

## توسعه روشی نوین جهت تخمین ضریب دبی دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق

ابوالفضل برقی خضولو\*<sup>۱</sup>، حسین خلیلی شایان<sup>۲</sup>، جواد فرهودی<sup>۳</sup>، علیرضا وطن خواه<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۳۰

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۴- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a\_barghi2009@ut.ac.ir

### چکیده

اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از دریاچه‌های کشویی از مسائل کلاسیک در علم هیدرولیک محسوب می‌شود. تحقیق حاضر، با استفاده از رابطه بقای انرژی، روشی نوین برای تخمین ضریب دبی دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، ارائه می‌کند. این روش ضریب دبی دریاچه را، به صورت تابعی از عمق آب در بالادست دریاچه و قرائت مانومترهای نصب شده در کف مقطع دریاچه و مستقل از شرایط جریان، بازشدگی دریاچه و عمق پایاب، به دست می‌دهد. به منظور ارزیابی قابلیت کاربرد رابطه پیشنهادی در این تحقیق در تخمین دبی، از نتایج ۴۱۸ سری اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر روی دو دریاچه کشویی با عرض‌های ۲۵ و ۴۰ سانتی‌متر به تفکیک جریان آزاد و مستغرق و در شرایط حضور و عدم حضور بلوک‌های پایاب استفاده گردید. به جهت عدم وابستگی ضریب دبی به عمق پایاب، این روش از مزیت‌های عمده‌ای چون تخمین پیوسته در شرایط جریان آزاد و مستغرق بر اساس یک معادله واحد و دقت بالاتر در دامنه استغراق‌های کمتر برخوردار است. همچنین عدم نیاز به آستانه استغراق دریاچه موجب سهولت کاربرد این روش در برآورد دبی جریان با حضور بلوک‌های مانع‌دار در حوضچه‌های آرامش می‌شود. نتایج نشان داد دخالت ضریب افت انرژی در رابطه پیشنهادی سبب کاهش متوسط قدرمطلق خطای نسبی در حدود ۰/۴ درصد و ۲/۶ درصد به ترتیب برای شرایط جریان آزاد و مستغرق می‌شود. همچنین رابطه پیشنهادی در شرایط جریان مستغرق دارای خطای نسبی تا حدود ۵- درصد است. با این وجود، روش پیشنهادی حساسیت قابل توجهی به فشار مانومتری زیر دریاچه، به ویژه در محدوده استغراق بیشتر دارد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری، جریان آزاد، جریان مستغرق، دبی، دریاچه کشویی

## Developing a New Method for Estimating Discharge Coefficient of Sluice Gates under Free and Submerged Flow Conditions

A Barghi Khezerloo<sup>1\*</sup>, H Khalili Shayan<sup>2</sup>, J Farhoudi<sup>3</sup>, AR Vatankhah<sup>4</sup>

Received: 2 August 2015 Accepted: 20 August 2016

1- Ph.D. student in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran, Iran

2- Ph.D. student in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran, Iran

3- Prof., Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran, Iran

4- Assoc. Prof., Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran, Iran

\*Corresponding Author, Email: a\_barghi2009@ut.ac.ir

### Abstract

Discharge measurement by sluice gates is one of the classical issues in hydraulic engineering. Based on the energy conservation relation, this study presents a novel method for estimating the discharge coefficient of sluice gates under free and submerged flow conditions. This method gives the discharge coefficient of sluice gates only as a function of upstream depth and bottom pressure measured by manometers located under the gate lip and is independent of flow conditions (free and submerged), gate opening and tailwater depth. For evaluating the applicability of the proposed equation in this research for estimating the flow discharge, the experimental results (418 runs) of two sluice gates with 25 and 40 cm widths are used in the conditions of presence and absence of end baffle blocks for both free and submerged flows. Independency of discharge coefficient from the tailwater depth has important advantages such as: continuous estimation of discharge coefficient under free and submerged flow conditions using a unified equation and higher accuracy at the lower submergence. Also being independent of tailwater depth makes easy flow estimation even at the presence of baffle blocks on the stilling basins. The results show that, applying the energy loss coefficient in the proposed equation decreases the mean absolute relative errors to 0.4% and 2.6% for free and submerged flow conditions respectively. Also the proposed equation has a relative error less than 5% under submerged flow conditions. The proposed method is very sensitive to bottom pressure head especially under higher submergence levels.

**Keywords:** Discharge, Free flow, Measurement, Sluice gate, Submerged flow

### مقدمه

دریچه‌های کشویی از جمله ساده‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که می‌توانند جهت اندازه‌گیری جریان در کانال‌های روباز مورد استفاده قرار گیرند. دقت کاربرد این سازه در تخمین جریان در شرایط کاربرد صحرائی در جریان آزاد قابل قبول ارزیابی شده است. با این وجود در شرایط جریان مستغرق خطای

اندازه‌گیری دبی جریان توسط دریچه‌های کشویی از روش‌های پیشنهادی پیشین، تا بیش از ۴۰ درصد در شرایط صحرائی گزارش شده است (کلمنس و همکاران ۲۰۰۳). هنری (۱۹۵۰)، نموداری را جهت تخمین ضریب دبی دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کرد که همچنان به‌عنوان مرجع در این زمینه مطرح است. راجاراتنام و سابرامانیا (۱۹۶۷)، با

مومنتم، روابطی را برای تخمین ضریب دبی دریاچه در شرایط آزاد و مستغرق، ارائه کردند. ایشان ضمن ارائه متوسط مقادیر ضریب افت انرژی دریاچه در شرایط جریان آزاد و مستغرق، بیان داشتند ضریب افت انرژی در تخمین ضریب دبی یک پارامتر ضروری است و نباید نادیده گرفته شود. بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۲)، بیان داشتند روش پیشنهادی توسط فررو (۲۰۰۰) در شرایط آزاد، دقت مناسبی دارد؛ ولی در شرایط جریان مستغرق و به‌ویژه در دامنه استغراق‌های کم، دقت کمتری دارد. ایشان با استفاده از اصل خود تشابه ناقص و معرفی ضریب کاهش دبی، رابطه‌ای جهت تخمین پیوسته عمق بحرانی در شرایط آزاد و مستغرق ارائه کردند. کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۳)، روش انرژی-مومنتم را با فرضیات قراردادی آن مورد بازنگری قرار دادند. ایشان با در نظر گرفتن تأثیر افت انرژی دریاچه و شار مومنتم غلتاب، روش جدیدی جهت تخمین دبی دریاچه‌های کشویی مستغرق، ارائه کردند. خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)، با استفاده از روابط انرژی و مومنتم و تعیین مقادیر متوسط ضریب افت انرژی در شرایط جریان آزاد و مستغرق که وابسته به بازشدگی نسبی و عمق پایاب نسبی هستند، ضریب دبی دریاچه کشویی را تخمین زدند. سویدا (۲۰۱۴) واسنجی مجموعه دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان مستغرق را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان آزمایش‌های خود را بر روی عملکرد متقارن و نامتقارن دریاچه‌های کشویی مجتمع در شرایط جریان آزمایشگاهی بر روی مدلی متشکل از پنج دریاچه انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد با ثابت ماندن سایر پارامترهای موثر، میزان آبگذری مجموعه دریاچه‌ها در شرایط عملکرد نامتقارن دریاچه‌ها نسبت به عملکرد متقارن افزایش خواهد یافت. کاسترو-ارگاز و هگر (۲۰۱۴)، خصوصیات جریان عبوری از دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق را با استفاده از تقریب‌های مرتبه بالاتر مدل یک‌بعدی بوزینسک مورد

بهره‌گیری از روابط انرژی و مومنتم، روابطی را جهت تخمین ضریب دبی در شرایط آزاد و مستغرق ارائه کرده و نتایج هنری (۱۹۵۰) را تایید کردند. سوامی (۱۹۹۲)، با رقومی‌کردن نمودار هنری (۱۹۵۰) روابطی را جهت تخمین ضریب دبی دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، ارائه کرد. مونتس (۱۹۹۷)، با بهره‌گیری از روش نگاشت همدیس، روشی عددی جهت حل روابط جریان غیر لزج از دریاچه‌های کشویی ارائه کرد. روت و هگر (۱۹۹۹) مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای پیرامون خصوصیات جریان آزاد از دریاچه‌های کشویی نظیر ضریب دبی، توزیع سرعت و فشار در پشت دریاچه و کف کانال، انجام دادند. فررو (۲۰۰۰) بواسطه کاربرد نظریه باکینگهام، مفهوم خودتشابه ناقص<sup>۱</sup> و بهره‌مندی از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی، رابطه دبی-اشل دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد بر پایه تخمین عمق بحرانی نسبی در ارتباط با عمق بالادست نسبی ارائه نمود. این روش در شرایط مستغرق، توسط انصار (۲۰۰۱) و فررو (۲۰۰۱) توسعه داده شد. لزانو و همکاران (۲۰۰۹)، با تکیه بر مجموعه داده‌های صحرائی، به ارزیابی روش‌های واسنجی دریاچه‌های کشویی پرداختند. ایشان دریافتند روش انرژی-مومنتم با انتخاب مقادیر مناسب برای ضریب تنگ‌شدگی، دارای دقت مناسب است. کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۰)، با به‌کارگیری اصول انرژی و مومنتم و دخالت ضرایب تصحیح سرعت و مومنتم در روابط انرژی و مومنتم، روشی جدید را جهت واسنجی دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان مستغرق ارائه کردند. ایشان بیان داشتند روش پیشنهادی در مقایسه با داده‌های صحرائی دارای دقت مناسب است. با این‌وجود بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۲)، نشان دادند روش پیشنهادی ایشان در دامنه استغراق‌های کم دریاچه، خطای قابل توجهی دارد. حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از حل همزمان روابط انرژی و

<sup>۱</sup> ISS: Incomplete self similarity

بلافاصله پس از مقطع دریچه را به عنوان پارامتری نوین معرفی نمودند که اندازه‌گیری مستقیم آن همراه با بازشدگی و عمق بالادست می‌تواند تخمین مناسبی از دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق مستقل از نیاز به اندازه‌گیری عمق پایاب به دست دهد. با این وجود اندازه‌گیری مستقیم عمق چسبیده به دریچه در شرایط صحرایی به دلیل مشکلات ناشی از سرعت‌ها و نیروهای قابل‌توجه در مقطع پس از دریچه و نوسان‌های قابل‌توجه سطح آب در این مقطع، عملاً غیرممکن است. وال (۲۰۰۴) اشاره می‌کند در صورت ارائه یک روش مناسب جهت اندازه‌گیری مستقیم عمق پس از دریچه، مشکلات ناشی از تأثیر پایاب در اندازه‌گیری دبی دریچه‌های مجتمع رفع می‌گردد.

مطالعه حاضر سعی در معرفی بار فشاری وارد بر کف در مقطع دریچه‌های کشویی به عنوان یک پارامتر جایگزین مناسب عمق پایاب جهت اندازه‌گیری پیوسته دبی دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق دارد. تخمین دبی دریچه‌های کشویی بر اساس اندازه‌گیری بار فشاری در مقطع دریچه، مفهوم نوینی است که نیازمند بررسی بیشتر جنبه‌های مختلف کاربرد این پارامتر در موارد عملی است.

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از رابطه انرژی در فاصله بالادست دریچه تا مقطع بازشدگی، رابطه‌ای جدید و نظری جهت تخمین ضریب دبی دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه شده است. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، محدوده تغییرات خطای نسبی تخمین ضریب دبی از رابطه پیشنهادی تعیین و دقت روش‌های مختلف در شرایط حضور و عدم حضور بلوک‌های پایاب (که ممکن است جهت کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش پایین دست دریچه‌ها، به کار روند)، ارزیابی شده

بررسی قرار دادند. نیمرخ سطح آب در بالادست دریچه، نیمرخ جت خروجی از دریچه کشویی در شرایط جریان آزاد، توزیع عمقی مولفه قائم سرعت و توزیع عمقی فشار غیر استاتیک وارد بر پشت دریچه، توزیع فشار وارد بر کف کانال و در نهایت نیمرخ جت جریانی رو به جلو در پایین دست دریچه‌های کشویی مستغرق در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. بی‌جن خان و کوچکزاده (۲۰۱۴)، خصوصیات پرش هیدرولیکی آزاد ناشی از مانور دو دریچه کشویی موازی با بازشدگی متفاوت را به صورت آزمایشگاهی و نظری مورد بررسی قرار دادند. بی‌جن خان و کوچکزاده (۲۰۱۵)، عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های کشویی موازی تحت بار آبی کم در بالادست را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان خصوصیات هیدرولیکی دریچه‌های کشویی موازی در شرایط باز بودن یک دریچه و بسته بودن سایر دریچه‌ها را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.

مروری بر مجموعه مطالعات انجام شده نشان می‌دهد، همچنان چالش‌هایی در زمینه تخمین ضریب دبی دریچه‌های کشویی به‌ویژه در شرایط جریان مستغرق، وجود دارد. روابط موجود در شرایط جریان مستغرق، دبی جریان را وابسته به عمق پایاب دریچه، بیان می‌کنند. این موضوع سبب خواهد شد روابط پیشنهادی در شرایطی که عرض دریچه و عرض کانال پایین دست تفاوت زیادی دارند یا حضور چندین دریچه در کنار یکدیگر و حضور ضمامم حوضچه، کارآیی خود را از دست دهند. در شرایط حضور مجموعه دریچه‌ها در مجاورت یکدیگر، ممکن است دریچه‌ها دارای بازشدگی متفاوت بوده و وضعیت متفاوتی از شرایط جریان و پرش هیدرولیکی در پایاب مجموعه دریچه‌ها حاصل از ترکیب جت‌های مختلف ایجاد نماید. این موضوع تخمین دبی عبوری از مجموعه دریچه‌ها را با مشکلاتی مواجه می‌سازد. یک روش، جایگزینی عمق پایاب با یک معیار مناسب در مقطع دریچه است. برخی از محققان مانند کلمنس و همکاران (۲۰۰۳) عمق جریان

پس از ساده‌سازی رابطه ۲، رابطه‌ای به فرم ذیل جهت تخمین دبی عبوری از واحد عرض دریچه، حاصل خواهد شد:

$$q = a \sqrt{\frac{2g(y_0 - h)}{1 + \lambda}} \quad [۳]$$

همچنین با استفاده از تعریف عمومی ضریب دبی دریچه ( $C_d = \frac{q}{a\sqrt{2gy_0}}$ )، خواهیم داشت:

$$C_d = \sqrt{\frac{1 - h/y_0}{1 + \lambda}} \quad [۴]$$

این رابطه، ضریب دبی دریچه کشویی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق، به صورت تابعی از قرائت مانومتر زیر دریچه و عمق آب در بالادست، بیان می‌کند. اگرچه پارامترهای مهمی چون بازشدگی دریچه، مشخصات کانال پایین دست و عمق پایاب به صورت مستقیم در رابطه ۴ وارد نشده‌اند، اما مجموعه این عوامل مؤثر بر قرائت بار فشاری  $h$  می‌باشند. به عبارت دیگر، به ازای عبور یک دبی مشخص از زیر دریچه تحت بازشدگی یکسان، با افزایش عمق پایاب، عمق آب در بالادست و نیز عمق آب چسبیده به دریچه نیز افزایش خواهد یافت که مؤثر بر تغییر قرائت مانومتری زیر دریچه خواهد بود. در نتیجه، همواره یک مقدار برای قرائت مانومتری زیر دریچه، به ازای ترکیب خاصی از استغراق دریچه، مشخصات کانال پایین دست، ضریب دبی، عمق آب در بالادست و بازشدگی، وجود خواهد داشت. بر همین اساس به جهت وابستگی بار فشاری  $h$  به عوامل مختلف، انتظار می‌رود رابطه پیشنهادی حساسیت قابل توجهی نسبت به برداشت بار فشاری  $h$  در مقطع دریچه داشته باشد.

#### تشریح انجام آزمایشات

جهت ارزیابی روش پیشنهادی در این تحقیق و روابط ارائه شده توسط سایر محققان در برآورد دبی جریان در شرایط جریان آزاد و مستغرق، آزمایش‌هایی بر روی دو مدل آزمایشگاهی به عرض‌های ۲۵ و ۴۰

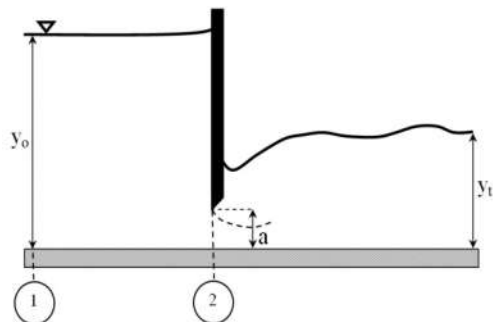
است. همچنین، حساسیت نسبی روابط به پارامترهای مختلف، مقایسه شده است.

#### تشریح روش پیشنهادی

روش پیشنهادی جهت تخمین ضریب دبی ساده و فقط بر مبنای کاربرد رابطه انرژی است. با استفاده از رابطه انرژی بین مقطع بالادست دریچه و مقطع بازشدگی (مقاطع ۱ و ۲ در شکل ۱) در واحد عرض دریچه و در نظر گرفتن افت بار انرژی دریچه معادل  $\lambda \frac{q^2}{2ga^2}$ ، خواهیم داشت ( $\lambda$  ضریب افت انرژی،  $q$  دبی واحد عرض دریچه،  $a$  بازشدگی دریچه و  $g$  شتاب ثقل است):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \lambda \frac{q^2}{2ga^2} \quad [۱]$$

که در آن،  $z$  بار ارتفاعی،  $p/\gamma$  بار فشاری،  $\gamma$  وزن مخصوص آب و  $V$  سرعت متوسط جریان است. با در نظر گرفتن یک مانومتر واقع در کف کانال و در مقطع دریچه (مقطع ۲)، فرض می‌گردد قرائت مانومتری در این مقطع بیانگر بار فشاری باشد ( $\frac{p_2}{\gamma} = h$ ). همچنین با صرف نظر از بار سرعت در بالادست دریچه ( $\frac{V_1^2}{2g} \approx 0$ ) و در نظر گرفتن کف کانال به عنوان سطح مبنای ارتفاعی در  $z_1 = z_2 = 0$  خواهیم داشت:



شکل ۱- نمایش شماتیک پارامترهای مؤثر در تحلیل جریان پشت دریچه کشویی.

$$0 + y_0 + 0 = 0 + h + \frac{q^2}{2ga^2} + \lambda \frac{q^2}{2ga^2} \quad [۲]$$

هیدرولیکی آزاد ( $D_2$ ) معادل ۳۰ سانتی‌متر تا ۶۷ سانتی‌متر از دریچه طراحی گردید (شکل ۲-ب). بر اساس معیار پیشنهادی USBR، بلوک‌ها در ردیف‌های مختلف به‌گونه‌ای طراحی گردید که ۵۰٪ از کل عرض حوضچه، توسط بلوک‌ها پوشش داده شود. در هر حالت پس از تثبیت بازشدگی دریچه و دبی جریان، با اعمال پایاب‌های مختلف، گستره وسیعی از تغییرات ضریب دبی و قرائت فشار در مقطع دریچه برداشت شد. در جدول ۱ دامنه تغییرات پارامترهای مختلف در آزمایش‌های انجام‌شده بر روی دو فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است.

به‌منظور ارزیابی کمی قابلیت روش‌های مختلف در تخمین ضریب دبی تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق، از پارامترهای مختلف آماری بیشینه خطا ( $ME$ )، ریشه میانگین مربعات خطا بر حسب درصد ( $RMSE$ )، ضریب باقی‌مانده جرمی ( $CRM$ )، میانگین قدر مطلق خطا ( $MAE$ ) و شاخص کفایت ( $EF$ ) استفاده شد.

$$ME = \text{Max} |C_{di(\text{exp})} - C_{di}| \quad [5]$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{di(\text{exp})} - C_{di})^2}}{E} \quad [6]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n C_{di(\text{exp})} - \sum_{i=1}^n C_{di(\text{cal})}}{\sum_{i=1}^n C_{di(\text{exp})}} \quad [7]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{di(\text{exp})} - C_{di}| \quad [8]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{di(\text{exp})} - M)^2 - \sum_{i=1}^n (C_{di} - C_{di(\text{exp})})^2}{\sum_{i=1}^n (C_{di(\text{exp})} - M)^2} \quad [9]$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n C_{di(\text{exp})}}{n} \quad [10]$$

که در آن،  $C_{di(\text{cal})}$  ضریب دبی محاسباتی،  $C_{di(\text{exp})}$  ضریب دبی مشاهداتی،  $M$  متوسط مقادیر ضریب دبی مشاهداتی و  $n$  تعداد کل داده‌هاست.

سانتی‌متر به‌ترتیب با طول‌های ۱۲ و ۴/۹ متر با شیب صفر، انجام شد. در هر دو حالت از دریچه‌های کشویی لبه‌تیز با زاویه انحراف لبه معادل ۴۵ درجه استفاده شد. شکل ۲-الف، طرح شماتیکی از اجزای مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. دبی جریان در هر حالت توسط یک جریان‌سنج الکترومغناطیسی در محدوده خطای  $\pm 0.2$  تا  $\pm 0.5$  درصد فول اسکیل، اندازه‌گیری شد. همچنین جهت قرائت بهتر و کاهش نوسان در برداشت سطح آب در بالادست دریچه ( $v_0$ ) و به‌ویژه برداشت بارفشاری در مقطع بازشدگی دریچه ( $h$ )، از دو لوله مانومتری قطور استفاده شد. اندازه‌گیری عمق پایاب نیز توسط یک اشل متحرک با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر، انجام شد. عمده مطالعات مربوط به تخمین دریچه‌های کشویی، در شرایط عدم حضور بلوک‌های پایاب صورت گرفته است. این در حالی است که در عمده موارد به‌منظور کنترل پرش هیدرولیکی، ممکن است از اجزایی نظیر بلوک استفاده شود. در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر حضور بلوک‌های حوضچه آرامش پایاب دریچه بر دبی جریان و ارزیابی قابلیت روش‌های پیشنهادی در این حالت، تعدادی آزمایش در حضور بلوک‌های مختلف در فلوم به عرض ۲۵ سانتی‌متر و تحت شرایط جریان مستغرق انجام شد. دلیل انجام آزمایش‌های حضور بلوک خاص شرایط جریان مستغرق، وابستگی عمده دبی عبوری از دریچه به تغییر عمق پایاب و مونت‌م وارده از مقطع پایاب بر حجم کنترل جت خروجی از دریچه است. با افزایش ردیف بلوک‌های موجود در پایاب یا کاهش فاصله آنها نسبت به محل دریچه، مونت‌م وارده از سوی پایین‌دست در خلاف جهت جریان تشدید شده و آبگذری دریچه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بر این اساس بلوک‌های مکعبی با ارتفاع ( $h_3$ ) ۲/۱۴ تا ۴/۱۱ سانتی‌متر با تراکم یک ردیف تا پنج ردیف متوالی بر اساس معیار پیشنهادی USBR در محدوده عدد فرود ( $Fr_1$ ) معادل ۶/۵ تا ۱۰/۵ (به‌ازای بازشدگی دریچه معادل ۲ سانتی‌متر) و ۵ تا ۱۰ (به‌ازای بازشدگی دریچه معادل ۳ سانتی‌متر) و در فاصله ۰/۸ برابر عمق ثانویه پرش

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای بی‌بعد مختلف در مجموعه آزمایش‌ها.

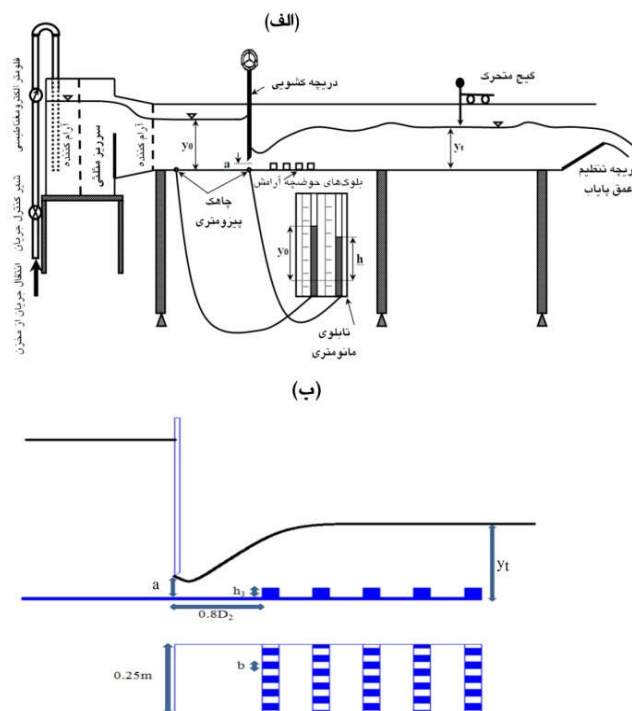
عرض کانال (cm)	شرایط جریان	تعداد آزمایش‌ها	$h/a$	$y_i/a$	$y_0/a$	$C_d$
۴۰	مستغرق (بدون حضور بلوک)	۲۰۴	۱/۲۵-۲۸/۶۵	۱/۶۵۴-۱۶/۶۲۵	۱/۹۴-۳۴/۹۵	۰/۲۳۳-۰/۵۷۹
۲۵	مستغرق (بدون حضور بلوک)	۱۲۱	۵/۱۶۳-۳۲/۰۱۷	۳/۷۹۳-۱۲/۰۵	۸/۳۶۷-۴۷/۲۵	۰/۴۴۷-۰/۵۸۹
۲۵	آزاد (بدون حضور بلوک)	۳۷	۱/۰۵-۲۴/۶۵	-----	۱/۴۷۸-۴۱/۱	۰/۴۹۵-۰/۵۹۹
۲۵	مستغرق-حضور بلوک	۵۶	۶/۸۷۵-۲۸/۹۳۲	۳/۹۵۵-۸/۸۶۵	۹/۹۶۷-۴۶	۰/۵۰۵-۰/۵۶۳

## نتایج و بحث

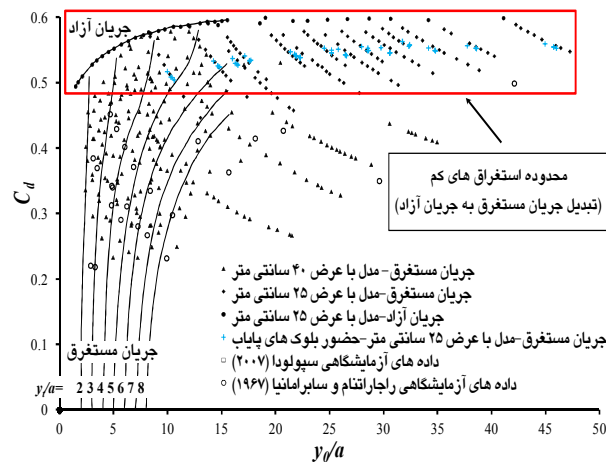
## واسنجی رابطه پیشنهادی تخمین ضریب دبی در شرایط آزاد و مستغرق

در شکل ۳، محدوده تغییرات ضریب دبی از داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق با محدوده داده‌های منتشرشده توسط راجاراتنام و سابرامانیا (۱۹۶۷) و سپولودا (۲۰۰۷)، در قالب نمودار هنری (۱۹۵۰)، مقایسه شده است. ملاحظه می‌گردد، نمودار هنری (۱۹۵۰) که بر اساس برداشت‌های آزمایشگاهی تا محدوده  $2 \leq y_i/a \leq 8$  توسعه داده شده است، بخش زیادی از شرایط عملی

کارکرد دریاچه‌های کشویی را به‌ویژه تحت عمق پایاب زیاد ( $y_i/a > 8$ )، پوشش نمی‌دهد. از شکل ۳ مشخص است که بیشتر برداشت‌های آزمایشگاهی روی مدل ۲۵ سانتی‌متر تحت استغراق‌های کم (ناحیه تبدیل جریان مستغرق به جریان آزاد) دریاچه صورت گرفته که به‌عنوان مکمل محدوده داده‌های برداشت‌شده حاصل از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل ۴۰ سانتی‌متر، مطرح است. این موضوع به‌ویژه در ارزیابی قابلیت تخمین پیوسته رابطه ۴ در شرایط آزاد و مستغرق، سودمند است.



شکل ۲- (الف)، اجزای مدل آزمایشگاهی مورد استفاده و (ب) مشخصات حوضچه پایین دست در شرایط حضور بلوک‌ها در کانال به عرض ۲۵ سانتی‌متر.

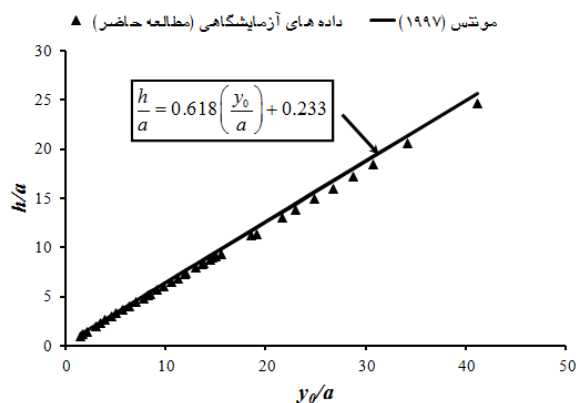


شکل ۳- مقایسه محدوده داده‌های برداشت‌شده آزمایشگاهی در این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات (داده‌های آزمایشگاهی راجاراتنام و سابرامانیا ۱۹۶۷ و سپولودا ۲۰۰۷).

درصد خطای نسبی در مقابل درصد استغراق نسبی ( )  

$$S_r \% = 100 \times \frac{y_t - y_{t(l)}}{y_{t(l)}}$$
  
 پایاب و  $y_{t(l)}$  عمق پایاب در شرایط آستانه استغراق پرش هیدرولیکی است، که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (خلیلی شایان و فرهودی ۲۰۱۳):

$$y_{t(l)} = \frac{C_c a}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{16}{\frac{C_c a}{2} \left( \frac{C_c a}{2} + 1 \right)}} - 1 \right) \quad [11]$$



شکل ۴- مقایسه مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی مونتس (۱۹۹۷) در شرایط آزاد با برداشت‌های آزمایشگاهی.

از شکل ۵ مشاهده می‌گردد با دخالت ضریب افت انرژی در رابطه ۳، خطای نسبی تخمین دبی به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. تحت جریان آزاد، متوسط قدر مطلق درصد خطای نسبی از ۵/۵۴ درصد با

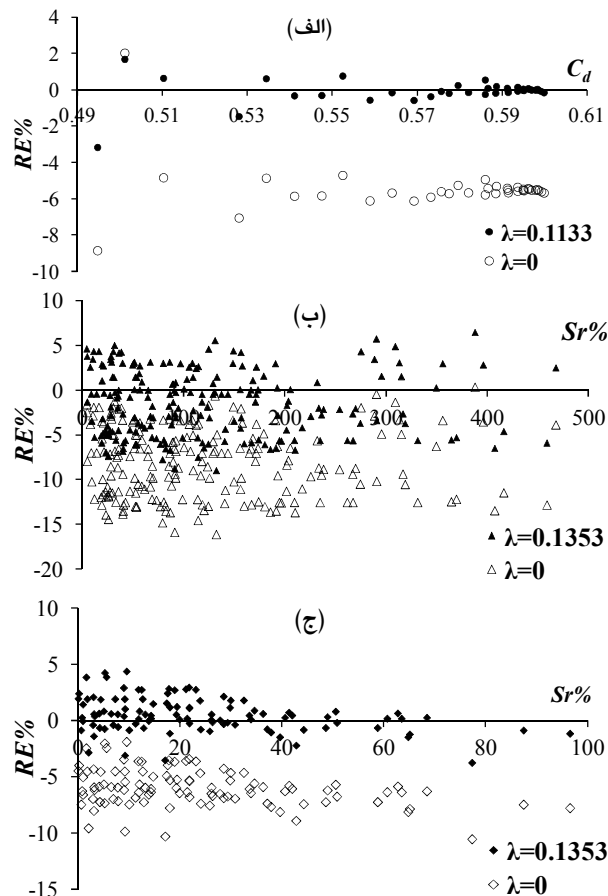
مطابق با رابطه ۴، تخمین ضریب دبی دریچه کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، مستلزم اطلاع از بار فشاری  $h$  و ضریب افت انرژی دریچه است. شکل ۴ انطباق مناسب تغییرات بار فشاری نسبی در مقطع دریچه در مقابل عمق بالادست نسبی از داده‌های آزمایشگاهی با رابطه پیشنهادی مونتس (۱۹۹۷) را در شرایط جریان آزاد نشان می‌دهد. در شرایط آزاد، با مینا قراردادن مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در محدوده ذکر شده در جدول ۱، مقدار ضریب افت انرژی بهینه جهت نمودن اختلاف بین مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج تخمین از رابطه ۳، معادل با  $\lambda=0.1133$  به دست آمد. در شرایط جریان مستغرق نیز مقدار ضریب افت انرژی بهینه از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در دامنه استغراق‌های بالا (مدل با عرض ۴۰ سانتی‌متر) تا استغراق‌های کمتر (مدل با عرض ۲۵ سانتی‌متر)، معادل با  $\lambda=0.1353$  حاصل شد. شکل ۵- الف، تغییرات درصد خطای نسبی برآورد دبی جریان آزاد، را تحت شرایط جریان آزاد،

$$RE \% = 100 \times \frac{q_{exp} - q_{cal}}{q_{exp}}$$

نشان می‌دهد (  $q_{cal}$  و  $q_{exp}$  به ترتیب مقادیر دبی واحد عرض اندازه‌گیری‌شده و محاسباتی است). همچنین در شکل‌های ۵- ب و ۵- ج، جهت شناخت میزان قابلیت کاربرد رابطه ۳ در دامنه استغراق‌های مختلف، تغییرات



مختلف تنها توسط یک منحنی مشخص شده است. در شکل ۶، مقادیر آزمایشگاهی ضریب دبی تحت شرایط مختلف، نشان داده شده است.



شکل ۵- درصد خطای نسبی تخمین دبی از رابطه ۳. (الف) جریان آزاد، مدل با عرض ۲۵ سانتی‌متر، (ب) جریان مستغرق، مدل با عرض ۴۰ سانتی‌متر و (ج) جریان مستغرق، مدل با عرض ۲۵ سانتی‌متر.

همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد، رابطه ۴ منوط به برداشت صحیح بار فشاری  $h$  می‌تواند جهت تخمین آسان و دقیق ضریب دبی دریاچه تحت شرایط مختلف، به کار رود. این در حالی است که نمودار پیشنهادی توسط هنری (۱۹۵۰) تنها در محدوده  $2 \leq y/a \leq 8$  ارائه شده است. در نتیجه در مقادیر بزرگتر عمق پایاب نسبی که بر اساس نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۳، حالت‌های معمول در عملکرد دریاچه‌هاست، دچار نقص است. همچنین ناپیوستگی‌هایی بین منحنی‌های آزاد و مستغرق در دامنه

اغماض از تأثیر افت انرژی، به حدود ۰/۳۶ درصد با دخالت تأثیر افت انرژی، کاهش یافته است. در جریان مستغرق، با در نظر گرفتن مقدار تعیین شده برای ضریب افت انرژی، متوسط قدرمطلق درصد خطای نسبی از حدود ۷/۳۱ درصد به حدود ۲/۵۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در شرایط جریان آزاد، درصد خطای نسبی در محدوده (۳/۱۵-) تا (۱/۷۱+) درصد و در شرایط جریان مستغرق، درصد خطای نسبی در محدوده (۸/۹۴-) تا (۶/۵۱+) درصد با اعمال ضرایب افت انرژی، تغییر می‌کند. حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، بر مبنای نتایج آزمایشگاهی راجارانتام و سابرامانیا (۱۹۶۷)، با در نظر گرفتن افت انرژی دریاچه برابر  $\frac{q^2}{2gC_c^2 a^2}$  و ضریب تنگ‌شدگی معادل با ۰/۶۱۱، متوسط مقدار ضریب افت انرژی دریاچه را در شرایط آزاد و مستغرق، به ترتیب معادل با ۰/۰۶۲ و ۰/۰۸۸ ارائه کردند. با در نظر گرفتن مقادیر پیشنهادی برای ضریب  $\lambda$  و رابطه  $\lambda = \frac{\varepsilon}{C_c^2}$ ، مقادیر ضریب افت انرژی، در شرایط جریان آزاد و مستغرق، به ترتیب معادل با ۰/۰۴۲۳ و ۰/۰۵۰۵ به دست می‌آید. بر این اساس میزان افت انرژی تحت شرایط آزاد کمتر از شرایط مستغرق است که قبلاً توسط حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش شده است. مشاهده می‌گردد ضریب افت انرژی پیشنهادی در این تحقیق، کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، می‌باشد. در توجیه این مشاهده می‌توان گفت به جهت کاربرد رابطه انرژی در مقطع بالادست دریاچه، در روش پیشنهادی تنها افت انرژی ناشی از جریان‌های گردابه‌ای بالادست در نظر گرفته شده و افت انرژی ناشی از توسعه لایه مرزی تا مقطع تنگ‌شدگی و تلاطم جریان در پایین دست دریاچه، لحاظ نمی‌گردد.

شکل ۶، تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت  $h/y_0$  محاسبه شده از رابطه ۴ را به‌ازای مقادیر ضریب افت انرژی معادل صفر و ۰/۱۳۵۳ نشان می‌دهد. در این نمودار، جریان‌های آزاد و مستغرق در عمق‌های پایاب

از رابطه ۱۲ مشخص است که با افزایش نسبت  $y_0/a$  (با  $a/y_0 \rightarrow 0$ )، با در نظر گرفتن ضریب تنگ‌شدگی معادل ۰/۶۱ و ضریب افت انرژی معادل با ۰/۰۶۲، مقدار ضریب دبی به حدود ۰/۵۹ نزدیک می‌شود

( $C_d \rightarrow \frac{C_c}{\sqrt{1+\varepsilon}}$ ) از سوی دیگر با در نظر گرفتن فرم کلی

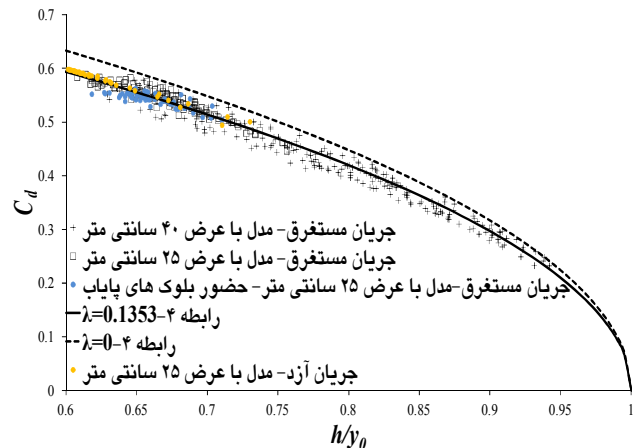
رابطه دبی-اشل به صورت  $\frac{y_c}{a} = \alpha \left( \frac{y_0}{a} \right)^\beta$  خواهیم داشت:

$$C_d = \frac{\alpha \sqrt{\alpha} \left( \frac{y_0}{a} \right)^{\frac{3\beta-1}{2}}}{\sqrt{2}} \quad [13]$$

مقادیر ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  توسط فررو (۲۰۰۰) به ترتیب معادل ۰/۸۳۰ و ۰/۳۷۸ و توسط بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۲) به ترتیب معادل ۰/۷۸۳۹ و ۰/۳۸۴۵ ارائه شده است. در هر دو حالت  $\frac{3\beta-1}{2} > 0$  و در نتیجه با افزایش نسبت  $y_0/a$  مقدار ضریب دبی، همواره افزایش می‌یابد.

جدول ۲ و ۳، قابلیت کاربرد روش‌های مختلف را در تخمین دبی دریاچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق بر اساس آماره‌های مختلف (روابط ۵ تا ۹)، بدست می‌دهد. ملاحظه می‌گردد روش پیشنهادی در این تحقیق و نیز روابط پیشنهادی توسط خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)، حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، الحمید (۱۹۹۹) و ناگو (۱۹۷۸)، دارای دقت بیشتری در برآورد ضریب دبی دریاچه در شرایط آزاد هستند. اما رابطه دبی-اشل پیشنهادی فررو (۲۰۰۰)، خطای بیشتری در برآورد ضریب دبی نسبت به سایر روش‌ها دارد. مقادیر پارامترهای آماری در جدول ۳ نیز بیان‌گر افزایش دقت برآورد ضریب دبی از روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها تحت شرایط جریان مستغرق است.

استغراق‌های کمتر در این نمودار مشاهده می‌شود. از سوی دیگر تخمین ضریب دبی در سایر مقادیر عمق پایاب نسبی در محدوده فوق نیازمند درون‌یابی است که می‌تواند توأم با خطای قابل‌توجهی باشد.



شکل ۶- نمودار عمومی تخمین ضریب دبی از رابطه ۴ در

مقابل بار فشاری نسبی  $h/y_0$

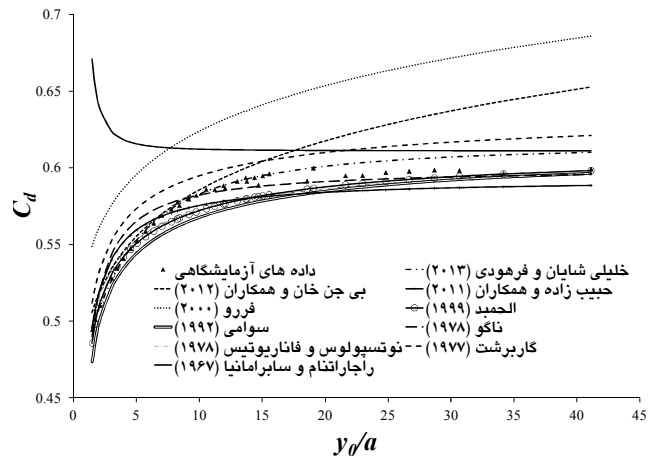
ارزیابی روش‌های تخمین دبی از دریاچه کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق

در شکل ۷، مقادیر ضریب دبی در شرایط جریان آزاد از روش‌های مختلف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی، مقایسه شده است. از این شکل مشخص است روابط دبی-اشل اعم از رابطه پیشنهادی فررو (۲۰۰۰)، ضریب دبی را به میزان قابل‌توجهی بیشتر از سایر روش‌ها و نیز نتایج برداشت‌شده نشان می‌دهند. در این حالت ضریب دبی از روش فررو (۲۰۰۰)، تا حدود ۰/۶۸ نیز بر مبنای شکل ۷، افزایش یافته است. علت این امر نوع فرم تابع نمایی انتخابی توسط فررو (۲۰۰۰)، به صورت  $\frac{y_c}{a} = \alpha \left( \frac{y_0}{a} \right)^\beta$  است که فاقد یک مبنای نظری مشخص می‌باشد. در شرایط آزاد، رابطه انرژی قبل و پس از دریاچه، رابطه‌ای به شکل ذیل را جهت تخمین ضریب دبی، به دست می‌دهد (خلیلی شایان و فرهودی ۲۰۱۳):

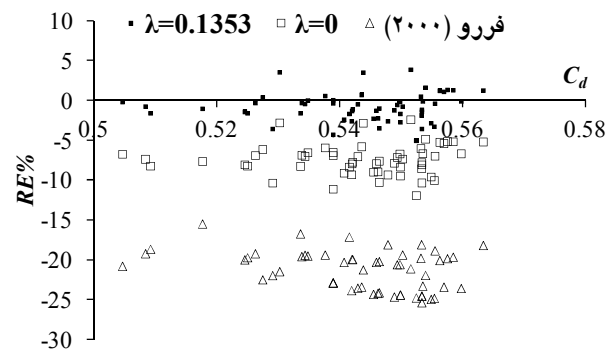
$$C_d = C_c \sqrt{\frac{1 - C_c \left( \frac{a}{y_0} \right)}{1 + \varepsilon - C_c^2 \left( \frac{a}{y_0} \right)^2}} \quad [12]$$

### تخمین ضریب دبی دریاچه کشویی در شرایط حضور بلوک‌های پایاب

به‌منظور ارزیابی تأثیر حضور بلوک‌های کنترل‌کننده پرش هیدرولیکی بر دقت تخمین ضریب دبی از روش‌های مختلف، از نتایج آزمایشگاهی این تحقیق تحت حضور بلوک‌ها در مدل به عرض ۲۵ سانتی‌متر تحت شرایط جریان مستغرق، استفاده شد. با قراردادن مقادیر حاصل از قرائت بازشدگی دریاچه، عمق بالادست و عمق پایاب از شرایط آزمایشگاهی در روابط مختلف مشخص شد، روابط پیشنهادی توسط سوامی (۱۹۹۲)، حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۲) و خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)، اساساً به جهت فرم ریاضی‌شان، مقدار صحیحی برای ضریب دبی دریاچه به‌دست نمی‌دهند. در بین روش‌های پیشین، تنها روش فررو (۲۰۰۰)، مقادیری را برای ضریب دبی تحت چنین شرایطی به‌دست می‌دهد که مطابق با شکل ۸، درصد خطاهای نسبی در این وضعیت قابل‌توجه است. این درحالی‌ست که رابطه ۴، به جهت عدم وابستگی مستقیم به عمق پایاب و شرایط پایین‌دست، ضریب دبی دریاچه را مطابق با شکل ۸ در محدوده مناسبی تخمین می‌زند.



شکل ۷- مقایسه روش‌های مختلف تخمین ضریب دبی تحت شرایط جریان آزاد بر مبنای نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۸- درصد خطای نسبی تخمین ضریب دبی دریاچه مستغرق در حضور بلوک‌های پایاب از روش پیشنهادی.

جدول ۲- ارزیابی قابلیت روش‌های مختلف برآورد ضریب دبی در شرایط آزاد.

روش	ME	RMSE	EF	CRM	MAE
مطالعه حاضر ( $\lambda=0.1133$ )	۰/۰۱۶	۰/۶۱۹	۰/۹۸۵	-۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۲
مطالعه حاضر ( $\lambda=0$ )	۰/۰۴۴	۵/۵۹۵	-۰/۲۵۴	-۰/۰۵۴	۰/۰۳۲
خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)	۰/۰۱۲	۰/۸۰۴	۰/۹۷۴	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
بی جن خان و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۰۵۴	۳/۳۳۸	۰/۵۵۴	۰/۰۲۳	۰/۰۱۳
حبیب زاده و همکاران (۲۰۱۱)	۰/۰۱۶	۱/۶۷۹	۰/۸۸۷	۰/۰۰۸	-۰/۰۰۹
فررو (۲۰۰۰)	۰/۰۸۷	۹/۱۴۱	-۲/۳۴۵	-۰/۰۸۹	۰/۰۵۱
الحمید (۱۹۹۹)	۰/۰۱۴	۱/۴۵۲	۰/۹۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷
سوامی (۱۹۹۲)	۰/۰۲۱	۲/۱۶۸	۰/۸۱۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲
ناگو (۱۹۷۸)	۰/۰۱۵	۱/۲۳۵	۰/۹۳۹	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۶
نوتسوپولوس و فاناریوتیس (۱۹۷۸)	۰/۰۱۴	۱/۴۸۳	۰/۹۱۲	۰/۰۱۰	۰/۰۰۷
گاربرشت (۱۹۷۷)	۰/۰۲۴	۲/۹۰۲	۰/۶۶۳	-۰/۰۲۸	۰/۰۱۶
راجاراتنام و ساپرامانیا (۱۹۶۷)	۱/۱۷۶	۱۰/۰۵۴	-۳/۰۴۸	-۰/۰۷۳	۰/۰۴۲

## تحلیل حساسیت نسبی

مسأله مهم در تخمین ضریب دبی از رابطه ۴، اندازه‌گیری بار فشاری در مقطع دریاچه ( $h$ )، می‌باشد. برای این منظور می‌توان از چاهک مشاهداتی استفاده نمود. این امر مستلزم ایجاد یک آستانه در ترازى بالاتر از کف و نصب حس‌گرهای اندازه‌گیری فشار یا لوله پرائنتل در مقطع دریاچه است. مسأله دیگر حساسیت رابطه ۴ به قرائت بار فشاری واقع در زیر دریاچه است.

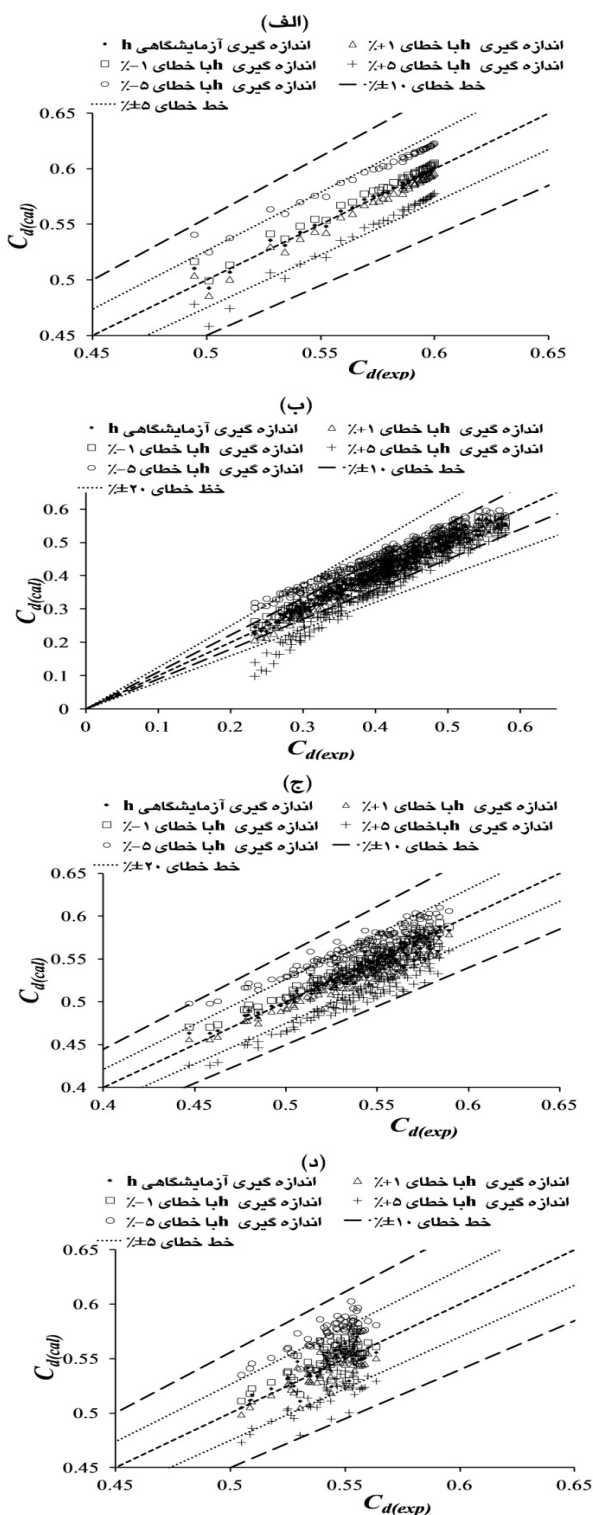
اگرچه قرائت بار فشاری در مقطع بازشدگی در برگیرنده تاثیر عمق پایاب نیز می‌باشد و در این وضعیت، به جهت ماهیت دینامیکی فشار، نوسانات زیادی مورد انتظار است، لکن مشاهدات آزمایشگاهی نشان‌دهنده ثبوت قابل‌توجه سطح آب در مانومتر واقع در زیر دریاچه است. علت این مسأله تأثیر همزمان سطوح آب بلافاصله در بالادست و پایین‌دست دریاچه است، بدین معنا که با افزایش عمق پایاب، سطح آب در بالادست افزایش یافته و سطح آب در مانومتر نوسان چندانی نخواهد داشت.

جدول ۳- ارزیابی قابلیت روش‌های مختلف برآورد ضریب دبی در شرایط مستغرق.

روش	ME	RMSE	EF	CRM	MAE
مطالعه حاضر ( $\lambda=0.1353$ )	۰/۰۳۷	۳/۹۵۱	۰/۹۶۱	-۰/۰۱۴	۰/۰۱۳
مطالعه حاضر ( $\lambda=0$ )	۰/۰۷۰	۹/۰۱۰	۰/۷۹۸	-۰/۰۸۰	۰/۰۳۳
خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)	۰/۱۸۱	۱۳/۹۶۰	۰/۵۱۵	۰/۰۵۲	۰/۰۵۱
بی جن خان و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۱۵۹	۱۶/۰۹۶	۰/۳۵۵	۰/۰۰۴	۰/۰۵۸
حبیب زاده و همکاران (۲۰۱۱)	۰/۱۸۲	۱۴/۱۳۷	۰/۵۰۳	۰/۰۵۷	۰/۰۵۲
فررو (۲۰۰۱)	۰/۱۹۹	۲۱/۰۰۶	-۰/۰۹۸	-۰/۰۹۳	۰/۰۶۱
سوامی (۱۹۹۲)	۰/۲۱۵	۱۷/۵۱۸	۰/۲۳۶	۰/۱۱۷	۰/۰۵۸

شکل ۹، جهت بررسی میزان شدت تغییرات ضریب دبی جریان از رابطه ۴ به‌ازای بروز  $\pm 1\%$  و  $\pm 5\%$  خطا در قرائت بار فشاری  $h$  تحت شرایط مختلف جریان و در حضور یا عدم حضور بلوک‌های پایاب، رسم شده است. از این شکل مشخص است با افزایش مقدار قرائت‌شده بار فشاری نسبت به مقدار صحیح خود، ضریب دبی محاسبه‌شده نسبت به ضریب دبی مشاهداتی کاهش خواهد یافت. مشاهده می‌گردد تحت شرایط جریان آزاد، قرائت بار فشاری  $h$  با  $\pm 5\%$  خطا سبب بروز خطاهایی تا حدود  $\pm 8/6\%$  در تخمین ضریب دبی خواهد شد (شکل ۹- الف). تحت شرایط مستغرق و در دامنه استغراق‌های کمتر این خطا تا حدود  $\pm 9/5\%$  نیز افزایش خواهد یافت (شکل ۹- ب). قابل‌توجه است با افزایش میزان استغراق دریاچه و کاهش ضریب دبی دریاچه، میزان وابستگی به پارامتر بار فشاری  $h$  بسیار شدید

است؛ به‌طوری‌که قرائت بار فشاری با خطای  $\pm 5\%$  و  $\pm 1\%$  به‌ترتیب سبب بروز خطاهایی در حدود  $57/6\%$  و  $13/93\%$  در تخمین ضریب دبی خواهد شد. همچنین اندازه‌گیری پارامتر  $h$  با خطای  $\pm 5\%$  و  $\pm 1\%$ ، تخمین ضریب دبی دریاچه را به‌ترتیب در حدود  $36/6\%$  و  $12/41\%$  بیشتر از مقدار متناظر آزمایشگاهی به‌دست می‌دهد (شکل ۹- ج). به‌طور مشابه محدوده تغییرات ضریب دبی به‌ازای قرائت بار فشاری با خطاهای مختلف در شرایط حضور بلوک‌های پایاب نیز در شکل (۹- د)، نشان داده شده است. در نتیجه روش پیشنهادی علی‌رغم امتیازات قابل‌توجه فوق، لازم است در تخمین ضریب دبی بخصوص در دامنه استغراق‌های قابل‌توجه دریاچه و مقادیر کمتر ضریب دبی، با دقت بیشتری در برداشت بار فشاری در مقطع دریاچه، به‌کار رود.



شکل ۹- تأثیر قرائت  $h$  با خطای  $\pm 1\%$  و  $\pm 5\%$  بر خطای تخمین ضریب دبی از رابطه ۴، (الف) شرایط جریان آزاد (مدل با عرض ۲۵ سانتی‌متر)، (ب) شرایط جریان مستغرق (مدل با عرض ۴۰ سانتی‌متر)، (ج) شرایط جریان مستغرق (مدل با عرض ۲۵ سانتی‌متر) و (د) حضور بلوک.

در شرایط جریان آزاد، متوسط قدرمطلق درصد خطای نسبی در تخمین دبی دریاچه‌های کشویی از رابطه ۴، معادل  $0.36\%$  برآورد گردید. این در حالی است که متوسط قدرمطلق درصد خطای نسبی از روابط پیشنهادی توسط خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)، بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۲)، حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، فررو (۲۰۰۰)، الحمید (۱۹۹۹)، سوامی (۱۹۹۲)، ناگو (۱۹۷۸)، نوتسوپولوس و فاناریوتیس (۱۹۷۸)، گاربرشت (۱۹۷۷) و راجارتنام و ساپرامانیا (۱۹۶۷)، به ترتیب معادل با  $0.48\%$ ،  $0.24\%$ ،  $0.15\%$ ،  $0.88\%$ ،  $1.22\%$ ،  $0.2/0.2$ ،  $1/3$ ،  $2/81$  و  $7/69$  می‌باشد. در شرایط جریان مستغرق نیز، متوسط قدرمطلق درصد خطای نسبی از رابطه ۴،  $0.55\%$  به دست آمد. متوسط قدرمطلق درصد خطای نسبی در تخمین دبی تحت شرایط جریان مستغرق نیز از روابط پیشنهادی خلیلی شایان و فرهودی (۲۰۱۳)، بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۲)، حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، فررو (۲۰۰۰) و سوامی (۱۹۹۲) به ترتیب معادل با  $0.54\%$ ،  $0.76\%$ ،  $2/98$ ،  $1.06\%$  و  $16/74\%$  تعیین گردید.

### نتیجه‌گیری کلی

مطالعه حاضر با تکیه بر جایگزینی عمق پایاب با اندازه‌گیری بار فشاری در مقطع دریاچه، رابطه‌ای ساده جهت تخمین دبی دریاچه‌های کشویی در تمام شرایط جریان ارائه نمود. رابطه واسنجی شده بر اساس نتایج ۱۸ سری برداشت آزمایشگاهی، متوسط خطایی معادل  $0.36\%$  و  $0.55\%$  درصد به ترتیب در شرایط جریان آزاد و مستغرق، بدست می‌دهد. بر اساس این رابطه، دسته نمودارهای پیشنهادی توسط هنری (۱۹۵۰) در قالب یک منحنی منفرد و پیوسته برای تمام شرایط جریان جایگزین گردید.

اندازه‌گیری بار فشاری با خطایی معادل ۵ درصد در محدوده مقادیر ضریب دبی کمتر از  $0.3$  سبب برآورد دبی با خطایی در حدود ۳۵ درصد خواهد شد. در نتیجه لازم است اندازه‌گیری این پارامتر بخصوص در استغراق‌های بیشتر دریاچه (ضریب دبی کمتر)، با دقت بیشتری صورت پذیرد که خود مستلزم استفاده از ابزار دقیق اندازه‌گیری بار فشاری است.

در حضور بلوک‌های کنترل‌کننده پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریاچه، متوسط قدر مطلق خطای نسبی از روش پیشنهادی در محدوده اندازه‌گیری‌ها،  $1/55$  درصد برآورد گردید. این درحالی‌است که عمده روش‌ها در این وضعیت به دلیل کاهش عمق پایاب نسبت به شرایط عدم حضور بلوک، اساساً جوابی به‌دست نمی‌دهند. روش پیشنهادی حساسیت قابل‌توجهی به قرائت بار فشاری در مقطع دریاچه در محدوده مقادیر کمتر عمق بالادست و مقادیر کمتر ضریب دبی دارد؛ به‌طوری‌که

### منابع مورد استفاده

- Alhamid AA, 1999. Coefficient of discharge for free flow sluice gates. *Engineering Science*, 11(1): 33–48.
- Ansar M, 2001. Discussion of simultaneous flow over and under a gate by V. Ferro. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 127(5): 325–326.
- Bijankhan M, Ferro V and Kouchakzadeh S, 2012. New stage-discharge relationships for free and submerged sluice gates. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* 28: 50-56.
- Bijankhan M and Kouchakzadeh S, 2014. Free hydraulic jump due to parallel jets. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 141(2): 04014041-04014049.
- Bijankhan M and Kouchakzadeh S, 2015. The hydraulics of parallel sluice gates under low flow delivery condition. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* 41: 140-148.
- 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 ASCE* 136(9): 610–616.
- Castro-Orgaz O, Mateos L and Dey S, 2013. Revisiting the energy-momentum method for rating vertical sluice gates under submerged flow conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 139(4): 325–335.
- Castro-Orgaz O and Hager WH, 2014. Transitional flow at the standard sluice gate. *Journal of Hydraulic Research* 52(2): 264–273.
- Clemmens AJ, Strelkoff TS and Replogle JA, 2003. Calibration of submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 129(9): 680–687.
- Ferro V, 2000. Simultaneous flow over and under a gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 126(3): 190- 193.
- Ferro V, 2001. Closure to simultaneous flow over and under a gate by V. Ferro. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 127(5): 326–328.
- Garbrecht G, 1977. Discussion of discharge computation at river control structures. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 104(12): 1481-1484.
- Habibzadeh A, Vatankhah AR and Rajaratnam N, 2011. Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 137(9): 1079-1084.
- Henry R, 1950. Discussion to 'On submerged jets'. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 115: 687–694.
- Khalili Shayan H and Farhoudi J, 2013. Effective parameters for calculating discharge coefficient of sluice gates. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* 33: 96-105.
- Lozano D, Mateos L, Merkley GP and Clemmens AJ, 2009. Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 135(6): 763-772.
- Montes J, 1997. Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 123(3): 219-232.
- Nago H, 1978. Influence of gate-shapes on discharge coefficients. *Transactions of the Japanese Society of Civil Engineers* 10(2): 116–119.
- Noutsopoulos GK and Fanariotis S, 1978. Discussion to Free flow immediately below sluice gates, by N. Rajaratnam. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 104: 451-454.
- Rajaratnam N and Subramanya K, 1967. Flow equation for the sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE* 93(3): 167-186.
- Roth A and Hager W, 1999. Underflow of standard sluice gate. *Experiments in Fluids* 27: 339–350.
- Sauida FS, 2014. Calibration of submerged multi-sluice gates. *Alexandria Engineering Journal* 53(3): 663-668.

- Sepulveda C, 2007. Instrumentation, model identification, and control of an experimental irrigation canal. PhD Thesis, Barcelona, Spain., Technical University of Catalonia.
- Swamee P, 1992. Sluice gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 118(1): 56–60.
- Wahl T, 2004. Issues and problems with calibration of canal gates. Pp. 1-9. *Proceedings of Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*. June 27-July 1, Salt Lake City, Utah, United States.