

تخمین دبی عبوری از دریاچه آویخته در کانال‌های دایره‌ای روباز با وضعیت جریان آزاد

بابک محمودی^{۱*} و جواد فرهودی^۲

چکیده

کاربرد گسترده دریاچه‌های آویخته در زهکش‌ها، خطوط انتقال فاضلاب و آبگیرها از یک طرف و نبود مطالعات کافی در رابطه با خصوصیات و عملکرد آنها در کانال دایره‌ای ضرورت بررسی این ویژگی‌ها را ضروری می‌کند که هدف تحقیق حاضر را، مبنی بر معرفی دریاچه آویخته به عنوان یک سازه‌ی اندازه‌گیری جریان، تشکیل می‌دهد. در این پژوهش با مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات جریان عبوری از دریاچه آویخته دایره‌ای و مربعی در کانال دایره‌ای افقی روباز، معادلاتی برای تخمین دبی جریان توسعه داده شده‌اند. برای واسنجی معادلات از داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده استفاده شده است. برای جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، یک کانال دایره‌ای افقی روباز با دو قطر اسمی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر در آزمایشگاه تحقیقات مرکزی آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران طراحی و احداث و در انتهای آن دریاچه آویخته نصب شد. اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر، نظیر عمق جریان در بالادست دریاچه و درجه بازشدگی دریاچه برای تخمین دبی جریان انجام شد. در این پژوهش از روش‌های تحلیلی محاسبه دبی سرریز و معادله مومنوم برای تخمین دبی جریان عبوری از دریاچه آویخته استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که متوسط خطای نسبی در استفاده از معادلات توسعه یافته برای دریاچه آویخته دایره‌ای بین ۴/۴۱ تا ۵/۶۶ درصد و در دریاچه آویخته مربعی بین ۵/۵۵ تا ۶/۸۴ درصد متغیر است.

واژه‌های کلیدی: دبی جریان، دریاچه آویخته دایره‌ای، دریاچه آویخته مربعی، کانال دایره‌ای، معادله مومنوم.

ارجاع: محمودی ب. و فرهودی ج. ۱۳۹۸. تخمین دبی عبوری از دریاچه آویخته در کانال‌های دایره‌ای روباز با وضعیت جریان آزاد. مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۱۲۷-۱۳۶.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: Babak.Mahmoudiii@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵



شکل ۱- نمایی از دریچه آویخته استاندارد دایره‌ای

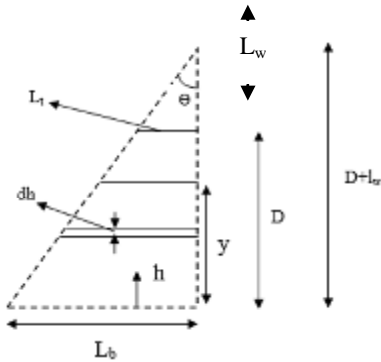
بارووس و علی (۱۹۹۷) تخمین ضریب دبی دریچه آویخته با مقطع دایره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آنان با استفاده از اصل پایستگی مومنتم زاویه‌ای و با در نظر گرفتن مفروضاتی از قبیل خط جریان در بالادست دریچه افقی و توزیع فشار هیدرواستاتیک، ضریب دبی دریچه آویخته را برای وضعیت زیر فشار بودن جریان در بالادست و آزاد بودن جریان در پایین دست دریچه استخراج کردند. بارووس و اموندس (۱۹۸۸) برای به دست آوردن میزان انرژی تلف شده در دریچه آویخته با استفاده از آزمایش‌هایی که در دانشگاه لیورپول انجام داد، برای حالت لوله با جریان کاملاً پر و برای وضعیتی که دریچه در پایین مستغرق باشد، نمودارهایی را ارائه کرد. از این نمودارها فقط زمانی می‌توان استفاده کرد که لوله پر و جریان تحت فشار باشد. گراف (۱۹۹۸) معادله روزنه را برای تخمین دبی عبوری از دریچه آویخته در کانال دایره‌ای معرفی کرد. رمی و هگر (۱۹۹۸) مدلی با جزئیات زیاد از دریچه آویخته در کانال مستطیلی همراه وزنه تعادل را معرفی کردند. همچنین معادله‌ای را برای تخمین نیروی وارده از جریان به دریچه را که تابعی از درجه بازشدگی دریچه بود، پیشنهاد دادند و نتایج به دست آمده خود را با استفاده از معادله مومنتم مورد بررسی قرار دادند. بارت و همکاران (۲۰۰۱) مدلی را برای کنترل خودکار سطح آب در بالادست برای کانال مستطیلی توسعه دادند. آنان با استفاده از این دریچه‌ها در مقیاس کوچک، توزیع فشار روی دریچه را به دست آوردند و توانستند نیروی وارده به دریچه را با استفاده از یک معادله خطی که تابع درجه باز شدگی دریچه باشد، تعیین کنند. رپلوگل (۲۰۰۳) روی دریچه آویخته با مقطع دایره‌ای که در انتهای زهکش‌ها نصب شده تحقیقات خود را انجام داد و به این نتیجه رسید زمانی که وزن دریچه کم و سرعت جریان زیاد باشد، افت انرژی ایجاد شده توسط دریچه، به صفر میل می‌کند

مقدمه

کانال دایره‌ای به عنوان پرکاربردترین و در دسترس‌ترین مقطع پیش‌ساخته، کاربرد گسترده‌ای در زهکش‌ها، خطوط انتقال فاضلاب و آبگیرها دارد. از سوی دیگر، این سازه از نظر اقتصادی بسیار مناسب و بدون نیاز به هزینه زیاد یا فناوری پیچیده و خاص قابل ساخت است و به سادگی مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرد. از مزایای دریچه آویخته علاوه بر هزینه کم ساخت و نصب، می‌توان به مناسب بودن آن برای نصب دائمی و غیردائمی، قابلیت انتقال رسوب بالادست، خودکار بودن دریچه، تسهیل در اندازه‌گیری از راه دور و هزینه پایین تعمیر و نگهداری اشاره کرد. با توجه به محدود بودن مطالعات انجام شده در این زمینه، تصمیم گرفته شد که برای معرفی دریچه آویخته، به عنوان یک سازه اندازه‌گیری دبی جریان، مشخصات هیدرولیکی دریچه آویخته مطالعه شود تا با توسعه معادلاتی بتوان از این نوع دریچه برای تخمین دبی در شبکه‌های آبیاری استفاده کرد؛ بنابراین، یکی از اهداف تحقیق حاضر به دست آوردن معادلاتی برای تخمین دبی با حداقل خطای نسبی است. با توجه به کاربرد این سازه در انتهای زهکش‌ها و فاضلاب‌روها، تصمیم گرفته شد که دریچه آویخته در انتهای کانال دایره‌ای نصب و آزمایش شود. از لحاظ هیدرولیکی، می‌توان معادلات حاکم بر دبی این سازه را توسعه داد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی آنها را واسنجی کرد و مورد استفاده قرار داد. دریچه آویخته متشکل از یک ورقه نسبتاً نازک فلزی است که با یک مفصل به نقطه‌ای لولا می‌گردد. دریچه می‌تواند حول محور لولا تحت تأثیر گشتاورهای وارده از طرف جریان، باز و بسته شود. با اضافه یا کم کردن وزنه‌های تعادل در روی بدنه دریچه می‌توان میزان باز و بسته شدن دریچه را کنترل کرد. در وضعیت جریان آزاد، وزنه تعادل موجود روی صفحه دریچه با نیروی وارده از طرف آب به سازه خنثی می‌شود و با افزایش سطح آب در پشت دریچه، نیروی وارده به دریچه افزایش یافته و گشتاور وارده به محور لولا دریچه، باعث باز شدن دریچه می‌شود. از کاربردهای دریچه آویخته می‌توان به تنظیم سطح آب بالادست و اندازه‌گیری جریان اشاره کرد. در شکل ۱ نمونه‌ای از دریچه آویخته استاندارد تولید شده نشان داده شده است.

برای این کار لازم است ابتدا با توجه به شکل ۲، پارامترهایی را تعریف کرد. تابع $T(h)$ به صورت تابعی از h را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$T(h) = L_b + \frac{h}{D}(L_t - L_b) \quad (۳)$$



شکل ۲- نمایی از شیوه تقریب جریان خروجی از کناره‌های دریاچه آویخته

L_b و L_t به صورت زیر تعریف خواهند شد:

$$L_b = (D + L_w) \tan(q) \quad (۴)$$

$$L_t = (D + L_w) \tan(q) \quad (۵)$$

بنابراین می‌توان معادله (۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Q_b = (D + L_w) \tan(q) \times D \sqrt{2gy} \quad (۶)$$

که در آن L_b عبارت از بازشدگی دریاچه در کف جریان، L_t باز شدگی دریاچه در بالای جریان، L_w بازوی دریاچه تا محل لولا و y عمق جریان است.

با فرض دوزنقه بودن مقطع عبوری جریان از کناره‌های دریاچه، بخش دبی عبوری از کنار دریاچه را می‌توان با استفاده از معادله سرریز، به صورت زیر برآورد کرد:

$$Q_s = \int_0^y \left[L_b + \frac{h}{D}(L_t - L_b) \right] \sqrt{2gh} dh \quad (۷)$$

با انتگرال‌گیری معادله (۷) و ترکیب آن با معادلات (۱) و (۲)، دبی کل عبوری از دریاچه آویخته به صورت معادله زیر قابل محاسبه است:

$$Q_t = Cd_1 \left[\begin{array}{l} (D + L_w) \tan(q) \times D \sqrt{2gy} \\ + 2 \left[\frac{2}{3} (D + L_w) \tan(q) \sqrt{2g} y^{\frac{3}{2}} \right. \\ \left. - \frac{2}{5} \tan(q) \sqrt{2g} y^{\frac{5}{2}} \right] \end{array} \right] \quad (۸)$$

که در آن Cd_1 برابر ضریب دبی جریان است.

و زمانی که وزن دریاچه بیشتر و سرعت جریان کمتر باشد، میزان افت انرژی بیشتر می‌شود. پژوهش‌های انجام شده حاکی از این است که افت انرژی در دریاچه آویخته نسبت به دیگر سازه‌های هیدرولیکی، که کاربرد یکسانی با این سازه دارند، کمتر است. لیتریکو و همکاران (۲۰۰۵) تخمین ضریب دبی دریاچه آویخته با مقطع مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از روش تعادل لنگرهای وارد شده به لولای دریاچه، معادله‌ای را برای تخمین دبی جریان در حالت رژیم جریان آزاد پیشنهاد دادند. هدف از این توسعه معادلات رگرسیونی برای تخمین دبی عبوری از دریاچه آویخته دایره‌ای و مربعی در کانال با مقطع دایره‌ای و برای وضعیت جریان آزاد است.

مواد و روش‌ها

روش اصول محاسبه دبی سرریز: دبی جریان عبوری از دریاچه آویخته به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش جریان عبور یافته از زیر دریاچه و دو بخش متقارن جریان عبور یافته از کناره‌های دریاچه. در استفاده از روش اصول محاسبه دبی سرریز فرض می‌شود که جریان عبوری از زیر دریاچه تشکیل یک مقطع مستطیلی و جریان عبوری از کناره‌ها تشکیل یک مقطع دوزنقه‌ای می‌دهند. همچنین فرض شده است که پروفیل جریان در بالادست دریاچه به صورت افقی است و ضریب دبی جریان عبوری از زیر دریاچه و از کناره‌ها با هم برابر باشد. با این ملاحظات، می‌توان دبی کل خروجی از دریاچه را به صورت زیر تعریف کرد:

$$Q_t = Q_b + 2Q_s \quad (۱)$$

که در آن Q_t برابر دبی کل، Q_b برابر دبی عبوری از زیر دریاچه و Q_s برابر دبی عبوری از بخش‌های کناری دریاچه است. بخش دبی عبوری از زیر دریاچه را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$Q_b = L_b \times D \sqrt{2gy} \quad (۲)$$

که در آن L_b عبارت از بازشدگی افقی دریاچه، D قطر کانال، y عمق جریان در بالادست دریاچه و g شتاب گرانش زمینی است. اگر هندسه جریان خروجی از کناره‌های دریاچه را مشابه شکل ۲ در نظر بگیریم، می‌توان با استفاده از اصول محاسبه دبی سرریز، دبی عبوری از کناره‌های دریاچه را تخمین زد.

$$X = F + V^* \cdot \frac{\cos(q)}{\sin(q)} \quad (13)$$

$$Y = \left[\frac{1}{A_2 \cdot \sin(q)} - \frac{1}{A_1} \right] \quad (14)$$

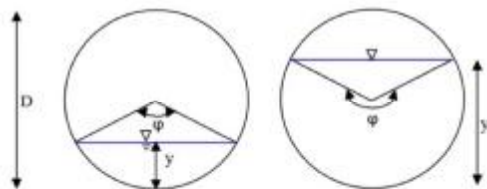
با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک، مقدار نیروی F براساس معادله زیر قابل محاسبه است:

$$F = rg \cdot h_c \cdot A_1 \quad (15)$$

که در آن h_c عبارت از فاصله مرکز ثقل سطح مقطع جریان از سطح جریان است. برای به دست آوردن مقادیر h_c می‌توان از معادله زیر استفاده کرد:

$$h_c = \frac{3 \cdot \sin\left(\frac{j}{2}\right) - \sin^3\left(\frac{j}{2}\right) - 3\left(\frac{j}{2}\right) \cos\left(\frac{j}{2}\right) \left(\frac{j}{2}\right) \times \frac{D^3}{24}}{A_1} \quad (16)$$

که در آن f زاویه مرکزی مقطع جریان (شکل ۴) است.

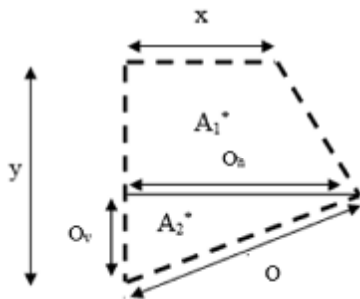


شکل ۴ - نمایی از مقطع دایره‌ای

برای تعیین نیروی وزن حجم کنترل از معادله زیر استفاده شده است:

$$V^* = A^* \cdot D \cdot g \quad (17)$$

که در آن D برابر با قطر کانال و A^* برابر سطح جانبی حجم کنترل، مطابق شکل ۵ است.

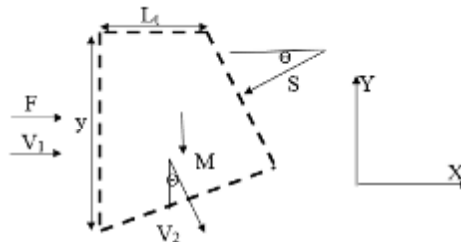


شکل ۵ - نمایی از سطح جانبی حجم کنترل

برای محاسبه A^* ، می‌توان سطح مقطع را به دو بخش A_1^* و A_2^* تقسیم کرد و مقادیر آنها را به قرار زیر به دست آورد:

$$A^* = A_1^* + A_2^* \quad (18)$$

روش استفاده از معادله مومنتوم: در این روش توزیع فشار در بالادست هیدرواستاتیک فرض شد و افت انرژی در محاسبات صفر در نظر گرفته شده و حجم کنترل به صورت شکل ۳ ساده‌سازی شده است.



شکل ۳ - نمایی از حجم کنترل تعریف شده برای استفاده در روش معادله مومنتوم

معادلات مومنتوم در جهت‌های X و Y به قرار زیر خواهند بود:

$$\sum F_x = rQ\Delta V \quad (9)$$

$$F - S \cdot \cos(q) = rQ(V_2 \cdot \sin(q) - V_1)$$

$$\sum F_y = rQ\Delta V \quad (10)$$

$$-S \cdot \sin(q) = rQ(-V_2 \cdot \cos(q))$$

در معادلات بالا، F عبارت از نیروی فشار هیدرواستاتیک وارده از بالادست به حجم کنترل، S نیروی واکنش دریچه در مقابل نیروی وارده از جریان آب، θ درجه بازشدگی دریچه، ρ چگالی جرمی آب، Q دبی جریان، V_1 و V_2 به ترتیب سرعت جریان ورودی به حجم کنترل و خروجی از حجم کنترل است. از ترکیب معادلات (۹) و (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت:

$$F - rQV_2 \cdot \frac{\cos^2(q)}{\sin(q)} + V^* \cdot \frac{\cos(q)}{\sin(q)} \quad (11)$$

$$= rQ(V_2 \cdot \sin(q) - V_1)$$

که در آن V^* برابر نیروی وزن حجم کنترل است. با ساده کردن معادله (۱۱) خواهیم داشت:

$$F + V^* \cdot \frac{\cos(q)}{\sin(q)} \quad (12)$$

$$= rQ^2 \left[\frac{1}{A_2 \cdot \sin(q)} - \frac{1}{A_1} \right]$$

که در آن A_1 و A_2 به ترتیب برابر با سطح مقطع جریان در بالادست دریچه و مقطع جریان عبوری از دریچه است. پارامترهای کمکی X و Y را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

دینامیکی مؤثر بر جریان آزاد دریچه آویخته، معادله تابعی زیر را می‌توان تعریف کرد:

$$F(Q, q, y, w, L_w, D, D_G, g, r, m, S) = 0 \quad (30)$$

که در آن Q عبارت از دبی جریان، θ زاویه بازشدگی دریچه، y عمق بالادست دریچه، w وزن دریچه، L_w بازوی دریچه، D قطر کانال دایره‌ای، D_G قطر دریچه دایره‌ای و یا ضلع دریچه مربعی، g شتاب ثقل، ρ چگالی جرمی آب، μ گرانروی دینامیکی آب و σ کشش سطحی آب است. با استفاده از روش Π -باکینگهام، می‌توان پارامترهای بدون بعد زیر را برقرار کرد:

$$F\left(\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} = C_d, \frac{w}{rgD^3} = w^*, \right. \quad (31)$$

$$\left. q, \frac{D_G}{D}, \frac{y}{D}, \frac{L_w}{D}, R_e, W_e\right) = 0$$

که در آن Re و We به ترتیب عدد رینولدز و عدد وبر هستند. با توجه به متلاطم بودن جریان در طول آزمایش‌ها ($Re > 6224/2$) و نیز برقراری عمق کافی جریان در کانال و ناچیز بودن کشش سطحی می‌توان از تأثیر عدد رینولدز و عدد وبر صرف‌نظر کرد و معادله (۳۱) به صورت زیر خلاصه کرد:

$$F\left(C_d, w^*, q, \frac{D_G}{D}, \frac{y}{D}, \frac{L_w}{D}\right) = 0 \quad (32)$$

برای تعیین ضریب دبی دریچه آویخته دایره‌ای و مربعی از روش‌های ذکر شده، بایستی مؤثرترین پارامترها روی ضریب دبی را شناسایی کرد. با ترسیم داده‌های مربوط به پارامترهای بدون بعد تعریف شده در معادله (۳۱) برحسب ضریب دبی معلوم شد که پارامترهای L_w/D و D_G/D تأثیر ثابتی روی ضریب دبی دارند. با توجه به این واقعیت و در نتیجه برای تخمین ضریب دبی در روش محاسبه دبی سرریزها، معادلات زیر برای دریچه آویخته دایره‌ای و دریچه آویخته مربعی به ترتیب معادلات (۳۳) و (۳۴) پیشنهاد شد:

$$Cd_1 = a_1 \times w_*^{b_1 \left(\frac{q \cdot y}{D}\right)^{g_1}} + h_1 \quad (33)$$

$$Cd_1 = a_2 \times w_*^{b_2 \left(\frac{y}{D \cdot q}\right)^{g_2}} + h_2 \quad (34)$$

$$Cd_2 = a_3 \cdot w_*^{b_3 + g_3 \cdot \ln\left(q \cdot \frac{y}{D}\right)} + h_3 \quad (35)$$

$$A_1^* = \left[\frac{x + O_h}{2} \right] \times (y - O_v) \quad (19)$$

$$A_2^* = \frac{1}{2} \cdot O_h \cdot O_v \quad (20)$$

در معادلات بالا O_h برابر با بازشدگی افقی دریچه، O_v بازشدگی قائم دریچه، y عمق جریان در بالادست دریچه و x طول ضلعی از حجم کنترل است که در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر O_h و O_v به قرار زیر تعیین می‌شوند:

$$O_h = (l_w + D_G) \cdot \sin(q) \quad (21)$$

$$O_v = (l_w + D_G) [1 - \cos(q)] \quad (22)$$

که در این معادلات l_w برابر با طول بازوی دریچه از محل لولا و D_G قطر دریچه دایره‌ای یا طول دریچه مربعی است.

$$x = O_h - y \cdot \tan(q) \quad (23)$$

سطح مقطع جریان عبوری از دریچه برابر با مجموع دو بخش سطح مقطع جانبی و سطح مقطع کف دریچه است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_2 = A_{side} + A_{bottom} \quad (24)$$

همچنین سطح مقطع جریان عبوری از کناره‌های دریچه و زیر دریچه براساس معادلات زیر تعیین می‌شود:

$$A_{side} = 2A^* \quad (25)$$

$$A_{bottom} = O \cdot D \quad (26)$$

که در آن O برابر با بازشدگی کل دریچه بوده و براساس معادله زیر به دست می‌آید:

$$O = \sqrt{O_v^2 + O_h^2} \quad (27)$$

در نهایت، با استفاده از معادله مومنتم، می‌توان معادله نظری زیر را برای تخمین دبی جریان برقرار کرد:

$$Q_{cal} = \sqrt{\frac{x}{r \cdot y}} \quad (28)$$

بنابراین، دبی واقعی برابر با حاصل ضرب ضریب دبی جریان (C_{d2}) در دبی محاسباتی خواهد بود:

$$Q_{exp} = C_{d2} \cdot Q_{cal} \quad (29)$$

که در آن Q_{exp} برابر با دبی آزمایشگاهی و Q_{cal} دبی محاسبه شده بر اساس معادله (۲۸) است.

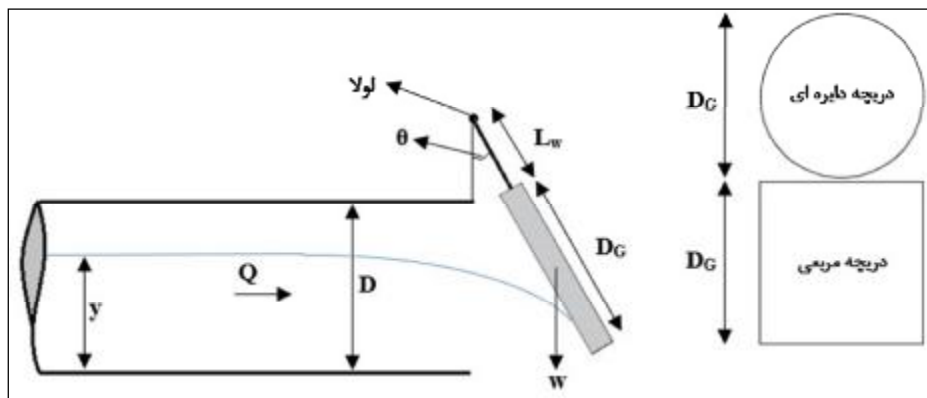
آنالیز ابعادی: مشخصات ظاهری دریچه آویخته و شیوه نصب آن در انتهای کانال در شکل ۶ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر هندسی، سینماتیکی و

پنج دریچه به وزن‌های مختلف برای هر قطری از دریچه آویخته دایره‌ای و پنج وزن در هر قطر برای دریچه آویخته مربعی استفاده شد. برای این منظور، دریچه‌ها از ورقه آهنی با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر برش داده شدند. برای افزایش وزن دریچه، ورقه‌های برش داده شده به هم چسبانده شد تا دریچه‌ای کاملاً همگن و با وزن بیشتر حاصل شود. برای آویختن دریچه در انتهای کانال، از یک لولا استفاده شد. برای تعیین جریان عبوری از دریچه آویخته، وزن دریچه، دبی جریان، شکل دریچه و قطر کانال به‌عنوان پارامترهای متغیر در طول آزمایش‌ها انتخاب شد.

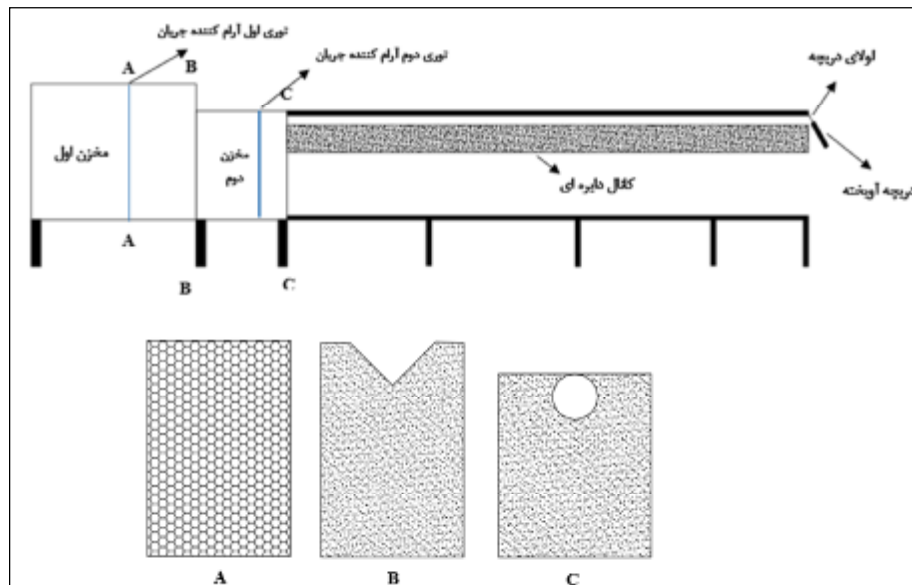
همچنین برای تعیین ضریب دبی دریچه آویخته دایره‌ای و مربعی از روش معادله مومنوم معادلات زیر پیشنهاد شد:

$$Cd_2 = a_4 \cdot w_* \left[b_4 + g_4 \cdot \ln \left(q \cdot \frac{y}{D} \right) \right] + h_4 \quad (36)$$

که در این معادلات α ، β ، γ و η با اندیس‌های ۱ تا ۴ ضرایب رگرسیونی هستند. برای بررسی خصوصیات هیدرولیکی یک مدل فیزیکی مورد دریچه آویخته در آزمایشگاه مدل هیدرولیکی گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، مطابق شکل ۷، طراحی و ساخته شد. طول کلی کانال مورد استفاده ۵/۷ متر، قطرهای مورد استفاده برای کانال دایره‌ای برابر ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری جریان از سرریز مثلی ۹۰ استفاده شد. در این پژوهش برای بررسی وزن دریچه آویخته، از



شکل ۶- مشخصات ظاهری دریچه آویخته و شیوه نصب در انتهای کانال



شکل ۷- مدل آزمایشگاهی

مثلی و عمق بالادست دریچه آویخته با استفاده از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها برای دریچه آویخته با وزن‌های مختلف تکرار شد. محدوده داده‌های آزمایشگاهی آورده شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

برای برداشت داده‌های مورد نیاز ابتدا دریچه با وزن کمتر در انتهای کانال نصب و کمترین دبی در کانال تنظیم و پس از پایدار شدن جریان، درجه بازشدگی با استفاده از نفاله نصب شده روی لولا اندازه‌گیری شد. دبی جریان نیز با استفاده از قرائت همزمان عمق جریان روی سرریز

جدول ۱- محدوده داده‌های آزمایشگاهی

مقطع دریچه	حد	Q*	θ(Rad)	y/D	w*	D _G /D	L _n /D
دایره‌ای	Min	۰/۰۱۲۳۵	۰/۰۲۷۰	۰/۱۲۰۶	۰/۰۳۴۳	۱/۰۳۰۹	۰/۱۵۵۲
	Max	۰/۲۵۰۳	۰/۴۰۸۸	۰/۴۸۹۹	۰/۲۵۴۲	۱/۰۸۶۲	۰/۳۳۵۰
مربعی	Min	۰/۰۱۰۰۶	۰/۰۱۷۴	۰/۱۱۸۹	۰/۰۵۶۲	۱/۰۳۰۹	۰/۱۵۵۲
	Max	۰/۲۵۷۶	۰/۴۰۱۲	۰/۴۹۸۲	۰/۳۳۰۵	۱/۰۸۶۲	۰/۳۳۵۰

نتایج واسنجی معادلات (۳۳) و (۳۴) برای روش اصول محاسبه دبی سرریز در جداول ۲ و ۳ و نتایج واسنجی معادلات (۳۵) و (۳۶) برای روش استفاده از معادله مومنتوم در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب واسنجی معادله (۳۳) (روش اصول محاسبه دبی سرریز)

نوع دریچه آویخته	α ₁	β ₁	γ ₁	η ₁
دایره‌ای (معادله (۳۳))	۰/۳۵۱	۱/۴۰۶	-۱/۶۶۸	۰/۲۶۷

جدول ۳- ضرایب واسنجی معادله (۳۴) (روش اصول محاسبه دبی سرریز)

نوع دریچه آویخته	α ₂	β ₂	γ ₂	η ₂
مربعی (معادله (۳۴))	۲/۲۵۹	۳/۵۳۸	۰/۲۳۲	۰/۲۷۰

جدول ۴- ضرایب واسنجی معادله (۳۵) (روش استفاده از معادله مومنتوم)

نوع دریچه آویخته	α ₃	β ₃	γ ₃	η ₃
دایره‌ای (معادله (۳۵))	۰/۳۵۱	۱/۴۰۶	-۱/۶۶۸	۰/۲۶۷

جدول ۵- ضرایب واسنجی معادله (۳۶) (روش استفاده از معادله مومنتوم)

نوع دریچه آویخته	α ₃	β ₃	γ ₃	η ₃
مربعی (معادله (۳۶))	۲/۲۵۹	۳/۵۳۸	۰/۲۳۲	۰/۲۷۰

در شکل ۸-الف و شکل ۹-الف به ترتیب ضریب دبی محاسبه شده از معادله‌های (۳۳) و (۳۴) در مقابل ضریب دبی آزمایشگاهی به ترتیب برای دریچه آویخته با مقطع دایره‌ای و مربعی نشان داده شده است. شکل ۸-ب نشان می‌دهد که ۸۷/۷٪ از داده‌ها دارای خطایی کمتر از ۱۰٪

برای تعیین میزان خطای تخمین دبی با استفاده از معادلات ذکر شده و مقایسه نتایج با یکدیگر، از پارامترهای مختلف آماری متوسط خطای نسبی^۱ (MARE)، حداکثر خطا^۲ (ME)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا^۴ (MAE) به قرار زیر استفاده شد:

$$MARE = 100 ABS \left[\frac{X_{(exp)} - X_{(cal)}}{X_{(exp)}} \right] \quad (37)$$

$$ME = Max \left| X_{(exp)} - X_{(cal)} \right| \quad (38)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{M} \right) \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{(exp)} - X_{(cal)})^2} \quad (39)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| X_{(exp)} - X_{(cal)} \right| \quad (40)$$

در این معادلات عبارت از داده محاسبه شده از معادلات پیشنهادی، $X_{(exp)}$ داده متناظر آزمایشگاهی و M میانگین داده‌های مشاهداتی است. لازم است توضیح داده شود که در بررسی‌ها، مقادیر کمتر MARE، ME، MAE و RMSE نشان‌دهنده قابلیت بالای معادله ارائه شده در تخمین دبی جریان خواهد بود.

نتایج و بحث

برای واسنجی معادلات رگرسیونی ارائه شده از ۹۸ سری داده آزمایشگاهی برای دریچه آویخته دایره‌ای و ۹۷ سری داده آزمایشگاهی برای دریچه آویخته مربعی استفاده و

1- Mean absolute relative error

2- Maximum error

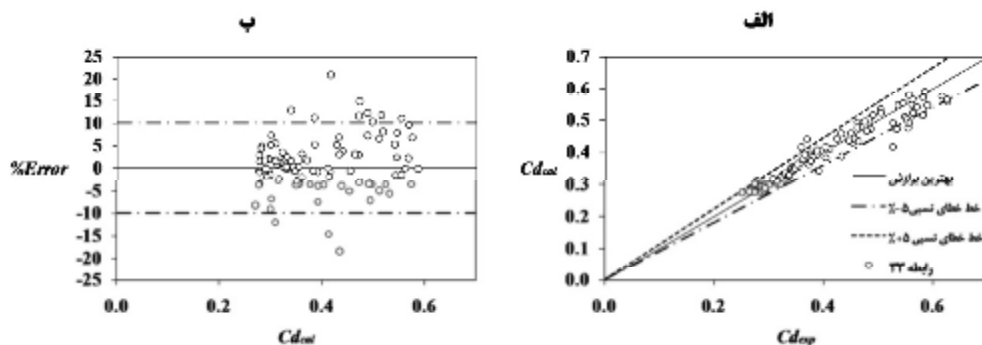
3- Root mean square error

4- Mean absolute error

و مربعی نشان داده شده است. شکل ۱۰-ب نشان می‌دهد که ۸۲٪ از داده‌ها دارای خطایی کمتر از ۱۰٪ هستند. نتایج حاصل شده از معادله (۳۵) نشان می‌دهد متوسط خطای نسبی در تخمین ضریب دبی جریان برابر ۵/۶۶ درصد است. شکل ۸-ب نشان می‌دهد ۷۹٪ از داده‌ها دارای خطایی کمتر از ۱۰٪ هستند. نتایج به‌دست آمده از معادله (۳۵) برای دریچهٔ مربعی نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین ضریب دبی جریان برابر ۶/۸۴٪ است.

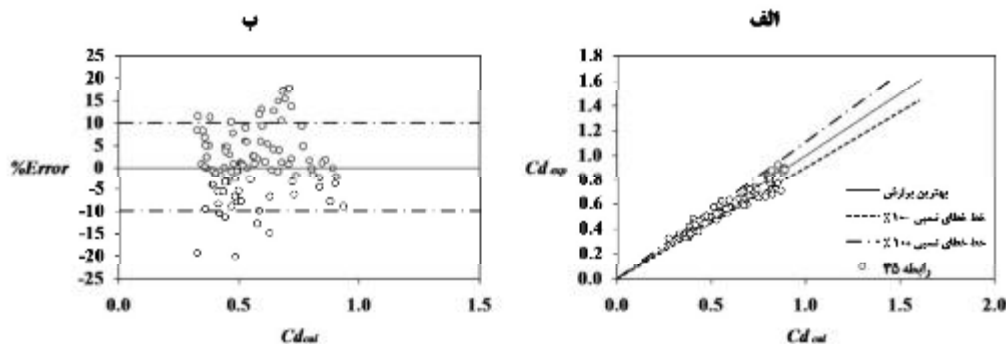
هستند. نتایج به‌دست آمده از معادله (۳۳) نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین ضریب دبی جریان برابر ۴/۴۱٪ است. همچنین شکل ۹-ب نشان می‌دهد که ۸۲/۵٪ از داده‌ها دارای خطایی کمتر از ۱۰٪ هستند. نتایج حاصل شده از معادله (۳۴) نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین ضریب دبی جریان برابر ۵/۵٪ است.

در شکل ۱۰-الف و شکل ۸-الف به ترتیب ضریب دبی محاسبه شده از معادله (۳۵) و (۳۶) در مقابل ضریب دبی آزمایشگاهی به ترتیب برای دریچهٔ آویخته با مقطع دایره‌ای



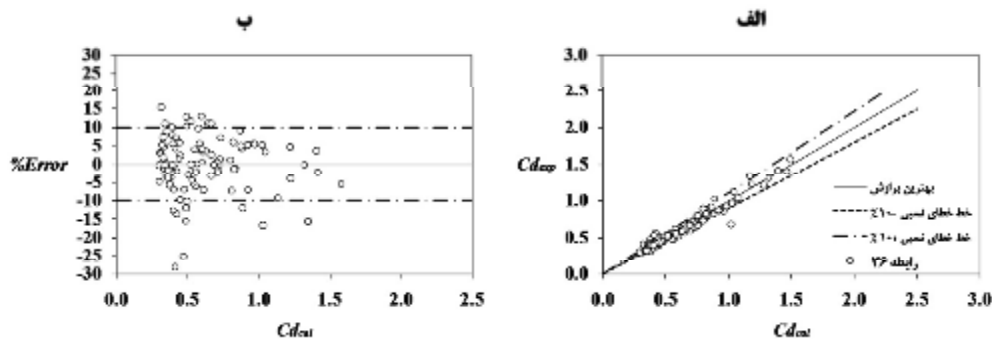
شکل ۸- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش اصول محاسبه دبی سرریز دریچهٔ دایره‌ای

الف - مقایسه دبی‌های محاسبه شده از معادله (۳۳) با داده‌های مشاهده شده و ب - خطای مشاهده شده



شکل ۹- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش استفاده از معادلهٔ مومنتوم دریچهٔ دایره‌ای

الف - مقایسهٔ دبی‌های محاسبه شده از معادله (۳۵) با داده‌های مشاهده شده و ب - خطای مشاهده شده



شکل ۱۰- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش استفاده از معادلهٔ مومنتوم دریچهٔ مربعی

الف - مقایسهٔ دبی‌های محاسبه شده از معادله (۳۶) با داده‌های مشاهده شده و ب - خطای مشاهده شده

پارامترهای مؤثر، تأثیر افزایشی یا کاهش‌ی بر ضریب دبی داشته باشند، روابط تحلیلی را متأثر خواهند کرد، در حالیکه در فرم‌های رگرسیونی فقط تأثیر افزایشی یا کاهش‌ی قابل درک است.

۲) اگرچه در معادلات تحلیلی و رگرسیونی همواره نیاز به استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای واسنجی مدل است؛ اما شدت وابستگی مدل‌های تحلیلی نسبت به ضرایب تجربی کمتر است. از سوی دیگر بر اساس مدل‌های تحلیلی می‌توان نمودارهای تخمین عمومی ضریب دبی نسبت به پارامترهای مؤثر دخیل را ترسیم کرد.

نتیجه‌گیری

هدف در این پژوهش، معرفی درجهٔ آویخته به عنوان یک سازهٔ اندازه‌گیری دبی جریان است. در این پژوهش با مطالعهٔ آزمایشگاهی، ویژگی‌های جریان عبوری از درجهٔ آویخته دایره‌ای و مربعی در کانال دایره‌ای افقی روباز، روش‌های اصول محاسبه دبی سرریز و روش استفاده از معادلهٔ مونتوم که دارای پایهٔ محکم نظری هستند، برای تخمین دبی عبوری از درجهٔ آویخته دایره‌ای و مربعی نصب شده در انتهای کانال دایره‌ای استفاده شده است. در این روش‌ها متوسط خطای نسبی برای درجهٔ آویخته دایره‌ای از ۴/۴۱ تا ۵/۶۶٪ و برای درجهٔ آویخته مربعی متوسط خطای نسبی از ۵/۵۵ تا ۶/۸۴٪ متغیر است. از بین دو روش مطرح شده روش اصول محاسبهٔ دبی سرریز برای هر دو درجه دارای نتایج با متوسط خطای نسبی کمتری است.

منابع

- Burrows R. and Ali K. H. M. A. 1996. Flow Estimation from Flap Gate Monitoring. Executive Summary Report. Report to TWU. Dept. Civil Engineering, University of Liverpool. 346-356
- Burrows R. and Emmonds J. 1998. Energy head implications of the installation of circular flap gates on drainage outfalls. J. Hydraulic Research. 26(2): 131-142.
- Burt C. Angold R. Lehmkuhl M. and Styles S. 2001. Flap gate design for automatic upstream canal water level control. Journal of irrigation and drainage engineering. 127(2): 84-91.
- Graaff B. Stability analysis of the Vlugter gate. 1998. Master's thesis, Delft University

مقایسهٔ روش‌های ارائه شده با پارامترهای آماری

برای مقایسهٔ چندین معادله با یکدیگر نیاز به تعدادی پارامتر آماری است. برای روش‌های بیان شده در این پژوهش، پارامترهای آماری معرفی شده در بخش مواد و روش‌ها محاسبه و در جداول ۶ و ۷ ارائه شد.

جدول ۶- مقایسهٔ روش‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری برای درجهٔ آویخته دایره‌ای

معادلهٔ مونتوم	اصول محاسبه دبی سرریز	پارامتر آماری
۰/۹	۰/۹۳۵	R ²
۵/۶۶	۴/۴۱	MARE (%)
۰/۱۵۱	۰/۱۰۹	ME
۷/۷۹۸	۷/۰۴۲	RMSE
۰/۰۳۱۲	۰/۰۱۹۳	MAE

جدول ۷- مقایسهٔ روش‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری برای درجهٔ آویخته مربعی

معادلهٔ مونتوم	اصول محاسبه دبی سرریز	پارامتر آماری
۰/۹۲۵	۰/۹۶۸	R ²
۶/۸۴	۵/۵۵	MARE (%)
۰/۳۳۳	۰/۱۴۶	ME
۹/۹۱۸	۷/۶۹۱	RMSE
۰/۰۴۱	۰/۰۲۳	MAE

با توجه به نتایج جدول‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به کمترین خطای نسبی در تخمین دبی جریان از درجهٔ آویخته با مقطع دایره‌ای و مربعی می‌توان از روش تحلیلی اصول استفاده از روش تحلیلی اصول محاسبه دبی سرریز استفاده کرد. در این روش خطای نسبی در برآورد دبی جریان برای درجه دایره‌ای برابر با ۴/۴۱٪ و برای درجهٔ مربعی برابر ۵/۵۵٪ است. ممکن است با توسعه معادلات رگرسیونی نتایج بهتری در محدوده داده‌های آزمایشگاهی حاصل شود؛ ولی تفاوت معادلات رگرسیونی و معادلات تحلیلی را می‌توان در دو بخش خلاصه کرد:

۱) فرم معادله انتخابی در تحلیل‌های رگرسیونی اختیاری است. در چنین تحلیلی پارامترهای مختلف با یک فرم اختیاری به گونه‌ای در معادله وارد می‌شوند که کمترین میزان خطا بین ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی برقرار شود؛ اما در روش‌های تحلیلی پارامترهای مؤثر با درجهٔ تأثیر واقعی و یکسان در معادله وارد می‌شوند که اگر

- of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands.
5. Litrico X. Belaud G. Baume J. P. and Jose R. B. 2005. Hydraulic Modeling of an Automatic upstream water-level control gate: *Journal of irrigation and drainage engineering*. 131(2): 176-189.
 6. Raemy F. and Hager W. 1998. Hydraulic level control by hinged flap gate. *Proc. Instn Civ. Engineers. Water, maritime and energy*. 130: 95-103.
 7. Replogle J. A. and Wahlin B. T. 2003. Head loss characteristics of flap Gates at the ends of drain pipes. *American Society of Agricultural Engineers ISSN. 0001-2351*.