

Experimental Study of Submerged Discharge Reduction Factor in Arched Gabion Weirs

Mehrdad Pirzad¹, Mohammad Hosein Purmohammadi², Hossein Ghorbanizadeh Kharazi^{3*},
Mohsen Solimani Babarsad³, Ehsan Derikvand³

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

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

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

* h.ghorbanizadeh@gmail.com

Received: 29 October 2023

Accepted: 20 January 2024

Discussion: 22 June 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Weirs are usually made of impermeable materials such as concrete. These impermeable structures prevent the longitudinal movement of aquatic organisms and physical and chemical substances in the water, thereby preventing sediment accumulation behind the weir and negative impacts on the water ecosystem (Mohamed, 2010). According to the Francis equation, increasing the discharge coefficient or the effective length of the weir can enhance its hydraulic performance (Crookston, 2012). Various studies have been conducted on impermeable weirs. Using an arc-shaped and zigzag plan can increase the effective length of the weir, thereby improving its performance. The main idea of this research was to study the performance of a porous weir with an arc-shaped plan. Firstly, due to its porous nature, the weir increases the discharge coefficient (due to the presence of flow through and over it). Secondly, the arc-shaped plan increases the effective length of the weir, resulting in significant enhancing of the hydraulic performance. The flow through and over the weir and their mutual effects combine flow within an open channel and a porous medium, significantly increasing the subject's complexity.

This research aims to experimentally analysis the discharge reduction factor (*DRF*) in submerged flow conditions in a porous weir with an arc-shaped plan under different hydraulic and geometric conditions.

Methodology: In the present study, two impermeable weir models of plexiglass were compared with corresponding porous weir models, and four porous weir models were constructed. The stone materials used in the porous weirs included five sizes ranging from approximately 7.13 to 31.75 mm in diameter, which were uniform and sharp-edged. In this research, various weir models were tested at different flow rates, and a total of 1704 experiments were conducted in the submerged flow condition and analyzed. To achieve this, the gate at the end of the flume was used to gradually increase the depth of submergence by reducing the gate opening, and the results were obtained for different submergence depths.

As the weir became submerged, the water depth upstream was influenced by the downstream depth. The discharge through the weir in submerged flow conditions was smaller than the discharge in free flow conditions, and it is usually extracted using a discharge reduction factor

from the free flow discharge as follows:

$$Q_s = DRF \times Q \rightarrow DRF = \frac{Q_s}{Q} \quad (1)$$

The first step in the dimensional analysis is identifying the potential parameters affecting the hydraulic flow in a submerged arc porous weir. A general relationship consisting of dimensionless parameters has been derived by dimensional analysis and based on previous studies. This study neglected the number of weirs with a flow depth greater than 3 cm, considering the range of hydraulic conditions and flow depth over the weir (Horton, 1907; Novak & Cabelka, 1981). Although the flow conditions in this study were turbulent, the Reynolds number (Re) was used as an effective parameter in the relationship for the discharge reduction factor (DRF) based on the correlation between DRF and Reynolds number and by the studies by Mohamed (2010). Therefore, the final relationship for DRF can be simplified as follows.

$$DRF = f(\xi, L_c/L_{Arc}, Re, d_{50}/P, n) \quad (2)$$

Results and Discussion: With an increase in flow rate, the value of the DRF decreases with a steep slope. At lower flow rates, the slope of the DRF is steep and gradually decreases with increasing flow rates. In the submerged condition, the discharge coefficient reduces the free-state coefficient by up to 68 percent. In other words, the discharge coefficient in the submerged condition is 68 percent less than the corresponding free-flow discharge coefficient. By increasing the materials' size, the DRF 's value decreases, and the model becomes submerged earlier. Comparing the results of each model with the corresponding solid model, it is evident that impermeable weirs have less sensitivity to lower depths and take longer to become submerged compared to porous weirs. The results indicate that the linear porous weir model becomes submerged later and is less sensitive to lower depths than arc-shaped models. Despite the similar values, comparing arc-shaped models shows that with an increase in arc length, the sensitivity of the weir to submergence decreases.

With an increase in flow rate, the DRF increases. With an increase in flow rate, the head over the weir crest increases, meaning the energy over the weir crest has increased. With increased energy over the crest, more energy is required for the weir to become submerged. Therefore, the weir becomes submerged at a greater depth and less sensitive to the submergence depth. The equation derived using the SPSS model has statistical parameter values of $R^2 = 0.78$, $RMSE = 0.074$, and $MAE = 0.068$. Furthermore, the equation derived using the GEP model has statistical parameter values of $R^2 = 0.95$, $RMSE = 0.035$, and $MAE = 0.027$.

Conclusion: In comparison with impermeable models, porous models consistently have a lower DRF . In impermeable models, the DRF decreases as the size of the materials increases. As the intensity of flow increases, the reduction in the DRF decreases. The results show that the discharge coefficient in the submerged condition is at most 68% less than the corresponding free condition. The study of the effect of arc shape on the DRF showed that the linear porous weir model becomes submerged later compared to models with arc and has less sensitivity to lower depths. The accuracy of the extracted relationship based on the GEP model is more suitable. It predicts about 95% of the data with an error of less than 10%.

Keywords: Porous arc-shaped weir, discharge reduction factor, submerged flow, gene expression programming

مطالعه آزمایشگاهی ضریب کاهش دبی جریان مستغرق در سرریزهای گابیونی قوسی

مهرداد پیرزاد^۱، محمدحسین پورمحمدی^۲، حسین قربانی زاده خرازی^{۳*}، محسن سلیمانی بابرصاد^۲، احسان دریکوند^۳

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

* h.ghorbanizadeh@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: سرریزهای گابیونی سازه‌های دوست‌دار محیط زیست هستند که با افزایش هوادهی و واکنش‌های هوزی، حداقل اثرات منفی بر محیط زیست وارد می‌کنند. هدف این تحقیق بررسی آزمایشگاهی ضریب کاهش دبی جریان مستغرق در سرریز متخلخل با پلان قوسی در شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف است. برای این منظور ۴ مدل مختلف سرریز گابیونی قوسی و خطی و ۲ مدل سرریز نفوذناپذیر قوسی و خطی در یک فلوم آزمایشگاهی افقی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۰، ۰/۵۹۳ و ۰/۵ متر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای دامنه وسیعی از دبی، اندازه مصالح، و زاویه قوس مختلف انجام گرفت. نتایج نشان داد سرریز قوسی حساسیت بیشتری نسبت به عمق پایین دست دارد. همچنین با افزایش اندازه مصالح، سرریز زودتر مستغرق می‌شود. مقدار ضریب دبی حالت آزاد این سرریزها بین ۰/۴۷ تا ۱/۳۷ می‌باشد که با افزایش اندازه مصالح و طول قوس افزایش می‌یابد. مقدار کاهش دبی برای این سرریزها حداکثر ۶۸ درصد بوده است. در نهایت، با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته و استفاده از رگرسیون چند متغیره غیر خطی و همچنین بر مبنای روش محاسبه نرم الگوریتم بیان ژن روابطی برای محاسبه ضریب کاهش دبی در حالت مستغرق استخراج شد. دقت رابط استخراج شده با استفاده از روش الگوریتم بیان ژن مناسب‌تر از روش رگرسیون چند متغیره غیر خطی است.

کلید واژگان: سرریز متخلخل قوسی، ضریب کاهش دبی، جریان مستغرق، الگوریتم بیان ژن.

۱- مقدمه

اثرگذاری‌های منفی‌ای بر محیط زیستی و منظره‌های طبیعی دارد. سرریزها به طور معمول از جنس مصالح صلب نفوذناپذیر مانند بتن ساخته می‌شوند. این بدنه‌های نفوذناپذیر از حرکت طولی موجوده‌های آبی، مواد فیزیکی و شیمیایی در آب جلوگیری کرده و در نتیجه باعث انباشتگی رسوب پشت سرریز و اثرگذاری‌های منفی بر بوم سامانه آب شوند (Mohamed, 2010). محققان در سال‌های اخیر برای حذف این تأثیرات زیان‌بار و همچنین تغییر نیافتن منظره‌های طبیعی سعی در استفاده از مصالح طبیعی ارزان قیمت و در

سازه‌های ساخته شده از توری فلزی و سنگ (گابیون) در زمینه‌های مختلف مهندسی آب مانند سرریزهای پلکانی برای استهلاک انرژی، آبشکن‌ها و سازه‌های کنترل فرسایش کف و کناره رودخانه، و سدها تأخیری برای کنترل سیلاب استفاده شده‌اند. مهندسان در دهه اخیر در تلاشند در کنار ساخت و سازها، تا حد امکان طبیعت و منظره‌های طبیعی را دستخوش تغییر قرار ندهند. استفاده از سازه‌های بتنی سخت و فشرده باعث مختل شدن تردد آبریان به ویژه در رودخانه و آبراهه‌های طبیعی شده و

جریان در بالادست و پایین دست سرریز، تخلخل، قطر ذرات پشته سنگریزه‌ای، طول سرریز و غیره می‌باشد. (Kohji et al. (2007) بررسی‌هایی آزمایشگاهی در زمینه جریان روی سرریزها و آبشکن‌های سنگریزه انجام دادند. یافته‌های آنان نشان داد که تغییرپذیری‌های جرم و مومنتم بین جریان اصلی و جریان در محیط متخلخل پیرامون زاویه‌های بالادست و پایین دست سرریز و آبشکن غالب بوده و همچنین خطوط جریان به سرعت منقبض می‌شدند. (Leu et al. (2008) جریان آشسته در پیرامون یک پشته سنگریزه‌ای در کف یک آبراهه با جریان آزاد را بررسی کرد. آنان ۳ مدل با تخلخل‌های ۰، ۳۴/۹ و ۴۷/۵ درصد را بررسی کرده و نشان دادند که برای سازه‌های متخلخل ناحیه چرخش در جهت پایین دست به دلیل عبور جریان از درون سرریز طولانی تر می‌شود.

از جمله پژوهش‌های اخیر در زمینه جریان بر روی سرریز تورسنگ توسط (Mohamed (2010) را می‌توان نام برد. در این پژوهش با انتخاب ۲ مدل سرریز تورسنگ مستطیلی و ۲ مدل سرریز بتنی با همان هندسه برای مقایسه، به بررسی عملکرد سرریز تورسنگ پرداخته شده و در نهایت رابطه‌هایی برای پیش‌بینی دبی این سرریز در شرایط آزاد و مستغرق ارائه شد. (Salmasi and Taghi Sattari (2017) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای تورسنگ لبه پهن را در شرایط آزاد و مستغرق به صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی کرد. در نهایت با استفاده از مدل M5 به استخراج رابطه‌های برای ضریب دبی در شرایط آزاد و مستغرق پرداختند. (Mohammadpour et al. (2013) به مدلسازی عددی جریان بر روی سرریز لبه پهن متخلخل پرداختند. آنان در مدلسازی خود از مدل‌های آشفتگی مختلف استفاده کردند و در نهایت نتایج نشان داد که مدل k-ε دارای دقت مناسب‌تری برای مدلسازی این نوع سرریز است. در این تحقیق الگوی جریان در مجاور این نوع سرریز بررسی و ارزیابی شد. (Fathi-moghaddam et al. (2018) با استفاده از مدل عددی Flow3D به بررسی الگوی جریان و همچنین عملکرد هیدرولیکی سرریزهای متخلخل با ساختار دوزنقه و مثلثی در شرایط جریان آزاد پرداختند. در این تحقیق همچنین بر روی استهلاک انرژی

دسترس دارند. در این میان سرریزهای متخلخل با داشتن ویژگی‌هایی همچون پایداری (نداشتن نیروی زیر فشار و جوشش پایین دست)، صرفه اقتصادی (استفاده از مصالح در دسترس و طبیعی)، نفوذپذیری و انعطاف‌پذیری در برابر نیروهای وارده از طرف آب، جایگزین مناسبی برای سرریزهای با بدنه نفوذناپذیر می‌باشند (Fathi-moghaddam et al., 2018; Rahmanshahi and shafai bejestan, 2020, 2024). این نوع سازه‌ها به گفته (Chanson (2006) در شمار سازه‌های توصیه شده و ارزنده برای بررسی و ارزیابی‌های آینده می‌باشند. این نوع سازه‌ها با هوادهی بیشتر باعث فعالیت ریزموجودهای هوازی و در نتیجه بالا بردن توان خودپالایی رودخانه می‌شوند. بالا بردن توان خودپالایی باعث پالایش آب و حذف بوی بد در آبراهه‌هایی می‌شود که به ویژه فاضلاب به آنان تخلیه می‌شود (Mohamed, 2010; Fathi-moghaddam et al., 2018).

تاکنون تحقیقات پرشماری روی جریان درون توده‌های سنگریزه‌ای و تورسنگ صورت گرفته است، اما در بیشتر این تحقیقات عمق جریان بالادست کمتر از ارتفاع تاج سرریز بوده و برهمکنش بین جریان درون گذر و روگذر و اثرگذاری‌های آنان بر هم کمتر توجه شده است. (Kells (1993) جریان متغیر تدریجی از روی بند سنگریزه‌ای را برای دو شرایط جریان مختلف شامل ریزش جزئی و کامل از روی بند را بررسی کرد. (Kells (1994) همچنین نشان داد که نسبت گذر جریان از درون بند سنگریزه‌ای به گذر جریان از روی آن در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵ می‌باشد.

(Maeno et al. (2002) به منظور بررسی ویژگی‌های نیروی نشت جریان عبوری از سرریز سنگریزه‌ای، حاصل ضرب گرادیان هیدرولیکی در واحد وزن آب را در هر نقطه از سرریز محاسبه کردند. نتایج آنان نشان داد که در دبی‌های کم به‌غیر از لبه‌ی پایاب سرریز جهت نیروی نشت تا حدودی موازی کف آبراهه بوده و در دبی‌های زیاد نیروی نشت به نسبت بزرگ ایجاد می‌شود. (Michioku et al. (2005) هیدرودینامیک یک پشته قلوه‌سنگی را به صورت نظری و آزمایشگاهی بررسی کرد. با انجام یک تحلیل یک‌بعدی بر روی جریان یکنواخت دائمی از میان سرریز توصیف کردند که دبی تابع فراسنجه‌هایی مانند عمق

با طرح قوسی در شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف است. در ادامه این ضریب در سرریز متخلخل با سرریز نفوذناپذیر متناظر آن مقایسه شده است. همچنین با بسط فراسنجه‌های مختلف و استفاده از تحلیل ابعادی و همچنین استفاده از مدل‌های محاسبه‌های نرم، رابطه‌های ریاضی برای استفاده مهندسان در طراحی سرریز در شرایط جریان مستغرق ارائه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدلسازی آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی افقی و مستطیل شکل به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۵، ۰/۵۹۳ 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 دریچه 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 سرریز از عمق سنج با دقت ۰/۲ میلی‌متر روی فلوم استفاده شد. برای ساخت سرریزهای متخلخل بدنه مدل از میله فلزی با قطر ۴ میلی‌متر برای ایجاد پایداری و بستن توری به دور سرریز ساخته شد. در این تحقیق ۲ مدل سرریز نفوذناپذیر از جنس پلگسی‌گلاس متناظر با سرریز متخلخل به‌منظور مقایسه نتایج و ۴ مدل سرریز متخلخل ساخته شده است. شکل ۱ چند نمونه از مدل‌های سرریز قوسی نفوذپذیر (تورسنگ) و نفوذناپذیر (صلب) استفاده‌شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهند، همچنین جزئیات هندسی و نام اختصاری مربوط به مدل‌های ساخته‌شده در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به هدف این تحقیق که به‌دست آوردن ضریب کاهش دبی در حالت جریان مستغرق است. برای این منظور با استفاده از دریچه انتهایی فلوم با کم کردن میزان باز شدگی دریچه عمق پایاب را کم‌کم افزایش داده و نتایج برای استغراق‌های مختلف برداشت شد. در شکل ۲ طرح

و میزان جریان درون‌گذر و روگذر بحث شد. Safarzadeh and Mohajeri (2019) به مدلسازی عددی سرریز لبه پهن در شرایط آزاد پرداختند و رابطه‌هایی برای محاسبه ضریب دبی در شرایط آزاد ارائه دادند. در این تحقیق با استفاده از مدل عددی نسبت جریان درون‌گذر به کل جریان در شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف به‌دست آمد. با استفاده از مدلسازی‌های مختلف رابطه‌های جدیدی برای محاسبه ضریب دبی با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی استخراج شد.

Hasanian et al., (2023) به بررسی تأثیر انسداد بالادست سرریز متخلخل ناشی از نشست رسوبات و آوردهای آبراهه بر ضریب دبی پرداختند. (Rahmanshahi et al. (2024) با استفاده از مدل‌های محاسبه‌های نرم، به پیش‌بینی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای متخلخل دوزنقه‌ای پرداختند. تحقیق آنان نشان داد با استفاده از این مدل‌ها می‌توان با دقت مناسبی، ضریب دبی حالت آزاد، آستانه استغراق و ضریب کاهش دبی جریان مستغرق را پیش‌بینی کرد.

با توجه به رابطه فرانسویس $Q = CLH^{1.5}$ برای افزایش عملکرد هیدرولیکی سرریزها می‌توان ضریب دبی و یا طول مؤثر سرریز را افزایش داد (Crookston, 2012). تاکنون کارهای مختلفی در این زمینه در سرریزهای نفوذناپذیر انجام شده است. استفاده از طرح و نقشه قوسی و زیگزاگی با توجه به اینکه طول مؤثر سرریز را افزایش می‌دهد باعث افزایش عملکرد این سرریزها می‌شود. نظر و دیدگاه اصلی این تحقیق این بوده است که سرریز متخلخل با طرح قوسی به دلیل متخلخل بودن ضریب دبی را زیاد می‌کند (به دلیل داشتن جریان درون‌گذر و روگذر)، ضمن اینکه طرح قوسی طول مؤثر سرریز را زیاد کرده و عملکرد هیدرولیکی قابل توجهی خواهد داشت. ترکیب جریان درون‌گذر و روگذر و تأثیر متقابل آنان ترکیبی از جریان درون‌آبراهه باز و جریان در محیط متخلخل می‌باشد که درجه‌ی پیچیدگی این موضوع را چندین برابر می‌کند لذا شناخت اصول هیدرولیکی حاکم بر آن نیازمند انجام آزمایش بر روی مدل فیزیکی است.

هدف کلی از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی ضریب کاهش دبی در شرایط جریان مستغرق در سرریز متخلخل

مستغرق انجام و تجزیه و تحلیل لازم صورت گرفته است.

۲-۲- تحلیل ابعادی

در این قسمت تحلیل ابعادی برای یافتن فراسنجه‌های بدون بعد مؤثر بر سرریز متخلخل قوسی در شرایط جریان مستغرق به کار برده شده است. شکل کلی رابطه دبی در سرریزها در شرایط جریان آزاد به صورت رابطه (۱) بوده

سرریز و فلوم مورد استفاده و در شکل ۳ کلیه سرریزهای متخلخل مورد بررسی و ارزیابی نمایش داده شده است. مصالح سنگی مورد استفاده در سرریزهای متخلخل برابر شکل ۴ شامل ۵ اندازه مختلف با قطر تا حدودی یکنواخت و تیز گوشه در محدوده ۷/۱۳ تا ۳۱/۷۵ میلی‌متر می‌باشند. در این تحقیق همه سرریزها در دبی‌های مختلف آزمایش شده و در مجموع ۱۷۰۴ آزمایش در حالت

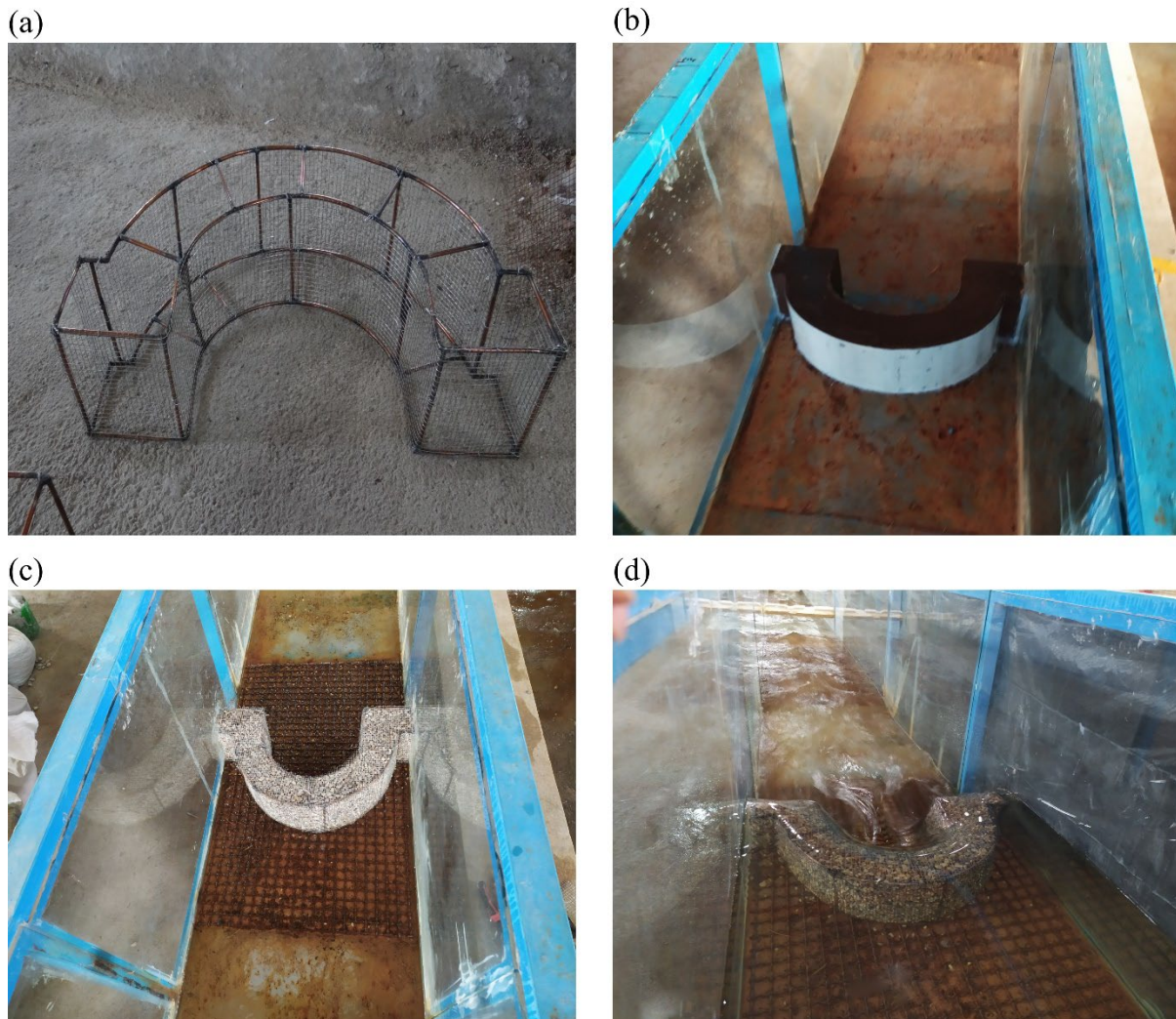


Fig. 1. Several examples of experimental models used in this research
شکل ۱ چند نمونه از مدل‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

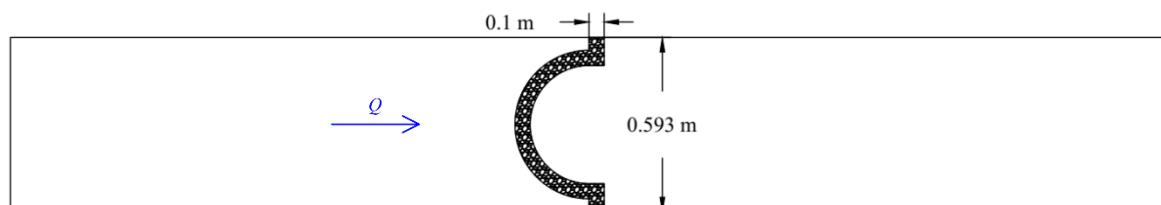


Fig. 2. The arced plan placed in the channel
شکل ۲ سرریز با طرح و نقشه قرار داده شده در آبراهه

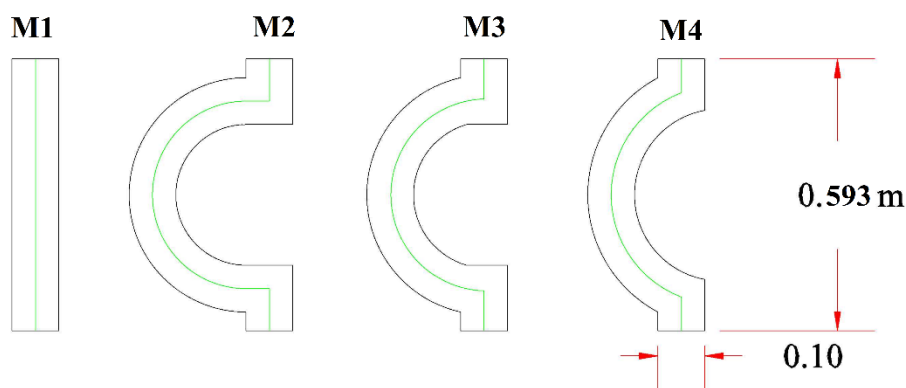


Fig. 3. illustrates the geometric plan of the weir models used in this research

شکل ۳ طرح هندسی مدل سرریزهای استفاده شده در این تحقیق



Fig. 4. Materials utilized for constructing porous weirs

شکل ۴ مصالح استفاده شده برای ساخت سرریزهای متخلخل

جدول ۱ جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی

Table 1 The details of the experimental models

Models	L_c (m)	P (m)	W (m)	Q (L/s)	L_{Arc} (cm)	d_{50} (mm)	n (%)
PW-M1				10.36 - 64.88	60	7.13,	
PW-M2				14.80 - 64.25	92.13	11.10,	54, 46,
PW-M3	0.1	0.16	0.593	14.80 - 64.25	81.45	15.87,	44, 47,
PW-M4				10.36 - 64.88	71.97	22.22,	56
						31.75	
SW-M1	0.1	0.16	0.593	7.19 - 64.88	60	-	-
SW-M2				3.39 - 64.88	81.45		

بالادست سرریز است.

با مستغرق شدن سرریز، عمق آب بالادست سرریز تحت تأثیر عمق پایین دست قرار می‌گیرد. دبی گذرنده از سرریز در حالت جریان مستغرق Q_s کوچکتر از دبی حالت آزاد Q است و به طور معمول با یک ضریب کاهش از دبی حالت آزاد به صورت رابطه زیر استخراج می‌شود.

که در آن دبی و ضریب دبی در ارتباط هستند. تأثیر دیگر فراسنجه‌های هیدرولیکی و هندسی در ضریب دبی محاسبه می‌شود.

$$Q = C_d W \sqrt{2gH}^{1.5} \quad (1)$$

که در آن g شتاب ثقل، H انرژی کل بالادست که در آن $(H = h + v^2 / 2g)$ ، h هد آب روی سرریز، و v سرعت

$$DRF = f(\xi, L_c/L_{Arc}, R_e, d_{50}/P, n, W) \quad (5)$$

که در آن عدد بدون بعد $\xi = \left(\frac{h_t}{h} \right) - \left(\frac{h_{ML}}{h} \right) / \left(1 - \left(\frac{h_{ML}}{h} \right) \right)$ به صورتی تعریف شده است که برای عمق‌های پایین دست مختلف مقداری بین صفر و یک داشته باشد. در این رابطه‌ها W عدد وبر و Re عدد رینولدز جریان در بالادست سرریز (محل اندازه‌گیری h) می‌باشند. در این تحقیق با توجه به محدوده شرایط هیدرولیکی و عمق جریان روی سرریز که بیشتر از ۳ سانتی‌متر است از عدد وبر صرف‌نظر شده است (Horton, 1907; Novak & Cabelka, 1981). اگرچه در این تحقیق شرایط جریان آشفته است، با توجه به همبستگی DRF به عدد رینولدز و همچنین بنابر نتایج بررسی‌های (Mohamed (2010) عدد رینولدز به عنوان یک فراسنجه مؤثر در رابطه استخراج شده برای ضریب DRF استفاده شده است. بنابراین رابطه نهایی DRF به صورت رابطه (۵) ساده می‌شود. در جدول ۲ محدوده متغیرهای بدون بعد رابطه ۵ در این تحقیق نمایش داده شده است.

$$DRF = f(\xi, L_c/L_{Arc}, R_e, d_{50}/P, n) \quad (5)$$

جدول ۲ محدوده متغیرهای بدون بعد

Table 2 The dimensionless variables range

Range	Independent dimensionless variables				
	L_c/L_{Arc}	ξ	$R_e \times 10^{-4}$	n	d_{50}/P
Min	0.108	1	1.75	0.44	0.045
Max	0.169	0	10.94	0.56	0.198

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ضریب دبی جریان آزاد

اگرچه هدف اصلی این تحقیق بررسی ضریب کاهش دبی در حالت مستغرق است، با توجه به اینکه ضریب دبی حالت مستغرق از حاصلضرب ضریب دبی حالت آزاد و ضریب کاهش دبی محاسبه می‌شود، در این بخش ضریب دبی سرریزهای مختلف در حالت آزاد ارائه شده است. در شکل ۵ ضریب دبی سرریزهای مختلف برای ۵ دانه بندی این تحقیق مقایسه شده‌اند. برابر این شکل با افزایش نسبت H/P ضریب دبی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول قوس، ضریب دبی افزایش یافته است. مقدار ضریب دبی حالت آزاد برابر شکل بین ۰/۴۷ تا ۱/۳۷ می‌باشد.

$$Q_s = DRF \times Q \rightarrow DRF = \frac{Q_s}{Q} \quad (2)$$

که در آن DRF ضریب کاهش دبی حالت مستغرق است. کام اول در تحلیل ابعادی شناخت فراسنجه‌های احتمالی مؤثر بر هیدرولیک جریان در سرریز متخلخل قوسی در حالت مستغرق است. فراسنجه‌های مؤثر بر هیدرولیک سرریز قوسی متخلخل در شرایط جریان مستغرق به صورت رابطه (۳) می‌باشند. قابل یادآوری اینکه در این تحقیق از مصالح با دانه‌بندی تا حدودی یکنواخت استفاده شده، بنابراین تنها قطر میانگین مصالح در تحلیل ابعادی توجه شده است.

(3)

$$f(h, L_c, L_{Arc}, P, v, g, \sigma, \rho, \mu, d_{50}, n, h_t, h_{ML}) = 0$$

در این رابطه L_c طول تاج سرریز، L_{Arc} طول خط مرکزی تاج سرریز (در شکل ۲ با رنگ سبز مشخص شده است)، P ارتفاع سرریز، σ کشش سطحی، ρ جرم واحد حجم مایع، μ لزجت دینامیکی، d_{50} قطر میانگین معرف مصالح سنگی، n تخلخل مصالح سنگی، h_t عمق پایاب در شرایط استغراق و h_{ML} عمق پایاب در شرایط آستانه استغراق است.

با تجزیه و تحلیل ابعادی و همچنین بنابر نتایج بررسی‌های پیشین (Hager & Schwalt, 1994; Fritz & Hager, 1998)، با استفاده از روش پی باکینگهام با در نظر گرفتن فراسنجه‌های تکراری μ ، h و g رابطه‌ای کلی شامل فراسنجه‌های بدون بعد در آغاز به دست آمده و پس از آن با استفاده از ترکیب فراسنجه‌های بدون بعد در نهایت فراسنجه‌هایی برابر رابطه (۴) استخراج شده است.

(4)

$$DRF = f\left(\frac{h}{P}, \frac{L_c}{h}, \frac{h}{L_{Arc}}, \frac{v}{\sqrt{gh}}, \frac{\sigma}{\mu\sqrt{gh}}, \frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu}, \frac{d_{50}}{h}, n, \frac{h_t}{h}, \frac{h_{ML}}{h}\right)$$

می‌دانیم که می‌توان اعداد بدون بعد را در هم ضرب و یا تقسیم کرد و یا با یک عدد ثابت جمع کرد. بر مبنای این قانون با ترکیب اعداد بدون بعد رابطه ۴، اعداد بدون شناخته شده‌تری به صورت رابطه ۵ استخراج شد.

۳-۲- تأثیر متغیرهای مختلف بر ضریب کاهش

دبی

همان‌طور که در قسمت تحلیل ابعادی بیان شد، به طور معمول دبی حالت مستغرق سرریز را ضریبی کاهش از دبی حالت آزاد در نظر می‌گیرند. در شکل ۶ ضریب دبی حالت آزاد با ضریب دبی حالت مستغرق در دبی‌های مختلف در دو مدل سرریز متخلخل PW - M1، PW - M2 با اندازه ذرات یکسان ۲/۲۲ سانتی‌متر نمایش داده شده است. برابر شکل در هر دو مدل سرریز با افزایش دبی مقدار ضریب دبی با شیب تندی کاهش می‌یابد. در دبی‌های پایین‌تر شیب کاهش ضریب دبی تند بوده و به تدریج با افزایش دبی این شیب کاهش پیدا می‌کند. بر مبنای همین شکل در ادامه تحقیق دبی حالت مستغرق به صورت ضریبی از دبی حالت آزاد در نظر گرفته و بحث در مورد تغییرپذیری‌های ضریب کاهش دبی مستغرق DRF

خواهد بود. برابر این شکل‌ها در حالت استغراق گاهی تا ۶۸ درصد ضریب دبی حالت آزاد را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر مقدار گذر دبی در حالت استغراق ۶۸ درصد کمتر از حالت آزاد متناظر است.

در شکل ۷ تغییرپذیری‌های ضریب کاهش دبی نسبت به C_d در مدل سرریز شماره PW - M2 و PW - M4 با مصالح با اندازه کمنینه (۷/۱۳ میلی‌متر) و بیشینه (۳۱/۷۵ میلی‌متر) نشان داده شده است. بنابر نتایج در هر دو مدل با افزایش اندازه مصالح، سرریز زودتر مستغرق شده و بیشتر تحت تأثیر پایین‌دست قرار می‌گیرد. قابل یادآوری است که خط برازش داده شده بر داده‌ها از معادله ریاضی رابطه (۶) بوده که مقدار ضریب‌های مجهول a و b با استفاده از رگرسیون برای هر مدل محاسبه شده است.

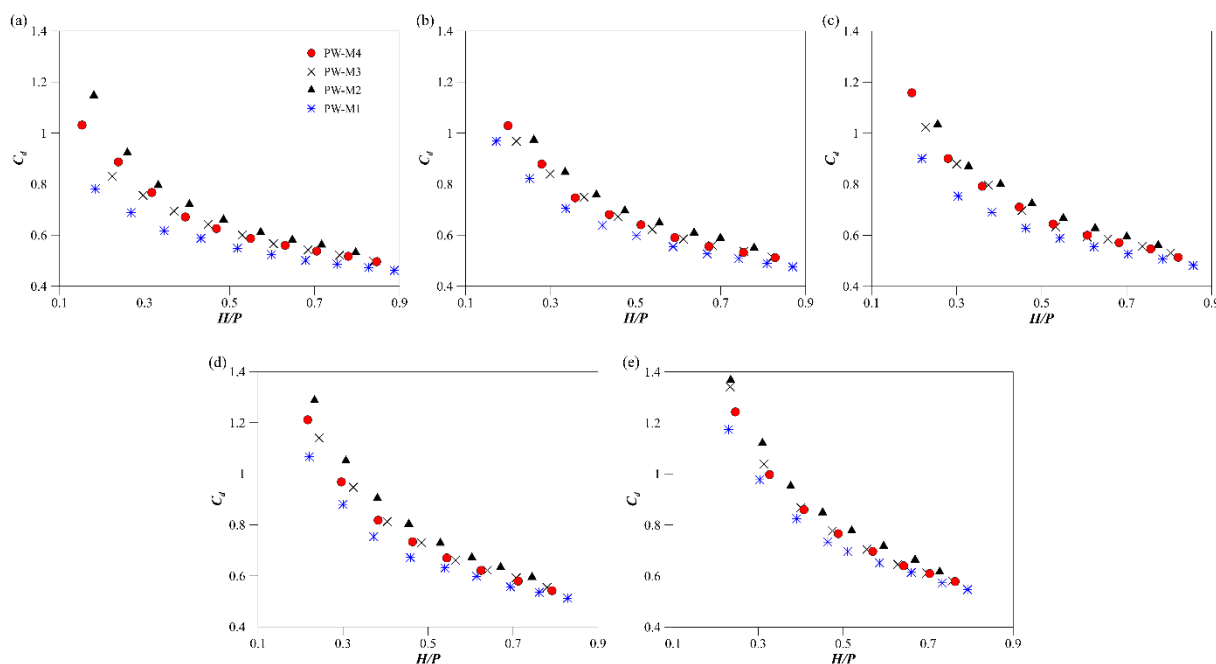


Fig. 5. Variations of free flow discharge coefficient for different weirs and 5 material sizes

شکل ۵ تغییرپذیری‌های ضریب دبی جریان آزاد برای سرریزهای مختلف و ۵ دانه بندی این تحقیق

مستغرق می‌شود. با مقایسه نتایج هر مدل با مدل صلب متناظر، مشخص است که سرریزهای نفوذناپذیر در مقایسه با سرریزهای متخلخل حساسیت کمتری نسبت به عمق پایین‌دست دارند و دیرتر مستغرق می‌شوند.

در شکل ۸ مقدارهای DRF در هر مدل برای سه دانه‌بندی مختلف هم‌زمان با مدل صلب متناظر مقایسه شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد با افزایش اندازه مصالح مقدار ضریب کاهش دبی کاهش یافته و مدل زودتر

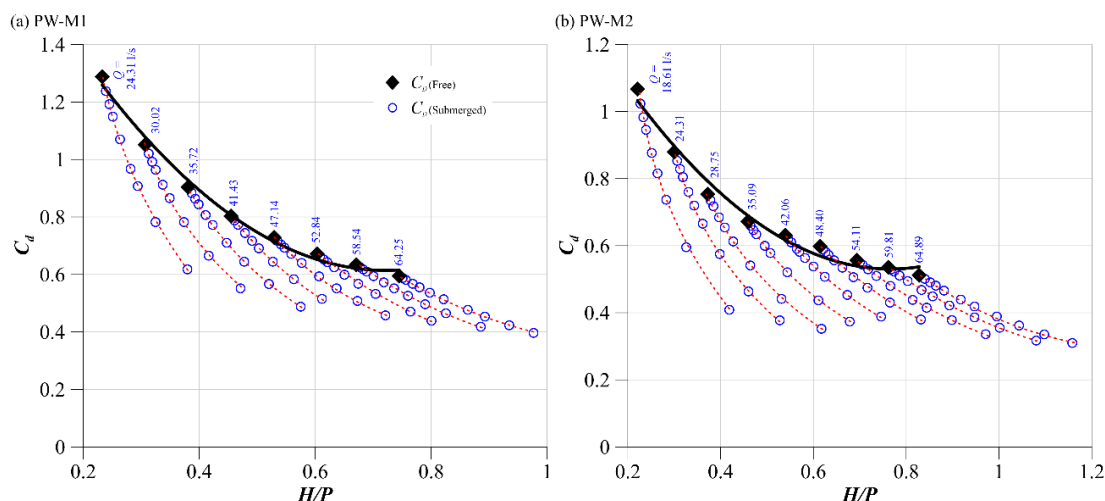


Fig. 6. Comparing the discharge coefficient in free flow condition with the discharge coefficient in submerged flow condition for different flow rates in weirs (a) PW-M1 and (b) PW-M2

شکل ۶ مقایسه ضریب دبی حالت آزاد با ضریب دبی حالت مستغرق برای دبی‌های مختلف در سرریز (a) PW-M1 و (b) PW-M2

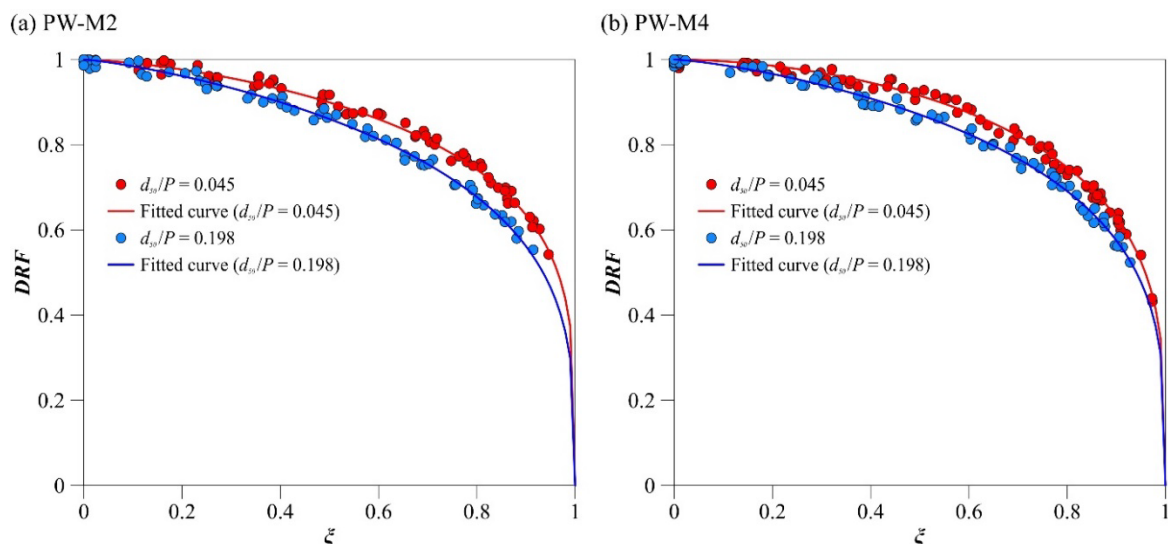


Fig. 7. The effect of grain size on the submergence discharge reduction factor in weirs (a) PW-M2, and (b) PW-M4

شکل ۷ تأثیر دانه‌بندی بر ضریب کاهش دبی مستغرق در سرریزهای (a) PW-M2 و (b) PW-M4

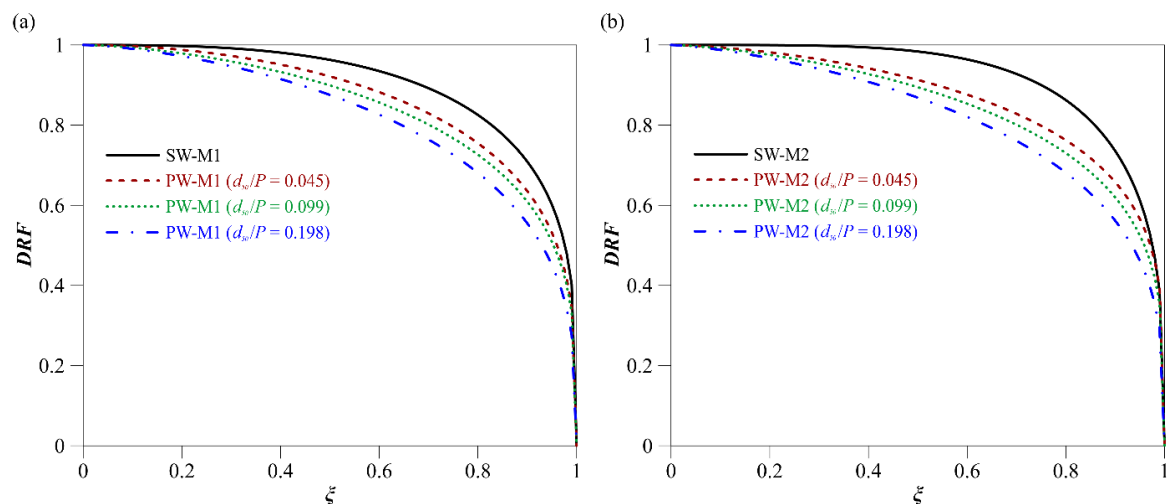


Fig. 8. Comparing the submergence discharge reduction factor for solid and porous weirs with three different grain sizes

شکل ۸ مقایسه ضریب کاهش دبی سرریزهای صلب و متخلخل با سه دانه‌بندی مختلف

خطی نسبت به مدل‌های دارای قوس دیرتر مستغرق شده و حساسیت کمتری به عمق پایین‌دست دارد. با مقایسه مدل‌ها دارای قوس اگرچه مقادارها به هم نزدیک است، با افزایش طول قوس حساست سرریز به استغراق کمتر می‌شود.

در شکل ۹ تأثیر هندسه سرریز با زاویه‌های قوس‌های مختلف بر ضریب کاهش دبی نمایش داده شده است. برای این منظور برای هر ۴ مدل سرریز متخلخل در دو دانه‌بندی مختلف مقادارهای DRF نسبت به ξ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل سرریز متخلخل

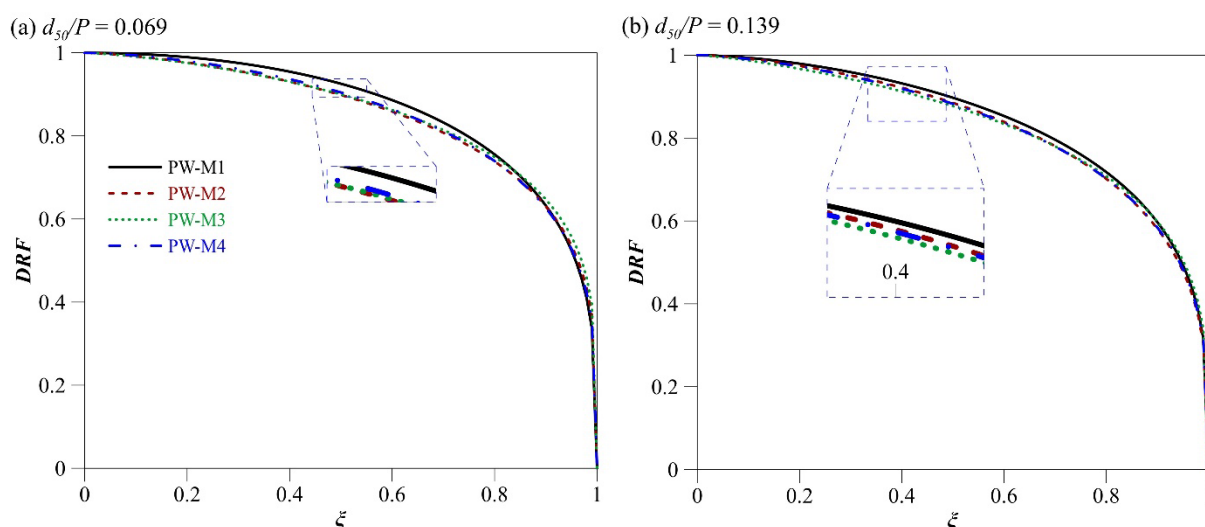


Fig. 9. Comparison of DRF for different weir models in two material sizes (a) 11.1 cm and (b) 22.2 cm
 شکل ۹ مقایسه DRF برای مدل‌های مختلف سرریز در دو دانه‌بندی (a) ۱/۱۱ سانتی متر و (b) ۲/۲۲ سانتی‌متر

افزایش دبی، هد بالادست سرریز افزایش یافته و در واقع انرژی بالادست سرریز زیاد شده است. با افزایش انرژی بالادست، برای مستغرق شدن سرریز، به انرژی پایین‌دست بیشتری نیاز است و بنابراین سرریز در عمق پایاب بیشتری مستغرق شده و به اصطلاح حساسیت کمتری به عمق پایاب دارد.

۳-۳- استخراج رابطه ضریب کاهش دبی

برای استخراج ضریب کاهش دبی مستغرق بر مبنای تحلیل ابعادی صورت گرفته، فراسنجه‌های بدون بعد بر مبنای مقادارهای آزمایشگاهی استخراج شد. سپس بر مبنای دو روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی با استفاده از نرم افزار SPSS یک معادله و بر مبنای روش الگوریتم بیان ژن یک دیگر معادله استخراج شد. در مدل GEP برخلاف روش‌های معمول رگرسیون افزون بر تعیین ضریب‌های ثابت، توابع ریاضی و به طور کلی شکل کلی رابطه نیز توسط مدل انتخاب شده و بنابراین توانایی

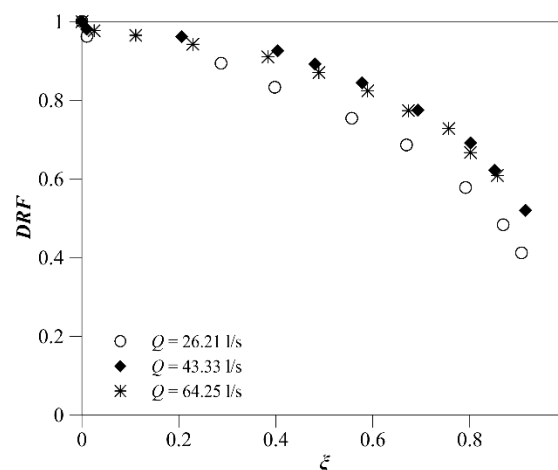


Fig. 10. Variation of DRF for different flow rates in the PW-M2 model and a grain size of $d_{50}/P = 0.198$

شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های ضریب کاهش دبی برای دبی‌های مختلف در مدل PW - M2 و دانه‌بندی $d_{50}/P = 0.198$

در شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های ضریب کاهش دبی برای دبی‌های مختلف ۲۶/۲۱، ۴۴/۳۳ و ۶۴/۲۵ لیتر بر ثانیه برای سرریز PW - M2 نمایش داده شده است. برابر شکل با افزایش دبی، ضریب کاهش دبی افزایش می‌یابد. با

بنابراین با توجه با قابلیت و توانایی مدل GEP، این مدل با دقت بسیار مناسب تری مقادیرهای ضریب کاهش دبی جریان مستغرق را محاسبه می کند. با این وجود رابطه های استخراج شده بر مبنای این مدل به طور معمول پیچیده تر است.

$$DRF = 0.132 \left(\frac{L_c}{L_{Arc}} \right)^{0.48} + 0.88 n^{-0.002} - 0.27 \frac{d_{50}^{0.9}}{P} + 0.8 Re \times 10^{-6} - 0.516 \xi^{3.3} \quad (7)$$

$$DRF = 1 + \frac{9}{Re \times 10^{-4}} \left(\frac{L_c}{L_{Arc}} - 1 \right) \left(\xi \frac{d_{50}}{P} \right) + (n \xi) \left(\xi - \frac{d_{50}}{P} \right)^2 \quad (8)$$

جدول ۳ فراسنجه های تنظیم شده برای مدل GEP

Parameters	Setting of parameters
Function set	+, -, /, ×
Population size	50
Linking function	Addition
Number of gene	2
Mutation rate	0.03
Inversion rate	0.1
One-point recombination rate	0.3
Two-point recombination rate	0.3
Gene recombination rate	0.1
Gene Transposition rate	0.1

بیشتری در برآزش بهترین مدل ریاضی دارد. برای توضیحات بیشتر این مدل به Rahmashahi and Shafai (2020) مراجعه شود. مقادیرهای فراسنجه های در نظر گرفته شده برای این مدل برابر جدول شماره ۳ می باشد. در جدول ۴ آماره های مختلفی برای ارزیابی رابطه های استخراج شده ارائه شده است. در آن DRF^M ضریب دبی مشاهده ای، DRF^C ضریب دبی محاسبه ای و DRF^{Mean} میانگین ضریب دبی مشاهده ای است.

معادله استخراج شده با استفاده از مدل SPSS به صورت رابطه (۷) می باشد. این رابط دارای مقادیرهای فراسنجه های آماری $R^2 = 0.78$ ، $RMSE = 0.074$ ، و $MAE = 0.068$ می باشد. همچنین رابطه استخراج شده بر مبنای مدل GEP به صورت رابطه (۸) می باشد. فراسنجه های آماری این رابطه به صورت $R^2 = 0.95$ ، $RMSE = 0.035$ ، و $MAE = 0.027$ می باشند.

در شکل ۱۱ نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسبه شده DRF نسبت به خط ۴۵ درجه برای هر دو مدل ارائه شده است. نتایج نشان از دقت مناسب رابطه برآزش داده شده بر مبنای مدل GEP دارد. قابل یادآوری است که این رابطه ها بر مبنای فراسنجه های بدون بعد در محدوده جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۱۲ مقدار خطای دو رابطه (۷) و (۸) نمایش داده شده است. بر مبنای شکل a ۱۰ رابطه (۷) حدود ۳۰ درصد از داده ها را با خطای بیشتر از ۱۰ درصد پیش بینی می کند. این در حالی است که رابطه (۸) حدود ۵ درصد از داده ها را با خطای بیشتر از ۱۰ درصد پیش بینی می کند.

جدول ۴ معیارهای آماری محاسبه دقت رابطه های ارائه شده

Table 4 Statistical relationships to calculate the accuracy of the presented relationships

Metric	Equation
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (DRF^M - DRF^C)^2}$
MAPE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ DRF^M - DRF^C }{DRF^M}$
R ²	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (DRF^M - DRF^C)^2}{\sum_{i=1}^n (DRF^M - DRF^{Mean})^2}$

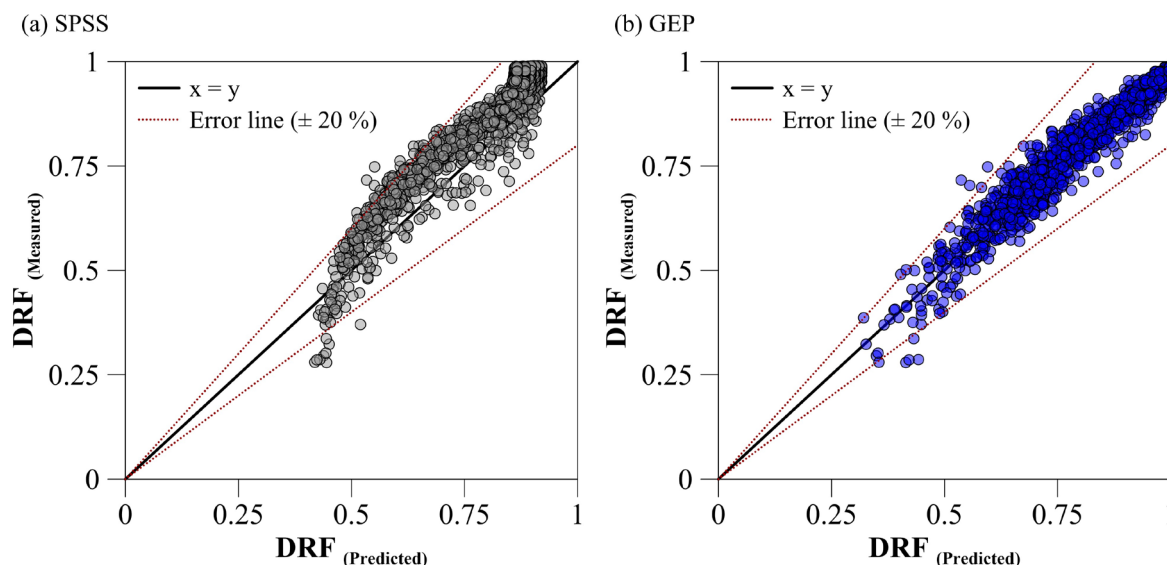


Fig. 11. Comparison between the experimental and calculated values of *DRF* with (a) Eq. (7), and (b) Eq. (8)

شکل ۱۱ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسبه شده *DRF* با (a) رابطه (۷) و (b) رابطه (۸)

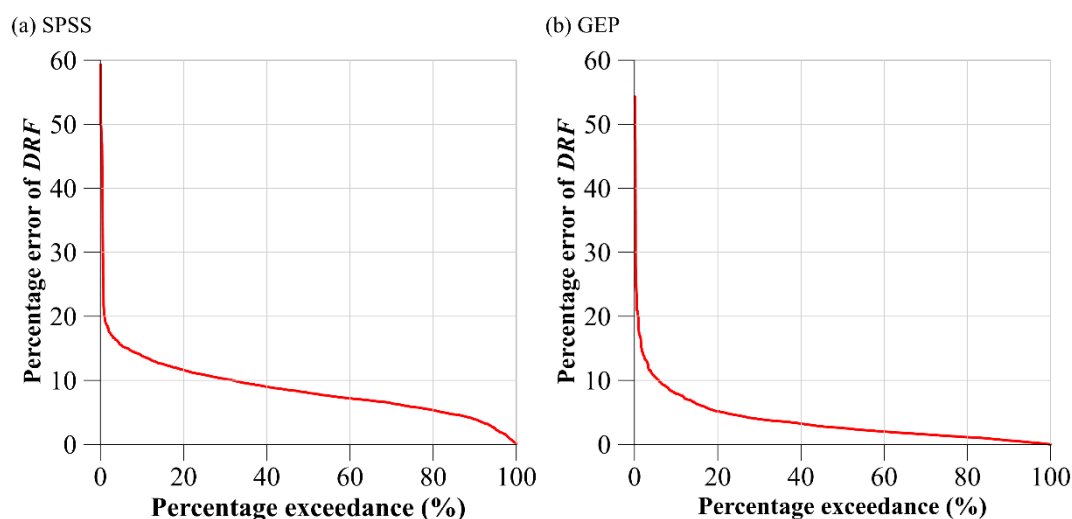


Fig. 12. Percentage error of a) Eq. (7), and b) Eq. (8)

شکل ۱۲ درصد خطا (a) رابطه (۷) و (b) رابطه (۸)

ضریب کاهش دبی کاهش یافته و با افزایش دبی شدت کاهش *DRF* کاهش می‌یابد. در دبی‌های پایین‌تر شیب کاهش ضریب دبی تند بوده و به تدریج با افزایش دبی این شیب کاهش پیدا می‌کند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد مقدار گذر دبی در حالت استغراق بیشینه ۶۸ درصد کمتر از حالت آزاد متناظر است. بررسی تأثیرگذاری قوس بر ضریب کاهش دبی نشان داد که مدل سرریز متخلخل خطی نسبت به مدل‌های دارای قوس دیرتر مستغرق شده و حساسیت کمتری به عمق پایین دست دارد. با مقایسه مدل‌ها دارای قوس اگرچه مقادیرها به هم نزدیک است، با افزایش طول قوس حساسیت سرریز به استغراق کمتر می-

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی ضریب کاهش دبی مستغرق در سرریزهای متخلخل قوسی در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی پرداخته شده است. برای این منظور در مجموع ۴ مدل از سرریز متخلخل و ۲ مدل سرریز صلب با دانه‌بندی و در دبی‌های مختلف آزمایش شد. در مقایسه مدل‌های متخلخل با مدل‌های نفوذناپذیر شاهد، ضریب کاهش دبی مدل‌های متخلخل همواره کمتر از مدل نفوذناپذیر است، و در واقع سرریزهای متخلخل به دلیل نفوذپذیری حساسیت بیشتری نسبت به عمق پایین دست دارند. در مدل‌های نفوذپذیر با افزایش اندازه مصالح،

۶- سپاسگزاری

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

۷- منابع

- Chanson, H. (2006). Discussion of "discharge through a permeable rubble mound weir" by Kohji Michioku, Shiro Maeno, Takaaki Furusawa, and Masanori Haneda. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 432-433.
- Crookston, B.M. & Tullis, B.P. (2012). Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6), 555-562.
- 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.
- Fritz, H.M. & Hager, W.H. (1998). Hydraulics of embankment weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(9), 963-971.
- Hager, W.H. & Schwalt, M. (1994). Broad-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 13-26.
- Hasanian Shirvan, S., Pirzadeh, B., Rajaei, S.H. & Shafai Bejestan, M. (2023). Experimental investigation of gabion broad-crested weirs under upstream partial blockage conditions. *Water Supply*, 23(7), 2638-2648.
- Horton, R.E. (1906). Weir experiments, coefficients, and formulas, Vol. 16, US Government Printing Office.
- Kells, J.A. (1993). Spatially varied flow over rockfill embankments. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(5), 820-827.
- Kells, J.A. (1994). Reply: Spatially varied flow over rockfill embankments. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 163-166.
- Kohji, M., Kohsei, T. & Takeharu, E. (2007). An experimental study on flow field in and around rubble mound river structures. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 25(2), 37-45.
- Leu, J.M., Chan, H.C. & Chu, M.S. (2008). Comparison of turbulent flow over solid and porous

شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی، ضریب کاهش دبی افزایش یافته است. در نهایت، با استفاده از مدل محاسبه‌های نرم الگوریتم بیان ژن GEP و همچنین رگرسیون چند متغیره غیرخطی با استفاده از مدل SPSS دو رابطه تجربی برای ضریب کاهش دبی سرریز متخلخل قوسی استخراج شد. دقت رابطه استخراج شده بر مبنای مدل GEP مناسب‌تر بوده و حدود ۹۵ درصد داده‌ها را با خطای کمتر از ۱۰ درصد پیش‌بینی می‌کند. رابطه ارائه شده در این تحقیق در محدوده اعداد بدون بعد جدول ۲ قابل کاربرد است.

در تحقیقات آینده پیشنهاد و تأکید می‌شود با استفاده از مدل عددی الگوی جریان و همچنین نسبت جریان درون گذر این نوع سرریز بررسی شود. همچنین تأثیر انسداد بالادست ناشی از نشست رسوب‌ها و همچنین آوردهای جریان بررسی لازم گیرد.

۵- فهرست نشانه‌ها

C_d	ضریب دبی (-)
d_{50}	قطر میانگین ذرات (m)
W	عرض فلوم (m)
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h	عمق آب بالادست (m)
H	هد کل بالادست (m)
h_{ML}	عمق آب پایین‌دست در آستانه استغراق (m)
h_t	عمق آب پایین‌دست در شرایط استغراق (m)
L_{Arc}	طول مؤثر سرریز (m)
L_c	پهنای تاج سرریز (m)
n	تخلخل ذرات (-)
P	ارتفاع سرریز (m)
Q	دبی جریان آزاد (m^3s^{-1})
Q_s	دبی جریان مستغرق (m^3s^{-1})
	نشانه‌های یونانی:
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت پویایی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
σ	کشش سطحی (ms^{-2})
ξ	نسبت استغراق (-)

dissipation on block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(2), 04019033, DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001442.

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), 3187-3209.

Safarzadeh, A. & Mohajeri, S.H. (2018). Hydrodynamics of rectangular broad-crested porous weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(10), 04018028, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001338).

Salmasi, F. & Sattari, M.T. (2017). Predicting discharge coefficient of rectangular broad-crested gabion weir using M5 tree model. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 41, 205-212.

structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6), 331-337.

Maeno, S., Michioku, K., Morinaga, S. & Ohnishi, T. (2002). Flow Characteristics of a weir made of natural gravel. *Annual J. Hydraulic Eng.*, 46, 493-498.

Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T. & Haneda, M. (2005). Discharge through a permeable rubble mound weir. *Journal of Hydraulic Eng.*, 131(1), 1-10.

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

Mohammadpour, R., Ghani, A.A. & Azamathulla, H. M. (2013). Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(22), 9324-9337.

Novak, P. & Cabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering, Pitman, London, UK.

Rahmanshahi, M. & Shafai Bejestan, M. (2020). Gene-expression programming approach for development of a mathematical model of energy

© 2025 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.

