

تحلیل آبگذری دریچه‌های کشویی جانبی لبه تیز مستطیلی در رژیم جریان زیر بحرانی بر اساس تئوری جریان متغیر مکانی و رابطه بده دریچه

حمید کیان‌مهر^۱، سعیدرضا خداشناس^{۲*} و محمد رستمی^۳

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ و استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۸

چکیده

دریچه‌های کشویی جانبی به سبب هندسه ساده و قابلیت بهره‌برداری آسان، یکی از متداول‌ترین سازه‌های کاربردی در شبکه‌های آبیاری برای انحراف آب از کانال اصلی و تنظیم میزان بده عبوری برای آبیاری زمین‌های کشاورزی هستند که به رغم اهمیت فراوان آنها در بهره‌برداری و مدیریت منابع آب در شبکه‌های آبیاری، کمتر بررسی شده‌اند. برای تعیین مشخصات جریان دریچه‌های جانبی، تحت شرایط رژیم جریان زیر بحرانی از ۱۰۷ آزمایش تحقیق حاضر به همراه ۵۲۹ آزمایش سایر محققان استفاده شد. با حل رابطه دینامیکی حاکم بر دریچه‌های جانبی با استفاده از روش عددی رانگ کوتای مرتبه چهارم، نیمرخ سطح آب در طول دریچه جانبی محاسبه شد. با مقایسه ضریب بده در دو رویکرد حل رابطه جریان متغیر مکانی و روش مستقیم حل رابطه بده، مشخص شد مقادیر ضریب بده در هر دو رویکرد، تطابق قابل قبولی با هم دارند. با استفاده از تحلیل ابعادی و آماری، به منظور تخمین ضریب بده رابطه‌هایی پیشنهاد شدند و رویکردی برای تشخیص شرایط جریان آزاد یا مستغرق ارائه شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضریب بده دریچه جانبی در شرایط جریان آزاد به نسبت عمق جریان به بازشدگی دریچه و عدد فرود جریان بالادست بستگی دارد و در شرایط مستغرق به نسبت عمق جریان به عمق پایاب کانال آبیگر و نسبت عمق جریان به بازشدگی دریچه بستگی دارد. رابطه پیشنهادی تخمین ضریب بده در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب دارای متوسط خطای نسبی ۲/۹۶ و ۵/۳۳ درصد است و دقت قابل قبول رابطه پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

اندازه‌گیری، سازه کنترل، شبکه آبیاری، ضریب بده، کانال آبیگر

مقدمه

کلیدی شبکه برنامه‌ریزی و بر حسن اجرای برنامه‌های بهره‌برداری از شبکه آبیاری نظارت و مدیریت لازم را اعمال کرد. از جمله این ابزارها، سرریزها و دریچه‌های کشویی هستند که آنها را می‌توان ساده‌ترین و کاربردی‌ترین نوع سازه‌های کنترل و تنظیم سطح جریان در شبکه‌های آبیاری و

برای بهره‌برداری و مدیریت بهینه در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری و کنترل جریان آب و بهره‌برداری درست از آنها اهمیت فراوان دارد تا با به کارگیری این ابزارها، بتوان حجم آب انتقالی و توزیع شده را در نقاط اصلی و

برداشت. تعیین میزان بده عبوری از کانال‌های فرعی اغلب مورد توجه مهندسان هیدرولیک است، زیرا می‌توان با برآورد میزان بده عبوری از کانال فرعی، میزان حقابه کشاورزان را کنترل و برای استفاده بهینه از آب موجود به راحتی برنامه‌ریزی کرد. بدین منظور از دریچه کشویی جانبی به‌عنوان ابزار تنظیم جریان، به‌طور گسترده در کانال‌های آبیاری برای انحراف جریان از کانال اصلی به یک کانال ثانویه (آبگیر) استفاده می‌شود (شکل ۱).

زهکشی دانست؛ این سازه‌ها، نسبت به بسیاری از سازه‌های موجود، هزینه نگهداری و بهره‌برداری کمتری دارند و می‌توان از آنها برای اندازه‌گیری جریان نیز بهره گرفت.

از این رو، با تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سازه‌های سنتی متداول مانند سرریزها و دریچه‌ها، علاوه بر ایجاد شرایط لازم برای طراحی و بهره‌برداری درست از این سازه‌ها، می‌توان گامی مؤثر در جهت استفاده از سازه‌های موجود برای مدیریت بهتر شبکه‌های آبیاری و زهکشی



شکل ۱- نمایی از کاربرد گسترده دریچه کشویی جانبی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی. (الف) شبکه آبیاری و زهکشی شاوور خوزستان، (ب) شبکه آبیاری و زهکشی ساوه مرکزی، (پ) شبکه آبیاری و زهکشی میاندر کرمانشاه، (ت) شبکه آبیاری و زهکشی دالکی بوشهر، (ث) کاربرد دریچه کشویی برای آبیاری مزارع برنج و (ج) شبکه آبیاری در سوئد (Noorköping, Sweden).

Fig. 1- A schematic view of the application of side sluice gates in irrigation and drainage networks; a) Shavour irrigation and drainage network (Khouzestan, Iran); b) Central Saveh irrigation and drainage network; c) Miandar irrigation and drainage network (Kermanshah, Iran); d) Dalaki irrigation and drainage network (Bushehr, Iran); e) Application of sluice gate for irrigation of rice fields; f) Noorköping irrigation network (Sweden)

سطح آب در نزدیکی دریچه و همچنین مقطع کنترل متفاوت خواهد بود. هیدرولیک جریان در دریچه‌های کشویی جانبی، با توجه به اینکه تحت تأثیر شرایط جریان در کانال اصلی و کانال آبگیر است، پیچیدگی‌های زیادی دارد که درک درست این

جریان در امتداد دریچه کشویی جانبی حالتی عمومی از جریان‌های متغیر مکانی با کاهش بده است. در این نوع جریان، مقدار بده در طول کانال اصلی کاهش می‌یابد و با توجه به شرایط جریان در بالادست دریچه (زیر بحرانی یا فوق بحرانی) پروفیل

حال، تعیین بده عبوری از دریچه کشویی با استفاده از این معادلات ساده نیست و نیاز به حل یک معادله ضمنی دارد. اوچها و سابایا (Ojha & Subbaiah, 1997) جریان عبوری از روزنه جانبی با ترکیب‌های مختلف بازشدگی روزنه و ارتفاع تاج روزنه را در آزمایشگاه بررسی کردند. قدسیان (Ghodsian, 2003) با فرض اینکه انرژی مخصوص در طول دریچه جانبی ثابت می‌ماند، ضریب بده را وابسته به y_1/a و Fr_1 برای شرایط جریان آزاد به دست آوردند و عنوان کردند که در حالت جریان مستغرق، نسبت y/a نیز به این پارامترها اضافه می‌شود. حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 2010) با مطالعه مشخصات بده عبوری از روزنه جانبی دایره‌ای لبه تیز در کانال و با استفاده از نتایج داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای رابطه ضریب بده در روزنه جانبی دایره‌ای ارائه دادند. حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 2011) با مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات بده در روزنه جانبی مستطیلی در کانال‌های روباز، به این نتیجه رسیدند که ضریب بده روزنه جانبی مستطیلی وابسته به عدد فرود بالادست و نسبت ابعاد روزنه به عرض کانال اصلی است. عظمت الله و همکاران (Azamathulla *et al.*, 2013) با استفاده از روش جستجوی ژنتیکی، معادله‌ای برای ضریب بده دریچه کشویی جانبی پیشنهاد کردند و ضریب بده را وابسته به عدد فرود تقریبی در کانال اصلی، نسبت عمق بالادست، و بازشدگی دریچه کشویی در نظر گرفتند. اسماعیل‌زاده و همکاران (Esmailzadeh *et al.*, 2014) با بررسی نیمرخ‌های سرعت در سه راستای طولی، عرضی و عمودی در طول دریچه جانبی، نشان دادند که بیشترین مقدار سرعت طولی در نزدیکی ابتدای دریچه جانبی اتفاق می‌افتد و در بالادست دریچه جانبی و در جایی که هیچ جریان جانبی وجود

تأثیرات همواره مورد علاقه مهندسان هیدرولیک بوده است.

سابقه مطالعاتی در خصوص مشخصات جریان عبوری از دریچه‌های کشویی جانبی محدود است. پاندا (Panda, 1981)، با بررسی آزمایشگاهی جریان عبوری از دریچه‌های کشویی جانبی در شرایط جریان آزاد در نسبت‌های مختلف عرض کانال آبرگیر به کانال اصلی، نشان داد که ضریب بده هیچ وابستگی سیستماتیکی به عدد فرود جریان در کانال اصلی و نیز به نسبت عرض کانال آبرگیر به عرض کانال اصلی ندارد و تنها به نسبت عمق میانگین جریان در کانال اصلی در بالاست دریچه کشویی جانبی به بازشدگی (y_1/a) بستگی دارد. تانوار (Tanwar, 1984) تأثیر عدد فرود جریان بر ضریب بده را با گسترش محدوده آن، در شرایط جریان آزاد و مستغرق در پایین دست دریچه جانبی مطالعه کرد و نشان داد که در شرایط جریان آزاد، ضریب بده دریچه کشویی جانبی با افزایش نسبت y_1/a و Fr_1 افزایش می‌یابد، اگرچه اثر پارامتر اخیر کمتر است. در شرایط جریان مستغرق، ضریب بده علاوه بر y_1/a و Fr_1 ، وابستگی شدیدی به y/a دارد (جایی که y_i عمق پایاب کانال فرعی است). رامامورتی و همکاران (Ramamurthy *et al.*, 1986) با مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات جریان در روزنه‌های مستطیلی جانبی در کانال‌های باز، به این نتیجه رسیدند که ضریب بده عبوری از روزنه جانبی تابعی است از طول روزنه، عرض کانال اصلی، و نسبت سرعت متوسط در کانال اصلی به سرعت جت خروجی از روزنه. سوامی و همکاران (Swamee *et al.*, 1993) با استفاده از مفهوم ضریب بده المانی و حل رابطه متغیر مکانی، روابطی برای ضریب بده دریچه کشویی جانبی در حالت جریان آزاد و مستغرق تعیین کردند. با این

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

رویکرد اول (حل رابطه جریان متغیر مکانی)

حل رابطه جریان متغیر مکانی: رابطه دینامیکی حاکم بر هیدرولیک جریان در دریاچه‌های کشویی جانبی در کانال منشوری مستطیلی به صورت زیر است (Chow, 1959).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \frac{Q}{gA^2} \frac{dQ}{dx}}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}} \quad (1)$$

که در آن،

dy/dx = تغییرات سطح آب نسبت به محور طولی؛
 x = فاصله از ابتدای لبه بالایی دریاچه جانبی در امتداد محور طولی کانال اصلی؛ S_0 = شیب کف کانال؛ S_f = شیب اصطکاکی؛ α = ضریب تصحیح انرژی جنبشی؛ Q = بده کانال اصلی؛ g شتاب ثقل؛ A = سطح مقطع جریان؛ T = عرض سطح آزاد آب در کانال اصلی؛ و dQ/dx = تغییرات بده در طول دریاچه جانبی.

رابطه تعیین انرژی مخصوص در کانال اصلی به صورت رابطه ۲ است.

$$E = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن برخی فرضیات ساده کننده در رابطه ۱، از جمله ثابت در نظر گرفتن انرژی مخصوص در طول دریاچه کشویی جانبی که معادل در نظر گرفتن $S_0 - S_f = 0$ یا $S_0 = 0$ و $S_f = 0$ است و قرار دادن ضریب تصحیح انرژی α مساوی یک و با جایگذاری رابطه ۲ در رابطه ۱، رابطه ۳ دیفرانسیل حاکم بر این نوع جریان‌ها به صورت رابطه ۳ به دست می‌آید.

ندارد، سرعت عرضی (سرعت عبوری از دریاچه کشویی جانبی) مقداری است ناچیز و با ورود به دریاچه جانبی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و بیشینه مقدار تقریباً در وسط دریاچه آبگیر اتفاق می‌افتد. سرعت عرضی در نزدیکی کف کانال، نسبت به مقادیر نزدیک سطح آب، مقادیر بیشتری دارد. این محققان اضافه می‌کنند که سرعت عمودی زیاد، در مجاورت دریاچه جانبی نشان دهنده جریان‌ات ثانویه قوی در این ناحیه است. غفاری و همکاران (Ghaffari et al., 2016) با شبیه سازی جریان در اطراف روزنه جانبی مستطیلی با استفاده از نرم افزار فلوتری دی، اثر ارتفاع تاج روزنه جانبی را بر تغییرات مؤلفه‌های مختلف سرعت و سطح آزاد جریان در مجاورت روزنه جانبی در کانال اصلی بررسی کردند.

هدف از تحقیق حاضر تعیین نیمرخ سطح آب، بازشدگی و بده عبوری از دریاچه‌های جانبی لبه تیز مستطیلی در رژیم جریان زیر بحرانی در شرایط جریان آزاد و مستغرق و نیز ارائه رویکردهایی برای تمایز شرایط جریان، اعم از آزاد یا مستغرق، است. برای این منظور، با مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی دو رویکرد حل معادله جریان متغیر مکانی در رژیم جریان زیر بحرانی و روش مستقیم حل معادله بده عبوری از دریاچه‌های جانبی در تعیین مشخصات جریان عبوری از دریاچه‌های جانبی، پرداخته شده است. به منظور واسنجی معادلات پیشنهادی و تعیین پارامترهای موثر بر بده عبوری از دریاچه‌های جانبی، علاوه بر داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی پاندا (Panda, 1981) روی سه دریاچه جانبی با عرض مختلف، تانوار (Tanwar, 1984)، سوامی و همکاران (Swamee et al., 1993) و باشا (Basha, 1998) استفاده شده است.

تحلیل آبگذری دریچه‌های کشویی جانبی لبه تیز...

H_c = عمق جریان نسبت به محور مرکزی بازشدگی
(a/2)

با در نظر گرفتن یک عرض کوچک dx از دریچه جانبی، جریان عبوری از میان نوار باریکی از سطح $a \cdot dx$ برابر است با:

$$\frac{dQ}{dx} = -V dy = -C_d \sqrt{2g(H_c - Y)} dy \rightarrow$$

$$\frac{dQ}{dx} = - \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} C_d \sqrt{2g(H_c - Y)} dy \quad (5)$$

با ساده‌سازی، خواهیم داشت:

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} [y^{3/2} - (y - a)^{3/2}] \quad (6)$$

که در آن،

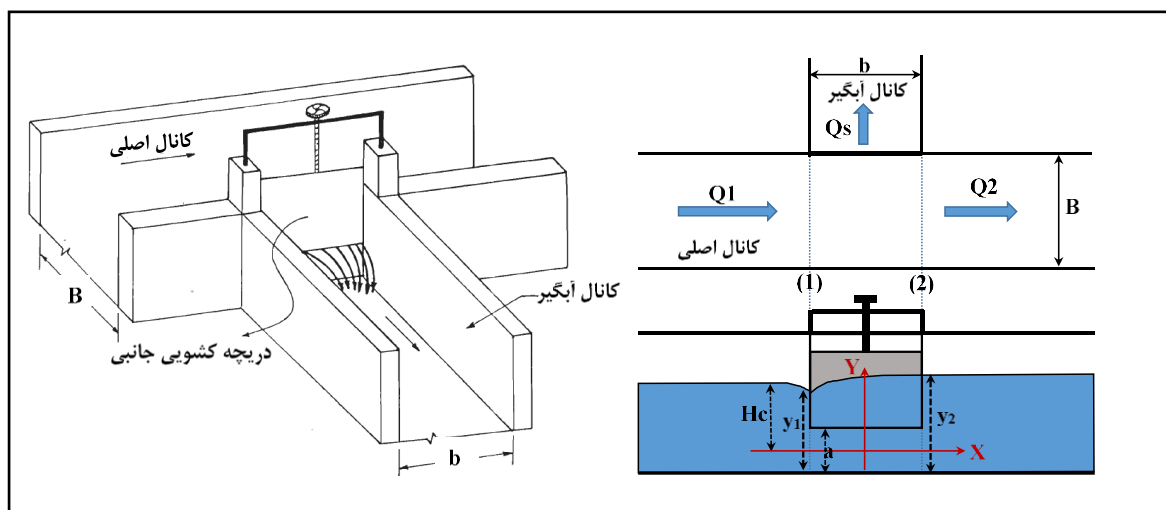
y = عمق آب در امتداد x نسبت به کف کانال اصلی؛
 C_d = ضریب بده؛ و a = بازشدگی دریچه جانبی.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sqrt{2(E - y)}}{B\sqrt{g(3y - 2E)}} \left(-\frac{dQ}{dx}\right) \quad (3)$$

به منظور تعیین میزان تغییرات بده در طول دریچه جانبی، باید فرم رابطه بده مشخص شود. با توجه به تغییرات سرعت در طول دریچه جانبی (تحقیقات اسماعیل‌زاده و همکاران Esmailzadeh et al., 2014) و خصوصاً هنگامی که بار آبی بالادست نسبت به میزان بازشدگی دریچه قابل توجه نباشد، نمی‌توان توزیع سرعت در مقطع بازشدگی دریچه را یکسان فرض کرد. در این حالت، توزیع سرعت در مقطع بازشدگی دریچه از کف دریچه تا لبه بالای بازشدگی دریچه متغیر است. با توجه به شکل ۲، سرعت در هر عمق y نسبت به محور مرکزی بازشدگی عبارت است از (رابطه ۴).

$$V = \sqrt{2g(H_c - y)} \quad (4)$$

که در آن،



شکل ۲- نمایش پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان دریچه کشویی جانبی
Fig. 2- Effective parameters on the flow hydraulic of the side sluice gate

مختلف به ترتیب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4}{3} C_d \frac{\sqrt{E-y} [y^{3/2} - (y-a)^{3/2}]}{B(3y-2E)} \quad (9)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2 a C_d \sqrt{y(E-y)}}{B(3y-2E)} \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2 a C_d \sqrt{(y-a/2)(E-y)}}{B(3y-2E)} \quad (11)$$

رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ دارای حل تحلیلی هستند و برای تعیین نیمرخ سطح آب با رابطه ۹ از حل عددی از روش رانگ کوتای مرتبه چهارم استفاده شد. با انتگرال‌گیری از رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ در بازه $x=0$ تا $x=b$ به ترتیب رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آیند.

$$C_d = \frac{B}{2ab} (\phi_1 - \phi_2) \quad , \phi(y, E) = 3 \sqrt{(E-y)y} + E \sin^{-1} \sqrt{y/E} \quad (12)$$

$$C_d = \frac{B}{2ab} (\phi_1 - \phi_2) \quad , \phi(y, E) = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sqrt{(E-y)(2y-a)} - \frac{(2E-3a)}{4} \sin^{-1} \left(\frac{2E+a-4y}{2E-a} \right) \quad (13)$$

۱۴، بده در مقطع انتهایی دریاچه محاسبه می‌شود و نهایتاً بده عبوری از زیر دریاچه جانبی مطابق رابطه ۱۵ تعیین می‌گردد.

$$Q_2 = B y_2 \sqrt{2g(E_1 - y_2)} \quad (14)$$

در رابطه بالا، y_2 عمق آب در انتهای دریاچه است. با داشتن بده در ابتدا و انتهای دریاچه جانبی و تفاضل آنها بده عبوری از زیر دریاچه جانبی قابل محاسبه خواهد بود.

$$Q_S = Q_1 - Q_2 \quad (15)$$

رابطه ۶، رابطه جامع تخمین بده در ارتباط با ضریب بده دریاچه‌های کشویی جانبی است که برای تمام نسبت‌های هد بالادست به بازشدگی دریاچه کاربرد دارد. سوامی و همکاران (Swamee et al., 1993) و گیل (Gill, 1987) به ترتیب روابط ۷ و ۸ را برای تعیین بده در واحد طول دریاچه‌های کشویی جانبی در نظر گرفتند که در واقع حالت ساده شده رابطه ۶ است.

$$\frac{dQ}{dx} = -C_d a \sqrt{2g y} \quad (7)$$

$$\frac{dQ}{dx} = -C_d a \sqrt{2g y} \quad (8)$$

با جایگذاری روابط ۶، ۷ و ۸ در رابطه ۱، رابطه دیفرانسیل حاکم بر این نوع جریان‌ها در حالت‌های

برای حل عددی نیمرخ سطح آب توسط رابطه ۹ با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهارم، مقطع کنترل در ابتدای دریاچه جانبی در نظر گرفته شده است. در ابتدا، مشخصات دریاچه، بده کانال اصلی و عمق آب در ابتدای دریاچه در رابطه ۹ اعمال می‌شود. پس از آن با فرض ضریب بده اولیه و استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهارم، نیمرخ سطح آب در طول دریاچه جانبی محاسبه می‌گردد و سرانجام به انتهای دریاچه جانبی می‌رسد و عمق پایین دست محاسبه می‌شود. در ادامه، با استفاده از عمق به دست آمده از انتهای دریاچه مطابق رابطه

استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهارم از نرم‌افزار متلب استفاده شد.

رویکرد دوم (حل مستقیم رابطه بده عبوری از دریچه‌های جانبی)

در این رویکرد، با فرض اینکه تغییرات بده عبوری از دریچه کشویی در طول آن ثابت است، می‌توان رابطه‌های تعیین بده عبوری از دریچه‌های جانبی (رابطه‌های ۶، ۷ و ۸) را به ترتیب به صورت روابط ۱۶، ۱۷ و ۱۸ در نظر گرفت:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} \left[y_1^{3/2} - (y_1 - a)^{3/2} \right]$$

$$Q = C_d a b \sqrt{2g y_1}$$

$$Q = C_d a b \sqrt{2g \left(y_1 - \frac{a}{2} \right)}$$

(۱۶) تحقیق حاضر

(۱۷) سوامی و همکاران (Swamee et al., 1993)

(۱۸) گیل (Gill, 1987)

متغیرهای بی‌بعد مؤثر در ضریب بده دریچه جانبی به صورت زیر است:

$$C_d = f\left(\frac{B}{b}, \frac{y_1}{b}, \frac{a}{b}, \frac{y_t}{b}, \frac{\rho V_1 b}{\mu}, \frac{V_1}{\sqrt{gb}}\right) \quad (20)$$

با توجه به اینکه دامنه عدد رینولدز جریان در تمامی آزمایش‌ها در حالت آشفته بود، از اثرهای لزوجت صرف‌نظر شده است. همچنین، طبق نظریه پی‌باکینگهام، رابطه ۲۰ را می‌توان به صورت رابطه ۲۱ بازنویسی کرد.

$$C_d = f\left(\frac{B}{b}, \frac{y_1}{b}, \frac{y_1}{a}, \frac{y_1}{y_t}, Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}\right) \quad (21)$$

در اینجا، با استفاده از متغیرهای بی‌بعد به دست آمده با تحلیل ابعادی، به بررسی نقش هر یک از و

که در آن،

$Q_s =$ بده دریچه جانبی؛ $Q_1 =$ بده کانال اصلی در ابتدای دریچه (که معلوم فرض می‌شود)؛ و $Q_2 =$ بده کانال اصلی در پایین دست دریچه.

اگر بده عبوری از زیر دریچه جانبی محاسبه شده با بده آزمایشگاهی برابر باشد، ضریب بده فرض شده درست است وگرنه با فرض یک ضریب بده جدید مراحل محاسبات تا برابر شدن بده جانبی آزمایشگاهی و محاسباتی برای هر سری از آزمایش‌ها تکرار می‌شود. برای حل عددی پروفیل سطح آب با

تحلیل ابعادی

در این تحقیق، تأثیر متغیرهای مختلف از جمله مشخصه‌های هیدرولیکی (شامل: عمق و سرعت جریان در کانال اصلی و کانال آبگیر) و هندسی (شامل: عرض کانال اصلی، عرض کانال آبگیر و بازشدگی دریچه) به صورت مجزا در به دست آوردن ضریب بده بررسی شده است. بر اساس تحقیق حسین و همکاران (Hussain et al., 2011) و در نظر گرفتن متغیر y_t در شرایط استغراق، متغیرهای مؤثر در ضریب بده دریچه جانبی را در شرایط آزاد و مستغرق می‌توان به صورت رابطه ۱۹ در نظر گرفت:

$$C_d = f(b, a, B, V_1, y_1, y_t, \rho, \mu, g) \quad (19)$$

با استفاده از نظریه پی‌باکینگهام و انتخاب متغیرهای b ، V_1 و ρ به عنوان پارامترهای تکراری،

ارائه رابطه تخمینی مناسب برای ضریب بده پرداخته می‌شود. در تخمین ضریب بده بر اساس متغیرهای بی‌بعد و تحلیل نتایج، از رابطه‌ها و مشخصه‌های آماری مانند شاخص میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) و میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) به صورت زیر استفاده شد.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{C_d(estimated)_i - C_d(observed)_i}{C_d(observed)_i} \right| \quad (22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{100}{N} \sum_{i=1}^N (C_d(estimated)_i - C_d(observed)_i)^2} \quad (23)$$

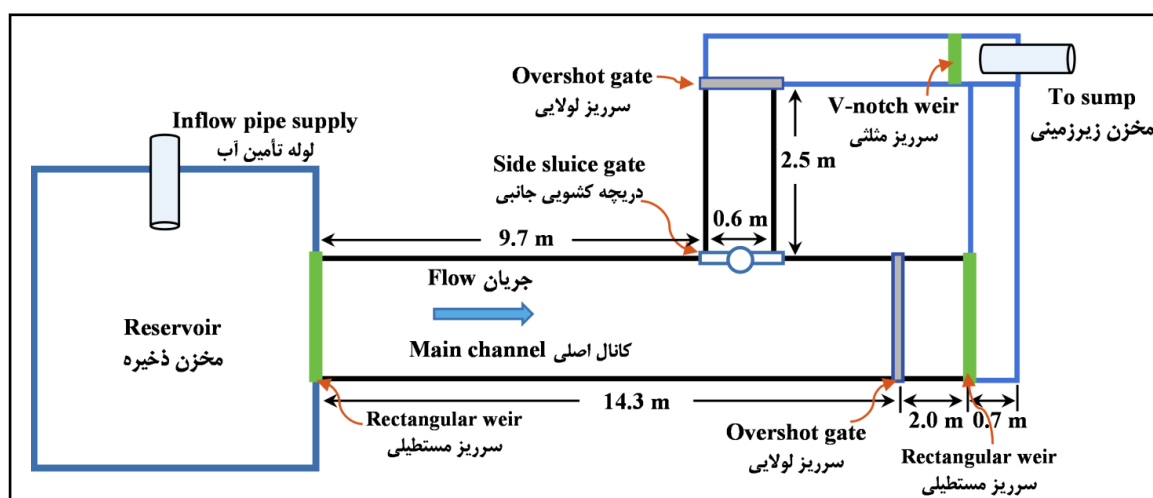
ابتدای کانال اصلی استفاده شد. آب با پمپ و از طریق لوله، از یک مخزن ذخیره زیرزمینی به درون کانال اصلی جریان می‌یافت که میزان جریان ورودی به کمک شیر ابتدایی تعبیه شده روی لوله، کنترل می‌شد. آزمایش‌ها برای جریان زیر بحرانی و ترکیبات مختلف از بده و عمق آب در کانال اصلی و بازشدگی دریچه کشویی جانبی اجرا شده است. در جریان مستغرق، برداشت حالت‌های مختلف استغراق دریچه کشویی جانبی با تغییر عمق آب در پایین دست کانال آنگیر صورت پذیرفت. شمای کلی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

که در آن،

N = تعداد داده‌های آزمایشگاهی؛ i = شماره آزمایش؛ $C_d(observed)$ = ضریب بده آزمایشگاهی؛ و $C_d(estimated)$ = ضریب بده تخمینی توسط رابطه‌های ارائه شده.

تجهیزات آزمایشگاهی

این مطالعه آزمایشگاهی روی مدلی فیزیکی انجام شد که در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کرج در فلومی به عرض ۱/۵ متر، طول ۱۷ متر و عمق ۰/۸ متر ساخته شده است. به منظور آگیری از کانال جانبی به عرض ۰/۶ متر و طول ۲/۵ متر در فاصله هشت متری از



شکل ۳- پلان کلی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق

Fig. 3- General plan of the laboratory equipment used in the study

تحلیل آبگذری دریچه‌های کشویی جانبی لبه تیز...

روی دریچه جانبی انجام شد. همچنین از داده‌های ۵۲۹ آزمایش محققان دیگر نیز استفاده گردید. در شکل ۴، فلوم آزمایشگاهی و دریچه جانبی مورد استفاده در آزمایش‌ها آورده شده است.

در این تحقیق، آزمایش‌ها برای دریچه جانبی با سه بازشدگی مختلف ۲، ۴ و ۷ سانتی‌متر در عرض دریچه ۶۰ سانتی‌متر در دو حالت جریان آزاد و مستغرق اجرا شده‌اند که در مجموع ۱۰۷ آزمایش بر



شکل ۴- فلوم آزمایشگاهی و دریچه جانبی مورد استفاده در این تحقیق
Fig. 4- Experimental flume and the side sluice gate used in the experiments

نیمرخ سطح آب در کانال اصلی با عمق‌سنج با دقت ± 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. عمق‌سنج قابلیت حرکت در جهت طولی و عرضی را داشت. مشخصات و محدوده متغیرهای هیدرولیکی و هندسی آزمایش‌های تحقیق حاضر و سایر محققان در جدول ۱ ارائه شده است.

برای هر دریچه جانبی در هر بازشدگی، علاوه بر تغییر بده کانال اصلی، عمق پایین‌دست نیز با سرریز لولایی پایین‌دست تغییر داده می‌شد. بده ورودی به کانال اصلی با سرریز مستطیلی بالادست آن و بده ورودی به کانال آبگیر با سرریز مثلثی انتهایی آن اندازه‌گیری می‌شد که با فلومتر الکترومغناطیسی کالیبره شده بودند.

جدول ۱- محدوده داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. The range of laboratory data used in this study

b/B	a (m)	y_t (m)	y_1 (m)	Fr_1	Q_s (m ³ /s)	Q_1 (m ³ /s)	شرایط جریان Flow conditions	تحقیق Research
0.6	0.02-0.07	-	0.13-0.57	0.056-0.32	0.011-0.081	0.065-0.154	Free	Present research
0.6	0.02-0.07	0.073-0.53	0.15-0.58	0.055-0.29	0.002-0.065	0.065-0.154	Submerged	Panda (1981)
0.6, 0.83, 1	0.01-0.1	-	0.3-0.75	0.017-0.307	0.005-0.097	0.009-0.129	Free	Tanwar (1984)
1.0	0.02-0.1	-	0.25-0.6	0.06-0.76	0.016-0.097	0.023-0.154	Free	Swamee et al. (1993)
1.0	0.02-0.1	0.076-0.40	0.22-0.54	0.19-0.71	0.008-0.041	0.091-0.154	Submerged	Basha (1998)
1.0	0.01-0.1	-	0.07-0.37	0.105-0.948	0.008-0.072	0.014-0.087	Free	
1.0	0.02-0.07	0.073-0.53	0.13-0.57	0.056-0.319	0.011-0.081	0.065-0.154	Submerged	
0.5	0.01-0.04	-	0.05-0.15	0.099-0.973	0.001-0.004	0.006-0.015	Free	

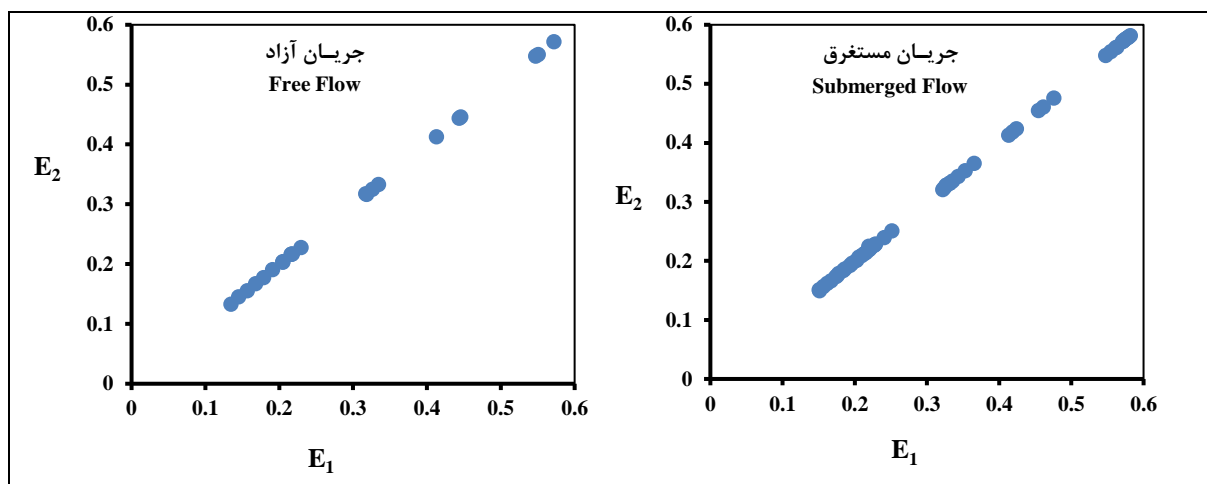
نتایج و بحث

برازشی مختلف با استفاده از متغیرهای بی‌بعد مختلف و لحاظ کردن گام به گام اثر آنها نیز ارائه شده است.

انرژی مخصوص در طول دریچه جانبی

در تعیین معادلات بده عبوری از دریچه جانبی، فرض شده که انرژی مخصوص در امتداد دریچه کشویی جانبی ثابت است. در شکل ۵، مقادیر انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای دریچه جانبی رسم شده است.

به‌منظور تعیین ضریب بده دریچه جانبی، در ابتدا به بررسی تغییرات انرژی مخصوص و نیمرخ طولی در امتداد دریچه جانبی پرداخته می‌شود و پس از آن با انتخاب بهترین رابطه تعیین بده دریچه کشویی جانبی، دو رویکرد حل رابطه جریان متغیر مکانی و روش مستقیم حل رابطه بده، بررسی خواهد شد. در ادامه، ضمن ارائه رویکردهایی برای تمایز شرایط جریان، اعم از آزاد یا مستغرق، به‌منظور تخمین مناسب ضریب بده، معادلات



شکل ۵- بررسی تغییرات انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای دریچه جانبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق

Fig. 5- Comparison of specific energy upstream and downstream of side sluice gate for free and submerged flow conditions

انتهایی به موازات دریچه جانبی اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه محور مرکزی کانال تحت تأثیر لبه دریچه و دیواره کانال نبود و نوسان کمی داشت، به‌عنوان محور اندازه‌گیری در دریچه جانبی انتخاب و در محاسبات لحاظ شد. نوسان‌ها و تغییرات سطح آب در محور لبه دریچه شدیدتر و با افزایش فاصله از دریچه، از تغییرات سطح آب کاسته می‌شد و پروفیل سطح آب انحنای ملایم‌تری پیدا می‌کرد. برای حل عددی پروفیل سطح آب، با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه

میانگین اختلاف مقدار انرژی مخصوص بین ابتدا و انتهای دریچه جانبی به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۳ درصد برای شرایط جریان آزاد و مستغرق به‌دست آمد. بنابراین، فرض انرژی ثابت برای تحلیل جریان درست است که با نتایج تحقیقات دیگر، و از جمله تحقیقات قدسیان (Ghodsian, 2003)، تطابق دارد.

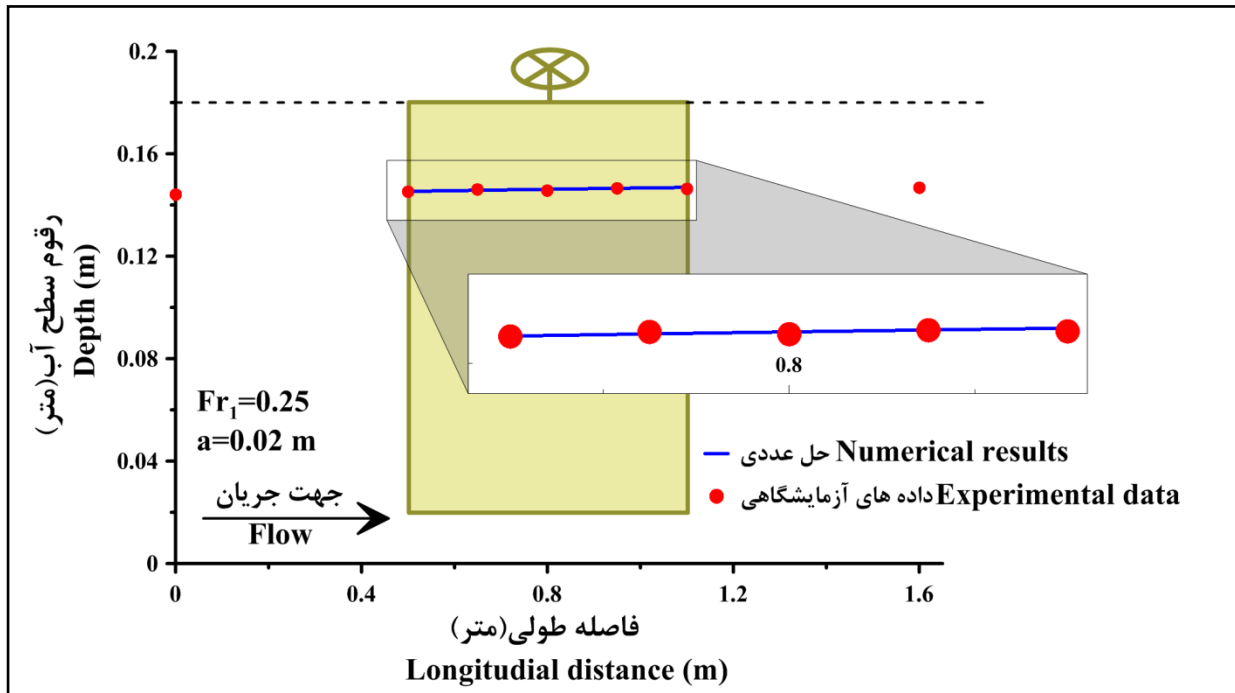
نیمرخ طولی در امتداد دریچه جانبی

نیمرخ سطح آب در کانال اصلی در سه امتداد نزدیک دریچه، محور مرکزی کانال، و محور

تحلیل آبگذری دریچه‌های کشویی جانبی لبه تیز...

بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی وجود دارد و حل عددی به خوبی نیمرخ سطح آب را تخمین زده است.

چهارم و نرم‌افزار متلب استفاده شد. مقایسه نیمرخ‌های آزمایشگاهی و نیمرخ نظیر به دست آمده از حل عددی در شکل ۶، نشان داد که تطابق خوبی



شکل ۶- مقایسه نیمرخ‌های برداشت شده در محور مرکزی کانال و نیمرخ‌های حاصل از حل عددی

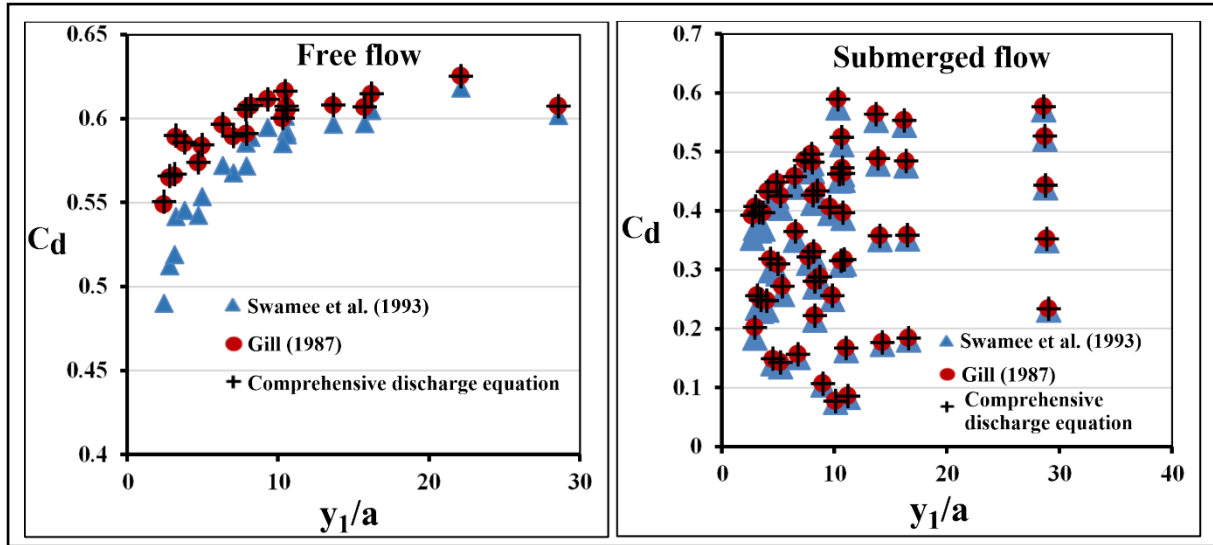
Fig. 6- Comparison of experimental and numerical water surface profile along the side sluice gate

رابطه گیل (Gill, 1987) تطابق قابل قبولی با حل رابطه متغیر مکانی برای رابطه کامل تعیین بده (رابطه ۶) دارد و مقدار متوسط خطای آن به ترتیب برابر ۰/۰۹ و ۰/۰۷ درصد برای شرایط جریان آزاد و مستغرق است.

بنابراین، رابطه گیل (Gill, 1987) با توجه به سادگی و دقت بالای آن، به عنوان رابطه تعیین بده در واحد طول دریچه‌های جانبی قابل استفاده است.

تعیین رابطه بده دریچه جانبی

ضریب بده دریچه جانبی با جایگذاری سه حالت مختلف ارائه شده برای تعیین بده عبوری از دریچه کشویی (رابطه‌های ۶، ۷ و ۸) در رابطه جریان متغیر مکانی با کاهش بده تعیین شد که نتایج آنها در شکل ۷ مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که رابطه سوامی و همکاران (Swamee et al., 1993) ضریب بده را در شرایط جریان آزاد و مستغرق کم برآورد می‌کند، اما ضریب بده حاصل از

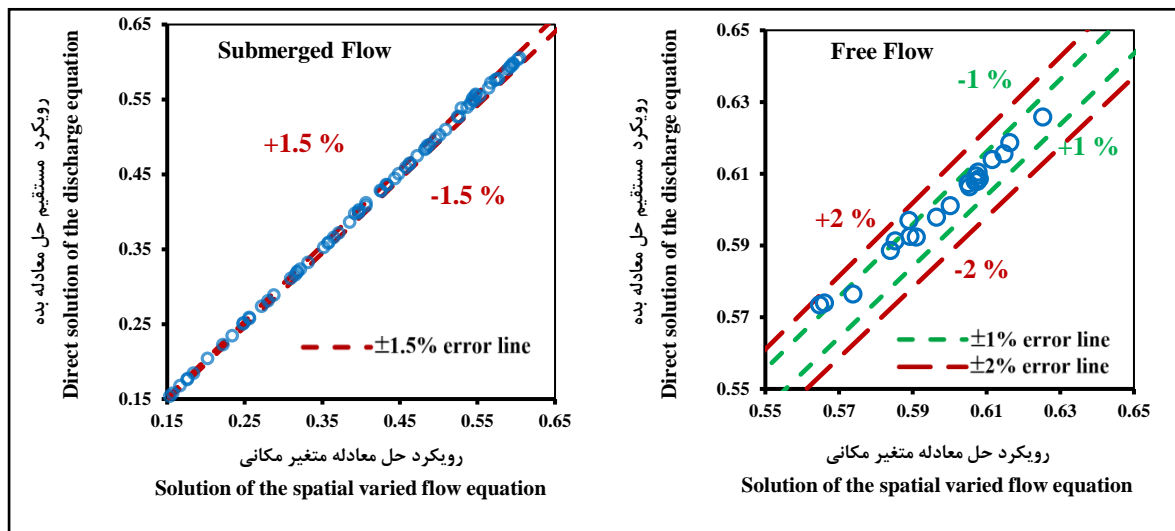


شکل ۷- مقایسه ضریب بده حاصل از حل رابطه متغیر مکانی بر اساس روابط مختلف تعیین بده در واحد طول دریچه جانبی

Fig. 7- Comparison of the discharge coefficient obtained by from the solution of the spatially varied flow equation

رابطه جریان متغیر مکانی (رابطه ۱۳) و روش مستقیم حل رابطه بده (رابطه ۱۸) ارائه شده است.

با انتخاب رابطه گیل (Gill, 1987) به‌عنوان رابطه تعیین بده دریچه جانبی، در شکل ۸، ضریب بده در دو رویکرد حل



شکل ۸- مقایسه مقادیر ضریب بده حاصل از رویکرد رابطه متغیر مکانی و حل مستقیم رابطه بده در شرایط جریان آزاد و مستغرق

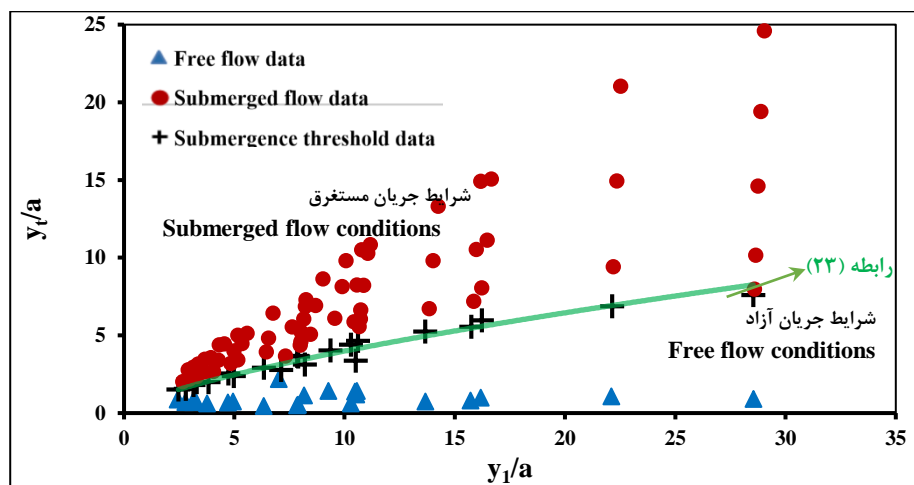
Fig. 8- Comparison of discharge coefficients derived from the spatially varied flow equation and direct solution of the discharge equation in free and submerged flow conditions

نسبی آن به‌ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۴۴ درصد برای شرایط جریان آزاد و مستغرق و ماکزیمم خطای آن ۱/۷ درصد است.

با توجه به شکل ۸، ضریب بده حاصل از روش مستقیم حل رابطه بده، تطابق قابل قبولی با حل رابطه متغیر مکانی دارد و مقدار متوسط خطای

ارایه رویکرد تشخیص شرایط جریان آزاد و مستغرق با برداشت داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان آستانه استغراق، معیار شناخت شرایط جریان آزاد و مستغرق دریچه کشویی جانبی تعیین شد که در شکل ۹ آورده شده است.

بنابراین، به منظور تعیین بده دریچه جانبی، می‌توان از روش حل مستقیم رابطه بده بر اساس عمق ابتدای دریچه جانبی با توجه به سهولت در تعیین بده و پرهیز از محاسبات زیاد، استفاده کرد.



شکل ۹- تعیین معیار شناخت شرایط جریان آزاد و مستغرق

Fig. 9- Definition of the criteria for recognizing free and submerged flow conditions

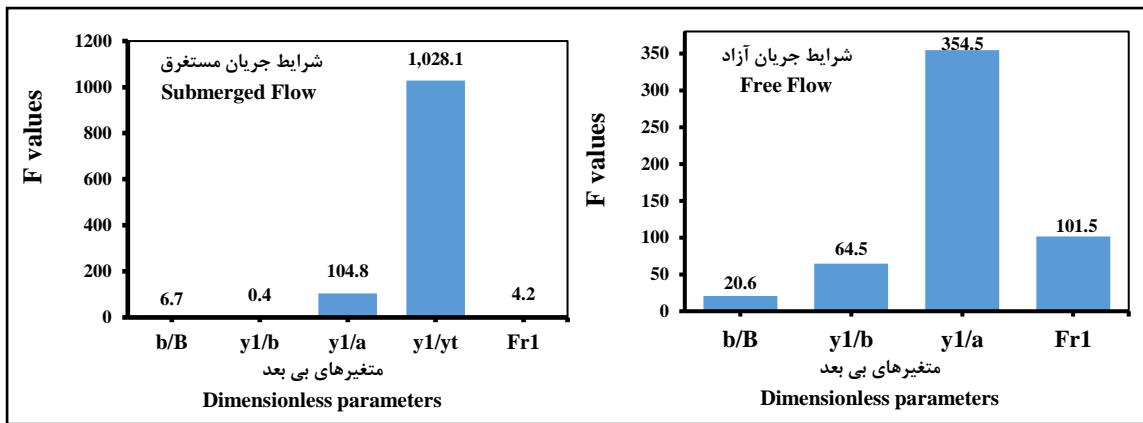
آماره متناظر آن به صورت $F = \frac{\text{واریانس قابل انتظار}}{\text{واریانس غیر قابل انتظار}}$ استفاده شد. با افزایش آماره F متأثر از هر پارامتر مستقل، شدت وابستگی پارامتر وابسته به آن پارامتر مستقل افزایش می‌یابد. شکل ۱۰، مقادیر F تعیین شده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و سایر محققان در شرایط جریان آزاد و مستغرق را نسبت به پارامترهای بی‌بعد مستقل نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۹، رابطه تعیین شرایط جریان آزاد و مستغرق دریچه کشویی جانبی به صورت زیر است:

$$\frac{y_t}{a} = 0.808 \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.694} \quad (24)$$

ضریب بده دریچه جانبی

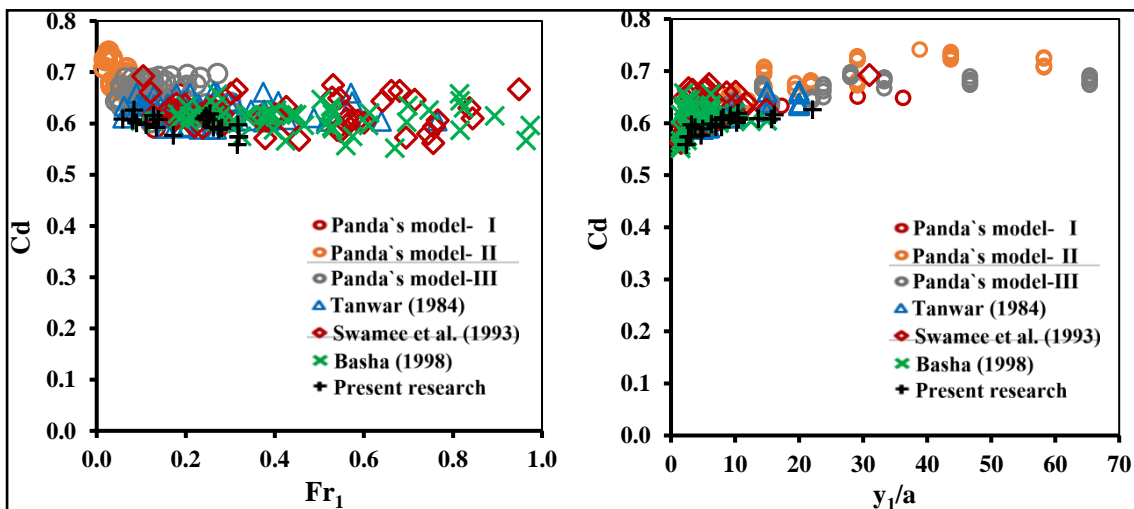
به منظور تعیین مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر ضریب آبگذری دریچه کشویی جانبی، از آزمون F و



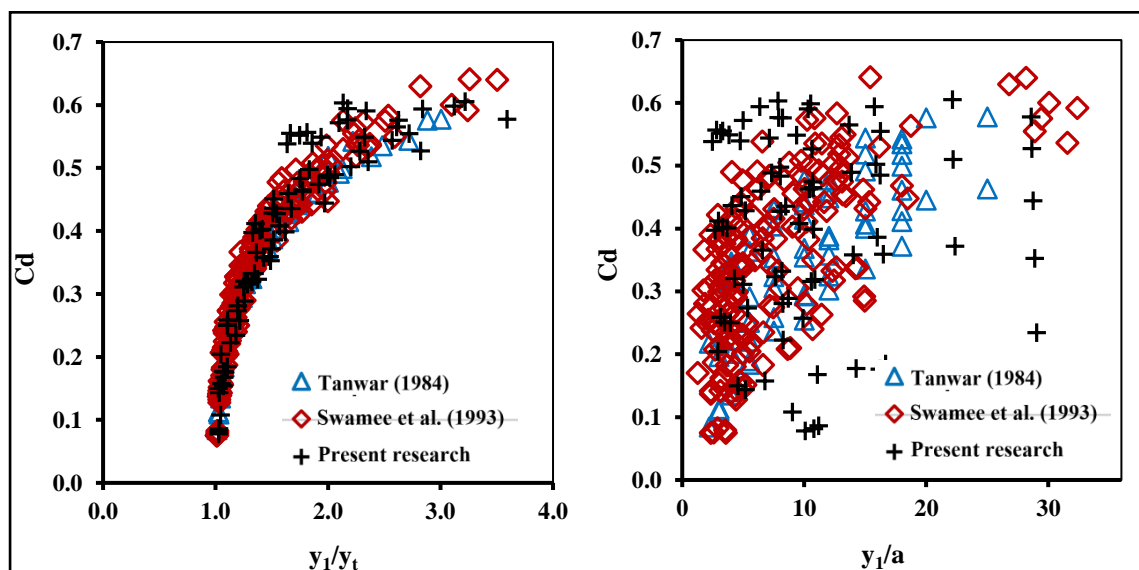
شکل ۱۰- تعیین مهمترین پارامترهای موثر بر ضریب بده دریچه جانبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق با استفاده از آزمون F
 Fig. 10- Determination of the most important parameters affecting the discharge coefficient in free and submerged flow conditions using F-test

آزاد و مستغرق رسم شده است. با توجه به شکل ۱۱، در شرایط جریان آزاد میزان ضریب بده با افزایش نسبت عمق جریان به بازشدگی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش عدد فرود، ضریب بده جریان کاهش می‌یابد؛ دلیل این امر این است که با افزایش عدد فرود و سرعت عبور جریان در کانال اصلی، جریان تمایل کمتری به عبور از دریچه جانبی دارد و بدین ترتیب ضریب بده کاهش می‌یابد. در جریان مستغرق نیز میزان ضریب بده با افزایش نسبت عمق جریان به عمق پایاب کانال آبگیر و نسبت عمق جریان به بازشدگی دریچه، افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۱۰، در شرایط جریان آزاد پارامترهای Fr_1 و y_1/a و در شرایط مستغرق پارامترهای y_1/a و y_1/yt بیش از سایر پارامترها در تعیین صحیح ضریب بده مؤثرند. در محدوده داده‌های آزمایشگاهی بررسی شده $(0.4 \leq \frac{b}{B} \leq 1.0)$ ، مشاهده می‌شود که تغییرات عرض کانال آبگیر به عرض کانال اصلی در ضریب بده جریان عبوری از دریچه‌های کشویی جانبی بی‌تأثیر است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات ضریب بده در مقابل Fr_1 و y_1/a به ترتیب در شرایط جریان



شکل ۱۱- تغییرات ضریب بده در مقابل Fr_1 و y_1/a در شرایط جریان آزاد
 Fig. 11- Variation of C_d with y_1/a and Fr_1 in free flow conditions



شکل ۱۲- تغییرات ضریب بده در مقابل y_1/a و y_1/y_t در شرایط جریان مستغرق
 Fig. 12- Variation of C_d with y_1/a and y_1/y_t in submerged flow conditions

شده است که در نهایت با توجه به مقادیر متوسط درصد خطای مطلق و سادگی معادلات، رابطه پیشنهادی در شرایط آزاد و مستغرق به ترتیب به صورت توانی و چند جمله‌ای در نظر گرفته شد. در جدول ۲، روابط پیشنهادی تعیین ضریب بده دریچه جانبی ارائه شده است.

به منظور تخمین مناسب ضریب بده، معادلات برازشی مختلف با استفاده از نرم افزار برازش منحنی (LAB Fit) برای متغیرهای بی بعد و لحاظ کردن گام به گام اثر آنها ارائه شده است. در محاسبه ضریب بده با معادلات پیشنهادی، چند رابطه غیر خطی نظیر چند جمله‌ای، توانی و ضربی ارائه

جدول ۲- رابطه‌های پیشنهادی تعیین ضریب بده دریچه جانبی

Table 2. Proposed equations for determining the discharge coefficient of side sluice gate

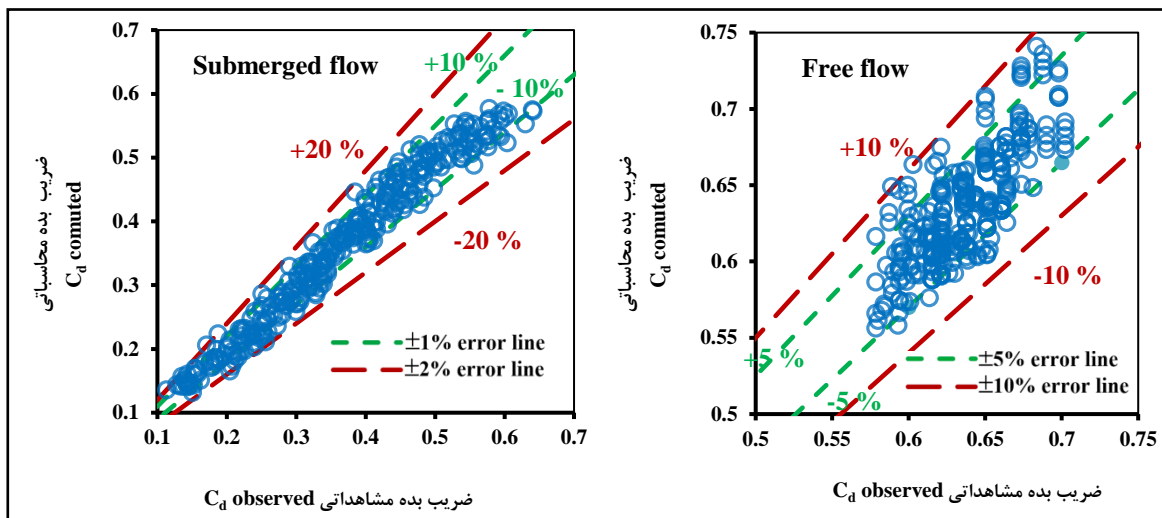
شرایط جریان Flow conditions	رابطه ضریب بده Equations of Discharge coefficient	MAPE	RMSE	Eq.
آزاد Free	$C_d = 0.6353$	4.737	0.037	(25)
	$C_d = 0.59 Fr_1^{-0.043}$	3.360	0.028	(26)
	$C_d = 0.5665 (y_1/a)^{0.0513}$	2.960	0.024	(27)
	$C_d = 0.559(y_1/a)^{0.037} Fr_1^{-0.148} + 0.04 Fr_1$	2.808	0.022	(28)
مستغرق Submerged	$C_d = -0.514(y_1/y_t)^{-(2.635(y_1/a)^{-1}+1.93)} + 0.616$	5.327	0.024	(29)

در جدول ۲، مشاهده می‌شود که با دخالت گام به گام متغیرهای بی بعد مؤثر متوسط درصد خطای معادلات کمتر می‌شود، به طوری که در شرایط جریان آزاد متوسط درصد خطای رابطه کلی (۲۸) با در نظر گرفتن متغیرهای بی بعد y_1/a و Fr_1 برابر

در جدول ۲، مشاهده می‌شود که با دخالت گام به گام متغیرهای بی بعد مؤثر متوسط درصد خطای معادلات کمتر می‌شود، به طوری که در شرایط جریان آزاد متوسط درصد خطای رابطه کلی (۲۸) با در نظر گرفتن متغیرهای بی بعد y_1/a و Fr_1 برابر

به‌عنوان رابطه پیشنهادی تخمین ضریب بده در شرایط جریان آزاد معرفی می‌شود. به‌همین ترتیب رابطه ۲۹ برای شرایط جریان مستغرق معرفی می‌شود. در شکل ۱۳، مقادیر ضریب بده محاسباتی در برابر ضریب بده آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد و مستغرق رسم شده است.

خطای کمتر از ۰/۱۵ درصد را ایجاد می‌کند، می‌توان ضریب بده درچه‌های کشویی جانبی را تنها تابعی از y_1/a دانست؛ در این صورت برای تعیین بده در کانال آبگیر، نیازی به اطلاع از میزان بده جریان در کانال اصلی نخواهد بود و می‌توان تنها با اندازه‌گیری عمق جریان و دانستن میزان بازشدگی درچه جانبی، بده را در کانال آبگیر تعیین کرد. در نتیجه، رابطه ۲۷



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر ضریب بده محاسباتی و آزمایشگاهی برای شرایط جریان آزاد و مستغرق

Fig. 13- Comparison of computed and observed values of discharge coefficient for free and submerged flow conditions

داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و سایر محققان ارائه شده است. با توجه به جدول ۳، رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر در مقایسه با دیگر رابطه‌ها، کمترین خطا را دارد و به‌دلیل داشتن شکل ساده‌تر، می‌تواند با دقت مناسب برای تخمین بده درچه‌های کشویی جانبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق به‌کار رود.

با توجه به شکل ۱۳، در شرایط جریان آزاد درصد بالایی از تخمین‌ها دارای خطایی کمتر از ± 5 درصد و در شرایط جریان مستغرق دارای خطایی کمتر از ± 10 درصد هستند. در جدول ۳، میزان خطای رابطه‌های پیشنهادی تحقیق حاضر و رابطه‌های محققان دیگر برای تعیین ضریب بده در شرایط آزاد و مستغرق بر اساس

جدول ۳- مقایسه رابطه‌های تعیین ضریب بده دریچه کشویی جانبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق

Table 3. Comparison of the equations for determining the discharge coefficient of the side sluice gate in free and submerged flow conditions

شرایط جریان Flow conditions	محقق Research	رابطه ضریب بده Equations of Discharge coefficient	MAPE	RMSE
آزاد Free	Panda (1981)	$C_d = 0.57 Fr_1^{-0.05}$ for $0.06 < Fr_1 < 0.40$	3.74	0.031
	Swamee <i>et al.</i> (1993)	$C_d = 0.611 \left(\frac{y_1/a - 1}{y_1/a + 1} \right)^{0.216}$	10.19	0.073
	Ghodsian (2003)	$C_d = 0.611 \left(\frac{y_1/a - 1}{y_1/a + 1} \right)^{0.216} (1 + 0.558 Fr_1^{0.1526})^{0.46}$	7.28	0.051
	Azamathulla <i>et al.</i> (2013)	$C_d = \frac{\tan^{-1}(\tan^{-1}(\sin(\log(y_1/a))) + Fr_1) - 7.953}{\tan^{-1}(\sin(\cos(\sin(y_1/a)))) + \frac{-7.348}{Fr_1}} + \tan^{-1} \left(\cos \left(\frac{Fr_1}{-8.54/Fr_1 + (y_1/a)^{1/3}} \right) \right)$	7.36	0.057
	Present research	$C_d = 0.5665 (y_1/a)^{0.0513}$	2.96	0.024
مستغرق Submerged	Swamee <i>et al.</i> (1993)	$C_e = 0.611 \left(\frac{y_1/a - 1}{y_1/a + 1} \right)^{0.216} \left\{ 0.24 \left[\frac{2.5y_t(y_t/a)^{0.2} - y_1}{y_1 - y_t} \right]^{0.67} + 1 \right\}^{-1}$	13.90	0.056
	Ghodsian (2003)	$C_e = 0.611 \left(\frac{y_1/a - 1}{y_1/a + 1} \right)^{0.216} \left\{ 0.24 \left[\frac{2.5y_t(y_t/a)^{0.2} - y_1}{y_1 - y_t} \right]^{0.67} + 1 \right\}^{-1} \times (1 + 0.558 Fr_1^{0.1526})^{0.46}$	7.03	0.030
	Present research	$C_d = -0.514(y_1/y_t)^{-(2.635(y_1/a)^{-1}+1.93)} + 0.616$	5.33	0.024

نتیجه‌گیری

عددی پروفیل سطح آب از روش رانگ کوتای مرتبه چهارم و نرم‌افزار متلب استفاده شد. مقایسه نیمرخ‌های آزمایشگاهی و نیمرخ به‌دست آمده از حل رابطه دیفرانسیلی حاکم بر جریان متغیر مکانی، بیانگر تطابق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی است؛ بنابراین، حل عددی به‌خوبی قادر به تخمین نیمرخ سطح آب خواهد بود. با بررسی نتایج حل رابطه متغیر مکانی، رابطه گیل (Gill, 1987) با توجه به سادگی آن نسبت به رابطه کامل تعیین بده

در این تحقیق ضریب بده دریچه‌های کشویی جانبی با مقطع مستطیلی با استفاده از دو رویکرد حل رابطه جریان متغیر مکانی و روش مستقیم حل معادله بده، بررسی شد. برای این منظور از نتایج ۱۰۷ آزمایش این تحقیق به‌همراه ۵۲۹ آزمایش از محققان دیگر استفاده شد. در این مطالعه، محور مرکزی کانال اصلی به‌عنوان محور اندازه‌گیری در دریچه‌های کشویی جانبی معرفی شد. برای حل

تخمین ضریب بده تعیین شد. مشخص شد ضریب بده دریاچه کشویی جانبی در شرایط جریان آزاد به نسبت عمق جریان به بازشدگی دریاچه جانبی و عدد فرود جریان بالادست و در شرایط مستغرق بستگی دارد به نسبت عمق جریان به عمق پایاب کانال آبگیر و نیز بستگی دارد به نسبت عمق جریان به بازشدگی دریاچه جانبی. رابطه پیشنهادی تخمین ضریب بده در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب دارای متوسط خطای ۲/۹۶ و ۵/۳۳ درصد است و نشان‌دهنده دقت قابل قبول رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر در تخمین ضریب بده دریاچه‌های کشویی جانبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق است.

و دقت بالای آن، به‌عنوان رابطه تعیین بده در واحد طول دریاچه‌های جانبی معرفی شد. با بررسی ضریب بده در دو رویکرد حل رابطه جریان متغیر مکانی و روش مستقیم حل رابطه بده، مشخص شد ضریب بده حاصل از روش مستقیم حل معادله بده، تطابق قابل قبولی با حل رابطه متغیر مکانی دارد و می‌توان از روش مستقیم حل رابطه بده بر اساس عمق ابتدای دریاچه جانبی با توجه به سهولت در تعیین بده و پرهیز از محاسبات زیاد استفاده کرد. ضمن ارائه رویکرد تشخیص شرایط جریان اعم از آزاد یا مستغرق، به‌منظور تخمین ضریب بده رابطه‌های برازشی مختلف تحت یک فرایند گام به گام ارائه و مناسب‌ترین رابطه برای

مراجع

- Azamathulla, H. M., Ahmad, Z., & Ghani, A. (2013). *Computation of discharge through side sluice gate using gene-expression programming. Irrigation and Drainage Engineering*, 62, pp. 115-119.
- Basha, S. I. J. (1998). *Analysis of flow through side sluice* (M. Sc. Thesis) Roorkee University. Roorkee. India.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co., New York, NY.
- Esmailzadeh, M., Heidarpour, M., & Eslamian, S. S. (2014). Flow characteristics of a sharp-crested side sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(7), 06014007.
- Ghaffari S., Eghbalzadeh A., & Javan M. (2016). Numerical investigation of effects of rectangular side orifice crest's height on flow characteristics around orifice. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(5), pp. 129-139. (in Persian)
- Ghodsian, M. (2003). Flow through side sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6), pp. 458-463.
- Gill, M. A. (1987). Flow through side slots. *Journal of Environmental Engineering*, 113(5), pp. 1047-1057.
- Hussain, A., Ahmad, Z., & Asawa, G. L. (2010). Discharge characteristics of sharp-crested circular side orifices in open channels. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), pp. 418-424.
- Hussain, A., Ahmad, Z., & Asawa, G. L. (2011). Flow through sharpcrested rectangular side orifices under free flow condition in open channels. *Agricultural Water Management*, 98(10), pp. 1536–1544.

- Ojha, C. S. P., & Subbaiah, D. (1997). Analysis of flow through lateral slot. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), pp. 402-405.
- Panda, S. (1981). Characteristics of side sluice flow (M. Sc. Thesis) Roorkee University, Roorkee, India.
- Ramamurthy, A. S., Udoyara, S. T., & Serraf, S. (1986). Rectangular lateral orifices in open channel. *Journal of Environmental Engineering*, 112(2), pp. 292-300.
- Swamee, P. K., Pathak, S. K., & Sabzeh, A. M. (1993). Analysis of rectangular side sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(6), pp. 1026-1035.
- Tanwar, M. P. S. (1984). Flow through side sluice (M. Sc. Thesis) Roorkee University. Roorkee, Roorkee, India.

Analysis of Sharp-Crested Rectangular Side Sluice Gates in Sub-Critical Flow Regimes, Based on Spatial Variable Flow Theory and Sluice Gate Discharge Equation

H. Kianmehr, S. R. Khodashenas* and M. Rostami

* Corresponding Author: Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir
Received: 7 December 2018, Accepted: 18 May 2019

Extended Abstract

Introduction

A side sluice gate is an underflow and metering diversion device set into the side of a channel with the purpose of allowing part of the liquid to spill through the side. Review of the literature shows that in spite of the importance of the side sluice gate, little attention has been given to studying the behaviour of flow through this device. The available published works on side sluice gates found are those of Panda (1981), Swamee et al. (1993) and Ghodsian (2003). They related the discharge coefficient of the side sluice gate to depth of flow and gate opening. For this purpose, the side sluice gates, since flow control devices, are widely used in the irrigation channels to divert flow from a main channel to a secondary channel. The main purpose of present study was to determine the water surface profile, gate opening, and flow discharge through the sharp-crested rectangular side sluice gates in a subcritical flow regime in free and submerged flow conditions. This study also provides some approaches to differentiate the free or submerged flow conditions. For this purpose, two approaches of solving spatially varied flow equation in a sub-critical flow regime and the direct solution of the discharge equation of the side sluice gates in determining the flow characteristics of the side sluice gates was experimentally investigated.

Methodology

The first approach (Solving the Spatially Varied Flow Equation)

The general differential equation of spatially varied flow along a side sluice gate with decreasing discharge is:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sqrt{2(E-y)}}{B\sqrt{g}(3y-2E)} \left(-\frac{dQ}{dx}\right) \quad (1)$$

To determine the variation of flow discharge during the side sluice gate, the functional relationship for discharge equation must be defined. The velocity at each height V of the gate opening section is obtained as follows:

$$V = \sqrt{2g(H-Y)} \quad (2)$$

Considering the discharge dQ passing through an elementary strip of length dx along the side sluice gate (Fig. 2c), the discharge per unit length of the side sluice gate is given by:

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{2}{3}C_d \sqrt{2g} [y^{3/2} - (y-a)^{3/2}] \quad (3)$$

Swamee et al. (1993) and Gill (1987) considered the following relationships for determining the flow discharge per unit length of side sluice gates, which is the simplified version of Eq. 3.

$$\frac{dQ}{dx} = -C_d a \sqrt{2g y} \quad (\text{Swamee et al. (1993)}) \quad (4)$$

$$\frac{dQ}{dx} = -C_d a \sqrt{2g \left(y - \frac{a}{2}\right)} \quad (\text{Gill (1987)}) \quad (5)$$

By inserting the Eqs. 3, 4, and 5 in Eq. 1, the governing differential equations were obtained in these types of flows in different conditions.

The second approach (direct solution of the side sluice gate discharge equation)

In this approach, assuming that the flow discharge variation along the sluice gate is constant and equal to the upstream water depth y_1 , the equations for determining the flow discharge through the side sluice gate (Eq. 3, 4, and 5) are re-written as follows:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} \left[y_1^{3/2} - (y_1 - a)^{3/2} \right] \quad (\text{Present Research}) \quad (6)$$

$$Q = C_d a b \sqrt{2g y_1} \quad (\text{Swamee et al. (1993)}) \quad (7)$$

$$Q = C_d a b \sqrt{2g \left(y_1 - \frac{a}{2}\right)} \quad (\text{Gill (1987)}) \quad (8)$$

Experimental Setup

The experiments of the present study were carried out on a physical model with a width of 1.5 m, a length of 17 m, and the depth of 0.8 m. In order to intake water, a branch channel with a width of 0.6 m and a length of 2.5 m in a distance of 8 m from the beginning of the main channel was used. In this study, the experiments were performed for a sluice gate with three different openings of 2, 4, and 7 cm with the width of 60 cm in two free and submerged flow conditions.

Results and Discussion

In order to determine the discharge coefficient of the side sluice gate, the first step was to study the variations of the specific energy and water surface profile along the side sluice gate. Then, by choosing the best relationship for determining the flow discharge of the side sluice gate, the two approaches of solving the equation of the spatially varied flow and direct solution of the side sluice gate discharge equation were examined. Further, some approaches are presented to differentiate the free or submerged flow conditions, some fitting equations are given in order to estimate the discharge coefficient using various non-dimensional variables and step-by-step consideration of their effect.

Conclusions

In this study, the central axis of the main channel was introduced as a measuring axis in side sluice gates. Comparison of experimental profiles and those obtained from the solution of the differential equation governing the spatially varied flow indicates the proper agreement between experimental results and numerical solutions. In addition, by examining the results of solving the spatially varied flow equation, Gill (1987)'s equation was selected as the best equation for determining the flow discharge through side sluice gates, due to the simplicity and high precision. By examining the discharge coefficient in two mentioned

approaches, it was found that the discharge coefficient obtained from the direct solution of the discharge equation is well consistent with the solution of the spatially varied flow equation. Next, some approaches are presented to differentiate the free or submerged flow conditions. It was found that the discharge coefficient of the side sluice gate in the free flow conditions depends on the ratio of the flow depth to the side sluice gate opening and upstream Froude number, and in submerged flow conditions depends on ratio of the flow depth to the tail-water depth at branch channel and the ratio of the flow depth to the side sluice gate opening.

Keywords: Discharge Coefficient, Intake Channel, Irrigation Network, Measurement