

Investigating the Hydraulic Efficiency of the Labyrinth Weir Using the Flow3D Numerical Method

Rasoul Daneshfaraz, Mahdi Majedi Asl* and Tohid OmidPour Alavian¹

(Received: June 24-2024; Revised: November 7-2024; Accepted: January 20-2025)

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Maragheh University, Maragheh, Iran.

*: Corresponding author Email: mehdi.majedi@gmail.com

Abstract

Weirs play a crucial role in flood management and dam safety, accounting for a significant portion of the construction costs of dams. The selection of floods with long return periods for flood design is of utmost importance. However, in some cases, increasing the weir capacity by widening it may be impossible due to topographical limitations. One solution to enhance the flow capacity of weirs is the application of labyrinth weirs. These weirs increase the effective length of the weir crest within a given width, allowing for the passage of higher flow rates while maintaining similar hydraulic conditions. In this study, the hydraulic performance of labyrinth weirs is investigated using the Flow3D numerical model and laboratory data. Since laboratory experiments are time-consuming and costly, employing numerical simulations to achieve more accurate and reliable results for evaluating the hydraulic behavior of labyrinth weirs is prioritized. The results of the simulations indicate that the Flow3D software, utilizing statistical parameters such as R^2 , DC, and RMSE, achieves values of (0.9805, 0.9725, and 0.0142), respectively. This demonstrates its capability to model the flow passing through weirs with high accuracy. The obtained values of the discharge coefficient in Flow3D show a high agreement with the laboratory data from Crookston. The approximate alignment of these results indicates the high accuracy of the numerical model. Additionally, in comparison to different discharges, the relative computational error observed for flow rates of 0.35, 0.6, and 0.44 (cubic meters per second) was approximately 0.5 percent, while for flow rates of 0.3, 0.4, and 0.57, the corresponding errors were 8, 6, and 4 percent, respectively. The results indicate that these tools can be effectively utilized in precise hydraulic analyses and the optimization of weir designs, irrigation systems, and fluid dynamics phenomena.

Keywords: Head water, Numerical modeling, Labyrinth weir, Hydraulic structures, Flow 3D

How to cite this article: Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and OmidPour Alavian, T. 2025. Investigating the Hydraulic Efficiency of the Labyrinth Weir Using the Flow3D Numerical Method.. *J. Water and Soil Sci.* 29 (1) :111-129. DOI: [10.47176/jwss.29.1.37877](https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.37877)

Copyright © 2025 Daneshfaraz et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی کارایی هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با استفاده از روش عددی Flow3D

رسول دانشفراز، مهدی ماجدی اصل*  و توحید امیدپور علویان^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱)

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mehdi.majedi@gmail.com

چکیده

سرریزها در مدیریت سیلاب‌ها و ایمنی سدها نقش حیاتی ایفا می‌کنند و بخش عمده‌ای از هزینه‌های ساخت سدها را به خود اختصاص می‌دهند. انتخاب سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت بلندمدت برای طراحی سیلاب از اهمیت زیادی برخوردار است، اما در برخی موارد افزایش ظرفیت سرریز از طریق افزایش عرض آن به دلیل محدودیت‌های توپوگرافی غیرممکن است. یکی از راهکارهای افزایش ظرفیت آبگذری سرریزها، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای است که با افزایش طول مؤثر تاج سرریز در یک عرض معین، امکان عبور دبی بیشتری را با حفظ بار هیدرولیکی مشابه فراهم می‌آورد. در این پژوهش، عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با استفاده از مدل عددی Flow3D و داده‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. از آنجاکه انجام مطالعه‌های آزمایشگاهی معمولاً نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتر برای ارزیابی رفتار هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای در اولویت قرار دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار Flow3D با استفاده از پارامترهای آماری R^2 ، DC و RMSE به ترتیب برابر است با (۰/۹۸۰۵، ۰/۹۷۲۵ و ۰/۰۱۴۲) که قادر است جریان عبوری از سرریزها را با دقت زیاد مدل‌سازی کند. مقادیر به دست آمده ضریب دبی در Flow3D تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی کروکستون دارد و هم‌راستایی تقریبی این نتایج نشان‌دهنده دقت زیاد مدل عددی است. علاوه بر این در مقایسه با دبی‌های مختلف، برای نمونه خطای نسبی محاسباتی مشاهده شده برای دبی‌های ۰/۳۵، ۰/۶ و ۰/۴۴ (مترمکعب بر ثانیه) تقریباً ۰/۵ درصد محاسبه شده است، درحالی‌که برای دبی‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵۷ به ترتیب خطاهایی معادل ۸، ۶ و ۴ درصد مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که این ابزارها می‌توانند در تحلیل‌های هیدرولیکی دقیق و بهینه‌سازی طراحی سرریزها، سیستم‌های آبیاری و پدیده‌های دینامیک سیالاتی به طور مؤثری استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: بار آبی، مدل‌سازی عددی، سرریز کنگره‌ای، سازه‌های هیدرولیکی، Flow 3D

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

مدیریت و انتقال آب از آغاز تمدن انسان تا به امروز یکی از مسائل بنیادین و حیاتی بوده است. برای تأمین نیازهای آبی، انواع مختلفی از سازه‌های هیدرولیکی طراحی و ساخته شده است. سرریزها به عنوان یکی از سازه‌های رایج در بسیاری از سدها و کانال‌های انتقال آب استفاده می‌شوند. این سرریزها به منظور تخلیه، اندازه‌گیری و کنترل سطح آب به کار می‌روند. برای بهبود و مدیریت بهتر منابع آب، مهندسان به تنظیم و بهینه‌سازی سازه‌ها از طریق استفاده از انواع مختلفی از سرریزها تمرکز کرده‌اند. به دلیل ارتباط مستقیم حجم جریان با خصوصیات هیدرولیکی و هندسی سرریزها، پژوهش‌های زیادی در زمینه تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب تخلیه جریان و مقدار دبی عبوری از سرریزها انجام شده است. یکی از راه‌های مؤثر برای افزایش طول تاج سرریز جریان در یک عرض مشخص، استفاده از سرریزهای با پلان غیرخطی مثلثی، ذوزنقه‌ای، دایره‌ای، سهموی و غیره است. این سرریزها به عنوان سرریزهای چندوجهی، کنگره‌ای یا زیگزاگی شناخته می‌شوند. ظهور سرریزهای کنگره‌ای منجر به بهبود عملکرد آن‌ها با جایگزینی سرریزهای خطی با سرریزهای کنگره‌ای غیرخطی شده که افزایش طول کل آن‌ها در یک کانال با عرض محدود از ویژگی‌های اصلی آن‌هاست. سرریزهای کنگره‌ای قوسی بیشترین کارایی را در مخزن‌های سدها از خود نشان می‌دهند. این سرریزها بر اساس عملکرد هیدرولیکی و تنوع هندسی، برای استفاده در جریان‌های مختلف مانند کانال‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن به عنوان سازه‌های کنترل هد آب، استهلاک انرژی، هوادهی جریان و اندازه‌گیری جریان طراحی شده‌اند. سرریز کنگره‌ای یک نوع سرریز خطی چین‌خورده در پلان است که افزایش طول تاج در یک عرض محدود کانال برای آن امکان‌پذیر و قابل طراحی است. این سرریزها می‌توانند دبی بیشتری را در ارتفاع‌های به نسبت کمتر نسبت به سرریزهای خطی با عرض یکسان کانال، از خود عبور دهند. همچنین، سرریزهای کنگره‌ای با طول تاج گسترده‌تری از عرض کانال

نسبت به سرریزهای خطی (مانند اوجی) در همان کانال دارند. این موضوع به‌ویژه زمانی که ارتفاع جریان محدود شده باشد، استفاده می‌شود. راندمان هوادهی سرریزهای کنگره‌ای بهتر از سرریزهای خطی با همان طول است که این بهبود در کاهش ارتعاشات سقوط ریزش و افزایش دبی‌ها مؤثر است. سرریزهای کنگره‌ای یکی از موضوعات مورد توجه در مهندسی هیدرولیک است که از دهه ۱۹۴۰ میلادی با مطالعه‌های ابتکاری توسط جنتیلینی بررسی شدند (۹). این مطالعه‌ها پس از آن به صورت پژوهش‌های گسترده‌تر توسط پژوهشگرانی همچون تیلور (۳۰) و هی و تیلور (۱۲) ادامه یافت. در یکی از مطالعه‌های اولیه، هی و تیلور (۱۲) نشان دادند که سرریزهای کنگره‌ای با شکل‌های مختلف از جمله مثلثی، ذوزنقه‌ای و مستطیلی با تاج لبه تیز، در ارتفاع‌های آب بالادست عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای خطی دارند و دبی بیشتری را می‌توان از آن‌ها عبور داد. این نتایج موجب شد تا پژوهشگران بیشتر به مطالعه و تحلیل سرریزهای کنگره‌ای پرداخته و در نتیجه، هی و تیلور (۱۲) به عنوان اولین افرادی که مطالعه‌های جامع‌تری را روی این نوع سرریزها انجام دادند، به نتایج کاربردی در این زمینه دست یافتند. آن‌ها برای نمایش عملکرد سرریزهای کنگره‌ای، از نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به دبی سرریز خطی استفاده کردند. دارواس (۸) به پژوهش خود بر اساس مدل‌های فیزیکی سدها و ورنوا و آن پرداخت و مدل‌هایی را برای طراحی سرریزهای ذوزنقه‌ای ارائه کرد. او همچنین یک دسته منحنی برای طراحی سرریزهای ذوزنقه‌ای شکل با تاج ربع دایره‌ای و یک رابطه تجربی ارائه کرد. لاکس (۱۵) بار آبی کل را به جای بار پی‌زومتری مورد استفاده قرار داده و فرمول‌های تجربی وی برای سرریزهای چند وجهی نشان داد که راندمان سرریزهای چند وجهی در مقادیر زیاد بار آبی به‌طور چشمگیری کمتر از مقادیری است که مطالعه‌های دیگر نشان می‌دهد. تویس و همکاران (۳۱) نشان دادند که ظرفیت سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای تابعی از بار هیدرولیکی کل، طول تاج مؤثر و ضریب آبگذری است. ضریب آبگذری نیز به عواملی چون ارتفاع سرریز، بار هیدرولیکی کل،

ضخامت دیواره سرریز، شکل تاج، شکل راس و زاویه دیوارهای جانبی سرریز وابسته است. این پژوهش‌ها منجر به ارائه نمودارهای جدید برای بررسی تأثیر این پارامترها بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای شد که نشان داد راندمان گذردهی این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای خطی به ازای بار بالادست یکسان، سه تا چهار برابر افزایش می‌یابد. قدسیان (۱۰) مطالعه آزمایشگاهی را روی سرریز کنگره‌ای مثالی با شکل‌های مختلف تاج انجام دادند. ابتدا با آنالیز ابعادی، پارامترهای مربوطه را به صورت بی بعد استخراج کردند و سپس با داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای منظم و منسجم برای ضریب دبی و هدابی معرفی کردند. کروکستون و تولیس (۵) بررسی کردند که استغراق موضعی، شکل تاج سرریز، هندسه سرریز و تأثیرات لزجت و فشار در زیر تیغه جریان سرریزهای کنگره‌ای از عوامل مؤثر در عملکرد هیدرولیکی آن‌ها هستند. کروکستون و تولیس (۵) سرریزهای قوسی کنگره‌ای با زوایای دیواره سیکل مختلف (α) و زوایای سیکل قوسی مختلف (θ) را بررسی کردند و پارامترها و اصطلاحات هندسی آن‌ها را نام‌گذاری کردند. کروکستون و همکاران (۴) آنالیز و طراحی بهینه سرریزهای کنگره‌ای برای هوادهی جریان، تخمین رابطه هد-دبی، پایداری تیغه آبی روی سرریز را بررسی کردند و با برش قسمت‌هایی از دیواره و دماغه سرریز و همچنین با ایجاد زائده‌هایی روی دیواره‌ها و دماغه سرریز به بهبود عوامل یادشده اقدام کردند. نتایج پژوهش تجربی انجام‌شده توسط سئو و همکاران (۲۹) نشان داد که دبی عبوری در سرریز کنگره‌ای حدود ۷۰٪ بیشتر از دبی عبوری از روی سرریز لبه‌تیز مستقیم تحت شرایط جریان آزاد است. آن‌ها بیان داشتند که با افزایش درجه استغراق سرریز، راندمان گذردهی سرریز کاهش می‌یابد که مقدار آن متناسب با نسبت $\left(\frac{h_d}{h^*}\right)$ است. کریستنسن (۶) علاوه بر بررسی میدان جریان ورودی به سرریزهای کنگره‌ای، تأثیر تعداد سیکل‌ها بر روی عملکرد این نوع سرریزها را مطالعه کرد و نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیکل‌ها، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. کاریلو و همکاران (۷)

به مدل‌سازی عددی سرریزهای کنگره‌ای با زاویه دیواره بزرگ تحت شرایط آزاد و مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد در پایین دست رودخانه، در شرایط جریان بحرانی، جریان و ضریب دبی در مدل‌سازی عددی به خوبی با داده‌های تجربی مربوطه مطابقت دارد. امیدپور علویان و همکاران به مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با استفاده از روش ANN پرداختند (۲۵). امیدپور علویان و همکاران به مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با فرم تاج ربع دایره‌ای و نیم دایره‌ای با استفاده از روش QNET پرداختند (۲۶). امیدپور علویان و همکاران به مدل‌سازی ضریب دبی سرریز غیرخطی با روش QNET پرداخت و نتایج نشان داد که QNET عملکرد بهتری در مدل‌سازی ضریب دبی از خود نشان داد (۲۷). ماجدی اصل و همکاران (۱۸) به مقایسه عملکرد روش‌های آزمایشگاهی و فرامدلی در پیش‌بینی ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای پرداختند. مقایسه نتایج این پژوهش با سایر پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که شاخص‌های ارزیابی الگوریتم‌های GEP و SVM در این پژوهش، نسبت به سایر روش‌ها و پژوهش‌ها، دقت و برآورد بهتری داشته‌اند. ماجدی اصل و همکاران (۱۹) به مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای غیرخطی قوسی در پلان پرداختند. مقایسه نتایج این پژوهش با دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌های ارزیابی برای روش‌های ANN، SVM، QNET و GEP نسبت به سایر پژوهش‌ها، نتایج بهتری را ارائه می‌دهند. ماجدی اصل و همکاران (۲۰) به طور آزمایشگاهی تأثیر شیب دیواره بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سرریز کنگره‌ای با زاویه سیکل قوسی ۲۰ درجه و بدون شیب دیواره، عملکرد بهتری نسبت به سایر سرریزها از خود نشان می‌دهد. ماجدی اصل و همکاران (۲۱) با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی، به مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌های SVM و ANN نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. مدل‌سازی ضریب

دبی سرریزهای غیرخطی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی QNET و SVM توسط ماجدی اصل و همکاران انجام شد (۲۲). اژدری مقدم و جعفری (۱) به بررسی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای پرداختند. ایشان پس از انجام آنالیز ابعادی و استخراج پارامترهای بی بعد به بررسی نحوه تغییرات ضریب دبی استخراج شده از نتایج مدل Flow3D با پارامترهای بی بعد پرداختند. نیک‌پیک و کاشفی‌پور (۲۴) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و مایل و سرریز مستطیلی را مقایسه کردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که به ازای دبی معین، طول بیشتر سرریز کنگره‌ای نسبت به سایر سرریزها موجب کاهش عمق آب در این سرریز نسبت به سایر سرریزها می‌شود. پژوهش رضایی و همکاران (۲۸) به منظور پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای رابطه‌ای معرفی کردند که با ضریب همبستگی زیاد در حالت‌های مختلف به تخمین ضریب دبی می‌پردازد. قلی‌زاده و همکاران (۱۱)، اثر شکل تاج بر روی ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای مثلی را به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار Flow3D بررسی کردند. حقی‌آبی و همکاران (۱۳)، با استفاده از مدل Flow3D الگوی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای مثلی را شبیه‌سازی و با سرریزهای خطی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه رأس سرریز از ۳۰ درجه تا ۱۸۰ درجه به علت کاهش تداخل جریان عبوری با تیغه‌های ریزشی جانبی، اغتشاشات و گردابه‌های جریان کمتر می‌شود و از برآمدگی سطح جریان در نیم‌رخ طولی و اختلاف ارتفاع عرضی جریان در نیم‌رخ عرضی کاسته می‌شود و در پایاب سرریز نیز فشار کاهش یافته و سرعت افزایش می‌یابد. جامی‌فر و همکاران (۱۴)، با استفاده از مدل عددی به بررسی پروفیل سطح آب در سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلی، دوزنقه‌ای و منحنی شکل پرداختند و دیدند که مقدار هد در سرریز با پلان منحنی شکل کمترین مقدار را نسبت به دو سرریز دوزنقه‌ای و مثلی هم طول خود در یک دبی ثابت دارد. عباسی و همکاران (۲)، هیدرولیک سرریزهای کنگره‌ای و همچنین پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی

سرریزهای کنگره‌ای در دو بخش پارامترهای هندسی و پارامترهای هیدرولیکی را به‌طور جامع بررسی کردند. منجزی و همکاران (۱۷)، به بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه جریان در سرریزهای انحنادار کنگره‌ای با مقطع مثلی پرداختند که نتایج نشان داد که سرریز یادشده، اجازه می‌دهد که دبی بیشتری در مقایسه با نوع خطی آن برای یک بار هیدرولیک یکسان، عبور کند. علاوه بر این، سرریز منحنی‌دار کنگره‌ای و سرریز خطی کنگره‌ای به ترتیب دارای ضریب تخلیه بیشتری در مقایسه با سرریز کنگره‌ای صاف و سرریز خطی صاف دارد. ضمیری و همکاران (۳۲) به بررسی تأثیر تغییر شکل در پلان سرریز کنگره‌ای بر افزایش ضریب دبی جریان به کمک مدل عددی Flow3D پرداخته شده است. تحلیل و مقایسه دقیق بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D، امکان ارائه اطلاعات دقیق و مفیدی درباره رفتار سیالاتی در سامانه‌های مهندسی فراهم می‌آورد. این اطلاعات از اهمیت زیادی در تحلیل و طراحی سیستم‌های مختلف مهندسی برخوردار هستند؛ زیرا به مهندسان این امکان را می‌دهند تا با دقت بیشتری به برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی فرایندها و ساختارهای مختلف بپردازند. همچنین، تطابق نتایج بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی می‌تواند به بهبود روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی کمک کند و دقت و صحت بیشتری در نتایج مدل‌سازی حاصل شود. این امر می‌تواند به گسترش و پیشرفت روش‌های مدل‌سازی عددی در زمینه‌های مختلفی از جمله علوم مهندسی، علوم زمین، علوم زیستی و غیره کمک کند. با استفاده از این تحلیل‌ها و مقایسه‌ها، مهندسان قادر خواهند بود تا تصمیم‌گیری‌های مهمی را در مراحل طراحی و بهینه‌سازی ساختارها و فرایندهای مختلف مهندسی انجام دهند. مقایسه دقیق و تحلیلی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی می‌تواند راهنمایی برای دستیابی به دقت و صحت بیشتری در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیالاتی در سامانه‌های مختلف باشد. این نتایج می‌توانند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مهم در طراحی و بهینه‌سازی ساختارها و

آزمایشگاهی کروکستون انجام شد. در شکل ۱، نمایی از پلان انواع سرریزهای کنگره‌ای نمایش داده شده است. تصویری از فلوم آزمایشگاهی پژوهش کروکستون در شکل ۲ نشان داده شده است که به عنوان معیاری برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. این مقایسه‌ها می‌توانند دقت شبیه‌سازی‌های عددی و توانایی نرم‌افزار Flow3D در بازسازی جریان‌های واقعی و پیچیده سرریزها را تأیید کنند.

تأسیسات فلوم مستطیلی

فلوم آزمایشگاهی مستطیلی با ابعاد ۱/۲ متر عرض، ۱۴/۶ متر طول و ۱ متر عمق از یک چهارچوب فولادی و دیواره‌ها و کف آن از شیشه اکریلیک ساخته شد. شیب فلوم با استفاده از چهار جک مکانیکی بزرگ قابل تنظیم است. شیب طولی کف فلوم (S_{bed}) برابر صفر در نظر گرفته شد. در بالادست فلوم، یک رمپ با شیب ۷ درجه نصب شده تا انتقال صاف و بدون وقفه‌ای میان کف فلوم و سکوی آزمایش فراهم شود. همچنین، دو خط تأمین آب به یک هدباکس فولادی متصل هستند که داخل آن صفحات مشبک تلاطم‌گیر جریان نصب شده‌اند تا جریان آب را آرام کرده و شرایط یکنواختی برای ورود به فلوم فراهم کند.

معادله یک‌بعدی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای تابعی از بار آبی کل (H_T) برحسب متر، طول تاج سرریز (L) برحسب متر و ضریب جریان سرریز (C_d) بدون بعد بوده و از معادله (۱) به دست می‌آید (۱۶). پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای را می‌توان به صورت رابطه تابعی (۲) نوشت.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_T^{3/2} \quad (1)$$

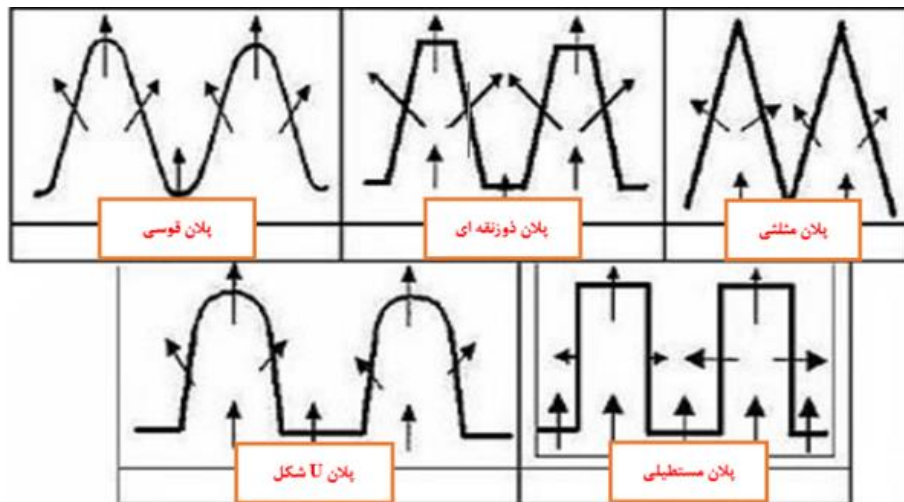
$$C_d = f(B, L, H_T, H_d, P, R, CR, Na, N) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، (B) عرض کانالی که سرریز در آن نصب می‌شود، (L) طول تاج سرریز، (H_T) هد کل جریان در بالادست سرریز که برابر است با $\left(\frac{h + v^2}{2g}\right)$ ، (H_d) هد کل جریان در پایین‌دست سرریز، (P) ارتفاع سرریز، (R) شعاع

فرایندهای مختلف مهندسی استفاده شده و به بهبود عملکرد و کارایی سامانه‌ها کمک کنند. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی ضریب دبی (C_d) و دقت مربوطه در سرریز کنگره‌ای با استفاده از نرم‌افزار Flow3D تعیین شده است. برای اعتبارسنجی، شبیه‌سازی و تنظیم پارامترهای نرم‌افزار Flow3D از داده‌های آزمایشگاهی کروکستون استفاده شد (۳).

مواد و روش‌ها

برای طراحی هندسه سرریزها و انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان، مراحل طراحی هندسی ابتدا در محیط نرم‌افزار AUTOCAD آغاز شد. در این مرحله، هندسه دقیق مدل سرریز با در نظر گرفتن ابعاد و ویژگی‌های هندسی مختلف از جمله هندسه جریان و ویژگی‌های سطح آب طراحی شد. پس از تکمیل طراحی هندسه، فایل نهایی به فرمت STL ذخیره شد. انتخاب فرمت STL به دلیل سازگاری زیاد آن با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان سیالات مانند Flow3D صورت گرفت. این فرمت به منظور انتقال دقیق اطلاعات هندسی مدل به نرم‌افزار شبیه‌سازی سه‌بعدی انتخاب شد. سپس فایل STL وارد نرم‌افزار Flow3D شد که از تکنولوژی‌های عددی پیشرفته برای حل معادلات ناویراستوکس به صورت حجمی استفاده می‌کند. این روش عددی امکان شبیه‌سازی دقیق جریان‌های سیالاتی در فضاهای پیچیده و با رفتارهای غیرخطی را فراهم می‌آورد. هدف اصلی پژوهش حاضر، مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در محیط Flow3D است. داده‌های آزمایشگاهی که توسط Brian Mark Crookston در سال ۲۰۱۰ در آزمایشگاه تحقیقات آب یوتا به دست آمده‌اند، به عنوان مبنای مقایسه قرار گرفت. این داده‌ها شامل نتایج جریان‌های سیالاتی در فلوم مستطیلی هستند که در شرایط مختلف آزمایش شده‌اند. برای ارزیابی دقت مدل‌های شبیه‌سازی شده، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از ۱۶ دبی مختلف با استفاده از پارامترهای



شکل ۱. پلان انواع سرریزهای کنگره‌ای (۵)



شکل ۲. تصویری از فلوم آزمایشگاهی پژوهش کروکستون (۳)

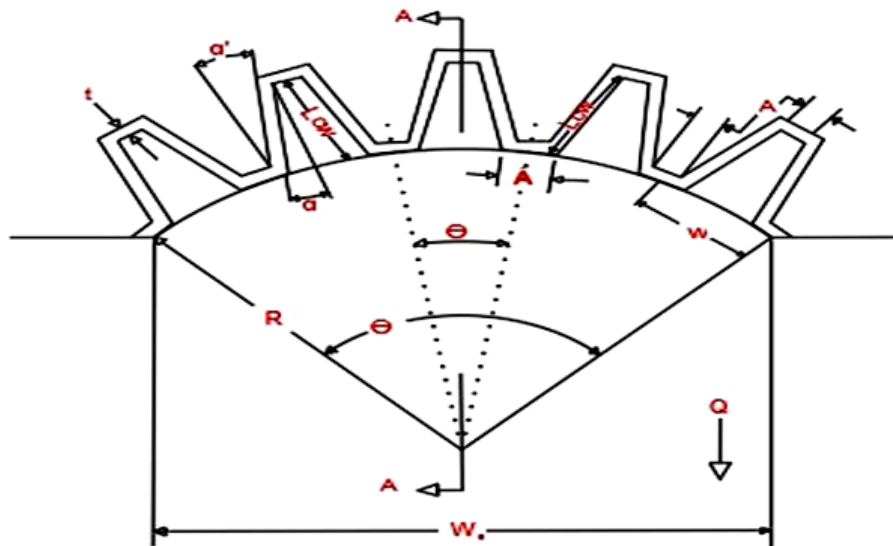
(α') زاویه دیواره جانبی بالادست $(\alpha' = \alpha + \frac{\theta}{2})$ ،
(N) تعداد سیکل، (A) عرض دماغه داخلی، (Lc) طول خط
مرکزی دیواره جانبی، (tw) ضخامت دیواره سرریز کنگره‌ای
در تاج و (θ) زاویه سیکل قوسی است.

در این پژوهش، پارامترهای مربوطه شامل ضریب
دبی (Cd)، نسبت بار آبی $(\frac{H_T}{p})$ و زاویه دیواره (α) بررسی
شده است. برای مقایسه ضریب دبی جریان از داده‌های
آزمایشگاهی کروکستون (۳) استفاده شد و این داده‌ها

انحناء سیکل‌های نیم‌دایره‌ای، (CR) پارامتر معرف شکل تاج
سرریز که می‌تواند به صورت لبه‌تیز، صاف، ربع دایره‌ای یا
شعاع‌های کوچک تا بزرگ، نیم‌دایره‌ای و اوجی باشد، (Na)
نماینده شکل ریزش تیغه جریان در سرریزهای کنگره‌ای است
که می‌تواند به صورت ریزش آزاد، ریزش تداخلی، هوادهی
شده، هوادهی ناقص یا مستغرق باشد و (N) تعداد سیکل‌ها
است. در شکل ۳ نمونه از سرریز کنگره‌ای نشان داده شده
است. پارامترهای موجود در شکل ۴ عبارت‌اند از: (W) عرض
کانال پایین‌دست، (R) شعاع قوس $(R = \left(\frac{W^2}{4} + r'^2\right)^{\frac{1}{2}})$ ،
 (α) زاویه دیواره جانبی برای چرخه سرریز کنگره‌ای قوسی،



شکل ۳. نمونه‌ای از سرریز کنگره‌ای



شکل ۴. پارامترهای سرریز کنگره‌ای (۵)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_0^i - \bar{X}_0)(X_P^i - \bar{X}_P)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (X_0^i - \bar{X}_0)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (X_P^i - \bar{X}_P)^2 \right]}} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{0i} - X_{pi})^2}{N}} \quad (۴)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - (C_d)_p)^2}{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - (\bar{C}_d)_m)^2} \quad (۵)$$

با استفاده از نرم‌افزار Flow3D تحلیل و به‌منظور حصول اطمینان از درستی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و کفایت دقت حاصل با به‌کارگیری از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE, Root Mean Square Error)، ضریب تعیین (DC, Nash-Sutcliffe Coefficient)، مجذور ضریب همبستگی (R^2 , The square of the correlation coefficient) و فرمول خطای نسبی (Relative Error) طبق معادلات (۳)، (۴)، (۵) و (۶) استفاده شد.

نرم افزار Flow3D

در سال ۱۹۶۳ دکتر تونی هرت در راستای پیشرفته کردن مدل سازی سیالات پایه و اساس مدل Flow3D را تعریف کرد و در سال ۱۹۸۵ اولین نمونه نسخه Flow3D را منتشر کرد و تاکنون به ابزاری جامع و دقیق در حوزه بررسی سیالات تبدیل شده است. نرم افزار Flow3D بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamic) توسعه داده شده و کاربرد آن در شبیه سازی جریان مایعات و گازها در زمینه های صنعتی، محیط زیست، هوافضا، علوم مهندسی نفت، گاز، علوم دریایی و هیدرولیکی است. این نرم افزار در مدل سازی مسائلی که وابسته به زمان هستند (جریان ماندگار - غیر ماندگار) و همچنین جریانی که با سطح آزاد در تماس هستند، مانند سرریزها عملکرد خوبی دارد. Flow3D نتایج آزمایش ها را به صورت یک بعدی - دوبعدی و سه بعدی ارائه می دهد که اجازه تحلیل و بررسی نتایج و دیتاهای خروجی را می دهد. مدل سازی با این نرم افزار مانند انجام آزمایشی است که احتمال دارد داده های ورودی آن صحیح نباشد و یا شرایط آزمایشگاه ممکن است شرایط را به خوبی تعریف نکند که نتایج حاصله از آن درخور خطا خواهد بود. در نهایت اگر در شبیه سازی عددی Flow3D شرایط معرفی شده به مدل مناسب نباشد، نتایج به دست آمده قابل استناد نخواهد بود.

معادلات Flow3D

نرم افزار Flow3D به عنوان جانشین شایسته ای برای مدل های فیزیکی، با استفاده از روش های عددی، مدل سازی و تحلیل رفتار سیالات را ساده تر کرده و نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد برای آزمایش های فیزیکی را حذف می کند. این نرم افزار نتایج را به صورت یک بعدی، دوبعدی، سه بعدی و همچنین در قالب داده های متنی (Text Data) ارائه می دهد که امکان بهره مندی آسان از این نتایج در نرم افزارهایی مانند اکسل و سایر ابزارهای جانبی را فراهم می سازد.

معادله پیوستگی یا بقای جرم یک جریان سیال بدین

$$\text{Relative Error} = \left(\frac{\text{Simulated Data} - \text{Experimental Data}}{\text{Experimental Data}} \right) * 100 \quad (6)$$

در معادلات (۳)، (۴) و (۵) پارامترهای X_p و X_0 به ترتیب داده های مشاهده ای و محاسبه ای و $\bar{X}_p$ ، $\bar{X}_0$ و N به ترتیب میزان میانگین داده های مشاهده ای و محاسبه ای و تعداد داده ها هستند. مقدار R^2 و DC هر چه به یک نزدیک تر و مقدار RMSE برای یک مدل هر چه کوچک تر و به صفر نزدیک تر باشد، نتایج مطلوب تر آن است. در معادله (۶)، داده های شبیه سازی شده به مقادیر حاصل از مدل یا شبیه سازی عددی اشاره دارند؛ درحالی که داده های آزمایشگاهی به عنوان مرجع واقعی و دقیق در نظر گرفته می شوند. در این فرمول، ابتدا تفاوت مطلق بین مقادیر شبیه سازی شده و داده های آزمایشگاهی محاسبه شده و سپس این تفاوت بر داده های آزمایشگاهی تقسیم می شود تا میزان انحراف نسبی مشخص شود. در نهایت حاصل ضرب در ۱۰۰، این تفاوت را به صورت درصد نشان داده و میزان انحراف شبیه سازی از داده های آزمایشگاهی را نمایان می کند.

مشخصات هندسی مدل سرریز کنگره ای

در پژوهش حاضر، هندسه سرریز کنگره ای با پلان دوزنقه ای انتخاب شد. این هندسه به دلیل ویژگی های خاص خود از جمله عملکرد بهینه در شرایط مختلف جریان ایفای نقش می کند. از طرفی، پلان دوزنقه ای به دلیل ساختار خاص خود که انعطاف پذیری در تنظیم جریان را فراهم می کند، در کنترل و تنظیم سطح آب و فشار در سرریز موثر است. همچنین، انتخاب پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است که دارای ارتفاع سرریز ۰/۳۰۴۸ متر، تعداد دو سیکل، با زاویه دیواره سرریز ۶ درجه که نقش مهمی در جهت دهی جریان دارد، استفاده شد. مقایسه نتایج مدل سازی با داده های کروکستون نیز به تأیید دقت و صحت مدل سازی کمک می کند (۴). این مقایسه شامل تطابق نتایج مدل سازی با داده های آزمایشگاهی است که نشان دهنده توانایی مدل در شبیه سازی و پیش بینی واقعیت های فیزیکی است.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + F_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

و همچنین برای سایر مؤلفه‌های معادله ناویراستوکس، اگرچه ظاهر معادله ناویراستوکس معادله ساده‌ای به نظر می‌رسد، اما به‌واسطه حضور ترم‌های غیرخطی (ترم‌هایی مانند $u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)$ و ترم‌های مشابه در سمت چپ این معادله)، حل صریح و ضمنی برای این معادله وجود ندارد و حل دقیق این مسئله یکی از مشکل‌ترین مسائل مهندسی محسوب می‌شود. به اعتقاد ریاضیدان‌ها معادله ناویراستوکس از آن دسته معادلاتی است که برای آن پاسخ یکتا وجود ندارد.

شبکه محاسباتی و اعمال شرایط مرزی

شبکه‌بندی در نرم‌افزار Flow3D به‌منظور حل عددی میدان جریان در سه راستای (X, Y, Z) به هر دو صورت یکنواخت و غیر یکنواخت امکان‌پذیر است که در این پژوهش مش‌بندی نهایی برای شبکه محاسباتی با انتخاب بهینه برای تمامی مدل‌ها مش یکنواخت به‌دست آمد. شاخص انتخاب مش‌بندی‌ها در نرم‌افزار Flow3D با سعی و خطا به‌دست می‌آید و در این مرحله از کار مش‌بندی که نتایجی نزدیک و قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی می‌دهد، به‌عنوان مش‌بندی بهینه و نهایی انتخاب شد. برای اعمال شرایط مرزی در مرز بالایی از شرط مرزی تقارن برای ورودی جریان از شرط مرزی دبی مشخص و برای مرز پایین‌دست نیز به‌منظور عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه حل از شرایط بیرون از شرط مرزی خروجی استفاده شده است برای دیواره‌ها و کف کانال شرط مرزی Wall تعریف شده که مانند یک دیوار مجازی بدون اصطکاک عمل می‌کند. در شکل ۵ و جدول ۱ شبکه‌بندی میدان محاسباتی و اعمال شرایط مرزی به مدل سرریز کنگره‌ای نشان داده شده است.

صورت بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial y_i} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z_i} (\rho w_i) = 0 \quad (7)$$

که در تعریف یک جریان تراکم‌ناپذیر به‌صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

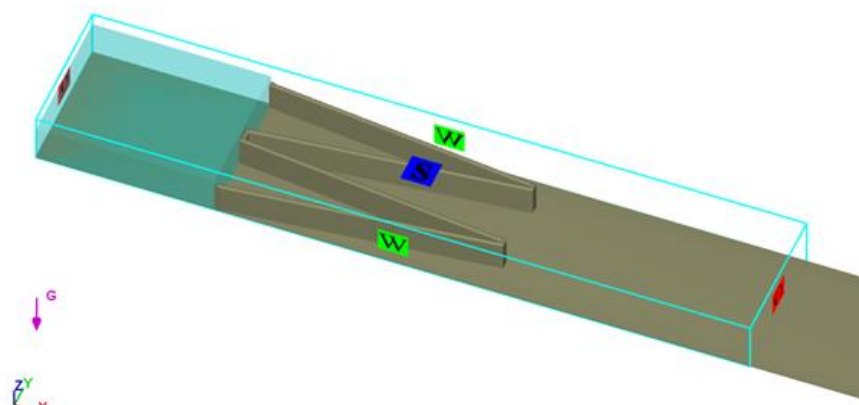
معادلات ناویراستوکس معادلات مومنتم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی ویسکوز است. این معادله در حالت کلی به حالت زیر بیان می‌شود:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + B_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (9)$$

در این معادله، u_i مؤلفه بردار سرعت در راستای فضایی i, μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، ρ دانسیته سیال و B_i نیروی حجمی در راستای i است. معمولاً ویسکوزیته دینامیکی سیال را از داخل مشتق خارج می‌کنند و در این بین خطایی قابل اغماضی به وجود می‌آید. برای یک جریان تراکم‌ناپذیر ($\vec{V} \cdot \vec{V} = 0$)، معادله بالا به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) = -\nabla p + B + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (10)$$

در این معادله $\vec{V}$ بردار سرعت، B نیروی حجمی، P بیانگر فشار و μ ویسکوزیته دینامیکی است. در این معادله $\left(\frac{D}{Dt} \right)$ بیانگر مشتق مادی بوده و به‌صورت $\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\phi \cdot \nabla)$ تعریف می‌شود. گفتنی است که $\frac{D}{Dt}$ و ∇^2 معادله برداری بوده و آنها را نمی‌توان برای مؤلفه‌های سرعت، جز در مختصات کارتزین استفاده کرد که در این مورد، مؤلفه x معادله ناویراستوکس به‌صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۵. شرایط اولیه معرفی شده به مدل سرریز (پژوهش حاضر)

جدول ۱. معرفی شرایط مرزی اعمال شده

نرم افزار	مرز بالادست	مرز پایین دست	مرز سطح آزاد	مرز کف سرریز	مرزهای کناری
Flow3D	Volume flow rate	Outflow	Symmetry	Wall	Wall

اعمال شرایط اولیه

شرایط اولیه در مدل سازی هیدرولیکی به مجموعه داده ها و اطلاعاتی اطلاق می شود که برای تعیین وضعیت سیستم در آغاز فرایند شبیه سازی به کار گرفته می شوند. این اطلاعات معمولاً شامل پارامترهایی نظیر توزیع فشار، دما یا حجم سیال در محیط مدل سازی هستند و می توانند از منابع مختلفی مانند داده های آزمایشگاهی، پژوهش های پیشین یا فرضیات پذیرفته شده در آن زمینه استخراج شوند. همچنین در مدل سازی سرریزها، شرایط اولیه می تواند شامل مقادیر خاصی از سیال (مانند آب) برای بالادست سرریز باشد. این مقادیر برای شبیه سازی جریان در بالادست سرریز و تحلیل دقیق رفتار سیستم ضروری هستند. برای وضوح بیشتر، مقادیر مشخص سیال آب در بالادست سرریز و همچنین شرایط اولیه در شکل ۵ به طور واضح نمایش داده شده اند.

یکی از روش های رایج برای پایش پایداری حل در مدل های عددی، بررسی همگرایی حل است در این بخش از پژوهش، هدف اصلی انتخاب بهینه مش بندی برای شبکه محاسباتی است تا تمامی مدل ها با تعداد مش های یکنواخت و

بهینه به دست آید. این اقدام به منظور دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد انجام شد. در این فرایند از شاخص های مختلفی که از روش های سعی و خطا به دست آمده بودند، استفاده شد. این شاخص ها شامل پارامترهایی مانند مش بهینه، توانایی مدل در تحلیل جریان های پیچیده و انطباق نتایج مدل عددی با داده های آزمایشگاهی بودند. فرایند بهینه سازی مش بندی به طور تکراری و با آزمایش و خطا انجام شد تا به نتیجه ای نزدیک به داده های تجربی دست یابد. در این پژوهش برای انتخاب مش بهینه، مش های مختلف با اندازه های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، و ۰/۰۴ متر به طور جامع بررسی شدند. هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر اندازه مش بر دقت شبیه سازی و پایداری جریان در شبیه سازی های عددی بود. برای این منظور، نتایج شبیه سازی برای هر یک از مش ها با داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند و دقت مدل عددی در شبیه سازی شرایط مختلف هیدرولیکی ارزیابی شد. در ابتدا، نتایج شبیه سازی ها برای اندازه های مختلف مش از نظر تطابق با داده های تجربی بررسی شد. سپس، پارامترهایی همچون دقت شبیه سازی و زمان محاسباتی در نظر گرفته شد. مش ۰/۰۱ متر نسبت به مش های

کالیبراسیون و ارائه نتایج

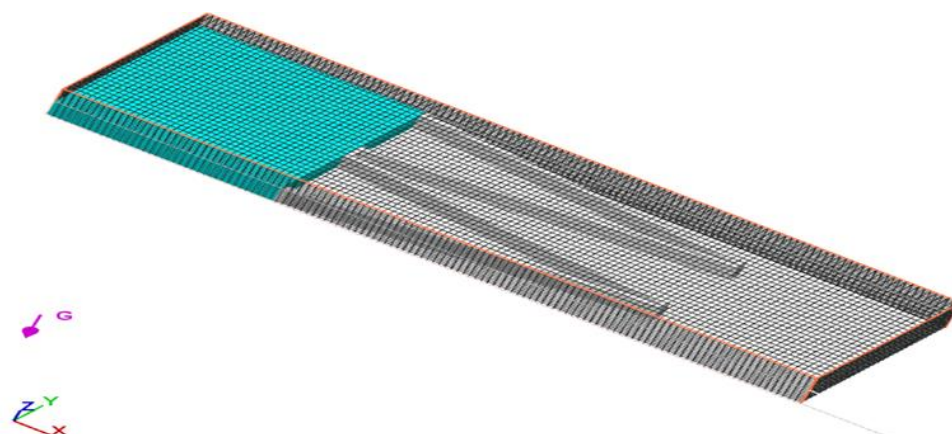
بکارگیری مدل‌های رایانه‌ای برای شبیه‌سازی جریان‌ها می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی تحولات آینده ایفا کند، مشروط بر اینکه نتایج مدل‌ها از دقت کافی برخوردار باشند. دقت شبیه‌سازی‌ها با مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی می‌شود و دسترسی به اطلاعات معتبر آزمایشگاهی اعتماد به مدل‌های عددی را افزایش می‌دهد. کالیبراسیون مدل‌های عددی، به‌ویژه از نظر شرایط مرزی و زمان شبیه‌سازی، ضروری است. در این پژوهش، نتایج ضریب دبی حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Flow3D با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهند که مقادیر به‌دست‌آمده از Flow3D با داده‌های آزمایشگاهی تقریباً یکسان هستند که نشان‌دهنده دقت زیاد این نرم‌افزار در شبیه‌سازی جریان‌ها است. در این پژوهش، هدف اصلی ارزیابی دقت و کارایی نرم‌افزار Flow3D در مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان سرریز کنگره‌ای با استفاده از ۱۶ دبی مختلف بوده است. با توجه به شکل ۸ که میزان خطای داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی Flow3D را نشان می‌دهد، دیده می‌شود که میزان خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج Flow3D قابل قبول است. این نتیجه نشان می‌دهد که روش حل عددی استفاده شده در Flow3D، با دقت و صحت زیاد قادر به تقلیل خطا و ارائه نتایجی نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی است. این تطابق بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی، نشان از دقت و قابلیت اعتماد زیاد روش حل عددی Flow3D در مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهای سیالاتی دارد. با این حال، بیشترین خطا مربوط به دبی ۰/۳ و کمترین خطا مربوط به دبی‌های ۰/۳۵، ۰/۰۸ و ۰/۶ دیده می‌شود. همچنین باید توجه داشت که برای دبی‌های مختلف، مقادیر خطا متفاوت است. به عبارت دیگر، هر دبی ورودی به‌صورت جداگانه خطای متفاوتی دارد. شکل ۹ نمودارهای پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل Flow3D نشان می‌دهند که عملکرد این مدل در مدل‌سازی پدیده حاضر که در آزمایشگاه مطالعه شده، بسیار مطلوب است.

۰/۰۲ و ۰/۰۳ متر عملکرد بهتری دارد. هرچند که با ریزتر شدن مش دقت نتایج بهبود می‌یابد، اما تفاوت نتایج مش ۰/۰۱ متر نسبت به مش ۰/۰۲ متر قابل توجه نبوده و زمان محاسباتی مش ۰/۰۱ متر نسبت به مش ۰/۰۲ متر بسیار بیشتر است. به همین دلیل، مش ۰/۰۲ متر به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد. بررسی‌ها نشان داد که مش ۰/۰۲ متر بهترین تعادل را بین دقت و کارایی محاسباتی دارد. با استفاده از مش ۰/۰۲ متر، نتایج شبیه‌سازی هم‌راستایی مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و همچنین در مقایسه با سایر مش‌ها، پایداری نتایج در این اندازه مش بیشتر بود. شکل ۶ توزیع یکنواخت مش‌ها با سایز ۰/۰۲ را نمایش می‌دهد.

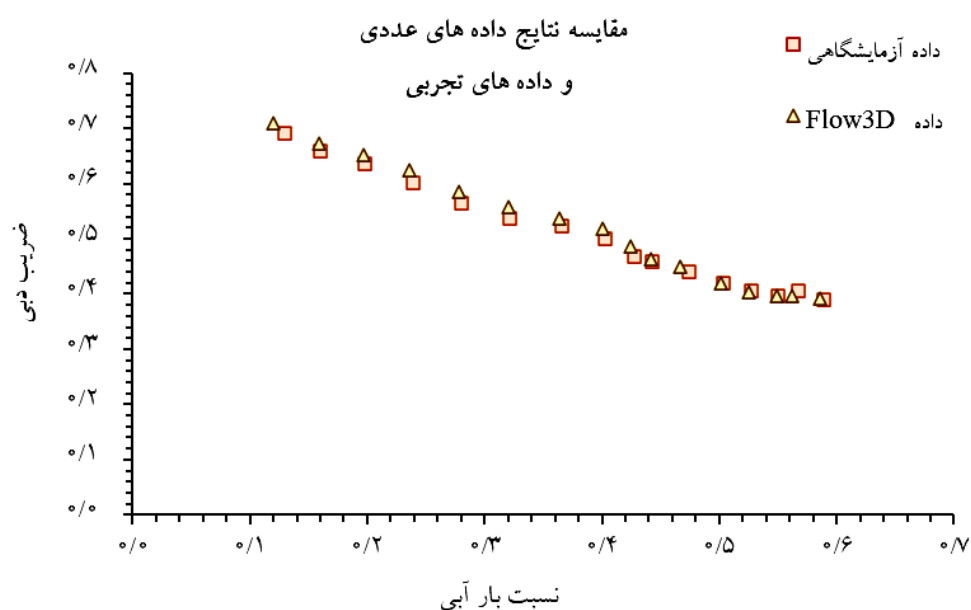
در این پژوهش بررسی میدان جریان با مدل‌های مختلف آشفتگی موجود در نرم‌افزار Flow3D و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. درصد خطای نسبی مدل RNG نسبت به مدل‌های دیگر کمتر و نزدیک به صفر است؛ بنابراین در همه شبیه‌سازی‌های عددی از مدل آشفتگی RNG استفاده شد (۲۳).

نتایج و بحث

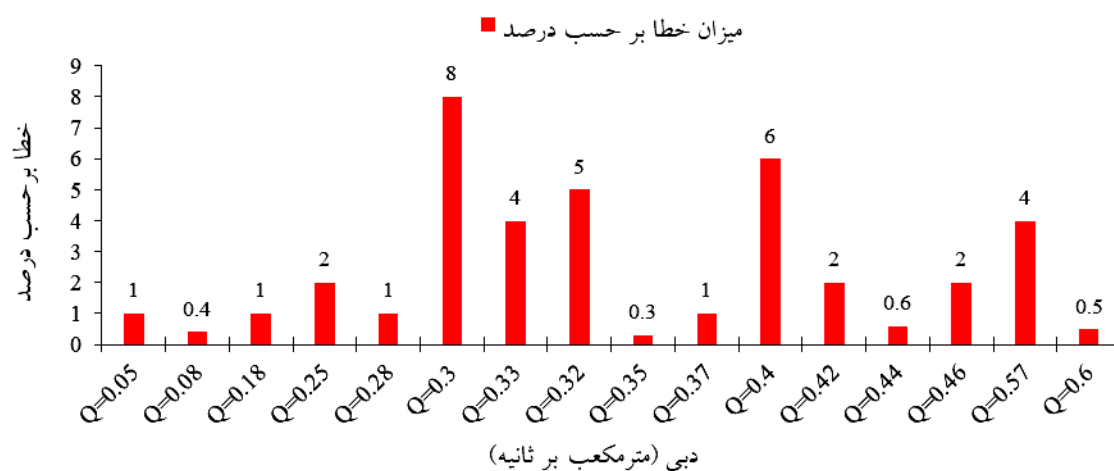
پژوهش حاضر به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از نرم‌افزار Flow3D پرداخته است. این تطابق از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا مدل‌سازی عددی به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها در شرایط مختلف، نقش مهمی در طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها ایفا می‌کند. هدف اصلی پژوهش، اعتبارسنجی مدل‌های عددی و بررسی دقت آن‌ها در شرایط واقعی بوده است. ابتدا شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار Flow3D انجام و ضرایب دبی مشابه با نتایج آزمایشگاهی محاسبه شد (۴). نتایج این دو روش مقایسه و میزان تطابق یا تفاوت‌ها بررسی شد. این پژوهش نه تنها به ارزیابی دقت مدل‌های عددی کمک می‌کند، بلکه به درک بهتر رفتار جریان و بهینه‌سازی سیستم‌های مهندسی و صنعتی نیز مفید است.



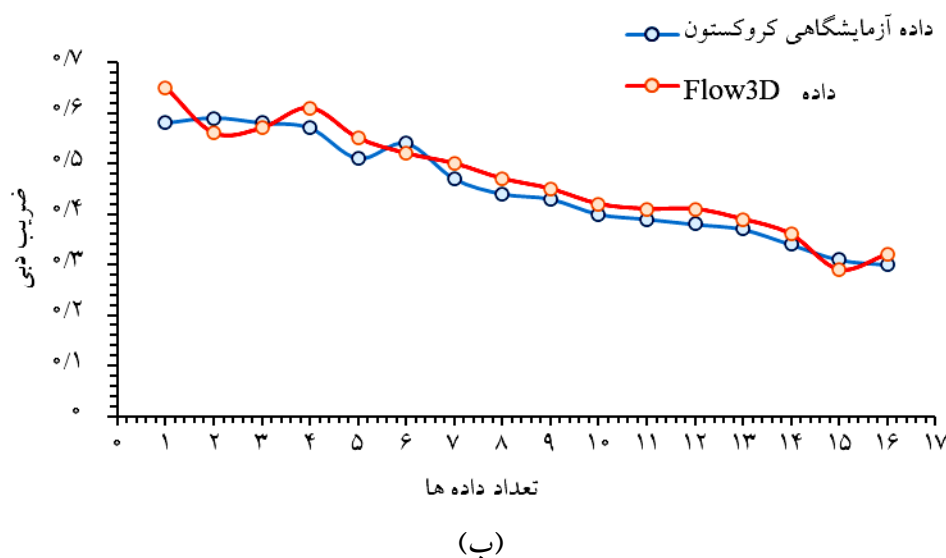
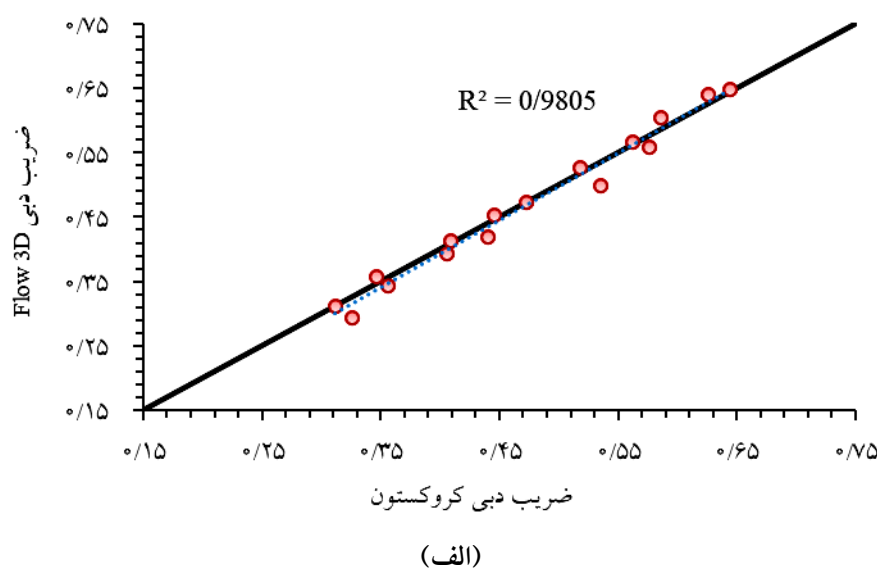
شکل ۶. نمای کلی از مش‌بندی مدل سرریز کنگره‌ای پژوهش حاضر



شکل ۷. مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی



شکل ۸. مقادیر خطای حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی برای دبی های متفاوت پژوهش حاضر

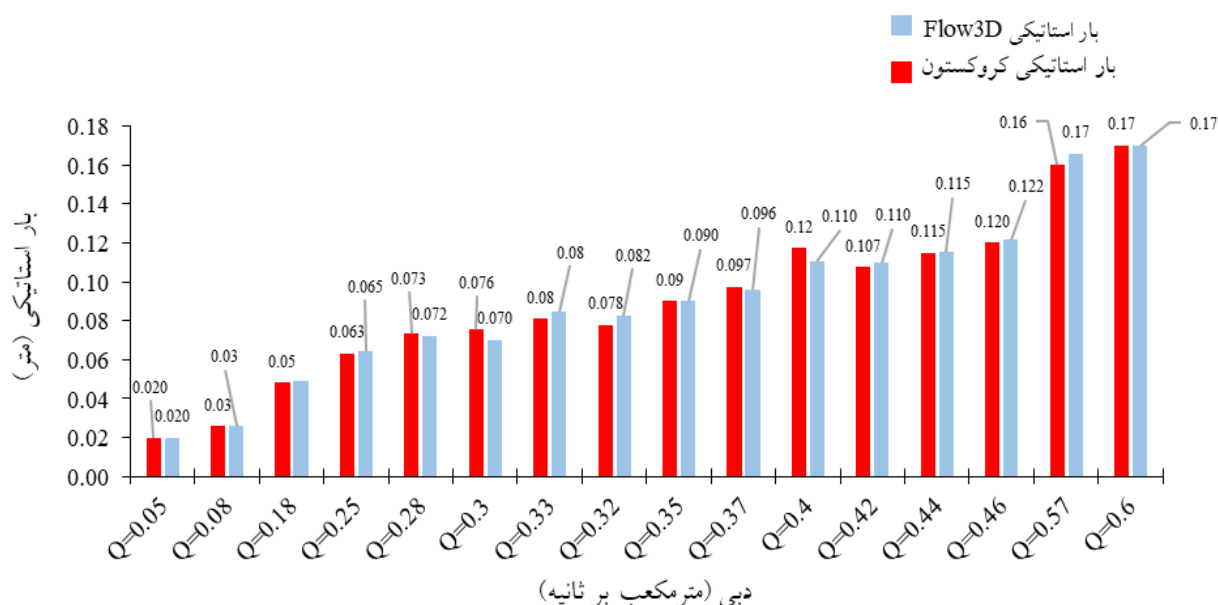


شکل ۹. مقایسه نتایج داده‌های آزمایشگاهی و نتایج Flow3D، الف): نمودار پراکنش ب): نمودار داده‌های آزمایشگاهی

تقریباً ۴-۳٪ درصد از خود نشان می‌دهد و در موارد خاص با خطای تقریباً ۸-۶ درصد رسیده است که این نشان‌دهنده دقت زیاد Flow3D است. این خطای به نسبت کم میان داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل Flow3D، نقش بسیار مهمی در افزایش اعتماد به دقت و قابلیت اعتماد این مدل در کاربردهای عملی و صنعتی دارد.

با استفاده از شکل ۱۰ که نتایج مقایسه H_d از دو روش مختلف (نرم‌افزار Flow3D و داده‌های آزمایشگاهی) را نشان می‌دهد،

این مطابقت با نمودارهای پراکنش می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از صحت و قابلیت اعتماد Flow3D شناخته شود. ضریب تعیین (R^2) که معیاری برای اندازه‌گیری تطابق میان داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل است، با مقدار نزدیک به ۰/۹۸۰۵، به وضوح نشان دهنده توانایی زیاد مدل در توصیف و پیش‌بینی دقیق پدیده مورد مطالعه است. با تحلیل نمودارهای پراکنش، دیده می‌شود که نقاط به دست آمده از مدل Flow3D به طور کلی با نقاط آزمایشگاهی در بیشتر دبی‌ها نتایج بسیار خوبی با خطای

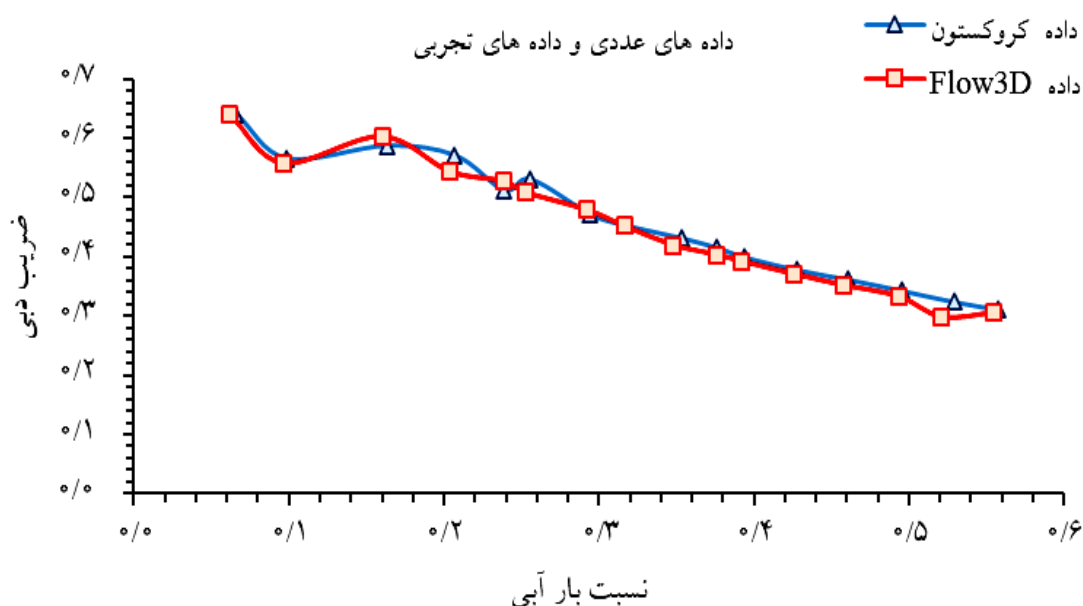


شکل ۱۰. نمودار ستونی H_d داده‌های آزمایشگاهی و Flow3D

نسبت بار آبی را برای دو مجموعه داده (داده‌های آزمایشگاهی کروکستون و داده‌های خروجی از نرم‌افزار Flow3D) می‌دهد. این نمودار با توجه به تطابق به نسبت خوب بین دو مجموعه داده، نشان می‌دهد که داده‌هایی که توسط نرم‌افزار Flow3D به دست آمده‌اند، با داده‌های آزمایشگاهی به نسبت خوب مطابقت دارند. توجه به این تطابق نشان می‌دهد که نرم‌افزار Flow3D قادر به تولید نتایج دقیق و قابل اعتماد در مورد رفتار ضریب دبی و نسبت بار آبی است؛ زیرا این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی سازگاری دارند. با افزایش دبی، تلاطم سطح آب افزایش پیدا کرده و در نتیجه دقت تا حدودی کاهش پیدا می‌کند که دقت مربوطه تا حدی قابل قبول است (۷-۴ درصد). در دبی‌های کم به خاطر خاصیت چسبندگی (موینگی) جریان به بدنه سرریز تا حدودی خطا به دست می‌آید. این نتایج می‌توانند به مهندسان و پژوهشگران کمک کنند تا به اطمینان بیشتری از دقت و صحت نتایجی که از این نرم‌افزار به دست می‌آید، دست یابند و از آن در فرایند تصمیم‌گیری‌های مرتبط با پروژه‌های هیدرولیکی و سازه‌های آبی استفاده کنند.

می‌توان به این نتیجه رسید که دقت قابل قبولی در تحلیل و شبیه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای توسط نرم‌افزار Flow3D به دست آمده است. این امر نشان‌دهنده توانایی مدل‌سازی و شبیه‌سازی موجود در این نرم‌افزار است که می‌تواند به خوبی و با دقت به نسبت زیاد، رفتارهای پیچیده‌ای که در این نوع سازه‌ها رخ می‌دهد را توصیف کند. تطابق مقادیر H_d بین دو روش مختلف، مؤید این است که نرم‌افزار Flow3D به عنوان ابزاری معتبر و قابل اعتماد برای مهندسان و پژوهشگرانی که در زمینه‌ی هیدرولیک و سازه‌های آبی فعالیت می‌کنند، قابل استفاده است. این تطابق می‌تواند به این دسته از افراد کمک کند تا با اطمینان بیشتری به نتایج شبیه‌سازی‌های خود اعتماد کرده و از آن‌ها در فرایند تصمیم‌گیری‌های مهم بهره‌برداری کنند. تطابق نتایج محاسباتی بین Flow3D و کروکستون نشان‌دهنده این است که این نرم‌افزار با استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های مختلف، قادر به ارائه نتایج معتبر و دقیقی در مورد رفتار سیالات و جریان سیالات در سامانه‌های مختلف است.

شکل ۱۱ نشان‌دهنده نمودار مربوط به ضریب دبی و



شکل ۱۱. نمودار مربوط به ضریب دبی کروکستون و Flow3D نسبت به بار آبی

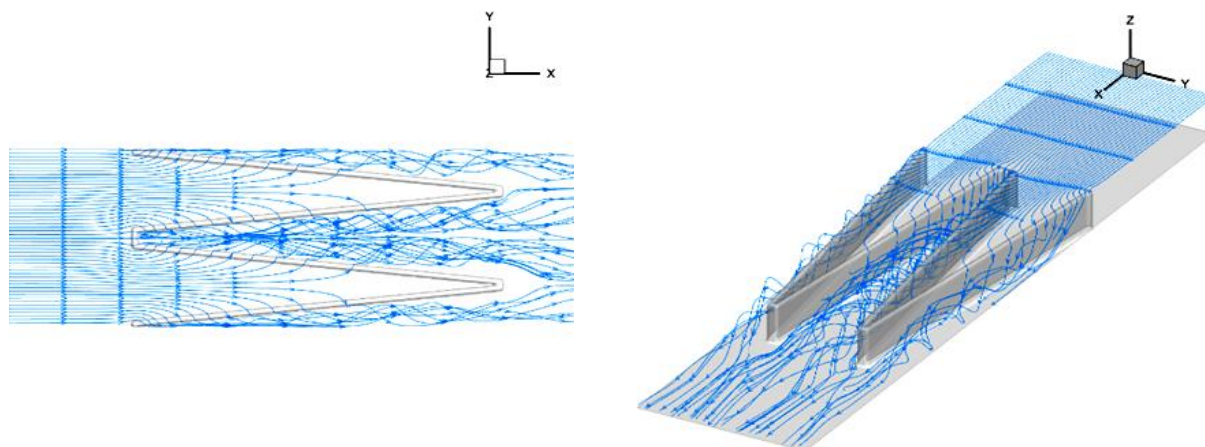
بررسی و تحلیل جریان

در سیستم‌های هیدرولیکی، رفتار خطوط جریان تحت تأثیر عواملی مانند دبی آب، ویسکوزیته، چسبندگی و شرایط محیطی قرار دارد. با افزایش دبی آب، میزان جریان وارد شده به سیستم بیشتر می‌شود که منجر به افزایش سرعت و تغییر در خطوط جریان می‌شود. این تغییرات زمانی که خطوط جریان با دیواره‌های سرریز کنگره‌ای برخورد می‌کنند، باعث تقسیم جریان به دو سمت دهانه‌های ورودی و دهانه‌های خروجی می‌شود. در دبی‌های مختلف (۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۳۷ و ۰/۴۴) که در شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، با نزدیک شدن جریان نزدیک شونده به سرریز، جریان دو قسمت می‌شود و جریان به دهانه‌های ورودی و خروجی وارد می‌شود. در دبی‌های کمتر، زاویه جریان نزدیک شونده با دیواره سرریز به حالت عمودی نزدیک‌تر است و به همین دلیل است که در دبی‌های کم، ضریب دبی بیشتر است. در دبی‌های بیشتر، جریان آب با سرعت بیشتری به داخل سیکل‌ها پیش می‌رود و زاویه جریان با دیواره سرریز کمتر شده و ضریب دبی کاهش می‌یابد (در حالت نزدیک به

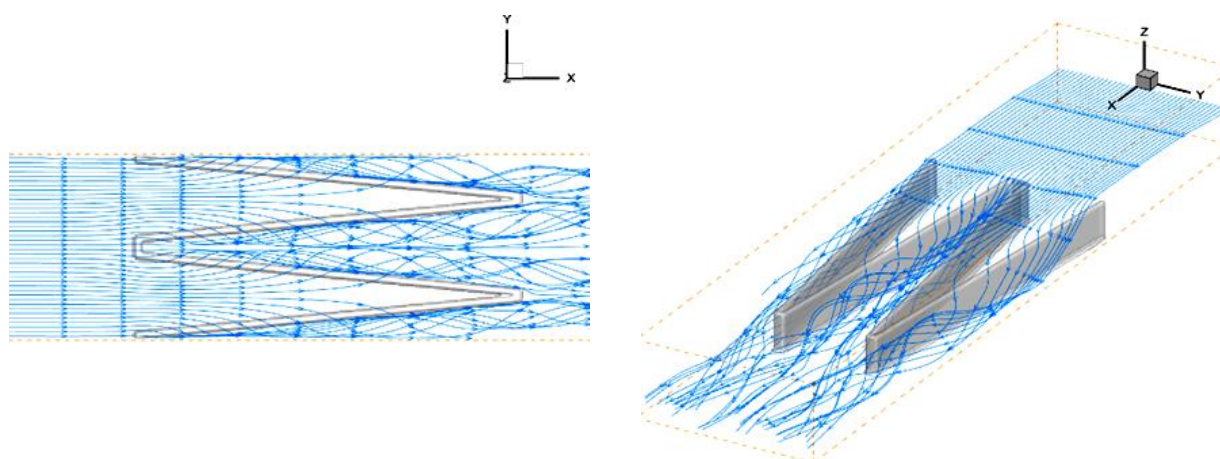
۹۰ درجه، این سرریزها شبیه سرریزهای خطی عمل کرده و ضریب دبی بیشتر می‌شود). همچنین با افزایش دبی، استغراق موضعی در دهانه‌های خروجی بیشتر شده و باعث کاهش ضریب دبی می‌شود.

نتیجه‌گیری

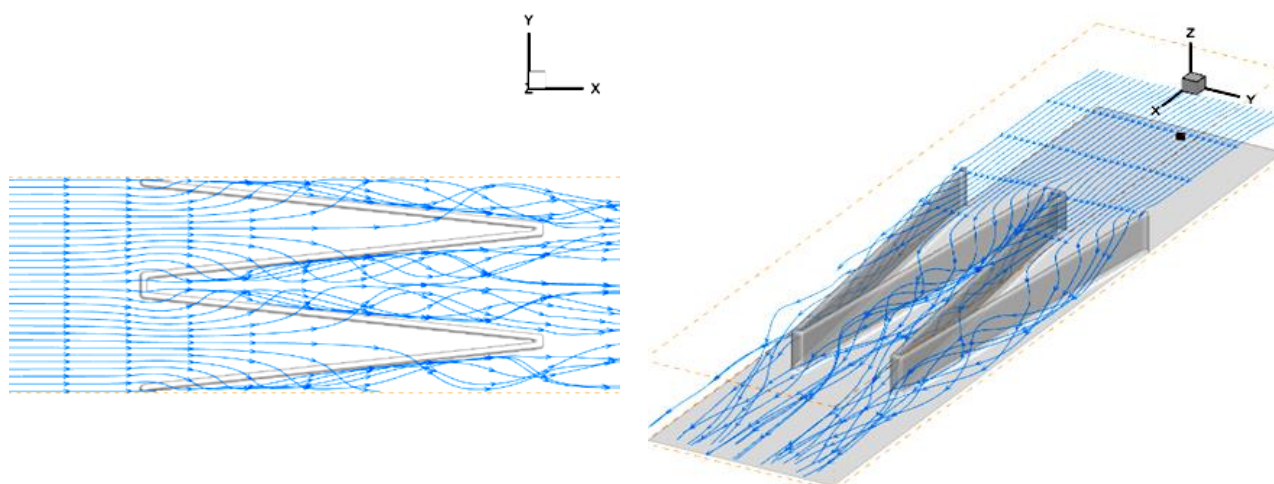
در این پژوهش، عملکرد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و جریان‌ات عبوری از آن‌ها بررسی شد. از آنجاکه انجام آزمایش‌های فیزیکی معمولاً هزینه‌بر و زمان‌بر است، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر استفاده شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که نرم‌افزار Flow3D قادر به شبیه‌سازی جریان‌های عبوری از سرریزها با دقت مناسبی است و ویژگی‌های جریان سیالاتی را به خوبی مدل‌سازی می‌کند. علاوه بر این، مقادیر H_d و C_d به ترتیب نمایانگر بار هیدرواستاتیکی و ضریب دبی سرریز در شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار Flow3D است که با داده‌های آزمایشگاهی کروکستون (۲۰۱۰) مطابقت بسیار



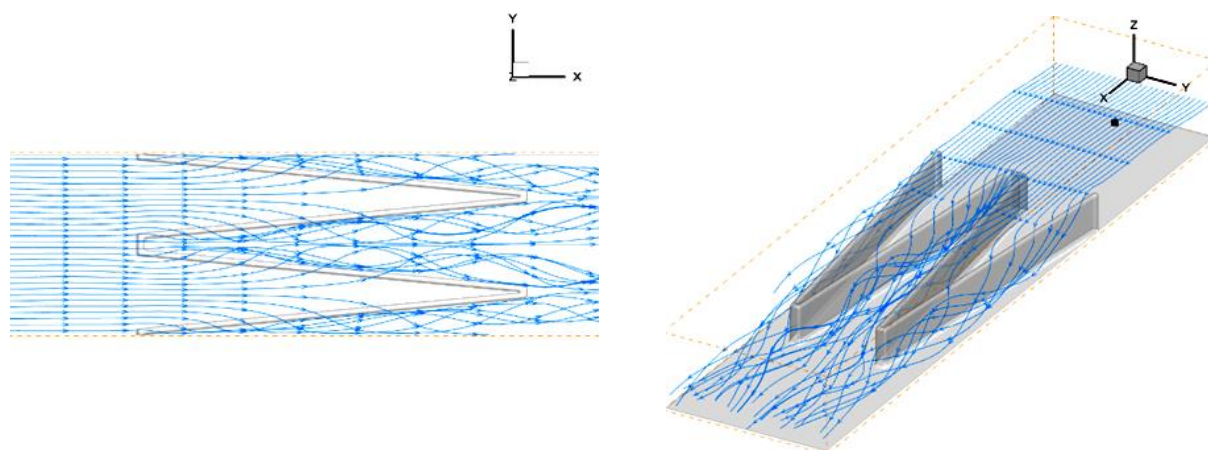
شکل ۱۲. خطوط جریان مربوط به دبی ۰/۰۵



شکل ۱۳. خطوط جریان مربوط به دبی ۰/۲۵



شکل ۱۴. خطوط جریان مربوط به دبی ۰/۳۷



شکل ۱۵. خطوط جریان مربوط به دبی ۰/۴۴

و طراحی سیستم‌های مختلفی همچون سامانه‌های آبیاری، انتقال سیالات و پدیده‌های دینامیک سیالاتی، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و علمی‌تر منجر شود.

خوبی نشان می‌دهد. این تطابق با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، DC و RMSE ارزیابی شد که به ترتیب مقادیر ۰/۹۸۰۵، ۰/۹۷۲۵ و ۰/۰۱۴۲ به دست آمدند و دقت زیاد این روش محاسباتی را تأیید می‌کنند. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان Flow3D در تحلیل

منابع مورد استفاده

1. Azhdari Moghadam, M. and E. Jafari Nadoushan. 2013. Hydraulic Design of a Trapezoidal Labyrinth Spillway Using Computational Hydrodynamics. *Modares Civil Engineering Journal* 13(3):123-123.
2. Abbasi, S., A. Safarzadeh and F. Masoumi. 2017. Analytical Study of Parameters Affecting the Hydraulic Performance of Congruent Spillways. 16th Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.
3. Crookston, B.M. 2010. Labyrinth weirs. Ph.D. thesis, Utah State University, Logan, UT.
4. Crookstone, B.M. and B.P. Tullis. 2013. Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(5): 363-370.
5. Crookston, B. and B. Tullis. 2012. Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(6): 555-562.
6. Christensen, N.A. and B.P. Tullis. 2012. Arced Labyrinth Weir Flow Characteristics. 4th International Junior Reasercher and Enginner Workshop on Hydraulic Structures. Utah State University, Logan.
7. Carrillo, J. M., J. Matos and R. Lopes. 2020. Numerical modeling of free and submerged labyrinth weir flow for a large sidewall angle. *Environmental Fluid Mechanics* 20(2): 357-374.
8. Darvas, L.A. 1971. Performance and Design of Labyrinth Weir. *Journal of the Hydraulics Division* 97(8): 1246-1251.
9. Gentilini, B. 1949. Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. Società Editrice Riviste Industrie Elettriche, Milan.
10. Ghodsian, M. 2007. Stage-Discharge Relationship for a triangular Labyrinth Spillway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 162(3): 173-178.
11. Gholizadeh, A., M. ghodsian and R. Panahi. 2016. Numerical study of effect of Crest shape on Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weir. *Modares Civil Engineering Journal* 16(4): 225-238.
12. Hay, S., G. Taylor. 1970. Performance of Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 96(11): 2337-2357.
13. Haghiabi, A. H., B. Abbaspour, A. Maleki and H. Torabi Pudeh. 2016. Numerical Simulation of Flow Pattern on the Triangular Plan Form Weirs and Comparing to Linear weir Techniques Using Flow-3D. *Journal of Water Resources Engineering* 9(29): 125-137.

14. Jami-Far, F., E. Takavandi, M. Faghfor-Moghaddam and K. Bina. 2017. Investigation of Water Surface Profiles in Congested Spillways. Proceedings of the 12th Symposium on Advances in Science and Technology, Commission IV: Sustainable Land - New Findings in Civil Engineering and Environmental Studies, Khavaran Higher Education Institute, Mashhad.
15. Lux, F. 1995. Design Methodologies for Labyrinth Weirs. Water Power and Dam Construction Conference, Vienna, Austria.
16. Henderson, F.M. 1966. open channel flow. Macmillan, New York.
17. Monjezi, R., M. Heidarnejad, A. Masjedi, M. H. Purmohammadi and A. Kamanbedast. 2018. Laboratory Investigation of the Discharge coefficient of Flow in arced labyrinth Weirs with triangular Plans, *Flow Measurement and Instrumentation* 64: 64-70.
18. Majedi Asl, M., T. Omidpour Alavian and V. Shamsi. 2023. Comparison of Hydraulic Efficiency of Arched Non-linear Weirs in Plan Using GEP and SVM Neural Networks. *Journal of Water and Soil Science* 27(3): 179-199.
19. Majedi Asl, M., T. Omidpour Alavian and M. Kouhdaragh. 2023. Comparison of The Hydraulic Efficiency of labyrinth Weirs with a Quarter and Semi-Circular Crest Shape Using Neural Networks (QNET, SVM, GEP, ANN). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 17(4): 787-804.
20. Majedi Asl, M., T. Omidpour Alavian and M. Kouhdaragh. 2023. Laboratory Investigation of the Effect of Wall Slope on the Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weirs. *Journal of Water and Soil Science* 27(4): 281-297.
21. Majedi Asl, M., A. Ghaderi, M. Kouhdaragh, T. Omidpour Alavian. 2024. A performance comparison of the Meta model methods for discharge coefficient prediction of labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 96: 102563
22. Majedi Asl, M., T. Omidpour Alavian, Y. Seyfari and M. Kouhdaragh. 2024. Modeling of discharge Coefficient of nonlinear weirs with QNET and SVM methods. *Journal of Hydraulic Structures* 10(2):30-45. DOI: 10.22055/jhs.2024.19040.
23. Mirzaei, M., E. Asadi, A. Abbaspour. 2021. Numerical study of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weir by changing the angle using Flow3D model. *Iranian Journal of Water Research* 15(3): 61-69.
24. Nikpiek, P. and S. M. Kashefipour, 2014. Effect of the hydraulic conditions and structure geometry on mathematical modelling of discharge coefficient for duckbill and oblique weirs. *Journal of Irrigation Science and Engineering* 39(1): 1-10 (in Farsi).
25. Omidpour Alavian, T., M. Majedi Asl, M. Soltani, E. Mohammadi and V. Shamsi. 2022. Comparative Assessment of the Hydraulic Efficiency of Labyrinth Weirs with Quarter-Circular and Semi-Circular Crest Shapes Using a Meta-Modeling Approach (ANN). 8th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development, Tehran.
26. Omidpour Alavian, T., M. Majedi Asl, M. Soltani and V. Shamsi. 2022. Comparative Evaluation of the Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs with Quarter-Circular and Semi-Circular Crest Shapes Using Meta-Modeling Methods (QNET)." 8th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development, Tehran.
27. Omidpour Alavian, T., M. Majedi Asl, Y. Seyfari and R. Abbaspour. 2023. Modeling the Discharge Coefficient of Nonlinear Weirs Using the QNET Method. 22nd Iranian Hydraulic Conference, Maragheh University, Maragheh, Iran.
28. Rezaee, M., A. Emadi and Q. Aqajani Mazandarani. 2016. Experimental Study of Rectangular Labyrinth Weir. *Journal of Water and Soil* 29(6): 1438-1446 (in Farsi).
29. Seo, I.W., K.Y. Do, Y.S. Park and C.G. Song. 2016. Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings. *Environmental Earth Science* 75(6): 496-509.
30. Taylor G. 1968. The performance of Labyrinth weir, Ph.D. thesis, university of Nottingham, Nottingham, England.
31. Tullis, B.P., N. Amanian, N. Waldron. 1995. Approach to Improve the Discharging Capacity of Design of Labyrinth Spillways. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 121(3): 247-55.
32. Zamiri, E., H. Karami and S. Farzin. 2020. Studying the effect of shape changes in plan of labyrinth weir on increasing flow discharge coefficient using Flow-3D numerical model. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 43 (1): 101-116.