



بررسی تأثیر شکل های مختلف هندسی آستانه بر ضریب دبی جریان دریاچه کشویی عمودی

فرزین سلماسی*، رضا نوروزی

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶-۱۲-۲۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۲-۲۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۰۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۳-۲۱

کلمات کلیدی:

دریاچه کشویی

ضریب دبی

آستانه

جریان آزاد

خلاصه: دریاچه ها در سدها و کانال های آبیاری برای کنترل دبی و یا تنظیم سطح آب بکار می روند. برای تعیین دبی جریان از زیر دریاچه ها نیاز به دانستن ضریب دبی می باشد. این تحقیق به بررسی تأثیر شکل آستانه در زیر دریاچه کشویی عمودی بر ضریب دبی برای جریان آزاد می پردازد. هر دو پارامتر شکل آستانه و ارتفاع آستانه مورد مطالعه قرار می گیرند. شکل های آزمایش شده شامل آستانه های چندوجهی و غیر چندوجهی می باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از شکل های آزمایش شده، آستانه دایره ای مؤثرترین شکل است و آستانه مثلثی از جمله بهترین آستانه های چندوجهی می باشد. آستانه دایره ای ضریب دبی را حداقل ۲۳ درصد و حداکثر ۳۱ درصد افزایش می دهد. همچنین علاوه بر شکل، ارتفاع آستانه نقش مهمی در ضریب دبی ایفا می کند. با استفاده از تحلیل ابعادی و تحلیل رگرسیون غیر خطی، معادله ای برای پیش بینی ضرایب دبی دریاچه جریان آزاد بدون آستانه و دارای آستانه ارائه می گردد. معادله توسعه یافته موافق با نتایج تجربی و همچنین داده های منتشر شده از محققان دیگر می باشد.

۱- مقدمه

به رودخانه و کانال احداث می شوند. از انواع دریاچه ها می توان به دریاچه های زیرگذر اشاره کرد که حرکت آب از زیر دریاچه صورت می گیرد و تنظیم و کنترل دبی عبوری بر اساس میزان بازشدگی دریاچه صورت می پذیرد. از مهمترین و پرکاربردترین دریاچه های زیرگذر می توان به دریاچه های کشویی و شعاعی (قطاعی) اشاره نمود. تخمین دبی جریان عبوری از زیر دریاچه ها یکی از مهمترین مسائل در علم مهندسی آب است. تخمین درست و دقیق دبی جریان عبوری مستلزم انتخاب ضریب دبی مناسب می باشد.

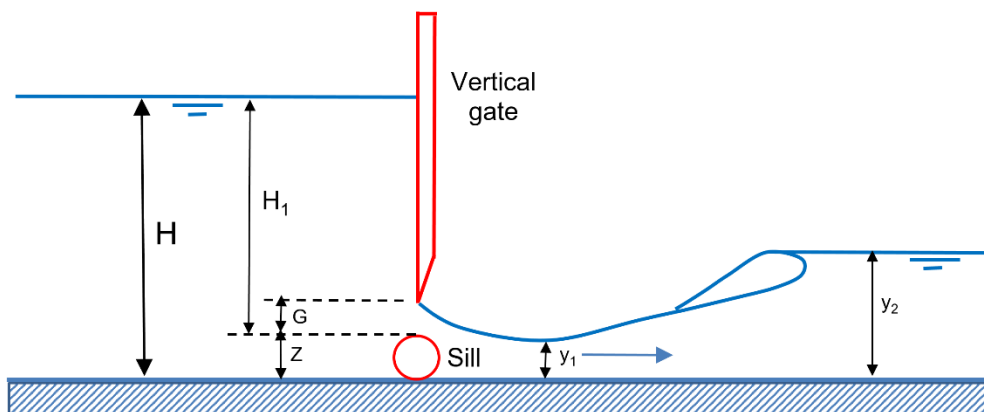
خصوصیات جریان زیر دریاچه ها به نحو گسترده ای از لحاظ تئوری و آزمایشگاهی توسط بسیاری از محققان از جمله هنری [۲]، هندرسون [۳]، راجاراتنام و سابرامانیا [۴]، راجاراتنام [۵]، سوامی [۶]، اوهاتسو و یاسودا [۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. مقطع طولی از یک دریاچه کشویی عمودی دارای آستانه با جریان خروجی آزاد در شکل (۱) ارائه گردیده است.

به منظور کنترل دبی و یا تنظیم سطح آب در کانال های آب رسانی و همچنین کنترل آب رها شده از سدها از سازه های کنترل کننده جریان استفاده می شود. این نوع سازه ها انواع مختلفی دارند که دریاچه ها یکی از مهمترین آن ها می باشند [۱]. دریاچه ها خود انواع مختلفی دارند که هر کدام امتیازات و نقائص مربوط به خود را داشته و با توجه به موقعیت کاربرد و خصوصیات استفاده از آن ها می توان یکی از انواع را انتخاب نمود. به دلیل روابط هیدرولیکی ساده که بر دریاچه ها حاکم هستند، از این نوع سازه ها زیاد استفاده می شود. دریاچه ها به دو نوع جریان با خروجی آزاد و جریان با خروجی مستغرق تقسیم می شوند که هر کدام روابط مربوط به خود را دارا می باشند. از لحاظ محل استفاده، دریاچه ها در کانال های آب رسانی، بالای تاج سرریز سدها و یا در محل خروج آب از دریاچه

هیدرولیک مربوط به دریاچه ها به دو نوع جریان با خروجی آزاد و

*نویسنده عهده دار مکاتبات: Salmasi@tabrizu.ac.ir





شکل ۱. دریچه کشویی با جریان خروجی آزاد
Fig. 1. Sluice gate with free flow condition

مناسب می توان ضریب فشردگی و دبی جریان را در دریچه های کشویی با جریان آزاد محاسبه نمود. خلیلی شایان و همکاران [۱۰] در پژوهش خود خصوصیات جریان عبوری از زیر دریچه های کشویی و قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق را بررسی نمودند. ایشان با استفاده از معادلات انرژی و مومنتم و بهره گیری از نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهشگران مطالعه خود را انجام دادند. در شرایط جریان آزاد، معادله ای برای تخمین ضریب افت انرژی دریچه ارائه و کاربرد آن در افزایش دقت برآورد ضریب دبی در شرایط جریان آزاد نشان داده شد. در شرایط جریان مستغرق نیز، معادله ای نظری برای تخمین ضریب دبی دریچه های کشویی و سه نوع دریچه قطاعی با لبه لاستیکی سخت، چوپوقی سان و لبه تیز گسترش داده شد. نتایج نشان داد که در شرایط معین، مقدار گذردهی جریان از دریچه قطاعی با لبه لاستیکی سخت نسبت به نوع لبه تیز و نوع چوپوقی سان بیشتر است. برقی خضرو و همکاران [۱۱] روشی نوین جهت تخمین ضریب دبی دریچه های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق را توسعه دادند. این روش ضریب دبی دریچه را به صورت تابعی از عمق آب در بالادست دریچه و قرائت مانومترهای نصب شده در کف مقطع دریچه و مستقل از شرایط جریان، بازشدگی دریچه و عمق پایاب، به دست می دهد. به جهت عدم وابستگی ضریب دبی به عمق پایاب، این روش از مزیت های عمده ای چون تخمین پیوسته در شرایط جریان آزاد و مستغرق بر اساس یک معادله واحد و دقت بالاتر در دامنه استغراق های کمتر برخوردار است. با این وجود، روش پیشنهادی حساسیت قابل توجهی به فشار مانومتری زیر دریچه، به

جریان با خروجی مستغرق تقسیم می شود که روابط حاکم بر آن ها به شرح زیر است:

با توجه به شکل ۱ و با صرف نظر کردن از افت انرژی در محل بازشدگی دریچه و با نوشتن رابطه ی انرژی بین مقطع بالادست و پایین دست دریچه، روابط زیر برای دبی جریان در حالت جریان با خروجی آزاد بدست می آیند.

$$q = C_d \cdot G \cdot \sqrt{2g(H-Z)} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{C_c \cdot G}{H-Z}}} \quad (2)$$

که در آن q دبی در واحد عرض دریچه، C_d ضریب دبی دریچه، G مقدار بازشدگی دریچه، g شتاب ثقل، H عمق آب در پشت دریچه، Z ارتفاع آستانه و C_c ضریب فشردگی (انقباض) دریچه می باشد. در کارهای عملی ضریب انقباض برابر ۰/۶۱۱ از دقت مناسبی برخوردار است. برای جریان با خروجی مستغرق نیز می توان از روابط مذکور استفاده کرد؛ با این تفاوت که ضریب دبی علاوه بر G/H به G/y_2 هم بستگی خواهد داشت. هنری [۲] ضریب دبی برای دو حالت جریان آزاد و مستغرق را به صورت نمودار ارائه نمود.

گل محمدی و بیرامی [۹] بر اساس معادله انرژی و مفهوم افزایش فشار در اثر انحنای مقعر سطح آب، روابطی برای تخمین ضریب فشردگی و دبی جریان در دریچه های کشویی و قطاعی با جریان آزاد ارائه نمود. بر اساس روابط ارائه شده، با داشتن عمق آب در بالادست دریچه و میزان بازشدگی دریچه، به راحتی و با دقت

ویژه در محدوده استغراق بیشتر دارد.

با توجه به پژوهش های مختلف صورت گرفته، وجود آستانه در کف کانال می تواند موجب بهبود عملکرد دریاچه شود [۱] و [۸]. از فواید آستانه در زیر دریاچه های قطاعی می توان جلوگیری از تأثیر رسوبات بر کارکرد دریاچه و تغییر ضریب دبی به ازای حالت های مختلف دریاچه و متعاقب آن تغییر دبی جریان را نام برد. در واقع وجود آستانه در زیر دریاچه ها، ارتفاع دریاچه ها را کم نموده و تأثیر نیروی فشاری آب را بر آن کاهش می دهد. با توجه به کاهش ارتفاع دریاچه ها، وزن دریاچه ها نیز کم می شود. لذا به نظر می رسد که وجود آستانه در موقعیت مناسب و شکل مناسب موجب بهبود عملکرد دریاچه گردد. در این مطالعه سعی خواهد شد شکل مناسب آستانه برای دریاچه های کشویی عمودی معرفی شود.

اولین مطالعه مدرن در مورد دریاچه های قائم توسط راجاراتنام و سابرامانیا [۴] صورت گرفت. بر اساس آزمایش های انجام شده، آن ها به این نتیجه رسیدند که مقدار C_d ارتباط مستقیم با نسبت G/H دارد و در صورتی که این نسبت کوچک تر از 0.3 باشد می توان مقدار C_d را از رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$C_d = 0.0297 \frac{G}{H} + 0.589 \quad (3)$$

سوامی [۶] نیز با رگرسیون گیری غیرخطی از نتایج مشاهدات هنری [۲]، برای حالت آزاد رابطه ی (۴) را ارائه کرد.

$$C_d = 0.611 \left(\frac{H-G}{H+15G} \right)^{0.071} \quad (4)$$

آستانه های قرار گرفته در زیر دریاچه ها عمدتاً برای کاهش ارتفاع دریاچه و در نتیجه وزن آن مورد استفاده قرار می گیرند. بسیاری از محققان تأثیر آستانه را روی خصوصیات جریان خروجی آزاد مورد مطالعه قرار داده اند. این مطالعات به لحاظ تجربی تأثیر آستانه های دوزنقه ای با ابعاد مختلف را روی ضریب تخلیه بررسی کرده اند. در مجموع، این مطالعات نشان می دهند که حضور آستانه ها زیر دریاچه ضریب تخلیه را افزایش می دهد و این افزایش به ابعاد آستانه بستگی دارد.

شیواپور و ششا پراکاش [۱۲] بررسی های آزمایشگاهی برای تعیین ضریب دبی جریان دریاچه کشویی عمودی و مایل انجام دادند. ایشان آزمایش های خود را برای 4 زاویه صفر (دریاچه عمود بر جهت جریان)، 15 ، 30 و 45 درجه (زاویه با امتداد قائم و مایل شدن دریاچه

به سمت بالادست) انجام دادند. برای دقت بیشتر در اندازه گیری دبی جریان، به جای استفاده از سرریز، از روش حجمی بهره برده شد. حجم مخزن $4/53$ مترمکعب بود. به عقیده ایشان، دریاچه عمودی باعث همگرایی جریان از زیر آن می شود و هر عاملی که این همگرایی را بیشتر کند (مثل مایل کردن دریاچه)، موجب افزایش ضریب دبی می گردد. نامبردگان رابطه زیر برای تعیین ضریب دبی در حالت جریان آزاد را ارائه نمودند که در آن α زاویه دریاچه (بر حسب رادیان) با امتداد قائم بوده و سایر عوامل قبلاً تعریف شده اند.

$$C_d = 0.645 \left(1 + 0.35 \alpha^{1.25} \right) \left(\frac{H-G}{H+15G} \right)^{0.072} \quad (5)$$

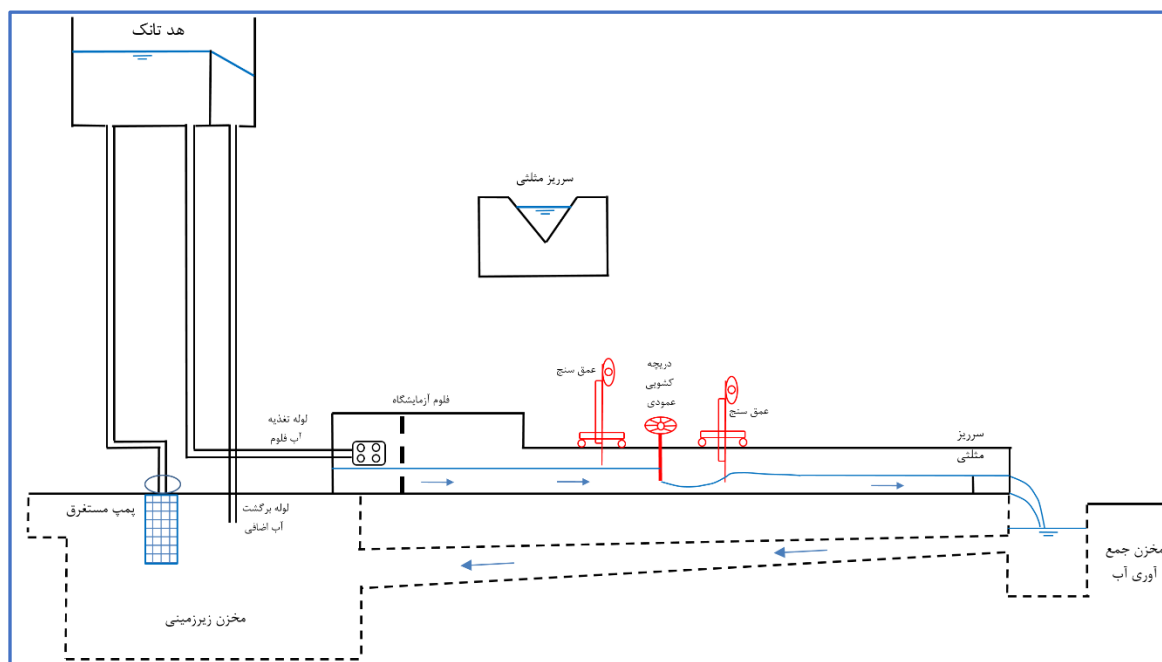
همچنین شیواپور و ششا پراکاش [۱۲] برای تعیین ضریب دبی در حالت جریان مستغرق معادله ی زیر را ارائه کردند که عوامل آن در شکل ۱ تعریف شده اند:

$$C_d = 0.645 \left(1 + 0.152 \alpha^{0.7} \right) \left(\frac{H-G}{H+15G} \right)^{0.072} \left\{ -0.9052 \left(\frac{y_2}{H} \right)^2 + 0.3781 \left(\frac{y_2}{H} \right) + 0.8394 \right\} \quad (6)$$

ضریب دبی برای دریاچه مایل با زاویه 45 درجه نسبت به قائم $25/88$ درصد افزایش نسبت به دریاچه قائم و برای حالت جریان آزاد را نشان داد. این مقدار برای شرایط جریان مستغرق $11/24$ درصد بدست آمد.

در تحقیق حبیب زاده و همکاران [۱۳] افت انرژی بین بالادست دریاچه و مقطع با تنگ شدگی جریان تعیین شد. در اکثر تحقیقات گذشته این افت به علت ناچیز بودن نادیده گرفته شده است. در جریان آزاد این افت بر اثر جریان چرخشی در بالادست دریاچه ایجاد می شود. اثر افت انرژی به صورت $kV_2^2/2g$ در نظر گرفته شد که در آن k ضریب افت و V_2 سرعت در مقطع تنگ شده جریان است. نتایج نشان داد که ضریب افت برای جریان آزاد 0.062 و برای جریان مستغرق 0.088 می باشند.

ناصحی اسکویی و سلماسی [۱۴] با کاربرد دو معادله انرژی و اندازه حرکت و حل هم زمان آن ها با نرم افزار ممتیکا (Mathematica)، تعداد 5200 داده برای تعیین ضریب دبی دریاچه های کشویی عمودی تولید نمودند. سپس دو معادله ی رگرسیونی توسط نرم افزار SPSS برای شرایط جریان آزاد و مستغرق بدست آوردند. نتایج نشان داد که



شکل ۲. جزئیات تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق
 Fig. 2. Details of the laboratory equipment used in this study

توسط یک سرریز مثلثی کالیبره شده در پایین دست اندازه گیری می شود. عمق های جریان با اندازه گیری های نقطه ای با دقت $\pm 0/1$ میلی متر اندازه گیری شدند. در شکل ۲ جزئیات فلوم آزمایشگاهی، هد تانک، مخزن آب زیرزمینی و سرریز مثلثی برای اندازه گیری دبی جریان مشاهده می شود. در شکل ۳ جریان از زیر دریچه کشویی عمودی دیده می شود. پرش هیدرولیکی ضعیفی در پایین دست دریچه و سمت چپ رخ داده است.

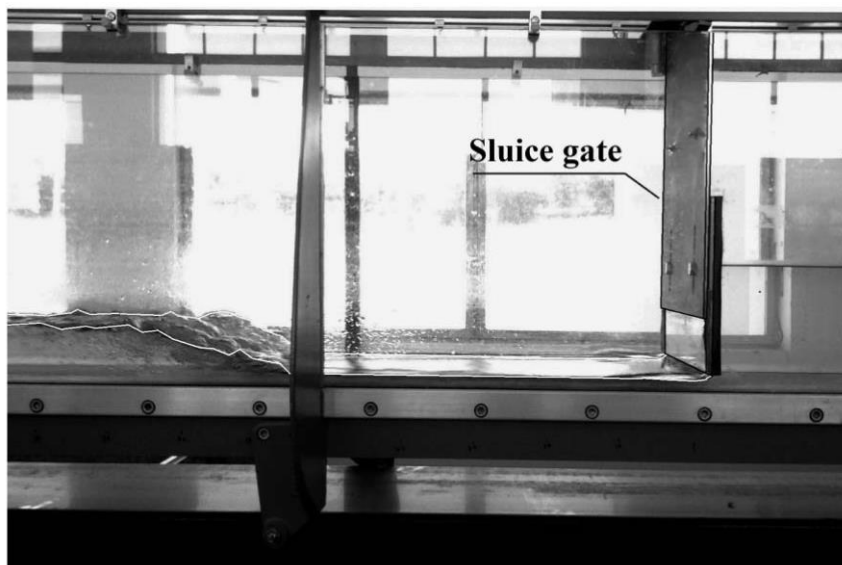
علاوه بر مورد غیر آستانه ای، دوازده آستانه متفاوت در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند. این سطح مقطع های آستانه ای، پنج شکل متفاوت دارند: مثلثی، دوزنقه ای، دایره ای، نیم دایره و نمای گردشده با پایین دست مثلثی (شکل ۴). آستانه ها از چوب ضد آب ساخته شدند و با لایه نازکی از روغن جلا پوشانده شدند تا شکل خود را در مقابل آب حفظ نمایند. مطابق شکل ۳، آستانه ها در بستر به طریقی ثابت شدند که تاج آستانه مستقیماً، در زیر دریچه قرار گرفته اند. ۹ مورد از این آستانه ها به ارتفاع ۵ سانتی متر بودند و ۳ آستانه دایره ای به ارتفاع ۲/۳۵ سانتی متر، ۳/۳ سانتی متر و ۸ سانتی متر بودند. شرایط جریان متفاوت با محدوده دبی مابین ۱۲ تا ۲۶ لیتر بر ثانیه و ۴ بازشدگی دریچه در نظر گرفته شد و لذا مجموعاً

روش پیشنهادی با دیاگرام هنری [۲] مطابقت دارد. در تحقیق مذکور ضریب انقباض دریچه ۰/۶۱ فرض شد.

این تحقیق نتایج بررسی تجربی تأثیر ارتفاع و شکل آستانه از جمله اشکال چند وجهی و غیر چند وجهی را ارائه می نماید که در زیر دریچه قائم قرار گرفته اند. آزمایش ها در مجرای مستطیلی افقی برای حالت های جریان آزاد خروجی دریچه انجام شدند. همچنین معادله ی رگرسیونی برای ارزیابی ضریب دبی برای هر دوی دریچه های آستانه ای و غیر آستانه ای ارائه گردیده و عملکرد آن با داده های محققان دیگر مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش ها

آزمایش ها در فلومی با دیواره های شفاف پلکسی گلاس انجام شدند. فلوم به طول ۹/۴ متر و عرض ۳۰/۵ سانتی متر بود. عمق فلوم ۱۱۰ سانتی متر برای ۲/۷ متر در ابتدا و عمق ۵۳ سانتی متر برای بقیه طول فلوم بود. فلوم به دو دریچه کنترل کننده مجهز شد که یکی مربوط به دریچه عمودی روی مقطع مورد مطالعه و دیگری روی دریچه انتهایی در پایین دست فلوم قرار داشت. جریان به یک پمپ مجهز بود که دارای حداکثر ظرفیت ۵۰ لیتر بر ثانیه می باشد و دبی



شکل ۳. جریان از زیر دریچه کشویی عمودی به همراه پرش هیدرولیکی ضعیف در پایین دست دریچه (سمت چپ)
 Fig. 3. Flow under the vertical sluice gate with a hydraulic jump at the downstream of the gate

حالت آزاد به صورت زیر خواهد بود:

$$F_3 \left(\frac{H_1}{p}, \frac{Z}{G}, \frac{R_s}{G}, \frac{R_s}{H_1}, C_d = \frac{q}{G\sqrt{2gH_1}}, R_n = \frac{\rho Q q}{\mu H_1} \right) = 0 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، $H_1 = H - z$ عمق جریان بالادست اندازه گیری شده از روی آستانه می باشد. در ضمن R_n عدد رینولدز است که در جریان های آشفته که در زیر دریچه اتفاق می افتد از آن صرف نظر می شود. همچنین C_d ضریب دبی و μ بی بعد می باشد و در حقیقت همان عدد فرود زیر دریچه است. لذا معادله نهایی برای تعیین ضریب دبی به صورت زیر بدست می آید:

$$C_d = F_4 \left(\frac{H_1}{p}, \frac{Z}{G}, \frac{R_s}{G}, \frac{R_s}{H_1} \right) \quad (10)$$

۲-۲- معیارهای ارزیابی

مطابق روابط (۷) و (۸) به کمک شاخص آماری خطای نسبی (RE) و ضریب تبیین (R^2) بین ضریب دبی مشاهداتی و محاسباتی مقایسه صورت گرفت.

$$RE = \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

تعداد ۱۸۰ اجرا مورد آزمایش قرار گرفته اند.

برای محاسبه ضریب دبی از رابطه ی (۱) که شکل ساده شده معادله انرژی است استفاده گردید (شکل ۱) و تأثیر شکل و ارتفاع آستانه در ادامه مورد بحث قرار می گیرند.

۲-۱- آنالیز ابعادی

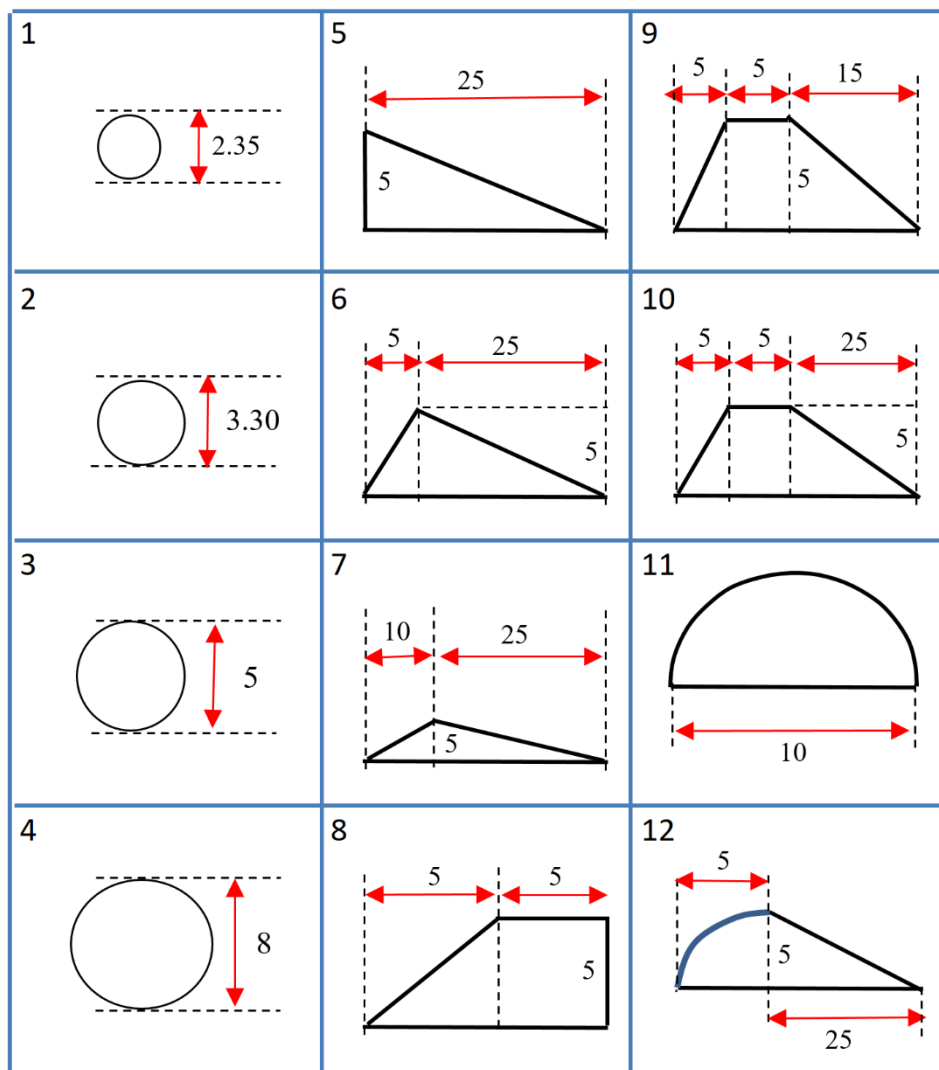
برای جریان آزاد از زیر دریچه کشویی عمودی دارای آستانه که در شکل ۱ نشان داده شده است، روابط کاربردی برای تعیین C_d به صورت زیر نوشته می شود:

$$F_1(\rho, Q, b, g, \mu, H, Z, G, \Phi) = 0 \quad (7)$$

که در آن ρ جرم مخصوص آب، Q دبی جریان، b عرض کانال، g شتاب ثقل، μ ویسکوزیته دینامیک آب، H عمق آب در پشت دریچه، Z ارتفاع آستانه، G مقدار بازشدگی دریچه و Φ که تابعی است که به شکل آستانه وابسته می باشد. دبی در واحد عرض کانال به صورت $q = Q/b$ تعریف می شود. در این تحقیق برای تابع شکل آستانه (Φ) از محیط خیس شده (p) و شعاع هیدرولیکی (R_s) مقطع عرضی آستانه ها استفاده شده است. بنابراین داریم:

$$\Phi = F_2(R_s, p) \quad (8)$$

طبق قضیه باکینگهام ضریب دبی دریچه کشویی با آستانه در



شکل ۴. آستانه های مختلف آزمایش شده (تمام واحدها سانتیمتر است)

Fig. 4. Different tested sills (all units are in cm)

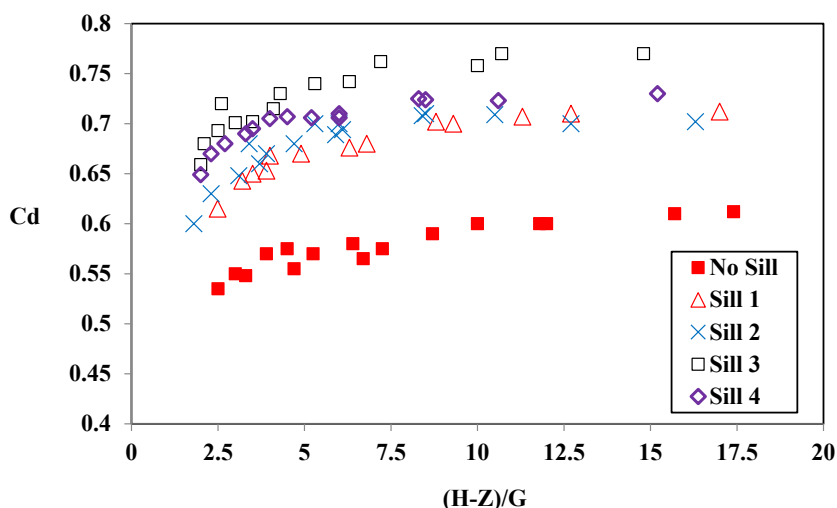
بیشتر از دريچه بدون آستانه است. همچنين از هنگامي که ارتفاع آستانه افزايش می يابد، مقادير C_d افزايش می يابد تا جایی که به یک ارتفاع مشخص برسد، سپس مجدداً مقادير C_d کاهش می يابد. آستانه آزمایش شده با ارتفاع ۵ سانتی متر بالاترين ضريب دبی را ارائه می نمايد.

همچنين شکل ۵ نشان می دهد که با کاهش باز شدگی دريچه (G) ، ضريب دبی (C_d) افزايش می يابد. توجه هيدروليکی آن اين است که با کاهش باز شدگی دريچه، جريان از زیر آن همگرا شده و به همراه افزايش شتاب جريان، از فشار هيدرواستاتیک کاسته می شود. به طوری که فشار به کمتر از $\gamma_w H_1$ می رسد که در آن γ_w وزن مخصوص آب است. اين کاهش فشار و مکش آب، موجب افزايش C_d می گردد. نتايج پژوهش های راجارائنام و هامفريز [۱۵] نیز نشان

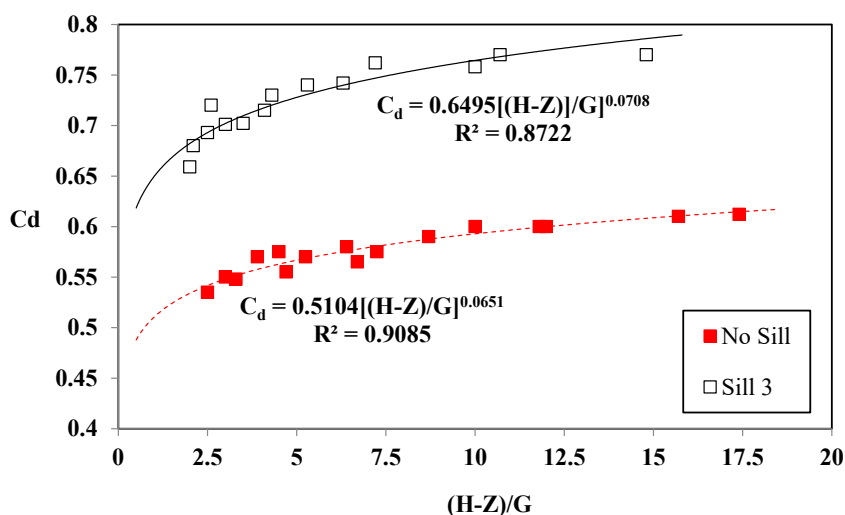
در معادله های فوق متغيرهای P_i و O_i به ترتيب مقادير حاصل از رابطه رياضي رگرسيون و اندازه گيري شده، \bar{P} و \bar{O} به ترتيب متوسط مقادير رابطه رياضي و اندازه گيري شده و n تعداد کل داده ها است. هر چه مقدار شاخص (RE) کمتر باشد و همچنين هر چه مقدار (R^2) بيشتر باشد، دقت روش بالاتر خواهد بود.

۳- نتايج و بحث

همانطوری که قبلاً اشاره شد چهار آستانه دایره ای دارای ارتفاع (قطر) ۲/۳۵ سانتی متر، ۳/۳ سانتی متر، ۵ سانتی متر و ۸ سانتی متر مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۵ نشان می دهد که ارتفاع آستانه نقش مهمی در مقادير C_d ایفا می کند. در دريچه با آستانه، ضريب دبی



شکل ۵. ضریب دبی دریاچه دارای آستانه های دایره ای با قطرهای متفاوت و مقایسه با حالت بدون آستانه
 Fig. 5. Comparison of discharge coefficient for sluice gate with circular sills and without sill



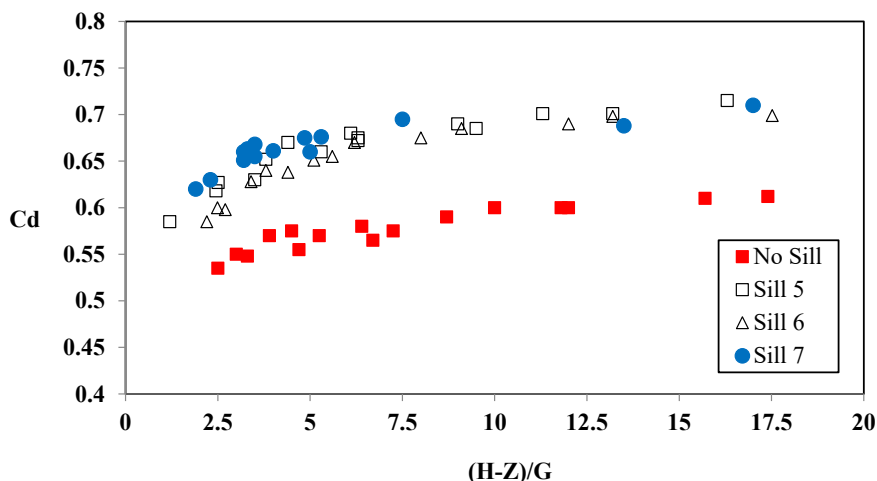
شکل ۶. ضریب دبی دریاچه با آستانه دایره ای و بدون آستانه
 Fig. 6. Discharge coefficient for vertical slide gate in two types (with circular sill under the gate and without sill)

۱-۳- آستانه چند وجهی

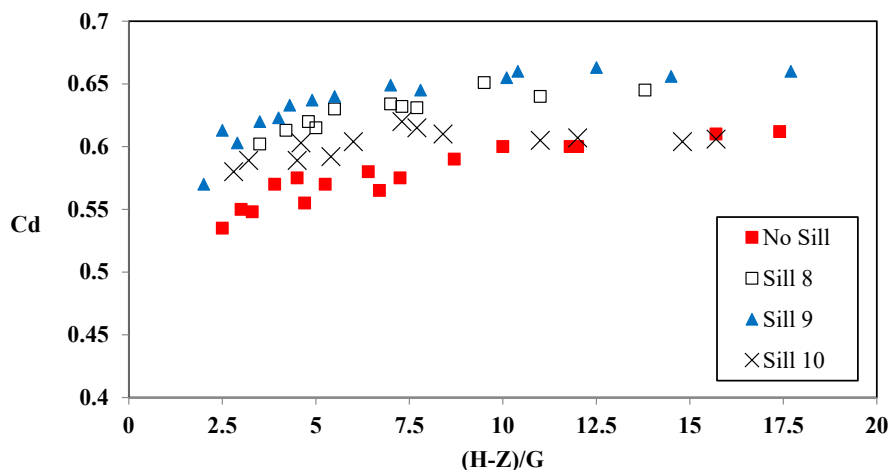
تأثیر شیب بالادست: تأثیر شیب بالادست روی C_d با استفاده از سه آستانه مثلثی دارای یک شیب پایین دست ثابت ۱:۵ (عمودی به افقی) و شیب های بالادست ۱۷:۰H، ۱۷:۱H و ۱۷:۲H مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۷ تغییرات ضریب تخلیه در مقابل پارامترهای بی بعد $(H-Z)/G$ ارائه شده است. شکل نشان می دهد که به خصوص برای مقادیر $(H-Z)/G$ کمتر از ۸، تأثیر شیب بالادست بیشتر می باشد؛ اما برای مقادیر $(H-Z)/G$ بیشتر، تأثیر شیب جریان به حداقل می رسد.

داده که کاهش فشار از زیر دریاچه تا فاصله ۵ برابر ارتفاع بازشدگی دریاچه (ΔG) در بالادست دریاچه ایجاد می گردد.

در شکل ۶ ضریب دبی دریاچه با آستانه به ارتفاع ۵ سانتی متر (آستانه ۳) با حالت بدون آستانه مقایسه شده است. مشاهده می شود که آستانه دایره ای ضریب دبی را حداقل ۲۳ درصد و حداکثر ۳۱ درصد افزایش داده است. همچنین در شکل ۶ دو معادله توانی با ضرایب تعیین مناسب ۰/۸۷ و ۰/۹۱ به ترتیب برای حالت آستانه دار و بدون آستانه برازش داده شده اند.



شکل ۷. تأثیر شیب بالادست روی ضریب دبی در آستانه مثلثی
 Fig. 7. Effect of upstream slope on the C_d in the triangular sill

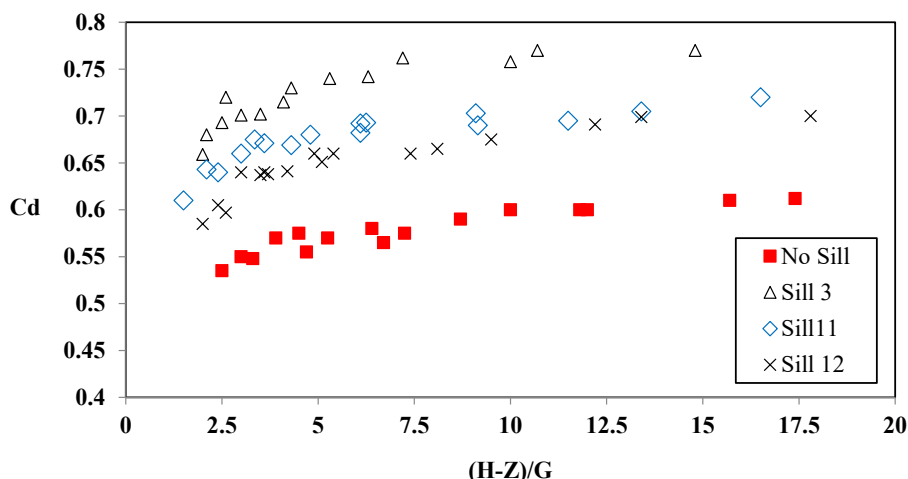


شکل ۸. تأثیر شیب پایین دست آستانه روی ضریب دبی در آستانه ذوزنقه‌ای و مقایسه با حالت بدون آستانه
 Fig. 8. Effect of downstream slope on the C_d in the trapezoidal sill

سه آستانه و همچنین بدون آستانه را نشان می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که شیب پایین دست تأثیر مثبتی روی ضریب دبی دارد و در بین آستانه‌های ذوزنقه‌ای شیب پایین دست ۱۷:۳H بیشترین تأثیر را در افزایش C_d دارد (آستانه شماره ۹). در این جا نیز همانند دلیل ارائه شده برای اثر شیب بالادست بر C_d می‌توان اظهار نمود که به ازای شیب پایین دست ملایم‌تر، خطوط جریان دورشونده از دریچه به آرامی تغییر جهت داده و لذا افت انرژی کمتری را باعث می‌شوند. منتها برای شیب پایین دست ۱۷:۵H چون کاهش شیب موجب افزایش طول وجه شیب دار شده، لذا طول تماس جریان آب با وجه شیب دار افزایش یافته و افت انرژی را بیشتر نموده است.

برای آستانه‌های آزمایش شده، شیب بالادست ۱۷:۲H بهترین شیب در نظر گرفته می‌شود، چون حداکثر ضریب دبی را ارائه می‌نماید (آستانه شماره ۷). دلیل هیدرولیکی آن را می‌توان این گونه توجیه نمود که به ازای شیب بالادست ملایم‌تر، خطوط جریان نزدیک شونده به دریچه به آرامی تغییر جهت داده و لذا افت انرژی کمتری را باعث می‌شوند. افت انرژی کمتر، باعث افزایش C_d می‌گردد.

تأثیر شیب پایین دست: برای درک تأثیر شیب پایین دست آستانه روی C_d ، سه آستانه ذوزنقه‌ای با شیب بالادست ثابت ۱۷:۱H و شیب‌های پایین دست از ۱۷:۰H، ۱۷:۳H و ۱۷:۵H مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۸ تغییرات C_d با $(H-Z)/G$ برای



شکل ۹. ضریب دبی برای آستانه های غیر چند وجهی
 Fig. 9. Variation of C_d for non-polyhedron sills

آزمایش های ۵ تحقیق دیگر راجارانتام و سابرامانیا [۴]، راجارانتام [۵]، نگم و همکاران [۸]، سوامی [۶] و شیواپور و ششا پراکاش [۱۲] مقایسه شده است. ضریب های معادله (۴) مجدداً بر اساس داده های کنونی ارزیابی شدند و رابطه ی (۱۳) برای تخمین ضریب دبی دریاچه کشویی قائم و بدون آستانه با جریان آزاد حاصل گردید.

$$C_d = 0.63 \left(\frac{H-G}{H+15G} \right)^{0.0649} \quad (13)$$

معادله ی (۱۳) با داده های موجود از دیگر محققان در شکل ۱۰ همخوانی داشته و مقدار C_d را به طور صحیح با حداکثر خطا کمتر از ۲/۷ درصد برای داده های کنونی و کمتر از ۴/۸ درصد برای کل داده های موجود پیش بینی می کند.

ب- دریاچه با آستانه

برای آستانه های چند وجهی، شیب پایین دست و شکل تاج پارامترهای اصلی شکل هستند. درحالی که برای اشکال غیر چند وجهی این طور نیست. از این رو یک عامل شکلی مورد نیاز است که در این تحقیق محیط خیس شده آستانه (P) و شعاع هیدرولیکی آستانه $\left(R_s = \frac{A}{P} \right)$ انتخاب گردید که در آن A سطح مقطع آستانه است. با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی، معادله ی (۱۴) به

دست آمد:

$$C_d = 0.63 \left(\frac{H_1 - G}{H_1 + 15G} \right)^{0.0649} \frac{\left(1 + \frac{Z}{G} \right)^{0.3618} \left(1 + \frac{H_1}{P} \right)^{0.0434}}{\left(1 + \frac{R_s}{G} \right)^{0.5169} \left(1 - \frac{R_s}{H_1} \right)^{0.3887}} \quad (14)$$

لذا کاهش افت انرژی با ملایم نمودن شیب، تا یک حد و آستانه ای صورت پذیرفته و برای شیب های خیلی ملایم، اثر طول تماس جریان با وجه شیب دار غالب شده و افت انرژی را افزایش داده است. به نظر می رسد در این مورد نیاز به آزمایش های بیشتری باشد.

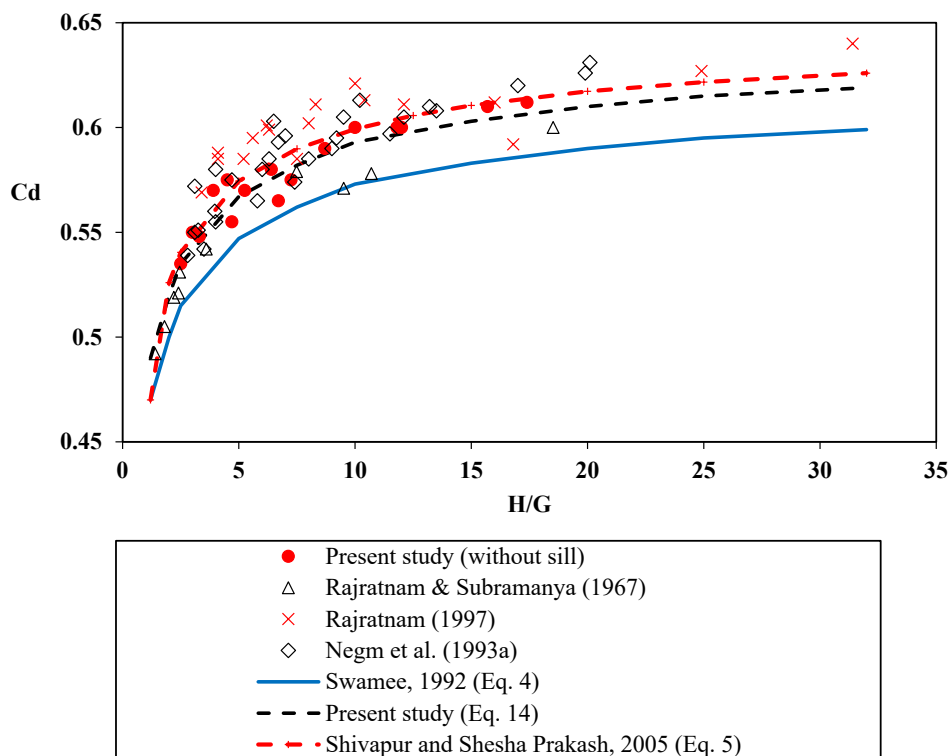
۲-۳- آستانه غیر چند وجهی

شکل ۹ تأثیر آستانه غیر چند وجهی بر ضریب دبی را نشان می دهد. در این شکل نتایج بدست آمده برای سه آستانه متفاوت دارای ارتفاع ۵ سانتی متری نشان داده می شوند. این آستانه ها به شکل دایره ای، نیم دایره ای و ربع دایره دمدمار با شیب پایین دست ۱۷:۵H است. شکل ۹ نشان می دهد که یک آستانه دایره ای شکل بالاترین ضریب دبی را در مقایسه با موارد دیگر ارائه می نماید (آستانه شماره ۳). آستانه دایره ای به قطر ۵ سانتی متر به افزایش متوسطی در حدود ۲۸/۶٪ بالاتر از مقادیر C_d غیر آستانه ای منجر می شود، در حالی که آستانه چند وجهی مثلثی شکل افزایش متوسطی در حدود ۱۹٪ بیشتر از مقدار C_d مورد غیر آستانه ای ایجاد می نماید. وجود آستانه ها ممکن است فشار منفی در پایین دست دریاچه ها ایجاد کند که دبی جریان و بنابراین C_d را افزایش دهد.

۳-۳- توسعه معادله دبی

الف- دریاچه غیر آستانه ای

در شکل ۱۰ نتایج محاسبه C_d بدون آستانه در این تحقیق با نتایج



شکل ۱۰. مقادیر C_d برای دریچه کشویی قائم بدون آستانه در این تحقیق و مقایسه با سایر محققان

Fig. 10. Variation of C_d for vertical sluice gate without sill in present study and comparison with the other studies

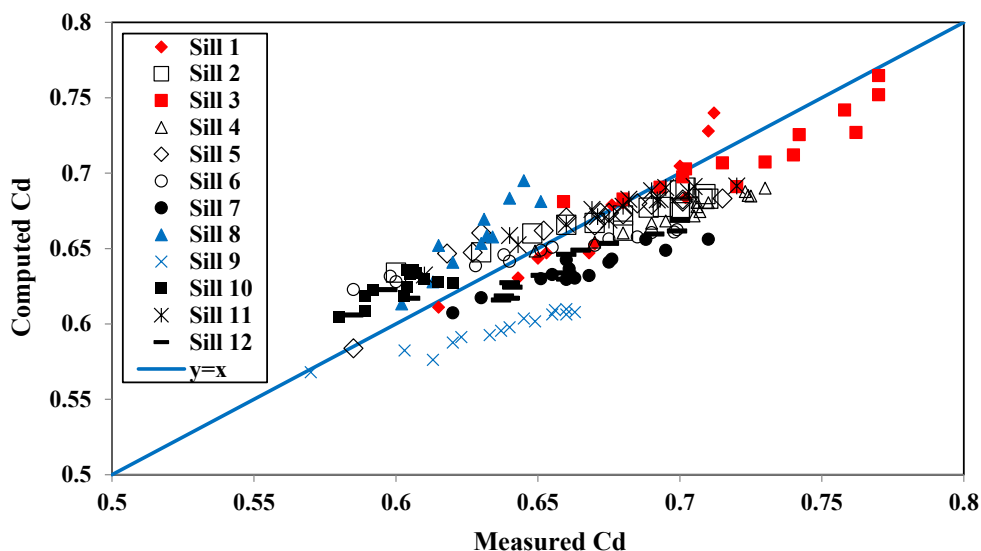
آستانه کاربرد دارد.

معادله ی (۱۴) بیانگر این موضوع است که با افزایش محیط خیس شده آستانه، از ضریب دبی کاسته می شود. در واقع افزایش محیط خیس شده باعث تماس بیشتر جریان آب با سطح آستانه داشته و این خود موجب افت بیشتر انرژی جریان می شود. افت بیشتر انرژی به نوبه خود از دبی جریان می کاهد.

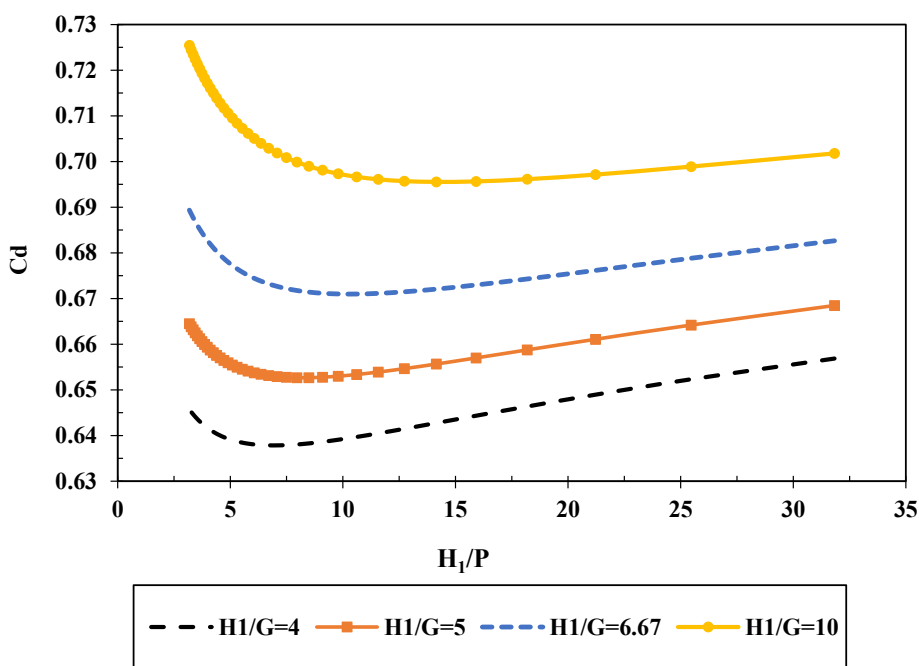
شکل ۱۱ مقایسه بین C_d اندازه گیری شده و موارد محاسبه شده با استفاده از معادله ی (۱۴) را ارائه می نماید که در آن تطابق قابل قبولی بین نقاط آزمایشگاهی و معادله رگرسیونی ۱۴ مشاهده می شود.

همان طوری که قبلاً اشاره شد، ارتفاع آستانه عامل مهمی در مقادیر C_d می باشد و به نظر می رسد یافته های آزمایش منطقی باشند که در آن مقادیر C_d ، با افزایش ارتفاع آستانه (Z) تا مقدار مشخصی، کاهش می یابد. سپس ضریب دبی با افزایش بیشتر Z روند افزایشی نشان می دهد. در شکل ۱۱، واضح است که معادله توسعه یافته مقادیر C_d را به نحو مناسبی پیش بینی می کند.

معادله ۱۴ را می توان برای هردوی جریان آزاد دریچه غیر آستانه ای و آستانه ای مورد استفاده قرار داد و می توان مقادیر C_d را با حداکثر خطای کمتر از ۶٪ پیش بینی کرد. برای دریچه غیر آستانه ای، Z برابر با صفر خواهد بود، P بینهایت خواهد بود و H_1 برابر با H می باشد و معادله (۱۴) به معادله (۱۳) تبدیل خواهد شد. برای بدست آوردن ضرایب ثابت و توان های رابطه ی (۱۴) از تکنیک ریاضی رگرسیون بهره برده شده است که در تحقیق حاضر از نرم افزار قدرتمند و شناخته شده SPSS استفاده گردیده است. معیار تولید معادله نیز اندازه گیری های آزمایشگاهی است که با صرف هزینه و وقت زیاد به انجام رسیده است. در ضمن قابل ذکر است که در توان ۰/۰۷۱ در معادله سوامی [۶] به توان ۰/۰۶۵ تغییر پیدا کرده است. سوامی [۶] از نتایج مشاهده های آزمایشگاهی هنری [۲] برای حالت جریان آزاد و دریچه بدون آستانه، معادله خود (رابطه ی (۴)) را ارائه نمود. رابطه ی (۱۴) ارائه شده در تحقیق حاضر، در حقیقت می تواند رابطه توسعه یافته و جایگزین معادله سوامی [۶] تلقی گردد، زیرا که هم برای دریچه با آستانه و هم برای دریچه بدون



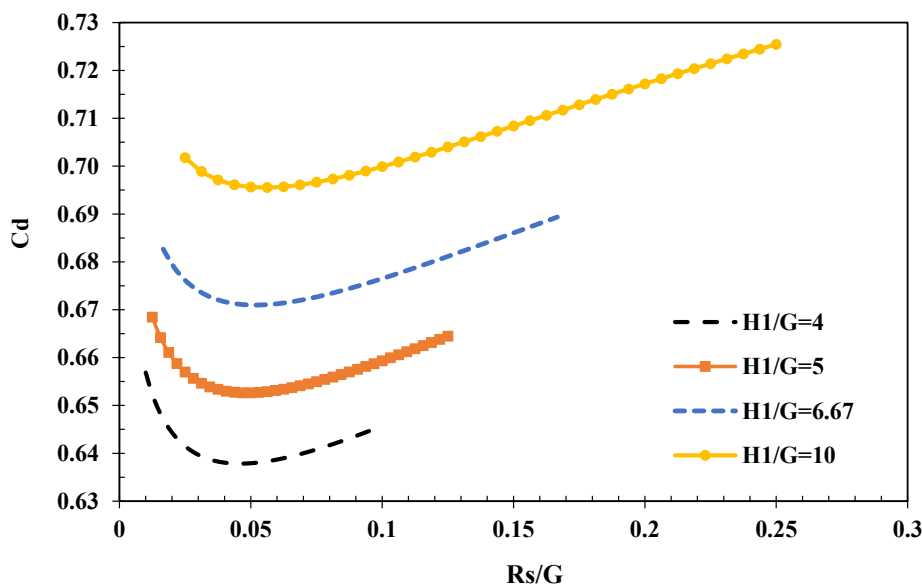
شکل ۱۱. مقادیر C_d اندازه گیری شده و محاسبه شده برای شکل های متفاوت آستانه
 Fig. 11. Measured and computed C_d values for different sill shapes



شکل ۱۲. تغییرات ضریب دبی در مقابل H_1/P به ازای چهار کمیت بی بعد H_1/G
 Fig. 12. Changes in C_d versus H_1/P for four dimensionless parameters of H_1/G

کمتر دریاچه (۰/۲ متر) مقدار ضریب دبی بیشتری نسبت به بازشدگی بیشتر (۰/۵ متر) ایجاد می کند. در ضمن به ازای یک مقدار مشخصی از بازشدگی دریاچه، ضریب دبی مقدار حداقل را اختیار می کند. این حداقل مقدار با بازشدگی دریاچه تغییر می کند و مقدار ثابتی نیست.

معادله ی (۱۴) اطلاعات مفیدی دیگری را در مورد ضریب دبی در اختیار می گذارد. شکل ۱۲ تغییرات ضریب دبی را در مقابل ارتفاع آستانه به ازای چهار بازشدگی ۰/۲ تا ۰/۵ متر دریاچه را ارائه می دهد. این شکل بر اساس معادله ی (۱۴) رسم گردیده است. بازشدگی



شکل ۱۳: تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت شعاع هیدرولیکی به بازشدگی دریاچه (R_s/G)
 Fig. 13. Variations of C_d versus the R_s/G

با افزایش شعاع هیدرولیکی بوده و افزایش آن به علت همگرایی بیشتر خطوط جریان عبور کننده از زیر دریاچه است که این عامل بر افزایش مقاومت در برابر جریان از یک حدی به بعد غالب می گردد. حد نهایی ضریب دبی برای دریاچه آستانه دار ۰/۷۸ و حد نهایی آن برای حالت بدون آستانه ۰/۶۱ می باشد.

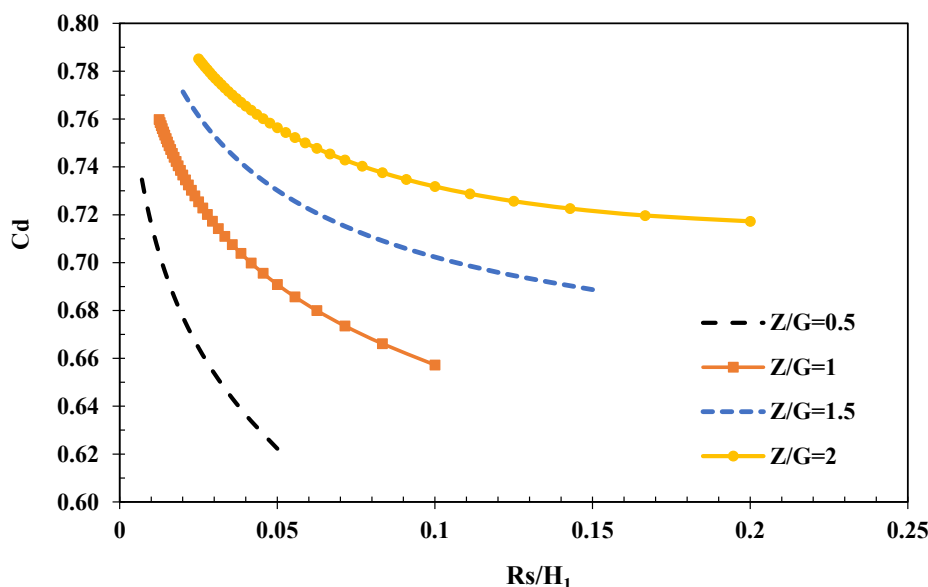
شکل ۱۴ تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت شعاع هیدرولیکی به ارتفاع آب بالادست دریاچه (R_s/H_1) به ازای چهار عامل بی بعد Z/G از ۰/۵ تا ۲ و برای آستانه دایره ای را نشان می دهد. ملاحظه می گردد که با افزایش R_s/H_1 ، ضریب دبی روند کاهشی دارد. به بیان دیگر افزایش ارتفاع آب پشت دریاچه موجب افزایش ضریب دبی می گردد. به نظر می رسد که همگرایی بیشتر خطوط جریان عبور کننده از زیر دریاچه علت این پدیده باشد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر ۱۲ آستانه با مقاطع مختلف هندسی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. این مقاطع شامل شکل های دایره، نیم دایره، مثلثی، دوزنقه ای و نمای گردشده با پایین دست مثلثی بودند. نمودارها و معادلات همبستگی بر اساس ۱۸۰ داده آزمایشگاهی بدست آمده اند. بررسی تأثیر شکل های مختلف هندسی آستانه بر ضریب دبی جریان در کارهای قبلی دیده نمی شود. نتایج

همچنین شکل ۱۲ نشان می دهد که ضریب دبی با افزایش نسبت بی بعد H_1/P ابتدا کاهش ولی سپس افزایش می یابد. احتمالاً توجیه فیزیکی آن این است که ابتدا با اندکی کاهش در P ، خطوط جریان نزدیک شونده به دریاچه بطور ناگهانی تغییر جهت داده و همگرا می شوند. این پدیده موجب کاهش جزئی در C_d می گردد (تغییر جهت خطوط جریان، افت انرژی را افزایش می دهد). منتها با کاهش بیشتر P ، این بار محیط خیس شده آستانه به سمت صفر میل نموده و باعث کاهش افت انرژی می گردد که به نوبه خود موجب افزایش در C_d می گردد. از طرف دیگر شکل ۱۲ نشان می دهد که با افزایش عامل بی بعد H_1/G ، ضریب دبی بیشتر می شود. به عبارت دیگر افزایش بار آبی پشت دریاچه و یا کاهش بازشدگی دریاچه، ضریب دبی را بیشتر می کند. هر دوی این عوامل موجب همگرایی بیشتر جریان از زیر دریاچه شده که به نوبت خود باعث افزایش ضریب دبی می گردند.

شکل ۱۳ تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت شعاع هیدرولیکی به بازشدگی دریاچه (R_s/G) به ازای چهار عامل بی بعد H_1/G از ۴ تا ۱۰ و برای آستانه دایره ای را نشان می دهد. منحنی های دریاچه با آستانه با استفاده از معادله d (۱۴) رسم شده اند. ملاحظه می شود که با افزایش R_s/G ، ضریب دبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. کاهش آن به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان و افت انرژی بیشتر



شکل ۱۴: تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت شعاع هیدرولیکی به ارتفاع آب بالادست دریاچه

Fig. 14. Variations of C_d versus the (R_s/H_1)

بیشتری مانند توزیع سرعت و فشار در بالادست، زیر دریاچه و پایین دست دریاچه در اختیار قرار دهد.

واژه نامه

- A سطح مقطع آستانه
- b عرض کانال
- C_d ضریب دبی
- G ارتفاع بازشدگی دریاچه
- g شتاب ثقل زمین
- H عمق جریان بالادست در بالادست دریاچه
- H_1 عمق جریان بالادست مبنا از روی آستانه
- P محیط خیس شده آستانه
- Q دبی جریان در کانال
- q دبی در واحد عرض کانال
- R_n عدد رینولدز
- R_s شعاع هیدرولیکی آستانه
- Z ارتفاع آستانه
- ϕ تابع شکل آستانه

نشان می دهند که حضور آستانه زیر دریاچه قائم تأثیر مثبتی روی خصوصیات جریان دارد. بدین معنی که ضریب دبی را افزایش می دهد. هر دوی شکل و ارتفاع آستانه نقش مهمی در افزایش ضریب دبی ایفا می نماید. برای اشکال آزمایش شده چنین نتیجه گیری می شود که آستانه دایره ای مؤثرترین شکل در مقایسه با همه اشکال دیگر بوده و آستانه مثلثی در مقایسه با اشکال آستانه ای چند وجهی مؤثرترین می باشد. معادله ای برای محاسبه ی ضریب دبی جریان برای هر دوی موقعیت های دریاچه ای آستانه ای و غیر آستانه ای بدست آمد. معادله شامل پارامترهای جریان، بازشدگی دریاچه و پارامترهای شکل آستانه می باشد. این معادله ضریب دبی را به درستی پیش بینی می کند و برای دریاچه های آستانه ای دریاچه های معمولی در درون محدوده ای که معادله در آن توسعه یافته است می تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای ادامه کار در پژوهش های بعدی پیشنهاد می شود تا محققین بعدی آزمایش های بیشتری انجام دهند تا تعداد داده ها فراتر از ۱۸۰ عدد گردد و ضرایب معادلات همبستگی احیانا اصلاح و خطاها کاهش یابند. پیشنهاد دیگر این که دریاچه در حالت مستغرق نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین شبیه سازی عددی توسط نرم افزارهایی مانند FLOW3D و FLUENT می تواند اطلاعات هیدرولیکی مفید

پیوست: داده های مورد استفاده در تحقیق حاضر

Without sill		Sill 5		Sill 10	
(H-Z)/G	Cd	(H-Z)/G	Cd	(H-Z)/G	Cd
2.5	0.535	1.2	0.585	2.8	0.58
3.3	0.548	2.45	0.618	3.2	0.589
3	0.55	2.51	0.627	4.5	0.589
3.9	0.57	3.5	0.63	4.6	0.603
4.5	0.575	3.8	0.652	5.4	0.592
4.7	0.555	4.4	0.67	6	0.604
5.25	0.57	5.3	0.66	7.3	0.62
6.4	0.58	6.1	0.68	7.7	0.615
6.7	0.565	6.3	0.675	8.4	0.61
7.25	0.575	6.3	0.672	11	0.605
8.7	0.59	9	0.69	12	0.607
10	0.6	9.5	0.685	14.8	0.604
11.8	0.6	11.3	0.701	15.7	0.606
12	0.6	13.2	0.701	Sill 11	
15.7	0.61	16.3	0.715	1.5	0.61
17.4	0.612	Sill 6		2.1	0.643
Sill 1		2.2	0.585	2.4	0.64
2.49	0.615	2.49	0.6	3	0.66
3.2	0.643	2.7	0.598	3.35	0.675
3.5	0.65	3.4	0.628	3.6	0.671
3.9	0.653	3.8	0.64	4.3	0.669
4	0.668	4.4	0.638	4.8	0.68
4.9	0.67	5.1	0.651	6.1	0.682
6.3	0.676	5.6	0.655	6.1	0.692
6.8	0.68	6.2	0.67	6.25	0.693
8.8	0.702	8	0.675	9.1	0.703
9.3	0.7	9.1	0.685	9.15	0.69
11.3	0.707	12	0.69	11.5	0.695
12.7	0.71	13.2	0.698	13.4	0.705
17	0.712	17.52	0.699	16.5	0.72
Sill 2		Sill 7		sill 12	
1.8	0.6	1.9	0.62	2	0.585
2.3	0.63	2.3	0.63	2.4	0.605
3.1	0.648	3.2	0.651	2.6	0.597
3.7	0.66	3.3	0.663	3	0.64
3.9	0.67	3.5	0.655	3.5	0.637
4.7	0.68	3.5	0.668	3.6	0.64
3.4	0.68	3.2	0.66	3.7	0.638
5.3	0.7	4	0.661	4.2	0.641
5.9	0.689	4.85	0.675	4.9	0.66
6	0.7	5	0.66	5.1	0.651
6.1	0.694	5.3	0.676	5.4	0.66
8.4	0.708	7.5	0.695	7.4	0.66

پیوست: داده های مورد استفاده در تحقیق حاضر

Sill 2		Sill 7		sill 12	
8.5	0.71	13.5	0.688	8.1	0.665
10.5	0.709	17	0.71	9.5	0.675
12.7	0.7	Sill 8		12.2	0.691
16.3	0.702	3.5	0.602	13.4	0.699
Sill 3		4.2	0.613	17.8	0.7
2	0.659	4.8	0.62		
2.1	0.68	5	0.615		
2.5	0.693	5.5	0.63		
3	0.701	7	0.634		
2.6	0.72	7.3	0.632		
3.5	0.702	7.7	0.631		
4.1	0.715	9.5	0.651		
4.3	0.73	11	0.64		
5.3	0.74	13.8	0.645		
6.3	0.742	Sill 9			
7.2	0.762	2	0.57		
10	0.758	2.5	0.613		
10.7	0.77	2.9	0.603		
14.8	0.77	3.5	0.62		
Sill 4		4	0.623		
2	0.649	4.3	0.633		
2.3	0.67	4.9	0.637		
2.7	0.68	5.5	0.64		
3.3	0.69	7	0.649		
3.5	0.695	7.8	0.645		
4	0.705	10.1	0.655		
4.5	0.707	10.4	0.66		
5.2	0.706	12.5	0.663		
6	0.706	14.5	0.656		
6	0.71	17.7	0.66		
8.3	0.725				
8.5	0.724				
10.6	0.723				
15.2	0.73				

Macmillan Publishing Co. Inc, 1966.

- [4] N. Rajratnam, K. Subramanya, K., Flow equation for the sluice gate, Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 93 (4), (1967), 167-186.
- [5] N. Rajratnam, Free flow immediately below sluice gates, Journal of Hydraulics Division, ASCE, 103 (4),

مراجع

- [1] A.A. Alhamid, Coefficient of discharge for free flow sluice gates, J King Saud Univ, 11, (1999) 33-48.
- [2] H. Henry, Discussion of diffusion of submerged jets, Trans. Proc. ASCE. 115 (1950), 687-697.
- [3] F.M. Henderson, Open channel flow, New York,

- [11] A. Barghi Khezerloo, H. Khalili Shayan, J. Farhoudi, A.R. Vatankhah, Developing a new method for estimating discharge coefficient of sluice gates under free and submerged flow conditions, *Water and soil science, University of Tabriz*, 26 (4.1) (2015) 207-221 (In Persian).
- [12] A.V. Shivapur, M.N. Shesha Prakash, Inclined sluice gate for flow measurement, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 11 (1), (2005) 46-56.
- [13] A. Habibzadeh, A.R. Vatankhah, N. Rajaratnam, Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (9), (2011) 1079-1084.
- [14] N. Nasehi Oskuyi, F. Salmasi, Vertical sluice gate discharge coefficient, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2 (3), (2012) 108-114.
- [15] N. Rajaratnam, J.A. Humphries, Free flow upstream of vertical sluice gates, *Journal of Hydraulic Research*, 20 (5), (1982) 427-437.
- (1997), 354-351.
- [6] P.K. Swamee, Sluice gate discharge equation, *Journal of Irrigation and Drainage Division. ASCE*, 118 (1), (1992) 57-60.
- [7] J. Ohatsu, Y. Yasuda, Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 120 (3), (1994) 332-346.
- [8] A.M. Negm, M. Abdellateef, T. Owais, Effect of under gate sill crest shape on the supercritical free flow characteristics, *Proc. AEIC 93 Conference*, 18. 21 Dec. 1993. Cairo. pp.230-241.
- [9] M.H. Golmohammadi, M.K. Beyrami, Estimation of discharge for free flow under sluice and radial gates, *Water and sewage*, 2 (2011) 94-101 (In Persian).
- [10] H. Khalili Shayan, J. Farhoudi, R. Roshan, Estimation of discharge coefficient of flow from sluice and radial gates, *Iranian Water Researches Journal*, 9, (1.16), (2015) 153-167 (In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Salmasi, R. Nourozi Sarkarabad, Investigation of different geometric shapes of sills on the discharge coefficient of a vertical sluice gate, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(1) (2020) 21-36.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14232.5596](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14232.5596)

