

# Physical Hydraulic Modeling of Gabion Stepped Weirs with Upstream Blockage

Sanaz Hasanian Shirvan<sup>1</sup>, Bahareh Pirzadeh<sup>2\*</sup>, Seyed Hossein Rajaei<sup>3</sup>, Mahmood Shafai Bejestan<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3- Ph.D. Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Mashhad, Iran.

4. Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\* [b\\_pirzadeh@eng.usb.ac.ir](mailto:b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir)

Received: 14 December 2022, Accepted: 25 February 2023  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Stepped spillways are one of the types of weirs used in waterway systems. This structure is used for discharge measurement, energy dissipation, and water aeration. Due to engineers' tendency towards environmental sustainability and not manipulating natural landscapes, porous spillways made of stone in the form of gabions are a suitable alternative to impermeable concrete spillways. These spillways have technical, economic, environmental, and hydraulic priorities compared to conventional concrete stepped spillways. Porous spillways are a suitable alternative to the usual concrete spillways in water transmission and distribution systems due to their high hydraulic and technical performance on the one hand and negligible negative environmental impact on the other hand. In this research, the hydraulic performance of the porous stepped spillway under free flow conditions has been investigated in a laboratory manner. This research investigates the effects of different variables including flow rate, upstream blockage, and porosity, on the discharge coefficient of the porous spillway. Finally, based on the dimensional analysis, two empirical relationships are presented using SPSS and GEP (gene-expression programming) for calculating the free flow discharge coefficient for porous stepped spillways.

**Methodology:** The experiments of this research were carried out in a laboratory flume with a length, width, and height of 11, 0.5, and 0.5 m, respectively. The main frame of the weirs is made of an iron rod and covered with a metal mesh. After the construction of the weir frame, stones were poured into it, and its upper part was covered with metal mesh.

The materials used in the porous spillway were selected from four gradations between 1.13 and 4 cm with a uniformity coefficient close to 1. Each porous spillway was tested for seven blockages between zero and 100%. Also, the results were compared with a solid stepped spillway model with and without blockage. In the following, it has been extracted to present the empirical relationship of the discharge coefficient in these spillways under blockage conditions, using the dimensional analysis of effective dimensionless parameters under free flow conditions.

**Results and Discussion:** For porous weirs in unblocked conditions and with few blockages, the trend of the discharge coefficient changes is relatively steep. Gradually, with the increase in blockage, the discharge coefficient of the downward slope decreases, and finally, in high blockages, its trend becomes horizontal. In 100% blockage, it becomes similar to a solid weir. These results, which are for the unblocked spillway, are consistent with the results of Salmasi et al. (2021), Salmasi and Taghi Sattari (2017), and Safarzadeh and Mohajeri (2018). Comparing two gradations shows that by reducing the gradation of materials, the weir behavior reaches the solid weir behavior sooner.

The trend of changes in the discharge coefficient of porous weirs is decreasing with increasing flow rate and increasing for solid weirs. The results show that with the increase in flow rate, the discharge coefficient of porous weirs approaches the solid weir. In porous weirs, unlike solid weirs, where the total flow is the overpass, the total flow is the sum of the inflow and overpass flow. The fraction of the flow through the passage is significant at the low flow rates. Also, with the increase in the flow rate, the ratio of the flow through the passage to the total flow rate decreases. Therefore, with the increase of the flow rate, the coefficient of the two weirs gradually approaches, and the effect of the flow in the passage decreases noticeably at high flow rates.

**Conclusion:** The results showed that the free flow discharge coefficient increases with the size of the filling material. The percentage increase in discharge coefficient for porous stepped spillways is approximately 34 to 230% higher than that of solid spillways. Unlike solid spillways, whose free flow discharge coefficient increases with increasing the flow rate, in porous stepped spillways, the trend of free flow discharge coefficient changes in low flow rates is downward. With an increasing flow rate, it gradually becomes horizontal and then increases with a slight slope. As the blockage increases, the flow coefficient in the porous stepped spillway gradually decreases. In blockages above 80%, the flow coefficient of the porous stepped spillway is insignificantly different from the solid stepped spillway. In the solid stepped spillway, in the percentage of obstructions below 80%, the obstacle does not affect the free discharge coefficient. The presence of blockage upstream of the porous stepped spillways sometimes reduces the discharge coefficient by more than 70%. The extraction of empirical relationships based on the GEP meta-heuristic model has higher accuracy than those extracted from the nonlinear multivariate regression using SPSS. The average error of the relation of the GEP porous stepped spillway free discharge coefficient was 4%, and the nonlinear multivariate regression model was 7%.

**Keywords:** Discharge coefficient, spillway, weir, sedimentation.



© 2023 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/>)

# مدل سازی فیزیکی هیدرولیک جریان سرریزهای پلکانی گابیونی با انسداد بالادست

ساناز حسینیان شیروان<sup>۱</sup>، بهاره پیرزاده<sup>۲\*</sup>، سید حسین رجائی<sup>۳</sup>، محمود شفاعی بجمستان<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
۳- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، مشهد، ایران.  
۴- استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\* [b\\_pirzadeh@eng.usb.ac.ir](mailto:b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶ و بگاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** امروزه سرریزهای متخلخل به دلیل عملکرد هیدرولیکی و فنی بالا از یک طرف و مضرات زیست-محیطی ناچیز از طرف دیگر، جایگزین مناسبی برای سازه های بتنی معمول در سیستم های انتقال و توزیع آب می باشند. در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی سرریزهای متخلخل پلکانی با وجود انسداد بالادست ناشی از نشست رسوبات، به صورت آزمایشگاهی مدل سازی شد. آزمایش های این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۱، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، انجام شده است. قابل ذکر است که ارتفاع کانال در ۲/۵ متر ابتدایی ۰/۸ متر است. مصالح مورد استفاده در ساخت سرریز از چهار دانه بندی بین ۱/۱۳ تا ۴ سانتی متر با ضریب یکنواختی نزدیک ۱ انتخاب شدند. هر کدام از سرریزها برای ۷ انسداد مختلف بین صفر تا ۱۰۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین نتایج با یک مدل سرریز پلکانی صلب با و بدون انسداد نیز مقایسه شد. مقدار درصد افزایش ضریب دبی برای سرریز متخلخل تقریباً بین ۳۴ تا ۲۳۰ درصد بیشتر از سرریز صلب است. نتایج نشان داد که انسداد در سرریز صلب تنها در درصدهای بالای ۸۰ درصد بر ضریب دبی مؤثر بوده درحالی که در سرریزهای متخلخل با افزایش انسداد ضریب دبی به تدریج کاهش می یابد. برخلاف سرریزهای صلب، روند تغییرات ضریب دبی با افزایش دبی در سرریزهای متخلخل، جز در انسدادهای بالا، نزولی بود. در نهایت با استفاده از الگوریتم بیان ژن رابطه ای تجربی برای محاسبه ضریب دبی جریان آزاد سرریز پلکانی متخلخل در شرایط وجود انسداد استخراج شد.

**کلیدواژه‌گان:** ضریب دبی، سرریز، سرریز متخلخل، رسوب گذاری.

## ۱- مقدمه

سرریزهای نفوذناپذیر بتنی به شمار می آیند. این نوع سرریزها از جنبه های مختلف دارای اولویتهای فنی، اقتصادی، زیست محیطی و هیدرولیکی نسبت به سرریزهای معمول بتنی هستند. از نظر پایداری سازه های سرریزهای متخلخل در مقابل نیروی لرزه ای منعطف بوده و برخلاف سرریزهای بتنی، نیروی زیر فشار محسوسی به آنها وارد نمی شود. این سرریزها اغلب از سنگ های در دسترس در محل ساخته شده و از نظر هزینه ساخت نیز به صرفه می باشند (Mohamed, 2010; Rahmanshahi and shafai-bejestan, 2020).

سرریز پلکانی از جمله انواع سرریزهای مورد استفاده در سامانه های آبی می باشند. این سازه با هدف هایی مانند استهلاک انرژی جنبشی و هوادهی جریان استفاده می شود (Roushangar et al., 2014). امروزه با توجه به گرایش مهندسان به پایداری محیط زیست و دستکاری نکردن منظره های طبیعی، سرریزهای متخلخل ساخته شده از سنگ به صورت تور-سنگ<sup>۱</sup>، جایگزین مناسبی برای

1 gabion

کرده‌اند. در تحقیق آنان، دبی گذرنده از سرریز به دو بخش جریان عبوری از محیط متخلخل و جریان گذرنده از روی سرریز تفکیک شده و رابطه نهایی محاسبه دبی از ترکیب آن‌ها به دست آمد.

بر مبنای پیشینه پژوهش تاکنون تحقیقی در زمینه جریان در سرریزهای متخلخل پلکانی با وجود انسداد با هدف تعیین ضریب دبی انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق برای رفع این کمبود، بررسی و ارزیابی‌های آزمایشگاهی روی سرریز پلکانی متخلخل انجام شده است. در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی متخلخل با سه پله در شرایط جریان آزاد به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. در آغاز کار با استفاده از تحلیل ابعادی فراسنجه‌های بدون بعد مؤثر در این سرریزها در شرایط جریان آزاد استخراج شده و سپس اثرگذاری فراسنجه‌های مختلف مانند دبی، انسداد و تخلخل بر ضریب دبی بررسی شده است. در نهایت بر مبنای تحلیل ابعادی صورت گرفته رابطه‌ای تجربی برای محاسبه ضریب دبی جریان برای سرریزهای پلکانی متخلخل ارائه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تجهیزات و روند انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۱، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، انجام شده است. قابل یادآوری است که ارتفاع کانال در ۲/۵ متر ابتدایی ۰/۸ متر است. قاب اصلی سرریزها از میله آهنی ساخته شده و با یک مش فلزی پوشانده شده است. پس از ساخت چارچوب سرریز و نصب آن در فاصله ۰/۲ متری از بالادست فلوم، سنگ‌ها درون آن ریخته شده و آن‌گاه قسمت بالایی آن نیز با مش فلزی پوشانده شد. در جدول ۱ مشخصه‌های سرریزها و اندازه مصالح سنگی ارائه شده است. برابر جدول در این تحقیق از ۴ دانه‌بندی (تخلخل) با ضریب یکنواختی نزدیک ۱ استفاده شده است. در این جدول  $L_{50}$  طول تاج سرریز،  $W$  عرض کانال،  $P$  ارتفاع سرریز،  $d_{50}$  قطر میانگین ذرات،  $n$  تخلخل مصالح، و

از جمله اثرگذاری‌های مثبت زیست-محیطی این سرریزها می‌توان هوادهی بیشتر و افزایش توان خود پالایی آبراهه، امکان عبور آبزیان به بالادست و کاهش رسوب‌گذاری در بالادست آن را نام برد. از نظر عملکرد هیدرولیکی نیز به دلیل اضافه شدن جریان درون‌گذر و همچنین کاهش جدایی جریان در لبه‌های ورودی، مقدار ضریب دبی بالاتری دارد (Shariq et al., 2022).

در سال‌های اخیر بررسی و ارزیابی‌های آزمایشگاهی و عددی مختلفی در ارتباط با سرریزهای متخلخل انجام شده است. این تحقیقات را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول به بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزها پرداخته‌اند (Mohamed, 2010; Sharigh et al., 2022; Biabani et al., 2022). دسته دوم الگوی جریان پیرامون این سازه‌ها را مورد ارزیابی کرده‌اند (Biabani et al., 2022; Leu et al., 2008; Mohammadpour et al., 2018; Fathi-Moghaddam et al., 2013). بررسی و ارزیابی‌های مرتبط با عملکرد هیدرولیکی را می‌توان به دو دسته سرریز در حال جریان درون‌گذر و سرریز در حالت جریان درون‌گذر و روگذر تقسیم‌بندی کرد (Kells, 1993, 1994; Michioku et al., 2005; Sharigh et al., 2020).

برخی از تحقیقات گذشته به صورت آزمایشگاهی به بررسی و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی سرریز متخلخل لبه پهن در مقایسه با سرریز صلب در شرایط آزاد و مستغرق پرداختند و در نهایت رابطه‌هایی غیر خطی برای برآورد ضریب دبی در شرایط آزاد و مستغرق ارائه دادند (Salmasi et al., 2021; Salmasi and Taghi Sattari 2017; Safarzadeh and Mohajeri, 2018; Salmasi et al. 2021).

(Safarzadeh and Mohajeri (2018) با استفاده مدل‌سازی عددی به بررسی هیدرودینامیک سرریز لبه پهن متخلخل در شرایط جریان آزاد پرداختند. آنان نیز یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی جریان آزاد سرریز لبه پهن متخلخل ارائه دادند. (Fathi-Moghaddam et al. (2018) با استفاده از مدل عددی FLOW3D به بررسی الگوی جریان و عملکرد هیدرولیکی سرریزهای مثلثی و دوزنقه‌ای پرداختند. (Sharigh et al. (2022) به صورت آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریز متخلخل را بررسی و ارزیابی

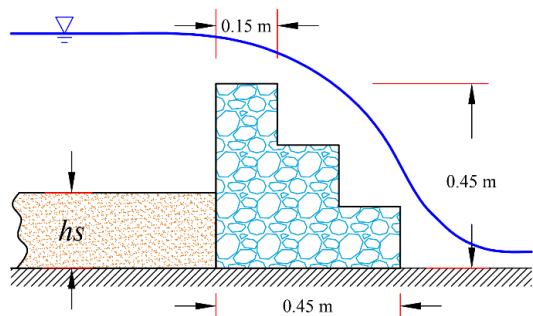


Fig. 1 Schematic of porous stepped spillway with upstream blockage

شکل ۱ شمای کلی سرریز پلکانی متخلخل با انسداد بالادست



Fig. 2 Experimental porous stepped spillway

شکل ۲ سرریز پلکانی متخلخل مدل سازی شده در آزمایشگاه

که برای سرریزهای متخلخل کسری از جریان از بدنه سرریز عبور می کند. فراسنجه های مؤثر بر جریان روگذر و درون گذر سرریز پلکانی متخلخل در شرایط جریان آزاد را می توان به صورت تابع زیر بیان کرد:

$$f(q, H, P, L_w, h_s, g, \rho, \sigma, v, d_{50}, n) = 0 \quad (2)$$

که در آن  $q$  دبی واحد عرض،  $P$  ارتفاع سرریز،  $h_s$  ارتفاع رسوب های انباشته شده پشت سرریز،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\sigma$  کشش سطحی،  $v$  لزجت سینماتیکی،  $d_{50}$  اندازه میانگین مصالح محیط متخلخل،  $n$  تخلخل مصالح، و  $f$  یک تابع است.

با استفاده از نظریه  $\Pi$  باکینگهام و انتخاب  $H$ ،  $g$  و  $\rho$  به عنوان متغیرهای تکرار، معادله (۲) را می توان به صورت گروه های بدون بعد رابطه (۳) تبدیل کرد

$$f\left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{H}{P}, \frac{L_w}{H}, \frac{h_s}{H}, \frac{\rho g H^2}{\sigma}, \frac{\sqrt{gH^3}}{v}, \frac{d_{50}}{H}, n\right) = 0 \quad (3)$$

با ضرب فراسنجه بدون بعد دوم و آخر، عدد بدون بعد  $\frac{d_{50}}{P}$  و با ضرب  $1/\sqrt{2}$  در عدد بدون بعد اول  $\frac{q}{\sqrt{2gH^3}}$  به دست

$h_s$  ارتفاع رسوبات پشت سرریز می باشد. برای آرام کردن جریان ورودی به فلوم از یک جسم شناور در مخزن ورودی و یک صفحه مشبک همگراکننده در ورودی فلوم استفاده شده است. مدل سازی های این تحقیق در دبی بین ۲۵ تا ۶۵ لیتر بر ثانیه انجام شده و اندازه گیری دبی با استفاده از یک سرریز مثلثی مدرج با دقت  $\pm 1/2$  درصد در انتهای فلوم انجام شد. دبی ۶۵ بیشینه دبی قابل تأمین آزمایشگاه و کمینه دبی بر مبنای حداقل دبی ای که می تواند سرریز را کامل مستغرق کند و همچنین عمق بالادست آن روی سرریز پلکانی متخلخل برای حذف اثر عدد وبر بیشتر از ۵ سانتی متر باشد، انتخاب شد. همچنین برای اندازه گیری عمق آب از یک عمق سنج با دقت  $\pm 0.2$  میلی متر استفاده شد.

روند انجام آزمایش ها در این تحقیق به این صورت بود که در آغاز با باز کردن شیر ورود جریان، آب وارد فلوم شده و پس از چند دقیقه شرایط جریان آزاد دائمی برقرار می شد. با تثبیت جریان، اطلاعات مورد نیاز جریان آزاد شامل عمق بالادست سرریز (در قسمتی که عمق افقی و بدون انحنا بود) توسط عمق سنج و دبی جریان از روی سرریز مثلثی مدرج انتهایی خوانده می شد. در این حالت دریچه انتهایی فلوم کامل باز بود. این روند برای همه آزمایش های این تحقیق تکرار شد. در شکل ۱ شمای کلی سرریز پلکانی متخلخل این تحقیق و در شکل ۲ نمایی از مدل آزمایشگاهی ارائه شده است.

## ۲-۲- تحلیل ابعادی

بنابر نظر Hager and Hager (1994) و Fritz and Hager (1998) در سرریز صلب رابطه دبی در شرایط جریان آزاد به صورت رابطه زیر تعریف می شود (Hager and Schwalt, 1994; Fritz and Hager, 1998)

$$Q = C_d W \sqrt{2gH^3} \quad (1)$$

که در اینجا،  $Q$  دبی عبوری از روی سرریز،  $C_d$  ضریب دبی،  $W$  عرض کانال،  $g$  شتاب ثقل،  $H$  انرژی کل جریان عبوری از روی سرریز می باشد.

برای سرریزهای متخلخل نیز ساختار رابطه دبی و عمق در شرایط جریان آزاد همانند رابطه (۱) است. با این تفاوت

$$\left(\frac{q}{\sqrt{2gH^3}}, \frac{P}{L_w}, \frac{L_w}{H}, \frac{h_s}{H}, \frac{\rho g H^2}{\sigma}, \frac{\sqrt{gH^3}}{v}, \frac{d_{50}}{P}, n\right) = 0 \quad (4)$$

آمده و رابطه (۳) بدین صورت تغییر می کند:

**جدول ۱** مشخصه های هندسی سرریزهای پلکانی مورد استفاده در این تحقیق

**Table 1** Geometric characteristics of stepped spillways used in this research

Weir type	Parameters					
	$L_w$ (m)	$P$ (m)	$W$ (m)	$h_s$ (m)	$n$ (%)	$d_{50}$ (mm)
porous	0.15	0.45	0.5	0.075, 0.15, 0.225, 0.3, 0.375, 0.45	50	1.13
porous	0.15	0.45	0.5	0.075, 0.15, 0.225, 0.3, 0.375, 0.45	46	1.75
porous	0.15	0.45	0.5	0.075, 0.15, 0.225, 0.3, 0.375, 0.45	44.3	3.13
porous	0.15	0.45	0.5	0.075, 0.15, 0.225, 0.3, 0.375, 0.45	44.5	4
solid	0.15	0.45	0.5	0	0	-

در نهایت با اختصاص  $\xi$  به  $H/(L_w + H)$ ، رابطه نهایی ضریب دبی به صورت رابطه زیر ساده می شود:

$$C_d = f\left(\xi, \frac{h_s}{H}, \frac{d_{50}}{P}, n\right) \quad (8)$$

برای محاسبه دقت رابطه ارائه شده از رابطه های جدول ۲ استفاده می شود. که در آن  $C_d^{obs}$  ضریب دبی مشاهده ای،  $C_d^{pre}$  ضریب دبی محاسبه ای و  $C_d^{ave}$  میانگین ضریب دبی مشاهده ای است.

**جدول ۲** رابطه های آماری محاسبه دقت روابط ارائه شده

**Table 2** Statistical relationships to calculate the accuracy of the presented relationships

Metric	Equatio
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_d^{obs} - C_d^{pre})^2}$
MAPE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ C_d^{obs} - C_d^{pre} }{C_d^{obs}}$
R <sup>2</sup>	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_d^{obs} - C_d^{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (C_d^{obs} - C_d^{ave})^2}$

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۳ نمایی کلی از تغییرپذیری ضریب دبی نسبت برای سرریز پلکانی صلب و پلکانی متخلخل برای دانه بندی کمینه ۱/۱۳ سانتی متر و بیشینه ۴ سانتی متر این تحقیق ارائه شده است. هدف از این شکل ارائه الگوی کلی تغییرپذیری ضریب دبی در سرریزهای متخلخل نسبت به سرریزهای صلب است. در محور افقی داده های هر سرریز از انسداد صفر تا انسداد ۱۰۰ درصد مرتب شده است. در این شکل به ترتیب ضریب دبی برای ۷ انسداد مختلف این تحقیق ارائه شده است. الگوی کلی تغییرپذیری ضریب

در اینجا  $\frac{q}{\sqrt{2gH^3}}$  ضریب دبی  $C_d$ ، عدد وبر  $W$  و عدد رینولدز  $R$  می باشد.

در آزمایش های این تحقیق نسبت  $P/L_w$  ثابت بوده بنابراین این نسبت می تواند از معادله (۴) حذف شود. با انتخاب ضریب دبی به عنوان فراسنجه وابسته، معادله (۴) به صورت زیر بیان می شود:

$$C_d = f\left(\frac{L_w}{H}, \frac{h_s}{H}, W, R, \frac{d_{50}}{P}, n\right) \quad (5)$$

بنابر نظر Fritz and Hager (1998) برای جریان عبوری از روی سرریز با عمق بالادست بیشتر از حدود ۵ سانتی متر، اثر کشش سطحی ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. همچنین برای محدوده جریان آشفته نیز می توان از عدد رینولدز صرف نظر کرد. در محدوده آزمایش های این تحقیق کمترین عدد رینولدز ۱۵۰۲۰ بوده است. بنابراین از اثر لزجت نیز می توان صرف نظر کرد. بنابراین عدد وبر و رینولدز از معادله (۵) حذف شده و داریم:

$$C_d = f\left(\frac{L_w}{H}, \frac{h_s}{H}, \frac{d_{50}}{P}, n\right) \quad (6)$$

در تحلیل ابعادی مجاز است که یک عدد ثابت را به یک فراسنجه بدون بعد اضافه یا کم شود. با اضافه کردن عدد ۱ به عدد بدون بعد اول رابطه (۶) و معکوس کردن آن رابطه (۷) به صورت رابطه زیر می باشد:

$$C_d = f\left(\frac{L_w}{H} + 1, \frac{h_s}{H}, \frac{d_{50}}{P}, n\right) = f\left(\frac{H}{L_w + H}, \frac{h_s}{H}, \frac{d_{50}}{P}, n\right) \quad (7)$$

تغییرپذیری ضریب دبی از انسداد ۸۰ درصد به بعد صعودی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد برای درصد انسداد ۱۰۰ درصد ضریب دبی هر سه سرریز تا حدودی یکسان هست.

در شکل ۴(a) تغییرپذیری ضریب دبی سرریز پلکانی صلب برای درصد انسدادهای مختلف ۰ تا ۱۰۰ درصد نمایش داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد انسداد، روند تغییرپذیری ضریب دبی را تغییر نداده و با افزایش دبی، ضریب دبی در همه انسدادها صعودی است. با این وجود در انسدادهای کمتر از ۸۰ درصد روند تغییرپذیری ضریب دبی با افزایش دبی نزدیک به خطی می‌باشد. در انسداد ۱۰۰ درصد شیب صعودی ضریب دبی کاهش یافته و روند تغییرپذیری آن دارای تقعر به سمت پایین بوده و با افزایش دبی به سمت خطی شدن میل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در درصد

دبی سرریزهای صلب در همه انسدادها صعودی است. برای سرریزهای متخلخل در شرایط بدون انسداد و با انسدادهای کم روند تغییرپذیری ضریب دبی نزولی با شیب به نسبت تند است. به تدریج با افزایش میزان انسداد شیب نزولی ضریب دبی کاهش یافته و در نهایت در انسدادهای بالا روند آن افقی شده و در انسداد ۱۰۰ درصد همانند سرریز صلب صعودی می‌شود. این نتایج که برای سرریز بدون انسداد است، با نتایج (Salmasi et al. 2021)، (Safarzadeh and Salmasi and Taghi Sattari 2017) و (Mohajeri 2018) مقایسه دو دانه‌بندی نشان می‌دهد با کاهش دانه‌بندی مصالح، رفتار سرریز زودتر به رفتار سرریز صلب می‌رسد. بنابراین برای دانه‌بندی ۱/۱۳ از انسداد ۵۰ درصد به بعد تا حدودی روند تغییرپذیری ضریب دبی افقی و پس از آن صعودی می‌شود این در حالی است که برای دانه‌بندی بزرگ‌تر ۴ سانتی‌متر

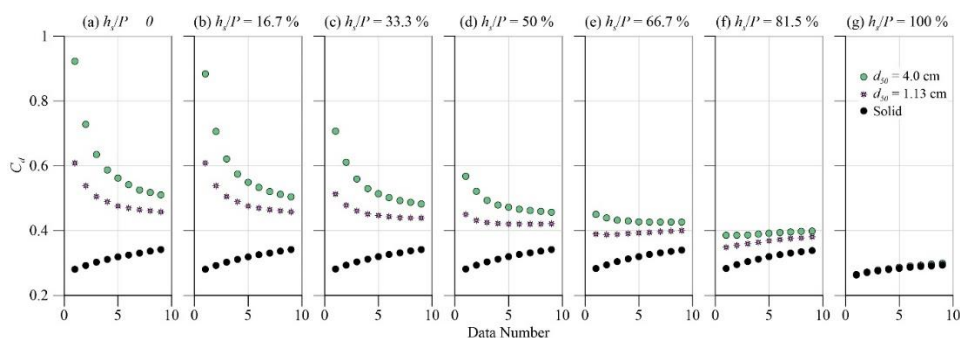


Fig. 3 The trend of changes in the discharge coefficient of solid stepped spillways and porous stepped spillways with 1.13 and 4 cm material sizes according to the percentage of blockage

شکل ۳ روند تغییرپذیری ضریب دبی سرریز پلکانی صلب و سرریزهای پلکانی متخلخل با دانه‌بندی ۱/۱۳ و ۴ سانتی‌متر به تفکیک درصد انسداد

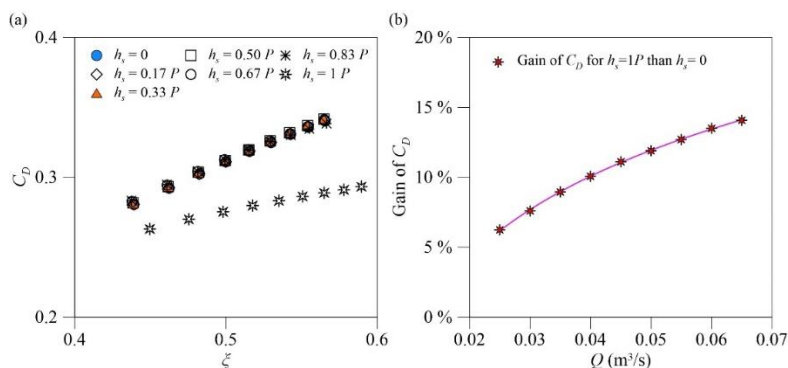


Fig. 4 (a) Variation of the discharge coefficient of the solid stepped spillway for different blockage, and (b) the percentage reduction of the discharge coefficient in the porous stepped spillway with 100% blockage compared to the porous stepped spillway without obstruction.

شکل ۴ (a) تغییرپذیری ضریب دبی سرریز پلکانی صلب برای انسدادهای مختلف، و (b) درصد کاهش ضریب دبی در سرریز متخلخل پلکانی با انسداد ۱۰۰ درصد نسبت به سرریز بدون انسداد

با افزایش دبی نسبت جریان درون گذر به کل دبی عبوری کاهش می یابد. بنابراین با افزایش دبی به مرور ضریب دو سرریز به هم نزدیک شده و اثر جریان درون گذر در دبی های بالا کاهش محسوسی دارد.

در شکل ۶(b) درصد افزایش ضریب دبی سرریز پلکانی متخلخل نسبت به سرریز پلکانی صلب ارائه شده است. نتایج نشان می دهد درصد افزایش ضریب دبی با کاهش دبی با نرخ قابل توجهی افزایش می یابد. میزان درصد افزایش ضریب دبی برای سرریز با دانه بندی ۱/۱۳ بین ۳۴ تا ۱۱۷ درصد و برای دانه بندی ۴ سانتی متر بین ۵۰ تا ۲۳۰ درصد است.

در شکل ۶(a) ضریب دبی سرریز صلب پلکانی با دو سرریز پلکانی متخلخل مقایسه شده است. بنابر انتظار ضریب دبی سرریز متخلخل نسبت به سرریز صلب به صورت معنی داری بیشتر است. روند تغییرپذیری ضریب دبی سرریزهای متخلخل با افزایش دبی نزولی و برای سرریز صلب صعودی می باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش دبی، ضریب دبی سرریزهای متخلخل به سرریز صلب نزدیک می شود. در سرریزهای متخلخل برخلاف سرریزهای صلب که کل دبی روگذر است، دبی کل مجموع دبی درون گذر و روگذر است. میزان کسر جریان درون گذر در دبی های پایین قابل توجه بوده و با افزایش دبی نسبت جریان درون گذر به کل دبی عبوری کاهش می یابد. بنابراین با افزایش دبی به مرور ضریب دو سرریز به هم نزدیک شده و اثر جریان درون گذر در دبی های بالا کاهش محسوسی دارد. در شکل ۶(b) درصد افزایش ضریب دبی سرریز پلکانی متخلخل نسبت به سرریز پلکانی صلب ارائه شده است. نتایج نشان می دهد درصد افزایش ضریب دبی با کاهش دبی با نرخ قابل توجهی افزایش می یابد. میزان درصد افزایش ضریب دبی برای سرریز با دانه بندی ۱/۱۳ تا حدودی بین ۳۴ تا ۱۱۷ درصد و برای دانه بندی ۴ سانتی متر نیز تا حدودی بین ۵۰ تا ۲۳۰ درصد است.

از جمله متغیرهای مهم این تحقیق اثرگذاری اندازه مصالح بر ضریب دبی سرریز پلکانی متخلخل می باشد. در شکل ۷ برای ۷ درصد انسداد مختلف، ضریب دبی سرریزهای پلکانی متخلخل در چهار دانه بندی مختلف مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهند که ضریب دبی دو دانه بندی

درصد انسداد ۱۰۰ درصد ضریب سرریز دارای کاهش چشمگیری است. دلیل است تغییرپذیری افزایش طول سرریز به بیشتر از ۳ برابر می باشد. بنابراین با افزایش طول تاج سرریز، ضریب دبی کاهش یافته است.

درصد کاهش ضریب دبی سرریز پلکانی صلب با ۱۰۰ درصد انسداد با سرریز پلکانی صلب بدون انسداد در شکل ۴(b) مقایسه شده است. برابر شکل با افزایش دبی درصد افزایش ضریب دبی افزایش یافته و بین ۶ تا ۱۴ درصد می باشد.

در شکل ۵ منحنی دبی اشل سرریز پلکانی صلب با دو سرریز پلکانی متخلخل مقایسه شده است. تغییرپذیری دبی-اشل در هر دو نوع سرریز همانند بوده و دارای تقعر اندک به سمت پایین می باشد. بنابر انتظار سرریز صلب دارای بیشترین اشل و سرریز با دانه بندی بزرگتر ۴ سانتی متر دارای کمترین اشل برای یک دبی مشخص است. سرریز پلکانی متخلخل با دانه بندی ۱/۱۳ سانتی متر عمق آب پشت سرریز را نسبت به نوع صلب سرریز به طور میانگین ۶/۴ درصد کاهش می دهد. این مقدار برای سرریز پلکانی متخلخل با دانه بندی ۴ سانتی-متر ۸/۵ درصد می باشد.

روند تغییرپذیری ضریب دبی سرریزهای متخلخل با افزایش دبی نزولی و برای سرریز صلب صعودی می باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش دبی، ضریب دبی سرریزهای متخلخل به سرریز صلب نزدیک می شود. در سرریزهای متخلخل برخلاف سرریزهای صلب که کل دبی روگذر است، دبی کل مجموع دبی درون گذر و روگذر است. میزان کسر جریان درون گذر در دبی های پایین قابل توجه بوده و

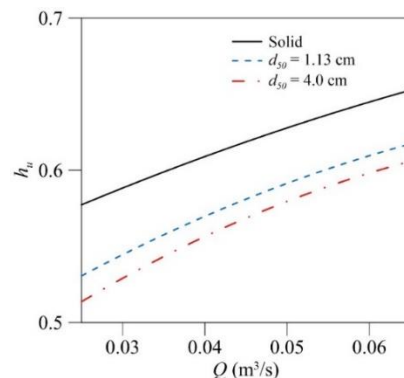


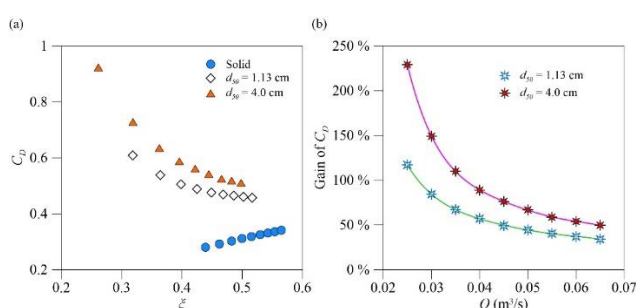
Fig. 5 Comparison of stage-discharge of the solid and porous stepped spillway with two material sizes of 1.13 and 4 cm.

شکل ۵ مقایسه دبی-اشل سرریز پلکانی صلب و متخلخل با دو دانه بندی ۱/۱۳ و ۴ سانتی متر



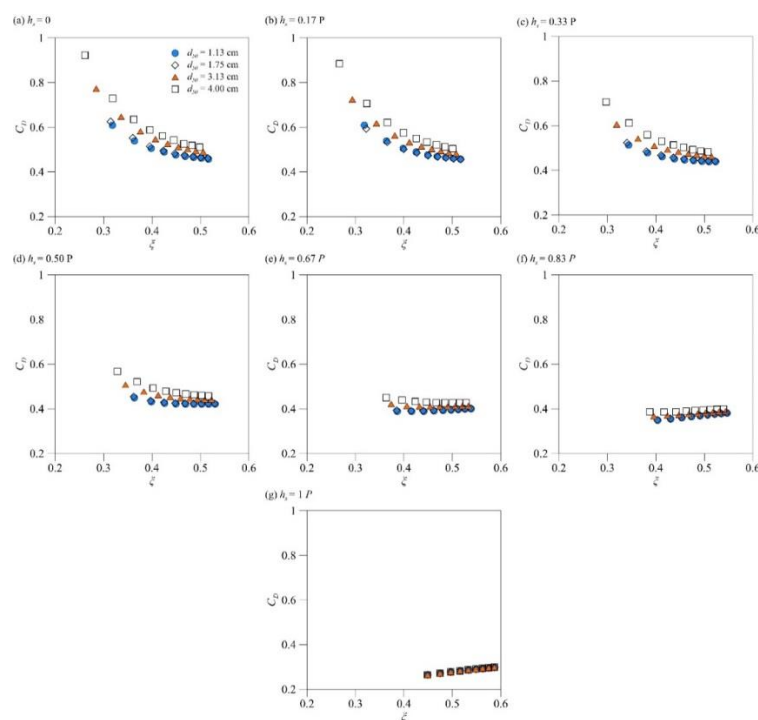
همانند هم کرده و پاسخ هیدرولیکی تاحدودی همانند داشته باشند. برای دو دانه‌بندی دیگر با افزایش اندازه میانگین مصالح برای درصد انسدادهای کوچک‌تر از ۸۰ درصد ضریب دبی افزایشی می‌یابد. برای انسداد ۱۰۰ درصد ضریب دبی همه مصالح تاحدودی یکسان است و اثر دانه‌بندی درعمل تأثیری بر ضریب دبی ندارد. همچنین نتیجه مهم دیگر این است که با افزایش درصد انسداد، به‌مرور اثرگذاری اندازه مصالح روند کاهشی داشته است.

کوچک‌تر ۱/۱۳ و ۱/۷۵ خیلی به هم نزدیک می‌باشند. دلیل این موضوع می‌تواند توزیع دانه‌بندی تهیه‌شده برای این دو نوع مصالح باشد. در دانه‌بندی‌های با توزیع گسترده ذرات با اندازه‌های مختلف در لابه‌لای هم قرار گرفته و تخلخل را به شدت کاهش می‌دهند. اگرچه در این تحقیق تلاش شده ضریب یکنواختی مصالح نزدیک به یک باشد، با این وجود با توجه به منابع قرضه استخراج مصالح، توزیع دانه‌بندی و شکل مصالح می‌تواند به صورتی باشد که تخلخل و منفذها دو نوع دانه‌بندی را



**Fig. 6** (a) Comparison of the discharge coefficient of the solid and porous stepped spillways, and (b) the percentage increase of the discharge coefficient of the porous stepped spillways compared to the solid one, for two material sizes of 1.13 and 4 cm.

شکل ۶ (a) مقایسه ضریب دبی سرریز پلکانی صلب و متخلخل، و (b) درصد افزایش ضریب دبی سرریزهای پلکانی متخلخل نسبت به سرریز صلب، برای دو دانه‌بندی ۱/۱۳ و ۴ سانتی‌متر

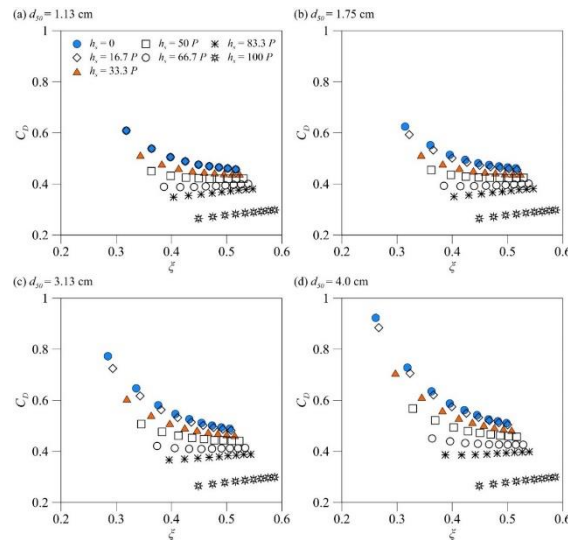


**Fig. 7** The effect of the porous stepped spillways material sizes on discharge coefficient for different percentages of blockages from zero to 100%.

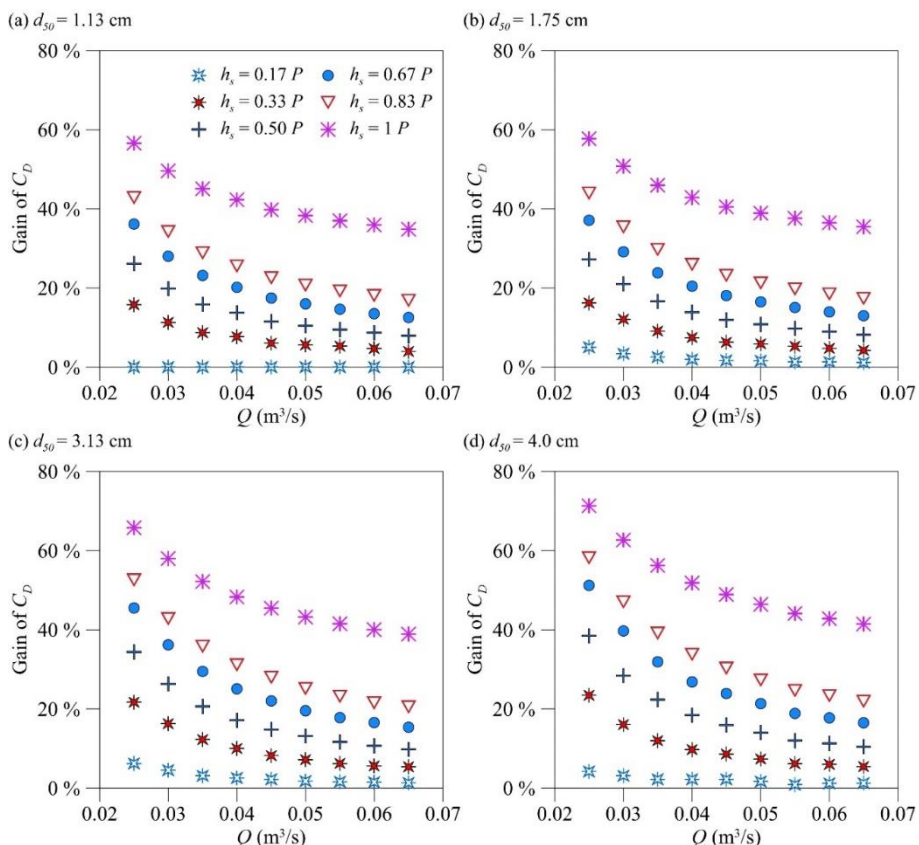
شکل ۷ اثرگذاری اندازه مصالح سرریز پلکانی متخلخل بر ضریب دبی در درصد انسدادهای مختلف صفر تا ۱۰۰ درصد

پایین تر کمتر و در انسدادهای بالای شدید می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد اثر انسداد بر کاهش دبی با افزایش اندازه مصالح محسوس تر است. در شکل ۹ درصد کاهش ضریب دبی در همه سرریزها نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد روند

مهم ترین هدف این تحقیق بررسی اثرگذاری انسداد بر ضریب دبی است. در شکل ۸ برای هر چهار دانه بندی، اثرگذاری درصد انسداد بر ضریب دبی بررسی شده است. در همه دانه بندی ها با افزایش درصد انسداد ضریب دبی کاهش می یابد. روند کاهش ضریب دبی در انسدادهای



**Fig. 8** The effect of blockage on the discharge coefficient in four different material sizes  
 شکل ۸ اثرگذاری انسداد بر ضریب دبی در چهار دانه بندی مختلف



**Fig. 9** The percentage of reduction of the discharge coefficient caused by different blockages in four different material sizes  
 شکل ۹ درصد کاهش ضریب دبی ناشی از انسدادهای مختلف در چهار دانه بندی مختلف

سرریز پلکانی متخلخل با استفاده از GEP حدود ۴ درصد است.

**جدول ۳** فراسنجه‌ها و تنظیم‌های مدل GEP

**Table 3** Parameters and settings of the GEP model

Parameters	Setting of parameter
Function set	+, -, /, ×, ^, 1/x, (1-x)
Population size	50
Number of genes	3
Mutation rate	0.02
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

**۴- نتیجه‌گیری**

در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی متخلخل با وجود انسداد بالادست به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. همچنین نتایج سرریز پلکانی متخلخل با یک نمونه سرریز پلکانی صلب متناظر مقایسه شد. نتایج نشان داد با افزایش اندازه مصالح سرریز متخلخل ضریب دبی افزایش می‌یابد. میزان درصد افزایش ضریب دبی برای سرریز متخلخل به تقریب بین ۳۴ تا ۲۳۰ درصد بیشتر از سرریز صلب است. برخلاف سرریزهای صلب که تغییرپذیری ضریب دبی آن‌ها با افزایش دبی صعودی است، در سرریزهای متخلخل روند تغییرپذیری ضریب دبی در دبی‌های پایین نزولی و با افزایش دبی به تدریج افقی شده و سپس با شیب کمی افزایشی می‌شود. با افزایش انسداد ضریب دبی در سرریز متخلخل به تدریج کاهش یافته و در انسدادهای بالای ۸۰ درصد ضریب دبی سرریز متخلخل تفاوت ناچیزی با سرریز صلب دارد. در سرریز صلب در درصد انسدادهای زیر ۸۰ درصد، انسداد تأثیر محسوسی در ضریب دبی ندارد. وجود انسداد در بالادست سرریز پلکانی متخلخل، ضریب دبی را گاهی بیشتر از ۷۰ درصد نیز کاهش می‌دهد. استخراج رابطه‌های تجربی بر مبنای مدل فرا کاوشی GEP دارای دقت بالایی است. میانگین خطای رابطه ضریب دبی سرریز پلکانی متخلخل GEP ۴ درصد به دست آمد.

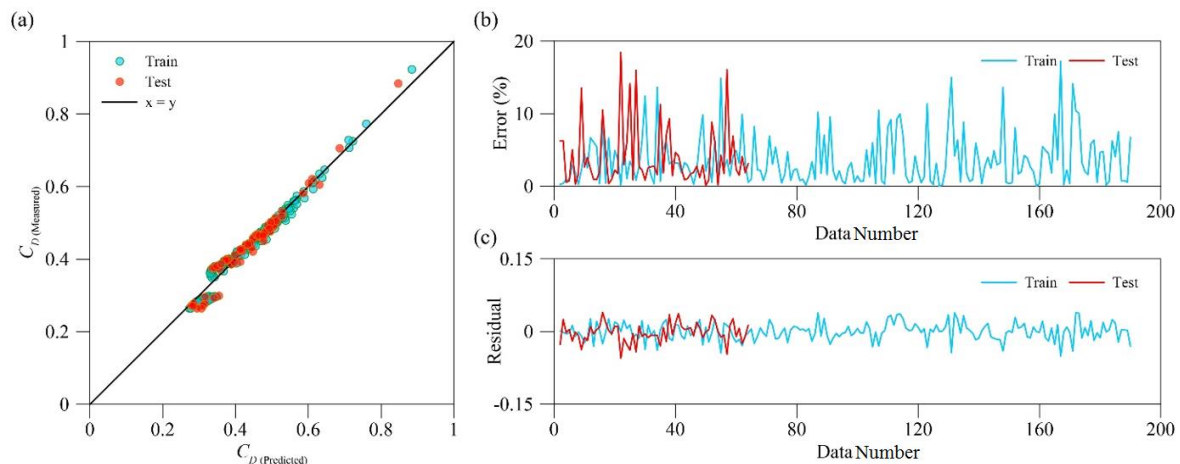
تغییرپذیری درصد کاهش دبی با افزایش دبی کاهش می‌یابد. با افزایش درصد انسداد شیب این تابع نزولی هم بیشتر می‌شود. به‌طور کلی با افزایش اندازه مصالح درصد کاهش دبی نیز زیاد می‌شود. در دانه‌بندی‌های بزرگ‌تر به دلیل دبی درون‌گذر بیشتر، اثرگذاری انسداد بر ضریب دبی به علت کاهش دبی درون‌گذر محسوس‌تر است. میزان درصد کاهش ضریب دبی بین ۰ تا ۷۰ درصد است.

**۳-۱- استخراج رابطه ریاضی محاسبه ضریب دبی**

در این بخش هدف استخراج رابطه ضریب دبی توسعه داده شده در بخش تحلیل ابعادی است. در مدل‌های فرا کاوشی استخراج رابطه تنها تابع‌های ریاضی مناسب احتمالی توسط کاربر تعیین شده و مدل تابع‌های مناسب، شکل تابع ریاضی بهینه و شمار و ترکیب عددهای ثابت را به‌صورت هوشمند انتخاب می‌کند. مدل GEP در سال ۲۰۰۱ توسط فریرا ارائه شد (Rahmanshahi and Shafai 2001a, 2001b). تنظیمات مدل GEP در جدول ۳ ارائه شده‌است. رابطه بهینه ارائه شده توسط مدل GEP در رابطه ۹ ارائه شده است.

$$C_d = -0.027 \xi \left( \frac{hs}{H} - n \right)^2 + 3.16 \frac{\xi}{4.34} - \frac{h_s}{H} \left( \frac{d_{50}}{P} + \xi \right)^2 + 1 / (5.64 \xi + 3.52 \frac{d_{50}}{P}) \quad (9)$$

در شکل ۱۰ نمودارهای مرتبط با دقت معادله نمایش داده شده است. در شکل (a) ۱۰ میزان‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده با استفاده از این رابطه در مقابل هم نسبت به خط ۴۵ درجه مقایسه شده‌اند. در شکل (b) ۱۰ درصد خطای رابطه و در شکل (c) ۱۰ اختلاف میزان‌های آزمایشگاهی و محاسبه‌ای با استفاده از رابطه استخراج‌شده، ارائه گردیده است. میزان فراسنجه‌های آماری این رابطه به همراه خطای رابطه در جدول ۴ ارائه شده است. میزان میانگین خطای پیش‌بینی ضریب دبی



**Fig. 10** (a) Comparison of measured and predicted discharge coefficient, b) prediction error and c) difference of measured and predicted discharge coefficient for training and test data based on the extracted relationship by GEP.

شکل ۱۰ (a) مقایسه ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسبه‌ای، (b) خطای پیش‌بینی، و (c) اختلاف ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسبه‌ای برای داده‌های آموزش

جدول ۴ فراسنجه‌های آماری رابطه (۹)

**Table 4** Statistical parameters of the Eq. (9)

Dataset	$R^2$	RMSE	MAPE	Error (%)			Residual		
				Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
Train	0.97	0.018	0.036	0.012	3.63	17.21	-0.051	0	0.039
Test	0.97	0.02	0.04	0.123	4.075	18.46	-0.055	-0.002	0.039

flow conditions. Journal of Hydro-environment Research, 44, 65-76.

Fathi-Moghaddam, M., Tavakol Sadrabadi M. and Rahmanshahi M. (2018). Numerical simulation of the hydraulic performance of triangular and trapezoidal gabion weirs in free flow condition. Flow Measurement and Instrumentation, 62 (2018), 93-104.

Ferreira, C. (2001a). Gene expression programming in problem solving. Proceedings of the 6th Online World Conf. on Soft Computing in Industrial Applications, 635-653.

Ferreira, C. (2001b). Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems. Complex Systems, 13(2), 87-129.

Fritz, H.M. and Hager, W.H. (1998). Hydraulics of embankment weirs. Journal of Hydraulic Engineering, 124(9), 963-971.

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

Kells, J.A. (1993). Spatially varied flow over rockfill embankments. Canadian Journal of Civil

## ۵- فهرست نشانه‌ها

$C_d$	ضریب دبی
$d_{50}$	اندازه میانگین ذرات (mm)
$g$	شتاب ثقل ( $m s^{-2}$ )
$H$	ارتفاع کل روی سرریز (m)
$h_s$	ارتفاع رسوبها (m)
$L_w$	طول تاج سرریز (m)
$n$	تخلخل
$P$	ارتفاع سرریز (m)
$Q$	دبی کل ( $m^3 s^{-1}$ )
$q$	دبی واحد عرض ( $m^2 s^{-1}$ )
$W$	عرض فلوم (m)
	نشانه‌های یونانی:
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزجت پویایی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $m^2 s^{-1}$ )

## ۶- منبع‌ها

Biabani, R. Salmasi, F. Nouri, M. and Abraham, J. (2022). Flow over embankment gabion weirs in free

- Instrumentation, 74, 101769, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101769>.
- Shariq, A. Hussain, A. and Ahmad, Z. (2022). Flow over gabion weir under free and submerged flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102199, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102199>.
- Engineering, 20(5), 820–827.
- Kells, J.A. (1994). Reply on discussion of spatially varied flow over rockfill embankments. *Canadian journal of civil engineering*, 21(1), 163–166.
- Leu, J.M., Chan, H.C. and Chu, M.S. (2008). Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6), 331-337.
- Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T. and Haneda, M. (2005). Discharge through a permeable rubble mound weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), 1–10.
- Mohamed, H. (2010). Flow over gabion weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8), 573-577.
- Mohammadpour, R., Ghani, A.A. and Azamathulla, H.M. (2013). Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(22), 9324-9337.
- Rahmanshahi, M. and 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.
- Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. and Shiri, J. (2014). Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches, *Journal of Hydrology*, 508, 254-265.
- Safarzadeh, A. and 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. and Taghi Sattari, M. (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(2), 205-2012.
- Salmasi, F., Sabahi, N. and Abraham J. (2021). Discharge Coefficients for Rectangular Broad-Crested Gabion Weirs: Experimental Study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(3), 04021001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001535).
- Shariq, A., Hussain, A. and Ahmad, Z. (2020). Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. *Flow Measurement and*