightarrow \quad 0.62802 \gamma (h_o - a)^2 \left[ 1 - 0.3 \tanh \left( 2.3 \sqrt{\frac{a}{h_o}} \right) \right] \leq \frac{1}{2} (h_o - a)^2 \quad \rightarrow \quad h_o \leq 7.71288a$$

استفاده از این روابط، در شکل ۲ توزیع فشار محاسبه شده وارد بر دریچه کشویی با استفاده از روابط فوق، به ازای بازشدگی ۲۰ سانتیمتر و عمق بالادست یک متر، نشان داده شده است.

$$F_c = \int_0^{h_1} \Delta P(y) dy \xrightarrow{v_1 = \frac{q}{h_1}} F_c = \int_0^{h_1} \eta \left( 1 - \frac{y}{h_1} \right) \frac{\gamma q^2}{2 g h_1^2} dy \quad \rightarrow \quad F_c = \eta \frac{\gamma q^2}{4 g h_1}$$

Belaud and Litrico (2008)، Roth and Hager (1999)

و Steppert et al. (2020) به ترتیب روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ را برای

توزیع بار فشاری وارد بر دریچه‌های کشویی تحت شرایط جریان

آزاد ارائه دادند:

(رابطه ۹)

$$P_g(y) = 1.538 \gamma z^{\frac{1}{7}} (h_o - a) (1 - z) \left[ 1 - 0.3 \tanh \left( 2.3 \sqrt{\frac{a}{h_o}} \right) \right] \quad \& \quad z = \frac{y - a}{h_o - a}$$

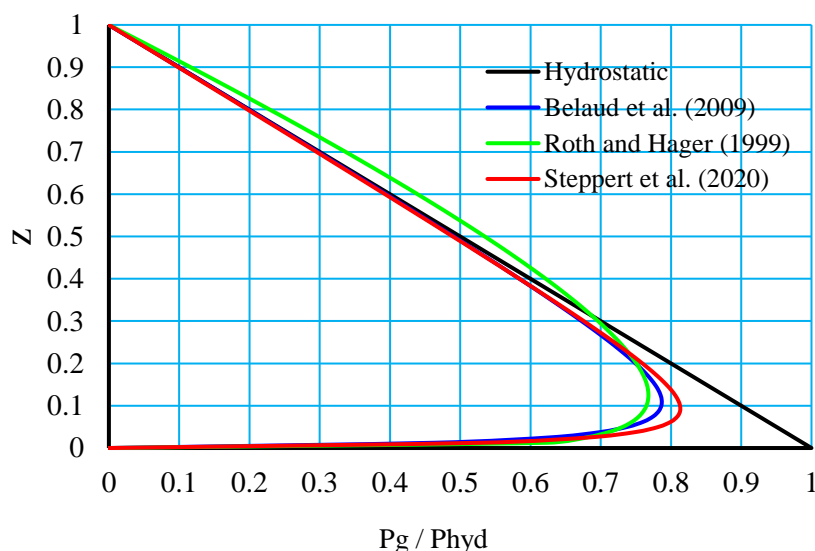
(رابطه ۱۰)

رابطه فوق نشان می‌دهد که اگر عمق بالادست دریچه از ۷/۷۱

برابر میزان بازشدگی دریچه بیشتر باشد، در این صورت فشار

محاسبه شده با استفاده از رابطه ۹ بیشتر از فشار هیدرواستاتیک

خواهد شد. به منظور بررسی بیشتر توزیع فشار محاسباتی با



شکل ۲- توزیع فشار وارد بر دریچه کشویی در بازشدگی ۲۰ سانتی‌متر

نیازمند حل عددی خواهد بود و نمی‌توان با انتگرال گیری مستقیم از آن مقدار نیروی فشاری وارد بر دریچه را محاسبه کرد. بنابراین در این پژوهش از رابطه ۱۱ به منظور محاسبه نیروی وارد بر دریچه استفاده خواهد شد و به منظور محاسبه نیروی وارد بر دریچه کشویی، با انتگرال گیری از این رابطه خواهیم داشت:

(رابطه ۱۳)

با توجه به شکل ۲ مشخص است که رابطه ارائه شده توسط

Roth and Hager (1999) به ازای یک مقدار مشخص عمق

بالادست و بیشتر از آن، فشار وارد بر دریچه را بیشتر از فشار

هیدرواستاتیکی محاسبه می‌کند. رابطه ارائه شده توسط

Belaud and Litrico (2008) نیز چنانچه عمق جریان برابر با میزان

بازشدگی باشد، مقدار فشار را برابر با بینهایت محاسبه می‌کند.

از سوی دیگر محاسبه کردن نیروی فشاری با استفاده از این رابطه،

**found.** ۱۹ مشاهده می‌شود، برای تعیین مقدار ضریب فشردگی جریان لازم است یک معادله مرتبه سوم حل شود. به این منظور در ابتدا باید مقدار  $\Delta$  طبق رابطه زیر حساب شود.

$$\Delta = \frac{N_1^2}{4} + \frac{M_1^3}{27} \quad (\text{رابطه } ۲۰)$$

با توجه به مقادیر  $M_1$  و  $N_1$  مقدار  $\Delta$  همواره کوچکتر از صفر خواهد بود ( $\Delta < 0$ ). بنابراین رابطه ۱۹ دارای سه ریشه به صورت زیر خواهد بود:

$$C_{e1} = 2\sqrt{-\frac{M_1}{3}} \sin\left(\frac{\phi}{3}\right) \quad (\text{رابطه } ۲۱)$$

$$C_{e2} = -2\sqrt{-\frac{M_1}{3}} \sin\left(\frac{\phi}{3} + \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{where} \quad \phi = \text{Arcsin}\left(\frac{N_1}{2} \sqrt{\left(-\frac{3}{M_1}\right)^3}\right)$$

$$C_{e3} = 2\sqrt{-\frac{M_1}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3} + \frac{\pi}{6}\right)$$

در رابطه فوق، روابط مربوط به  $C_{e2}$  و  $C_{e3}$  مقادیری منفی را نتیجه خواهند داد که مقادیری غیر قابل قبول می‌باشند. بنابراین رابطه مربوط به  $C_{e1}$ ، رابطه مورد نظر برای محاسبه ضریب فشردگی جریان است.

**روش دوم: توسعه ضریب فشردگی جریان با استفاده از رابطه ۳**  
[رابطه Henry (1950)]

با توجه به تغییر متغیرهای پیشین و رابطه ۳ خواهیم داشت:  
(رابطه ۲۲)

$$q = C_d a \sqrt{2gh_o} \rightarrow \begin{cases} \frac{q^2}{2gh_o^2} = \omega^2 h_o C_d^2 \\ \frac{q^2}{2gh_1^2} = \frac{h_o C_d^2}{C_c^2} \end{cases}$$

با توجه به رابطه فوق و رابطه ۱۶ و انجام عملیاتی مشابه با عملیات انجام شده در روش اول، رابطه ضریب فشردگی جریان عبوری از دریچه کشویی به صورت زیر خواهد بود:  
(رابطه ۲۳)

$$C_c = 2\sqrt{-\frac{M_2}{3}} \sin\left(\frac{\phi}{3}\right) \quad \text{where} \quad \phi = \text{Arcsin}\left(\frac{N_2}{2} \sqrt{\left(-\frac{3}{M_2}\right)^3}\right)$$

که متغیرهای رابطه فوق به صورت زیر می‌باشند:  
(رابطه ۲۴)

$$M_2 = \frac{1}{\omega^2} (I_g - 4\omega^2 C_d^2 - 1) \quad \& \quad N_2 = \frac{C_d^2 (\eta + 4)}{\omega}$$

**روش سوم: توسعه ضریب فشردگی جریان با استفاده از رابطه ۴**  
با توجه به تغییر متغیرهای پیشین و رابطه ۴ خواهیم داشت:

(رابطه ۲۵)

$$F_g = \int_a^{h_o} \gamma (h_o - a) \left[ 1 - \frac{y-a}{h_o-a} - \left(1 - \frac{1}{b}\right) \left( 1 + \frac{1}{b-1-b \frac{y-a}{h_o-a}} \right) \right] dy \quad (\text{رابطه } ۱۴)$$

$$F_g = \gamma (h_o - a) \left\{ h_o - \frac{1}{2}(h_o + a) - \left(1 - \frac{1}{b}\right) (h_o - a) \left[ 1 - \frac{1}{b} \text{Ln} \left( \frac{1}{1-b} \right) \right] \right\}$$

با اعمال رابطه مومنتم در جهت محور افقی بین دو مقطع ۱ و ۲ در شکل ۱ (ب) خواهیم داشت:

$$\sum F_x = \rho q \Delta V_x \rightarrow F_o - F_c - F_1 - F_g = \rho q (V_1 - V_o) \quad (\text{رابطه } ۱۵)$$

$$\rightarrow F_o = \frac{1}{2} \gamma Y_o^2 \quad \& \quad F_1 = \frac{1}{2} \gamma Y_1^2$$

که در آن  $V_1$  و  $V_o$  به ترتیب سرعت جریان در بالادست و در مقطع فشردگی جریان است. با جایگذاری روابط مربوط به هر کدام از نیروها در رابطه ۱۵ و ساده سازی آن، خواهیم داشت:  
(رابطه ۱۶)

$$1 + \frac{2q^2}{gh_o^3} = \left(\frac{h_1}{h_o}\right)^2 + \frac{q^2}{2gh_1 h_o^2} (\eta + 4) + I_g \quad \& \quad I_g = \frac{2F_g}{\gamma h_o^2}$$

روابط مختلف ارائه شده برای جریان عبوری از دریچه‌ها ساده سازی شده، و رابطه ضریب فشردگی جریان برای هر کدام از روابط بده جریان به ترتیب زیر ارائه گردیده است.

**روش اول: توسعه ضریب فشردگی جریان با استفاده از رابطه ۲**

با توجه به تغییر متغیرهای پیشین و رابطه ۲ خواهیم داشت:  
(رابطه ۱۷)

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left[ h_o^{\frac{3}{2}} - (h_o - a)^{\frac{3}{2}} \right] \rightarrow \begin{cases} \frac{q^2}{2gh_o^2} = \frac{4}{9} h_o C_d^2 \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2 \\ \frac{q^2}{2gh_1^2} = \frac{4h_o C_d^2}{9\omega^2 C_c^2} \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2 \end{cases}$$

با توجه به رابطه فوق و همچنین متغیرهای بی بعدی که قبلاً تعریف شده است، رابطه ۱۶ به صورت زیر خواهد شد:  
(رابطه ۱۸)

$$C_c^2 + \frac{4C_d^2 (\eta + 4) \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2}{9\omega^3 C_c} + \frac{1}{\omega^2} \left\{ I_g - \frac{16}{9} C_d^2 \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2 - 1 \right\} = 0$$

رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:  
(رابطه ۱۹)

$$\begin{cases} M_1 = \frac{1}{\omega^2} \left\{ I_g - \frac{16}{9} C_d^2 \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2 - 1 \right\} \\ N_1 = \frac{4C_d^2 (\eta + 4) \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2}{9\omega^3} \end{cases} \rightarrow C_c^3 + M_1 C_c + N_1 = 0$$

همانطور که در رابطه **Error! Reference source not**

روش چهارم: توسعه ضریب فشردگی جریان با استفاده از

#### رابطه ۵

با توجه به تغییر متغیرهای پیشین و رابطه ۵ خواهیم داشت:

(رابطه ۲۹)

$$q = C_d a \sqrt{2g \left( h_o - \frac{a}{2} \right)} \rightarrow \begin{cases} \frac{q^2}{2gh_o^2} = \omega^2 h_o C_d^2 \left( 1 - \frac{\omega}{2} \right) \\ \frac{q^2}{2gh_1^2} = \frac{h_o C_d^2 \left( 1 - \frac{\omega}{2} \right)}{C_c^2} \end{cases}$$

در این روش نیز با توجه به رابطه فوق و رابطه ۱۶ و همچنین انجام عملیاتی مشابه با عملیات انجام شده در روش اول، رابطه ضریب فشردگی جریان عبوری از دریچه کشویی به صورت زیر خواهد بود:

(رابطه ۳۰)

$$C_c = 2 \sqrt{\frac{M_4}{3}} \sin\left(\frac{\phi}{3}\right) \quad \text{where} \quad \phi = \text{Arcsin}\left(\frac{N_4}{2} \sqrt{\left(\frac{-3}{M_4}\right)^3}\right)$$

متغیرهای رابطه فوق به صورت زیر می‌باشند:

(رابطه ۳۱)

$$M_4 = \frac{1}{\omega^2} \left[ I_4 - 4\omega^2 C_d^2 \left( 1 - \frac{\omega}{2} \right) - 1 \right] \quad \& \quad N_4 = \frac{C_d^2 (\eta + 4)}{\omega} \left( 1 - \frac{\omega}{2} \right)$$

تعیین ضریب افت انرژی جریان عبوری از دریچه کشویی

چنانچه تحت شرایط جریان آزاد در حد فاصل قبل و بعد از دریچه، رابطه انرژی اعمال شود، خواهیم داشت:

(رابطه ۳۲)

$$h_o + \frac{q^2}{2gh_o^2} = h_1 + \frac{q^2}{2gh_1^2} (1 + \varepsilon) \quad \xrightarrow{h_1 = a C_c} \quad h_o + \frac{q^2}{2gh_o^2} = a C_c + \frac{q^2}{2gh_1^2} (1 + \varepsilon)$$

با توجه به رابطه فوق و با استفاده از پارامترهای بی بعد از قبل تعریف شده و همچنین با توجه به روابط ۲، ۳، ۴ و ۵ خواهیم داشت:

(رابطه ۳۳)

$$\text{Method 1} \rightarrow q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left[ h_o^{\frac{3}{2}} - (h_o - a)^{\frac{3}{2}} \right] \rightarrow \varepsilon_1 = \frac{9\omega^2 C_c^2 (1 - \omega C_c)}{4C_d^2 [1 - (1 - \omega)^{\frac{3}{2}}]} + \omega^2 C_c^2 - 1$$

(رابطه ۳۴)

$$\text{Method 2} \rightarrow q = C_d a \sqrt{2gh_o} \rightarrow \varepsilon_2 = \frac{C_c^2}{C_d^2} + \omega^2 C_c^2 - \frac{\omega C_c^3}{C_d^2} - 1$$

(رابطه ۳۵)

$$\text{Method 3} \rightarrow q = C_d a \sqrt{2g(h_o - h)} \rightarrow \varepsilon_3 = \frac{C_c^2}{C_d^2} + \omega^2 C_c^2 - 1$$

(رابطه ۳۶)

$$\text{Method 4} \rightarrow q = C_d a \sqrt{2g \left( h_o - \frac{a}{2} \right)} \rightarrow \varepsilon_4 = \frac{C_c^2 (1 - \omega C_c)}{C_d^2 \left( 1 - \frac{\omega}{2} \right)} + \omega^2 C_c^2 - 1$$

$$q = C_d a \sqrt{2g(h_o - h)} \quad \xrightarrow[h=h_1=aC_c]{\text{Free Flow}} \begin{cases} \frac{q^2}{2gh_o^2} = \omega^2 h_o C_d^2 (1 - \omega C_c) \\ \frac{q^2}{2gh_1^2} = \frac{h_o C_d^2 (1 - \omega C_c)}{C_c^2} \end{cases}$$

چنانچه عملیاتی مشابه عملیات مربوط به قسمت‌های قبل

انجام شود خواهیم داشت:

(رابطه ۲۶)

$$\begin{cases} M_3 = \frac{1}{\omega^2} [I_3 - \omega^2 C_d^2 (\eta + 4) - 4\omega^2 C_d^2 - 1] \\ N_3 = \frac{C_d^2 (\eta + 4)}{\omega} \\ O = 4\omega C_d^2 \end{cases} \rightarrow C_c^3 + O C_c^2 + M_3 C_c + N_3 = 0$$

برای حل معادله درجه سوم فوق لازم است که مقدار  $\Delta$  به

صورت زیر محاسبه شود:

(رابطه ۲۷)

$$\begin{cases} r = M_3 - \frac{O^2}{3} \\ t = \frac{2O^3}{27} - \frac{M_3 O}{3} + N_3 \end{cases} \rightarrow \Delta = \frac{t^2}{4} + \frac{r^3}{27}$$

با توجه به منفی بودن مقدار  $\Delta$ ، رابطه ۲۶ سه ریشه به

صورت زیر خواهد داشت:

(رابطه ۲۸)

$$C_{e1} = 2 \sqrt{\frac{r}{3}} \sin\left(\frac{\phi}{3}\right)$$

$$C_{e2} = -2 \sqrt{\frac{r}{3}} \sin\left(\frac{\phi}{3} + \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{where} \quad \phi = \text{Arcsin}\left(\frac{t}{2} \sqrt{\left(\frac{-3}{r}\right)^3}\right)$$

$$C_{e3} = 2 \sqrt{\frac{r}{3}} \cos\left(\frac{\phi}{3} + \frac{\pi}{6}\right)$$

در روابط فوق تنها رابطه مربوط به  $C_{e1}$  دارای جواب قابل

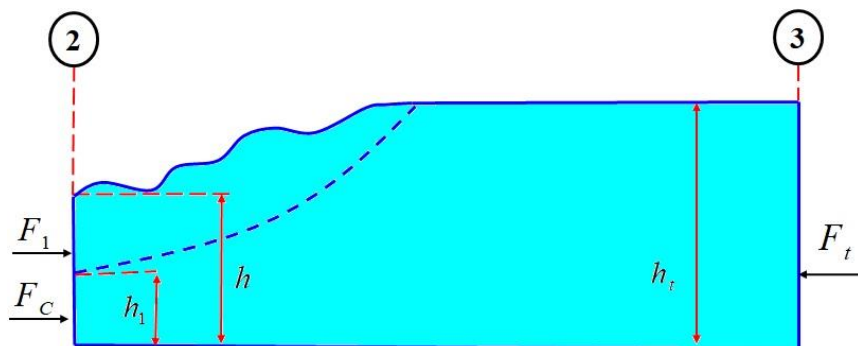
قبول می‌باشد، بنابراین از این رابطه جهت محاسبه مقدار ضریب فشردگی جریان استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است از آنجایی که رابطه Rajaratnam and Subramanya (1967) در شرایط جریان آزاد وابسته به مقدار ضریب فشردگی جریان است، بنابراین محاسبه مقدار ضریب فشردگی جریان در این روش به صورت سعی و خطا خواهد بود. به عبارتی دیگر در ابتدا یک مقدار برای ضریب فشردگی در نظر گرفته خواهد شد، سپس با استفاده از آن، مقدار  $C_d$ ،  $M_3$ ،  $N_3$  و  $O$  محاسبه خواهد شد و در نهایت با استفاده از مقادیر این پارامترها، مقدار ضریب فشردگی جریان محاسبه خواهد شد. چنانچه مقدار ضریب فشردگی اولیه با مقدار محاسباتی آن برابر نباشد، مقدار دیگری برای ضریب فشردگی اولیه فرض خواهد شد، این کار تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد که مقدار ضریب فشردگی فرض شده برابر با مقدار محاسبه شده آن شود.

مقطع بالادست دریاچه و مقطع محل فشردگی جریان پس از دریاچه رابطه انرژی اعمال شود، خواهیم داشت:

(رابطه ۳۷)

$$h_o + \frac{q^2}{2gh_o^2} = h + \frac{q^2}{2gh_1^2}(1+\varepsilon) \xrightarrow{h_o} 1 + \frac{q^2}{2gh_o^3} = s + \frac{q^2}{2gh_1^2 h_o}(1+\varepsilon)$$

به منظور اعمال رابطه مومنتم، حجم کنترلی به صورت زیر در حدفاصل بین مقاطع بعد از دریاچه و محل عمق پایاب در نظر گرفته شد.



شکل ۳- حجم کنترل در نظر گرفته شده در حد فاصل مقاطع بعد از دریاچه و محل عمق پایاب

توسعه رابطه تخمین بده جریان عبوری از دریاچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق

به منظور توسعه رابطه تخمین بده جریان عبوری از دریاچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق، از روش انرژی- مومنتم استفاده شد. به این صورت که در فاصله بین مقاطع بالادست و بلافاصله پس از دریاچه رابطه انرژی و در فاصله بعد از دریاچه و مقطع عمق پایاب رابطه مومنتم اعمال شد. بنابراین چنانچه بین

در روابط فوق می توان تغییر متغیرهایی به صورت زیر در نظر گرفت:

(رابطه ۴۲)

$$E_1 = \frac{4}{9} \left( 1 - \frac{1+\varepsilon}{\omega^2 C_c^2} \right) \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right] \quad \& \quad F_1 = \frac{4}{9} \left( \frac{\eta+4}{\omega C_c} - \frac{4}{S'} \right) \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right] \quad \& \quad G_1 = -S'^2$$

با توجه به تغییر متغیرهای فوق، روابط ۴۰ و ۴۱ به صورت

زیر خواهند شد:

$$S = 1 + E_1 C_d^2 \quad (رابطه ۴۳)$$

$$S^2 + F_1 C_d^2 + G_1 = 0 \quad (رابطه ۴۴)$$

با جایگذاری رابطه ۴۳ در رابطه ۴۴، رابطه ضریب بده جریان عبوری از دریاچه کشویی، مستقل از پارامتر  $S$  به صورت زیر حاصل خواهد شد.

(رابطه ۴۵)

$$(1 + E_1 C_d^2)^2 + F_1 C_d^2 + G_1 = 0 \rightarrow E_1^2 C_d^4 + C_d^2 (2E_1 + F_1) + (G_1 + 1) = 0$$

(رابطه ۴۶)

$$C_d^2 = \frac{1}{2} \left[ \left( -\frac{2E_1 + F_1}{E_1^2} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{2E_1 + F_1}{E_1^2} \right)^2 - \frac{4(G_1 + 1)}{E_1^2}} \right]$$

در رابطه فوق تنها جواب قابل قبول به صورت زیر خواهد

بود:

(رابطه ۴۷)

$$C_d = \sqrt{-\frac{2E_1 + F_1}{2E_1^2} - \sqrt{\left( \frac{2E_1 + F_1}{2E_1^2} \right)^2 - \frac{(G_1 + 1)}{E_1^2}}}$$

با توجه به شکل ۳ با اعمال رابطه مومنتم بین مقاطع ۲ و ۳

خواهیم داشت:

(رابطه ۳۸)

$$\sum F_x = \rho q \Delta V_x \rightarrow F_1 + F_c - F_t = \rho q (V_3 - V_2)$$

با توجه به  $V_3 = q/h_t$ ,  $V_2 = q/h_1$  و جایگذاری آن ها در رابطه

فوق و همچنین جایگذاری روابط مربوط به نیروهای وارد بر حجم کنترل در نظر گرفته شده در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} \gamma h^2 + \eta \frac{\gamma q^2}{4gh_1} + \frac{\gamma q^2}{gh_1} = \frac{1}{2} \gamma h_t^2 + \frac{\gamma q^2}{gh_t} \quad (رابطه ۳۹)$$

حال با توجه به روابط مختلف ارائه شده برای تخمین بده

عبوری از دریاچه ها، روش هایی به صورت زیر جهت تخمین بده

عبوری از دریاچه های کشویی تحت شرایط جریان مستغرق ارائه خواهد شد.

روش اول: توسعه ضریب بده جریان مستغرق عبوری از دریاچه

کشویی با استفاده از رابطه ۲

با توجه به متغیرهای بی بعد پیشین و رابطه ۱۷، روابط ۳۲ و ۳۹ به صورت زیر خواهند شد.

$$S = 1 + C_d^2 \frac{4}{9} \left( 1 - \frac{1+\varepsilon}{\omega^2 C_c^2} \right) \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2 \quad (رابطه ۴۰)$$

(رابطه ۴۱)

$$S^2 - S'^2 + C_d^2 \frac{4}{9} \left( \frac{\eta+4}{\omega C_c} - \frac{4}{S'} \right) \left[ 1 - (1-\omega)^{\frac{3}{2}} \right]^2 = 0$$



$$S = \frac{1}{2} \left( -E_3 + \sqrt{E_3^2 + 4E_3 - 4F_3} \right) \quad (\text{رابطه } ۵۵)$$

در این روش در ابتدا با استفاده از رابطه ۵۲ مقدار ضریب بده جریان عبوری از دریچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق محاسبه خواهد شد، سپس با استفاده از رابطه ۵۵ مقدار  $S$  و در نتیجه آن مقدار  $h$  محاسبه خواهد شد. در نهایت با استفاده از ضریب بده  $h$  محاسبه شده و مقدار عمق بالادست دریچه، می-توان بده جریان عبوری از دریچه را تحت شرایط جریان مستغرق محاسبه کرد.

**روش چهارم: توسعه ضریب بده جریان مستغرق عبوری از دریچه کشویی با استفاده از رابطه ۵**

در این روش نیز با توجه به روابط ۲۹، ۳۲ و ۳۹ و همچنین انجام عملیاتی مشابه با عملیات انجام شده در روش اول، رابطه ضریب بده جریان عبوری از دریچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق به صورت زیر خواهد شد:

(رابطه ۵۶)

$$C_d = \sqrt{-\frac{2E_4 + F_4}{2E_4^2} - \sqrt{\left(\frac{2E_4 + F_4}{2E_4^2}\right)^2 - \frac{(G_3 + 1)}{E_4^2}}}$$

پارامترهای موجود در رابطه فوق به صورت زیر هستند.

(رابطه ۵۷)

$$E_4 = \left(1 - \frac{\omega}{2}\right) \left(\omega^2 - \frac{1+\varepsilon}{C_c^2}\right) \quad \& \quad F_4 = \left(1 - \frac{\omega}{2}\right) \left[\frac{\omega(\eta+4)}{C_c} - \frac{4\omega^2}{S'}\right] \quad \& \quad G_3 = -S'^2$$

#### بررسی آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی و واسنجی روابط توسعه داده شده در این پژوهش آزمایش‌هایی در فلوم مستطیلی به عرض ۹۳/۷ سانتیمتر، طول ۱۸ متر و عمق ۱۲۰ سانتیمتر در بالادست و ۶۰ سانتیمتر در پایین دست، با بدنه‌ای از پلکسی گلاس واقع در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شد. جریان ورودی به کانال توسط دو پمپ به یک مخزن در بالادست کانال منتقل شده و از مخزن با بار ثابت وارد کانال شد. جریان عبوری پمپ‌ها با یک فلومتر الکترومغناطیسی با حداکثر خطای ۰/۲ تا ۰/۵ درصد اندازه‌گیری شد. مدل مورد آزمایش شامل یک دریچه کشویی لبه تیز (به عرض ۹۷ سانتیمتر و ارتفاع ۱ متر و ضخامت ۴ میلیمتر) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها، میزان بازشدگی دریچه نسبت به تراز کف کانال در چهار بازشدگی ۳، ۵، ۶ و ۷ سانتیمتر تنظیم شد. در هر بازشدگی پس از تنظیم دبی ورود به کانال، ابتدا در شرایط باز بودن دریچه انتهایی کانال (شرایط جریان آزاد)، عمق جریان بالادست دریچه مورد نظر با استفاده از سطح سنج (پوینت گیج) با دقت ۰/۱ ±

روش دوم: توسعه ضریب بده جریان مستغرق عبوری از دریچه کشویی با استفاده از رابطه ۳

در این روش نیز با توجه به روابط ۲۲، ۳۲ و ۳۹ و همچنین انجام عملیاتی مشابه با عملیات انجام شده در روش اول، رابطه ضریب بده جریان عبوری از دریچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق به صورت زیر خواهد شد:

(رابطه ۴۸)

$$C_d = \sqrt{-\frac{2E_2 + F_2}{2E_2^2} - \sqrt{\left(\frac{2E_2 + F_2}{2E_2^2}\right)^2 - \frac{(G_2 + 1)}{E_2^2}}}$$

پارامترهای موجود در رابطه فوق به صورت زیر هستند.

(رابطه ۴۹)

$$E_2 = \left(\omega^2 - \frac{1+\varepsilon}{C_c^2}\right) \quad \& \quad F_2 = \left[\frac{\omega(\eta+4)}{C_c} - \frac{4\omega^2}{S'}\right] \quad \& \quad G_2 = -S'^2$$

**روش سوم: توسعه ضریب بده جریان مستغرق عبوری از دریچه کشویی با استفاده از رابطه ۴**

با توجه به پارامترهای بی بعد از قبل تعریف شده و رابطه ۴، روابط ۳۲ و ۳۹ به صورت زیر خواهند شد.

(رابطه ۵۰)

$$S - S' \cdot C_d^2 \left(\frac{1+\varepsilon}{C_c^2} - \omega^2\right) = 1 + C_d^2 \left(\omega^2 - \frac{1+\varepsilon}{C_c^2}\right)$$

(رابطه ۵۱)

$$S^2 - S'^2 + C_d^2 (S - 1) \left[\frac{4\omega^2}{S'} - \frac{\omega(\eta+4)}{C_c}\right] = 0$$

رابطه ۵۰ را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

(رابطه ۵۲)

$$C_d^2 = \frac{C_c^2}{(1+\varepsilon) - \omega^2 C_c^2} \quad \rightarrow \quad C_d = C_c \sqrt{\frac{1}{(1+\varepsilon) - \omega^2 C_c^2}}$$

در رابطه ۵۱ می‌توان تغییر متغیرهایی به صورت زیر در نظر گرفت:

$$E_3 = C_d^2 \left[\frac{4\omega^2}{S'} - \frac{\omega(\eta+4)}{C_c}\right] \quad \& \quad F_3 = -S'^2 \quad (\text{رابطه } ۵۳)$$

با توجه به تغییر متغیرهای فوق، رابطه ۵۱ به صورت زیر خواهد شد:

(رابطه ۵۴)

$$S^2 + F_3 + E_3 (S - 1) = 0 \quad \rightarrow \quad S^2 + E_3 S + (F_3 - E_3) = 0$$

رابطه فوق، یک رابطه درجه دوم است و دارای دو ریشه است که تنها یک ریشه آن جواب قابل قبولی را ارائه خواهد داد که رابطه آن به صورت زیر است:

پایین دست دریچه با استفاده سطح سنج اندازه‌گیری شد. در شکل ۴ نمایی از کانال آزمایشی و مدل مورد آزمایش نشان داده شده است.

میلیمتر اندازه‌گیری شد. پس از آن برای ایجاد جریان مستغرق، با استفاده از دریچه انتهایی کانال عمق پایاب افزایش داده شد. در هر دبی، بازشدگی دریچه و عمق پایاب مشخص، عمق بالادست و



شکل ۴- نمایی از کانال و دریچه کشویی نصب‌شده

(شامل ۲۰ سری داده آزمایشگاهی تحت شرایط جریان آزاد و ۳۵ سری داده تحت شرایط جریان مستغرق) و داده‌های صحرایی Sepulveda(2008) (شامل ۵۹ سری داده تحت شرایط جریان مستغرق) نیز استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش ذکر شده است.

داده‌های آزمایشگاهی در این پژوهش شامل ۱۱۸ سری داده تحت شرایط جریان آزاد و ۱۴۲ سری داده تحت شرایط جریان مستغرق است. در ارزیابی‌های انجام شده در این پژوهش، علاوه بر استفاده از داده‌های برداشت شده در این پژوهش، از داده‌های آزمایشگاهی Rajaratnam and Subramanya (1967)

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده در ارزیابی روابط توسعه داده شده

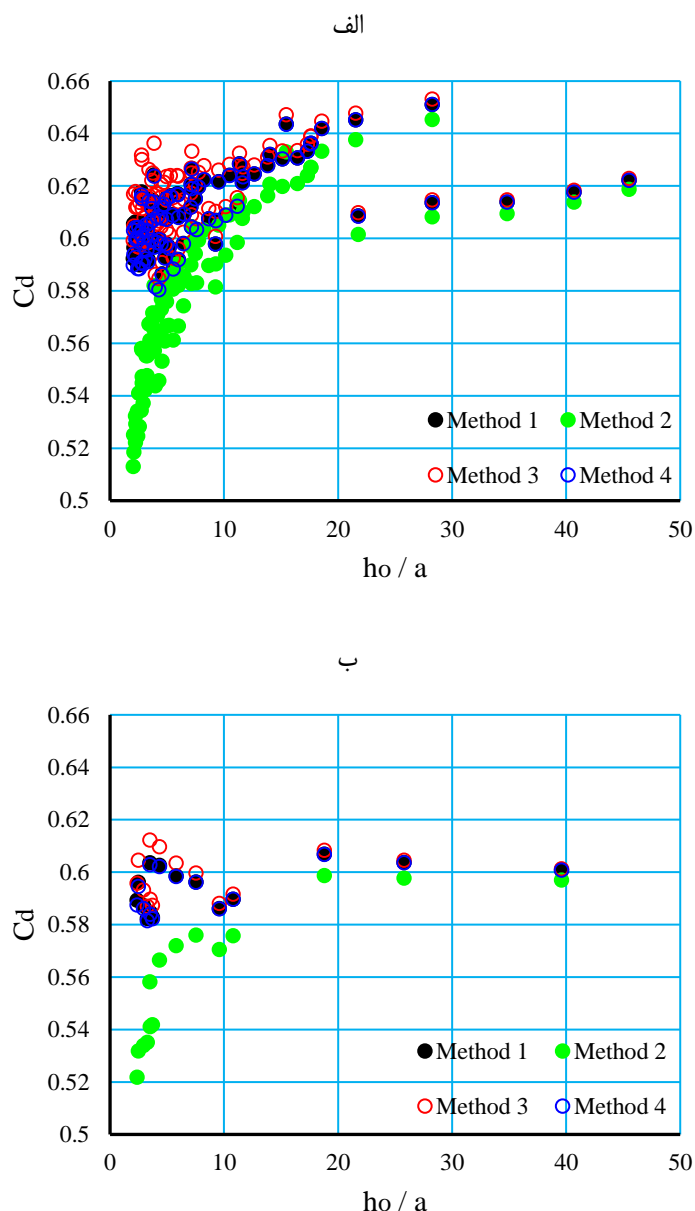
جریان مستغرق		جریان آزاد		منبع داده‌ها
درجه استغراق % ( $Sr=100h/h_0$ )	تعداد استغراق	$h_0/a$	تعداد سری داده	
۲۳-۹۶	۱۴۲	۱/۱-۴۵/۵	۱۱۸	این پژوهش
۳۴-۹۲	۳۵	۱/۴-۳۹/۶	۲۰	Rajaratnam and Subramanya (1967)
۲۳-۹۶	۵۹	-	-	Sepulveda(2008)

از دریچه کشویی برقرار نیست و همچنین به دلیل کم بودن عمق و بده جریان عبوری کمترین خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌تواند، موجب بروز خطاهای قابل ملاحظه‌ای در استفاده از روابط توسعه داده شود.

با توجه به شکل ۵ مشخص است که در مقادیر کم  $h_0/a$  رابطه Henry (1950) کمترین مقدار و رابطه Rajaratnam and Subramanya (1967) بیشترین مقدار ضریب بده را محاسبه می‌کنند. اما روابط ۲ و ۵ در همه مقادیر  $h_0/a$  دارای مقادیر ضریب بده همسان هستند. همچنین در مقادیر زیاد  $h_0/a$  همه روش‌ها به سمت مقدار ثابت و همسان ضریب بده میل می‌کنند.

## نتایج و بحث

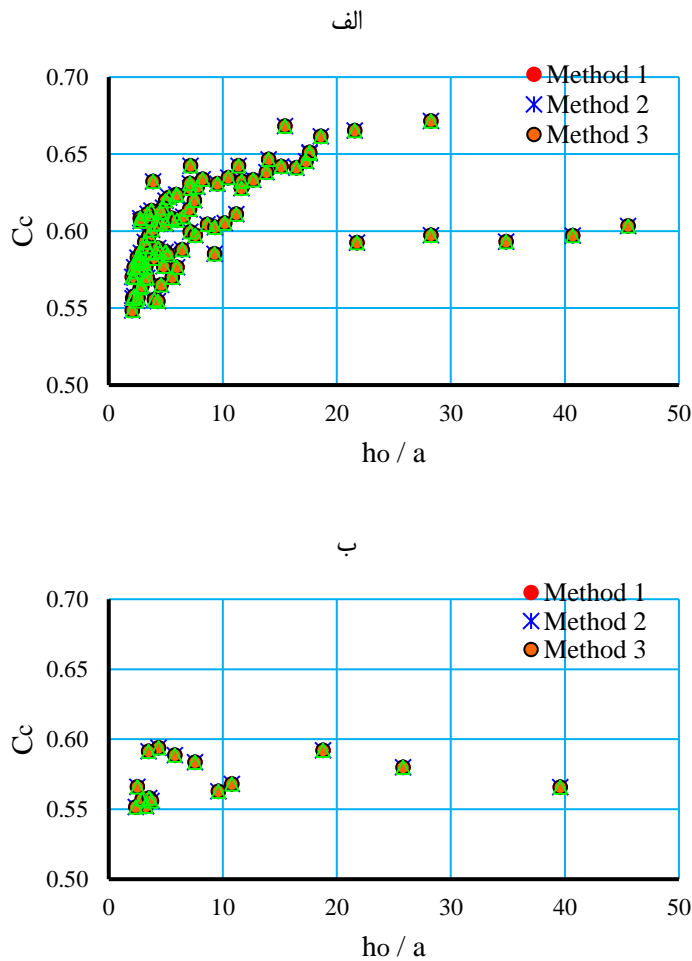
در ارزیابی روابط توسعه داده شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، با توجه به وابستگی آنها به مقدار ضریب فشردگی و ضریب افت انرژی جریان برای تعیین ضریب بده، مقادیر ضریب بده جریان عبوری با استفاده از روابط ۲، ۳، ۴ و ۵ محاسبه شد که تغییرات آن در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در ارزیابی انجام شده داده‌هایی که مقدار نسبت  $h_0/a$  در آنها کوچکتر از ۲ بود ( $h_0/a < 2$ )، مورد استفاده قرار نگرفتند. چرا که در شرایط  $h_0/a < 2$  شرایط جریان روزنه‌ای برای جریان عبوری



شکل ۵- تغییرات ضریب بده آزمایشگاهی جریان دریاچه کشویی با استفاده از روش‌های مختلف (الف: داده‌های این پژوهش، ب: داده‌ها Rajaratnam and Subramanya (1967))

سمت یک مقدار ثابت میل خواهد کرد. که این روند تغییرات در همه روش‌ها قابل مشاهده است و در مقادیر زیاد  $h_0/a$  مقدار ضریب فشردگی به سمت مقدار  $0/6$  میل خواهد کرد. متوسط مقدار ضریب فشردگی جریان عبوری از دریاچه کشویی در همه روش‌ها برابر  $0/599$  است. مقدار متوسط ضریب فشردگی حاصل از روش‌های ارائه شده بسیار نزدیک به مقدار متوسط ضریب فشردگی آزمایشگاهی تعیین شده توسط Rajaratnam and Subramanya (1967) ( $C_c=0.611$ ) است. که این نشان دهنده درستی روش‌های توسعه داده شده می‌باشد.

با استفاده از ضرایب بده آزمایشگاهی و سایر پارامترهای مورد نیاز، مقادیر ضریب فشردگی جریان عبوری از دریاچه کشویی با استفاده از روش‌های توسعه داده شده محاسبه شد که نتیجه آن در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که همه روش‌ها در همه داده‌های برداشت شده دارای نتایج یکسانی هستند. در حالت کلی مقدار ضریب فشردگی جریان در نسبت‌های کم  $h_0/a$  دارای کمترین مقدار و با افزایش مقدار این نسبت، مقدار ضریب فشردگی جریان افزایش می‌یابد. به طوریکه در عمق‌های بالادست زیاد، مقدار ضریب فشردگی به



شکل ۶- مقادیر ضریب فشردگی محاسبه شده از روش‌های مختلف (الف: داده‌های این پژوهش، ب: داده‌های (Rajaratnam and Subramanya (1967)

محاسباتی وارد بر دریاچه نسبت به مقدار واقعی آن کم برآورد شده باشد.

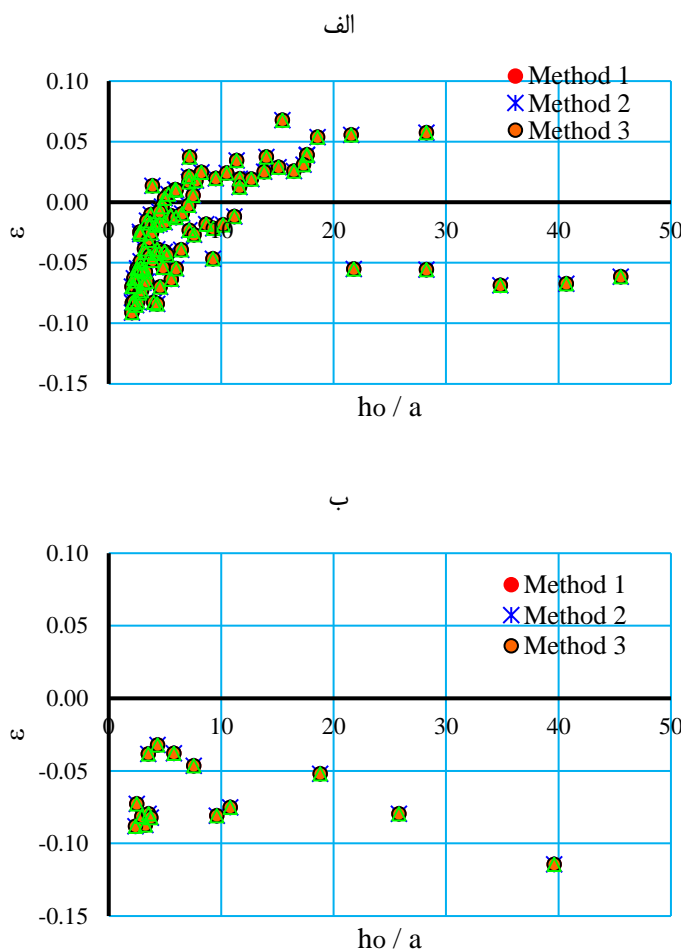
در ارزیابی روابط ارائه شده برای تخمین بده عبوری از دریاچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق، مقدار ضریب فشردگی جریان یک مقدار ثابت و برابر  $0.611$  در نظر گرفته شد و مقدار ضریب افت جریان نیز مقداری ثابت و برابر  $0.088$  [مقدار ضریب افت انرژی جریان عبوری از دریاچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق تعیین شده توسط (Habibzadeh et al (2011)] در نظر گرفته شد. در جدول ۲ مقدار بیشینه و متوسط خطای نسبی روش‌های ارائه شده در تخمین عدد فرود جریان بالادست دریاچه  $[Fr=q/(gh_0^3)^{0.5}]$  تحت شرایط جریان مستغرق نشان داده شده است.

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش و Rajaratnam and Subramanya (1967) و همچنین ضرایب فشردگی جریان محاسبه شده در بخش قبل، مقادیر ضریب افت انرژی جریان عبوری از دریاچه کشویی با استفاده از روش‌ها مختلف محاسبه شد، که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷ مشخص است که همه روش‌ها دارای نتایج یکسانی هستند. همچنین مشخص است همه روش‌ها در بیشتر موارد، مقدار ضریب افت انرژی را مقادیری منفی محاسبه خواهند کرد، که مقادیر غیر قابل قبولی است. بررسی‌ها نشان داد که، مقدار ضریب افت انرژی نسبت به مقدار ضریب فشردگی جریان حساس است و با توجه به اینکه مقدار ضریب فشردگی جریان وابسته به مقدار نیروی وارد بر دریاچه نیز می‌باشد و نیروی

جدول ۲- مقادیر بیشینه و متوسط خطای نسبی برآورد عدد فرود جریان بالادست دریاچه از روش‌های مختلف، تحت شرایط جریان مستغرق

شاخص	روش اول	روش دوم	روش سوم	روش چهارم
Error (%)	۵/۶	۵/۶	۵/۶	۴/۸
Max Error (%)	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۶/۵



شکل ۷- تغییرات ضریب افت انرژی جریان عبوری محاسبه شده از روش‌های مختلف [الف: داده‌های این پژوهش، ب: داده‌ها توسط Rajaratnam and Subramanya (1967)]

از مقادیر مربوط به این دو شاخص کوچکتر می‌باشند. هرچقدر مقدار این دو شاخص کوچکتر باشد، مناسب تر است. شاخص Q3 دارای اهمیت بیشتری نسبت به شاخص Q1 است زیرا مقدار شاخص Q3 بازه بیشتری از خطاها را پوشش خواهد داد. IQR بیانگر فاصله بین دو شاخص Q1 و Q3 است به عبارتی دیگر این شاخص نشان دهنده طول جعبه در باکس پلات است، هر چقدر مقدار این شاخص کوچکتر باشد، نشان دهنده کوچکتر بودن بازه تغییرات خطاها است و مناسب تر است. شاخص میانه هر چقدر به صفر نزدیکتر باشد مناسب تر است و مقدار آن با استفاده از خط میانی جعبه مشخص می‌شود. با استفاده از شاخص میانه و شاخص IQR می‌توان قرینه بودن توزیع خطاها را تعیین کرد، به این صورت که هر چه خط وسط جعبه به قسمت میانه جعبه نزدیکتر باشد، توزیع خطاها قرینه تر است. در شکل ۸ به ارزیابی روش‌های

با توجه به جدول ۲، روش‌های اول، دوم و سوم در تخمین عدد فرود جریان بالادست دریچه تحت شرایط جریان مستغرق دارای عملکرد یکسانی بوده‌اند. همچنین علی رغم نامحسوس بودن اختلاف مقادیر خطای نسبی روش‌های مختلف، اما مشخص است که روش چهارم دارای عملکرد مناسب تری نسبت به سایر روش‌ها بوده است. در استفاده از شاخص قدرمطلق خطای نسبی، نرمال بودن توزیع خطا، کم برآورد و بیش برآورد کردن مقدار ضریب بده مشخص نیست، به عبارتی دیگر این شاخص، شاخص مناسبی برای مقایسه روش‌های مختلف نیست. نمودار باکس پلات<sup>۱</sup>، یک روش استاندارد برای نمایش توزیع خطا و مقایسه روش‌های مختلف بر اساس چهار شاخص چارک اول<sup>۲</sup> (Q1)، چارک سوم<sup>۳</sup> (Q3)، دامنه میان چارکی<sup>۴</sup> (IQR) و میانه<sup>۵</sup> است. Q1 و Q3 بیانگر این هستند که به ترتیب ۲۵ و ۷۵ درصد خطاها

۴ Interquartile range (IQR)

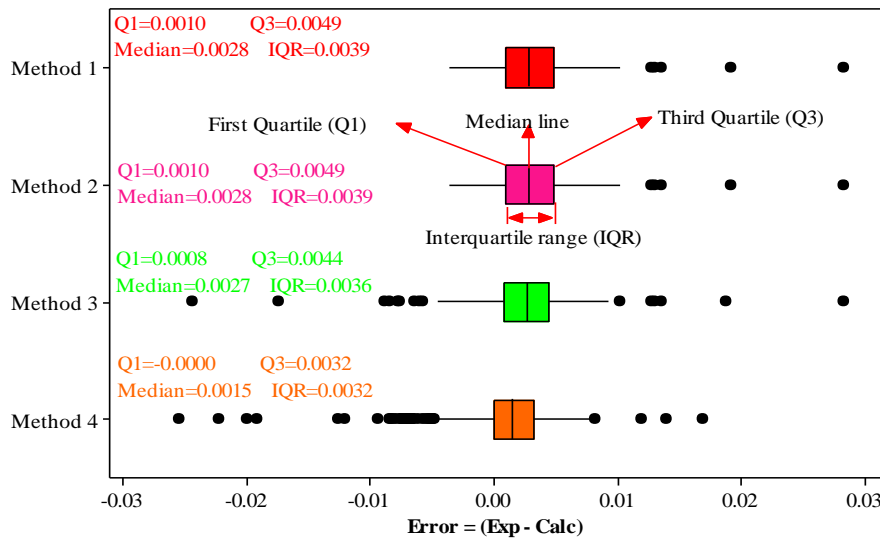
۵ Median

۱ Boxplot

۲ First quartile (Q1)

۳ Third quartile (Q3)

مختلف در تخمین بده جریان عبوری از دریچه کشویی تحت شرایط جریان مستغرق پرداخته شده است.



شکل ۸- نمایش جعبه‌ای دامنه خطای روش‌های مختلف در تخمین عدد فرود جریان بالادست دریچه، تحت شرایط جریان مستغرق

ارزیابی کاربرد روابط مختلف برای جریان آزاد از زیر دریچه‌های کشویی نشان می‌دهد که برآورد مقدار ضریب فشردگی جریان و ضریب افت انرژی، برای همه مقادیر  $a/h_0 > 2$  نسبتاً همسان است. برای بده جریان مستغرق، متوسط خطا کمتر از ۱۰ درصد و قابل قبول است؛ به طوریکه متوسط خطای روابط ۲، ۳، ۴ برابر ۵/۶ درصد و برای رابطه ۵ برابر ۴/۸ درصد بود. با توجه به نتایج مشخص شد که تحت شرایط جریان مستغرق روابط ۲ و ۳ دارای نتایجی کاملاً یکسان هستند؛ و نتایج رابطه ۴ با اختلافی ناچیزی بهتر از نتایج روابط ۲ و ۳ است. کاربرد رابطه ۵ تحت شرایط جریان مستغرق مناسب‌تر از سایر روابط است. در شرایط جریان آزاد، رابطه ۴ با توجه به وابستگی آن به مقدار ضریب فشردگی دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به سایر روابط است. با توجه به فرم ساده‌تر رابطه Henry (1950)، استفاده از این رابطه برای دریچه‌های کشویی تحت شرایط جریان آزاد توصیه می‌شود. برای شرایط جریان مستغرق در دریچه‌های کشویی، کاربرد هر یک از سه رابطه ۵، Henry (1950) و Rajaratnam and Subramanya (1967) توصیه می‌گردد. رابطه Rajaratnam and Subramanya (1967) برای تعیین ضریب بده در شرایط جریان آزاد و مستغرق همسان بوده و فرم ساده‌ای دارد. در این رابطه، مقدار ضریب بده وابسته به ضریب افت، ضریب فشردگی جریان و  $a/h_0$  می‌باشد.

### سپاس‌گزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است. همچنین

با توجه به شکل ۸ دو روش اول و دوم دارای نتایج یکسانی بوده‌اند و روش سوم با اختلاف ناچیزی بهتر از روش‌های اول و دوم بوده است. خط میانه همه روش‌ها در وسط طول جعبه آن‌ها قرار دارد که نشان از استاندارد بودن توزیع خطای حاصل از آن‌ها دارد. روش چهارم دارای کمترین مقدار شاخص‌های Q1 و Q3 است و همچنین طول جعبه آن کوچکتر از طول جعبه سایر روش‌ها است. به عبارتی دیگر روش چهارم نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه داده است. با توجه به تعریف خطا به صورت عدد فرود آزمایشگاهی و محاسباتی ( $Error = Fr_{Exp} - Fr_{Calc}$ )، همه روش‌ها عدد فرود جریان بالادست دریچه را تحت شرایط جریان مستغرق، کم برآورد کرده‌اند. مطالعات Sepulveda et al. (2009) در واسنجی روش‌های مختلف جهت تخمین جریان عبوری از دریچه‌های کشویی تحت شرایط جریان مستغرق، نشان می‌دهد که اکثر روش‌ها دارای حداکثر خطای ۱۰ درصد می‌باشند. آن‌ها با استفاده از آنالیز ابعادی و روش خود تشابه ناقص توانستند متوسط خطای تخمین بده جریان تحت شرایط مستغرق را به ۳ درصد کاهش دهند. Clemmens et al. (2003) در مطالعات خود به این نتیجه رسید که روش‌های مختلف واسنجی شده جهت تخمین بده جریان عبوری از دریچه‌ها، تحت شرایط جریان آزاد معمولاً دارای متوسط خطای ۵ درصد هستند و در شرایط جریان مستغرق خطای آن‌ها تا حداکثر ۵۰ درصد نیز افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به نتایج محققین مختلف، نتایج روش‌های ارائه شده در این پژوهش دارای دقت مطلوبی می‌باشند.

### نتیجه‌گیری

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

این پژوهش از حمایت مالی گروه تحقیقات کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران برخوردار بوده است.

## REFERENCES

- Alminagorta, O. and Merkley, G. (2009). Transitional Flow between Orifice and Nonorifice Regimes at a Rectangular Sluice Gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(3), 382–387.
- Ansar, M. (2001). Discussion of „Simultaneous flow over and under a gate by V. Ferro. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(5), 325-326.
- Belaud, G., & Litrico, X. (2008). Closed-form solution of the potential flow in a contracted flume. *Journal of Fluid Mechanics*, 599, 299-308.
- Cassan, L., and Belaud, G. (2011). Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4), 367-373.
- Castro-Orgaz, O., Lozano, D., and Mateos, L. (2010). Energy and momentum velocity coefficients for calibration of submerged sluice gates in irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(9), 610–616.
- Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., & Replogle, J. A. (2003). Calibration of submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 680-687.
- Ferro, V. (2000). Simultaneous flow over and under a gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(3), 190- 193.
- Ghavidel, M.A., Kuchakzadeh, S., Bijankhan, M. (2018). Numerical modeling of flow through sluice gates in all submergence range. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(3), 583-596 (In Farsi)
- Habibzadeh, A., Vatankhah, A., and Rajaratnam, N. (2011). Role of Energy Loss on Discharge Characteristics of Sluice Gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 1079–1084.
- Henry, H. R. (1950). A study of flow from a submerged sluice gate. M.S. thesis, Dept. of Mechanics and Hydraulics, Iowa State Univ., Ames, IA.
- Kim, D. G. (2007). Numerical analysis of free flow past a sluice gate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11(2), 127-132.
- Kubrak, E., Kubrak, J., Kiczko, A., & Kubrak, M. (2020). Flow Measurements Using a Sluice Gate; Analysis of Applicability. *Water*, 12(3), 819.
- Lozano, D., Mateos, L., Merkley, G. P., and Clemmens, A. J. (2009). Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(6), 763–773.
- Rajaratnam, N., and Subramanya, K. (1967). Flow equation for the sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, 93(IR3), 167–186.
- Roth, A., Hager, W. H. (1999). Underflow of standard sluice gate. *Journal of Experiments in Fluids*, 27(4), 339–350.
- Sepulveda Toepfer, C. (2008). “Instrumentation, model identification and control of an experimental irrigation canal.” Ph.D. thesis, Technical Univ. of Catalonia, Barcelona, Spain.
- Sepúlveda, C., Gómez, M., & Rodellar, J. (2009). Benchmark of discharge calibration methods for submerged sluice gates. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(5), 676-682.
- Shammaa, Y., Zhu, D., and Rajaratnam, N. (2005). Flow Upstream of Orifices and Sluice Gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 127–133.
- Shayan, H. K., & Farhoudi, J. (2013). Effective parameters for calculating discharge coefficient of sluice gates. *Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 96-105.
- Steppert, M., Epple, P., & Malcherek, A. (2020). Parametrisation of the Pressure and the Momentum Integral for Inclined Sluiceways Flows. In ASME 2020 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2020 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2020 18th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Woycicki, K. (1931). *Wassersprung, Deckwalze und Ausfluss unter einer Schütze [Hydraulic jump, roller and outflow from below a gate]*. Ph.D. dissertation 639, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- Wu, S., & Rajaratnam, N. (2015). Solutions to rectangular sluice gate flow problems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(12), 06015003.