



University Of Qom

Civil Infrastructure Researches

Civil Infrastructure
Researches

Online ISSN: 2783-140X
journal homepage: <https://cer.qom.ac.ir/>

Numerical Investigation of Flow over the Rectangular Compound Sharp-Crested Weir at Different Angles in Plan

Mahdi Majedi-Asl¹ , Mohammadhossein Jahanpeima², Peyman Khodapanah-Rad³, Mehdi Kouhdaragh⁴, Mohammad Bagherzadeh⁵

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, East Azarbaijan, Iran. E-mail: majedi@maragheh.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, East Azarbaijan, Iran. E-mail: hoosein59@yahoo.com
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, East Azarbaijan, Iran. E-mail: peymankhodapanah@yahoo.com
4. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Malekan Branch, Islamic Azad University, Malekan, Iran. E-mail: mehdi_k55@yahoo.com
5. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: m.bagherzadeh@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 25 Feb 2023
Revised 12 Jun 2023
Accepted 09 Jul 2023

Keywords:
The compound sharp-crested weir,
Discharge coefficient,
Angle of weir,
Transverse constriction,
Numerical model.

ABSTRACT

The aim of the current research is to evaluate the effect of placing a compound sharp-crested weir at different angles in the channel on its hydraulic performance. For this purpose, Flow-3D software was used to simulate the effect of the placement angle of the compound sharp-crested weir in the channel, considering four angles: zero (perpendicular to the flow pass), 15, 30, and 45 degrees. The comparison of the error percentage obtained between the results of the flow discharge and the depth of the upstream weir from the numerical results and the laboratory data was 0.39% and 2.86%, respectively. The results of the flow pattern passing through the compound sharp-crested weir showed that the flow lines are closer to each other when approaching the crest of the weir at the narrowing place, and the accumulation of flow lines increases in the place of the flow narrowing. The interference of flow lines at the narrowing place reduces the flow coefficient of the flow passing over the weir. The increase in transverse constricting and the decrease of 25 and 50% in the length of the weir crest caused a decrease in the flow discharge coefficient of 14.4 and 9.81%, respectively, compared to the sharp-crested weir of the same channel width. By creating a constant for the weir crown in the width of the compound weirs and placing them at a maximum angle of 45 degrees, the flow rate coefficient is increased 8.91% compared to the angle of the compound sharp-crested weir to the flow.

Cite this article: Majedi-Asl, Mahdi., Jahanpeima, Mohammadhossein., Khodapanah-Rad, Peyman., Kouhdaragh, Mehdi., Bagherzadeh, Mohammad. (2023). Numerical investigation of flow over the rectangular compound sharp-crested weir at different angles in plan. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 51-65. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9176.1461>



Publisher: University of Qom.
© The Authors.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9176.1461>



پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی



دانشگاه قم

شاپا الکترونیکی: ۱۴۰۰-۲۷۸۳

صفحه خانگی مجله: <https://cer.qom.ac.ir/>

بررسی عددی جریان عبوری از سرریزهای مستطیلی مرکب لبه‌تیز دارای زاویه در پلان

مهدی ماجدی اصل^۱، محمدحسین جهان‌پیما^۲، پیمان خداپناه‌راد^۳، مهدی کوهدرق^۴، محمد باقرزاده^۵

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران. رایانامه: majedi@maragheh.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران. رایانامه: hoosein59@yahoo.com

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران. رایانامه: peymankhodapanah@yahoo.com

۴. گروه مهندسی عمران، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران. رایانامه: mehd_k550@yahoo.com

۵. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.bagherzade@urmia.ac.ir

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی اثر قرارگیری سرریز مرکب لبه‌تیز در زوایای مختلف نسبت به جریان بر عملکرد هیدرولیکی آن می‌باشد. بدین منظور برای شبیه‌سازی تأثیر زاویه قرارگیری سرریزهای مرکب لبه‌تیز در کanal با در نظر گرفتن چهار زاویه صفر (عمود بر جریان)، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شد. مقایسه مقادیر درصد خطای به دست آمده بین نتایج مقادیر دبی و عمق جریان بالادست سرریز از نرم‌افزار با داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۸۶ درصد حاصل شد. نتایج الگوی جریان عبوری از سرریزهای مرکب لبه‌تیز نشان داد که خطوط جریان هنگام نزدیک شدن به تاج سرریز در محل تنگ‌شدگی بهم نزدیک شده و تجمع خطوط جریان در محل تنگ‌شدگی جریان افزایش می‌یابد. تداخل خطوط جریان در محل تنگ‌شدگی باعث کاهش ضریب دبی جریان عبوری از روی سرریز می‌گردد. افزایش تنگ‌شدگی عرضی و کاهش ۰/۲۵ و ۰/۵۰ درصدی طول تاج سرریز، باعث کاهش ضریب دبی جریان عبوری به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۸۱ درصد نسبت به سرریز لبه‌تیز هم‌عرض کanal گردید. با ایجاد تنگ‌شدگی در عرض سرریز مرکب و قرارگیری آن با زاویه حداقل ۴۵ درجه نسبت به امتداد جریان، ضریب دبی جریان تا ۰/۹۱ درصد نسبت به زمانی که سرریز مرکب لبه‌تیز عمود بر جریان است، افزایش یافت.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

کلیدواژه‌ها:

سرریز مرکب لبه‌تیز،

ضریب دبی،

زاویه قرارگیری سرریز،

تنگ‌شدگی عرضی،

مدل عددی.

استناد: ماجدی اصل، مهدی؛ جهان‌پیما، محمدحسین؛ خداپناه‌راد، پیمان؛ کوهدرق، مهدی؛ و باقرزاده، محمد. (۱۴۰۲). بررسی عددی جریان عبوری از سرریزهای مستطیلی مرکب لبه‌تیز دارای زاویه در پلان. *پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی*, ۲(۹)، ۵۱-۶۵.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9176.1461>



۱- مقدمه

حالات مختلف جریان عبوری از سرریز ضریب دبی را به راحتی محاسبه نمود [۸]. لی^۳ و همکاران با انجام آزمایش‌ها در مورد سرریزهای مرکب لبه‌تیز ذوزنقه‌ای- ذوزنقه‌ای نیز نتیجه گرفتند که ضریب دبی تابعی از نسبت ارتفاع سرریز به هد مؤثر است [۹].

حقیقین زیادی با استفاده از مدل فیزیکی در زمینه سرریزهای مرکب مطالعه نموده‌اند و به کارگیری مدل‌های عددی کمتر مدنظرشان بوده است. با توجه به اینکه استفاده از مدل آزمایشگاهی با هزینه‌های گراف جهت مدل‌سازی و صرف زمان زیاد برای انجام آزمایش‌ها همراه است؛ بنابراین بهره‌جویی از مدل‌های عددی گزینه مناسبی می‌باشد. در همین راستا استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۴) برای توصیف ویژگی‌های جریان در شرایط جریان زیربحراتی در سرریز جانبی مرکب نشان داد که مدل FLOW-3D توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان دارد [۱۰]. فرزین و همکاران با شبیه‌سازی سرریز لبه‌تیز مستطیلی قائم و مورب با نرم‌افزار FLOW-3D، دریافتند که شبیه سرریز با ضریب دبی جریان رابطه مستقیم دارد و در سرریز با زاویه ۵۰ درجه نسبت به افق حداقل آبگذری اتفاق می‌افتد [۱۱]. صمدی و ارونقی به شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جریان بر روی سرریزهای لبه‌تیز مرکب با فشردگی جانبی مستطیلی شکل قوس‌دار با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداختند. این حقیقین برای شبیه‌سازی جریان چندفازی از روش VOF^۵ و برای شبیه‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی RNG و k-e استفاده نمودند. نتایج نشان داد که فلوئنت جریان را بر روی سرریزهای لبه‌تیز مرکب قوسی مستطیلی را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند و می‌توان از این نرم‌افزار برای تعیین ضریب دبی روی سرریزهای مرکب با فشردگی جانبی

مدیریت و انتقال آب یکی از مباحث مهم در طول توسعه تمدن بشر می‌باشد. برای پاسخگویی به نیازها، سازه‌های هیدرولیکی متنوعی طراحی و ساخته شده است. یکی از سازه‌های متداول در بسیاری از سدها و کانال‌های انتقال آب، سرریزها هستند که به‌منظور تخلیه، اندازه‌گیری و کنترل سطح آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرریزها از مهم‌ترین سازه‌های اندازه‌گیری و تنظیم دبی جریان دارند که به دو صورت لبه تیز و پهن هستند. سرریزهای لبه‌تیز از متداول‌ترین سازه‌های کنترل، انحراف و اندازه‌گیری جریان هستند و در مقاطع مختلف مثلثی، مستطیلی، ذوزنقه‌ای، دایره‌ای، سهمی و غیره طراحی می‌شوند [۱]. از آنچاکه سرریزهای لبه‌تیز ساده در اندازه‌گیری و تخلیه جریان با دبی زیاد دارای محدودیت عملکرد هستند، سرریزهای لبه‌تیز مرکب که شامل دهانه مرکزی (دهانه پایینی) و دهانه بالایی می‌باشند، برای اندازه‌گیری محدوده گسترده‌تری از دبی‌های جریان و با دقت بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. این سرریزها از یک سرریز در قسمت پایین برای عبور دبی‌های کمتر و از یک سرریز در قسمت بالا برای دبی‌های بیشتر تشکیل می‌شوند [۳].

تحقیقات تجربی ابتدایی انجام شده مربوط سرریزهای مرکب را می‌توان به برگمن^۶ نسبت داد که با استفاده از سه مدل سرریز لبه‌تیز مرکب- با فشردگی جانبی یک معادله تجربی جهت ارزیابی دبی جریان بر حسب بار هیدرولیکی موجود بر روی سرریز محاسبه نمود [۴]. پس از ایشان پژوهشگران متعددی به صورت آزمایشگاهی انواع سرریز مرکب را مطالعه نمودند [۵] و [۷]. آیدین^۷ و همکاران با بررسی سرریز مستطیلی لبه‌تیز مرکب با اندازه‌گیری دبی و عمق روی سرریز برای ارتفاع و عرض تنگ‌شده‌گی متفاوت نشان دادند که می‌توان برای

³- Lee

⁴- Computational Fluid Dynamics

⁵- Volume of Fluid

¹- Bergmann

²- Aydin

شد [۸]. در ادامه نیز به بررسی محل قرارگیری سرریز مرکب مستطیلی لبه‌تیز در پلان و زوایای مختلف در برابر جریان و تأثیر موقعیت قرارگیری بر روی الگوی جریان و ضریب دبی پرداخته می‌شود. همچنین تحلیل و ارزیابی نتایج ضریب دبی و نمودار دبی- عمق نسبت به هم نیز در این پژوهش انجام خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۱- معرفی مدل‌های عددی

برای بررسی تغییرات زاویه قرارگیری تاج سرریز در مقابل جریان بر عملکرد هیدرولیکی سرریز لبه‌تیز مرکب با فشردگی جانبی متفاوت، ۱۵ مدل سرریز لبه‌تیز مرکب مستطیلی در ارتفاع (P) ۰/۱۰ متر با سه نسبت فشردگی عرضی (b/B) ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ و با چهار زاویه قرارگیری نسبت به جریان (θ) یعنی صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه و در چهار دبی جریان بالا دست Q انتخاب شد. مشخصات مدل‌ها و ابعاد هندسی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱، نمونه‌ای از مدل سرریز لبه‌تیز مرکب با قرارگیری مختلف در برابر جریان آورده شده است. در این تحقیق، ابتدا مدل عددی با مدل آزمایشگاهی سرریز (P) برابر ۰/۱۰ متر انجام شده توسط آیدین و همکاران مورد صحبت‌سنجی قرار می‌گیرد. این محققین از یک کانال مستطیلی افقی به طول ۶، عرض ۰/۳۲ و عمق ۰/۴۵ متر برای آزمایش‌ها استفاده نمودند [۸]. در شکل ۲، نمایی از مدل سرریز ارائه شده است. همچنین در جدول ۲، مشخصات هیدرولیکی و هندسی انتخاب شده برای صحبت‌سنجی ارائه شده است. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی متغیر سرریز شامل دبی بالا دست (Q)، ارتفاع سرریز (P)، عرض کانال (B)، فشردگی عرضی سرریز (b)، ارتفاع هد آب سرریز (h) و زاویه قرارگیری سرریز نسبت به جریان (θ) می‌باشند که در شکل ۱، نمایی از مدل سرریز ارائه شده است.

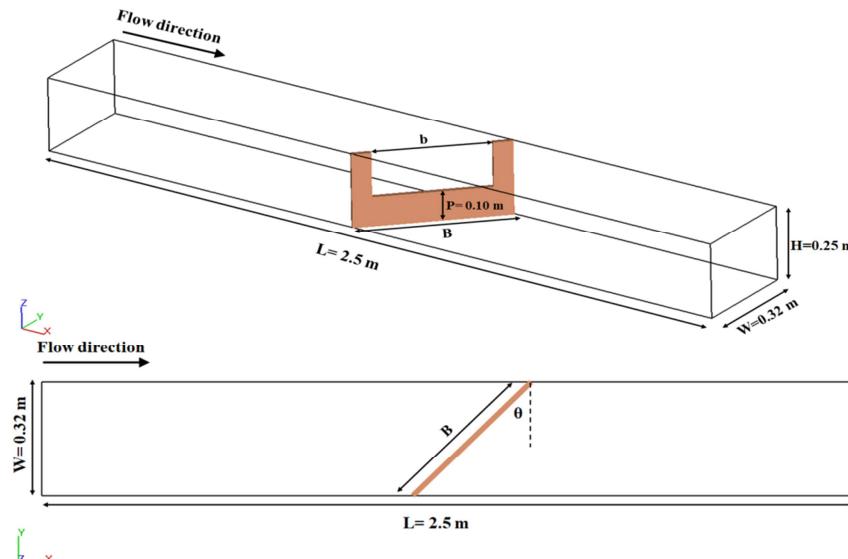
استفاده کرد [۱۲]. آلتان ساکاریا^۶ و همکاران با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D جریان بر روی سرریز لبه‌تیز با فشردگی جانبی و سیستم ترکیبی سرریز و دریچه را شبیه‌سازی عددی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مطابقت خوبی میان داده‌های تجربی و یافته‌های عددی وجود دارد. علاوه‌بر این، با استفاده از قابلیت‌های مدل‌سازی عددی ضرایب دبی سرریز و دریچه در سیستم ترکیبی را به طور جداگانه محاسبه نمودند که در مطالعات تجربی به راحتی به دست نمی‌آیند [۱۳]. ماجدی اصل و همکاران به ارزیابی و تعیین استهلاک انرژی در پایین دست سرریز اوجی با وجود سازه گابیونی با استفاده از روش‌های فرامدلی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش‌های فرامدلی می‌تواند به خوبی پارامترهایی همانند استهلاک انرژی جریان را پیش‌بینی نماید [۱۴]. استایندیتو^۷ و همکاران برای محاسبه عدد فرود و سرعت میانگین عمقی بر روی سرریز ذوزنقه‌ای از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده نمودند. نتایج نشان داد که عدد فرود با میانگین سرعت این عمق متناسب است زیرا عدد فرود با افزایش سرعت متوسط افزایش می‌یابد. این محققین با مقایسه نتایج تجربی با مدل‌سازی عددی دریافتند که مقادیر ویژگی‌های جریان به دست آمده از مدل عددی با نتایج فیزیکی نزدیکی مناسبی دارد [۱۵]. با توجه به اینکه سرریز لبه‌تیز مرکب رایج‌ترین و متداول‌ترین سرریز لبه‌تیز است؛ بنابراین ضروری است که میدان جریان و رفتار سازه در مواجهه با جریان عبوری بررسی شود. با بررسی منابع مشخص شد که تحقیقات در زمینه تأثیر موقعیت قرارگیری سرریز مرکب مستطیلی لبه‌تیز در پلان و در زاویه‌های مختلف تاکنون به طور جامع مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر، ابتدا جهت کالیبراسیون و صحبت‌سنجی کار عددی از داده‌های آزمایشگاهی آیدین و همکاران استفاده خواهد

⁶- Altan-Sakarya

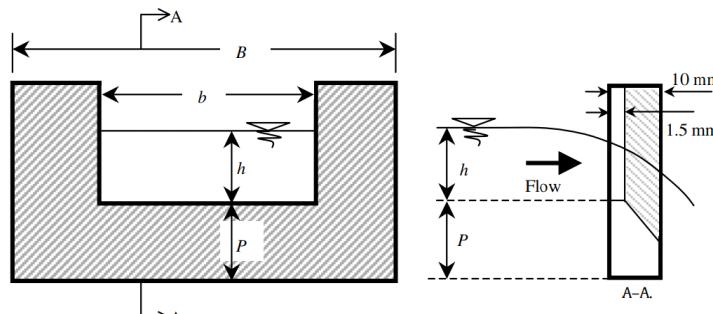
⁷- Setyandito

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مدل‌های تحقیق حاضر

مدل	عرض کanal (m)	فرشته‌گی سرریز (m)	ارتفاع سرریز (m)	نسبت‌های فشردگی جانبی (-)	زاویه‌های قرارگیری صفر	دبی ورودی (m^3/s)
۱	۰/۳۲	۰/۱۶ و ۰/۲۲/۵	۰/۱	۰/۷۵ و ۰/۵	۰/۰۴۱-۰/۰۱۱	
۲	۰/۳۲	۰/۱۶ و ۰/۲۲/۵	۰/۱	۰/۷۵ و ۰/۵	۰/۰۴۱-۰/۰۱۱	
۳	۰/۳۲	۰/۱۶ و ۰/۲۲/۵	۰/۱	۰/۷۵ و ۰/۵	۰/۰۴۱-۰/۰۱۱	
۴	۰/۳۲	۰/۱۶ و ۰/۲۲/۵	۰/۱	۰/۷۵ و ۰/۵	۰/۰۴۱-۰/۰۱۱	



شکل ۱- نحوه قرارگیری سرریز مرکب لبه‌تیز در برابر جریان



شکل ۲- نمایی از مدل تحقیق آیدین و همکاران [۸]

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مدل سرریز مرکب لبه‌تیز برای صحبت‌سنگی

دبی بالادست ($Q_0 \cdot m^3/s$)	ارتفاع آب در بالادست سد (H-m)	ارتفاع آب روی تاج سرریز (h-m)	ارتفاع سرریز (P-m)	طول تاج سرریز (b-m)	عرض کanal (B-m)
۰/۰۲۹	۰/۳۰۲	۰/۲۰۲	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۳۲
۰/۰۴۱	۰/۳۶۳	۰/۲۶۳	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۳۲

را با استفاده از روش حجم سیال بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. این معادلات در دستگاه مختصات کارتزین (x, y, z) به صورت روابط (۱) تا (۴) می‌باشند [۱۶ و ۱۷]:

۲-۲- معادلات حاکم بر جریان
نرم‌افزار FLOW-3D برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر، معادلات ناویر-استوکس رینولدزی

ارزیابی قرار گرفت. یک مشبلاک برای کanal اصلی و یک مشبلاک در نزدیکی سرریز مرکب لبه‌تیز در نظر گرفته شد. با شبیه‌سازی مدل در سه حالت مختلف با اندازه مشاهی متغیر و مقایسه افزایش دقت نتایج آنها از روی داده‌های آزمایشگاهی مربوط به دبی و عمق جریان بالا دست برداشت شده توسط آیدین و همکاران، در نهایت مشبندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. جدول ۴ مشخصات سه اندازه مش انتخاب شده برای آنالیز حساسیت مش را نشان می‌دهد. طبق راهنمای نرم‌افزار برای استفاده از مش یکنواخت در هر سه راستای مختصات x ، y و z و استفاده از نسبت حداکثر مش بزرگ‌تر به مش کوچک‌تر برابر $1/5$ ، در این جدول سعی شد که موارد ذکر شده رعایت شود. برای مقایسه نتایج و تعیین محدوده درصد خطای خطا بین داده‌های حاصل از نرم‌افزار FLOW-3D با داده‌های آزمایشگاهی از رابطه (۷) استفاده شد [۲۱ و ۲۲]:

$$APE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{M_{(EXP)} - M_{(NUM)}}{M_{(EXP)}} \right| \times 100 \quad (7)$$

در رابطه بالا، APE درصد خطای متوسط^۸، $(M)_{EXP}$ پارامتر هیدرولیکی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و $(M)_{NUM}$ پارامتر هیدرولیکی حاصل از حل عددی می‌باشد.

مقادیر نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به دبی و عمق جریان در بالا دست سرریز مرکب لبه‌تیز همراه با خطای محاسبه شده در جدول ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در بزرگ‌ترین اندازه مش انتخاب شده، درصد خطای به دست آمده بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی بالاترین مقدار را دارد. به طوری که درصد خطای به دست آمده برای دبی و عمق جریان بالا دست به ترتیب ۵ و $6/20$ درصد می‌باشد. همچنین با مشاهده شکل ۳، می‌توان مشاهده کرد که با کاهش اندازه مش، اختلاف

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial w} + G_z + f_z \quad (4)$$

در این روابط، (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 ، R_{SOR} منبع جرم، ρ چگالی سیال، P' پخش آشفتگی، V_F کسری از حجم مرتبط با جریان و فشار است. با توجه به نتایج بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین دیگر بر روی هیدرولیک جریان عبوری از سرریزها و سرریز لبه‌تیز مشخص گردید که مدل آشفتگی k-e (RNG) نتایج دقیق‌تری را با نتایج آزمایشگاهی برقرار می‌کند [۱۳ و ۱۸]. از این‌رو، برای حل آشفتگی k-e (RNG) میدان جریان در این تحقیق از مدل آشفتگی (RNG) استفاده شد. در شبیه‌سازی آشفتگی جریان از معادلات زیر استفاده می‌کند [۱۹]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

در به کارگیری این معادلات مقادیر ضرایب ثابت صورت جدول ۳ منظور شده است.

جدول ۳- ثابت‌های مدل آشفتگی (RNG)

C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ
۰/۰۸۵	۱/۴۲	۱/۶۸	۰/۷۲	۰/۷۱

۳-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی دامنه حل

در این تحقیق در بخش استقلال نتایج نسبت به اندازه مش، از دو مشبلاک با اندازه‌های مختلف مش مورد

⁸- Average Percent Error

می‌دهد تأثیر اندازه مش در نتایج عددی تقریباً ناچیز است. بنابراین مش ریز به عنوان مش مناسب برای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود.

بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی کاهش می‌یابد. اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی برای اندازه مش ریز (حالت سوم) برای دبی بالادرست کمتر از $0/5$ درصد و برای عمق جریان بالادرست کمتر از 4 درصد می‌باشد که نشان

جدول ۴- مشخصات سه سایز مش در نظر گرفته شده برای آنالیز حساسیت مش

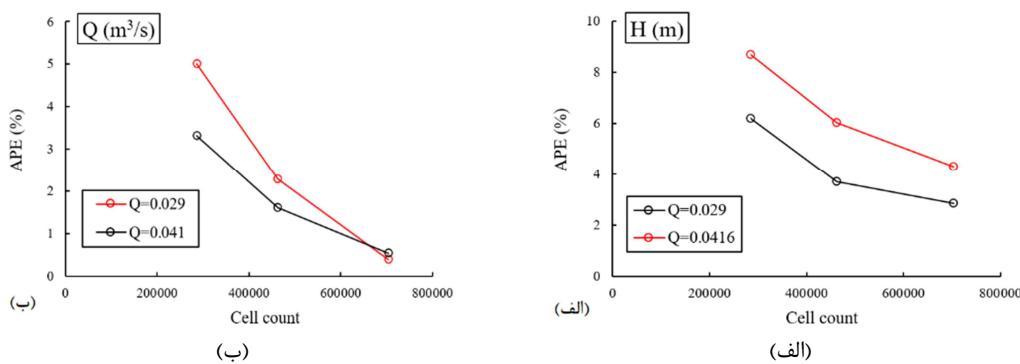
نوع مش	نسبت مش درشت‌تر به ریزتر	تعداد مش	سایز مش ریزتر (m)	سایز مش درشت‌تر (m)	مدل
درشت	۱/۲۱	۲۸۵۴۲۴	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۴	حالت اول
متوسط	۱/۲۶	۴۶۳۲۰۷	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۲	حالت دوم
ریز	۱/۴۶	۷۰۳۷۹۸	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۱	حالت سوم

۵- مقادیر عددی و درصد خطای بهدست‌آمده از سه اندازه مش در نظر گرفته شده

حالت	دبی بالادرست (Q-m³/s)	عمق جریان بالادرست (H-m)	دبی APE (%)	عمق APE (%)
اول	۰/۰۳۰۴	۰/۱۸۳	۶/۲۰	۵
	۰/۰۴۲۹	۰/۲۳۱	۸/۶۷	۳/۳۱
دوم	۰/۰۲۹۶	۰/۱۹۱	۳/۷۰	۲/۲۷
	۰/۰۴۲۲	۰/۲۴۱	۶/۰۲	۱/۶۱
سوم	۰/۰۲۹۱	۰/۱۹۳	۲/۸۶	۰/۳۹
	۰/۰۴۱۸	۰/۲۴۷	۴/۳۰	۰/۵۵

که اندازه مش ریز برای انتخاب به عنوان مش بهینه می‌تواند ایده‌آل باشد. زمان محاسباتی برای شبیه‌سازی‌ها با مش بهینه انتخابی بین 4 تا 5 ساعت با استفاده از یک کامپیوتر شخصی با هشت هسته CPU i7- $7700K$ @ 4.2 GHz و 16 گیگابایت رم) بود.

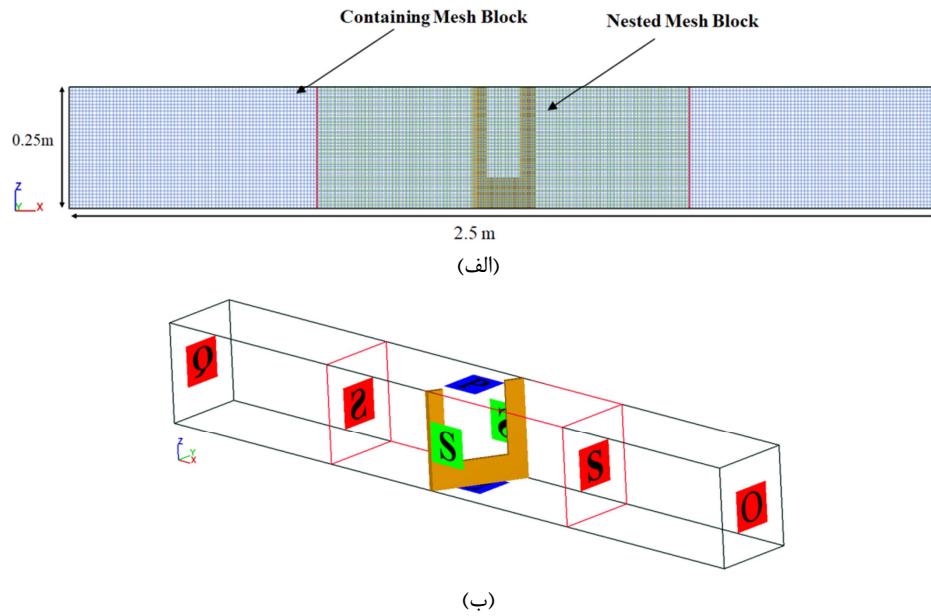
با توجه به اینکه با کوچک‌تر شدن اندازه مش، زمان شبیه‌سازی افزایش می‌یابد، بنابراین ریزتر کردن اندازه مش نسبت به حالت سوم برای کمتر کردن اختلاف، شاید در برابر زمان و حجم خروجی شبیه‌سازی که می‌تواند اختلاف زمان و حجم خروجی شبیه‌سازی تقریباً دو برابری را ایجاد کند، عاقلانه نباشد. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت



شکل ۳- مقایسه درصد خطای متوسط در برابر تعداد مش (الف) عمق و (ب) دبی جریان بالادرست

لبه‌تیز مرکب مستطیلی به اندازه مش $0/۰۰۷۵$ متر در نظر گرفته شد (شکل ۴-الف). شرایط مرزی اعمال شده در نرمافزار در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

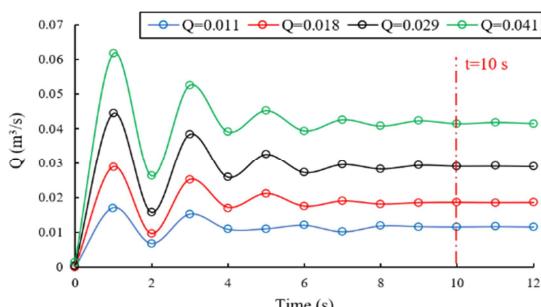
بنابراین برای دامنه حل محاسباتی یک مش بلک با بعد مش $0/۰۱۱$ متر در هر سه جهت برای بخش بالادرست کanal اصلی، یک مش بلک در نزدیکی سرریز



شکل ۴- (الف) نمایی کلی از شبکه‌بندی و (ب) شرایط مرزی در دامنه حل

۴-۲- بررسی همگرایی و پایداری جریان

برای بررسی همگرایی حل عددی و پایداری جریان، نمودارهای تاریخچه زمان به دست آمده از Flux surface مربوط به دبی جریان بالا دست سرریز مرکب لبه‌تیز نشان داده شده است (شکل ۵). مشاهده می‌شود که از زمان $t=10\text{ s}$ به بعد تقریباً تغییرات نتایج دبی‌های بالا دست نسبت به زمان، ناچیز است و جریان به پایداری نسبی رسیده است. بنابراین می‌توان برای کاهش زمان محاسباتی برای سری محاسبات در نظر گرفته شده، مدت زمان شبیه‌سازی را 10 s در نظر گرفت.



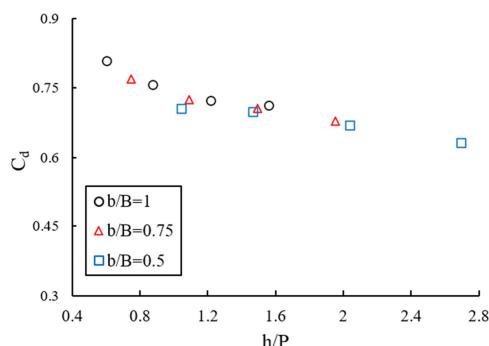
شکل ۵- نتایج تاریخچه زمانی مربوط به دبی در بالا دست سرریز مرکب لبه‌تیز

۳- بحث و بررسی نتایج

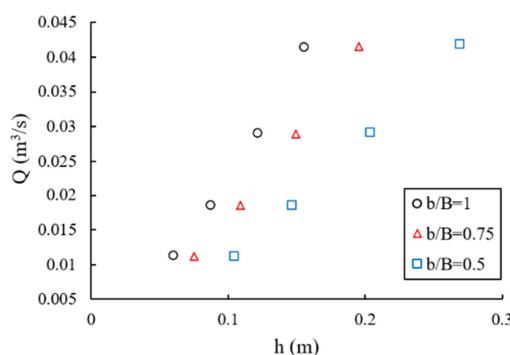
یکی از مهم‌ترین پارامترهای اصلی در تحقیق حاضر، ثابت بودن عمق جریان در بالا دست کanal برای تمامی مدل‌ها و بررسی میزان دبی جریان خروجی از مدل‌ها با ایجاد تغییرات هندسی در سرریز می‌باشد. بنابراین برای ورودی جریان از شرط عمق جریان بالا دست مشخص ^{۱۰} استفاده شد. همچنین برای مرز پایین دست به منظور عدم تأثیرگذیری جریان در شبکه حل از شرایط خروجی جریان استفاده گردید. برای مرز Z_{max} شرط Fluidfraction=0 Specified Pressure همراه با 0 Pa اعمال گردید. این نوع شرط مرزی شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایط سطح آزاد یا فشار اتمسفر در نظر می‌گیرد [۱۶]. برای دیوارهای و کانال شرط مرزی Wall تعریف شده که همانند یک دیوار مجازی بدون اصطکاک عمل می‌کند. مرز بین مش بلک‌ها و دیوارهای شرط تقاضن ^{۱۱} در نظر گرفته شد. این شرط زمانی استفاده می‌شود که تفاوتی در مشخصات جریان (عمق، سرعت، فشار جریان و غیره) بین قبل و بعد از شرط مرزی ایجاد نکند.

¹⁰- Specified Pressure¹¹- Symmetry

۹/۸۱ درصد نسبت به سرریز لبه‌تیز هم‌عرض کanal می‌گردد. همچنین در شکل ۸، نمودار h/P - عمق جریان عبوری از سرریز مرکب لبه‌تیز مستطیلی برای نسبت‌های تنگ‌شدگی مختلف نشان داده شده است. در این نمودار برای یک دبی ثابت، افزایش ارتفاع آب روی سرریز به ازای افزایش تنگ‌شدگی مشهود است. به طور متوسط برای عبور جریان با دبی یکسان، کاهش ۲۵ و ۵۰ درصدی طول تاج سرریز، باعث افزایش عمق جریان بالا دست به ترتیب $10/89$ و $25/85$ درصد نسبت به سرریز لبه‌تیز هم عرض کanal می‌گردد. علت افزایش عمق جریان بالا دست با افزایش تنگ‌شدگی، کاهش طول مؤثر تاج سرریز و انسداد جریان می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی جریان در مقابل نسبت h/P در مدل‌ها با طول تاج مختلف

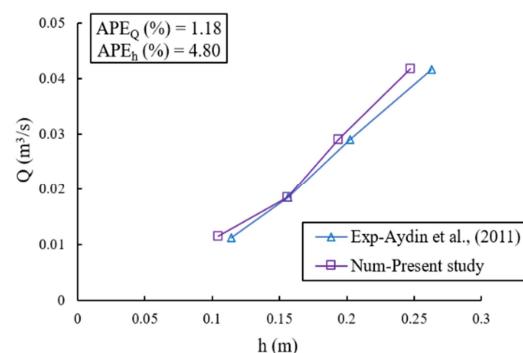


شکل ۸- تغییرات دبی - عمق در مدل‌ها با طول تاج مختلف
۳-۳- تأثیر قرارگیری سرریز مرکب با زاویه در برابر جریان همراه با b ثابت

در شکل ۹، الگوی جریان عبوری از سرریزهای مرکب لبه‌تیز مستطیلی همراه با تنگ‌شدگی عرضی در زوایای مختلف قرارگیری در برابر جریان نشان داده شده

۱-۳- صحبت‌سنجدی مدل عددی

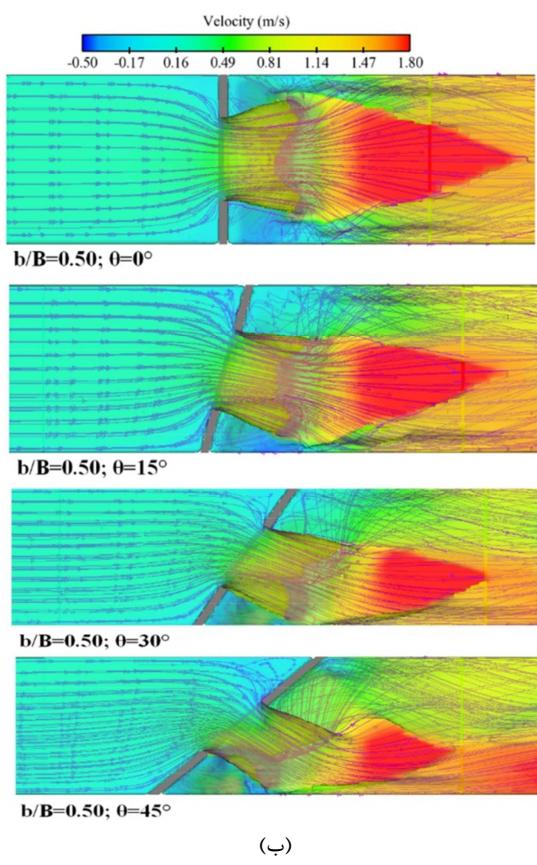
در بخش صحبت‌سنجدی، مقایسه‌ای بین نمودار دبی- عمق جریان عبوری از سرریز مرکب به دست آمده از نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام شده توسط آیدین و همکاران انجام و در شکل ۶ ارائه شده است. سرریز مرکب انتخاب شده در بخش صحبت‌سنجدی برای سرریز مرکب لبه‌تیز با نسبت $b/B=0.5$ و ارتفاع سرریز (P) برابر $10/0$ متر می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، روند نمودار نتایج عمقد نتایج عددی، تقریباً مطابق روند نمودار نتایج آزمایشگاهی است. به طوری که با افزایش دبی جریان بالا دست، عمق جریان در بالا دست سرریز، افزایش می‌یابد. به طور متوسط، مقدار خطای APE برای دبی بالا دست و عمق جریان بالا دست به ترتیب $1/18$ و $4/80$ درصد به دست آمد که می‌توان نتیجه گرفت تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار است.



شکل ۶- مقایسه نتایج دبی - عمق نتایج عددی و آزمایشگاهی
۲-۳- تأثیر تنگ‌شدگی عرضی در سرریز لبه‌تیز بر مشخصات جریان عبوری

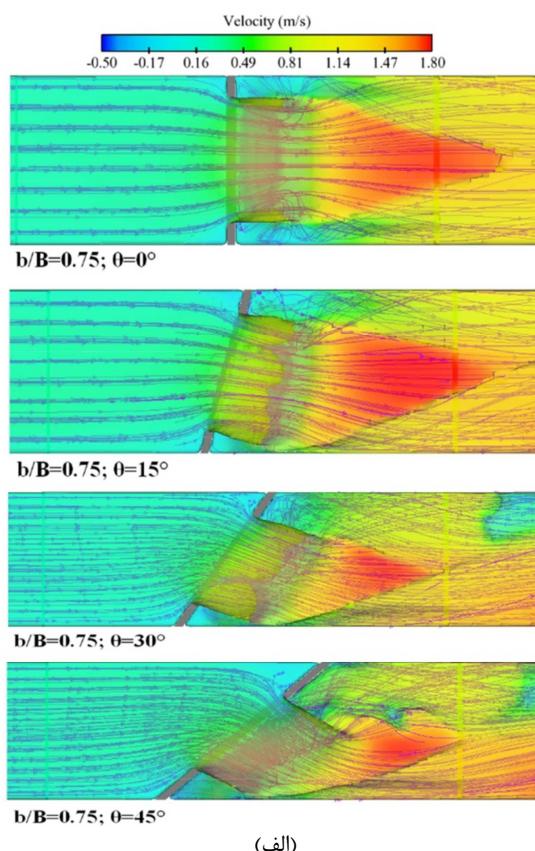
تغییرات ضریب دبی جریان عبوری از سرریزهای لبه‌تیز به ازای پارامتر بدون بعد h/P در شکل ۷ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تنگ‌شدگی عرضی ضریب دبی کاهش می‌یابد. علت آن می‌تواند به دلیل تجمع خطوط جریان در محل تنگ‌شدگی و کاهش ضریب دبی جریان باشد. به طور متوسط برای عبور جریان با دبی یکسان، کاهش ۲۵ و ۵۰ درصدی طول تاج سرریز، باعث کاهش ضریب دبی جریان عبوری به ترتیب $4/14$ و

افزایش تنگ‌شدگی عرضی، افزایش می‌یابد و این امر با افزایش زاویه قرارگیری سرریز مرکب در مقابل جریان، تشدید می‌شود. تجمع خطوط جریان در محل تنگ‌شدگی و افزایش قرارگیری سرریز مرکب در برابر جریان می‌تواند بر روی راندمان سرریزهای مرکب تأثیرگذار باشد.



b/B=0.5

است. مشاهده می‌شود، افزایش زاویه قرارگیری سرریز مرکب لبه‌تیز در برابر جریان، باعث ایجاد انحنای بیشتر جریان عبوری از مسیر موازی خود می‌شود و برخورد جریان با دیواره افزایش می‌یابد. با مقایسه تغییرات توزیع سرعت جریان در طول کanal، می‌توان گفت که برای یک دبی ثابت، سرعت جریان در پایین دست سرریز مرکب با

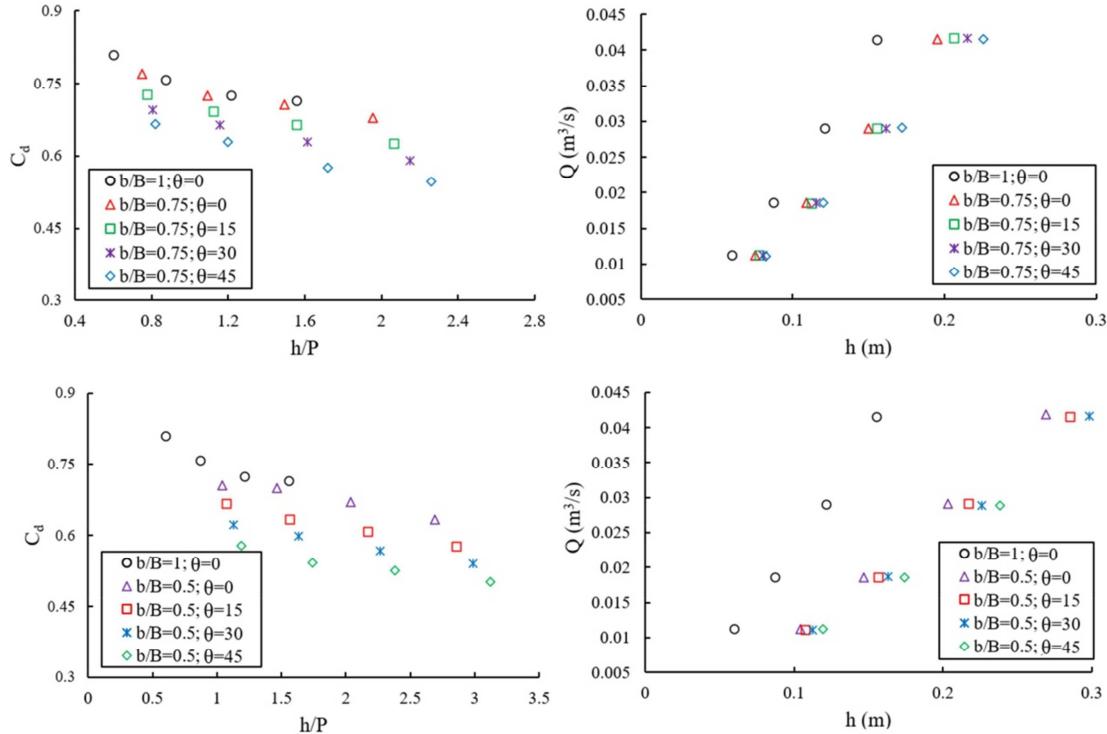


b/B=0.75

نسبت $b/B=0.75$ و با زاویه قرارگیری 45° درجه نسبت به زاویه قرارگیری صفر درجه (عمود بر جریان)، $13/48$ درصد و برای نسبت $b/B=0.5$ و با زاویه قرارگیری 45° درجه نسبت به زاویه قرارگیری صفر درجه (عمود در برابر جریان)، $18/13$ درصد کاهش می‌یابد. علت این امر، کاهش طول تاج سرریز و تجمع خطوط جریان در محل تنگ‌شدگی در اثر قرارگیری با زاویه در مقابل جریان می‌باشد. همچنانی با دقت در نمودار دبی- عمق مدل‌های سرریز مرکب لبه‌تیز، می‌توان بیان کرد که هرچقدر نسبت تنگ‌شدگی بیشتر و زاویه قرارگیری در برابر جریان

شکل ۱۰، تغییرات دبی- عمق و ضریب دبی جریان عبوری از مدل‌های مرکب سرریز لبه‌تیز را برای قرارگیری در زوایای مختلف در کanal نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با ایجاد هم‌زمان تنگ‌شدگی عرضی و قرارگیری سرریزهای مرکب با زاویه نسبت به جریان، ضریب دبی کاهش می‌یابد. این امر با افزایش عمق جریان در بالادست سرریزها برای یک دبی ثابت همراه است. هرچقدر تنگ‌شدگی افزایش می‌یابد، ضریب دبی جریان عبوری از سرریزهای مرکب مورب، کاهش بیشتری دارد. بهطوری که ضریب دبی برای مدل‌های سرریز مرکب با

قرارگیری در حالت عمود، $8/60$ درصد و برای نسبت $b/B=0.5$ و با زاویه قرارگیری 45 درجه، $12/57$ درصد افزایش می‌یابد.



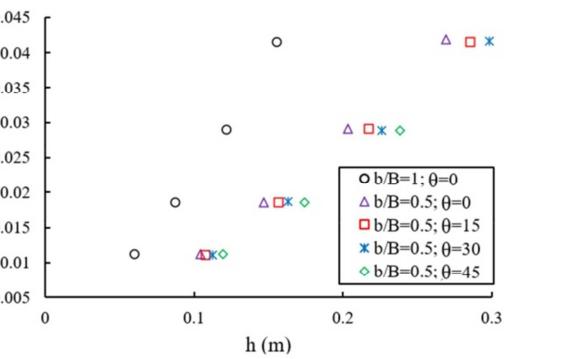
شکل ۱۰- تغییرات دبی- عمق و ضریب دبی جریان در سرریزهای مرکب لبه‌تیز با زوایای قرارگیری مختلف

باشد. همچنین برای یک زاویه قرارگیری ثابت، افزایش نسبت تنگشدنگی باعث کاهش ضریب دبی جریان در تمامی مقادیر دبی می‌گردد.

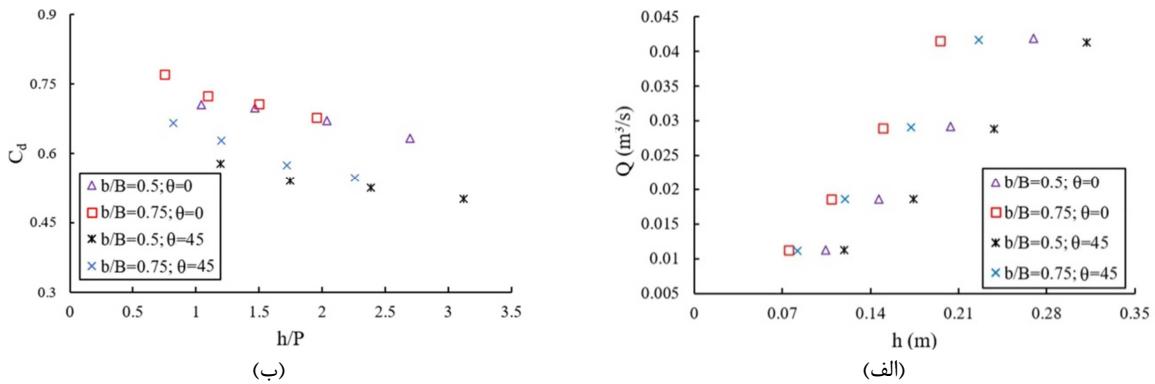
۴-۳- قرارگیری با زاویه در برابر جریان همراه با عرض تنگشدنگی ثابت

در این بخش، اثر زاویه قرارگیری سرریزهای مرکب با ثابت در نظر گرفتن عرض تنگشدنگی بر روی مشخصات جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب الگوی جریان عبوری از سرریزهای مرکب لبه‌تیز با قرارگیری در زوایای مختلف را برای نسبت‌های تنگشدنگی $0/5$ و $7/75$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با ثابت بودن عرض تنگشدنگی و با افزایش زاویه قرارگیری سرریز نسبت به جریان، طول تاج سرریز افزایش می‌یابد.

افزایش یابد، عمق جریان در بالادست سرریز افزایش می‌یابد. برای مثال، سرریز مرکب با نسبت تنگشدنگی $b/B=0.75$ و با زاویه قرارگیری 45 درجه نسبت به



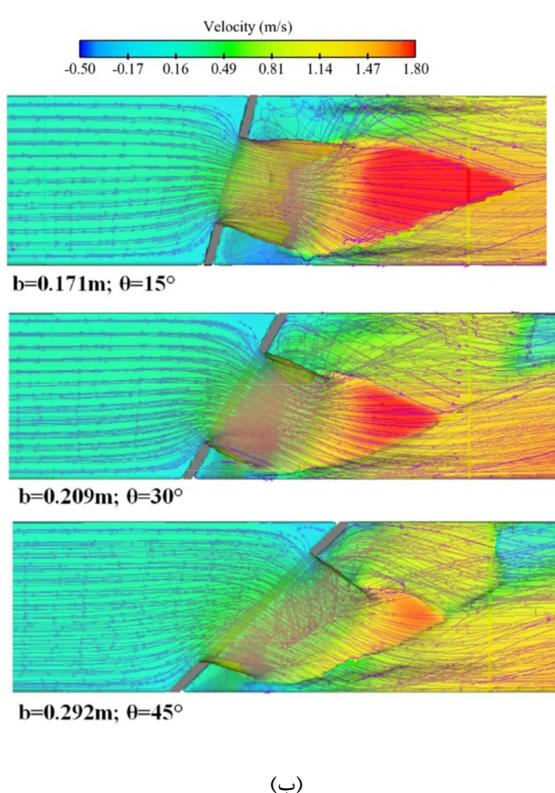
شکل ۱۱، مقایسه‌ای بین ضریب دبی و دبی- عمق جریان عبوری از مدل‌های سرریز مرکب لبه‌تیز و تأثیر زاویه قرارگیری سرریزها بر روی راندمان آنها انجام می‌دهد. در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود که برای یک زاویه قرارگیری ثابت، افزایش نسبت تنگشدنگی سرریز (b/B) باعث افزایش عمق جریان در بالادست سرریز می‌شود. همچنین برای یک نسبت تنگشدنگی ثابت، افزایش زاویه قرارگیری سرریز، باعث افزایش عمق جریان در بالادست سرریزها می‌گردد. علت این امر، انسداد جریان ناشی از تنگشدنگی و نتیجه افزایش عمق جریان در بالادست می‌باشد. با دقیق در شکل ۱۱-ب، می‌توان گفت که برای یک نسبت تنگشدنگی ثابت، افزایش زاویه قرارگیری سرریز در برابر جریان، باعث کاهش ضریب دبی جریان در تمامی دبی‌ها می‌گردد. علت این امر می‌تواند به دلیل انحراف بیشتر خطوط جریان عبوری از سرریز با افزایش زاویه قرارگیری و افزایش طول تنگشدنگی سرریز



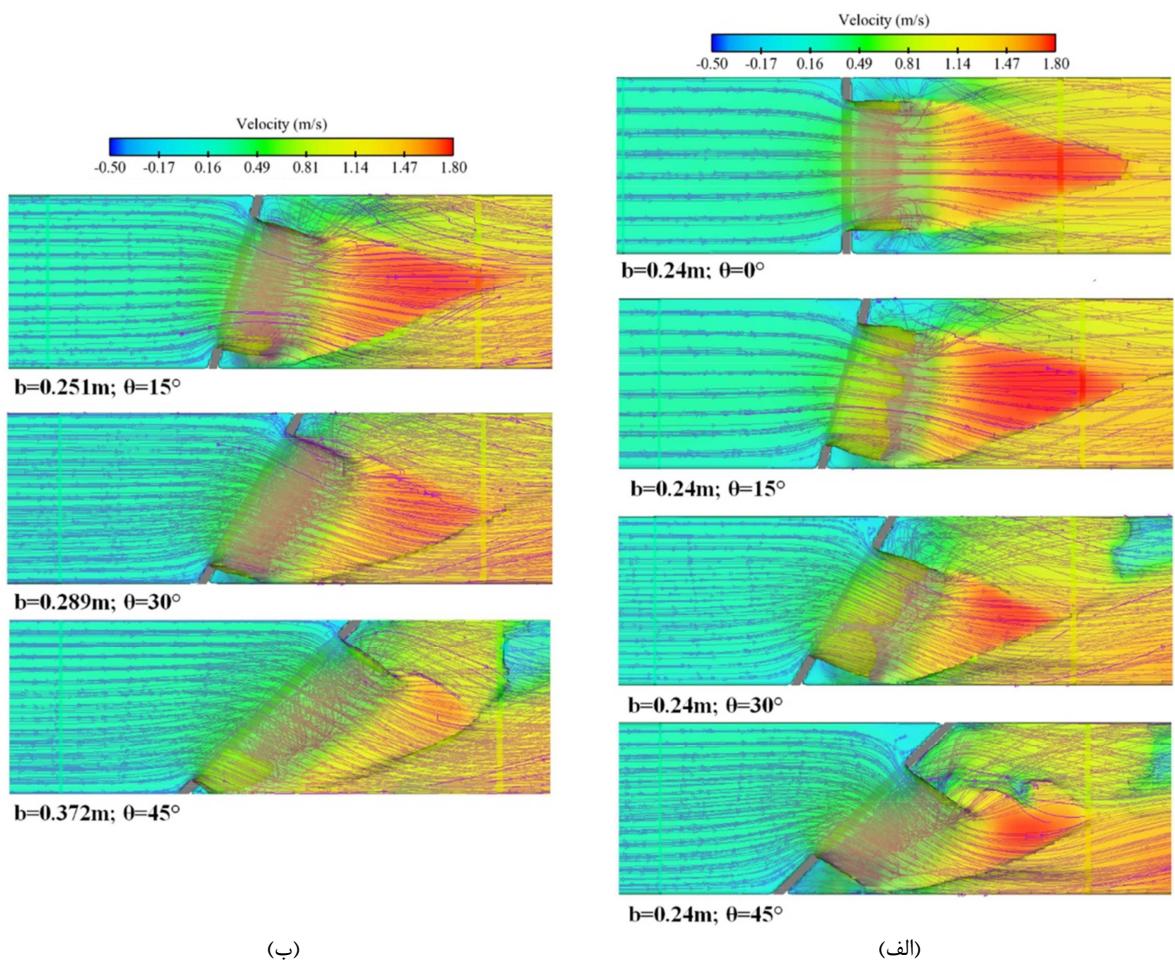
شکل ۱۱- تغییرات دبی-عمق و ضریب دبی جریان در سرریزهای مرکب لبه‌تیز با نسبت تنگ‌شدگی و زوایای قرارگیری مختلف، (الف) دبی - عمق و (ب) ضریب دبی

است. افزایش طول تاج سرریز می‌تواند باعث افزایش راندمان سرریزهای مرکب در عبوردهی بیشتر جریان در هد ثابت گردد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه قرارگیری سرریز، انحنای خطوط جریان عبوری از سرریز افزایش یافته و جریان با دیواره سرریز برخورد می‌کند.

به‌طوری که با افزایش زاویه از صفر درجه تا ۴۵ درجه، طول تاج سرریز از $0.16/0.29$ به $0.24/0.372$ متر (درصد) برای نسبت $b/B=0.5$ و از $0.24/0.372$ به $0.48/0.75$ متر (درصد) برای نسبت $b/B=0.75$ افزایش می‌یابد. با این حال در نسبت تنگ‌شدگی $0.75/0.75$ ، تأثیر افزایش طول مؤثر تاج سرریز با افزایش زاویه قرارگیری مشهود



شکل ۱۲- خطوط سرعت جریان عبوری از سرریزهای مرکب لبه‌تیز در زوایایی و طول تاج مختلف (شرط نسبت تنگ‌شدگی $b/B=0.5$ ،)، (الف) طول تاج ثابت و (ب) طول تاج متغیر



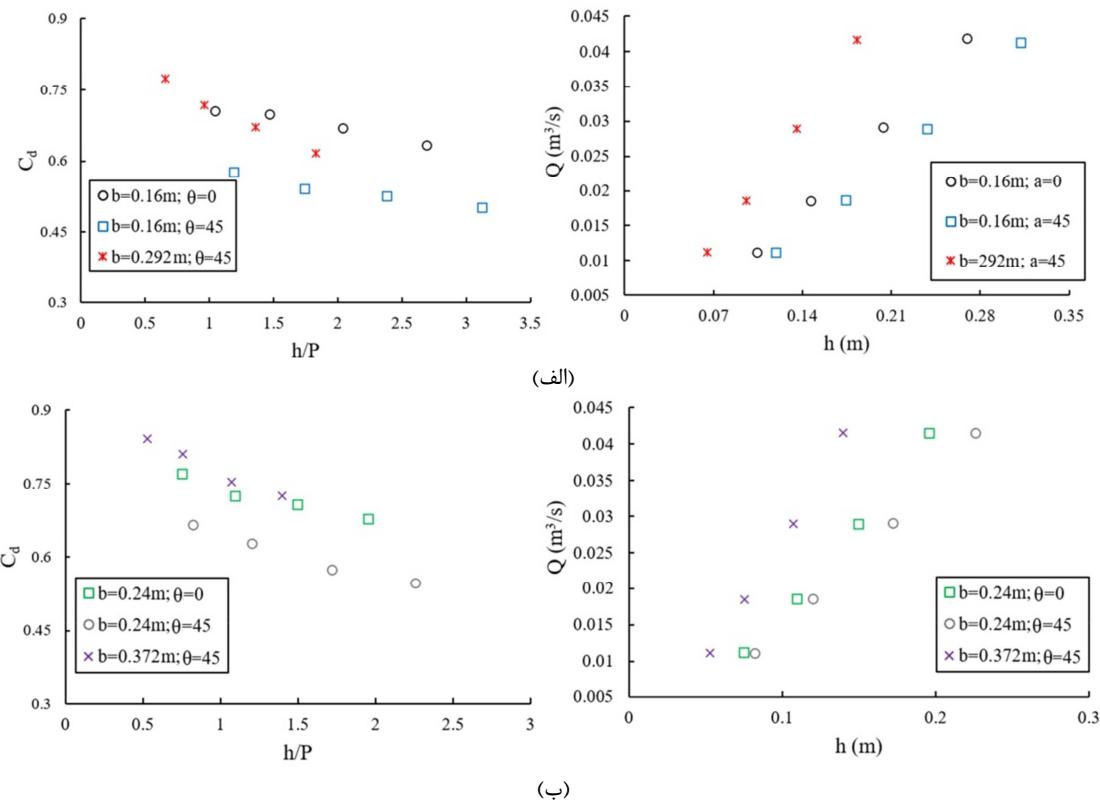
شکل ۱۳- خطوط سرعت جریان عبوری از سرریزهای مرکب لبه‌تیز در زوایای و طول تاج مختلف (شروع نسبت تنگ‌شدگی $b/B=0.75$)
(الف) طول تاج ثابت و (ب) طول تاج متغیر

لبه‌تیز عمود بر جریان کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که عمق جریان در بالادست سرریز مرکب با طول تاج سرریز ثابت و قرارگیری با زاویه در برابر جریان، حدوداً $15/85$ درصد افزایش می‌یابد. با دقت در نمودار تغییرات ضریب دبی جریان عبوری از سرریزهای مرکب لبه‌تیز می‌توان بیان کرد که ایجاد تنگ‌شدگی ثابت در عرض سرریز و قرارگیری با زاویه 45° درجه باعث افزایش ضریب دبی جریان تا $8/91$ درصد نسبت به سرریز مرکب لبه‌تیز عمود بر جریان می‌شود. این در حالی است که با ثابت نگهداشتن طول تاج سرریز، قرارگیری سرریز مرکب با زاویه 45° درجه باعث کاهش $22/18$ درصدی ضریب دبی می‌گردد. تغییرات ایجاد شده در عمق جریان و ضریب دبی در نسبت تنگ‌شدگی اولیه $b/B=0.75$ بیشتر از نسبت $b/B=0.5$ است. در یک جمع‌بندی می‌توان بیان

در شکل ۱۴، تغییرات دبی- عمق و ضریب دبی جریان عبوری از مدل‌های سرریز مرکب لبه‌تیز را برای قرارگیری در زوایای مختلف در کanal و طول تاج مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای انتقال دبی جریان یکسان به پایین‌دست سرریز، زمانی که طول تاج سرریز ثابت در نظر گرفته شود (عرض تنگ‌شدگی افزایش پیدا کند) با افزایش زاویه قرارگیری سرریز نسبت به مسیر جریان، ارتفاع عمق جریان افزایش می‌یابد. همچنین زمانی که طول تاج سرریز با افزایش زاویه قرارگیری سرریز افزایش می‌یابد (عرض تنگ‌شدگی ثابت باشد)، عمق جریان در بالادست کاهش می‌یابد. به طور متوسط در دبی ثابت، عمق جریان در بالادست سرریز با ایجاد تنگ‌شدگی ثابت در عرض سرریز و قرارگیری با زاویه در برابر جریان، حدوداً $31/99$ درصد نسبت به سرریز مرکب

تنگ‌شدگی را ثابت در نظر گرفت تا راندمان آن‌ها افزایش یابد.

کرد که در سریزهای مرکب لبه‌تیز، هنگامی که به صورت زاویه‌دار در برابر جریان قرار می‌گیرند، بایستی عرض



شکل ۱۴- ۱- دبی- عمق و ضریب دبی جریان در مدل‌ها با زوایای قرارگیری مختلف و طول تاج مختلف، (الف) $b/B=0.75$ و (ب) $b/B=0.5$

درصد خطای به‌دست آمده برای دبی و عمق جریان بالا‌دست برای اندازه مش بزرگ‌تر به ترتیب ۵ و ۶/۲۰ درصد محاسبه شد، این در حالی است که برای مش بهینه درصد خطای به‌دست آمده به ترتیب ۰/۳۹ و ۲/۸۶ درصد بود.
 ۲- در بخش صحتسنجی داده‌های عددی با آزمایشگاهی، با توجه به اینکه میانگین درصد خطای به‌دست آمده برای نمودار دبی- عمق با در نظر گرفتن ابعاد مش بهینه برای دبی جریان و اعماق بالا‌دست به ترتیب ۱/۱۸ و ۴/۸۰ درصد محاسبه گردید، تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار بود.

۳- الگوی جریان عبوری از سریزهای مرکب لبه‌تیز نشان داد که خطوط جریان هنگام نزدیک شدن به تاج سریز در محل تنگ‌شدگی به هم نزدیک

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی مشخصات جریان عبوری از سریزهای مرکب لبه‌تیز مستطیلی در شرایط قرارگیری در زوایای مختلف در برابر جریان پرداخته شد. نتایج شامل آنالیز حساسیت مش و صحتسنجی داده‌های عددی با داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت و در گام بعدی مشخصات جریان، شامل الگوی جریان، نتایج ضریب دبی و دبی- عمق برای مدل‌های مختلف سریزهای مرکب لبه‌تیز بررسی شد. با توجه به اهداف کلی تحقیق حاضر، نتایج به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- نتایج آنالیز حساسیت مش با انتخاب سه اندازه مختلف برای مش‌های به‌کار رفته در تحقیق حاضر نشان داد که با کاهش اندازه مش، اختلاف بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی کاهش می‌یابد.

قرارگیری سرریز در عرض تنگشدن ثابت، انحنای خطوط جریان عبوری از سرریز افزایش یافته و جریان با دیواره سرریز برخورد می‌کند.

-۸ ایجاد تنگشدن ثابت در عرض سرریزهای مرکب و قرارگیری با زاویه حداقل ۴۵ درجه باعث افزایش ضریب دی جریان تا ۸/۹۱ درصد نسبت به سرریز مرکب لبه‌تیز عمود بر جریان می‌شود. این در حالی است که با ثابت نگهداشتن طول تاج سرریز، قرارگیری سرریز مرکب با زاویه ۴۵ درجه باعث کاهش ۲۲/۱۸ درصدی ضریب دبی می‌گردد.

در یک جمع‌بندی می‌توان بیان کرد که در سرریزهای مرکب لبه‌تیز، هنگامی که به صورت زاویه‌دار (مورب) در برابر جریان قرار می‌گیرند، بایستی عرض تنگشدن را ثابت در نظر گرفت تا راندمان آنها افزایش یابد. برای تحقیقات آتی، با توجه به ثابت بودن ارتفاع سرریز در تحقیق حاضر، بررسی تأثیر ارتفاع سرریز بر الگوی جریان سرریزهای لبه‌تیز با قرارگیری در زوایای مختلف در پلان پیشنهاد می‌شود.

شده و تجمع خطوط جریان در محل تنگشدن شدی جریان افزایش می‌یابد. تداخل خطوط جریان در محل تنگشدن باعث کاهش ضریب دی جریان عبوری از روی سرریز می‌گردد.

-۵ افزایش تنگشدن ثابت کاهش ضریب درصدی طول تاج سرریز، باعث کاهش ضریب دی جریان عبوری به ترتیب ۹/۸۱ و ۴/۱۴ درصد نسبت به سرریز لبه‌تیز هم‌عرض کانال گردید. علت این امر، تجمع خطوط جریان در محل تنگشدن و کاهش طول مؤثر تاج سرریز می‌باشد.

-۶ ضریب دی جریان عبوری از سرریزهای لبه‌تیز مورب با افزایش زاویه قرارگیری سرریز، افزایش یافت. تأثیر زاویه قرارگیری سرریز در افزایش ضریب دی، برای دیهای پایین بیشتر بود. به طوری که با افزایش ۴۱ درصدی طول تاج سرریز، ضریب دی در دی حداقل و حداقلش به ترتیب ۹/۷۹ و ۹/۴۵ درصد افزایش یافت.

-۷ با مشاهده الگوی جریان عبوری از سرریزهای مرکب مورب مشاهده گردید که با افزایش زاویه

References

- [1] United States. Bureau of Reclamation. (2001). *Water measurement manual*. The Bureau, Chapters 5 and 7.
- [2] Wu, S., & Rajaratnam, N. (1996). Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(7), 412-414. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:7\(412\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:7(412))
- [3] Grant, D. M., & Dawson, B. D. (1995). *Open Channel Flow Measurement Handbook*. 4th Edition, Isco Environmental Division, Lincoln, NE.
- [4] Bergmann, M. (1963). *Special weirs, Water measurement manual*. USBR Publication Report Number HYD-505 United States Bureau of Reclamation (USBR), USA, Chapter 7, Section 13.
- [5] Martinez, J., Reca, J., Morillas, M. T., & Lopez, J. G. (2005). Design and calibration of a compound sharp-crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 112-116. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(112\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(112))
- [6] Jan, C. D., Chang, C. J., & Lee, M. H. (2006). Discussion of “Design and calibration of a compound sharp-crested weir” by J. Martinez, J. Reca, MT Morillas, and JG Lopez. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), 868-871. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:8\(868\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(868))
- [7] Mohammed, A. Y., Al-Talib, A. N., & Basheer, T. A. (2013). Simulation of flow over the side weir using simulink. *Scientia Iranica*, 20(4), 1094-1100. [In Persian]
- [8] Aydin, I., Altan-Sakarya, A. B., & Sisman, C. (2011). Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(2), 144-151. doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2011.01.003](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.01.003)
- [9] Lee, J. T., Chan, H. C., Huang, C. K., & Leu, J. M. (2012). Experiments on hydraulic relations for flow over a compound sharp-crested weir. *International Journal of Physical Sciences*, 7(14), 2229-2237. doi: [10.5897/IJPS11.1695](https://doi.org/10.5897/IJPS11.1695)

- [10] Khassaf, S. I., Attiyah, A. N., & Al-Yousify, H. A. (2016). Experimental investigation of compound side weir with modeling using computational fluid dynamic. *International Journal of Energy and Environment*, 7(2), 169-178.
- [11] Farzin, S., Karami, H., Yahyavi, F., & Nayyer, S. (2018). Numerical study of hydraulic characteristics around the vertical and diagonal sharp crested weirs using Flow3D simulation.. *Civil Infrastructure Researches*, 4(1), 15-24. doi: [10.22091/cer.2017.1661.1068](https://doi.org/10.22091/cer.2017.1661.1068) [In Persian]
- [12] Samadi, A., & Arvanaghi, H. (2014). CFD simulation of flow over contracted compound arched rectangular sharp crested weirs. Iran University of Science & Technology, 4(4), 549-560.
- [13] Altan-Sakarya, A. B., Kokpinar, M. A., & Duru, A. (2020). Numerical modelling of contracted sharp-crested weirs and combined weir and gate systems. *Irrigation and Drainage*, 69(4), 854-864. doi: [10.1002/ird.2468](https://doi.org/10.1002/ird.2468)
- [14] Majedi Asl, M., valizadeh, S., & Mohammad Taghizadeh, Y. (2021). Study of energy dissipation of gabion structure downstream of Ogee weir using laboratory and meta-model methods. *Journal of Hydraulics*, 16(4), 21-35. doi: [10.30482/jhyd.2021.285286.1526](https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.285286.1526) [In Persian]
- [15] Setyandito, O., Christian, S., & Lopa, R. T. (2022). Flow characteristics investigation on trapezoidal weir using FLOW 3D. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 998(1), 012013. IOP Publishing. doi: [10.1088/1755-1315/998/1/012013](https://doi.org/10.1088/1755-1315/998/1/012013)
- [16] Dasineh, M., Ghaderi, A., Bagherzadeh, M., Ahmadi, M., & Kuriqi, A. (2021). Prediction of hydraulic jumps on a triangular bed roughness using numerical modeling and soft computing methods. *Mathematics*, 9(23), 3135. doi: [10.3390/math9233135](https://doi.org/10.3390/math9233135)
- [17] Bagherzadeh, M., Mousavi, F., Manafpour, M., Mirzaee, R., & Hoseini, K. (2022). Numerical simulation and application of soft computing in estimating vertical drop energy dissipation with horizontal serrated edge. *Water Supply*, 22(4), 4676-4689. doi: [10.2166/ws.2022.127](https://doi.org/10.2166/ws.2022.127)
- [18] Wang, Y., Wang, W., Hu, X., & Liu, F. (2018). Experimental and numerical research on trapezoidal sharp-crested side weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 64, 83-89. doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.005)
- [19] Flow Science Inc. (2016). *FLOW-3D V 11.2 User's Manual*; Flow Science: Santa Fe, NM, USA.
- [20] Yakhot, V. Orszag, S.A. Thangam, S. Gatski, T.B. and Speziale, C.G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4, 1510-1520. doi: [10.1063/1.858424](https://doi.org/10.1063/1.858424)
- [21] Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R., Fuladipanah, M., Abraham, J., & Bagherzadeh, M. (2020). Simulation of bridge pier scour depth base on geometric characteristics and field data using support vector machine algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(2), 137-143. doi: [10.22126/arww.2021.5747.1189](https://doi.org/10.22126/arww.2021.5747.1189)
- [22] Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Ghaderi, A., Di Francesco, S., & Asl, M. M. (2021). Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3451-3459. doi: [10.1016/j.asej.2021.03.013](https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.013)