

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Numerical Investigation of Flow Characteristics and Discharge Coefficients on a Submerged Cylindrical Weir-Gate by Using Computational Dynamics

## بررسی عددی مشخصات جریان و ضریب دبی عبوری از سرریز دریاچه های استوانه ای مستغرق با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

Mohammad Amin Tutunchian<sup>1\*</sup> and Hamid Rostambeigi<sup>2</sup>

محمد امین توتونچیان<sup>۱\*</sup> و حمید رستم بیگی<sup>۲</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

2- M.Sc. in Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [amin@pnu.ac.ir](mailto:amin@pnu.ac.ir)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [amin@pnu.ac.ir](mailto:amin@pnu.ac.ir)

Received: 22/07/2020

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

Revised: 22/09/2021

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

Accepted: 04/10/2021

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

### چکیده

Combined structure of weir and gate due to the simultaneous flow of suspended material from on the overflow and material deposited in the flow of water from the valve section, provides better conditions compared to other structures used to measure the discharge in the channels. Nowadays, numerical solution methods without the need of laboratory equipment and the ability to calculate the desired parameters, with low time and cost is considered as one of the efficient methods of flow analysis. In this research, by using CFD and numerical solution method with FLOW-3D software for different diameters of combined structure of weir and gate was simulated. Flow simulation was performed in a channel with 3 mm length, 0.4 mm width and 0.5 mm height. The models were studied in cylindrical diameter of 5, 7.5, 10 and 12.5 cm, and for openings gates of 1, 2 and 3 cm. The flow was also simulated and studied for all models at 4 discharges of 12, 16, 20 and 22 lit/s. Comparing the discharge coefficient results with the dimensionless parameter of water depth upstream to water depth downstream of the overflow-valve combined model, it was observed that the numerical results obtained using the RNG turbulence model provide closer data to laboratory results. In the validation stage of numerical results with laboratory outputs of previous researches, the error percentage of the simulated model was calculated to be less than 5%, which indicates the acceptable accuracy of numerical modeling. The results showed that with increasing the flow, when the diameter and opening of the valve are fixed, the flow coefficient increases. At a constant diameter of the overflow-valve model, the flow coefficient decreases in exchange for increasing the valve opening. For a constant flow rate and diameter, changes in flow rate decrease with increasing valve opening height. It was also observed that the curvature of the flow surface profile increases with increasing diameter of the cylindrical model.

سازه ترکیبی سرریز-دریاچه به دلیل قابلیت عبور همزمان مواد معلق از روی سرریز و مواد ته نشین شده در جریان آب از قسمت دریاچه، در مقایسه با سازه های دیگری که برای اندازه گیری دبی در کانال ها به کار برده می شوند، شرایط بهتری ایجاد می کند. در این تحقیق با بهره گیری از علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D جریان عبوری برای قطرهای مختلف سرریز-دریاچه استوانه ای بررسی شد. شبیه سازی جریان در کانالی به طول ۳، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۵ متر انجام گرفت. مدل ها برای قطرهای استوانه ای ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ سانتی متر و برای سه بازشدگی دریاچه ۱، ۲ و ۳ سانتی متر و جریان در ۴ دبی ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۲ لیتر بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفتند. از مقایسه نتایج ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد نسبت عمق آب در بالادست به عمق آب در پایین دست مدل ترکیبی سرریز-دریاچه مشاهده شد که نتایج عددی به دست آمده با به کارگیری مدل آشفتگی RNG داده های نزدیک تری به نتایج آزمایشگاهی ارائه می دهند. در مرحله صحت سنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تحقیقات گذشته، درصد خطای مدل شبیه سازی شده کمتر از ۵ درصد محاسبه شد که بیانگر دقت قابل قبول مدل سازی عددی است. نتایج بررسی ها نشان داد با افزایش دبی، در قطر و بازشدگی دریاچه ثابت، ضریب دبی افزایش می یابد. در یک قطر ثابت از مدل سرریز-دریاچه، به ازای افزایش بازشدگی دریاچه، ضریب دبی کاهش می یابد. به ازای یک دبی و قطر ثابت، با افزایش ارتفاع بازشدگی دریاچه، تغییرات ضریب دبی روند کاهشی دارد. هم چنین مشاهده شد انحنا ی پروفیل سطح جریان با افزایش قطر مدل استوانه ای بیشتر می شود.

**Keywords:** Cylindrical weir-gate, Discharge coefficient, Dimensionless parameters, Numerical solution, FLOW-3D software.

**واژه های کلیدی:** سرریز- دریاچه استوانه ای، ضریب دبی، پارامترهای بدون بعد،

حل عددی، نرم افزار FLOW-3D

۱۳۹۵). مسعودیان و همکاران (۱۳۹۳) با مطالعه هیدرولیک جریان عبوری از نمونه آزمایشگاهی سرریز-دریچه نیم استوانه‌ای در یک بازشدگی ثابت، اثر چرخش سازه پیرامون محوری خارج از مرکز نیم استوانه را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد بیشترین و کمترین ضریب دبی به ترتیب در زوایای ۳۳۰ و ۹۰ درجه رخ می‌دهد. همچنین این محققین نتیجه گرفتند که علاوه بر زاویه قرارگیری انحنای نیم استوانه، قطر سازه بر ضریب دبی عبوری از سازه‌ی ترکیبی نیم استوانه تاثیرگذار است. همچنین Masoudian et al. (2013) مطالعاتی را برای بررسی تأثیر اندازه ابعاد کانال بر میزان ضریب تخلیه سازه ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای، آزمایش‌هایی در دو کانال مستطیلی با ابعاد متفاوت انجام دادند.

اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۹) الگوی جریان عبوری از روی سرریزهای استوانه‌ای را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. در این مطالعه آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی دانشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی انجام شده و برای مدل‌سازی جریان در حل عددی از نرم‌افزار FLUENT استفاده شده است. طول کانال آزمایشگاهی ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع آن ۰/۵ متر بوده است و سرریزها در قطرهای متفاوت ۵۷، ۶۳، ۱۱۰ و ۱۶۰ میلی‌متر، در دو حالت بدون پایه و با پایه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج داده‌های آزمایشگاهی و عددی این محققین حاکی از این است محل تشکیل عمق بحرانی قبل از تاج سرریز و جدایش جریان از روی سرریز در ناحیه انتهایی آن صورت می‌گیرد. محل جدایش بستگی به شدت جریان عبوری از روی سرریز داشته و با افزایش آن به سمت پایین دست منتقل می‌شود. تحقیق Chanson (2009) به بررسی اثر گردشگی لبه سرریز بر توزیع فشار و ضریب دبی آن پرداخت و نشان داد که گردشگی لبه سرریز روی الگوی جریان و ضریب دبی موثر است.

Ferro (2000) با استفاده از آنالیز ابعادی براساس تئوری باکینگهام و مدل ISS یک رابطه دبی-اشل برای جریان هم‌زمان از رو و زیر دریچه‌ی قائم لبه پهن به دست آورد. وی در معادله استخراج شده نشان داد پارامترهای بدون بعد نسبت عمق بحرانی به ارتفاع بازشدگی دریچه به ازای مقدار دبی مشخص با پارامتر بدون بعد نسبت هد آب روی دریچه بر میزان بازشدگی آن رابطه مستقیم دارد. Jun-Fu et al. (2001) مشخصات هیدرولیکی و کنترل دبی دریچه‌های قطاعی را بررسی کرده و در طی این آزمایش‌ها معادلات تئوری برای ضریب دبی و ماکزیمم بازشدگی مجاز دریچه برای دریچه‌های قطاعی به دست آوردند. همچنین برای دبی، معادلات بی بعدی برحسب عمق آب بالا و پایین دست

دریچه‌ها و سرریزها برای کنترل سطح آب، تنظیم جریان و همچنین به منظور اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از یک مقطع، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با تجمع رسوبات و مواد شناور پشت این سازه‌ها و به دنبال آن تغییر شکل کانال، پس‌زدگی جریان، سرریز شدن آب از جوانب کانال و مشکلات دیگر در بهره‌مندی از این سازه‌ها، محققین این زمینه همواره در تلاش برای افزایش کارایی و دقت عملکرد دریچه‌ها و سرریزها برآمدند و به همین منظور استفاده از سازه ترکیبی سرریز-دریچه را به جای به کارگیری جداگانه این سازه‌ها پیشنهاد نمودند.

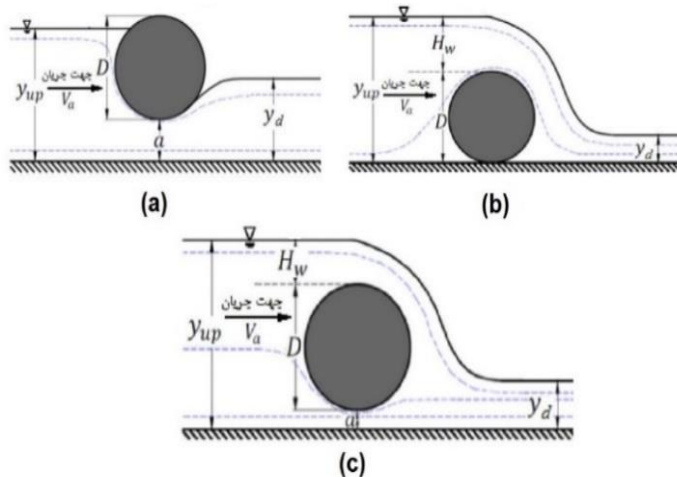
استفاده از سازه ترکیبی سرریز-دریچه به دلیل قابلیت عبور هم‌زمان مواد معلق از روی سرریز و مواد ته‌نشین شده در جریان آب از قسمت دریچه، در مقایسه با سازه‌های دیگری که برای اندازه‌گیری دبی در کانال‌ها به کار برده می‌شوند، شرایطی بهتر و نزدیک به واقعی را فراهم می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود با بهره‌گیری از سازه ترکیبی سرریز-دریچه بتوان با دقت بیشتری دبی را برآورد نمود (Chanson and Montes, 1989). از آنجایی که در سازه‌های ترکیبی سرریز-دریچه، تداخل جریان از زیر دریچه و روی سرریز باعث اختلاط جریان می‌شود، شبیه‌سازی الگوی جریان، سطح آزاد آب و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند ضریب دبی جریان عبوری با پیچیدگی محاسباتی همراه خواهد بود و از این رو بررسی ویژگی‌های جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز-دریچه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نقش هندسه استوانه‌ای در انحنای خطوط جریان، طراحی آسان و سهولت ساخت مدل استوانه‌ای به نسبت سایر شکل‌ها باعث شده است که مدل استوانه‌ای برای سازه ترکیبی سرریز-دریچه مورد توجه واقع شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان بازشدگی و اندازه قطر استوانه بیشترین تأثیر را بر عملکرد سازه ترکیبی دارند. از مهم‌ترین پارامترهایی که دبی یک سازه کنترل‌کننده جریان آب به تغییرات آن‌ها حساس بوده و با تغییرات آن عملکرد سازه دچار تغییر می‌شود می‌توان به حساسیت دبی سازه به تغییرات عمق آب بالادست، مقدار بازشدگی دریچه، سطح مقطع جریان عبوری، زبری و شیب کف کانال و همچنین تغییرات دبی در ابتدای سیستم (منبع جریان) اشاره کرد (شاهرخ‌نیا و جوان، ۱۳۸۲).

محققین زیادی به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان هم‌زمان سازه‌های ترکیبی سرریز-دریچه پرداختند (قادری و همکاران، ۱۳۹۵؛ سلامتی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مهتابی و همکاران،

سرریز حرکت می‌نماید. سوری و همکاران (۱۳۹۳) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اوستفالیای آلمان مدل استوانه‌ای را در سه حالت سرریز تنها، مدل سرریز-دریاچه و دریاچه تنها مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در ۴ قطر استوانه و به ازای بازشدگی‌های مختلف انجام گرفت و نشان داد بیشترین ضریب دبی جریان مربوط به حالتی است که مدل سرریز تنها به کار گرفته شد. همچنین تغییرات قطر سازه با تغییرات ضریب دبی رابطه عکس و با تغییرات افت انرژی رابطه مستقیم داشت.

Severi et al. (2015) با بهره‌گیری از قضیه باکینگهام، پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بی‌بعد مؤثر بر میزان دبی مدل ترکیبی سرریز-دریاچه استوانه‌ای را به دست آوردند. استفاده از مدل ترکیبی سرریز-دریاچه را با هدف افزایش ضریب تخلیه نسبت به حالت به کارگیری جداگانه آن، در مقطع لبه تیز با سرریز دوزنقه‌ای و دریاچه مستطیلی توسط Khassaf and Habeeb (2014) بررسی شد. Saad and Fattouh (2017) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ایجاد بازشدگی دایره‌ای شکل در سرریز بر روی مشخصات جریان پرداختند. هم‌چنین Fu et al. (2018) به بررسی ضریب دبی جریان عبوری از مدل ترکیبی سرریز-دریاچه پرداختند.

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی ضریب دبی عبوری از سرریز-دریاچه استوانه‌ای مستغرق با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D است. در این راستا از مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط سوری و همکاران (۱۳۹۳) برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی تحقیق حاضر استفاده شده است. اهداف فرعی بررسی تأثیر قطر متفاوت و تأثیر مقادیر بازشدگی متفاوت سرریز-دریاچه استوانه‌ای مستغرق در ضریب دبی و مشخصات جریان است. شکل‌های ۱ و ۲ تصاویری از مدل آزمایشگاهی را ارائه می‌دهند.

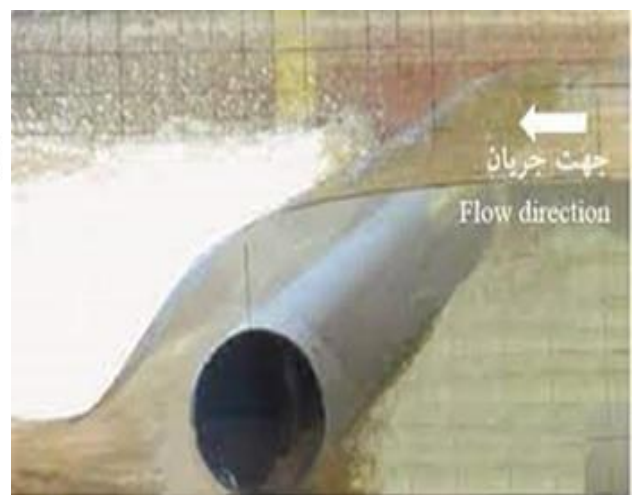


شکل ۲- تصاویر شماتیک از مدل‌های سوری و همکاران (۱۳۹۳)

ارائه کردند. Hayawi et al. (2008) به بررسی جریان هم‌زمان از روی سرریز مثلثی و زیر دریاچه مستطیلی در حالت آزاد پرداختند. نتایج آزمایشگاهی حاصل نشان داده است که ضریب شدت جریان با افزایش  $\theta$  زاویه رأس سرریز مثلثی، کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت  $P/HW$  نسبت ارتفاع سرریز به هد آب روی سرریز، ضریب دبی کاهش می‌یابد. Masoudian and Gharahgezlou (2012) پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی سرریز استوانه‌ای در کانال آزمایشگاهی کوچک را بررسی نمودند و نتایج آن‌ها به این صورت بود که ضریب دبی عبوری از سرریز استوانه‌ای با افزایش پارامترهای بدون بعد  $We$  و  $Hw/R$ ,  $Hw/yup$ ,  $Re$  افزایش می‌یابد.

کرمی و همکاران (۱۳۹۶ب)، به آنالیز عددی مشخصه جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای با استفاده از مدل FLOW-3D پرداختند. آنان در مدل عددی خود به پارامترهای سرعت، فشار، عمق جریان و انرژی جنبشی و آشفتگی در مقطعی از کانال با توجه به موقعیت سرریز بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که عمق و فشار جریان در مقطع قبل از سرریز، مقادیری بزرگتری نسبت به مقادیر مربوط به مقطع بعد از سرریز دارند. در نهایت رابطه‌ای برای تعیین انرژی جنبشی جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای ارائه کردند.

کرمی و همکاران (۱۳۹۶الف)، مشخصات جریان عبوری از روی سرریز نیمه استوانه‌ای را با استفاده از نرم‌افزار عددی ANSYS CFX پرداختند. در تحقیق آنان سطح آزاد جریان، توزیع فشار و تأثیر بار هیدرولیکی بالادست و قطر سرریز بر ضریب دبی بررسی شد. نتایج آنان نشان داد که با افزایش شعاع سرریز، مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد و محل ایجاد کمترین فشار بر روی سرریز به ازای افزایش دبی جریان عبوری به سمت بالادست

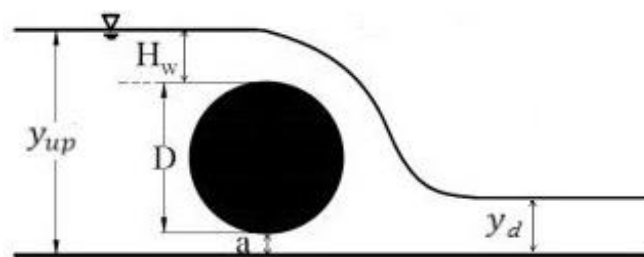


شکل ۱- تصویر واقعی از مدل آزمایشگاهی (سوری و همکاران، ۱۳۹۳)

سرریز-دریچه ضریب دبی افزایش می‌یابد. به طوری که افزایش ارتفاع سرریز باعث کاهش تداخل جهت جریان عبوری از سرریز با جریان زیر دریچه شده و این امر باعث افزایش دبی عبوری از مدل ترکیبی می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار Flow-3D در مدل سازی معادلات حاکم بر حرکت سیال، سرریز استوانه‌ای با قطر و ارتفاع بازشدگی متغیر واقع در کانالی به طول ۳ متر، عرض کف ۰/۴ متر و عمق ۰/۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی سوری و همکاران (۱۳۹۳) انجام شده است. شکل ۲ تصویر شماتیکی از مدل سرریز-دریچه شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- طرح شماتیک از مدل سرریز-دریچه مدل شده در تحقیق حاضر

از مجموع دبی‌های عبوری از زیر دریچه ( $Q_g$ )، و دبی سرریز شده از قسمت فوقانی استوانه ( $Q_w$ ) به دست می‌آید. جدول ۱ پارامترهای هیدرولیکی و هندسی سرریزهای جانبی مدل سازی تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مدل‌های سرریز - دریچه مورد بررسی شده در تحقیق حاضر

مدل	بازشدگی‌های مدل (cm)	قطرهای مدل (cm)	عرض مدل‌ها (cm)	دبی ورودی به کانال اصلی (lit/s)
WG	۳، ۲، ۱	۱۵، ۱۲/۵، ۱۰، ۷/۵	۴۰	۲۲، ۲۰، ۱۶، ۱۲

تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل k-ε، که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند. هم‌چنین این مدل به منظور شبیه‌سازی حرکت جریان در مقیاس‌های کوچکتر و تأثیرات آن‌ها به وسیله نرمال‌سازی مجدد معادلات ناپروستوکس گسترش داده شده است. در مدل k-ε، لزجت گردابی به وسیله مقیاس طول آشفتگی منفرد تعیین می‌شود، بنابراین پخش آشفتگی محاسبه شده تنها در مقیاس‌های

محققین زیادی به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان همزمان سازه‌های ترکیبی سرریز-دریچه پرداختند. از جمله آنان می‌توان به Negm et al. (1994) اشاره نمود. ایشان به بررسی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر روی خصوصیات دبی در حالت جریان آزاد از روی یک سرریز منقبض شده مستطیلی و زیر دریچه مثلثی معکوس V شکل با محدوده زوایه‌هایی از ۴۵ تا ۱۱۰ درجه پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند در حالتی که سرریز مثلثی با زاویه ۹۰ درجه و دریچه مستطیلی وجود دارد، نتایج بهتری به دست خواهد آمد. هم‌چنین Negm et al. (1997) تأثیر میزان استغراق پایین دست بر دبی جریان در مدل ترکیبی سرریز مثلثی در بالای دریچه مستطیلی و برعکس را بررسی کرده و نتیجه گرفتند نسبت استغراق دریچه هم روی عمق بالادست و هم روی دبی تأثیر می‌گذارد.

قادری و همکاران (۱۳۹۵الف) به ارزیابی ضریب دبی جریان عبوری از سرریز-دریچه کنگره‌ای مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. نتایج آنان نشان داد که با افزایش ارتفاع

در شکل ۳  $y_{up}$  عمق بالادست جریان برحسب متر،  $y_d$  عمق پایاب سرریز برحسب متر و  $H_w$  عمق جریان عبوری از روی سرریز برحسب متر، و پارامترهای  $a$  و  $D$  به ترتیب نشانگر میزان بازشدگی سرریز-دریچه و قطر استوانه هستند. دبی عبوری از سازه ترکیبی

## ۳- فرم ریاضی معادلات حاکم

مدل‌های دارای معادله تنش بر پایه گروه‌های نرمال شده رینولدز ( $RNG^1$ ) استوار است. این رویکرد شامل روش‌های آماری برای حل معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی نظیر انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن است. مدل RNG از روابط نظیر روابط موجود در مدل k-ε استفاده می‌کند با این

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

در مدل  $K - \varepsilon$  (RNG) پارامترهای آشفتگی جریان براساس یک تکنیک آماری دقیق به کمک روابط ریاضی به دست می‌آید و ثابت‌های موجود در این مدل برخلاف سایر مدل‌های آشفتگی صرفاً با استفاده از تئوری و بدون نیاز به تطبیق نتایج با داده‌های تجربی به دست می‌آیند. جدول ۲ اندازه ثابت‌های این مدل آشفتگی را نشان می‌دهد. این روش به دلیل وجود یک ترم اضافی در معادله  $\varepsilon$  در حل آشفتگی جریان‌های کرنشی از دقت بالایی برخوردار است (رودی و شاملو، ۱۳۸۸). ضرایب جدول ۲ در مدل دو معادله‌ای مطابق جدول ۳ است (رودی و شاملو، ۱۳۸۸).

مخصوصی اتفاق می‌افتد. در حالی که در واقعیت، همه مقیاس‌های حرکت در پخش آشفتگی شرکت دارند.

برای حل آشفتگی میدان جریان در این تحقیق نیز مدل آشفتگی  $K - \varepsilon$  (RNG) به کار گرفته شده که در شبیه‌سازی آشفتگی جریان از معادلات (۱) و (۲) استفاده می‌کند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

پارامترهای موثر در روابط فوق در روابط (۳) الی (۶) به شرح زیر تعریف شده‌اند:

جدول ۲- ثابت‌های مدل آشفتگی  $K - \varepsilon$  (RNG)

$C_\mu$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\eta_0$	$\beta$
۰/۰۸۴۵	۱/۴۲	۱/۶۸	۰/۷۱۹۴	۰/۷۱۹۴	۴/۳۸	۰/۰۱۲

جدول ۳- ثابت‌های مدل آشفتگی  $K - \varepsilon$

$C_\mu$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱	۱/۳

استفاده کرد. مثلاً، در سلول‌هایی که بخشی از سلول توسط مانع اشغال شده، روش FAVOR معادل با درون‌یابی خطی برای شرایط مرزی است.

در هنگام مدل کردن سطح آزاد آب، این نرم‌افزار با استفاده از مدل VOF جزء حجم سیال  $F$  را با استفاده از معادله (۷) که معادله جابجایی حاکم بر جزء حجم سیال  $F$  نامیده شده تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( \frac{\partial}{\partial x} (FUA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FVA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FWA_z) \right) = 0 \quad (7)$$

$F$ : ضریبی است که بسته به میزان سیال در حجم کنترل، همواره مقداری بین ۰ و ۱ دارد. به طوری که اگر برابر یک باشد حجم کنترل (سلول محاسباتی) پر از سیال بوده و در صورتی که برابر صفر باشد در سلول محاسباتی آبی وجود نداشته و کل حجم

### ۳-۱- تقریبات عددی در مدل عددی Flow-3D

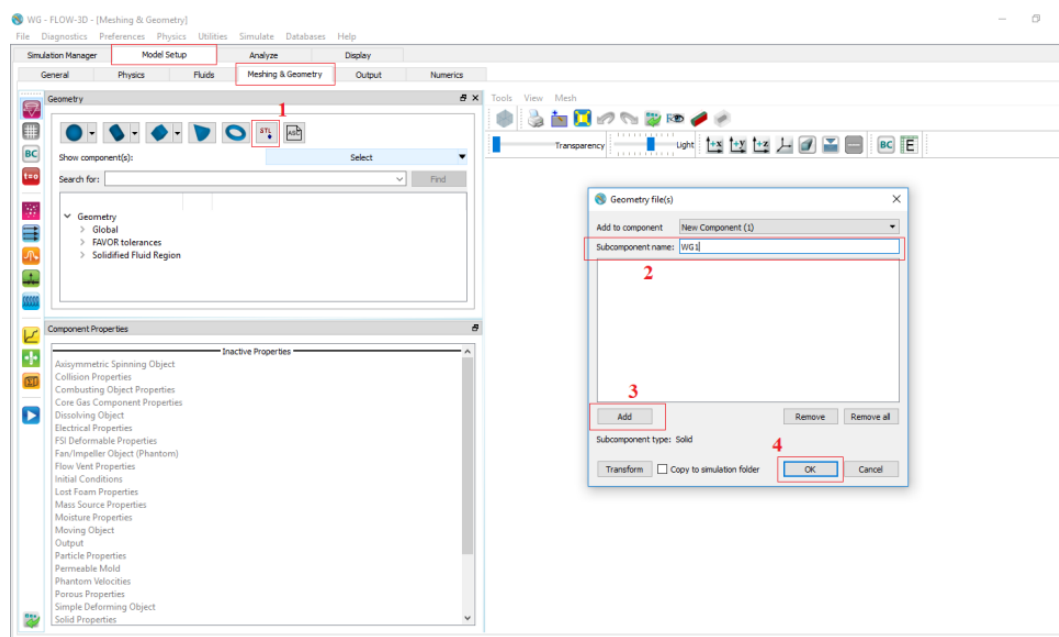
نرم‌افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود، که برای هر سلول مقادیر میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. موانع منحنی شکل، دیوارهای مرزی و سایر اشکال هندسی دیگر، به وسیله تعیین کسر مساحت وجوه و کسر حجم باز به جریان سلول، در شبکه در نظر گرفته شده جای می‌گیرند (روش FAVOR). روش دقت مرتبه اول نسبت به افزایش زمان و مکان، روش عددی اصلی که در Flow-3D استفاده می‌شود. وقتی که شبکه مورد استفاده در روش حجم محدود غیریکنواخت است باید در انتخاب درجه دقت حل عددی توجه کرد. دقت مرتبه دو در این حالت مناسب‌تر است. در همه حالات حداقل می‌توان از دقت درجه یک برای شرایط مرزی

کنترل توسط هوا اشغال شده است (قاسم‌زاده، ۱۳۹۴).

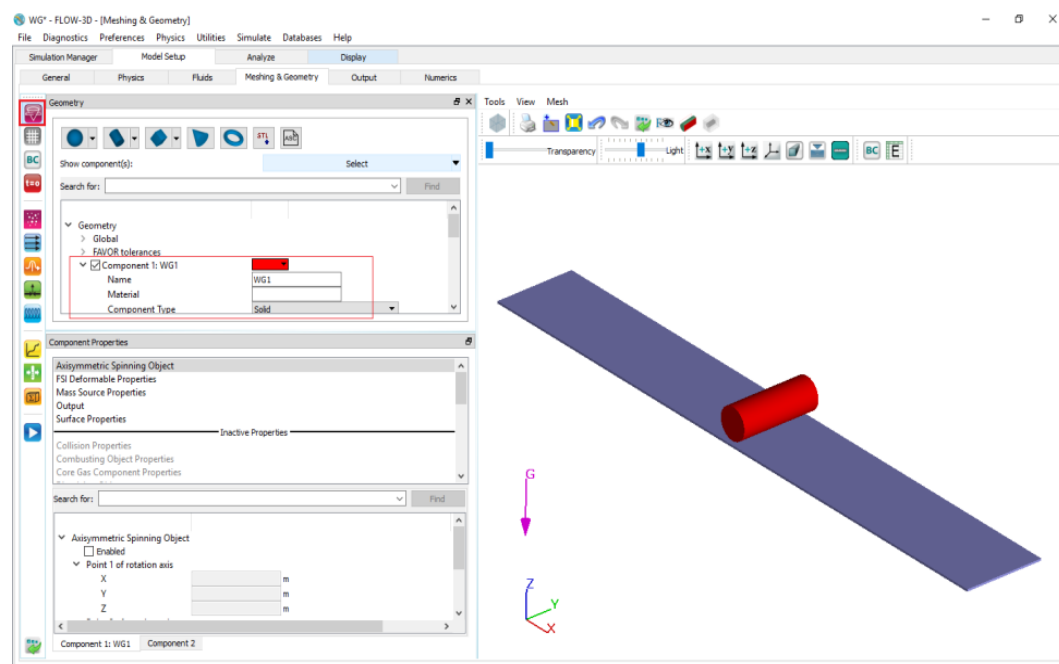
هندسه مدل‌های سرریز-دریچه تحقیق حاضر با ترسیم شکل هندسی مدل‌های سرریز-دریچه در قطرهای مختلف سرریز در نرم‌افزار ترسیمی اتوکد استفاده شده است. بدین صورت که هندسه سه‌بعدی مدل‌ها از طریق برنامه اتوکد ترسیم و با فرمت STL ذخیره شد. سپس توسط گزینه STL از نرم‌افزار بازخوانی شد. مراحل فراخوانی مدل سرریز-دریچه در نرم‌افزار Flow-3D در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

#### ۴- ترسیم هندسه مدل

مهم‌ترین مرحله مدل‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D در زبانه Meshing and Geometry انجام می‌گیرد. در این بخش هندسه محیط شبیه‌سازی به نرم‌افزار معرفی شده و مش‌بندی شبکه حل، شرایط مرزی و شرایط اولیه در مدل اعمال می‌شود. برای ترسیم



شکل ۴- فراخوانی هندسه مدل سه بعدی سرریز-دریچه از گزینه STL

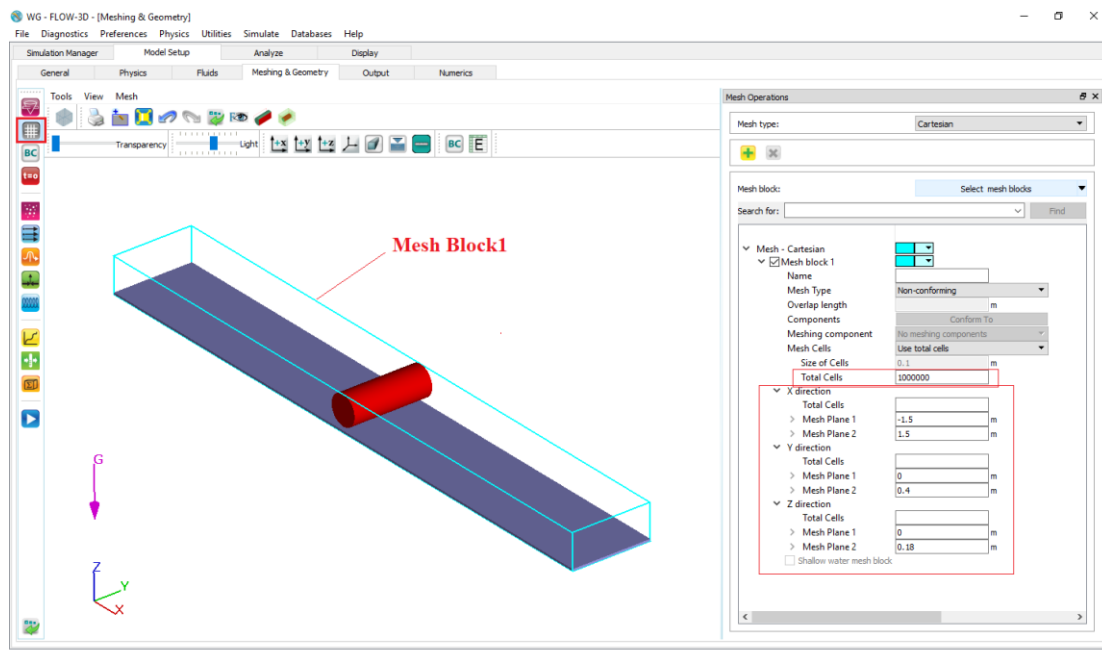


شکل ۵- هندسه سه بعدی سرریز-دریچه در نرم‌افزار Flow-3D

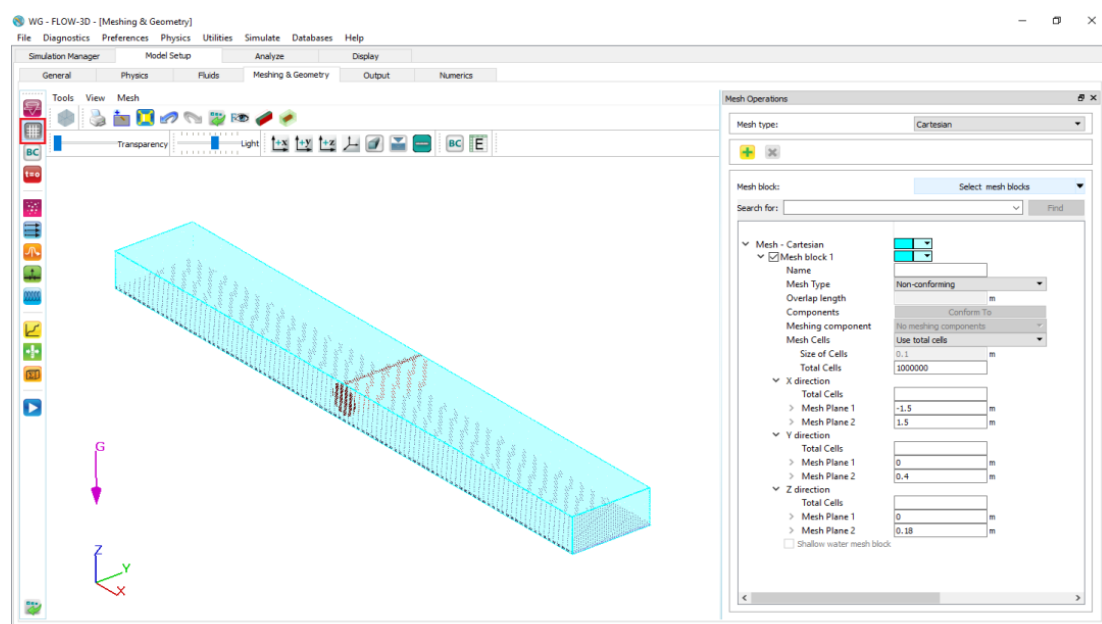
#### ۱-۴- شبکه‌بندی مدل سرریز-دریاچه

پس از ترسیم هندسه مدل، در این مرحله ناحیه حل باید مش‌بندی شود. نرم‌افزار Flow-3D فقط قابلیت تولید شبکه‌های حل منظم مکعبی را دارد. استفاده از شبکه‌های مکعبی علاوه بر قابلیت تولید نتایج مطلوب، باعث افزایش سرعت نرم‌افزار در ایجاد و حل شبکه می‌شود. شبکه‌بندی مدل با استفاده از قسمت Mesh-Cartesian در منوی Meshing and Geometry انجام می‌گیرد. برای ایجاد مش در این مرحله روش‌های متفاوتی وجود دارد،

به طوری که هم می‌توان برای کل مدل مش‌های هم اندازه در نظر گرفت و یا برای هر بعد اندازه مش‌ها متفاوت باشد. حتی برای یک راستا می‌تواند اندازه مش‌ها غیر یکنواخت انتخاب شود. به طوری که در محل‌هایی از مدل که آشفتگی جریان بیشتر باشد و یا نتایج مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار باشد می‌توان اندازه مش‌ها را کوچک‌تر انتخاب کرد. برای مدل‌های مورد بررسی با توجه به ابعاد کانال و مدل سرریز-دریاچه مش‌بندی معقول و بهینه برای مدل به صورت زیر انتخاب شد. تعداد و اندازه‌ی مش‌ها در هر راستا و سایر اطلاعات شبکه‌بندی مدل در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- اطلاعات شبکه‌بندی مدل

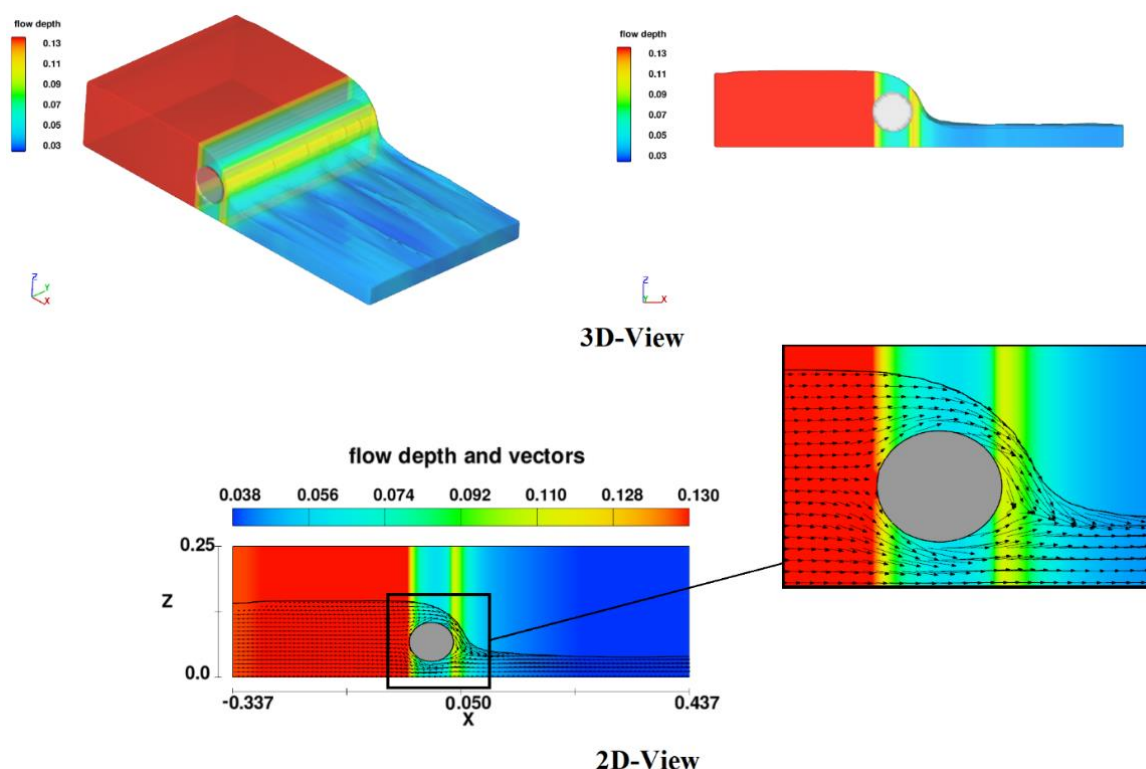


شکل ۷- شبکه‌بندی نهایی مدل سه بعدی کانال و سرریز-دریاچه

رنگ قرمز درآمده و نشان‌دهنده هشدار و پیام خطا است که باید به تعداد و نوع این پیام‌ها دقت شود. پیام‌ها و هشدارهایی که توسط برنامه Flow-3D ظاهر می‌شود در دو دسته پیام‌های هشداردهنده و بازدارنده از اجرای شبیه‌سازی قرار می‌گیرند که ممکن است در هر دو مرحله پیش‌پردازش و اجرای مدل‌سازی ظاهر شوند. در صورت وجود پیام‌های بازدارنده در حین مدل‌سازی حتماً باید خطای موردنظر در مدل برطرف شود.

#### ۳-۴- مشاهده‌ی نتایج

در نرم‌افزار Flow-3D قابلیت استخراج نتایج به‌صورت سه بعدی، دو بعدی، به‌صورت متنی و ... است. در این بخش به‌عنوان نمونه شکل ۸ جریان عبوری از مدل ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای با قطر ۷/۵ سانتی‌متر و بازشدگی ۳ سانتی‌متر را برای دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۸- جریان عبوری از مدل ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای با قطر ۷/۵ و بازشدگی ۳ سانتی‌متر

در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. برای این کار طبق جدول ۴ نتایج ضریب دبی مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی برای مدل سرریز-دریچه با قطر ۷/۵ سانتی‌متر و بازشدگی ۳ سانتی‌متر مقایسه و درصد میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> (MAPE(%)) و خطای جذر میانگین مربعات<sup>۳</sup> (RMSE (gr)) برای هر یک محاسبه شد.

به‌منظور عدم تأثیرپذیری نتایج مدل از تعداد و اندازه مش‌ها، شبکه‌بندی مدل برای تمامی مدل بررسی شده یکسان در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی نهایی پس از ترسیم در نرم‌افزار برای مدل سه بعدی کانال و مدل سرریز-دریچه در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### ۲-۴- اجرای شبیه‌سازی

پس از انجام مراحل فوق، مدل‌سازی انجام شده و مدل برای شبیه‌سازی جریان آماده است. برای شروع شبیه‌سازی وارد منوی Simulation شده و با انتخاب گزینه Run Simulation از قسمت Simulate کار شبیه‌سازی آغاز می‌شود. پیشرفت شبیه‌سازی در قسمت solver مشاهده می‌شود. در صورتی که در طول شبیه‌سازی جریان هرگونه ناسازگاری در اطلاعات تعریف شده برای مدل توسط نرم‌افزار تشخیص داده شود گزینه Warnings & Errors به

#### ۴-۴- تحلیل حساسیت مش‌بندی در شبکه محاسباتی

در شبکه‌بندی مدل در محیط نرم‌افزار FLOW-3D علاوه بر تعداد مش‌ها، اندازه آن‌ها در هر راستا نیز می‌تواند بر روی نتایج مدل‌سازی تأثیرگذار باشد. برای مدل سرریز-دریچه تحقیق حاضر، با شبیه‌سازی مدل در ۳ حالت مختلف با اندازه مش‌های متفاوت و مقایسه افزایش انطباق نتایج با داده‌های آزمایشگاهی،



جدول ۴- تحلیل حساسیت مش‌بندی در شبکه مدل عددی تحقیق حاضر

حالت	قطر استوانه (m)	بازشدگی دریچه (m)	تعداد مش	دبی ورودی (Lit/s)	مقادیر ضریب دبی در نتایج آزمایشگاهی توسط سوری و همکاران (۱۳۹۳)	مقادیر ضریب دبی در نتایج عددی	درصد میانگین خطای مطلق (% MAPE)	خطای جذر میانگین مربعات RMSE
۱	۰/۰۷۵	۰/۰۳	۶۹۱۲۶۰	۱۲	۰/۷۷۳	۰/۶۷۸	۱۲/۲۸	۰/۰۹۵
			۱۰۰۰۰۰۰	۲۰	۰/۸۵۶	۰/۷۵۰	۱۲/۳۸	۰/۱۰۶
۲	۰/۰۷۵	۰/۰۳	۱۰۰۰۰۰۰	۱۲	۰/۷۷۳	۰/۷۲۶	۶/۰۸	۰/۰۴۷
				۲۰	۰/۸۵۶	۰/۷۹۶	۷/۰۰	۰/۰۶۰
۳	۰/۰۷۵	۰/۰۳	۱۸۶۰۰۰۰	۱۲	۰/۷۷۳	۰/۷۴۲	۴/۰۱	۰/۰۳۱
				۲۰	۰/۸۵۶	۰/۸۱۶	۴/۵۸	۰/۰۴۰

حل اشباع از سیال فرض شده و به‌طور غیرفیزیکی جریان به‌صورت تحت فشار عمل خواهد کرد. به‌همین منظور (عدم برخورد جریان سیال با قسمت بالایی شبکه حل) ارتفاع حداکثر شبکه محاسباتی در نرم‌افزار ۰/۴۵ متر در نظر گرفته شده است. پس از اعمال شرایط مرزی، در قسمت Initial شرایط اولیه برای مدل تعریف می‌شود. در این مرحله توزیع فشار در راستای Z هیدرواستاتیکی اعمال شده این مرحله، برای مدل مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین می‌توان مقداری حجم آبی را در داخل کانال اصلی تحت عنوان Fluid Region به نرم‌افزار معرفی کرد.

#### ۵-۱- مدل‌های حل آشفتگی

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در ساخت سیستم‌های پردازش موازی استفاده از حل کامل و تماماً وابسته به زمان معادلات ناویر استوکس برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتگی، به واسطه حجم محاسباتی بسیار بالا، کاملاً غیرمنطقی و تا حد زیادی غیرممکن است. بنابراین برای بررسی جریان آشفتگی در اکثر موارد از معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده زمانی استفاده می‌شود. با این عمل یک‌سری عبارت‌های اضافی در معادلات ناویر استوکس ظاهر می‌شود که از جنس تنش بوده و اصطلاحاً تنش‌های رینولدز نامیده می‌شوند.

#### ۵-۲- انتخاب مدل آشفتگی مناسب در شبیه‌سازی جریان

در این بخش در انتخاب مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی مدل مورد بررسی، با توجه به بررسی مطالعات مشابه انجام شده توسط محققین دیگر (بیان شده در ادبیات فنی) مدل آشفتگی RNG و K-ε نتایج دقیق‌تر و همگرایی بهتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی از خود نشان می‌دهد. بر همین اساس برای حل آشفتگی در مدل‌سازی جریان عبوری از مدل ترکیبی سرریز-دریاچه از دو

مطابق جدول ۴ درصد خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی ۴/۵۸ درصد محاسبه شد و با توجه به این‌که درصد خطای مش دوم و سوم تقریباً نزدیک به هم بوده، لذا مش سوم به عنوان مش بهینه با ۱۸۶۰۰۰۰ مش انتخاب شد.

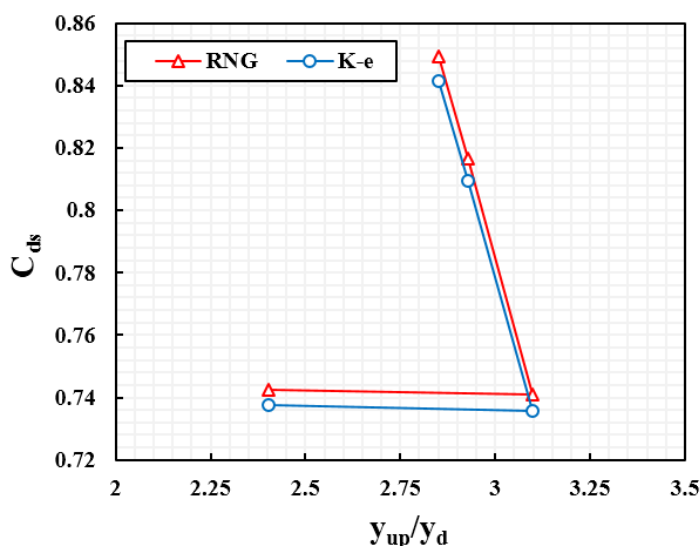
#### ۵-۳- تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه مدل

برای ورودی جریان از شرط مرزی Volume flow rate استفاده و برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر ران دبی ورودی به نرم‌افزار معرفی شده است. برای قسمت خروجی کانال شرایط مرزی Continuitive و Outflow به‌کار برده می‌شوند. در هر دو شرط، مشخصات جریانی که به این مرز می‌رسد بدون هیچ تغییری به خارج از شبکه حل منتقل می‌شود. برای پایین‌دست سرریز شبیه‌سازی شده شرط مرزی Outflow اعمال شده است. برای جداره‌ها و کف شبکه تحلیل که نقش دیواره‌ها و کف کانال را ایفا می‌کنند از شرط مرزی Wall استفاده شده است. این شرط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار مجازی عمل می‌کند. لازم‌به‌ذکر است استفاده از تعریف شرط مرزی Wall برای کف در شبکه، در شرایطی صحیح است که سطح کف کانال کاملاً صاف و بدون زبری باشد. در غیر این‌صورت کف کانال با استفاده از گزینه Create Box یک Subcomponent تعریف و زبری موردنظر را بر آن اعمال کرد.

برای مرز Z max نیز شرط مرزی Symmetry اعمال شد. این نوع شرط مرزی شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایطی که تا وقتی جریان سیال به این مرز برخورد نکند نرم‌افزار شرایط بالای سطح سیال تا بینهایت را مشابه شرایط اتمسفر شبیه‌سازی می‌کند. ولی در حالتی که جریان سیال به این مرز برسد شرایط بیرون شبکه

آزمایشگاهی با دو مدل آشفتگی RNG و K-ε انجام شده است. شکل ۹ و جدول ۵ نتایج ضریب دبی از شبیه‌سازی عددی FLOW-3D و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این شکل  $C_{db}$  ضریب دبی در حالت مستغرق و  $y_{up}/y_d$  نسبت تفاضل عمق آب بالادست و پایین‌دست به قطر سازه است.

مدل آشفتگی RNG و K-ε استفاده شده است. برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب، از مقایسه نتایج ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد نسبت عمق آب در بالادست به عمق آب در پایین‌دست مدل ترکیبی سرریز-دریچه برای مدل با قطر ۷/۵ سانتی‌متر و بازشدگی ۳ سانتی‌متر به دست آمده در حل عددی و نتایج



شکل ۹- مقایسه نتایج ضریب دبی برای دو مدل آشفتگی حل عددی با نتایج آزمایشگاهی

جدول ۵- درصد خطای نسبی به دست آمده از نتایج حل عددی برای دو مدل آشفتگی RNG و K-ε

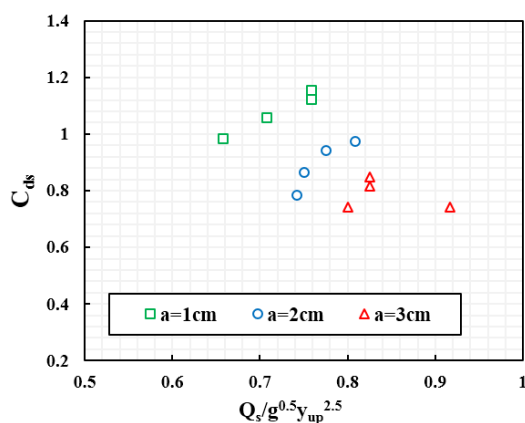
MAPE (%)	RMSE	MAPE (%)	RMSE	مقادیر ضریب دبی			y <sub>up</sub> /y <sub>d</sub>
				K-ε	RNG	نتایج آزمایشگاهی	
۲/۵۱	۰/۰۲۲	۱/۶۰	۰/۰۱۴	۰/۸۴۱	۰/۸۴۹	۰/۸۶۳	۲/۲۹
۲/۵۷	۰/۰۲۱	۱/۷۱	۰/۰۱۵	۰/۸۱۰	۰/۸۱۶	۰/۸۳۱	۲/۳۸
۲/۴۱	۰/۰۱۹	۱/۷۳	۰/۰۱۴	۰/۷۳۵	۰/۷۴۰	۰/۷۵۴	۲/۵۱
۲/۸۳	۰/۰۲۲	۲/۱۷	۰/۰۱۷	۰/۷۳۷	۰/۷۴۲	۰/۷۵۹	۲/۸۰

بخش‌های تحقیق اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی است. به همین منظور نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی در شرایط یکسان مقایسه می‌شود. در این تحقیق نیز برای صحت‌سنجی مدل، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی سوری و همکاران (۱۳۹۳) مقایسه می‌شود. قسمت صحت‌سنجی ضریب دبی  $C_{db}$  برای مدل سرریز-دریچه استوانه‌ای با قطر ۷/۵ سانتی‌متر، بازشدگی ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر و دبی‌های ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۲ لیتر بر ثانیه محاسبه و انجام شده است. در شکل ۱۰ و ۱۱ به منظور اعتباربخشی به نتایج حل عددی و صحت‌سنجی مدل استوانه‌ای با قطر ۷/۵ سانتی‌متر، پارامتر بدون بعد  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  در برابر ضریب دبی جریان عبوری از سازه ترکیبی در مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی سوری و همکاران (۱۳۹۳) نشان داده شده است.

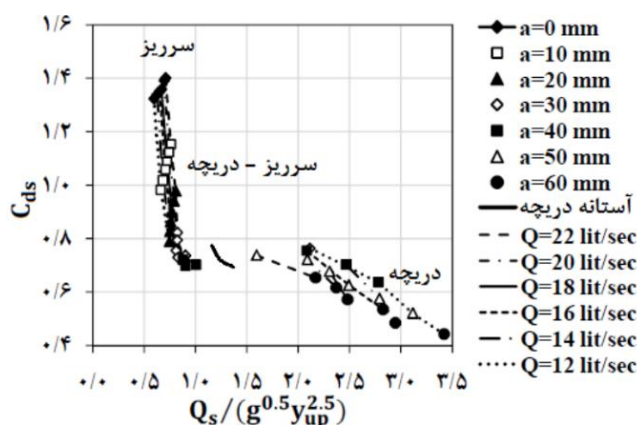
مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از حل عددی با به‌کارگیری مدل آشفتگی RNG داده‌های نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهد و بیشترین درصد خطای نسبی و مقدار RMSE به ترتیب ۲/۱۷٪ و ۰/۰۱۷ است. بنابراین برای سایر مدل‌ها استفاده از مدل آشفتگی RNG نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل آشفتگی K-ε به نتایج آزمایشگاهی می‌دهد.

#### ۶- صحت‌سنجی نتایج عددی و آزمایشگاهی

در این بخش از تحقیق حاضر، با استفاده از نتایج حل عددی، ضریب دبی جریان در سازه ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای محاسبه شده است. در استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های حل عددی برای بررسی پدیده‌ها، یکی از مهم‌ترین



شکل ۱۰- ضریب دبی در در برابر پارامتر بدون بعد  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  برای مدل سرریز-دریاچه استوانه‌ای با قطر ۷/۵ سانتی‌متر (حل عددی)



شکل ۱۱- ضریب دبی در داده‌های آزمایشگاهی در برابر پارامتر بدون بعد  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  برای مدل سرریز-دریاچه استوانه‌ای با قطر ۷/۵ سانتی‌متر (سوری و همکاران، ۱۳۹۳)

با قطر ۷/۵ سانتی‌متر در داده‌های آزمایشگاهی سوری و همکاران (۱۳۹۳) نیز در همین محدوده قرار دارد. درصد خطای مدل شبیه‌سازی در جدول ۶ محاسبه شده است.

با دقت در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی برای پارامتر بدون بعد  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  برای بازشدگی‌ها و عمق‌های ورودی جریان بررسی شده در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ قرار گرفته است و این درحالیست که این پارامتر برای استوانه‌ای

جدول ۶- مقایسه نتایج حل عددی نرم‌افزار و داده‌های آزمایشگاهی و درصد خطای مدل با قطر ۷/۵ سانتی‌متر

درصد خطای تحلیل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی	مقادیر ضریب دبی		دبی جریان ورودی (Lit/s)	بازشدگی دریاچه (cm)
	نتایج آزمایشگاهی سوری و همکاران (۱۳۹۳)	نتایج حل عددی مطالعه حاضر		
۲/۶۴	۱/۰۰۹	۰/۹۸۳	۱۲	۱
۲/۷۴	۱/۰۸۶	۱/۰۵۷	۱۶	
۱/۴۲	۱/۱۳۷	۱/۱۲۱	۲۰	
۲/۰۰	۱/۱۷۷	۱/۱۵۴	۲۲	
۲/۸۰	۰/۸۰۷	۰/۷۸۵	۱۲	۲
۲/۷۷	۰/۸۸۹	۰/۸۶۵	۱۶	
۳/۰۷	۰/۹۷۱	۰/۹۴۲	۲۰	
۱/۸۴	۰/۹۹۲	۰/۹۷۴	۲۲	
۴/۱۷	۰/۷۷۳	۰/۷۴۲	۱۲	۳
۳/۹۱	۰/۷۶۹	۰/۷۴۰	۱۶	
۴/۹۰	۰/۸۵۶	۰/۸۱۶	۲۰	
۳/۷۶	۰/۸۸۱	۰/۸۴۹	۲۲	

با تغییرات  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  رابطه مستقیم دارد. در یک قطر ثابت از مدل سرریز-دریچه، به ازای افزایش بازشدگی دریچه، ضریب دبی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تغییرات ضریب دبی با تغییرات ارتفاع بازشدگی دریچه رابطه عکس دارد. همچنین با فرض ثابت بودن دبی و ارتفاع بازشدگی دریچه، با افزایش قطر مدل ترکیبی سرریز-دریچه، ضریب دبی کاهش می‌یابد.

#### ۷-۲- تغییرات ضریب دبی با پارامتر بدون بعد $y_{up}/y_d$

در شکل ۱۳ نتایج حل عددی تغییرات ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  را برای مدل ترکیبی سرریز-دریچه با قطرهای مختلف و بازشدگی متفاوت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در قطر و بازشدگی دریچه ثابت در مدل ترکیبی سرریز-دریچه، با افزایش دبی، ضریب دبی افزایش می‌یابد این درحالی است که مقدار پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش دبی، تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  رابطه عکس دارد. همچنین برای بازشدگی ثابت دریچه، با افزایش قطر مدل ترکیبی سرریز-دریچه مقدار پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  افزایش می‌یابد.

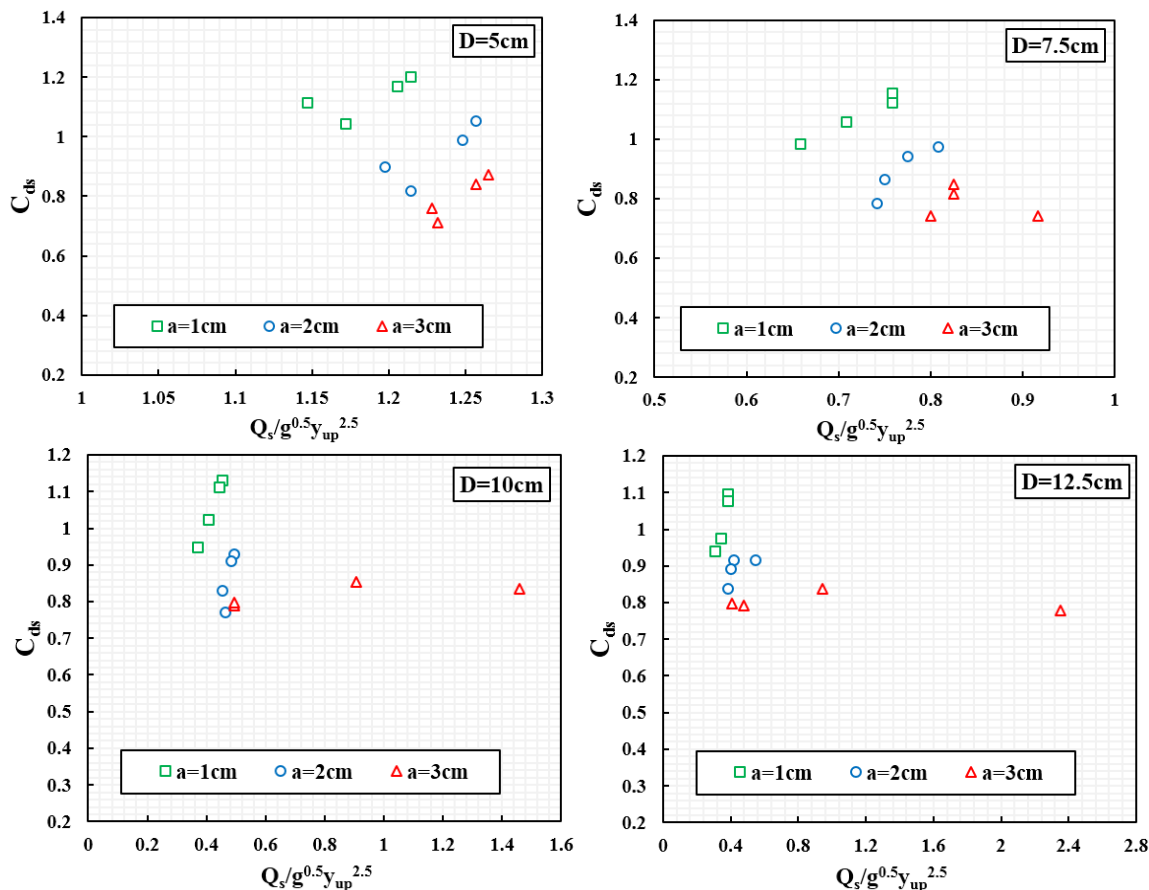
جدول ۶ نشان می‌دهد درصد خطای مدل شبیه‌سازی شده کمتر از ۵ درصد بوده و بیشترین درصد خطا به مقدار ۴/۹۰ درصد برای بازشدگی ۳ سانتی‌متر و دبی جریان ۲۰ لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده است. بنابراین مدل شبیه‌سازی شده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است.

#### ۷- نتایج مدل‌سازی عددی

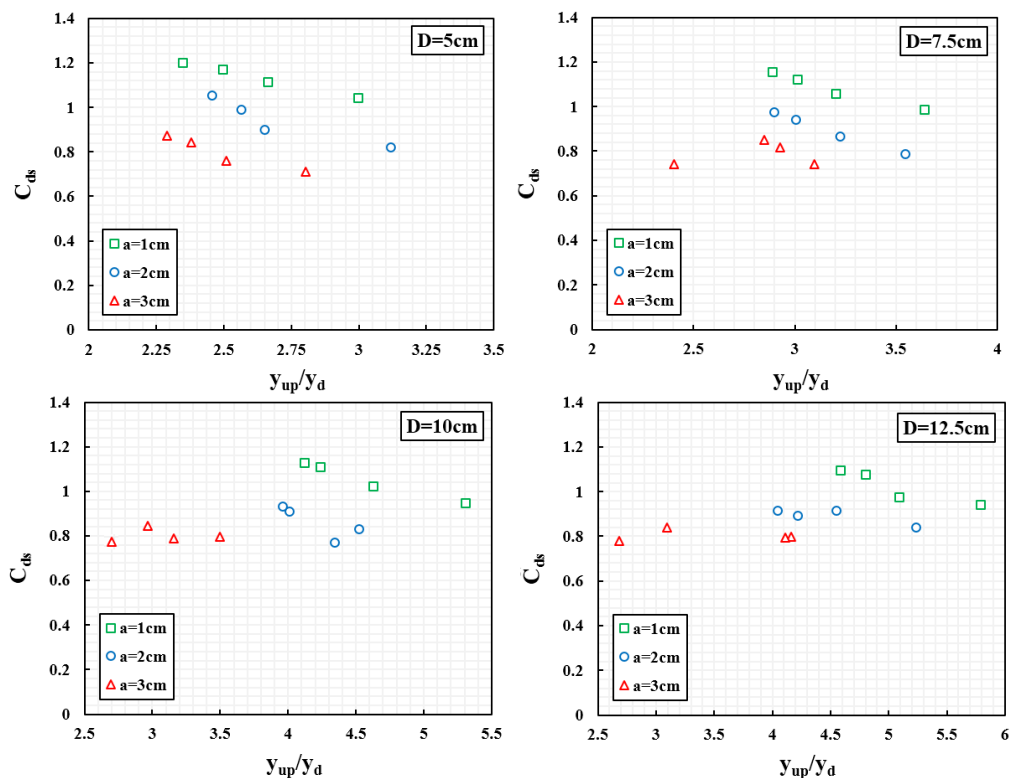
پس از صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی، در ادامه نتایج حاصل شده ارائه می‌شوند.

#### ۷-۱- تغییرات ضریب دبی با پارامتر بدون بعد $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$

در شکل ۱۲ نتایج حل عددی تغییرات ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  که معرف تغییرات دبی کل عبوری است، برای مدل ترکیبی سرریز-دریچه با قطرهای مختلف و بازشدگی متفاوت نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش دبی، در قطر و بازشدگی دریچه ثابت، ضریب دبی افزایش می‌یابد. به طوری که تغییرات ضریب دبی



شکل ۱۲- ضریب دبی در برابر پارامتر بدون بعد  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  برای مدل‌ها با قطرهای متفاوت

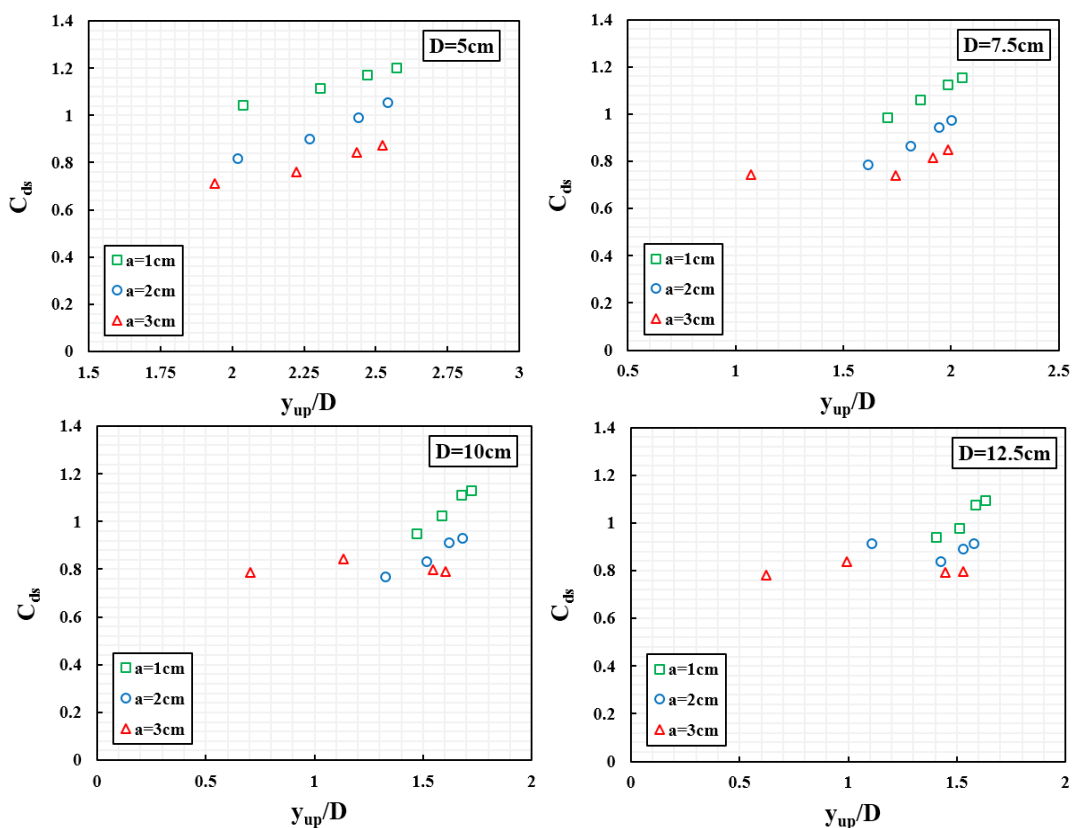


شکل ۱۳- ضریب دبی در برابر پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  برای مدل‌ها با قطرهای متفاوت

پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$  را برای مدل ترکیبی سرریز-دریاچه با قطرهای مختلف و بازشدگی متفاوت نشان داده شده است.

۳-۷ تغییرات ضریب دبی با پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$

در شکل ۱۴ نتایج حل عددی تغییرات ضریب دبی نسبت به



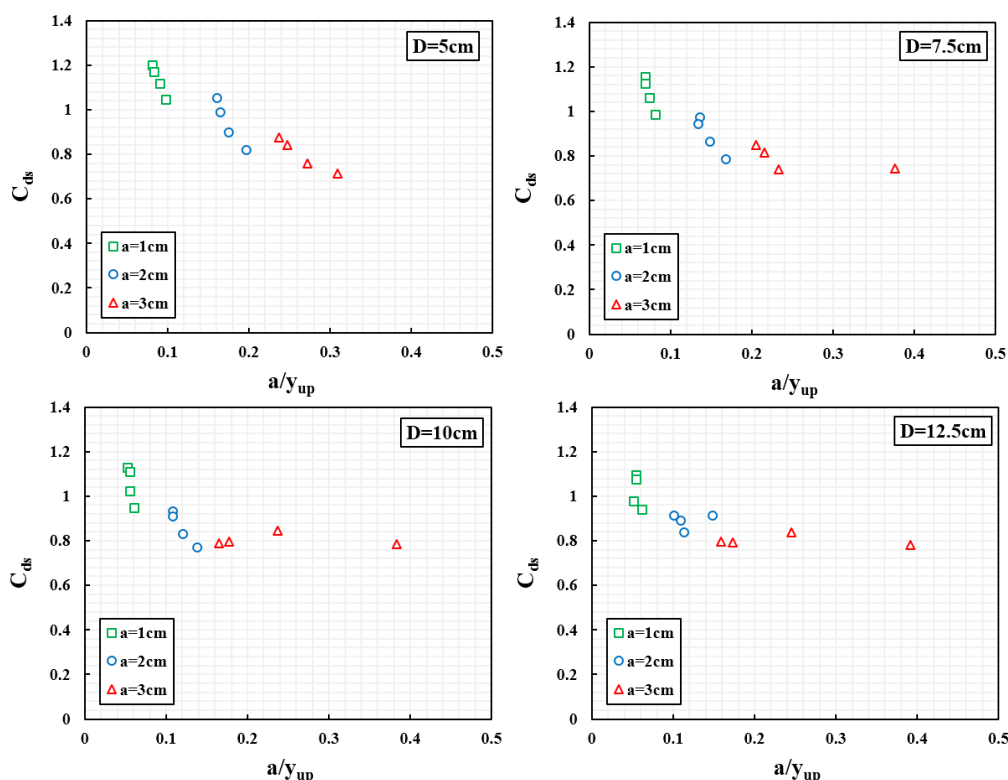
شکل ۱۴- ضریب دبی در برابر پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$  برای مدل‌ها با قطرهای متفاوت

پارامتر بدون بعد  $a/y_{up}$  برای مدل ترکیبی سرریز-دریچه با قطرهای مختلف و بازشدگی متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش  $a/y_{up}$ ، بازشدگی دریچه، ضریب دبی و قطر ثابت، با افزایش ارتفاع  $a/y_{up}$  روند افزایشی دارد. به عبارت دیگر، تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $a/y_{up}$  رابطه عکس دارد. همچنین برای بازشدگی ثابت، با افزایش قطر مدل ترکیبی سرریز-دریچه مقدار پارامتر بدون بعد  $a/y_{up}$  کاهش می‌یابد.

مشاهده می‌شود که با افزایش قطر و میزان بازشدگی دریچه ثابت مدل ترکیبی سرریز-دریچه، با افزایش دبی، ضریب دبی و پارامتر بی‌بعد  $y_{up}/D$  افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش دبی، تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$  رابطه مستقیم دارد. همچنین برای بازشدگی ثابت، با افزایش قطر مدل مقدار پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$  کاهش می‌یابد.

#### ۷-۴- تغییرات ضریب دبی با پارامتر بدون بعد $a/y_{up}$

در شکل ۱۵ نتایج حل عددی تغییرات ضریب دبی نسبت به

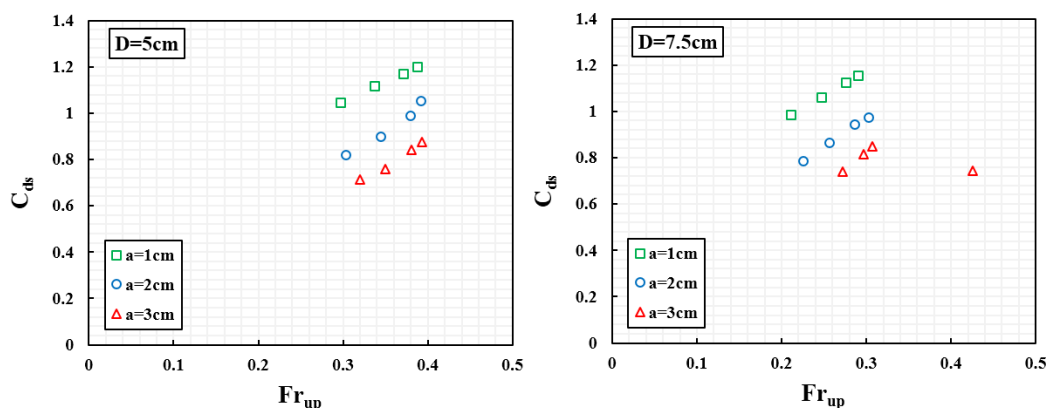


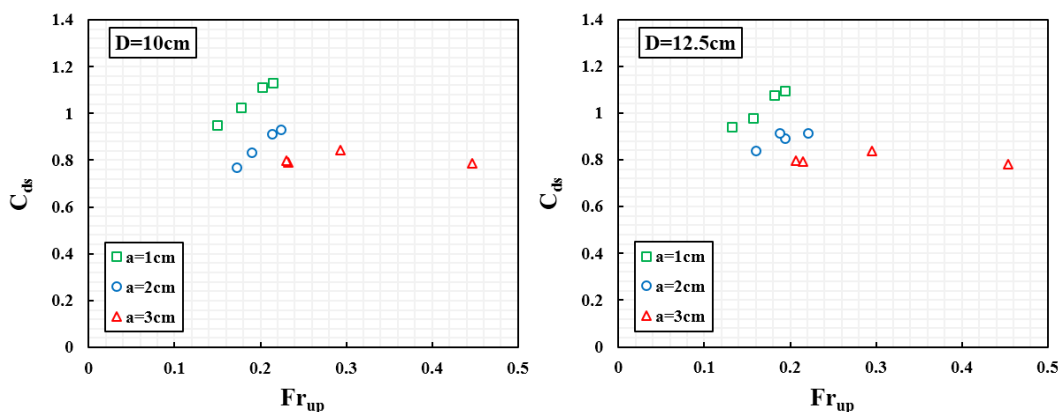
شکل ۱۵- ضریب دبی در برابر پارامتر بدون بعد  $a/y_{up}$  برای مدل‌ها با قطرهای متفاوت

پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  برای مدل ترکیبی سرریز-دریچه با قطرهای مختلف و بازشدگی متفاوت نشان داده شده است.

#### ۷-۵- تغییرات ضریب دبی با پارامتر بدون بعد $Fr_{up}$

در شکل ۱۶ نتایج حل عددی تغییرات ضریب دبی نسبت به

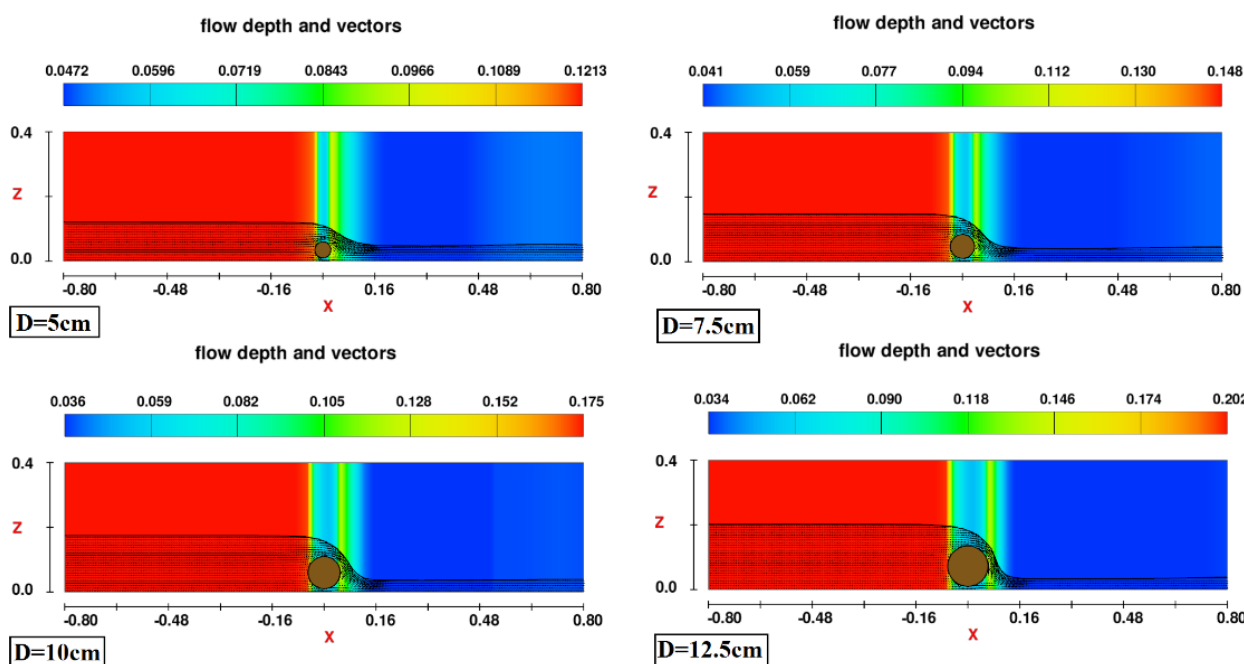




شکل ۱۶- ضریب دبی در برابر پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  برای مدل‌ها با قطرهای متفاوت

برای دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۱ سانتی‌متر، برای هر ۴ قطر استوانه‌ای نشان داده شده است. در این شکل رنگ نمایش داده شده، نشان دهنده تغییرات سرعت جریان در پلان و در عمق کانال برحسب مترمکعب بر ثانیه است. بدین ترتیب رنگ آبی تیره حداقل سرعت جریان (حدود صفر) را نشان می‌دهد و به تدریج با تغییر رنگ از آبی به سبز، زرد و در نهایت قرمز، سرعت جریان به حداکثر مقدار خود در محدوده مورد مطالعه مدل می‌رسد.

محدوده تغییرات عدد فرود پشت سازه ترکیبی زیر بحرانی بودن رژیم جریان در بالادست سرریز-دریاچه را نشان می‌دهد. به ازای قطر و ارتفاع بازشدگی دریاچه ثابت، با افزایش میزان پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  ضریب دبی روند افزایشی دارد. به عبارت دیگر، تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  رابطه مستقیم دارد. هم‌چنین برای بازشدگی ثابت، با افزایش قطر مدل ترکیبی سرریز-دریاچه مقدار پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  کاهش می‌یابد. در شکل ۱۷ جریان عبوری از مدل‌های شبیه‌سازی شده



شکل ۱۷- پروفیل سطح آزاد جریان برای ۴ مدل شبیه‌سازی شده (توضیح: محورهای افقی x نشان دهنده فاصله از محور مدل (متر) بوده و محورهای عمودی z نشان دهنده عمق جریان (متر) است)

جریان به سرریز-دریاچه استوانه‌ای چسبیده‌تر بوده و انحنای جریان بیشتر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین انحنای جریان در مدل استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر است. در حالی که برای مدل با قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر پروفیل سطح جریان

مشاهده می‌شود برای یک دبی آب ورودی مشخص با افزایش قطر سرریز-دریاچه استوانه‌ای، مقدار پارامتر  $H_w$  (عمق آب روی سرریز) کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به این که نسبت استغراق جریان در مدل‌های با قطر بیشتر کاهش می‌یابد پروفیل سطح

انحنای زیادی برداشته است.

شده است. تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  رابطه مستقیم دارد و با افزایش میزان پارامتر بدون بعد  $Fr_{up}$  ضریب دبی روند افزایشی دارد.

## ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق نتایج مدل آزمایشگاهی سوری و همکاران (۱۳۹۳) توسط نرم افزار Flow-3D صحت‌سنجی شد و از مدل کالیبره شده برای ارزیابی سایر پارامترهای موثر بهره‌گیری شد. در این پژوهش با استفاده از تحلیل ابعادی به روش پی باکینگهام پارامترهای بدون بعد جریان عبوری از سازه‌ی ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای به دست آورده شد. با استفاده از نتایج حل عددی تغییرات این پارامترها در برابر ضریب دبی سازه ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفت. پارامترهای بدون بعد تغییرات دبی کل عبوری، نسبت عمق جریان در بالادست به پایین‌دست مدل استوانه‌ای، عدد فرود بالادست و هم‌چنین نسبت عمق آب بر روی سرریز به عمق جریان در بالادست برای قطرهای مختلف مدل استوانه‌ای بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب، مشاهده شد که نتایج به‌دست آمده از حل عددی و با به‌کارگیری مدل آشفتگی RNG داده‌های نزدیکتری به نتایج آزمایشگاه به‌دست می‌آید. بنابراین استفاده از مدل آشفتگی RNG نتایج دقیق‌تری را نسبت به مدل آشفتگی  $K-\epsilon$  ارائه می‌دهد.

- با افزایش دبی، در قطر و بازشدگی دریچه ثابت، ضریب دبی افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر تغییرات ضریب دبی با تغییرات  $Q_s/g^{0.5}y_{up}^{2.5}$  رابطه مستقیم دارد. در یک قطر ثابت از مدل سرریز-دریچه، به ازای افزایش بازشدگی دریچه، ضریب دبی کاهش می‌یابد.

- با افزایش دبی، تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  رابطه عکس دارد. هم‌چنین برای بازشدگی ثابت دریچه، با افزایش قطر مدل ترکیبی سرریز-دریچه مقدار پارامتر بدون بعد  $y_{up}/y_d$  افزایش می‌یابد.

- برای بازشدگی ثابت، با افزایش قطر مدل ترکیبی سرریز-دریچه مقدار پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$  کاهش می‌یابد. هم‌چنین تغییرات ضریب دبی با تغییرات پارامتر بدون بعد  $y_{up}/D$  رابطه مستقیم دارد.

- به ازای یک دبی و قطر ثابت، با افزایش ارتفاع بازشدگی دریچه، تغییرات ضریب دبی روند کاهشی و تغییرات پارامتر بدون بعد  $a/y_{up}$  روند افزایشی دارد.

- روند تغییرات پارامتر  $Fr_{up}$  با قطر استوانه برعکس است به‌طوری‌که محدوده عدد فرود با افزایش قطر استوانه کمتر

## ۹- پی‌نوشت‌ها

- 1- Renormalized group (RNG) model
- 2- Mean Absolute Percentage Error
- 3- Root Mean Square Error

## ۱۰- مراجع

اسماعیلی، ک.، نقوی، ب.، کورش وحید، ف. و یزدی، ج.، (۱۳۸۹)، "مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای"، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۱(۱)، ۱۶۶-۱۸۹.

رودی، و. شاملو، ح.، (۱۳۸۸)، *مدل‌های آشفتگی و کاربرد آن در هیدرولیک*، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

قادری، ا. دانش‌فراز، ر. و قهرمان‌زاده، ع.، (۱۳۹۵ الف)، "بررسی عددی ضریب دبی جریان عبوری از سرریز-دریچه کنگره‌ای با ارتفاع بازشدگی دریچه مختلف"، *اولین کنفرانس بین‌المللی آب، محیط‌زیست و توسعه پایدار*، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

قادری، ا. دانش‌فراز، ر. و مینایی، ع.، (۱۳۹۵ ب)، "ارزیابی ضریب دبی جریان عبوری از سرریز-دریچه کنگره‌ای مستطیلی"، *اولین کنفرانس بین‌المللی آب، محیط‌زیست و توسعه پایدار*، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

قاسم‌زاده، ف.، (۱۳۹۴)، *شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D*، انتشارات نشر نوآور، تهران، ایران.

سلامتی، س.، دهقانی، ا.، مفتاح‌هلقی، م. و ظهیری، ع.، (۱۳۹۴)، "نخمن ضریب آبگذری سازه ترکیبی سرریز-دریچه با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیکی"، *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۲(۲)، ۲۵۵-۲۶۳.

سوری، ا.، مسعودیان، م.، کردی، ا. و راتچر، ک.، (۱۳۹۳)، "بررسی آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی و افت انرژی در سرریز-دریچه استوانه‌ای با حرکت قائم"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، ۴۴(۴)، ۶۵-۷۸.

شاهرخ‌نیا، م.ع و جوان، م.، (۱۳۸۲)، "تعیین سازه‌های تحویل آب در شبکه‌های آبیاری درودزن با استفاده از مدل ریاضی"،



- D., (1994), "Characteristics of simultaneous flow over weirs and below inverted V- notches gate", *Journal of Civil Engineering Research*, 16(9), 786-799 .
- Negm, A.M., El-Saiad, A.A., and Saleh, O.K., (1997), "Characteristics of combined flow over weirs and below submerged gates", *Proceedings of Al-Mansoura Engineering*, 3(2), 259-272.
- Saad, N.Y., and Fattouh, E.M., (2017), "Hydraulic characteristics of flow over weirs with circular openings", *Ain Shams Engineering Journal*, 8(4), 515-522.
- Severi, A., Masoudian, M., Kordi, E., and Roettcher, K., (2015), "Discharge coefficient of combined free over-under flow on a cylindrical weir-gate", *Journal of Hydraulic Engineering*, 21(1), 42-52.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

- مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۶۳۳-۶۵۴.
- کرمی، ح.، فرزین، س.، حیدری، ع. و حسینی، خ.، (۱۳۹۶ الف)، "شبیه‌سازی مشخصات جریان روی سرریز نیمه استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار عددی ANSYS CFX"، *مجله مهندسی منابع آب*، ۱۰(۳۴)، ۵۱-۶۰.
- کرمی، ح.، فرزین، س.، ضمیری، ا. و نیر، ش.، (۱۳۹۶ ب)، "آنالیز عددی مشخصه‌های جریان عبوری از سرریز استوانه‌ای با استفاده از مدل FLOW-3D"، *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*، ۸(۲)، ۱-۱۸.
- مسعودیان، م.، سوری، ا. و ضیایی‌فر، س.، (۱۳۹۳)، "اثر چرخش سرریز-دریاچه نیم استوانه‌ای بر میزان افت کارماپه و ضریب دبی"، *مجله مهندسی منابع آب*، ۷(۲۲)، ۸۵-۱۰۰.
- مهتابی، ق.، ارونقی، ه. و لطفی، پ.، (۱۳۹۵)، "مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریز-دریاچه منشوری"، *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۶(۱-۴)، ۲۵۵-۲۶۸.
- Chanson, H., (2009), "Discussion of hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 136(7), 508-509.
- Chanson, H., and Montes, J.S., (1998), "Over flow characteristics of circular weirs: effects of inflow condition", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 32(1), 152-161.
- Ferro, V., (2000), "Simultaneous flow over and under a gate", *Irrigation and Drainage Engineering*, 126(3), 190-193.
- Fu, Z.F., Cui, Z., Dai, W.H., and Chen, Y.J., (2018), "Discharge coefficient of combined orifice-weir flow", *Water*, 10(6), 699.
- Hayawi, H.A.M., Yahia, A.A.G., and Hayawi, G.A.M., (2008), "Free combined flow over a triangular weir and under rectangular gate", *Journal of Damascus University*, 24(1), 9-22.
- Jun-Fu, Y. Chih-Han, L., and Chang-Tai, T., (2001), "Hydraulic characteristics and discharge control of sluice gates", *Journal of Chinese Institute of Engineering*, 24(23), 301-310.
- Khassaf, S.I., and Habeeb, M., (2014), "Experimental investigation for flow through combined trapezoidal weir and rectangular gate", *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(4), 312-323.
- Masoudian, M., Fendreski, R., and Gharahgezlou, M., (2013), "The effects of laboratory canal size and cylindrical weir-gate diameter on discharge coefficient", *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(15), 1630-1634.
- Masoudian, M., and Gharahgezlou, M., (2012), "Flow characteristics of cylindrical weirs in a small laboratory canal", *Journal of Science Series Data Report*, 4(4), 12-23.
- Negm, A.M., El-Saiad, A.A., Alhamid, A.A., and Husain,