

بررسی کارایی هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با استفاده از روش عددی Flow3D

رسول دانشفراز^۱، مهدی ماجدی اصل^{۲*}، توحید امیدپور علویان^۳

۱- استاد تمام دانشگاه مراغه - گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران daneshfaraz@maragheh.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه مراغه - گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران mehdi.majedi@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی - دانشگاه مراغه، مراغه، ایران tohidomidpour1377@gmail.com

*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 بلند مدت برای طراحی سیلاب از اهمیت بالایی برخوردار است، اما در برخی موارد افزایش ظرفیت سرریز از طریق افزایش عرض آن به دلیل محدودیت‌های توپوگرافی غیرممکن می‌باشد. 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 تحقیق، عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با استفاده از مدل عددی Flow3D و داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که انجام مطالعات 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 $RMSE$, DC , R^2 به ترتیب برابر است با (۰/۹۸۰۵، ۰/۹۷۲۵ و ۰/۰۱۴۲) که قادر است جریان عبوری از سرریزها را با دقت بالا 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 بالای مدل عددی است. علاوه بر این، در مقایسه با دبی‌های مختلف به طور مثال خطای نسبی محاسباتی مشاهده شده برای دبی‌های ۰/۳۵، ۰/۶ و ۰/۴۴ (مترمکعب بر ثانیه) تقریباً ۰/۵ درصد محاسبه شده است، در حالی که برای دبی‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵۷ به ترتیب خطاهایی معادل ۶، ۸ و ۴ درصد مشاهده گردید. نتایج نشان می‌دهد که این ابزارها می‌توانند در تحلیل‌های هیدرولیکی دقیق و بهینه‌سازی طراحی سرریزها، سیستم‌های آبیاری و پدیده‌های دینامیک سیالاتی به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند.

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

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 مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سرریزها جهت 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، تحقیقات 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، دوزنقه‌ای، 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 آنها است. 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 نسبتاً 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 به ویژه زمانی که ارتفاع جریان محدود شده باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. 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 مطالعات ابتکاری توسط جنتیلینی مورد بررسی قرار گرفتند (۹). این تحقیقات پس از آن به وسیله‌ی تحقیقاتی گسترده‌تر توسط پژوهشگرانی همچون تیلور (۳۰) و هی و تیلور (۱۲) ادامه یافت. در یکی از مطالعات اولیه، هی و تیلور (۱۲) نشان داد که سرریزهای کنگره‌ای با شکل‌های مختلف از جمله مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی با تاج لبه‌ی 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 محققان بیشتر به مطالعه و تحلیل سرریزهای کنگره‌ای پرداخته و در نتیجه، هی و تیلور (۱۲) به عنوان اولین افرادی که مطالعات جامع‌تری را بر 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 تحقیقات خود بر اساس مدل‌های فیزیکی سدها و رونوا و آون پرداخت و مدل‌هایی را برای طراحی سرریزهای دوزنقه‌ای ارائه کرد. او همچنین یک دسته منحنی برای طراحی سرریزهای دوزنقه‌ای شکل با تاج ربع دایره‌ای و یک رابطه تجربی ارائه نمود. لاکس (۱۵) بار آبی کل را به جای بار پیرومتری مورد استفاده قرار داده و فرمول‌های تجربی وی برای سرریزهای چند وجهی نشان داد که راندمان سرریزهای چند وجهی در مقادیر بالای بار آبی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقادیری است که مطالعات دیگر نشان می‌دهد. تویس و همکاران (۳۱) نشان داد که ظرفیت سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای 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 تحقیقات منجر به ارائه نمودارهای

نشریه علوم آب و خاک

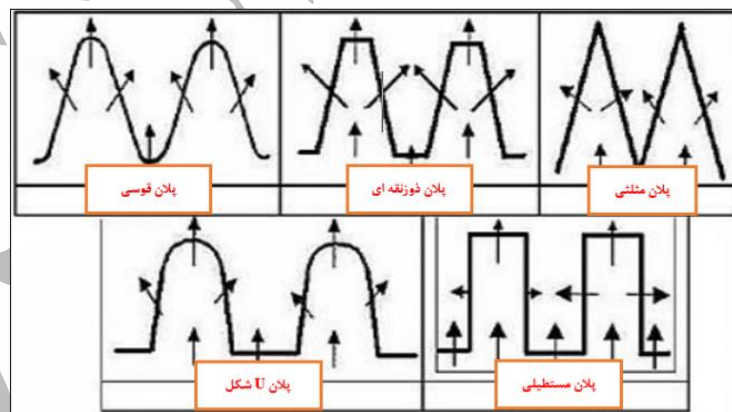
جدید برای بررسی تأثیر این پارامترها بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای شد که نشان داد راندمان گذردهی این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای خطی به ازای بار بالادست یکسان، سه تا چهار برابر افزایش می‌یابد. قدسیان (۱۰) مطالعات آزمایشگاهی را بر روی سرریز کنگره‌ای مثلی با شکل‌های مختلف تاج انجام دادند. ابتدا با آنالیز ابعادی، پارامترهای مربوطه را به صورت بی بعد استخراج کردند و سپس با داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای منظم و منسجم برای ضریب دبی و هد-دبی 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 موثر در عملکرد هیدرولیکی آن‌ها هستند. کروکستون و تولیس (۵) سرریزهای قوسی کنگره‌ای با زوایای دیواره سیکل مختلف (α) و زوایای سیکل قوسی مختلف (\square) 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، پایدارسازی تیغی آبی روی سرریز را بررسی کردند و با برش قسمت‌هایی از دیواره و دماغه سرریز و همچنین با ایجاد زائده‌هایی بر روی دیواره‌ها و دماغه سرریز به بهبود عوامل مذکور اقدام نمودند. نتایج پژوهش تجربی انجام شده توسط سئو و همکاران (۲۹) نشان داد که دبی عبوری در سرریز کنگره‌ای حدود ۷۰٪ بیشتر از دبی عبوری از روی سرریز لبه تیز 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 $(\frac{h_d}{h_p})$ است. کریستنسن (۶) ضمن بررسی میدان جریان ورودی به سرریزهای کنگره‌ای، تأثیر تعداد سیکل‌ها بر روی عملکرد این نوع سرریزها را مورد تحقیق قرار داد 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 تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که شاخص‌های ارزیابی الگوریتم‌های GEP و SVM در این تحقیق، 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 تحقیق با دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌های ارزیابی برای روش‌های ANN، SVM، QNET و GEP نسبت به سایر تحقیقات، 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 این تحقیق 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 این تحقیق 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

نشریه علوم آب و خاک

با پارامترهای بی بعد پرداختند. نیک‌پیک و کاشفی‌پور (۲۴) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و مایل و سرریز مستطیلی را مورد مقایسه قرار دادند. 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 گردید که با ضریب همبستگی بالا 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 مورد بررسی قرار دادند. حقی‌آبی و همکاران (۱۳)، با استفاده از مدل Flow3D الگوی جریان بر 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 نیم رخ طولی و اختلاف ارتفاع عرضی جریان در نیم رخ 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، ذوزنقه‌ای و منحنی شکل پرداختند و مشاهده کردند که مقدار هد در سرریز با پلان منحنی شکل کمترین مقدار را نسبت به دو سرریز ذوزنقه‌ای و مثلی هم طول خود در یک دبی ثابت دارد. عباسی و همکاران (۲)، هیدرولیک سرریزهای کنگره‌ای و همچنین پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای در دو بخش پارامترهای هندسی و پارامترهای هیدرولیکی بطور جامع مورد بررسی قرار دادند. منجزی و همکاران (۱۷)، به بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه جریان در سرریزهای انحنادار کنگره‌ای با مقطع مثلی پرداختند که نتایج نشان داد که سرریز مذکور، 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 تاثیر 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 بالایی در تحلیل و طراحی سیستم‌های مختلف مهندسی برخوردار می‌باشند، زیرا به مهندسان این امکان را می‌دهند تا با دقت بیشتری به برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی فرآیندها و ساختارهای مختلف بپردازند. همچنین، تطابق نتایج بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی می‌تواند به بهبود روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی کمک نماید و دقت و صحت بیشتری در نتایج مدل‌سازی حاصل گردد. 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 فرآیندهای 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 فرآیندهای مختلف مهندسی استفاده شده و به بهبود عملکرد و کارایی سامانه‌ها کمک نمایند. در این تحقیق، هدف اصلی بررسی ضریب دبی (Cd) و دقت مربوطه در سرریز کنگره‌ای با استفاده از نرم‌افزار Flow3D تعیین گردیده است. برای اعتبارسنجی، شبیه‌سازی و تنظیم پارامترهای نرم‌افزار Flow3D با استفاده 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 بالای آن با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان سیالات، مانند Flow3D، صورت گرفت. این فرمت به منظور انتقال دقیق اطلاعات هندسی مدل به نرم‌افزار شبیه‌سازی سه‌بعدی انتخاب گردید. سپس فایل STL وارد نرم‌افزار Flow3D شد که از تکنولوژی‌های عددی پیشرفته برای حل معادلات ناویر-استوکس 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 تحقیق 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 آزمایشگاهی کروکستون انجام گردید در شکل ۱، نمایی از پلان انواع سرریزهای کنگره‌ای نمایش داده شده است. تصویری از فلوم آزمایشگاهی تحقیق 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 نمایند.



شکل ۱. پلان انواع سرریزهای کنگره‌ای (۵)

تاسیسات فلوم مستطیلی

فلوم آزمایشگاهی مستطیلی با ابعاد $1/2$ متر عرض، $14/6$ متر طول و 1 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 (Sbed) برابر صفر در نظر گرفته شد. در بالادست فلوم، یک رمپ با شیب 7 درجه نصب شده تا انتقال صاف و بدون وقفه‌ای میان کف فلوم و سکوی آزمایش فراهم گردد. همچنین، دو خط تأمین آب به یک هدباکس فولادی متصل هستند که داخل آن صفحات مشبک

نشریه علوم آب و خاک

تلاطم گیر جریان نصب شده‌اند تا جریان آب را آرام کرده و شرایط یکنواختی برای ورود به فلوم فراهم کند.



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

معادله یک بعدی جریان بر 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 رابطه (۱) به دست می‌آید هندرسون (۱۶). پارامترهای موثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای را می‌توان به صورت رابطه تابعی (۲) نوشت.

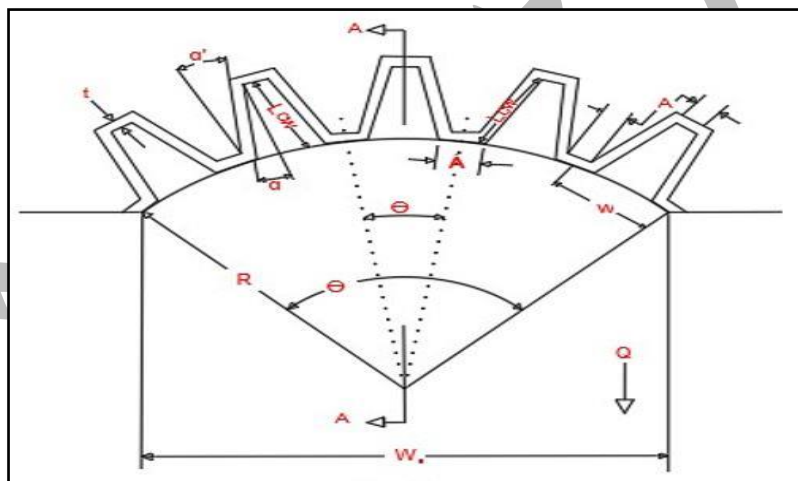
$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_T^{\frac{3}{2}} \quad (۱)$$

$$C_d = f(B, L, H_T, H_d, P, R, CR, Na, N) \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، (B) عرض کانالی که سرریز در آن نصب می‌گردد، (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 انحنا سیکل‌های نیم‌دایره‌ای، (CR) پارامتر معرف شکل تاج سرریز که می‌تواند بصورت 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 بصورت ریزش آزاد، ریزش تداخلی، هواده‌ی شده، هواده‌ی ناقص یا مستغرق باشد و (N) تعداد سیکل‌ها می‌باشد. در شکل (۳) نمونه از سرریز کنگره‌ای نشان داده شده است. پارامترهای موجود در شکل ۴ عبارت است 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، (α') زاویه دیواره جانبی بالادست، ($\alpha' = \left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right)$)، (N) تعداد سیکل، (A) عرض دماغه داخلی، (L_c) طول خط مرکزی دیواره جانبی، (tw) ضخامت دیواره سرریز کنگره‌ای در تاج و (θ) زاویه‌ی سیکل قوسی می‌باشد.



شکل ۳. نمونه از سرریز کنگره‌ای



شکل ۴. پارامترهای سرریز کنگره‌ای (۵)

در این تحقیق، پارامترهای مربوطه شامل ضریب دبی (Cd)، نسبت بار آبی ($\frac{H_T}{p}$) و زاویه‌ی دیواره (α) مورد بررسی قرار گرفته است. برای مقایسه ضریب دبی جریان از داده‌های آزمایشگاهی کروکستون (۳) استفاده شد و این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Flow3D مورد تحلیل و به منظور حصول اطمینان از درستی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و کفایت دقت حاصل با به کارگیری از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطاها (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 رابطه‌ی ۳، ۴، ۵ و ۶ مورد استفاده قرار گرفت.

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

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

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - (C_d)_p)^2}{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - (\bar{C}_d)_m)^2} \quad (5)$$

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

در رابطه‌ی ۳، ۴ و ۵ پارامترهای \bar{x}_p و \bar{x}_o به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای \bar{x}_p و \bar{x}_o و N به ترتیب میزان میانگین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای و تعداد داده‌ها هستند. مقدار R^2 و DC هر چه به یک نزدیک‌تر و مقدار $RMSE$ برای یک مدل هر چه کوچک‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد نتایج مطلوب‌تر آن می‌باشد. در رابطه (۶)، داده‌های شبیه‌سازی شده به مقادیر حاصل از مدل یا شبیه‌سازی عددی اشاره دارند، در حالی که داده‌های آزمایشگاهی به عنوان مرجع واقعی و دقیق در نظر گرفته می‌شوند. در این فرمول، ابتدا تفاوت مطلق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شده و سپس این تفاوت بر داده‌های آزمایشگاهی تقسیم می‌شود تا میزان انحراف نسبی مشخص گردد. در نهایت، حاصل ضرب در ۱۰۰، این تفاوت را به صورت درصد نشان داده و میزان انحراف شبیه‌سازی از داده‌های آزمایشگاهی را نمایان می‌سازد.

مشخصات هندسی مدل سرریز کنگره‌ای

در تحقیق حاضر، هندسه‌ی سرریز کنگره‌ای با پلان دوزنقه‌ای انتخاب گردید. این هندسه به دلیل ویژگی‌های خاص خود، از جمله عملکرد بهینه در شرایط مختلف جریان، کمک می‌کنند. به عنوان مثال، هندسه‌ی سرریز کنگره‌ای برای جلوگیری از پدیده‌های انحراف جریان و ... موثر است. از طرفی، پلان دوزنقه‌ای به دلیل ساختار خاص خود که انعطاف پذیری در تنظیم جریان را فراهم می‌کند، در کنترل و تنظیم سطح آب و فشار در سرریز موثر است. همچنین، انتخاب پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است که دارای ارتفاع سرریز ۰/۳۰۴۸ متر، تعداد دو سیکل، با زاویه دیواره سرریز ۶ درجه که نقش مهمی در جهت‌دهی جریان دارد مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های کروکستون نیز به تأیید دقت و صحت مدل‌سازی کمک می‌کند (۴). این مقایسه شامل تطابق نتایج مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی واقعیت‌های فیزیکی است.

نرم‌افزار Flow3D

در سال ۱۹۶۳ دکتر تونی هرت در راستای پیشرفته کردن مدل‌سازی سیالات پایه و اساس مدل Flow3D را تعریف نمود 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. نرم‌افزار Flow3D بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی (computational fluid Dynamic) توسعه داده شده و کاربرد آن در شبیه‌سازی جریان مایعات و گازها در زمینه‌های صنعتی، محیط‌زیست، هوافضا، علوم مهندسی نفت، گاز، علوم دریایی و هیدرولیکی است. این نرم‌افزار در مدل‌سازی مسائلی که وابسته به زمان هستند (جریان ماندگار-غیرماندگار) و همچنین جریانی که با سطح آزاد در تماس هستند؛ مانند سرریزها عملکرد خوبی دارد. Flow3D نتایج آزمایشات را به صورت یک‌بعدی-دو بعدی و سه بعدی ارائه می‌دهد که اجازه‌ی تحلیل و بررسی نتایج و دیتاهای خروجی را می‌دهد. مدل‌سازی با این نرم‌افزار مانند انجام آزمایشی است که احتمال دارد داده‌های ورودی آن صحیح نباشد و یا شرایط آزمایشگاه ممکن است شرایط را به خوبی تعریف نکند که طبعاً نتایج حاصله از آن درخور خطا خواهد بود. نهایتاً اگر در شبیه‌سازی عددی Flow3D شرایط معرفی شده به مدل مناسب نباشد نتایج به دست آمده قابل استناد نخواهد بود.

نرم افزار Flow3D جانشین شایسته‌ای در بررسی و آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی در محیط فیزیکی است که در حل مسئله‌های مکانیک سیالات در دریافت نتیجه‌گیر بسیار کاربردی بوده است، Flow3D با استفاده از روش‌های عددی مدل‌سازی و تحلیل و بررسی رفتار سیالات را بسیار ساده‌تر می‌کند. برای تحلیل و تحقیق مدل‌ها در Flow3D دیگر نیازی به استفاده از ماژول‌های پیشرفته و صرف هزینه و وقت بی‌رویه نخواهد بود، Flow3D نتایج پارامترها را به صورت یک‌بعدی-دو بعدی-سه بعدی و همچنین در قالب DATA TEXT تولید کرده که بهره‌مندی از نتایج را در اکسل و نرم‌افزارهای جانبی دیگر را فراهم می‌سازد.

معادله پیوستگی یا بقای جرم یک جریان سیال بدین صورت بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial y_i}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z_i}(\rho w_i) = 0 \quad (4)$$

که در تعریف یک جریان تراکم‌ناپذیر بصورت زیر معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

معادلات ناویر استوکس معادلات مومنتم حاکم بر جریان سیالات نیوتنی ویسکوز می‌باشد. این معادله در حالت کلی به حالت زیر بیان می‌شود:

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

در این معادله u_i مولفه بردار سرعت در راستای فضایی i ، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، ρ دانسیته سیال و B_i نیروی حجمی در راستای i می‌باشد. 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 فوق بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) = -\nabla p + B + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (7)$$

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

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + F_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

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

نشریه علوم آب و خاک

شبکه محاسباتی و اعمال شرایط مرزی

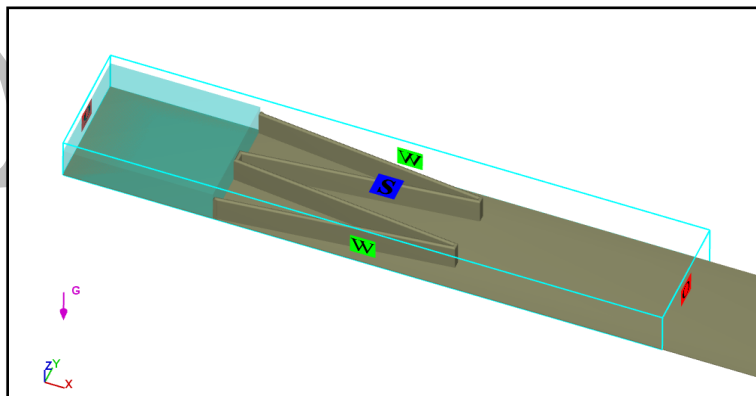
شبکه‌بندی در نرم افزار Flow3D به منظور حل عددی میدان جریان در سه راستای (x, y, Z) به هر دو صورت یکنواخت و غیر یکنواخت امکان پذیر است که در این تحقیق مش بندی نهایی برای شبکه محاسباتی با انتخاب بهینه برای تمامی مدل‌ها مش یکنواخت بدست آمد شاخص انتخاب مش بندی ها در نرم افزار Flow3D با سعی و خطا بدست می‌آید و در این مرحله از کار مش بندی را که نتایج نزدیک و قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی می‌دهد را به عنوان مش بندی 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 پایین دست نیز به منظور عدم تاثیر پذیری 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 شبکه بندی میدان محاسباتی و اعمال شرایط مرزی به مدل سرریز کنگره‌ای نشان داده شده است.

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

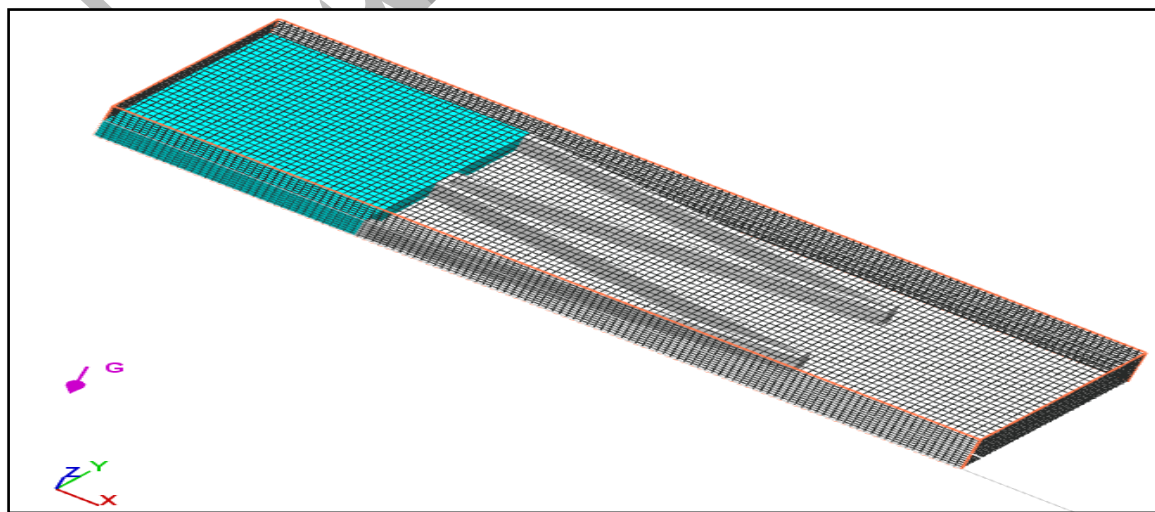
شرایط اولیه در مدل سازی هیدرولیکی به مجموعه داده‌ها و اطلاعاتی اطلاق می‌شود که برای تعیین وضعیت سیستم در آغاز فرایند شبیه سازی به کار گرفته می‌شوند. این اطلاعات معمولاً شامل پارامترهایی نظیر توزیع فشار، دما یا حجم سیال در محیط مدل سازی هستند و می‌توانند از منابع مختلفی مانند داده‌های آزمایشگاهی، تحقیقات پیشین یا فرضیات پذیرفته شده در آن زمینه استخراج شوند. همچنین، در مدل سازی سرریزها، شرایط اولیه می‌تواند 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 شده‌اند.



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

نشریه علوم آب و خاک

یکی از روش‌های رایج برای پایش پایداری حل در مدل‌های عددی، بررسی همگرایی حل است در این بخش از تحقیق، هدف اصلی انتخاب بهینه مش‌بندی برای شبکه محاسباتی می‌باشد تا تمامی مدل‌ها با تعداد مش‌های یکنواخت و بهینه به‌دست آید. این اقدام به منظور دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد انجام شد. در این فرآیند، از شاخص‌های مختلفی که از روش‌های سعی و خطا به‌دست آمده بودند، استفاده شد. این شاخص‌ها شامل پارامترهایی مانند مش‌بندی، توانایی مدل در تحلیل جریان‌های پیچیده و انطباق نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی بودند. فرآیند بهینه‌سازی مش‌بندی به‌طور تکراری و با آزمایش و خطا انجام گردید تا به نتیجه‌ای نزدیک به داده‌های تجربی دست یابد. در این تحقیق، برای انتخاب مش بهینه، مش‌های مختلف با اندازه‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴ متر به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر اندازه مش بر دقت شبیه‌سازی و پایداری جریان در شبیه‌سازی‌های عددی بود. برای این منظور، نتایج شبیه‌سازی برای هر یک از مش‌ها با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند و دقت مدل عددی در شبیه‌سازی شرایط مختلف هیدرولیکی ارزیابی گردید. در ابتدا، نتایج شبیه‌سازی‌ها برای اندازه‌های مختلف مش از نظر تطابق با داده‌های تجربی بررسی شد. سپس، پارامترهایی همچون دقت شبیه‌سازی و زمان محاسباتی در نظر گرفته شد. مش ۰/۰۱ متر نسبت به مش‌های 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.



شکل ۶. نمای کلی از مش‌بندی مدل سرریز کناره‌ای تحقیق حاضر

در این تحقیق بررسی میدان جریان با مدل‌های مختلف آشفتگی موجود در نرم‌افزار Flow3D و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

نشریه علوم آب و خاک

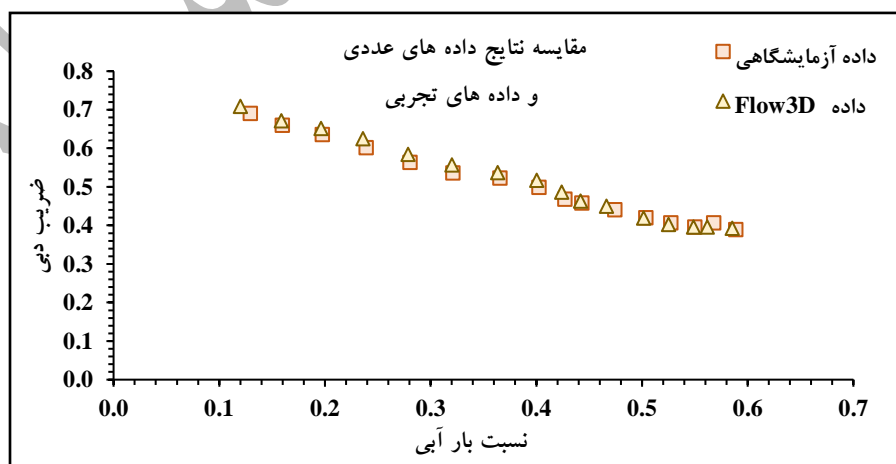
انجام گرفت. درصد خطای نسبی مدل RNG نسبت به مدل‌های دیگر کمتر و نزدیک به صفر است. بنابراین در همه شبیه‌سازی‌های عددی از مدل آشفتگی RNG استفاده شد (۲۳).

نتایج و بحث

تحقیق حاضر به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از نرم‌افزار Flow3D پرداخته است. این تطابق از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مدل‌سازی عددی به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها در شرایط مختلف، نقش مهمی در طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها ایفا می‌کند. هدف اصلی تحقیق، 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 گردید (۴). نتایج این دو روش مقایسه و میزان تطابق یا تفاوت‌ها بررسی شد. این تحقیق نه تنها به ارزیابی دقت مدل‌های عددی کمک می‌کند، بلکه به درک بهتر رفتار جریان و بهینه‌سازی سیستم‌های مهندسی و صنعتی نیز مفید است.

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، به ویژه از نظر شرایط مرزی و زمان شبیه‌سازی، ضروری است. در این تحقیق، نتایج ضریب دبی حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Flow3D با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهند که مقادیر بدست‌آمده از Flow3D با داده‌های آزمایشگاهی تقریباً یکسان هستند، که نشان‌دهنده دقت بالای این نرم‌افزار در شبیه‌سازی جریان‌ها است.

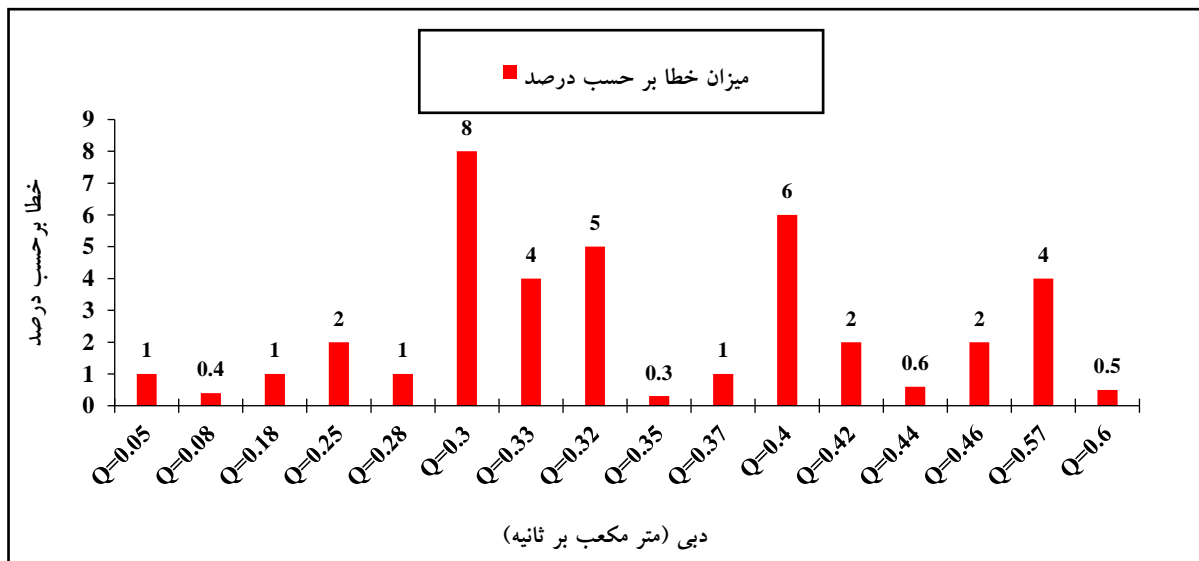


شکل ۷. مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی

در این تحقیق، 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

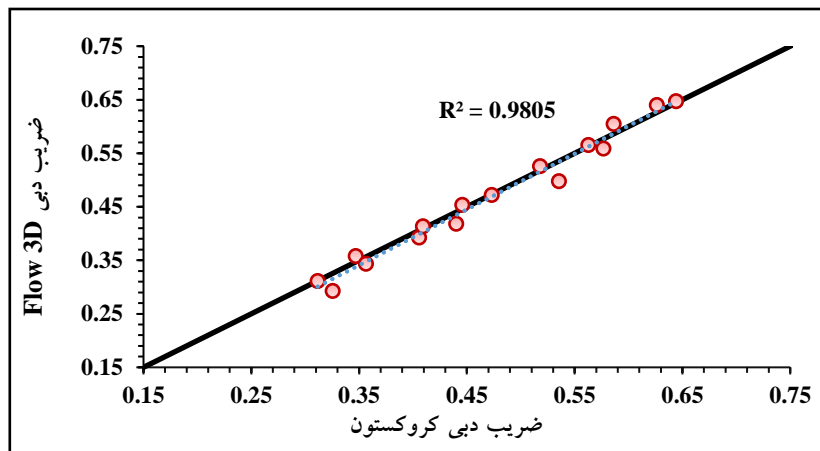
نشریه علوم آب و خاک

می‌دهد، مشاهده 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 بالا، 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 بالای روش حل عددی Flow3D در مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیندهای 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 مشاهده می‌شود. همچنین، باید توجه داشت که برای دبی‌های مختلف، مقادیر خطا متفاوت است. به عبارت دیگر، هر دبی ورودی به صورت جداگانه خطای متفاوتی دارد.

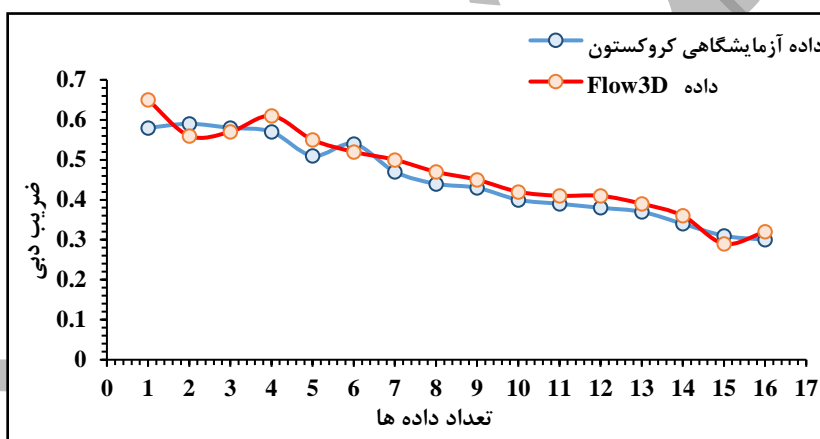


شکل ۸. مقادیر خطای حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی برای دبی‌های متفاوت تحقیق حاضر

شکل ۹ نمودارهای پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل Flow3D نشان می‌دهند که عملکرد این مدل در مدل‌سازی پدیده حاضر که در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفته، بسیار مطلوب است. 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 بالای مدل در توصیف و پیش‌بینی دقیق پدیده مورد مطالعه است. با تحلیل نمودارهای پراکنش، مشاهده می‌شود که نقاط به دست آمده از مدل Flow3D به طور کلی با نقاط آزمایشگاهی در اکثر دبی‌ها نتایج بسیار خوبی با خطای تقریباً (۴-۰/۳) درصد از خود نشان می‌دهد و در موارد خاص با خطای تقریباً (۶-۸) درصد رسیده است که این نشان‌دهنده دقت بالای Flow3D می‌باشد. این خطای نسبتاً 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.

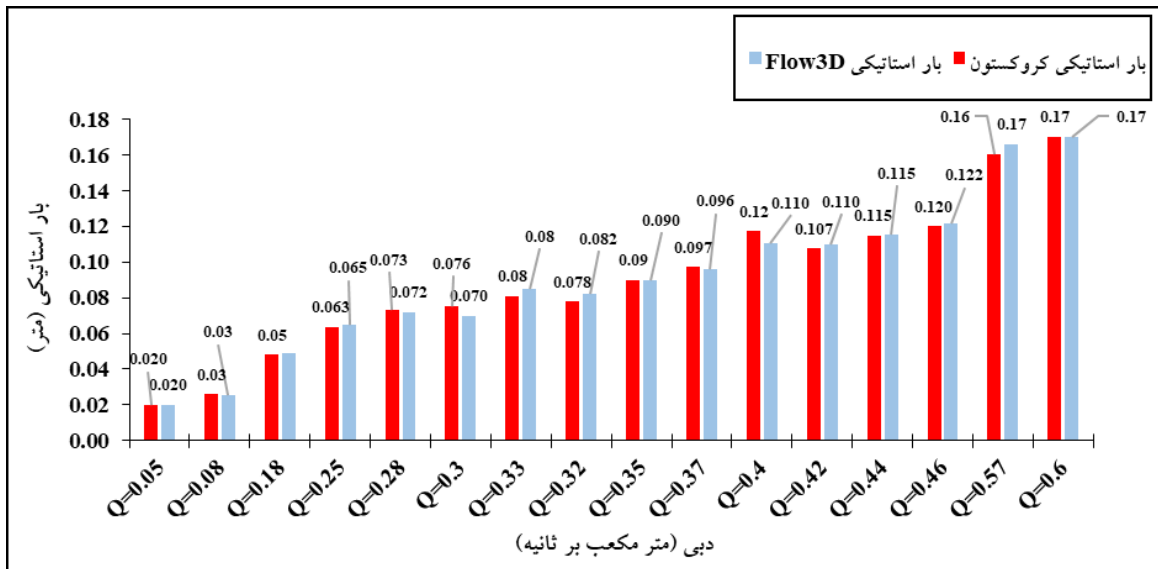


(الف)



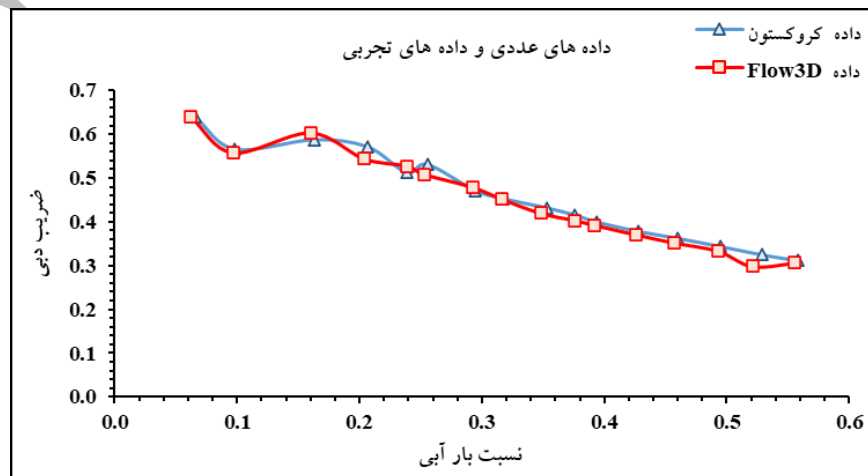
(ب)

شکل ۹- مقایسه نتایج داده‌های آزمایشگاهی و نتایج Flow3D، (الف: نمودار پراکنش)، (ب: نمودار داده‌های آزمایشگاهی) با استفاده از شکل ۱۰ که نتایج مقایسه H_d از دو روش مختلف (نرم‌افزار Flow3D و داده‌های آزمایشگاهی) را نشان می‌دهد، می‌توان به این نتیجه رسید که دقت قابل قبولی در تحلیل و شبیه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای توسط نرم‌افزار Flow3D به دست آمده است. این امر نشان‌دهنده‌ی توانایی مدل‌سازی و شبیه‌سازی موجود در این نرم‌افزار است که می‌تواند به خوبی و با دقت نسبتاً بالا، رفتارهای پیچیده‌ای که در این نوع سازه‌ها رخ می‌دهد را توصیف نماید. تطابق مقادیر H_d بین دو روش مختلف، مؤید این است که نرم‌افزار Flow3D به عنوان ابزاری معتبر و قابل اعتماد برای مهندسان و محققانی 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، نشان‌دهنده‌ی 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 ۱۰. نمودار ستونی Hd داده‌های آزمایشگاهی و Flow3D

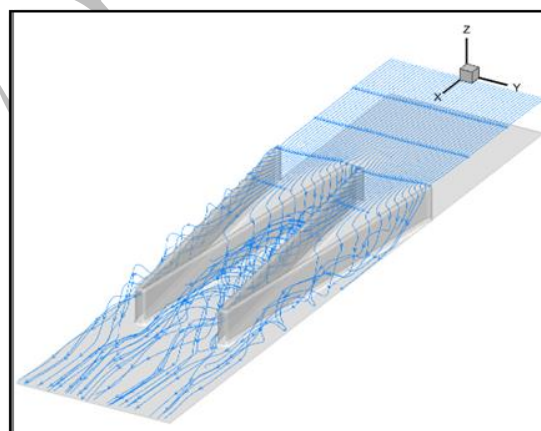
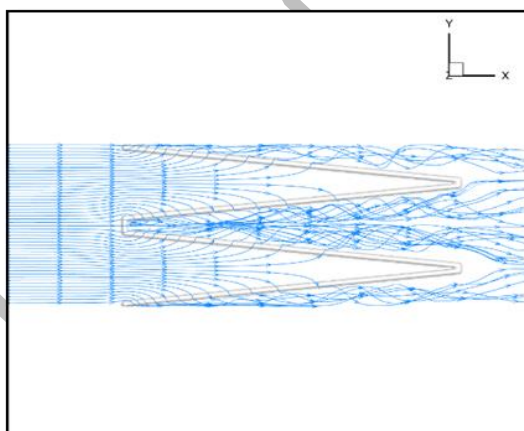
شکل ۱۱ نشان دهنده نمودار مربوط به ضریب دبی و نسبت بار آبی را برای دو مجموعه داده (داده‌های آزمایشگاهی کروکتون و داده‌های خروجی از نرم‌افزار Flow3D) می‌دهد. این نمودار با توجه به تطابق نسبتاً خوب بین دو مجموعه داده، نشان می‌دهد که داده‌هایی که توسط نرم‌افزار Flow3D به دست آمده‌اند، با داده‌های آزمایشگاهی نسبتاً 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 در نتیجه دقت تا حدودی کاهش پیدا می‌کند که دقت مربوطه تا حدی قابل قبول است (۴-۷) درصد. در دبی‌های کم بخاطر خاصیت چسبندگی (موینگی) جریان به بدنه سرریز تا حدودی خطا بدست 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 فرآیند تصمیم‌گیری‌های مرتبط با پروژه‌های هیدرولیکی و سازه‌های آبی استفاده کنند.



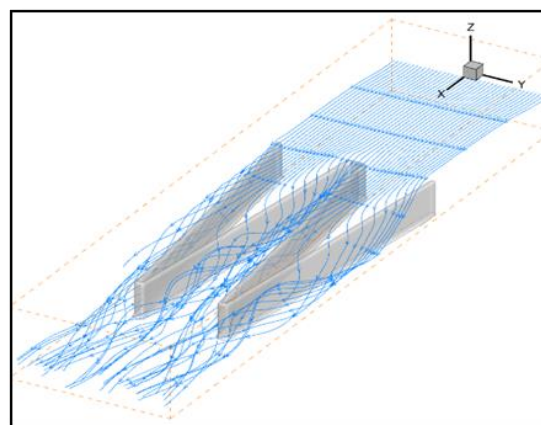
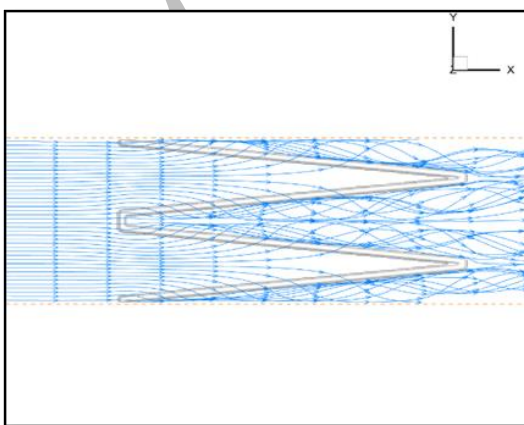
شکل ۱۱. نمودار مربوط به ضریب دبی کروکتون و Flow3D نسبت به بار آبی

بررسی و تحلیل جریان

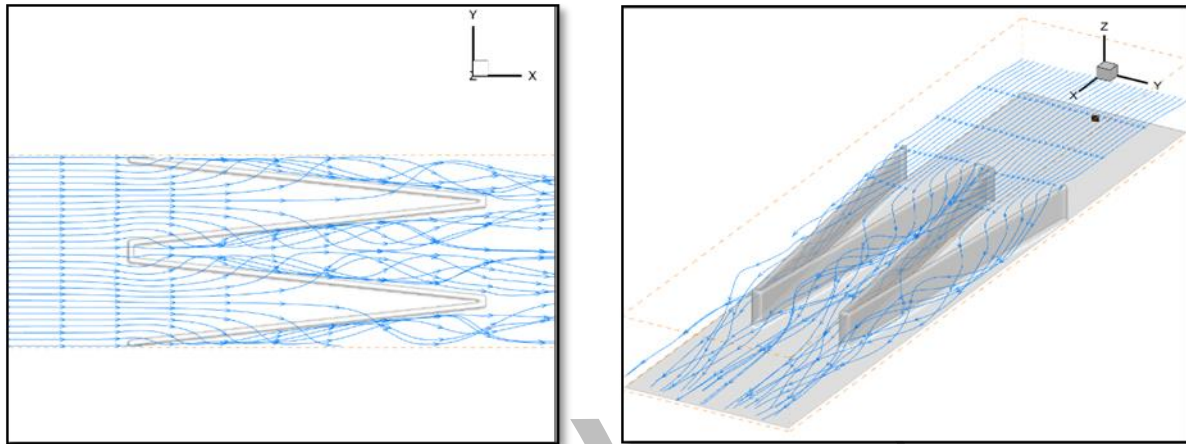
در سیستم‌های هیدرولیکی، رفتار خطوط جریان تحت تأثیر عواملی مانند دبی آب، ویسکوزیته، چسبندگی و شرایط محیطی قرار دارد. با افزایش دبی آب، میزان جریان وارد شده به سیستم بیشتر می‌شود که منجر به افزایش سرعت و تغییر در خطوط جریان می‌گردد. این تغییرات زمانی که خطوط جریان با دیواره‌های سرریز کنگره‌ای برخورد می‌کنند، باعث تقسیم جریان به دو سمت دهانه‌های ورودی و دهانه‌های خروجی می‌شود. در دبی‌های مختلف (۰/۵، 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 می‌گردد و جریان به دهانه‌های ورودی و خروجی وارد می‌شود. در دبی‌های پایین‌تر، زاویه جریان نزدیک شونده با دیواره سرریز به حالت عمودی نزدیکتر است و به همین دلیل است که در دبی‌های پایین، ضریب دبی بیشتر است. در دبی‌های بالاتر، 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 نموده و ضریب دبی بیشتر می‌شود). همچنین با افزایش دبی، استغراق موضعی در دهانه‌های خروجی بیشتر شده و باعث کاهش ضریب دبی می‌گردد.



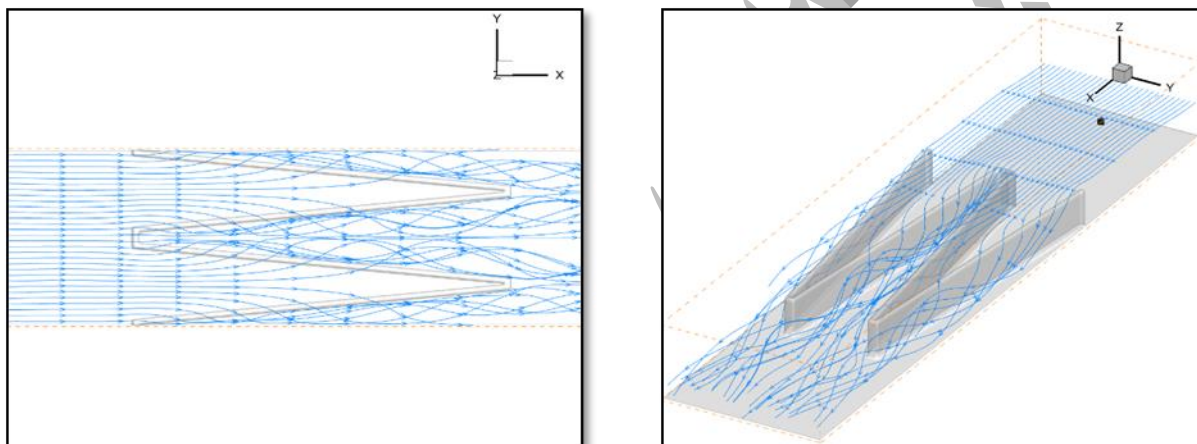
شکل ۱۲. خطوط جریان مربوط به دبی ۰/۰۵



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

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و جریانات عبوری از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که انجام آزمایش‌های فیزیکی معمولاً هزینه‌بر و زمان‌بر است، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر مورد استفاده قرار گرفت. 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 به‌خوبی مدل‌سازی می‌کند. علاوه بر این، مقادیر C_d و H_d که نمایانگر باراستاتیکی و ضریب دبی در سرریزها هستند، در شبیه‌سازی نرم‌افزار Flow3D با داده‌های آزمایشگاهی کروکستون تقریباً یکسان و هم‌راستا با نتایج آماری حاصل از پارامترهای R^2 ، DC و RMSE به‌ترتیب برابر با (۰/۹۸۰۵، ۰/۹۷۲۵ و ۰/۰۱۴۲) به‌دست آمد، که دقت بالای این روش محاسباتی را تأیید می‌کند. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان Flow3D در تحلیل و طراحی سیستم‌های مختلفی همچون سامانه‌های آبیاری، انتقال سیالات و پدیده‌های دینامیک سیالاتی، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و علمی‌تر منجر شود.

1. Azhdari Moghadam, M., E. Jafari Nadoushan. Hydraulic Design of a Trapezoidal Labyrinth Spillway Using Computational Hydrodynamics. *MCEJ* 2013; 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.
3. Crookston, B.M. (2010). Labyrinth weirs. Ph.D. thesis, Utah State University, Logan, UT.
4. Crookstone, B.M., B.P. Tullis. (2013). Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139:363-370.
5. Crookston, B. and B.Tullis. (2012). Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 137(6): 555-562.
6. Christensen, N.A., B.P. Tullis. (2012). Arced Labyrinth Weir Flow Characteristics. *4th International Junior Reasercher and Enginner Workshap on Hydraulic Structures. IJREWHS' 12*. B. Tullis and R. Janssen (Eds.) Utah State University, Logan, USA.
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. *J. Hydr. Engg.* ASCE. 97(8):1246-1251.
9. Gentilini, B. (1949). Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. Memorie e Studi dell istituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche Del Regil Politecnico di Milano, 48, in Italian.
10. Ghodsian, M. (2007). Stage-Discharge Relationship for a triangular Labyrinth Spillway. *Proc. Inst. Eng. Water Manage.* 162(3), 173-178.
11. Gholizadeh, A., M. ghodsian, R. Panahi. Numerical study of effect of Crest shape on Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weir. *MCEJ 2016*; 16 (4):225-238.
12. Hay. S., G. Taylor. (1970). Performance of Labyrinth Weirs. *ASCE J. of Hydraulic Engg.* 96(11):2337-57.
13. Hagheriabi, A. H., B. Abbaspoor, 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, 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 Proceeding*. pp. 1397-1407
16. Henderson, FM (1966) *open channel flow*. Macmillan, New York, USA.
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(2018)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. *Jwss 2023*; 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). Volume 17, Issue 4 - Serial Number 100 November and December 2023. Pages 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. *Jwss 2023*; 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.
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 J. Hydraul. Struct.* 2024; 10(2):30-45 DOI: 10.22055/jhs.2024.19040.
23. Mirzaei, M., E. Asadi, A. Abbaspour. Numerical study of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weir by changing the angle using Flow3D model. *Iranian Journal of Water Research*. Pages 61-69, fall 1400 (2021) Volume 15, Issue 3, Continuous Issue No. 42.
24. Nikipiek, 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), pp.1-10. (In Persian).
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.
 28. Rezaee, M., A. Emadi and Q. Aqajani Mazandarani. (2016). Experimental Study of Rectangular Labyrinth Weir. *Journal of Water and Soil*. 29(6), pp. 1438-1446. (In Persian).
 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, *thesis presented to university of Nottingham*, England.
 31. Tullis, B.P., N. Amanian, N. Waldron. (1995). Approach to Improve the Discharging Capacity of Design of Labyrinth Spillways. *ASCE J. of Hyraulic Sharp-Crested Triangular Plan form Weirs*. *J. Flow Engg.* 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)* Vol. 43, No. 1, spring 2020, Original Paper, p. 101-116.