



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و دوم، شماره ششم، ۱۳۹۴

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## تئوری خودمانایی و ارائه روابط تعیین دبی دریاچه‌های کشویی با انتهای استوانه‌ای در جریان آزاد و مستغرق

\* محمد نورالهی<sup>۱</sup>، علی‌نقی ضیائی<sup>۲</sup> و علی‌اصغر بهشتی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۲۳

### چکیده

**سابقه و هدف:** دریاچه‌ها از جمله پرکاربردترین سازه‌ها برای کنترل سطح آب و دبی جریان در کانال‌های روباز هستند. با این وجود دریاچه‌های کشویی لبه‌تیز، دارای ضریب فشردگی پایین و در نتیجه ظرفیت عبوری کمی می‌باشند. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی دریاچه تلفیقی هندسی از دریاچه کشویی و دریاچه طبلی پرداخته شده است.

**مواد و روش‌ها:** آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد در فلوم مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر انجام گرفت. در این پژوهش در مجموع از هشت دریاچه که شامل چهار دریاچه استوانه‌ای کامل و چهار دریاچه نیم‌استوانه با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر است، استفاده شده است. رابطه بی‌بعد دبی‌اشل با استفاده از روش آنالیز ابعادی و تئوری خودمانایی ناقص ارائه شده است. این رابطه دبی جریان عبوری را به بار آبی بالادست دریاچه، بازشدگی دریاچه و قطر استوانه انتهایی دریاچه ربط می‌دهد.

**یافته‌ها:** با توسعه رابطه فرو و تئوری باکینگهام و تئوری خودمانایی ناقص، رابطه‌ای برای تخمین دبی عبوری از دریاچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه شد و با داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت که رابطه پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی و ارزیابی آماری از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. از مزایای این رابطه می‌توان به عدم نیاز به تعیین ضریب دبی اشاره کرد. نتایج نشان داد که روابط پیشنهاد شده برای تخمین دبی، تطابق بالایی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. به‌طوری‌که میانگین خطای نسبی تخمین دبی برای هر رابطه پیشنهادی در هر دریاچه در حالت آزاد کم‌تر از ۲ درصد و در حالت مستغرق کم‌تر از ۵ درصد به‌دست آمد. در نتیجه از رابطه ارائه شده می‌توان برای طراحی اینگونه دریاچه‌ها بهره برد.

**نتیجه‌گیری:** از آنجایی که تخمین دقیق دبی عبوری از دریاچه‌ها باعث افزایش عملکرد مدیریتی شبکه‌های توزیع آب و همچنین منجر به افزایش قطعیت اجرایی در طراحی دریاچه‌ها می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب آنالیز ابعادی و تئوری خودمانایی می‌توان روابطی با دقت بالا برای تخمین دبی عبوری به‌دست آورد.

**واژه‌های کلیدی:** تئوری خودمانایی ناقص، دریاچه کشویی لبه‌تیز، ضریب فشردگی

\* مسئول مکاتبه: [mohammad.nour.um@gmail.com](mailto:mohammad.nour.um@gmail.com)

## مقدمه

دریچه‌ها از پرکاربردترین سازه‌های آبی در شبکه‌های توزیع هستند که به منظور ارسال و تحویل آب به نقاط از پیش تعیین شده و یا به منظور سازه کنترل جریان دبی و یا سطح آب استفاده می‌شوند. از جمله متداول‌ترین دریچه‌ها می‌توان به دریچه‌های کشویی لبه تیز و دریچه‌های قطاعی اشاره نمود که با توجه به شرایط حاکم در محل و همچنین هدف مورد نظر می‌توان از آنها استفاده نمود. تعیین روابط حاکم بر این سازه‌ها می‌تواند باعث بهبود عملکرد سیستم‌های شبکه مجاری رو باز توزیع آب شده و در نتیجه باعث جلوگیری از اتلاف آب گردد. هر کدام از این دو نوع دریچه دارای مزایا و معایبی هستند. در این پژوهش سعی می‌شود با تلفیق هندسه این دو، دریچه‌ای کشویی با انتهای استوانه‌ای معرفی گردد که دارای عملکرد مطلوب‌تری می‌باشد. به این ترتیب که دریچه همانند دریچه کشویی باز و بسته می‌شود و از نظر ساختار، استوانه‌ای در لبه زیرین دریچه کار شده است. بدین منظور از دو شکل مختلف در انتهای دریچه استفاده شده که شامل یک نیم استوانه در قسمت بالادست دریچه در اندازه‌های مختلف و یک استوانه کامل در در انتهای دریچه در اندازه‌های مختلف می‌باشد، استفاده شده است. علت استفاده از این چنین ترکیبی از دو دریچه ذکر شده، دست یافتن به دریچه‌ای است که از نظر ساخت ساده و از نظر هیدرولیکی دارای عملکرد بالایی نسبت به مدل‌های رایج باشد.

از مسایل کلاسیک در مهندسی هیدرولیک، تعیین میزان دبی عبوری از دریچه است. با توجه به پژوهش‌های انجام گرفته بر روی دریچه‌ها، در سال‌های پیشین توسط پژوهشگران مختلف، روش‌ها

و روابط برای تعیین میزان دبی عبوری برای دو حالت آزاد و مستغرق به‌طور جداگانه ارائه شده است. پژوهش‌های زیادی برای دریچه‌های کشویی و قطاعی در دو حالت آزاد و مستغرق انجام شده است اولین پژوهش‌های آزمایشگاهی گسترده توسط هنری (1950) در دو حالت آزاد و مستغرق برای دریچه کشویی لبه تیز انجام شد و نتایج آن به شکل گراف‌هایی برای ضریب دبی بیان شد (7). راجاراتنام و سوبرامانیا (1967) نتایج به‌دست آمده توسط هنری را تأیید کردند و روابطی برای تعیین دبی در حالت جریان آزاد و مستغرق برای دریچه کشویی پیشنهاد دادند (9). فرو (2000) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در یک فلوم آزمایشگاهی و روش آنالیز ابعادی و همچنین تئوری خودمانایی ناقص رابطه بدون بعد ساده‌ای برای دریچه کشویی تخت ارائه کرده است. وی ابتدا رابطه انرژی تحت شرایط جریان آزاد برای دریچه کشویی تخت را نوشته و سپس با استفاده از رابطه عمق بحرانی کانال و تلفیق روابط مذکور، رابطه بی‌بعد دبی - اشل را ارائه نمود که تطابق زیادی با داده‌های آزمایشگاهی دارد (6). انصار (2001) با توسعه رابطه پیشنهادی فرو (2000) و با در نظر گرفتن عمق استغراق تحت شرایط مستغرق، رابطه‌ای بی‌بعد برای شرایط مستغرق در دریچه کشویی لبه تیز ارائه نمودند که نتایج نشان داد برای حالت مستغرق خطای اندازه‌گیری میزان دبی عبوری از دریچه نسبت به رابطه فرو (2000) کاهش پیدا کرده است (1). کلمنس و همکاران (2003) به مطالعه هیدرولیک جریان بر روی دریچه قطاعی برای دو حالت آزاد و مستغرق پرداختند. آن‌ها از دو رابطه انرژی و مومتم به‌طور هم‌زمان برای تعیین دبی عبوری پرداختند. آن‌ها برای حل این مشکل که روش

(2000) دارای بهترین دقت می‌باشد (10). بیژن‌خان و همکاران (2011) به توسعه رابطه فرو (2000) برای دریچه‌های کشویی در حالات آزاد و مستغرق پرداختند. آن‌ها با اضافه نمودن یک عدد بی‌بعد به نام فاکتور کاهش دبی به رابطه فرو، رابطه‌ای را ارائه کردند که به‌طور پیوسته برای حالت‌های جریان آزاد و مستغرق و حتی انتقالی بین این دو حالت مناسب و دارای دقت بالایی بوده است (3). بیژن‌خان و همکاران (2013) به ارائه یک رابطه برای دریچه قطاعی برای هر دو حالت آزاد و مستغرق با استفاده از تئوری خودمانایی ناقص و تئوری باکینگهام پرداختند. رابطه پیشنهادی آن‌ها نه تنها از رابطه ارائه شده فرو دقیق‌تر بود بلکه به‌طور پیوسته قادر به تخمین دبی عبوری از دریچه از حالت جریان آزاد و مستغرق و حتی حالت انتقالی می‌باشد (4).

با توجه به این‌که دریچه مورد استفاده در این پژوهش دارای شکل و ساختاری متفاوت است و در گذشته پژوهش‌های گسترده‌ای فقط بر روی دریچه‌های رایج کشویی لبه‌تیز و قطاعی انجام شده و روابط زیادی توسط پژوهشگران در زمینه ضریب فشردگی، کنترل جریان و روابطی برای تخمین دبی عبوری در آن‌ها ارائه شده است، در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی مشخصات جریان بر روی دریچه تلفیقی کشویی استوانه‌ای پرداخته می‌شود همچنین روابطی با دقت قابل‌قبول برای اندازه‌گیری جریان عبوری از آن در دو حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه خواهد شد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد در فلوم

انرژی-مومنتم قادر به تخمین دقیق دبی نیست، از یک فاکتور اصلاحی انرژی بهره بردند و توانستند مشکل را حل نمایند (5). شاهرخ‌نیا و جوان (2004) رابطه پیشنهادی فرو (2000) را بدون تغییر برای دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد به‌کار بردند. آن‌ها نتایج را با سه سری داده مورد بررسی قرار دادند که متوسط خطای تخمین دبی ۲/۶ درصد و خطای استاندارد ۳ درصد به‌دست آمد (11). شاهرخ‌نیا و جوان (2006) رابطه‌ای بی‌بعد برای دریچه قطاعی تحت جریان آزاد و مستغرق با استفاده از آنالیز ابعادی ارائه نمودند که دارای دقت بالایی می‌باشد. آن‌ها برای بررسی صحت رابطه‌شان از هفت سری داده آزمایشگاهی و میدانی استفاده نمودند. آن‌ها همچنین به بررسی تأثیر به‌کارگیری عدد رینولدز در رابطه پیشنهادی‌شان پرداختند که نتایج نشان داد حضور و یا عدم حضور عدد رینولدز تغییر چندانی در برآورد دبی جریان ندارد (12). بیرامی و یوسفیان (2008) روش ابتکاری برای تخمین دبی در دریچه‌های قطاعی مبتنی بر تلفیق روابط انرژی و اندازه حرکت ارائه دادند. آن‌ها ابتدا متوسط دبی را که یک‌بار از رابطه انرژی و بار دیگر از رابطه مومنتم بین مقاطع بالادست دریچه و مقطع فشردگی بعد از دریچه را به‌دست آوردند و سپس با استفاده از یک ضریب که با توجه به مقادیر آزمایشگاهی به‌دست آوردند، مقدار متوسط دبی را تصحیح کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین خطای مطلق در حالت جریان آزاد ۷/۵ درصد و برای جریان مستغرق ۱۰/۸ درصد به‌دست آمد (2).

اسپولودا و همکاران (2009) به بررسی روابط ارائه شده برای تعیین میزان دبی عبوری از دریچه‌های کشویی پرداخت و دریافت رابطه پیشنهادی فرو

قرار گرفته در انتهای فلوم را به‌طور کامل خوابانده که تأثیری بر جریان آزاد نداشته باشد. سپس پمپ راه‌اندازی شده و پس از تثبیت و توسعه‌یافتگی جریان، اقدام به برداشت اعماق سطح آب در بالادست و پایین‌دست دریچه شد. سپس با ایجاد جریان مستغرق به‌وسیله دریچه خوابان انتهای فلوم، اعماق بازخوانی شد.

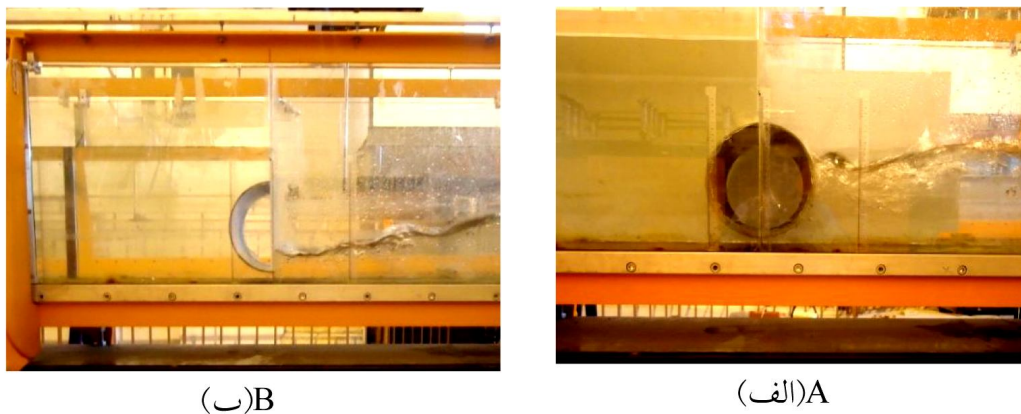
**تئوری خودمانایی:** یک پدیده در یک مجموعه اعداد بی‌بعد  $\pi_n$  پدیده خودمانا نامیده می‌شود، اگر رابطه بیان‌کننده پدیده فیزیکی  $\pi_1 = \varphi_1(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n)$  مستقل از مقیاس مکانی و زمانی  $\pi_n$  ها باشد. جواب‌های خودمانایی در مسایل برای شرایط مرزی به‌کار رفته است. برای مثال رفتار  $\pi_n$  در زمان‌هایی که به‌سمت صفر و بینهایت میل می‌کند مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمانی که  $\pi_n$  به‌سمت مقدار محدودی غیر از صفر میل می‌کند، پدیده فیزیکی متأثر از  $\pi_n$  نبوده و تابع بی‌بعد به شکل  $\pi_1 = \varphi_1(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-1})$  بیان می‌شود و به این تشابه یک تشابه خودمانایی کامل<sup>۴</sup> در گروه اعداد بی‌بعد  $\pi_n$  ها گفته می‌شود. در اینجا نماد  $\varphi_1$  بیان‌کننده تابع است. از طرفی زمانی که  $\pi_n$  به‌سمت صفر و یا بینهایت میل کند و  $\pi_1$  نیز چنین رفتاری را از خود نشان دهد، پدیده فیزیکی با رابطه تابعی  $\pi_1 = \pi_n^\omega \varphi_3(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n)$  بیان می‌شود که به این تشابه، یک تشابه خودمانایی ناقص<sup>۵</sup> گفته می‌شود. در اینجا  $\omega$  ضریب ثابت و  $\varphi$  نماد تابع است (۶).

مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر انجام گرفت (شکل‌های ۱ و ۲). آزمایش‌ها برای حالت زیرگذری جریان با تراز کف برابر در بالادست و پایین‌دست دریچه و مقاطع مستطیلی شکل صورت گرفت. برای تأمین جریان در فلوم از پمپی با حداکثر دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه استفاده شد. برای ساخت دریچه از یک صفحه پلکسی‌گلاس با ضخامت ۸ میلی‌متر و عرضی برابر با عرض فلوم و برای استوانه و نیم‌استوانه‌های به‌کار رفته در انتهای دریچه از لوله‌های پی وی سی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این پژوهش در مجموع از هشت دریچه که شامل چهار دریچه استوانه‌ای کامل و چهار دریچه نیم‌استوانه با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر است، استفاده شده است.

دریچه‌های مورد نظر در این پژوهش در فاصله ۱/۲ متر از ابتدای فلوم نصب شده و همچنین از صفحات آرام‌کننده جریان در ورودی جریان به فلوم نیز استفاده شد. از یک دریچه خوابان در انتهای فلوم به‌منظور تنظیم عمق پایاب استفاده شده است. با تنظیم عمق می‌توان شرایط جریان آزاد و مستغرق را تعیین نمود. اندازه‌گیری میزان دبی جریان ورودی با استفاده از سرریز مستطیلی واسنجی شده صورت گرفت و با استفاده از دستگاه تنظیم فرکانس<sup>۲</sup> ابتدا میزان دبی برای هر فرکانس به‌دست آمده و سپس برای هر دریچه مورد استفاده قرار گرفت. برای قرائت عمق جریان، از یک عمق‌سنج<sup>۳</sup> به‌صورت ریلی و با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها در دو بازشدگی مختلف برای دریچه‌ها انجام شد. برای هر آزمایش ابتدا بازشدگی دریچه تنظیم شده و دریچه خوابان

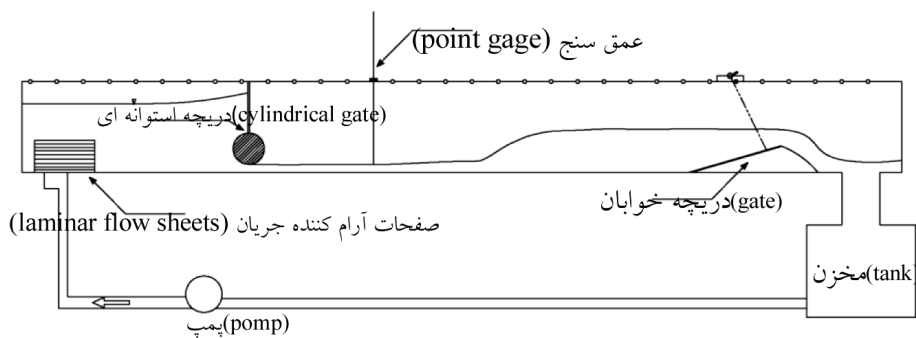
- 1- PVC
- 2- Inverter
- 3- Point gage

- 4- Complete self-similarity
- 5- Incomplete self-similarity



شکل ۱- تصاویری از دریچه‌های نیم استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل در شرایط جریان مستغرق، شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب دریچه کشویی استوانه‌ای کامل و نیم‌استوانه‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر.

Figure 1. Images of half-cylindrical and cylindrical gates in submerged flow (a) half-cylindrical with a diameter of 200 mm (b) half-cylindrical with a diameter of 200 mm.



شکل ۲- طرح شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی.  
Figure 2. Schematic of the laboratory flume.

که در آن،  $Q$  دبی عبوری جریان از دریچه،  $w$  بازشدگی دریچه،  $b$  عرض کانال،  $g$  شتاب ثقل،  $H_0$  بار آبی بالادست دریچه و  $C_d$  ضریب دبی می‌باشد.

$$y_c = Q^{\frac{2}{3}} b^{\frac{-2}{3}} g^{\frac{-1}{3}} \quad (2)$$

که در آن  $y_c$  عمق بحرانی می‌باشد. رابطه به دست آمده از رابطه‌های ۱ و ۲ به شکل زیر است:

تعیین رابطه بی بعد دبی اشل در حالت جریان آزاد: فرو (2000) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در یک فلوم آزمایشگاهی و روش آنالیز ابعادی، رابطه بی بعد ساده‌ای برای دریچه کشویی تخت ارائه کرده است. وی ابتدا با نوشتن رابطه انرژی جریان آزاد برای دریچه کشویی تخت و سپس با نوشتن رابطه عمق بحرانی کانال و تلفیق رابطه‌های ۱ و ۲ و پس از آن با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه بدون بعد دبی-اشل را ارائه نمود.

$$Q = C_d w b \sqrt{2gH_0} \quad (1)$$

نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل پرداخته شده، با این تفاوت که در آنالیز ابعادی تأثیر قطر استوانه نیز اعمال شده است. تحت شرایط جریان آزاد، دبی عبوری از زیردریچه‌های استوانه‌ای به بازشدگی دریچه، شتاب ثقل، لزجت دینامیکی، بار آبی بالادست دریچه و قطر استوانه نسبت داده شده است.

$$F(Q, H_0, w, g, \mu, b, D) = 0 \quad (9)$$

که در آن،  $D$  قطر استوانه به‌کار رفته در لبه دریچه است. به‌عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$Q = f(H_0, w, g, \mu, b, D) \quad (10)$$

از رابطه ۱۰ پارامترهای بی‌بعد به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$f\left(\frac{H_0}{w}, \frac{Q^2}{gw^5}, \frac{b}{w}, \frac{D}{w}\right) = 0 \quad (11)$$

با تقسیم اعداد بی‌بعد دوم و سوم و به‌توان رساندن آن‌ها خواهیم داشت:

$$\frac{\pi_1^{\frac{1}{2}}}{\pi_2^{\frac{3}{2}}} = \frac{\left(\frac{Q^2}{gw^5}\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{b}{w}\right)^{\frac{2}{3}}} = \frac{y_c}{w} \quad (12)$$

در نهایت می‌توان نوشت:

$$\frac{y_c}{w} = f\left(\frac{D}{w}, \frac{H_0}{w}\right) \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ با توجه به شکل ریاضی آن و به‌دلیل

این‌که زمانی که  $\frac{y_c}{w}$  به سمت صفر و بینهایت میل می‌کند،  $\frac{H_0}{w}$  نیز به ترتیب به سمت صفر و بینهایت

$$\frac{H_0}{w} = \frac{1}{2c_d^2} \left(\frac{y_c}{w}\right)^3 \quad (3)$$

فرو (2000) دبی عبوری از دریچه را به بارآبی بالادست دریچه، بازشدگی، شتاب ثقل و لزجت مربوط دانسته است:

$$F(Q, H_0, w, g, \mu, b) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{H_0}{w} = \left(\frac{Q^2}{gw^5}, \frac{b}{w}\right) \quad (5)$$

که در آن،  $\varphi$  نشانگر تابع و  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال می‌باشد. چون:

$$\frac{y_c}{w} = \left(\frac{Q^2}{gw^5}\right)^{\frac{1}{3}} / \left(\frac{b}{w}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

می‌توان گفت که  $\frac{H_0}{w}$  به‌صورت تابعی از  $\frac{y_c}{w}$  قابل بیان است:

$$\frac{H_0}{w} = f\left(\frac{y_c}{w}\right) \quad (7)$$

با استفاده از تئوری خودمانایی ناقص (زمانی که

$\frac{y_c}{w}$  به سمت صفر و بینهایت میل می‌کند،  $\frac{H_0}{w}$  نیز به ترتیب به سمت صفر و بینهایت میل خواهد کرد)، رابطه ۸ را می‌توان در نظر گرفت:

$$\frac{H_0}{w} = i \left(\frac{y_c}{w}\right)^j \quad (8)$$

که در آن،  $i$  و  $j$  ضرایب ثابت می‌باشند. فرو (2000) مقادیر  $i$  و  $j$  را به ترتیب برابر با ۱/۶۳۸۸ و ۲/۶۴۵۶ برای دریچه لبه تیز به‌دست آورد.

در این مرحله با استفاده از آنالیز ابعادی و همچنین تئوری خودمانایی ناقص به توسعه رابطه پیشنهادی فرو (2000) در دریچه‌های کشویی

$$\frac{H_0 - y_3}{w} = f\left(\frac{y_c}{w}\right) \quad (17)$$

انصار (2001) با به‌کارگیری تئوری خودمانایی ناقص در رابطه ۱۷ و با بازنویسی آن، رابطه ۱۸ را برای تعیین دبی عبوری از دریچه کشویی لبه تیز تحت شرایط جریان مستغرق ارائه نمود (1):

$$\frac{H_0 - y_3}{w} = i\left(\frac{y_c}{w}\right)^j \quad (18)$$

فرو (2000) مقادیر  $i$  و  $j$  را به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۲/۹۹ برای دریچه لبه تیز در شرایط جریان مستغرق به دست آورد (6).

در این مرحله نیز، اثر قطر را در تحلیل ابعادی دخیل نموده تا بتوان رابطه‌ای کلی برای دریچه‌های کشویی استوانه‌ای با اندازه قطرهای مختلف در شرایط جریان مستغرق استخراج نمود. پس از اضافه نمودن عمق استغراق به رابطه ۱۵ و تحلیل ابعادی در نهایت رابطه ۲۰ به دست آمده است که می‌بایست با برآزش بر داده‌های آزمایشگاهی ضرایب ثابت رابطه به دست آید.

$$\frac{y_c}{w} = f\left(\frac{H_0 - y_3}{w}, \frac{D}{w}\right) \quad (19)$$

$$\frac{y_c}{w} = i\left(\frac{H_0 - y_3}{w}\right)^j \left(\frac{D}{w}\right)^k \quad (20)$$

البته باید متذکر شد که این روابط دارای شرط  $w$  و  $D$  مخالف با صفر می‌باشند.

### نتایج و بحث

**جریان آزاد:** ابتدا از رابطه پیشنهادی فرو (2000) برای تعیین روابط بی‌بعد دبی اشل برای دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل به‌کار رفته در این

میل خواهد کرد، می‌توان از تئوری خودمانایی ناقص بهره برد که در نهایت به شکل رابطه ۱۴ در خواهد آمد:

$$\frac{y_c}{w} = i\left(\frac{H_0}{w}\right)^j \left(\frac{D}{w}\right)^k \quad (14)$$

**تعیین رابطه بی بعد دبی - اشل در حالت جریان مستغرق:** انصار (2001) به بررسی پژوهش انجام شده توسط فرو (2000) پرداخت. وی به بحث درباره دو مسأله کلیدی که فرو به آن توجه نکرده بود، پرداخت. وی ابتدا به دلیل حذف اثر لزجت از رابطه پیشنهادی فرو پرداخته و سپس به ارائه رابطه‌ای برای جریان عبوری از زیر دریچه تحت جریان مستغرق پرداخته که فرو به آن‌ها اشاره ننموده است. در زیر مراحل تولید رابطه بدون بعد دبی اشل توسط وی آورده شده است.

$$F(Q, H_0 - y_3, w, g, \mu, b, \rho) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{H_0 - y_3}{w} = f\left(\frac{y_c}{w}, Re\right) \quad (16)$$

که در آن،  $Re$  عدد رینولدز و  $y_3$  عمق استغراق است.

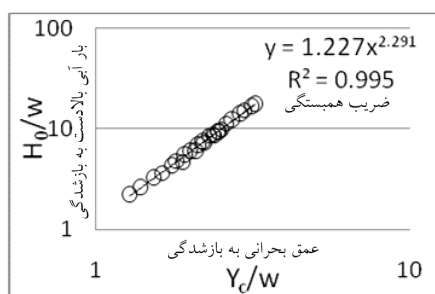
مونتس (1997) بر روی تأثیر عدد رینولدز بر روی دبی عبوری بر دریچه کشویی لبه تیز پژوهش‌هایی انجام داد. وی اعلام کرد برای اعداد رینولدز کم‌تر از ۱۰۰۰۰، تأثیر لزجت قابل ملاحظه است. برای اعداد رینولدز بیش‌تر از ۱۰۰۰۰، تأثیر لزجت قابل چشم‌پوشی می‌باشد (8). در پژوهش حاضر، عدد رینولدز در کل آزمایش‌ها بیش‌تر از ۱۰۰۰۰ بوده است که در نتیجه می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر کرد. در نتیجه رابطه ۱۷ به دست می‌آید:

که در آن،  $MRE\%$  قدرمطلق میانگین خطای نسبی به درصد،  $Q_{measured}$  دبی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و  $Q_{Estimated}$  دبی تخمین زده شده توسط رابطه پیشنهادی است.

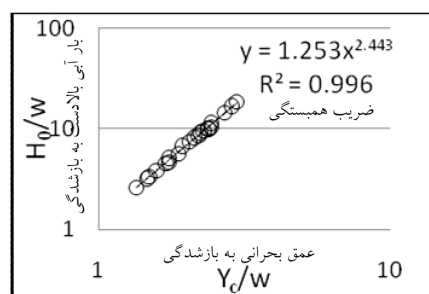
شکل‌های ۳ و ۴ و شکل‌های ۵ و ۶ برآزش رابطه ۸ را به ترتیب برای دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل و همچنین مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده شده برای دبی عبوری برای هر دریچه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، برآزش رابطه ۸ بر داده‌های آزمایشگاهی دارای ضریب همبستگی بالایی است.

پژوهش به‌طور مجزا پرداخته شده است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد برای هر دریچه، منحنی ترسیم شده و سپس مقادیر ثابت  $i$  و  $j$  به‌دست آمده است. برای ارزیابی روابط تخمین دبی عبوری، از قدرمطلق میانگین خطای نسبی دبی عبوری استفاده شده است. قدرمطلق میانگین خطای نسبی برای میزان دبی عبوری از رابطه ۲۱ محاسبه شده که این مقادیر برای دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای در جدول ۱ همراه با ضرایب ثابت این رابطه آمده است.

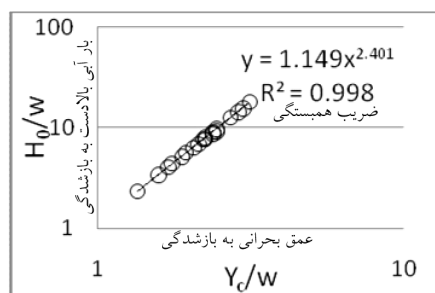
$$MRE\% = \frac{|Q_{measured} - Q_{Estimated}|}{Q_{measured}} \times 100 \quad (21)$$



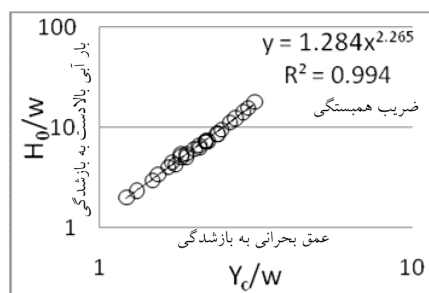
(ب)B



(الف)A



(ت)D

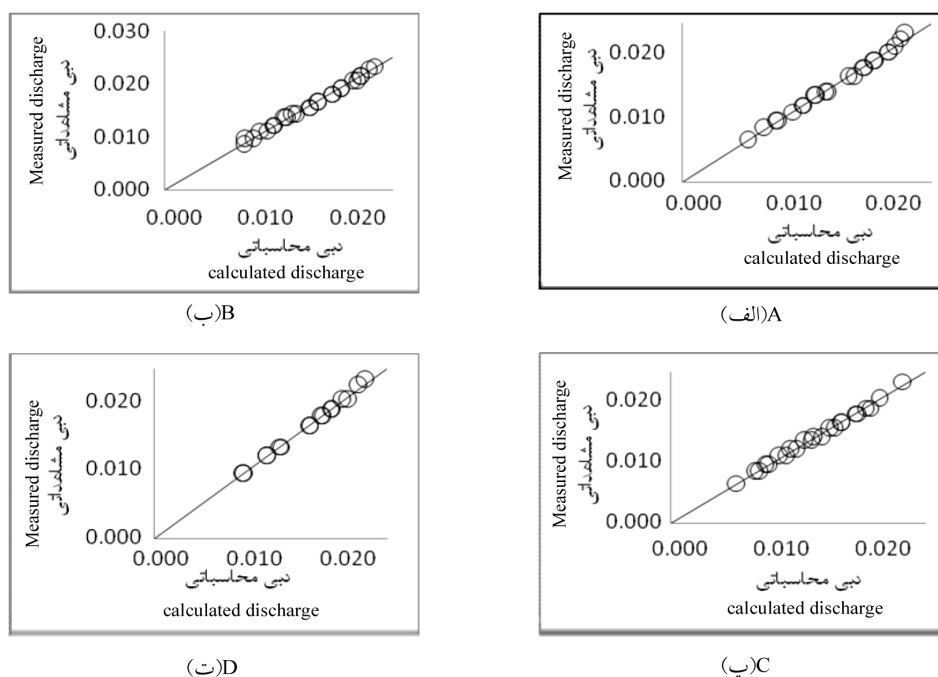


(پ)C

شکل ۳- برآزش داده‌های آزمایشگاهی دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای در شرایط جریان آزاد، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر.

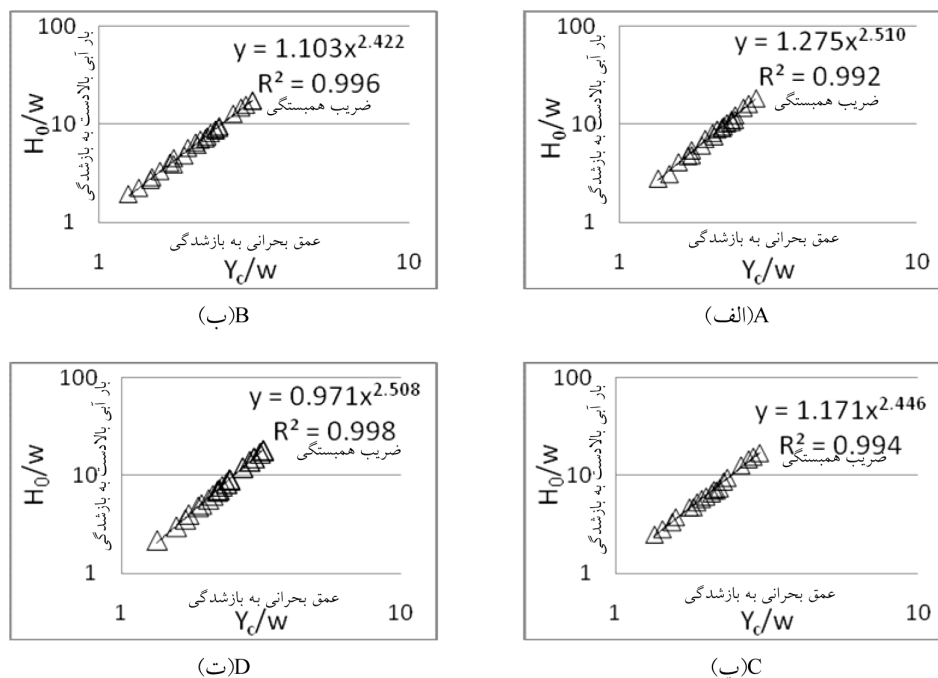
Figure 3. Fitted Eq. (8) to experimental data in free flow (a) half-cylindrical with a diameter of 63 mm (b) half-cylindrical with a diameter of 90 mm (c) half-cylindrical with a diameter of 125 mm (d) half-cylindrical with a diameter of 200 mm.





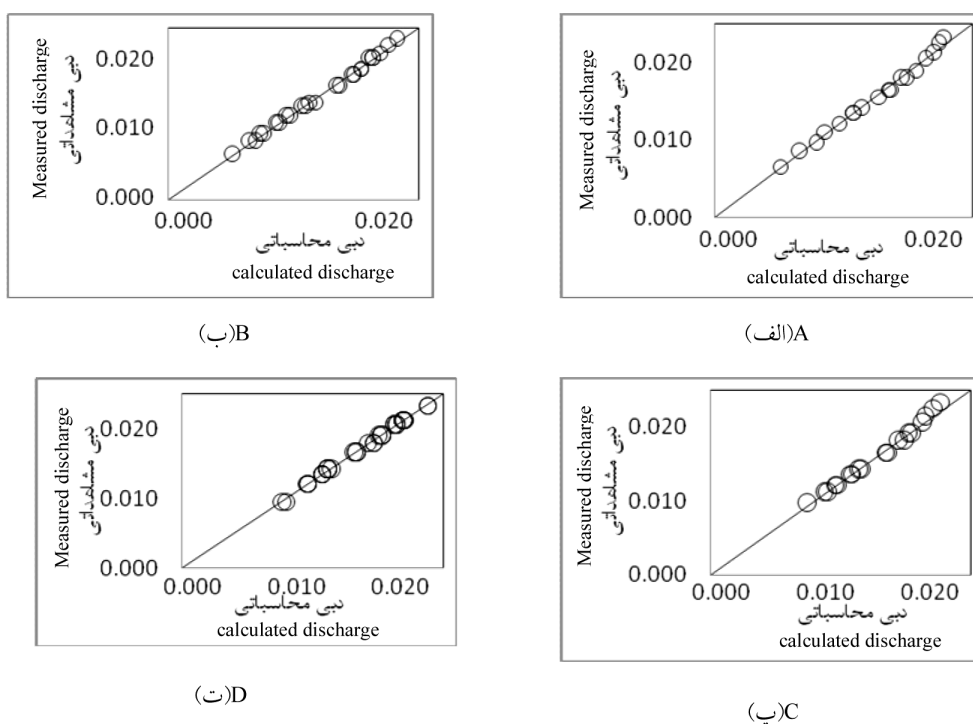
شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده شده دبی عبوری در شرایط جریان آزاد، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی نیم‌استون‌های با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر.

Figure 4. Comparison the calculated and the measured discharge in free flow conditions (a) half-cylindrical with a diameter of 63 mm (b) half-cylindrical with a diameter of 90 mm (c) half-cylindrical with a diameter of 125 mm (d) half-cylindrical with a diameter of 200 mm.



شکل ۵- برازش داده‌های آزمایشگاهی دریچه‌های کشویی استون‌های کامل در شرایط جریان آزاد، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی استون‌های کامل با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر.

Figure 5. Fitted equation (8) to experimental data in free flow (a) cylindrical slide gate with a diameter of 63 mm (b) cylindrical slide gate with a diameter of 90 mm (c) cylindrical slide gate with a diameter of 125 mm (d) cylindrical slide gate with a diameter of 200 mm.



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تخمین زده شده دبی عبوری در شرایط جریان آزاد، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر.

Figure 6. Comparison the calculated and the measured discharge in free flow conditions (a) cylindrical slide gate with a diameter of 63 mm (b) cylindrical slide gate with a diameter of 90 mm (c) cylindrical slide gate with a diameter of 125 mm (d) cylindrical slide gate with a diameter of 200 mm.

رابطه فرو (رابطه ۸) برای دریچه کشویی لبه‌تیز، در نسبت یکسان بار آبی بالادست دریچه به بازشدگی دریچه، مقادیر نسبت عمق بحرانی به بازشدگی، برای دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و کامل با قطر ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۵، ۲۱، ۲۵ و ۲۷ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر، با توجه به رابطه بین عمق بحرانی و دبی عبوری (رابطه ۲) به منظور مقایسه دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل با دریچه کشویی لبه‌تیز می‌توان گفت که در بازشدگی دریچه و بار آبی بالادست یکسان، میزان دبی عبوری در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل با قطر ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۲۴، ۴۰، ۴۳ و ۴۴ درصد افزایش یافته است.

در جدول ۱ ضرایب ثابت رابطه ۸ و قدرمطلق میانگین خطای نسبی تخمین دبی عبور برای دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، خطای نسبی تخمین دبی عبوری در همه دریچه کم‌تر از ۲ درصد است که بر دقت بالای رابطه بی‌بعد دبی-اشل دلالت دارد.

با توجه به رابطه‌های ۳ و ۸ می‌توان دریافت که جمله  $\frac{1}{2c_d^2}$  همان ضریب ثابت  $i$  در رابطه بی‌بعد دبی اشل می‌باشد. با توجه به جدول بالا، خواهیم یافت که ضریب  $i$  با افزایش قطر کاهش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش ضریب دبی ( $c_d$ ) در نتیجه کاهش ترم  $\frac{1}{2c_d^2}$  می‌باشد. در مقایسه روابط به دست آمده برای دریچه‌های مورد بررسی در این پژوهش با

به دست آمده برای دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه به صورت زیر است:

$$\frac{y_c}{w} = 1.282 \left( \frac{H_0}{w} \right)^{2.4} \left( \frac{D}{w} \right)^{0.066} \quad (22)$$

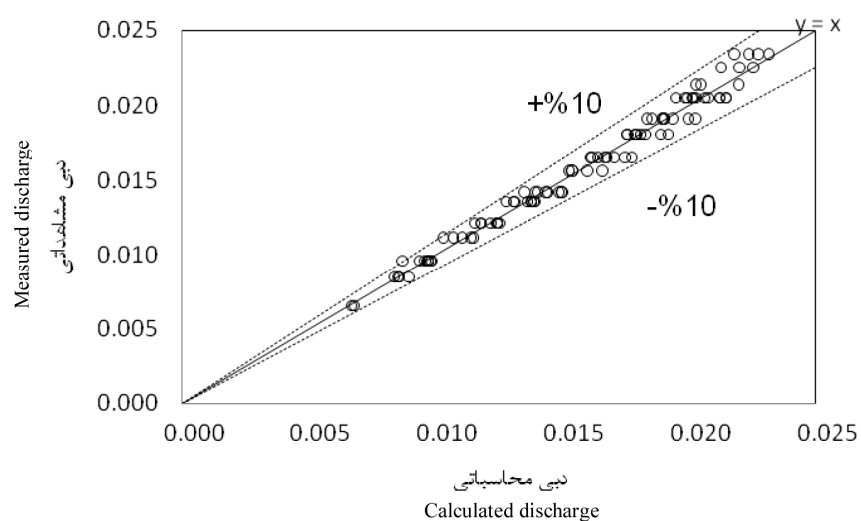
در رابطه ۲۲، ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۸۴ و متوسط خطای نسبی برای دبی عبوری از دریچه به ترتیب برابر با ۲/۸ درصد است، که از نظر آماری و با توجه به خطای پایین، رابطه قابل قبولی است. همچنین محدوده خطا در شکل ۷ نشان داده شده است که برای همه داده‌ها کم‌تر از ۱۰ درصد است.

در رابطه بی بعد ارائه شده توسط فرو (رابطه ۸) ضریب دبی وجود ندارد و اثر خود را در مقادیر ضرایب  $i$  و  $j$  (ضرایب ثابت) نشان می‌دهد. به عبارتی عوامل دیگر از قبیل شکل دریچه اثر خود را به طور غیرمستقیم در رابطه می‌گذارند. برای ارزیابی رابطه ۱۴ ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزار آماری<sup>۱</sup> ضرایب ثابت  $i$ ،  $j$  و  $k$  به دست آمده است. برای برآورد ضرایب به این ترتیب عمل می‌شود که در ابتدا دریچه‌های نیم‌استوانه و سپس دریچه‌های استوانه‌ای کامل مورد بررسی قرار می‌گیرند. رابطه

جدول ۱- مقادیر به دست آمده برای ضرایب ثابت در رابطه بی بعد دبی - اشل برای حالت آزاد.

**Table 1. Numerical constants of Eq. (8) and mean relative errors for free flow condition.**

قدرمطلق میانگین خطای نسبی MRE%(Q)	i (constant coefficient)	j (constant coefficient)	شکل دریچه (types of gate)
1.58	1.253	2.443	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۶۳ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 63 mm
2	1.275	2.510	استوانه‌ای با قطر ۶۳ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 63 mm
1.9	1.243	2.277	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۹۰ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 90 mm
1.8	1.103	2.422	استوانه‌ای با قطر ۹۰ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 90 mm
1.9	1.284	2.265	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۱۲۵ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 125 mm
2	1.171	2.446	استوانه‌ای با قطر ۱۲۵ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 125 mm
0.8	1.149	2.401	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 200 mm
0.9	0.971	2.508	استوانه‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 200 mm



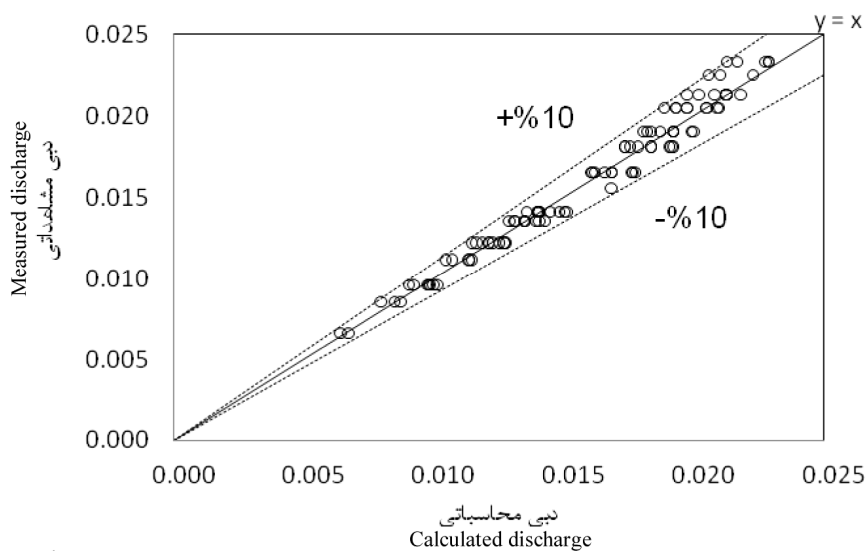
شکل ۷- دبی محاسباتی در مقابل دبی مشاهداتی برای دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای در حالت جریان آزاد.

Figure 7. Calculated discharge versus measured discharge by using Eq. (22) for half- cylindrical slide gate for free flow condition.

دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل به‌صورت زیر است:

$$\frac{y_c}{w} = 1.316 \left( \frac{H_0}{w} \right)^{2.541} \left( \frac{D}{w} \right)^{-0.165} \quad (23)$$

در این قسمت برای دریچه‌های استوانه‌ای کامل، ضرایب ثابت و ضریب همبستگی و قدرمطلق متوسط خطای نسبی تعیین و محاسبه شده است. رابطه به‌دست آمده برای

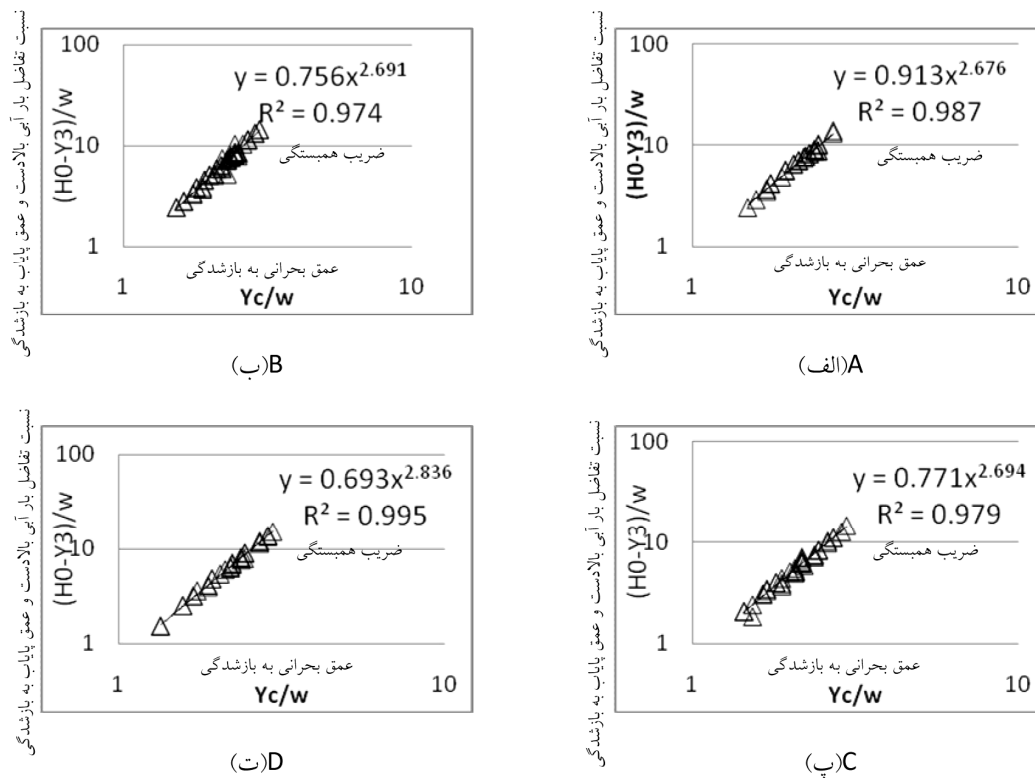


شکل ۸- دبی محاسباتی در مقابل دبی مشاهداتی در دریچه‌های استوانه‌ای کامل در حالت جریان آزاد.

Figure 8. Calculated discharge versus measured discharge by using Eq. (23) for cylindrical slide gate for free flow condition.

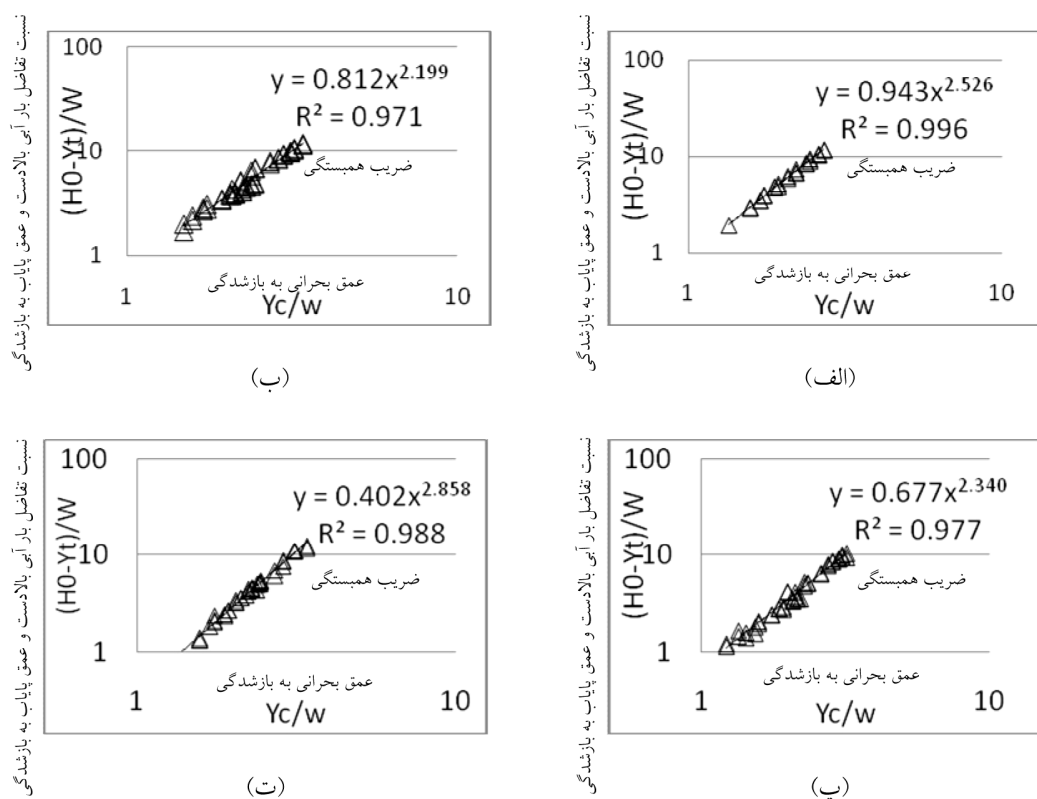
دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل به‌کار رفته در این پژوهش به‌طور مجزا پرداخته شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب برآزش داده‌های آزمایشگاهی دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه‌های کشویی با استوانه کامل در شرایط جریان مستغرق و همچنین ضریب همبستگی روابط نشان داده شده است.

در رابطه ۲۳ ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۷۸ و قدرمطلق متوسط خطای نسبی برای دبی عبوری از دریچه به‌ترتیب برابر با ۳/۳ درصد می‌باشد که از نظر آماری و با توجه به خطای پایین، رابطه قابل‌قبولی است. همچنین محدوده خطا در شکل ۸ نشان داده شده است که برای همه داده‌ها کم‌تر از ۱۰ درصد است. جریان مستغرق: در این مرحله رابطه پیشنهادی انصار (2001) برای تعیین روابط بی‌بعد دبی-اشل برای



شکل ۹- برآزش داده‌های آزمایشگاهی دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای در شرایط جریان مستغرق، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به‌ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر.

Figure 9. Fitted equation (18) to experimental data in submerged flow (a) half-cylindrical with a diameter of 63 mm (b) half-cylindrical with a diameter of 90 mm (c) half-cylindrical with a diameter of 125 mm (d) half-cylindrical with a diameter of 200 mm.



شکل ۱۰- برآزش داده‌های آزمایشگاهی دریاچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل در شرایط جریان مستغرق، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به ترتیب مربوط به دریاچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل با قطرهای ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر.

Figure 10. Fitted equation (18) to experimental data in submerged flow (a) cylindrical with a diameter of 63 mm (b) cylindrical with a diameter of 90 mm (c) cylindrical with a diameter of 125 mm (d) cylindrical with a diameter of 200 mm.

دریاچه‌ها، میانگین خطای نسبی دبی، کم‌تر از ۵ درصد است که نشان از کارآمدی رابطه ۱۸ و دقت بالای آن در تخمین دبی عبوری تحت شرایط جریان مستغرق دارد.

جدول ۲ نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۹ و ۱۰ را نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر ضرایب ثابت  $i$  و  $j$  و همچنین مقدار قدرمطلق میانگین خطای نسبی در تخمین دبی عبوری برای هر دریاچه آمده است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود برای تمامی

جدول ۲- ضرایب ثابت رابطه ۱۸ در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل به همراه میزان خطای نسبی در میزان دبی عبوری.

**Table 2. Numerical constants of Eq. (18) and mean relative errors for submerged flow condition.**

قدرمطلق میانگین خطای نسبی MRE%(Q)	i (constant coefficient)	j (constant coefficient)	شکل دریچه (types of gate)
2	0.913	2.676	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۶۳ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 63 mm
3.6	0.943	2.526	استوانه‌ای با قطر ۶۳ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 63 mm
2.7	0.752	2.691	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۹۰ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 90 mm
4.7	0.812	2.199	استوانه‌ای با قطر ۹۰ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 90 mm
2.9	0.771	2.694	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۱۲۵ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 125 mm
4.9	0.677	2.34	استوانه‌ای با قطر ۱۲۵ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 125 mm
4.5	0.693	2.836	نیم‌استوانه‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر half-cylindrical with a diameter of 200 mm
3.1	0.402	2.858	استوانه‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر cylindrical with a diameter of 200 mm

و بار آبی بالادست و عمق استغراق یکسان، میزان دبی عبوری در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای با قطر ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۹، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ درصد و در دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل با قطر ۶۳، ۹۰، ۱۲۵، ۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۳، ۵۵، ۵۷ و ۵۸ درصد نسبت به دریچه کشویی لبه‌تیز افزایش یافته است.

رابطه جامع بی‌بعد دبی-اشل برای دریچه‌های کشویی با استوانه کامل به شکل رابطه ۲۴ آمده است که در این رابطه ضریب همبستگی،  $0.928$  و قدرمطلق میانگین خطای نسبی برای  $\frac{y_c}{w}$  برابر با  $4/9$  درصد و برای تخمین دبی  $7/4$  درصد به دست آمده است.

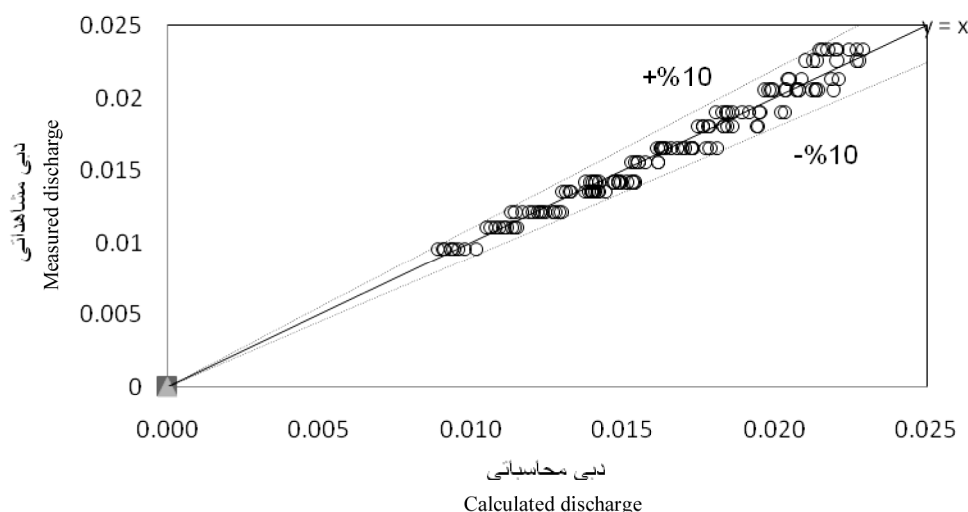
$$\frac{y_c}{w} = 1.066 \left( \frac{H_0 - y_3}{w} \right)^{0.37} \left( \frac{D}{w} \right)^{0.122} \quad (24)$$

در مقایسه روابط به دست آمده برای دریچه‌های مورد بررسی در این پژوهش با رابطه انصار (رابطه ۱۸) برای دریچه کشویی لبه‌تیز، در نسبت یکسان اختلاف بار آبی بالادست به عمق پایاب دریچه به بازشدگی دریچه  $\frac{H_0 - y_3}{w}$ ، مقادیر نسبت عمق بحرانی به بازشدگی  $\frac{y_3}{w}$ ، برای دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای با قطر ۶۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر میلی‌متر، به ترتیب ۷، ۱۳، ۱۴ و ۱۶ درصد افزایش و برای دریچه‌هایی با انتهای استوانه‌ای کامل ۶۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر، به ترتیب ۸، ۳۵، ۳۷، ۳۸ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر، با توجه به رابطه بین عمق بحرانی و دبی عبوری به منظور مقایسه دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل با دریچه کشویی لبه‌تیز در شرایط جریان مستغرق می‌توان گفت که در بازشدگی دریچه

درصد و برای تخمین دبی عبوری ۳/۳ درصد به دست آمده است.

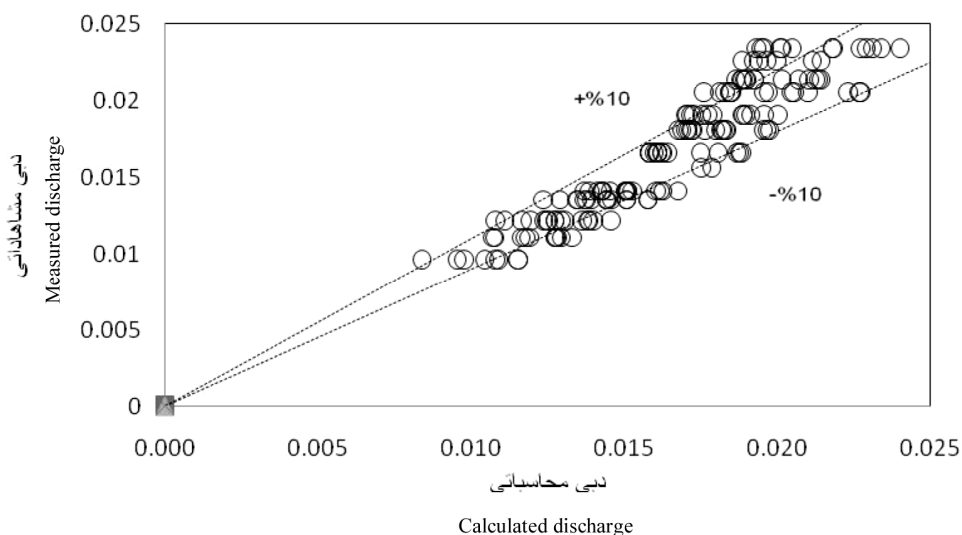
$$\frac{y_c}{w} = 1.087 \left( \frac{H_0 - y_3}{w} \right)^{0.354} \left( \frac{D}{w} \right)^{0.029} \quad (25)$$

رابطه جامع بی‌بعد دبی-اشل برای دریچه‌های کشویی با نیم‌استوانه نیز به شکل رابطه ۲۵ در آمده است که در این رابطه ضریب همبستگی، ۰/۹۷۱ و قدرمطلق میانگین خطای نسبی برای  $\frac{y_3}{w}$  برابر با ۲/۴



شکل ۱۱- مقادیر دبی محاسباتی در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای در برابر دبی مشاهده‌ای.

Figure 11. Calculated discharge versus measured discharge by using Eq. (25) for half-cylindrical slide gate for submerged flow condition.



شکل ۱۲- مقادیر دبی محاسباتی در دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل در برابر دبی مشاهده‌ای.

Figure 12. Calculated discharge versus measured discharge by using Eq. (24) for cylindrical slide gate for submerged flow condition.



خودمانایی ناقص، رابطه‌ای برای تخمین دبی عبوری از دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه شد و با داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت که رابطه پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی و ارزیابی آماری از دقت قابل قبولی برخوردار است. از آنجایی که تخمین دقیق دبی عبوری از دریچه‌ها باعث افزایش عملکرد مدیریتی شبکه‌های توزیع آب و همچنین منجر به افزایش قطعیت اجرایی در طراحی دریچه‌ها می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب آنالیز ابعادی و تئوری خودمانایی می‌توان روابطی با دقت بالا برای تخمین دبی عبوری به دست آورد. به طوری که میانگین خطای نسبی تخمین دبی برای هر رابطه پیشنهادی در هر دریچه در حالت آزاد کم‌تر از ۲ درصد و در حالت مستغرق کم‌تر از ۵ درصد به دست آمد. برای طراحی دریچه‌های کشویی با لبه استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای می‌توان از رابطه‌های ارائه شده در این پژوهش بهره برد که از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. برای مطالعات بیشتر می‌توان از اشکال مختلفی در لبه انتهایی دریچه از جمله قطع‌هایی با اندازه‌های متفاوت استفاده کرد که در این‌گونه دریچه‌های کشویی امکان بهبود در ملاحظات طراحی، اقتصادی و فنی فراهم خواهد شد.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب مقادیر دبی محاسباتی در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه کشویی استوانه‌ای کامل در برابر دبی‌های مشاهده‌ای برای شرایط جریان مستغرق نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود به‌ازای همه مقادیر، خطای تخمین دبی کم‌تر از ۱۰ درصد و در شکل ۱۲، خطای تخمین دبی تا حداکثر ۲۰ درصد می‌باشد. خطای بیش‌تر در رابطه ارائه شده برای دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل در مقایسه با رابطه پیشنهادی برای دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای، به دلیل تغییر شکل دریچه به‌ازای تغییر در قطر استوانه می‌باشد. این در حالی است که در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای، شکل دریچه‌ها در پایین دست تغییری ندارد. کلمنس و همکاران (۲۰۰۳)، اعلام کرد که با توجه به پیچیدگی‌های جریان در شرایط مستغرق پس از دریچه، روابط ارائه شده برای تخمین دبی تا ۵۰ درصد دارای خطا می‌باشند (۵). این در حالی است که با استفاده از رابطه بی‌بعد دبی - اشل می‌توان حتی در شرایط مستغرق نیز تخمین دقیقی از دبی عبوری از دریچه به دست آورد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی دریچه کشویی با لبه استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای پرداخته شد. با توسعه رابطه فرو و تئوری باکینگهام و تئوری

### منابع

1. Ansar, M. 2001. Discussion of 'Simultaneous flow over and under a gate' by V. Ferro. J. Irrig. Drain. Eng. 127: 5. 325-326.
2. Beirami, M.K., and Yousefian, M. 2008. Estimation of radial gate's discharge using a combination of energy and momentum equation. Tabriz, Third National Congress on Civil Engineering. Pp: 137-144. (In Persian)
3. Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S., and Bayat, E. 2011. Distinguishing condition curve for radial gates. Flow Measure. Instrum. J. 22: 5. 500-506.
4. Bijankhan, M., Ferro, V., and Kouchakzadeh, E. 2013. New Stage-Discharge Relationships for Radial Gates. Hydr. Eng. J. ASCE. 139: 5. 378-387.

5. Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., and Replogle, J.A. 2003. Calibration of submerged radial gates. *Hydr. Eng. J. ASCE*. 129: 9. 680-687.
6. Ferro, V. 2000. Simultaneous flow over and under a gate. *J. Irrig. Drain. Eng.* 126: 3. 190-193.
7. Hosseini, S.M., and Abrishami, J. 2001. Open-channel hydraulics. Emam reza University. Press, 449p. (In Persian)
8. Montes, J.S. 1997. Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates. *Hydraulic Eng. J. ASCE*. 123: 3. 219-232.
9. Rajaratnam, N., and Subramanya, K. 1967. Flow equation for the sluice gate. *J. Irrig. Drain. Eng.* 93: 3. 167-186.
10. Sepúlveda, C., Gómez, M., and Rodellar, J. 2009. Benchmark of discharge calibration methods for submerged sluice gates. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135: 5. 676-682.
11. Shahrokhnia, M.A., and Javan, M. 2004. Dimensionless Stage-Discharge Relationship for Free Flow Radial Gates. *J. Agric. Engin. Res.* 5: 20. 85-96. (In Persian)
12. Shahrokhnia, M.A., and Javan, A. 2006. Dimensionless stage-discharge relationship in radial gates. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132: 2. 180-184.

Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(6), 2016*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Self-Similarity Theory to determine head-discharge relationships of sluice gates with cylindrical edge in free and submerged flows**

**\*M. Nourollahi<sup>1</sup>, A.N. Ziaei<sup>2</sup> and A.A. Beheshti<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 02/17/2014; Accepted: 04/12/2015

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Gates are among the most common hydraulic structures in open channels that are used for flow control and water level control. The vertical slide gates suffer from lower contraction coefficient and thus lower flow rate capacity. In this paper, the hydraulic performance of a new modified gate, combination of a vertical slide gate with a cylindrical edge (Drum gate), has been studied.

**Materials and Methods:** Laboratory tests of this study are performed in Hydraulic Laboratory of Water Engineering Group from University of Ferdowsi in Mashhad, in rectangular flume with length of 10 cm, width 30 cm, height 50 cm. In this study, totally, from nine gates that include four cylindrical slide gates and four half-cylindrical slide gates with diameter of 63 mm, 90 mm, 125 mm and 200 were used. The dimensionless stage-discharge relationship was proposed based on dimensional analysis and using the incomplete self-similarity concept in free and submerged conditions. In these relationships, flow rate is related to the upstream depth, gate opening and the cylinder diameter.

**Results:** Finally, the development of the relationship of Ferro and Buckingham theory and the Self-Similarity Theory, relationships to estimate the flow rate of a half and full cylindrical gates for free and submerged flow conditions were presented separately and with proposed correlation with experimental data and statistical evaluation of acceptable accuracy were examined and the experimental data were analyzed. The proposed equation is accurate and practical so that it removes the need to consider the discharge coefficient. Results showed that this equation can be fitted to laboratory data very well. The mean relative error for estimation of discharge in the free and submerged conditions was less than 2 and 5 percent, respectively. Therefore, these equations can be used as a design tool for slide gates with cylindrical edge.

**Conclusion:** Since accurate estimate discharge increased management function of water distribution network and also leads to an increased executive certainty in gate design, it can be concluded that the combination of dimensional analysis and the self-similarity theory can estimate the discharge obtained with high accuracy.

**Keywords:** Incomplete self-similarity, Sharp sluice gate, Contraction coefficient

---

\* Corresponding Author; Email: mohammad.nour.um@gmail.com