

Experimental Modeling of Submergence Threshold and Submerged Flow in Porous Flume with Trapezoidal and Triangular Throats

Hadiseh Sedighi Harsini¹, Ali Arman^{2*}, Mostafa Rahmanshahi³

1-PhD student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

2-Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

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

* a.arman@razi.ac.ir

Received: 9 August 2025

Revised: 15 October 2025

Accepted: 18 October 2025

Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Measuring, recording, and monitoring water flow in the waterways and irrigation and drainage networks are essential for demand-driven, volumetric water delivery. Flow measurement in open channels is more complex than in closed channels because flow uncertainty and degrees of freedom are greater. At the same time, these irrigation systems require low-cost yet accurate measuring instruments or structures. Due to their economic efficiency and relatively low uncertainty, flow measurement structures based on the discharge-head relationships, such as weirs and flumes, are used. Among them, measuring flumes are fundamental hydraulic structures in irrigation networks and, when properly designed and constructed, can achieve high measurement accuracy.

In this study, the submergence threshold and discharge under submerged conditions were tested for a porous cut-throat flume with triangular and trapezoidal throats. The main goal of this study is to derive an empirical relationship for estimating the submergence threshold and through-flow discharge under submerged conditions in a gabion-based cut-throat flume.

Methodology: The experiments were conducted in the hydraulic laboratory of the Water Engineering Department of the Faculty of Agriculture, Razi University. For this purpose, a laboratory channel with a rectangular cross-section with 37 cm width, 60 cm height, and 6 m length was used. To construct the gabion structures used in this study, 6 mm diameter rebar was used, and the structures were filled with aggregates with different porosity percentages and the aggregates were divided into three different porosity percentages. The flumes were constructed with three different flume heights, four different throat openings, and three different porosity percentages.

In total, 36 measurement structures were tested, and 330 experiments under submergence threshold conditions as well as 880 experiments under submerged flow conditions were conducted to calibrate the mathematical relationships and examine the effects of governing variables on flow behavior. To derive appropriate mathematical relationships, dimensionless groups were first obtained using Buckingham's π -theorem. Subsequently, nonlinear regression and Gene Expression Programming (GEP) methods were applied to develop empirical relationships with satisfactory accuracy for estimating the

submergence threshold and submerged flow discharge of the flume.

Results and Discussion: The results indicate that, for a constant discharge, when the throat opening and material porosity are constant, an increase in flume height leads to an increase in the submergence threshold depth by 5–28%. As the flume height and materials porosity are considered constant, increasing the throat opening at a constant discharge causes the structure to become submerged more rapidly, resulting in a reduction in the submergence threshold depth by 9–26%. A flume with greater height and lower porosity and opening percentage has a higher submergence threshold, and as a result, is more resistant to submergence and submerges more slowly.

Conversely, increasing the throat opening at a constant water depth leads to an increase in dimensionless discharge by 9–66%. This is observed with an increase in the porosity percentage and a decrease in the height of the structure. In this condition, a larger flow rate passes through the flume and a larger flow rate range can be measured. Finally, based on the dimensionless groups derived from dimensional analysis, empirical relationships were developed to estimate both the submergence threshold depth and the discharge under submerged conditions. These relationships were obtained using SPSS 26 and GeneXproTools 5.0 and were formulated separately for flumes with triangular and trapezoidal throats to enhance measurement accuracy.

Conclusion: This study showed that the use of a porous flume effectively extends the range of flow measurement under submerged conditions, thereby confirming the use of this type of flume in submerged flow conditions. Moreover, increasing the flume height was shown to delay submergence, improving measurement reliability. However, it should be noted that the application of gabion structures in alluvial waterways with high sediment concentrations may lead to progressive clogging of flume pores, resulting in temporal changes in structural porosity and, consequently, measurement performance.

Keywords: Gabion, measurement flume, submerged flow, submergence threshold, GEP.

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: Data Analyses, Laboratory Data, Initial writing of the article.

Second Author: Conceptualization, results review, correction of the article.

Third Author: Conceptualization, results review, correction of the article.

Acknowledgment: The authors of the article hereby express their gratitude to the Water Engineering Department of Razi University.

مدلسازی آزمایشگاهی فلوم متخلخل با گلوگاه دوزنقه‌ای و مثلثی در شرایط جریان مستغرق

حدیثه صدیقی هرسینی^۱، علی آرمان^{۲*}، مصطفی رحمانشاهی^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۳- پژوهشگر پسا دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه پلی تکنیک کنگ، هنگ کنگ.

* a.arman@razi.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

چکیده: فلوم‌های بدون گلو به دلیل ساختار ساده و اجرای راحت، در کنار دقت بالایی که دارند، ابزاری کارآمد جهت اندازه‌گیری دبی در کانال‌های روباز محسوب می‌شوند. از طرفی سازه‌های گابیونی به دلیل سازگاری با محیط زیست و کارایی بهتر آنها نسبت به سازه‌های صلب مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. در این پژوهش به مدلسازی آزمایشگاهی فلوم متخلخل با گلوگاه دوزنقه‌ای و مثلثی در شرایط جریان آستانه استغراق و مستغرق، پرداخته شده است. بدین منظور ۳۶ فلوم ساخته شد که دارای ارتفاع، بازشدگی گلوگاه و درصد تخلخل متفاوتی بودند. در مجموع ۳۳۰ آزمایش در شرایط جریان آستانه استغراق و ۸۸۰ آزمایش در شرایط جریان مستغرق بر روی این فلوم‌ها انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که برای یک دبی ثابت در صورتی که بازشدگی و تخلخل مصالح ثابت باشد، با افزایش ارتفاع فلوم، عمق آستانه استغراق به میزان ۵ تا ۲۸ درصد افزایش پیدا می‌کند که موجب مقاومت فلوم در برابر استغراق می‌شود. همچنین، فلوم متخلخل با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر که گلوگاه مثلثی دارد و مصالحی با درصد تخلخل ۳۷ درصد پر شده است، مقاوم‌ترین فلوم در برابر استغراق است. در انتها، با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیرخطی به عنوان یک مدل جعبه سفید و نیز مدل GEP به عنوان یک مدل جعبه خاکستری روابطی تجربی بر اساس تحلیل ابعادی انجام شده، استخراج شد و با استفاده از معیارهای آماری مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلیدواژگان: گابیون، فلوم اندازه‌گیری، جریان مستغرق، آستانه استغراق، GEP.

Rahmanshahi et al., 2023; Rahmanshahi & Shafai (Bejestan, 2020). با توجه به اقتصادی بودن و عدم قطعیت کم سازه‌های اندازه‌گیری جریان مبتنی بر رابطه دبی-اشل مانند سرریزها و فلوم، تاکنون بررسی و ارزیابی‌های مختلفی بر روی این سازه‌ها انجام شده است. در این میان فلوم‌های اندازه‌گیری یکی از سازه‌های اساسی در شبکه‌های آبیاری هستند که در صورتی که به طور درست ساخته شوند دارای دقت بالایی هستند. از برتری‌های فلوم‌ها می‌توان به پایین

۱- مقدمه

به منظور بهبود عملکرد شبکه‌های آبیاری از سازه‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری جریان مختلفی استفاده می‌شود. اندازه‌گیری جریان در آبراه‌های باز به دلیل عدم قطعیتی که در آنها وجود دارد، نسبت به سامانه‌های لوله تحت فشار، با چالش‌های بیشتری رو به رو است. از سوی دیگر این سامانه‌های آبیاری به ابزارها و یا سازه‌های اندازه‌گیری کم هزینه و دقیقی نیاز دارند (Azma et al., 2023;)

رابطه‌های دبی-اشل مختلفی با میانگین خطاهای زیر ۲٪ ارائه شد. برای به دست آوردن روابط دبی-اشل در این سازه‌ها از روش تجزیه و تحلیل بدون بعد جریان استفاده شده است، که این روش به بررسی و ارزیابی دبی عبوری از فلوم‌ها کمک می‌کند (Vatankhah, 2022).

سریزها و فلوم‌های اندازه‌گیری جریان به طور معمول از نوع سخت (صلب) بوده و از بتن ساخته می‌شوند. این درحالی است که ساخت این سازه‌ها از جنس توریسنگ (گابیون) از نظر اقتصادی به صرفه بوده و مصالح مورد استفاده در آن به راحتی در دسترس می‌باشد. ساختار توریسنگی به دلیل اینکه موجب عبور جریان از میان سازه می‌شود، اکسیژن حل شده در جریان را افزایش می‌دهد که موجب می‌شود سازه دوستار محیط زیست و طبیعت باشد. همچنین رسوب‌ها و مواد آلی می‌توانند از میان توریسنگ عبور کرده و موجب کاهش رسوب در پشت سازه شود (Shariq et al., 2020). مطالعات مختلفی بر روی سریزهای گابیونی انجام شده است که در طی آن انواع مختلف سریزها مانند سریزهای لبه پهن مستطیلی، مثلثی، هلالی و دوزنقه‌ای آزمایش شده و رابطه‌ی دبی-اشل در آن‌ها با توجه به هندسه و شرایط جریان به دست آمده است. همچنین نتایج پژوهش‌ها نشان دادند که عبور جریان از میان توریسنگ نه تنها موجب کاهش ضریب دبی سریز می‌شود بلکه افزایش افت انرژی را در طی سازه در پی دارد (Doustkam et al., 2024; Fathi-moghaddam et al., 2018; Mohamed, 2010; Mohammadzadeh-Habili et al., 2016; Rahmanshahi et al., 2024; Shariq et al., 2020; Vatankhah, 2022). در آبراه‌های با مهار پایین دست همیشه جریان آزاد نبوده جریان‌های عبوری به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: آزاد (مدولار^۱) و مستغرق (غیر مدولار^۲). یافتن آستانه استغراق، که نقطه انتقال جریان از حالت آزاد به مستغرق و جدا کننده‌ی این دو جریان است، ضروری می‌باشد. زیرا ویژگی‌های هیدرولیکی فلوم اندازه‌گیری و نیز استفاده از رابطه‌ی ریاضی درست برای برآورد دبی عبوری از آن، با توجه به نوع جریان عبوری، تغییر می‌کند. در نتیجه

بودن هزینه‌های ساخت، اندازه‌گیری بازه‌ی گسترده‌ای از دبی جریان، پایین بودن مسئله‌های تجمع رسوب‌ها و زباله‌ها و مقاومت در برابر انسداد آنها اشاره کرد، که این برتری‌ها موجب شده است مورد توجه بسیاری قرار گیرند (Boiten, 2002; Raskar et al., 2018).

بررسی‌ها و ارزیابی‌های چندی بر روی فلوم‌ها انجام شده است که موجب معرفی انواع مختلفی از این سازه شده است (Aminpour et al., 2020; Herb & Hernick, 2022; Khosronejad et al., 2021; Yarahmadi & Vatankhah, 2021). از انواع این فلوم‌ها می‌توان به فلوم‌های گولبلند و بدون گلو (Aali & Vatankhah, 2023; Ghasemi & Vatankhah, 2012; Vatankhah & Mahdavi, 2024)، فلوم‌های استوانه‌ای و دو نیمه استوانه (Samani & Magallanez, 2000; Vatankhah, 2021) و فلوم‌های مرکزی با شکل‌های هندسی مختلف (Bijankhan et al., 2022; Bijankhan & Ferro, 2019; Kapoor et al., 2019; Ferro, 2016) اشاره کرد. ساخت فلوم با ساختار چند ضلعی ساده‌تر و ارزانتر از حالت منحنی شکل آن است (Sun et al., 2021). در این میان فلوم گلوبریده که ساختاری چندضلعی دارد، مورد توجه قرار گرفت و برای نخستین بار توسط Ref پیشنهاد شد (Skogerboe & Hyatt, 1967). این نوع فلوم گلوبریده به طور معمول دارای دیواره‌های عمودی و مستقیم همگرا و واگرا می‌باشد. برابر مطالعه‌ی آزمایشگاهی که (Yarahmadi & Vatankhah, 2021) بر روی این نوع فلوم انجام دادند، رابطه دبی-اشل فقط تحت تاثیر شیب کف آبراهه است و شیب دیواره‌های فلوم در کانال افقی، تاثیری بر روی رابطه دبی-اشل ندارد. در انتها رابطه‌ی ریاضی برای برآورد دبی با استفاده از این فلوم ارائه شد. در این میان محققان نوعی از این فلوم گلوبریده را پیشنهاد دادند که دیواره‌های فلوم با شیب جانبی به دیواره‌ی آبراهه آزمایشگاهی رسیده و مقطع عبوری جریان دوزنقه‌ای شکل را تشکیل می‌دهند. (Aali & Vatankhah, 2023) بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی این نوع از فلوم گلوبریده در شرایط جریان آزاد و مستغرق انجام دادند. نتایج گویای آن بود که شیب دیواره‌ی پایین دست تاثیری بر دبی جریان ندارد. از سوی دیگر

1. Modular
2. Non-Modular

گلوبریده با ساختار گابیونی است. بدین منظور با گردآوری داده‌های آزمایشگاهی و نیز با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و رگرسیون چند متغیره غیر خطی، رابطه‌های مورد نظر برآورد شد. این رابطه‌ها برای حالتی که سازه دارای مقطع مثلثی و یا دوزنقه‌ای در گلوگاه است جداسازی شد. در این میان تغییرپذیری‌های متغیرهای هندسی و ساختاری فلوم بر روی آستانه‌ی استغراق بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های آبراهه آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی، انجام گرفت. بدین منظور از آبراهه آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۳۷ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و با طول ۶ متر استفاده شد. اندازه‌گیری دبی جریان در این پژوهش با استفاده از یک سریز لبه تیز مثلثی انجام گرفت. جهت برآورد رابطه‌های مورد نظر، نیاز به اندازه‌گیری عمق جریان عبوری از سازه‌ی مورد آزمایش و برآورد دبی عبوری از آبراهه آزمایشگاهی است. بدین منظور از یک عمق سنج مکانیکی برای اندازه‌گیری عمق آب در آبراهه آزمایشگاهی استفاده شد. در شکل ۱ تصویر عمق‌سنج و آبراهه آزمایشگاهی قابل مشاهده است.

شناختن آستانه استغراق به برآورد دقیق دبی عبوری از سازه‌ی اندازه‌گیری کمک می‌کند (Kazemi et al., 2024). از سوی دیگر هنگام عبور جریان مستغرق از یک سازه‌ی اندازه‌گیری، به دلیل مقاومتی که در برابر جریان ایجاد می‌شود، دبی عبوری کمتر از مقدار آزاد است در نتیجه رابطه‌های به دست آمده برای جریان آزاد قابل استفاده نبوده و نیاز به برآورد رابطه‌ی ریاضی برای برآورد دبی جریان در حالت مستغرق است (Aminpour et al., 2020). در بررسی و ارزیابی‌های که بر روی فلوم گلوبریده انجام شده همواره از جنس سخت برای ساخت فلوم استفاده شده است و تاکنون پژوهشی در زمینه‌ی فلوم گلوبریده با ساختار توریسنگ انجام نشده است. بر خلاف فلوم‌های سخت، استفاده از گابیون به دلیل ساختار متخلخلی که بدنه‌ی آنها دارد، باعث می‌شوند که مواد فیزیکی و شیمیایی مانند مواد معلق و آلی به پایین دست منتقل شدند و نشست در پشت فلوم به کمترین میزان خود برسد (Rahmanshahi et al., 2023). این مهم باعث می‌شود که به مرور زمان عمق بالادست فلوم در یک دبی ثابت، دستخوش تغییر نشده و دبی اندازه‌گیری شده مقدار درستی باشد. در این پژوهش بررسی آستانه استغراق و دبی در شرایط مستغرق در فلوم گلوبریده متخلخل با گلوگاه مثلثی و دوزنقه‌ای آزمایش شد. هدف اصلی در این پژوهش به دست آوردن رابطه‌ی تجربی برای یافتن آستانه استغراق و نیز دبی عبوری در شرایط مستغرق فلوم



Fig. 1 View of (a) the experimental channel and (b) the depth gauge used in this study.

شکل ۱ نمایش کلی از (a) آبراهه آزمایشگاهی و (b) عمق سنج مورد استفاده در این پژوهش.

در جدول ۲ مقادیرهای در نظر گرفته شده نشان داده شده است. در نهایت در این پژوهش از ۳۶ سازه اندازه‌گیری و ۳۳۰ آزمایش در شرایط آستانه استغراق و ۸۸۰ آزمایش در شرایط جریان مستغرق برای واسنجی کردن رابطه ریاضی و بررسی اثر متغیرها بر روی جریان، استفاده شد. شکل ۴ نمایی از طرح (پلان) و نیمرخ‌های این فلوم نشان داده شده است.

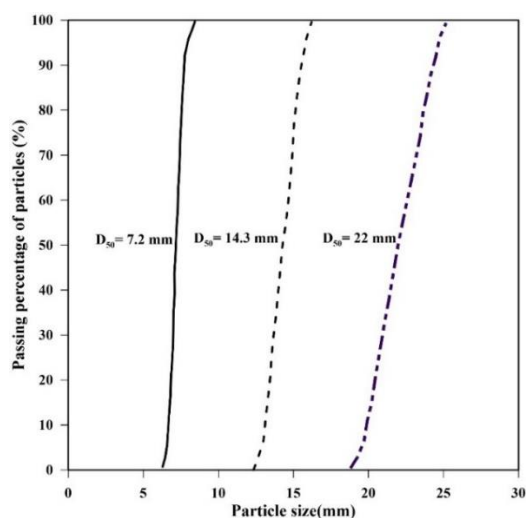


Fig. 3 The grading curve of the aggregates used in this research

شکل ۳ نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش.

۲-۴- مرحله‌های انجام آزمایش‌ها

برای تعیین شرایط جریان در حالت مستغرق در فلوم، استغراق با استفاده از بستن دریچه انتهایی قابل دسترس بود. برای تعیین آستانه استغراق، دریچه انتهایی را به تدریج بسته تا حالتی که عمق بالادست ۱ میلی متر افزایش یافت. آنگاه با بستن بیشتر دریچه انتهایی شرایط جریان مستغرق پدید آمد در نتیجه برای همان اندازه دبی که آزمایش در آستانه استغراق انجام شد، آزمایش‌هایی با شرایط جریان مستغرق برداشت شد. در حالت استغراق، چند تراز مختلف آزمایش شد. پس از پایان یافتن این سری از آزمایش‌ها، دبی جدید وارد آبراهه شده و آزمایش‌های با شرایط جریان در آستانه استغراق و مستغرق تکرار شدند. در شکل ۵ نمایی کلی از سازه مورد آزمایش در این پژوهش نشان داده شده است.

۲-۲- مراحل ساخت مدل آزمایشگاهی

برای ساخت سازه‌های توربینی مورد استفاده در این پژوهش، از میلگرد ترانس، ۶ میلی‌متری استفاده شده و نیز سازه‌ها به وسیله سنگدانه‌هایی با درصد تخلخل‌های مختلفی پر شدند. ال‌ک‌های مورد استفاده برای دانه‌بندی سنگدانه‌ها، دارای مشخصه‌هایی به اندازه‌ی ۱"، ۳/۴"، ۵/۸"، ۱/۲"، ۳/۸" و ال‌ک شماره‌ی ۴ بودند. با استفاده از انجام آزمایش تخلخل، سنگدانه‌ها به سه درصد تخلخل مختلف تقسیم‌بندی شدند. بدین صورت که آغاز یک استوانه مدرج از سنگدانه‌ها به طور کامل پر شد و به خوبی تکان داده شد. سپس به آن آب اضافه گردید تا جایی که فضای بین سنگدانه‌ها به طور کامل از آب پر شد و این حجم آب اندازه‌گیری شد. در نهایت نسبت حجم آب اضافه شده به حجم کل نشان دهنده‌ی درصد تخلخل ذرات می‌باشد. قطر میانگین ذرات دارای مقدارهایی برابر ۷/۲، ۱۴/۳ و ۲۲ میلی‌متر بودند. در نهایت سنگدانه‌ها به سه میزان تخلخل ۵۰، ۴۵ و ۳۷ درصد تقسیم‌بندی شدند. شکل ۲ نمونه‌ای از اندازه سنگدانه‌های مورد استفاده و شکل ۳ نمودار دانه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد.



Fig. 2 The aggregate sizes used in this study

شکل ۲ نمونه‌ای از اندازه سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش.

۲-۳- متغیرهای مدل آزمایشگاهی

تغییرپذیری‌های ابعاد فلوم اندازه‌گیری جریان در کنار تغییر تخلخل سنگدانه‌های موجود در مدل، بر روی میزان جریان عبوری و ضریب دبی تاثیرگذاری‌های مستقیمی دارد. در نتیجه برای برآورد رابطه ریاضی مناسب بین متغیرهای این سازه از ۳ ارتفاع سازه (p)، ۴ بازشدگی فلوم در گلوگاه (w) که موجب تغییرپذیری‌های اندازه‌ی کل سازه می‌شوند و نیز ۳ درصد تخلخل (n) استفاده شد که

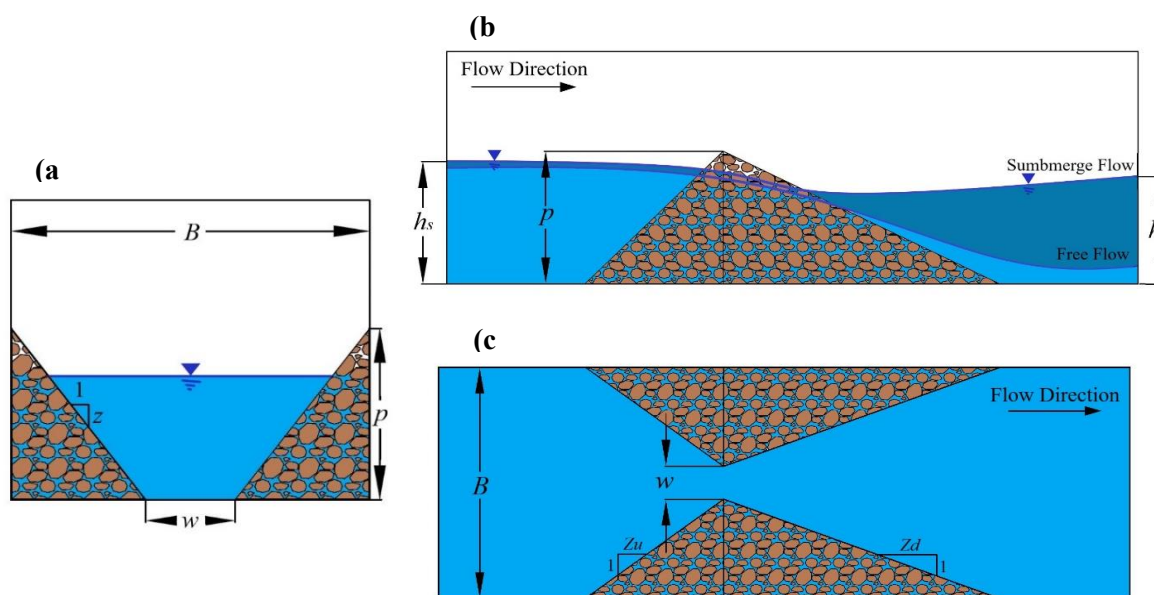


Fig. 4 Schematic (a) cross-section, (b) profile, and (c) plan flume in this study.

شکل ۴ نمای کلی از (a) مقطع عرضی، (b) پروفیل و (c) نیمرخ فلوم استفاده شده در این پژوهش.

جدول ۱ مقادیر متغیرهای استفاده شده در این پژوهش.

Table 1 Values of variables used in this study

Flume No.	w (cm)	p (cm)	D ₅₀ (mm)	n (%)
1-9	5			
10-18	8	10, 15, 20	7.2, 14.3, 22	37, 45, 50
19-27	11			
27-36	0			

الف) جریان آستانه استغراق:

برای جریان در حالت آستانه استغراق h_s ، g و μ به عنوان متغیرهای تکرار شونده در نظر گرفته شدند. در نتیجه حالت‌های بدون بعد زیر برای متغیرها به دست آمد:

$$(1)$$

$$f_2(h_s, h_t, B, g, \mu, p, \rho, w, n, z, D_{50}, S_0, z, z_u, z_d, \sigma) = 0$$

$$(2)$$

$$f_2\left(\frac{B}{h_s}, \frac{w}{h_s}, \frac{p}{h_s}, \frac{h_t}{h_s}, \frac{D_{50}}{h_s}, n, S_0, z, z_u, z_d, Re, We\right) = 0$$

با ترکیب گروه‌های به دست آمده و در نظر گرفتن موضوع که شیب بالادست و پایین دست فلوم اندازه‌گیری مورد آزمایش و شیب کانال آزمایشگاهی ثابت در نظر گرفته شده و نیز در طی این پژوهش عدد رینولدز همواره بزرگتر از ۵۰۰۰ بود و اثرگذاری‌های گرانشی (ویسکوزیته) کوچک

۲-۵- تجزیه و تحلیل ابعادی

در این پژوهش متغیرهایی که بر جریان موثر هستند: عرض آبراهه آزمایشگاهی (B)، میزان بازشدگی فلوم (w)، درصد تخلخل سنگدانه‌ها (n)، ارتفاع سازه (p)، شیب کف آبراهه (S_0)، شیب بالادست فلوم (z_u)، شیب بالادست فلوم (z_d)، شیب گلوگاه فلوم (z)، عمق جریان در بالادست فلوم (h_s)، عمق جریان در پایین دست فلوم (h_t)، دبی جریان (Q_s)، جرم واحد حجم سیال (ρ)، شتاب ثقل (g)، لزوجت دینامیکی (μ) و (σ) کشش سطحی می‌باشد. از طرفی برابر نتایج و بررسی‌های (یاراحمدی و وطن خواه، ۲۰۲۱) شیب بالادست و پایین دست فلوم ثابت و به ترتیب برابر ۱:۳ و ۱:۶ در نظر گرفته شد. همچنین شیب طولی آبراهه در این پژوهش ثابت و صفر می‌باشد.

الگوریتم تکاملی است که به طور خاص برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی و یادگیری ماشین طراحی شده است. این روش به طور خاص به تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی سامانه‌ها می‌پردازد و از مفاهیم ژنتیک و برنامه‌نویسی الهام گرفته شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار GeneXproTools 5.0 به تجزیه و تحلیل داده‌ها به روش GEP² پرداخته شد. روش GEP یک روش و فن هوش مصنوعی و الگوریتم تکاملی است که به طور خاص برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی و یادگیری ماشین طراحی شده است. این روش به طور خاص به تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی سامانه‌ها می‌پردازد و از مفاهیم ژنتیک و برنامه‌نویسی الهام گرفته شده است (Azamathulla & Ghani, 2010). در آغاز به صورت تصادفی ۷۵ درصد داده‌ها برای Train و ۲۵ درصد برای Test با استفاده از یک کد در نرم افزار MATLAB تفکیک شدند. آنگاه تنظیم‌های نرم افزار که شامل انتخاب مجموعه مناسب تابع‌ها، شمار ژن‌ها، شمار کروموزوم‌ها، شمار و دامنه ثابت‌های عددی و ... به نرم افزار معرفی شد. این نکته لازم به یادآوری است که در زمان تحلیل داده‌ها شمار ژن‌ها و نیز دیگر تنظیم‌های نرم افزار تغییر داده شد.

برای برآورد رابطه ریاضی بین گروه‌های بدون بعد نیاز است که درستی و میزان خطای رابطه‌ی به دست آمده سنجیده شود. در این تحقیق از معیارهای آماری زیر برای ارزیابی رابطه ارائه شده استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((x)_i^{Meas} - (x)_i^{Cal})^2}{\sum_{i=1}^n ((x)_{Ave}^{Meas} - (x)_i^{Cal})^2} \quad (7)$$

(8)

$$\%Relative\ Error = \frac{x_{Meas} - x_{Cal}}{x_{Meas}} \times 100$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((x)_i^{Meas} - (x)_i^{Cal})^2} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(x)_i^{Meas} - (x)_i^{Cal}| \quad (10)$$

که در این رابطه‌ها $(x)^{Mea}$ مقدار متغیر اندازه‌گیری شده و $(x)^{Cal}$ میزان برآورد شده‌ی متغیر بعد توسط رابطه‌ی ریاضی است.

است، و نیز نیروی الاستیک و نیروی کشش سطحی به علت اینکه عمق جریان بیش از ۵ سانتی‌متر است، صرف‌نظر شده است. می‌توان نوشت:

$$\frac{h_t}{p} = f_2 \left(\frac{h_s}{B}, \frac{w}{B}, \frac{D_{50}}{p}, n, z \right) \quad (3)$$

(ب) جریان مستغرق:

هنگامی که جریان مستغرق باشد، با در نظر گرفتن فراسنجه‌های موثر و تجزیه و تحلیل ابعادی بر روی آنها به روش باکینگهام و در نظر گرفتن ρ, g, w به عنوان متغیرهای تکرار شونده پارامترهای بدون بعد صورت زیر به دست می‌آید.

(4)

$$f_1(Q_s, w, B, n, \rho, g, \mu, p, h_s, h_t, S_0, z, z_u, z_d, \sigma) = 0 \quad (5)$$

$$f_1 \left(\frac{Q_s}{\sqrt{g w^5}}, \frac{p}{w}, \frac{D_{50}}{w}, \frac{h_t}{w}, \frac{h_s}{w}, \frac{B}{w}, n, z, Re, We \right) = 0$$

با توجه با اینکه شیب بالادست و پایین دست فلوم اندازه‌گیری مورد آزمایش و شیب آبراهه آزمایشگاهی ثابت در نظر گرفته شده و نیز در طی این پژوهش عدد رینولدز همواره بزرگتر از ۵۰۰۰ بود و اثرگذاری گرانی کوچک است. همچنین، از نیروی الاستیک و نیروی کشش سطحی به علت اینکه عمق جریان بیش از ۵ سانتی‌متر است، صرف‌نظر شده است. از ترکیب و ساده کردن گروه‌های بدون بعد می‌توان به رابطه‌ی ۶ دست پیدا کرد:

$$\frac{Q_s}{\sqrt{g h_s^5}} = f_1 \left(\frac{h_t}{h_s}, \frac{h_s}{B}, \frac{D_{50}}{p}, \frac{w}{B}, n, z \right) \quad (6)$$

به منظور برآورد رابطه‌ی ریاضی مناسب بین گروه‌های بدون بعد، از روش رگرسیون‌گیری غیر خطی^۱ استفاده شد. این روش که روشی فراسنجه‌ای برای مدلسازی روابط غیر خطی بین یک متغیر پاسخ (وابسته) و یک یا چند متغیر پیشین (مستقل) است. جهت اجرای این روش از دو نرم افزار IBM SPSS Statistics 26 برای برآورد مستقیم رابطه‌ی ریاضی و نیز GeneXproTools 5.0 برای برآورد با روش GEP استفاده شد. روش GEP یک روش و فن هوش مصنوعی و

1. Nonlinear Regression
2. Gene Expression Programming

۳- نتایج و بحث

در این بخش در آغاز به بررسی جریان در حالت آستانه استغراق پرداخته می‌شود و آنگاه فلوم در شرایط جریان مستغرق بررسی و ارزیابی شود. در شکل ۵ نمایی از جریان‌های عبوری از فلوم با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و درصد تخلخل ۳۷ درصد در حلت جریان آزاد و نیز با درصد استغراق‌های مختلف به ازای دبی ثابت نشان داده شده است.

۳-۱- جریان آستانه استغراق

برای بررسی میزان تاثیر متغیرهای مورد ارزیابی در این پژوهش بر روی آستانه استغراق فلوم، برای همه‌ی سازه‌های ساخته شده در محدوده دبی‌های ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۲۵ مترمکعب بر ثانیه عمق آستانه‌ی استغراق برداشت شد. نتایج گویای از آن است که برای یک دبی ثابت در صورتی که بازشدگی و تخلخل مصالح ثابت باشد، با افزایش ارتفاع فلوم، عمق آستانه استغراق به میزان ۵ تا ۲۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که ارتفاع و تخلخل مصالح فلوم ثابت در نظر گرفته شود، با افزایش بازشدگی گلوگاه در یک دبی ثابت، سازه سریع‌تر مستغرق می‌شود و عمق آستانه استغراق کمتر می‌شود، که این مقدار از ۹ تا ۲۶ درصد متغیر می‌باشد و تغییرپذیری‌ها برای سازه با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر مشهودتر است، که در شکل ۶ نشان داده شده است. از سوی دیگر با کاهش درصد تخلخل مصالح مورد استفاده، سازه با ارتفاع و بازشدگی ثابت و به ازای یک دبی مشخص، دیرتر مستغرق می‌شود و میزان افزایش آستانه استغراق بین ۸ تا ۲۰ درصد می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت سازه با ارتفاع بیشتر و نیز درصد تخلخل و بازشدگی کمتر دارای آستانه استغراق بیشتری است، در نتیجه در برابر استغراق مقاوم‌تر بوده و دیرتر مستغرق می‌شود. تغییرپذیری‌های $\frac{h_t}{p}$ در مقابل $\frac{h}{B}$ در ارتفاع‌های مختلف برای فلوم با گلوگاه مثلثی نیز در شکل ۷ به نشان داده شده است. با استفاده از نرم افزار SPSS 26 و با در نظر گرفتن $\frac{h_t}{p}$ به عنوان متغیر وابسته رگرسیون غیر خطی بر روی داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت.

در صورتی که فلوم دارای بازشدگی در گلوگاه باشد، از رابطه ۱۱ می‌توان برای برآورد آستانه استغراق در فلوم استفاده کرد:

$$\frac{h_t}{p} = 3.17 \frac{h_s^{1.08}}{B} \left(\frac{w^{0.3} D_{50}^{0.1}}{p} n^{-0.48} z^{1.04} \right) \quad (11)$$

این رابطه که برای $0.14 \leq \frac{w}{B} \leq 0.3$ و $0.65 \leq z \leq 1.85$ صدق می‌کند دارای R^2 برابر با ۰/۹۸ می‌باشد و بیشترین خطای نسبی برآورد آن $\pm 8\%$ محاسبه شد که در شکل ۸ مقادیر آن نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، زمانی که مقدارهای محاسباتی $\frac{h_t}{p}$ توسط رابطه ۱۱، در مقابل مقدارهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه رسم شود ۱۰۰ درصد بین دو خط $\pm 8\%$ قرار می‌گیرند. از سوی دیگر مقدارهای RMSE و MAE محاسبه شده برای این معادله به ترتیب برابر ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۰ برآورد خواهد شد.

در صورتی که سازه بدون بازشدگی در گلوگاه باشد رابطه ۱۲ را می‌توان برای برآورد مقدار $\frac{h_t}{p}$ را پیشنهاد داد که با استفاده نرم افزار SPSS 26 به دست آمده است. با توجه به اینکه $\frac{w}{B}$ مقداری برابر صفر دارد پس از معادله حذف می‌شود. این رابطه که برای $0.65 \leq z \leq 1.85$ صدق می‌کند، دارای R^2 برابر با ۰/۹۹ می‌باشد و خطای نسبی در آن $\pm 5\%$ می‌باشد که در شکل ۹ مقدارهای آن نمایش داده شده است. مقادیر RMSE و MAE محاسبه شده برای این معادله به ترتیب برابر ۰/۰۳۲ و ۰/۰۱۸ می‌باشد.

$$\frac{h_t}{p} = 0.63 \frac{h_s^{1.06}}{B} \left(\frac{D_{50}}{p} + n^{-0.5} + z^{2.24} \right) \quad (12)$$

۳-۲- جریان مستغرق

نیمرخ‌های سطح جریان در هر آزمایش و برای درصد استغراق‌های مختلف برداشت شد. در شکل ۱۰ نیمرخ‌های جریان برای سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و درصد تخلخل ۵۰ درصد به ازای یک دبی ثابت نمایش داده شده است.

از شاخص‌های متفاوتی برای معرفی و بررسی رفتار دبی در فلوم‌های بدون گلو می‌توان استفاده کرد که در این پژوهش از شاخص $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^3}}$ برای فلوم بدون گلو در مقابل $\frac{h_s}{B}$ استفاده شد. بدین منظور به ازای بازشدگی‌های مختلف

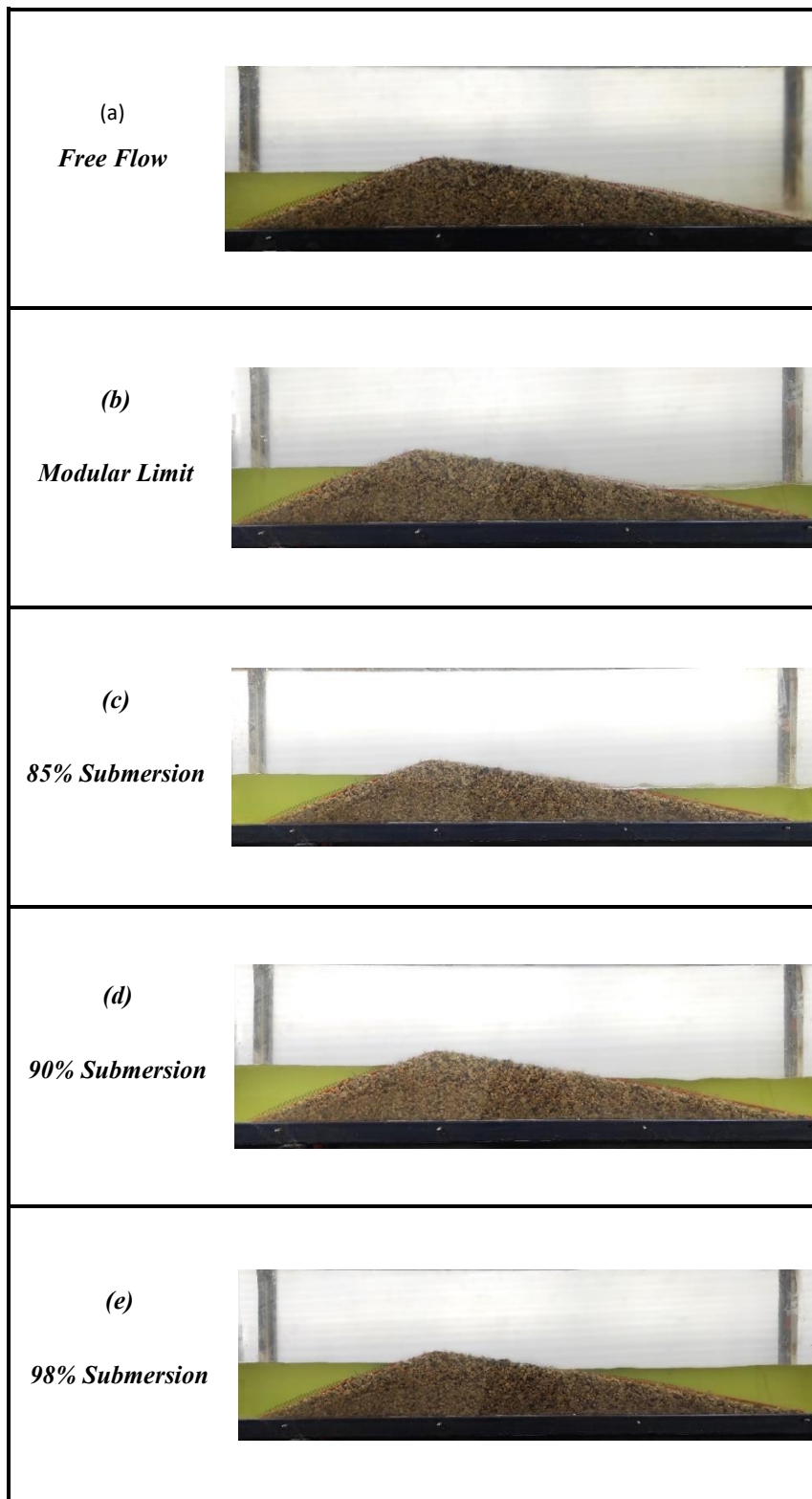


Fig. 5 Views of the flow surface profile and the tested flume in (a) free flow mode and (b-e) different submergence percentages.

شکل ۵ نماهایی کلی از نیمرخ سطح جریان و فلوم مورد آزمایش در (a) حالت جریان آزاد و (b-e) درصد استغراق‌های مختلف.

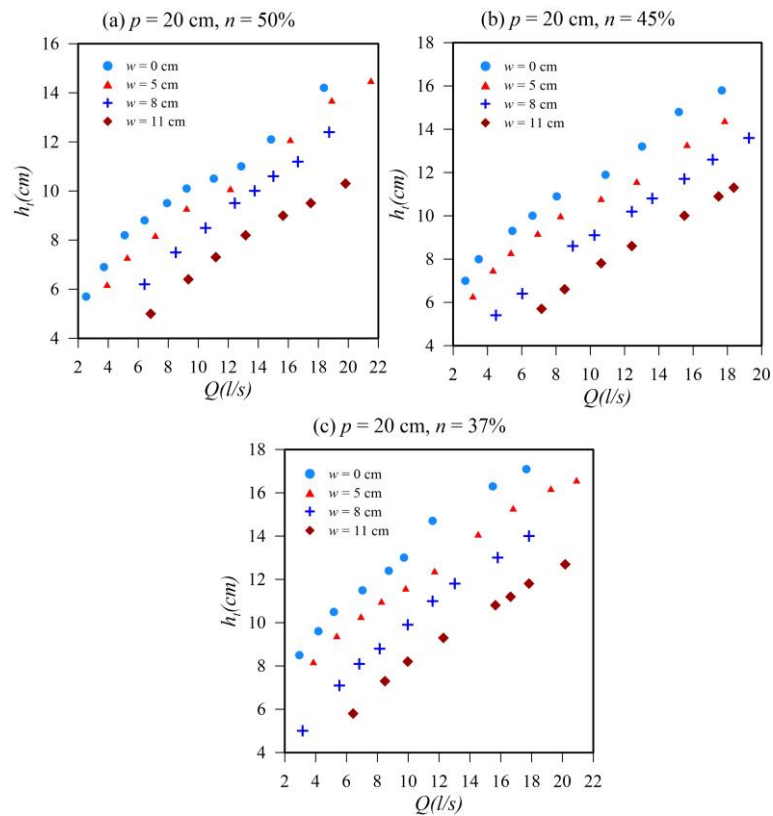


Fig. 6 Variations of the submergence threshold depth versus flow rate at different openings for a structure with a height of 20 cm and (a) $n=50\%$, (b) $n=45\%$ and (c) $n=50\%$.

شکل ۶ تغییرپذیری‌های عمق آستانه استغراق در مقابل دبی جریان در بازشدگی‌های مختلف برای سازه با ارتفاع 20cm و $n=50\%$ (a) و $n=45\%$ (b) و $n=50\%$ (c).

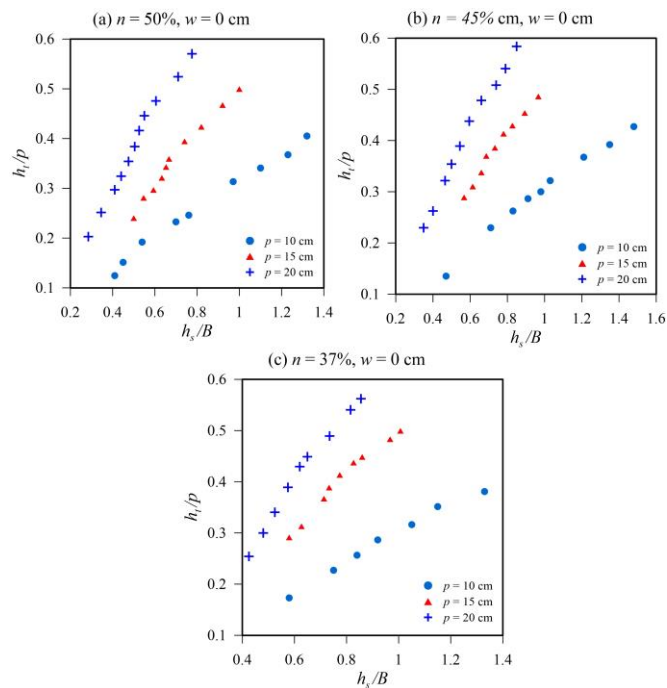


Fig. 7 Variations of $\frac{h_t}{p}$ versus $\frac{h_s}{B}$ at different heights for flume with triangular throat and (a) $n=50\%$, (b) $n=45\%$ and (c) $n=50\%$.

شکل ۷ تغییرپذیری‌های $\frac{h_t}{p}$ در مقابل $\frac{h_s}{B}$ در ارتفاع‌های مختلف برای فلوم با گلوگاه مثلثی و $n=50\%$ (a) و $n=45\%$ (b) و $n=50\%$ (c).

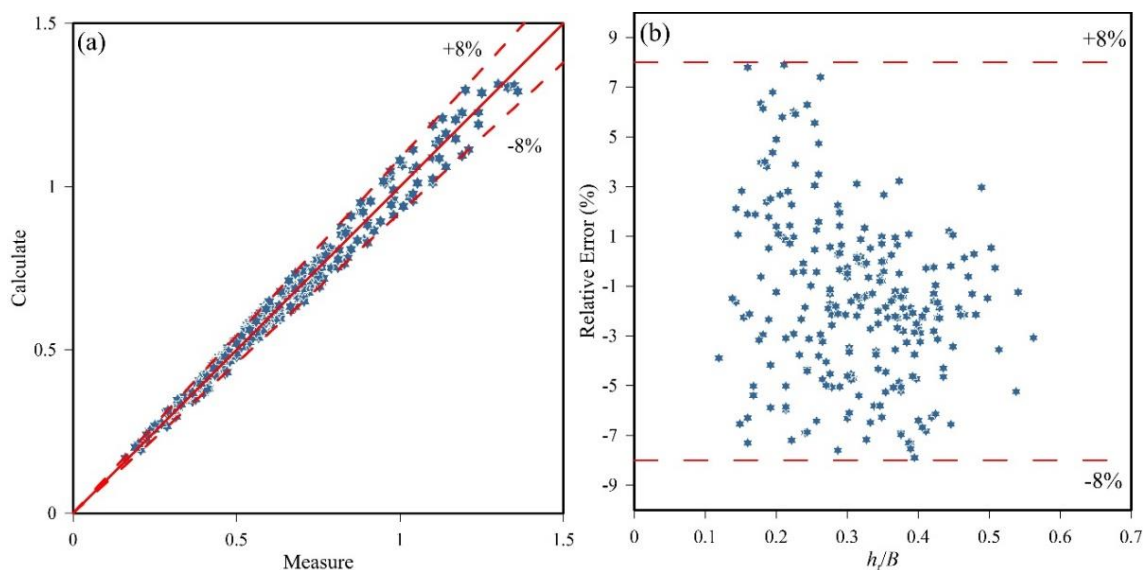


Fig. 8 (a) Calculated values of $\frac{h_t}{P}$ versus measured values (b) Relative error rate estimated by Equation 11.

شکل ۸ (a) مقادیر محاسبه شده $\frac{h_t}{P}$ در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (b) میزان خطای نسبی برآورد شده توسط رابطه ۱۱.

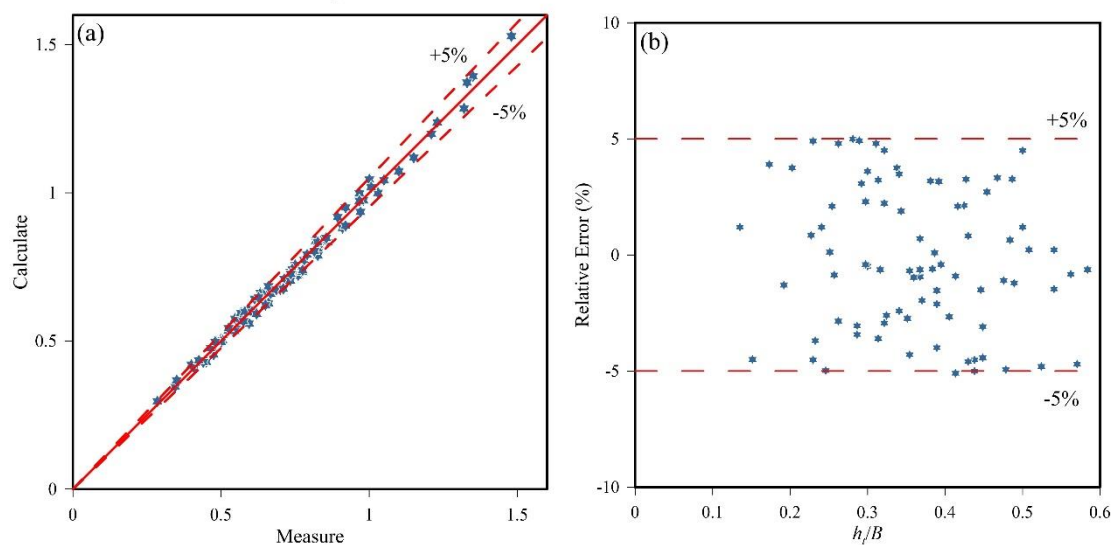


Fig. 9 (a) Calculated values of $\frac{h_t}{P}$ versus measured values (b) Relative error rate estimated by Equation 12.

شکل ۹ (a) مقادیر محاسبه شده $\frac{h_t}{P}$ در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (b) میزان خطای نسبی برآورد شده توسط رابطه ۱۲.

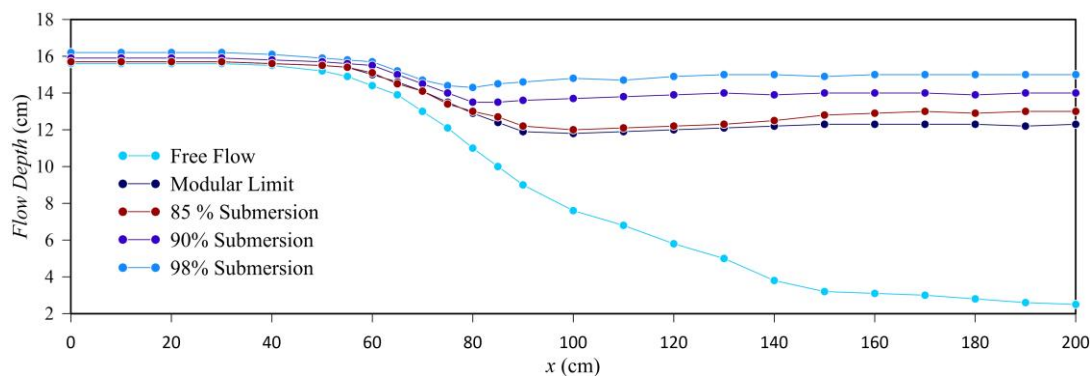


Fig 10. Current level profiles for different submersion percentages.

شکل ۱۰ نیمرخ‌های سطح جریان برای درصد استغراق‌های مختلف.

بازشدگی از مقدار صفر تا ۱۱ سانتی‌متر به ازای $\frac{h_s}{B}$ ثابت، مقدار $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ بین ۹ تا ۶۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. این رخداد با افزایش درصد تخلخل و نیز کاهش ارتفاع سازه مشاهده می‌شود در این شرایط دبی بزرگتری از فلوم عبور می‌کند و می‌توان محدوده دبی بیشتری را اندازه‌گیری کرد.

گلوگاه فلوم و در یک درصد استغراق ثابت (۰.۹۸)، شاخص $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ در مقابل $\frac{h_s}{B}$ برای ارتفاع‌ها و درصد تخلخل‌های ثابت ترسیم شد، که در شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های این گروه برای فلوم با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. نتایج گویای آن است که برای این ارتفاع از فلوم، با افزایش میزان

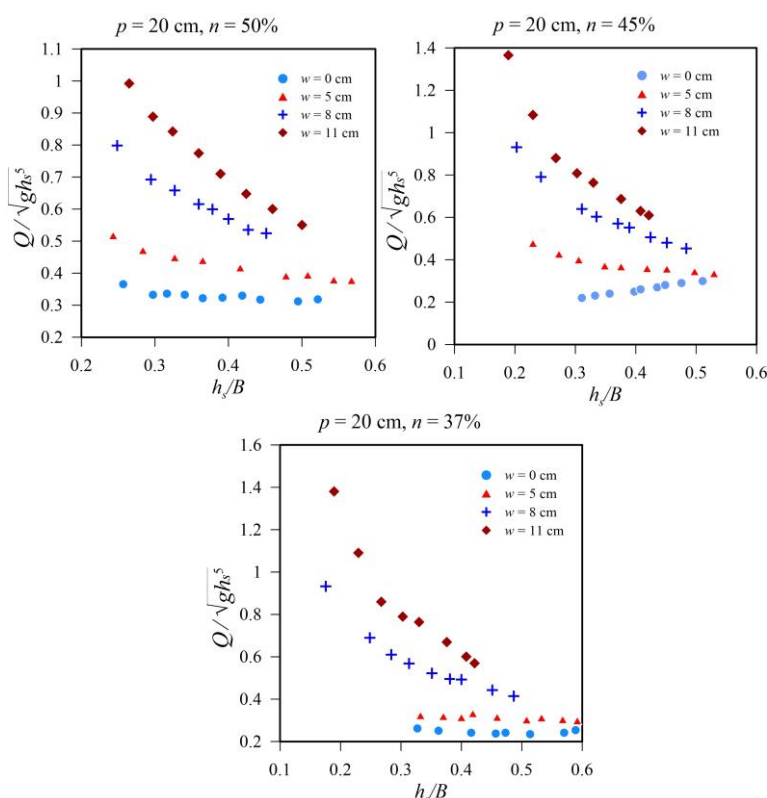


Fig. 11 Variations of $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ versus $\frac{h_s}{B}$ at different openings for a structure with a height of 20cm and (a)n=50%, (b) n=45% and (c)n=50%

شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ در مقابل $\frac{h_s}{B}$ در بازشدگی‌های مختلف برای سازه با ارتفاع 20cm و (a)n=50% (b)n=45% (c)n=50% و

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}} = \left[1 - \left[\left(\frac{1}{3.36} - \frac{D_{50}}{p} + n \right) \frac{h_s}{B} \right] \right] n + [1 - nz - 3.36n] \left[n - \frac{D_{50}}{p} (1 - z) \right] \quad (13)$$

که در آن $\frac{h_t}{B}$ از ضرب دو گروه بدون بعد $\frac{h_s}{B}$ و $\frac{h_t}{h_s}$ به دست آمده است. این رابطه که برای $0.65 \leq z \leq 1.85$ صدق می‌کند دارای R^2 برابر ۰.۹۵ است و بیشترین خطای نسبی در آن به $\pm 10\%$ می‌رسد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقادیرهای RMSE و MAE محاسبه شده برای این معادله به ترتیب برابر ۰/۰۴۵ و ۰/۰۳۷ است. همچنین بیشترین خطای نسبی دبی برآورد شده با رابطه‌ی ۱۳ برابر $\pm 9\%$ می‌باشد.

برای برآورد رابطه‌ی ریاضی بین گروه‌های بدون بعد در حالت استغراق سازه، در آغاز سعی شد از نرم افزار SPSS 26 استفاده شود. اما با سعی و خطای فراوان نتایج مطلوبی به دست نیامد، بنابراین از نرم افزار GenExproTools 5.0 استفاده شد.

در این قسمت نیز داده‌ها برای سازه با گلوگاه مثلثی (بدون بازشدگی گلوگاه) و ذورنقه‌ای (با بازشدگی‌های متفاوت در گلوگاه) جداسازی شدند. در حالت گلوگاه مثلثی رابطه زیر با استفاده از روش GEP برآورد شد:

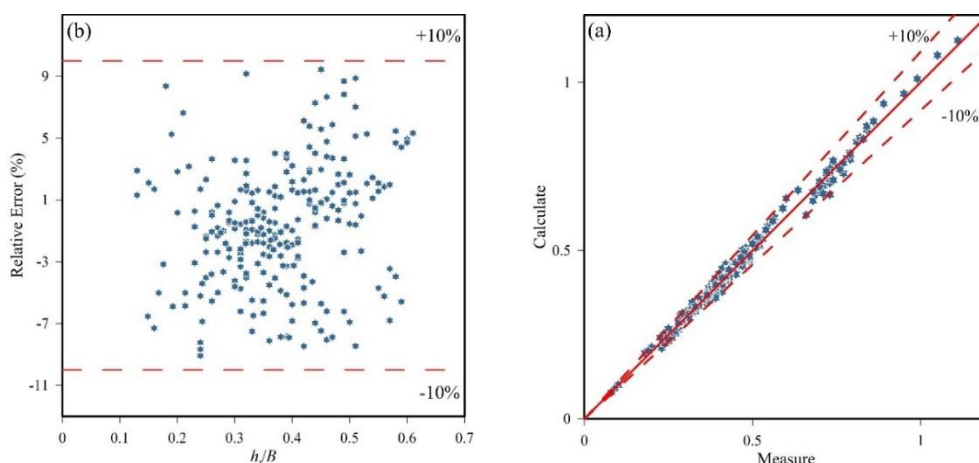


Fig. 12 (a) Relative error values calculated versus $\frac{h_s}{B}$ (b) $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ calculated by Equation 13 versus $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ measured in the laboratory.

شکل ۱۲ (a) مقدارهای خطای نسبی محاسبه شده در مقابل $\frac{h_s}{B}$ (b) $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ محاسبه شده به وسیله رابطه ۱۳ در مقابل $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه.

خطای نسبی در آن مقداری برابر با $\pm 16\%$ دارد و نیز مقادیر RMSE و MAE محاسبه شده برای این معادله به ترتیب برابر 0.053 و 0.041 است. در شکل ۱۳ محدوده خطاها نمایش داده شده است. از سوی دیگر بیشینه خطای نسبی دبی برآورد شده با رابطه‌ی ۱۴ برابر $\pm 11\%$ می‌باشد. در جدول ۲ تمامی رابطه‌های به دست آمده در این پژوهش برای برآورد آستانه استغراق و دبی مستغرق نشان داده شده است.

در صورتی که بازشدگی در گلوگاه در نظر گرفته شود از رابطه زیر می‌توان برای برآورد دبی در حالت استغراق سازه استفاده کرد:

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}} = \frac{w}{B} \left[\left(\frac{0.8 + \frac{h_t}{h_s}}{2} \right) (z - 1.9) + 1.24 \right] + \left[\frac{w}{B} + (z - 1.4) \left(\frac{h_s}{B} z \right) - \left(\frac{0.6 + \frac{h_s}{B}}{2} \right) \right] \quad (14)$$

این رابطه که برای $0.14 \leq \frac{w}{B} \leq 0.3$ و $0.65 \leq z \leq 1.85$ صدق می‌کند، دارای R^2 برابر 0.84 است. بیشترین

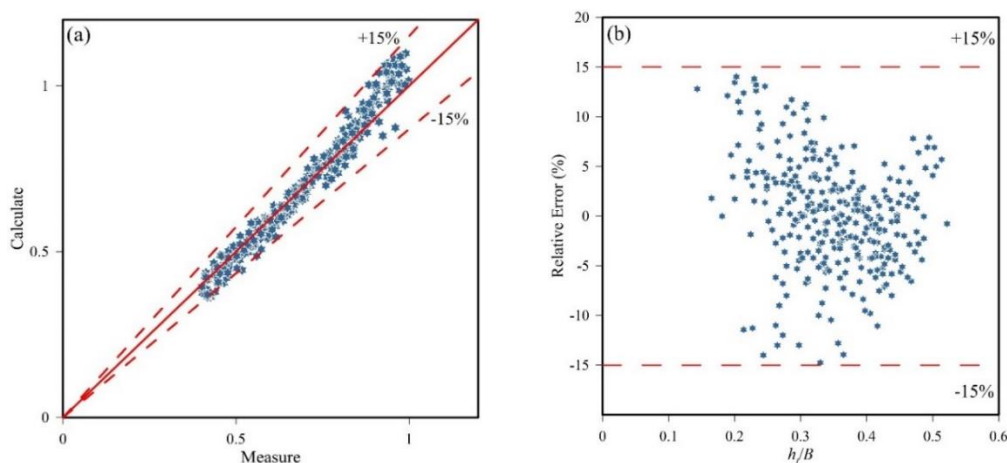


Fig. 13 (a) Relative error values calculated versus $\frac{h_s}{B}$ (b) $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ calculated by Equation 14 versus $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ measured in the laboratory.

شکل ۱۳ (a) مقدارهای خطای نسبی محاسبه شده در مقابل $\frac{h_s}{B}$ (b) $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ محاسبه شده به وسیله رابطه ۱۴ در مقابل $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه.

جدول ۲ روابط ریاضی به دست آمده برای برآورد آستانه استغراق و دبی مستغرق به وسیلهی فلوم متخلخل با گلوگاه مثلثی و دوزنقه‌ای.

Table 2 Mathematical relations obtained for estimating the submergence threshold and submerged discharge by a porous flume with triangular and trapezoidal throats

Equation	Throat type	Flow conditions
$\frac{h_t}{p} = 0.63 \frac{h_s^{1.06}}{B} \left(\frac{D_{50}}{p} + n^{-0.5} + z^{2.24} \right)$	Triangular	Submergence threshold
$\frac{h_t}{p} = 3.17 \frac{h_s^{1.08}}{B} \left(\frac{w^{0.3} D_{50}^{0.1}}{p} n^{-0.48} z^{1.04} \right)$	Trapezoidal	Submergence threshold
$\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}} = \left[1 - \left[\left(\frac{1}{3.36} - \frac{D_{50}}{p} + n \right) \frac{h_t}{B} \right] \right] n + [1 - nz - 3.36n] \left[n - \frac{D_{50}}{p} (1 - z) \right]$	Triangular	Submerged
$\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}} = \frac{w}{B} \left[\left(\frac{0.8 + \frac{h_t}{h_s}}{2} \right) (z - 1.9) + 1.24 \right] + \left[\frac{w}{B} + (z - 1.4) \left(\frac{h_s}{B} z \right) - \left(\frac{0.6 + \frac{h_s}{B}}{2} \right) \right]$	Trapezoidal	Submerged

۴- نتیجه‌گیری

بزرگتر دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهد. در فلوم با گلوگاه مثلثی با افزایش درصد تخلخل مصالح، مقدار $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ در یک ثابت بین ۹ تا ۱۴ درصد افزایش پیدا می‌کند. برای ارتفاع‌های مختلف فلوم، اما در عرض گلوگاه و درصد تخلخل ثابت، با افزایش ارتفاع، مقدار $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ به ازای یک $\frac{h_s}{B}$ ثابت، کاهش پیدا می‌کند که این کاهش $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ مقداری بین ۱۶ تا ۴۱ درصد را به خود می‌گیرد. با افزایش عرض گلوگاه، $\frac{Q_s}{\sqrt{gh_s^5}}$ در مقابل $\frac{h_s}{B}$ برای ارتفاع‌ها و درصد تخلخل‌های ثابت، افزایش پیدا خواهد کرد که این افزایش مقداری بین ۹ تا ۶۶ درصد را به خود می‌گیرد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت فلوم متخلخل با گلوگاه مثلثی و مصالحی با درصد تخلخل ۳۷ درصد و نیز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر مقاوم‌ترین فلوم در برابر استغراق است. این درحالی است که فلوم با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و عرض گلوگاه ۱۱ سانتی‌متر که با مصالح با درصد تخلخل ۵۰ درصد پر شده است، بیشترین دبی را از خود عبور می‌دهد.

در انتها با در نظر گرفتن گروه‌های بدون بعد به دست آمده به وسیله تجزیه و تحلیل ابعادی، با استفاده از دو نرم افزار SPSS 26 و GeneXproTools 5.0 بین گروه‌های بدون بعد، به ترتیب رابطه‌های ریاضی ۱۱ و ۱۲ جهت برآورد عمق آستانه استغراق سازه و روابط ۱۳ و ۱۴ جهت برآورد دبی جریان در شرایط استغراق، به دست آمد. این رابطه‌ها به منظور بالا رفتن دقت اندازه‌گیری برای فلوم‌های با گلوگاه مثلثی و دوزنقه‌ای جداسازی شدند.

به منظور تایین تاثیرگذاری‌های هندسه‌ی فلوم متخلخل اندازه‌گیری با گلوگاه ترکیبی بر روی ویژگی‌های جریان در شرایط استغراق و نیز استخراج رابطه‌های ریاضی مناسب، برای برآورد دبی جریان مستغرق و عمق آستانه استغراق، پژوهشی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه رازی صورت گرفت. در این پژوهش از ۳۶ فلوم متخلخل که دارای ارتفاع، بازشدگی گلوگاه و درصد تخلخل متفاوتی بودند، استفاده شد. از محدودیت‌های فلوم معرفی شده می‌توان به این نکته اشاره کرد که تحقیق انجام شده تنها بر روی کانال مستطیلی بوده است و نمی‌توان نتایج را برای همه‌ی شکل‌های مختلف مجاری (دوزنقه‌ای، دایروی و ...) بسط داد. نتایج گویای از آن بود که با کاهش درصد تخلخل مصالح مورد استفاده و به ازای یک دبی مشخص، فلوم دیرتر مستغرق می‌شود و عمق آستانه استغراق افزایش پیدا می‌کند. این میزان افزایش عمق آستانه استغراق، مقداری بین ۸ تا ۲۰ درصد مختلف می‌باشد. با افزایش ارتفاع فلوم، عمق آستانه استغراق افزایش پیدا می‌کند. این افزایش آستانه استغراق مقداری بین ۲ تا ۲۸ درصد را به خود می‌گیرد. با افزایش میزان عرض گلوگاه در یک ارتفاع و درصد تخلخل ثابت، فلوم در عمق کمتری مستغرق می‌شود و که مقداری بین ۹ تا ۱۶ درصد را به خود اختصاص داده است.

با بررسی و ارزیابی تاثیر متغیرها در شرایط جریان مستغرق در فلوم نتایج گویای از آن بود که، سازه با اندازه مصالح

۵- فهرست نشانه‌ها

w	عرض بازشدگی فلوم (cm)
B	عرض آبراهه آزمایشگاهی (cm)
z_u	شیب بالا دست فلوم
z_d	شیب پایین دست فلوم
z	شیب گلوگاه فلوم
h_s	عمق جریان در بالادست فلوم (cm)
h_t	عمق جریان در پایین دست فلوم (cm)
n	درصد تخلخل مصالح
D_{50}	قطر میانگین مصالح (mm)
Q_s	دبی جریان در حالت استغراق
	نشانه‌های یونانی
ρ	جرم واحد حجم سیال (kg/m^3)
g	شتاب ثقل (m/s^2)
μ	گرانروی دینامیکی ($kg/m.s$)

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: تجزیه و تحلیل داده‌ها، برداشت داده‌ها، نگارش اولیه مقاله.

نویسنده دوم: انتخاب موضوع، بررسی نتایج، تصحیح مقاله.

نویسنده سوم: بررسی نتایج، تصحیح مقاله.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله نویسندگان مقاله از گروه مهندسی آب دانشگاه رازی کمال تقدیر و سپاسگزاری را دارند.

۶- منابع‌ها

Aali, F. & Vatankhah, A.R. (2023). Experimental study of simple flumes with trapezoidal contraction. *Flow Measurement and Instrumentation*, 90, 102328, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102328>.

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

Azamathulla, H.M. & Ghani, A.A. (2010). Genetic programming to predict river pipeline scour. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 1(3), 127–132.

Azma, A., Tavakol Sadrabadi, M., Liu, Y., Azma, M., Zhang, D., Cao, Z. & Li, Z. (2023). Boosting ensembles for estimation of discharge coefficient and through flow discharge in broad-crested gabion weirs. *Applied Water Science*, 13(2), 45, <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01841-x>.

Bijankhan, M. & Ferro, V. (2019). Experimental study on triangular central baffle flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70, 101641, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101641>

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>.

Boiten, W. (2002). Flow measurement structures. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5–6), 203–207.

Doustkam, M., Rahmanshahi, M., Fathi-Moghadam, M., Keramat, A. & Duan, H.-F. (2024). Experimental study on the hydraulic performance of porous broad-crested weirs with sloping crests. *Water Resources Management*, 38(12), 4783–4802.

Fathi-moghaddam, M., Sadrabadi, M.T. & Rahmanshahi, M. (2018). Numerical simulation of the hydraulic performance of triangular and trapezoidal gabion weirs in free flow condition.

3187–3209.

Rahmanshahi, M. & Shafai Bejestan, M. (2020). Gene-expression programming approach for development of a mathematical model of energy dissipation on block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(2), 04019033, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001442](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001442).

Raskar, V.B., Hailkar, S.S. & Student, M.E. (2018). Hydraulic investigation of floating miniature venturiflume. *Int. J. Eng. Sci.*, 8(5), 17858, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212576842>.

Samani, Z. & Magallanez, H. (2000). Simple flume for flow measurement in open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2), 127–129.

Shariq, A., Hussain, A. & Ahmad, Z. (2020). Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74, 101769, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101769>.

Skogerboe, G.V. & Hyatt, M.L. (1967). Rectangular cutthroat flow measurement Flumes. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 93(4), 1–13.

Sun, B., Zhu, S., Yang, L., Liu, Q., Zhang, C. & Zhang, J. (2021). Experimental and numerical investigation of flow measurement mechanism and hydraulic performance on curved flume in rectangular channel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 4409–4420.

Vatankhah, A.R. (2021). Discussion of “Cylindrical Central Baffle Flume for Flow Measurement in Open Channels” By Aniruddha D. Ghare, Ankur Kapoor, and Avinash M. Badar. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(7), 07021010, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001580).

Vatankhah, A.R. (2022). General free-flow discharge equation for Parshall flumes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 175(5), 257–270.

Vatankhah, A.R. & Mahdavi, A. (2012). Simplified procedure for design of long-throated flumes and weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 79–84.

Yarahmadi, N. & Vatankhah, A.R. (2021). Experimental study on rectangular cut-throated flume: Effects of flume walls slopes and channel longitudinal slope. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101919, <https://doi.org/>

Flow Measurement and Instrumentation, 62, 93–104.

Ferro, V. (2016). Simple flume with a central baffle. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 53–56.

Ghasemi, M. & Vatankhah, A.R. (2024). Experimental study of simple flumes with converging triangular walls. *Flow Measurement and Instrumentation*, 97, 102623, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102623>.

Herb, W. & Hernick, M. (2022). Physical, analytical, and CFD models of a long-throated flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(3), 04022002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001654](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001654).

Kapoor, A., Ghare, A.D., Vasudeo, A.D. & Badar, A. M. (2019). Channel flow measurement using portable conical central baffle. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), 06019010, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001427](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001427).

Kazemi, H.S., Babarsad, M.S., Pourmmohamadi, M. H., Eslami, H. & Kharazi, H.G. (2024). Development of empirical models for the modular limit of trapezoidal and triangular throat flumes. *Flow Measurement and Instrumentation*, 100, 102721, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102721>.

Khosronejad, A., Herb, W., Sotiropoulos, F., Kang, S. & Yang, X. (2021). Assessment of Parshall flumes for discharge measurement of open-channel flows: A comparative numerical and field case study. *Measurement*, 167, 108292, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108292>.

Mohamed, H.I. (2010). Flow over gabion weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8), 573–577.

Mohammadzadeh-Habili, J., Heidarpor, M. & Haghiabi, A. (2016). Comparison the hydraulic characteristics of finite crest length weir with quarter-circular crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 77–82.

Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Fathi-Moghadam, M., Ohadi, S. & Mirjalili, S. (2024). Metaheuristic learning algorithms for accurate prediction of hydraulic performance of porous embankment weirs. *Applied Soft Computing*, 151, 111150, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111150>.

Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Shafai Bejestan, M. & Mirjalili, S. (2023). A hybrid model for predicting the energy dissipation on the block ramp hydraulic structures. *Water Resources Management*, 37(8),

10.1016/j.flowmeasinst.2021.101919.



© 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.