

## ضریب دبی جریان برای دریچه‌های قائم

نوید ناصحی اسکویی<sup>۱</sup> و فرزین سلماسی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

از انواع دریچه‌ها به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری دبی و تنظیم سطح آب در طرح‌های آبیاری و زهکشی استفاده می‌شود. به همین دلیل تعیین ضریب دبی دریچه‌ها مهم است. ضریب دبی به مشخصات هیدرولیکی و هندسی جریان و نوع دریچه بستگی دارد. در این پژوهش با حل همزمان معادله برنولی و اندازه حرکت و روش‌های رگرسیون‌گیری، پارامترهای بی‌بعد مؤثر در تعیین ضریب دبی جریان و معادله این پارامترها با ضریب دبی جریان مشخص شد. همچنین نتایج برخی معادلات تحلیلی و آزمایشگاهی موجود برای محاسبه ضریب دبی جریان مقایسه شد. معادله غیرخطی برای هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق، نسبت به معادله خطی، ضریب دبی جریان را با دقت بیشتری مدل می‌کند. کلیه محاسبات با استفاده نرم‌افزار جامع Mathematica v.6 انجام شده است.

**واژه‌های کلیدی:** آنالیز ابعادی، جریان آزاد، جریان مستغرق، دریچه کشویی قائم، رگرسیون‌گیری چندمتغیره، ضریب دبی.

ارجاع: ناصحی اسکویی ن. و سلماسی ف. ۱۳۹۵. ضریب دبی جریان برای دریچه‌های قائم. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۱۵۳-۱۵۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

\* نویسنده مسئول: [Salmasi@tabrizu.ac.ir](mailto:Salmasi@tabrizu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۲۷

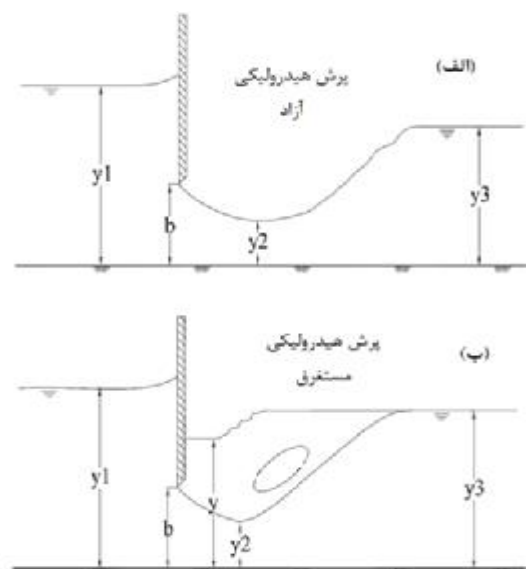
## مقدمه

انواع دریچه‌ها کاربرد وسیعی در کانال‌های آبیاری و زهکشی و سرریز سدها برای اندازه‌گیری دبی جریان و کنترل سطح آب دارند (هندرسون، ۱۹۶۶). محاسبه دقیق دبی جریان از جهت‌های مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. به طوری که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، جریان در پایین‌دست دریچه می‌تواند آزاد یا مستغرق باشد. مشخص کردن آزاد یا مستغرق بودن جریان مسئله مهمی است که همه محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. براساس تعریف به محض اینکه عمق پایاب به حدی برسد که روی دبی جریان تأثیرگذار باشد، استغراق انجام شده است. برای تعیین نوع جریان، معادلات تئوریک و آزمایشگاهی زیادی ارائه شده است که در این پژوهش از معادلات سووامی (۱۹۹۲) استفاده شده است:

$$y_1 \geq 0.81y_3 \left( \frac{y_3}{b} \right)^{0.72}, \text{Free flow} \quad (1)$$

$$y_3 < y_1 < 0.81y_3 \left( \frac{y_3}{b} \right)^{0.72}, \text{Submerged flow} \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)  $y_1$  عمق آب در بالادست دریچه،  $y_3$  عمق پایاب و  $b$  ارتفاع بازشدگی دریچه است.



شکل ۱- هیدرولیک جریان از زیر دریچه کثوئی قائم. الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

با استفاده از معادله پیوستگی و معادله برنولی می‌توان نوشت (هندرسون، ۱۹۶۶):

$$q = C_d b \sqrt{2gy_1} \quad (3)$$

در این معادله  $q$  دبی جریان در واحد عرض،  $C_d$  ضریب دبی و  $g$  شتاب ثقل است.

هندرسون (۱۹۶۶) مقدار  $C_d$  را با توجه به آزاد یا مستغرق بودن جریان، به ترتیب با معادلات (۴) و (۵) تعیین کرد (سیولودا و همکاران، ۲۰۰۹):

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1+\eta}}, \text{Free flow} \quad (4)$$

$$C_d = C_c \frac{\left( \xi - \sqrt{\xi^2 - \left( \frac{1}{\eta^2} - 1 \right) \left( 1 - \frac{1}{\lambda^2} \right)} \right)^{1/2}}{\frac{1}{\eta} - \eta} \quad (5)$$

## Submerged flow

که در آن،  $C_c$  ضریب انقباض دریچه است که برابر نسبت ارتفاع جت آب ( $y_2$ ) به ارتفاع بازشدگی دریچه است. پارامترهای دیگر به کار گرفته شده نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta = C_c b / y_1, \quad \lambda = y_1 / y_3 \quad (6)$$

$$\xi = \left( \left( \frac{1}{\eta} \right) - 1 \right)^2 + 2(\lambda - 1) \quad (7)$$

مقدار ضریب انقباض در مورد دریچه قائم لبه تیز، برای شرایط مختلف بهره‌برداری در محدوده ۰/۵۹ تا ۰/۶۲ تغییر می‌کند که به‌طور متوسط مقدار ۰/۶۱۱ توسط پژوهش‌گران مختلف تأیید شده است از سوی راجاراتنام و سابرامانیا (۱۹۶۷) برای هر یک از حالت‌های آزاد و مستغرق معادله‌ای جداگانه ارائه کردند:

$$q = C_d b \sqrt{2g(y_1 - C_c b)}, \text{Free flow} \quad (8)$$

$$q = C_d b \sqrt{2g(y_1 - y)}, \text{Submerged flow} \quad (9)$$

بر اساس آزمایش‌های آن‌ها در صورتی که  $b/y_1 < 0.3$

می‌توان مقدار  $C_d$  را از معادله زیر محاسبه کرد:

$$C_d = 0.0297 \frac{b}{y_1} + 0.589 \quad (10)$$

راجاراتنام و سابرامانیا (۱۹۶۷) برای محاسبه مقدار  $y$  پس از یک سری ساده‌سازی، معادله (۱۱) را ارائه کردند:

$$y = bC_d \left[ 2 \left( 1 - \frac{bC_d}{y_3} \right) + \sqrt{4 \left( 1 - \frac{bC_d}{y_3} \right)^2 + \left( \frac{y_3}{bC_d} \right)^2 - 4 \left( \frac{y_1}{bC_d} - \frac{y_1}{y_3} \right)} \right] \quad (11)$$

$$C_d = 0.611 \left( \frac{y_1 - b}{y_1 + 15b} \right)^{0.072}, \text{Free flow} \quad (12)$$

سووامی (۱۹۹۲) نیز با رگرسیون گیری غیرخطی از نتایج مشاهدات هنری، برای هر یک از حالت‌های آزاد و مستغرق به ترتیب معادلات (۱۲) و (۱۳) را ارائه کرد.

$$C_d = 0.611 \left( \frac{y_1 - b}{y_1 + 15b} \right)^{0.072} = \left( 0.32 \left( \frac{0.81y_3 (y_3/b)^{0.72} - y_1}{y_1 - y_3} \right)^{0.7} + 1 \right)^{-1}, \text{Submerged flow} \quad (13)$$

$$y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} \quad (14)$$

$$\frac{y_2^2}{2} + \frac{q^2}{gy_2} = \frac{y_3^2}{2} + \frac{q^2}{gy_3} \quad (15)$$

در صورتی که دو معادله اخیر را باهم ادغام کنیم یک معادله چهار متغیره به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$f(y_1, y_3, q, y_2) = \left( y_1 + \frac{q^2}{2g} \left( \frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right) \right)^2 + \frac{2q^2}{g} \left( \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_3} \right) - y_3^2 = 0 \quad (16)$$

عدد بی‌بعد تبدیل کرد. این پارامترها عبارتند از:  $C_d, q, g, b, y_1, y, y_3$  با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام و در نظر گرفتن  $b$  و  $g$  به عنوان مقادیر تکراری، می‌توان ۵ نسبت بی‌بعد به دست آورد که عبارتند از:  $\frac{gb^3}{q^2}, \frac{gb^3}{q^2}, \frac{y_1}{b}, \frac{y}{b}, \frac{y_3}{b}$  همان عدد فرود نسبت به بازشدگی دریچه است و می‌توان آن را به صورت  $\frac{1}{Fr^2}$  نوشت. بنابراین معادله کلی به صورت زیر خواهد بود:

$$F(C_d, \frac{1}{Fr^2}, \frac{y_1}{b}, \frac{y}{b}, \frac{y_3}{b}) = 0 \quad \text{یا} \quad (18)$$

$$C_d = F_1 \left( \frac{1}{Fr^2}, \frac{y_1}{b}, \frac{y}{b}, \frac{y_3}{b} \right)$$

برای تعیین تابع  $F_1$  با استفاده از داده‌های تولید شده برای هر دو حالت جریان، یک تابع خطی و یک تابع غیرخطی در نظر گرفته شده، و رگرسیون گیری بر اساس این توابع انجام شده است. الگوی رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی، به ترتیب به صورت معادلات (۱۹) و (۲۰) فرض شده‌اند.

$$(C_d)_i = \alpha_0 + \alpha_1 \left( \frac{y_1}{b} \right)_i + \alpha_2 \left( \frac{y_3}{b} \right)_i + \alpha_3 \left( \frac{y}{b} \right)_i + \alpha_4 \left( \frac{1}{Fr^2} \right)_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (19)$$

## مواد و روش‌ها

با توجه به شکل ۱- الف، می‌توان معادله بین پارامترهای هیدرولیکی دریچه قائم را با اعمال معادله برنولی و مومنتم به ترتیب بین مقطع ۱ و ۲، و مقطع ۲ و ۳ به دست آورد. با فرض کف کانال به عنوان خط مبنا و صرف نظر کردن از افت انرژی در محل دریچه خواهیم داشت:

حال به طور دلخواه مقداری (مجاز از نظر هیدرولیکی) برای سه پارامتر  $y_1$  و  $y_3$  و  $q$  انتخاب شده و معادله بالا برای  $y_2$  حل می‌شود. با معلوم شدن  $y_2$  می‌توان مقدار  $b$  را حساب کرد. سپس با توجه به معادلات (۱) و (۲) می‌توان آزاد یا مستغرق بودن جریان را مشخص کرده و در نهایت ضریب دبی جریان حساب کرد. کلیه محاسبات با نرم‌افزار Mathematica v.6 انجام شده است. تولید داده‌های ورودی در محدوده  $0.1 \leq y_1 \leq 5, 0.1 \leq y_3 < y_1, 0.005 \leq q \leq 2$  است (در سیستم واحدها SI).

تعداد داده‌های تولید شده ۵۲۰۰ عدد است که از بین آن‌ها ۶۵۰ داده مربوط به حالت جریان آزاد و ۴۵۵۰ داده مربوط به حالت جریان مستغرق است.

در حالت جریان مستغرق معادله برنولی به صورت معادله (۱۷) تبدیل خواهد شد زیرا ارتفاع آب در پایین دست دریچه برابر  $y$  است:

$$y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} = y + \frac{q^2}{2gy_2^2} \quad (17)$$

پارامترهای دخیل در فرایند جریان از زیر یک دریچه کشویی را می‌توان با استفاده از آنالیز ابعادی به تعدادی

$$(C_d)_i = \beta_0 \left(\frac{y_1}{b}\right)_i^{\beta_1} \left(\frac{y_3}{b}\right)_i^{\beta_2} \left(\frac{y}{b}\right)_i^{\beta_3} \left(\frac{1}{Fr^2}\right)_i^{\beta_4}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (20)$$

مقدار MAPE برای هر یک از روش‌های هندرسون (۱۹۶۶)، راجاراتنام و ساپرامانیا (۱۹۶۷) و سووامی (۱۹۹۲) به ترتیب برابر  $۰.۴/۷۳$ ،  $۰.۴/۴۳$  و  $۰.۲۳/۶$  است. که این مقدار با نتیجه بررسی‌های سپولودا و همکاران (۲۰۰۹) به طور کامل همخوانی دارد.

در بخش دوم این پژوهش تابع  $F_1$  برای هر دو حالت جریان با استفاده از روش‌های رگرسیون‌گیری چندمتغیره تعیین شد که سبب نتایج زیر شد. در این فرآیند از بین سه ضریب دبی تعیین شده برای هر سری داده، از مقدار به دست آمده با روش سووامی (۱۹۹۲) استفاده شده است.

### جریان آزاد

معادلات خطی و غیرخطی به دست آمده برای حالت جریان آزاد و ضریب تبیین ( $R^2$ ) آن‌ها به ترتیب عبارتند از:

$$C_d = 0.4556 + 0.01194 \left(\frac{y_1}{b}\right) - 0.000085 \left(\frac{1}{Fr^2}\right), R^2 = 0.541 \quad (22)$$

$$C_d = 0.4445 \left(\frac{y_1}{b}\right)^{0.1289} \left(\frac{1}{Fr^2}\right)^{0.0107}, R^2 = 0.806 \quad (23)$$

می‌توان برای سادگی این پارامتر را از فرایند رگرسیون‌گیری حذف نمود.

$$C_d = 0.4552 + 0.01197 \left(\frac{y_1}{b}\right), R^2 = 0.513 \quad (24)$$

$$C_d = 0.44457 \left(\frac{y_1}{b}\right)^{0.1219}, R^2 = 0.7894 \quad (25)$$

### جریان مستغرق

معادلات خطی و غیرخطی به دست آمده برای حالت جریان مستغرق نیز به ترتیب عبارتند از:

$$C_d = 0.2681 - 0.0015 \left(\frac{y_1}{b}\right) + 0.0982 \left(\frac{y_3}{b}\right) - 0.1018 \left(\frac{y}{b}\right) - 0.0013 \left(\frac{1}{Fr^2}\right), R^2 = 0.7347 \quad (26)$$

در این معادلات،  $n$  تعداد سری داده‌ها است و پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب نامعلومی بوده که مقادیر آن‌ها با داده‌های تولید شده تعیین می‌شود.

### نتایج و بحث

در این پژوهش با کاربرد معادلات (۱۶) و (۱۷) در محیط نرم‌افزار Mathematica v.6 برنامه‌ای برای حل همزمان معادلات برنولی و اندازه حرکت نوشته شد. با استفاده از ضریب دبی محاسبه شده، دبی جریان برای هر سری از داده‌های ورودی با استفاده از معادلات (۳) یا (۶) یا (۷) محاسبه شد. خطای هر یک از این روش‌ها در محاسبه دبی جریان نیز با استفاده از معیار میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) محاسبه شد.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{q_i - \hat{q}_i}{q_i} \right| \quad (21)$$

در این معادله  $n$  تعداد سری داده‌ها و  $q_i$  مقادیر دبی‌های فرضی در واحد عرض و  $\hat{q}_i$  مقادیر به دست آمده از سه روش مختلف برای آن است.

چنانچه از ضریب‌های معادلات (۲۲) و (۲۳) پیدا است، عدد فرود نسبت به  $y_1/b$  دارای اهمیت کمتری بوده و

استفاده از معادلات (۲۴) و (۲۵) به دلیل سادگی ترجیح داده می‌شود. همچنین به دلیل دقت بالای معادله غیرخطی نسبت به معادله خطی به دست می‌آید، منطقی است معادله غیرخطی استفاده شود.

$$C_d = 0.8275 \left(\frac{y_1}{b}\right)^{0.077} \left(\frac{y_3}{b}\right)^{-0.9898} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.1637} \left(\frac{1}{Fr^2}\right)^{-0.4132}, R^2 = 0.9883 \quad (27)$$

در این حالت نیز می‌توان با حذف برخی از پارامترها به معادلات ساده‌تر و با دقت مشابه دست یافت.

$$C_d = 0.2663 + 0.0905 \left(\frac{y_3}{b}\right) - 0.0961 \left(\frac{y}{b}\right), R^2 = 0.71 \quad (28)$$

$$C_d = 0.7482 \left(\frac{y_3}{b}\right)^{-0.6825} \left(\frac{1}{Fr^2}\right)^{-0.3929}, R^2 = 0.9831 \quad (29)$$

با متغیرهای مستقل  $y_1/b$  و  $y_3/b$  به صورت معادله (۳۰) ارائه شده است.

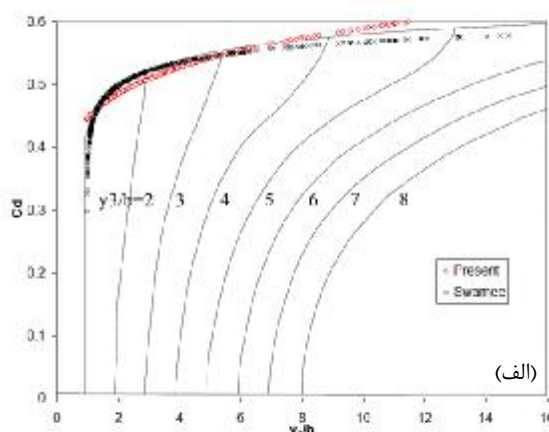
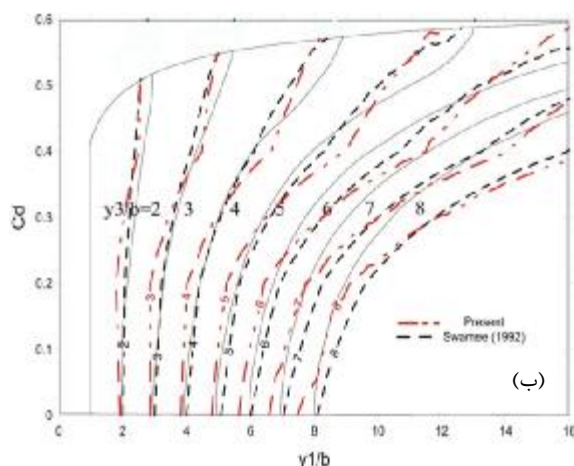
$$C_d = 0.3865 \left(\frac{y_1}{b}\right)^{1.0676} \left(\frac{y_3}{b}\right)^{-1.4486}, R^2 = 0.82 \quad (30)$$

و این در حالی است که، معادلات (۲۵) و (۳۰) بسیار ساده‌تر از معادلات (۱۰) و (۱۱) هستند.

در نهایت با استفاده از معادلات (۲۵)، (۲۹) و (۳) دبی جریان عبوری در واحد عرض دریاچه به دست آمد و معیار MAPE برای آن‌ها حساب شد. مقدار MAPE برای نتایج این پژوهش ۲۱/۵۴٪ است که همخوانی خوبی با روش سووامی داشته و حتی کمتر از آن است (شکل ۲).

چنانچه مشاهده می‌شود معادله (۲۹) با دقت بسیار بالایی می‌تواند جریان عبوری از زیر دریاچه را مدل کند. برای مقایسه نتایج این پژوهش با سایر بررسی‌های آزمایشگاهی موجود، فرم ساده شده دیگری از معادله (۲۷)

این معادله دقت کمتری نسبت به معادله (۲۹) دارد، اما می‌توان به واسطه آن نتایج این پژوهش را با نتایج هنری (۱۹۵۰) و سووامی (۱۹۹۲) مقایسه کرد (شکل ۲). به طوری که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، معادله (۲۵) و (۳۰) همخوانی خوبی با منحنی هنری داشته و در برخی موارد همخوانی بیشتری از معادلات سووامی (۱۹۹۲) دارد



شکل ۲- نتایج این پژوهش و مقایسه آن با منحنی هنری و روش سووامی (۱۹۹۲)، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

می‌تواند آزاد یا مستغرق باشد. در این پژوهش معادلات برنولی و مومنتم برای دریاچه کشویی قائم با کد نوشته شده در محیط Mathematica v.6 حل شده و تعداد ۵۲۰۰ سری داده تولید شد. نتایج حل این معادلات با

### نتیجه‌گیری

بررسی جریان عبوری از زیر دریاچه‌ها از نظر ایجاد آبرازی برای مدیریت بهینه در کانال‌های آبیاری و زهکشی مهم است. جریان عبوری از زیر دریاچه بسته به عمق پایاب

نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌گران دیگر بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش دقت بالایی در تخمین ضرب دبی دارد.

#### منابع

1. Henderson F. M. 1966. Open Channel Flow. MacMillan Publishing Co. Inc. New York. 522 p.
2. Henry H. R. 1950. Discussion of 'Diffusion of submerged jets' by Albertson M. L. Dai Y. B. Jensen R. A. and Rouse H. Trans. ASCE. 115: 687-694.
3. Rajaratnam N. and Subramanya K. 1967. Flow Equation for the Sluice Gate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 93(3): 167-186.
4. Sepúlveda C. Gómez M. and Rodellar J. 2009. Benchmark of Discharge Calibration Methods for Submerged Sluice Gates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 135(5): 676-682.
5. Swamee P. K. 1992. Sluice-gate Discharge Equations. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 118(1): 56-60.