

Investigating the Discharge Coefficient and Efficiency of the Pivot Side Weirs with Threshold

Homan Kheybar,¹ Seyed Mohsen Sajjadi^{2*}, Javad Ahadiyan³, Mehdi Ghomeshi⁴

¹ Hydraulic structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

² Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

³ Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

⁴ Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received 15

January 2024

Received in

revised form

18 February

2024

Accepted 21

February 2024

Published online

14 June 2024

Keywords:

Weir threshold, spatially varied flow, efficiency, Side Weirs, Pivot Weirs, discharge coefficient

Objective: In this research, the discharge coefficient and efficiency of the weir side overflow model with threshold flow at different opening angles facing side channel were studied. The overflow model built in this research consists of a threshold part with a fixed right angle and an inclined pivot part with the ability to change the angle.

Methods: Experiments were done in a flume (12 m in length, 80 cm in width, and 80 cm in height). The absolute mean of the difference percentage of the energy of upper and lower currents for different models was calculated according to 5%. Hence, the Demarchi hypothesis is acceptable for extracting the discharge coefficient of overflowing in this research. The performance of three models in relation to the height of the overflowing threshold part to the height of the pivot of overflow with different $\frac{hs}{hp}$ based on 1.5 and 0.75 were investigated. Then their discharge coefficient and efficiency were calculated.

Results: Based on laboratory results, it was observed for all Froude numbers that by increasing the opening angle facing the side channel, the discharge coefficient increased from 30% to 60% on average and efficiency rose from 20% to 45% percent compared to the control model (rectangle overflowing with right sharp edge). Finally, an empirical relation is extracted to calculate the flow coefficient of laboratory models. R^2 of this relationship is equal to 0.72, and the NRMSE and WQD error values for it were calculated as 0.6 and 0.02, respectively.

Conclusions: The results showed that the model's opening facing the side channel at different angles led to the rise of the discharge coefficient and efficiency of the overflow. It had a positive effect on the performance of the pivot side overflow. In the current research, an experimental relationship was obtained to calculate the flow coefficient of laboratory models. According to the error calculated for this relationship, it can be concluded that the mentioned equation has suitable accuracy.

*Corresponding Author, Email: m.sajjadi@scu.ac.ir

Cite this article: Kheybar, H., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, M., & Ghomeshi . (2024). Investigating the Discharge Coefficient and Efficiency of the Pivot Side Weirs with Threshold. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*,



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096>



بررسی ضریب دبی و راندمان سرریزهای جانبی لولایی با آستانه

هومن خیبری^۱، سید محسن سجادی^{۲*}، جواد احدیان^۳، مهدی قمشی^۴

^۱ گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۳ گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۴ گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: در این پژوهش ضریب دبی و راندمان مدل سرریز جانبی لولایی با آستانه جریان تحت زوایای بازشدگی مختلف رو به کانال جانبی بررسی شد. مدل سرریز ساخته شده در این پژوهش از یک بخش آستانه با زاویه قائم ثابت و یک بخش لولایی مایل با قابلیت تغییر زاویه تشکیل شده است.
مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت:	روش پژوهش: آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع مشابه ۸۰ سانتی‌متر صورت پذیرفت. میانگین مطلق درصد اختلاف انرژی ویژه جریان بین انتهای بالادست و پایین‌دست برای مدل‌های مختلف در حدود ۵ درصد محاسبه شده است و لذا فرضیه دیمارچی در برآورد ضریب دبی سرریزهای تحقیق حاضر، قابل استفاده خواهد بود. عملکرد سه مدل با نسبت‌های ارتفاع بخش آستانه سرریز به ارتفاع بخش لولایی سرریز $(\frac{h_s}{h_p})$ متفاوت به ترتیب برابر ۱/۵، ۱ و ۰/۷۵ بررسی شد و ضریب دبی و راندمان آن‌ها محاسبه گردید.
تاریخ بازنگری:	یافته‌ها: با توجه به نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید که برای تمام اعداد فرود بالادست، با افزایش زاویه بازشدگی رو به کانال جانبی، ضریب دبی مدل‌های مختلف به‌طور میانگین در حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد و راندمان در حدود ۲۰ تا ۴۵ درصد نسبت به مدل شاهد (سرریز مستطیلی لبه تیز قائم) افزایش خواهد یافت. در ادامه یک رابطه خطی به‌منظور محاسبه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی به‌دست آورده شد. R^2 این رابطه برابر با ۰/۷۸ و مقادیر خطای NRMSE و WQD برای آن به‌ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۰۲ محاسبه شدند.
تاریخ پذیرش:	نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بازشدگی مدل رو به کانال جانبی تحت زوایای مختلف مکانی، راندمان، سرریزهای جانبی، سرریزهای لولایی، ضریب دبی
تاریخ انتشار:	صحت سنجی رابطه خطی حاصل شده در این پژوهش برای محاسبه ضریب دبی و با توجه به مقدار خطای این رابطه، در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که معادله مذکور از دقت مناسبی برخوردار است.
کلیدواژه‌ها:	آستانه سرریز، جریان متغیر مکانی، راندمان، سرریزهای جانبی، سرریزهای لولایی، ضریب دبی

*نویسنده مسئول، Email: m.sadjadi@scu.ac.ir

استناد: خیبری، هومن؛ سجادی، سید محسن؛ احدیان، جواد؛ و قمشی، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی ضریب دبی و راندمان سرریزهای جانبی لولایی با آستانه. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096>



مقدمه

سرریز جانبی یک سازه پر کاربرد است که از آن برای روگذری جریان در مسیل‌ها و کانال‌ها استفاده می‌گردد. در این گونه سرریزها، محور کانال جانبی شامل یک سرریز مستقیم است که محور آن موازی تاج سرریز است. درحالی‌که محور کانال پایین دست سرریز استاندارد به صورت عمود بر تاج سرریز تعبیه می‌گردد. از این سرریز به‌ویژه در سدهای خاکی یا محل‌هایی در کناره سدها که موقعیت مناسب‌تری با حوضچه آرامش برقرار می‌سازد و به‌طور کلی هر جا که کاربرد سرریز مستقیم عملی نیست، استفاده می‌شود (Iranpour et al., 2024; Hajjaligol et al. 2021; Fathi-Moghadam et al. 2024) از جمله مدل‌های کارآمدی که طی سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند، می‌توان به سرریزهای لولایی^۱ اشاره نمود. سرریز لولایی، مدلی نسبتاً جدید از سرریزها است که تاکنون عمدتاً به‌عنوان سازه سرریز در کانال اصلی مورد آزمایش و استفاده قرار گرفته است. برطبق تعریف، سرریز لولایی سازه‌ای است که می‌توان آن را در کف یک کانال یا مجرا لولا نمود و زاویه آن نسبت به کف نیز قابل تغییر و تنظیم است. به کمک اهرم یا کابل‌هایی که در دو طرف سرریز تعبیه می‌شوند، می‌توان زاویه سرریز را تغییر داد و آن را بالا یا پایین آورد. سرریزهای لولایی از گروه سرریزهای لبه تیز مایل هستند و در بهره‌برداری‌ها می‌توان آنها را در زوایای مختلف نسبت به کف کانال تنظیم نمود. از جمله مزایای این سازه، امکان استفاده از آن هم به‌عنوان آبگیر و هم به‌صورت آب‌بند، امکان تخلیه رسوبات، نیاز به انرژی کم و مکانیزم ساده تنظیم سازه، طراحی روگذر و سهولت اتوماسیون است.

مروری بر منابع

اولین مطالعات درباره سرریزهای لولایی در حد فاصل سالهای ۱۸۸۶-۱۸۸۷ توسط بازن دانشمند فرانسوی انجام گرفت. وی آزمایش‌های خود را برای دو مدل سرریز لولایی با فشردگی و بدون فشردگی جانبی در کانالی به مشخصات ۲۱۳ متر طول و ۲ متر عرض انجام داد. اما نتایج وی با نتایج سایر محققان تفاوت چشمگیر داشت. Schoder و Turner (۱۹۲۹) با تحلیل نتایج بازن به این نتیجه رسیدند که دلیل مغایرت نتایج وی، مشخص نبودن لبه تیز بودن یا نبودن سرریزهای مورد استفاده بوده است. در نهایت، خطای برآورد دبی در حالت جریان آزاد با استفاده از داده‌های وی ۳/۴ درصد بوده است. اولین گزارش ثبت شده از کاربرد سرریزهای لولایی مربوط به پروژه بولدر کنیون متعلق به سازمان USBR بوده است. سرریز مورد استفاده در این پروژه فاقد فشردگی جانبی بوده و از کف متحرک در محل استفاده شده است. مشخصات هندسی کانال مورد استفاده نیز عبارت بودند از ۵/۵ متر طول، ۰/۶۱ متر عرض و ۲/۹ متر عمق. Kindsvater و Carter (۱۹۵۷) رابطه‌ای را برای محاسبه دبی برای سرریزهای لبه تیز در شرایط جریان آزاد ارائه دادند که در آن C_e ضریب دبی، b_c عرض سرریز بر حسب متر و h_1 ارتفاع آب روی سرریز (بر حسب متر) خواهد بود. آنها نشان دادند که ضریب دبی با نسبت‌های $\frac{h_1}{p}$ و $\frac{b_c}{B_1}$ رابطه خطی دارد. Hulsing (۱۹۶۷) رابطه دبی-اشل سرریزهای مستطیلی لبه تیز هم‌عرض کانال را با نسبت شیب‌های ۳:۳، ۲:۳ و ۱:۳ به سمت پایین دست تعیین و با سرریز مستطیلی لبه تیز قائم مقایسه نمود. Brater و King (۱۹۷۶) یک رابطه تصحیح شده برای ضریب دبی با توجه به معادله مرسوم سرریزهای قائم ارائه نمودند. واهلین و رپلوگله (۱۹۹۴) در یک پروژه متعلق به سازمان USBR، آزمایش‌هایی بر روی یک کانال مستطیلی با ۱۵ متر طول، ۱/۲۲ متر عرض با دو سرریز لولایی به عرض‌های ۱/۱۴ و ۱/۲ متر و طول تیغه‌های ۰/۶۱ و ۰/۴۶ انجام دادند. آنها دریافتند که معادله استاندارد دبی که برای سرریزهای معمولی مستطیلی به‌دست می‌آید، برای سرریزهای لولایی نیز قابل استفاده و اجرا است. بنابراین، یک ضریب تصحیح برای زاویه سرریز لولایی در نظر گرفته شد. Sajjadi و همکاران (۲۰۲۴) نسبت به بررسی اثر فیزوپلاگ در سرریز جانبی سد رامشیر مطالعه عددی دوبعدی پخش سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ و ۱۰۰ ساله با سناریوهای مختلف نمودند. چهار سناریو شامل وضعیت

¹ Side Weir

² Pivot or Pivot Weir

فعلی، سناریوی لایروبی کانال سیلاب، سناریوی تعمیرات اساسی کانال سیلاب و سناریوی تعمیرات اساسی کانال سیلاب با لایروبی مخزن مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که کانال سیلاب بر در حالت فعلی خود حتی نمی تواند جریان های کمتر از طراحی را تخلیه کند و جریان از خاکریزهای طرفین آن سرریز می کند. یافته های تحقیق آنها نشان داد که لایروبی در مدیریت سیل از اهمیت ویژه و اساسی برخوردار است.

احدیان و همکاران (۱۴۰۳) در یک تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اثر دیوار جداکننده هدایتی در اصلاح الگوی جریان ورودی به آبگیرهای جانبی پرداختند و مقدار عمق جریان در قبل و بعد از دیوار مستغرق و غیرمستغرق با حالت شاهد مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که دیوار مستغرق اثر بیشتری نسبت به دیوار غیر مستغرق دارد. ایشان نتیجه گیری نمودند در بسیاری از دبی ها کاهش عمق جریان در پایین دست آبگیر رخ میدهد. بیشترین مقدار کاهش معادل ۴/۷۶ درصد و بازشدگی ۱۰۰ درصد در نتیجه در اثر کارگذاری دیوار مستغرق بود. Arvanaghi و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از سرریزهای لولایی در شرایط جریان آزاد پرداختند. معادله دبی-اشل سرریز لولایی را برای هر یک از زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در یک مدل آزمایشگاهی کوچک که شامل کانال مستطیلی به عرض ۰/۲۵ متر و عمق ۰/۷ متر و ارتفاع سرریز ۰/۲ متر بود، تعیین کردند. شیخ رضازاده نیکو و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق دیگری به بررسی اثر فشردگی های جانبی مختلف بر روی ضریب دبی سرریزهای لولایی در شرایط جریان مستغرق پرداختند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی ملاحظه شد که با کاهش عرض سرریز لولایی نسبت به عرض کانال، به دلیل تأثیر فشردگی جریان و گردابه های تشکیل شده در نزدیکی کناره بالادست سرریز، گرادیان سرعت تبدیل به گرادیان فشار گردیده که سبب افزایش بارآبی شد و پدیده برگشت آب رخ نمود. با ایجاد فشردگی جانبی، عرض مؤثر مجرای عبور جریان، کاهش یافته، ضریب دبی کاهش می یابد. با افزایش نسبت عرض سرریز به عرض کانال و لذا کاهش اثرات فشردگی جریان، ضریب دبی برای یک شاخص استغراق معین، افزایش می یابد. درنهایت نیز یک معادله به منظور محاسبه دبی در سرریز لولایی تحت شرایط جریان مستغرق به دست آورده شد. نیسی و همکاران (۱۴۰۳) سرریز جانبی به شکل مثلثی در دو حالت با لبه ساده و شیبدار در آزمایشگاه و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف در شرایط جریان زیر بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با شیبدار کردن لبه های سرریز جانبی مثلثی میزان گردابه ایجاد شده در ورودی دهانه سرریز کاهش می یابد و لذا ضریب دبی و حجم جریان عبوری از سرریز نسبت به حالت عادی و مستطیلی به ترتیب به میزان حدود ۲۷ درصد و ۴۸ درصد افزایش نشان می دهد. Azimfar و همکاران (۲۰۱۷) با انجام آزمایش هایی، به ارائه روابطی برای محاسبه ضریب دبی سرریز لولایی هم عرض کانال در شرایط آزاد و مستغرق پرداختند. ایشان برای برآورد دبی سرریز و ضریب دبی از یک رویکرد نظری مبتنی بر معادلات برنولی و مومنوم استفاده نمودند. معادلات ضریب دبی با استفاده از سایر داده های تجربی و شرایط صحرائی اعتبار سنجی شد و نتایج با معادلات پیشنهادی Wahlin و Replogle (۱۹۹۴) مقایسه گردید. بررسی ها نشان داد که معادلات پیشنهادی در این تحقیق ساده تر از روش پیشنهادی Wahlin و Replogle (۱۹۹۴) برای تعیین ضریب تخلیه سرریز لولایی است و دقت بالاتری نیز دارند. Bijankhan و Ferro (۲۰۱۸) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر زاویه شیب بر عملکرد سرریز لولایی پرداختند. آزمایش ها با استفاده از زوایای شیب ۳۰ درجه تا ۹۰ درجه انجام گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات زاویه شیب سرریز به طور جزئی بر رابطه دبی تأثیر می گذارد. در ادامه نیز روابطی برای محاسبه دبی ارائه شد. بخشایی و همکاران (۱۴۰۱) به انجام آزمایش هایی برای تعیین ضریب دبی سرریز جانبی لولایی پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی تحت تأثیر سرریز لولایی در جنب سرریز است و در نتیجه در شرایط جریان بر روی سرریز جانبی نسبت به حالت ایستا و شاهد مؤثر بوده است. مقادیر دبی جریان عبوری و تغییرات پروفیل سطح آب سرریز جانبی برای کانال با حالت صفر درجه و عمودی همبستگی خوبی را نسبت به مقادیر حاصل شده از جریان در کانال دارد. بخشایی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش دیگری با هدف افزایش ضریب دبی عبوری و بازدهی بهینه سرریز جانبی لولایی شکل، به بررسی مدل فیزیکی این نوع از سرریز و راندمان بهینه ضریب دبی آن پرداختند. با توجه به

نتایج مشاهده گردید که انرژی در امتداد سرریز جانبی برای وضعیت کانال، تقریباً ثابت است و تغییرات کمی دارد. نتایج آزمایشگاهی برای هر کدام از حالت‌های قرارگیری سرریز نسبت به عمق و حالت زاویه دار نسبت به کانال نشان می‌دهد که داده‌های برداشتی در سرریز به حالت ساده و عمودی نسبت به حالت زاویه‌دار، اثرگذارتر است و هرچه میزان زاویه نسبت به حالت عمودی بیشتر شود، این تاثیر افزایش خواهد یافت. باقری و همکاران (۱۳۹۷)، با انجام آزمایشهایی نشان دادند که در صورت تشکیل پرش هیدرولیکی روی یک سرریز جانبی خطی، افزایش ارتفاع می‌تواند منجر به کاهش ضریب دبی عبوری از آن سرریز شود. ایشان به این نتیجه رسیدند که دلیل این کاهش دبی، انحراف کمتر جریان به سمت سرریز در حالت تشکیل پرش هیدرولیکی روی سرریز است. Parvaneh و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی شرایط هیدرولیکی دبی در یک مدل جدید سرریز جانبی مثلثی با بستر شیبدار در جریان زیر بحرانی پرداختند. هدف اصلی مطالعه آنها، بررسی دقیق‌تر عملکرد هیدرولیکی مدل پیشنهادی سرریزهای جانبی (بستر شیبدار) با ایجاد یک معادله برای پیش‌بینی ضریب دبی آن‌ها و مقایسه عملکرد هیدرولیکی آنها با مدل مشابه مستطیلی بود. در مجموع ۱۵۹ آزمایش تجربی با استفاده از طرح‌های هندسی مختلف و متغیرهای هیدرولیکی انجام شد. به‌طور کلی در آزمایش‌ها مشاهده شد که مقادیر C_M با کاهش δ افزایش می‌یابد. با این حال، در مجموع سرریز جانبی مثلثی با بستر شیبدار پیشنهادی دارای مقادیر C_M بسیار بالاتری نسبت به سرریزهای جانبی دیگر در شرایط مشابه است. ظاهراً بستر شیبدار کمک می‌کند تا آب به سمت سرریز کناری جریان یابد و راحت‌تر از کانال اصلی تخلیه شود. همچنین با توجه به آزمایش‌ها مشخص گردید که هرگونه افزایش عمق جریان در سرریزهای جانبی مثلثی با بستر ثابت، به‌طور قابل توجهی ضرایب دبی آنها را کاهش می‌دهد. به‌طور کلی با توجه به نتایج مشخص گردید که در شرایط جریان یکسان و هندسه‌های مشابه، راندمان سرریز جانبی مثلثی دارای بستر شیبدار بیشتر از سرریزهای جانبی مثلثی بستر ثابت و سرریزهای جانبی مستطیلی معمولی به ترتیب به میزان ۳۹ و ۷۸ درصد بود. سرریزهای جانبی مثلثی با بستر شیبدار بهترین عملکرد خود را با ارتفاع سرریز بیشتر نشان دادند، جایی که بالاترین ضرایب دبی و کمترین آسیب‌پذیری را نسبت به افزایش عمق جریان داشتند. صفار و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی آزمایشگاهی همگرایی مقطع جریان بر هیدرولیک سرریز جانبی پرداختند. برای بررسی دقیق این موضوع پارامترهای هندسی سرریز و هیدرولیکی جریان متفاوت، بررسی شد و بر اساس پارامترهای هندسی سرریز، سناریوهای آزمایش در نظر گرفته شدند. براساس سناریوها، ۵ طول سرریز، ۴ ارتفاع تاج سرریز، ۳ عرض کانال پایین‌دست سرریز جانبی در نظر گرفته شد که در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به اینکه پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی در این آزمایش‌ها متغیر فرض شدند، اثر هر کدام بر روی سازه آنالیز شده و راهکارهایی برای انتخاب ابعاد بهینه در کانال معرفی شد. براساس نتایج آزمایش‌ها، این نتیجه حاصل شد که با به‌زای یک ارتفاع آب بالادست ثابت با ۱۹ درصد کاهش عرض کانال پایین‌دست سرریز جانبی، میزان نسبت انحراف جریان به کانال جانبی ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که تغییر در مقطع جریان با همگرا کردن کانال عبوری باعث می‌گردد پروفیل طولی سطح آب در تمام طول سازه دارای نوسان ارتفاعی حداقلی باشد. عبدی چوپلو و همکاران (۱۴۰۱)، به مطالعه آزمایشگاهی اثر ارتفاع ریزش جریان بر توپوگرافی بستر پایین‌دست سرریز جانبی کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل نوع A پرداختند. در این تحقیق آب‌شستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل تحت تغییرات شرایط هیدرولیکی جریان و ارتفاع ریزش جریان عبوری از سرریز به‌صورت آزمایشگاهی در کانالی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۰/۸۰ و ۰/۷۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران بررسی شده است. از رسوبات یکنواخت و غیرچسبنده با قطر متوسط ۲ میلی‌متر به طول و عرض ۳ و ۰/۷۵ متر در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در شرایط جریان آزاد انجام گردید. نتایج نشان داد که محل رخداد بیشینه عمق آب‌شستگی با افزایش ارتفاع ریزش جریان، در فاصله دورتری از سرریز قرار می‌گیرد. بیشینه عمق آب‌شستگی با افزایش ارتفاع ریزش جریان، افزایش می‌یابد. آب‌شستگی در میانه عرضی بستر کمتر از جداره‌های آن می‌شود. افزایش ارتفاع ریزش جریان همراه با تغییرات بیشتری در توپوگرافی بستر است. ایرانپور و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از نرم‌افزار Flow3D به شبیه‌سازی عددی سرریزهای جانبی

کلیدپیانویی پرداختند. هدف از این کار افزایش استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی است. در مجموع ۹ مدل شبیه‌سازی گردید. برای این کار از سه بافل مکعبی، دایره‌ای و پنج ضلعی که با آرایش خطی روی سرریز قرار گرفته بودند، استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع بافل‌ها اتلاف انرژی هم افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار افت با افزایش yc/H ، به ترتیب در بافل مکعبی، دایره‌ای و پنج ضلعی اتفاق افتاد. در شرایط یکسان تفاوت در شکل و ارتفاع بافل‌ها موجب تفاوت در میزان استهلاک انرژی شد. با افزایش عدد وبر میزان افت انرژی هم کاهش پیدا می‌کند. در شرایط یکسان تفاوت در شکل و ارتفاع بافل‌ها موجب تفاوت در میزان استهلاک انرژی شد. در مجموع نتایج نشان داد که علاوه بر افزایش ضریب گذردهی جریان، میتوان اتلاف انرژی را افزایش داد و با کاستن از ابعاد سازه‌های مستهلک کننده ی انرژی در پایین دست سدها، مانند حوضچه‌های آرامش و... به اقتصاد طرح کمک شایانی کرد.

ضرورت تحقیق

نظر به مطالب گفته شده، واضح است که همواره نیاز استقرار به یک سازه سرریز مناسب با راندمان بالا برای هدایت و کنترل جریان احساس می‌شود؛ لذا در این پژوهش از یک سرریز لولایی و استقرار آن به موازات دیواره فلوم آزمایشگاهی، به بررسی ضریب دبی جریان و راندمان سرریز در حالتی که سرریز لولایی به‌عنوان یک سرریز جانبی مورد استفاده قرار گیرد، پرداخته خواهد شد.

نوآوری و هدف تحقیق

مدل سرریز ساخته شده در این پژوهش از یک بخش آستانه با زاویه قائم ثابت و یک بخش لولایی مایل با قابلیت تغییر زاویه تشکیل شده است. با این تفاسیر، با توجه به هدف اصلی و نوآوری بیان شده، اهداف جزئی ذیل نیز در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از: الف) بررسی ضریب دبی سرریز جانبی لولایی؛ ب) بررسی تاثیر زاویه بازشدگی سرریز لولایی بر عملکرد سرریز؛ ج) بررسی راندمان مدل سرریز جانبی لولایی.

مواد و روش‌ها

تئوری پژوهش

جریان گذرنده از روی سرریزهای جانبی از نوع جریان متغیر مکانی^۱ با کاهش دبی است. مشخصه اصلی چنین جریانی این است که مقدار دبی آن در طول کانال اصلی کاهش یافته، با کاهش دبی، شدت جریان نیز کم می‌شود. در نتیجه با توجه به نوع جریان در بالادست سرریز جانبی که می‌تواند از نوع زیربحرانی یا فوق بحرانی باشد، نیم‌رخ سطح آب روی تاج سرریز و مقطع کنترل تغییر می‌کند. محققان و پژوهشگران با توجه به مطالعات گسترده‌ای که برای بررسی تغییرات انرژی مخصوص در طول جریان منشعب شده از سرریز صورت گرفته، عموماً مقدار انرژی را در طول مسیر ثابت در نظر می‌گیرند.

دیمارچی (۱۹۳۴) در مطالعات خود، فرض را بر ثابت بودن انرژی جریان در طول سرریز جانبی در کانال اصلی گرفت. دیمارچی نشان داد که ضریب دبی سرریز جانبی (C_m) می‌تواند تابعی از متغیرهای مختلف باشد که با استفاده از آنها می‌توان میزان دبی خروجی جریان را تخمین زد. افزایش طول عبور جریان در سرریزها اعم از مستقیم یا جانبی، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز به ازای یک عمق مشخص آب روی سرریز می‌شود. از سوی دیگر در سرریزهای خطی، فرضیه اصلی، مساوی بودن انرژی ویژه جریان در طول سرریز و انتهای بالادست و پایین دست آن است. شرط کاربرد فرضیات دی مارچی به منظور تعیین ضریب دبی مدل سرریز

¹ Spatially varied flow

جانبی لولایی، اثبات حد برابری مقدار انرژی ویژه در انتهای بالادست و پایین دست مدل سرریز جانبی است. بدین منظور در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مقادیر انرژی ویژه در انتهای بالادست (E_1) و پایین دست (E_2) مدل سرریز در در انتهای بالادست و پایین دست آن (X_1, X_6) و مجاورت تاج سرریز (Z_4) برای تمامی مدل‌ها محاسبه و بررسی شد. به‌طور کلی انرژی ویژه جریان به کمک رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad (1)$$

که در این رابطه q دبی در واحد عرض، y عمق جریان، V سرعت جریان و g شتاب جاذبه است. در ادامه درصد اختلاف انرژی ویژه جریان بین دو نقطه انتهای بالادست و پایین دست مدل سرریز به کمک رابطه ۲ به دست آمده و سپس، میانگین این مقادیر محاسبه و به‌عنوان معیار ارزیابی فرضیه دیمارچی در نظر گرفته خواهد شد:

$$\frac{\Delta E}{E_1} (\text{درصد}) = \frac{|E_2 - E_1|}{E_1} \times 100 \quad (2)$$

در این پژوهش، انرژی ویژه جریان در طول و انتهای بالادست و پایین دست سرریز برابر فرض شده است. فرضیه‌های دیگر شامل تغییر ضریب دبی جریان با تغییر مشخصات هندسی و هیدرولیکی و نیز کاهش ضریب دبی با افزایش عدد فرود در انتهای بالادست سرریز است. رابطه پیوستگی در جریان متغیر مکانی به صورت ۳ است. طبق این معادله از تفاضل دبی جریان در بالادست و پایین دست سرریز جانبی، دبی عبوری از خود سرریز جانبی محاسبه می‌شود:

$$\frac{Q_0 - Q_i}{L} = -\frac{dQ}{dx} = q_s \quad (3)$$

در این معادله Q_0 دبی جریان در انتهای پایین دست سرریز جانبی، Q_i دبی جریان در انتهای بالادست سرریز جانبی و q_s دبی عبوری از سرریز جانبی هستند. اگر رابطه عمومی سرریزها، برای سرریز جانبی مفروض گردد، با در نظر گرفتن یک عمق به عنوان عمق مبنا (Y_{index})، دبی عبوری از سرریز جانبی به کمک معادله ۴ محاسبه خواهد شد:

$$q_s = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_M (Y_{index} - P)^{1.5} \quad (4)$$

در این رابطه P ارتفاع سرریز، g شتاب گرانشی و C_M ضریب دبی سرریز خواهند بود. در یک سرریز جانبی، ضریب دبی تابعی از مشخصات هیدرولیکی جریان در بالادست و پایین دست سرریز و نیز مقطع هندسی سرریز است. مطابق با نظریات دیمارچی، با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص جریان و مستقل بودن ضریب دبی در طول سرریز، اگر از معادله فوق انتگرال گرفته شود، در نهایت معادله ۵ برای محاسبه ضریب دبی (C_M) سرریز جانبی حاصل می‌گردد:

$$C_M = \frac{3B}{2L} [\Delta\phi] \quad (5)$$

در این معادله ϕ تابع متغیر جریان دیمارچی، B عرض کانال اصلی، L طول سرریز، Y عمق جریان و E انرژی ویژه هستند. تابع ϕ با توجه به مشخص بودن پارامترهای هیدرولیکی جریان در ابتدا و انتهای سرریز، از معادله ۶ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\phi(Y, E, P) = \frac{2E - 3P}{E - P} \sqrt{\frac{E - Y}{Y - P}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E - Y}{E - P}} \quad (6)$$

در مقایسه عملکرد سرریزهای جانبی، بررسی پارامتر راندمان سرریز نیز نقشی مهم و اساسی دارد. راندمان یک سرریز جانبی مطابق با معادله ۷ عبارت است از نسبت دبی عبوری از سرریز جانبی به دبی ورودی به کانال اصلی:

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{Q_i} \quad (7)$$

آنالیز ابعادی

در این بخش لازم است که تمامی پارامترهای مهم و تاثیرگذار در یک پدیده فیزیکی، شناسایی شوند. سپس با استفاده از تکنیک‌های خاص آنالیز ابعادی، این پارامترها باید با یکدیگر ترکیب شوند تا به صورت پارامترهای بدون بعد درآیند و نیز از نظر فیزیکی معنی‌دار و معرف ویژگی‌ها و شرایط مخصوص آن پدیده باشند. بر این اساس، برای انجام آنالیز ابعادی، پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز لولایی جانبی با آستانه به صورت معادله زیر خواهند بود:

$$f(Q, h_p, P, h_s, y_u, \mu, \rho, g, \beta) \quad (8)$$

در این معادله، Q دبی جریان، h_p ارتفاع بخش لولایی سرریز، P ارتفاع کل سرریز، h_s ارتفاع بخش آستانه سرریز، y_u عمق جریان در بالادست سرریز، μ لزجت دینامیکی سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب گرانش و β زاویه سرریز لولایی در جهت کانال جانبی هستند. مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش برای آنالیز ابعادی، روش باکینگهام است. به کمک این روش و با مروری بر منابع موجود و استفاده از تجربیات پیشین که نقشی مهم در تشخیص پارامترهای موثر دارد، در نهایت پارامترهای بدون بعد زیر که در برآورد ضریب دبی جریان تاثیرگذار هستند، حاصل می‌گردند:

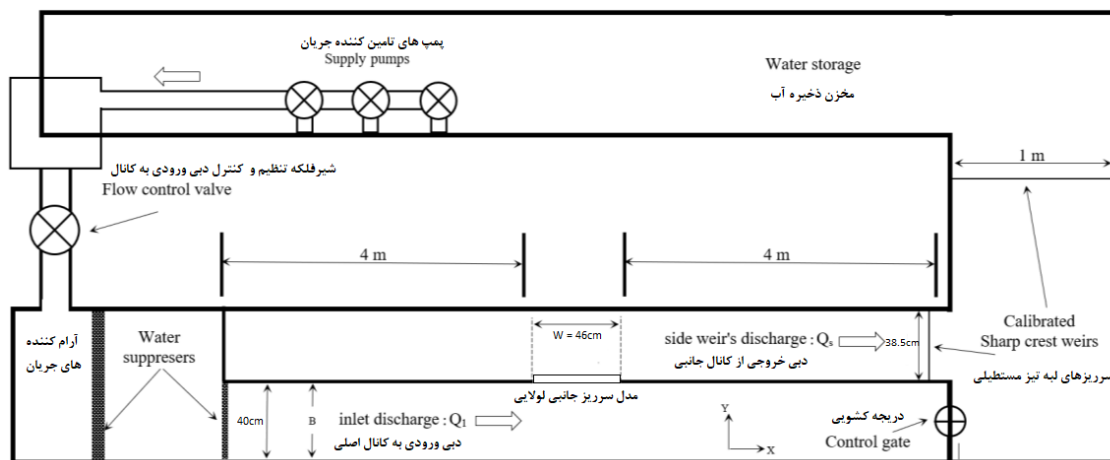
$$C_d = f\left(\frac{y_u}{P}, \frac{h_s}{h_p}, Fr, \beta\right) \quad (9)$$

متغیرهای پژوهش با توجه به نتایج آنالیز ابعادی به روش باکینگهام عبارتند از: عدد فرود جریان (Fr)، زاویه بازشدگی سرریز لولایی در جهت کانال جانبی (β)، عمق بالادست جریان به ارتفاع سرریز ($\frac{y_u}{P}$)، ارتفاع آستانه به ارتفاع بخش لولایی سرریز ($\frac{h_s}{h_p}$).

مدل و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های پژوهش حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده علوم آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفته است. فلوم مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها، ۱۲ متر طول، ۸۰ سانتی متر عرض و ۸۰ سانتی متر ارتفاع دارد. جنس دیواره فلوم از نوع پلاکسی گلس و کف آن از جنس آهن ضد زنگ به ضخامت ۱۰ میلی متر است. برای ایجاد شرایط مناسب برای مدل‌سازی جریان متغیر مکانی عبوری از سرریز جانبی و انجام آزمایش‌ها، با قرار دادن صفحه‌ای از جنس ورق PVC با ضخامت ۱۶ میلی‌متر به موازات دیواره فلوم در میانه آن، فلوم به دو قسمت کانال اصلی و جانبی تقسیم شده است. عرض کانال اصلی و کانال جانبی تحت این شرایط به ترتیب برابر ۴۰ و ۳۸/۵ سانتی متر خواهد بود. علاوه بر این به منظور ایجاد استغراق در سرریز جانبی، کف کانال اصلی به صورت پیش فرض در حدود ۱۵ سانتی متر بالاتر نسبت به کف کانال جانبی (جمع‌کننده) قرار داده شده و سپس کف آن به وسیله ورق‌های PVC با ضخامت ۱۶ میلی‌متر با شیب کف ۰/۰۰۰۲ پوشانده شده است.

میزان بازشدگی محلی که برای نصب و قرارگیری مدل سرریز جانبی در دیواره جداکننده تعبیه شده است، برابر با ۴۶ سانتی‌متر است. محل نصب مدل در فاصله ۴ متری از شروع انتهای بالادست کانال، جایی که کانال به دو کانال اصلی و جمع‌کننده تقسیم می‌شود، واقع شده است. شکل ۱ شماتیک فلوم آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- شماتیک فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مرتبط

یک دریچه کشویی در بخش انتهایی کانال اصلی تعبیه شده است که برای تنظیم سطح آب در بالادست سرریز جانبی در کانال اصلی و ایجاد شرایط جریان موردنظر در آن کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش کار با دریچه بدین صورت است که پس از برقراری جریان در کانال اصلی، با تغییر میزان بازشدگی دریچه سطح آب توسط آن تنظیم می‌گردد و افزایش عمق آب در بالادست مدل سرریز را در پی دارد که منجر به عبور جریان از روی تاج سرریز می‌شود. در مخزن جمع‌کننده انتهایی فلوم آزمایشگاهی، یک سرریز لبه تیز قائم مستطیلی نصب و تعبیه شده است. میزان دبی عبوری از این سرریز به کمک یک دبی سنج کالیبره شده و با توجه به روابط حاکم بر جریان در سرریزهای لبه تیز مستطیلی، محاسبه و تنظیم شده است. با عبور جریان از روی این سرریز، ارتفاع آب از روی آن قرائت شده و دبی کل کانال با دقت $\pm 0/1$ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری و بدین صورت امکان ایجاد اعداد فرود مختلف در کانال فراهم می‌گردد. به منظور محاسبه دقیق دبی عبوری از کانال جانبی نیز یک سرریز لبه تیز مستطیلی قائم به عرض $38/5$ سانتی‌متر (برابر با عرض کانال جانبی) و ارتفاع 7 سانتی‌متر در انتهای این کانال نصب شده است. با برداشت عمق جریان از روی این سرریز می‌توان به دبی عبوری از کانال جانبی دست یافت. به منظور اندازه‌گیری عمق آب در بالادست، پایین‌دست و یا در مجاورت و روی سرریز از عمق سنج معمولی سوزنی با دقت $\pm 0/5$ میلی‌متر استفاده خواهد شد.

در پژوهش حاضر به منظور دست‌یابی به اهداف ذکر شده، تعدادی مدل فیزیکی طراحی و ساخته شد. برای رسیدن به اهداف این تحقیق در مجموع 60 آزمایش در نظر گرفته شده است (45 آزمایش اصلی و 15 آزمایش شاهد). آزمایش‌ها برای محدوده دبی کل 25 تا 45 لیتر بر ثانیه (اعداد فرود $0/3$ تا $0/54$)، زوایای بازشدگی 30 ، 45 و 60 درجه در یک عمق بالادست یکسان ($Y_{II} = 16.5\text{cm}$) و نسبت عمق بالادست به ارتفاع سرریز ثابت ($\frac{Y_{II}}{P}$) برای هر مدل انجام شدند. برای ساخت مدل سرریز جانبی لولایی، از ورق PVC به دلیل خاصیت ضدآب بودن و دوام و مقاومت زیاد آن استفاده گردید. برای تفکیک بخش آستانه و لولایی سرریز جانبی، لازم است که مدل‌ها با نسبت‌های خاصی به دوقطعه مجزا (بخش آستانه و بخش لولایی) برش داده شده، تقسیم‌بندی گردند. به منظور جلوگیری از نفوذ آب، روی هر کدام از مدل‌ها توسط برچسب ضدآب مخصوص کاملاً پوشانده می‌شود. در ادامه به کمک دستگاه عمق سنج سوزنی، عمق جریان در انتهای بالادست، انتهای پایین‌دست و روی تاج سرریز و به فواصل معینی در طول و عرض فلوم برداشت خواهد شد. در پایان داده‌های برداشت‌شده حاصل از آزمایش‌ها بررسی و تحلیل شدند و ضرایب دبی و راندمان مدل‌ها استخراج شد که در قالب اشکال مختلف ارائه خواهد شد.

در این پژوهش سه مدل تحت عنوان $M1\beta$ ، $M2\beta$ و $M3\beta$ با نسبت‌های مختلف $\frac{h_s}{h_p}$ مطابق با جدول ۱ ارائه گردید. شایان ذکر است که مدل‌های شاهد در این پژوهش یک سرریز لبه‌تیز قائم مستطیلی بدون بازشدگی بوده است و ارتفاع آن‌ها با ارتفاع کلی هر کدام از مدل‌ها برابر است. این مدل‌های شاهد صرفاً تحت عنوان مدل‌های $M1$ ، $M2$ و $M3$ معرفی می‌گردند. در شکل ۲ نیز نمایی از یک مدل آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های تحقیق

نام مدل	$K = \frac{h_s}{h_p}$
$M1\beta$	۱/۵
$M2\beta$	۱
$M3\beta$	۰/۷۵

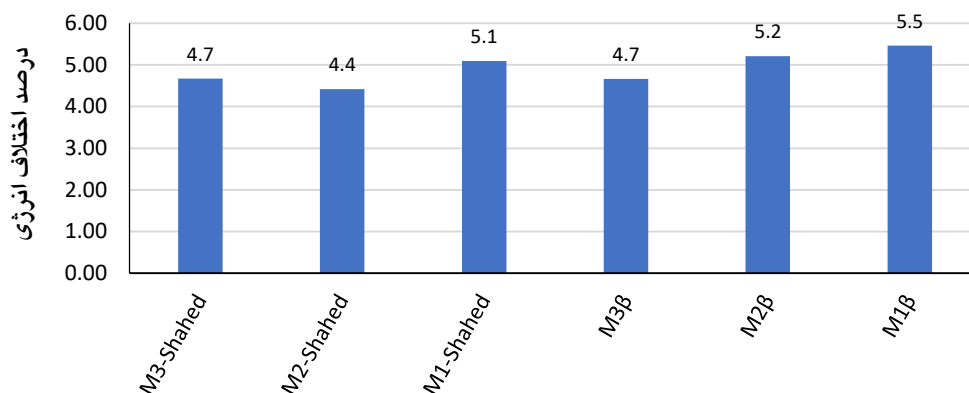


شکل ۲- نمایی از یک مدل نصب‌شده در فلوم تحت زاویه بازشدگی رو به کانال جانبی

نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها، در این مرحله ابتدا امکان استفاده از فرضیه دی مارچی به منظور کاربرد در محاسبات ضریب دبی سرریز، بررسی می‌گردد. در ادامه اثر پارامترهای تعریف‌شده در این تحقیق بر ضریب دبی و راندمان سرریز ارزیابی می‌شوند و در ادامه عملکرد مدل‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی مختلف با یکدیگر مقایسه شده، نتایج در قالب شکلها و تصاویر ارائه خواهد شد. در ادامه به‌منظور محاسبه ضریب دبی برای تمامی مدل‌ها، یک رابطه تجربی استخراج شده و مورد صحت‌سنجی قرار خواهد گرفت.

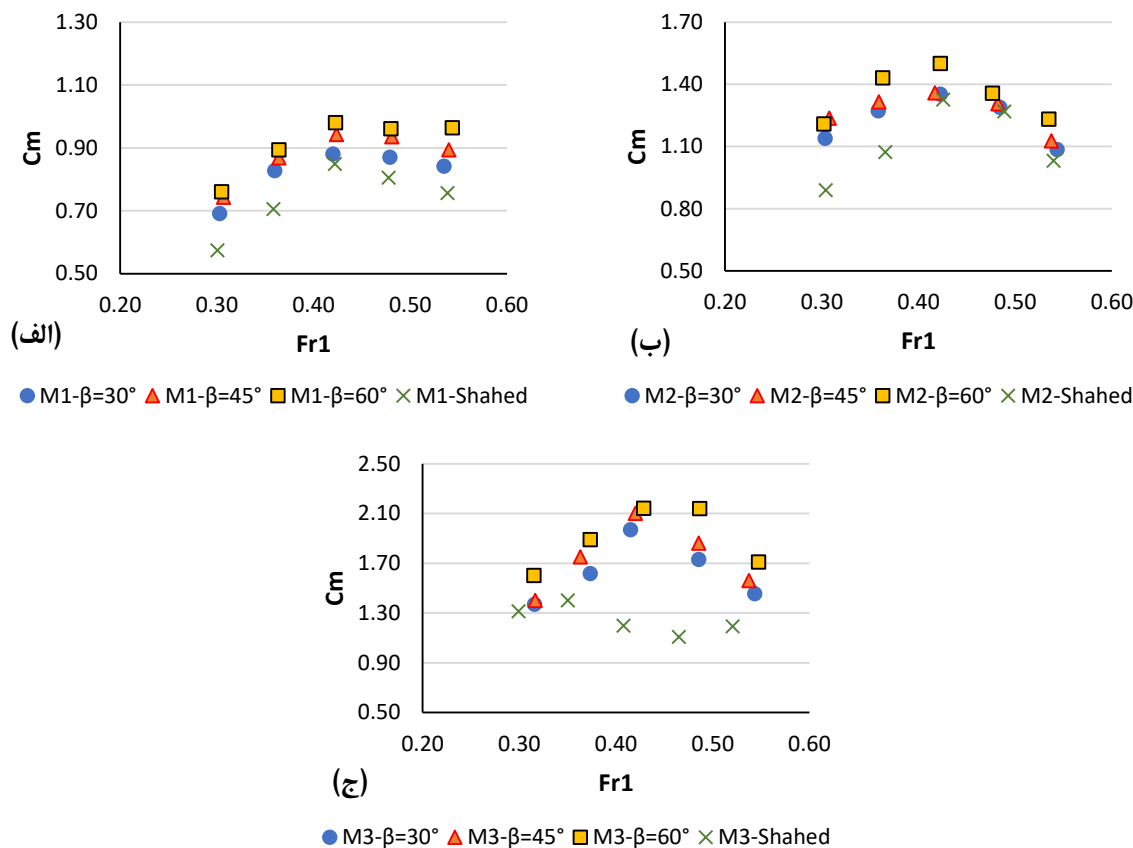
با توجه به توضیحات گفته‌شده در بخش تئوری تحقیق و طبق نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، در شکل ۳، مقادیر میانگین درصد اختلاف انرژی ویژه برای تمام مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود:



شکل ۳- درصد اختلاف انرژی ویژه در مدل‌های آزمایشگاهی

در مقایسه مدل‌های مختلف مشاهده می‌شود که مقادیر به‌دست‌آمده برای $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، نزدیک به هم هستند و لذا خطای احتمالی ناشی از یکسان نبودن انرژی ویژه در انتهای بالادست و پایین‌دست سرریز به یک نسبت بین مدل‌ها تقسیم می‌گردد. در نتیجه با توجه به مقادیر درصد اختلاف انرژی مخصوص به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، مقایسه ضرایب دبی بر اساس فرضیه دیمارچی برای استخراج نتایج تحقیق با احتیاط قابل قبول است.

شکل ۴ ضریب دبی مدل‌های اصلی (C_m) آزمایش با شناسه $M1\beta$ ، $M2\beta$ و $M3\beta$ را نسبت به مدل‌های شاهد $M1$ ، $M2$ و $M3$ در مقابل عدد فرود انتهای بالادست جریان (Fr_1) به ازای یک نسبت $\frac{Y_u}{p}$ ثابت نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای هر سه مدل تحت تمام زوایای بازشدگی β (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه)، ضریب دبی سرریز نسبت به حالت شاهد (یک سرریز لبه تیز قائم مستطیلی فاقد بازشدگی) افزایش خواهد یافت و هرچه این زاویه بازشدگی بزرگتر شود، ضریب دبی مدل نیز بیشتر خواهد بود. محاسبات نشان داد که ضریب دبی مدل‌های مختلف به‌طور میانگین در حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش خواهد یافت و به‌عنوان نمونه ضریب دبی مدل $M3\beta$ برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب در حدود ۳۳، ۴۱ و ۵۵ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج شکل نشان می‌دهد که در محدوده اعداد فرود مورد بررسی قرار گرفته، تا اعداد فرود ۰/۴ تا ۰/۴۵، مقدار ضریب دبی افزایش یافته و پس از آن با افزایش عدد فرود بالادست جریان، ضریب دبی برای تمامی مدل‌ها روند کاهشی داشته است. افزایش اعداد فرود بالادست منجر به تشکیل گردابه‌های قوی تری در انتهای بالادست تاج سرریز شده و این پدیده قدرت جریان‌های برگشتی ایجاد شده را افزایش می‌دهد و منجر به کاهش حجم جریان عبوری از روی تاج سرریز جانبی خواهد شد.

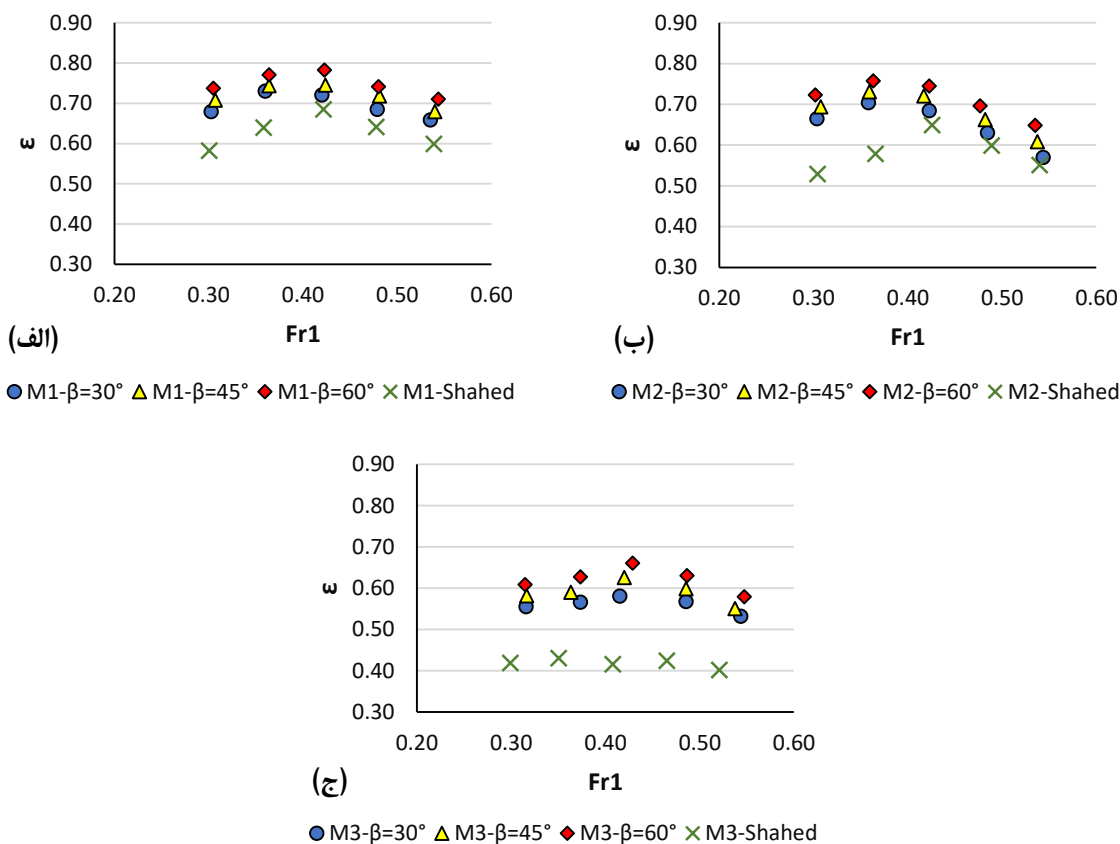


شکل ۴- C_m در مقابل Fr_1 برای مدل الف) $M1\beta$ ب) $M2\beta$ ج) $M3\beta$

شکل ۵ راندمان (ϵ) مدل‌های $M1\beta$ ، $M2\beta$ و $M3\beta$ را نسبت به مدل‌های شاهد $M1$ ، $M2$ و $M3$ در مقابل عدد فرود انتهایی بالادست جریان (Fr_1) نمایش می‌دهد.

مشاهده می‌شود که برای مدل‌های مختلف نسبت به شرایط نمونه شاهد، برای تمام اعداد فرود بالادست، با افزایش زاویه بازشدگی، راندمان افزایش یافته و تحت بیشترین زاویه بازشدگی، راندمان مدل‌ها خصوصاً در محدود اعداد فرود $0/3$ تا $0/4$ نسبت به سایر حالات بیشتر خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که برای اعداد فرود $0/4$ به بالا، مقدار راندمان برای تمامی مدل‌ها روند کاهشی خواهد داشت.

نتایج محاسبات نشان داد که راندمان مدل $M1\beta$ تحت زاویه بازشدگی 60° درجه به طور متوسط و به ترتیب در حدود 5 و 8 درصد بیش از شرایط بازشدگی تحت زوایای 45° و 30° درجه و 20 درصد بیش از مدل شاهد خود است. راندمان مدل $M2\beta$ تحت زاویه بازشدگی 60° درجه به طور متوسط و به ترتیب در حدود 5 و 10 درصد بیش از شرایط بازشدگی تحت زوایای 45° و 30° درجه و 23 درصد بیش از مدل شاهد خود است. راندمان مدل $M3\beta$ تحت زاویه بازشدگی 60° درجه به طور متوسط و به ترتیب در حدود 5 و 6 درصد بیش از شرایط بازشدگی تحت زوایای 45° و 30° درجه و 45 درصد بیش از مدل شاهد خود است.



شکل ۵- ε در مقابل Fr_1 برای مدل الف) $M1\beta$ ب) $M2\beta$ ج) $M3\beta$

در ادامه رابطه‌ای تجربی به منظور محاسبه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی ارائه خواهد شد. ضریب دبی در این پژوهش به صورت تابعی از پارامترهای زیر خواهد بود:

$$C_d = f\left(\frac{y_u}{P}, \frac{h_s}{h_p}, Fr\right) \quad (10)$$

با توجه به این پارامترها، معادله ضریب دبی برای مدل‌های آزمایشگاهی به دست آورده می‌شود. معادله مذکور با استفاده از نرم‌افزار آماری^۱ SPSS به دست خواهد آمد. این نرم‌افزار به طور کلی یک نرم‌افزار تحلیلی و آنالیز است که اطلاعات را در قالب‌های مختلف مانند یک پرسش نامه دریافت می‌کند و سپس در قالب جدول، شکل و... ارائه می‌دهد تا تجزیه و تحلیل آن‌ها راحت‌تر باشد. در نهایت به منظور سنجش دقت معادلات و انتخاب بهترین رابطه با توجه به R^2 (R-Square) از توابع خطای NRMSE^۲ (نرمال‌سازی انحراف جذر میانگین مربعات) و WQD^۳ (انحراف درجه دوم وزنی) استفاده می‌گردد که از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌گردند:

^۱ Statistical Package for the Social

^۲ Normalized Root Mean Square Error

^۳ Weighted Quadratic Deviation

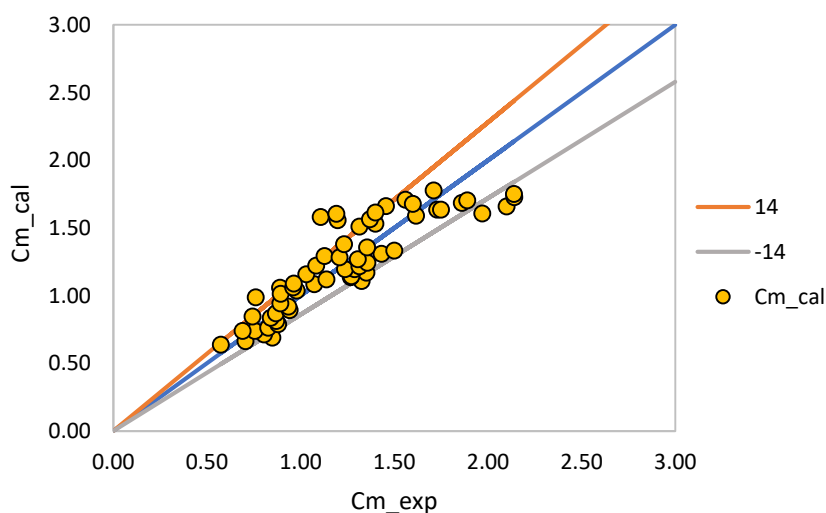
$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum(F(x) - f(x))^2}{\sum(F(x) - \bar{f})^2}} \quad (11)$$

$$WQD = \frac{\sqrt{[\sum f(x) \cdot F(x) \cdot |F(x) - f(x)|^2]}}{\sum[f(x) \cdot F(x)]} \quad (12)$$

در این روابط $F(x)$ مقدار تخمینی از معادله، $f(x)$ مقدار اندازه‌گیری شده یا برآورد شده در آزمایشگاه، \bar{f} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و x پارامتر مستقل مورد بررسی هستند. شایان ذکر است که هرچه مقادیر NRMSE و WQD به دست آمده کمتر باشند، مقادیر حاصل شده از معادله موردنظر به مقدار واقعی نزدیکتر خواهند بود. با پذیرش فرضیه دیمارچی، به کمک نرم افزار SPSS و با استفاده از رگرسیون خطی در نهایت رابطه خطی ۱۳ برای برآورد ضریب دبی در پژوهش حاضر حاصل خواهد شد که به صورت زیر است. R^2 این رابطه برابر با ۰/۷۸ بوده و مقادیر NRMSE و WQD برای آن به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۰۲ محاسبه گردیدند:

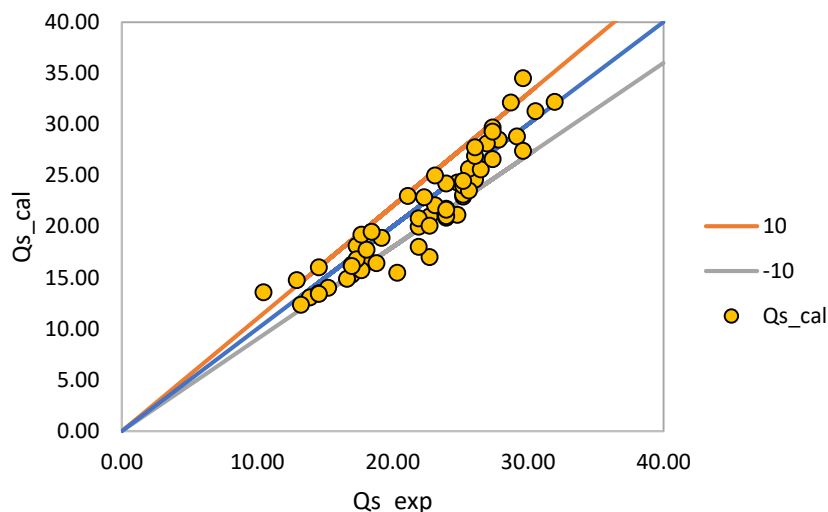
$$C_m = -1.434 + 0.497 \times \left(\frac{Y_u}{P}\right) + 1.68 \times \left(\frac{H_s}{H_p}\right) + 0.421 \times (Fr_u) \quad (13)$$

شکل ۶ مقایسه مقادیر ضریب دبی حاصل از معادله خطی پیشنهادی (C_{m_cal}) و مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی (C_{m_exp}) را نمایش می‌دهد. نتایج شکل نشان می‌دهد که خطای رابطه فوق در حدود درصد ± 14 است.



شکل ۶-مقایسه مقادیر C_{m_exp} و C_{m_cal} از رابطه خطی

در ادامه با استفاده از ضریب دبی پیشنهادی، دبی محاسباتی (Q_{s_cal}) به دست آورده شده و مقدار آن با دبی آزمایشگاهی (Q_{s_exp}) بر حسب لیتر بر ثانیه مقایسه خواهد شد. شکل ۷ نتایج مقایسه دبی‌ها را برای ضریب دبی حاصل از معادله خطی نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطای شکل در حدود درصد ± 10 است. همچنین ضرایب NRMSE و WQD به ترتیب برابر با ۰/۴۹ و ۰/۰۳ محاسبه شدند.



شکل ۷- مقایسه مقادیر Q_{s_exp} و Q_{s_cal} برای ضریب دبی حاصل از معادله خطی

نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی تاثیر زاویه β بر ضریب دبی و راندمان سرریز، عملکرد مدل‌های $M1\beta$ ، $M2\beta$ و $M3\beta$ نسبت به مدل‌های شاهد $M1$ ، $M2$ و $M3$ در مقابل عدد فرود انتهای بالادست جریان (Fr_1) به ازای یک نسبت $\frac{Y_u}{P}$ ثابت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای هر سه مدل تحت تمام زوایای بازشدگی (β ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه)، ضریب دبی سرریز نسبت به حالت شاهد (سرریز بدون بازشدگی) افزایش خواهد یافت و هرچه این زاویه بازشدگی بزرگتر شود، ضریب دبی مدل نیز بیشتر خواهد بود. محاسبات نشان داد که ضریب دبی مدل‌های مختلف تحت زاویه β به طور میانگین در حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده گردید که برای مدل‌های مختلف نسبت به شرایط نمونه شاهد، برای تمام اعداد فرود بالادست، با افزایش زاویه بازشدگی، راندمان افزایش یافته و تحت بیشترین زاویه بازشدگی (۶۰ درجه)، راندمان مدل‌ها خصوصاً در محدود اعداد فرود $0/3$ تا $0/4$ نسبت به سایر حالات بیشتر خواهد بود. طبق محاسبات انجام شده مشخص گردید که برای مدل‌های مختلف تحت زاویه β راندمان در به طور میانگین در حدود ۲۰ تا ۴۵ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش خواهد یافت. در مجموع نتایج حاصل شده نشان داد که بازشدگی مدل رو به کانال جانبی تحت زوایای مختلف و در نتیجه آن افزایش طول تاج سرریز جانبی، منجر به افزایش ضریب دبی و راندمان سرریز شده و بر عملکرد سرریز جانبی لولایی تاثیر مثبت خواهد داشت. در پژوهش حاضر، رابطه‌ای تجربی به منظور محاسبه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی به دست آورده شد. R^2 این رابطه برابر با $0/78$ بوده و مقادیر WQD و $NRMSE$ برای آن به ترتیب $0/53$ و $0/02$ محاسبه شدند. با توجه به این مقادیر، می‌توان چنین نتیجه گرفت که معادله مذکور از دقت مناسبی برخوردار است.

منابع

احمدیان، ج.، صادقی، ب.، شفاعی بجستان، م.، سجادی، م.، ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی اثر دیوار جداکننده هدایتی در اصلاح الگوی جریان ورودی به آبگیرهای جانبی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۴)، ۶۷-۵۱.

- ایرانپور، ع.، آگدرنژاد، ا.، حیدرنژاد، م. ۱۴۰۳. بررسی عددی استهلاک انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی بافل دار، *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۳(۱)، ۵۵-۷۰.
- باقری سیدشکری، ن.، اقبال زاده، ا.، جوان، م. ۱۳۹۷. تاثیر عمق آب پایین دست بر مشخصات پرش هیدرولیکی در امتداد سرریز جانبی، *دانش آب و خاک*، ۲۸(۳)، ۱۹۵-۲۰۸.
- بخشایی، ش.، سجادی، س. م. و احدیان، ج. ۱۴۰۱. بررسی آزمایشگاهی تعیین ضریب دبی سرریز جانبی لولایی. ششمین کنفرانس بین المللی توسعه فناوری علوم آب، آبخیزداری و مهندسی رودخانه.
- بخشایی، ش.، سجادی، س. م. و احدیان، ج. ۱۴۰۱. بررسی مدل فیزیکی سرریز لولایی و راندمان بهینه ضریب دبی. ششمین کنفرانس بین المللی توسعه فناوری علوم آب، آبخیزداری و مهندسی رودخانه.
- شیخ رضازاده نیکو، ندا، منعم، محمد جواد، صفوی، خداداد. ۱۳۹۴. استخراج معادله دبی جریان مستغرق و تعیین ضریب دبی در سرریز لولایی با فشردگی های جانبی مختلف، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۹(۵)، ۶۹۱-۷۰۰.
- صفر، س.، سلیمانی باورصاد، م.، محمودیان شوشتری، م.، پورمحمدی، م. ح.، ریاضی، ر. ۱۴۰۱. بررسی آزمایشگاهی همگرایی مقطع جریان بر هیدرولیک سرریز جانبی، *مجله علوم و فنون دریایی* ۲۱(۳)، ۲۳-۳۲.
- نیسی، م.، سجادی، م.، شفاعی بجستان، م.، احدیان، ج. ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سرریز جانبی مثلثی لبه شیبدار در شرایط زیر بحرانی. *علوم آب و خاک*. ۲۸ (۳): ۱۱۷-۱۲۹.
- عبدی چوپلو، چ.، قدسیان، م.، واقفی، م.، کازرونی، س.، بداعی، ا. ۱۴۰۱. مطالعه آزمایشگاهی اثر ارتفاع ریزش جریان بر توپوگرافی بستر پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای شکل نوع A، *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۱(۱)، ۱۲۴-۱۱۳.

References

- Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M., Vaghefi, M., Kazerooni, S. and Bodaghi, E. 2022. Experimental Study of Effect of Flow Drop Height on Downstream Bed Topography of Type-A Trapezoidal Piano Key Weir. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2023.345240.1009>. (In Persian).
- Ahadiyan, J., Sadeghi, B., Shafai Bajestan, M., Sajjadi, S. M. 2024. Effect of longitudinal training wall (LTW) on improving the inlet flow pattern at the side channel intakes, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(4), pp. 51-67. doi: 10.22126/atwe.2024.10776.1128. (In Persian).
- Arvanaghi, H., Naderi, V., Azimi, V., Salmasi, F. 2014. Determination of discharge coefficient in inclined rectangular sharp-crested weirs using experimental and numerical simulation. *J. Curr. Res. Sci.*, 2(3), 401-406.
- Azimfar, S. M., Hosseini, S. A., and Khosrojerrdi, A. 2017. Derivation of Discharge Coefficient of a Pivot Weir under Free and Submergence Flow Conditions, *Flow Measurement and Instrumentation*, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.010>.
- Bakshaei, Sh., Sajjadi, S. M. and Ahadian, J. 2022. Laboratory investigation of the determination of the discharge coefficient of the pivot pivot side weir. The 6th international conference on technology development of water science, watershed management and river engineering. (In Persian)

- Bakhshaei, Sh., Sajjadi, S. M. and Ahadian, J. 2022. Investigation of the physical model of the pivot side weir and the optimal efficiency of the discharge coefficient. The 6th international conference on technology development of water science, watershed management and river engineering. (In Persian)
- Bagheri, N., Eghbalzadeh, A., Javan, M. 2021. The Effect of Downstream Water Depth on Hydraulic Jump Characteristics along Side Weir. *Journal of Water and Soil Science*. 28: 3. 195-208. (In Persian)
- Bijankhan, M., Ferro, V. 2018. Experimental Study and Numerical Simulation of Inclined Rectangular Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 144. 10.1061, (ASCE) 1943-4774.0001325.
- Brater, E.F., King, H.W. 1976. *Handbook of Hydraulics*. 6th ed. McGraw-Hill, New York. 584 pp.
- De Marchi, G. 1934. Essay on the performance of pivot weirs. *L Energia Elettrica Milano, Italy*, 11: 11. 849-860.
- Fathi-Moghadam, M., Salmanzadeh, S., Ahadiyan, J., Sajadi, M. 2024. Drag coefficient of rigid and flexible deciduous trees in riparian forests. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 2024, 150(5):04024027.
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, M., Scorzini, A.R., Di Bacco, M., Shafai Bejestan, M. 2021. Cross-beam dissipators in abruptly expanding channels: Experimental analysis of flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE 2021, 147, 06021012
- Hulsing, H. 1967. Measurement of peak discharge at dams by indirect methods. *U.S. Geol. Survey Techniques Water-Resources Inv.*, book 3, chap. A5, pp. 29.
- Iranpour, A., Egdernezhad, A., Heidarnejad, M. 2024. Numerical investigation of energy losses in baffled piano key weirs, *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. 3:1. 55-70. DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.451817.1069>. (In Persian).
- Kindsvater, C. E., Carter, R. W. 1957. Discharge characteristics of rectangular thin plate weirs. *Journal Hydraulic Division*. 83(6), 1-36.
- Neisi, M., Sajadi, M., Shafai Bejestan, M., Ahadiyan, J. 2024. Experimental Study of Flow over the Triangular Side Weir with Inclined Crest in Subcritical Flow. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28 (3):117-129. (In Persian)
- Parvaneh, A., Parvaneh, M., Rakhshandehroo, G., Jalili Ghazizadeh, M. R., Sadeghian, H. 2022. Discharge Characteristics of a Novel Inclined-Bed Triangular Side Weir in Subcritical Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 148. 10.1061, (ASCE) 1943-4774.0001651.
- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., Khedri, P. 2024. Redesigning the Fuse Plug, Emergency Spillway, and Flood Warning System: An Application of Flood Management. *Water*, 16(24), 3694. <https://doi.org/10.3390/w16243694>.
- Schoder, E.W., Turner, K.B. 1929. Precise Weir Measurements. *Trans. ASCE*, 93, 999-1110.
- Sheikh Rezazadeh Nikou, N., Monem, M. J., Safavi, K. 2015. Extraction of flow Rate Equation under Submerged Flow Condition and Determining of Related Coefficients in Pivot Weirs with the Different Side Contractions, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(5), pp. 691-700. (In Persian)
- Saffar, S., Solimani Babarsad, M., Mahmoodian Shooshtari, M., Poormohammadi, M. H., Riazi, R. 2022. 'Experimental study of flow converging section side weir hydraulics', *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), pp. 23-32. doi: 10.22113/jmst.2021.253749.2401. (In Persian).
- USBR. 1948. Studies of Crests for Overfall Dams. Bulletin 3. Boulder Canyon Project, Final Report. United States Bureau of Reclamation, Denver.
- Wahlin, B.T., Replogle, J.A. 1994. Flow Measurement Using an Overshot Gate. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, under Cooperative Agreement NO.1425-2-FC-81-19060 entitled Water Conservation Innovative Technology Research for Agriculture and Urban Irrigation Water.