

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تئوری و عددی ضریب‌دبی دریاچه‌های کشویی و قطاعی در شرایط کاربرد آستانه

حمیدرضا عباس‌زاده^۱، کیومرث روشنگر^{۲*}، زهرا صلاح‌پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

چکیده

دریاچه‌های زیرگذر سازه‌هایی هستند که در آن‌ها حرکت آب از زیر دریاچه صورت می‌پذیرد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی عددی تأثیر وجود آستانه بر مشخصات هیدرولیکی جریان در دریاچه‌های کشویی و قطاعی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D است. بدین منظور، آستانه با مشخصات هندسی مختلف در عرض، ضخامت و ارتفاع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص‌های آماری در مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل‌های k-ε، LES و k-ω از دقت بالایی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. شاخص RMSE در مدل آشفتگی RNG برای عمق آب بالادست دریاچه و ضریب‌دبی به ترتیب ۰/۰۷۹- متر و ۰/۱۱۷- بوده و میانگین درصد خطای نسبی برای این پارامترها به ترتیب ۲/۹۴٪ و ۱/۶۰٪ می‌باشد. شاخص کلینگ گوپتا (KGE) برای مش‌بینه و مدل آشفتگی مذکور در بازه بسیار خوب (very good) قرار دارد. در یک بازه‌شدگی یکسان در حالت بدون آستانه و با آستانه هم‌عرض کانال، ضریب‌دبی با آستانه، بیشتر از حالت بدون آستانه است. در بین آستانه‌های بررسی شده میزان ضریب‌دبی در آستانه نیم‌دایره بیشتر از آستانه مستطیلی است. همچنین ضریب‌دبی دریاچه قطاعی در حالت بدون آستانه و با آستانه بیشتر از دریاچه کشویی در حالت متناظر است. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت آستانه منجر به افزایش تنش برشی جریان شده و به تبع آن ضریب‌دبی کاهش می‌یابد. ضریب‌دبی دریاچه با ارتفاع‌های مختلف آستانه همواره بیشتر از شرایط بدون آستانه می‌باشد اما به‌ازای نسبت ثابت پارامتر عمق بالای آستانه به میزان بازشدگی، ضریب‌دبی با افزایش ارتفاع آستانه تا حد مشخصی افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: دریاچه کشویی، دریاچه قطاعی، ضریب‌دبی، معادله غیرخطی رگرسیونی، FLOW-3D

مقدمه

هیدرولیک بوده و کمک شایانی به مهندسان و کاربران در طراحی این نوع سازه‌ها می‌کند. از پرکاربردترین این دریاچه‌ها، دریاچه‌های کشویی و قطاعی هستند که به‌صورت صفحه‌ای عمود و استوانه‌ای شکل در مسیر جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مواقعی که ارتفاع دریاچه از یک معیار خاص طراحی تجاوز نماید، از دریاچه‌های دوتایی یا سه‌تایی استفاده می‌شود (Negm et al., 1998). در حالی که استفاده از این نوع دریاچه‌ها هزینه‌های زیادی در بردارد. یکی از راه‌حل‌های اساسی به‌منظور حل این مسئله، استفاده از ترکیب دریاچه-آستانه می‌باشد (Negm et al., 1998; Karami et al., 2020; Daneshfaraz et al., 2022). در یک عمق ثابت آب بالادست دریاچه، کاربرد آستانه منجر به افزایش میزان دبی عبوری از زیر دریاچه در مقایسه با حالت بدون آستانه می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در رابطه با بررسی دریاچه‌ها صورت پذیرفته است. هنری نموداری برحسب نسبت عمق پایاب به میزان بازشدگی دریاچه برای تعیین ضریب‌دبی ارائه داد (Henry, 1950). راجاراتنام و سوپرامانیا، راجاراتنام و سوامی ضریب‌دبی

در سال‌های اخیر با توجه به کمبود منابع آب، لزوم استفاده بهینه از منابع آبی و بهره‌گیری مطلوب از آن بیش از پیش احساس و لزوم بررسی‌های بیشتر دریاچه‌ها بایستی مورد توجه قرار گیرد. جهت جلوگیری از هدر رفت آب بایستی در کنترل و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری نهایت دقت به‌عمل آید و دریاچه‌ها با توجه به شرایط هر منطقه به‌طور صحیح و اصولی انتخاب شوند. بررسی پارامترهای هیدرولیکی دریاچه‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در علم مهندسی

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: kroshangar@yahoo.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.3.3

درصدی آن می‌شود (Karami et al., 2020). قربانی و همکاران با استفاده از روش H_2O و مدل‌های هوشمند از جمله GBM, RF, DL و GLM به تجزیه و تحلیل ضریب‌دبی دریاچه‌های کشاورزی با آستانه هم‌عرض کانال پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش یادگیری ماشین H_2O ، عملکرد خوبی در تخمین ضریب‌دبی دریاچه کشاورزی دارد (Ghorbani et al., 2020).

بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که اکثر بررسی‌های صورت پذیرفته، حول بررسی ضریب‌دبی دریاچه‌های کشاورزی انجام یافته و مطالعه‌ای در زمینه استفاده از ترکیب (آستانه-دریاچه) آستانه‌های غیرهم‌عرض با مشخصات هندسی مختلف با دریاچه‌های قطاعی انجام نپذیرفته و گزارش نتایج ترکیب آستانه غیرهم‌عرض-دریاچه در این نوع دریاچه‌ها در میان منابع علمی خالی است. بنابراین با توجه به پیشینه تحقیق و اهمیت موضوع، در پژوهش حاضر لزوم بررسی دریاچه‌های کشاورزی و قطاعی در حالت بدون آستانه و با آستانه در عرض، ارتفاع و ضخامت برای آستانه‌های مستطیلی و نیم‌دایره، با به‌کارگیری روش VOF انجام پذیرفته و تأثیر آن بر ظرفیت پارامترهای هیدرولیکی، میزان تنش برشی و ضرایب‌دبی مشخص گردید.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان

معادلات پیوستگی و ناویر استوکس توسط نرم‌افزار FLOW-3D برای انجام شبیه‌سازی سه بعدی حرکت سیال گسسته‌سازی می‌شوند. معادله پیوستگی یا بقای جرم در یک جریان سیال به صورت زیر است (Flow Science Inc., 2016):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

که در آن، u_i مؤلفه بردار سرعت در راستای i می‌باشد. نرم‌افزار جهت تحلیل سه بعدی جریان، معادلات ناویر استوکس را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. معادلات در دستگاه مختصات کارتزین به صورت روابط زیر است (Flow Science Inc., 2016):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (5)$$

در روابط بالا، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب ناشی از لزجت در جهت‌های (x, y, z) ، R_{SOR} منبع جرم، R_{DIF} عبارت

دریاچه‌های کشاورزی را بررسی و روابطی را برای تخمین ضریب‌دبی ارائه دادند (Rajaratnam and Subramanya., 1967; Rajaratnam., 1977; Swamee., 1992). شیواپور و پراکش نحوه قرارگیری دریاچه کشاورزی در زوایای مختلف نسبت به حالت قائم را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش زاویه قرارگیری دریاچه کشاورزی نسبت به حالت قائم، ضریب‌دبی جریان افزایش می‌یابد (Shivapur and Prakash., 2005). محمد موید به بررسی تأثیر مدل لبه دریاچه و انحراف آن در جهت جریان و خلاف جهت جریان پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که ضریب‌دبی در دریاچه با زاویه 45° در جهت جریان و با لبه افقی و تیز، به ترتیب $17/8\%$ و 17% بیشتر از حالت دریاچه قائم است (Mohammed and Moayed., 2013). دانشفرز و همکاران تأثیر شکل لبه دریاچه‌های کشاورزی بر خصوصیات جریان را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. براساس نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها، ضریب انقباض جریان برای لبه‌های تیز به سمت بالا و پائین و برای دریاچه‌های لبه‌گرد، زمانی که نسبت بازشدگی دریاچه به انرژی مخصوص در بالادست کوچک‌تر از $0/4$ باشد، کاهش و برای نسبت‌های بزرگ‌تر از $0/4$ ، افزایش می‌یابد (Daneshfaraz et al., 2016). سلماسی و همکاران با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری مدل‌های هوش SVM، ANN، GRNN، RF، GP و RT ضریب‌دبی دریاچه‌های کشاورزی مایل را بررسی و گزارش کردند که با افزایش زاویه قرارگیری دریاچه، ضریب‌دبی افزایش می‌یابد (Salmasi et al., 2021). روشنگر و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی ضریب‌دبی دریاچه‌های قطاعی با استفاده از روش‌های پایه کرنلی پرداختند. بررسی مدل‌های مختلف نشان داد رگرسیون فرآیند گاوسی عملکرد بهتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان دارد.

در زمینه وجود آستانه و ترکیب آن با دریاچه می‌توان به بررسی آزمایشگاهی الحمید (Alhamid., 1999) اشاره کرد. نتایج تحقیق ایشان حاکی از افزایش میزان ضریب‌دبی در حالت استفاده از آستانه در دریاچه کشاورزی نسبت به حالت بدون آستانه بود. سلماسی و نوروزی به بررسی تأثیر شکل آستانه‌های هم‌عرض کانال بر ضریب‌دبی جریان در دریاچه کشاورزی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که آستانه‌هایی که با باز شدن دریاچه، جلوی آن قرار می‌گیرند، به صورت یک مانع عمل کرده و موجب کاهش ضریب‌دبی می‌گردند (Salmasi et al., 2019). کرمی و همکاران ضریب‌دبی دریاچه‌های کشاورزی با آستانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود آستانه تأثیر بیشتری بر ضریب‌دبی دارد و باعث افزایش ۲۰

آنالیز ابعادی

در این پژوهش، صحت‌سنجی داده‌ها با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی دانش‌فراز (Daneshfaraz et al., 2022) برای دریاچه کشویی در حالت بدون آستانه و با آستانه مستطیلی انجام یافته و سپس شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌های مورد مطالعه تحقیق حاضر از جمله دریاچه کشویی و دریاچه قطاعی در شکل‌های مختلف آستانه با مشخصات هندسی متفاوت ادامه یافته است. در جدول (۱) مشخصات هیدرولیکی و هندسی مدل‌های مورد مطالعه آورده شده است. در شکل (۱) مدل‌های مورد مطالعه پژوهش حاضر نشان داده شده است.

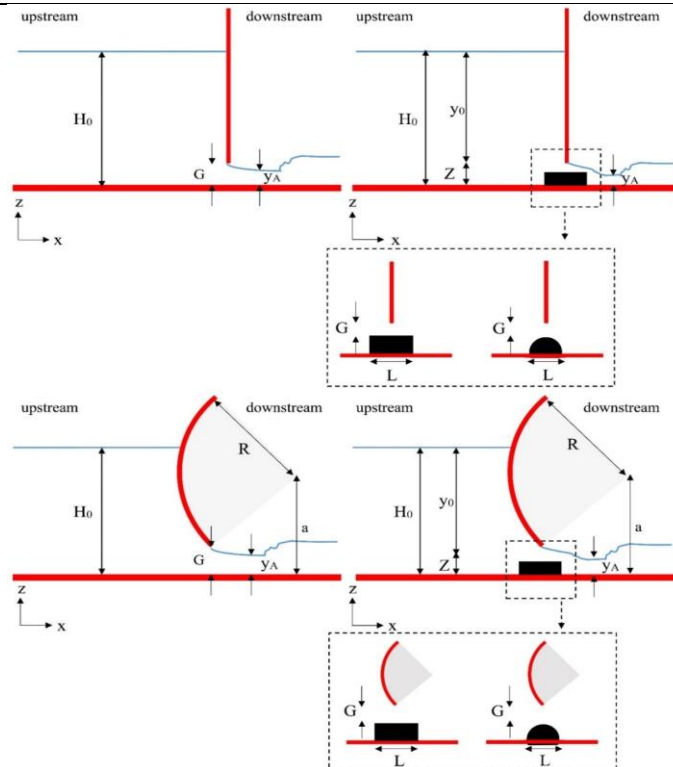
پخش آشفتگی، V_F کسر حجمی سیال و P نمایانگر فشار می‌باشند. معادلات ناویر استوکس معادلات مومنتم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی لزج است. این معادله در حالت کلی به صورت رابطه (۶) بیان می‌گردد:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن، B_i نیروی حجمی در راستای i و μ لزوجت دینامیکی سیال، ρ جرم مخصوص آب، x_i, x_j, x_k به ترتیب مختصات جریان در راستای فضایی i, j و k دلتای کرونکر که در آن اگر $i=j$ باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت مقداری برابر صفر دارد.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی و هندسی مدل‌های تحقیق حاضر

مشخصات هیدرولیکی			
دبی (m^3/s)	عمق بالادست دریاچه (m)	نوع دریاچه	
۰/۰۰۲۵ - ۰/۰۱۴۲	۰/۰۵ - ۰/۴۲	کشویی - قطاعی ($a=0/30m$ و $R=0/30m$)	
مشخصات هندسی			
عرض آستانه (m)	ضخامت آستانه (m)	ارتفاع آستانه (m)	بازشدگی دریاچه (m)
۰/۱۵ - ۰/۲۰ - ۰/۳۰	۰/۰۵ - ۰/۱۵ - ۰/۲۵ (مستطیلی)	۰/۰۳ - ۰/۰۶ - ۰/۰۹ (مستطیلی، نیم‌دایره)	۰/۰۱ - ۰/۰۲ - ۰/۰۴
	۰/۰۶ - ۰/۱۲ - ۰/۱۸ (نیم‌دایره)		



شکل ۱- شماتیک دریاچه کشویی و دریاچه قطاعی در حالت بدون آستانه و با آستانه مستطیلی و نیم‌دایره

$$C_d = \frac{q}{G\sqrt{2gH_0}} = f_1\left(\frac{H_0}{G}\right) \quad (9)$$

در رابطه فوق، q دبی در واحد عرض کانال (L^2T^{-1}) است. ضریب دبی دریاچه قطاعی علاوه بر اینکه تابعی از پارامترهای هیدرولیکی ذکر شده در دریاچه کشویی است، تابعی از پارامترهای هندسی دریاچه قطاعی همچون شعاع دریاچه (L) و ارتفاع محور دریاچه از کف کانال (L) نیز می‌باشد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی دریاچه قطاعی در رابطه (۱۰) آورده شده است.

$$C_d = f_1\left(\frac{H_0}{G}, \frac{R}{G}, \frac{\alpha}{G}\right) \quad (10)$$

میزان دبی عبوری از زیر دریاچه برای حالت آستانه هم‌عرض کانال از طریق رابطه (۱۱)، به دست می‌آید:

$$Q = C_d W G \sqrt{2g(H_0 - Z)} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، Q دبی (L^3T^{-1})، Z ارتفاع آستانه (L) و WG مساحت جریان عبوری از زیر دریاچه (L^2) می‌باشد. برای حالت آستانه‌های غیرهم‌عرض کانال، میزان دبی عبوری از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد:

$$Q = C_d \left((A_1 \sqrt{2gH_0}) + (A_2 \sqrt{2g(H_0 - Z)}) + (A_3 \sqrt{2gH_0}) \right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، A_1 ، A_2 و A_3 به ترتیب مساحت جریان عبوری در نواحی بدون آستانه و بالای آستانه است (شکل ۲).

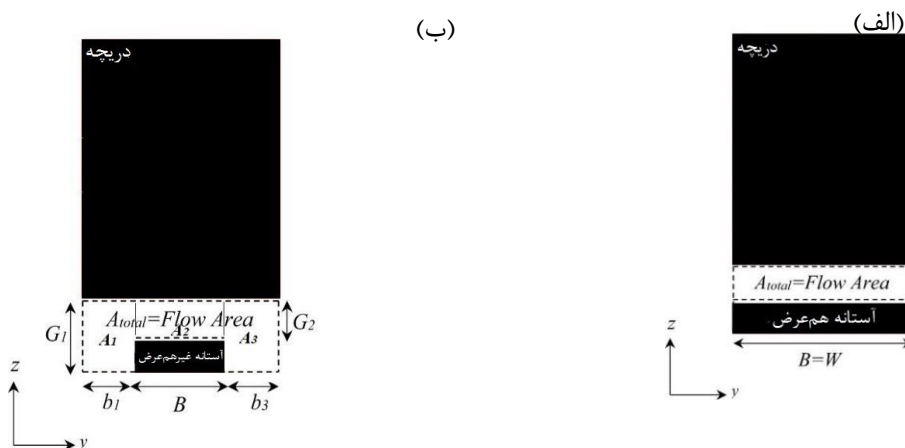
در پژوهش حاضر مقدار a در صورت بسته بودن دریاچه قطاعی مقدار 0.30 متر را دارا است بنابراین براساس بازشدگی‌های مختلف دریاچه و ارتفاع آستانه، میزان a متغیر بوده و بایستی میزان بازشدگی و ارتفاع آستانه نیز به مقدار a افزوده گردد. مقدار ضریب دبی دریاچه کشویی در حالت بدون آستانه تابعی از عمق جریان بالادست و میزان بازشدگی دریاچه است، بنابراین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر آن به صورت زیر قابل بیان است (Swamee., 1992):

$$f_1(C_d, H_0, G, \rho, g, \mu) = 0 \quad (7)$$

در رابطه (۷) C_d ضریب دبی (-)، H_0 عمق آب بالادست دریاچه (L)، G میزان بازشدگی دریاچه (L)، ρ جرم مخصوص آب (ML^{-3})، شتاب گرانش زمین (LT^{-2}) و μ لزوجت دینامیکی ($ML^{-1}T^{-1}$) هستند. با استفاده از روش π -باکینگهام، می‌توان رابطه بی‌بعد (۸) را ارائه کرد:

$$f_2\left(C_d, \frac{H_0}{G}, Re\right) = 0 \quad (8)$$

در رابطه (۸) Re بیانگر عدد بی‌بعد رینولدز است. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر جریان متلاطم و $47222 \leq Re \leq 11111$ است لذا می‌توان از تأثیر عدد رینولدز چشم‌پوشی نمود (Nasrabadi et al., 2021). مهم‌ترین پارامتر موثر بر ضریب دبی دریاچه کشویی در حالت بدون آستانه در رابطه (۹) نشان داده شده است:



شکل ۲- نمای روبرو ($y-z$) از دریاچه-آستانه (الف) آستانه هم‌عرض کانال (ب) آستانه غیرهم‌عرض کانال

$$f_1 = (C_d, H_0, G, B, Z, L, W, \rho, g, \mu) = 0 \quad (14)$$

که در آن B عرض آستانه (L) و L ضخامت آستانه (L) است. با در نظر گرفتن ρ ، g و B به عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش π -باکینگهام، می‌توان رابطه بی‌بعد (۱۵) را ارائه کرد:

$$f_2\left(C_d, \frac{H_0}{B}, \frac{G}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{L}{B}, \frac{W}{B}, Re\right) = 0 \quad (15)$$

$$A_{total} = A_1 + A_2 + A_3 \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، A_{total} مساحت کل جریان عبوری از زیر دریاچه (L) می‌باشد.

در پژوهش حاضر آستانه‌های مورد استفاده نسبت به محور کانال متقارن است. در تحقیق حاضر برای حالت با آستانه دریاچه کشویی، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی عبارتند از:

R/B نیز در رابطه (۱۶) اضافه می‌گردند.

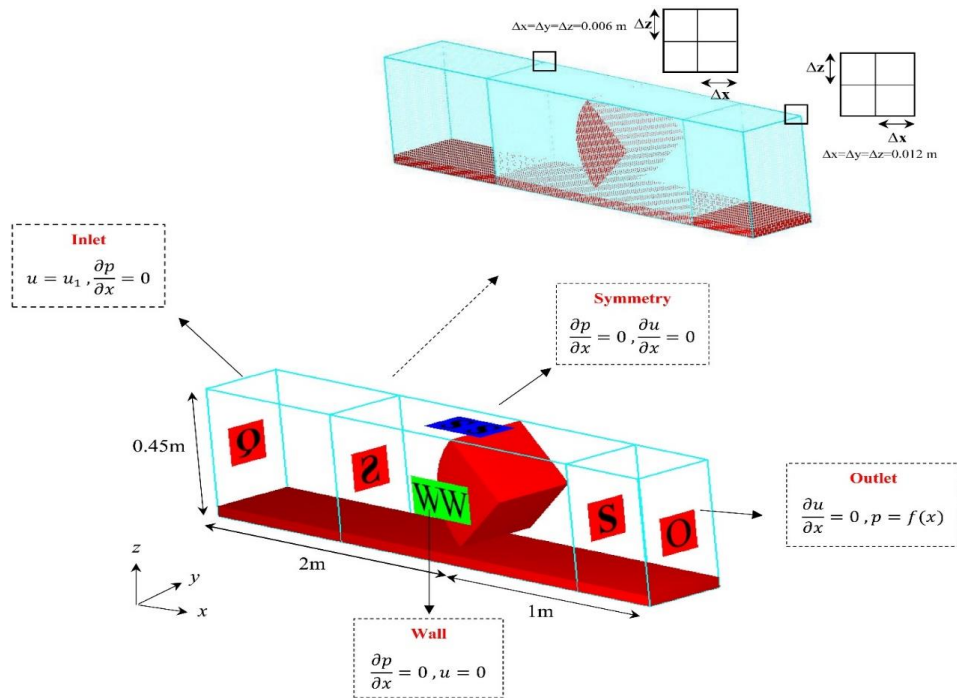
تعریف شبکه حل، شرایط مرزی و انتخاب مدل آشفتگی

هندسه سه بعدی یکی از مدل‌ها و شبکه مش‌بندی، در شکل (۳) نشان داده شده است.

مطابق تئوری (White., 2016) پارامترهای بی‌بعد را می‌توان با هم جمع، به هم ضرب و یا بر هم تقسیم نمود. پارامترهای مورد بررسی در تحقیق حاضر به صورت رابطه (۱۶)، ارائه گردید:

$$C_d = f_3 \left(\frac{H_0}{G}, \frac{Z}{B}, \frac{L}{B}, \frac{W}{B} \right) \quad (16)$$

برای دریچه قطاعی در حالت با آستانه پارامترهای بی‌بعد a/B



شکل ۳- هندسه سه بعدی یکی از مدل‌ها و مش‌بندی

در این پژوهش، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از ۲ مش بلاک با ابعاد متفاوت و به صورت تودرتو انجام یافته است. در انتخاب شرایط مرزی، در مش بلاک اول برای ورودی جریان از شرط مرزی دبی و در انتهای کانال از شرط مرزی خروجی استفاده شده است. همچنین برای دیواره‌ها و کف کانال از شرط مرزی دیوار و برای مرز بالایی، شرط مرزی متقارن انتخاب شده است. در مش بلاک دوم به منظور تأثیرپذیری از شرایط مرزی تعریف شده در مش بلاک یک، برای مرز ورودی، خروجی و بالا، شرط مرزی تقارن و برای دیواره‌ها و کف کانال شرط مرزی دیواره تعریف شده است. برای دست‌یابی به مش بهینه، شبیه‌سازی‌ها در ابعاد مش مختلف صورت پذیرفت. مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در جدول (۲) آورده شده است. برای انتخاب مدل آشفتگی، با چهار مدل $k-\omega$, $k-\epsilon$, RNG و LES شبیه‌سازی‌ها انجام و در نهایت مدل آشفتگی RNG برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. مقایسه نتایج کمی شبیه‌سازی مدل‌های آشفتگی مذکور در جدول (۲)، نشان می‌دهد که مدل آشفتگی RNG

خطای کم‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها داشته و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. در تحقیق حاضر برای بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی و مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی از شاخص‌های آماری درصد خطای نسبی ($RE\%$)، خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$) و شاخص کلینگ گوپتا (KGE) استفاده شد.

$$RE\% = \left| \frac{x_{Obs} - x_{Cal}}{x_{Obs}} \right| \times 100 \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{Obs} - x_{Cal})^2}{n}} \quad (17)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad \begin{matrix} 0.7 < KGE < 1 & \text{Very good} \\ 0.6 < KGE < 0.7 & \text{Good} \\ 0.5 < KGE \leq 0.6 & \text{Satisfactory} \\ 0.4 < KGE \leq 0.5 & \text{Acceptable} \\ KGE \leq 0.4 & \text{Unsatisfactory} \end{matrix} \quad (18)$$

در روابط بالا، Cal و Obs به ترتیب بیانگر نتایج مشاهداتی و نتایج حل عددی (محاسباتی) و n تعداد کل داده‌ها می‌باشند. مقادیر

رضایت بخش، می‌تواند بیانگر دقت روابط ارائه شده باشد (Gupta et al., 2009).

نتایج و بحث

در جدول (۲)، نتایج صحت‌سنجی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی در اندازه‌های مش مختلف به همراه شاخص‌های آماری مربوط به هر اندازه مش آورده شده است.

جدول ۲- صحت‌سنجی مدل

حالت	اندازه مش بلاک (m)	Mean RE (%)		RMSE		KGE		مدل آشفستگی	RMSE	
		H_0	C_d	H_0 (m)	C_d (-)	H_0	C_d		H_0 (m)	C_d (-)
۱	مش بلاک ۱: ۰/۱۴	۱۴/۱۲	۹/۲۸	۰/۰۷۳۵	۰/۰۹۱۴	good	good	RNG	۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۱۷
	مش بلاک ۲: ۰/۰۰۷									
۲	مش بلاک ۱: ۰/۰۱۳	۶/۳۵	۵/۷۲	۰/۰۲۸۵	۰/۰۳۴۸	Very good	Very good	k-ε	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۲۳
	مش بلاک ۲: ۰/۰۰۶۵									
۳	مش بلاک ۱: ۰/۰۱۲	۳/۹۰	۲/۹۵	۰/۰۱۸۵	۰/۰۲۴۵	Very good	Very good	k-ω	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۲۸
	مش بلاک ۲: ۰/۰۰۷									
۴	مش بلاک ۱: ۰/۰۱۲	۲/۹۴	۱/۶۰	۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۱۷	Very good	Very good	LES	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۲۰
	مش بلاک ۲: ۰/۰۰۶									
۵	مش بلاک ۱: ۰/۰۱۰	۲/۸۶	۱/۵۰	۰/۰۰۷۶	۰/۰۱۱۴	Very good	Very good			
	مش بلاک ۲: ۰/۰۰۵									

اختلاف ناچیزی دارد. در شکل (۴- ب، ج و د) مقایسه نتایج بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی به همراه شاخص‌های آماری برای هر سری از داده‌ها بر روی نمودار نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است داده‌های حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D با تقریب مطلوبی به دست آمده است. به طوری که نتایج شاخص‌های آماری میانگین درصد خطای نسبی، حداکثر درصد خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعات برای آستانه هم‌عرض کانال به ترتیب ۱/۵۰٪، ۱/۷۶٪ و ۰/۱۱۸ است. همچنین نتایج این شاخص‌ها برای آستانه غیرهم‌عرض ۰/۲۰ متر به ترتیب ۱/۹۸٪، ۲/۶۵٪ و ۰/۱۴۳ بوده و برای آستانه غیرهم‌عرض ۰/۱۵ متر نیز برابر با ۱/۱۶٪، ۲/۲۱٪ و ۰/۰۸۲ است.

بعد از ارائه نتایج صحت‌سنجی، نتایج سایر مدل‌ها نیز در ادامه بررسی شده است. در شکل (۵)، بررسی نتایج میزان ضریب‌دبی دریاچه کشویی و دریاچه قطاعی توسط پارامتر بدون بعد ضریب‌دبی (C_d) و نسبت عمق بالادست دریاچه به میزان بازشدگی دریاچه (H_0/G) آورده شده است. با توجه به شکل (۵)، میزان ضریب‌دبی دریاچه قطاعی همواره بیشتر از دریاچه کشویی است. علت این موضوع را مطابق شکل (۶) می‌توان به شکل دریاچه مرتبط دانست به طوری که در دریاچه‌های کشویی، خطوط جریان تمایل بیشتری به سمت بازشدگی دریاچه نداشته و در رقوم بالاتر جریان در پشت دریاچه حالت تقریباً سکون دارند. این در حالی است که در دریاچه‌های قطاعی با توجه به اینکه شکل دریاچه حالت قوسی دارد بنابراین

روابط (۱۷) هرچه به عدد صفر نزدیک باشد، بیانگر دقت بالای حل عددی در شبیه‌سازی خواهند بود. در رابطه (۱۸)، R ضریب همبستگی، β نسبت میانگین داده‌های محاسباتی به میانگین داده‌های مشاهداتی، σ_{cal} انحراف استاندارد مقادیر برآورد شده و γ بیانگر نسبت انحراف استاندارد مقادیر محاسباتی به انحراف استاندارد مقادیر مشاهداتی می‌باشند. شاخص آماری KGE بر اساس تقسیم‌بندی این شاخص به خیلی خوب، خوب، رضایت بخش، قابل قبول و غیر

با توجه به جدول (۲) و بررسی شاخص‌های آماری مشاهده شد که حالت ۵ از نظر میانگین درصد خطای نسبی، خطای جذر میانگین مربعات و شاخص کلینگ گوپتا شرایط مطلوبی داشته و از بقیه حالت‌ها کم‌تر است. با توجه به اینکه شاخص‌های آماری به دست آمده از حالت ۴ و ۵ به یکدیگر بسیار نزدیک است از این رو حالت ۴ به عنوان مش‌بهینه برای ادامه روند شبیه‌سازی مدل‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شد. پس از مشخص نمودن اندازه مش‌بهینه، نتایج صحت‌سنجی مابین نتایج حل عددی و آزمایشگاهی برای سایر مدل‌های مورد استفاده توسط دانش‌فراز (Daneshfaraz et al., 2022)، در حالت بدون آستانه برای بازشدگی‌های مختلف ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متر مطابق با جدول (۳) ارائه گردید. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نتایج حاصل از حل عددی هم‌خوانی مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و خطای جذر میانگین مربعات برای بازشدگی‌های مذکور به ترتیب ۰/۱۰۵، ۰/۱۷۱ و ۰/۱۴۸ است که بیانگر نزدیکی نتایج به‌همدیگر است.

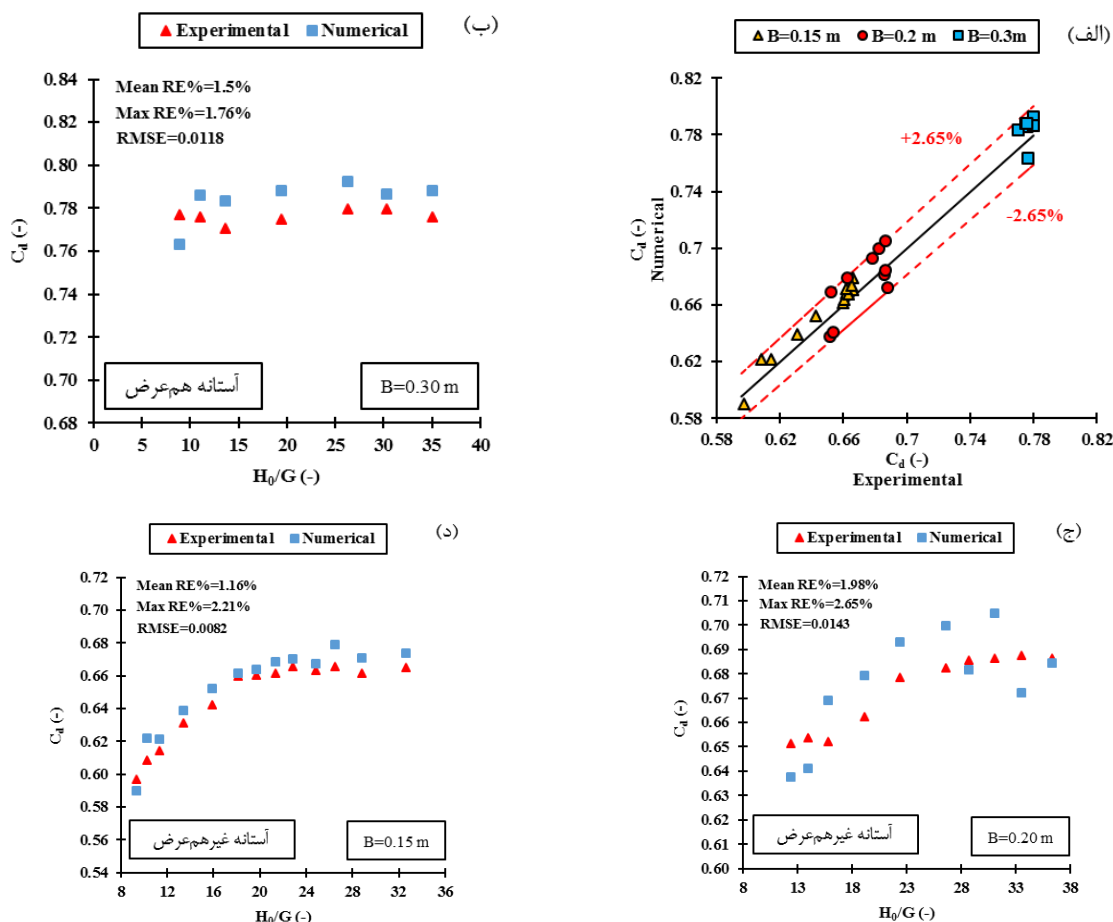
علاوه بر صحت‌سنجی نتایج در حالت بدون آستانه در بازشدگی‌های ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متر که در جدول (۳) ارائه شده است، مقایسه نتایج بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از حل عددی برای حالت با آستانه در عرض‌های مختلف ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۳۰ متر صورت پذیرفت. در این شکل G میزان بازشدگی بالای آستانه است. مطابق شکل (۴-الف)، ملاحظه می‌گردد که ضرایب‌دبی حاصل از حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی (Daneshfaraz et al., 2022)

خروجی از کنارها نسبت به بالای آستانه می‌گردد. جریان‌های برگشتی به سمت دریچه باعث افزایش اتلاف انرژی و تلاطم جریان خروجی از زیر دریچه شده که منجر به کاهش ضریب‌دبی می‌گردد (شکل ۸). در شکل (۸) خطوط جریان نشان داده شده در (section y-z) مربوط به آستانه غیرهم‌عرض است. با توجه به شکل (۷) در بین آستانه‌ها، بیشترین مقدار ضریب‌دبی مربوط به آستانه نیم‌دایره‌ای است. در آستانه نیم‌دایره‌ای جریان بعد از برخورد با آستانه به دلیل هندسه قوسی آن به صورت نرم و یکنواخت از روی آستانه عبور می‌کند. این درحالی است که در آستانه مستطیلی، با توجه به حالت قائم بودن هندسه آن، در بالادست دریچه برخی از خطوط جریان بعد از برخورد با آستانه به سمت عقب برگشته و تلاطمی در آن قسمت ایجاد می‌گردد. دریچه قطاعی نیز در مقایسه با دریچه کشویی بیشترین مقدار ضریب‌دبی را دارا است.

خطوط جریان در برخورد با دریچه به سمت بازشدگی دریچه تمایل پیدا می‌کنند. همچنین مطابق شکل (۶)، پروفیل سرعت (section x-z) در دریچه کشویی و قطاعی نیز موید این مسئله بوده و تفاوت رفتار جریان در بالادست دریچه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل (۷)، تأثیر وجود آستانه هم‌عرض و غیرهم‌عرض مستطیلی و نیم‌دایره‌ای بر ضریب‌دبی دریچه کشویی و قطاعی با بازشدگی‌های مختلف بررسی شده است. با توجه به شکل (۷)، با افزایش عرض آستانه، ضریب‌دبی افزایش می‌یابد، به طوری که آستانه با کم‌ترین عرض دارای حداقل مقدار ضریب‌دبی در بین آستانه‌ها می‌باشد. دلیل افزایش ضریب‌دبی با افزایش عرض آستانه را می‌توان به توزیع یکنواخت جریان به سمت دریچه عنوان نمود. به طوری که در آستانه با عرض‌های کم‌تر، میزان بازشدگی در کنارهای آستانه بیشتر از میزان بازشدگی در بالای آن است که باعث افزایش حجم جریان

جدول ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حل عددی در حالت بدون آستانه

G=1cm						
ردیف	C_d Exp (-)	C_d Num (-)	AE (-)	RE (%)	RMSE (-)	KGE (-)
۱	۰/۶۸۰	-۰/۶۸۵	-۰/۰۰۵	۰/۷۴۴		
۲	۰/۷۰۱	-۰/۷۰۵	-۰/۰۰۴	۰/۵۰۴		
۳	۰/۷۱۱	-۰/۷۰۰	-۰/۰۱۱	۱/۵۶۹	۰/۰۱۰۵	۰/۸۲۵ very good
۴	۰/۷۳۲	-۰/۷۱۲	-۰/۰۲۰	۲/۶۶۷		
۵	۰/۷۵۶	-۰/۷۵۲	-۰/۰۰۴	۰/۵۶۳		
G=۲cm						
ردیف	C_d Exp (-)	C_d Num (-)	AE (-)	RE (%)	RMSE (-)	KGE (-)
۱	۰/۶۳۱	-۰/۶۴۹	-۰/۰۱۸	۲/۸۵۲		
۲	۰/۶۴۲	-۰/۶۶۲	-۰/۰۲۱	۳/۱۹۸		
۳	۰/۶۴۹	-۰/۶۷۲	-۰/۰۲۳	۳/۵۰۲		
۴	۰/۶۵۹	-۰/۶۷۹	-۰/۰۲۱	۳/۱۶۴	۰/۰۱۷۱	۰/۸۰۴ very good
۵	۰/۶۷۲	-۰/۶۸۷	-۰/۰۱۵	۲/۲۴۳		
۶	۰/۶۸۴	-۰/۶۷۹	-۰/۰۰۵	۰/۷۴۹		
۷	۰/۶۸۸	-۰/۶۹۸	-۰/۰۰۹	۱/۳۴۹		
G=۴cm						
ردیف	C_d Exp (-)	C_d Num (-)	AE (-)	RE (%)	RMSE (-)	KGE (-)
۱	۰/۵۳۸	-۰/۵۵۰	-۰/۰۱۲	۲/۲۸۲		
۲	۰/۵۶۷	-۰/۵۸۶	-۰/۰۱۹	۳/۳۹۱		
۳	۰/۵۸۴	-۰/۵۷۳	-۰/۰۱۱	۱/۹۵۶		
۴	۰/۵۹۵	-۰/۵۸۶	-۰/۰۱۰	۱/۶۳۸		
۵	۰/۶۰۱	-۰/۵۸۲	-۰/۰۱۹	۳/۱۴۹		
۶	۰/۶۰۶	-۰/۵۹۷	-۰/۰۰۹	۱/۴۴۷	۰/۰۱۴۸	۰/۹۰۱ very good
۷	۰/۶۰۹	-۰/۶۳۶	-۰/۰۲۷	۴/۴۴۱		
۸	۰/۶۱۳	-۰/۵۹۹	-۰/۰۱۳	۲/۱۸۲		
۹	۰/۶۱۷	-۰/۶۲۷	-۰/۰۱۰	۱/۶۵۳		
۱۰	۰/۶۲۱	-۰/۶۳۲	-۰/۰۱۱	۱/۸۰۹		
۱۱	۰/۶۲۶	-۰/۶۳۷	-۰/۰۱۰	۱/۶۳۵		



شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حل عددی دریاچه کشویی در حالت با آستانه، (الف) نمودار کلی داده‌ها (ب) آستانه هم‌عرض ۰/۳۰ متر (ج) آستانه غیر هم‌عرض ۰/۲۰ متر، (د) آستانه غیر هم‌عرض ۰/۱۵ متر

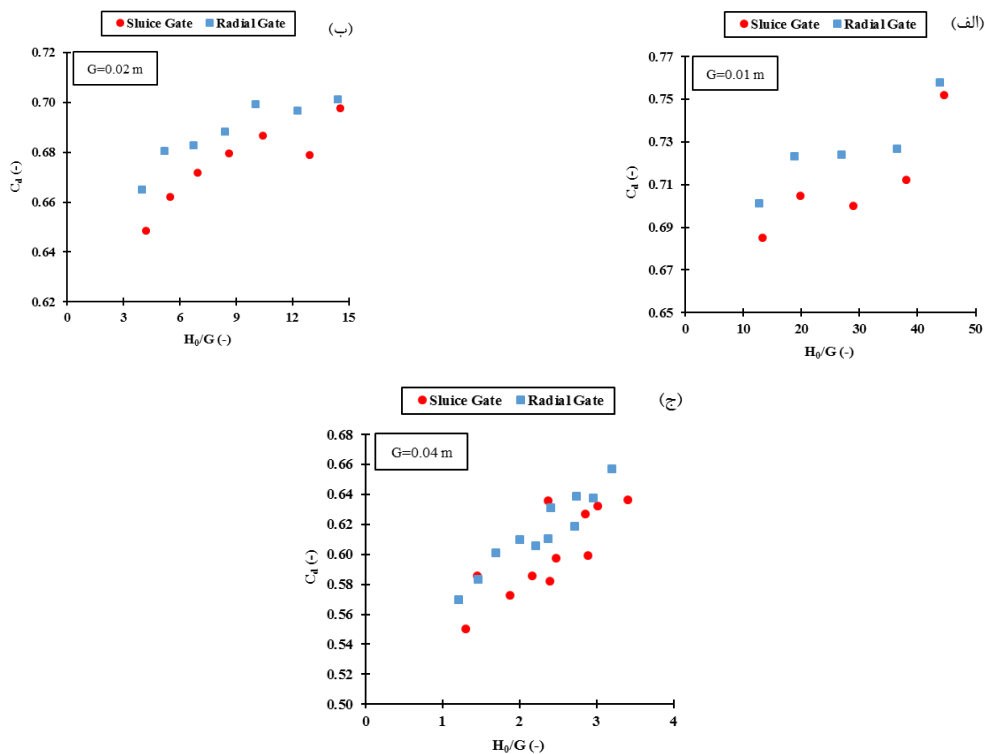
باعث می‌شوند. همچنین وجود آستانه باعث می‌گردد تا فشار وارد بر دریاچه به کم‌تر از γH_0 برسد. بنابراین کاهش فشار و مکش جریان منجر به افزایش ضریب‌دبی می‌گردد.

تأثیر ارتفاع آستانه بر ضریب‌دبی در شکل (۱۰) آورده شده است. برای آستانه مستطیلی و نیم‌دایره‌ای ارتفاع ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ متر و میزان بازشدگی دریاچه ۰/۰۲ متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است طول آستانه مستطیلی ۰/۲۵ متر است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ضریب‌دبی در تمامی حالات بیشتر از حالت بدون آستانه می‌باشد. همچنین ضریب‌دبی دریاچه کشویی با آستانه مستطیلی با افزایش ارتفاع آستانه تا ۰/۰۶ متر افزایش یافته اما در آستانه با ارتفاع ۰/۰۹ متر نسبت به آستانه با ارتفاع ۰/۰۶ متر کاهش می‌یابد. در شکل (۱۰-ب) با افزایش ارتفاع آستانه تا ۰/۰۳ متر میزان ضریب‌دبی حالت افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد به طوری که میزان ضریب‌دبی آستانه نیم‌دایره در ارتفاع‌های ۰/۰۶ و ۰/۰۹ متر نتایج نزدیک برهم دارند. با توجه به اینکه در حالت با آستانه از عمق جریان بالای آستانه

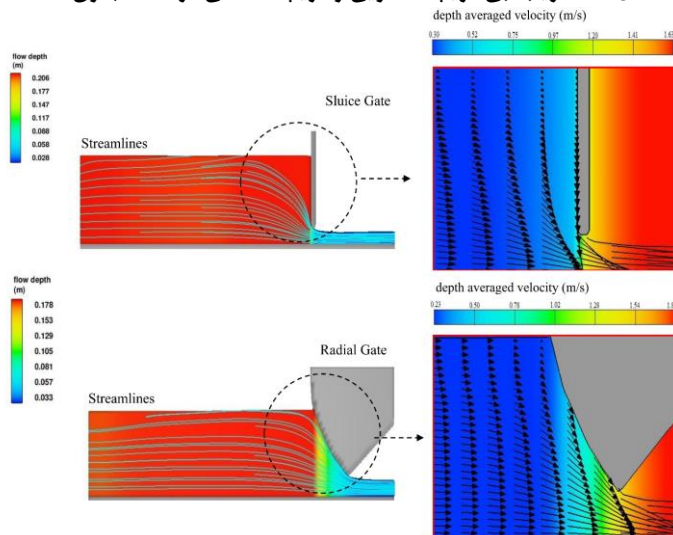
در شکل (۹)، مقایسه‌ای بین ضریب‌دبی دریاچه کشویی و قطاعی در حالت بدون آستانه و با آستانه هم‌عرض کانال در بازشدگی یکسان صورت پذیرفت. در شکل (۹-الف، ب)، میزان بازشدگی در حالت بدون آستانه و با آستانه ۱ سانتی‌متر است. همچنین شکل (۹-ج، د) بیانگر تغییرات ضریب‌دبی در بازشدگی ۲ سانتی‌متر در حالت با آستانه و بدون آستانه می‌باشد. با توجه به شکل (۹)، مشاهده می‌گردد که وجود آستانه باعث افزایش ضریب‌دبی و عملکرد بهتر سیستم از نظر میزان آبگذری دارد و بیشترین مقدار آن مربوط به آستانه نیم‌دایره‌ای در دریاچه قطاعی است. مقایسه بین ضرایب‌دبی برای بازشدگی‌های مختلف در حالت با آستانه حاکی از کاهش ضریب‌دبی نسبت به دریاچه با بازشدگی کم‌تر است. با توجه به اینکه شکل دریاچه و آستانه باعث تغییر شکل خطوط جریان می‌گردد، بنابراین تأثیر به‌سزایی بر ضریب‌دبی جریان می‌گذارد. به طوری که خطوط جریان در آستانه نیم‌دایره‌ای بلافاصله پس از طی مسیر روی آستانه با حالت ملایم‌تری بعد از آستانه به مسیر خود ادامه می‌دهد و لذا افت انرژی کم‌تری را

ایجاد مکش و کاهش عمق آب در بالادست دریچه در مقایسه با حالت بدون آستانه می‌شود که در این حالت ضریب‌دبی افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

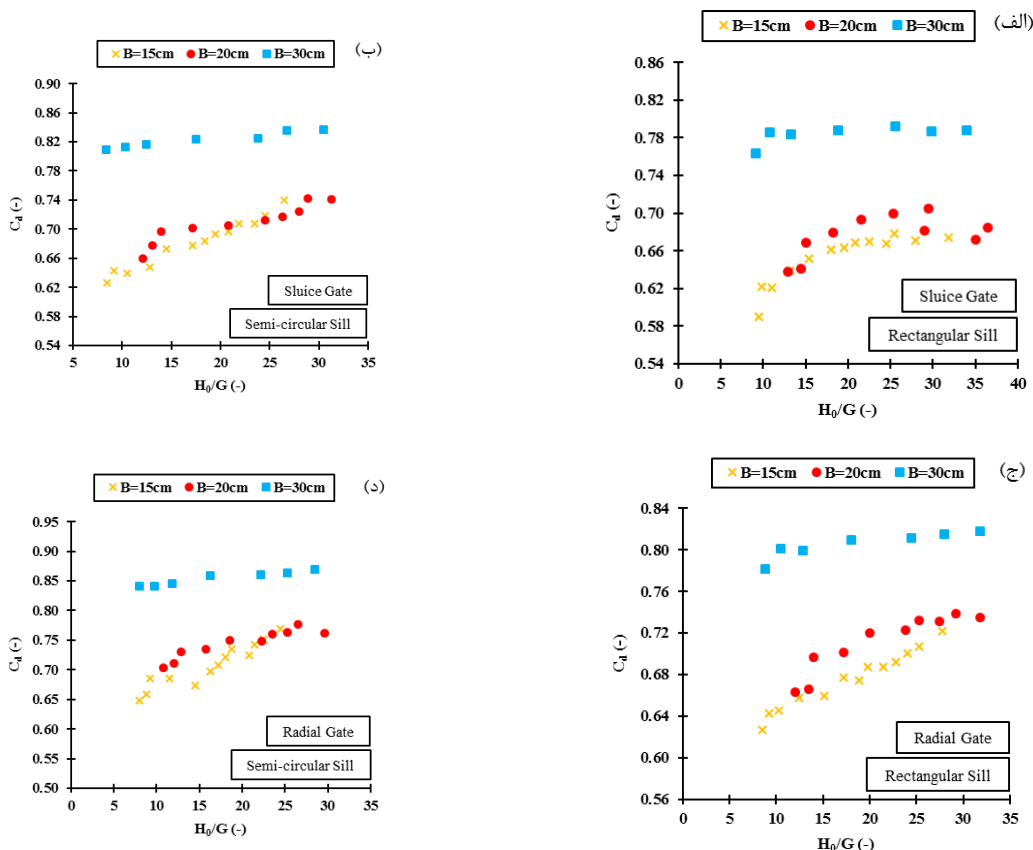
در محاسبات استفاده می‌شود، افزایش ارتفاع آستانه، منجر به افزایش عمق آب نسبت به کف کانال شده و فشار وارد بر کف کانال افزایش می‌یابد. اما ایجاد آستانه منجر به کاهش عمق بالای آستانه و کاهش فشار در نزدیکی بازشدگی می‌شود. کاهش فشار در آن قسمت باعث



شکل ۵- ضریب‌دبی دریچه کشویی و دریچه قطاعی در حالت بدون آستانه



شکل ۶- رفتار جریان در بالادست دریچه کشویی و قطاعی



شکل ۷- میزان تغییرات ضریب دبی در بچه کشویی و قطاعی در عرض‌های مختلف آستانه مستطیلی و نیم‌دایره در ارتفاع آستانه ۰/۳ متر

قسمت آستانه و بخش بدون آستانه، تنش برشی در آن قسمت وجود نداشته و تنش برشی تنها ناشی از ضخامت آستانه و دیواره‌های کانال می‌باشد.

در پژوهش حاضر به منظور پیش‌بینی میزان ضریب دبی، معادلاتی در محدوده تحقیق حاضر ارائه گردید. فرم کلی معادلات پیشنهادی برای حالت بدون آستانه در بچه کشویی و قطاعی به صورت روابط (۱۹) و (۲۰)، در نظر گرفته شد:

$$C_d = a \times \left(\frac{H_0}{G}\right)^b + c \quad (19)$$

$$C_d = a \left(\frac{H_0}{G}\right)^b + c \left(\frac{R}{G}\right)^d + e \left(\frac{a}{G}\right)^f \quad (20)$$

در روابط بالا ضرایب a ، b ، c ، d ، e و f اعداد ثابت بوده و به صورت پیش‌فرض یک در نظر گرفته شد. با بهره‌گیری از Solver نرم‌افزار اکسل، معادلات پیشنهادی به منظور دست‌یابی به فرم مناسب آن با کم‌ترین میزان خطا مطابق روابط (۲۱) و (۲۲)، ارائه گردید:

$$C_d = 2.7465 \left(\frac{H_0}{G}\right)^{0.0177} - 2.1916 \quad (21)$$

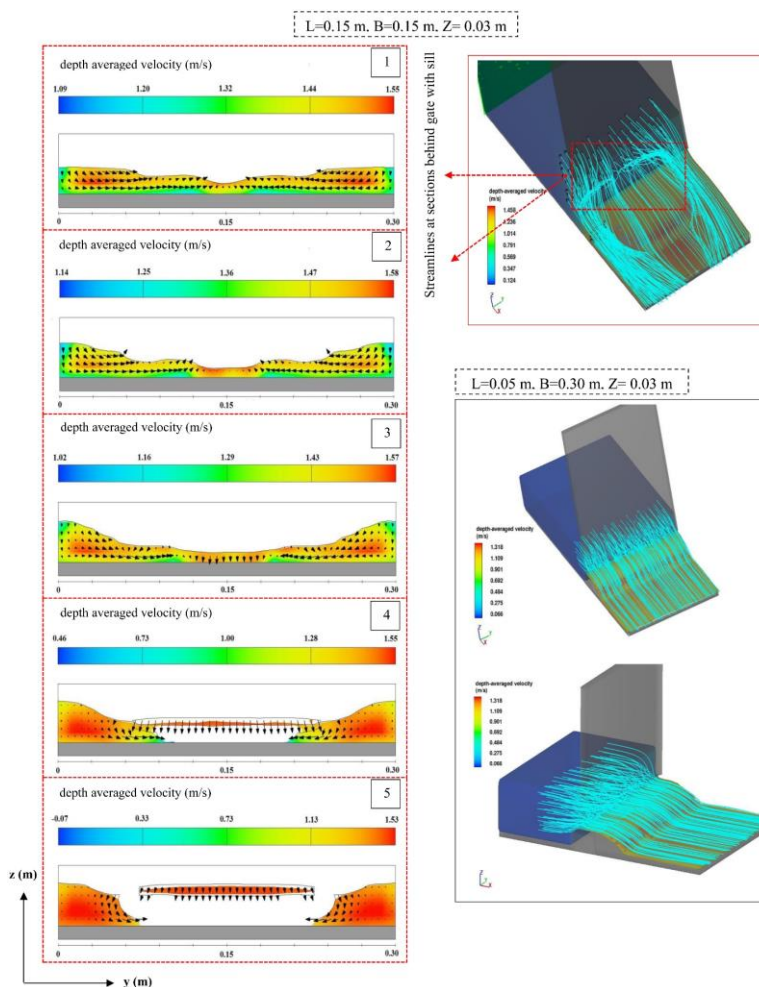
با توجه به شکل (۱۲) افزایش ضخامت آستانه باعث افزایش مدت زمان درگیری جریان و اصطکاک آن با آستانه شده که رابطه مستقیمی با تنش برشی جریان دارد. در شکل (۱۲-الف، ب) میزان تنش برشی آستانه در پشت دریچه با نزدیک شدن به دریچه روند افزایشی دارد. برای آستانه مستطیلی در ابتدای شروع آستانه، میزان تنش برشی به دلیل مجاورت با دیواره آستانه اندکی افزایش یافته است، این افزایش ناگهانی در انتهای آستانه نیز دیده می‌شود. در موقعیت بعد از دریچه، تنش برشی افزایش بیشتری داشته و در طول آستانه کاهش می‌یابد. در شکل (۱۲-ب) در آستانه نیم‌دایره میزان تنش برشی در مقایسه با آستانه مستطیلی مقدار کمتری دارد که منجر به کاهش اصطکاک و کاهش عمق جریان بالادست می‌گردد. افزایش ضخامت آستانه تأثیر به‌سزایی در افزایش تنش برشی در سطح و طرفین آستانه دارد. به طوری که میزان تنش برشی در لایه مرزی طرفین آستانه غیرمعرض نیز وجود داشته و با فاصله گرفتن از آن کاهش می‌یابد. این موضوع تأثیر خود را در ضریب دبی نیز به وضوح نشان داده است. به طوری که افزایش ضخامت منجر به کاهش ضریب دبی جریان شده است (شکل ۱۳). بر خلاف آستانه‌های غیرمعرض، در آستانه هم‌عرض با توجه به نبود لایه مرزی بین

پیشنهادی دقت بسیار مناسبی دارد، به طوری که بیش از ۸۲٪ داده‌ها دارای خطایی کم‌تر از $\pm 1/5$ هستند. برای دریچه قطاعی مطابق شکل (۱۴-ج)، مقادیر شاخص‌های آماری مذکور به ترتیب $3/65\%$ ، $1/74\%$ و $0/134$ است. با توجه به شکل (۱۳-د) بیش از ۸۲٪ داده‌ها دارای خطای نسبی کمتر از $\pm 3\%$ هستند.

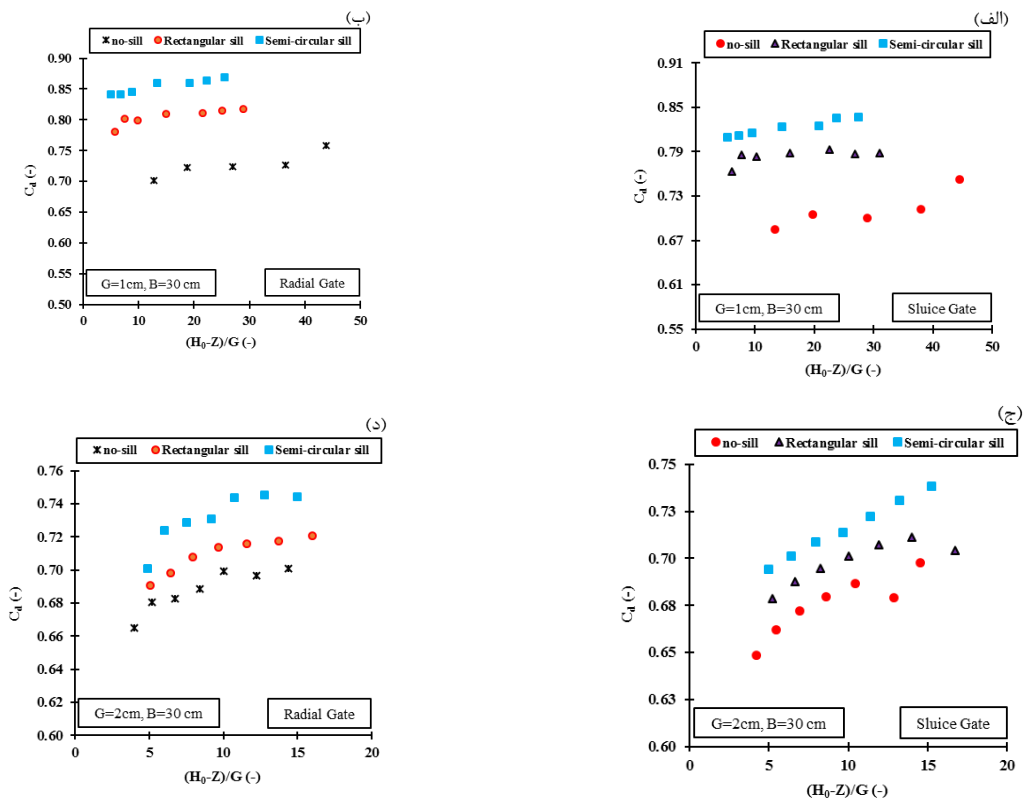
با تلفیق داده‌های حاصل از پژوهش حاضر معادلات (۲۳) و (۲۴) به ترتیب برای دریچه‌های کشویی و قطاعی در حالت با آستانه ارائه گردید. در شکل (۱۵-الف، ب) دقت معادلات (۲۳) و (۲۴) با شاخص‌های آماری نشان داده شده است که حاکی از دقت بالای روابط ذیل است:

$$C_d = 0.582 \left(\frac{H_0}{G}\right)^{0.069} + 0.004 \left(\frac{R}{G}\right)^{0.077} + 0.003 \left(\frac{a}{G}\right)^{0.018} \quad (22)$$

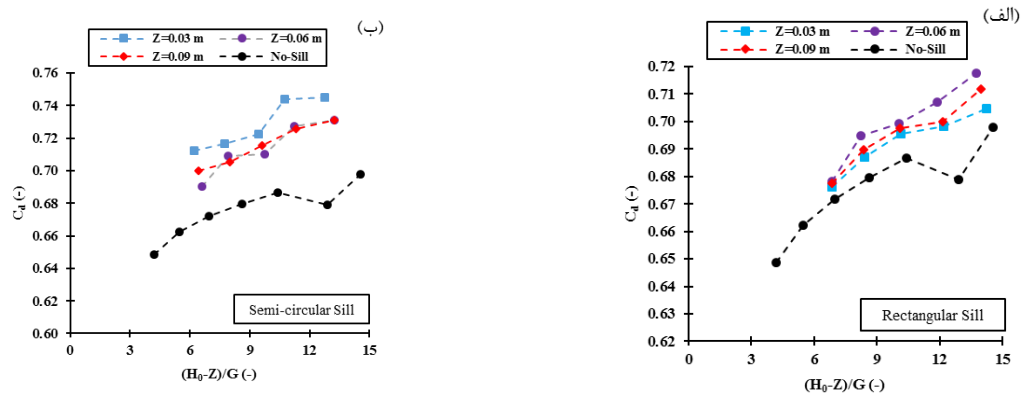
در شکل (۱۴-الف)، نتایج عددی با نتایج حاصل از معادله (۲۱) همخوانی مطلوبی داشته و مقدار ضریب‌دبی را به طور مناسب و به ترتیب با حداکثر درصد خطای نسبی، میانگین درصد خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعات $2/81\%$ ، $0/97\%$ و $0/072$ پیش‌بینی می‌کند. در شکل (۱۴-ب)، با جایگذاری ضرایب‌دبی به دست آمده از رابطه پیشنهادی (۲۱)، در رابطه (۹)، مقایسه‌ای بین میزان دبی عبوری حاصل از نتایج عددی با رابطه (۹)، انجام یافت. همان طور که ملاحظه می‌گردد دامنه گسترده‌ای از داده‌ها در باند خطای نسبی $\pm 1/5$ قرار گرفته‌اند. این مسئله بیانگر این است که فرمول



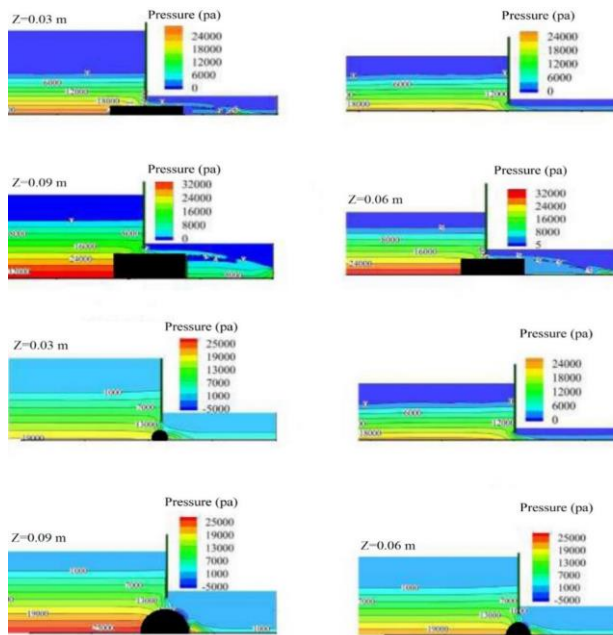
شکل ۸- الگو و خطوط جریان در حالت با آستانه غیرهم‌عرض $2/0$ متر و آستانه هم‌عرض $3/0$ متر



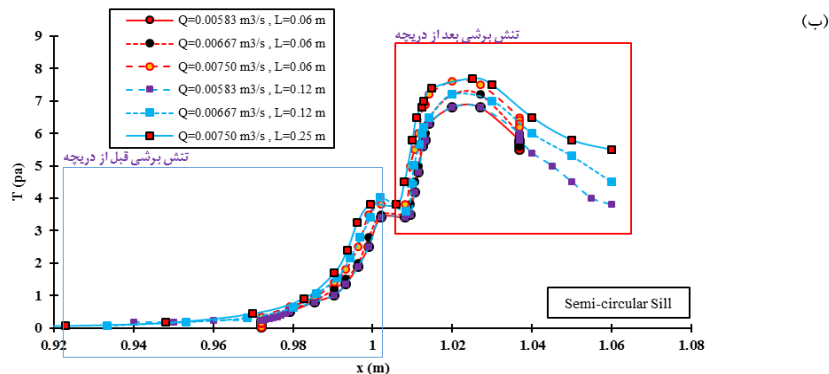
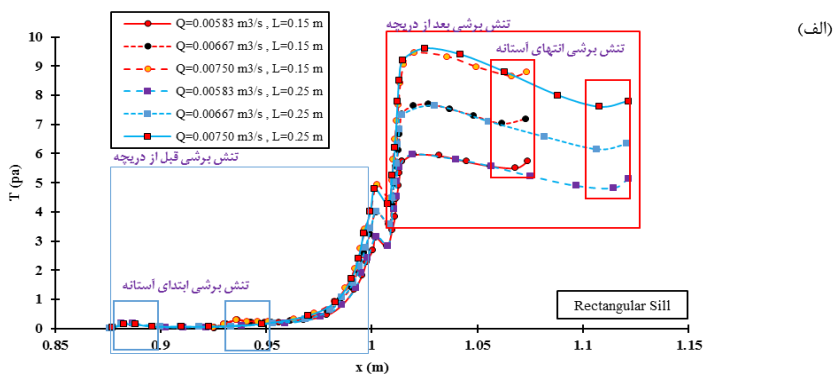
شکل ۹- مقایسه ضریب‌دبی بین حالت بدون آستانه و با آستانه هم‌عرض کانال مستطیلی و نیم‌دایره (ب) بازشدگی ۱ سانتی‌متر ج، (د) بازشدگی ۲ سانتی‌متر در دریچه کشویی و قطاعی



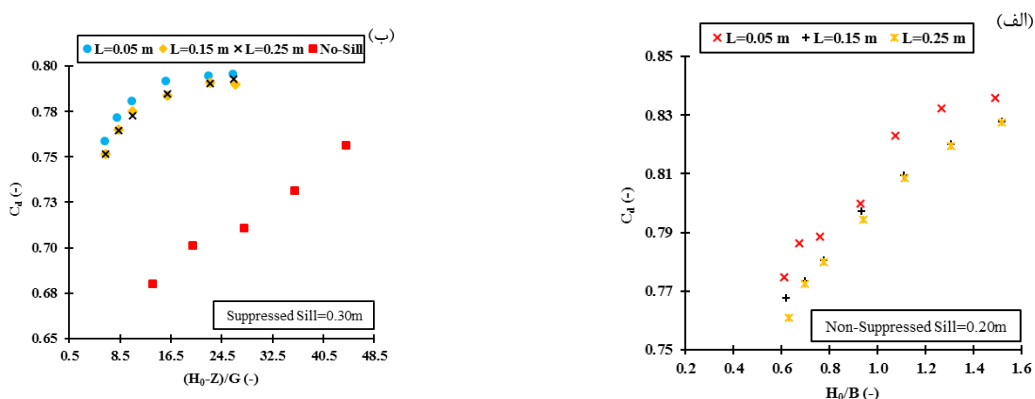
شکل ۱۰- تأثیر ارتفاع آستانه بر ضریب‌دبی دریچه کشویی الف) آستانه مستطیلی (L=0.25 m) ب) آستانه نیم‌دایره (L=0.06, 0.12, 0.18 m)



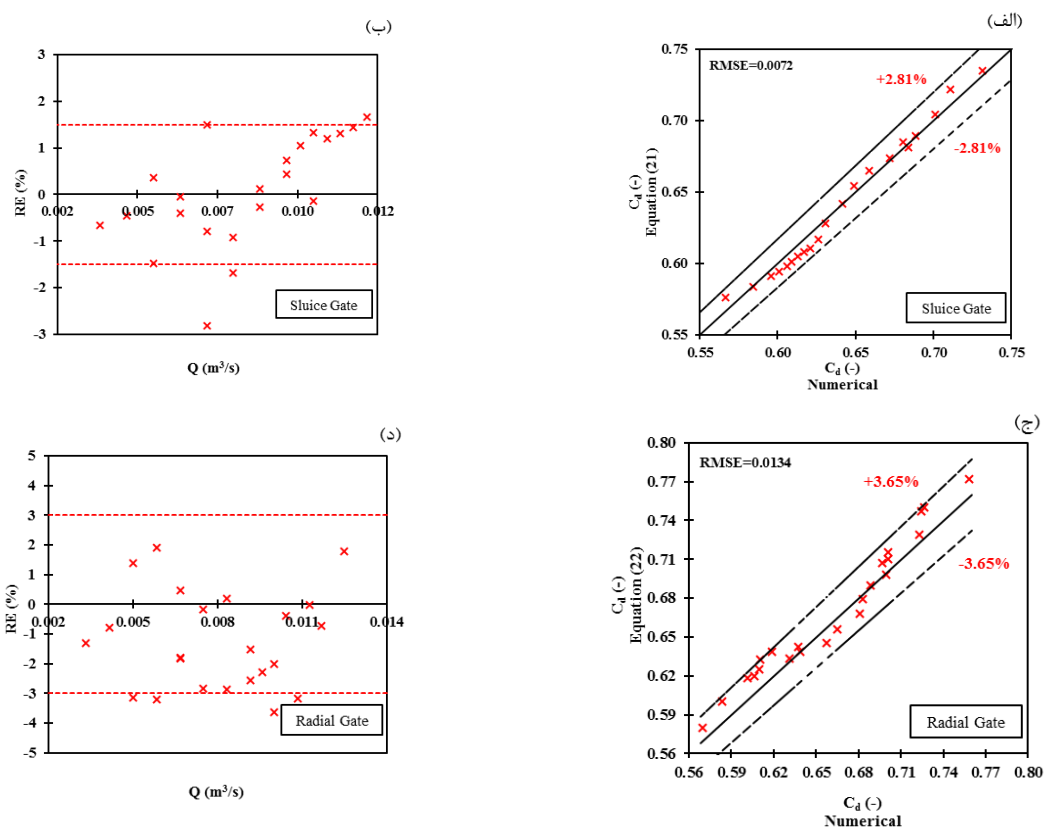
شکل ۱۱- تأثیر ارتفاع آستانه مستطیلی و نیم‌دایره بر میدان فشار عبوری از دریاچه



شکل ۱۲- تنش برشی در راستای طول آستانه الف) آستانه مستطیلی با ضخامت ۰/۱۵ و ۰/۲۵ متر ب) آستانه نیم‌دایره با ضخامت ۰/۰۶ و ۰/۱۲ متر



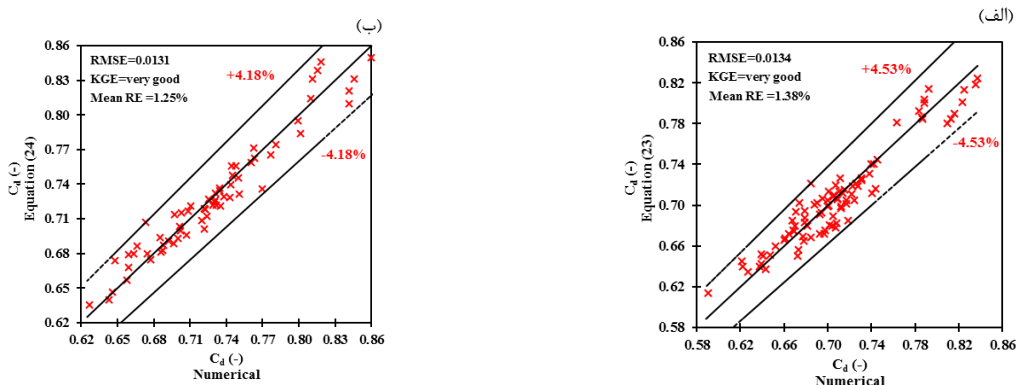
شکل ۱۳- ضریب دبی در چپه کشویی در ضخامت‌های مختلف آستانه الف) آستانه غیرهم‌عرض ب) آستانه هم‌عرض



شکل ۱۴- الف، ج) مقایسه مقادیر عددی و محاسباتی در در چپه کشویی و قطاعی ب، د) درصد خطای نسبی در برابر دبی

$$C_d = 2.542 \left(\frac{H_0}{G}\right)^{0.285} + 0.015 \left(\frac{W}{B}\right)^{0.814} + 1.820 \left(\frac{Z}{B}\right)^{-0.014} + 1.654 \left(\frac{L}{B}\right)^{1.058} \quad (23)$$

$$C_d = 3.54 \left(\frac{H_c}{G}\right)^{0.145} + 1.054 \left(\frac{W}{B}\right)^{0.018} - 1.834 \left(\frac{Z}{B}\right)^{2.184} + 0.892 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.003} + 1.216 \left(\frac{R}{B}\right)^{-0.918} + 1.568 \left(\frac{B}{B}\right)^{0.000} \quad (24)$$



شکل ۱۵- مقایسه مقادیر محاسباتی و عددی ضریب‌دبی در حالت با آستانه الف) دریچه کشویی ب) دریچه قطاعی

ضخامت آستانه کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پارامترهای هیدرولیک جریان در دریچه‌های کشویی و قطاعی به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها در بازه دبی ۰/۰۰۲۵ الی ۰/۱۴۲ متر مکعب بر ثانیه و عمق آب بالادست ۰/۰۵ الی ۰/۴۴ متر انجام پذیرفت. در حل عددی از مش بلاک با اندازه‌های مختلف سلول استفاده شده و در نهایت مش تودرتو با ابعاد مش ۰/۰۱۲ و ۰/۰۰۶ متر به‌دلیل نتایج مطلوب شاخص‌های آماری برای ادامه شبیه‌سازی سایر مدل‌ها استفاده گردید. همچنین مقایسه داده‌های حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل‌های آشفتگی k- ϵ و LES از دقت بالایی برخوردار بوده و با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. در حالت بدون آستانه نتایج نشان داد که بیشترین میزان ضریب‌دبی مربوط به دریچه قطاعی است. مقایسه نتایج به‌دست آمده برای ضریب‌دبی در حالت با آستانه و بدون آستانه حاکی از عملکرد بهتر وجود آستانه از نظر افزایش ضریب‌دبی دارد. به‌طوری‌که با جایگذاری تمامی مدل‌های آستانه در زیر دریچه کشویی و قطاعی، ضریب‌دبی جریان در مقایسه با حالت بدون آستانه افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که آستانه نیم‌دایره به‌دلیل شکل هندسی آن در مقایسه با آستانه مستطیلی ضریب‌دبی بیشتری دارد. همچنین مقایسه ضرایب‌دبی در حالت بدون آستانه و با آستانه در یک بازه‌دبی یکسان نشان داد که میزان عمق جریان در بالادست دریچه کم‌ترین میزان را در مقایسه با حالت بدون آستانه دارد که منجر به کاهش نیروی فشاری وارد بر دریچه و افزایش ضریب‌دبی می‌گردد. در تمامی ارتفاع‌های آستانه، ضریب‌دبی همواره بیشتر از حالت بدون آستانه می‌باشد اما به‌ازای نسبت ثابت پارامتر عمق بالای آستانه به میزان بازه‌دبی، ضریب‌دبی با افزایش ارتفاع آستانه تا یک روند مشخصی افزایش یافته سپس شروع به کاهش می‌کند. افزایش ضخامت آستانه منجر به افزایش تنش برشی در تمامی مدل‌های هم‌عرض و غیرهم‌عرض در آستانه‌ها می‌گردد به‌گونه‌ای که ضریب‌دبی با افزایش

منابع

- روشنگر، ک.، علیرضا زاده صدقیانی، الف. و شهنازی، سامان. ۱۴۰۰. مدل‌سازی ضریب‌دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از روش‌های پایه کرنلی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵ (۱): ۱۲۰-۱۰۹.
- Alhamid, A.A. 1999. Coefficient of discharge for free flow sluice gates. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 11 (1): 33-47.
- Daneshfaraz, R., Ghahramanzadeh, A., Ghaderi, A., Joudi, A.R. and Abraham, J. 2016. Investigation of the effect of edge shape on characteristics of flow under vertical gates. *Journal of American Water Works Association*. 108 (8): E425-E432.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H. and Azamathulla, H.M. 2022. Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients. *Water Supply*. 22 (10): 7767-7781.
- Flow Science Inc. 2016. FLOW-3D V 11.2 User's Manual, Santa Fe, NM, USA; 2016.
- Ghorbani, M.A., Salmasi, F., Saggi, M.K., Bhatia, A.S., Kahya, E. and Norouzi, R. 2020. Deep learning under H₂O framework: A novel approach for quantitative analysis of discharge coefficient in sluice gates. *Journal of Hydroinformatics*. 22 (6): 1603-1619.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377 (1-2): 80-91.
- Henry, H.R. 1950. Discussion on "Diffusion of submerged jets," by Albertson, M. L. et al., *Trans.*

- sluice gates. *Journal of the Hydraulics Division*. 103 (4): 345-351.
- Salmasi, F. and Norouzi Sarkarabad, R. 2018. Investigation of different geometric shapes of sills on discharge coefficient of vertical sluice gate. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 52 (1): 2-2.
- Salmasi, F., Nouri, M., Sihag, P. and Abraham, J. 2021. Application of SVM, ANN, GRNN, RF, GP and RT models for predicting discharge coefficients of oblique sluice gates using experimental data. *Water Supply*. 21 (1): 232-248.
- Salmasi, F., Nouri, M. and Abraham, J. 2019. Laboratory study of the effect of sills on radial gate discharge coefficient. *KSCE J Civ Eng*. 23: 2117-2125.
- Shivapur, A.V. and Shesha Prakash, M.N. 2005. Inclined sluice gate for flow measurement. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 11 (1): 46-56.
- Swamee, P.K. 1992. Sluice gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 118 (1): 56-60.
- White, Frank M. 2016. *Fluid Mechanics* (8th ed). Secacus, United State: McGraw Hill Education.
- Am. Society Civil Engrs. 115:687.
- Karami, S., Heidari, M.M. and Adib Rad, M.H. 2020. Investigation of free flow under the sluice gate with the sill using flow-3D model. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. 44:317-324.
- Mohammed, A. and Moayed, K. 2013. Gate lip hydraulics under sluice gate. *Modern Instrumentation*. 2 (1): 16-19.
- Nasrabadi, M., Mehri, Y., Ghassemi, A. and Omid, M.H. 2021. Predicting submerged hydraulic jump characteristics using machine learning methods. *Water Supply*. 21 (8): 4180-4194.
- Negm, A.M., Alhamid, A.A. and El-Saiad, A.A. 1998. Submerged flow below sluice gate with s sill. *Proceedings of International Conference on Hydro-Science and Engineering Hydro-Science and Engineering ICHE98, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol.III, Published on CD-Rom and A Booklet of Abstracts, 31 Aug.-3 Sep. Cottbus/Berlin*.
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K. 1967. Flow equation for the sluice gate. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 93 (3): 167-186.
- Rajaratnam, N. 1977. Free flow immediately below

Theoretical and Numerical Investigation of the Sluice and Radial Gates Discharge Coefficient in the Conditions of Sill Application

H. Abbaszadeh¹, K. Roushangar^{2*}, Z. Salahpour³
Recived: Jan.23, 2023 Accepted: Apr.25, 2023

Abstract

Underpass gates are structures in which water moves through the gate. The purpose of this research is to investigate the effect of the sill on the hydraulic characteristics of flow in sluice and radial gates numerically using FLOW-3D software. For this aim, sills with different geometric characteristics in width, thickness, and height were investigated. The results showed that the statistical indicators in the RNG turbulence model have high accuracy compared to the $k-\epsilon$, $k-\omega$, and LES models in comparison with the experimental results. The RMSE in the RNG turbulence model for the upstream water depth and the discharge coefficient are 0.0079 m and 0.0117 m, respectively, and the average percentage relative error for these parameters is 2.94% and 1.60%, respectively. The Kling Gupta Efficiency (KGE) for the optimal mesh and mentioned turbulence model is in the very good range. In the same opening in the case without and with a suppressed, the discharge coefficient with the sill is higher than without the sill. Among the investigated sills, the discharge coefficient in the semi-circular sill is higher than in the rectangular sill. Also, the discharge coefficient of the radial gate in the without and with a sill is higher than the sluice gate in the corresponding state. The results showed that the increase in the thickness of the sill leads to an increase in the shear stress of the flow and consequently the discharge coefficient decreases. The discharge coefficient of the gate with different heights of the sill is always higher than the one without the sill, but due to the constant ratio of the depth parameter above the sill to the opening, the discharge coefficient increases with the increase of the height of the sill up to a certain level and then decreases.

Keywords: Discharge Coefficient, FLOW-3D, Nonlinear Regression Equation, Radial Gate, Sluice Gate

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: kroshangar@yahoo.com)