

Hydraulics of a Flume with Multiple Cylindrical Baffles under Free-Flow Conditions

Nasrin Bahrami¹, AmirHamzeh Haghiabi^{2*}, Mahmood Shafai Bejestan³, Hassan Torabi Poudeh², Mostafa Rahmanshahi⁴

1-PhD Graduate in Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorram Abad, Iran.

2-Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorram Abad, Iran.

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

4-Postdoctoral Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong SAR, PR China.

*haghiabi.a@lu.ac.ir

Received: 2 July 2025

Revised: 28 August 2025

Accepted: 7 September 2025

Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Flow measurement in open channels is a key principle in the effective management of irrigation networks. Currently, critical flow conditions are widely applied in the design of flow measurement flumes, where a control section creates a definite relationship between flow depth and discharge. The Venturi flume first demonstrated the influence of local channel constriction on pressure and velocity distribution (Hager, 1985; Ferro, 2002). Flumes that operate by locally reducing channel width are common; for example, throat flumes with gradual width variation are used in several European countries, while the throatless Parshall flume is widely applied in Anglo-Saxon countries (Blaisdell, 1994; Parshall, 1926). Hager (1988) introduced a moving circular flume consisting of a circular column placed at the center of a pipe to create constriction. Earlier studies also proposed inserting circular columns into trapezoidal channels to estimate discharge (Hager, 1986; Samani and Magallanez, 1993), and laboratory investigations examined the hydraulic behavior of different circular flumes (Samani et al., 1991). Previous studies mainly focused on Parshall flumes or flumes with a central baffle. In Parshall flumes, the cross-section is partially reduced and sometimes includes a bottom step. In central baffle flumes, the non-submerged baffle may increase blockage risk and generate high shear stresses due to high-velocity flow passing on both sides. The flume proposed in this study aims to utilize the entire cross-section, particularly at high discharges, while allowing the flow to submerge the baffles. It is hypothesized that using multiple baffles can reduce downstream shear stress compared to flumes with a single central baffle, which is particularly important for erodible beds. The objective of this study is to hydraulically evaluate a new flume consisting of cylindrical baffles. The effects of blockage ratio (cylinder diameter) and cylinder height at different discharges are investigated. In addition, dimensional analysis is used to derive a discharge relationship, which is determined through nonlinear multivariate regression.

Methodology: The modeling of this research was carried out in a rectangular laboratory channel with a

length, width, and height of 10, 0.8, and 0.6 m, respectively, in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz. In general, 11 models were built with geometric variables, including different heights (P) and diameters (D). Hydraulic variables also included different discharges. At each discharge in free-flow conditions, the downstream gate was fully open. Considering the hydraulic variables, a total of 190 experiments were conducted for free flow conditions.

Results and discussion: As the height of the baffles increases, submergence occurs at higher discharges. Conversely, increasing the baffle diameter increases partial blockage and causes submergence at lower discharges. Determining the threshold discharge for submerged baffles is particularly important in waterways carrying debris such as tree branches, since blockage can lead to errors in discharge estimation. In this type of flume, the relationship between discharge and upstream depth follows a logarithmic function. Because partial blockage increases with larger baffle diameters, the upstream depth becomes greater for the same discharge. Results also indicate that for a given upstream depth, the discharge index decreases with increasing baffle height and blockage ratio. Similarly, for a constant upstream depth, smaller diameter baffles produce a higher discharge index. Based on the dimensionless relationships obtained from dimensional analysis and laboratory data, an empirical equation was developed using nonlinear multivariate regression. The analysis was performed using SPSS 16, with 75% of the data used for training and 25% for calibration to evaluate the accuracy of the proposed relationship.

Conclusion: This study experimentally examined the hydraulic performance of a flume with cylindrical baffles, focusing on how baffle height and diameter affect flow under free conditions. Results show that discharge changes logarithmically with these variables. Reducing the height or increasing the diameter of the baffles causes the flume to become submerged at lower discharges. Also, increasing the height and diameter of baffles reduces the discharge index due to greater flow blockage. An empirical formula for the discharge index was developed using dimensional analysis and nonlinear regression, achieving high accuracy ($R^2 = 0.98$ for training and testing datasets) and a relative error of approximately 11% for the testing dataset.

Keywords: Flume, Experimental modeling, Flow measurement, Free flow.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Conducting experiments and analyzing data, drawing graphs, writing the draft article.

Second Author: Editing and revising the article, methodology, data analysis.

Third Author: Editing and revising the article, supervising the process of conducting experiments, providing laboratory facilities.

Fourth Author: Editing and revising the article, statistical analysis.

Fifth Author: Editing and revising the article, statistical analysis.

Acknowledgment: We would like to express our gratitude to the officials of the Hydraulic Laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz who expressed their utmost cooperation in conducting this research.

هیدرولیک جریان در فلوم با موانع استوانه‌ای چندگانه در شرایط جریان آزاد

نسرین بهرامی^۱، امیر حمزه حقی‌آبی^{۲*}، محمود شفاعی بجنستان^۳، حسن ترابی پوده^۴، مصطفی رحمانشاهی^۴

۱- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

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

۴- پژوهشگر پسا دکتری، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ، هنگ کنگ.

*haghiabi.a@lu.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

چکیده: فلوم‌ها یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری جریان در مجاری باز مبتنی بر رابطه دبی-اشل هستند. در این تحقیق، هیدرولیک جریان در فلوم با موانع استوانه‌ای چندگانه به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. برای این منظور مدل‌های مختلفی از این نوع فلوم در شرایط جریان آزاد مورد آزمایش قرار گرفت. متغیرهای این تحقیق شامل ارتفاع‌ها و قطرهای مختلف موانع و دبی‌های متفاوت در شرایط جریان آزاد بودند. در این تحقیق برای ۱۱ مدل فلوم در مجموع ۱۹۰ آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش قطر و ارتفاع موانع، مقدار شاخص دبی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش ارتفاع و افزایش قطر موانع، سازه در دبی کمتری مستغرق گردید. سپس با استفاده از تحلیل ابعادی پارامترهای بدون بعد موثر این فلوم استخراج شده و در نهایت با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیرخطی یک رابطه تجربی ارائه شد که دقت آن با استفاده از معیارهای آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار R^2 این رابطه برای داده‌های آموزش و واسنجی ۰/۹۸ می‌باشد. میزان خطای نسبی این رابطه بر اساس داده‌های واسنجی حدود ۱۱ درصد است.

کلید واژگان: فلوم، مدل‌سازی آزمایشگاهی، سنجش دبی، جریان آزاد.

۱- مقدمه

است. فلوم ونتوری^۱ پیشگام در تشخیص تأثیر انقباض موضعی در یک مجرا بر توزیع فشار و سرعت بود (Hager 1985; Ferro 2002). فلوم‌هایی که از طریق تغییر موضعی عرض کانال عمل می‌کنند، رایج هستند. در کشورهای مختلف اروپایی، فلوم گلوگاهی که عرض آن به تدریج تغییر می‌کند، استفاده می‌شود. برعکس، فلوم پارشال که به عنوان فلوم بدون گلوگاه شناخته می‌شود، به طور گسترده در

اندازه‌گیری جریان در یک کانال باز، از اصول اساسی مدیریت و تنظیم پیشرفته شبکه‌های آبیاری است. در حال حاضر، اصل شرایط بحرانی جریان در کانال باز در طراحی فلوم‌های اندازه‌گیری جریان به کار گرفته می‌شود. این روش بر مبنای ایجاد یک مقطع کنترل که در آن همبستگی بین عمق جریان بحرانی و دبی مشخص می‌باشد، استوار شده

مقایسه با رابطه‌های موجود، می‌توان با اطمینان برای طیف گسترده‌ای از داده‌ها استفاده کرد.

Carollo and Pampalone (2021) با استفاده از یک روش نظری که پیش از این برای فلوم افقی پیشنهاد شده بود، عملکرد فلوم SMBF شیب‌دار را بررسی و ارزیابی کردند. ایشان با بکارگیری این روش که مبتنی بر رابطه انرژی بین مقطع بالادست فلوم و نخستین مقطع پایین‌دست استوانه‌ها می‌باشد، رابطه جدیدی برای دبی - اشل ارائه کرده و نتایج آن را با داده‌های تجربی نتایج بررسی‌های پیشین برای نسبت‌های انقباض و شیب‌های مختلف مقایسه کردند.

Kapoor et al. (2021) در یک پژوهش به شبیه‌سازی مبتنی بر CFD فلوم با مانع‌های مرکزی مخروطی پرداختند که در آن از عمق جریان برای پیش‌بینی دبی این نوع فلوم با بیشینه و میانگین خطای ۶ و ۳/۳ درصد استفاده شد.

Parsaie et al. (2023) ضریب دبی (C_d) فلوم SMBF را تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق به صورت تحلیلی بررسی کردند. فراسنجه‌های موثر بر ضریب دبی در شرایط جریان آزاد شامل نسبت انقباض (نسبت عرض فلوم به عرض کانال) و بار^۲ نسبی (نسبت عمق بالادست به عرض فلوم) و در شرایط جریان مستغرق افزون بر آن شامل فراسنجه نسبت استغراق (نسبت عمق جریان پایین‌دست به عمق جریان بالادست) نیز بودند. نتایج نشان داد که در شرایط جریان آزاد با افزایش بار نسبی از ۰/۴ به ۱/۸ ضریب C_d به صورت لگاریتمی از ۱/۲ به ۰/۷۵ کاهش می‌یابد. شرایط مستغرق تأثیری بر ضریب C_d نداشته ولی ظرفیت تخلیه را تا ۵۰ درصد کاهش داد؛ به گونه‌ای که برای عبور یک دبی جریان معین، عمق بالادست باید حدود ۱۰۰ درصد افزایش می‌یافت.

Nair et al. (2024) یک روش طراحی هیدرولیکی برای کانال‌های با مانع مرکزی مخروطی ارائه دادند که یک مدل پیش‌بینی دبی بهبود یافته با میانگین خطای نسبی $\pm 1/42$ درصد و بیشترین خطای نسبی ۳/۵ درصد را ارائه می‌دهد؛ افزون بر این، یک روش طراحی خاص برای کانال‌های دوزنقه‌ای را تشریح می‌کند.

کشورهای انگلوساکسون^۱ استفاده می‌شود (Blaisdell, 1926; Parshall, 1994). Hager برای اندازه‌گیری جریان از یک فلوم دایره‌ای متحرک استفاده کرد، که شامل یک ستون دایره‌ای بود که به صورت عمودی در مرکز یک لوله قرار گرفته تا به انقباض لازم برسد. Hager (1986) و Samani and Magallanez (1993) کمی‌سازی دبی جریان را با اضافه کردن یک ستون دایره‌ای در یک کانال دوزنقه‌ای توصیه کردند. Samani et al. (1991) تحقیق‌های آزمایشگاهی را با هدف بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی فلوم‌های دایره‌ای مختلف انجام دادند.

Baiamonte and Samani and Magallanez (2000) و Ferro (2007) و Di Stefano et al. (2008) و Carollo et al. (2016) رابطه دبی - اشل را برای یک فلوم اصلاح شده (فلوم SMBF) با اتصال دو مانع نیمه استوانه‌ای به دیواره‌های کانال بررسی کردند.

Baiamonte and Ferro (2007) با بکارگیری یک فلوم و استفاده از قضیه II باکینگهام برای تحلیل ابعادی و مفهوم خودتشابهی ناقص، یک معادله دبی - اشل را برای برآورد دبی جریان استخراج کردند که پس از آنان توسط Di Stefano et al. (2008) در شرایط واقعی اعتبارسنجی شد.

Aminpour et al. (2020) فلوم با دو نیم‌استوانه در دو طرف را در شرایط جریان آزاد، آستانه استغراق و جریان مستغرق با استفاده از داده‌های تحقیق خود و نتایج پژوهش‌های پیشین بررسی و ارزیابی کردند. ایشان با استفاده از داده‌های یاد شده، رابطه‌های جدیدی برای محاسبه دبی جریان آزاد، نسبت آستانه استغراق و دبی جریان مستغرق پیشنهاد کردند. آنان همچنین برای تشخیص دقیق حد جریان آزاد و مستغرق، با معادل قرار دادن دبی جریان آزاد و مستغرق، نسبت آستانه استغراق را به دست آوردند.

Vatankhah and Mohammadi (2020) با بررسی جریان خروجی از یک فلوم ساده با دو نیم‌استوانه در دو طرف، دو رابطه دبی - اشل جدید، یکی با در نظر گرفتن نسبت انقباض و دیگری با صرف نظر کردن از آن، ارائه کردند. ایشان همچنین عنوان کردند که رابطه‌های پیشنهادی را در

در نهایت با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیر خطی، رابطه جدیدی بدین منظور استخراج شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل‌سازی آزمایشگاهی

مدل‌سازی این پژوهش به صورت آزمایشگاهی در یک فلوم مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۰، ۰/۸ و ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. به طور کلی ۱۱ مدل با متغیرهای هندسی شامل ارتفاع‌ها (P) و قطرهای (D) مختلف ساخته شد. متغیرهای هیدرولیکی نیز شامل دبی‌های مختلف بود. در هر دبی در شرایط جریان آزاد، دریچه پایین دست به طور کامل باز بوده و برای هر آزمایش زمان کافی به جریان داده می‌شد تا شرایط جریان دائمی شکل گیرد و آنگاه عمق جریان بالادست فلوم خوانده می‌شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مستطیلی لبه تیز در پایین دست سامانه آزمایشگاهی و برای اندازه‌گیری عمق جریان از یک عمق‌سنج با دقت ± 0.1 mm استفاده شد.

مدل‌ها متشکل از ۴ استوانه در عرض کانال و دو نیم‌استوانه در دو طرف آن بود. در شکل ۱ نمای کلی و دو تصویر آزمایشگاهی از فلوم مورد نظر نشان شده است. جزئیات آزمایش‌های این پژوهش نیز در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به متغیرهای هیدرولیکی، در مجموع ۱۹۰ آزمایش برای شرایط جریان آزاد انجام شد.

جدول ۱ جزئیات آزمایش‌های این پژوهش

Table 1 Details of the experiments in this study

Model No.	D (cm)	P (cm)	Q (l/s)
1-5	6.3	5, 7.5, 10, 12.5, 15	6.36-84.62
6-8	7.3	5, 7.5, 10	6.36-84.62
9-11	8	5, 7.5, 10	6.36-84.62

Shen et al. (2025) یک مدل یادگیری یکپارچه را برای پیش‌بینی ضریب تخلیه دبی فلوم انقباضی ایجاد کردند و با استفاده از نظریه SHAP^۱ به تجزیه و تحلیل نتایج مدل بهینه پرداختند. آنان اثرگذاری فراسنجه‌های مختلف بر ضریب دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق را نیز بررسی و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که در شرایط جریان آزاد نسبت عمق بالادست به عرض گلوگاه و در شرایط جریان مستغرق نسبت عرض کانال به عرض گلوگاه بیشترین تاثیر را بر نتایج مدل دارا بود. ایشان همچنین عنوان کردند که مدل XGBoost^۲ با معرفی بسط تیلور مرتبه دوم و عبارات منظم برای تابع‌های زیان، پیچیدگی را کاهش می‌دهد.

بررسی نتایج پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که فلوم‌های مورد استفاده یا از دسته پارشال فلوم بوده و یا از نوع فلوم با مانع مرکزی می‌باشند. در فلوم‌های از نوع پارشال، قسمتی از مقطع کاهش یافته و برخی از آن‌ها دارای برآمدگی در کف هستند. در فلوم‌های از نوع مانع مرکزی نیز مانع به صورت غیر مستغرق بوده و افزون بر افزایش احتمال انسداد، جریان عبوری از دو طرف آن با سرعت بالا، تنش برشی بالایی در دو طرف سازه دارد. در فلوم پیشنهادی این پژوهش، هدف این است که به ویژه در دبی‌های بالا از کل مقطع استفاده شود و افزون بر این، جریان مانع‌ها را مستغرق کند. یکی از فرضیه‌های این تحقیق این است که با توجه به استفاده از مانع‌های چندگانه با قطر کوچک‌تر، به دلیل کاهش گرداب پایین دست، تنش برشی ایجاد شده در پایین دست مانع‌ها هم نسبت به فلوم‌های با مانع منفرد مرکزی کاهش می‌یابد. این موضوع به ویژه در بسترهای قابل فرسایش بسیار با اهمیت است.

هدف این پژوهش ارزیابی هیدرولیکی یک فلوم جدید با ساختاری متشکل از مانع‌های استوانه‌ای است. برای این منظور اثر درصد انسداد (یا قطر) و ارتفاع استوانه‌ها در دبی‌های مختلف آزمایش شده است. همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه دبی مناسب این فلوم به دست آمده و

2. eXtreme Gradient Boosting

1. Shapley Additive exPlanation

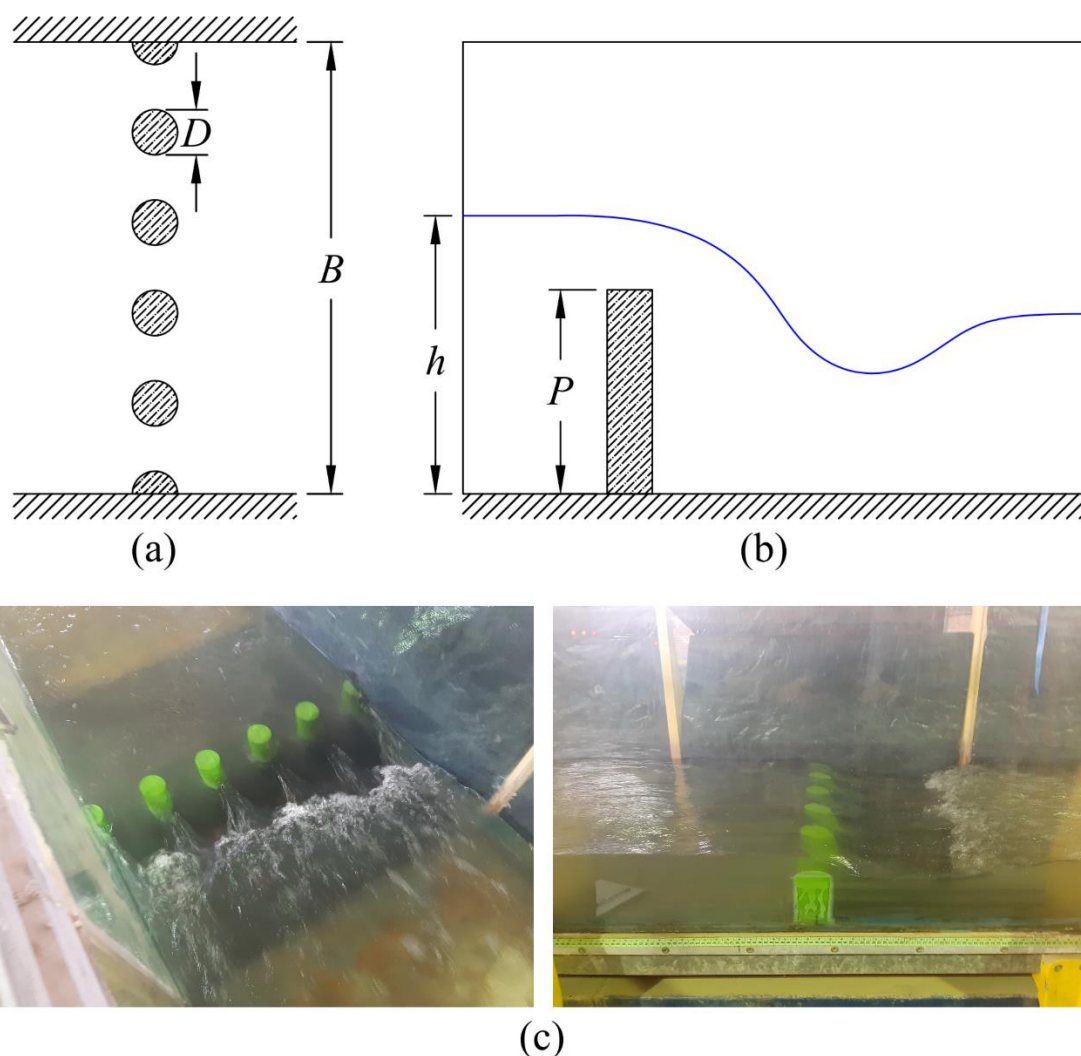


Fig. 1 (a),(b) Schematic of flume with central baffles, (c) flume in laboratory channel
 شکل ۱ (a) و (b) نمای کلی فلوم با مانع‌های مرکزی، (c) فلوم در کانال آزمایشگاهی

۲-۲- تحلیل ابعادی

مطابق رابطه (۱) فراسنجه‌های مختلف مؤثر بر دبی فلوم استفاده شده در این پژوهش در شرایط جریان آزاد Q ، شامل عمق بالادست فلوم (h)، ارتفاع استوانه‌ها (P)، عرض بازشدگی ($B_c = B - N \times D$)، قطر استوانه‌ها (D)، عرض کف کانال (B) و فراسنجه‌های مربوط به سیال شامل دانسیته سیال (ρ)، گرانروی سیال (μ)، کشش سطحی (σ) و همچنین شتاب ثقل (g) هستند:

$$f(Q, h, B, B_c, g, P, D, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (1)$$

در اینجا f یک تابع است.

با انتخاب h و μ و g به عنوان متغیرهای تکراری و استفاده از روش پی باکینگهام، و همچنین با استفاده از تبدیل‌های

مختلف و استفاده از الگوهای همانند در پیشینه پژوهش،

اعداد بدون بعد زیر به دست می‌آید:

$$\pi_1 = \frac{Q}{g^{1/2} h^{5/2}} \quad (2)$$

$$\pi_2 = \frac{h}{B_c} \quad (3)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{P} \quad (4)$$

$$\pi_4 = \frac{\rho h^{3/2} g^{1/2}}{\mu} \quad (5)$$

$$\pi_5 = \frac{B}{h} \quad (6)$$

در شکل ۲ تغییر پذیری‌های دبی آستانه استغراق سازه فلوم با قطر و ارتفاع‌های مختلف ارائه شده است. بدیهی است که با افزایش ارتفاع مانع‌ها، سازه‌ها در دبی بیشتری مستغرق شده‌اند. همچنین برابر شکل، افزایش قطر مانع‌ها با افزایش درصد انسداد مقطع، منجر به استغراق سازه در دبی پایین‌تر شد. تعیین دبی آستانه استغراق مانع‌ها، به ویژه در آبراهه‌هایی که شامل جریان‌های آواری مانند شاخ و برگ درختان و یا آشغال می‌باشند، دارای اهمیت است؛ زیرا این آوارها می‌توانند باعث انسداد سازه و ایجاد خطا در برآورد دبی شوند.

در شکل ۳ تغییر پذیری‌های دبی-اشل فلوم‌های با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطرهای ۶/۳، ۷/۳ و ۸ سانتی‌متر ارائه شده است. در این نوع فلوم هم رابطه دبی و اشل به صورت تابع لگاریتمی می‌باشد. با توجه به اینکه با افزایش قطر مانع‌ها انسداد سازه بیشتر می‌شود، برای یک دبی خاص، مقدار اشل برای مانع‌های با قطر بیشتر، بالاتر است.

در شکل ۴-ا تا ۴-ج تغییر پذیری‌های شاخص دبی برای ارتفاع‌های مختلف مانع‌ها نمایش داده شده است. در قطر ۶/۳ سانتی‌متر، پنج ارتفاع و در دو قطر دیگر، سه ارتفاع بررسی و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای یک عمق بالادست مشخص، با افزایش ارتفاع و افزایش انسداد مقطع جریان، مقدار شاخص دبی کاهش می‌یابد.

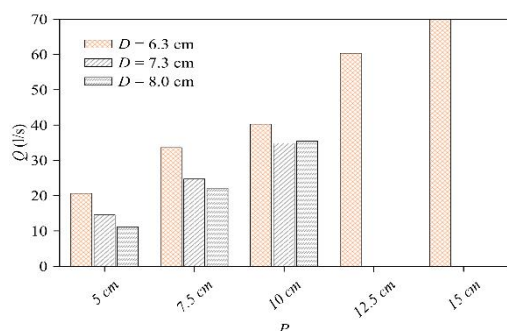


Fig. 2 Changes in the threshold discharge of the flumes submersion at different heights and diameters

شکل ۲ تغییر پذیری‌های دبی آستانه مستغرق شدن سازه فلوم در ارتفاع‌ها و قطرهای مختلف

$$\pi_6 = \frac{\sigma}{\mu\sqrt{gh}} \quad (7)$$

با استفاده از عملیات ریاضی مختلف و همچنین استفاده از رابطه دبی $Q = AV = B_c hV$ ، عدد رینولدز و عدد وبر را به شکل زیر می‌توان از گروه‌های بدون بعد به دست آمده محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \pi_{1,2,4} &= \pi_1 \times (\pi_2) \times \pi_4 \quad (8) \\ &= \frac{Q}{g^{1/2} h^{5/2}} \frac{h}{B_c} \frac{\rho h^{3/2} g^{1/2}}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu B_c} \\ &= Re \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi_{1,2,4,6} &= \pi_1^2 \times \pi_2^2 \times \pi_4 \times (1/\pi_6) \quad (9) \\ &= \frac{B_c^2 h^2 V^2}{gh^5} \frac{h^2}{B_c^2} \frac{\rho h^{3/2} g^{1/2}}{\mu} \frac{\mu\sqrt{gh}}{\sigma} \\ &= \frac{\rho V^2 h}{\sigma} = We \end{aligned}$$

$$\pi_{2,5} = (1/\pi_2)/\pi_5 = \frac{B_c}{B} = r \quad (10)$$

بر مبنای (Bijankhan et al. (2022)، می‌توان عدد بدون بعد شاخص دبی را به صورت زیر اصلاح کرد:

$$\pi_{1,2} = \pi_1 \times \pi_2^{5/2} = Q/\sqrt{gB_c^5} \quad (11)$$

بنابراین رابطه (۱) را می‌توان به صورت بدون بعد زیر نوشت:

$$Q/\sqrt{gB_c^5} = f\left(\frac{h}{B_c}, r, \frac{D}{P}, Re, We\right) \quad (12)$$

از سوی دیگر با توجه به اینکه جریان در این پژوهش در همه آزمایش‌ها در محدوده جریان آشفته است، و همچنین کمینه عمق جریان در بالادست سازه بیشتر از ۵ سانتی‌متر است، می‌توان از عدد رینولدز و عدد وبر صرف‌نظر کرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر متغیرها

یکی از مسئله‌های فلوم‌های با مانع مرکزی، غیر مستغرق بودن آنهاست. در فلوم معرفی شده در این پژوهش هدف این است که سازه فلوم در شرایط بهره‌برداری، به طور کامل مستغرق باشد (زیر آب باشد).

در شکل ۵- a تا ۵- c تغییر پذیری‌های شاخص دبی برای قطرهای مختلف مانع‌ها با هم مقایسه شده است. با همان استدلال مشابه‌ای که برای ارتفاع مانع‌ها استفاده شد، در این شکل‌ها هم مشخص است که با افزایش قطر مانع‌ها و افزایش میزان انسداد، برای یک عمق بالادست مشخص، شاخص دبی برای قطرهای کوچکتر مانع‌ها، مقدار بیشتری است. به طور کلی می‌توان گفت با افزایش میزان انسداد،

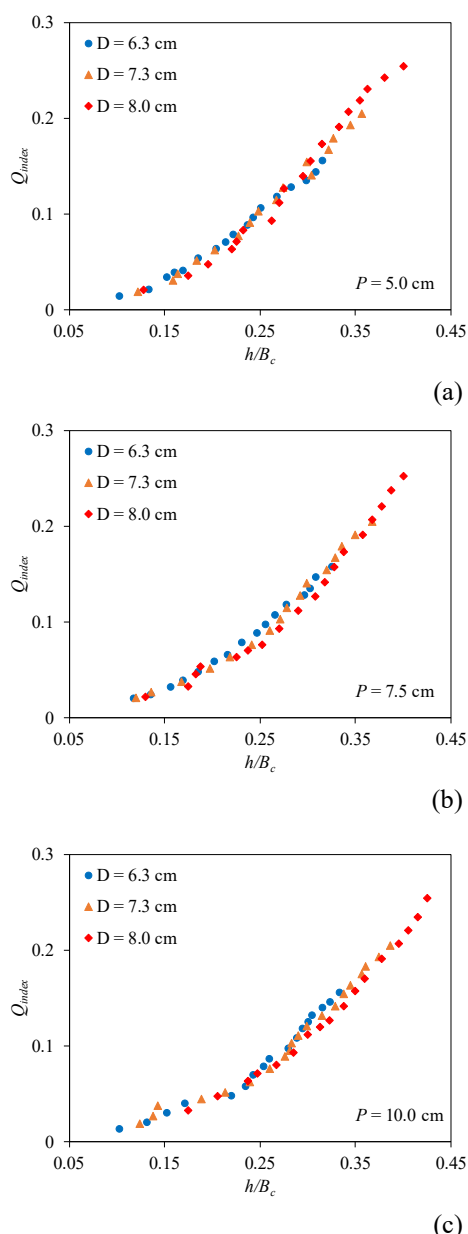


Fig. 5 Variation of discharge index for different diameters of baffles with height (a), 5 cm, (b) 7.5 cm, and (c) 10 cm

شکل ۵ تغییر پذیری‌های شاخص دبی برای قطرهای مختلف مانع‌ها به ارتفاع (a)، ۵ سانتی‌متر، (b) ۷/۵ سانتی‌متر و (c) ۱۰ سانتی‌متر

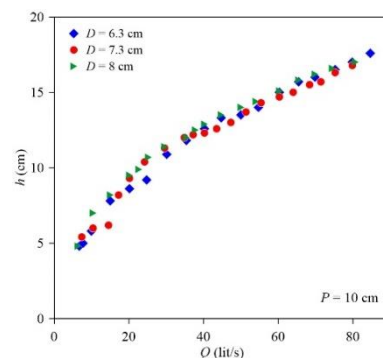


Fig. 3 Rating curve variations for flumes with heights of 10 cm and different diameters

شکل ۳ تغییر پذیری‌های دبی-اشل برای فلوم‌های با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطرهای مختلف

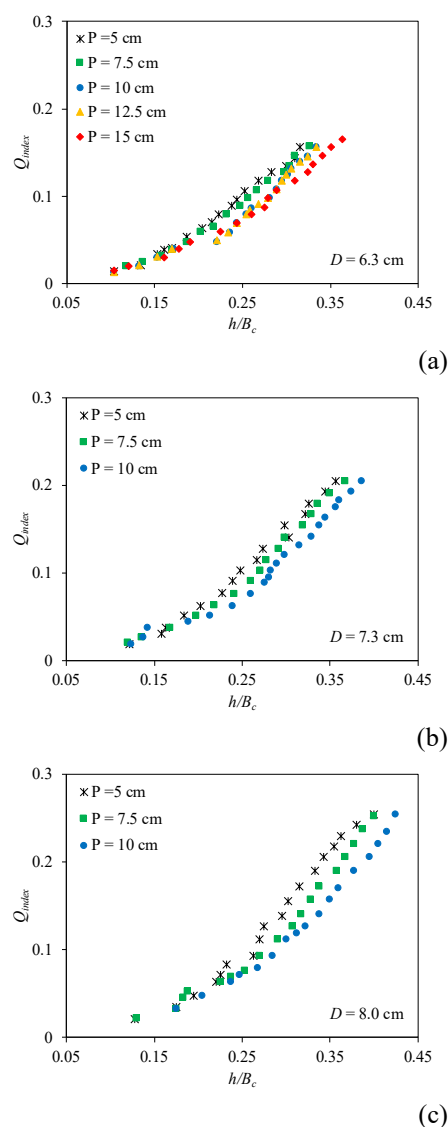


Fig. 4 Variation of discharge index for different heights of baffles with diameter: (a) 6.3 cm, (b) 7.3 cm, and (c) 8 cm

شکل ۴ تغییر پذیری‌های شاخص دبی برای ارتفاع‌های مختلف مانع‌ها به قطر: (a) ۶/۳ سانتی‌متر، (b) ۷/۳ سانتی‌متر و (c) ۸ سانتی‌متر

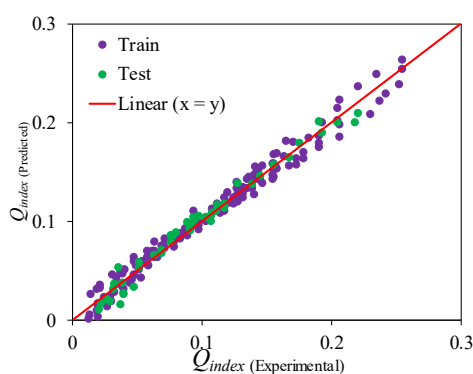


Fig. 6 Comparison of experimental and calculated flow index from Eq. (9)

شکل ۶ مقایسه مقدارهای شاخص دبی آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده از رابطه (۱۳)

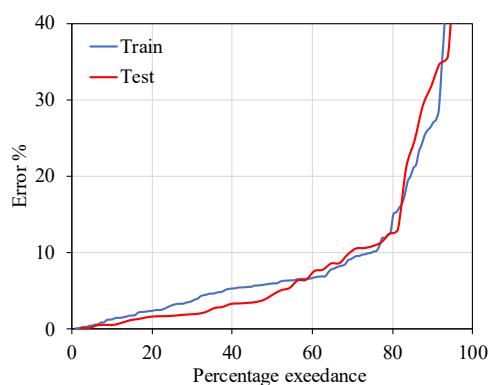


Fig. 7 Train and test discharge index relative error

شکل ۷ خطای نسبی شاخص دبی داده‌های آموزش و واسنجی

در شکل ۸ نیز باقیمانده اختلاف شاخص دبی آزمایشگاهی و محاسبه شده برای داده‌های آموزش و واسنجی ارائه شده است. مقدار این فراسنجه برای بیشتر داده‌ها بین ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۵- می‌باشد.

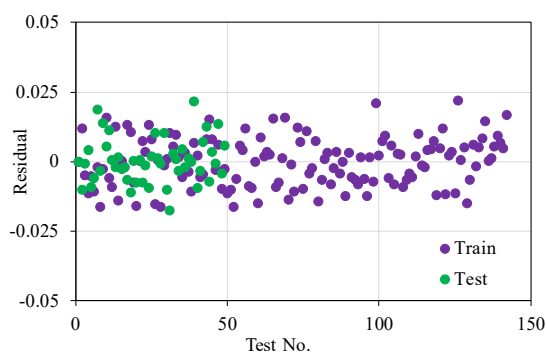


Fig. 8 Residual difference between experimental and calculated flow rate index for training and test data

شکل ۸ باقیمانده اختلاف شاخص دبی آزمایشگاهی و محاسبه شده برای داده‌های آموزش و واسنجی

یک جریان مشخص با عمق بیشتری از سازه عبور می‌کند. از قابلیت‌های این سازه می‌توان به این نکته اشاره کرد که در آبراهه‌هایی با محدوده دبی زیاد، در دبی‌های کم وجود مانع‌ها باعث افزایش عمق جریان شده و می‌توان دبی را با دقت مناسبی برداشت کرد. همچنین در دبی‌های بالا از کل مقطع فلوم بدون هیچ انسداد اضافی استفاده می‌شود؛ در نتیجه پس‌زدگی غیر ضروری رخ نمی‌دهد.

۳-۲- استخراج رابطه تجربی

در این قسمت بر مبنای رابطه بی بعد شماره (۱۲) و همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، یک رابطه تجربی بر مبنای رگرسیون چند متغیره غیر خطی، ارائه شده است. این رابطه با استفاده از نرم افزار SPSS 16 استخراج شده است. برای این کار داده‌های آزمایشگاهی به دو دسته داده‌های آموزش (۷۵ درصد داده‌ها) و داده‌های واسنجی (۲۵ درصد داده‌ها) تقسیم شدند. داده‌های آموزش برای استخراج رابطه و داده‌های واسنجی برای ارزیابی دقت رابطه به دست آمده، استفاده شده است.

رابطه (۱۳) رابطه استخراج شده برای محاسبه شاخص دبی در شرایط جریان آزاد برای فلوم با مانع‌های استوانه‌ای مرکزی مستغرق، است.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^3}} = 1.73 \frac{h}{B_c}^{2.15} - 0.03 r^{-1.04} + 0.036 \frac{D^{0.88}}{P} + 0.017 \quad (13)$$

در شکل ۶ مقدارهای آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده از رابطه (۱۳) برای هر دو دسته داده‌های آموزش و واسنجی با هم مقایسه شده است. برابر شکل، رابطه تجربی ارائه شده توانسته است با دقت مناسبی مقدارهای آزمایشگاهی را برآورد کند. مقدار شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و MAE این رابطه برای داده‌های آموزش ۰/۹۸، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۶۱ و برای داده‌های واسنجی ۰/۹۸، ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۰۷۳ می‌باشد. در شکل ۷ خطای نسبی داده‌های آموزش و واسنجی ارائه شده است. برابر شکل برای ۸۰ درصد داده‌های آموزش و داده‌های واسنجی مقدار خطا کمتر از ۱۴ درصد است. میزان خطای نسبی داده‌های واسنجی ۱۱ درصد است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد هیدرولیکی فلوم با مانع‌های استوانه‌ای، به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. برای این منظور متغیرهای مختلفی از جمله ارتفاع و قطر مانع‌ها تحت دبی‌های مختلف در شرایط جریان آزاد بررسی شد. برابر نتایج به دست آمده، تغییر پذیری‌های دبی-اشل این نوع فلوم‌ها به صورت لگاریتمی می‌باشد. با افزایش قطر و کاهش ارتفاع مانع‌های استوانه‌ای، فلوم‌ها در دبی کمتری مستغرق شدند. مقایسه متغیرهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع مانع‌ها و در نتیجه افزایش میزان انسداد مقطع جریان، مقدار شاخص دبی برای یک عمق بالادست خاص کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر مانع‌ها نیز انسداد زیاد شده و شاخص دبی به ازای یک عمق بالادست معین، کاهش می‌یابد. در نهایت با استفاده از تحلیل ابعادی و رگرسیون چند متغیره غیر خطی، یک رابطه تجربی برای محاسبه شاخص دبی در این سازه فلوم استخراج شد که بر مبنای شاخص‌های آماری دارای دقت مناسبی است. مقدار R^2 این رابطه برای داده‌های آموزش و واسنجی ۰/۹۸ است. میزان خطای نسبی این رابطه بر مبنای داده‌های واسنجی حدود ۱۱ درصد است. توصیه می‌شود با توجه به توان بالقوه این سازه برای ایجاد انسداد در آبراهه‌های با جریان آواری، در پژوهش‌های آینده اثر جریان‌های آواری بر عملکرد هیدرولیکی این سازه بررسی و ارزیابی شود. همچنین یکی از محدودیت‌های این پژوهش استفاده از شمار مانع‌های ثابت است؛ بنابراین در پژوهش‌های آتی می‌توان اثر شمار مانع‌ها را بررسی کرد.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	عرض فلوم (m)
B_c	عرض تنگ شدگی (m)
D	قطر استوانه‌ها (m)
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h	عمق آب بالادست (m)
P	ارتفاع استوانه‌ها (m)
Q	دبی (ls^{-1})

نشانه‌های یونانی:

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها، رسم نمودارها، نگارش پیش نویس مقاله.

نویسنده دوم: ویرایش و بازنگری مقاله، روش شناسی، تحلیل داده‌ها.

نویسنده سوم: ویرایش و بازنگری مقاله، نظارت بر روند انجام آزمایش‌ها، تامین امکانات آزمایشگاهی.

نویسنده چهارم: ویرایش و بازنگری مقاله، تحلیل آماری.

نویسنده پنجم: ویرایش و بازنگری مقاله، تحلیل آماری.

۶- سپاسگزاری

بدینوسیله از مسئولان محترم دانشگاه شهید چمران اهواز برای فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی این پژوهش، قدردانی می‌شود.

۷- منبع‌ها

Aminpour, Y., Vatankhah, A.R. & Farhoudi, J.

- engineering*, 114(3), 520-534.
- Kapoor, A., Ghare, A.D. & Nair, S. (2021). Modeling of Conical Central Baffle Flumes Using CFD. In: International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering, 127-137, Singapore: Springer Nature Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_11.
- Nair, P.S., Ghare, A.D. & Kapoor, A. (2024). An approach to hydraulic design of Conical Central Baffle Flumes. *Flow Measurement and Instrumentation*, 97, 102573, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102573>.
- Parsaie, A., Dehdar-Behbahani, S., Devi, G.S.L., Haghiabi, A. & Afaridegan, E. (2023). The discharge coefficient of SMBF flumes under free and submerged conditions. *Applied Water Science*, 13(12), 236, <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02048-4>.
- Parshall, R.L. (1926). The improved Venturi flume. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 89(1), 841-851.
- Samani, Z., Jorat, S. & Yousaf, M. (1991). Hydraulic characteristics of circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 558-566.
- Samani, Z. & Magallanez, H. (1993). Measuring water in trapezoidal canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 119(1), 181-186.
- Samani, Z. & Magallanez, H. (2000). Simple flume for flow measurement in open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2), 127-129.
- Shen, G., Chen, Y., Sun, L., Parsaie, A. & Wan, W. (2025). The interpretable model for the discharge coefficient of a contraction flume under free and submerged flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 105, 102918, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2025.102918>.
- Vatankhah, A.R. & Mohammadi, M. (2020). Stage-discharge equation for simple flumes with semi-cylinder contractions. *SN Applied Sciences*, 2(3), 510, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2317-z>.
- (2020). Experimental modeling of flumes with two semi-cylinder contractions (free and submerged flows). *Flow Measurement and Instrumentation*, 76, 101844, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101844>.
- Baiamonte, G. & Ferro, V. (2007). Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 71-78, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:1\(71\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(71)).
- Bijankhan, M., Teymourkhani, A. & Ferro, V. (2022). Portable central baffle flume. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(2), <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1339>.
- Blaisdell, F.W. (1994). Results of Parshall flume tests. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 120(2), 278-291.
- Carollo, F.G. & Pampalone, V. (2021). Testing the stage-discharge relationship in sloping SMBF flumes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(5), 04021010, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001558).
- Carollo, F.G., Di Stefano, C., Ferro, V. & Pampalone, V. (2016). New stage-discharge equation for the SMBF flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5), 04016005, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.00010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.00010).
- Di Stefano, C., Di Piazza, G.V. & Ferro, V. (2008). Field testing of a simple flume (SMBF) for flow measurement in open channels. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(2), 235-240.
- Ferro, V. (2002). Discussion of "Simple flume for flow measurement in open channel, by Zohrab Samani and Henry Magallanez. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(2), 127-129.
- Hager, W.H. (1985). Modified venturi channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 111(1), 19-35.
- Hager, W.H. (1986). Modified, trapezoidal Venturi channel. *Journal of Irrigation and drainage engineering*, 112(3), 225-241.
- Hager, W.H. (1988). Mobile flume for circular channel. *Journal of Irrigation and drainage*



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.