

بررسی آزمایشگاهی دریاچه آویخته به عنوان سازه اندازه‌گیری جریان در کانال دایره‌ای روباز برای رژیم جریان آزاد

بابک محمودی^{۱*}، جواد فرهودی^۲

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

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی،

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۵/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۲۲)

چکیده

در تحقیق حاضر با مطالعه آزمایشگاهی و تئوری خصوصیات جریان عبوری از دریاچه آویخته دایره‌ای و مربعی در کانال دایره‌ای افقی روباز، معادلاتی برای تخمین بده جریان توسعه داده شد. به منظور جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه تحقیقات مرکزی آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده و دریاچه آویخته در انتهای کانال دایره‌ای افقی روباز با دو قطر اسمی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر نصب گردید. اندازه‌گیری پارامترهای لازم نظیر بده جریان، عمق جریان در بالادست دریاچه و درجه بازشدگی دریاچه برای تخمین بده جریان صورت گرفت. در این تحقیق از روش‌های فرم اول دبی-اشل، نظریه خودتشابه ناقص و فرم دوم دبی-اشل برای تخمین بده استفاده شده است. یکی از نقاط ضعف این سازه نوسان در مقابل جریان و مشکل اندازه‌گیری درجه بازشدگی می‌باشد. برای رفع این نقص، روش نهایی فرم دوم دبی-اشل که روشی مستقل از درجه بازشدگی دریاچه است ارائه شده است. دقیق‌ترین روش از بین روش‌های مذکور، نظریه خودتشابه ناقص می‌باشد که متوسط خطای نسبی آن برای دریاچه آویخته دایره‌ای برابر ۳/۳۴ درصد و برای دریاچه آویخته مربعی برابر ۴/۱ درصد است.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری جریان، دریاچه آویخته، کانال دایره‌ای، نظریه خودتشابه ناقص، دبی-اشل

مقدمه

نصب سازه‌های مناسب اندازه‌گیری، بهره‌برداری صحیح از آنها و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مصرف آب، علاوه بر اینکه نقش مهمی در پایش شبکه‌های آبیاری و افزایش قدرت تصمیم‌گیری منطقی برای مدیران شبکه دارد، باعث رعایت عدالت در توزیع و تحویل آب و تهیه معیاری جهت اعمال مدیریت اقتصادی آب و نهایتاً باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود. دریاچه آویخته متشکل از یک ورقه‌ی نازک فلزی است که توسط یک مفصل به نقطه‌ای لولا می‌گردد. دریاچه می‌تواند حول محور لولا تحت تاثیر گشتاورهای وارده، باز و بسته شود. با اضافه یا کم کردن وزنه‌های تعادل بر روی بدنه دریاچه می‌توان تعادل مورد نظر را کنترل نمود. وقتی رژیم جریان به صورت آزاد باشد و به دریاچه برسد، وزنه تعادل موجود روی صفحه دریاچه توسط نیروی وارده از طرف آب به سازه خنثی شده و با افزایش سطح آب در پشت دریاچه، نیروی وارده به دریاچه افزایش یافته و گشتاور وارده به

محور لولا دریاچه، باعث باز شدن دریاچه می‌گردد. نمایی از کاربرد عملی دریاچه آویخته با مقطع دایره‌ای و مستطیلی در شکل ۱ نشان داده شده است. از مزایای دریاچه آویخته میتوان به هزینه کم ساخت، هزینه ناچیز نصب، مناسب بودن برای نصب دائمی و غیردائمی، قابلیت انتقال رسوب بالادست، خودکار بودن دریاچه، تسهیل در اندازه‌گیری از راه دور و هزینه کم تعمیر و نگهداری اشاره کرد. همچنین معایب این سازه امکان گرفتگی سازه توسط اجسام شناور موجود در جریان و امکان نوسان دریاچه در مقابل جریان می‌باشد. از کاربردهای دریاچه آویخته می‌توان به تنظیم سطح آب بالادست و اندازه‌گیری جریان اشاره کرد.

Soil Conservation Service (1973) افت انرژی دریاچه‌های آویخته مورد مطالعه قرار داد و نمودارهایی برای تعیین میزان افت انرژی از این نوع دریاچه را ارائه کرد. در آزمایشگاه هیدرولیک شرکت ARMCO (1978) تحقیقی در رابطه با افت انرژی دریاچه آویخته صورت گرفت و یک رابطه تجربی برای محاسبه افت ارائه گردید. Burrows and (1997) Ali تخمین ضریب دبی دریاچه آویخته با مقطع دایره‌ای مورد

* نویسنده مسئول: Mahmouadi.Babak.1370@gmail.com

یکسانی با این سازه دارند کمتر است. Litrico *et al.* (2005) تخمین ضریب دبی دریاچه آویخته با مقطع مستطیلی را مورد مطالعه قرار داده و با استفاده از روش تعادل گشتاورهای وارد شده به لولای دریاچه، رابطه‌ای را برای تخمین بده جریان در حالت رژیم جریان آزاد پیشنهاد دادند. با توجه به محدود بودن مطالعات صورت گرفته روی دریاچه آویخته تصمیم گرفته شد که برای معرفی کردن دریاچه آویخته به عنوان یک سازه‌ی اندازه‌گیری بده جریان، مشخصات هیدرولیکی دریاچه آویخته مورد مطالعه قرار بگیرد، تا با توسعه روابط تخمین دبی بتوان از این نوع دریاچه برای تخمین دبی در شبکه‌های آبیاری استفاده شود. تنها مطالعه برای تخمین دبی از دریاچه آویخته در کانال دایره‌ای توسط Burrows and Ali (1997) صورت گرفته که با توجه به نتایج بدست آمده خطای تخمین بده جریان از ۲۰ درصد تا ۳۰ درصد می‌باشد که در حد قابل قبول نیست. همچنین تحقیق Burrows and Ali (1997) برای شرایطی است، که جریان در بالادست دریاچه تحت فشار، یعنی عمق جریان در بالادست برابر قطر کانال باشد. با این وجود برای مجاری روباز مطالعه‌ای تا به حال صورت نگرفته است. یکی از اهداف تحقیق حاضر توسعه کاربرد دریاچه‌های آویخته به عنوان سازه اندازه‌گیری جریان با صحت بیشتر می‌باشد. همچنین با توجه به کاربرد این سازه در انتهای زهکش‌ها و فاضلاب‌روها با درصد‌های مختلف پرشدگی تصمیم گرفته شد که دریاچه آویخته در انتهای کانال دایره‌ای نصب و مورد آزمایش قرار گیرد. در این تحقیق از دو نوع دریاچه آویخته با مقاطع دایره‌ای و مربعی با وزن‌های متغیر برای آزمایش استفاده شده و روابط تخمین دبی برای این دو نوع از دریاچه آویخته توسعه داده شد.

مطالعه قرار دادند. آنان با استفاده از اصل پایستگی مومنتم زاویه‌ای و با در نظر گرفتن مفروضاتی از قبیل خط جریان در بالادست دریاچه افقی و توزیع فشار هیدرواستاتیک، ضریب دبی دریاچه آویخته را برای شرایط تحت فشار بودن جریان در بالادست و آزاد بودن جریان در پایین‌دست دریاچه استخراج کردند. متوسط خطای نسبی در تخمین ضریب دبی ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش شده است. Graaff (1998) معادله روزنه را برای تخمین بده عبوری از دریاچه آویخته در کانال دایره‌ای معرفی نمود. Raemy and Hager (1998) مدلی از دریاچه آویخته در کانال مستطیلی همراه با وزنه تعادل را معرفی کردند. همچنین معادله‌ای را برای تخمین نیروی وارده از جریان به دریاچه، که تابعی از درجه بازشدگی دریاچه می‌باشد را پیشنهاد دادند و نتایج بدست آمده خود را با استفاده از معادله مومنتم مورد بررسی قرار دادند. Burt *et al.* (2001) مدلی را برای کنترل خودکار سطح آب در بالادست برای کانال مستطیلی توسعه دادند. آنها با استفاده از این دریاچه‌ها در مقیاس کوچک، توزیع فشار روی دریاچه را بدست آورده و توانستند نیروی وارده به دریاچه را با استفاده از یک معادله خطی که تابع درجه باز شدگی دریاچه باشد، تعیین کنند. Replogle *et al.* (2003) روی دریاچه آویخته با مقطع دایره‌ای که در انتهای زهکش‌ها نصب شده تحقیقات خود را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند، زمانی که وزن دریاچه کم و سرعت جریان زیاد باشد افت انرژی ایجاد شده توسط دریاچه به صفر میل می‌کند و زمانی که وزن دریاچه بیشتر و سرعت جریان کمتر باشد میزان افت انرژی بیشتر می‌شود. تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که افت انرژی در دریاچه آویخته نسبت به دیگر سازه‌های هیدرولیکی، که کاربرد



شکل ۱- نمایی از کاربرد عملی دریاچه آویخته با مقطع دایره‌ای و مستطیلی

ثقل، ρ جرم مخصوص آب، μ لزجت دینامیکی آب و σ برابر کشش سطحی می‌باشد.

با استفاده از روش II-باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه ۲ بدست می‌آید.
(رابطه ۲)

$$F\left(\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} = Q^*, \frac{w}{\rho g D^3} = w^*, \theta, \frac{D_G}{D}, \frac{y}{D}, \frac{L_w}{D}, R_e, W_e\right) = 0$$

که در آن R_e و W_e به ترتیب عدد رینولدز و عدد وبر می‌باشند. با توجه به متلاطم بودن جریان در طول آزمایشها ($R_e > 6224.2$) و نیز عمق کافی جریان در کانال و ناچیز بودن کشش سطحی از تاثیر عدد رینولدز و عدد وبر صرف نظر گردید و نتیجتاً رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ خلاصه گردید:

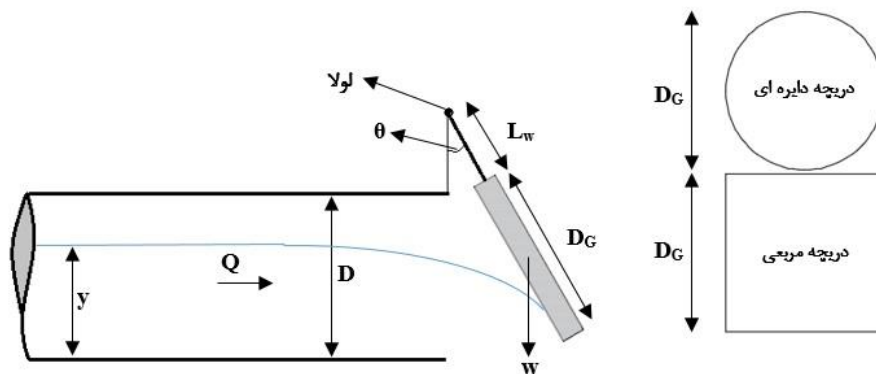
مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

طرح شماتیک از مشخصات دریچه آویخته و نحوه‌ی نصب در انتهای کانال در شکل ۲ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای موثر هندسی، سینماتیکی و دینامیکی موثر بر جریان آزاد دریچه آویخته، تابع جریان به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:
(رابطه ۱)

$$F(Q, \theta, y, w, L_w, D, D_G, g, \rho, \mu, \sigma) = 0$$

که در آن Q بده 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 ضلع دریچه مربعی، g شتاب



شکل ۲- طرح شماتیک از مشخصات دریچه آویخته و نحوه‌ی نصب در انتهای کانال

$$Q^* = \alpha_1 \cdot \left(\frac{\theta \cdot y}{D}\right)^{\left(\beta_1 + \frac{\gamma_1}{\ln(w^*)}\right)} + \eta_1 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$Q^* = \alpha_2 \cdot \left(\frac{\theta \cdot y}{D}\right)^{(\beta_2 + \gamma_2 \cdot w^*)} + \eta_2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در این روابط α ، β ، γ و η با اندیس‌های ۱ و ۲ برابر ضرایب رگرسیون روابط ۵ و ۶ می‌باشند.

نظریه خودتشابه ناقص که اولین بار توسط Ferro (2000) یک روش ساده برای تخمین دبی برپایه عمق بحرانی می‌باشد. در این روش، تخمین عمق بحرانی با استفاده از مشخصات جریان مانند عمق بالادست، مشخصات هندسی سازه مانند درجه بازشدگی دریچه، بازوی دریچه تا محل لولا، قطر لوله، قطر دریچه و وزن دریچه، صورت گرفته و نهایتاً رابطه‌ای جهت تخمین دبی جریان ارائه شده است. برای استفاده از نظریه خودتشابه کامل، ابتدا بایستی از رابطه صریح γ عمق بحرانی را محاسبه و سپس پارامترهای موثر بر عمق بحرانی به صورت بی-بعد شناسایی شوند.

$$F\left(Q^*, w^*, \theta, \frac{D_G}{D}, \frac{y}{D}, \frac{L_w}{D}\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روش نخست با عنوان فرم اول دبی-اشل، Q^* به صورت تابعی از متغیرهای دیگر در نظر گرفته شده و تحلیل رگرسیونی انجام شد.

$$Q^* = f\left(w^*, \theta, \frac{D_G}{D}, \frac{y}{D}, \frac{L_w}{D}\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

لازمه تعریف روابط فرم اول دبی-اشل نهایی برای دریچه آویخته دایره‌ای و مربعی شناخت موثرترین پارامترها بر روی تخمین بده می‌باشد. با ترسیم داده‌های مربوط به هر پارامتر بدون بعد رابطه ۴ در برابر Q^* مشخص شد که پارامترهای $\frac{L_w}{D}$ و $\frac{D_G}{D}$ تاثیر ثابتی روی Q^* داشته و در نتیجه رابطه ۵ برای دریچه آویخته دایره‌ای و رابطه ۶ برای دریچه آویخته مربعی تعریف شد.

پارامتر θ خود تابعی از وزن دریاچه و عمق جریان در بالادست می‌باشد و برای تعیین آن نیاز به استفاده از معادله تعادل گشتاورها حول لولا بوده و برای این کار اطلاع دقیق از توزیع فشار غیر استاتیکی وارد بر سطح بالادست دریاچه ضرورت دارد. بنابراین برای اندازه‌گیری جریان با دریاچه آویخته نیاز به معادله-ای است که با معلوم بودن مشخصات دریاچه آویخته و کانال، بتوان تنها با قرائت عمق بالادست دریاچه بده جریان عبوری از دریاچه آویخته را تخمین زد که نیاز به استفاده از روش فرم دوم دبی-اشل خواهد بود. فرم دوم دبی-اشل مبتنی بر رابطه دبی جریان با عمق مشخصه جریان است که تنها با قرائت عمق مشخصه (مثلاً عمق بالادست دریاچه)، بتوان مستقیماً دبی را تخمین زد. با استفاده از شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان رابطه نمایی ۱۳ و ۱۴ را بین بده و عمق جریان به ترتیب برای دریاچه دایره‌ای و مربعی برقرار نمود:

$$Q^* = a_1 \left(\frac{y}{D} \right)^{b_1} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$Q^* = a_2 \left(\frac{y}{D} \right)^{b_2} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که در آن ضرایب a_1 و b_1 ، ضرایب رابطه دبی اشل برای دریاچه آویخته دایره ای و ضرایب a_2 و b_2 ، ضرایب رابطه دبی اشل برای دریاچه آویخته مربعی می‌باشد.

همچنین مطابق شکل‌های ۶ و ۷ ضرایب معادلات ۱۳ و ۱۴ تابعی از وزن دریاچه، w^* می‌باشند. بهترین برازش برای یافتن ضرایب انتخاب شد.

$$a_1 = \frac{w^*}{(\alpha_5 + \beta_5 \times w^* + \gamma_5 \sqrt{w^*})} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$b_1 = \alpha_6 \times (w^*)^2 + \beta_6 \times w^* + \gamma_6 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$a_2 = \alpha_7 \text{Exp} \left(\frac{\beta_7}{w^*} \right) + \gamma_7 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$b_2 = \alpha_8 \cdot \text{Cos} (\beta_8 \cdot w^* + \gamma_8) + \eta_5 \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

که در این روابط α ، β و γ با اندیس‌های ۵، ۶، ۷ و ۸، و η با اندیس ۵ برابر ضرایب رگرسیونی روابط ۱۵ تا ۱۸ می‌باشند.

تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایشات: به

منظور بررسی خصوصیات هیدرولیکی دریاچه آویخته مدلی در نظر گرفته شد. مدل فیزیکی مورد نظر در آزمایشگاه تحقیقات مرکزی آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران 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 مثلثی ۹۰

Vatankhah and Easa (2011)، معادله ساده و صریحی را برای یافتن عمق بحرانی در کانال دایره‌ای به قرار زیر پیشنهاد نمودند:

$$\frac{y_c}{D} = (1 + 13.6 \varepsilon_c^{-2.1135} - 13 \varepsilon_c^{-2.1})^{-0.1156} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در این رابطه ε_c پارامتر بدون بعد است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\varepsilon_c = \frac{Q^2}{g D^5 \cdot \text{Cos}(\phi)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن ϕ برابر زاویه شیب طولی کانال است. خطای نسبی بیشینه استفاده از رابطه ۸ برای تخمین عمق بحرانی ناچیز بوده و برابر با ۰/۲۷ درصد می‌باشد. همانند روش فرم اول دبی-اشل می‌توان عمق بحرانی تابعی از پارامترهای بدون بعد موثر معرفی نمود.

$$\frac{Y_c}{D} = f \left(w^*, \frac{y}{D}, \theta \right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

پس از بررسی‌های لازم معادله‌ای به فرم ۱۰ به عنوان بهترین فرم برای تعیین عمق بحرانی برای دریاچه دایره‌ای و دریاچه مربعی انتخاب شد.

$$\frac{Y_c}{D} = \alpha_3 \cdot \left(\frac{\theta \cdot y}{D} \right)^{\left(\beta_3 + \frac{\gamma_3}{\text{Ln}(w^*)} \right)} + \eta_3 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\frac{Y_c}{D} = \alpha_4 \cdot \left(\frac{\theta \cdot y}{D} \right)^{\left(\beta_4 + \frac{\gamma_4}{\text{Ln}(w^*)} \right)} + \eta_4 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در این روابط α ، β ، γ و η با اندیس‌های ۳ و ۴ برابر ضرایب رگرسیونی روابط ۱۰ و ۱۱ می‌باشند.

اگر با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ بتوان تخمین مناسبی از عمق بحرانی داشت، می‌توان با استفاده از رابطه ۱۲ تخمین دقیقی از بده جریان داشت.

$$Q^2 \cdot T = g \cdot A_c^3 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن T برابر عرض سطح آب و A_c برابر مقطع جریان با عمق بحرانی است.

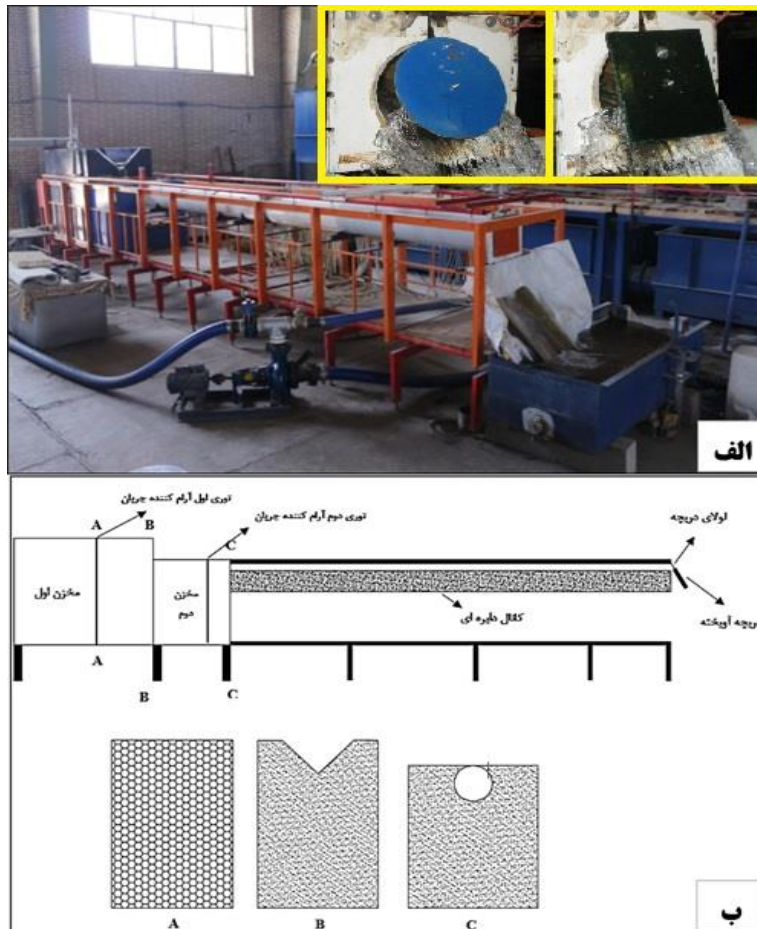
با توجه به تجربیات کسب شده در مراحل انجام آزمایشات، یکی از مشکلات اساسی موجود در کاربرد دریاچه آویخته به عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان، نوسان سازه در مقابل جریان، حتی در جریانهای خیلی کم، می‌باشد که باعث دقت پایین در قرائت درجه بازشدگی دریاچه می‌گردد. بنابراین وجود پارامتر θ در معادلات توسعه یافته برای تخمین بده جریان یک مشکل اساسی خواهد بود که می‌تواند در کاربرد این سازه در شبکه‌ها می‌تواند با خطای زیادی همراه باشد. از طرفی

در صورت عدم وجود جریان به صورت کامل بسته شود. علاوه بر این لولای به کار گرفته شده روغن کاری گردید تا میزان اصطکاک آن در هنگام باز شدن به حداقل برسد. پس از مطالعات صورت گرفته روی جریان عبوری از دریچه آویخته، پارامترهای آزمایشگاهی وزن دریچه، بده جریان، شکل دریچه و قطر کانال به عنوان پارامترهای متغیر در طول آزمایشات انتخاب گردید. هنگام ارائه یک رابطه برازشی مناسب بایستی دقت داشت که روابط برازشی برای محدوده داده‌ها قابل استفاده هستند. به عبارت دیگر این روابط قابل درونیایی بوده و قابلیت برونیایی را دارا نیستند، به همین منظور محدوده داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در واسنجی معادلاتی که ارائه شد، در جدول ۱ خلاصه شده است.

استفاده شد. در این تحقیق به منظور بررسی وزن دریچه آویخته روی بده جریان، از پنج دریچه به وزن‌های مختلف در هر قطر برای دریچه آویخته دایره‌ای و پنج وزن در هر قطر برای دریچه آویخته مربعی استفاده شد. برای این منظور با استفاده از ورقه آهنی با ضخامت ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر ورقه‌هایی دایره‌ای و مربعی در قطرهای و ضلع‌های مورد نظر برش داده شد. برای افزایش وزن دریچه، ورقه‌های برش داده شده به هم چسبانده شد تا دریچه‌ای کاملاً همگن و با وزن بیشتر حاصل شود. وزن دریچه‌های دایره‌ای از ۰/۲۵ تا ۶/۱۸۹ کیلوگرم و برای دریچه مربعی از ۰/۴۱ تا ۸/۰۴۶ کیلوگرم متغیر می‌باشد. به منظور آویختن دریچه در انتهای کانال، یک لولا در نظر گرفته شد. لولای مورد نظر در انتهای کانال به گونه‌ای نصب شد که دریچه آویزان شده از لولا در موقعیت بازشدگی صفر درجه قرار گرفته و

جدول ۱- محدوده داده‌های آزمایشگاهی

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



شکل ۳- (الف) نمایی از فلوم آزمایشگاهی؛ (ب) نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی

پارامترهای آماری

به منظور تعیین میزان خطای تخمین دبی با روابط ذکر شده و مقایسه نتایج با یکدیگر پارامترهای مختلف آماری متوسط خطای نسبی (MARE)، حداکثر خطا (ME) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، استفاده شد. تعریف پارامترهای مختلف به صورت استفاده شده است:

$$MARE = 100.ABS \left[\frac{X_{(exp)} - X_{(cal)}}{X_{(exp)}} \right] \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$ME = Max \left| X_{(exp)} - X_{(cal)} \right| \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{M} \right) \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{(exp)} - X_{(cal)})^2} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

که در این روابط $X_{(cal)}$ داده محاسباتی از معادلات پیشنهادی، $X_{(exp)}$ داده متناظر از مقادیر آزمایشگاهی و M برابر میانگین داده‌های مشاهداتی است. لازم به توضیح است که در بررسی‌ها، مقدار کمتر MARE، ME و RMSE نشان دهنده قابلیت بالای رابطه ارائه شده در تخمین بده جریان خواهد بود.

نتایج و بحث

برای واسنجی روش‌های پیشنهادی تخمین ضریب دبی ارائه شده از ۹۸ داده آزمایشگاهی برای درجه آویخته دایره‌ای و ۹۷ داده آزمایشگاهی برای درجه آویخته مربعی استفاده شد. نتایج جداول ۲ و ۳ برای واسنجی معادلات ۵ و ۶ در روش فرم اول دبی-اشل، جداول ۴ و ۵ برای واسنجی معادلات ۱۰ و ۱۱ در نظریه خود تشابه ناقص حاصل گردیده است.

جدول ۲- ضرایب واسنجی معادله ۵ (روش فرم اول دبی-اشل)

نوع درجه آویخته	α_1	β_1	γ_1	η_1
دایره ای (معادله ۵)	۱/۲۴۸	۱/۰۹۹	۰/۳۰	۰/۰۰۷۲

جدول ۳- ضرایب واسنجی معادله ۶ (روش فرم اول دبی-اشل)

نوع درجه آویخته	α_2	β_2	γ_2	η_2
مربعی (معادله ۶)	۰/۹۹۱	۰/۹۴۳	-۰/۶۳۳	۰/۰۰۳

جدول ۴- ضرایب واسنجی معادله ۱۰ (نظریه خود تشابه ناقص)

نوع درجه آویخته	α_3	β_3	γ_3	η_3
دایره ای (معادله ۱۰)	۱/۱۹۱	۰/۶۶۰	۰/۱۸۱	۰/۰۶۲

جدول ۵- ضرایب واسنجی معادله ۱۰ (نظریه خود تشابه ناقص)

نوع درجه آویخته	α_4	β_4	γ_4	η_4
مربعی (معادله ۱۱)	۱/۰۲۶	۰/۷۲۶	۱/۰۷۳	۰/۰۳۱

جداول ۶ و ۷ برای واسنجی معادلات ۱۵ و ۱۶ و جداول ۷ و ۸ برای واسنجی معادلات ۱۷ و ۱۸ برای روش فرم دوم دبی-اشل حاصل گردید.

جدول ۶- ضرایب واسنجی معادله ۱۵

(روش فرم دوم دبی-اشل درجه دایره ای)

ضریب	α_5	β_5	γ_5
a_1	-۰/۲۲۲	-۲/۸۵۲	۱/۹۴

جدول ۷- ضرایب واسنجی معادله ۱۶

(روش فرم دوم دبی-اشل درجه دایره ای)

ضریب	α_6	β_6	γ_6
b_1	۵۲/۱۲	-۴/۵۵۹	۱/۸۵

جدول ۸- ضرایب واسنجی معادله ۱۷

(روش فرم دوم دبی-اشل درجه مربعی)

ضریب	α_7	β_7	γ_7
a_2	۳۴۵۰	-۱/۵۱۱	۰/۸۶

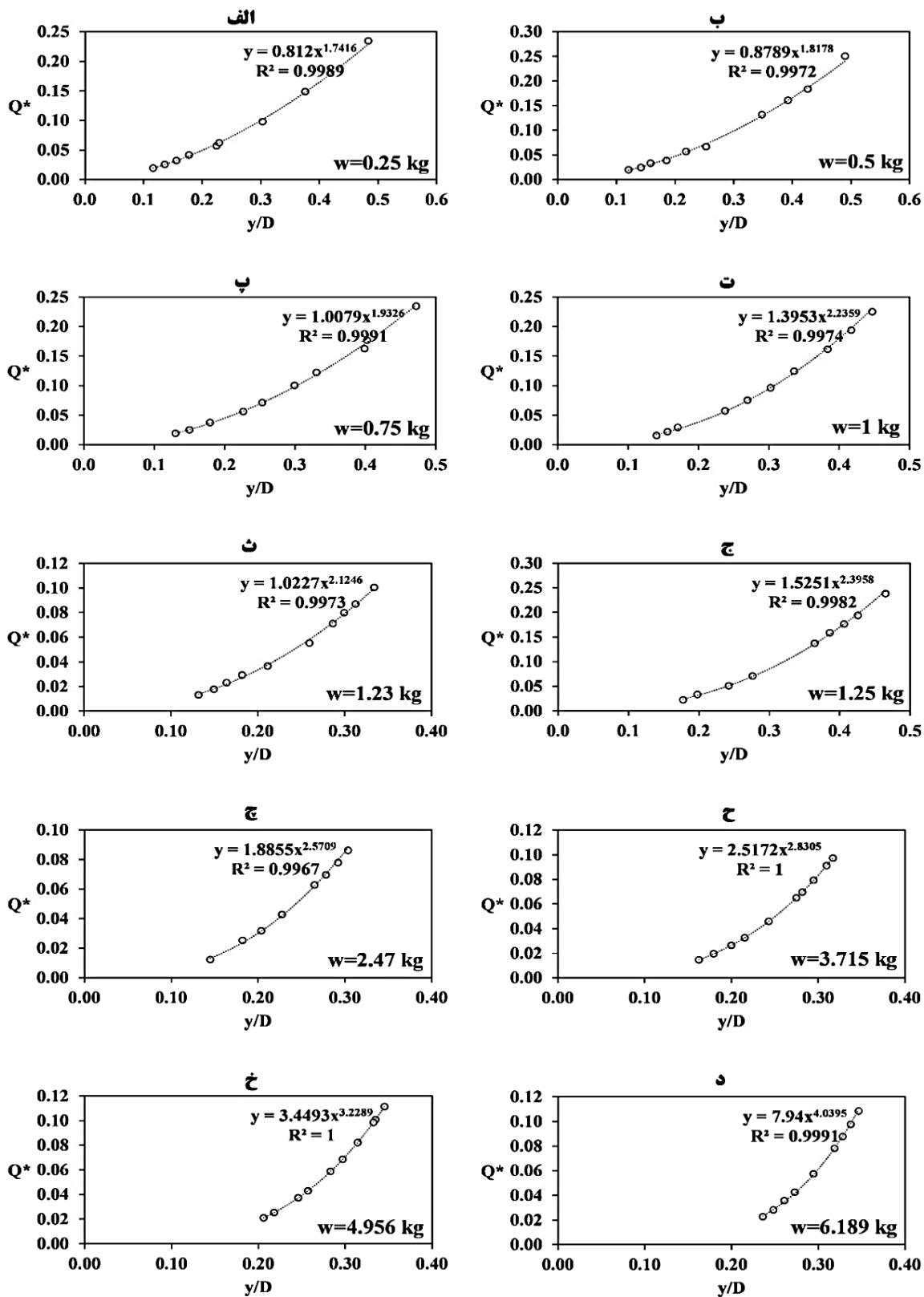
جدول ۹- ضرایب واسنجی معادله ۱۸

(روش فرم دوم دبی-اشل درجه مربعی)

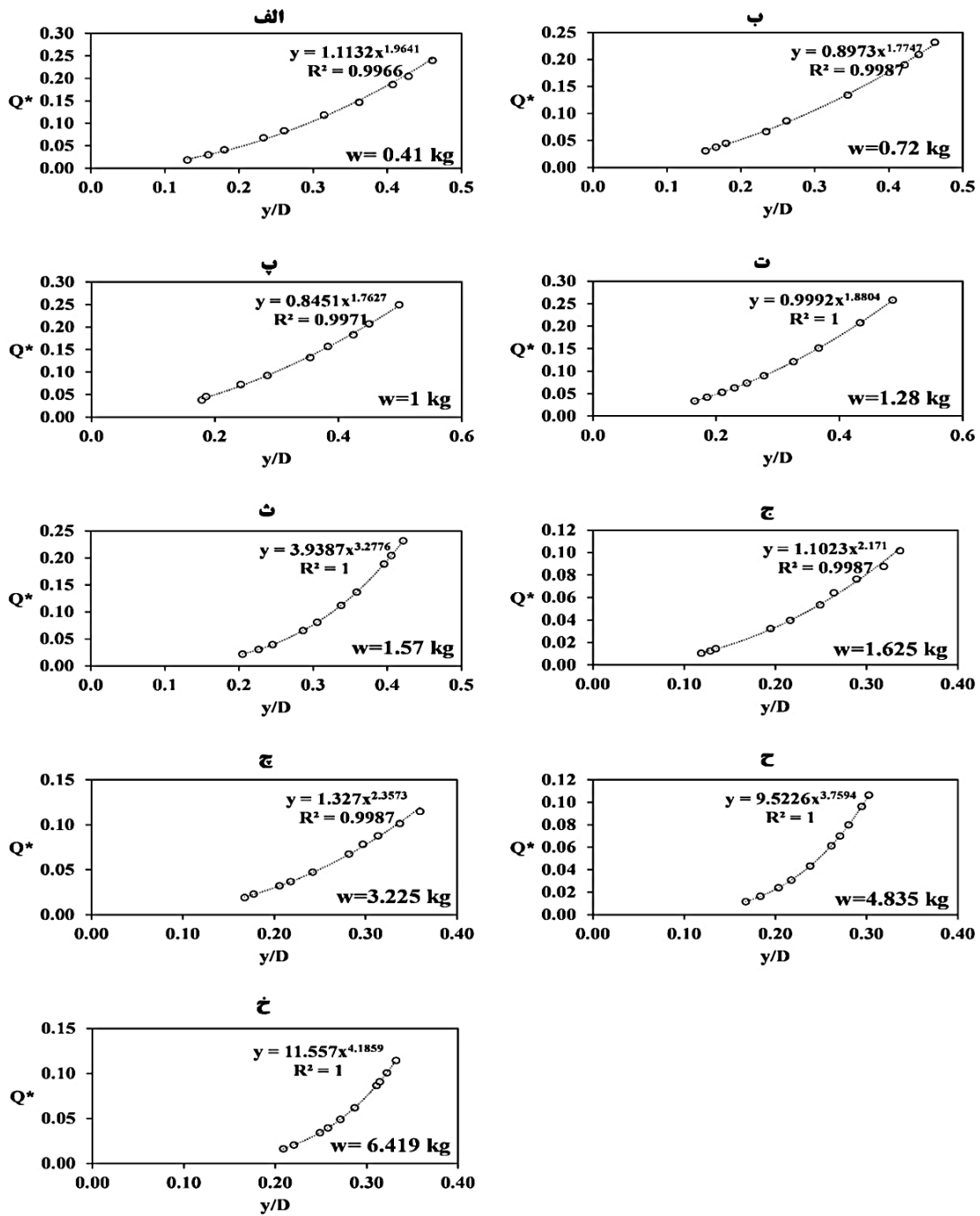
ضریب	α_8	β_8	γ_8	η_5
b_2	۱/۷۶۶	۱۲/۳۵	-۴/۳۷۶	۳/۴۵۴

شکل های ۸-الف و ۹-الف نشانگر بده بی بعد محاسبه شده از رابطه‌های ۵ و ۶ در مقابل بده بی بعد مشاهداتی به ترتیب برای درجه آویخته با مقطع دایره‌ای و مربعی در روش فرم اول دبی-اشل می باشند. خط برازش ۴۵ درجه، نشان دهنده تطابق بسیار خوب نتایج محاسباتی روش تجربی با نتایج مشاهداتی با خطای $\pm 5\%$ درصد می باشد. شکل ۸-ب نشان می‌دهد که ۷۳/۵ درصد از داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را دارا می‌باشند.

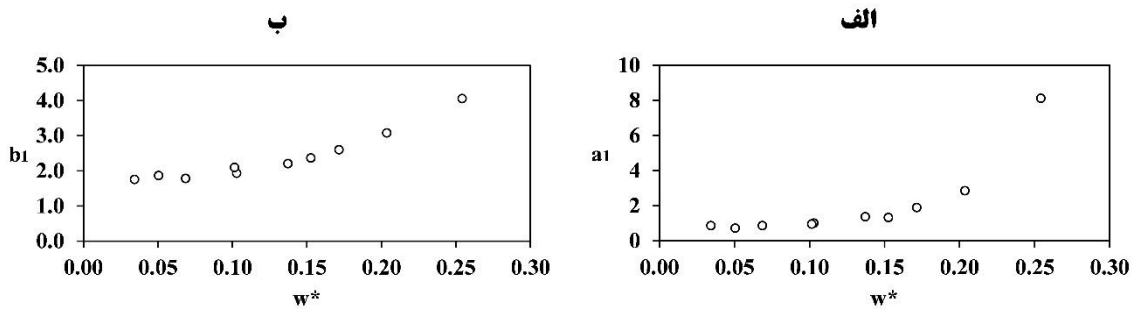
نتایج حاصل از رابطه ۵ نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین بده جریان در روش فرم اول دبی-اشل برابر ۶/۶۶ درصد می‌باشد. شکل ۹-ب نشان می‌دهد که ۷۳/۲ درصد از داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را دارا می‌باشند. نتایج حاصل شده از رابطه ۶ نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین بده جریان برابر ۸/۱ درصد می‌باشد.



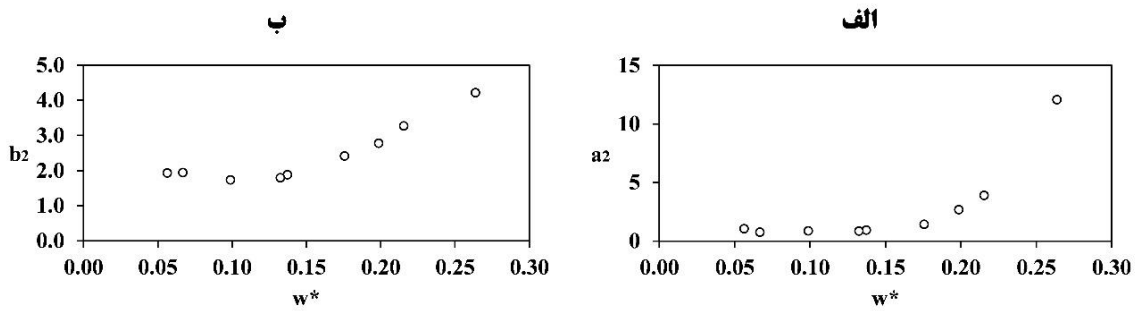
شکل ۴- منحنی های فرم دوم دبی-اشل دریاچه آویخته دایره‌ای



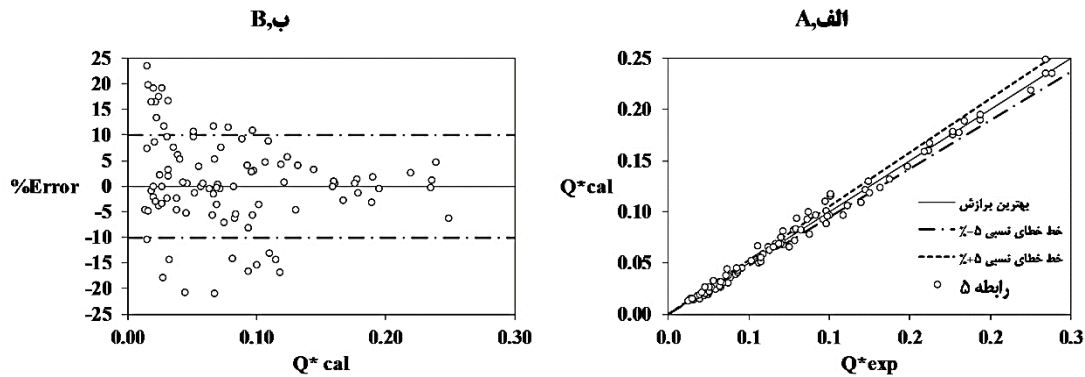
شکل ۵- منحنی های فرم دوم دبی-اشل در بچه آویخته مربعی



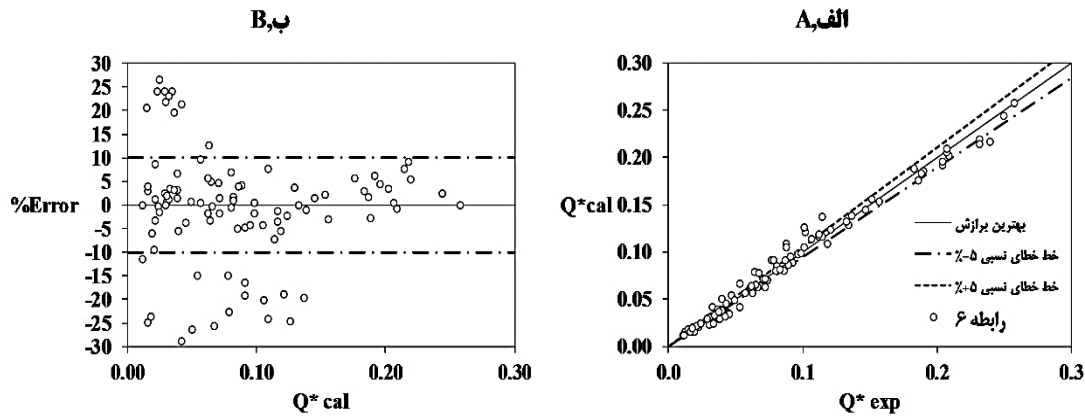
شکل ۶- تغییرات ضرایب a_1 و b_1 در مقابل وزن در بچه آویخته دایره ای



شکل ۷- تغییرات ضرایب a_2 و b_2 در مقابل وزن دریاچه آویخته مربعی



شکل ۸- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش فرم اول دبی-اشل دریاچه دایره‌ای
الف- مقایسه دبی های محاسبه شده از رابطه ۵ با داده های مشاهده شده
ب- خطای مشاهده شده



شکل ۹- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش فرم اول دبی-اشل دریاچه مربعی
الف- مقایسه دبی های محاسبه شده از رابطه ۶ با داده های مشاهده شده
ب- خطای مشاهده شده

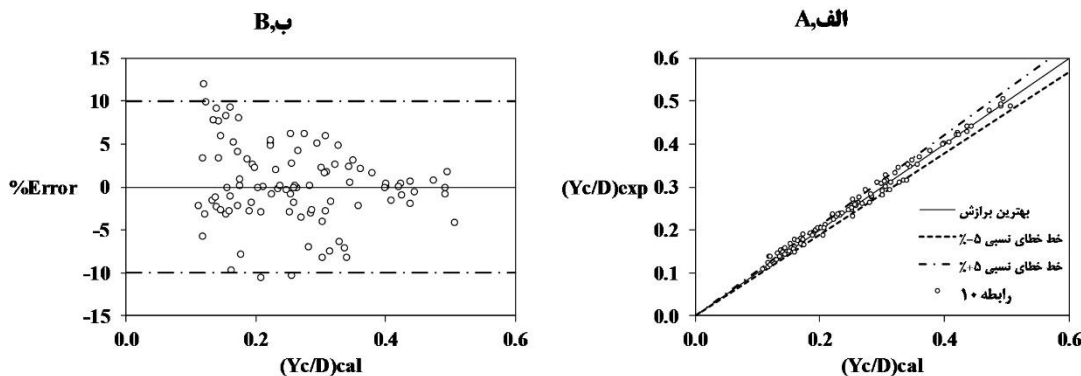
شکل ۱۰- الف و شکل ۱۱- الف نشانگر عمق بحرانی بی بعد محاسبه شده از رابطه ۱۰ در مقابل عمق بحرانی بی بعد مشاهداتی در نظریه خود تشابه ناقص به ترتیب برای دریاچه آویخته با مقطع دایره‌ای و مربعی می باشند. شکل ۱۰- ب نشان می‌دهد که ۹۵/۹ درصد از داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را می‌دهند. نتایج حاصل شده از رابطه ۱۱ برای دریاچه مربعی نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین عمق بحرانی برابر ۴/۱ درصد می‌باشد.

در شکل ۱۲- الف بده بی بعد محاسبه شده از رابطه ۱۳ در مقابل بده بی بعد آزمایشگاهی دریاچه آویخته با مقطع دایره-

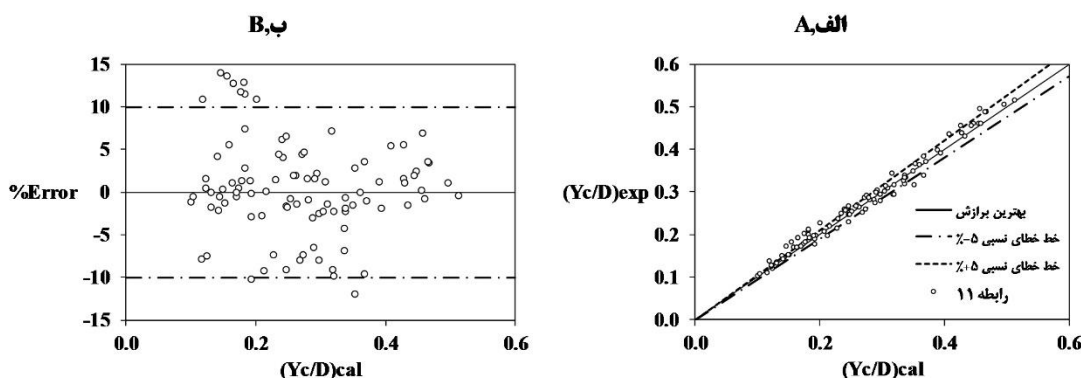
شکل ۱۰- الف و شکل ۱۱- الف نشانگر عمق بحرانی بی بعد محاسبه شده از رابطه ۱۰ در مقابل عمق بحرانی بی بعد مشاهداتی در نظریه خود تشابه ناقص به ترتیب برای دریاچه آویخته با مقطع دایره‌ای و مربعی می باشند. شکل ۱۰- ب نشان می‌دهد که ۹۵/۹ درصد از داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را می‌دهند. نتایج حاصل شده از رابطه ۱۰ برای دریاچه دایره-ای نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین عمق

می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین بده جریان برابر ۴/۹۵ درصد می‌باشد.

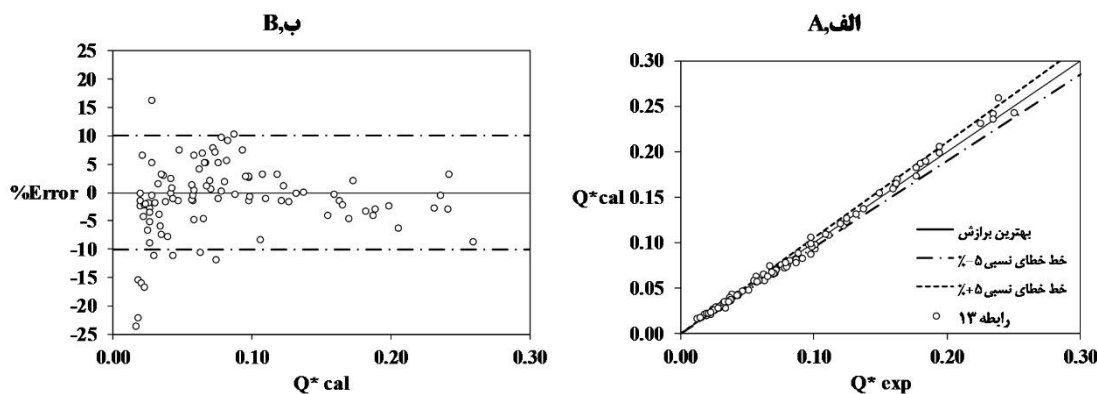
ای برای روش دبی-اشل نشان داده شده است. شکل ۱۲-ب نشان می‌دهد که ۸۸/۷ درصد از داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را دارا می‌باشند. نتایج حاصل شده از رابطه ۱۳ نشان



شکل ۱۰- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در نظریه خود تشابه ناقص درپچه دایره ای الف- مقایسه دبی های محاسبه شده از رابطه ۱۰ با داده های مشاهده شده ب- خطای مشاهده شده



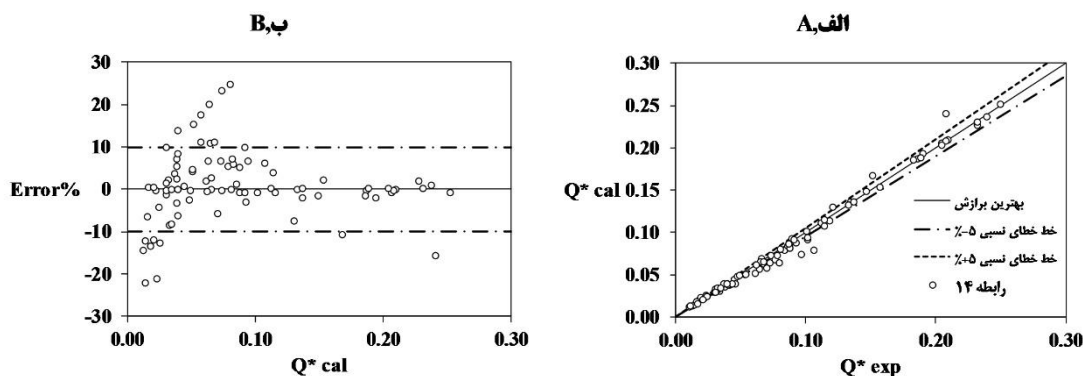
شکل ۱۱- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در نظریه خود تشابه ناقص درپچه مربعی الف- مقایسه دبی های محاسبه شده از رابطه ۱۱ با داده های مشاهده شده ب- خطای مشاهده شده



شکل ۱۲- مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش فرم دوم دبی-اشل درپچه دایره‌ای الف- مقایسه دبی های محاسبه شده از رابطه ۱۳ با داده های مشاهده شده ب- خطای مشاهده شده

که ۷۸/۴ درصد از داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد را دارا می‌باشند. نتایج حاصل شده از رابطه ۱۳ نشان می‌دهد که متوسط خطای نسبی در تخمین بده جریان برابر ۵/۷ درصد می‌باشد.

در شکل ۱۳-الف بده بی بعد محاسبه شده از رابطه ۱۳ در مقابل بده بی بعد آزمایشگاهی درپچه آویخته با مقطع مربعی برای روش دبی-اشل نشان داده شده است. شکل ۱۳-ب نشان می‌دهد



شکل ۱۳ - مقایسه نتایج محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی در روش فرم دوم دبی-اشل در پیچه مربعی
 الف- مقایسه دبی های محاسبه شده از رابطه ۱۳ با داده های مشاهده شده
 ب- خطای مشاهده شده

پارامترهای آماری معرفی شده برای هر سه روش محاسبه شده و در جداول ۱۰ و ۱۱ ارائه گردید.

مقایسه روش های ارائه شده با پارامترهای آماری برای مقایسه چندین معادله با یکدیگر نیاز به یکسری پارامتر-های آماری می باشد. برای روش های بیان شده در این تحقیق

جدول ۱۰-مقایسه روش های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری برای در پیچه آویخته دایره ای

پارامتر آماری	روش فرم اول	نظریه خود تشابه	روش فرم دوم دبی-اشل
	دبی-اشل	ناقص	اشل
R^2	۰/۹۹۲	۰/۹۹۱	≈۱
MARE (%)	۶/۶۶	۳/۳۴	۴/۹۵
ME	۰/۰۱۷	۰/۰۲۶	۰/۰۲۱
RMSE	۷/۱۵۹	۳/۸۳۶	۵/۴۷۶

جدول ۱۱-مقایسه روش های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری برای در پیچه آویخته مربعی

پارامتر آماری	روش فرم اول	نظریه خود تشابه	روش فرم دوم دبی-اشل
	دبی-اشل	ناقص	اشل
R^2	۰/۹۸۷	۰/۹۸۴	≈۱
MARE (%)	۸/۱۴	۴/۱	۵/۶۸
ME	۰/۰۲۵	۰/۰۳۶	۰/۰۵۰
RMSE	۹/۳۰۲	۵/۰۷۸	۹/۱۳۱

جریان برای در پیچه دایره ای برابر با ۳/۳۴ درصد و برای در پیچه مربعی برابر ۴/۱ درصد بوده که برای یک سازه اندازه گیری جریان در مقایسه با روش بارروس و علی (۳) که در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد می باشد، مقداری قابل قبول بوده و خطای تخمین بده جریان به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. با توجه به پارامتر آماری RMSE می توان گفت به بهترین نتایج با استفاده

با توجه به نتایج جداول ۱۰ و ۱۱ برای رسیدن به کمترین خطای نسبی در تخمین بده جریان از در پیچه آویخته با مقطع دایره ای و مربعی می توان از نظریه خود تشابه ناقص استفاده کرد. البته نظریه خود تشابه ناقص دارای دیدگاه رگرسیونی بوده و فقط در محدوده داده های آزمایشگاهی می تواند استفاده گردد. در این روش خطای نسبی در برآورد بده

می‌تواند با خطای زیادی همراه باشد. برای رفع این مشکل روابط فرم دوم دبی-اشل برای دریچه‌های آویخته دایره‌ای و مربعی توسعه داده شد. روابط جدید فرم دوم دبی-اشل مستقل از پارامتر درجه بازشدگی دریچه بوده و روشی کاربردی‌تر برای تخمین بده عبوری از دریچه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر معرفی دریچه آویخته به عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان در کانال‌های دایره‌ای روباز و بدست آوردن معادلات تخمین بده جریان می‌باشد. دریچه آویخته می‌تواند در انتهای زهکش‌ها و فاضلاب‌روها برای اندازه‌گیری جریان کاربرد داشته باشد. با توجه به نتایج حاصل شده پیشنهاد می‌گردد که در کارهای آزمایشگاهی از روش نظریه خودتشابه ناقص و در کارهای کاربردی از روش فرم دوم دبی-اشل استفاده گردد. در روش نظریه خودتشابه ناقص خطای نسبی در برآورد بده جریان برای دریچه دایره‌ای برابر با $3/34$ درصد و برای دریچه مربعی برابر $4/1$ درصد و در روش فرم دوم دبی-اشل خطای نسبی در برآورد بده جریان برای دریچه دایره‌ای برابر با $4/95$ درصد و برای دریچه مربعی برابر $5/68$ درصد می‌باشد. یکی از مشکلات اندازه‌گیری جریان با استفاده از دریچه آویخته اندازه‌گیری زاویه بازشدگی دریچه می‌باشد، برای رفع این مشکل روش دبی اشل فرم دوم توسعه داده شد.

از روش نظریه خودتشابه ناقص برای هر دو دریچه حاصل شده است. روش متداول در تخمین دبی عبوری از سازه های هیدرولیکی بخصوص دریچه‌ها در نظر گرفتن اصول روزنه با شکلی متناسب با مقطع خروجی جریان و دخالت مفهوم ضریب دبی است. با این وجود برای سازه خاص مورد مطالعه به دلیل ریزش جریان از کناره‌ها، تعیین دقیق مقطع خروج جریان مشکل خواهد بود. مزیت عمده این روش آن است که رابطه بین عمق بحرانی و دبی جریان کاملاً مشخص بوده و در نتیجه با تعیین دقیق عمق بحرانی، می‌توان تخمین دقیقی از دبی جریان را بدست آورد. این موضوع برطرف‌کننده مشکل ارائه تعریف صحیح و واحد برای ضریب دبی دریچه آویخته است، زیرا در دریچه آویخته جریان هم از زیر دریچه و هم از کناره‌های دریچه خارج می‌گردد (شکل ۳-الف) و روشی برای تفکیک بده عبوری از زیر دریچه و از کناره‌های دریچه وجود ندارد، بنابراین نمی‌توان ضریب بده جریان عبوری از زیر دریچه و ضریب بده جریان عبوری از کناره‌های دریچه را تعیین کرد. یکی از مشکلات اساسی موجود در کاربرد دریچه آویخته به عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان، نوسان داشتن سازه در مقابل جریان، حتی در جریانهای خیلی کم، می‌باشد که باعث دقت پایین در قرائت درجه بازشدگی دریچه می‌گردد. بنابراین وجود پارامتر θ در معادلات توسعه یافته برای تخمین بده جریان یک مشکل اساسی خواهد بود که می‌تواند در کاربرد این سازه در شبکه‌ها

REFERENCES

- Soil conservation service. (1973). Drainage of Agricultural Land. US Department of Agriculture. Pub. Water Information Center, New York.
- ARMCO., Canada Ltd. (1978). Armco Water Control Gates-Catalogue. P.O. Box 3000, Guelph, Ontario, Canada.
- Burrows R. and Ali K.H.M. (1997). Flow estimation from flap-gate monitoring. *Journal of Institution of Water and Environmental Management (U.K.)* 11(5): 346-356.
- Graaff B. (1998). Stability analysis of the Vlughter gate. The Thesis Master of Science Degree in Geosciences. The University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, the Netherlands.
- Raemy F. and Hager W.H. (1998). Hydraulic level control by hinged flap gate. *Proc. Inst. Civil Eng. Water Maritime and Energy*, 130: 95-103.
- Ferro V. (2000). Simultaneous flow over and under a gate. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 190-193.
- Burt C.M., Angold R., Lehmkuhl M., and Styles S. (2001). Flap gate design for automatic upstream water level control. *Journal of Irrigation and Drainage Eng.* 127(2): 84-91.
- Replogle J. A. and Wahlin B. T. (2003). head loss characteristics of flap Gates at the ends of drainpipes. American Society of Agricultural Engineers ISSN. 0001-2351.
- 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.
- Vatankhah A.R., Easa S.M. (2011). Explicit solutions for critical and normal depths in channels with different shapes. *Flow Measurement and Instrumentation*. 43- 49.