

Research Article



Investigation of flow over a crump weir in free and submerged flow conditions

Mohammadhasan Hashemi F.¹, Ali Khoshfetrat^{2*}, Elham Izadinia³, Ehsan Delavari¹

1 Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2 Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

3 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: ali.khoshfetrat@iau.ir

© The Author (s) 2025

Received: 09 Apr 2025

Revised: 15 Jun 2025

Accepted: 15 Jul 2025

Published: 16 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

Weirs are essential hydraulic structures widely used for flow regulation, water level control in reservoirs, and discharge measurement. Among various types, the Crump weir stands out due to its simple and cost-effective design, making it particularly valuable for irrigation channels and water distribution networks. Its unique features, such as reduced sediment accumulation and adaptability to both free and submerged flow conditions, have attracted significant research interest. However, a comprehensive analysis of the discharge coefficient and flow patterns under different hydraulic conditions remains a research gap. This study aims to experimentally and numerically investigate the discharge coefficient of Crump weirs under free and submerged flow conditions, while evaluating the effects of geometric and hydraulic parameters on their performance. The findings can contribute to optimizing the design and application of these structures in practical scenarios.

Materials and Methods

This research employed a combined experimental and numerical approach to analyze flow over Crump weirs. Laboratory experiments were conducted in a flume measuring 10 m in length, 0.6 m in width, and 1.1 m in height. Four distinct Crump weir models were tested, with the following specifications:

1. Model M1: Height (P): 0.15 m; Upstream slope: 30°; Downstream slope: 60°
2. Model M2: Height (P): 0.15 m; Upstream slope: 60°; Downstream slope: 30°
3. Model M3: Height (P): 0.15 m; Upstream and downstream slopes: 45° (symmetrical)
4. Model M4: Height (P): 0.20 m; Upstream and downstream slopes: 45° (symmetrical)

Flow rates ranged from 0.03 to 0.05 m³/s, and water depths were measured at multiple points using precision sensors. For numerical simulation, the study utilized *Flow-3D* software, which solves the Navier-Stokes equations using the finite volume method. The numerical model was validated against experimental data, with accuracy assessed using RMSE and MAPE metrics. A grid convergence analysis was performed, leading to the selection of an optimal mesh with 679,800 cells. The model effectively simulated three-dimensional flow fields, velocity distributions, and pressure profiles around the weir.

Results and Discussion

The results indicated that the discharge coefficient of the Crump weir decreased as the dimensionless hydraulic head-to-weir height ratio (H_t/P^*) increased. The highest discharge coefficient was observed for Model M4 (0.2 m height, 45°

slope) under both free and submerged flow conditions, while the lowest coefficient corresponded to Model M2 (0.15 m height, asymmetric slopes). Symmetrical upstream and downstream slopes improved performance, increasing the discharge coefficient by approximately 16%. Submerged flow conditions reduced the coefficient by an average of 3.5% compared to free flow. Flow field analysis revealed counterclockwise vortices downstream of the weir, with weaker intensity under submerged conditions. Velocity distributions (longitudinal, transverse, and vertical) were significantly influenced by weir geometry and flow conditions. For instance, Model M4 exhibited the highest longitudinal velocity in free flow, whereas Model M1 recorded the lowest. Pressure peaks reached 2662 Pa upstream under free flow, but no negative pressures were observed in submerged conditions. These findings underscore the interplay between weir design and hydraulic performance.

Conclusion

This study demonstrated that the *Flow-3D* numerical model accurately simulates flow over Crump weirs. Key findings highlighted the impact of weir geometry and flow conditions on the discharge coefficient and flow patterns. Specifically, weirs with symmetrical slopes exhibited superior performance, while increased hydraulic head reduced the discharge coefficient. Notable differences in velocity and pressure distributions were observed between free and submerged flows. These insights provide valuable guidance for optimizing Crump weir designs in practical applications. Future research could explore additional parameters, such as surface roughness and varying flow rates, to further enhance performance predictions. The integration of experimental and numerical methods proved effective, offering a robust framework for similar hydraulic studies.

Keywords: Discharge coefficient, Experimental model, Free flow, Numerical simulation, Submerged flow

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammadhasan Hashemi F. and Ali Khoshfetrat: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software;

All authors: Analysis, Supervision, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Hashemi F., M., Khoshfetrat, A., Izadinia, E., & Delavari, E. (2025). Investigation of flow over a crump weir in free and submerged flow conditions. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 36-56. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.12100770>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی جریان روی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق

محمدحسن هاشمی فشارکی^۱، علی خوش فطرت^{۲*}، الهام ایزدی نیا^۳، احسان دلاوری^۱

۱. دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اشرافی اصفهانی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iau.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

چکیده

در مطالعه حاضر، ضریب دبی و الگوی جریان بر روی یک سرریز کرامپ با هندسه‌های مختلف در شرایط هیدرولیکی متنوع در حالت جریان دائمی و در شرایط جریان آزاد و مستغرق به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که سرریزهای کرامپ، سازه‌های ساده و مقرون به صرفه‌ای هستند و لذا بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ و کاهش آبشستگی در آن‌ها حائز اهمیت است. در این مطالعه سه سرریز با ارتفاع ۰/۱۵ متر و یک سرریز با ارتفاع ۰/۲ متر مورد بررسی قرار گرفتند. این چهار سرریز دارای شیب‌های متفاوت در بالادست و پایین‌دست هستند. همچنین از پنج دبی ۰/۰۳، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از سرریز کرامپ از مدل Flow 3D استفاده شد. ضریب آبگذری سرریز کرامپ با افزایش نسبت بی بعد کل بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز و عدد فرود کاهش یافت. بیشترین ضریب آبگذری در سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۲ متر و زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق در شرایط جریان آزاد و مستغرق مشاهده شد. همچنین کمترین ضریب دبی توسط سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۱۵ متر و زوایای پایین‌دست و بالادست به ترتیب ۶۰ و ۳۰ درجه نسبت به افق در هر دو شرایط ایجاد شد. نتایج نشان داد ضریب آبگذری سرریزها با زوایای شیب یکسان بالادست و پایین‌دست نسبت به زمانی که شیب بالادست بیشتر از شیب پایین‌دست بود، تقریباً ۱۶ درصد افزایش یافت. مقدار هد هیدرولیکی بالادست سرریز، ضریب آبگذری و عدد فرود در جریان مستغرق نسبت به شرایط جریان آزاد ۷/۳ درصد افزایش و ۳/۳ و ۵/۲۴ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: ضریب آبگذری، مدل آزمایشگاهی، جریان آزاد، شبیه‌سازی عددی، جریان مستغرق

استناد: هاشمی فشارکی، م.، خوش فطرت، ع.، ایزدی نیا، ا.، و دلاوری، ا. (۱۴۰۴). بررسی جریان روی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و

مستغرق. راهبردهای فنی در سیستم‌های آبی، ۱۳(۱): ۵۶-۳۶. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.12100770>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

سرریزها برای تخلیه جریان مازاد یا تنظیم سطح آن در مخازن سدها استفاده می‌شوند. جریانی که بیش از ظرفیت انتقال سدهای انحرافی باشد، می‌تواند برای کاهش فرسایش در رودخانه‌ها عبور داده شود. همچنین، سرریزها در بالا بردن و تثبیت سطح جریان در کانال‌ها بسیار مؤثر هستند و به عنوان سازه‌های اندازه‌گیری جریان در سیستم‌های انتقال آب عمل می‌کنند. یک نوع خاص از سرریز که معمولاً در شبکه‌ها و کانال‌های آبیاری استفاده می‌شود، سرریز کرامپ نام دارد. نام این سرریز از نام طراح آن (C. S. Crump) گرفته شده است. این سرریز در مطالعات جریان و اندازه‌گیری دبی جریان در داخل کانال استفاده می‌شود. پروفیل آن شامل یک مقطع طولی مثلثی و یک مقطع عرضی مستطیلی است. این ساختار ساده، طراحی و ساخت آن را آسان می‌کند و اجازه می‌دهد ذرات گل و لای و رسوب کمتری در پشت آن جمع شوند و به راحتی به پایین‌دست منتقل شوند (Deelstra et al., 2002). برای اولین بار، سرریز کرامپ در سال ۱۹۶۵ برای اندازه‌گیری جریان در رودخانه آیس‌بروک^۱ در انگلستان با مساحت حوضه آبریز ۱۹۴ کیلومتر مربع مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، در کرکتون گلن^۲ در بریتانیا با عرض ۷ متر و موناشیل گلن^۳ در اسکاتلند به ترتیب برای اندازه‌گیری سرعت و تعیین میزان رسوبات معلق و بار بستر مورد استفاده قرار گرفت (Spaan et al., 2003). در یک پروژه، از این نوع سرریز برای شمارش و ردیابی ماهی‌ها با نصب یک سری نوارهای مغناطیسی در شیب پایین‌دست آن استفاده شد (Stott, 2006). همچنین، در یک طرح، ساختار سرریز کرامپ با هدف تسهیل عبور ماهی‌ها و جلوگیری از تخریب جمعیت گونه‌های آبی اصلاح و تغییر شکل داده شد (Rockne, 2006).

Keller (1984) با استفاده از روش تزریق رنگ در آزمایشگاه، وجود یک ناحیه چرخشی جریان در پایین‌دست تاج سرریز مشخص شد و فرمولی تجربی برای شکل هندسی حباب‌ها در این ناحیه چرخشی به دست آمد. او همچنین نشان داد که این سازه برای اندازه‌گیری دبی جریان در نزدیکی پیچ رودخانه مناسب است. Span et al. (2003) از نوعی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق استفاده کردند. آن‌ها فرمول‌های جریان سرریز را برای شبیه‌سازی کامپیوتری به دست آوردند. Bettess et al. (1984) آزمایش‌هایی را روی سرریزهای کرامپ در مسیر مستقیم انجام دادند و نتیجه گرفتند که سرریز کرامپ کوچک‌تر می‌تواند به عنوان یک سرریز اندازه‌گیری در جریان‌های کم استفاده شود. Sarker et al. (2006) در مطالعه‌ای برای بهبود سرریز کرامپ به منظور تسهیل عبور ماهی‌ها در مسیر مستقیم، به این نتیجه رسیدند که ایجاد سازه‌های آرام‌کننده مانند بافل‌ها در پایین‌دست سرریز، یک مقطع زمانی ایجاد می‌کند که به عنوان یک مسیر صعودی برای ماهی‌ها در نظر گرفته می‌شود. وقتی پایه آن به تاج سرریز نزدیک‌تر بود، می‌توانست منجر به ایجاد سرعت بهینه کم در شیب پایین‌دست شود و در نتیجه عبور و مهاجرت ماهی‌ها به سمت پایین‌دست سرریز را آسان‌تر کند. در مطالعه‌ای که توسط Hussein (2014) انجام شد، از سه مدل سد با ارتفاع‌های مختلف در آزمایش‌ها استفاده کرد. هر مدل دارای سه نوع زبری مختلف در سطح سد بود. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب تخلیه با افزایش ارتفاع سد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده کرد که افزایش زبری سطح منجر به کاهش قابل توجه مقادیر ضریب تخلیه می‌شود. (AL-Naely et al., 2018) بر تأثیر دهانه‌های طولی جریان که به طور مساوی وارد هر دو طرف پایین‌دست و بالادست یک سرریز کرامپ می‌شدند، تمرکز کردند. این دهانه‌ها به عنوان مستهلک‌کننده انرژی عمل می‌کردند و بر ضریب آبگذری تأثیر می‌گذاشتند. (Al-Khateeb et al., 2019) یک سرریز کرامپ با تاج زاویه‌دار را در مقایسه با یک تاج استاندارد بررسی کردند. ایشان چهار مدل سرریز کرامپ را با استفاده از چوب ساختند که هر کدام دارای یک مقطع مثلثی متقارن طولی با پایه صاف بود.

¹ Icebrook² Kirkton Glen³ Monashill Glen

Khalifa et al. (2021) یک مطالعه تجربی برای تعیین پارامترهای جریان روی مدل‌های سرریز کرامپ زبر انجام دادند. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب آبگذری (C_d) با افزایش دبی جریان و کاهش ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش زبری سطح سرریز کرامپ منجر به کاهش قابل توجه مقادیر C_d شد. این مطالعه همچنین نشان داد که تأثیر نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست (h/P) بر مقادیر C_d تأثیرگذار است و با افزایش ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد. (Achour & Amara (2022) رابطه دقیقی برای ضریب آبگذری در سرریز کرامپ یافتند. رابطه بین دبی عبوری از سرریز کرامپ و پارامترهای مؤثر بر آن به شرح زیر است:

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

همچنین ضریب تخلیه سرریز کرامپ (C_d) را می‌توان با دانستن دبی جریان (Q) و بار کل آب (H_t) تعیین کرد:

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

در روابط بالا و شکل (۱)، L طول تاج سرریز است که برابر با عرض کانال و H_t بار کل آب (عمق آب بالادست (h) به علاوه هد سرعت ($v^2/2g$) و g ثابت گرانش است.

شکل ۱- مشخصات جریان و هندسه سرریز در حالت جریان آزاد و مستغرق

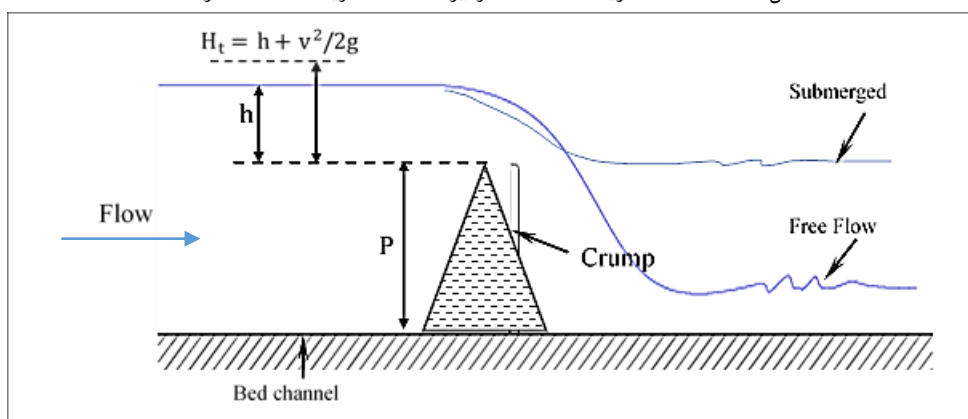


Fig 1. Flow characteristics of the Crump weir in the free and submerged flow conditions

کاربرد و اهمیت روش‌های عددی در حوزه‌های علوم و مهندسی روز به روز در حال افزایش است. محدودیت‌های حاکم بر شرایط فیزیکی، از جمله مقیاس مدل، نیاز بیشتری به استفاده از شبیه‌سازی عددی را آشکار می‌کند. نرم‌افزارهای مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تحلیل میدان جریان و بررسی تنش‌ها و نیروهای موجود ارائه شده‌اند. یکی از نمونه‌های قابل توجه در میان این روش‌ها، FLOW-3D است. این مدل سه‌بعدی توسط برخی از محققان در تحقیقات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزها مورد استفاده قرار گرفته است. (Oertel (2015) ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی (PKW) را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کرد و گزارش داد که مدل عددی به خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان هیدرولیکی از روی سرریز است. (Karimi et al. (2018 به صورت عددی عملکرد سرریز کلیدپیانویی و سرریز کنگره‌ای را در مقایسه با سرریز خطی که به عنوان سرریز جانبی عمل می‌کند، بررسی کردند و نشان دادند که سرریز کلیدپیانویی در مقایسه با سایر سرریزها دبی بیشتری دارد. (Sarhan & Jalil (2018 اثر جریان بر روی یک سازه مرکب سرریز-دریچه را با مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی و با توجه

به مدل تجربی آن اعتبارسنجی کردند. نتایج ایشان نشان‌دهنده دقت خوب این نرم‌افزار بود. در مطالعه‌ای که توسط Habibi & Khosrowjerdi (2007) انجام شد، ضریب آبگذری سرریز کرامپ بررسی و با ضریب آبگذری سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT مقایسه شد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ضریب آبگذری در سرریز کرامپ برخلاف سرریز اوجی با افزایش ارتفاع آب کاهش می‌یابد. مروری بر مطالعه انجام شده توسط محققان در سال‌های گذشته نشان داد که ضریب آبگذری در سرریز کرامپ بررسی نشده است. بنابراین، این موضوع در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. Hosseini Mobarra & Yasi (2013) تأثیر ارتفاع سرریز کرامپ را بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه بررسی کردند. ایشان نتایج مربوط به توزیع عمق جریان و سرعت عمقی متوسط در مقطع کنترل سرریز را به صورت نمودارهایی که توزیع دبی در واحد عرض را نشان می‌دهند، ارائه کردند. نتایج ایشان نشان داد که توزیع دبی در واحد عرض در مقاطع قوس‌های نامتقارن و غیریکنواخت رخ می‌دهد. همچنین، با افزایش ارتفاع سرریز، اثر غیریکنواختی اندکی کاهش یافت، اما به طور کلی غیریکنواختی در توزیع عرضی دبی در واحد عرض وجود داشت. (Muhsun et al. (2019 & 2020 شبیه‌سازی‌های پیش‌بینی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) جریان روی یک سرریز خمیده کرامپ را تحت شیب‌های طولی مختلف انجام دادند. بر اساس یافته‌های ایشان، رابطه جدیدی برای پیش‌بینی دبی روی سرریز کرامپ استخراج شد. این معادله با نتایج عملی و شبیه‌سازی شده CFD با حداکثر اختلاف ۴٪ مطابق با چندین شاخص خطای استاندارد و تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) مطابقت بسیار خوبی نشان داد. تکنیک CFD از روش کسر حجمی برای شبیه‌سازی سرعت و الگوی جریان سرریز خمیده کرامپ استفاده کرد. علاوه بر این، ایشان از یک مدل CFD فلوئنت برای شبیه‌سازی نرخ جریان بالای سرریز لبه پهن و لبه مربعی استفاده کردند. آزمایش‌های تجربی نیز انجام شد و عمق انتهایی به عنوان یک بخش کنترل برای استخراج رابطه جدید نرخ جریان در نظر گرفته شد. این مدل با موفقیت مسئله را با اختلاف کمتر از ۱۰٪ در مقایسه با آزمایش‌های عملی شبیه‌سازی کرد. (Behroozi & Vaghefi (2022 با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D تأثیر فرورفتگی‌های تاج سرریز بر دبی را بررسی کردند. اعتبارسنجی مدل عددی ایشان نشان داد که Flow-3D نتایجی با میانگین خطای مطلق درصد (MAPE) کمتر از ۵٪ از نظر ضریب آبگذری ارائه می‌دهد. (Abdi-Chooplou et al. (2023 با استفاده از مدل عددی Flow-3D و یک مدل آشفته‌گی مبتنی بر RNG، یک مطالعه عددی روی میدان جریان و آبشستگی سرریزهای PKW انجام دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که Flow-3D به طور مؤثر میدان‌های جریان سرریزهای غیرخطی را مدل‌سازی می‌کند.

با توجه به توضیحات فوق و همچنین با توجه به هندسه‌های مختلف سرریزهای کرامپ، هنوز نیاز به مطالعه جامع در مورد بررسی ضریب آبگذری در شرایط جریان آزاد و مستغرق وجود دارد. در این مطالعه، تأثیر ارتفاع سرریز، زاویه ورودی، زاویه خروجی و طول تاج سرریز کرامپ بر ضریب آبگذری در شرایط جریان آزاد و مستغرق به صورت تجربی و عددی بررسی شد. علاوه بر این، توزیع سرعت و فشار در اطراف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق نیز بررسی شد.

۲- روش کار

۲-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها بر روی سرریز کرامپ در یک آزمایشگاه هیدرولیک انجام شد. کانال مورد استفاده برای آزمایش‌ها دارای ابعاد ۱۰ متر طول، ۰/۶۰ متر عرض و ۱/۱۰ متر ارتفاع بود. کف فلوام از ورق‌های گالوانیزه و دیواره‌های آن از شیشه نشکن ساخته شده بود. جریان آب در آزمایشگاه توسط پمپی با قابلیت ارائه حداکثر دبی ۵۵ لیتر بر ثانیه تأمین می‌شد. شکل (۲-الف) طرح فلوام آزمایشگاهی را ارائه می‌دهد. از سه سنسور برای اندازه‌گیری عمق جریان استفاده شد. سنسورهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در بالادست، روی تاج سرریز و در فاصله‌ای معادل ۵ برابر هد آب روی تاج سرریز در پایین‌دست، همانطور که در شکل (۲-ب) نشان داده

شده است، نصب شدند. از یک کنترل کننده منطقی قابل برنامه ریزی (PLC) برای اندازه گیری دبی و هد آب در زمان های مختلف استفاده شد (شکل ۲-ج).

شکل ۲- مشخصات الف) کانال آزمایشگاهی، ب) سنسورها و ج) دستگاه PLC

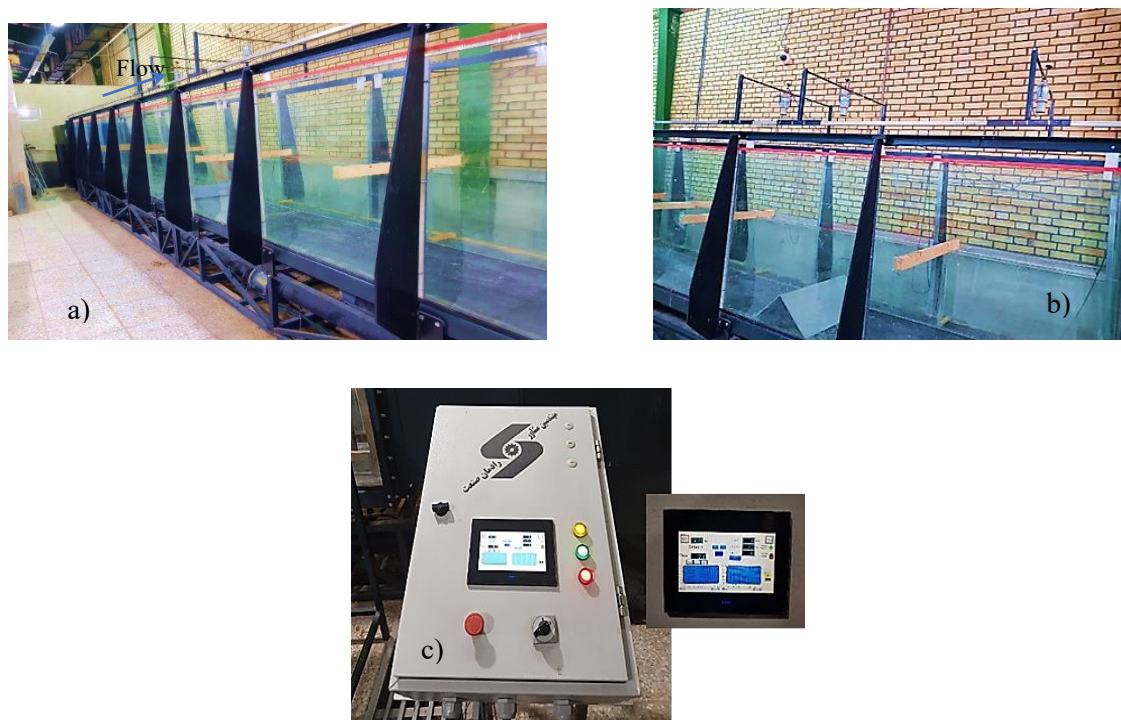


Fig 2. A view of a) the laboratory channel, b) flow depth sensors and c) PLC

در مطالعه حاضر، سرریز کرامپ از ورق های گالوانیزه ساخته شد. شکل (۳) مشخصات هندسی سرریز کرامپ مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد، در حالی که جدول (۱) مقادیر ابعاد مربوطه را ارائه می دهد. شیب های سرریزهای مورد بررسی مطابق با تحقیق Hashemi. F & Khoshfetrat (2024) در نظر گرفته شده اند. شکل (۳) اجزای مختلف سرریز کرامپ، از جمله طول افقی سازه، ارتفاع سرریز و شیب های هر دو طرف بالادست و پایین دست را نشان می دهد.

شکل ۳- الف) سرریز کرامپ در آزمایشگاه و ب) تصویر شماتیک آن

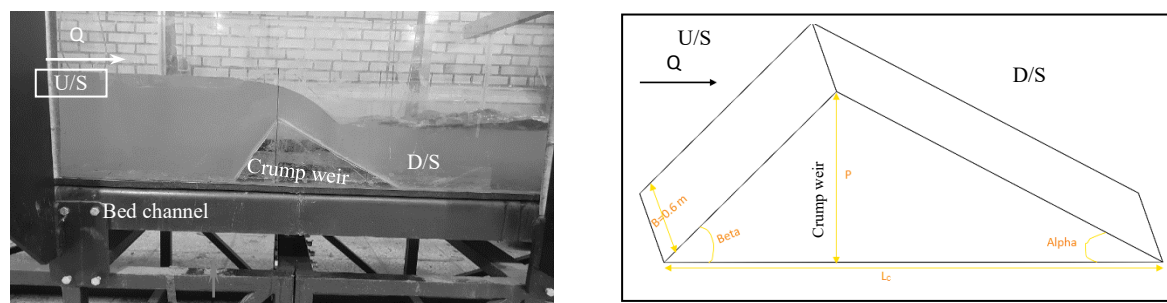


Fig 3. a) A picture of the Crump weir in the laboratory and b) its schematic view

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای کرامپ

Table 1. Geometric characteristics of the Crump weir

Model	Structure length (L_C) (m)	Height (P) (m)	Upstream slope (degree)	Downstream slope (degree)
M1	۰/۳۵	۰/۱۵	۶۰	۳۰
M2	۰/۳۰	۰/۱۵	۴۵	۴۵
M3	۰/۲۵	۰/۱۵	۹۰	۳۰
M4	۰/۴۰	۰/۲۰	۴۵	۴۵

برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به هر هندسه سرریز، سرریز در فلوم نصب و به طور ایمن آب‌بندی شد. متعاقباً، آزمایش‌ها به روش زیر انجام شد:

پس از روشن کردن پمپ، تنظیم دبی جریان، کنترل آن با جریان‌سنج و دستیابی به جریان یکنواخت در فلوم و تنظیم دریچه پایین‌دست کانال برای ایجاد شرایط جریان آزاد و مستغرق، عمق جریان در نقاط مختلف توسط سنسورهای تعبیه‌شده اندازه‌گیری شد. این فرآیند برای هندسه‌های مختلف سرریز کرامپ در حالت‌های هیدرولیکی مختلف و در زمان‌های مختلف تکرار شد.

۲-۲- مدل عددی و اعتبارسنجی آن

در این مطالعه از نرم‌افزار Flow-3D v 10.0.1 برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شد (Flow Science, 2011). این نرم‌افزار به طور مؤثر معادلات ناویر-استوکس را در فرمول‌بندی ناویر-استوکس میانگین رینولدز (RANS) برای تحلیل سه‌بعدی جریان تراکم‌ناپذیر حل می‌کند. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای مدل‌سازی دقیق رفتار سیالات استفاده می‌کند. معادلات حاکم برای یک جریان تراکم‌ناپذیر دو فازی با (w, v, u) که نشان‌دهنده مؤلفه‌های سرعت در سیستم مختصات دکارتی در امتداد محورهای (x, y, z) هستند، می‌توانند به صورت زیر بیان شوند (Łukaszewicz & Kalita, 2016):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} \quad (3)$$

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (AUF) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + Gx + fx \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y uv}{x V_F} = -\frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + Gy + fy \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + Gz + fz - bz \quad (7)$$

در این مطالعه، V_F نشان دهنده نسبت حجم سیال عبوری از یک عنصر به حجم کل آن عنصر است؛ نماد p نشان دهنده چگالی سیال است، در حالی که R_{SOR} تابعی مربوط به منبع است؛ A_x ، A_y و A_z مقادیر نسبت مساحت را نشان می‌دهند و G_x ، G_y و G_z نشان دهنده شتاب‌های گرانش هستند. شتاب‌های ویسکوزیته با (f_x, f_y, f_z) و b_x ، b_y و b_z به ترتیب نشان‌دهنده افت جریان در محیط متخلخل در امتداد جهات x ، y و z هستند؛ A مساحت جریان را نشان می‌دهد؛ U نشان دهنده سرعت متوسط جریان در جهات x ، y و z است؛ و F تابعی مربوط به حجم سیال است. نرم‌افزار Flow-3D از روش حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی سطح مشترک سیال-هوا در سطوح آزاد استفاده می‌کند. همچنین از روش نمایش کسری مساحت/حجم مانع (FAVOR) برای نمایش دقیق سطوح و حجم موانع جامد و مرزهای هندسی صلب استفاده می‌کند. این نرم‌افزار مدل‌های تخمین آشفتگی متعددی را ارائه می‌دهد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌های نهایی در این مطالعه تبدیل می‌کند. انتخاب Flow-3D بر اساس توصیه‌های منابع مختلف انجام شد و پیش‌بینی بهبودیافته گردابه‌های آشفتگی را با استفاده از مدل آشفتگی RNG تضمین کرد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای این مطالعه، از شرط مرزی دبی ثابت (دبی جریان حجمی) برای تأیید پروفیل‌های جریان برای دبی‌های مختلف $0.3/0.5$ تا $0.05/0.5$ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. کمترین دبی به نحوی انتخاب شد که عمق جریان در بالادست سرریز بیشتر از $0.3/0.5$ متر باشد تا بتوان از تأثیر عدد وبر و ضریب کشش سطحی صرف نظر کرد. بیشترین دبی نیز بر اساس بیشینه دبی پمپ در نظر گرفته شد. عمق جریان در حالت مستغرق توسط دریچه‌ی انتهایی کانال تنظیم شد. عمق جریان در پایین‌دست مطابق تحقیق (Bodaghi et al. (2024 در نظر گرفته شده است. در مرز خروجی، شرط مرزی فشار مشخص با ارتفاع جریان معلوم اعمال شد. این مدل تحت شرایط مرزی خاصی از جمله شرایط مرزی دیواره اعمال شده به کف و دیواره‌های کانال قرار گرفت. علاوه بر این، همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، شرط مرزی تقارن بر روی سطح آزاد سیال و مرزهای داخلی کانال اعمال شد.

شکل ۴- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی

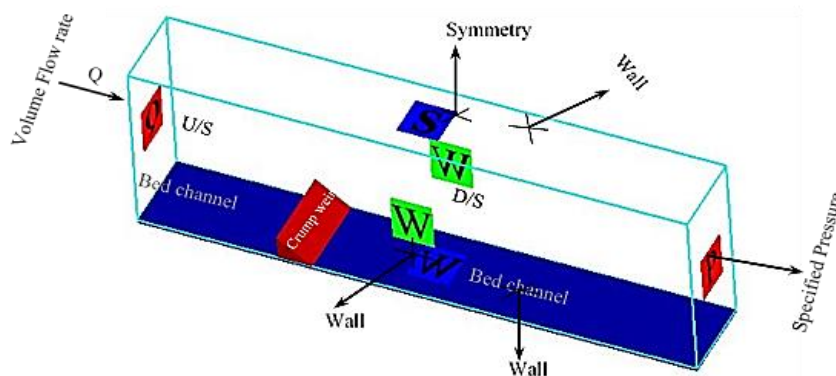


Fig 4. illustrates the computational domain and the boundary conditions applied in the numerical simulation.

برای تعیین وضوح بهینه شبکه، تحلیل همگرایی شبکه انجام شد. پنج وضوح شبکه مختلف مورد استفاده قرار گرفت که با برچسب‌های ۱# (۵۲۳۰۸۰ سلول)، ۲# (۶۱۶۱۷۰ سلول)، ۳# (۶۷۹۸۰۰ سلول)، ۴# (۹۰۳۴۵۰ سلول) و ۵# (۱۱۵۴۱۹۰ سلول) نامگذاری شدند. سپس ضرایب تخلیه به صورت عددی محاسبه و با مقادیر به دست آمده از داده‌های تجربی مقایسه شدند. برای ارزیابی دقت مدل عددی، از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد. این معیارها با معادلات زیر تعریف می‌شوند: در معادلات ذکر شده، O_i نشان دهنده مقادیر مشاهده شده است؛ P_i مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد؛ و n تعداد نقاط داده مشاهده شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، اعتبارسنجی

مدل عددی نشان می‌دهد که Flow-3D قادر به تولید نتایجی با میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) کمتر از ۰/۶۲٪ برای ضریب تخلیه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|^2} \quad (8)$$

$$MAPE (\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \quad (9)$$

شکل ۵- هنجارهای خطاهای عددی در محاسبه ضریب آبگذری

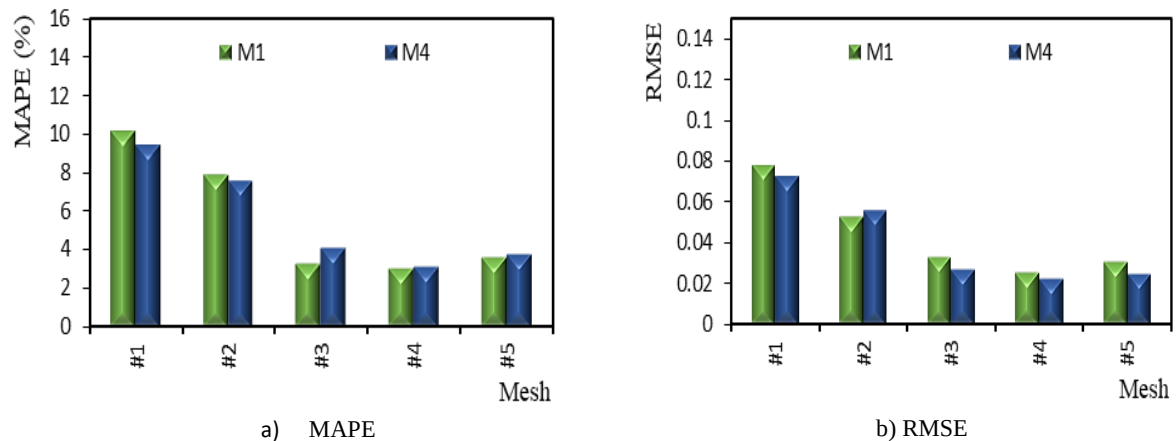


Fig 5. illustrates the error norms of the numerical model in calculating the discharge coefficient

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از فرآیند اعتبارسنجی، مشاهده شد که کاهش تعداد سلول‌ها به زیر عدد ۳ منجر به بهبود قابل توجهی در دقت نمی‌شود. بنابراین، این تعداد سلول خاص به عنوان وضوح شبکه بهینه برای شبیه‌سازی عددی سرریز کرامپ تعیین شد. در نتیجه، همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در مجموع ۶۷۹۸۰۰ سلول برای هر مدل‌سازی استفاده شد.

شکل ۶- نمایی از شبکه‌بندی نقاط

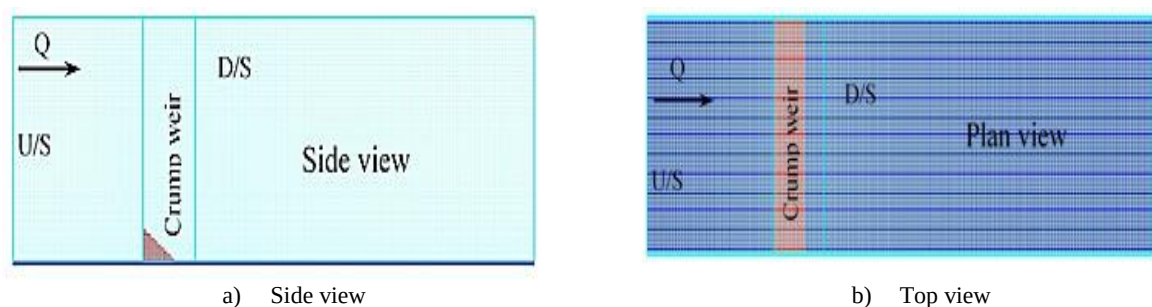


Fig 6. A view of the meshing of points

شکل (۷) مقایسه‌ای بین پروفیل طولی جریان روی سرریز کرامپ و سمت بالادست آن که از داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی مدل‌های مختلف سرریز کرامپ تحت شرایط هیدرولیکی مختلف به دست آمده است، ارائه می‌دهد. پروفیل‌های جریان عددی مدل‌های ۱ و ۴ به طور متوسط خطای بسیار کمی با پروفیل‌های تجربی خود دارند. این نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی عددی از دقت قابل قبولی برخوردارند.

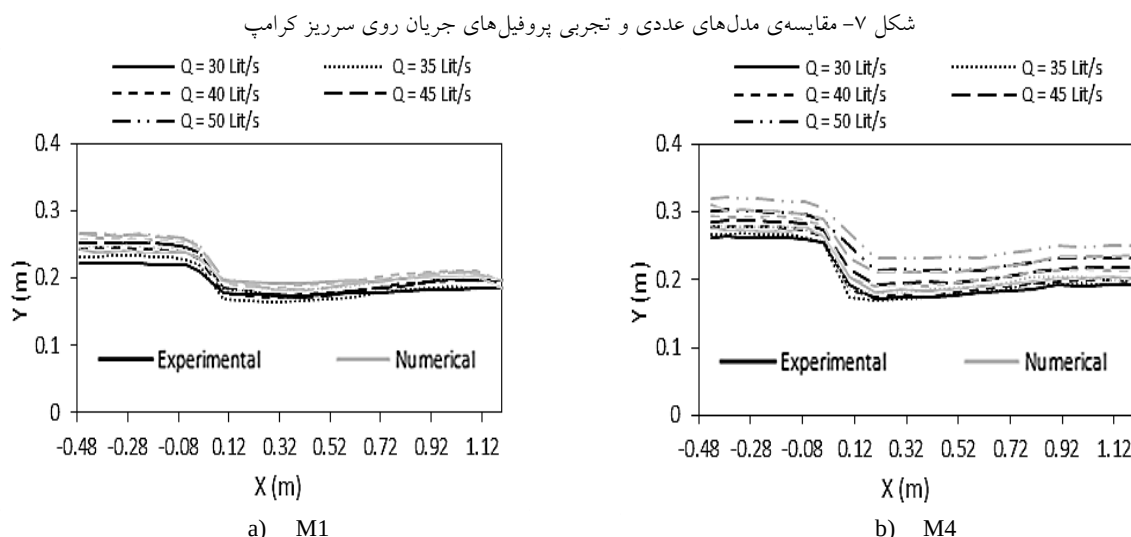


Fig 7. Comparison of the numerical and experimental models of the profiles of flows over the Crump weir

بر اساس نتایج مقایسه بین مدل عددی Flow-3D و داده‌های تجربی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل Flow-3D به طور مؤثر جریان عبوری از سرریز کرامپ را شبیه‌سازی می‌کند.

۳- نتایج و بحث

شکل (۸) تغییرات بار هیدرولیکی کل (هد کل جریان) بر اساس دبی را در مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی، بار هیدرولیکی سرریز افزایش می‌یابد. در حالت جریان آزاد، افزایش بار هیدرولیکی در مدل‌های M1، M2، M3 و M4 به ترتیب حدود ۴/۸۷، ۶/۶۹، ۷/۶۲ و ۹/۹۳ درصد بیشتر از مقادیر محاسبه شده در حالت جریان مستغرق اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه شروع شد و تا محدوده ۵۲ لیتر بر ثانیه افزایش یافت. در ابتدای آزمایش‌ها مشاهده شد که تفاوت بارهای هیدرولیکی سرریزهای مختلف تا دبی‌های ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه در حالت جریان آزاد و مستغرق تقریباً ناچیز است.

شکل ۸- تغییرات دبی برحسب هد کل جریان در سرریزهای کرامپ با هندسه مختلف، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

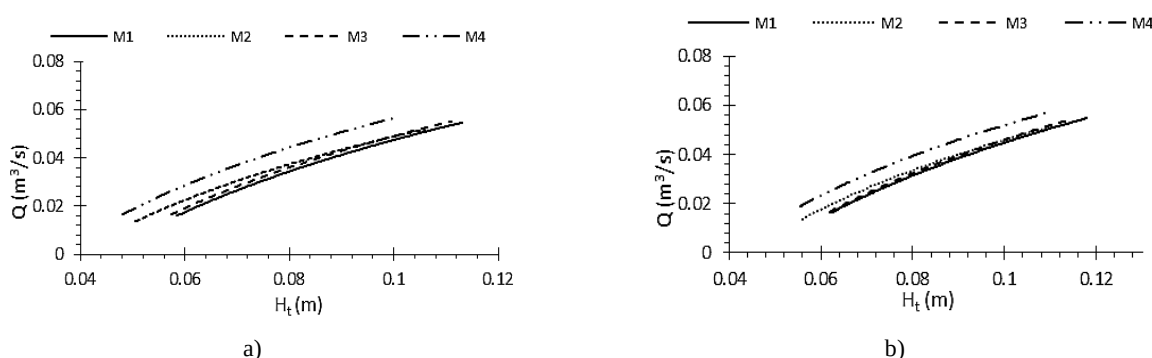


Fig 8. Changes in flow rate vs. H_t in the Crump weirs with different geometries in a) free flow and b) submerged flow conditions

شکل (۹) تغییرات ضریب آبگذری جریان عبوری از روی مدل‌های مختلف سرریزهای کرامپ را متناسب با H_t/P در شرایط جریان آزاد و مستغرق نشان می‌دهد. طبق شکل (۹)، مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری سرریز کرامپ با افزایش نسبت بی‌بعد

بار کل آبی به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد. با افزایش بار آبی تا مقدار H_t/P کمتر از ۰/۴، کاهش ضریب آبگذری به دلیل وقوع هوادهی کامل (به‌ویژه در M4) با شیب زیادی رخ داده است. سپس به دلیل ورود و خروج (حالت گذرا) هوا از زیر جریان، کاهش با شیب کمتری ادامه می‌یابد تا زمانی که در مقدار H_t/P کوچکتر از ۰/۶ هوادهی رخ ندهد. بیشترین ضریب آبگذری در سرریز کرامپ M4 در شرایط جریان آزاد و مستغرق مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که کمترین ضریب دبی در مدل ۲ در شرایط جریان آزاد ایجاد شده است. وقتی سرریز با زاویه شیب بالادست و پایین‌دست یکسان نصب شد، در مقایسه با زمانی که شیب بالادست بیشتر از شیب پایین‌دست بود، ضریب آبگذری در حالت جریان آزاد تقریباً ۱۶ درصد افزایش یافت. نتایج همچنین نشان داد که افزایش بار هیدرولیکی منجر به کاهش دبی سرریز کرامپ می‌شود. تغییرات زاویه دیواره سرریز، روند خاصی را در تغییرات ضریب دبی بر اساس تمام مقادیر بی‌بعد نسبت بار کل آب به ارتفاع سرریز ایجاد نکرد. جالب توجه است که ضرایب آبگذری مدل‌های ۳ و ۱ تقریباً با تمام بارهای کل آب در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق برابر بود؛ از این رو می‌توان گفت که شیب بالادست سرریز تأثیر چندانی نداشته است. مشاهده شد که با افزایش نسبت بی‌بعد بار کل آب به ارتفاع سرریز، ضریب آبگذری در مدل‌های ۳ و ۱ با شیب تندتری نسبت به سایر سرریزها کاهش یافته است. با مقایسه بخش‌های الف و ب در شکل ۹، مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری عبوری از سرریز کرامپ در تمام مدل‌ها با مستغرق شدن جریان کاهش می‌یابد، به طوری که ضرایب دبی در M1، M2، M3 و M4 در حالت مستغرق نسبت به جریان آزاد به ترتیب ۲/۳۸، ۳/۳۶، ۳/۱۳ و ۴/۳۶ درصد کمتر اندازه‌گیری شده‌اند. مشاهده می‌شود که اختلاف ضرایب دبی در M2 و M4 در حالت آزاد نسبت به حالت مستغرق ۷ درصد بیشتر است.

شکل ۹- تغییرات ضریب آبگذری برحسب هد کل جریان در سرریزهای کرامپ با هندسه مختلف، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

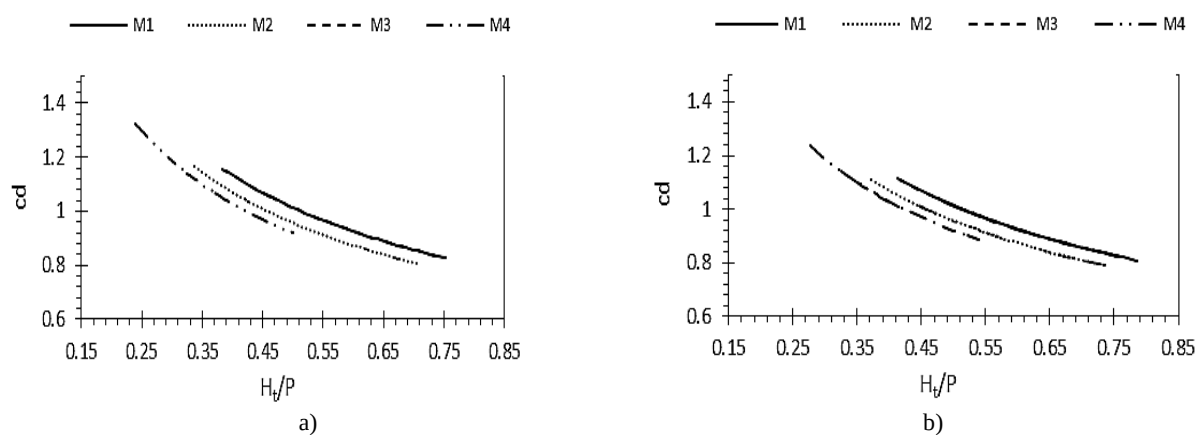


Fig 9. Changes in the discharge coefficient of the Crump weir with different geometries proportionate to H_t/P in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

تغییرات ضریب آبگذری عبوری بر حسب عدد فرود ($V_1/(gH_t)^{0.5}$) در بالادست سرریز در مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۰) نشان داده شده است که در آن سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق منجر به کاهش دبی سرریز کرامپ شده است. مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری در مدل ۱ با افزایش عدد فرود در مقایسه با سایر سرریزها با شیب تندتری کاهش یافته است. در تمام مدل‌های آزمایش شده سرریز کرامپ، مشاهده می‌شود که عدد فرود با مستغرق شدن جریان کاهش یافته است، به طوری که اعداد فرود در M1، M2، M3 و M4 به ترتیب ۳/۹۲، ۵/۴۳، ۵/۱۱ و ۶/۵۰ درصد در حالت مستغرق نسبت به حالت جریان آزاد کمتر اندازه‌گیری شده‌اند.

شکل ۱۰- تغییرات ضریب آبگذری برحسب عدد فرود در سرریزهای کرامپ با هندسه مختلف، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

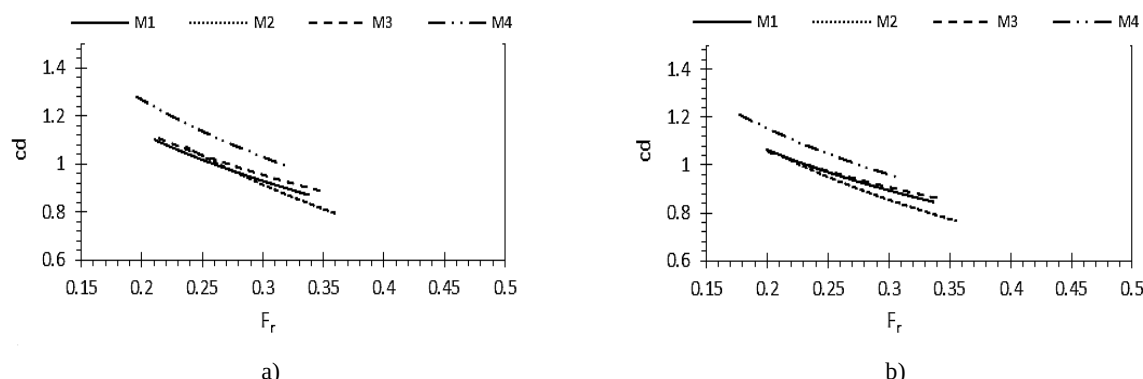


Fig 10. Changes in discharge coefficients of the Crump weir with the different geometries in relation to the Froude number in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

همانطور که قبلاً گفته شد، به دلیل محدودیت‌ها و مشکلات موجود در اندازه‌گیری تجربی میدان جریان، مدل‌سازی با ترکیبی از مدل‌سازی تجربی و عددی انجام شد. علاوه بر این، میدان جریان و سرعت‌های جریان سه‌بعدی از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D تجزیه و تحلیل شدند. کانتورهای سرعت طولی مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در تمام مدل‌ها در هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق، سرعت‌های طولی منفی در پایین‌دست سرریز کرامپ وجود دارد. این مشاهده نشان‌دهنده وجود گردابه‌های خلاف جهت عقربه‌های ساعت و ناحیه‌ای با چرخش ضعیف در پایین‌دست سرریز است. مقادیر سرعت آن‌ها در شرایط جریان مستغرق کمتر است. این گردابه‌ها را می‌توان در مدل‌های تجربی نیز مشاهده کرد (شکل ۱۲). مشاهده می‌شود که در سطح معادل تاج سرریز، سرعت جریان پایین‌دست به دلیل برخورد جریان در حال سقوط به تاج سرریز بیشتر است. حداکثر سرعت طولی مثبت در جهت جریان در M4 و در حالت جریان آزاد اندازه‌گیری شد که نشان دهنده ضریب دبی بالاتر در این مدل است. در مدل M1 مشاهده می‌شود که گردابه‌های پادساعتگرد با قدرت بیشتری تشکیل شده‌اند و بیشترین سرعت‌های طولی منفی در این مدل وجود دارد. به طور کلی، با تغییر چیدمان سرریز کرامپ از M4 به M3، M2 و M1، سرعت طولی در حالت جریان آزاد به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۷/۵ درصد کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که کمترین و بیشترین سرعت‌های طولی مثبت به ترتیب در مدل‌های M3 و M4 در حالت جریان مستغرق است. با تغییر هندسه سرریز از M3 به M2 و M1، مقادیر ذکر شده به ترتیب ۶/۹ و ۱۴/۷ درصد کاهش یافته است. بیشترین و کمترین گرادیان سرعت طولی به ترتیب در مدل‌های M2 و M4 مشاهده می‌شود.

شکل (۱۳)، نمونه‌ای از کانتورهای سرعت عرضی دو مدل مختلف سرریز کرامپ را در شرایط جریان آزاد و مستغرق نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در این شکل، مشخص است که سرعت‌های عرضی منفی در پایین‌دست سرریز در هر دو حالت آزاد و مستغرق وجود دارد. دامنه و مقادیر این سرعت‌های منفی در M1 بیشتر است. مشاهده می‌شود که سرعت‌های عرضی مثبت روی سطح جریان در حالت جریان آزاد بیشتر است. با تغییر چیدمان سرریز از M1 به M4 در حالت جریان مستغرق، سرعت عرضی منفی تقریباً ۲۰٪ کاهش یافت. این مقدار در حالت جریان آزاد بیشتر بود.

شکل ۱۱- خطوط سرعت طولی در مدل‌های مختلف سرریز (الف) جریان آزاد و (ب) جریان مستغرق

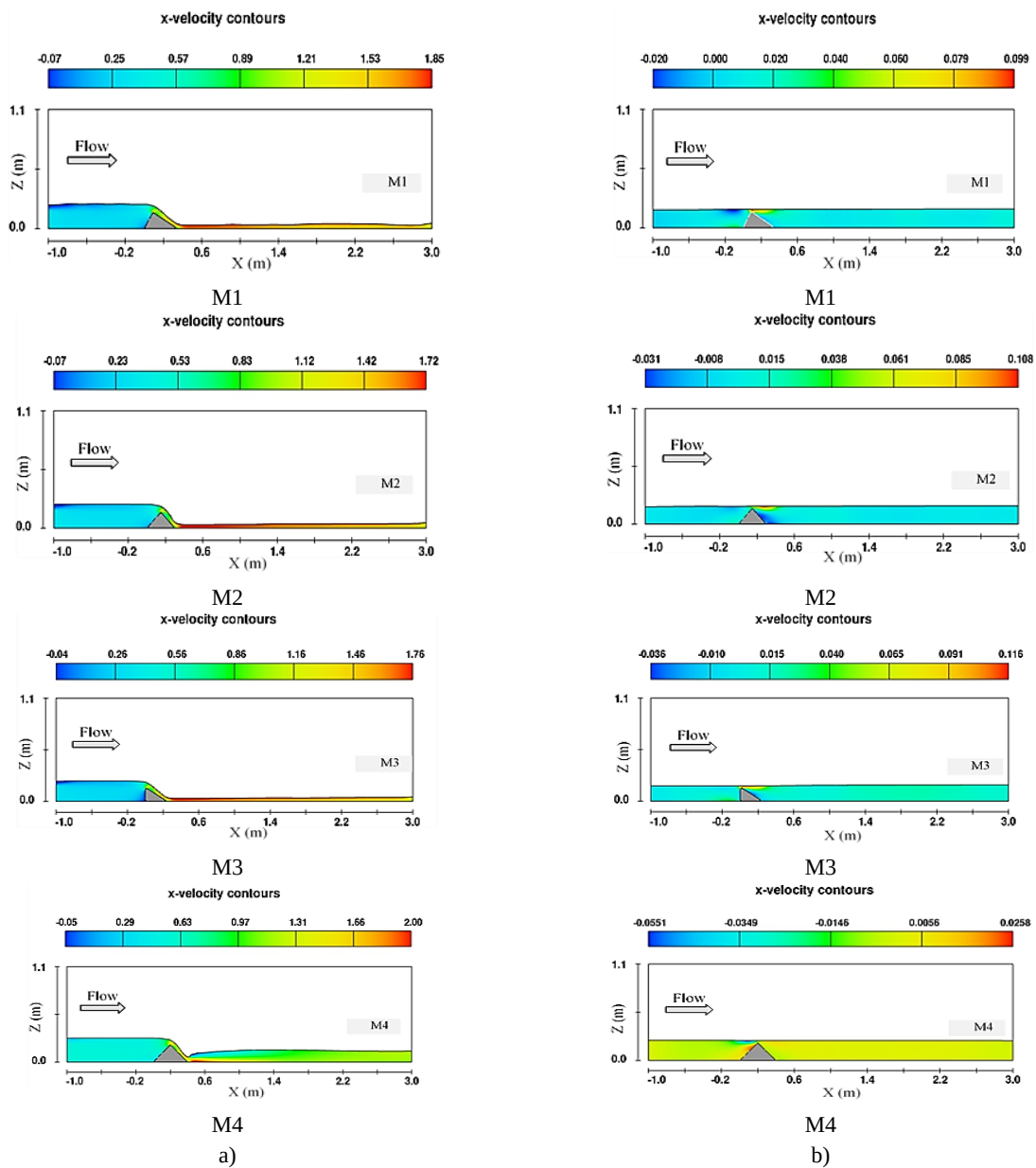


Fig 11. Contours of longitudinal velocities in the different weir models in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل ۱۲- نمای جانبی جریان عبوری از روی سرریز کرامپ در حالت شرایط آزاد

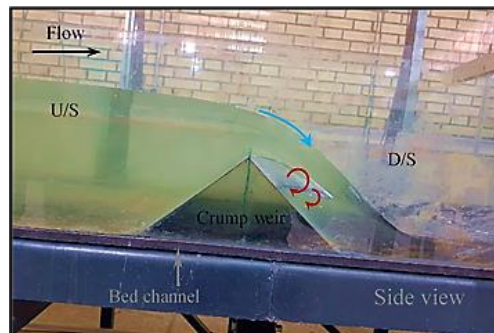


Fig 12. The side view of the experimental flow passing over the Crump weir in the free flow condition

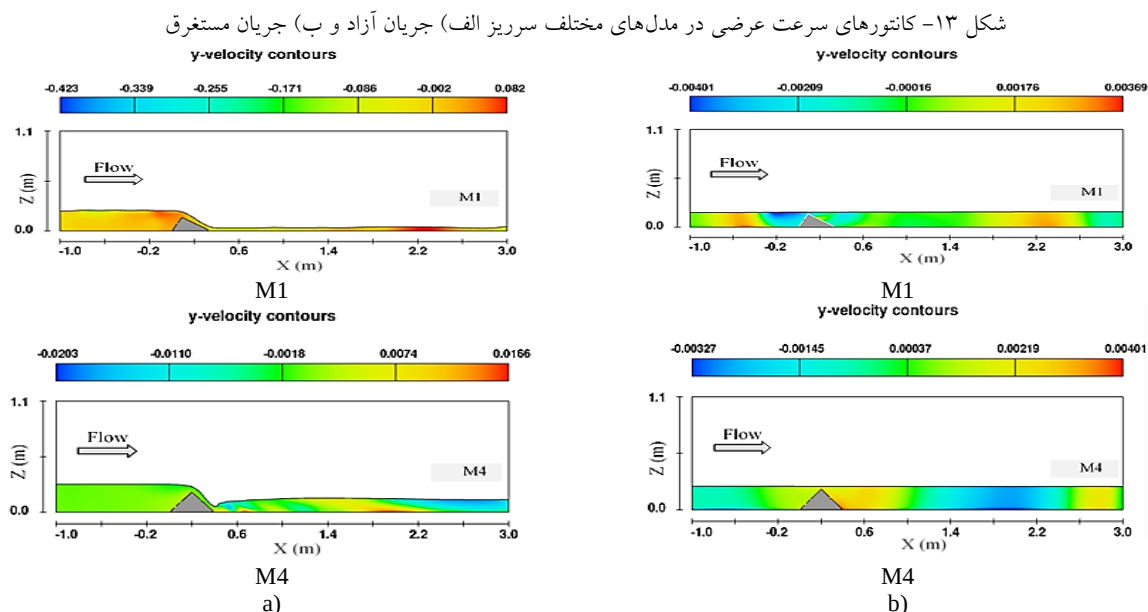


Fig 13. Contours of transverse velocities in the different weir models in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل (۱۴)، نشان می‌دهد که سرعت عمقی جریان در بالادست سرریز قابل توجه است و سرعت آن پس از عبور از روی سرریز بیشتر افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش یافته در جریان مستغرق در مقایسه با حالت جریان آزاد به طور قابل توجهی کاهش یافته است. الگوهای جریان پایین‌دست مدل‌های مختلف سرریز شباهت قابل توجهی را نشان می‌دهند، به طوری که جریان عبوری از روی سرریز به شکل یک جت مایل خارج می‌شود. پس از برخورد به پایاب، بردارهای سرعت (نشان دهنده سرعت‌های منفی) به دلیل سرعت بالای جریان به سمت کف کانال تشکیل می‌شوند. این مشاهده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بالاترین مقدار سرعت عمودی منفی در M4 در حالت جریان آزاد اندازه‌گیری شد. می‌توان مشاهده کرد که شکل هندسی سرریز کرامپ بر توزیع سرعت‌های عمقی تأثیر دارد، به طوری که با تغییر چیدمان سرریز از M4 به M3، M2 و M1، سرعت‌های عمقی در حالت جریان آزاد به ترتیب ۳۷، ۱۵ و ۳۷ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین سرعت‌های عمقی منفی در شرایط جریان مستغرق به ترتیب در مدل‌های M1 و M2 مشاهده شد.

سرعت حاصل در مدل‌های مختلف سرریز مدل‌سازی شده در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۵) نشان داده شده است. بدیهی است که در شرایط جریان مستغرق، سرعت جریان ورودی به کانال بالادست سرریز در مدل M2 در مقایسه با سایر مدل‌ها کمتر است. در نتیجه، شدت تخلیه نیز به دلیل کاهش سرعت جریان کمتر است. سرعت جریان در مدل M4 در شرایط جریان آزاد دارای شیب عمقی شدیدی است.

فشارهای موجود در امتداد کانال در مقاطع میانی مدل‌های مختلف سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل (۱۶) ارائه شده است. طبق این شکل، مشاهده می‌شود که فشارهای بالادست سرریزها در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب تا ۲۶۶۲ و ۲۱۸۳ پاسکال می‌رسد که دلیل اصلی آن برخورد آب با بدنه سرریز و عبور آن از روی سرریز است. همچنین مشاهده می‌شود که در شرایط جریان مستغرق، در تمام مقاطع بالادست و پایین‌دست سرریز فشار مثبت وجود دارد و هیچ فشار منفی رخ نداده است. همچنین مشاهده می‌شود که هندسه‌های مختلف سرریز در شرایط جریان مستغرق تأثیر زیادی بر فشار نداشته‌اند، در حالی که در شرایط جریان آزاد بر مقادیر و توزیع فشار تأثیر داشته‌اند.

شکل ۱۴- کانتورهای سرعت جریان عمودی در مدل‌های مختلف سرریز، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

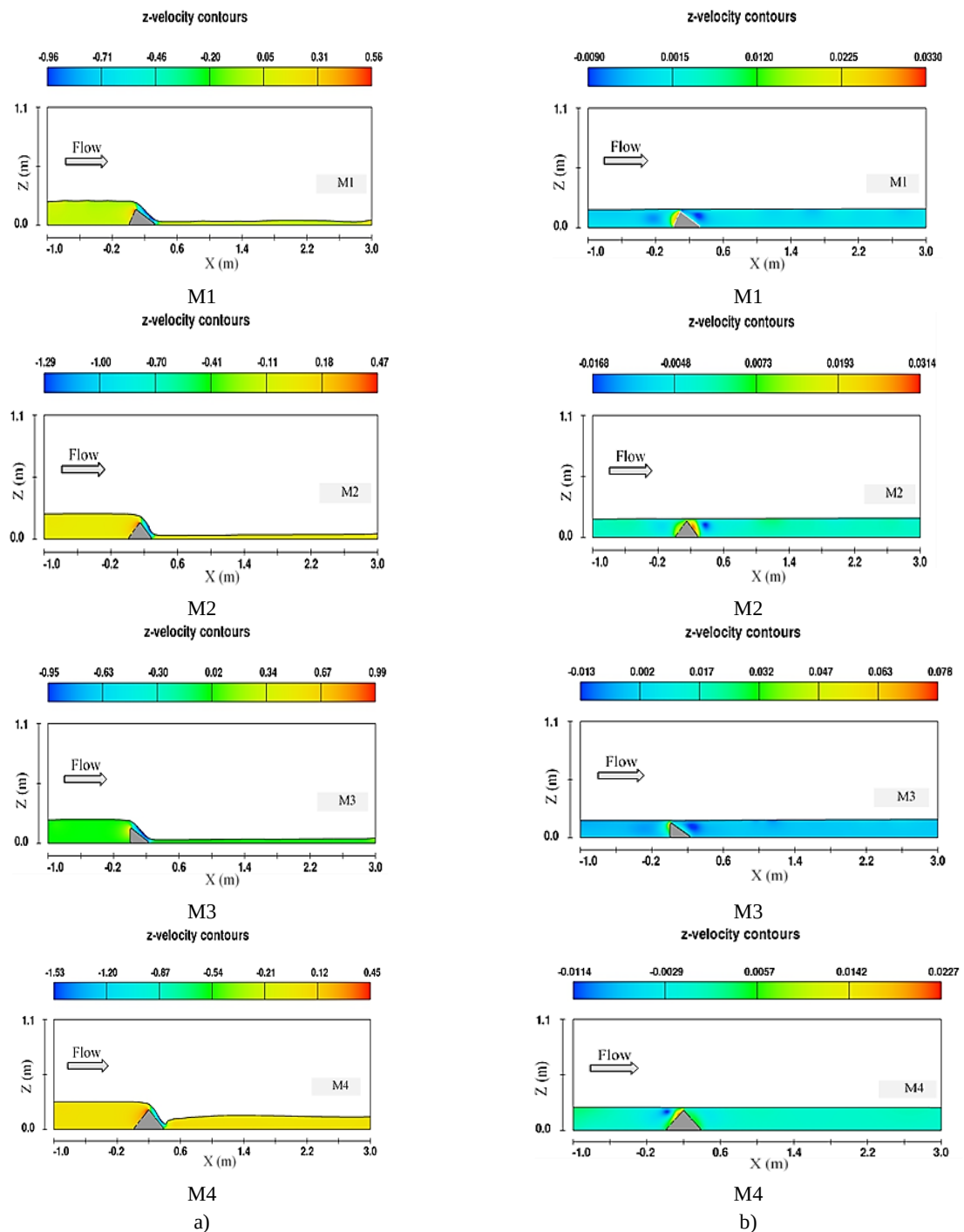


Fig 14. Contours of vertical flow velocities in the different weir models in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل ۱۵- سرعت حاصل در مدل‌های مختلف سرریز، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

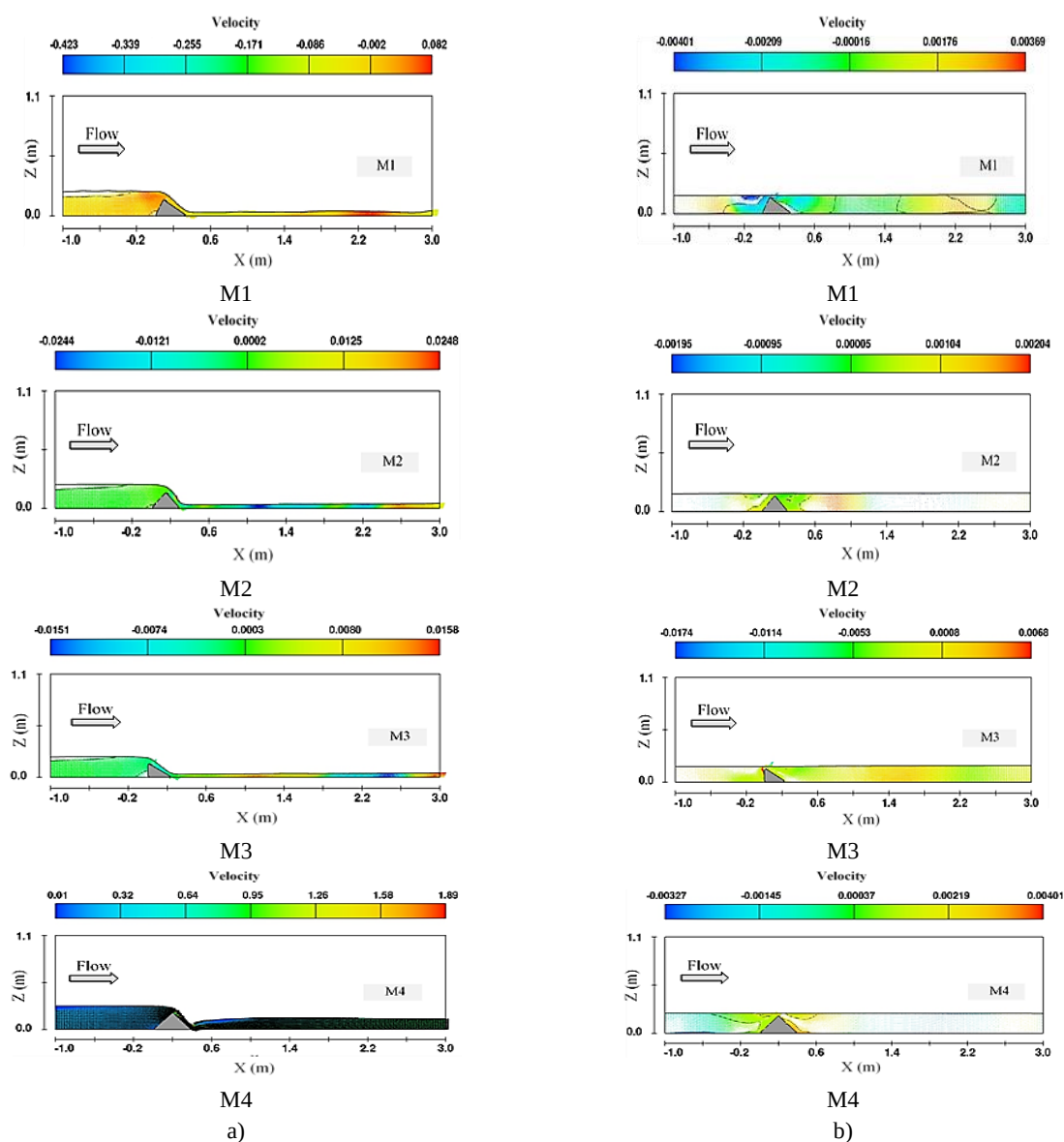


Fig 15. The resultant velocity in the different models of the weir in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

شکل ۱۶- توزیع فشار در امتداد کانال و در مدل‌های مختلف سرریز، الف) جریان آزاد و ب) جریان مستغرق

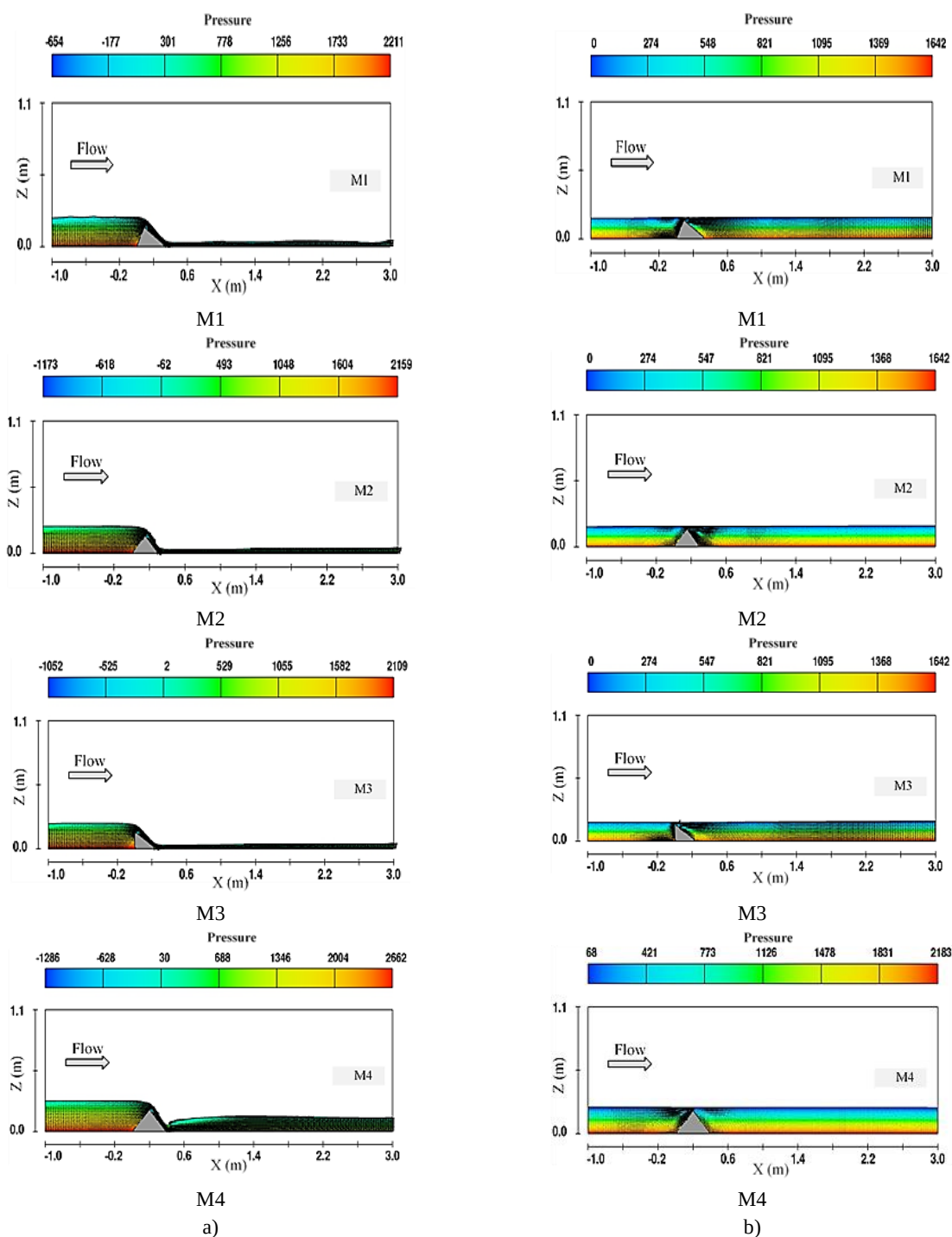


Fig 16. Pressure distribution along the channel in the different models of the weir in the conditions of a) free flow and b) submerged flow

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله، تحلیل جامعی از ضریب تخلیه سرریز کرامپ را از طریق بررسی‌های تجربی و عددی ارائه داد. با توجه به اینکه تاکنون هیچ مطالعه‌ای با هدف بررسی دبی و میدان جریان سرریز کرامپ انجام نشده بود، انجام مدل‌سازی تجربی و عددی این نوع سرریز و همچنین بررسی میدان جریان آن ضروری بود. با توجه به چالش‌ها و محدودیت‌های مرتبط با جمع‌آوری داده‌های میدان

جریان برای سرریزهای کرامپ، از یک رویکرد ترکیبی شامل مدل‌سازی تجربی و عددی استفاده شد. یافته‌های اصلی به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- مدل عددی Flow-3D می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریز کرامپ با سطح دقت رضایت‌بخشی مورد استفاده قرار گیرد. با مدل‌سازی سرریز کرامپ، پروفیل جریان نشان داد که دو مدل عددی و تجربی دارای خطای متوسط حدود $6\%/53$ هستند. Flow-3D می‌تواند نتایجی با میانگین خطای مطلق درصد (MAPE) کمتر از $5\%/62$ از نظر ضریب تخلیه تولید کند.
- بیشترین و کمترین ضریب دبی به ترتیب در سرریزهای کرامپ M4 و M2 در شرایط جریان آزاد و مستغرق مشاهده شد. ضریب دبی در زمانی که سرریزها با زاویه شیب بالادست و پایین‌دست یکسان نصب شدند، در مقایسه با زمانی که شیب بالادست بیشتر از شیب پایین‌دست بود، تقریباً 16% درصد افزایش یافت.
- افزایش بار هیدرولیکی منجر به کاهش دبی سرریز کرامپ در هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق شد.
- اختلاف ضرایب تخلیه M4 و M2 در حالت جریان آزاد نسبت به مستغرق 7% درصد بیشتر بود.
- مقادیر بار هیدرولیکی بالادست سرریز، ضریب تخلیه روی سرریز کرامپ و عدد فرود در تمام مدل‌ها در حالت مستغرق در مقایسه با حالت جریان آزاد به طور متوسط $7\%/3$ درصد افزایش و $3\%/3$ و $5\%/24$ درصد کاهش یافت.
- به طور کلی، سرعت طولی با تغییر هندسه سرریز کرامپ از M4 به M2، M3 و M1 در شرایط جریان آزاد به ترتیب 12 ، 14 و $7\%/5$ درصد کاهش یافت.
- کمترین و بیشترین سرعت‌های طولی مثبت در مدل‌های M4 و M3 در شرایط جریان مستغرق مشاهده شد. این سرعت‌ها با تغییر هندسه سرریز از M3 به M2 و M1 به ترتیب $6\%/9$ و $14\%/7$ درصد کاهش یافتند.
- سرعت‌های جانبی مثبت در سطح جریان بیشتر بودند. با تغییر آرایش سرریز از M1 به M4، سرعت عرضی در حالت جریان مستغرق تقریباً 20% کاهش یافت. مقدار آن در حالت جریان آزاد بیشتر بود.
- شکل هندسی سرریز کرامپ بر توزیع سرعت‌های عمقی تأثیر گذاشت، به طوری که با تغییر آرایش سرریز از M4 به M3، M2 و M1 در شرایط جریان آزاد، به ترتیب 37 ، 15 و 37% درصد کاهش یافت.
- هندسه‌های مختلف سرریز کرامپ برخلاف حالت جریان آزاد، تأثیر چندانی بر تغییرات فشار در حالت مستغرق نداشتند.
- برخلاف حالت جریان آزاد، فشار در تمام قسمت‌های بالادست و پایین‌دست در حالت مستغرق مثبت بود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

محمدحسن هاشمی فشارکی و علی خوش فطرت: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها و نرم‌افزار. تمامی نویسندگان: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M., Abediakbar, D., & Ghafouri, A. (2023). An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5), 140. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01108-7>
- Achour, B., & Amara, L. (2022). Accurate discharge coefficient relationship for the Crump weir. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (52), 93-115.
- Al-Khateeb, H. M. M., Sahib, J. H., & Al-Yasisri, H. H. H. (2019). An experimental study of flow over V-shape crump weir crest. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 584, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- Al-Naely, H., Al-Khafaji, Z., & Khassaf, S. (2018). Effect of opening holes on the hydraulic performance for crump weir. *International Journal of Engineering*, 31(12), 2022-2027. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.12c.05>
- Behrooz, A. M., & Vaghefi, M. (2022). Experimental and numerical study of the effect of zigzag crests with various geometries on the performance of A-type piano key weirs. *Water Resources Management*, 36(12), 4517-4533. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03261-7>
- Bettess, P., White, W. R., & Bettess, R. (1984). Recirculation in Flow over Crump Weirs. In *Channels and Channel Control Structures: Proceedings of the 1st International Conference on Hydraulic Design in Water Resources Engineering: Channels and Channel Control Structures, University of Southampton, April 1984* (pp. 103-117). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-11300-4_9
- Bodaghi, E., Abdi-Chooplou, C., & Ghodsian, M. (2024). Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(1), 34-48. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0041>
- Deelstra, J., Vandsemb, S., Eggestad, H. O., Bechmann, M., & Vagstad, N. (2002). Monitoring and Assessment of Non-Point Source Pollution in Norway.
- Flow Science, Inc. FLOW-3D® Version 10.0 (Computer software). [https://www.flow3d.com\(2011\)](https://www.flow3d.com(2011))
- Habibi, M.S., & Khosrowjerdi, A. (2008). Investigation of the discharge coefficient of a Cramp weir and its comparison with that of an ogee weir by using FLUENT software. The 3rd Conference of Water Resources Management, Tabriz, Iran. <https://civilica.com/doc/50444>
- Hashemi Fesharaki, M. H., & Khoshfetrat, A. (2024). Experimental Investigation of Energy Loss in Crump Spillways in Free Flow and Submerged State. *Modares Civil Engineering journal*, 24(2), 157-167.
- Hosseini Mobarra, S.E., & Yasi, M. (2013). The effect of the height of a short-edged weir (Crump weir) on its flow pattern at a 90-degree bend. 12th Hydraulic Conference, Karaj, Iran. <https://civilica.com/doc/379448>
- Hussein, J. N. (2014). Experimental study of height and surface roughness effects of crump weirs on over flow characteristics. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, 22(4), 845-859.
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M., & Jalili Ghazizadeh, M. R. (2018). Side weir flow characteristics: comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001539](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001539)
- Keller, R. J. (1989). Sloping crest crump weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 115(2), 231-238. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:2\(231\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:2(231))
- Khalifa, S. Y., Adeogun, B. K., Ismail, A., Ajibike, M. A., & Muhammad, M. M. (2021). Experimental Study to Determine Flow Parameters over Roughed Crump Weir Models. *ATBU Journal of Science, Technology and Education*, 9(2), 18-29.
- Łukaszewicz, G., & Kalita, P. (2016). Navier–stokes equations. *Advances in Mechanics and Mathematics*, 34.

- Muhsun, S. S., Al-Madhhachi, A. S. T., & Al-Sharify, Z. T. (2020). Prediction and CFD simulation of the flow over a curved crump weir under different longitudinal slopes. *International Journal of Civil Engineering*, 18(9), 1067-1076. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00527-2>
- Muhsun, S. S., Talab Al-Osmy, S. A., Al-Hashimi, S. A. M., & Al-Sharify, Z. T. (2019). Theoretical, CFD simulation and experimental study to predict the flowrate across a square edge broad crested weir depending on the end depth as a control section. In *AWAM International Conference on Civil Engineering* (pp. 15-34). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32816-0_2
- Oertel, M. A. R. I. O. (2015). Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models. In *36th IAHR World Congress the Hague. Netherlands*.
- Rockne.karl, (2006). laboratory 7-open channel flow, [www.uic.edu / classes / cmeng 211 / lab 7](http://www.uic.edu/classes/cmeng211/lab7)
- Sarhan, S. A., & Jalil, S. A. (2018). Analysis of simulation outputs for the mutual effect of flow in weir and gate system. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(6), 48-59.
- Sarker, M. A., Rhodes, D. G., & Armstrong, G. S. (2006). Modification of Crump weir to facilitate fish passage. *Environmental Hydraulics and Eco-Hydraulics, Theme B, Proceedings: 21st Century: The New Era for Hydraulic Research and Its Applications*, 371.
- Spaan, G. B. H., Van Nooyen, R. R. P., De Graaff, B. J. A., & Brouwer, R. (2003). Discharge formulas of Crump-de Gruyter gate-weir for computer simulation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(4), 270-277.
- Stott.tim, (2006). Measuring stream flow, [www.filter.ac.uk / Fluvial Geomorphology](http://www.filter.ac.uk/Fluvial%20Geomorphology)
- Woldesemayat, E. M., & Genovese, P. V. (2021). Monitoring urban expansion and urban green spaces change in Addis Ababa: Directional and zonal analysis integrated with landscape expansion index. *Forests*, 12(4), 389. <https://doi.org/10.3390/f12040389>