

مطالعه عددی و آزمایشگاهی ترکیب سرریز کنگره‌ای با روزنه و تأثیر آن بر ضریب دبی جریان

امیررضا بهره‌بر^۱، محمد حیدر نژاد^{۲*}، علیرضا مسجدی^۲ و امین بردبار^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۸)

چکیده

ترکیب سرریزهای کنگره‌ای با روزنه می‌تواند راه حلی مفید برای عبور مواد شناور از روی سرریز و انتقال مواد رسوبی از روزنه باشد. همچنین ایجاد شکاف در بال سرریز موجب عبور دبی بیشتری می‌شود. در این تحقیق با چهار دبی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه) و عرض و ارتفاع کانال ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، مدل‌های سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای - روزنه، مربعی - روزنه و مثلثی - روزنه به صورت آزمایشگاهی و با نرم‌افزار Flow3D با مدل آشفتگی K-ε از نوع RNG مطالعه شد و نتایج با همدیگر مقایسه شد از بین تمامی مدل‌های گفته شده، سرریز کنگره‌ای مثلثی - روزنه دار بیشترین ضریب دبی را به خود اختصاص داد و با افزایش نسبت Ht/P (Ht: هد آب روی تاج سرریز، P: ارتفاع سرریز) برای تمامی مدل‌ها ضریب دبی افزایش یافت. با توجه به کارایی این نوع از سرریزها بیشترین ضریب دبی در نسبت‌های Ht/P پایین، به دست آمد. در نسبت‌های پایین با توجه به اینکه جریان به حالت آزاد است ضریب دبی سرریز روند صعودی داشته و با افزایش این نسبت سرریز حالت نیمه‌مستغرق پیدا می‌کند. همچنین برای طراحی سرریز، بهترین نسبت Ht/P در محدوده بین ۰/۱۳ تا ۰/۴۱ است که حداکثر ضریب دبی معادل $Cd=1/2$ در این محدوده قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: سرریز - روزنه، ضریب دبی جریان، طول مؤثر، Flow3D.

۱. گروه علوم و مهندسی آب، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mo_he3197@yahoo.com

مقدمه

برای کاهش دادن مشکلات در سرریزها و دریچه‌ها و همچنین بالا بردن کارایی آنها می‌توان از سازه ترکیبی سرریز-دریچه استفاده کرد به طوری که همزمان جریان آب بتواند هم از زیر دریچه و هم از روی سرریز عبور کند، این سازه ترکیبی می‌تواند مشکلاتی از جمله رسوب گذاری را مرتفع کند و با این روش رسوبات و مواد زائد در پشت سرریزها انباشه نمی‌شوند. توزیع و اندازه‌گیری دقیق آب به‌منظور کاهش تلفات در شبکه‌های آبیاری و زهکشی همواره مورد توجه بوده است. در این جهت، سرریز و دریچه، به‌علت داشتن روابط ساده نسبت به سازه‌های جایگزین کاربرد بیشتری دارند. وجود مواد معلق و شناور در آب، اغلب سبب تجمع در ورودی دریچه و بالادست سرریز می‌شود. که همین باعث کاهش دقت اندازه‌گیری دبی می‌شود. از جمله مطالعات صورت گرفته در مورد سرریز-دریچه می‌توان به پژوهش‌هایی اشاره کرد که سرریزهای کنگره‌ای از طریق افزایش طول مؤثر مورد بررسی قرار گرفته و با اصلاح هندسی پیکربندی سرریز کنگره‌ای از طریق ایجاد برش و شیب‌دار کردن در طول سرریز عملکرد هیدرولیکی آن را بهبود بخشیدند. آنها برای شبیه‌سازی پروفیل سطح جریان از روش VOF و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در نرم‌افزار FLOW-D از مدل آشفتگی RNG استفاده کردند. نتایج عددی آنها نشان داد که در نسبت‌های پایین H_T/P اصلاح در پیکره سرریز باعث افزایش ضریب دبی عبوری از سرریزهای اصلاح شده کنگره‌ای می‌شود. با افزایش نسبت طول سرریز در نسبت‌های بالای H_T/P ضریب دبی جریان به‌علت استغراق سرریز کنگره‌ای کاهش می‌یابد (۶). همچنین ایشان در پژوهشی دیگر به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز کنگره‌ای مثلی- دوزنقه‌ای روی ضریب دبی- استهلاک انرژی و رژیم جریان از روش VOF و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در نرم‌افزار FLOW-D از مدل آشفتگی RNG در دو حالت قرارگیری مختلف سرریز در مخزن پرداختند. نتایج از عملکرد خوب نرم‌افزار عددی در شبیه‌سازی جریان و مطابقت

نتایج عددی و آزمایشگاهی گواه بود. همچنین ضریب دبی با افزایش زاویه رأس کنگره طی ریزش جریان عبوری از رأس کنگره در نسبت‌های بالای H_T/P کاهش می‌یابد. هیدرولیک جریان روی سرریز کنگره‌ای مثلی- دوزنقه‌ای در دبی‌های پایین جریان آزاد و در دبی‌های بالا به‌صورت جریان مستغرق است (۵). هاوای و همکاران (۹) به بررسی جریان همزمان از سرریز مثلی و زیر دریچه مستطیلی در حالت آزاد پرداختند. نتایج آزمایشگاهی ایشان نشان داد که ضریب شدت جریان با افزایش زاویه رأس سرریز مثلی کاهش می‌یابد. سامانی و مظاهری (۱۶) جریان ترکیبی روی سرریز-دریچه مستطیلی لبه‌تیز بدون فشردگی جانبی را در حالت‌های مختلف (سرریز در حالت آزاد و مستغرق) مدل‌سازی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که عمق پایاب بر عمق بالادست سازه و در نتیجه بر دبی جریان تأثیر گذار است.

بلوچی و زینی‌وند (۲) طراحی و ساخت مدل‌های ترکیبی مختلف سرریز مثلی لبه‌تیز- روزنه مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی از جمله فشار آب روی سرریز (h) و پارامترهای هندسی از جمله ارتفاع روزنه (d) عرض روزنه (b) و فاصله بین بالای روزنه تا رأس مثلث (y) بر ضریب دبی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که ضریب دبی با افزایش نسبت‌های h/b و h/y و کاهش h/d و مدل ترکیبی بیشتر عملکردی شبیه به روزنه دارد. قره‌گزلو و همکاران (۷) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی مدل ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای در نهرهای کوچک پرداختند و نتیجه گرفتند در یک h/d ثابت، ضریب دبی استوانه کامل تقریباً برابر با ضریب دبی نیم‌استوانه یا انحنای در بالادست و حدود ۱۲ درصد بیشتر از ضریب دبی نیم‌استوانه‌ای یا انحنای در پایین دست است. مسعودیان و همکاران (۱۳) دریافتند با افزایش نسبت‌های بی‌بعد h/b و d/h بده سرریز-دریچه‌ای ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. در یک h/b ثابت، با افزایش قطر سازه، ضریب بده سرریز و سرریز-دریچه کاهش، و ضریب بده دریچه

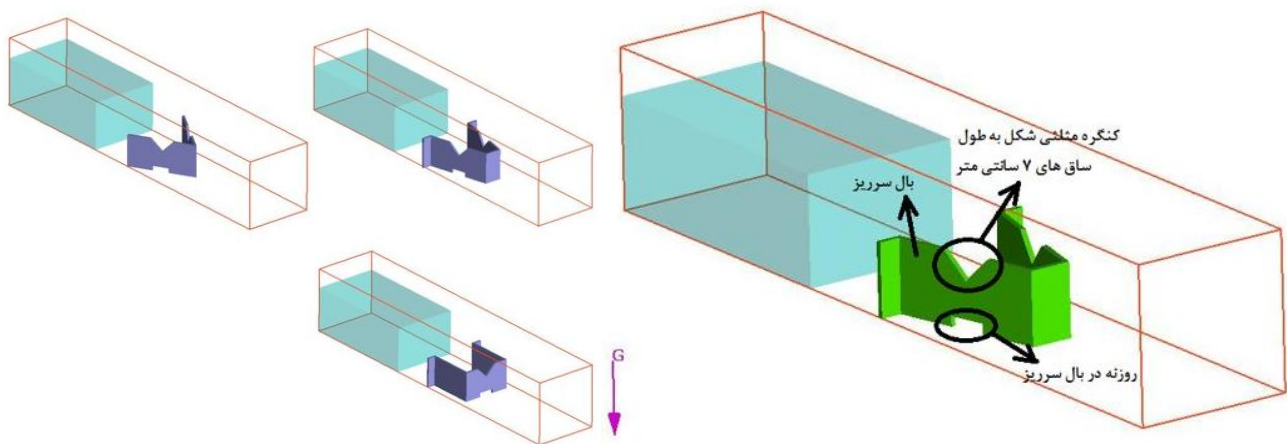
پژوهش خصوصیات هیدرولیکی مدل‌های مختلف ترکیبی سرریز-دریچه دوزنقه‌ای در سه گروه متفاوت بازشدگی مختلف دریچه در انتهای کانال باز با مقطع دایره‌ای بررسی شد، نتایج نشان داد که ضریب دبی به دست آمده مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. رضایی و همکاران (۱۵) نشان دادند که در سرریزهای کنگره‌ای با پلان مستطیلی برای ارتفاع آب بالادست ثابت دبی سرریز کنگره‌ای حداکثر $2/6$ برابر دبی سرریز مستقیم و در دبی ثابت، ارتفاع آب بالادست سرریز مستقیم $1/8$ برابر ارتفاع آب بالادست سرریز کنگره‌ای است و همچنین بیان کردند که بهترین محدوده H/P برای طراحی سرریز کنگره که حداکثر ضریب دبی عبوری را داشته باشد بین $0/2$ و $0/4$ است. نگاهی بر پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد با وجود اینکه درخصوص سرریز کنگره‌ای - روزنه‌دار مطالعات زیادی انجام شده است و لیکن مطالعات عددی کمی در این خصوص انجام شده است. لذا در تحقیق حاضر اثر ایجاد روزنه در کنگره‌های با هندسه‌های مثلثی، مربعی و دوزنقه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است و با نرم‌افزار FLOW3D شبیه‌سازی صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

دینامیک سیالات محاسباتی با تبدیل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان به معادلات جبری، امکان حل عددی آنها را فراهم می‌سازد. با وجود روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف برای حل عددی معادلات حاکم، تقریباً در تمامی روش‌ها با تقسیم ناحیه موردنظر به المان‌های کوچکتر و اعمال شرایط مرزی برای گره‌های مرزی با در نظر گرفتن تقریب‌هایی، یک دستگاه معادلات خطی به دست می‌آید که با حل این معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و سایر پارامترها به دست می‌آید (۱).

در این پژوهش نیز از نرم‌افزار Flow-3D به منظور شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای استفاده شده است. شکل ۱ مدل‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار Flow-3D را نشان می‌دهد و همچنین سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با ایجاد شکاف‌های مثلثی و روزنه در بال سرریز را

افزایش می‌یابد. قره‌گزلو و همکاران (۷) دریافتند که پارامترهای هیدرولیکی بی‌بعد h/d و h/b روی ضریب دبی هر سه نوع سازه ترکیبی (استوانه کامل، نیم‌استوانه با انحنا در بالادست و برعکس) مؤثرند، به طوری که با افزایش هر دو پارامتر مزبور ضریب Cd افزایش می‌یابد، و در یک h/d و h/b ثابت، Cd سازه نیم‌استوانه با انحنا در بالادست به علت جمع‌شدگی تدریجی خطوط جریان و در نتیجه افت ورودی کمتر تقریباً برابر حالت استوانه‌ای و بیشتر از نیم‌استوانه با انحنا در پایین دست است. بنابراین انحنای بالادست تأثیر بیشتری بر ضریب دبی نسبت به انحنای پایین دست دارد. اسماعیلی ورکی و رضوی‌زاده (۴) در کلیه سرریزهای کنگره‌ای مورد مطالعه (با پلان نیم‌دایره‌ای خطی و نیم‌دایره‌ای با شعاع‌های مختلف) دریافتند که ضریب دبی جریان با افزایش H/P (نسبت انرژی کل بالادست به ارتفاع سرریز) تا $0/37$ ، روند افزایشی داشته و سپس به دلیل تداخل تیغه‌های ریزی ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد و به تدریج با استغراق نسبی سرریز، ضریب دبی جریان به سمت ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن متمایل می‌شود. حیدرپور و همکاران (۱۰) دریافتند که هر یک از مدل‌های ترکیبی سرریز نیم‌دایره‌ای با دریچه کشویی در شرایط دبی ثابت با افزایش میزان بازشدگی دریچه مقدار ضریب دبی کاهش پیدا می‌کند و در صورت ثابت بودن دبی و میزان بازشدگی دریچه، با افزایش مقدار α ضریب دبی کاهش جزئی پیدا می‌کند. مسعودیان و همکاران (۱۲) به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز-دریچه استوانه‌ای مستغرق در کانالی مستطیلی و افقی پرداختند. و نتایج خود را با مدل سرریز دریچه لبه تیز در شرایط مشابه مقایسه کردند. نتایج ایشان نشان داد که نسبت عمق آب بالادست به بازشدگی دریچه، نسبت عمق آب بالادست به ارتفاع سازه و نسبت عمق پایاب به عمق بالادست روی ضریب دبی مؤثرند. پاشازاده و همکاران (۱۴) نشان دادند که ترکیب سرریز با دریچه می‌تواند راه حلی مفید برای عبور مواد شناور از روی سرریز و انتقال مواد رسوبی از زیر دریچه باشد. در این



شکل ۱. مدل‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار Flow-3D و معرفی قسمت‌های اصلی سرریز

است که در این مورد طبق محاسبات آنالیز ابعادی نسبت H_t/P و C_d در فلوم آزمایشگاهی در حالت‌های آزاد و نیمه مستغرق کالیبره شدند زیرا در ابتدا که جریان به حالت آزاد بود ضریب دبی افزایش یافت و وقتی که ضریب دبی کاهش پیدا کرد جریان به حالت استغرق درآمد. در نرم‌افزار Flow-3D برای صحت‌سنجی ابعاد مش‌بندی به صورت ابعاد کوچک و بزرگ تغییر یافت و با هر کدام از این ابعاد مش‌بندی شده تست انجام شد و بعد نتایج به دست آمده در هر حالت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در اینجا مش‌بندی بهینه را انتخاب می‌کنیم که درصد خطای کمتری را بین داده‌های حاصل از نرم‌افزار Flow-3D با داده‌های آزمایشگاهی بدهد.

آزمایش‌ها در حالت‌های آزاد و نیمه‌مستغرق در فلوم آزمایشگاهی مستطیل شکل که طول، ارتفاع و عرض آن به ترتیب ۸، ۰/۴ و ۰/۳ متر است انجام شد و مدل‌های آزمایشگاهی از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بودند. در این تحقیق مش‌بندی نهایی برای شبکه محاسباتی با انتخاب بهینه برای تمامی مدل‌ها به تعداد ۹۰۰۰۰۰ مش یکنواخت به دست آمد، شاخص انتخاب مش‌بندی‌های در نرم‌افزار Flow3D با سعی و خطا به دست آمد و این مرحله از کار مش‌بندی را که نتایجی نزدیک و قابل قبول با نتایج

در محیط نرم‌افزار Flow-3D را نشان می‌دهد. (TLW1: معرف سرریز کنگره‌ای مثلثی به حالت ساده)، (TLW1-1: معرف سرریز کنگره‌ای مثلثی با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز)، (TLW1-2: معرف سرریز کنگره‌ای مثلثی - روزنه همراه با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز)، (RLW: معرف سرریز کنگره‌ای مربعی به حالت ساده)، (RLW1: معرف سرریز کنگره‌ای مربعی با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز)، (RLW2: معرف سرریز کنگره‌ای مربعی - روزنه همراه با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز)، (TLW: معرف سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای به حالت ساده)، (TLW1: معرف سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز)، (TLW2: معرف سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای - روزنه همراه با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز).

در طول پژوهش برای اندازه گرفتن دبی، از دبی‌سنج مغناطیسی استفاده شد و خطای اندازه‌گیری آن مطابق گواهی‌نامه کالیبراسیون برای دبی طراحی کمتر از ۱ درصد است. کالیبراسیون عبارت است از مقایسه یک دستگاه اندازه‌گیری با یک استاندارد و تعیین میزان خطای این وسیله نسبت به آن و در صورت لزوم تنظیم دستگاه در مقایسه با استانداردهای مربوطه و به زبان ساده کالیبراسیون یعنی اندازه‌گیری و صحت وسیله اندازه‌گیری در مطابقت با استاندارد

ابعادی، با سه کمیت اصلی (طول، جرم و زمان) به‌روش باکینگهام می‌توان معادله جریان آزاد روی یک سرریز زیگزاگی را به‌صورت زیر خلاصه و ارائه کرد. بنابراین در این تحقیق، ارزیابی تجربی ضریب جریان C_d مستقل از تأثیر عوامل هندسی به‌روش باکینگهام خواهد بود. در این صورت، معادله اصلی مورد نظر ما در این تحقیق به‌صورت زیر ساده خواهد شد:

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{P}\right) \quad (5)$$

معادلات حاکم

نرم‌افزار Flow-3D برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر است و معادلات ناویر استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. این معادلات در دستگاه مختصات کارتزین (x, y, z) به‌صورت زیر هستند (5):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (8)$$

که در آن:

(u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب جرمی و (f_x, f_y, f_z) شتاب لزجت در جهت‌های (x, y, z) چگالی سیال، R_{SOR} ترم چشمه، V_F کسری از حجم مرتبط با جریان و P فشار هستند (5).

در نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش

آزمایشگاهی داشت به‌عنوان مش‌بندی بهینه و نهایی انتخاب شد. در نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش (VOF) (volume of fluid) استفاده شد که در این روش با حل معادلات حاکم بر جریان، F به‌عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه شد (8). علت انتخاب این مدل داشتن ترم اضافی نسبت به سایر معادلات آشفتگی در معادله‌اش است که برای حل و گسسته‌سازی معادلات مربوط به آشفتگی جواب دقیق‌تری را به ما می‌دهد.

آنالیز ابعادی

آنالیز ابعادی، یعنی گروه‌بندی کمیت‌های مهم به‌صورت پارامترهای بدون بعد که می‌توان تعداد متغیرها را کاهش داده و حاصل را که به‌صورت معادلات ریاضی و نمودارهای تجربی است، به‌صورتی درآورد که قابل کاربرد برای تمام وضعیت‌های مشابه باشد. با این کار می‌توان به توصیف جامع پدیده پرداخت و با انجام تعداد کمی آزمایش، از جنبه‌های پنهان پدیده آگاه شده و به‌این ترتیب در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرد. در این صورت تابع عمومی جریان آزاد روی یک سرریز زیگزاگی به‌صورت زیر خواهد بود.

$$f(H_t, P, D, R, L, W, T, n, Lv, Q, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

در تابع معرفی شده ۱۵ متغیر مستقل با سه کمیت اصلی (طول، جرم و زمان) وجود دارد.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_0^2 \quad (2)$$

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{R}{W}, \frac{W}{P}, \frac{D}{P}, \frac{T}{P}, \frac{1}{w}\right) \quad (3)$$

$$C_d = \left\{ F\left(\frac{H_a}{P}, \frac{L}{W}, \frac{W}{P}\right) \right\} \quad (4)$$

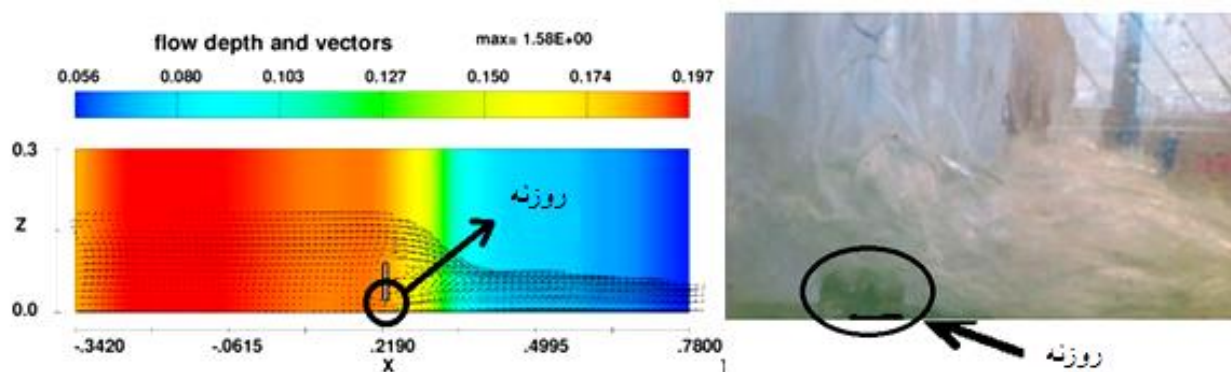
Q = دبی جریان آزاد؛ L = طول کل تاج سرریز؛ H_t = انرژی روی تاج سرریز در بالادست؛ C_d = ضریب جریان آزاد است.

تحلیل ترکیبی

از ترکیب معادله (1)، (2)، (3) و (4) با هم در روش تحلیل

جدول ۱. اطلاعات مربوط به مدل‌های سرریزهای کنگره‌ای

شماره مدل	عرض کانال (سانتی‌متر)	طول تاج مؤثر (سانتی‌متر)	ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)	دبی بالادست (لیتر/ثانیه)	عمق جریان بالادست (سانتی‌متر)
RLW	۳۰	۷۶	۱۴	۵-۲۰	۲۰-۱۵
TLW	۳۰	۸۴	۱۴	۵-۲۰	۲۰-۱۵
TLW1	۳۰	۶۸	۱۴	۵-۲۰	۲۰-۱۵



شکل ۲. خروج جریان به صورت گردابه از روزنه سرریز در آزمایشگاه و نرم‌افزار Flow3D (رنگی در نسخه الکترونیکی)

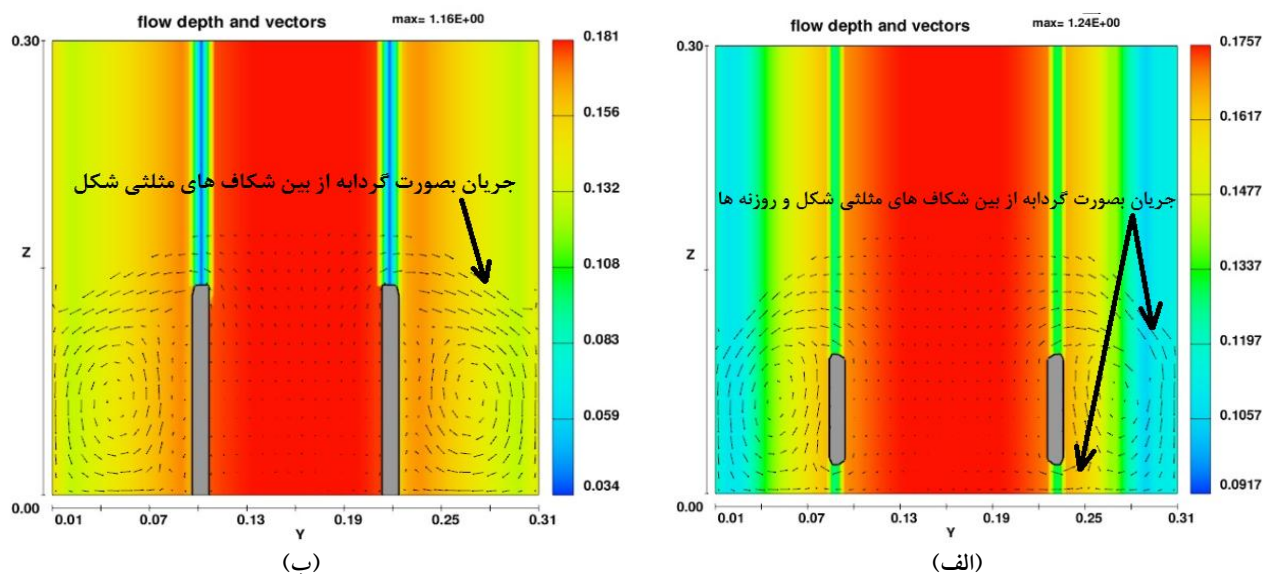
ثانیه اندازه‌گیری شد و تمامی مدل‌های آزمایشگاهی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر از جنس پلکسی‌گلاس مورد آزمایش قرار گرفتند. جهت شبیه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای با هندسه‌های مختلف در جدول ۱ مشخصات هندسی و داده‌های مورد نیاز آورده شده است. به منظور راحتی بیان نام‌های مدل‌ها از مخفف دو کلمه اصلی انگلیسی آنها در نامگذاری‌ها استفاده شده است. (Rectangular Labyrinth Weir=RLW) و (Triangular Labyrinth Weir= TLW1).

شکل ۲ جریان عبوری از روزنه سرریز را در آزمایشگاه و نرم‌افزار Flow3D نشان می‌دهد که از نوع سرریز کنگره‌ای مربعی به حالت ساده است که در حالت جریان آزاد و با دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه است. وقتی که جریان از روزنه عبور می‌کند به دلیل نامنظم بودن لایه‌های جریان، به صورت گردابه‌ای و پرش هیدرولیکی مستغرق در می‌آید. در واقع دبی عبوری از روزنه باعث افزایش دبی عبوری از سرریز و همچنین افزایش ضریب دبی می‌شود.

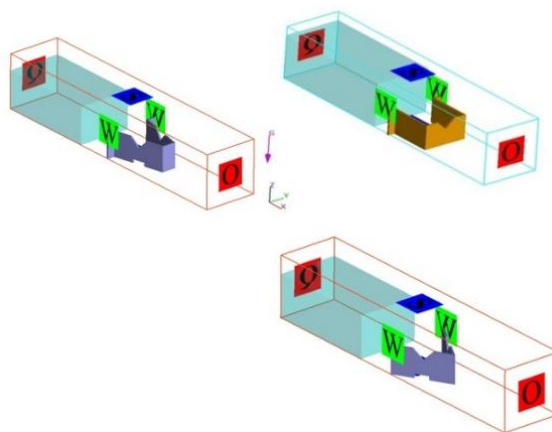
(VOF) (volume of fluid) استفاده می‌شود، که در این روش با حل معادله ۵، F به عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می‌شود (۸).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) = 0 \quad (9)$$

برای حل آشفتگی میدان جریان نیز از مدل آشفتگی K-ε نوع RNG استفاده شده است و علت انتخاب مدل این بوده است که مدل مزبور یک ترم اضافی نسبت به سایر معادلات آشفتگی در معادله اش دارد که برای حل و گسسته‌سازی معادلات مربوط به آشفتگی جواب دقیق‌تری را به ما می‌دهد. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته (۱۱) به دلیل وجود یک بخش اضافی در مدل RNGk-ε، این مدل از دقت بالاتری نسبت به بقیه روش‌ها برخوردار است. آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی مستطیلی شکل دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج (ایران) در حالات آزاد و نیمه‌مستغرق با مشخصات هندسی طول، ارتفاع و عرض ۸، ۰/۴ و ۰/۳ متر و ۴ دبی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) لیتر بر



شکل ۳. جریان گردابه‌ای در حالت با روزنه و بدون روزنه در نرم‌افزار Flow3D (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. مدل‌های مورد استفاده در نرم‌افزار Flow3d و شبکه‌بندی میدان محاسباتی و اعمال شرایط مرزی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

از طریق روزنه عبور خواهند کرد.

شبکه محاسباتی و اعمال شرایط مرزی

شبکه‌بندی میدان محاسباتی و اعمال شرایط مرزی به مدل سرریزهای کنگره‌ای در شکل ۴ و جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

صحت‌سنجی نتایج عددی و آزمایشگاهی

یکی از راه‌های صحت‌سنجی مقایسه نتایج و همچنین تعیین محدوده درصد خطا بین داده‌های حاصل از نرم‌افزار Flow-3D

شکل ۳ (ب) ناحیه گردابه‌های چرخشی ایجاد شده (جریان متلاطم) در اثر عبور جریان از بین شکاف‌های مثلثی ایجاد شده در بال سرریزهای کنگره‌ای را نشان می‌دهد و شکل ۳ (الف) ناحیه گردابه‌های چرخشی (جریان متلاطم) ایجاد شده در اثر عبور جریان از بین روزنه و شکاف‌های مثلثی ایجاد شده در بال سرریزهای کنگره‌ای را نشان می‌دهد و در حالتی که جریان به صورت آزاد هست روزنه‌ها به خوبی عمل خواهند کرد. و جریان به خوبی از آنها عبور خواهد کرد. همین باعث می‌شود که ارتفاع آب روی تاج سرریز کاهش پیدا کند و در نتیجه ضریب دبی افزایش یابد. همچنین اینکه رسوبات و مواد معلق

جدول ۲. معرفی شرایط مرزی اعمال شده

مرزهای کناری	مرز کف سرریز	مرز سطح آزاد	مرز پایین دست	مرز بالادست	نرم افزار
Wall	Wall	Symmetry	Outflow	Volume flow rate	Flow-3D

شکل ۶ مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی مدل (Rectangular Labyrinth Weir=RLW) را نشان می‌دهد. وقتی که دبی جریان پایین هست و جریان به حالت آزاد از روی سرریزها عبور می‌کند ضریب دبی یک روند صعودی دارد و با افزایش دبی جریان وقتی که جریان عبوری از روی سرریز به حالت نیمه استغراق می‌رسد. ضریب دبی جریان یک روند نزولی را به خود می‌گیرد و بیشترین ضریب دبی را سرریز RLW به خود اختصاص داده است. حال با توجه به شکل ۶ مشخص هست که سرریز RLW2 کارایی بهتری نسبت به بقیه سرریزها دارد زیرا که با ایجاد روزنه در بال سرریز ارتفاع آب روی سرریز کاهش می‌یابد. و در نتیجه ضریب دبی کم می‌شود.

RLW : معرف سرریز کنگره‌ای مربعی به حالت ساده،

RLW1 : معرف سرریز کنگره‌ای مربعی با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز و

RLW2 : معرف سرریز کنگره‌ای مربعی - روزنه همراه با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز است.

شکل ۷ مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی مدل (Trapezoidal Labyrinth Weir =TLW) را نشان می‌دهد. وقتی که دبی جریان پایین هست و جریان به حالت آزاد از روی سرریزها عبور می‌کند ضریب دبی یک روند صعودی دارد. و با افزایش دبی جریان وقتی که جریان عبوری از روی سرریز به حالت نیمه استغراق می‌رسد. ضریب دبی جریان یک روند نزولی را به خود می‌گیرد. بیشترین ضریب دبی را سرریز TLW به خود اختصاص داده است. حال با توجه به شکل ۷ مشخص هست که سرریز TLW2 کارایی بهتری نسبت به بقیه سرریزها دارد. زیرا که با ایجاد روزنه در بال سرریز باعث عبور دبی بیشتری می‌شود. و در نتیجه ضریب دبی افزایش می‌یابد.

با داده‌های آزمایشگاهی استفاده از رابطه ۱۰ است:

$$e = \frac{(Cd_N - Cd_E)}{Cd_N} \times 100 \quad (10)$$

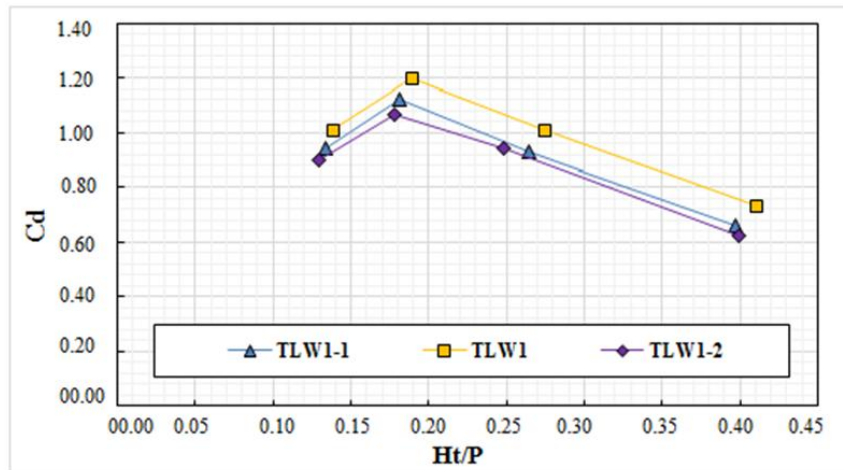
در رابطه فوق e نشانگر درصد خطای نسبی، Cd_N مقدار ضریب دبی حل عددی و Cd_E مقدار ضریب دبی اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق نتایج ضریب دبی حاصل از شبیه سازی نرم افزار مدل‌های مربعی - روزنه، مثلثی - روزنه و دوزنقه‌ای - روزنه با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر ضریب دبی و درصد خطای نسبی حاصل از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای هر سه مدل را نشان می‌دهند.

شکل ۵ مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی مدل (Triangular Labyrinth Weir= TLW1) را نشان می‌دهد. وقتی که دبی جریان پایین هست و جریان به حالت آزاد از روی سرریزها عبور می‌کند ضریب دبی یک روند صعودی دارد و با افزایش دبی جریان وقتی که جریان عبوری از روی سرریز به حالت نیمه استغراق می‌رسد ضریب دبی جریان یک روند نزولی را به خود می‌گیرد. و بیشترین ضریب دبی را سرریز TLW1 به خود اختصاص داده است. حال با توجه به شکل ۶ مشخص هست که سرریز TLW1-2 کارایی بهتری نسبت به بقیه سرریزها دارد زیرا که با ایجاد روزنه در بال سرریز ارتفاع آب روی سرریز کاهش می‌یابد و در نتیجه ضریب دبی کاهش می‌یابد.

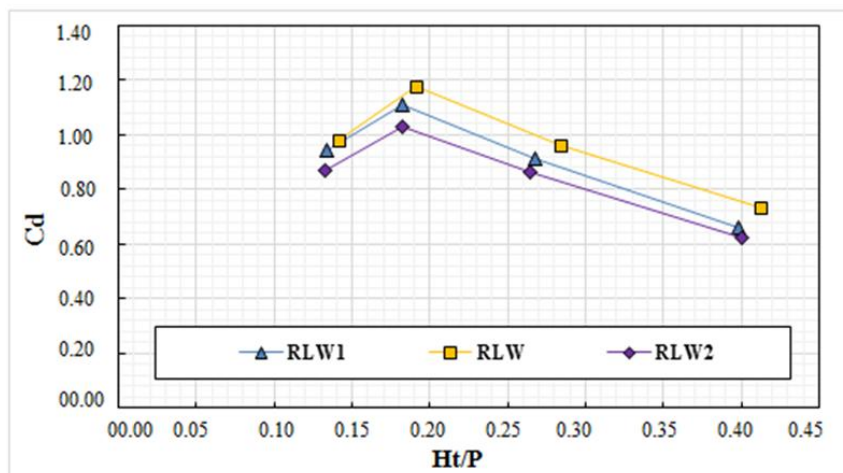
TLW1 : معرف سرریز کنگره‌ای مثلثی به حالت ساده،

TLW1-1 : معرف سرریز کنگره‌ای مثلثی با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز و

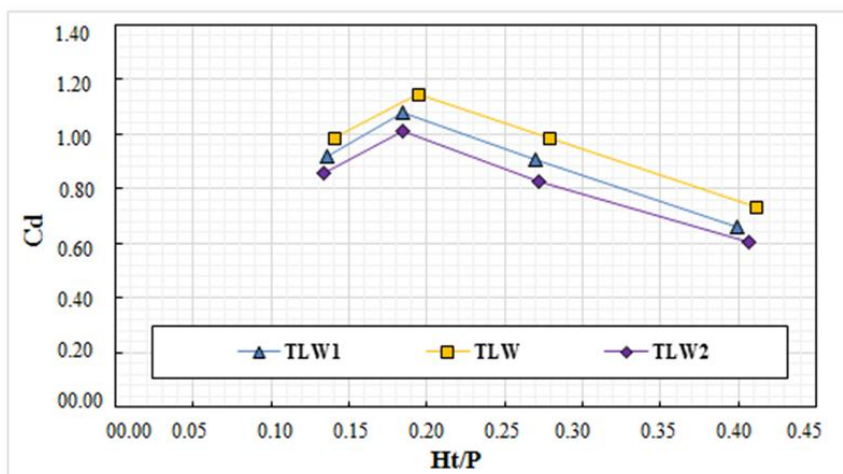
TLW1-2 : معرف سرریز کنگره‌ای مثلثی - روزنه همراه با کنگره‌های مثلثی در بال سرریز است.



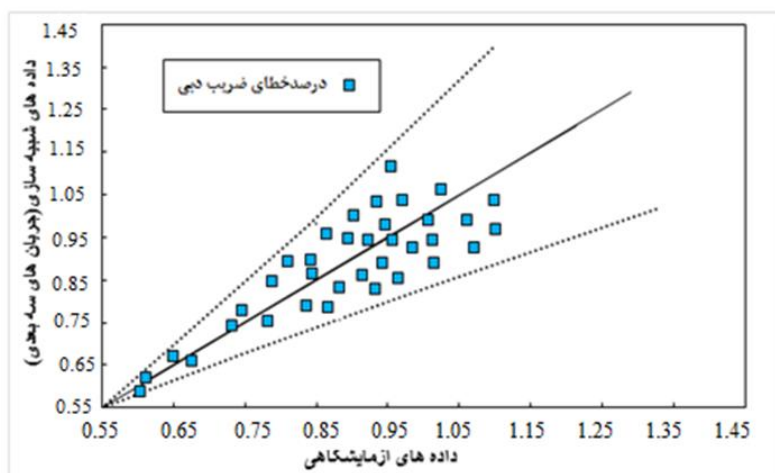
شکل ۵. مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی مدل TLW1 (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۶. مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی مدل RLW (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. مقادیر ضریب دبی حاصل از حل عددی مدل TLW (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. درصد خطای نسبی ضریب دبی برای کل مدل‌ها

H_t/P ثابت توانایی عبور جریان بیشتری را دارد. به همین دلیل به منظور کاهش خطرات ناشی از وقوع سیلاب از سرریزهای کنگره‌ای به جای سرریز خطی استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به صورت ترکیبی سرریز-روزنه، به این نوع سرریزها توانایی عبور دبی بیشتری را می‌دهیم. با ایجاد شکاف مثلی در بال سرریز (شکل ۱) برای سرریز مثلی بیشترین C_d در نسبت H_t/P ثابت حاصل شده است، همچنین بیشترین C_d در نسبت‌های H_t/P پایین، به دست آمده است به طوری که در نسبت‌های پایین چون جریان به حالت آزاد است C_d سرریز روند افزایشی داشته و با افزایش این نسبت (افزایش دبی) چون سرریز حالت نیمه‌مستغرق پیدا می‌کند بنابراین مقادیر C_d برای تمامی سرریزها کاهش می‌یابد. با افزایش دبی روی سرریزها، جریان روی سرریزها به سمت نیمه مستغرق شدن می‌رود و همین باعث می‌شود برای تمامی مدل‌های سرریز، ضرایب دبی به هم نزدیک‌تر شده و روند نزولی داشته باشد.

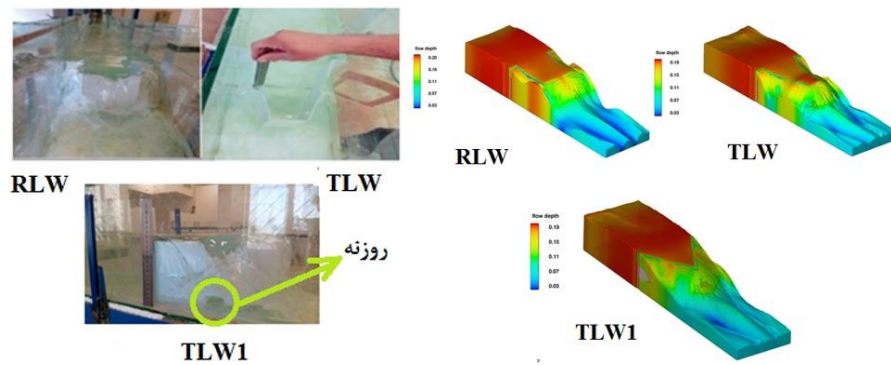
در سرریزهای کنگره‌ای تداخل خطوط جریان و ایجاد گردابه‌های چرخشی (جریان متلاطم) در پایین دست آنها در اثر ریزش جریان از روی سرریز به خصوص در هدهای بالا زیاد است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با ایجاد شکاف‌های مثلی در بال سرریز و روزنه در هدهای پایین در بال سرریزهای (بدنه

TLW: معرف سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای به حالت ساده،
 TLW1: معرف سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با کنگره‌های مثلی در بال سرریز و
 TLW2: معرف سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای -روزنه همراه با کنگره‌های مثلی در بال سرریز است (شکل ۹).

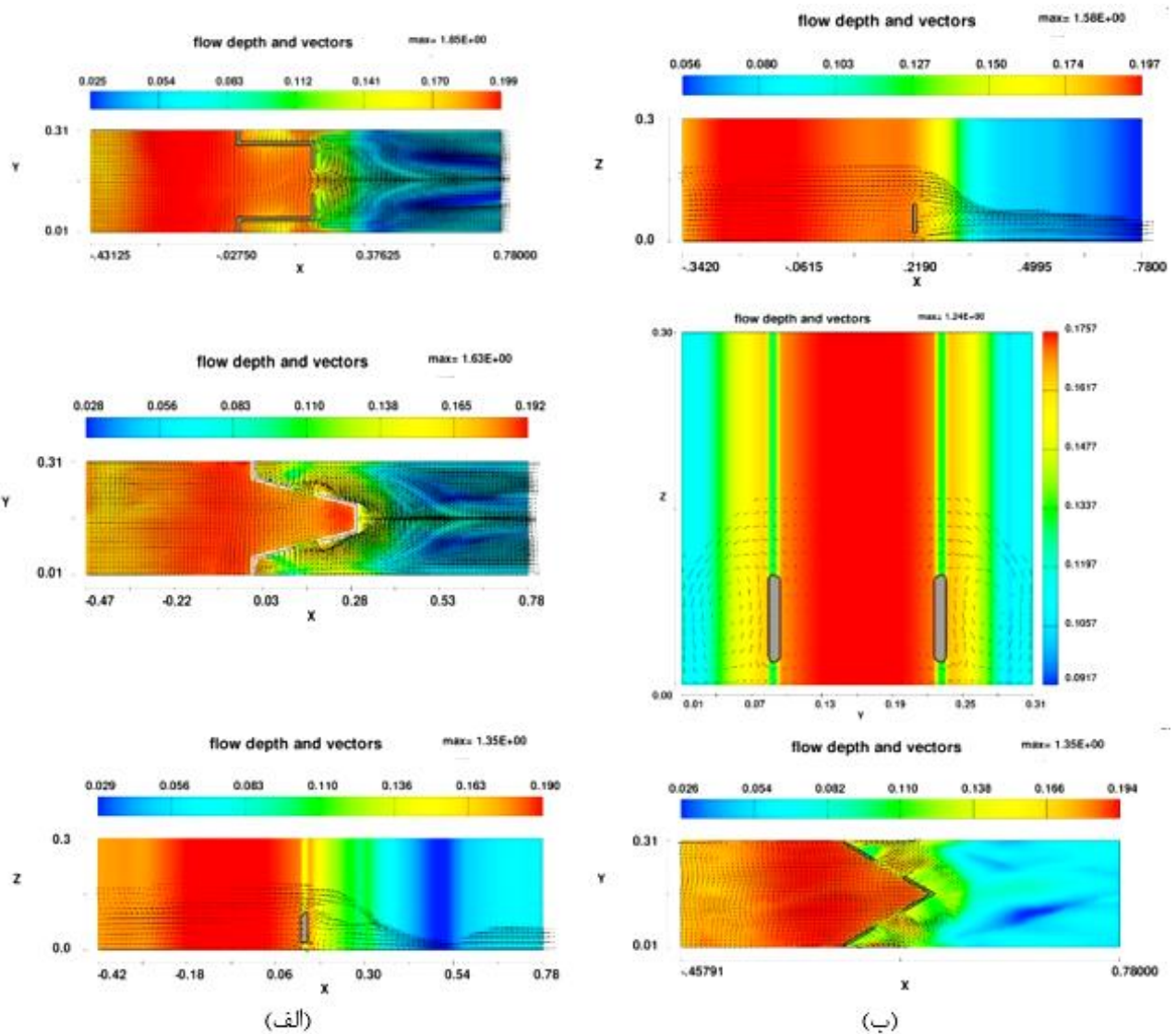
شکل ۸ میزان همبستگی مابین نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی را نشان می‌دهد. در واقع هرچه نقاط به همدیگر نزدیک‌تر باشند همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی بیشتر است. با بررسی درصد خطاهای نسبی C_d مدل‌های شبیه‌سازی مطابق شکل ۸ بیشترین خطا به مقدار ۵/۸۷ درصد است و با توجه به اینکه برای تمامی مدل‌ها درصد خطای C_d زیر ۱۰ درصد است می‌توان به این نتیجه رسید که میزان همبستگی بین نتایج حل عددی و آزمایشگاهی قابل قبول است.

تأثیر روزنه مستطیلی بر ضریب دبی عبوری در سرریزهای کنگره‌ای

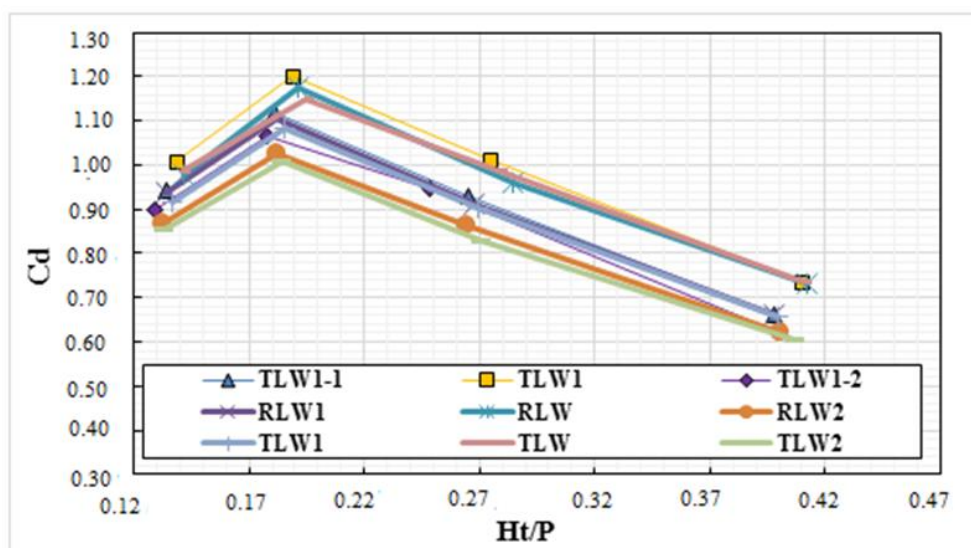
سرریزهای کنگره‌ای در نرم‌افزار Flow-3D برای حداکثر جریان عبوری ۲۰ لیتر بر ثانیه مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. در سرریزهای کنگره‌ای با افزایش طول مؤثر سرریز در عرض مشخص نسبت به سرریزهای خطی در پلان با نسبت



شکل ۹. جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای در حالات نرم‌افزاری و آزمایشگاهی به صورت سه بعدی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. جریان عبوری از شکاف‌های مثلثی و روزنه ایجاد شده در سرریزهای کنگره‌ای (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۱. مقایسه ضرایب دبی به دست آمده از کل مدل‌ها

جدول ۳. مقایسه ضریب دبی سرریز کنگره‌ای پژوهشگران مختلف

نویسنده یا محقق	نوع سرریز کنگره‌ای	تعداد سیکل	محدوده Hd/P	دبی جریان (l/s)	ضریب دبی
مطالعه حاضر	سرریز کنگره‌ای مثلثی روزنه‌دار (سرریز لبه‌تیز)	۱	۰/۱۴ - ۰/۴۲	۵ - ۲۰	۰/۶۷ - ۰/۹
امیر قادری و همکاران (۲۰۲۰)	سرریز لبه پهن روزنه‌دار	۴	۰/۰۵ - ۰/۴	۵ - ۳۰	۰/۶۶ - ۰/۹۵

سرریز کنگره‌ای مثلثی (TLW1) بیشترین ضریب دبی و کمترین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای-روزنه (TLW2) را به خود اختصاص داده است و با افزایش نسبت Ht/P برای تمامی مدل‌ها ضریب دبی افزایش می‌یابد.

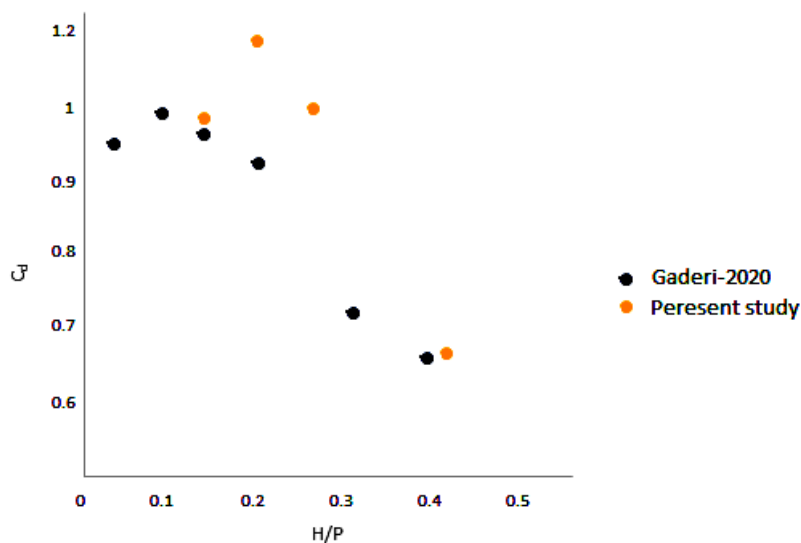
مقایسه نتایج تحقیق حاضر با سایر پژوهشگران

برخی مشخصات و ویژگی‌های تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران پیشین و تحقیق حاضر در جدول ۳ و شکل ۱۲ ارائه شده است.

مقایسه نتایج در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که از لحاظ روند تغییرات C_d نسبت به H/P ، نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات قبل از این مطابقت دارد (۴ و ۶).

سرریز کنگره‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده است موجب می‌شود که جریان از بین شکاف‌ها عبور کند. با این روش ارتفاع سقوط جریان ریزشی کاهش می‌شود. همین باعث می‌شود که تداخل خطوط جریان کمتری ایجاد شود. همچنین این شکاف‌ها باعث افزایش طول مؤثر تاج سرریز و همچنین کاهش هد روی تاج سرریز کنگره‌ای و ناحیه گردابه‌های چرخشی می‌شود. لازم به ذکر است که کارایی روزنه تا زمانی است که جریان به حالت آزاد است. در شکل ۱۰ (الف) جریان عبوری از روری سرریزهای کنگره‌ای و شکل ۱۰ (ب) جریان عبوری از روزنه را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۱ ضرایب دبی به دست آمده از کل مدل‌هایی که به حالات جریان آزاد و نیمه مستغرق اندازه‌گیری شده‌اند ارائه شده است. مشاهده می‌شود که از بین تمامی مدل‌ها،



شکل ۱۲. نمودار مقایسه نتایج این تحقیق با پژوهشگران دیگر

نتیجه گیری

مثلی - روزنه بیشترین ضریب دبی را به خود اختصاص داده و با افزایش نسبت H_t/P برای تمامی مدل‌ها ضریب دبی افزایش می‌یابد به این صورت که ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای مثلی - روزنه (TLW1-2) به ترتیب بزرگ‌تر از سرریز کنگره‌ای مربعی - روزنه (RLW2) و سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای - روزنه (TLW2) است. و با بررسی درصد خطاهای نسبی ضریب دبی مدل‌های شبیه‌سازی مطابق شکل ۷ بیشترین خطا به مقدار ۵/۸۷ درصد است و با توجه به اینکه برای تمامی مدل‌ها درصد خطای Cd زیر ۱۰ درصد است می‌توان به این نتیجه رسید که نتایج حل عددی و آزمایشگاهی به صورت قابل قبول هستند.

در سرریزهای کنگره‌ای با افزایش طول مؤثر سرریز در عرض مشخص نسبت به سرریزهای خطی در پلان در نسبت H_t/P ثابت توانایی عبور جریان بیشتری را دارد. و به همین دلیل به منظور کاهش خطرات ناشی از وقوع سیلاب از سرریزهای کنگره‌ای به جای سرریز خطی استفاده می‌کنند. شکل ۱۱ ضرایب دبی به دست آمده از کل مدل‌ها را نشان می‌دهد. مشخص هست که از بین تمامی مدل‌ها، سرریز کنگره‌ای مثلی به حالت ساده (TLW1) بیشترین ضریب دبی را به خود اختصاص داده و با افزایش نسبت H_t/P برای تمامی مدل‌ها به دلیل نیمه‌مستغرق شدن سرریز ضریب دبی کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که از بین تمامی مدل‌ها، سرریز کنگره‌ای

منابع مورد استفاده

1. Arab Ameri, M. and M. Barfei. 2016. Numerical solutions of Navier-stokes equation using radial basis functions. *Iranian Journal of Marine Science and Technology* 3(1): 47-53. (In Farsi).
2. Baluchi, B. and M. Zainivand. 2012. Experimental investigation on discharge coefficient for combined structure of weir-gate under flood conditions. *Journal of Water and Soil Science* 22(2): 152-164. (In Farsi).
3. Daneshfaraz, R., O. Minaei, J. Abraham and S. Dadashi. 2019. 3-D Numerical simulation of water flow over a broad-crested weir with openings, ISH. *Journal of Hydraulic Engineering* <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1581098>.
4. Esmaeili Varki, M. and M. Razavizadeh. 2014. Study of hydraulic features of flow over labyrinth weir with semi-circular plan form. *Journal of Water and Soil* 27(1): 224-234. (In Farsi).

5. Ghaderi, A., R. Daneshfaraz, M. Dasineh and S. Di Francesco. 2020. Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal–triangular labyrinth weirs. *Water* 12(7): 1-18. <https://doi.org/10.3390/w12071992>.
6. Ghaderi, A., R. Daneshfaraz, S. Abbasi and J. Abraham. 2020. Numerical analysis of the hydraulic characteristics of modified labyrinth weirs. *International Journal of Energy and Water Resources* 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00082-5>.
7. Gharahgezlou, M., M. Masoudian, A. Salehi Neishabouri, F. Naderi and A. Souri. 2012. Laboratory investigation of combination of cylindrical and semi cylindrical weir-gate model in a small canal. *Journal of Water and Soil Conservation* 20(1): 185-195. (In Farsi).
8. Ghasemzadeh, F. 2017. Simulation of Hydraulic Problems in Flow3D Software. Noavar Publications, Iran. (In Farsi).
9. Hayawi, H. A. M., A. A. G. Yahia and G. A. M. Hayawi. 2008. Free combined flow over a triangular weir and under rectangular gate. *Damascus University Journal* 24(1): 9-22.
10. Heydarpour, M., H. Razavian and H. Hosseini. 2014. Determination of discharge coefficient for the combined model of semicircle weir and sluice gate in the circular channel. *Iranian Water Research Journal* 7(13): 149-155.
11. Kahe, M., A. Dehghani, M. Kahe and A. Zahiri. 2015. Simulation of flow hydraulic in combined weir – gate structure by flow3D. *Journal of Water and Soil Conservation* 22(1): 111-129.
12. Masoudian, M., M. Gharahgezlou, R. Fendreski and F. Naderi. 2013. Laboratory investigation of flow over and under a submerged cylindrical weir-gate in small canals. *Journal of Water and Soil Conservation* 21(3): 221-235.
13. Masoudian, M., R. Fendereski and M. Gharahgezlou. 2013. Determination of discharge coefficient for combined flow over a cylindrical weir and submerged gate and its correlation with separate flow over the weir and under the gate. *Journal Mangement System* 6(16): 51-62. (In Farsi).
14. Pashazadeh, M., M. Heydarpour, H. Saghaeian Nejad and H. Razavian. 2016. Investigation of simultaneous flow under sluice gate and over trapezoidal weir in circular channel. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Researches* 17(67): 33-46. (In Farsi).
15. Rezaie, M., A. R. Emadi and G. H. Aghajan Mazandarani. 2016. Experimental analysis of rectangular labyrinth weirs. *Journal of Water and Soil* 29(6): 1438-1446. (In Farsi).
16. Samani, J. M. V. and M. Mazaheri. 2009. Combined Flow over Weir and under Gate. *Hydraulic Engineering Journal* 135(3): 224-227.

Numerical and Experimental Study of the Combination of Labyrinth Weir with Orifice and its Effect on Discharge Coefficient

A. R. Bahreh Bar^{1,2}, M. Heidarnejad^{2*}, A. R. Masjedi² and A. Bordbar²

(Received: June 5-2020; Accepted: September 29-2020)

Abstract

The combination of a labyrinth weir with an orifice is a proper solution for floating material to pass over the weir and transfer sediment through the orifice. Additionally, creating a slot in the overflow wing leads to higher discharge. This study examined four discharges (5, 10, 15, and 20 liters per second) with channel width and height of 30 and 40 cm in trapezoidal-orifice, square-orifice, and triangular-orifice labyrinth weirs in the laboratory and using Flow3D with RNG k-epsilon ($k-\epsilon$) turbulence model, the results were compared with one another. Comparing the discharge flow over weirs and measuring the discharge coefficient among the mentioned models showed that the triangular-orifice labyrinth weir had the highest discharge rate. Moreover, the increased Ht/P ratio (Ht represents total hydraulic head; P denotes weir height) for all models resulted in the increased discharge coefficient. Due to the efficiency of this type of weirs, the highest discharge coefficient was obtained at low Ht/P ratios. At lower ratios, since there was free flow, the coefficient of weir discharge increased, and as the ratio increased, the weir was partially submerged. Furthermore, for the weir design, the best Ht/P ratio was between 0.13 to 0.41, and the maximum discharge coefficient ($C_d = 1.2$) was within this range.

Keywords: Orifice-weir, Discharge coefficient, Effective length, Flow3D

1. Department of Water Science Engineering, Khuzestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran.

2. Department of Water Science Engineering, Ahwaz Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran.

Corresponding author, Email: mo_he3197@yahoo.com.