



Validation of the numerical model for submerged flow discharge prediction based on experimental measurements

Bahare Rastipishe¹ | Ali Salajegheh² | Younes Amirpour³ | Amir Hossein Parsamehr⁴

1. Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: rastipishe.bahar@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: salajegh@ut.ac.ir
3. Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research Institute, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: aminipour@yahoo.com
4. Department of Rangeland and Watershed Management (Nature Engineering), Faculty of Agriculture, Fasa University, Fasa, Iran. E-mail: amir84@fasa.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 23 February 2026
Received in revised form
20 April 2026
Accepted 25 April 2026
Published online 22 June 2026

Keywords:

Flow-3D
Kling–Gupta Efficiency (KGE)
Numerical modeling
SMBF flume

ABSTRACT

Accurate discharge measurement under submerged flow conditions remains a major challenge in irrigation and drainage networks. Portable SMBF flumes, despite their widespread application, experience reduced accuracy under submergence conditions. In this study, the hydraulic performance of an SMBF flume under submerged conditions was evaluated through an integrated experimental and numerical approach using the Flow-3D simulator. Experiments were conducted in a rectangular flume with contraction ratios of ($r=0.342$) and ($r=0.561$). In the numerical modeling framework, the RNG turbulence model and the Volume of Fluid (VOF) method were employed to accurately capture the free-surface dynamics. Model performance was assessed using RMSE, NSE, the Kling–Gupta Efficiency (KGE) index, and a systematic mesh sensitivity analysis. The results indicated that the contraction ratio ($r=0.342$) showed the best agreement with experimental data, while increasing the contraction ratio to ($r=0.561$) led to a reduction in model accuracy. Furthermore, an optimal grid configuration with a cell size of approximately one hundredth of a meter and a total number of cells between $10^5 \times 7/5$ and $10^6 \times 1/1$ provided a suitable balance between numerical accuracy and computational cost. The main novelty of this study lies in presenting an integrated framework combining three-dimensional numerical modeling, mesh sensitivity analysis, and the application of the KGE index for multi-dimensional performance evaluation under submerged flow conditions. This approach enables simultaneous assessment of accuracy, stability, and variability of flow. The findings can be directly applied to the calibration of SMBF flumes and the improvement of discharge measurement accuracy in irrigation networks.

Cite this article: Rastipishe, B., Salajegheh, A., Amirpour, Y., & Parsamehr, A.H. (2026). Validation of the numerical model for submerged flow discharge prediction based on experimental measurements. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 69-79. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.411597.1291>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.411597.1291>

Publisher: University of Tehran Press.



اعتبارسنجی مدل عددی در پیش‌بینی دبی جریان مستغرق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

بهاره راستی‌پیشه^۱ | علی سلاجقه^۲ | یونس امین‌پور^۳ | امیرحسین پارسامهر^۴

۱. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: rastipishe.bahar@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: salajegh@ut.ac.ir
۳. گروه سازه‌های هیدرولیکی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: aminipour@yahoo.com
۴. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه فسا، فسا، ایران. رایانامه: amir84@fasa.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

اندازه‌گیری دقیق دبی جریان در شرایط مستغرق همچنان یکی از چالش‌های اساسی در شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی محسوب می‌شود. فلوم‌های قابل حمل SMBF، با وجود کاربرد گسترده، در شرایط استغراق با کاهش دقت مواجه هستند. در این پژوهش، عملکرد هیدرولیکی فلوم SMBF تحت شرایط مستغرق از طریق بررسی تلفیقی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با استفاده از شبیه‌ساز Flow-3D ارزیابی شد. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی با نسبت‌های تنگ‌شدگی $(r=0/342)$ و $(r=0/561)$ انجام شد. در مدل‌سازی عددی، از مدل آشفتگی RNG و روش حجم سیال (VOF) برای بازسازی دقیق سطح آزاد استفاده گردید. عملکرد مدل با معیارهای RMSE، NSE، شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) و تحلیل حساسیت مش ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نسبت تنگ‌شدگی $(r=0/342)$ بیش‌ترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی داشته، درحالی‌که افزایش آن به $r=0/561$ موجب کاهش دقت مدل شده است. همچنین، شبکه بهینه با اندازه سلول حدود یک‌صدم متر و تعداد سلول بین $7/5 \times 10^5$ تا $1/1 \times 10^6$ ، تعادل مناسبی میان دقت عددی و هزینه محاسباتی ایجاد کرد. وجه نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک چارچوب تلفیقی شامل مدل‌سازی عددی سه‌بعدی، تحلیل حساسیت مش و استفاده از شاخص KGE برای ارزیابی چندبعدی عملکرد مدل در شرایط جریان مستغرق است. این رویکرد، برخلاف مطالعات پیشین که بیش‌تر بر شاخص‌های رایج تمرکز داشته‌اند، امکان تحلیل هم‌زمان دقت، پایداری و تغییرپذیری جریان را فراهم می‌سازد و درک عمیق‌تری از رفتار هیدرولیکی فلوم SMBF ارائه می‌دهد. این یافته‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم در کالیبراسیون فلوم‌های SMBF و بهبود دقت اندازه‌گیری در شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

شاخص کلینگ-گوپتا (KGE)
فلوم SMBF
مدل‌سازی عددی
Flow-3D

استناد: راستی‌پیشه، بهاره؛ سلاجقه، علی؛ امین‌پور، یونس و پارسامهر، امیرحسین (۱۴۰۵). اعتبارسنجی مدل عددی در پیش‌بینی دبی جریان مستغرق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی. *تشریح مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۱)، ۶۹-۷۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.411597.1291>



۱. مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضا برای تولید محصولات کشاورزی، لزوم بهره‌برداری بهینه از منابع آب محدود را بیش از پیش آشکار ساخته است. در کشور ایران، با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و محدودیت منابع آبی، مدیریت صحیح آب کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده آب اهمیت ویژه‌ای دارد (Aminpour *et al.*, 2020). در بسیاری از شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، ناتوانی در اندازه‌گیری دقیق جریان منجر به توزیع ناعادلانه آب، افزایش تلفات و کاهش بهره‌وری می‌شود (Kraatz & Mahajan, 1975). با توجه به شرایط تغییر اقلیم، اسراف و بهره‌برداری نامناسب از آب و در نتیجه کاهش شدید منابع آبی، لزوم تخصیص دقیق منابع آبی به مصارف مختلف از قبیل محیط زیست، صنعت و کشاورزی بیش از پیش ضروری و کتمان‌ناپذیر می‌باشد (Asadi *et al.*, 2011). بنابراین، اندازه‌گیری دقیق دبی در کانال‌های انتقال و توزیع نه‌تنها ابزاری برای صرفه‌جویی در مصرف آب محسوب می‌شود، بلکه زمینه‌ساز ارتقای عدالت اجتماعی، بهبود مدیریت بهره‌برداری و افزایش اعتماد بهره‌برداران نیز خواهد بود (یاراحمدی و همکاران، ۲۰۲۱). از میان سازه‌های متداول اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز، فلوم‌ها و سرریزها^۱ به‌دلیل دارابودن مقطع کنترل و روابط هیدرولیکی قابل‌اعتماد، بیش‌ترین کاربرد را دارند (Clemens *et al.*, 2001). با این‌حال، عملکرد این سازه‌ها به‌شدت وابسته به شرایط هیدرولیکی جریان است. در بسیاری از مجاری روباز، به‌ویژه کانال‌های آبیاری و زه‌کشی، بالابودن سطح آب پایین‌دست باعث ایجاد جریان مستغرق^۲ می‌شود (Sun *et al.*, 2020). در این شرایط، کاهش اختلاف انرژی بین بالادست و گلوگاه موجب می‌شود فرض تشکیل عمق بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی برقرار نباشد و روابط تجربی جریان آزاد با خطای قابل‌توجهی همراه شود (Samani *et al.*, 1991; Samani and Magallanez, 1993).

یکی از سازه‌های پرکاربرد در این زمینه، فلوم قابل‌حمل SMBF^۳ است که نخستین‌بار توسط Samani (2017) معرفی شد. این فلوم به‌دلیل سادگی ساخت و هزینه پایین، کاربرد وسیعی در اندازه‌گیری دبی در شرایط جریان آزاد پیدا کرده است. با این‌حال، مطالعات اخیر نشان داده است که در شرایط مستغرق، دقت اندازه‌گیری SMBF تحت تأثیر نسبت تنگ‌شدگی و درجه استغراق قرار گرفته و روابط تجربی موجود نیازمند اصلاح می‌باشند (Lotfi Kolavani *et al.*, 2019; Lotfi Kolavani *et al.*, 2018). در این راستا، استفاده از مدل‌سازی عددی در کنار آزمایش‌های فیزیکی می‌تواند درک بهتری از رفتار هیدرولیکی جریان مستغرق فراهم آورد و امکان توسعه روابط اصلاحی را فراهم سازد. این رویکرد امکان بررسی دقیق‌تر پایداری مدل و بازتولید تغییرپذیری جریان را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل می‌تواند زمینه‌ساز ارائه روابط اصلاحی قابل‌اعتمادتر برای فلوم SMBF بوده و به بهبود دقت اندازه‌گیری دبی در شبکه‌های انتقال کمک کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب مدل‌های CFD با روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌بینی جریان‌های پیچیده را افزایش دهد (Zhang *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2022). هم‌چنین، کاربرد مدل‌های سری زمانی مانند ARIMA در پیش‌بینی دبی در شرایط متغیر موردتوجه قرار گرفته است. با وجود مطالعات متعدد در زمینه مدل‌سازی جریان مستغرق، اغلب آن‌ها فاقد ارزیابی هم‌زمان پایداری عددی (از طریق تحلیل حساسیت مش) و دقت آماری چندبعدی (مانند KGE) هستند. هم‌چنین، اثر نسبت تنگ‌شدگی بر پایداری و دقت مدل به‌صورت یکپارچه بررسی نشده است. این پژوهش با هدف پرکردن این خلأ انجام شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش تمرکز بر مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بوده و مقایسه با مدل‌های داده‌محور نظیر ARIMA (باکس-جنکینز) یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام نشده است. با این‌حال، ترکیب مدل‌های CFD با روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مکمل برای بهبود دقت پیش‌بینی در مطالعات آینده موردتوجه قرار گیرد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی، بهره‌گیری از شاخص‌های آماری دقیق ضروری است. در این پژوهش، علاوه بر معیارهای متداول ارزیابی RMSE و NSE، از شاخص کلینگ گوپتا (KGE)^۴ به‌عنوان یک معیار جامع‌تر بهره گرفته شد که توانایی بالاتری در ارزیابی همبستگی، پراکندگی و بایاس بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی دارد (Gupta et al., 2009). افزون بر این، تحلیل حساسیت مش عددی نیز به‌عنوان یک گام نوآورانه در این پژوهش در نظر گرفته شده تا تأثیر تفکیک شبکه محاسباتی بر دقت نتایج و میزان همخوانی با داده‌های آزمایشگاهی موردبررسی قرار گیرد. این پژوهش در دو مرحله تولید داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار به‌شرح شکل (۱) انجام گردید.

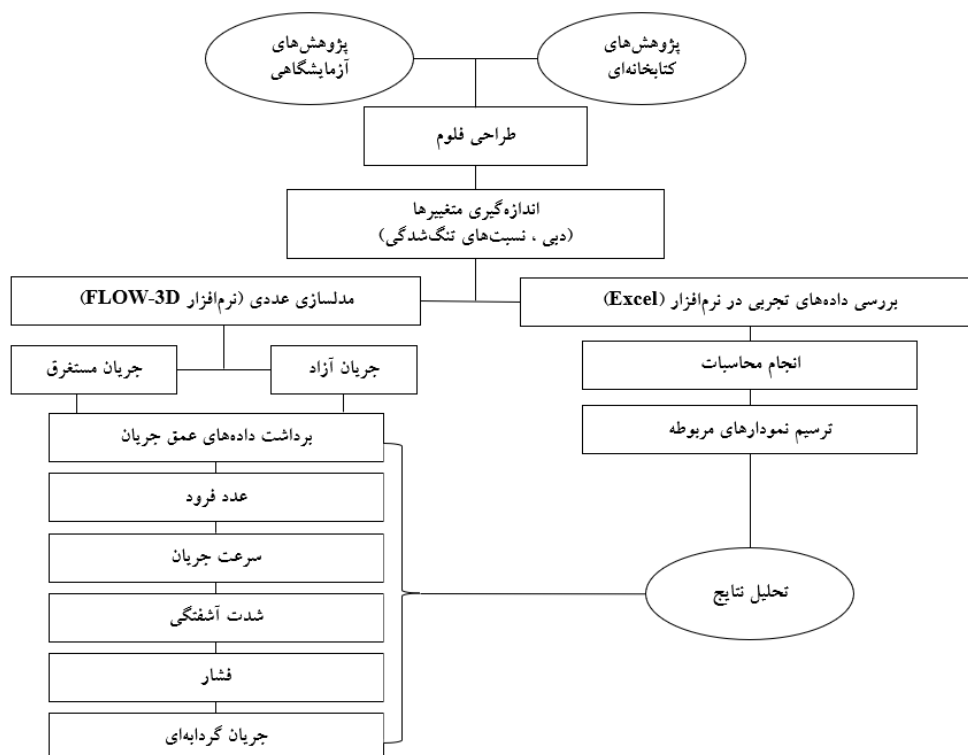


Figure 1. Flowchart of the research methodology

۱.۲. داده‌های آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی رفتار فلوام قابل‌حمل SMBF در شرایط جریان مستغرق، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در یک فلوام آزمایشگاهی واقع در مؤسسه تحقیقات آب (وزارت نیرو) طراحی و اجرا شد (شکل ۲). فلوام مورد‌استفاده کانال مستطیلی با ابعاد طول پنج متر، عرض ۳۴/۶ سانتی‌متر و ارتفاع دیواره ۶۰ سانتی‌متر بود. برای ایجاد شرایط مستغرق، دریچه متحرک انتهای پایین‌دست کانال در موقعیت‌های مختلف تنظیم گردید تا عمق جریان پایین‌دست افزایش یافته و اثر پس‌زدگی بر مقطع گلوگاه حاکم گردد. در این حالت، آستانه استغراق به‌عنوان نسبت عمق جریان پایین‌دست به عمق جریان بالادست (Hd/Ha) در محدوده‌های مختلف (۰/۶ تا ۰/۹) ایجاد شد تا طیف وسیعی از شرایط مستغرق پوشش داده شود. پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل دبی عبوری و عمق آب در بالادست، گلوگاه و پایین‌دست با استفاده از فلومتر الکترومغناطیسی و گیج‌های نقطه‌ای^۵ کالیبره‌شده ثبت شدند. برای هر سناریو سه بار تکرار انجام شد و میانگین داده‌ها

به‌عنوان ورودی تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. پایش مستمر تجهیزات و تمیزکاری فلوم پس از هر آزمایش به‌منظور حذف رسوبات و تضمین صحت داده‌ها انجام گرفت.

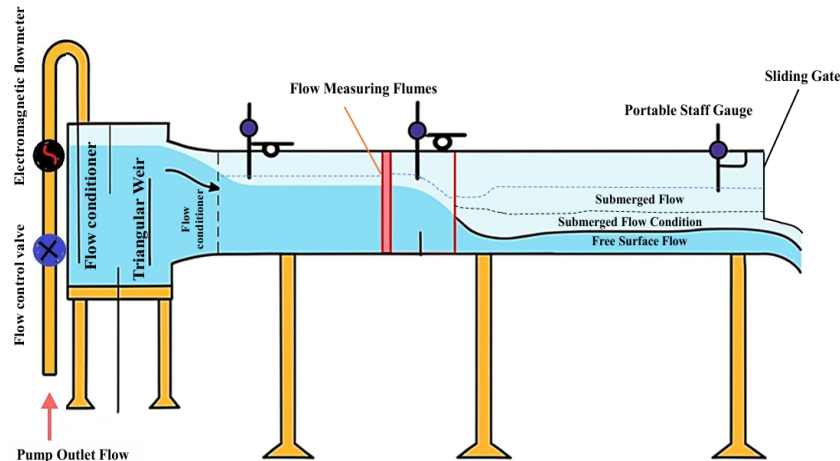


Figure 2. Overall view of the conceptual model used at the Central Water Research Laboratory, Irrigation and Reclamation Group, University of Tehran

۲.۲. مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Flow-3D

شبیه‌سازی عددی شرایط مستغرق با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. هندسه فلوم SMBF و دامنه محاسباتی مشابه حالت جریان آزاد تعریف شد، با این تفاوت که در مرز خروجی، به‌جای شرط فشار آزاد، شرط عمق کنترل‌شده اعمال گردید تا امکان بازتولید شرایط مستغرق فراهم شود. نسبت‌های مختلف مستغرق‌شدگی مشابه آزمایش‌ها در مدل عددی اعمال شد. مدل آشفتگی $^{\text{RNG}}$ برای شبیه‌سازی جریان آشفته و روش $^{\text{VOF}}$ برای بازسازی سطح آزاد استفاده گردید. شبکه‌بندی دامنه با تمرکز بر گلوگاه و پایین‌دست فلوم انجام شد تا تغییرات موضعی ناشی از مستغرق‌شدن با دقت بیشتری ثبت گردد. برای تحلیل اثر اندازه شبکه، تحلیل حساسیت مش اجرا شد و سه سطح شبکه (ریز، متوسط و درشت) موردبررسی قرار گرفت. این کار به‌منظور ارزیابی تأثیر تفکیک عددی بر خروجی‌های دبی و سطح آب انجام گرفت.

۳.۲. معیارهای ارزیابی

برای مقایسه داده‌های عددی و آزمایشگاهی در حالت مستغرق، از شاخص‌های آماری، RMSE، MAE، ME و NSE استفاده شد. افزون بر این، به‌منظور و ارزیابی جامع‌تر، شاخص (KGE)^۹ نیز محاسبه شد. این شاخص با ترکیب سه مؤلفه همبستگی، بایاس و تغییرپذیری، امکان سنجش دقیق‌تری از توان مدل عددی در بازتولید شرایط مستغرق فراهم می‌آورد. استفاده از KGE در کنار تحلیل حساسیت مش باعث شد علاوه بر بررسی صحت کلی مدل، میزان پایداری و اعتمادپذیری نتایج عددی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت چندبعدی مورد ارزیابی قرار گیرد.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) شاخصی برای سنجش میزان اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌ای است. این معیار در بازه‌ای از صفر تا بی‌نهایت قرار می‌گیرد و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر خطای پیش‌بینی کم‌تر و در نتیجه دقت بیشتر مدل است. RMSE به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Willmott & Matsuura, 2005).

$$RMSE = \sum_{i=1}^n \sqrt{(S_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

خطای میانگین (ME) شاخصی برای ارزیابی بایاس مدل به شمار می‌رود و می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی اختیار کند. نزدیک بودن مقدار آن به صفر بیانگر حداقل میزان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد در عملکرد مدل است. این شاخص از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Moriasi *et al.*, 2007).

$$ME = \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \quad \text{رابطه ۲}$$

میانگین قدرمطلق خطا (MAE) بدون در نظر گرفتن علامت خطا، میانگین میزان اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌شده را بیان می‌کند (رابطه ۳). این شاخص در بازه‌ای از صفر تا بی‌نهایت قرار دارد و مقادیر کوچک‌تر آن نشان‌دهنده خطای کلی کم‌تر و در نتیجه دقت بالاتر مدل است (Willmott & Matsuura, 2005).

$$MAE = \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad \text{رابطه ۳}$$

برای ارزیابی توانایی مدل در بازنمایی روند داده‌های مشاهده‌ای، از ضریب نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

این شاخص بدون بُعد بوده و مقدار آن در بازه یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده برازش مناسب مدل است، در حالی که مقادیر منفی بیانگر عملکردی ضعیف‌تر از میانگین مقادیر مشاهده‌شده می‌باشد.

معیار کلینگ-گوپتا (KGE) با ترکیب سه مؤلفه شامل ضریب همبستگی (r)، نسبت تغییرپذیری (α) و نسبت میانگین (β) تعریف می‌شود (Gupta *et al.*, 2009) (رابطه ۵):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

این شاخص نیز بدون بُعد بوده و مقدار آن در بازه یک تا منفی بی‌نهایت قرار دارد. در این رابطه، α بیانگر نسبت تغییرپذیری و β نشان‌دهنده نسبت میانگین بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است. مقادیر KGE نزدیک به ۱ حاکی از عملکرد مناسب مدل در بازتولید رفتار جریان می‌باشد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳.۱. مقایسه آماری دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهده‌ای در شرایط جریان مستغرق

برای نسبت تنگ‌شدگی ($r=0/332$)، نتایج نشان داد که مدل عددی قادر به بازتولید دقیق دبی جریان مستغرق است (شکل ۳). داده‌ها بیش‌تر در اطراف خط یک‌به‌یک و در محدوده خطای $\pm 10\%$ درصد قرار دارند که بیانگر تطابق مناسب مدل با داده‌های آزمایشگاهی است. شاخص‌های آماری نیز این نتیجه را تأیید می‌کنند، به طوری که مقادیر بسیار پایین ($RMSE=0/1436$) و ($MAE=0/0898$ Percent) و مقدار ($ME=-0/0675$ Percent)، اختلاف اندک بین نتایج محاسباتی و داده‌های تجربی می‌باشند. همچنین خطای نسبی به مقدار قابل قبول حدود $0/39$ درصد بوده که بیانگر عملکرد قابل اعتماد مدل در شرایط مستغرق است. اگرچه مقدار R^2 نسبتاً پایین است، اما نزدیکی نقاط به خط یک‌به‌یک نشان می‌دهد که مدل توانسته روند کلی تغییرات دبی را به خوبی بازنمایی کند. نتایج حاضر با یافته‌های مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. در برخی پژوهش‌های عددی گزارش شده است که استفاده از روش حجم سیال (VOF) در شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای مستغرق می‌تواند الگوی میدان جریان و مقادیر دبی را با دقت قابل قبولی بازتولید کند (Maghsoodi *et al.*, 2012). همچنین در مطالعات ترکیبی آزمایشگاهی-عددی دیگر نیز دقت مناسب مدل‌های عددی در پیش‌بینی رفتار جریان و پارامترهای هیدرولیکی در شرایط مستغرق تأیید شده است (Guan *et al.*, 2019). در مقابل، برخی پژوهش‌گران اشاره کرده‌اند که در هندسه‌های پیچیده یا شرایط هیدرولیکی خاص، ممکن است مدل‌های عددی در بازتولید دقیق عمق جریان یا توزیع فشار با محدودیت‌هایی مواجه شوند

(García-Alén *et al.*, 2021). با این حال، در پژوهش حاضر میزان خطاهای کم و تطابق مناسب با خط یک‌به‌یک نشان می‌دهد که مدل به کاررفته برای شرایط موردبررسی از دقت کافی برخوردار بوده است. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مدل عددی مورد استفاده می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تحلیل و پیش‌بینی جریان مستغرق در کاربردهای مهندسی به کار گرفته شود.

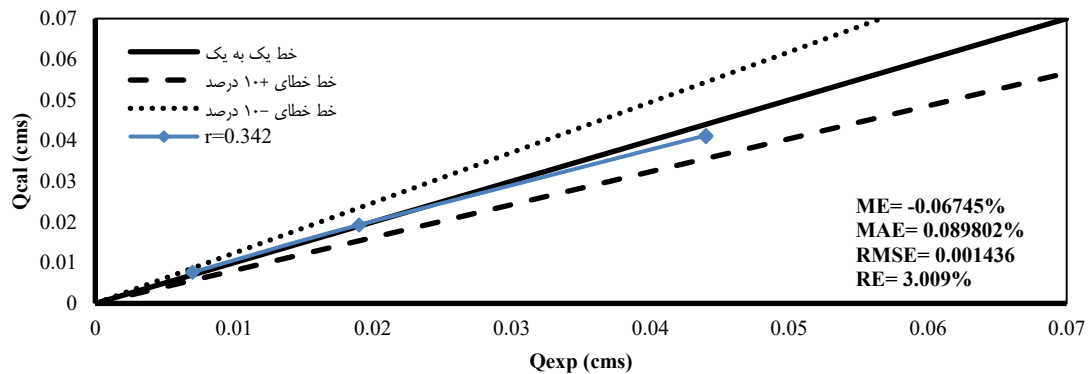


Figure 3. Discharge evaluation in numerical models and comparison with experimental data at a contraction ratio of 0.342

برای نسبت تنگ‌شدگی ($r=0.561$) تحت شرایط جریان مستغرق، همخوانی بالای نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل قادر به بازنمایی دقیق رفتار فلوم است (شکل ۴). بیش‌تر نقاط داده در محدوده خطای $\pm 10\%$ درصد قرار گرفته و منحنی نتایج شبیه‌سازی به خط ایده‌آل یک‌به‌یک نزدیک است. این امر نشان می‌دهد که مدل بدون تمایل به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد قابل توجه، توانسته جریان مستغرق را با دقت شبیه‌سازی کند. شاخص‌های آماری مانند MAE، RMSE و میانگین خطای نزدیک به صفر، پراکندگی اندک خطاها و همبستگی بالا بین داده‌های عددی و تجربی را نشان می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حتی در شرایطی که پیش‌بینی دبی نسبت به جریان آزاد دشوارتر است، مدل عددی با قابلیت اطمینان بالا می‌تواند مبنای تحلیل‌های مهندسی باشد. مطالعات دیگری نیز یافته‌های مشابهی را تأیید می‌کنند. Fleit *et al.* (2018) گزارش کردند که مدل‌های CFD قادر به پیش‌بینی دقیق میدان جریان و ارتفاع سطح آزاد در سرریزهای اوجی مستغرق هستند. Herrera-Granados (2021) دریافت که مدل‌های LES و RANS توانایی بازتولید الگوی سرعت و توزیع انرژی تلاطم در جریان مستغرق را دارند. Pedersen & R  ther (2016) نیز نشان دادند که با شبکه‌بندی مناسب، مدل‌های عددی می‌توانند شرایط جریان مستغرق را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند، هرچند حساسیت به اندازه‌مش باید لحاظ شود.

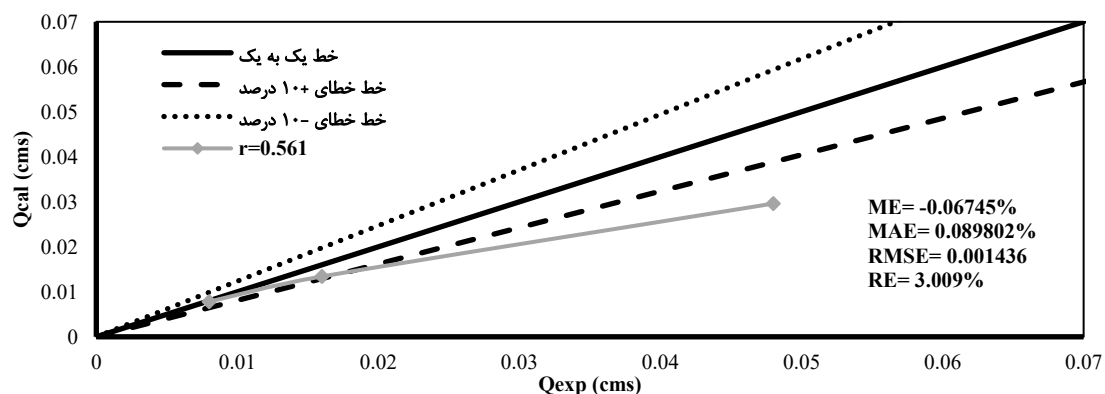


Figure 4. Discharge evaluation in numerical models and comparison with experimental data at a contraction ratio of 0.561

۲.۳. تفسیر شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) در حالت مستغرق

با توجه به شکل (۵)، هر سه مؤلفه شاخص KGE یعنی ضریب تعیین (R^2)، نسبت انحراف معیار (α) و نسبت میانگین (β) در حالت جریان مستغرق با نسبت تنگ‌شدگی $r=0/342$ عملکرد بهتری نسبت به $r=0/561$ ارائه می‌دهند. مقدار بالای R^2 نزدیک به یک و α و β در حدود نهم نشان‌دهنده بازتولید مناسب تغییرپذیری و میانگین داده‌های آزمایشگاهی توسط مدل است. برای $r=0/561$ کاهش قابل توجهی در α و β مشاهده شد، به طوری که α به حدود $0/53$ و β به حدود هفت‌دهم رسید. این کاهش بیانگر کاهش توانایی مدل در بازنمایی نوسانات و میانگین جریان تحت شرایط تنگ‌شدگی بالاتر است. نتایج کلی KGE نیز روند مشابهی را نشان می‌دهند. مقدار KGE برای $r=0/342$ حدود $0/89$ به دست آمد که بیانگر عملکرد مطلوب مدل است، در حالی که برای $r=0/561$ مقدار KGE به $0/45$ کاهش یافته و نشان‌دهنده افت قابل توجه دقت و تطابق مدل با داده‌های تجربی می‌باشد. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که این شاخص به‌عنوان معیاری متعادل برای سنجش دقت مدل‌های هیدرولوژیکی عمل می‌کند، زیرا هم همبستگی و هم تغییرپذیری و میانگین جریان را به‌طور هم‌زمان ارزیابی می‌کند (Yilmaz et al., 2008; Addor et al., 2013). مقادیر بالای KGE در این مطالعات به‌عنوان شاخصی از تطابق مطلوب میان داده‌های عددی و مشاهدات گزارش شده است، که با مقدار KGE تقریباً $0/89$ برای نسبت تنگ‌شدگی $r=0/342$ در مطالعه حاضر همسو می‌باشد. این یافته نشان می‌دهد که مدل عددی قادر است تغییرپذیری و میانگین جریان مستغرق را به‌طور دقیق بازتولید کند و عملکرد قابل‌اعتماد در شرایط جریان مستغرق با نسبت تنگ‌شدگی پایین ارائه دهد.

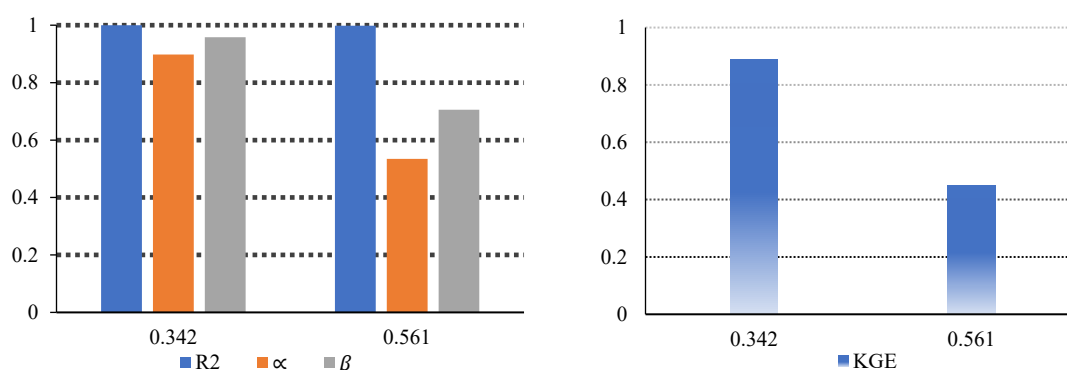


Figure 5. Kling-Gupta Efficiency (KGE) index and its components at two contraction ratios

۳.۳. تحلیل حساسیت شبکه محاسباتی در شرایط مستغرق

تحلیل حساسیت مش (جدول ۱) نشان داد که شبکه محاسباتی نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی جریان مستغرق فوم SMBF ایفا می‌کند. افزایش تعداد سلول‌ها در شبکه موجب کاهش شاخص‌های خطا مانند RMSE و MAPE و ارتقای دقت مدل در محدوده مشخصی شد. برای نسبت تنگ‌شدگی پایین‌تر ($r=0/342$)، افزایش سلول‌ها از $616,000$ به $1,092,000$ منجر به کاهش MAPE از $9/4$ به $6/17$ درصد شد و همگرایی مدل به‌خوبی حاصل گردید. مقادیر خطای به‌دست‌آمده در این مطالعه با دامنه گزارش‌شده در مطالعات CFD مشابه همخوانی دارد، به طوری که در پژوهش‌های پیشین نیز مقادیر MAPE در بازه ۵ تا ۱۵ درصد برای جریان‌های مستغرق گزارش شده است. با این حال، در نسبت تنگ‌شدگی بالاتر ($r=0/561$) افزایش بیش از حد تعداد سلول‌ها نه تنها موجب بهبود خطاها نشد، بلکه در برخی موارد به دلیل ناپایداری جریان و حساسیت مدل، مقدار خطا افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در شرایط جریان مستغرق، انتخاب شبکه محاسباتی باید با احتیاط انجام شود. اندازه

سلول حدود ۰/۰۱ متر و تعداد سلول بین $7/5 \times 10^5$ تا $1/1 \times 10^6$ تعادل مناسبی میان دقت و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. مقادیر خطای به‌دست‌آمده در این مطالعه با دامنه گزارش‌شده در مطالعات CFD مشابه همخوانی دارد، به‌طوری‌که در پژوهش‌های پیشین نیز مقادیر MAPE در بازه ۵ تا ۱۵ درصد برای جریان‌های مستغرق گزارش شده است. این نتایج با یافته‌های Pedersen & Rütther (2016) و Fleit *et al.* (2018) همخوانی دارد که نشان دادند بهبود شبکه تا یک حد مشخص موجب افزایش دقت می‌شود، اما ریزتر شدن بیش از حد مش می‌تواند منجر به ناپایداری عددی شود. بنابراین، تحلیل حساسیت مش تأکید می‌کند که استفاده از مش‌های بسیار ریز الزامی نیست و حتی ممکن است باعث افزایش خطا شود. این نتیجه اهمیت طراحی بهینه شبکه را برای شبیه‌سازی دقیق جریان مستغرق برجسته می‌کند.

Table 1. Mesh sensitivity in submerged flow simulation and associated error indices

Condition	B (m)	NO	Cell size	Number of cells	Qexp (cms)	Qcal (cms)	RMSE	MAPE Percent
1	0.342	1	0.01	616000	0.0070	0.0077	0.00065	9.405
		2	0.01	784000	0.0190	0.0193	0.00027	1.472
		3	0.01	1092000	0.0440	0.0413	0.00271	6.167
2	0.561	1	0.01	896000	0.0080	0.0078	0.00018	2.360
		2	0.01	1148000	0.0160	0.0134	0.00259	16.219
		3	0.01	1456000	0.0480	0.0296	0.01839	38.330

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر عملکرد هیدرولیکی فوم قابل‌حمل SMBF را در شرایط جریان مستغرق با استفاده از شبیه‌سازی عددی Flow-3D و داده‌های آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار داد. مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان داد که مدل عددی توانسته است روند تغییرات جریان مستغرق را با دقت بسیار بالا بازتولید کند. بخش عمده داده‌ها در محدوده خطای $\pm 10\%$ درصد و نزدیک به خط ایده‌آل یک‌به‌یک قرار داشتند و شاخص‌های آماری RMSE، MAE، ME و خطای نسبی مقادیر پایین و قابل‌قبولی داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که مدل بدون سوگیری سیستماتیک عمل کرده و حتی در شرایطی که پیش‌بینی دبی جریان مستغرق به دلیل کاهش اختلاف انرژی و افزایش عمق پایین‌دست دشوارتر است، قابلیت پیش‌بینی دقیق و قابل‌اعتماد دارد. تحلیل حساسیت شبکه محاسباتی نشان داد که اندازه و کیفیت شبکه نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی دارد. افزایش تعداد سلول‌ها در محدوده مشخص باعث کاهش شاخص‌های خطا و ارتقای دقت مدل شد. برای نسبت تنگ‌شدگی پایین‌تر ($r=0/342$)، افزایش تعداد سلول‌ها از ۶۱۶,۰۰۰ به ۱,۰۹۲,۰۰۰ موجب کاهش MAPE از ۹/۴ درصد به ۶/۱۷ درصد شد و همگرایی مدل به‌خوبی حاصل گردید. با این حال، در نسبت تنگ‌شدگی بالاتر ($r=0/561$)، استفاده از مش‌های بسیار ریز نه تنها به کاهش خطا کمک نکرد، بلکه در برخی موارد به دلیل ناپایداری جریان و حساسیت مدل، مقادیر خطا افزایش یافت. بر این اساس، انتخاب شبکه با اندازه سلول حدود ۰/۰۱ متر و تعداد سلول بین $7/5 \times 10^5$ تا $1/1 \times 10^6$ ، تعادل مناسبی میان دقت شبیه‌سازی و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند و اهمیت طراحی بهینه شبکه برای حفظ صحت مدل را برجسته می‌سازد.

تحلیل شاخص KGE نیز نشان داد که نسبت تنگ‌شدگی پایین‌تر ($r=0/342$) عملکرد مدل را به شکل قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. ضریب تعیین (R^2) نزدیک به یک و مؤلفه‌های α و β حدود ۰/۹ بودند که حاکی از توانایی مدل در بازتولید تغییرپذیری و میانگین جریان تجربی است. در مقابل، افزایش نسبت تنگ‌شدگی به $r=0/561$ موجب کاهش α و β و افت قابل‌توجه KGE شد که بیانگر کاهش دقت و پایداری مدل در شرایط جریان مستغرق با تنگ‌شدگی بالاتر است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی فوم SMBF، به‌ویژه با انتخاب نسبت تنگ‌شدگی بهینه و شبکه محاسباتی مناسب، ابزار مؤثری برای پیش‌بینی دبی و تحلیل رفتار هیدرولیکی جریان مستغرق است. این یافته‌ها می‌توانند به توسعه روابط اصلاحی برای فوم‌ها، طراحی سازه‌های اندازه‌گیری و مدیریت بهینه منابع آب در شبکه‌های انتقال کمک کنند. علاوه بر این، نتایج

مطالعه تأکید می‌کند که در طراحی مدل عددی، انتخاب دقیق پارامترهای هندسی، بهینه‌سازی شبکه محاسباتی و تعیین نسبت تنگ‌شدگی مناسب، نقش کلیدی در حفظ دقت، پایداری و قابلیت اعتماد مدل دارند. افزایش بیش از حد تنگ‌شدگی یا استفاده از مش‌های بسیار ریز بدون توجه به شرایط جریان می‌تواند منجر به کاهش دقت و ناپایداری شود. بنابراین، مطالعه حاضر نشان می‌دهد که حتی در شرایط پیچیده جریان مستغرق، با طراحی مناسب شبکه و پارامترهای هندسی، مدل عددی قادر به بازتولید دقیق رفتار هیدرولیکی و فراهم کردن اطلاعات ارزشمند برای تحلیل مهندسی است.

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی می‌تواند ابزاری کاربردی و قابل‌اعتماد برای مهندسين هیدرولیک و پژوهشگران در پیش‌بینی جریان مستغرق، طراحی فلو‌های اندازه‌گیری و بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال باشد. همچنین، اهمیت انتخاب دقیق پارامترهای شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت مش برای حفظ دقت و صحت نتایج، به‌ویژه در شرایط مستغرق، به‌وضوح برجسته شده است و می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای مطالعات مشابه در آینده باشد.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهادهای کاربردی زیر ارائه می‌شود:

- استفاده از نسبت تنگ‌شدگی حدود ۰/۳۴۲ برای افزایش دقت اندازه‌گیری در شرایط مستغرق؛
- انتخاب اندازه سلول حدود ۰/۰۱ متر برای ایجاد تعادل بین دقت و هزینه محاسباتی؛
- استفاده از شاخص KGE در کنار RMSE برای ارزیابی جامع مدل؛
- پرهیز از استفاده از مش‌های بسیار ریز در شرایط ناپایدار جریان؛
- ترکیب مدل‌های CFD با روش‌های یادگیری ماشینی برای بهبود پیش‌بینی در کاربردهای عملی.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Spillway
2. Submerged flow
3. Samani- Magallanez- Baiamonte- Ferro
4. Kling-Gupta Efficiency
5. Point gauges
6. Pressure boundary
7. Renormalization Group
8. Volume of Fluid
9. Kling-Gupta Efficiency

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Addor, N., Fowler, K. J., & Clark, M. P. (2013). Hydrologic model performance evaluation: Experience with multi-objective diagnostics and hydrologic signatures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 111-128.
- Aminpour, Y., Vatankeh, A. R., & Farhoudi, J. (2020). Experimental modeling of flumes with two semi cylinder contractions (free and submerged flows). *Flow Measurement and Instrumentation*, 76, 101844.
- Asadi, M., Koochakzadeh, S., & Sotudenia, M. (2011). Water Measurement Manual, Iranian National Committee on Irrigation & Drainage (IRNCID), Tehran, Iran. (In Persian).
- Clemmens, A. J., Wahl, T. L., Bos, M. G., & Replogle, J. A. (2001). *Water measurement with flumes and weirs* (ILRI Publication 58). International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).

- Fleit, G., Baranya, S., & Bihs, H. (2018). CFD modeling of varied flow conditions over an ogee-weir. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 26-32.
- García-Alén, M., et al. (2021). Numerical modeling of submerged weir flows in complex geometries. *Journal of Hydraulic Research*, 59(4), 501-515.
- Guan, D., et al. (2019). Experimental and numerical study of sediment transport downstream of submerged weirs. *Water*, 11(9), 1746.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Herrera-Granados, O. (2021). Numerical analysis of flow behavior in a rectangular channel with submerged weirs. *Water*, 13(10), 1396.
- Kolavani, F. L., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V., & Mazdeh, A. M. (2019). Experimental study of central baffle flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(3), 04019002.
- Kolavani, L. F., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V., & Mazdeh, A. M. (2018). Flow measurement using circular portable flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 76-83.
- Kraatz, D. B., & Mahajan, I. K. (1975). Small Hydraulic Structures (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Maghsoodi, S., et al. (2012). 3D simulation of flow over submerged weirs using CFD. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(3), 234-243.
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Pedersen, O., & Røther, N. (2016). Numerical modeling of submerged flow over ogee-weirs. In *River Flow 2016: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics* (pp. 249-256).
- Samani, Z. (2017). Three simple flumes for flow measurement in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6), 04017010.
- Samani, Z., & Magallanez, H. (1993). Modified circular flume for trapezoidal channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(6), 1023-1031.
- Samani, Z., Jorat, S., & Yousaf, M. (1991). Hydraulic characteristics of a circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 558-566.
- Sun, B., Yang, L., Zhu, S., Zhang, H., Zhang, C., & Zhang, J. (2020). Experimental and numerical investigation of flow measurement mechanism and hydraulic performance of portable pillar-shaped flumes in trapezoid channels. *Shock and Vibration*, 8815957.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over RMSE. *Climate Research*, 30(1), 79-82.
- Yarahmadi, N., & Vatankhah, A. R. (2021). Experimental study on rectangular cut-throated flume: Effects of flume wall slopes and channel longitudinal slope. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101919.
- Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9), W09417.