

Experimental Investigation of the Threshold Submergence in Combined Throat Flumes

Hossein Soltani Kazemi¹, Mohsen Solimani Babarsad², Mohammad Hossein Pourmohamadi^{3*}, Hossein Eslami², Hossein Ghorbanizadeh Kharazi²

1- Department of Civil Engineering, Water Resources Engineering and Management, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

2- Department of Water Science, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

3- Department of Water Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

*purmohammadi@gmail.com

Received: 9 September 2023

Accepted: 26 October 2023

Discussion: 21 December 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: There are generally two main methods for measuring open channel flows. The first method involves measuring the average velocity and cross-sectional area and multiplying them to calculate the discharge. The second method entails creating a controlled depth using a structure, establishing a direct relationship between the depth and flow rate (known as the stage-discharge relationship), allowing the flow rate to be directly determined by measuring the depth (Potter et al., 2012). Since the hydraulic behavior of these structures differs under free and submerged conditions, determining the boundary between these two flow states is essential. The threshold of each structure represents the boundary between these two flow states. So far, no studies on this topic have been specifically for flumes with combined cross-sections. Therefore, this research aims to cover this subject. This study aims to experimentally investigate the threshold of submergence in trapezoidal-rectangular and triangular-rectangular combined cross-section flumes. For this purpose, the submergence threshold of these flumes is examined for various flow rates and geometries. Additionally, empirical relationships for both proposed flume types have been developed after dimensional analysis and non-dimensionalities of influential parameters for engineers to use in the design phase. Finally, the submergence thresholds of these two types of flumes are compared.

Methodology: The experiments in this study were conducted on horizontal and rectangular flumes with dimensions of 20, 0.6, and 0.5 m for length, width, and height. The flumes feature a closed water flow system and an end gate to control of downstream depth. Different models of flumes were tested at various flow rates. A total of 170 experiments were performed for the trapezoidal-rectangular flume, and 101 experiments were conducted for the triangular-rectangular flume in the threshold submergence state. The effective parameters influencing the threshold submergence of a trapezoidal-rectangular flume include geometrical parameters, fluid characteristics, and gravity acceleration. The geometric parameters are the height of the flume P , the amount of floor opening a , and the width of flume B . The angles of upstream and downstream transitions are not considered as they are fixed. Fluid-related parameters include dynamic viscosity μ and specific mass ρ . Another crucial parameter affecting flow in open channels is the acceleration of gravity g . Also, flow-related parameters, including the upstream

depth h , and the downstream depth h_t , are effective variables on the threshold submergence. Using Buckingham's Π theory, with parameters μ , g , and h as repetition variables, and applying the theory of incomplete self-similarity (Barenblatt, 1987), the final expressions for the dimensionless parameters are derived as Eqs. (1) and (2).

$$\frac{h_t}{P} = \left(\frac{h}{B}\right)^m f_1\left(\frac{a}{B}, Z\right) \quad (1)$$

$$\frac{h_t}{P} = \left(\frac{h}{B}\right)^m f_2(Z) \quad (2)$$

where m is a numerical constant that is determined based on experimental data.

Results and Discussion: The results indicate that although the h_t/B index shows a consistent increasing trend, it effectively fails to differentiate between flows with different heights. The h_t/h index demonstrates that this index does not exhibit a consistent trend compared to the h/B parameter. Therefore, based on the analyses conducted in this study, h_t/P was considered a suitable threshold index for both types of flows under investigation. The index increases as the height of the flume increases for all three triangular prism side lengths (5, 10, and 15 cm). It is worth mentioning that the changes for low h/B ratios are negligible, and the difference between different flume depths increases with an increase in this ratio, especially for structures with side lengths of 10 and 15. The results show that with an increase in this parameter, the threshold submergence index decreases, indicating an increase in the sensitivity of the flow to the upstream depth. For a specific flow height and discharge, the upstream depth of the structure decreases with an increase in the parameter a . Therefore, the upstream energy of flows with higher opening ratios is lower, resulting in their submergence at an earlier stage. Similarly, for the trapezoidal-rectangular flume, an increase in height leads to an increase in the threshold submergence index, causing the flume to submerge later. Equations (3) and (4) illustrate the threshold submergence index for the combined trapezoidal-rectangular and triangular-rectangular flumes. The results show that more than 80% of the data have an error of less than 5%. The provided empirical equations have achieved satisfactory accuracy in estimating the experimental results.

$$\frac{h_t}{P} = 4 \left(\frac{h}{B}\right)^{1.1} \left(\frac{a}{B}\right)^{0.088} (Z)^{0.096} \quad (3)$$

$$\frac{h_t}{P} = 1.443 \left(\frac{h}{B}\right)^{1.254} (Z)^{1.29} \quad (4)$$

Conclusion: The investigation of various dimensionless parameters has shown that the ratio of the downstream depth to the flume height (h_t/P) is a suitable indicator for the threshold submergence for both types of flumes. In both types of flumes, as the flow depth increases, the threshold submergence index also increases, indicating a decrease in the sensitivity of the flume to the downstream depth. The study of the effect of the trapezoidal base on the threshold submergence index has shown that as the base width increases, the threshold submergence decreases. A comparison between the two types of flumes has revealed that, at low flow rates, the triangular-rectangular combined flume reaches the threshold submergence earlier than the trapezoidal-rectangular flume. Conversely, at high flow rates, the trapezoidal-rectangular flume reaches the threshold submergence later. Statistical analyses have demonstrated that the proposed relationships accurately predict the experimental results, with over 80% of the predictions having an error of less than 5%.

Keywords: Flow measurement, free flow, submerged flow, experimental modeling, flume.

© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی آستانه استغراق فلوم‌های با گلوگاه ترکیبی

حسین سلطانی کاظمی^۱، محسن سلیمانی بابرصاد^۲، محمدحسین پورمحمدی^{۳*}، حسین اسلامی^۲
حسین قربانی زاده خرازی^۲

۱- گروه مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.
۲- گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.
۳- گروه مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

* purmohammadi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: فلوم یکی از سازه‌های متداول اندازه‌گیری آب در مجاری باز می‌باشد. یکی از اصول اندازه‌گیری جریان با استفاده از این سازه، مشخص بودن آزاد یا مستغرق بودن جریان عبوری از آن می‌باشد. هدف این تحقیق تعیین آستانه استغراق دو نوع فلوم با گلوگاه ترکیبی می‌باشد. آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۰، ۰/۶ و ۰/۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان انجام شده است. برای این تحقیق ۹ مدل فلوم با مقطع دوزنقه‌ای-مستطیلی و ۴ مدل فلوم با مقطع مثلثی-مستطیلی در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و در مجموع ۲۷۱ آزمایش انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش ارتفاع فلوم، حساسیت سازه به عمق پایاب کمتر می‌شود. همچنین مقایسه دو فلوم مختلف نشان می‌دهد که فلوم با مقطع مثلثی-مستطیلی در دبی‌های پایین حساسیت بیشتری به عمق پایاب داشته و زودتر مستغرق می‌شود و در دبی‌ها بالا فلوم دوزنقه‌ای-مستطیلی زودتر مستغرق می‌شود. با استفاده از تحلیل ابعادی و اصل خود تشابهی ناقص و همچنین رگرسیون چند متغیره غیرخطی روابط تجربی مناسبی برای شاخص آستانه استغراق هر دو نوع فلوم ارائه شد.

کلیدواژگان: اندازه‌گیری جریان، جریان آزاد، جریان مستغرق، مدل‌سازی آزمایشگاهی، فلوم

ارائه شده است.

۱- مقدمه

به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها در سنجش سیال‌ها در مجاری باز نسبت به مجاری بسته پیچیدگی‌های تحلیلی در مجاری باز بیشتر می‌باشد. برای سنجش سیال‌ها در مجاری باز به صورت عمده دو روش کلی وجود دارد. در روش اول با اندازه‌گیری سرعت میانگین و سطح مقطع و ضرب آن‌ها دبی محاسبه می‌شود. در روش دوم با تشکیل عمق کنترل با استفاده از یک سازه و ایجاد رابطه مستقیم بین عمق و دبی جریان (دبی-اشل)، با اندازه‌گیری عمق، دبی به صورت مستقیم به دست می‌آید (Potter et al., 2012).

همان‌طور که بیان شد یکی از روش‌های اندازه‌گیری جریان در مجاری باز روش تشکیل مقطع کنترل و ارتباط

اندازه‌گیری، ثبت و پایش جریان آب در آبراه‌ها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی از ضرورت‌های تحویل حجمی آب تقاضا محور بوده و عملیاتی شدن آن باعث کاهش مسئله-های اجتماعی ناشی از ضعف مدیریت در تحویل و فروش آب شد و امکانات پایه‌ای برای برنامه‌ریزی استفاده بهینه از آب را فراهم می‌سازد. با توجه به اینکه کشور ایران در منطقه‌های گرم خشک جهان قرار دارد، کمبود منابع آب در حال حاضر و آینده به یک چالش اساسی تبدیل شده است. بنابراین ضرورت دارد همگام با جهان مسئولان طراز اول ایران نیز سنجش و مدیریت منبع‌های آب موجود و مدیریت بهینه آن‌ها را جدی بگیرند. با این هدف سازه-های آب سنجی مختلفی در مجاری باز و بسته تاکنون

(1967) توسعه داده شد. در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی در ارتباط با این نوع فلوم با شکل گلوگاه مستطیلی انجام شده است (Weber et al., 2007; Ramamurthy and Tadayan, 2008; Temeepattanapongsa et al., 2013; Manekar et al., 2007; Xiao et al., 2016; Das et al., 2017).

در بعضی آبراهه‌های فصلی مقدار دبی اندک بوده و تنها در بعضی مواقع سال دارای دبی قابل توجهی هستند. از طرفی این آبراهه‌ها دارای آورد رسوبی فراوانی بوده که استفاده از سازه‌هایی مانند سرریز مثلثی را با مشکل روبه‌رو می‌کنند. در این مسیله‌ها نشست رسوب‌ها در بالادست سرریز باعث ناکارایی مناسب سرریز می‌شود. بنابراین در صورت ارائه یک فلوم با ساختاری که هم بتواند دبی‌های کم را با دقت مناسب اندازه‌گیری کند و مشکل نشست رسوب‌ها را نداشته باشد می‌تواند کارآمد باشد. از سویی دیگر فلوم‌های موجود و مورد استفاده در صنعت برای محدوده‌ای مشخص از دبی استفاده می‌شود. با انتخاب فلوم‌هایی با مقطع ترکیبی مثلثی/دورنق‌ه‌ای و مستطیلی، که قسمت مثلثی/دورنق‌ه‌ای آن برای دبی‌های پایین و قسمت مستطیلی آن برای دبی‌های زیاد وارد مدار می‌شود، می‌توان محدوده اندازه‌گیری جریان از دبی‌های کم تا زیاد را پوشش داد. همچنین به دلیل نداشتن بالآمدگی در کف در این نوع فلوم، امکان به دام افتادن رسوب به کمترین می‌رسد. بنابراین این سازه از نظر عملکرد هیدرولیکی و قابلیت حذف رسوب می‌تواند دارای قابلیت باشد.

Alai and Vatankhah (2023) به بررسی فلوم با مقطع دورنق‌ه‌ای در شرایط جریان آزاد پرداختند. در این تحقیق رابطه‌هایی برای تعیین دبی این نوع فلوم با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل ابعادی، معادله پیوستگی و انرژی ارائه شد و خطای هر کدام از آن‌ها ارزیابی شد.

جریان عبوری از یک سازه اندازه‌گیری به دو دسته کلی جریان آزاد یا مدولار و جریان مستغرق یا نامدولار تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها در شرایط آزاد و مستغرق متفاوت است، تعیین مرز بین این دو حالت از جریان ضروری است. در واقع مرز بین این دو حالت آستانه استغراق هر سازه‌ای می‌باشد. تاکنون تحقیقی در این زمینه برای فلوم‌های با مقطع ترکیبی

مستقیم بین دبی و اشل می‌باشد. در این زمینه سازه‌های مختلفی مانند سرریز، روزنه، و فلوم‌ها در صنعت استفاده می‌شود (White, 1990).

فلوم‌ها سازه‌هایی هستند که به دو صورت کلی تنگ‌شدگی از کناره و مانع مرکزی باعث تشکیل عمق کنترل و ارتباط مستقیم بین دبی و تراز سطح آب می‌شود. در فلوم‌های با تنگ‌شدگی کناری، مقطع آبراهه با استفاده از دو مانع در دیواره فلوم کاهش یافته و عمق بحرانی تشکیل می‌شود. در فلوم‌های با موانع مرکزی مقطع آبراهه با استفاده از یک مانع در مرکز فلوم کاهش یافته و عمق بحرانی تشکیل می‌شود. تاکنون فلوم‌های مختلفی مانند فلوم ونتوری^۱، پارشال^۲، گلو کوتاه و بلند^۳، استوانه‌ای و شبه استوانه‌ای^۴، فلوم‌های با موانع مرکزی^۵ و دیگر انواع هندسه‌ها مورد بررسی و استفاده در صنعت قرار گرفته‌اند (Parshall, 1950; Skogerboe et al., 1972; Blaisdell, 1994; Vatankhah and Mahdavi, 2012; Saki et al., 2016; Carollo et al., 2016; Yarahmadi and Vatankhah, 2021; Khosronejad et al., 2021; Khastar-Borujeni and Samadi-Borujeni, 2012).

فلوم‌ها را می‌توان به دو دسته کلی فلوم‌های با و بدون گلو تقسیم‌بندی کرد. فلوم‌های با گلو مانند پارشال فلوم به طور معمول به تغییرپذیری‌های کف نیز نیاز داشته ولی فلوم‌های بدون گلو تنها با استفاده از تنگ‌شدگی در دیواره آبراهه ایجاد می‌شوند و ساخت آن‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر است. اگرچه همچنان از فلوم‌های با گلو و پیچیده‌تر به دلیل همگانه بودن رابطه آن‌ها استفاده می‌شود ولی فلوم‌های بدون گلو با ساختار ساده‌تر نیز در این سال‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاکنون بررسی و ارزیابی‌های مختلفی در ارتباط با فلوم‌های ساده بدون گلو با هدف ساده‌سازی ساخت و کاهش هزینه این سازه انجام شده است (Samani and Magallanez, 2000; Ferro, 2016; Carollo et al., 2016; Kolavani et al., 2018; Bijankhan and Ferro, 2019; Vatankhah, 2017; Aminpour et al., 2020; Vatankhah, 2021). فلوم بدون گلو در آغاز توسط

1. Venturi
2. Parshall
3. Cutthroat and long-throated
4. Cylindrical and semi-cylindrical
5. Central baffle

افزایش یابد. در واقع برای ترازهای پایین‌تر از آستانه استغراق، شرایط جریان آزاد یا مدولار و برای ترازهای بالاتر از آستانه استغراق جریان مستغرق است و تغییرپذیری‌های عمق پایاب بر عمق بالادست فلوم تأثیر می‌گذارد.

برای تعیین آستانه استغراق به صورت آزمایشگاهی، در آغاز در شرایطی که درجه انتهایی به کلی باز است، جریان آزاد برقرار می‌شود. در ادامه به تدریج درجه پایاب بسته شده تا تراز پایاب افزایش یابد. پس از هر بار افزایش عمق، باید زمان کافی به جریان داده شود که جریان به کلی ماندگار شود. این عمل تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که افزایش بیشتر عمق پایاب باعث افزایش عمق بالادست به اندازه ۱ میلی‌متر می‌شود. در این حالت تراز پیش از تراز که باعث افزایش عمق بالادست شده است به عنوان آستانه استغراق لحاظ می‌شود.

در این آزمایش‌ها عمق بالادست و پایین‌دست در فاصله‌ای از فلوم اندازه‌گیری می‌شود که سطح آب افقی بوده و نوسان‌های سطحی ناچیز باشد. برای عمق بالادست به‌طور معمول در فاصله‌ای ۴ برابر عمق بالادست فلوم شرایط مناسب است. با این وجود در پایین‌دست فلوم به دلیل پرش هیدرولیکی، آشفتگی یا تلاطم و نوسان‌ها و امواج سطحی، سعی می‌شود عمق پایاب در فاصله‌ای از پایین‌دست فلوم برداشت شود که این نوسان‌ها کمترین باشد. این فاصله بسته به دبی جریان و همچنین هندسه فلوم‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

۲-۲- تحلیل ابعادی

فراسنجه‌های مؤثر بر آستانه استغراق فلوم ذونقه‌ای-مستطیلی شامل فراسنجه‌های هندسی، ویژگی‌های سیال و شتاب ثقل می‌باشند. برابر شکل ۱، فراسنجه‌های هندسی ارتفاع فلوم P ، مقدار بازشدگی کف a ، و عرض فلوم B می‌باشد. زاویه‌های تبدیل‌های بالادست و پایین دست به دلیل ثابت بودن لحاظ نمی‌شود. فراسنجه‌های مربوط به سیال شامل لزجت پویایی μ ، و جرم مخصوص ρ می‌باشد. دیگر فراسنجه مؤثر بر جریان در مجاری باز شتاب ثقل g می‌باشد. همچنین فراسنجه‌های مربوط به

انجام نشده است. بنابراین این تحقیق با هدف پوشش این موضوع انجام شده است.

هدف این تحقیق بررسی آزمایشگاهی آستانه استغراق در فلوم‌های با مقطع ترکیبی ذونقه‌ای-مستطیلی و مثلثی-مستطیلی است. برای این منظور به ازای دبی‌ها و هندسه‌های مختلف این سازه‌ها، آستانه استغراق آن‌ها بررسی و ارزیابی شده است. همچنین برای استفاده مهندسان در مرحله طراحی، پس از تحلیل ابعادی و بی‌بعد سازی فراسنجه‌های مؤثر، رابطه‌های تجربی برای هر دو نوع فلوم پیشنهادی ارائه شده است. در نهایت، آستانه استغراق این دو نوع فلوم با هم مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدلسازی آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی افقی و مستطیل شکل به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۶، ۰/۵ و ۰/۵ متر در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام شد. فلوم دارای یک سامانه بسته‌ی جریان آب است و برای کنترل عمق پایین‌دست از درجه انتهایی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای کنترل و تنظیم دبی ورودی به فلوم از یک شیرفلکه پس از خروجی پمپ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دبی ورودی به فلوم از سرریز مستطیلی لبه تیز مدرج در انتهای پایین‌دست سامانه استفاده شد. به‌منظور خوانش ارتفاع ایستایی سطح آب در بالادست و پایین‌دست فلوم از عمق سنج روی فلوم استفاده شد. برای ساخت فلوم‌ها از ورقه آهن گالوانیزه به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب تصویرهای آزمایشگاهی و شمای کلی فلوم ذونقه‌ای-مستطیلی و فلوم مثلثی-مستطیلی را نمایش می‌دهد. در این تحقیق مدل‌های مختلف فلوم در دبی‌های مختلف آزمایش شده و در مجموع ۱۷۰ آزمایش برای فلوم ذونقه‌ای-مستطیلی و ۱۰۱ آزمایش برای فلوم مثلثی-مستطیلی در حالت آستانه استغراق انجام شد. در جدول ۱ جزئیات آزمایش‌های این تحقیق ارائه شده است.

آستانه استغراق در واقع تراز از عمق پایاب است که با افزایش بیشتر عمق پایاب، عمق بالادست ۱ میلی‌متر

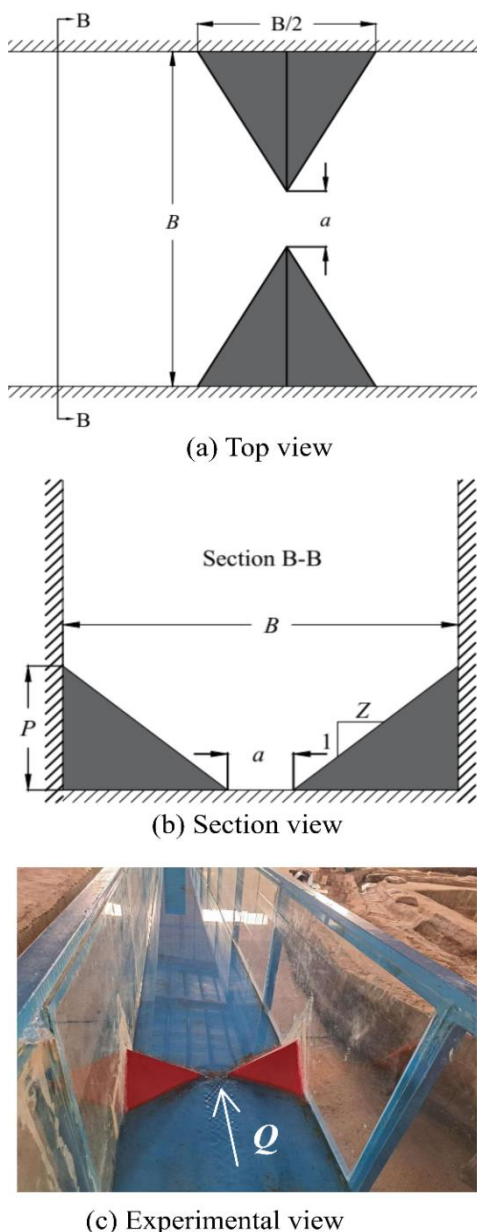


Fig. 1 Schematic and an experimental view of trapezoidal-rectangular flume

شکل ۱ نمای کلی و یک تصویر آزمایشگاهی از فلوم دوزنقه‌ای-مستطیلی

می‌باشند بنابراین از عدد رینولدز صرف نظر می‌شود و رابطه نهایی به شکل زیر ارائه می‌شود.

$$\frac{h_t}{P} = f_1\left(\frac{h}{B}, \frac{a}{B}, Z\right) \quad (7)$$

شایان یادآوری است که در پیشینه تحقیق برای آستانه استغراق شاخص‌های دیگری مانند h_t/h و h_t/B نیز به عنوان آستانه استغراق معرفی شده‌اند (Bijankhan et al., 2022). همان طوری که در بخش نتایج نشان داده شده است h_t/P شاخص مناسب‌تری برای این نوع فلوم‌ها می‌باشد.

جریان شامل عمق بالادست h و پایین دست جریان h_t از متغیرهای مؤثر بر آستانه استغراق می‌باشد.

$$f_1(h, h_t, B, g, P, \rho, \mu, a) = 0 \quad (1)$$

با استفاده از فرضیه پی باکینگهام (Barenblatt, 1987) و با انتخاب فراسنجه‌های μ, g و h به عنوان متغیرهای تکرار، می‌توان رابطه (۱) را به صورت بدون بعد زیر نوشت

$$f_1\left(\frac{B}{h}, \frac{a}{h}, \frac{P}{h}, \frac{h_t}{h}, \frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu}\right) = 0 \quad (2)$$

با ترکیب این فراسنجه‌های بدون بعد می‌توان به اعداد بدون بعد مناسب تری رسید.

$$\pi_1 = \frac{h_t}{h} / \frac{P}{h} = \frac{h_t}{P} \quad (3)$$

$$\pi_2 = \frac{a}{h} / \frac{B}{h} = \frac{a}{B} \quad (4)$$

$$\pi_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{B}{h} - \frac{a}{h} \right) / \frac{P}{h} = \frac{B-a}{2P} = Z \quad (5)$$

بنابراین فراسنجه‌های بدون بعد رابطه (۲) به صورت زیر تغییر می‌کنند.

$$\frac{h_t}{P} = f_1\left(\frac{h}{B}, \frac{a}{B}, Z, \frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu}\right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) فراسنجه $\frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu}$ عدد رینولدز می‌باشد. در آزمایش‌های این تحقیق عدد رینولدز بزرگتر از ۵۶۵۰

جدول ۱ جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی این تحقیق

Table 1 The details of the laboratory models in this research.

| Flume type | Q (L/s) | P (cm) | a (cm) |
|---------------------------|-------------|----------|----------|
| Trapezoidal - Rectangular | 3.39-55.378 | 15 | 5 |
| | | 20 | 5 |
| | | 25 | 5 |
| | | 15 | 10 |
| | | 20 | 10 |
| | | 25 | 10 |
| | | 15 | 15 |
| | | 20 | 15 |
| | | 25 | 15 |
| Triangular - Rectangular | 3.39-55.378 | 20 | - |
| | | 25 | - |
| | | 30 | - |
| | | 35 | - |

(۸) را می توان به عنوان یک عبارت توانی نوشت (Barenblatt, 1987)

$$\frac{h_t}{P} = \left(\frac{h}{B}\right)^m f_1\left(\frac{a}{B}, Z\right) \quad (9)$$

$$\frac{h_t}{P} = \left(\frac{h}{B}\right)^m f_2(Z) \quad (10)$$

که در آن m یک ثابت عددی است که بر مبنای داده های تجربی تعیین می شود.

در جدول ۲ محدوده متغیرهای بدون بعد رابطه های (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۲ محدوده اعداد بدون بعد هر دو نوع فلوم

Table 2 Range of independent dimensionless variables for both flumes

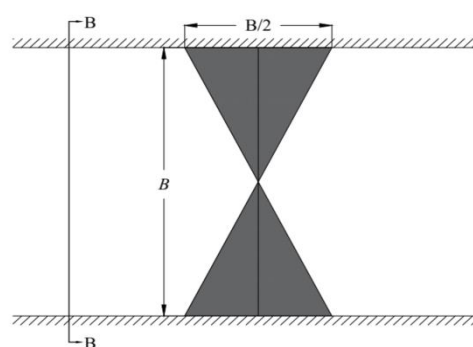
| Range | Independent dimensionless variables | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|------|-------|-------|
| | h/B | Z | a/B | Re |
| Trapezoidal-rectangular flume | | | | |
| Min | 0.167 | 0.90 | 0.083 | 5656 |
| Max | 0.443 | 1.83 | 0.25 | 92297 |
| Triangular-rectangular flume | | | | |
| Min | 0.15 | 0.86 | - | 5650 |
| Max | 0.51 | 1.5 | - | 93353 |

۳- نتایج و بحث

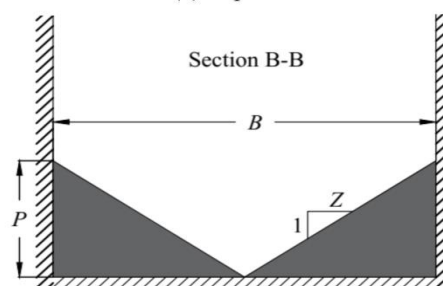
بخش نتایج و بحث شامل چهار قسمت مختلف می باشد. در بخش اول پس از تحلیل شاخص مناسب برای آستانه استغراق در هر دو نوع فلوم، به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر این شاخص پرداخته شده است. در بخش دوم رابطه های کلی بسط داده شده در بخش تحلیل ابعادی با استفاده از مدل SPSS 16 مدلسازی شده و رابطه مناسب استخراج شده است. در بخش سوم آستانه استغراق دو نوع فلوم با هم مقایسه شده است. در بخش پایانی نیز تأثیر موقعیت قرارگیری سازه فلوم بررسی و ارزیابی می شود.

۳-۱- تأثیر متغیرها بر آستانه استغراق

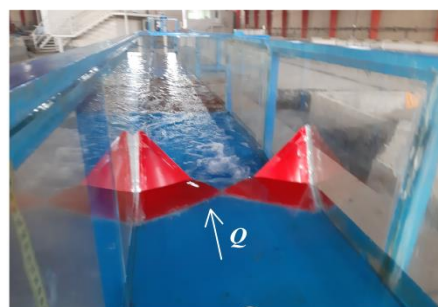
همان طور که بیان شد شاخص های مختلفی از جمله نسبت عمق پایین دست به عمق بالادست (h_t/h) و نسبت عمق پایین دست به عرض کف آبراهه (h_t/B) برای آستانه استغراق معرفی شده است. در شکل ۳ و ۴ به ترتیب این دو شاخص برای هر دو فلوم ذوزنقه ای- مستطیلی و



(a) Top view



(b) Section view



(c) Experimental view

Fig. 2 Schematic and an experimental view of triangular-rectangular flume

شکل ۲ نمای کلی و یک تصویر آزمایشگاهی از فلوم مثلثی- مستطیلی

فلوم با مقطع مثلثی- مستطیلی نیز تحلیل ابعادی همانندی دارد. در این نوع فلوم با توجه به اینکه فراسنجه عرض کف (a) وجود ندارد عدد بدون بعد a/B حذف شده و در نهایت رابطه آستانه استغراق این نوع فلوم به صورت زیر ارائه می شود.

$$\frac{h_t}{P} = f_2\left(\frac{h}{B}, Z\right) \quad (8)$$

برای مقادیرهای مشخص Z و a/B در رابطه (۶) و Z در رابطه (۸)، هرگاه $h/B \rightarrow 0$ و $h_t/P \rightarrow 0$ و $h/B \rightarrow \infty$ و $h_t/P \rightarrow \infty$ ، بنابراین، با توجه به نظریه خود تشابهی ناقص، عدد بدون بعد h/B در رابطه های (۷) و

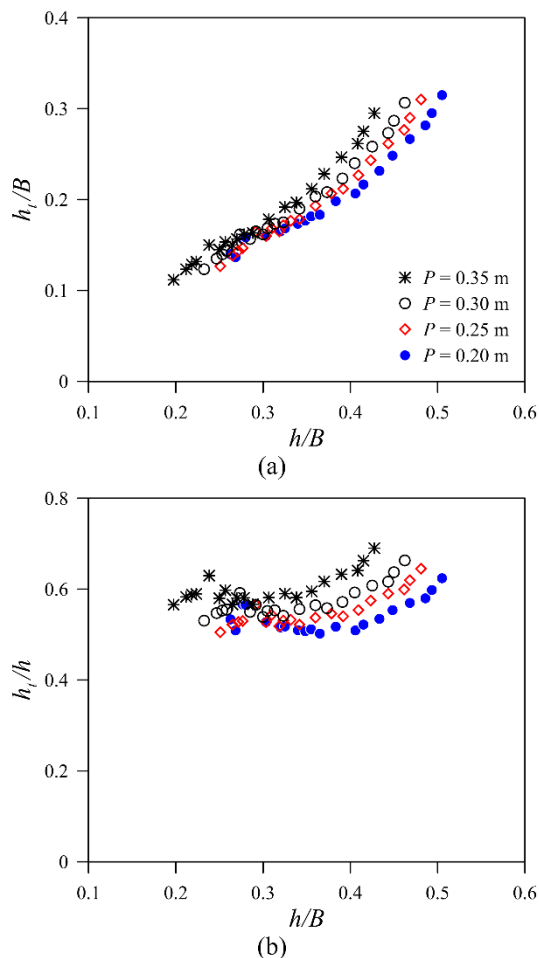


Fig 4. The variations of a) h_t/B and b) h_t/h with respect to the parameter h/B in the triangular-rectangular flume
 شکل ۴ تغییرپذیری‌های (a) h_t/B و (b) h_t/h نسبت به فراسنجه h/B فلوم مثلثی - مستطیلی

شایان یادآوری است تغییرپذیری‌های برای نسبت‌های پایین h/B ناچیز بوده و با افزایش این نسبت مقدار تفاوت ارتفاع‌های مختلف به‌ویژه در دو سازه با طول ضلع ۱۰ و ۱۵ افزایش می‌یابد. برای یک دبی مشخص، در فلوم‌های با ارتفاع بیشتر، بار آبی بیشتری در بالادست فلوم وجود دارد. بنابراین مقاومت بیشتر نسبت به مستغرق شدن و عمق پایاب دارند. در نتیجه شاخص آستانه استغراق آن‌ها بزرگتر است.

در شکل ۶ تغییرپذیری‌های شاخص آستانه استغراق برای مقدارهای متفاوت a در فلوم دوزنقه‌ای-مستطیلی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار این فراسنجه شاخص آستانه استغراق کاهش یافته و در واقع حساسیت فلوم به عمق پایاب افزایش می‌یابد. برای یک ارتفاع فلوم و دبی مشخص با افزایش فراسنجه a عمق

مثلثی- مستطیلی برای ارتفاع‌های مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه شاخص h_t/B روند یکنواختی افزایشی دارد ولی نتوانسته است فلوم‌های با ارتفاع مختلف را به خوبی جداسازی کند. نتایج شاخص h_t/h نشان می‌دهد که این شاخص روند یکنواختی نسبت به فراسنجه h/B نداشته است. بنابراین با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق h_t/P به عنوان شاخص آستانه استغراق مناسب برای هر دو نوع فلوم مورد تحقیق در نظر گرفته شد.

شکل ۵ تأثیر ارتفاع فلوم‌های دوزنقه‌ای-مستطیلی را بر شاخص آستانه استغراق نمایش می‌دهد. برابر شکل به طور کلی با افزایش ارتفاع فلوم این شاخص در هر سه طول ضلع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری دوزنقه، افزایش می‌یابد.

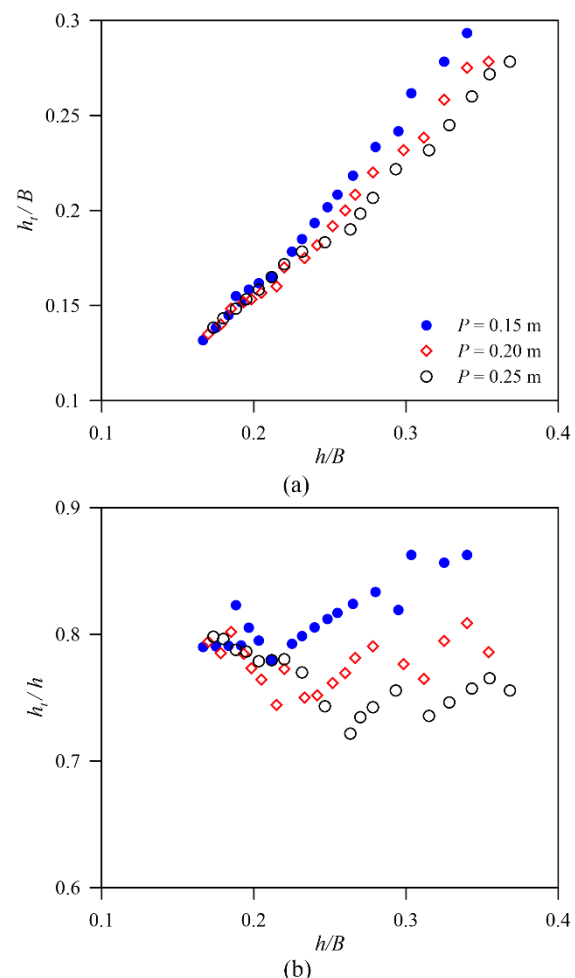
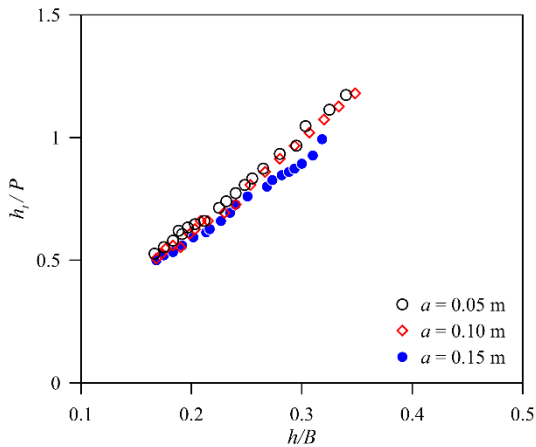
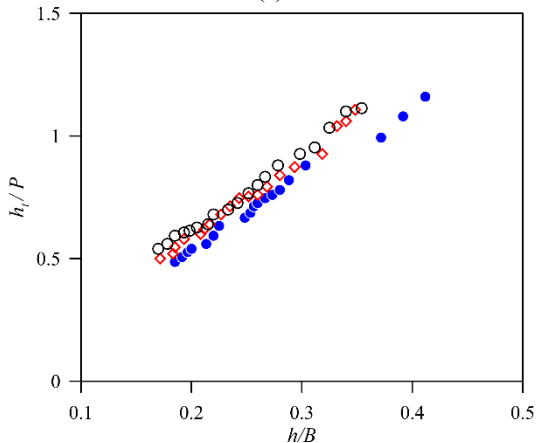


Fig 3. The variations of a) h_t/B and b) h_t/h with respect to the parameter h/B in the trapezoidal-rectangular flume
 شکل ۳ تغییرپذیری‌های (a) h_t/B و (b) h_t/h نسبت به فراسنجه h/B فلوم دوزنقه‌ای - مستطیلی

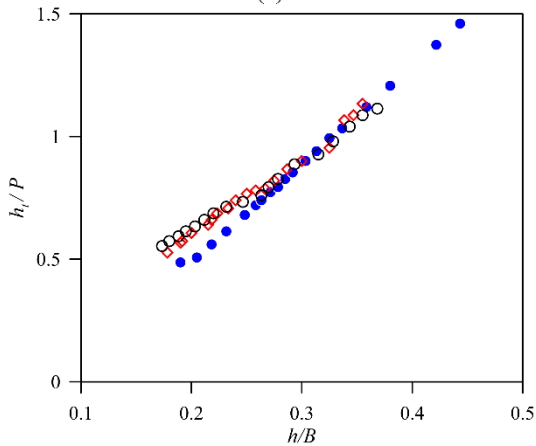
است. برابر شکل همانند با فلوم دوزنقه‌ای- مستطیلی در این نوع فلوم هم با افزایش ارتفاع به دلیل افزایش انرژی بالادست فلوم، شاخص آستانه استغراق افزایش یافته و فلوم دیرتر مستغرق می‌شود.



(a)



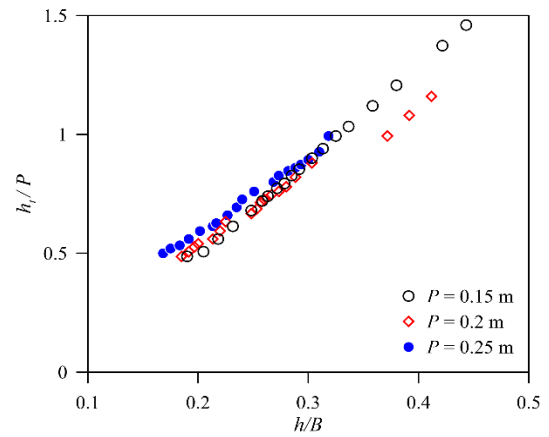
(b)



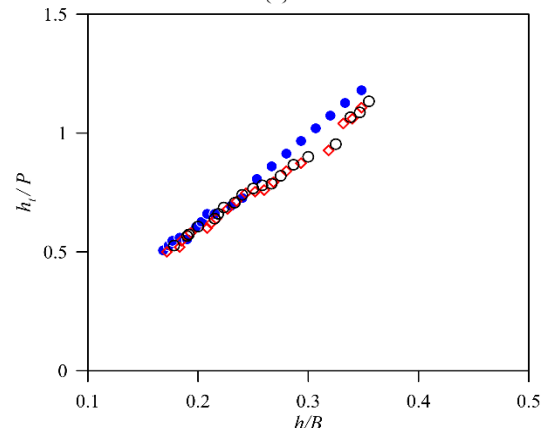
(c)

Fig. 6 The variations of h_t/P versus h/B for different trapezoidal-rectangular flumes sides

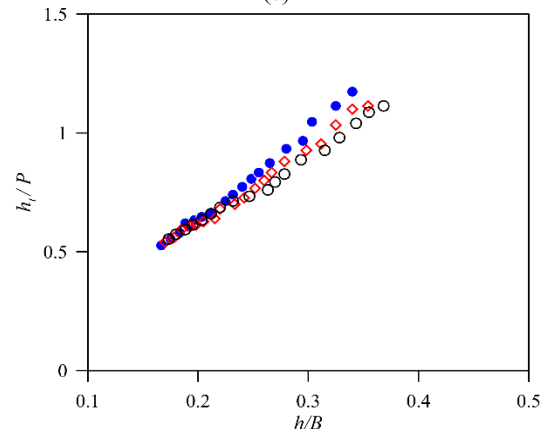
شکل ۶ تغییرپذیری‌های h_t/P در مقابل h/B برای فلوم‌های دوزنقه‌ای- مستطیلی با طول ضلع‌های مختلف



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 The variations of h_t/P versus h/B for different trapezoidal-rectangular flumes heights

شکل ۵ تغییرپذیری‌های h_t/P در مقابل h/B برای فلوم‌های دوزنقه‌ای- مستطیلی با ارتفاع‌های مختلف

بالادست سازه کاهش می‌یابد. بنابراین انرژی بالادست فلوم‌های با بازشدگی بیشتر در کف کمتر بوده و در نتیجه زودتر مستغرق می‌شوند.

در شکل ۷ تغییرپذیری‌های شاخص آستانه استغراق برای فلوم‌های مثلثی- مستطیلی با ارتفاع مختلف ارائه شده

$$\frac{h_t}{P} = 4 \left(\frac{h}{B}\right)^{1.1} \left(\frac{a}{B}\right)^{0.088} (Z)^{0.096} \quad (11)$$

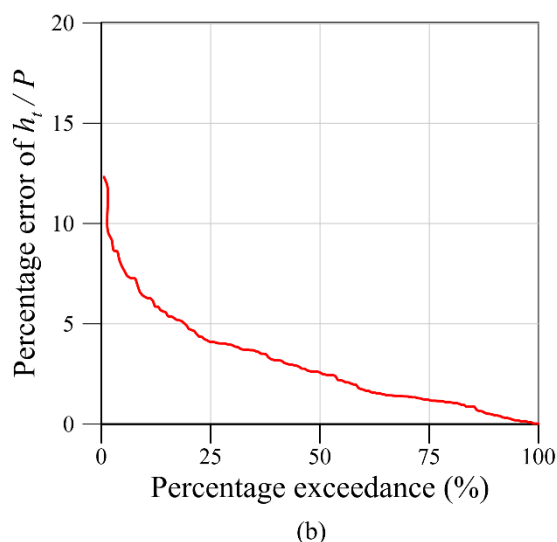
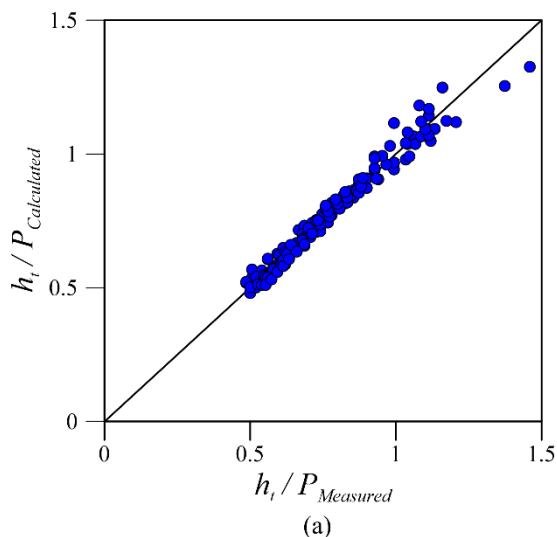


Fig. 8 (a) Comparison between the experimental and calculated values of h_t/P , and (b) percentage exceedance of percentage error of Eq. (11)

شکل ۸ (a) مقایسه بین مقادیرهای آزمایشگاهی و محاسبه شده h_t/P و (b) درصد خطا رابطه (۱۱)

رابطه (۱۲) شاخص آستانه استغراق برای فلوم ترکیبی مثلثی-مستطیلی است. مقدار شاخص های آماری R^2 ، RMSE و MAE این رابطه به ترتیب، ۰/۹۸، ۰/۰۰۲۶ و ۰/۰۱ می باشد. در شکل ۹ (الف) مقادیرهای آزمایشگاهی و محاسبه شده از رابطه ۱۲ با هم مقایسه شده اند و همچنین در شکل ۹ (ب) مقدار درصد خطای نسبی این رابطه نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که بیشتر از ۸۰ درصد از داده ها خطایی کمتر از ۵ درصد دارند و رابطه

شایان توجه اینکه برابر شکل ۷ استفاده از شاخص آستانه استغراق h_t/P به خوبی توانسته است فلوم های با ارتفاع مختلف را جداسازی کند.

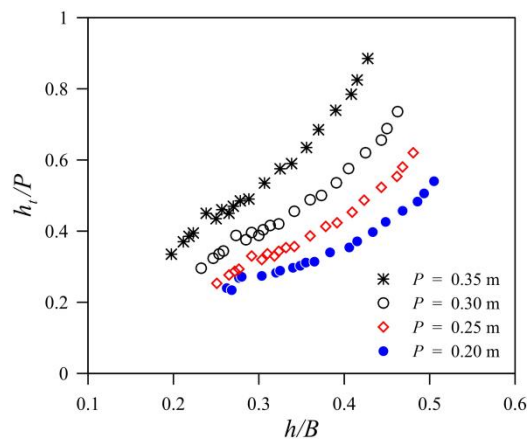


Fig. 7 The variations of h_t/P versus h/B for different triangular-rectangular flumes heights

شکل ۷ تغییرپذیری های h_t/P در مقابل h/B برای فلوم های مثلثی-مستطیلی با ارتفاع های مختلف

۳-۲- استخراج رابطه های تجربی

بنابر تحلیل ابعادی انجام شده و همچنین استفاده از خودتشابهی ناقص در بخش پیش، در این بخش بر مبنای رگرسیون چند متغیره غیرخطی و با استفاده از نرم افزار SPSS 16 دو رابطه تجربی برای فلوم با گلوگاه ترکیبی دوزنقه ای-مستطیلی و مثلثی-مستطیلی ارائه شد. برای محاسبه دقت رابطه های ارائه شده از معیارهای آماری جدول ۲ استفاده می شود. که در آن h_t/P^M ضریب دبی مشاهده ای، h_t/P^C ضریب دبی محاسبه ای و h_t/P^{Mean} میانگین ضریب دبی مشاهده ای است.

رابطه (۱۱) شاخص آستانه استغراق برای فلوم ترکیبی دوزنقه ای-مستطیلی است. مقدار شاخص های آماری R^2 ، RMSE و MAE این رابطه به ترتیب، ۰/۹۷، ۰/۰۳ و ۰/۰۲ می باشد. در شکل ۸ (الف) مقادیرهای آزمایشگاهی و محاسبه شدنی از رابطه ۱۱ با هم مقایسه شده اند و همچنین در شکل ۸ (ب) مقدار درصد خطای نسبی این رابطه نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که بیشتر از ۸۰ درصد از داده ها خطایی کمتر از ۵ درصد دارند و رابطه تجربی ارائه شده با دقت مناسبی توانسته است نتایج آزمایشگاهی را برآورد کند.

۳-۳- مقایسه دو فلوم با گلوگاه ترکیبی

در این قسمت آستانه استغراق دو فلوم مختلف با هم مقایسه شده است. در شکل ۱۰ آستانه استغراق دو فلوم ذوزنقه‌ای- مستطیلی با ارتفاع ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر با زاویه ضلع کف ۱۰ سانتی‌متر با فلوم‌های مثلثی- مستطیلی با ارتفاع مشابه مقایسه شده است.

مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که در دبی‌های پایین فلوم با گلوگاه مثلثی- مستطیلی حساسیت بیشتری به عمق پایاب داشته و برای یک دبی مشخص، در عمق پایاب کمتری نسبت به فلوم ذوزنقه‌ای- مستطیلی مستغرق می‌شود. مقایسه شکل‌ها در دبی‌های بالا در هر دو ارتفاع نشان می‌دهد که در دبی‌های بالای ۵۰ لیتر بر ثانیه این روند برعکس شده و فلوم با گلوگاه ذوزنقه‌ای- مستطیلی در عمق پایاب کمتری مستغرق می‌شود.

۳-۴- تأثیر عمق پایاب

از جمله فرضیه‌های این تحقیق تأثیر عمق پایاب در هنگام قرارگیری سازه در وسط آبراهه آزمایشگاهی بود. زیرا با قرارگیری سازه در وسط آبراهه همواره یک عمق آب قابل توجه در پایین دست سازه به‌ویژه در دبی‌های بالا تشکیل می‌شد. برای بررسی این موضوع، فلوم ذوزنقه‌ای با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و اندازه ضلع کف ۵ سانتی‌متر در انتهای پایین‌دست آبراهه آزمایشگاهی در مجاورت دریچه پایین‌دست برابر شکل ۱۱ نصب شد. مشابه دیگر آزمایش‌ها، برای این سازه نیز در این موقعیت دبی‌های مختلف استفاده شده و عمق بالادست برداشت شد.

نتایج این دو آزمایش در شکل ۱۲ ترسیم شده است. برابر شکل در این دو حالت نمودار دبی-اشل تا حدودی یکسان بوده و بنابراین می‌توان نتیجه‌گرفت که با کارگزاری سازه‌های فلوم در وسط آبراهه نیز عمق استغراق تشکیل شده، عمق استغراق واقعی فلوم بوده و سازه در حالت استغراق نبوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی آستانه استغراق فلوم‌های با گلوگاه ترکیبی ذوزنقه‌ای- مستطیلی

تجربی ارائه شده با دقت مناسبی توانسته است نتایج آزمایشگاهی را برآورد کند.

$$\frac{h_t}{P} = 1.443 \left(\frac{h}{B}\right)^{1.254} (Z)^{1.29} \quad (12)$$

جدول ۳ معیارهای آماری محاسبه دقت رابطه‌های ارائه شده

Table 3 Statistical relationships to calculate the accuracy of the presented relationships

| Metric | Equatio |
|----------------|--|
| RMSE | $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_t/P^M - h_t/P^C)^2}$ |
| MAPE | $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ h_t/P^M - h_t/P^C }{h_t/P^M}$ |
| R ² | $1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_t/P^M - h_t/P^C)^2}{\sum_{i=1}^n (h_t/P^M - h_t/P^{Mean})^2}$ |

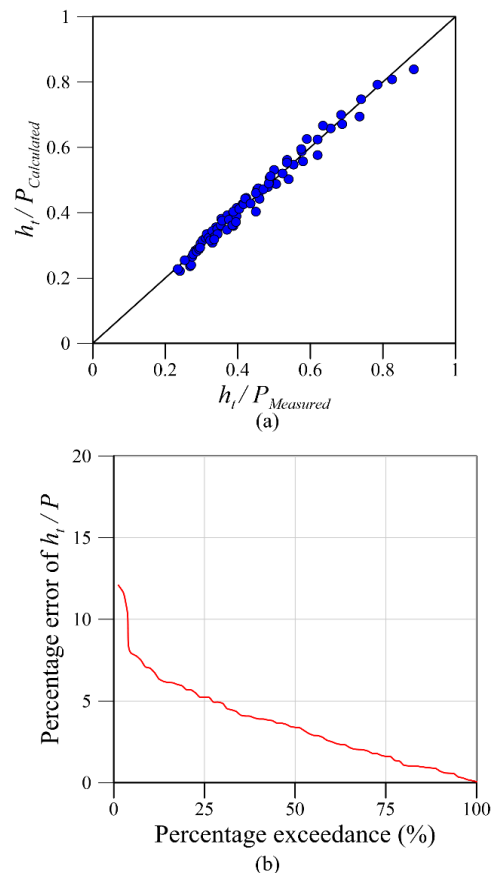


Fig. 9 (a) Comparison between the experimental and calculated values of h_t/P , and (b) percentage exceedance of percentage error of Eq. (12)

شکل ۹ (a) مقایسه بین مقادیرهای آزمایشگاهی و محاسباتی h_t/P و (b) درصد خطا رابطه (۱۲)

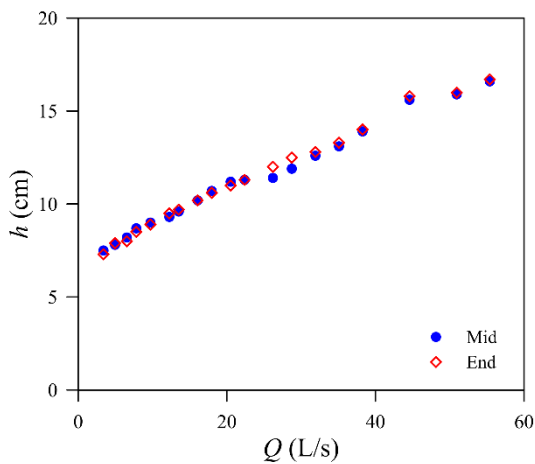


Fig. 12 Comparing of the upstream depth of the trapezoidal-rectangular flume ($a = 10$ cm, $P = 20$ cm) at two positions of the middle and the end of the experimental channel

شکل ۱۲ مقایسه عمق بالادست فلوم دوزنقه‌ای مستطیلی ($a = 10$ cm, $P = 20$ cm) در دو موقعیت وسط آبراهه و انتهای پایین دست

و مثلثی - مستطیلی پرداخته شد. برای این منظور ۱۳ مدل آزمایشگاهی ساخته شده و برای دبی‌های مختلف آزمایش شد. بررسی فراسنجه‌های بی‌بعد مختلف نشان داد که نسبت عمق پایاب به ارتفاع فلوم (h_t/P) یک شاخص مناسب برای آستانه استغراق هر دو نوع فلوم است. در هر دو نوع فلوم با افزایش ارتفاع فلوم، شاخص آستانه استغراق افزایش یافته و در واقع حساسیت فلوم به عمق پایاب کاهش می‌یابد. بررسی تأثیر قاعده کف دوزنقه بر شاخص آستانه استغراق نشان داد که با افزایش قاعده کف، آستانه استغراق کاهش می‌یابد. مقایسه دو نوع فلوم نشان داد که فلوم با گلوگاه ترکیبی مثلثی - مستطیلی در دبی‌های کم زودتر از فلوم دوزنقه‌ای - مستطیلی مستغرق شده و در دبی‌های بالا برعکس می‌باشد. مقایسه اشکل پایین دست یکی از فلوم‌های دوزنقه‌ای - مستطیلی در دو موقعیت وسط فلوم و انتهای فلوم نشان داد که آستانه استغراق اندازه - گیری شده در وسط فلوم آستانه استغراق واقعی می‌باشد و موقعیت قرارگیری سازه در طول آبراهه تأثیری روی نتایج ندارد. با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و همچنین استفاده از نظریه‌ی خود تشابهی ناقص دو رابطه تجربی برای آستانه استغراق هر دو نوع فلوم ارائه شد. تحلیل‌های آماری نشان داده که این دو رابطه با دقت خوبی توانسته

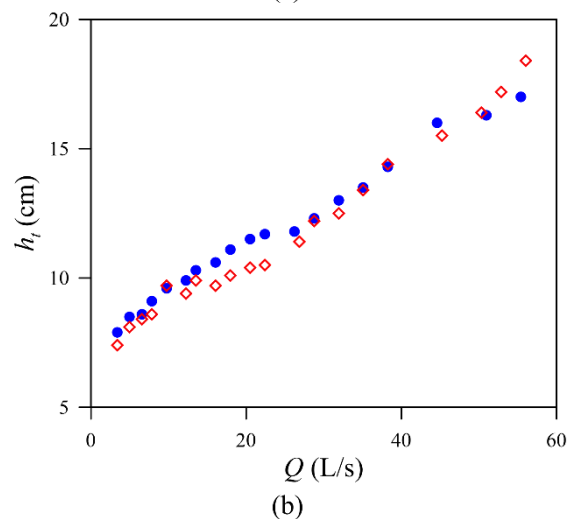
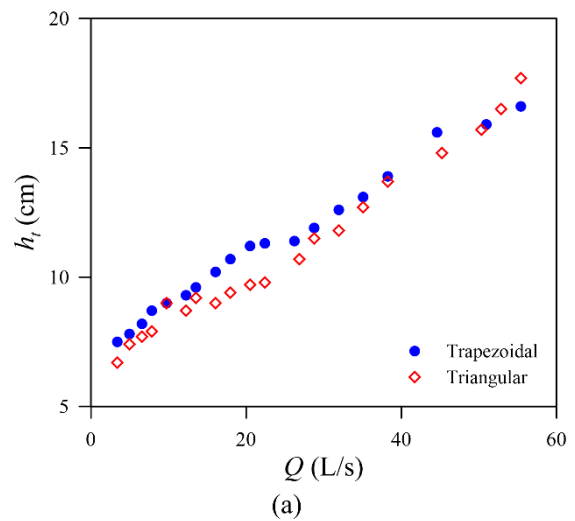


Fig. 10 Comparing the discharge- tailwater depth in the both combined cross-section flumes

شکل ۱۰ مقایسه دبی - عمق پایاب در هر دو نوع فلوم با مقطع ترکیبی

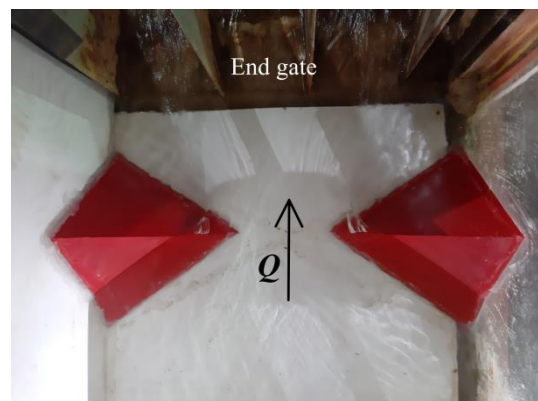


Fig. 11 Installation of a trapezoidal-rectangular flume ($a = 10$ cm, $P = 20$ cm) at the bottom end of the laboratory channel.

شکل ۱۱ نصب فلوم دوزنقه‌ای - مستطیلی ($a = 10$ cm, $P = 20$ cm) در انتهای پایین دست آبراهه آزمایشگاهی

tests. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(2), 278-291.

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), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001005](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001005).

Das, R., Nayek, M., Das, S., Dutta, P. & Mazumdar, A. (2017). Design and analysis of 0.127 m (5") Cutthroat flume. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3), 295-303.

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. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 93-104.

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

Fritz, H.M. & Hager, W.H. (1998). Hydraulics of embankment weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(9), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:9\(963\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:9(963)).

Hager, W.H. & Schwalt, M. (1994). Broad-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 13-26.

Khastar-Borujeni, M. & Samadi-Borujeni, H. (2012). Hydraulic Flow Characteristics in Rotating Flume using the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). *Journal of Hydraulics*, 7(2), 77-85. (In Persian)

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>.

Kolavani, F.L., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V. & Mazdeh, A.M. (2018). Flow measurement using circular portable flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 76-83.

Manekar, V.L., Porey, P.D. & Ingle, R.N. (2007). Discharge relation for cutthroat flume under free-flow condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(5), 495-499.

Parshall, R.L. (1950). *Measuring water in irrigation channels with Parshall flumes and small weirs*, PhD Thesis, Colorado State University.

Potter, M.C., Wiggert, D.C. & Ramadan, B.H. (2012). *Mechanics of fluids SI version*. Cengage learning.

است نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرده و بالای ۸۰ درصد از پیش‌بینی‌ها دارای خطایی کمتر از ۵ درصد می‌باشند.

۵- فهرست نشانه‌ها

| | |
|-------|---------------------------|
| a | عرض کف دوزنقه (m) |
| B | عرض فلوم (m) |
| g | شتاب ثقل (ms^{-2}) |
| h | عمق آب بالادست (m) |
| h_t | عمق آب پایین دست (m) |
| P | ارتفاع فلوم‌ها (m) |
| Q | دبی (m^3s^{-1}) |
| Z | شیب یال دوزنقه و مثلث (-) |

نشانه‌های یونانی:

| | |
|--------|----------------------------------|
| ρ | چگالی (kgm^{-3}) |
| μ | لزجت پویایی ($kgm^{-1}s^{-1}$) |

۶- سپاسگزاری

از مسئولان و کارشناسان سازمان آب و برق خوزستان برای فراهم کردن شرایط آزمایشگاهی این تحقیق قدردانی می‌شود.

۷- 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>.

Azimi, A.H., Rajaratnam, N. & Zhu, D.Z. (2014). Submerged flows over rectangular weirs of finite crest length. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000728](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000728).

Barenblatt, G.I. (1987). *Dimensional Analysis*. CRC Press.

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>

Blaisdell, F.W. (1994). Results of Parshall flume

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/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101919>.

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), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001442](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001442).

Ramamurthy, A.S. & Tadayon, R. (2008). Numerical simulation of flows in cut-throat flumes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6), 857-860.

Saki, M.J., Taleb beydokhti, N., Vaseli, N. & Zand Parsa, S. (2016). Performance of Long Throated Flume and Modification of Broad Crested Weir to Improve the Measurement Accuracy. *Journal of Hydraulics*, 11(2), 33-42. (In Persian)

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

Skogerboe, G.V., Bennett, R.S. & Walker, W.R. (1972). Generalized discharge relations for cutthroat flumes. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 98(4), 569-583.

Temeepattanapongsa, S., Merkley, G.P., Barfuss, S. L. & Smith, B.L. (2013). Generic free-flow rating for cutthroat flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(7), 727-735.

Vatankhah, A.R. (2017). Discussion of “New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume” by Francesco Giuseppe Carollo, Costanza Di Stefano, Vito Ferro, and Vincenzo Pampalone. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), 07017011, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001202](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001202).

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), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001580).

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

Weber, R.C., Merkley, G.P., Skogerboe, G.V. & Torres, A.F. (2007). Improved calibration of Cutthroat flumes. *Irrigation Science*, 25, 361-373.

White, F.M. (1990). Fluid mechanics. New York.

Xiao, Y., Wang, W., Hu, X. & Zhou, Y. (2016). Experimental and numerical research on portable short-throat flume in the field. *Flow Measurement and Instrumentation*, 47, 54-61.

Yarahmadi, N. & Vatankhah, A. R. (2021).