بررسی تأثیر آستانه بر جریان عبوری از دریچه قطاعی در شرایط آزاد

محمّدمهدی حیدری *۱، سحر کرمی ً و محمّدحسین ادیبراد ۱

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی ^۲ دانشآموخته کارشناسی ارشد سازههای آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی

(دریافت: ۹۶/۸/۱۹، پذیرش: ۹۷/۸/۲۶، نشر آنلاین: ۹۷/۸/۲۶)

چکیدہ

دریچههای قطاعی بهمنظور کنترل سطح آب و اندازه گیری دبی در شبکههای آبیاری استفاده میشوند. دقت دبی عبوری از دریچهها و یا دقت تنظیم سطح آب به تخمین ضریب دبی سازه بستگی دارد. ضریب دبی در شرایط بدون آستانه به میزان بازشدگی دریچه و عمق آب بالادست بستگی دارد. ایجاد آستانه در زیر دریچه بر ضریب آبگذری سازه تأثیر میگذارد که این موضوع کمتر توسط محققین ارزیابی شده است. بررسی اثر شکل، ارتفاع و موقعیت آستانه بر ضریب دبی دریچه بر ضریب آبگذری سازه تأثیر میگذارد که این موضوع کمتر توسط محققین ارزیابی شده است. بررسی اثر شکل، ارتفاع و موقعیت آستانه بر ضریب دبی دریچه بر ضریب آبگذری سازه تأثیر میگذارد که این موضوع کمتر توسط محققین ارزیابی شده است. بررسی اثر شکل، ارتفاع و موقعیت شد و عمق آب در بالادست دریچه قطاعی از اهداف اصلی این پژوهش است. در این تحقیق جریان عبوری از دریچه توسط مدل فلوتردی (FLOW3D) شبیهسازی شد و عمق آب در بالادست دریچه و همچنین ضریب دبی توسط نرمافزار محاسبه و با دادههای آزمایشگاهی مقایسه و صحتسنجی شد حداکثر خطای مدل عددی در محاسبه عمق آب و ضریب دبی دریچه به ترتیب ۵ و ۳ درصد است که نشاندهنده دقت مناسب مدل می باشد. بهمنظور بررسی تأثیر مشخصات آستانه بر جریان، از آستانه مستطیلی و نیمدایرهای با ارتفاعهای مختلف استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می دهد که احداث آستانه باعث افزایش مشیب دبی میشود که ارتفاع و شکل آستانه مهم ترین عامل افزایش آن میباشد. در آستانه مستطیلی و نیمدایرهای در حالتی که نسبت ارتفاع آستانه به بازشدگی دریچه برابر ۲ است، ضریب دبی دریچه قطاعی حداکثر و به ترتیب ۱۷/۷ و ۱۳/۳ درصد بیش از حالت بدون آستانه است. در این پژوهش بهمنظور بازشدگی دریچه برابر ۲ است، ضریب دبی دریچه قطاعی حداکثر و به ترتیب ۱۷/۷ و ۱۳/۳ درصد بیش از حالت بدون آستانه است.

کلیدواژهها: دریچههای زیرگذر، ضریب شدت جریان، آستانه دریچه، مدل عددی فلوتردی، جریان آزاد.

۱– مقدمه

با توجه به کمبود آب در کشور، افزایش عملکرد هیدرولیکی و بالا بردن راندمان توزیع آب در شبکههای آبیاری ضروری میباشد. یکی از راهکارهای بالابردن راندمان بهرهوری آب در کشاورزی افزایش دقت در اندازهگیری دبی و کنترل سطح آب است. بهمنظور کنترل دبی و تنظیم سطح آب در شبکههای آبیاری به دریچهها نیاز است. دریچهها انواع مختلفی دارند که معمول ترین آنها دریچههای کشویی و قطاعی میباشد. دریچههای قطاعی مزایای بیشتری نسبت به دریچههای کشویی دارند، ازجمله این که ضریب دری جریان در آن بیشتر و نیروی لازم برای عملیات بهرهبرداری آنها کمتر است. ضریب دبی دریچههای قطاعی در شرایط جریان آزاد و بدون آستانه به عمق آب بالادست، بازشدگی دریچه و مشخصات هندسی دریچه بستگی دارد. تحقیقات متعددی بر ضریب دبی دریچههای کشویی بدون در نظر گرفتن آستانه انجام

1. Music note

شده است. Toch (۱۹۵۵) براساس دادههای آزمایشگاهی روابطی برای ضریب فشردگی و ضریب دبی دریچه قطاعی در شرایط جریان آزاد ارائه داد (به نقل از ۱۹۸۳، Buyalski). وی به این نتیجه رسید که ضریب فشردگی دریچه قطاعی فقط تابع زاویه لبه دریچه نبوده و به نسبت عمق آب بالادست به بازشدگی دریچه نیز بستگی دارد. Buyalski (۱۹۸۳) به منظور تعیین ضریب دبی داد. ایشان برای سه شکل متفاوت از دریچههای قطاعی از جمله داد. ایشان برای سه شکل متفاوت از دریچههای قطاعی از جمله لاستیکی سخت، چوپوقی سان^۱ و لبه تیز به بررسی اثر زاویه افقی لبه دریچه، شعاع دریچه، ارتفاع محل نصب دریچه، عمق آب بلادست و پایین دست بر ضریب دبی پرداخت و روابط تجربی به-منظور تخمین ضریب دبی دریچه های قطاعی در شرایط آزاد و مستغرق ارائه داد. Chemmens و همکاران (۲۰۰۳) به مطالعه هیدرولیکی جریان عبوری از دریچههای قطاعی برای شرایط

^{*} نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۸۵۷۳۹۸۸-۹۱۱

آدرس ایمیل: mm.heidari@razi.ac.ir (م. ح. دیدری)، sahar.karami4464@gmail.com (س. کرمی)، m.adibrad@razi.ac.ir (م. ح. ادیبراد).

جریان آزاد و مستغرق پرداختند. در این راستا روش جدیدی توسعه دادند که از معادله انرژی در بخش بالادست دریچه و معادله اندازه حرکت در بخش پاییندست دریچه بهطور همزمان استفاده میشود و این روش را روش انرژی- مومنتم نامیدند. آنها بیان داشتند در نظر گرفتن افت انرژی دریچه بر افزایش دقت تخمین ضریب دبی ضروری است و بدین منظور مقادیر متوسط ضریب افت انرژی دریچه در شرایط جریان آزاد و مستغرق را ارائه دادند.

شاهرخنیا و جوان (۱۳۸۴) تحقیقات گستردهای برروی دریچههای قطاعی بهمنظور ارائه روابطی برای به دست آوردن دبی عبوری از آنها انجام دادند و با استفاده از دادههای آزمایشگاهی بویالسکی^۲ و برازش چند متغیره غیرخطی، روابطی را برای برآورد ضریب دبی جریان در دریچههای قطاعی بهدست آوردند. قبادیان و همکاران (۱۳۹۰) با تلفیق معادلات انرژی و قطاعی در شرایط استغراق ارائه دادند و نتایج روابط را مورد ارزیابی قرار دادند. امین پور و یاسی (۱۳۹۳) معادلات نظری که جهت برآورد ضریب بده برای سه نوع دریچه قطاعی، با آرایش منفرد در مقطع کنترل کانال، تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق توسط محققین مختلف ارائه شده بود را مورد بررسی قرار دادند.

سوری و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از دادههای آزمایشگاهی به هیدرولیک جریان عبوری از سازه استوانهای متحرک در راستای عمود بر جهت جریان که با جابهجایی آن سه سازه سرریز، سرریز-دریچه و دریچه استوانهای ایجاد میشود، پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که قطر سازه با ضریب دبی رابطه عکس و با افت انرژی رابطه مستقیم دارد، همچنین ارتفاع بازشدگی دریچه با ضریب دبی و افت انرژی جریان رابطه عکس دارد. آنها همچنین روابطی برای ضریب دبی سازه استوانهای متحرک ارائه دادند.

خلیلی شایان و همکاران (۱۳۹۴) با بهرهگیری از مجموعه معادلات انرژی و مومنتم، رابطهای را جهت بر آورد ضریب دبی سه نوع دریچه قطاعی با لبه لاستیکی سخت، چوپوقیسان و لبه تیز در شرایط جریان آزاد ارائه دادند. به منظور شبیه سازی جریان عبوری از دریچه ها می توان از روش های آزمایشگاهی و عددی استفاده نمود. در دهه های اخیر با رشد چشمگیر کامپیوتر و روش های عددی تمایل محققین به مدل های عددی برای شبیه سازی جریان افزایش یافته است.

Kim (۲۰۰۷) برای تعیین مشخصات جریان عبوری از دریچه کشویی شامل ضریب فشردگی، ضریب دبی و توزیع فشار روی دریچه از مدل عددی FLOW-3D استفاده کرد. ایشان محدوده شبیهسازی جریان را تابعی از میزان بازشدگی دریچه در نظر گرفت و برای قسمت ورودی شرط فشار هیدرواستاتیک، قسمت

پاییندست شرط مرزی جریان خروجی (Outflow)، بخش تحتانی شرط مرزی دیواره و قسمت فوقانی شرط مرزی تقارن انتخاب کرد. Akoz و همکاران (۲۰۰۹) با اندازه گیری پروفیل سرعت در بالادست دریچه کشویی به بررسی تأثیر ابعاد شبکهبندی بر دقت نتایج مدل ANSYS پرداختند. آنها از روش VOF برای شبیهسازی پروفیل سطح آزاد جریان و از مدلهای آشفتگی ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ برای شبیهسازی جریان استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد، به منظور افزایش دقت مدل عددی باید اندازه شبکه محاسباتی در زیر دریچه که تغییرات سرعت زیاد است و همچنین در نزدیکی سطح آزاد جریان کوچک درنظر گرفته شود.

و Cassan و Cassan (۲۰۱۲) با استفاده از دادههای آزمایشگاهی و مدل عددی به بررسی مشخصات جریان در بالادست و پاییندست دریچه کشویی پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از دادههای آزمایشگاهی مربوط به پروفیل سرعت در شرایط جریان آزاد و مستغرق به بررسی دقت خروجی مدل هیدرودینامیک Fluent پرداختند و سپس با استفاده از مدل عددی روابطی برای ضریب فشردگی و افت انرژی دریچه کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه دادند.

خدادای و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از نرمافزار FLUENT به بررسی موقعیت نصب و هندسه دریچه قطاعی در میزان توزیع فشار غیر هیدرواستاتیکی و نیروی برآیند وارد بر دریچه قطاعی واقع شده بر روی سرریز اوجی پرداختند. در تحقیق آنها مدل دو معادلهای *K-ε* RNG به عنوان مدل آشفتگی به کار رفته و برای كوپل كردن معادلات سرعت و فشار از الگوريتم SIMPLE استفاده شده است. دادههای آزمایشگاهی USACE به عنوان معیاری برای صحتسنجی مدل عددی به کار برده شد. اکثر تحقیقاتی که قبلاً در خصوص ضریب دبی دریچههای قطاعی انجام شده در حالت بدون آستانه بوده است. ایجاد آستانه در زیر دریچه باعث تغییر در ضریب آبگذری دریچه می شود. شکل، ارتفاع و ابعاد آستانه، محل نصب دریچه قطاعی نسبت به ابتدای آستانه و نسبت عمق آب بالادست به میزان بازشدگی دریچه از متغیرهای مهم در ضریب آبگذری دریچه قطاعی میباشند و توسط محققین بررسی نشده است. لذا در این مطالعه ابتدا با استفاده از دادههای آزمایشگاهی نتایج خروجی مدل FLOW-3D برای شبیهسازی جریان عبوری از دریچه قطاعی صحتسنجی میشود و سپس به بررسی تأثیر مشخصات آستانه بر جریان عبوری از دریچه پرداخته می شود.

۲- روش تحقیق ۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر میدان جریان در سیالات عبارتاند از معادله پیوستگی و اندازه حرکت که برای جریان آشفته تراکمناپذیر با

لزجت و چگالی ثابت به صورت روابط (۱) و (۲) بیان می شوند (Flow Science:):

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_s}{\partial x_i} + g_i + f_i \tag{(Y)}$$

که در آن، ui بیان کننده سرعت در جهت xi (جهات x، y و ک، x زمان، vi جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم r i زمان، vj جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR جرم مخصوص سیال، A جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت is مخصوص سیال، a واستاتیک، gi بیانگر شتاب ثقلی fi بیانگر شتاب ناشی از لزجت است. مؤلفه شتاب ناشی از لزجت در برگیرنده اثرات لزجت مولکولی و لزجت ناشی از آشفتگی است و به صورت رابطه (۳) می،اشد:

$$f_i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{(7)}$$

 $\mu e \mu$ و μ به ترتیب لزجت گـردابهای و ویسکوزیته دینامیکی سیال میباشد. برای محاسبه لزجت گردابهای روشهای متعددی وجود دارد که شامل روشهای صفر (مدل طول اختلاط پرانتل)⁷، یک و یا دو معادلهای (مدل ϵ -RNG یا ($K-\epsilon$ (RNG)) است. استفاده از روابط صریح و ساده برای تعیین دبی عبوری از دریچهها همواره موردتوجه محققین و مهندسین بوده است. بـدین منظور با استفاده از دادههای آزمایشگاهی، صحرایی و یا نتایج خروجی از مدلهای هیدرودینامیکی روابطی برای تعیین دبی عبوری از دریچهها ارائه شده است. متداول ترین شکل رابطه حاکم بر میزان دبی عبوری از دریچههای در شـرایط آزاد به صـورت رابطه (۴) ارائه شده است (Sog، ۱۹۸۹):

$$q = C_d w \sqrt{2gy_0} \tag{f}$$

که در آن *p* دبی در واحد عرض جریان عبوری از دریچه، *Ca* ضریب دبی دریچه، *w* بازشدگی دریچه و *va* عمق آب بالادست دریچه است. لازم به ذکر است عمق آب بالادست دریچه در شرایط وجود آستانه از اختلاف تراز سطح آب بالادست تا رقوم تاج آستانه محاسبه می شود. Toch (۱۹۵۵) به منظور محاسبه ضریب تخلیه در شرایط جریان آزاد رابطه (۵) را پیشنهاد داد (به نقل از ۱۹۸۳، Buyalski):

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c w / y_0}} \tag{(b)}$$

در رابطه (۵) ضریب فشردگی جریان (*C*_c)، از رابطه (۶) محاسبه می شود:

$$C_c = 1 - 0.75(\theta/90) + 0.36(\theta/90)^2$$
(\$)

3. Prandtl's mixing length model



شکل ۱- جزئیات عبور جریان از زیر دریچه قطاعی

که در آن، *θ* زاویه لبه دریچه برحسب درجه بوده و از رابطه (۷) محاسبه می گردد:

$$\theta = \cos^{-1}[(p - w)/r] \tag{Y}$$

در رابطه فوق متغیر p فاصله محور دریچه از کف کانال است. شاهرخنیا و جوان (۱۳۸۴) با استفاده از دادههای آزمایشگاهی

بویالســکی و بران چنـد متغیره غیرخطی رابطه (۸) را جهت برآورد ضریب دبی دریچه قطاعی درشرایط جریان آزاد ارائه دادند.

$$C_d = 0.46(\theta/90)^{-0.36}(y_0/w)^{0.12} \tag{A}$$

شکل (۱) دریچه قطاعی با جریان آزاد را نشان میدهد. در این شـکل، yd عمق آب پاییندست دریچه، y1 عمـق آب در مقطـع فشـردگی و r شعاع دریچه است.

FLOW-3D معرفی مدل

با توجه به توسعه امکانات رایانهای و نیز ارائه نرمافزارهای قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، امکان بررسی جریانات پیچیده با استفاده از شبیهسازی عددی فراهم شده است. در بین نرمافزارهای قابل استفاده، با توجه به ویژگیهایی از جمله سرعت و دقت مطلوب و شبکهبندی مناسب، نرمافزار TLOW-3D برای انجام تحقیق حاضر انتخاب شد. این مدل توسط شرکت Stow Science در سال ۱۹۸۰ توسعه داده شده است. این نرمافزار معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبهای حجم محدود حل میکند. محیط جریان به شبکههایی با سلولهای مکعبی ثابت تقسیمبندی میشود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیتهای وابسته وجود دارد. در این نرمافزار از دو میانگین کمیتهای وابسته وجود دارد. در این نرمافزار از دو شامل روش VOF در پیشبینی سطح آزاد سیال و ترکیب آن با روش FAVOR در تشخیـ__ م مـ_رزهای صلب مـ_یاشد روش Stow Science.

۲-۳- دادههای آزمایشگاهی مورد استفاده

برای صحتسنجی نتایج مدل عددی Flow-3D نیاز به دادههای آزمایشگاهی است. از دادههای آزمایشگاهی Buyalski (۱۹۸۳) برای صحتسنجی ضریب دبی دریچه قطاعی در حالت بدون آستانه استفاده گردید. مجموعه آزمایشگاهی در بخش تحقیقات هیدرولیک دانشگاه کلرادو ساخته شده و شامل یک کانال مستطیلی به طول ۱۱/۵۸ متر، عرض ۷۶۲/۰ متر و عمق ۰/۷۶ متر است. آزمایشات ایشان شامل ۹ حالت مختلف از نوع (لبه تیز، لاستیکی سخت و چوپوقیسان) و ارتفاع پین دریچه (معادل با ۰/۴۶۱، ۰/۴۶۱ و ۵۱۱ متر) می باشد. در تمام حالتها، عرض و شعاع دریچه به ترتیب ۷۱۱/۰ و ۷۰۲/۰ متر است. تعدادی از دادههای مشاهداتی بویالسکی برای دریچه لبه تیز و ارتفاع پین دریچه معادل ۰/۴۰۹ متر و بازشدگی دریچه برابر با ۴ و ۸/۱ سانتیمتر انتخاب و شبیهسازی جریان برای آنها انجام شد. لازم به ذکر است، دادههای مشاهداتی انتخاب شده شامل ۳۶ سری آزمایش در حالت جریان آزاد است که محدوده دبی عبوری از دریچه بین ۳۳/۸۷ تا ۱۳۹/۸۶ لیتر بر ثانیه، عمق آب بالادست دریچه بین ۱۷/۸ تا ۷۲/۶۳ سانتیمتر است.

۲-۴- شبکهبندی، شرایط مرزی و انفصال معادلات

بررسی میدان جریان عبوری از دریچه در این پژوهش به صورت دوبعدی انجام شده است. یکی از عوامل مهم در مدلسازی عددی، تعیین محدوده شبیه سازی است. در صورتی که محدوده حل کوچک در نظر گرفته شود مقدار خطا محاسباتی افزایش یافته و اگر محدوده شبیه سازی بزرگ در نظر گرفته شود، مدت زمان شبیه سازی افزایش می یابد.

Kim (۲۰۰۷) برای شبیهسازی جریان عبوری از دریچه، طولی معادل با ۲۰ و ۶ برابر بازشدگی به ترتیب در بالادست و پاییندست دریچه و ارتفاعی معادل ۱۲ برابر بازشدگی در نظر گرفت. در این تحقیق نیز از نتایج ایشان استفاده گردید. شرایط مرزی و اولیه برای اجرای مدل عددی از اساسیترین مراحل شبیهسازی است. در این تحقیق برای مرز ورودی دبی معلوم، برای قسمت پاییندست شرط مرزی جریان خروجی، برای کف کانال شرط مرزی دیواره و برای قسمت فوقانی محدوده شرط مرزی تقارن انتخاب شده است. با داشتن دبی و براساس روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مقدار عمق تقریبی محاسبه و به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. در شکل (۲) شرایط مرزی به کار رفته آورده شده است. اندازه شبکهبندی در شبیهسازی میدان جریان نقش مهمی دارد. شبکهبندی نامناسب میتواند باعث بروز مشکلات فراوانی در طول شبیهسازی از قبیل عدم همگرایی و پايداري، افزايش ميزان حافظه موردنياز و افزايش زمان شبيهسازي شود.



شکل ۲- شرایط مرزی در شبیهسازی جریان عبوری از دریچه

Kim (۲۰۰۷) برای شبیهسازی دو بعدی جریان عبوری از دریچه، اندازه شبکه در جهت x را بین ۰/۰۲۵ و ۰/۲۶۵ برابر بازشدگی و در جهت z نیز بین ۰/۰۲۵ و ۰/۰۷ برابر بازشدگی در نظر گرفت. لازم به ذکر است با توجه به شبیهسازی دوبعدی اندازه ابعاد شبکه در جهت y برابر عرض دریچه در نظر گرفته می شود. بهمنظور تعیین اندازه سلول بهینه، آزمایش مربوط به بازشدگی ۴ سانتیمتر و دبی ۵۳ لیتر بر ثانیه انتخاب شد و شبیهسازی جریان توسط مدل عددی برای تعداد سلولهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ هزار، ۱ و ۱/۵ میلیون با متوسط اندازه سلولها در جهت x و z به ترتیب معادل ۳، ۲/۲، ۱/۶، ۱، ۹/۹ و ۰/۸ میلیمتر، انجام شد. مقدار عمق آب از طریق مدل عددی تعیین و مقدار درصد خطا برای هر شبیهسازی محاسبه شد. در شکل (۳) درصد خطای عمق آب محاسباتی و مدت زمان اجرای مدل آورده شده است. با افزایش تعداد سلولهای محاسباتی، مقدار خطا کاهش و مدت زمان اجرای مدل افزایش می یابد. همچنین در صورتی که تعداد سلول های محاسباتی بیش از ۸۰۰ هزار (متوسط اندازه سلولها معادل ۱ میلیمتر) باشد، ریز کردن اندازه سلول اهمیت چندانی بر دقت نتایج نداشته و تنها مدت زمان اجرای مدل عددی افزایش می یابد. بنابراین در این تحقیق متوسط اندازه سلولها در جهت x و z برابر ۱ میلیمتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق ابتدا از یک شبکه درشت با سلولهایی به اندازه ۳ میلیمتر در جهت x و z استفاده شد و بعد از اتمام شبیهسازی نتایج خروجی از آن به عنوان شرایط اولیه برای شبکه ریز با سلولهایی به اندازه ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است. برای جداسازی معادله اندازه حرکت از شمای Second Order و مدل آشفتگی *K-ɛ* (RNG) استفاده شده است. شکل (۴) نمونهای از مشبندی محدوده حل و فشار محاسباتی برای دریچه قطاعی با بازشدگی ۴ سانتیمتر، ارتفاع آستانه ۴ سانتیمتر و دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه آورده شده است.





همانطور که ملاحظه میشود بعد از ۳۵ ثانیه عمق آب در بالادست و دبی در پاییندست تقریباً ثابت میشود. با توجه به اینکه، یکی از اهداف تحقیق بررسی شکل، ارتفاع و محل قرار گرفتن آستانه بر ضریب دبی دریچه قطاعی است. از دو شکل آستانه مستطیلی و نیمدایره با ارتفاعهای ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی متر استفاده گردید. لازم به ذکر است، در شبیه سازی ها میزان بازشدگی دریچه ۴ سانتی متر و طول آستانه مستطیلی ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. دریچه در آستانه نیم دایره دقیقاً بر روی رأس آن و در آستانه مستطیلی در سه فاصله ۴، ۸ و ۱۲ سانتی متری از ابت دای آستانه قرار داشت. در شکل (۶) آستانه های مورد استفاده در شبیه سازهای عددی آورده شده است.



شکل ۳- تأثیر تعداد سلولهای محاسباتی بر دقت مدل عددی و مدت زمان اجرای مدل



شکل ۴- نمونهای از مشبندی محدوده حل و فشار محاسباتی برای دریچه قطاعی با بازشدگی ۴ سانتیمتر

مدت زمان شبیه سازی جریان در مدل عددی توسط کاربر انتخاب می شود. در صورت انتخاب مدت زمان کم، ممکن است جریان هنوز ماندگار نشده باشد و انتخاب مقدار زیاد آن نیز، زمان اجرای برنامه را طولانی می کند. در این تحقیق، برای هر شبیه سازی هیدرو گراف عمق-زمان در مرز بالادست و هیدرو گراف دبی-زمان در مرز پایین دست ترسیم و بر اساس آن انتهای شبیه سازی انتخاب شد.



شکل ۶- آستانههای مورد استفاده در تحقیق حاضر برای دریچه





قطاعى

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه نتایج مدل عددی با دادههای آزمایشگاهی

در این تحقیق از دادههای از دادههای آزمایشگاهی Buyalski در این تحقیق از دادههای از دادههای آزمایشگاهی در حالت آزاد استفاده شده است. بعد از شبکهبندی مدل آزمایشگاهی در نرمافزار Flow-3D و اعمال شرایط مرزی برای آزمایشات انتخاب شده، مدل عددی برای دبیهای مختلف اجرا و عمق آب بالادست مده، مدل عددی برای دبیهای مختلف اجرا و عمق آب بالادست عرض دریچه از طریق نرمافزار محاسبه شد. سپس مقدار دبی در واحد استفاده از رابطه (۹) مقدار ضریب دبی دریچه در شرایط آزاد محاسبه شد.

$$C_d = q/(w\sqrt{2gy_0}) \tag{9}$$

در شکل (۷) منحنی بهرهبرداری و ضریب دبی مشاهداتی و محاسباتی آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، با افزایش پارامتر بی بعد ۲+ (نسبت عمق آب بالادست به میزان باز شدگی دریچه) مقدار ضریب دبی دریچه قطاعی نیز افزایش می یابد. عمق آب و ضریب دبی محاسبه شده توسط مدل -Flow 3D با داده های مشاهداتی اختلاف ناچیزی دارد، که بیانگر دقت مناسب مدل عددی در شبیه سازی جریان عبوری از دریچه می باشد.



شکل ۷- الف) منحنی بهرهبرداری، ب) ضریب دبی مشاهداتی و محاسباتی دریچه قطاعی



سکل ۸- مفایسه عمق آب و صریب دبی مساهدانی و محاسباتی مربوط به آزمایشات بویالسکی (۱۹۸۳)

به منظور بررسی دقت مدل عددی، مقادیر ضریب دبی و عمق آب محاسباتی و مشاهداتی در مقابل هم در شکل (۸) ترسیم شدهاند. ضریب زاویه خط عبور کرده از بین نقاط عمق آب و ضریب دبی به ترتیب ۸۸۸/۰ و ۱/۰۱ و ضریب تبعین[†] به ترتیب ۹۹/۰ و ۸۹۸۶/۰ است که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی TBow-3D در شبیه سازی جریان عبوری از زیر دریچه قطاعی می باشد. همچنین متوسط و حداکثر درصد خطای مدل عددی در محاسبه ضریب دبی دریچه قطاعی به ترتیب ۱/۳ و ۳ درصد و همین متغیرهای آماری برای عمق آب بالادست دریچه به ترتیب ۲/۴ و ۵ درصد است.

۳-۲- تأثیر ارتفاع آستانه زیر دریچه قطاعی بر مشخصات هیدرولیکی جریان

در این تحقیق از دو شکل آستانه مستطیلی و نیمدایره با ارتفاع ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتیمتر استفاده گردید. لازم به ذکر است طول آستانه مستطیلی ۱۶ سانتیمتر و بازشدگی دریچه ۴ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. دریچه در آستانه نیمدایره دقیقاً بر روی رأس آن و در آستانه مستطیلی در فاصله ۴

^{4.} Coefficient of determination

سانتیمتری از ابتدای آستانه قرار داشت. پس از شبیهسازی برای دبیهای مختلف، پروفیل سطح آب ترسیم و عمق آب در بالادست دریچه و ضریب دبی دریچه محاسبه شد. در شکل (۹) برای ارتفاع آستانه ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتری ضریب دبی دریچه آورده شده است.

همانطور که ملاحظه میشود، ضریب دبی دریچه قطاعی با آستانه نسبت به شرایط بدون آستانه بیشتر است. در دریچه قطاعی با آستانه مستطیلی و نیمدایرهای به ازای *H ثابت، افزایش ارتفاع آستانه تا ۸ سانتیمتری باعث افزایش ضریب دبی میشود و برای ارتفاع بیش از آن ضریب دبی نسبت به آستانه ۸ سانتیمتر کاهش مییابد. در شکل (۱۰) تأثیر نسبت ارتفاع آستانه مستطیلی و نیمدایرهای به بازشدگی دریچه، *P/M*، بر ضریب دبی دریچه قطاعی آورده شده است. لازم به ذکر است در شکل مربوطه، متغیر *D* و *C* به ترتیب مربوط به ضریب دبی دریچه بدون آستانه و با آستانه میباشد.





افزایش نسبت *P/w در* ابتدا باعث افزایش ضریب دبی دریچه قطاعی می شود، در آستانه مستطیلی و نیم دایرهای در حالتی که ۲= *P/w* ضریب دبی دریچه حداکثر است. در این حالت ضریب دبی دریچه قطاعی با آستانه مستطیلی و نیم دایرهای نسبت به حالت بدون آستانه به ترتیب ۲/۷ و ۱۳/۳ درصد افزایش مییابد و برای نسبت های بیشتر از ۲> *P/۳* افزایش ضریب دبی کمتر است.





بهمنظور تصحیح ضریب دبی دریچه با آستانه روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب برای آستانه مستطیلی و نیمدایرهای ارائه میشود:

 $\frac{C}{C_d} = 1 + 0.06(p/w)^{-0.8} exp[-(p/w)^{-2}]$ (1.)

$$\frac{C}{C_d} = 1 + 0.3(p/w)^{-0.8} exp[-(p/w)^{-2}]$$
(11)

به منظور صحتسنجی رابطه ارائه شده، مدل 3D-Flow برای آستانه های مختلف و در دبی های مختلف مجدداً اجرا و ضریب دبی محاسبه و با روابط (۱۰) و (۱۱) مقایسه شد. در شکل (۱۱) ضریب دبی محاسبه شده توسط مدل هیدرودینامیک و نتایج روابط ارائه شده، آورده شده است. ضریب زاویه خط عبور کرده از بین نقاط ۱/۰۰۵ و ضریب تبعین ۱/۹۹ است. همچنین متوسط و حداکثر درصد خطای روابط ارائه شده به ترتیب ۱/۲۷ و ۳ درصد است که نشان دهنده دقت مناسب روابط است.



شکل ۱۱- ضریب دبی محاسبه شده توسط مدل هیدرودینامیک و نتایج روابط ارائه شده



شکل ۱۲- تأثیر محل نصب دریچه قطاعی نسبت به آستانه مستطیلی بر ضریب دبی

۳-۳- تأثیــر محــل نصـب دریچـه قطاعـی روی آستانه مستطیلی بر ضریب دبی

محل نصب دریچه نسبت به ابتدای آستانه مستطیلی از عوامل مؤثر بر ضریب دبی دریچه میباشد. در این تحقیق، در شرایطی که ارتفاع آستانه مستطیلی ۸ سانتیمتر و فاصله محل نصب دریچه کشویی نسبت به ابتدای آستانه ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتر است، ضریب دبی دریچه محاسبه و نتایج در شکل (۱۲) آورده شده است.

ضریب دبی دریچه قطاعی با افزایش فاصله نصب دریچه نسبت به ابتدای آستانه کاهش می یابد و در نتیجه اثر آستانه مستطیلی بر ضریب دبی جریان کمتر می شود. همان طور که مشاهده می شود، بیشترین افزایش ضریب دبی دریچه قطاعی مربوط به حالتی است که محل نصب دریچه در فاصله ۴ سانتیمتری از ابتدای آستانه باشد و کمترین اثر را فاصله ۱۲ سانتیمتری از ابتدای آستانه دارد. برای دبی ۲/۳۵ لیتر بر ثانیه درصورتی که دریچه کشویی در فاصله ۴ و ۱۲ سانتیمتری از ابتدای آستانه نصب شده باشد، ضریب دبی به ترتیب ۲/۵ و ۲/۱ درصد نسبت به حالت بدون آستانه افزایش می یابد.

۳-۴-تأثیر شکل آستانه زیر دریچه قطاعی بر مشخصات هیدرولیکی جریان

به منظور بررسی تأثیر شکل آستانه بر ضریب دبی دریچه قطاعی از آستانه های مستطیلی و نیم دایره ای با ارتفاع های مختلف استفاده شد. در شکل (۱۳) تأثیر نوع آستانه (مستطیلی و نیم دایره ای) با ارتفاع های ۴، ۸ و ۱۲ سانتی متری بر ضریب دبی دریچه قطاعی آورده شده است. در شرایطی که از آستانه نیم دایره ای در زیر دریچه قطاعی استفاده شود؛ ضریب دبی جریان افزایش قابل توجه ای نسبت به آستانه مستطیلی خواهد داشت.



شکل ۱۳- تأثیر شکل آستانه بر ضریب دبی دریچه قطاعی برای ار تفاع آستانه ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتری: الف) ار تفاع آستانه ۴ سانتیمتر، ب) ار تفاع آستانه ۸ سانتیمتر، ج) ار تفاع آستانه ۱۲ سانتیمتر

آستانه مستطیلی با ارتفاع ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتری بهطور متوسط باعث افزایش ۸/۵۰، ۴/۱ و ۱/۵ درصد ضریب دبی و آستانه نیمدایرهای با ارتفاع ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتری بهطور متوسط باعث افزایش ۸/۵، ۹/۸ و ۶/۲ درصد ضریب دبی دریچه قطاعی شده است. بیشترین اثر آستانه نیمدایرهای در افزایش ضریب دبی مربوط به آستانهای با ارتفاع ۸ سانتیمتر میباشد.

نتایج نشان میدهد که در ^{*}H (نسبت عمق آب بالادست به میزان بازشدگی دریچه) زیاد، آستانه نیمدایرهای اثر بیشتری بر افزایش ضریب دبی دارد. زیرا هنگامیکه از آستانه نیمدایرهای

استفاده می شود، به دلیل افزایش انحنای خطوط جریان، سرعت جریان عبوری از زیر دریچه افزایش یافته و در نتیجه فشار کاهش خواهد یافت. در پایین دست آستانه نیم دایره ای ممکن است فشار منفی ایجاد شود که این فشار منفی با مکش همراه بوده و هر اندازه *H زیادتر باشد، فشار منفی تر و مکش بیشتر خواهد شد. با ایجاد مکش تراز سطح آب بالادست دریچه کاهش یافته و همین امر سبب افزایش ضریب دبی دریچه می شود. در شکل (۱۴) برای سه نیم دایره ای آورده شده است.لازم به ذکر است در شکل مربوطه x فاصله افقی هر نقطه از ابتدای آستانه و L فاصله افقی انتها و ابتدای آستانه می باشد. همان طور که ملاحظه می شود، فشار منفی از رأس آستانه می باشد. همان طور که ملاحظه می شود و با افزایش دبی، مقدار فشار منفی کمتر می شود.

۴- نتیجهگیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر آستانه بر ضریب دبی جریان دریچه قطاعی در شرایط جریان آزاد پرداخته شده است. به دنبال این بررسی پارامترهایی همچون ارتفاع آستانه، موقعیت قرار گیری آستانه و شکل آستانه موردتوجه قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می،دهد که احداث آستانه در زیر دریچه باعث افزایش ضریب دبی می شود. همچنین آستانه نیم دایرهای نسبت به آستانه مستطیلی بیشتر ضریب دبی دریچه قطاعی را افزایش میدهد. یکی از متغیرهایی که بر ضریب دبی دریچه اثر می گذارد نسبت ارتفاع آستانه به بازشدگی دریچه، *P/w،* میباشد. حداکثر ضریب دبی در شرایط آستانه مستطیلی و نیمدایرهای در P/w برابر ۲ میباشد. در این حالت ضریب دریچه قطاعی به ترتیب حدود ۲/۷ و ۱۳/۳ درصد افزایش می یابد. یکی دیگر از عوامل اثر گذار بر ضریب دبی دریچه با آستانه مستطیلی، موقعیت محل نصب دریچه نسبت به ابتدای آستانه است. با افزایش فاصله نصب دریچه نسبت به آستانه، میزان افزایش ضریب دبی کمتر می شود و به عبارت دیگر تأثیر آستانه بر ضریب دبی کمتر میشود.

در این پژوهش با استفاده از خروجی مدل Flow-3D روابطی برای محاسبه ضریب دبی دریچه قطاعی با آستانه مستطیلی و نیم دایره ای ارائه شد که با توجه به دادههای خروجی مدل، حداکثر خطای روابط ارائه شده حدود ۳ درصد می باشد.



شکل ۱۴- توزیع فشار روی آستانه نیمدایرهای برای ارتفاع آستانه ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتری: الف) ار تفاع آستانه ۴ سانتیمتر، ب) ارتفاع آستانه ۸ سانتیمتر، ج) ارتفاع آستانه ۱۲ سانتیمتر

۵- مراجع

امین پور ی، یاسی م، فرهودی ج، خلیلی شایان ح، "بررسی آزمایشگاهی و صحرایی دریچههای قطاعی به عنوان سازه اندازه گیری جریان تحت شرایط آزاد و مستغرق"، مجله آب و خاک، ۱۳۹۳، ۲۸ (۴)، ۷۰۷-۶۹۵.

- خدادادی پ، صالحی نیشابوری س ع ۱، صفرزاده ۱، "بررسی عددی توزیع فشار بر روی سطح سرریز اوجی دریچهدار با استفاده از نرمافزار FLUENT"، نهمین کنگره بینالمللی مهندسی عمران، اصفهان ایران، ۱۹ تا ۲۱ اردیبهشت، ۱۳۹۱.
- خلیلی شایان ح، فرهودی ج، روشن ر، "برآورد ضریب دبی جریان عبوری از دریچههای کشویی و قطاعی"، مجله پژوهش آب ایران، ۱۳۹۴، ۹ (۱)، ۱۶۷-۱۵۳.
- سوری ا، مسعودیان م، کردی ا، راتچر ک، "بررسی آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی و افت انرژی در سرریز- دریچه استوانهای با حرکت قائم"، مجله مهندسی عمران و محیط زیست، ۶۵-۷۸ (۴)، ۴۴ (۶)، ۲۹-۹۵.
- شاهرخنیا م ع، جوان م، "برآورد ضریب دبی جریان در دریچههای قوسی"، مجله هیدرولیک، ۱۳۸۴، ۱ (۱)، ۱۱–۱۱.
- قبادیان ر، یعقوبی م، زارع م، "مقایسه دو روش تئوری تلفیق معادلات انرژی و اندازه حرکت در تخمین دبی عبوری از
- دریچههای قطاعی در شرایط استغراق "، مجله پژوهش آب ایران، ۱۳۹۰، ۵ (۹)، ۲۱۹-۲۱۱.
- Akoz M, Kirkgoz M, Oner A, "Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow", Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (2), 167-176.
- Bos MG, "Discharge measurement structures", International institute for land reclamation and improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands, 1989.
- Buyalski CP, "Discharge algorithms for canal radial gates", Prepared by Engineering and Research Center, U.S. Bureau of Reclamation, 1983.
- Cassan L, Belaud G, "Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates", Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138 (4), 367-373.
- Clemmens A, Strelkoff T, Replogle J, "Calibration of submerged radial gates", Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129 (9), 680-687.
- Flow Science Inc, "FLOW-3D user's manual version 11.0", Santa Fe, Mexico, 2014.
- Kim D, "Numerical analysis of free flow past a sluice gate", KSCE Journal of Civil Engineering, 2007, 11 (2), 127-132.
- Toch A, "Discharge characteristics of Tainter gates", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1955, 120, 290-300.



EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Free Flow under the Radial Gate with the Sill

Mohammad Mehdi Heidari^{*}, Sahar Karami, Mohammad Hossein Adib Rad

Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 11 November 2017; Accepted: 18 November 2018

Keywords:

Discharge coefficient, Flow-3D model, Free flow, Radial gate, Sill.

1. Introduction

Due to the water shortage in developing countries, increasing the hydraulic performance and increasing the efficiency of water distribution in irrigation networks is necessary. One of the strategies for improving the efficiency of agricultural water productivity is increasing the accuracy of discharge measurement and controlling the water level. Gates are needed in order to control the amount of water released from dams and for regulating the water level in irrigation networks. There are different types of gates, and the most common types of gates are sluice gates and radial gates. Gates are used widely in irrigation networks; therefore choosing small dimensions for the gates can reduce the channel costs. One of the ways for reducing the dimensions of the gate is to create a sill at the bottom of the canal and install the gate on the sill, so the design height of the gate is reduced and it's economically affordable. Estimation of the discharge coefficient of discharge for free flow radial gates without the sill depends on the upstream water level and the gate opening (Bos, 1989). The objective of this paper is to investigate the effect of characteristics of sill such as the shape, height and location on the discharge coefficient for free flow radial gates. To achieve this goal, first, the Flow-3D model's output results for simulation of flow passing through a gate is examined.

2. Methodology

2.1. Flow-3D Model

According to the development of computer facilities, as well as providing robust software in the field of computational fluid dynamics, it is possible to study complex flow using numerical simulation. Among the software that can be used by considering characteristics such as; speed, optimum accuracy and simple mesh building, the Flow-3D software has been chosen for this research. This model has been developed by the Flow Science Company in 1980 and is very much popular among the users, one of the reasons for this models popularity is its great graphical results. This software solves the 3D transient Navier-Stokes equations with finite volume approximations. This program evaluates the location of the flow obstacles and rigid boundaries by FAVOR technique and tracks the free flow surface by VOF technique. The flow region is divided into cubic cells, and for each cell there are mean values of dependent quantities (Flow Science, 2014).

2.2. Experimental Investigation

In this paper, Buyalski's (1983) experimental data were used for evaluating the accuracy of the Flow-3D model results. The experiments were conducted in a rectangular laboratory flume with 11.58 m length and 0.762 m width. Seven different gate openings and three different gate lip seal configurations were used in the

^{*} Corresponding Author

E-mail addresses: mm.heidari@razi.ac.ir (Mohammad Mehdi Heidari), sahar.karami4464@gmail.com (Sahar Karami), m.adibrad@razi.ac.ir (Mohammad Hossein Adib Rad).

model studies. In the presented research, the radius of the gate is 0.702m, the gate openings are 4 and 8.1 cm, and the trunnion-pin height is 0.409 m.

3. Results and discussion

3.1. Validity of the Flow-3D Model Results

After constructing of the mesh and applying the boundary conditions for the selected experiments, the Flow-3D model was run, and the water depth was calculated. Then the discharge coefficient was determined. The observed and calculated water depth and discharge coefficients for the free flow radial gate are shown in Fig 1.



Fig. 1. Observed and calculated water depth and discharge coefficients regarding Buyalski's experiments

The water depth and gate's discharge coefficient calculated by the Flow-3D model is very close to the observed data. The maximum relative errors of the numerical model in estimating the discharge coefficient and water depth are 3% and 5% respectively, which are suitable for predicting the characteristics of flow passing through a gate.

3.2. The Effect of the Sill Height under the radial Gate on the Discharge Coefficient

In this research two different sill shapes (rectangular and semicircular) with 6 different heights (P=2, 4, 6, 8, 10, 12 cm) were used. The Rectangular sill length was 16 cm, and the gate opening was considered 4 cm. The gate was located on the head of the semicircular sill and at a distance of 4 cm from the beginning of the rectangular sill. After simulation for different discharges, the water depth upstream of the gate and the radial gate's discharge coefficient were calculated. The effects of the rectangular and semicircular sill's height on the radial gate's discharge coefficient are shown in Fig 2.



Fig. 2. The effects of the rectangular and semicircular sill's height on the radial gate's discharge coefficient

This figure shows that the radial gate's discharge coefficient in the condition with sill is higher than the condition without sill. Fig. 2 also shows that sill height has an important effect on Cd values, as the sill height increase, the discharge coefficient for free flow sluice gates increase until a specific height is got, then Cd values start decreasing. The tested rectangular and semicircular sill of 8cm gave the highest discharge coefficient.

3.3. The Effect of the Installation Location of the radial Gate on the Rectangular Sill on the Discharge Coefficient

The installation location of the radial gate relative to the beginning of the rectangular sill is one of the factors that affect the gate's discharge coefficient. In this research, the gate's discharge coefficient is calculated in the condition where the rectangular sill's height is 8cm, and the installation location of the gate relative to the beginning of the sill is 4, 8, and 12cm, and the results are shown in Fig 3.



Fig. 3. The effect of the installation location of the radial gate relative to the rectangular sill on the discharge coefficient.

By increasing the distance of the gate's installation location relative to the beginning of the sill, the radial gate's discharge coefficient decreases, therefore the effect of the rectangular sill on the discharge coefficient reductions. For a discharge of 62.35 lit/s, if the radial gate is installed in a distance of 4 and 12cm from the beginning of the sill, the discharge coefficient increases 4.5% and 2.1% relatively compared to the condition without sill.

4. Conclusions

In this research, the effect of the sill on the radial gate's discharge coefficient in free flow condition has been studied. Therefore, evaluation of the effect of the height, location, and shape of the sill has been considered. The results indicate that creating a sill under the gate increases the discharge coefficient; also the semicircular sill increases the radial gate's discharge coefficient more than the rectangular sill. One of the variables that affect the gate's discharge coefficient is the ratio of the sill height to the gate opening (P/w), the maximum radial gate discharge coefficients for rectangular and semicircular sills is in P/w equal to 2, where in this case the sluice gate's coefficient increases 2.7% and 13.3% respectively. Another factor that affects the radial gate with a rectangular sill's discharge coefficient is the installation location of the gate relative to the beginning of the sill. By increasing the distance of the gate relative to the beginning of the sill, the discharge coefficient starts to decrease. In other words, the effect of the sill on the discharge coefficient diminutions.

5. References

Buyalski CP, "Discharge algorithms for canal radial gates", Prepared by Engineering and Research Center, U.S. Bureau of Reclamation, 1983.

Flow Science Inc, "FLOW-3D user's manual version 11.0", Santa Fe, Mexico, 2014.

Bos MG, "Discharge measurement structures", International institute for land reclamation and improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands, 1989.