



Research Article



Numerical analysis of flow hydraulics in a culvert-weir system with a circular crest and gate

Donya Heidari¹, Elham Izadinia^{2*}

1 Master's Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: elham.izadinia@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 16 Oct 2024

Accepted: 09 Dec 2024

Published: 24 Dec 2024

Abstract

Weirs are essential components in water engineering projects, effectively managing surface flows. Among these structures, circular-crested weirs are particularly popular due to their simple design and high flow capacity. This study primarily focuses on investigating the hydraulic characteristics of flow in a culvert-weir system with a circular crest and analyzing the effects of critical parameters such as crest radius and gate opening on the discharge coefficient. For this purpose, velocity profiles, water surface levels, and other flow parameters were analyzed as the main variables. Various models of the culvert-weir system with circular crests were designed and meshed using Gambit software, then imported to Fluent software for detailed computational fluid dynamics (CFD) simulations. The discharge coefficients of the weir crest, gate, and the entire structure were calculated and compared under different water load conditions and independent parameters. The results indicate that the discharge coefficient of the weir crest is higher when a gate is present compared to a gate-free condition. Furthermore, the discharge coefficient increases as the crest radius decreases and the gate opening expands. Additionally, the comparison between numerical simulation results and reliable experimental data shows a high level of accuracy and satisfactory agreement, validating the numerical modeling approach. This study provides precise data and practical analyses to improve the design and performance of combined hydraulic structures.

Keywords: Circular Weir, Computational Fluid Dynamics (CFD), Culvert-Weir Combination, Flow Hydraulics, Numerical Simulation



تحلیل عددی هیدرولیک جریان در سیستم کالورت-سرریز تاج‌دایره‌ای همراه با دریچه

دنیا حیدری^۱، الهام ایزدی‌نیا^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: elham.izadnia@gmail.com

© The Author(s) 2024

چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۵

چکیده

سرریزها نقشی حیاتی در پروژه‌های مهندسی آب دارند و به مدیریت جریان‌های سطحی کمک می‌کنند. یکی از انواع پرکاربرد این سازه‌ها، سرریز با تاج‌دایره‌ای است که به دلیل طراحی ساده و توانایی بالا در عبور جریان، در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در سیستم کالورت-سرریز با تاج‌دایره‌ای و تحلیل تأثیر پارامترهای کلیدی مانند شعاع تاج و بازشدگی دریچه بر ضریب دبی است. به این منظور، پروفیل‌های سرعت، سطح آب، و سایر پارامترهای جریان به عنوان متغیرهای اصلی تحلیل شده‌اند. مدل‌های مختلف سیستم کالورت-سرریز با تاج‌دایره‌ای در نرم‌افزار گمبیت طراحی و شبکه‌بندی شده و سپس به نرم‌افزار فلونت منتقل شده‌اند تا شبیه‌سازی‌های دقیق دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) صورت گیرد. در این مطالعه، ضریب دبی تاج سرریز، دریچه، و کل سازه سرریز برای مقادیر مختلف بار آبی و پارامترهای متغیر محاسبه و مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب دبی تاج سرریز در حضور دریچه بیشتر از حالت بدون دریچه بوده و با کاهش شعاع تاج و افزایش بازشدگی دریچه، ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین، مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های آزمایشگاهی معتبر نشان‌دهنده مطابقت قابل قبول و دقت بالای مدل‌سازی عددی است. این تحقیق تلاش دارد تا با ارائه داده‌های دقیق و تحلیل‌های کاربردی، راهکارهایی برای بهبود طراحی و عملکرد سازه‌های آبی ترکیبی ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: سرریز دایره‌ای، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، کالورت-سرریز ترکیبی، هیدرولیک جریان، شبیه‌سازی عددی

۱- مقدمه

سرریزهای تاج‌دایره‌ای، که به عنوان یکی از انواع سرریزهای لبه‌باریک شناخته می‌شوند، از جمله سازه‌های هیدرولیکی پرکاربرد در پروژه‌های مهندسی آب به شمار می‌روند. این نوع سرریزها در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، قبل از معرفی سرریزهای اوجی شکل، به طور وسیعی استفاده می‌شدند و به دلیل ویژگی‌های خاص خود در بسیاری از کاربردهای مدرن حضور دارند. در طول قرن نوزدهم، با افزایش تقاضا برای ظرفیت‌های بالاتر در تخلیه آب از سازه‌ها، طراحی سرریزهای تاج‌دایره‌ای مورد توجه قرار گرفت و این تلاش‌ها به شکوفایی این نوع سرریزها منجر شد (Ghobadian et al. 2012). سرریزهای تاج‌دایره‌ای و استوانه‌ای در مقایسه با دیگر سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان، از مزایای قابل توجهی برخوردار هستند. این مزایا شامل ایجاد الگوی پایدار جریان ریزشی، عبور آسان اجسام شناور بدون اختلال در جریان، طراحی ساده و قابلیت انعطاف، ضریب جریان بالا و پایداری جریان است. از دیگر ویژگی‌های برجسته این سرریزها می‌توان به قابلیت طراحی در مقیاس‌های بزرگ و کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری اشاره کرد. به همین دلیل، سرریزهای تاج‌دایره‌ای به‌طور گسترده‌ای در مهندسی هیدرولیک به عنوان ابزارهایی برای اندازه‌گیری جریان و سازه‌های تخلیه آب در پروژه‌های مختلف به کار می‌روند. این سرریزها به‌ویژه در کنترل سطح آب در کانال‌ها، مخازن و همچنین در سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب بسیار موثر هستند (Beigi Poor & Bina, 2005). به طور خلاصه، سرریز تاج‌دایره‌ای شامل تاجی است که به شکل یک قطاع از دایره با شعاع R_b طراحی شده و به صورت عمود بر جریان قرار گرفته است، به طوری که دیواره‌های بالادست و پایین‌دست آن با افق زاویه‌های α و β تشکیل می‌دهند. رابطه ارتفاع - دبی در واحد عرض جریان (q) برای این سرریزهای لبه‌باریک به صورت زیر نوشته می‌شود. در اکثر تحقیقات مرتبط با سرریزها، ضریب دبی (C_d) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gH_1^3} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، q دبی در واحد عرض در بالادست سرریز، g شتاب ثقل، H_1 بار آبی کل نسبت به تاج سرریز و C_d ضریب دبی سرریز است. شکل (۱)، جریان عبوری از روی سرریز را نشان می‌دهد که در آن R_b قطاعی از دایره به شعاع دیواره‌های بالادست و پایین‌دست آن است که با افق زاویه‌های α و β می‌سازد و به صورت عمود بر جهت جریان نصب می‌شود. H_1 بار آبی کل نسبت به تاج سرریز و D بازشدگی دریچه است.

شکل ۱- مقطع یک سرریز تاج‌دایره‌ای

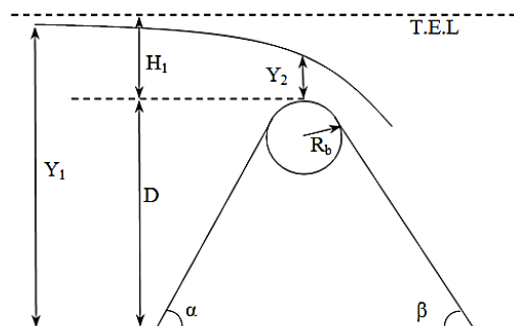


Fig 1. Cross-section of a circular-crested weir

یکی از روش‌های مهم و رایج برای تحلیل رفتار سیال در سرریزها، استفاده از مدل‌های فیزیکی است. این مدل‌ها می‌توانند در صورتی که شرایط مدل‌سازی به‌دقت شبیه‌سازی شوند، نتایج دقیقی ارائه دهند که در بسیاری از موارد قابل استناد هستند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی استفاده از مدل‌های فیزیکی در پروژه‌های مهندسی، زمان طولانی و هزینه‌های بالا است. به‌عنوان مثال، برای بررسی پدیده‌هایی پیچیده مانند کاویتاسیون، ممکن است مدت زمان زیادی نیاز باشد و حتی در برخی از مسائل، مدل‌سازی شرایط محیطی با دماهای بسیار بالا، مانند ۴۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، ممکن است دشوار یا حتی غیرممکن باشد. این موضوع باعث می‌شود که استفاده از روش‌های عددی به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد، امکان‌پذیر شود. روش‌های عددی، به‌ویژه روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، این امکان را فراهم می‌آورند که در مدت زمان کوتاه‌تری به تحلیل سیستم‌های پیچیده پرداخته شود. این روش‌ها به محققان اجازه می‌دهند که گزینه‌های مختلف را بررسی کرده و آن‌ها را با هزینه‌های بسیار کمتر نسبت به آزمایش‌های فیزیکی ارزیابی کنند. علاوه بر سرعت بیشتر، روش‌های عددی می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری از جمله تغییرات سرعت، فشار و دما را در سراسر محدوده موردنظر ارائه دهند. این در حالی است که جمع‌آوری چنین داده‌هایی از طریق آزمایش‌های فیزیکی معمولاً پیچیده، زمان‌بر و گاهی غیرعملی است.

یکی از مزایای برجسته استفاده از روش‌های CFD نسبت به روش‌های تجربی عبارت است از:

کاهش چشم‌گیر در زمان و هزینه طراحی‌های جدید: با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، می‌توان طراحی‌ها و آزمایش‌های مختلف را بدون نیاز به ساخت مدل‌های فیزیکی و انجام آزمایش‌های پیچیده و پرهزینه انجام داد.

امکان بررسی سیستم‌هایی که آزمایش بر روی آن‌ها دشوار یا غیرممکن است: برای مثال، تحلیل سیستم‌های بسیار بزرگ یا سیستم‌هایی که در شرایط خاصی فعالیت می‌کنند، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی امکان‌پذیر است.

قابلیت مطالعه سیستم‌ها در شرایط غیرعادی یا تصادفی: به کمک روش‌های CFD می‌توان به شبیه‌سازی شرایط غیرمنتظره و یا حالت‌های ناپایدار که در آزمایش‌های فیزیکی به‌راحتی قابل بررسی نیستند، پرداخته و رفتار آن‌ها را تحلیل کرد.

جزئیات بسیار بالای نتایج: روش‌های عددی به‌ویژه به محققان این امکان را می‌دهند که در سطح بسیار دقیقی از نتایج، از جمله پروفایل‌های سرعت، فشار و دما، تجزیه و تحلیل انجام دهند.

تحقیقات زیادی تاکنون روی سرریزهای تاج‌دایره‌ای انجام شده است. (Ramamurthy & Vo, 1993) به بررسی تأثیر زاویه وجه بالادست و پایین‌دست و شعاع تاج سرریز بر ضریب دبی پرداختند. (Negm et al., 2002) ضریب دبی و ویژگی‌های هیدرولیکی سرریز لبه‌تیز دریچه‌دار با فشردگی جانبی را بررسی کردند. (Bhajantri et al., 2006) مدل دوبعدی از سرریز تاج‌دایره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و توزیع سرعت، فشار و ضریب دبی را با نتایج مدل‌های فیزیکی مقایسه کردند که تطابق خوبی داشت. (Samani, Mazaheri, 2009) جریان مستغرق و نیمه‌مستغرق را برای سرریز لبه‌تیز دریچه‌دار بدون انقباض جانبی بررسی کردند و نتایج دقیق مدل‌های آزمایشگاهی را برای تعیین عمق آب و رابطه دبی تاج و دریچه مشاهده کردند. (Schmocker et al., 2011) تأثیر زاویه وجه بالا و پایین‌دست، جریان آزاد و مستغرق، و شعاع تاج سرریز بر ضریب دبی و ویژگی‌های هیدرولیکی را با استفاده از ۲۰ مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. (Severi et al., 2014) نیز تغییرات ضریب دبی سرریز استوانه‌ای دریچه‌دار در شرایط مختلف جریان آزاد، ترکیبی، و زیرگذری را مطالعه کردند.

کالورت یا آبرو زیرزمینی سازه متداولی است که برای عبور جریان از زیر جاده، بزرگراه، خاکریز، مناطق مسکونی و سرریز استفاده می‌شود. کالورت‌ها از لحاظ شکل مقطع به پنج دسته مستطیلی، مربعی، دایره‌ای، بیضی و نیم‌بیضی تقسیم‌بندی می‌شوند. انتخاب شکل کالورت به عواملی مانند نوع و محل کاربرد و محدودیت اجرا بستگی دارد. متداول‌ترین نوع کالورت مستطیلی است. طراحی کالورت متأثر از عوامل مختلفی از جمله عملکرد هیدرولیکی کالورت، استحکام بنا، هزینه‌های کلی سازه و نگهداری و سایر موارد است؛ به همین منظور همیشه طراحی یک کالورت ایده‌آل مد نظر است. هدف این تحقیق بررسی شرایط هیدرولیکی جریان با استفاده از مدل‌سازی عددی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی جریان به روش CFD

نرم‌افزار مورد استفاده از یک الگوریتم کلی برای شبیه‌سازی پیروی می‌کند که شامل مراحل زیر است:

تعیین هندسه‌ی جریان: در این مرحله، سیال و مسیر حرکت آن مدل‌سازی می‌شود. این مدل‌سازی می‌تواند در محیط‌هایی مانند ANSYS Design Modeler یا گمبیت انجام شود.

تولید شبکه یا المان: برای حل عددی معادلات سیال از تکنیک‌های ریاضی پیشرفته استفاده می‌شود. نرم‌افزار فلوئنت از روش حجم محدود یا کنترل حجم بهره می‌برد. تولید شبکه به دقت مسئله و نوع هندسه جریان وابسته است و نقش کلیدی در حل دقیق مسئله ایفا می‌کند. این مرحله می‌تواند در نرم‌افزارهایی مانند ANSYS Icem CFD یا گمبیت انجام شود. خروجی این نرم‌افزارها با فرمت msh به عنوان ورودی در فلوئنت استفاده می‌شود.

اعمال شرایط مرزی: در این مرحله مدل جریان (آرام یا آشفته)، ویژگی‌های فیزیکی سیال، فازهای جریان، شرایط مرزی روی سطوح و تنظیمات مربوط به مش دینامیکی مشخص می‌شود.

حل مسئله: تنظیمات مربوط به فرآیند حل در این مرحله انجام می‌شود.

پردازش نتایج: در این مرحله، تمام نتایج محاسباتی و اهداف موردنظر قابل بررسی هستند. این شامل مشاهده‌ی کانتورهای مختلف، خطوط جریان، بردارهای نرمال، استخراج نمودارها و ساخت انیمیشن از مدل جریان است. پردازش نتایج می‌تواند در نرم‌افزار فلوئنت یا محیط‌های ANSYS Workbench و CFD Post انجام شود.

در تحقیق حاضر، برای تعیین سطح آزاد جریان و محاسبه عمق آب بالادست، از مدل $k - \epsilon$ به دلیل سرعت همگرایی و دقت بالاتر استفاده شد. همچنین، برای برداشت پروفیل‌های سرعت، از مدل Reynolds Stress بهره گرفته شد. مقاطع پروفیل سرعت در طول کانال و سرریز با استفاده از قابلیت Iso Surface نرم‌افزار تعیین شدند و فاصله‌ی این مقاطع با نزدیک شدن به سرریز، به دلیل افزایش تغییرات، کاهش یافت. اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از روی تاج و کالورت سازه با استفاده از پروفیل سرعت و انتگرال‌گیری انجام شد (Izadina & Heidari., 2023).

مدل $k - \varepsilon$ یکی از پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین مدل‌های آشفتگی در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته به کار می‌رود. این مدل بر اساس حل دو معادله برای توصیف رفتار آشفتگی در جریان طراحی شده است:

K : نشان‌دهنده انرژی جنبشی آشفتگی است که معیاری برای اندازه‌گیری شدت آشفتگی در جریان است.

(ε): نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است که نرخ تبدیل انرژی جنبشی آشفتگی به انرژی داخلی را نشان می‌دهد (Izadinia et al., 2022).

۲-۱-۱- تأثیر مدل $(k - \varepsilon)$

دقت بیشتر در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته: این مدل با حل معادلاتی برای انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف آن، توزیع آشفتگی را در جریان با دقت بیشتری محاسبه می‌کند. در جریان‌هایی با تغییرات شدید سرعت، مانند جریان روی سرریزها یا پشت موانع، مدل $k - \varepsilon$ به دلیل دقت بیشترش می‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد.

کاربرد در جریان‌های آزاد و نیمه‌مستغرق: این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های آزاد، مانند جریان‌های عبوری از سرریزها، که شامل ناحیه‌های مختلف از جمله ناحیه‌های جداشده و بازگردشی هستند، مناسب است. استفاده از مدل $k - \varepsilon$ به محققان امکان می‌دهد که رفتار جریان در نزدیکی سازه‌ها مانند سرریزها را با دقت شبیه‌سازی کنند.

همگرایی سریع‌تر: مدل $k - \varepsilon$ نسبت به برخی دیگر از مدل‌های آشفتگی، مانند مدل‌های پیچیده‌تر $Reynolds Stress$ ، از همگرایی سریع‌تری برخوردار است. این ویژگی به معنای کاهش زمان محاسبات است، به‌ویژه در مسائلی که حجم محاسبات زیاد است.

سادگی و پایداری: مدل $k - \varepsilon$ به دلیل ساختار ساده‌تر خود نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی، پایداری بالاتری دارد و به راحتی می‌تواند در شرایط مختلف جریان به کار گرفته شود. این ویژگی باعث می‌شود که این مدل در شبیه‌سازی‌های مهندسی سیالات به طور گسترده استفاده شود.

محدودیت‌ها: مدل $k - \varepsilon$ در شبیه‌سازی جریان‌های نزدیک به دیواره (جریان‌های لایه مرزی) یا جریان‌های دارای تغییرات شدید در مقیاس کوچک، مانند جریان‌های با گردابه‌های پیچیده یا جریان‌هایی که به شدت وابسته به شرایط مرزی هستند، دقت کمتری دارد. برای این‌گونه مسائل، مدل‌های پیچیده‌تری مانند $k - \varepsilon$ یا $Reynolds Stress$ ترجیح داده می‌شوند (Izadinia et al., 2023).

۲-۲- مدل‌های مورد بررسی

(Ramamurthy & Vo, 1993) و (Schmocker et al., 2011) در پژوهش‌های خود نشان دادند که زاویه وجه بالادست سرریز تاج‌دایره‌ای تأثیر چشم‌گیری در تغییرات ضریب دبی سرریز ندارد از این رو در تحقیق حاضر شعاع تاج سرریز و ارتفاع دریچه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. گروه A با سه شعاع تاج مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و ۶ دبی ۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰ و ۳۸۰ لیتر بر ثانیه و گروه B با ۴ ارتفاع دریچه مختلف ۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و ۶ دبی در واحد عرض مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامتر ثابت در این گروه شعاع تاج ۱۰ سانتی‌متر و زاویه وجه پایین‌دست ۴۵ درجه است، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. پارامتر ثابت در مدل‌های A ارتفاع کالورت ۵ سانتی‌متر و زاویه وجه پایین‌دست ۴۵ درجه است. مشخصات مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۲- طراحی هندسه سازه در نرم افزار گمبیت

برای طراحی هندسه سرریز-دریچه و کانال در نرم‌افزار گمبیت ابتدا از منوی Operation در سمت راست نرم‌افزار گزینه Geometry را انتخاب کرده و سپس برای طراحی دو بعدی از سه گزینه Vertex, Edge و Face به ترتیب برای ایجاد نقطه، خط و سطح استفاده شده است. در زیر مجموعه گزینه Face که برای طراحی سطح استفاده شده گزینه‌های تبدیل خطوط به سطح، ایجاد اشکال هندسی و اجتماع و اشتراک‌گیری از سطوح نیز در طراحی دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۲) کلیه گزینه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

شکل ۲- جزئیات پنجره Geometry برای طراحی هندسی سرریز-دریچه و حجم کنترل

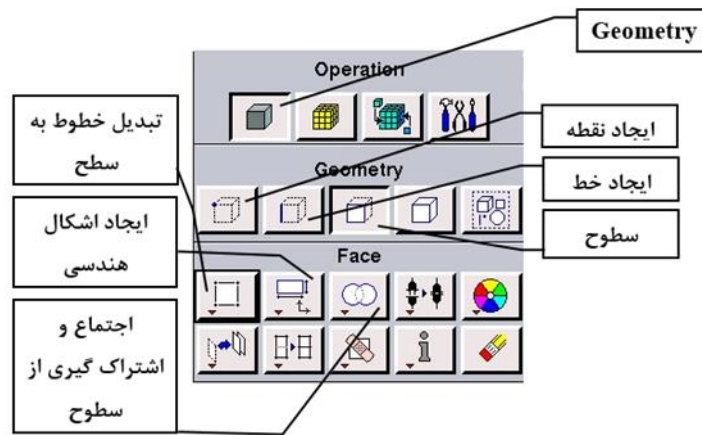


Fig 2. Details of the Geometry window for designing the geometry of the weir-gate and control volume

۳-۲-۱- مش‌بندی هندسه سازه در نرم افزار گمبیت

برای مش‌بندی هندسه سرریز-دریچه و کانال در نرم‌افزار گمبیت ابتدا از منوی Operation در سمت راست نرم‌افزار گزینه Mesh را انتخاب کرده و سپس از گزینه Face برای مش‌بندی سطح استفاده شده است. با انتخاب گزینه Mesh Face در زیر مجموعه گزینه Face شکل و نوع مش‌بندی در قسمت Element و Type به ترتیب Quad و Pava انتخاب شده و اندازه‌ی چشمه‌ها در قسمت Spacing تعیین شده است. در شکل (۳) کلیه گزینه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

۳-۲-۲- تعیین شرایط مرزی در نرم‌افزار گمبیت

برای تعیین شرایط مرزی حجم کنترل در نرم‌افزار گمبیت ابتدا از منوی Operation در سمت راست نرم‌افزار گزینه Zones را انتخاب کرده و سپس از گزینه Specify Boundary Types برای تعیین شرایط مرزی استفاده شده است. در مرحله بعد ابتدا لبه‌ی مورد نظر را انتخاب کرده و سپس در قسمت Type نوع شرط مرزی برای لبه‌ی مورد نظر تعیین شده است. در شکل (۴) کلیه گزینه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

شکل ۳- جزئیات پنجره Mesh برای مش‌بندی سرریز- دریاچه و حجم کنترل

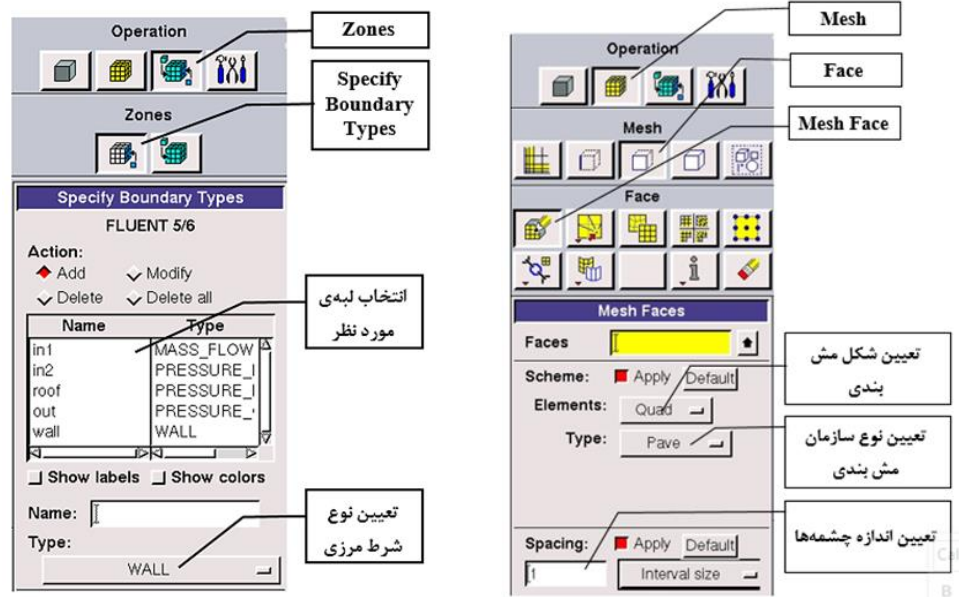


Fig 4. Details of the Zones window for defining boundary conditions of the control volume

Fig 3. Details of the Mesh window for meshing the weir-gate and control volume

۲-۴- صحت‌سنجی مدل عددی

برای صحت‌سنجی این پژوهش از مدل‌سازی عددی ۵ مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در مقالات بین‌المللی استفاده شده است. مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقالات در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی دقت محاسبه ضریب دبی سرریز تاج‌دایره‌ای از دو مدل آزمایشگاهی مورد بررسی توسط (Ramamurthy & Vo, 1993) استفاده شد. دو سرریز تاج‌دایره‌ای به شعاع‌های ۱۵/۲ و ۲/۵۴ سانتی‌متر به صورت عددی در نرم‌افزار فلونت مدل‌سازی شد. مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

برای صحت‌سنجی توانایی مدل‌سازی سرریز و دریاچه توسط نرم‌افزار فلونت از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی توسط (Samani & Mazaheri, 2009) استفاده شد. در این بررسی سرریز لبه‌تیز دریاچه‌دار بدون فشردگی جانبی در نرم‌افزار فلونت مدل‌سازی شد. مقایسه عمق آب بالادست محاسبه شده در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز به ترتیب در فاصله‌های دو برابر و هشت برابر نسبت به مرکز سرریز اندازه‌گیری شدند (Sing and Kumar, 2022).

برای صحت‌سنجی دقت محاسبه پروفیل سرعت و به دنبال آن پروفیل پارامترهای آشفتگی و فشار از دو مدل آزمایشگاهی مورد بررسی توسط (Bagheri & Heydarpour, 2010) استفاده شد. در این بررسی سرریز تاج‌دایره‌ای به شعاع ۸/۰۶۵ سانتی‌متر با سه مدل آشفتگی متفاوت در نرم‌افزار فلونت مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی پروفیل سرعت تاج سرریز برای دو نسبت H/R متفاوت

۰/۸۵ و ۱/۲ استخراج شد. مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. پارامترهای شکل (۵)، P' فاصله تاج سرریز تا کالورت، P ارتفاع سرریز، D بازشدگی دریچه سرریز و R شعاع تاج دایره‌ای است.

شکل ۵- مشخصات مدل‌های مورد ارزیابی

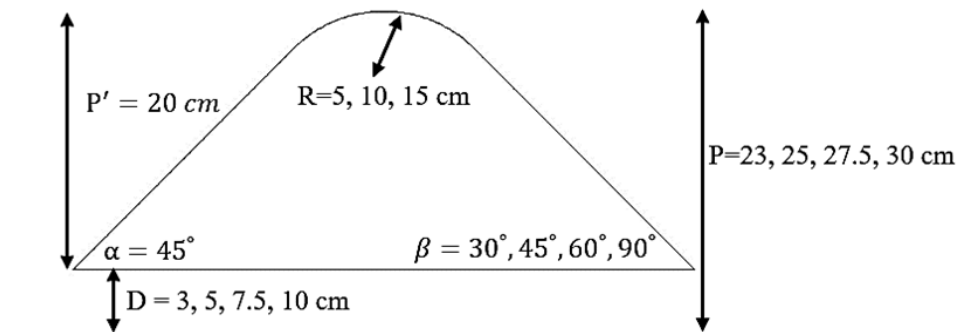


Fig 5. Specifications of the evaluated models

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل‌ها

Table 1. Geometric specifications of the models

Q(lit/s)	β	D(cm)	R(cm)	مدل
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۵	۵	A۱
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۵	۱۰	A۲
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۵	۱۵	A۳
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۳	۱۰	B۱
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۵	۱۰	B۲
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۷/۵	۱۰	B۳
۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰، ۳۰۰، ۳۴۰، ۳۸۰	۴۵	۱۰	۱۰	B۴

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی پروفیل سطح آب

پارامتر متغیر در سرریزها در گروه A شعاع تاج سرریز است. در شکل (۶) پروفیل سطح آب برای دبی ۲۶۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، سطح آزاد جریان در بالادست با افزایش شعاع تاج افزایش یافته و پروفیل سطح آب در پایین‌دست از سرریز فاصله گرفته است. در پایین‌دست (در فاصله ۰/۸ متر تا انتها) سطح آب برای کلیه شعاع‌های سرریز برابر است.

شکل ۶- تغییرات پروفیل سطح آب در کالورت - سرریز تاج دایره‌ای بر اساس شعاع تاج سرریز

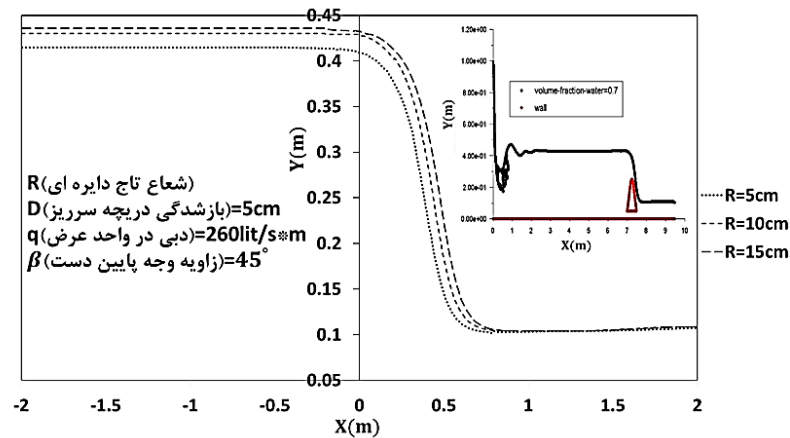


Fig 6. Variations in the water surface profile in the culvert-circular-crested weir based on the radius of the weir crest

پارامتر متغیر در سرریزها در گروه B مقدار بازشدگی دریچه است. در شکل (۷) پروفیل سطح آب برای دبی ۲۶۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. سطح آب در بالادست با افزایش بازشدگی دریچه مقدار ناچیزی افزایش یافته است. به دلیل افزایش بازشدگی دریچه و به دنبال آن افزایش دبی دریچه و کاهش دبی سرریز پروفیل سطح آب در پایین دست از سرریز فاصله گرفته است. در پایین دست (در فاصله ۰/۸ متر تا انتها) سطح آب برای کلیه مقادیر بازشدگی دریچه برابر است.

شکل ۷- تغییرات پروفیل سطح آب در کالورت - سرریز تاج دایره‌ای بر اساس بازشدگی دریچه

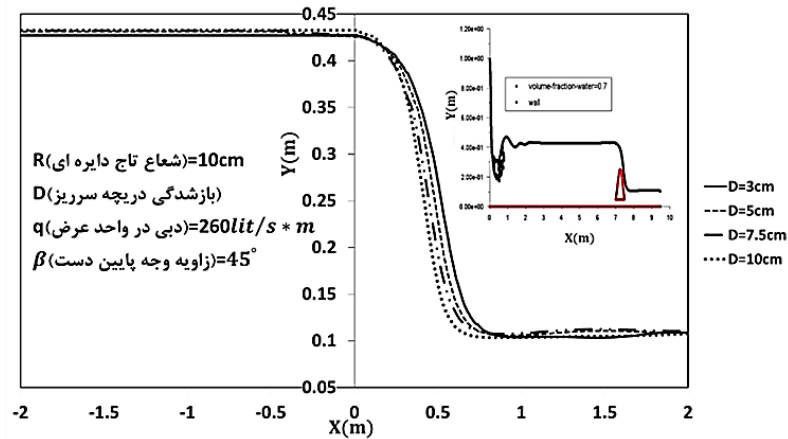


Fig 7. Variations in the water surface profile in the culvert-circular-crested weir based on the gate opening

۲-۳- بررسی پروفیل‌های سرعت در طول کانال و سرریز

محور افقی مقدار سرعت بی‌بعد شده با میانگین سرعت بالادست (v/U_1) و محور قائم ارتفاع جریان (y) نسبت به ارتفاع بیشینه پروفیل (y_{max}) مورد نظر است. محور افقی بالای هر شکل فاصله هر پروفیل از ابتدای سرریز تقسیم بر طول سرریز (L) را نشان

می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شده است، پارامتر متغیر در کالورت - سرریز تاج‌دایره‌ای گروه A شعاع تاج سرریز است. شکل (۸-الف) توزیع سرعت را در بالادست سرریز نشان می‌دهد. با توجه به شکل جریان دارای مقدار سرعت بیشینه در نزدیک سطح آزاد است و با حرکت به سمت پایین‌دست جریان یکنواخت و توسعه‌یافته می‌شود. با توجه به اینکه در سرریز با شعاع تاج ۱۵ سانتی‌متر سرعت جریان در نزدیکی بستر کاهش و با نزدیک شدن به سطح آب نسبت به دو شعاع دیگر ۵ و ۱۰ سانتی‌متر، ۱۷ درصد اختلاف داشته می‌توان بیان نمود افزایش شعاع تاج سرریز باعث اثر گذاشتن در جریان بالادست سرریز شده است در حالیکه در دو شعاع دیگر پروفیل‌های سرعت تقریباً یکسان هستند. با نزدیک شدن به سرریز جریان از حالت یکنواخت خارج شده و دارای مقدار بیشینه‌ای در ورودی کالورت است. سرعت ورودی آب به کالورت با افزایش شعاع سرریز کمتر از ۴ درصد افزایش یافته است و با نزدیک شدن به سطح آزاد این روند معکوس شده و بیشترین سرعت مربوط به پروفیل با کمترین شعاع تاج سرریز است. شکل (۸-ب) تغییرات سرعت را در طول کالورت - سرریز نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است بیشینه سرعت جریان در دریچه نزدیک کف کانال و در ابتدای کالورت است. بیشینه سرعت جریان کالورت با کاهش شعاع تاج کمتر از ۳ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات سرعت روی سرریز نشان می‌دهد بیشینه سرعت جریان روی تاج سرریز است که با کاهش شعاع ۱۳ درصد افزایش می‌یابد که نشان دهنده تأثیر کاهش شعاع در افزایش سرعت جریان تاج سرریز است. بیشینه سرعت جریان قبل از تاج سرریز نزدیک سطح آزاد است و با نزدیک شدن به تاج سرریز و پایین‌دست تاج این روند معکوس شده و بیشینه سرعت جریان در نزدیک سطح سرریز است. در پایین‌دست سرریز با کاهش شعاع سرعت کاهش یافته است. شکل (۸-ج) تغییرات سرعت را در پایین‌دست سازه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از سازه جریان یکنواخت شده و بیشینه سرعت جریان در نزدیک سطح آزاد است. درصد اختلاف سرعت جریان پایین‌دست سازه بین شعاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متر، ۷ درصد و بین شعاع ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر کمتر از ۳ درصد است که نشان دهنده تأثیر کم شعاع در سرعت پایین‌دست سازه است.

پارامتر متغیر در کالورت-سرریز تاج دایره‌ای مقدار بازشدگی دریچه است. شکل (۹-الف) توزیع سرعت را در بالادست سرریز نشان می‌دهد. با توجه به شکل جریان دارای مقدار سرعت بیشینه در نزدیک سطح آزاد است و با حرکت به سمت پایین‌دست جریان یکنواخت و توسعه‌یافته می‌شود. سرعت جریان با کاهش مقدار بازشدگی دریچه ۱۰ درصد افزایش می‌یابد که علت آن کاهش سطح مقطع جریان با داشتن یک دبی ثابت است. با نزدیک شدن به سرریز جریان از حالت یکنواخت خارج شده و دارای مقدار بیشینه‌ای در ورودی دریچه و نزدیک کف کانال است. مقدار بیشینه سرعت ورودی آب به دریچه با افزایش بازشدگی از کف کانال فاصله گرفته و ۱۱ درصد افزایش یافته است. بیشترین مقدار بیشینه سرعت مربوط به بازشدگی ۱۰ سانتی‌متر و در فاصله $Y / Y_{max} = 0.19$ از کف کانال اتفاق افتاده است. شکل (۹-ب) تغییرات سرعت را در طول سرریز-دریچه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است بیشینه سرعت جریان در دریچه نزدیک کف کانال و در ابتدای دریچه است. با افزایش بازشدگی دریچه سرعت جریان در دریچه در حدود ۱۱ درصد افزایش یافته است. مقدار سرعت تا مقطع $X / L = 0.48$ بر روی سرریز با افزایش بازشدگی دریچه کاهش یافته که نشان دهنده کاهش دبی عبوری روی سرریز است و بعد از آن با توجه به کاهش سطح مقطع جریان بیشینه سرعت تقریباً ثابت شده است. با افزایش بازشدگی دریچه سرعت جریان روی تاج سرریز ۱۱/۵ درصد کاهش یافته است. شکل (۹-ج) تغییرات سرعت را در پایین‌دست سرریز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از سرریز جریان یکنواخت شده و بیشینه سرعت جریان در نزدیک سطح آزاد است. سرعت جریان در پایین‌دست سرریز با افزایش بازشدگی دریچه ۳ درصد افزایش یافته که نشان دهنده تأثیر ناچیز دریچه در تغییرات سرعت پایین‌دست سازه است.

شکل ۸- تغییرات پروفیل‌های سرعت بر اساس شعاع تاج سرریز الف) در بالادست، ب) در طول سرریز-دریچه و ج) در پایین‌دست کالورت- سرریز تاج‌دایره‌ای

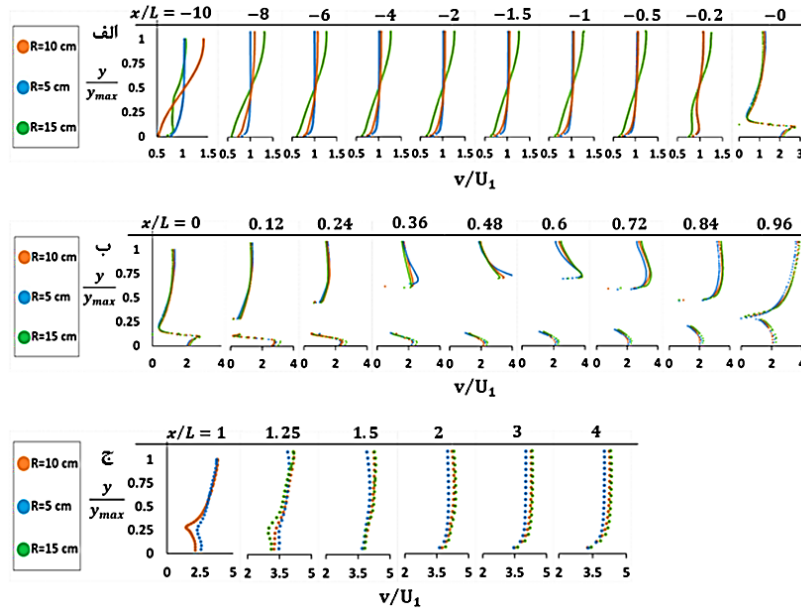


Fig 8. Variations in velocity profiles based on the radius of the weir crest: a) upstream, b) along the weir-gate, and c) downstream of the culvert-circular-crested weir

شکل ۹- تغییرات پروفیل‌های سرعت بر اساس بازشدگی دریچه الف) در بالادست، ب) در طول سرریز-دریچه و ج) در پایین‌دست کالورت- سرریز تاج‌دایره‌ای

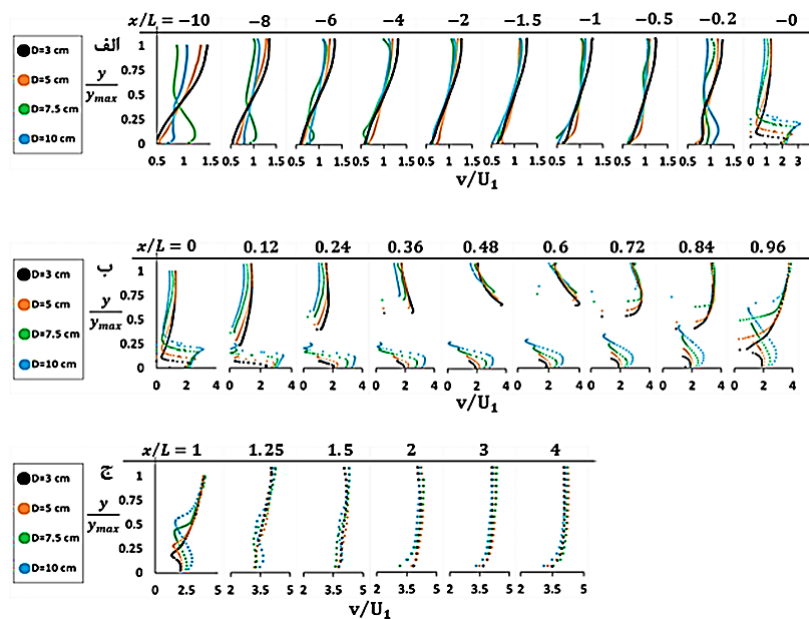


Fig 9. Variations in velocity profiles based on the gate opening: a) upstream, b) along the weir-gate, and c) downstream of the culvert-circular-crested weir

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که ضریب دبی در سرریزهای دریچه‌دار بیشتر از سرریزهای بدون دریچه است. همچنین با کاهش شعاع تاج سرریز، ضریب دبی افزایش می‌یابد. در سرریزهای گروه A، کمترین ضریب دبی مربوط به شعاع تاج ۱۵ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۲ تا ۱/۳۴ تغییر می‌کند، در حالی که بیشترین ضریب دبی مربوط به شعاع ۵ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۴۲ تا ۱/۵۲ تغییر دارد. علاوه بر این، با افزایش بازشدگی دریچه در نسبت H_1/R ، مقدار ضریب دبی افزایش یافته و اثر دریچه بر ضریب دبی تقویت می‌شود. در سرریزهای گروه B، بیشترین ضریب دبی مربوط به بازشدگی دریچه ۱۰ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۳ تا ۱/۴۶ تغییر می‌کند و کمترین ضریب دبی مربوط به بازشدگی ۳ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۲۷ تا ۱/۴ تغییر دارد. این نتایج نشان می‌دهند که تغییرات در شعاع تاج و بازشدگی دریچه تاثیر قابل توجهی بر ضریب دبی سرریزها دارند و می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی‌های هیدرولیکی موثر باشند.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- منابع

- Bagheri, S., & Heydarpour, M. (2010). Application of Euler equations in determining the discharge coefficient of circular crest spillways. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 40(1)67-73. (In Persian)
- Beigi Poor, G., & Bina, M. (2005). Hydraulic flow in circular and cylindrical crested weirs. 5th Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 1-8.
- Bhajantri, M.R., Eldho, T.I., & Deolalikar, P.B. (2006). Hydrodynamic modelling of flow over a spillway using a two-dimensional finite volume-based numerical model. *Sadhana*, 31(6), 743-754. <https://doi.org/10.1007/BF02716893>
- Ghobadian, R., Farmani Fard, M., & Karami, A. (2012). Effect of crest roughness and body on discharge coefficient and hydraulic conditions of flow in circular crested weirs using a physical model. *Journal of Soil and Water Sciences*, 22(1), 1-8.
- Izadinia, E., & Heidari, D. (2023). Flow simulation in a combined culvert-circular crown spillway structure, 22nd Iranian Hydraulic Conference, Maragha. <https://civilica.com/doc/1963858>
- Izadinia, E., & Heidari, D. (2022). Flow simulation in a combined structure of culvert and circular crown spillway, 21st National Conference of Iranian Hydraulics, Ahvaz. <https://civilica.com/doc/1694896>
- Negm, A.M., Al-Brahim, A.M., & Alhamid, A.A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 359-365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>
- Ramamurthy, A.S., & Vo, N.D. (1993). Characteristics of circular crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(9), 1055-1062.
- Samani, J., & Mazaheri, M. (2009). Combined flow over weir and under gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 224-227. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(224\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(224))
- Schmocker, L., Halldórsdóttir, B., & Hager, W. (2011). Effect of weir face angles on circular-crested weir flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 637-643. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000346](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000346)
- Severi, A., Masoudian, M., Kordi, E., & Roettcher, K. (2014). Discharge coefficient of combined-free over-under flow on a cylindrical weir-gate. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 42-52. <https://doi.org/10.1080/09715010.2014.939503>