

کالیبراسیون دریچه‌های آبگیر قطاعی مستغرق با استفاده از بهینه سازی غیر خطی

مهرداد تقیان^{۱*}، حسین محمد ولی سامانی^۲ و محسن پوررضا بیلندی^۳

* نویسنده مسئول، عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین اهواز mehrdad.taghian@gmail.com

۲- استاد گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- عضو باشگاه پژوهشگران جوان، واحد دانشگاه آزاد اسلامی گناباد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۱۱

چکیده

دریچه‌ها از جمله سازه‌های کنترل کننده جریان هستند که در شکل‌ها و با نحوه عملکرد متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مشهورترین و پرکاربردترین دریچه‌های زیر گذر می‌توان دریچه‌های کشویی و شعاعی (قطاعی) را نام برد. سادگی ساخت و نصب دریچه‌های قطاعی و نیاز به نیروی کم جهت بالا و پایین بردن این دریچه‌ها، باعث افزایش کاربرد آنها جهت کنترل جریان یا سطح آب در سدها و سازه‌های انتقال آب شده است. تاکنون روابط و نمودارهای تجربی متعددی برای تخمین دبی عبوری یا ضریب تخلیه جریان از دریچه‌های قطاعی ارائه شده است اما شرایط جریان مستغرق کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برآورد دبی عبوری از دریچه‌های آبگیر در حالت استغرق با حل توأم معادلات انرژی و مومنتم امکان پذیر است. در این راستا برای ارزیابی دبی‌های محاسباتی، ۱۶ مورد اندازه گیری در دو آبگیر سد انحرافی گتوند و شهدا در استان خوزستان انجام شده است. نتایج این بررسی حاکی از آن است که معادله مومنتم همواره عمق استغرق را کمتر از میزان واقعی برآورد می‌نماید که دلیل آن نادیده گرفتن آشفتگی جریان و عدم یکنواختی سرعت بعد از دریچه می‌باشد. لذا دبی محاسباتی همواره بیش از دبی اندازه گیری بوده است. در ادامه با اندازه گیری مستقیم عمق استغرق به جای عمق پایاب (حذف معادله مومنتم) و استفاده از معادله انرژی به صورت منفرد، نتایج بهتری در محاسبه دبی عبوری حاصل گردیده است. در نهایت به منظور کالیبراسیون ضریب فشردگی جریان تاج^۱، از حل تلفیقی معادلات انرژی و مومنتم در نرم افزار لینگو (ابزار بهینه سازی غیر خطی) استفاده گردید.

کلید واژه‌ها: کالیبراسیون، بهینه سازی غیرخطی، دریچه قطاعی، جریان مستغرق.

مقدمه

دریچه‌ها از جمله سازه‌های کنترل کننده جریان هستند که در شکل‌ها و با نحوه عملکرد متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مشهورترین و پر کاربردترین دریچه‌های زیر گذر می‌توان دریچه‌های کشویی و شعاعی (قطاعی) را نام برد. سادگی ساخت و نصب دریچه‌های قطاعی و نیاز به نیروی کم جهت بالا و پایین بردن این دریچه‌ها، باعث افزایش کاربرد آنها جهت کنترل جریان یا سطح آب در سدها و سازه‌های انتقال آب شده است. شکل شماتیک زیر دریچه قطاعی و پارامترهای موثر در دبی عبوری از آن را نشان می‌دهد.

با توجه به کاربرد فراوان دریچه‌ها به ویژه در آب بندهای دریچه‌دار و دهانه‌های آبگیر و اهمیت آنها در اندازه گیری دقیق دبی جریان و همچنین فراهم نمودن تسهیلاتی برای مدیریت آب در شبکه، در سال ۲۰۰۲ کمیته ای از ASCE برای اندازه گیری دقیق جریان در دریچه کانالها تشکیل شده است (تونی^۲، ۲۰۰۴).

انجمن مهندسی ارتش امریکا (۱۹۴۶) رابطه‌ای را برای تعیین دبی عبوری از دریچه قطاعی در حالت مستغرق برای حالتی که روی یک آستانه برجسته در کف کانال نصب شده است، ارائه نمودند:

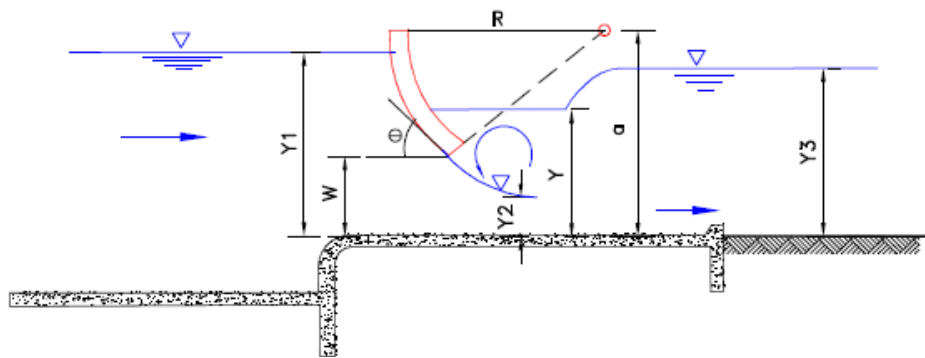
$$Q = C_d b h_s \sqrt{2gh} \quad (1)$$

که در آن h_s اختلاف ارتفاع آب در پایین دست دریچه و ارتفاع آستانه $(Y_3 - W)$ ، h ارتفاع مؤثر برای عبور آب از زیر دریچه که برابر است با اختلاف رقوم انرژی بالادست با سطح آب پایین دست و C_d ضریب تخلیه می‌باشد که با توجه به

دریچه‌ها از جمله سازه‌های کنترل کننده جریان هستند که در شکل‌ها و با نحوه عملکرد متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مشهورترین و پر کاربردترین دریچه‌های زیر گذر می‌توان دریچه‌های کشویی و شعاعی (قطاعی) را نام برد. سادگی ساخت و نصب دریچه‌های قطاعی و نیاز به نیروی کم جهت بالا و پایین بردن این دریچه‌ها، باعث افزایش کاربرد آنها جهت کنترل جریان یا سطح آب در سدها و سازه‌های انتقال آب شده است. شکل شماتیک زیر دریچه قطاعی و پارامترهای موثر در دبی عبوری از آن را نشان می‌دهد.

متغیرهای عمومی موجود در شکل فوق و معادلات این نوشتار به صورت زیر است:

Y_1 عمق آب بالادست یا سراب دریچه، Y_2 عمق جت پس از دریچه، Y_3 عمق آب پایاب دریچه، Y عمق استغرق، W میزان گشودگی دریچه، a فاصله محور دریچه تا کف کانال، R شعاع دریچه، θ زاویه بین خط مماس بر لبه پایین دریچه و خط افق، b عرض دریچه (بر اساس تعداد دریچه‌های در حال بهره برداری متغیر خواهد بود).



شکل ۱- پرش هیدرولیکی مستغرق در دریچه قطاعی

کشویی روابط ذیل را به ترتیب در حالت جریان مستغرق و آزاد ارائه کردند:

$$Q = C_d W b \sqrt{2g(Y_1 - Y_3)} \quad (۶)$$

$$Q = C_d W b \sqrt{2gY_1} \quad (۷)$$

علاوه بر پارامترهای معرفی شده قبلی، C_d ضریب تخلیه است که در اینجا تابعی از Y_1/W می باشد. روابط فوق کاربرد عمومی برای دریچه‌های قطاعی نیز دارند، مشروط بر اینکه ضریب تخلیه دبی به درستی تخمین زده شود.

کلمنس و همکاران^۲ (۲۰۰۳) با استفاده از رابطه انرژی بین مقطع بالادست دریچه و مقطع حداکثر انقباض در پایین دست دریچه، رابطه زیر را برای محاسبه دبی عبوری در شرایط مستغرق ارائه نمودند:

$$Q_d = C_c W b \sqrt{\frac{2g(H_1 - Y - E_{corr})}{1 + \zeta}} \quad (۸)$$

که در آن H_1 انرژی بالادست دریچه، E_{corr} پارامتر اصلاحی انرژی است که ناشی از افزایش ضخامت جت ورودی و گردادیان فشار معکوس در جریان مستغرق پشت دریچه می باشد، $1 + \zeta$ ضریبی است که به خاطر افت انرژی بالادست و عدم یکنواختی سرعت در محل حداکثر انقباض جریان در پشت دریچه در نظر گرفته شده است.

دنت^۳ (۲۰۰۴) یک رابطه رگرسیون درجه دو را برای برآورد دبی عبوری از دریچه‌های قطاعی مستغرق با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری در دریچه‌های تنظیم کننده بکار برد. این رابطه به شرح ذیل است:

$$Q/W = A(DH)^2 + B(DH) + C \quad (۹)$$

نسبت $\frac{h_s}{W}$ از روی نمودار به دست می‌آید. علاوه بر این رابطه‌ای را نیز برای حالتی که دریچه قطاعی روی سرریز اوجی قرار گرفته، ارائه نموده‌اند:

$$Q = C_d W b \sqrt{2gh} \quad (۲)$$

که در آن h ارتفاع آب بالادست تا وسط بازشدگی دریچه می‌باشد.

تاچ (۱۹۵۵) براساس داده‌های تجربی رابطه زیر را برای محاسبه ضریب تخلیه در شرایط جریان آزاد پیشنهاد کرد:

$$C_d = C_c / \sqrt{(1 + C_c W / Y_1)} \quad (۳)$$

که در آن C_c ضریب فشردگی جریان و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_c = 1 - 0.75 \left(\frac{\theta}{90} \right) + 0.36 \left(\frac{\theta}{90} \right)^2 \quad (۴)$$

زویه θ که در شکل (۱) نشان داده شده است از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{a - W}{R} \right) \quad (۵)$$

تاچ با استفاده از مقادیر تجربی، نمودارهایی برای شرایط جریان مستغرق ارائه کرده است که با داشتن $\frac{W}{R}$ ، $\frac{Y_3}{R}$ ، $\frac{Y_1}{R}$ و $\frac{a}{R}$ می‌توان ضریب دبی را محاسبه کرد. البته نمودارهای مشابهی نیز توسط هندرسون و چو ارائه شده است. راجاراتنام و سوبرامانیا^۱ (۱۹۶۷) برای محاسبه دبی عبوری از دریچه‌های

2. Clemmens et al.
3. Dent

1. Rajaratnam and Subramanya

بهینه سازی غیرخطی و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و تلفیق معادلات انرژی-مومنتم، اصلاحاتی در ضرایب رابطه فشرده‌گی جریان تاج اعمال گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد انحرافی-تنظیمی گتوند در شمال خوزستان و کیلومتر ۲۷۷ رودخانه کارون در محلی که رودخانه کارون از تپه‌ها خارج و بر سطح جلگه خوزستان پدیدار می‌شود قرار گرفته است. این سد آب رها شده از سد شهید عباسپور را تنظیم و به کانال گتوند در ساحل غربی و کانال عقیلی در ساحل شرقی هدایت می‌کند. سد انحرافی شهیدا نیز بر روی رودخانه مارون در جنوب شرقی خوزستان قرار دارد و یکی از آبیگرهای آن کانال A می‌باشد که قسمتی از شبکه آبیاری بهبهان را تحت پوشش دارد. در این مقاله از داده‌های اندازه‌گیری دبی عبوری از دریاچه‌های قطاعی کانال اصلی گتوند و کانال A سد شهیدا استفاده گردید.

معادلات انرژی و مومنتم حاکم بر جریان خروجی مستغرق

در جریان خروجی آزاد، عمق پایاب به گونه‌ای است که تأثیری روی دبی خروجی ندارد. حال اگر با ثابت ماندن دبی، عمق پایاب (Y_3) افزایش یابد، پرش هیدرولیکی بوجود آمده به تدریج به سمت بالادست حرکت کرده تا زمانی که شروع پرش به محل کوچکترین عمق جریان (Y_2) برسد. در این حالت هر مقدار افزایش اضافی در Y_3 باعث غرق شدن پرش گشته و لذا عمق جریان بیش از Y_2 خواهد شد و چنانچه بخواهیم شدت جریان ثابت بماند، بایستی مقدار Y_1 افزایش یابد. این حالت را جریان خروجی مستغرق می‌نامند. در جریان خروجی مستغرق، Y_3 بیشتر از عمق ثانویه پرش است که عمق اولیه اش Y_2 می‌باشد. مجموعه افت انرژی که در این حالت بوجود خواهد آمد یکی افت انرژی از مقطع یک تا دو و دیگری افت انرژی از مقطع دو تا سه است که اولی در مقایسه با دومی بسیار ناچیز بوده و قابل صرفنظر کردن می‌باشد. لازم به توضیح است مقدار Y_2 تابع میزان بازشدگی دریاچه (W) و ضریب انقباض آن (C_c) می‌باشد:

$$Y_2 = C_c \times W \quad (13)$$

برای تعیین مقدار C_c ، بایستی پروفیل سطح جریان از دریاچه تا مقطع دو محاسبه گردد که در آن و بلافاصله پس از دریاچه، یک جریان متغیر سریع وجود دارد که مربوط به هیدرودینامیک بوده و هنوز راه حل کاملی برای محاسبه آن ارائه نشده است. در دریاچه

که در آن DH اختلاف ارتفاع سطح آب بالادست و پایین دست دریاچه و A, B, C ضرایب رابطه رگرسیونی می‌باشند. شاهرخ نیا و جوان (۱۳۸۴) با استفاده از داده‌های بویالسکی^۱ (۱۹۸۳) روابط زیر را برای شرایط جریان آزاد به دست آوردند:

$$C_d = -0.27 + 0.08 \left(\frac{\theta}{90} \right)^{-1.49} + 0.66 \left(\frac{Y_1}{W} \right)^{0.1} \quad (10)$$

$$C_d = 0.46 \left(\frac{\theta}{90} \right)^{-0.36} \left(\frac{Y_1}{W} \right)^{0.12} \quad (11)$$

و در شرایط جریان مستغرق فرمول زیر را ارائه داده اند:

$$C_d = 0.62 \left(\frac{\theta}{90} \right)^{-0.06} \left(\frac{Y_1 - Y_3}{Y_3} \right)^{0.37} \quad (12)$$

بیرامی و یوسفیان (۱۳۸۵) دبی عبوری از دریاچه در حالت مستغرق و آزاد را میانگین دبی محاسبه شده از رابطه انرژی بین مقطع بالادست دریاچه و محل حداکثر انقباض (مقطع او ۲) و دبی محاسبه شده از رابطه مومنتم بین دو مقطع فوق در نظر گرفتند. نهایتاً به خاطر فرضیات موجود با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بویالسکی، ضرایب اصلاحی را به دست آوردند که در دبی‌های تئوری به دست آمده ضرب می‌شوند. نامبردگان روش مذکور را تلفیق معادلات انرژی و مومنتم (E-M) نامیدند.

قبادیان و یعقوبی (۱۳۸۷) دو روش تئوری بر مبنای تلفیق معادلات انرژی و اندازه حرکت را با استفاده از داده اندازه‌گیری محققان قبلی، برای تخمین دبی عبوری از دریاچه‌های قطاعی در شرایط استغرق مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در روش اول هر دو معادله انرژی و اندازه حرکت برای مقطع بالادست دریاچه و ناحیه حداکثر انقباض در پشت دریاچه نوشته می‌شود. بدین ترتیب از هر معادله یک مقدار دبی عبوری محاسبه و میانگین آنها پس از ضرب در یک ضریب اصلاحی (به خاطر فرضیات در نظر گرفته شده) به عنوان دبی محاسباتی عبوری از دریاچه در نظر گرفته می‌شود. در روش دوم رابطه انرژی بین مقطع بالادست دریاچه و مقطع جریان در پایاب دریاچه و رابطه اندازه حرکت بین مقطع حداکثر انقباض و پایاب دریاچه نوشته می‌شود. در نهایت نتیجه گیری گردید که روش دوم مناسب تر می‌باشد.

در این تحقیق دو روش تئوری محاسبه دبی عبوری از دریاچه‌های قطاعی در شرایط مستغرق شامل روش تلفیق معادلات انرژی-مومنتم و استفاده مستقیم از معادله انرژی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در ادامه با کاربرد نرم افزار لینگو و روش

جدول ۱- مشخصات دریچه‌های قطاعی و ظرفیت آبگیر

نام آبگیر	ابعاد دریچه (متر) ارتفاع * عرض	تعداد دریچه	شعاع دریچه (متر)	ظرفیت کانال (متر مکعب در ثانیه)
کانال اصلی سد گتوند	۳*۴/۵	۴	۵/۶۳	۹۲/۵
کانال A سد شهدا	۳*۲/۲	۱	۴	۱۰/۷

نتایج و بحث

حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی (E-M)

معادله‌های فوق یک دستگاه دو معادله و دو مجهول را تشکیل می‌دهند که معادله مومنتم جهت برآورد عمق استغراق و معادله انرژی جهت برآورد دبی به کار می‌رود. با حل معادله‌های مذکور و مقایسه عمق استغراق برآورد شده و اندازه گیری بر اساس جدول (۲)، مشخص می‌گردد که در شرایط واقعی، تلاطم و آشفتگی جریان و عدم یکنواختی سرعت در محل حداکثر انقباض جریان (مقطع شماره دو)، باعث افزایش عمق استغراق واقعی نسبت به عمق استغراق محاسباتی می‌شود و با توجه به نادیده گرفتن عوامل فوق در محاسبات مذکور، معادله مومنتم عمق استغراق را همواره کمتر از میزان واقعی برآورد نموده است. لذا در تمامی حالات دبی محاسباتی بیشتر از دبی اندازه گیری می‌باشد.

استفاده منفرد از معادله انرژی (E)

همانگونه که ملاحظه گردید در حالت قبل، شرایط پایاب با استفاده از عمق پایاب در معادله مومنتم منظور شده است و از عمق استغراق برآورد شده از معادله مومنتم در معادله انرژی استفاده گردیده است. اما می‌توان با منظور نمودن مستقیم عمق استغراق اندازه گیری، از معادله انرژی به صورت منفرد جهت برآورد دبی استفاده نمود. در نهایت ملاحظه گردید با استفاده مستقیم از عمق استغراق اندازه گیری و کاهش خطای برآورد، نتایج دبی محاسباتی به دبی اندازه گیری نزدیک تر می‌شوند و میزان خطا کاهش می‌یابد. در این روش خطای محاسباتی دبی می‌تواند ناشی از خطای اندازه گیری عمق استغراق با توجه به تلاطم جریان در مقطع شماره دو و افت انرژی در حد فاصل مقاطع یک تا دو باشد که در معادله انرژی از آن صرفنظر شده است.

کالیبراسیون ضریب فشردگی جریان تاج

اکثر روابط تجربی موجود برای محاسبه ضریب جریان، منطبق بر نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی است که در محدوده خاصی معتبر هستند و خارج از این محدوده، کاربرد آنها با خطای قابل توجهی همراه است. بنابراین تصمیم گرفته شد تا ضرایب a و b در رابطه ضریب فشردگی جریان تاج، با استفاده از داده‌های اندازه گیری صحرایی در کانال غربی سد انحرافی گتوند

قطاعی بر اساس توصیه تاج، Cc از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

برای مقاطع یک و دو می‌توان معادله انرژی را به صورت زیر به کار برد (سامانی، ۱۳۷۶). که در آن q، دبی در واحد عرض کانال می‌باشد:

$$E_1 = E_2 \quad (14)$$

$$Y_1 + \frac{q^2}{2gY_1^2} = Y + \frac{q^2}{2gY_2^2}$$

برای مقاطع دو و سه می‌توان معادله مومنتم (تبادل نیروی مخصوص) را به صورت ذیل به کار برد (سامانی، ۱۳۷۶):

$$M_2 = M_3 \quad (15)$$

$$\frac{q^2}{gY_2} + \frac{Y^2}{2} = \frac{q^2}{gY_3} + \frac{Y_3^2}{2}$$

بایستی توجه داشت که برای استخراج روابط (۱۴) و (۱۵) و در مقطع شماره دو، ارتفاع استاتیک بر اساس عمق استغراق پشت دریچه (Y) محاسبه شده است در حالی که محاسبه ارتفاع معادل سرعت با استفاده از عمق جت ورودی (Y₂) انجام شده است. بدین ترتیب با داشتن W، Y₃، Y₁ و حل معادلات غیر خطی فوق می‌توان مجهولات Y و q را به دست آورد.

اندازه‌گیری‌های انجام شده

در کانال اصلی گتوند، ۱۲ مورد اندازه گیری دبی در حالت‌های تک دریچه، دو دریچه و سه دریچه و برای گشودگی‌های مختلف انجام گردیده است (بی‌نام، ۱۳۸۲). با توجه به جریان مستغرق در کانال اصلی گتوند، علاوه بر ارتفاع آب بالادست و میزان گشودگی، عمق پایاب و استغراق نیز در هر مورد اندازه گیری دبی، ثبت شده است. در کانال A سد شهدا نیز همانند روش فوق، چهار مورد اندازه گیری در گشودگی‌های مختلف تک دریچه قطاعی موجود انجام گردید (بی‌نام، ۱۳۸۲). لازم به توضیح است که اندازه گیری‌های دبی با استفاده از یک مولینه از نوع آمریکایی با خطای اندازه گیری حدود دو تا سه درصد و اندازه گیری عمق با استفاده از یک خط کش (اشل) با درجه بندی سانتی متر انجام شده است.

جدول ۲- داده‌های اندازه‌گیری و محاسباتی - متر و متر مکعب در ثانیه

حل تلفیقی معادله‌های مومنتم و انرژی		حل منفرد معادله انرژی		داده‌های اندازه‌گیری							No.
Q_E	$Q_{(E-M)}$	Y	Q_0	b	Y	Y_3	W	Y_1	intake		
37.70	47.65	3.14	35.25	9.00	3.65	3.75	1.50	4.50		1	
40.63	56.27	2.49	34.69	6.00	3.45	3.75	2.20	4.50		2	
31.88	41.25	2.10	30.52	3.00	3.15	3.75	3.00	4.50		3	
30.23	34.93	2.86	27.16	6.00	3.27	3.63	1.50	4.50		4	
19.51	23.74	1.44	15.48	3.00	2.45	3.30	1.50	4.50		5	
30.07	31.97	1.56	29.75	3.00	2.20	3.24	2.20	4.50		6	
50.82	68.02	3.19	49.36	9.00	3.77	3.93	2.20	4.50	گتوند	7	
53.49	80.30	2.32	45.58	6.00	3.55	3.91	3.00	4.50		8	
15.31	15.49	3.07	15.11	9.00	3.10	3.33	0.45	4.50		9	
11.25	12.09	2.53	11.96	6.00	2.80	2.95	0.45	4.50		10	
6.35	6.84	1.99	6.45	3.00	2.33	2.61	0.45	4.50		11	
80.66	120.28	2.33	71.22	9.00	3.54	3.92	3.00	4.50		12	
2.31	2.50	0.02	1.85	3.00	0.72	0.84	0.2	2.37		13	
7.12	8.61	0.06	6.36	3.00	1.11	1.35	0.72	2.37	شهدا	14	
10.37	12.59	0.81	8.90	3.00	1.42	1.74	1.2	2.37		15	
11.92	16.27	0.97	9.82	3.00	1.70	1.84	1.6	2.37		16	

ب- متوسط مجذور خطای نسبی $(ARE)^2$

در این تابع نیز به دلیل مربع کردن خطا، وزن بزرگتر به خطاهای بزرگتر و وزن کوچکتر به خطاهای کوچکتر تعلق می‌گیرد. لذا در جهت یکسان کردن و متعادل نمودن درصد خطا بین اندازه‌گیریهای مختلف عمل می‌نماید. توجه داشته باشید در این روش مفهوم درصد خطا جایگزین مقدار خطا نسبت به روش قبل گردیده است.

$$\min \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[\frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right]_t^2 \quad (18)$$

لازم به توضیح است علاوه بر استفاده از دو توابع هدف مختلف، کالیبراسیون داده‌ها نیز در دو گزینه انجام گرفته است. در گزینه یک، کل داده‌های اندازه‌گیری (۱۲ مورد) در کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفته است. در گزینه دو، چهار مورد از داده‌ها که حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی در آن بر اساس ضرایب موجود رابطه تاچ فاقد همگرایی بود، حذف گردیده است. لازم به توضیح است که در جریان خروجی مستغرق، Y_3 بیشتر از عمق ثانویه پرش است که عمق اولیه اش Y_2 می‌باشد اما در روش حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی، در چهار مورد از ۱۲ داده اندازه‌گیری کانال اصلی گتوند، شرایط مذکور در نتایج خروجی محاسبات حاکم نگردیده است و عمق استغرق کمتر از میزان گشودگی دریچه به دست آمده است. این در حالی است که بر اساس دبی و عمق استغرق اندازه‌گیری شده در تمامی شرایط جریان مستغرق حاکم بوده است. در موارد مذکور که با ستاره در

و با حل تلفیقی معادلات انرژی و مومنتم و کاربرد ابزار بهینه‌سازی غیرخطی در نسخه هشتم نرم افزار لینگو^۱ بهینه گردند. در ادامه داده‌های اندازه‌گیری در کانال A سد شهدا برای اعتبارسنجی^۲ این رابطه جدید استفاده گردید:

$$C_c = 1 - a \left(\frac{\theta}{90} \right) + b \left(\frac{\theta}{90} \right)^2 \quad (16)$$

در واقع ضرایب a و b متغیرهای تصمیم‌گیری هستند که بایستی با استفاده از برنامه ریزی غیرخطی به نحوی برآورد گردند تا مجموع اختلاف دبی‌های اندازه‌گیری (Q_o) و دبی‌های محاسباتی (Q_c) حاصل از حل تلفیقی معادلات انرژی و مومنتم در مجموع کل داده‌های اندازه‌گیری (n)، بر اساس توابع هدف^۳ زیر حداقل گردند.

الف- مجموع مربع باقیمانده ها^۴ (SSR)

در این تابع به علت مربع کردن خطا، وزن بزرگتر به خطاهای بزرگتر و وزن کوچکتر به خطاهای کوچکتر تعلق می‌گیرد. لذا در جهت یکسان کردن و متعادل نمودن مقدار خطا بین اندازه‌گیری‌های مختلف عمل می‌نماید.

$$\min \sum_{t=1}^n (Q_c - Q_o)_t^2 \quad (17)$$

1. Lingo
2. Validation
3. Objective functions
4. Sum of Squared Residuals

توابع هدف الف و ب، ضرایب کالیبراسیون (متغیرهای تصمیم گیری) به شرح ذیل به دست آمده است:

$$\begin{aligned} \text{الف-} & a=0.709 & \text{ب-} & a=0.759 \\ & b=0.03 & & b=0.146 \end{aligned}$$

در جدول (۳) مقایسه نتایج دبی اندازه گیری با دبی محاسباتی از حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی، قبل و پس از کالیبراسیون و اعتبار سنجی آورده شده است. جهت ارزیابی نتایج و انتخاب ضرایب نهایی، سه معیار اساسی وجود دارد:

الف- میزان تابع هدف (OF)

برای ارزیابی و مقایسه نتایج گزینه های یک و دو به کار می رود و با توجه به تعریف انجام شده برای تابع هدف، هر چه میزان کمتر باشد مناسب تر است اما بایستی توجه داشت این معیار فقط می تواند برای ارزیابی توابع هدف یکسان بین دو گزینه به کار رود. لذا برای انتخاب تابع هدف برتر می توان گزینه های ب و ج را تعریف نمود.

ب- ضریب همبستگی پیرسون (R)

درجه وابستگی داده های محاسباتی و اندازه گیری را نشان می دهد. بدیهی است هر چه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد، این همبستگی بهتر است و می تواند یکی از معیارهای انتخاب تابع هدف برتر باشد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$R = \frac{\sum_{t=1}^n [(Q_o Q_c)_t] - (n \bar{Q}_o \bar{Q}_c)}{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^n (Q_o)_t^2 - n(\bar{Q}_o)^2 \right] \left[\sum_{t=1}^n (Q_c)_t^2 - n(\bar{Q}_c)^2 \right]}}$$

جدول (۳) مشخص گردیده است، حل تلفیقی معادلات انرژی و مومنتم همگرا نمی شود و پس از حل کامل معادلات به یک اختلاف بین دبی فرض شده در معادله مومنتم و دبی برآورد شده از معادله انرژی با کاربرد عمق استغراق معادل دبی فرض شده در معادله مومنتم می رسیم. دامنه نوسانات این اختلاف از ۱/۷ درصد دبی محاسباتی در آخرین اندازه گیری تا ۱۲ درصد دبی محاسباتی در اندازه گیری شماره شش متغیر بوده است. لذا با توجه به درصد اختلاف نسبتاً محدود، میانگین دبی های مذکور در هر یک از این چهار مورد به عنوان نتیجه خروجی محاسبات پذیرفته شده است. در ادامه با بهینه سازی غیر خطی طبق توابع هدف الف و ب، ضرایب کالیبراسیون به شرح ذیل به دست آمده است:

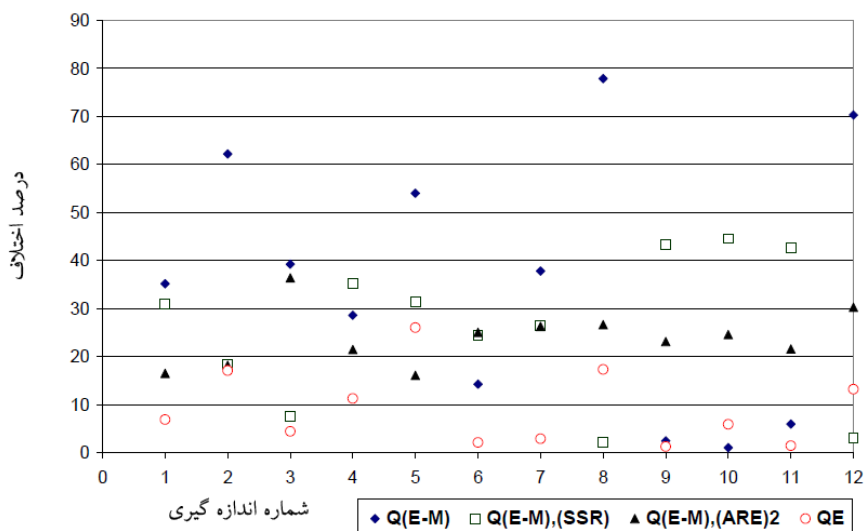
گزینه یک- استفاده از کل داده های اندازه گیری آنگیر گتوند جهت کالیبراسیون (۱۲ مورد)

$$\begin{aligned} \text{الف-} & a=1.996 & \text{ب-} & a=1.158 \\ & b=1.640 & & b=0.498 \end{aligned}$$

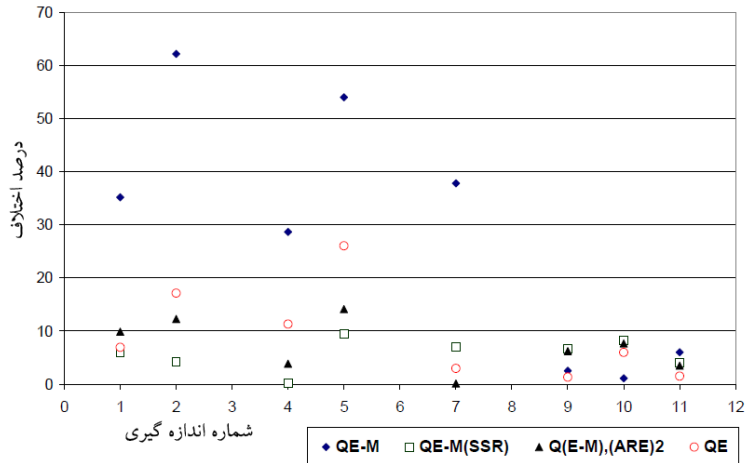
مقایسه دبی های اندازه گیری (Q_o) و محاسباتی حاصل از تلفیق معادله انرژی و مومنتم (E-M) و دبی های کالیبره شده محاسباتی بر اساس توابع هدف مذکور در جدول (۳) و شکل (۳) ارائه گردیده است.

گزینه دو- استفاده از داده های اندازه گیری قابل همگرا در حل تلفیقی معادلات انرژی و مومنتم در آنگیر گتوند (۸ مورد).

بر اساس توضیحات قبلی در بند حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی، اندازه گیری های شماره ۳، ۶، ۸ و ۱۲ که با مشکل عدم همگرایی در حل معادلات انرژی و مومنتم مواجه بودند از محاسبات حذف گردیدند. در ادامه با بهینه سازی غیر خطی طبق



شکل ۳- درصد اختلاف دبی های محاسباتی با دبی اندازه گیری - (گزینه یک)



شکل ۴- درصد اختلاف دبی‌های محاسباتی با دبی اندازه گیری - (گزینه دو)

جدول ۳- مقایسه دبی‌های اندازه گیری و محاسباتی - متر مکعب در ثانیه

گزینه دو		گزینه یک		نوع داده	QE-M	Q _o	No.
QE-M ₂ (ARE)	QE-M(SSR)	QE-M ₂ (ARE)	QE-M(SSR)				
38.73	37.36	29.42	24.34	c	47.65	35.25	1
38.95	36.14	28.37	28.32	c	56.27	34.69	2
----	----	19.41	28.21	C	42.50	30.52	3*
28.21	27.19	21.32	17.61	C	34.94	27.16	4
17.67	16.94	12.98	10.62	C	23.84	15.48	5
----	----	22.28	22.46	C	34.01	29.75	6*
49.30	45.93	36.37	36.30	C	68.03	49.36	7
----	----	33.42	46.54	C	81.09	45.58	8*
14.17	14.10	11.61	8.57	C	15.49	15.11	9
11.04	10.99	9.01	6.63	C	12.09	11.96	10
6.2	6.19	5.06	3.70	C	6.84	6.45	11
----	----	49.64	69.02	C	121.3	71.22	12*
2.21	2.12	1.86	1.48	V	50.2	85.1	13
6.77	6.49	5.60	5.35	V	61.8	36.6	14
10.06	9.27	9.15	9.26	V	59.12	9.8	15
12.19	10.80	10.74	12.68	V	27.16	82.9	16

c: کالیبراسیون، v: اعتبارسنجی، *: در ردیف‌های فوق حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی همگرا نمی شود.

جدول ۴- ارزیابی نتایج و معیارهای انتخاب گزینه نهایی

گزینه دو		گزینه یک		QE-M	معیار ارزیابی	گروه داده
QE-M ₂ (ARE)	QE-M(SSR)	QE-M ₂ (ARE)	QE-M(SSR)			
0.993	0.993	0.990	0.977	0.982	R	
0.14	0.09	0.36	0.45	0.78	MRE	C
37.9	22.5	1098.9	588.0	----	OF	
-	-0.932	-0.853	-0.725	0.984	R	
0.888	0.15	0.12	0.29	0.66	MRE	V
10.26	1.98	1.23	12.19	----	OF	

ج- حداکثر خطای نسبی

حداکثر قدرمطلق نسبت اختلاف بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی را نشان می‌دهد و یکی دیگر از معیارهای انتخاب تابع هدف برتر است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$MRE = \max_{i=1}^n \left| \frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right| \quad (20)$$

در نهایت پس از بررسی جدول (۴) که شامل ارزیابی داده‌های کالیبراسیون (C) و اعتبارسنجی (V) با سه معیار ذکر شده می‌باشد، به این نتیجه دست خواهیم یافت که گزینه دو و تابع هدف الف (SSR) که میزان آن کمتر از مقدار همان تابع هدف در گزینه یک است، بالاترین ضریب همبستگی را دارد و در آن اختلاف تمامی دبی‌های محاسباتی و اندازه‌گیری پس از کالیبراسیون به زیر ۱۰ درصد و پس از اعتبارسنجی به کمتر از ۱۵ درصد کاهش یافته است، به عنوان روش برتر معرفی می‌گردد. لذا ضرایب کالیبراسیون نهایی این تحقیق بدین شرح می‌باشد:

$$a = 0.709 \text{ و } b = 0.03$$

همانگونه که ملاحظه می‌گردد اختلاف ضریب a با ضریب پیشنهادی تاچ اندک است اما ضریب b تغییرات زیادی نموده است و در مجموع تغییرات ضریب Cc پس از کالیبراسیون کاهشی بوده است.

جمع بندی و نتیجه گیری

الف- معادله مومنتم با توجه به نادیده گرفتن تلاطم جریان و شرایط آشفته حاکم بر پرش هیدرولیکی پس از دریچه‌های آبگیر، معمولاً عمق استغراق را کمتر از میزان واقعی برآورد نموده است. لذا حل توأم معادلات مومنتم و انرژی، دبی عبوری از دریچه را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید.
ب- حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی علاوه بر دقت پایین در برآورد عمق استغراق، ممکن است با عدم همگرایی در

حل معادلات مواجه گردد که بیشتر در حالتی که استغراق جریان در شرایط واقعی قابل توجه نمی‌باشد، رخ می‌دهد.

ج- اندازه‌گیری مستقیم عمق استغراق و استفاده مستقیم از معادله انرژی به جای اندازه‌گیری عمق پایاب و حل تلفیقی معادلات انرژی و مومنتم، نتایج مطلوب تری را برای دبی عبوری از دریچه قطاعی ارائه نموده است.

د- با استفاده از یک رابطه همبستگی تجربی بین اختلاف عمق سراب و پایاب و دبی عبوری در واحد عرض واحد گشودگی دریچه، می‌توان تخمین دبی عبوری را به سادگی و با دقت مناسبتر انجام داد.

ن- استفاده از روش تجربی پیشنهادی بند فوق، تهیه جداول و نمودار برای استفاده بهره‌بردار را به سادگی امکان‌پذیر می‌سازد. زیرا با منظور نمودن اختلاف عمق سراب و پایاب به جای منظور نمودن هر یک به صورت مجزا در معادله‌های مورد بررسی، تعداد پارامترهای موثر از سه به دو کاهش می‌یابد.

و- در برخی از مواقع ممکن است با توجه به تلاطم جریان بعد از دریچه، اندازه‌گیری مستقیم عمق استغراق با دقت مناسب میسر نگردد، لذا ناگزیر به استفاده از عمق پایاب می‌باشیم. در این حالت همانگونه که ملاحظه گردید، استفاده از روش تجربی پیشنهادی ارائه شده در این مقاله نتایج بسیار مطلوبتری نسبت به حل تلفیقی معادلات مومنتم و انرژی ارائه خواهد داد.

ه- پس از کالیبراسیون نهایی رابطه Cc پیشنهادی تاچ با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی ملاحظه گردید که ضریب فشردگی جریان به سمت کاهش سوق پیدا نموده است.

ی- بررسی نتایج حاکی از آن است که استفاده از تلفیقی از معادلات مومنتم و انرژی توأم با کالیبراسیون ضریب فشردگی جریان پیشنهادی تاچ با استفاده از برنامه ریزی غیر خطی و تابع هدف حداقل نمودن مجموع مربع باقیمانده (SSR)، بهترین برآورد دبی عبوری از دریچه‌های آبگیر قطاعی در حالت مستغرق را ارائه نموده است. پس از آن استفاده از رابطه تجربی پیشنهادی این تحقیق بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری در جایگاه بعدی قرار دارد.

منابع

۱. بی نام، ۱۳۸۲. طرح بهینه‌سازی سازه‌های اندازه‌گیری حجمی. گزارش کالیبراسیون دریچه‌های آبگیر سد انحرافی گتوند، جلد شانزدهم، سازمان آب و برق خوزستان.
۲. بیرامی، م. ک. و م. یوسفیان. ۱۳۸۵. تخمین دبی جریان در دریچه‌های قطاعی با استفاده از تلفیق روابط انرژی و اندازه حرکت. سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز.
۳. سامانی، ج. ۱۳۷۶. طراحی سازه‌های هیدرولیکی، انتشارات شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۲۹۲ صفحه.
۴. شاهرخ نیا، ع. م. و م. جوان. ۱۳۸۴. برآورد ضریب دبی جریان در دریچه‌های قوسی. مجله هیدرولیک، جلد یک، شماره یک، صفحات ۱۱-۱.

۵. قبادیان، ر. و م. یعقوبی. ۱۳۸۷. مقایسه دو روش تئوری تلفیق معادلات انرژی و اندازه حرکت در تخمین دبی عبوری از دریچه‌های قطاعی در حالت استفراق. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
6. Buyalski, C. P. 1983. Discharge algorithms for canal radial gates. REC-ERC-83-9, Engineering and Research Center, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
7. Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. and J. A. Replogle. 2003. Calibration of submerged radial gates. *Journal Hydraulic Engineering*, 129(9): 680-687.
8. Dent, p. 2004. Submerged radial gate calibration using historical data to improve canal automation performance. ASCE World Water Congress.
9. Rajaratnam, N. and K. Subramanya. 1967. Flow equation for the sluice gates. *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 93 (4): 57-77.
10. Toch, A. 1955. Discharge characteristics of Tainter gates. *ASCE Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 120: 290-300.
11. Tony, L. W. 2004. Issues and problems with calibration of canal gates. World Water and Environmental Resources Congress, Salt Lake City.
12. Anonymous, 1946. Engineering manual for civil works. U. S. Army Corps of Engineers, Part 2, Chapter 5.