

برآورد معادلات جریان و ضریب دبی دریچه‌های سالونی در شرایط مستغرق

فاطمه یوسفوند^۱، محمدجواد منعم^{۲*} و محمدرضا کاویان پور^۳

چکیده

دریچه‌های سالونی، از جمله سازه‌های کنترل و تنظیم جریان آب در کانال‌ها هستند. با توجه به بررسی‌های هیدرولیکی اندک بر روی این سازه، جهت توسعه معادلات جریان، به ویژه در شرایط مستغرق، در این پژوهش، خصوصیات جریان عبوری از دریچه‌های سالونی در شرایط مستغرق با استفاده از معادله مومنتم و بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. در شرایط جریان مستغرق، معادله‌ای برای تخمین دبی دریچه‌های سالونی بر اساس معادله مومنتم در نظر گرفته شد. همچنین با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و انجام رگرسیون بین پارامترهای بدون بعد مؤثر، معادله‌ای صریح برای ضریب دبی دریچه‌های سالونی در شرایط جریان مستغرق ارائه شد. نتایج نشان داد که ضریب دبی تا زاویه ۵۲/۵ درجه (نسبت بازشدگی = ۰/۳۹)، روند صعودی داشته و پس از آن کاهش می‌یابد. برای ارزیابی دقت معادله پیشنهادی، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای نسبی (MAPE) محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد معادلات پیشنهادی برای دبی و ضریب دبی دریچه‌های سالونی دارای حداکثر خطایی برابر ۱۰٪± است و با دقت مطلوب، تخمین مناسبی از این دو پارامتر را ارائه می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: جریان مستغرق، دبی، دریچه سالونی، رابطه مومنتم، ضریب دبی.

ارجاع: یوسفوند ف. منعم م. ج. و کاویان پور م. ر. ۱۳۹۷. برآورد معادلات جریان و ضریب دبی دریچه‌های سالونی در شرایط مستغرق. مجله پژوهش آب ایران. ۲۹: ۵۱-۵۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانشیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

* نویسنده مسئول: monem_mj@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۹

مقدمه

عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری و تأثیر آن در کاهش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، ضرورت ارائه روش‌های مؤثر در بهره‌برداری مناسب از شبکه‌های آبیاری را ایجاد کرده است (گومز و همکاران، ۲۰۰۲). یکی از روش‌های پیشنهادی پژوهشگران در این خصوص که نیازمند بهبود روش‌های توزیع و تحویل است، ارتقاء سیستم‌های کنترل و تنظیم در شبکه‌های آبیاری است (مالتر و همکاران، ۱۹۹۸). دریاچه‌های سالونی^۱، از جمله سازه‌های کنترل و تنظیم جریان آب در کانال‌ها هستند. این سازه به صورت دو لنگه در به دیواره مستطیلی در امتداد کانال لولا می‌شود و با تغییر زاویه باز شدگی، امکان تنظیم ارتفاع آب برای دبی‌های متفاوت، در بالادست دریاچه فراهم می‌شود. با توجه به مزایای این سازه از جمله، روگذر بودن جریان و امکان کنترل بهتر سطح آب، امکان عبور اجسام شناور و رسوبات به صورت همزمان و قابلیت خودکار سازی دریاچه، به تازگی کاربرد آن در کانال‌های آبیاری مورد توجه قرار گرفته است. با وجود کاربرد این سازه به‌عنوان یک سازه تنظیم و کنترل، بررسی‌های هیدرولیکی برای توسعه معادلات جریان در شرایط مستغرق اندک می‌باشد. این سازه در دهه ۱۹۸۰ از سوی لانگمن و همکاران، برای مدیریت نوسانات سطح آب در کانال‌های آبیاری ابداع شد و تاکنون تعدادی از کاربردهای موفقیت‌آمیز آن از جمله استفاده در پروژه Middle Rio Grand، در نیومکزیکو در سال ۲۰۰۶ گزارش شده است. در پروژه Middle Rio Grand، به جای استفاده از سازه‌های انحراف آب فرسوده، از سازه دریاچه‌های سالونی استفاده شد و سازه‌های آب‌بند مرسوم، با دریاچه‌های سالونی جایگزین شدند (آد و کنزلی، ۲۰۰۶).

Aqua System 2000 Inc. (AS2I) برای ارائه یک راه‌حل انعطاف‌پذیر و اقتصادی، برای کنترل جریان در کانال‌های کوچک و متوسط، مدل سازه دریاچه سالونی را با یک سیستم محرک هیدرولیکی ترکیب کرد. AS2I، ۲۰۱۲، با انجام آزمایش‌های روی دریاچه‌های سالونی، ضمن ارائه معادلات دبی دریاچه سالونی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، آستانه استغراق این سازه را ۰/۳ معرفی کرد. بر اساس تعریف، نسبت عمق آب پایین دست دریاچه به عمق

آب بالادست (y_2/y_1) ، درجه استغراق دریاچه است. بر طبق نظر AS2I، چنانچه درجه استغراق دریاچه کمتر از ۰/۳ باشد، جریان عبوری از دریاچه آزاد و در غیر این صورت جریان مستغرق است. بنابراین درجه استغراق ۰/۳ به‌عنوان آستانه استغراق دریاچه سالونی، در نظر گرفته شده است. معادلات ارائه شده توسط AS2I در سیستم انگلیسی، برای جریان آزاد به‌صورت معادله (۱) و برای جریان مستغرق به‌صورت معادله (۲) تعریف شده است:

$$Q = 4.339 \times b_g \times y_1^2 \quad (1)$$

$$Q = 4.012 \times C_d \times b_g \times \sqrt{(y_1^2 - y_2^2) \times \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1}\right)^{-1}} \quad (2)$$

در این معادلات Q دبی جریان (ft³/s)، y_1 و y_2 به ترتیب عمق آب بالادست و پایین دست دریاچه (ft)، b_g عرض بازشدگی دریاچه (ft) و C_d ضریب دبی جریان مستغرق است که از معادله (۳) محاسبه می‌شود:

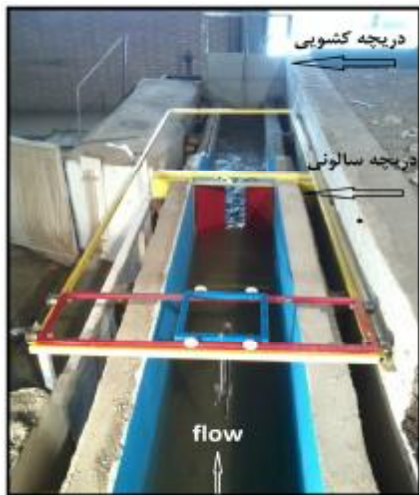
$$C_d = 0.860 - 0.890 \times \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{0.285}{y_1}\right) \quad (3)$$

نقایی و منعم (۱۳۹۲)، با استفاده از نمودارهای ارائه شده توسط AS2I، رابطه دبی-اشل را برای دریاچه‌های سالونی با عرض‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ فوت و به ترتیب با بازشدگی ۲/۷، ۳/۶، ۴/۵، ۵/۴ و ۷/۳ فوت، و نیز زاویه بازشدگی ۷۰ درجه و نسبت‌های استغراق ۴۰، ۷۰، ۹۰ و ۹۵ درصد ارائه کردند. در نمودارهای موجود، نسبت عرض بازشدگی به عرض دریاچه، برای دریاچه‌های مختلف، ثابت و برابر با ۰/۹ است.

یوسفوند و منعم (۱۳۹۳ الف)، دریاچه سالونی را به‌عنوان سازه کنترل و تنظیم آب در کانال‌های آبیاری معرفی و معادلات دبی در زوایای مختلف بازشدگی دریاچه‌های سالونی هم‌عرض کانال در شرایط جریان آزاد را ارائه کردند. در پژوهشی دیگر، یوسفوند و منعم (۱۳۹۳ ب)، معادله هیدرولیکی دبی عبوری از دریاچه‌های سالونی با فشرده‌گی جانبی را در شرایط جریان آزاد، با استفاده از معادله انرژی در نظر گرفتند.

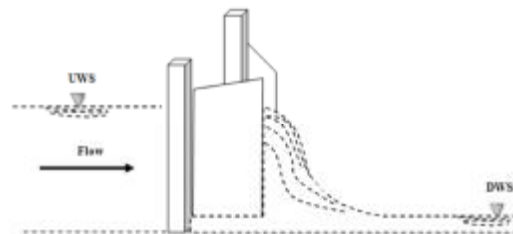
با توجه به بررسی‌های اندک بر روی این سازه در شرایط مختلف هیدرولیکی، لزوم ارائه معادلاتی برای تخمین دبی و ضریب دبی در شرایط مستغرق احساس می‌شود. در این پژوهش با بهره‌گیری از معادله مومنتم، معادله تخمین دبی دریاچه سالونی در شرایط استغراق ارائه می‌شود. در ادامه

شد. عرض و ارتفاع دریچه به ترتیب ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر بود. برای تنظیم درجه استغراق، یک دریچه کشویی به ابعاد ۱×۲ متر در انتهای کانال نصب شد (شکل ۳). دریچه در ۵ زاویه بازشدگی متفاوت و با ۳ دبی مختلف ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر در ثانیه آزمایش شد. ۵ زاویه ۴۵، ۵۲/۵، ۶۰، ۶۷/۵ و ۷۰ درجه، به‌عنوان زوایای بازشدگی دریچه سالونی انتخاب شد. در این آزمایش‌ها سه درجه استغراق ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب در مجموع ۴۵ آزمایش در چندین تکرار انجام شد. پلان و مقطع طولی کانال آزمایشگاهی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

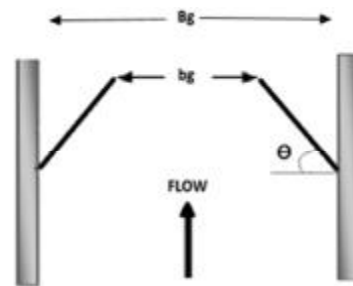


شکل ۳- نمای دریچه سالونی و کشویی در کانال

به کمک داده‌های آزمایشگاهی، معادله رگرسیونی ضریب دبی دریچه سالونی بر حسب پارامترهای مهم بی‌بعد ارائه می‌شود. نمای شماتیک دریچه سالونی در شکل ۱ و ۲ ارائه شده است. در این شکل‌ها، Bg عرض دریچه، bg عرض بازشدگی، θ زاویه بازشدگی و UWS و DWS به ترتیب تراز آب بالادست و پایین‌دست دریچه است.



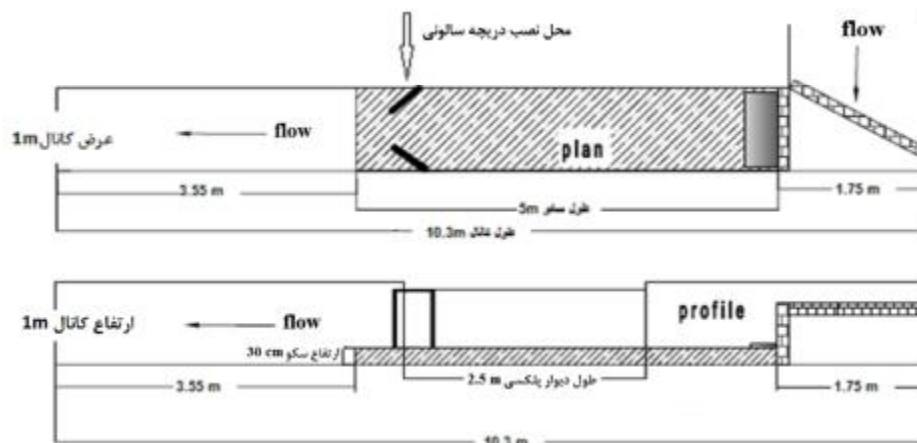
شکل ۱- پروفیل شماتیک جریان عبوری از دریچه سالونی



شکل ۲- پلان دریچه سالونی

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، آزمایش‌هایی روی دریچه سالونی هم‌عرض کانال در شرایط مستغرق انجام



شکل ۴- پلان و پروفیل کانال آزمایشگاهی

$$\sum F = M_2 - M_1 \quad (۴)$$

M_1 و M_2 به ترتیب مومنتم ورودی و خروجی از حجم کنترل و F نیروهای وارده بر حجم کنترل است. از آنجایی که هدف استخراج معادله دبی حجمی عبوری از دریچه است، در به‌کارگیری معادله مومنتم، مابه‌التفاوت مومنتم خروجی و ورودی در واحد زمان بیان شد و مومنتم ورودی و خروجی حجم کنترل موردنظر، به‌صورت معادله (۵) است:

$$M_1 = (VA)V - \frac{d[(VA)V]}{dx} \times \frac{\Delta x}{2}$$

$$M_2 = (VA)V + \frac{d[(VA)V]}{dx} \times \frac{\Delta x}{2} \quad (۵)$$

$$M_2 - M_1 = \frac{d[(VA)V]}{dx} \times \Delta x$$

در این معادله، A سطح مقطع جریان، V سرعت جریان در المان موردنظر و Δx طول حجم کنترل انتخابی است. برآیند نیروهای وارد بر حجم کنترل انتخابی نیز به‌صورت معادله (۶) محاسبه می‌شوند:

$$\sum F = F_p - (F_p + \frac{dF_p}{dx} \times \Delta x + F_1 + F_2) + F_3 + F_4 \quad (۶)$$

در این معادله، F_p نیروی هیدرواستاتیک آب، F_1 و F_2 نیروهای وارده از دریچه به جریان، F_3 نیروی اصطکاک بین کف کانال و آب و F_4 مؤلفه افقی نیروی وزن آب است. به دلیل کوچکی شیب کف کانال و همچنین کم بودن نیروی اصطکاک کف کانال، از نیروهای F_3 و F_4 صرف‌نظر شده و معادله (۶) به‌صورت معادله (۷) نوشته می‌شود:

$$\sum F = F_p - (F_p + \frac{dF_p}{dx} \times \Delta x + F_1 + F_2) \quad (۷)$$

با توجه به شکل ۶، نیروی هیدرواستاتیکی F_p و دیفرانسیل آن به‌صورت معادلات (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند:

$$F_p = \int_0^y g(y-h)B_g \times dh \quad (۸)$$

$$\frac{dF_p}{dx} \Delta x = \int_0^y \Delta x g \frac{dy}{dx} B_g dh + \int_0^y \Delta x g (y-h) \frac{dB_g}{dx} dh \quad (۹)$$

برای انجام آزمایش‌ها، پس از تنظیم دبی موردنظر در کانال، زاویه بازشدگی دریچه با صفحات مدرجی که بدین منظور روی سازه نصب شده است، تنظیم شد (شکل ۵-الف). پس از تنظیم درجه استغراق سازه و تثبیت شرایط جریان در کانال، عمق آب در بالادست و پایین‌دست دریچه با عمق‌سنج^۱ اندازه‌گیری شد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- الف) صفحات مدرج تنظیم زاویه بازشدگی دریچه سالونی و ب) دریچه سالونی

نتایج و بحث

معادله دبی دریچه در شرایط استغراق

برای استخراج معادله دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق، یک حجم کنترل پیرامون دریچه (شکل ۶) در نظر گرفته شد. معادله مومنتم برای این حجم کنترل به‌صورت معادله (۴) نوشته می‌شود:

انجام آزمایشات در محدوده اعداد رینولدز $(9-4.8) \times 10^5$ ، تأثیر نیروی لزجت قابل اغماض است. کلیه آزمایشات در شرایط جریان زیربحرانی (عدد فرود در محدوده $0.497-0.112$) انجام شد. همچنین با توجه به وابستگی دو پارامتر بی‌بعد b_g/B_g و θ ، از θ در معادله ضریب دبی صرف‌نظر می‌شود (معادله (۱۵)).

$$c_d = f_2(y_2/y_1, B_g/y_1, b_g/B_g) \quad (15)$$

معادله ضریب C_d با پارامترهای بی‌بعد y_2/y_1 ، B_g/y_1 و b_g/B_g در ادامه ارائه شد. در زاویه ثابت بازشدگی، با افزایش نسبت استغراق دریچه به دلیل کاهش جریان ثانویه، هد بالادست دریچه افزایش یافته و در نتیجه هد سرعت (ارتفاع معادل انرژی جنبشی) کاهش یافته که سبب کاهش ضریب دبی جریان می‌شود (شکل ۷).

با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، عمق آب در بالادست دریچه کاهش و B_g/y_1 افزایش می‌یابد. معادله ضریب C_d با B_g/y_1 برای دریچه سالونی در شکل ۸ نشان می‌دهد که برای درجه استغراق 50% و 70% ، افزایش B_g/y_1 با کاهش C_d همراه بوده، اما در درجه استغراق 90% درصد به طور تقریبی ثابت است. با توجه به شکل ۹، ضریب C_d تا زاویه $52/5^\circ$ (نسبت بازشدگی 0.39)، روند صعودی داشته و سپس کاهش می‌یابد. در زوایای کمتر، با افزایش زاویه تا $52/5^\circ$ هد در نزدیکی دریچه کاهش یافته و هد سرعت افزایش می‌یابد که سبب افزایش ضریب C_d تا زاویه $52/5^\circ$ می‌شود. برای زوایای $52/5^\circ$ تا 70° (نسبت بازشدگی 0.66) به دلیل افزایش جریان ثانویه در نزدیکی دریچه، C_d کاهش یافته و معادله ضریب C_d با بازشدگی دریچه، ابتدا افزایشی و سپس کاهش می‌یابد.

معادلات ضریب دبی جریان مستغرق

برای تعیین ضریب دبی جریان مستغرق، دبی اندازه‌گیری شده Q_m به دبی حاصل از معادله (۱۲)، به صورت معادله (۱۶)، بررسی و معادلات مختلفی برای ضریب C_d برحسب پارامترهای بی‌بعد مؤثر، در شرایط جریان مستغرق در نظر گرفته شد.

$$C_d = \frac{Q_m}{2.215 \times C \times b_g \times \sqrt{(y_1 + y_2)y_1y_2}} \quad (16)$$

معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) به شکل بی‌بعد، برای دریچه با ابعاد مختلف و در شرایط استغراق و زوایای بازشدگی متفاوت قابل استفاده هستند.

$$\frac{dF_p}{dx} \Delta x =$$

$$\int_0^y \Delta x g \frac{dy}{dx} B_g dh + \int_0^y \Delta x g (y-h) \frac{dB_g}{dx} dh$$

$$\int_0^y B_g dh = A, \int_0^y \Delta x g (y-h) \frac{dB_g}{dx} dh = -(F_1 + F_2)$$

$$\frac{dF_p}{dx} \Delta x = g A \Delta x \frac{dy}{dx} - (F_1 + F_2)$$

با جایگذاری دو معادله (۸) و (۹) در معادله (۷)، معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$\sum F = F_p - (F_p + g A \Delta x \frac{dy}{dx} - (F_1 + F_2) + F_1 + F_2) = -g A \Delta x \frac{dy}{dx} \quad (10)$$

در نهایت از تساوی معادله (۵) و (۱۰)، دبی دریچه سالونی در شرایط استغراق بر اساس معادله (۱۲) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \frac{d[QV]}{dx} \times \Delta x = -g A \Delta x \frac{dy}{dx} \\ Q \times \frac{\Delta V}{\Delta x} = -g A \times \frac{\Delta y}{\Delta x} \\ Q \times (V_2 - V_1) = (g A y_2 - y_1) \\ Q \times \left(\frac{Q}{B_g y_2} - \frac{Q}{B_g y_1} \right) = g \left(\frac{B_g y_1 + B_g y_2}{2} \right) (y_1 - y_2) \end{cases} \quad (11)$$

$$Q = 2.215 \times C \times b_g \times \sqrt{(y_1 + y_2)y_1y_2} \quad (12)$$

در این معادله y_1 عمق آب در بالادست، y_2 عمق آب در پایین‌دست دریچه (m) و C ضریب تبدیل عرض دریچه به عرض بازشدگی است.

ضریب دبی دریچه در شرایط مستغرق

ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط مستغرق تابعی از چندین متغیر مختلف به صورت معادله (۱۳) است:

$$c_d = f_1(y_1, y_2, B_g, b_g, V_1, g, r, m, q) \quad (13)$$

با توجه به آنالیز ابعادی، ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط مستغرق تابعی از نسبت عرض دریچه به عمق آب در بالادست دریچه B_g/y_1 ، نسبت بازشدگی دریچه b_g/B_g ، درجه استغراق دریچه y_2/y_1 ، زاویه بازشدگی دریچه θ و اعداد فرود و رینولدز جریان است (معادله (۱۴)).

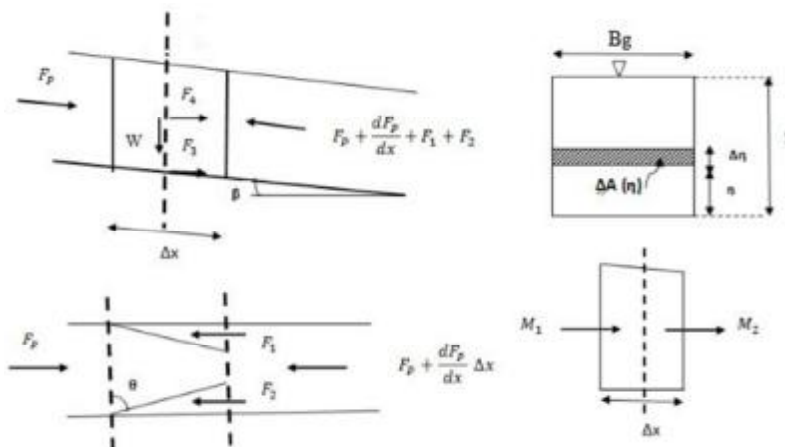
$$c_d = f_2\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{B_g}{y_1}, \frac{b_g}{B_g}, q, Re_1, Fr_1\right) \quad (14)$$

عدد رینولدز بیان‌کننده نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت است. در جریان‌های آرام، نیروی لزجت بر نیروی اینرسی غلبه دارد. در حالی که در جریان‌های متلاطم نیروی لزجت تأثیرگذار نیست (اکان، ۱۳۹۱). با توجه به

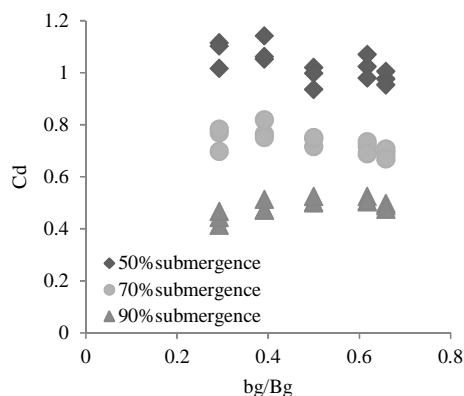
$$C_d = 0.416 + (0.003 \times \frac{B_g}{y_1}) + (0.039 \times \frac{b}{B_g}) - 0.427 \times (\frac{y_2}{y_1})^2 + (\frac{0.362}{y_1}) \quad (19)$$

$$C_d = 0.454 - 0.434 \times (\frac{y_2}{y_1})^2 + (\frac{0.359}{y_2/y_1}) \quad (17)$$

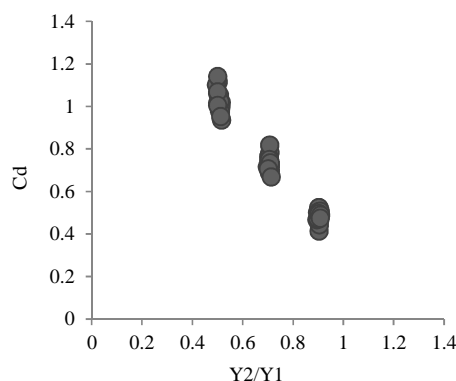
$$C_d = 1.726 + 0.053 \times (\frac{b}{B_g}) - 1.4 \times (\frac{y_2}{y_1}) \quad (18)$$



شکل ۶- نمایش نیروهای وارده بر حجم کنترلی از جریان عبوری از دریچه سالونی



شکل ۹- رابطه ضریب دبی با نسبت بازشدگی دریچه

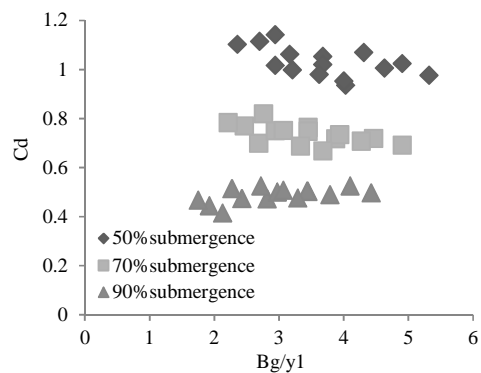


شکل ۷- رابطه ضریب دبی با نسبت استغراق دریچه

جدول ۱، محدوده پارامترهای بی‌بعد موثر در تحلیل دریچه‌های سالونی بر اساس نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

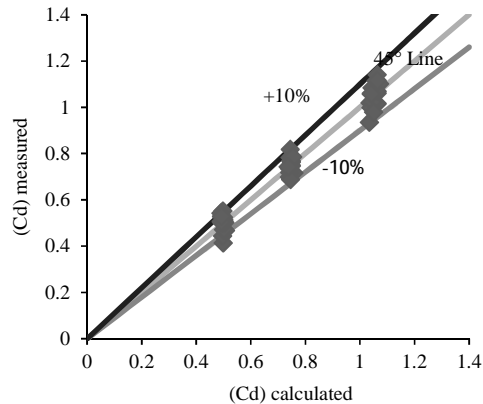
جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای مؤثر در ضریب دبی دریچه سالونی

| پارامتر | B_g/y_1 | b/B_g | y_2/y_1 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| دامنه | ۵/۳۱۹ | ۰/۶۵۸ | ۰/۹۰۹ |
| تغییرات | ۱/۷۵۴ | ۰/۲۹۲ | ۰/۴۶۸ |

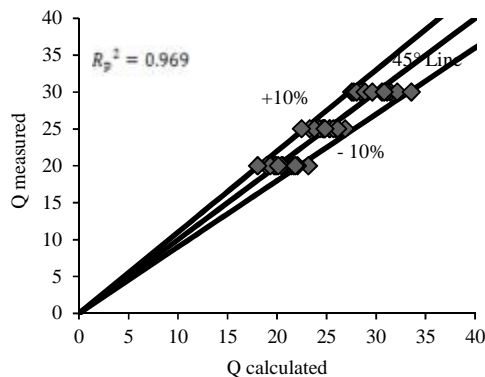


شکل ۸- رابطه ضریب دبی با B_g/y_1

خطای نسبی معادله پیشنهادی ضریب دبی (معادله (۱۸))، در شکل ۱۰ ارائه شده است. خطای نسبی دبی اندازه‌گیری شده و دبی محاسبه شده از معادله پیشنهادی (معادله (۱۲))، در حدود $\pm 10\%$ است (شکل ۱۱). در شکل ۱۲، دبی به دست آمده از معادله آکوا و معادله پیشنهادی، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شرایط جریان مستغرق ارائه شده است.



شکل ۱۰- خطای نسبی معادله ضریب دبی (معادله (۱۸))



شکل ۱۱- خطای نسبی معادله دبی (معادله (۱۹))

برای ارزیابی معادلات مختلف در تخمین ضریب دبی جریان مستغرق بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی، از سه شاخص خطای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای نسبی (MAPE) و خطای نسبی (RE) که به ترتیب به صورت معادلات (۲۰) تا (۲۲) تعریف شده‌اند، استفاده شد.

$$MAPE = \frac{\sum \left| 1 - \frac{Q_{calculated}}{Q_{measured}} \right|}{N} \times 100 \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{measured} - Q_{calculated})^2}{N}} \quad (21)$$

$$RE = \frac{Q_{measured} - Q_{calculated}}{Q_{measured}} \times 100 \quad (22)$$

در این معادلات، $Q_{measured}$ دبی اندازه‌گیری شده و $Q_{calculated}$ دبی محاسبه شده است. جدول ۲، مقدار شاخص‌های خطا را به ازای کاربرد معادلات مختلف ضریب دبی نشان می‌دهد.

معادله (۱۹) با وجود پیچیدگی در شکل، مقدار ضریب دبی در شرایط جریان مستغرق را به صورت صریح و تابعی از مشخصات جریان و ابعاد دریچه به دست می‌دهد.

قابل توجه است که معادله (۱۸)، با وجود فرمی ساده دارای دقتی قابل قبول در تعیین ضریب دبی جریان مستغرق است. با توجه به معادلات به دست آمده، مهم‌ترین پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب C_d جریان مستغرق، نسبت استغراق و نسبت بازشدگی دریچه (y_2/y_1 و b_g/B_g) هستند. برای تعیین ضریب C_d جریان مستغرق، معادله ارائه شده بر حسب دو پارامتر نسبت استغراق و نسبت بازشدگی دریچه (معادله (۱۸))، به‌عنوان معادله ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق پیشنهاد می‌شود.

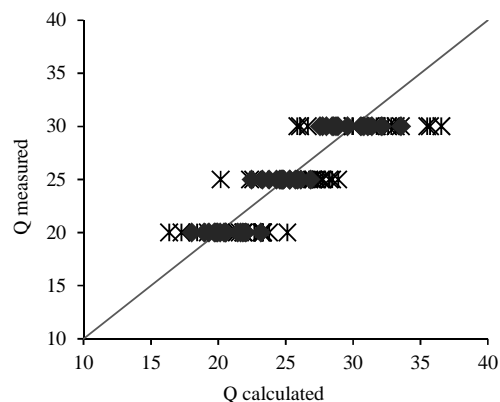
جدول ۲- ارزیابی معادلات پیشنهادی ضریب دبی

| عوامل مؤثر در معادلات | $\frac{y_2}{y_1}$ | $\frac{y_2}{y_1}, \frac{b_g}{B_g}$ | $\frac{y_2}{y_1}, \frac{B_g}{y_1}, \frac{b_g}{B_g}$ |
|-----------------------|-------------------|------------------------------------|---|
| پارامترهای آماری | (معادله (۱۷)) | (معادله (۱۸)) | (معادله (۱۹)) |
| RE (%) | ۴/۶۷۸ | ۲/۵۳۹ | ۳/۶۸۶ |
| MAPE (%) | ۴/۵۷ | ۴/۶۴ | ۴/۳ |
| RMSE | ۰/۰۴ | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۴ |

۳. یوسفوند ف. و منعم م. ج. ۱۳۹۳ الف. استخراج معادله دبی دریچه سالونی به‌عنوان سازه نوین آب‌بند با فشردگی جانبی با استفاده از رابطه انرژی در شرایط جریان آزاد. دومین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه. ۲۹ مهر، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج.

۴. یوسفوند ف. و منعم م. ج. ۱۳۹۳ ب. معرفی دریچه سالونی و استخراج رابطه هیدرولیکی دبی در شرایط جریان آزاد. سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. ۲۱ تا ۲۲ آبان ماه، دانشگاه تبریز.

5. Aqua Systems 2000 In. 2013. Leaders in Water Management and Control, Available from: <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate> [10september2013].
6. Gomez M. Rodellar J. and Mantencon J. 2002. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. Applied Mathematical Modeling. 26: 1039-1056.
7. Langeman p. Craig k. Elser P. and Allen L. 2006. Irrigation Gate System. US Patent 7,114,878 B2.
8. Malaterre P. O. Rogers D. and Schuurmans j. 1998. Classification of canal control algorithms. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. 124(1): 3-10.
9. Oad R. and Kinzli K. 2006. SCADA Employed in Middle Rio Grande Valley to Help Deliver Water Efficiently. Newsletter of the water center at Colorado state university. 10 p.



شکل ۱۲- مقایسه معادله پیشنهادی و معادله آکوا در شرایط جریان مستغرق

نتیجه‌گیری

معادله ارائه شده مبتنی بر رابطه مومنتم، برای دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق، تخمین مناسبی از دبی جریان را به دست می‌دهد. در شرایط جریان مستغرق معادله توصیف کننده تغییرات ضریب دبی دریچه سالونی به‌صورت تابعی از نسبت بازشدگی و استغراق نسبی دریچه، استنتاج شد. دخالت نسبت عرض دریچه به عمق آب در بالادست دریچه، سبب افزایش دقت در تخمین ضریب دبی خواهد شد. در یک زاویه بازشدگی ثابت، با افزایش نسبت استغراق دریچه، مقدار ضریب دبی کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که رابطه ضریب دبی با زاویه بازشدگی، به‌صورت افزایشی - کاهشی است.

سیاس‌گذاری

از همکاری‌های مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، جناب آقایان دکتر عباس اکبرزاده، مهندس رضا روشن و مهندس علی خراسانی‌زاده قدردانی می‌شود.

منابع

۱. اکان ع. ۱۳۹۱. هیدرولیک کانال‌های باز. چاپ اول، تهران، انتشارات گنو. ۲۳۹ ص.
۲. نقایی ر. و منعم م. ج. ۱۳۹۲. معرفی دریچه سالونی جهت تنظیم سطح آب در کانال‌های آبیاری و ارائه روابط هیدرولیکی آن. چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. ۶ تا ۸ اسفند، دانشگاه شهید چمران اهواز.