

Research Paper

Assessment of the Effect of the Hydraulic and Geometric Parameters on the Discharge Coefficient of the Labyrinth Weirs Using the Experimental Method and Intelligent Algorithms

Mahdi Majedi-Asl^{1*}, Mehdi Fuladipanah², Rasul Daneshfaraz³, Khalil Jannat⁴

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ramhormoz Branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran
3. Professor, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
4. MSc Student, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received:2021/07/15

Revised:2021/09/30

Accepted:2022/03/07

Online: 2022/03/13

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2022.28461.2323

Keywords:

Performance improvement of weir, Data-based algorithm, Discharge coefficient, Dimensional analysis

Abstract

Introduction: Using a non-linear weir to pass more excess water for a certain water head than a linear one has been extended remarkably. As a significant parameter, the discharge coefficient plays a key role in the passing flow rate. A combination of geometric and hydraulic parameters affects the value of the discharge coefficient. In this paper, two data-mining algorithms SVM and GEP have been implemented to discover hidden and complex relationships among the discharge coefficient and effective parameters.

Methods: In this research work, nine physical models of labyrinth weir with different values of wall angles, weir height, nose shape, inlet slope, and crest shapes were used to study the effect of geometric and hydraulic characteristics on the discharge coefficient. A rectangular reference model was used to compare the effects of the changes. In addition to laboratory study, two SVM and GEP algorithms were run using dimensionless parameters to simulate the discharge coefficient for various conditions.

Findings: The experimental results showed that increasing the wall angle increases the discharge coefficient. The discharge coefficient experienced rising values as the weir height increased. Improving flow conduction and non-collision of flow napes increased the discharge coefficient. Two algorithms had accurate performance, but the GEP was superior to the SVM. It can be concluded that inclined guidance wall has an important role in flow conduction. The weir height has the same effect with decreasing nape collision. The results of the simulation proved the utilization of data-based GEP and SVM models.

Citation: Majedi-Asl M, Fuladipanah M, Daneshfaraz R, Jannat KH. Assessment of the Effect of the Hydraulic and Geometric Parameters on the Discharge Coefficient of the Labyrinth Weirs Using the Experimental Method and Intelligent Algorithms. Water Resources Engineering Journal. 2022; 15(52): 73-92.

***Corresponding author:** Mahdi Majedi-Asl

Address: Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Tell: +989143222205

Email: mehdi.majedi@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Non-linear weirs have more passing length than linear ones for a certain value of flow width, so they have more utilization for water surface adjustment, flow control in channels, rivers, and dam reservoir purposes. Labyrinth weir is a common type of non-linear weir that has been considered by researchers in recent decades. The effect of some geometric and hydraulic characteristics appears as discharge coefficient in the head-discharge relationship. For the same conditions, the higher the discharge coefficient, the more flow will pass over the weir. The experimental study is one of the methods to determine the effect of parameters on the discharge coefficient value. Due to the occurrence of complex phenomena that cannot be measured or the existence of physical limitations in the laboratory, the use of intelligent artificial methods has become a growing trend in recent decades. The GEP and the SVM are two algorithms with train and test base phases that are used to extract the hidden and complex relationships among dependent and independent variables. In this research work, in addition to the experimental assessment of different geometric and hydraulic parameters on discharge coefficient, the outputs of the two mentioned algorithms have been considered and compared with laboratory results.

Materials and Methods

In this research work, all experiments were performed in a rectangular flume of length 13 m, width 1.2 m, and height 0.8 m in the hydraulic laboratory of Maragheh university. The flume was equipped with an electromagnetic flowmeter with an accuracy of ± 3 percent and a gage depth of accurate ± 0.1 mm. The bed slope was horizontal. Eight labyrinth weirs of plan trapezoidal (with three wall angles of 12, 20, 35 degrees, flat and quarter-circle in the crest shape, with linear and semi-circle in nose shape, with a 1.5% increase in the weir height and

upstream inlet bed slope of 0 and 1:1.5) were tested with a rectangular plan shape labyrinth weir as a reference model. Physical models were made from polyethylene of thickness 1 cm. All data were gathered after passing ten minutes from starting each test to achieve hydraulic stability. Using dimensional analysis, five dimensionless parameters were determined as $\frac{H_t}{P}$, Fr , $\frac{L_c}{W}$, $\frac{P}{W}$, $\frac{A}{W}$, SF and C. The independence of parameters was checked using the correlation test.

Findings

The angle of the inlet wall had a positive effect on increasing C_d values so that the average increase values of C_d for LW12, LW20, and LW35 than RLW were 42, 71, and 76 percent respectively. The slope of the upstream inlet bed along with the change in the crest nose shape compared to the control model has increased the discharge coefficient. The average percent improvement of C_d for LW12SU than LW12 was 9.2 and that of LW35SU than LW35 was 12.3. An increase of 1.5% in the height of the weir has improved its performance. The average value of performance improvement of LW35SUM to LW35 is 26.5 percent and that of LW12SUM to LW12 is 20.4 percent. The total number of experimental data was 212. The optimum model of the SVM simulator included $\frac{H_t}{P}$, $\frac{L_c}{W}$, $\frac{P}{W}$, $\frac{A}{W}$, SF and C parameters. The share percent of the train and the test phases were 60 and 40 respectively. The maximum values of $C_{d(DDR)}$ for the train and test stages were 11.16 and 9.76 respectively. The superior model for the GEP algorithm included $\frac{H_t}{P}$, Fr , $\frac{L_c}{W}$, $\frac{P}{W}$, $\frac{A}{W}$, SF and C parameters. the share of the train and test phases for the GEP were 80 and 20 percent, respectively. the highest values of $C_{d(DDR)}$ through the train and test phases were obtained 9.302 and 10.55 respectively.

Discussion

The experimental results showed that improving flow conduction increases the discharge coefficient of the weir. Geometric parameters i.e. the angle of upstream inlet wall, the height of the weir, and upstream inlet bed slope have a positive effect on the C_d values. These three factors justify streamlines and prevent nape collision. Of course, the shape of the weir crest and nose have an affirmative effect on the C_d values. Their corrective action was illustrated in the combination with the weir geometry. The results proved that SVM and the GEP algorithms are capable to simulate the C_d for the labyrinth weir with high accuracy. The amount of performance assessment criteria showed the superiority of the GEP over the SVM.

Conclusion

Upstream wall angle, upstream bed slope, and the weir height have improving effects on the labyrinth weir performance. Their effect boosts with the combination of the round shape of weir crest and nose shape. Data-mining SVM and GEP algorithms are potential to predict the C_d with high accuracy under different hydraulic and geometry conditions.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Majedi-Asl and Fuladipanah conceived the study and were in charge of overall direction and planning and performed the experiments and contributed to the interpretation of the results. Fuladipanah,

Daneshfaraz and Jannat took the lead in writing the manuscript and carried out the SVM&GEP Models. All authors provided critical feedback and helped shape the research, analysis and manuscript

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

ارزیابی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی روی ضریب گذردهی سرریزهای کنگره‌ای با دو روش آزمایشگاهی و الگوریتم‌های هوشمند

مهدی ماجدی اصل^{۱*}، مهدی فولادی پناه^۲، رسول دانشفرازا^۳، خلیل جنت^۴

۱. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران
۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

چکیده

مقدمه: ظرفیت بالای گذردهی سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای خطی، استفاده و کاربرد آنها را به عنوان سازه‌های تنظیم‌کننده‌ی سطح آب، تخلیه‌ی سیلاب و اندازه‌گیری جریان افزایش داده است. ضریب دبی جریان نقش بسیار مهمی در میزان دبی عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای ایفا می‌کند.

روش: پارامترهای موثر در ضریب دبی شامل ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز (H_t)، طول تاج سرریز (L_{cw})، عدد فرود بالادست (Fr)، طول دماغه سرریز (A)، عرض کل سرریز (W)، ارتفاع سرریز (P)، شکل سرریز (SF)، افزایش ارتفاع سرریز (C)، هستند. در این پژوهش، کارکرد نه مدل آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای به کمک تغییر زاویه‌ی دیواره (سه زاویه‌ی ۱۲، ۲۰ و ۳۵ درجه)، ارتفاع سرریز (۱/۵ درصد افزایش ارتفاع)، شکل تاج (مسطح و ربع دایره)، شیب دهانه‌ی سرریز و فرم دماغه‌ی سرریز (خطی و نیم‌دایره) در قالب ضریب دبی سرریز تحت شرایط جریان آزاد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مدل شاهد، سرریز کنگره‌ای مستطیلی می‌باشد.

یافته‌ها: تغییرات ضریب دبی نسبت به $\frac{H_t}{P}$ نشان داد با افزایش زاویه‌ی دیواره مقدار ضریب دبی به طور متوسط نسبت به مدل شاهد ۷۶ درصد افزایش یافت. با اعمال شیب کف بالادست و تغییر فرم دماغه، بهبود عملکرد سرریز به طور متوسط ۱۲/۳ درصد زیاد شد. در نهایت افزایش ارتفاع سرریز منجر به بهبود ۲۶/۵ درصدی مقدار ضریب دبی نسبت به مدل شاهد شد. بهبود هدایت جریان و نیز عدم تداخل تیغه‌های جریان با اعمال اصلاحات فوق‌الذکر دلیل بهبود عملکرد سرریز هستند. در ادامه دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژن برای شبیه‌سازی ضریب دبی با استفاده از ۱۸ مدل از ترکیب‌های مختلف پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده قرار گرفتند. بهترین مدل در SVM شامل پارامترهای $\frac{L_{cw}}{W}$ ، $\frac{P}{W}$ ، $\frac{A}{W}$ ، SF ، C ، $\frac{H_t}{P}$ و بهترین ترکیب در الگوریتم GEP شامل پارامترهای $\frac{L_{cw}}{W}$ ، $\frac{P}{W}$ ، $\frac{A}{W}$ ، C ، SF ، $\frac{H_t}{P}$ بودند.

نتیجه‌گیری: مقایسه آماره‌های ارزیابی عملکرد ضمن تایید قابلیت بسیار زیاد هر دو الگوریتم در پیش‌بینی ضریب دبی جریان، حاکی از برتری الگوریتم GEP نسبت به الگوریتم SVM بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

تاریخ اولین بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

تاریخ آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2022.28461.2323

واژه‌های کلیدی:

بهبود عملکرد سرریز، الگوریتم داده‌مبنا، ضریب دبی، تحلیل ابعادی.

* نویسنده مسئول: مهدی ماجدی اصل

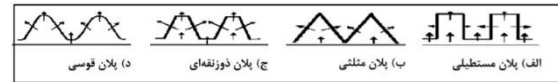
نشانی: گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تلفن: ۰۹۱۴۳۲۲۲۲۰۵

پست الکترونیکی: mehdi.majedi@gmail.com

مقدمه

سرریزهای کنگره‌ای از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای تنظیم سطح آب، کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به کار گرفته می‌شوند. این سرریزها در زمره‌ی سرریزهای غیرمستقیم قرار می‌گیرند. شکل تاج سرریز از نمای بالا به صورت مثلثی، مستطیلی، دوزنقه‌ای یا قوسی با تعداد تناوب مختلف در عرض کانال قابل مشاهده و طراحی است (شکل ۱). فرضیه‌ی اصلی در ساخت این نوع سرریزها، افزایش ظرفیت گذردهی جریان به ازای مقدار معینی از سطح آب بالادست است (۲).



شکل ۱ پلان‌های مختلف سرریز کنگره‌ای (۲۴)

نقطه‌ی آغازین ساخت سرریزهای کنگره‌ای به سال ۱۹۲۰ برمی‌گردد، اما اولین مطالعات علمی و آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی آنها توسط (۱۲) انجام شده است. یکی از زمینه‌های پژوهش در مورد سرریز کنگره‌ای، بررسی عوامل موثر بر ضریب دبی آن است. پارامترهای مختلفی روی ضریب دبی تاثیرگذار هستند که بررسی میزان اثرگذاری آنها روی ضریب دبی موضوع پژوهش‌های مختلفی شده است. این پژوهش‌ها در قالب آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی انجام شده است. (۲۴) مطالعه‌ی آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مستطیلی را انجام دادند. آنها رابطه‌ی دبی جریان و ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی را با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج و برای تعیین ضریب‌های ثابت رابطه‌ها از مدل فیزیکی استفاده کردند. مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر تراز پایاب بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای توسط (۳۳) انجام شد. آنها بیان داشتند که افزایش تراز بستر پایاب به یک سوم ارتفاع سرریز، تاثیری بر ضریب دبی جریان در سرریزهای مورد مطالعه ندارد. (۳۰) عملکرد سرریز کنگره‌ای قوسی را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان داشتند که قوسی کردن سرریز کنگره‌ای می‌تواند کارایی آن را تا حدود ۵۰ درصد بهبود ببخشد. (۲۳) تاثیر شیب وجه بالادست و پایین دست را در ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی بررسی کردند. طبق یافته‌های آنها با ایجاد شیب تاج سرریز کنگره‌ای مستطیلی در وجه بالادست، ضریب دبی سرریز نسبت به حال بدون شیب کاهش می‌یابد. (۲۷) تاثیر تغییر زاویه‌ی سیکل قوسی بر روی ضریب دبی جریان را بررسی کردند. (۲۹) به بررسی آزمایشگاهی اثر دیوارهای هادی بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای قوسی پرداختند. نتیجه‌ی پژوهش آنها نشان داد که قوسی کردن سرریز کنگره‌ای می‌تواند بهبود کارایی آن را در پی داشته باشد. همچنین با افزایش بار هیدرولیکی، کارایی سرریزهای کنگره‌ای قوسی کاهش می‌یابد. (۸) پژوهش آزمایشگاهی را به منظور ارزیابی تاثیر شعاع قوس و طول سیکل بر عملکرد سرریز کنگره‌ای قوسی انجام دادند. (۶) به صورت آزمایشگاهی تاثیر موقعیت درجه بر ضریب دبی سرریز-دریچه کنگره‌ای مستطیلی را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد برای یک دبی و طول موثر ثابت با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار ارتفاع آب بالادست سرریز و استغراق پایین دست کاهش می‌یابد که این دو ضریب دبی جریان را افزایش می‌دهند. (۴) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی بیان کرد

با افزایش استغراق، کارایی دماغه‌های بالادست به دلیل استغراق موضعی در بالادست دهانه‌های خروجی کاهش می‌یابد. استغراق محلی، شکل تاج سرریز، هندسه‌ی سرریز، تاثیرات ویسکوزیته و فشار در زیر تیغه‌ی جریان سرریزهای کنگره‌ای از عوامل موثر در عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای هستند. ضمن اینکه سه بعدی بودن جریان منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری‌ها در شرایط آزمایشگاهی می‌شود. (۱۵) برای بهینه کردن و توسعه‌ی سرریزها، جریان روی سرریز دوزنقه-ای کنگره‌ای دو سیکل را با تغییر در زاویه‌ی دیواره جانبی از ۶ تا ۳۶ درجه مطالعه کردند و با ارزیابی آزمایش‌ها در دامنه‌ی گسترده‌ای از مقادیر پارامترهای مهم به ارزیابی ویژگی‌های مختلف یک سرریز کنگره‌ای پرداختند. (۵) با استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای را به وسیله‌ی نصب سازه‌های هیدرودینامیکی در قسمت دماغه‌های بالادست سرریز، مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش تجربی انجام شده توسط (۳۲) نشان داد دبی عبوری در سرریز کنگره‌ای حدود ۷۰ درصد بیشتر از دبی عبوری از روی سرریز لبه‌تیز مستقیم تحت شرایط جریان آزاد است. آنها بیان داشتند با افزایش درجه‌ی استغراق سرریز، راندمان گذردهی سرریز کاهش می‌یابد. پژوهش‌های مختلف حاکمی از تاثیرگذاری پارامترهای هیدرولیکی و فیزیکی مختلف و تاثیرگذار در ضریب دبی جریان می‌باشد که امکان بررسی آزمایشگاهی آنها و یا یافتن رابطه‌ی تحلیلی بین آنها از روش‌های معمول میسر نمی‌باشد. در این بین، هوش مصنوعی با قابلیت یافتن روابط پیچیده و مخفی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، کاربرد زیادی در دهه‌های اخیر بین پژوهشگران یافته است که از جمله‌ی آنها می‌توان به SVM، ANFIS، ANN، ARMA، GEP و ... اشاره کرد. (۳۱) ضمن انجام مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی پارامترهای موثر بر عملکرد سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، از الگوریتم SVM برای پیش‌بینی نتایج استفاده کردند که نتایج بسیار رضایتبخشی داشت. (۱۸) کاربرد سیستم‌های تکاملی در تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی را بررسی کردند. در نهایت نتیجه گرفتند که الگوریتم SVM در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای لبه تیز عملکرد بسیار مناسبی دارد. (۱۰) با استفاده از الگوریتم‌های GEP و SVM موفق به پیش‌بینی و استخراج رابطه‌ی دبی-اشل در سرریزهای کنگره‌ای با دقت بسیار زیاد شدند. (۲۶) ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی شکل را با استفاده از روش داده-مبنا مورد مطالعه قرار دادند. (۲۲) ضریب دبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای را با استفاده از دو الگوریتم شبکه‌ی عصبی و SVM برای ۴۲۴ داده‌ی آزمایشگاهی شبیه‌سازی نمودند. (۱۶) ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی را با مدل فیزیکی و الگوریتم آموزش ماشین شبیه‌سازی کردند. (۲۸) کارایی هیدرولیکی سرریزهای غیر خطی را با روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های مبتنی بر تابع کرنل مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ی پژوهش آنها حاکمی از دقت بسیار مناسب الگوریتم‌های آموزش ماشین بود. استفاده از مدل‌های داده-مبنا در پیش‌بینی ضریب دبی جریان توسط (۱۱)، (۱۹)، (۲۵)، (۹)، (۳)، (۷)، (۳۴)، (۱۷) و (۱۳) نیز توصیه و پیشنهاد شده است. مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان‌دهنده گسترش و رشد چشمگیر استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای شبیه‌سازی خصوصیات و

شاخص‌های هیدرولیکی) ارتفاع سطح آب بالادست سرریز قبل از افت سطح آب، با عمق سنج نقطه‌ای با دقت ± 0.1 میلی‌متر و دبی جریان با استفاده از دبی‌سنج آتراسونیک نصب شده بر روی لوله‌ی مکش پمپ با خطای نسبی $\pm 3\%$ درصد قرائت شد. شیب کف فلوم برای تمامی آزمایش‌ها برابر صفر تنظیم شد. بیان شماتیک از تجهیزات فلوم آزمایشگاهی در شکل ۲ و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد استفاده در این پژوهش به صورت نمادین در شکل ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۱ ویژگی مدل‌ها همراه با محدوده‌ی متغیرهای فیزیکی آنها را نشان می‌دهد. در این جدول، S نشان دهنده‌ی شیب کف ورودی بالادست سرریز، W عرض کل سرریز، α زاویه دیواره سیکل، P ارتفاع سرریز و A_{up} و A_{dw} به ترتیب طول دماغه‌ی بالادست و پایین‌دست سرریز هستند. برای نمونه، عکس‌های حین آزمایش از سرریزها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. برای محاسبه‌ی ضریب دبی جریان آزاد (C_d) از رابطه‌ی یک بعدی بیان شده در معادله‌ی (۱) استفاده شده است:

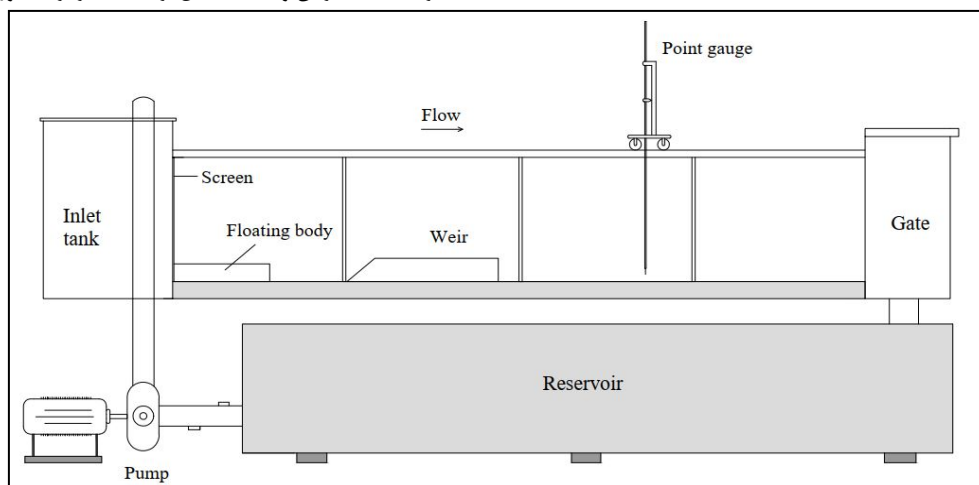
$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_c H_t^{1.5} \quad (1)$$

که در این رابطه Q، شدت جریان عبوری از روی سرریز کنگره‌ای بر حسب متر مکعب بر ثانیه، L_c طول تاج سرریز بر حسب متر، H_t ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز بر حسب متر، C_d ضریب شدت جریان و g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه هستند.

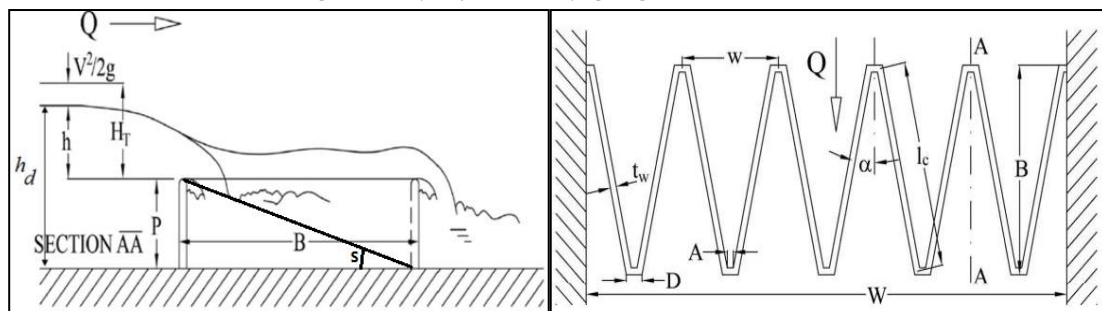
پارامترهای سازه‌های هیدرولیکی در دهه‌های اخیر است. در این پژوهش، ضمن بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی روی ضریب دبی جریان، از دو الگوریتم GEP و SVM برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای استفاده شده است. در نهایت، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و خروجی دو الگوریتم انجام و شبیه‌ساز برتر بر مبنای سنج‌های آماری انتخاب شده است.

مواد و روش‌ها تجهیزات آزمایشگاهی

پژوهش پیش رو مقایسه‌ی کارایی هیدرولیکی و ارزیابی عملکرد سرریز کنگره‌ای خطی و سرریز کنگره‌ای مستطیلی با استفاده از مدل فیزیکی ساخته شده از پلی‌اتیلن به ضخامت یک سانتیمتر است. همه‌ی آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه مراغه بر روی نه مدل سرریز کنگره‌ای و در فلومی با کف فیزی و دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلاس با مقطع مستطیلی به طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر، ارتفاع ۰/۸ متر انجام شده‌اند. برای اینکه جریانی کاملاً توسعه یافته و نسبتاً آرام، به سمت سرریز جریان داشته باشد مدل‌ها در فاصله‌ی هفت متری از بالادست کانال نصب شدند. تعداد سیکل‌های هر سرریز به دلیل محدودیت‌های فیزیکی و آزمایشگاهی برابر با چهار در نظر گرفته شد. در هر آزمایش پس از گذشت ده دقیقه (به منظور تثبیت



شکل ۲ شماتیک کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی



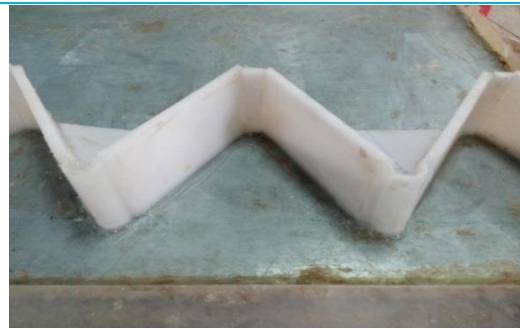
شکل ۳ تصاویری از سرریز کنگره‌ای و پروفیل طولی سرریز و با پارامترهای هندسی و هیدرولیکی

جدول ۱ مشخصات مدل‌های فیزیکی سرریزهای کنگره‌ای ساخته شده در این تحقیق

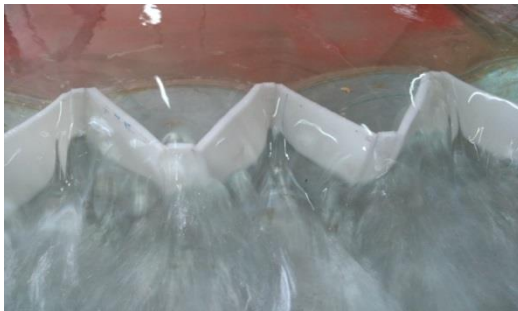
شماره مدل	نام مدل	نوع سرریز	W (cm)	α (deg)	P (cm)	Si	فرم تاج سرریز	فرم دماغه سرریز	A_{up} (cm)	A_{dw} (cm)
۱	RLW	کنگره‌ای مستطیلی	۱۰۰	۰	۱۰	-	مسطح	-	-	-
۲	LW12	کنگره‌ای	۱۰۰	۱۲	۱۰	-	مسطح	خطی	۲	۲
۳	LW12S	کنگره‌ای	۱۰۰	۱۲	۱۰	۱:۱/۵	مسطح	خطی	۲	۲
۴	LW12SU	کنگره‌ای	۱۰۰	۱۲	۱۰	۱:۱/۵	مسطح	نیم‌دایره	۲	۲
۵	LWM12SU	کنگره‌ای	۱۰۰	۱۲	۱۱/۵	۱:۱/۵	ربع دایره	نیم‌دایره	۲	۲
۶	LW20	کنگره‌ای	۱۰۰	۲۰	۱۰	-	مسطح	خطی	۲	۲
۷	LW35	کنگره‌ای	۱۰۰	۳۵	۱۰	-	مسطح	خطی	۲	۲
۸	LW35SU	کنگره‌ای	۱۰۰	۳۵	۱۰	۱:۱/۵	مسطح	نیم‌دایره	۲	۲
۹	LWM35SU	کنگره‌ای	۱۰۰	۳۵	۱۱/۵	۱:۱/۵	ربع دایره	نیم‌دایره	۲	۲



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴ نمای از سرریزهای کنگره‌ای؛ (الف) LW12 (ب) LW35 (ج) LW35 (د) LW12 حین آزمایش

در جریان از تاثیر نیروی لزجت (عدد رینولدز) در مقابل نیروی اینرسی می‌توان صرفنظر کرد. همچنین بر روی سرریزها، اگر ارتفاع سیال از یک مقدار مشخص (سه سانتیمتر) بیشتر شود، نیروی کشش سطحی (عدد ویر) قابل چشم‌پوشی است. با استفاده از روش پی‌باکینگهام، رابطه‌ی زیر برای تعیین Cd به دست آمد:

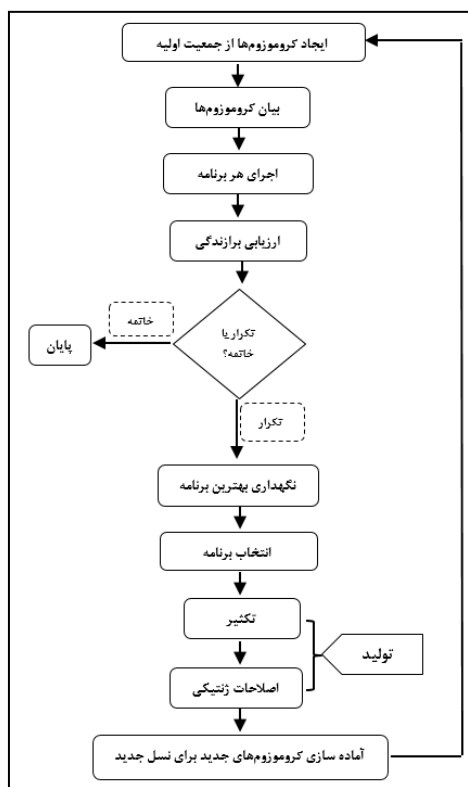
$$C_d = F\left(\frac{H_t}{P}, Fr, \frac{L_c}{W}, \frac{P}{W}, \frac{A}{W}, SF, C\right) \quad (2)$$

که در این معادله Fr عدد فرود بالادست سرریز است.

تحلیل ابعادی

متغیرهای مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای شامل: سرعت جریان بالادست (U)، عمق آب روی تاج سرریز (y)، طول دماغه‌ی سرریز (A)، عرض کل سرریز (W)، زاویه‌ی دیواره (α)، ارتفاع سرریز (P)، ضخامت سرریز (Tw)، تعداد سیکل‌ها (N)، شکل دماغه‌ی سرریز (SF)، افزایش ارتفاع سرریز (C)، شیب دیواره‌ی سرریز (S)، لزجت دینامیکی (μ)، جرم مخصوص آب (ρ)، کشش سطحی (σ) و شتاب ثقل (g) هستند. در هیدرولیک کانال‌های روباز به دلیل وجود آشفتگی

کروموزوم به صورت رشته‌ی خطی کدگذاری می‌شود و در نهایت به صورت نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف به فرم بیان درختی نمایش داده می‌شود. در شکل ۵ فرآیند الگوریتم GEP نشان داده شده است (۱۰). مراحل انجام الگوریتم GEP مشتمل بر پنج مرحله به قرار زیر است: (الف) تعیین تابع برازش؛ (ب) انتخاب مجموعه‌ی ترمینال‌ها و مجموعه‌ی توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها؛ (پ) انتخاب ساختار کروموزوم‌ها؛ (ت) انتخاب تابع پیوند؛ (ث) انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آنها. مطابق شکل ۵، تولید اولین مرحله از این الگوریتم جمعیت اولیه از طریق فرآیند کاملاً تصادفی و یا به کمک اطلاعات موجود در مسئله از راه‌حل‌ها است. در گام بعدی، کروموزوم‌ها پس از ارزیابی با یک تابع برازش به صورت درختی نمایش داده می‌شوند. در صورت رضایتبخش بودن کیفیت کروموزوم‌های به دست آمده از یک راه‌حل، تکامل آنها به پایان می‌رسد و متوقف می‌شود. در غیر این صورت، بهینه‌ترین راه‌حل از نسل حاضر حفظ می‌شود و نخبه‌گزینی انجام می‌شود. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به طور متوسط بهبود یابد.



شکل ۵ روندنمای الگوریتم GEP

آماره‌های ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیش‌بینی C_d ، از سه آماره‌ی ارائه شده در معادله‌های ۶ تا ۸ استفاده شده است:

الگوریتم SVM

الگوریتم SVM ارائه شده توسط (۳۶) یکی از روش‌های یادگیری ماشینی مبتنی بر فرآیندهای آموزش و آزمون است که بر پایه‌ی کمینه کردن خطای مدل‌سازی از اصولی با عنوان حداقل‌سازی ریسک ساختاری شکل گرفته است. در مدل رگرسیونی SVM، وابستگی متغیر وابسته Y به مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل در قالب معادله‌ی (۳) تخمین زده می‌شود:

$$y=f(x)+noise \quad (3)$$

هدف اصلی در الگوریتم SVM، یافتن فرمی از $f(x)$ است به طوری که بتواند مقدارهای جدیدی را که الگوریتم SVM تجربه نکرده است به شیوه‌ی درست و صحیح پیش‌بینی کند. طی فرآیند آموزش، بهینه‌سازی دایمی تابع خطا انجام می‌شود. معادله‌ی تابع خطا در الگوریتم SVM به قرار زیر است:

$$\frac{1}{2}W^TW+C\sum_{i=1}^N\xi_i+C\sum_{i=1}^N\xi_i^* \quad (4)$$

تابع خطای ارائه شده در معادله‌ی (۴) براساس محدودیت‌های ارائه شده در معادله‌ی (۵) کمینه می‌شود:

$$\begin{aligned} W^T\Phi(x_i)+b-y_i &\leq \varepsilon+\xi_i^* \\ y_i-W^T\Phi(x_i)-b &\leq \varepsilon+\xi_i \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0, \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

که در این معادله‌ها C ثابت گنجایش، W بردار ضریب، W^T ترانزپاز بردار ضریب‌ها، ξ_i و ξ_i^* ضریب‌های کمبود، b ضریب ثابت، N تعداد داده‌های مورد استفاده در الگوی آموزش مدل و Φ تابع کرنل است. تابع‌های کرنل مورد استفاده در الگوریتم SVM در جدول ۲ ارائه شده است (۱۰). کرنل تابع پایه شعاعی به عنوان بهترین انتخاب از بین دیگر توابع کرنل گزارش شده است.

جدول ۲ انواع تابع کرنل

تعریف تابع	نام تابع
$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$	خطی
$K(x_i, x_j) = [(x_i, x_j) + 1]^d$	چند جمله‌ای
$K(x_i, x_j) = \exp[-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2}]$	تابع پایه شعاعی
$K(x_i, x_j) = \tanh[-\alpha(x_i, x_j) + c]$	تابع پایه شعاعی نمایی

الگوریتم GEP

این الگوریتم مبتنی بر نظریه‌ی تکامل داروین است که به صورت گردشی در قالب معیارهای کیفی تابع هدف را تعریف می‌کند. طی دو گام آموزش و آزمون، تابع هدف را بر اساس تصحیح ساختار داده‌های مورد استفاده ارائه می‌دهد. در این الگوریتم، هر فرد در قالب ژنوم یا

بیانگر دقت زیاد مدل مورد نظر است. برای رسم منحنی، باید مقادیرهای استاندارد شده DDR را که با نماد Z_{DDR} نمایش داده می‌شوند با استفاده از تابع گوسی محاسبه نمود.

نتایج و بحث استقلال داده‌ها

قبل از استفاده از داده‌ها اندازه‌گیری شده باید از استقلال خطی آنها اطمینان حاصل نمود. برای نشان دادن استقلال بین متغیرهای ورودی، می‌توان از آزمون همبستگی استفاده کرد. اگر جواب این آزمون مثبت باشد، یعنی تعداد زیادی از داده‌های یک ورودی با تعداد زیادی از داده‌های ورودی دیگر با هم در ارتباط است. اگر منفی باشد یعنی تعداد کمی از داده‌های یک ورودی با تعداد زیادی از داده‌های ورودی دیگر با هم در ارتباط است و اگر جواب آزمون صفر شود بین دو ورودی X_i و X_j استقلال خطی وجود دارد. معادله‌ی (۱۰) بیان‌گر آزمون همبستگی است:

$$\text{Cor}(x,y) = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

$$\text{Cov}(x,y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (11)$$

انحراف معیار σ_x و σ_y میانگین متغیرها و \bar{x} و \bar{y} که در این معادله‌ها استاندارد متغیرها هستند. در

هستند. بنابراین استقلال سری داده‌های ورودی، مناسب می‌باشند. البته بیشترین همبستگی بین دو پارامتر $(\frac{P}{W}, \frac{A}{W})$ و $(\frac{P}{W}, \frac{L_c}{W})$ مشاهده می‌شود که به دلیل وجود پارامتر مشترک W بین آنها است (۱۴).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((C_{di})_M - (C_{di})_P)^2}{N}} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{di} - \bar{C}_d)_M (C_{di} - \bar{C}_d)_P}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (C_{di} - \bar{C}_d)_M^2] [\sum_{i=1}^N (C_{di} - \bar{C}_d)_P^2]}} \quad (7)$$

$$\text{DC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N ((C_{di})_M - (C_{di})_P)^2}{\sum_{i=1}^N ((C_{di})_M - \bar{C}_d)_M^2} \quad (8)$$

که در این معادله‌ها RMSE مجذور میانگین مربعات خطا، R^2 ضریب تبیین، DC ضریب ناش-ساتکلیف، زیرنویس‌های M و P به ترتیب بیانگر مقادیرهای مشاهده‌ای و محاسبه‌ای هستند. شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد فوق‌الذکر، توصیف‌گر متوسط خطا هستند و قضاوت صحیحی در خصوص عملکرد مدل‌ها و همچنین توزیع خطاها ارائه نمی‌نمایند. برای رفع این محدودیت، (۲۱) استفاده از آماره‌ی نسبت تفاوت توسعه داده شده ۱ را پیشنهاد دادند:

$$\text{DDR} = \frac{\text{Predicted values}}{\text{Observed values}} - 1 \quad (9)$$

مقدار $\text{DDR} = 0$ بیانگر معادل بودن مقادیرهای محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، مقدار $\text{DDR} > 0$ بیانگر بیشتر بودن مقدار محاسبه‌ای از مشاهده‌ای و حالت $\text{DDR} < 0$ بیانگر کم بودن مقدار محاسبه‌ای از مشاهده‌ای هستند. برای قضاوت بهتر، استفاده و محاسبه‌ی تابع گوسی مقادیرهای DDR پیشنهاد شده است که به صورت توزیع نرمال استاندارد رسم می‌شود. تمایل بیشتر به سمت محور عمودی همراه با مقدار بیشتر روی آن

جدول ۳ نتایج این آزمون ارائه شده است. بسیاری از مقادیرهای به دست آمده برای آزمون همبستگی در جدول، نزدیک به صفر و یا منفی

جدول ۳ نتایج آزمون همبستگی متغیرهای مستقل پژوهش حاضر

$\frac{H_t}{P}$	Fr	$\frac{L_c}{W}$	$\frac{P}{W}$	$\frac{A}{W}$	SF	C	$\frac{H_t}{P}$
۰/۰۰۱۵	-۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۳	۰/۰۱۳۲	-۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۲	-	C
-۰/۰۰۳۳۵	۰/۰۰۱۶۹	-۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۳۴	۰/۰۰۰۳۲	-	۰/۰۰۱۲	SF
-۰/۰۱۶۳	۰/۰۰۱۲۷	۰/۲۱	۰/۶۵	-	۰/۰۰۰۳۲	-۰/۰۱۴	$\frac{A}{W}$
-۰/۰۲۱۶	-۰/۱۰۶۳	۰/۴۳۲	-	۰/۶۵	۰/۰۰۲۳۴	-۰/۰۱۳۲	$\frac{P}{W}$
۰/۱۴۷۲	-۰/۰۹۹	-	۰/۴۳۲	۰/۲۱	-۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳	$\frac{L_c}{W}$
۰/۱۱۲۵	-	-۰/۰۹۹	-۰/۱۰۶۳	۰/۰۰۱۲۷	۰/۰۰۱۶۹	-۰/۰۱۴۹	Fr
-	۰/۱۱۲۵	۰/۱۴۷۲	-۰/۰۲۱۶	-۰/۰۱۶۳	-۰/۰۰۳۳۵	-۰/۰۰۱۵	$\frac{H_t}{P}$

تاثیر زاویه دیواره‌ی سیکل بر سرریزهای کنگره‌ای نشان داده شده‌است. همان طور که مشخص است کمترین ضریب دبی مربوط به

تاثیر زاویه دیواره‌ی سیکل بر سرریزهای کنگره‌ای

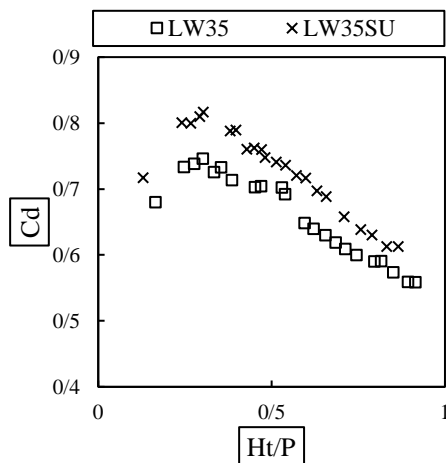
در

¹ Developed Discrepancy Ratio (DDR)

سیکل بیشتر می‌شود و بالعکس. علت اصلی این تداخل تیغه‌های جریان در سرریز RLW همزمان با افزایش بار آبی است که منجر به کاهش ضریب دبی می‌شود. وجود دیواره‌ی شیب‌دار تداخل تیغه‌های جریان را کاهش می‌دهد و همین امر منجر به بهبود هدایت جریان و افزایش راندمان سرریز با دیواره‌های زاویه‌دار می‌شود. به طور متوسط افزایش ضریب دبی برای سرریزهای LW12، LW20، LW35 و LW35 نسبت به RLW به ترتیب ۴۲، ۷۱ و ۷۶ درصد می‌باشد.

تاثیر اعمال شیب بالادست و تغییر فرم دماغه سرریز بر عملکرد آنها

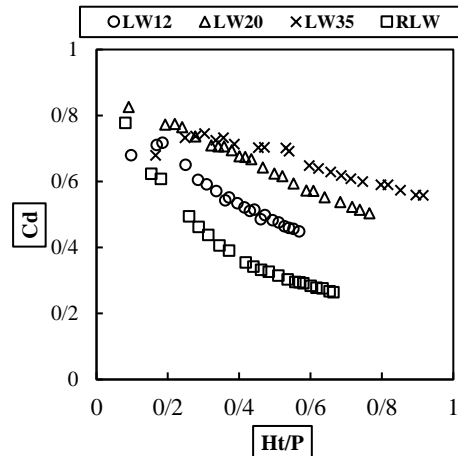
در این بخش از پژوهش، علاوه بر اعمال زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز تاثیر تغییر فرم تاج سرریز و نیز فرم دماغه‌ی سرریز روی ضریب دبی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا تاثیر هر یک از اصلاحات فوق برای یک نوع سرریز در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اعمال شیب بالادست سرریز همزمان با تغییر شکل دماغه سرریز ضریب دبی جریان را بهبود بخشیده است. متوسط بهبود عملکرد ضریب دبی برای LW12SU نسبت به LW12 برابر با ۹/۲ درصد و متوسط بهبود عملکرد LW35SU نسبت به LW35 برابر با ۱۲/۳ درصد است. بنابراین بهبود نسبی در LW35 نسبت به LW12 بیشتر است.



شکل ۶ تاثیر زاویه دیواره سیکل بر مقدار Cd به ازای

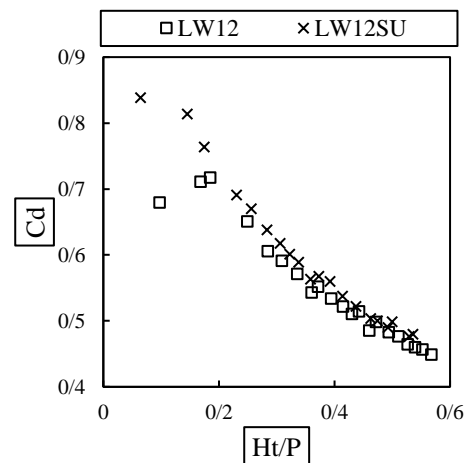
RLW (بدون زاویه‌ی دیواره) و بیشترین مقدار ضریب دبی مربوط به LW35 می‌باشد. طبق

به ازای $\frac{H_t}{P} < 3/0$ اختلاف بین ضریب دبی سرریزها کم است ولی با افزایش بار نسبی، تاثیر زاویه‌ی دیواره سیکل مشهودتر می‌شود.



شکل ۷ روند مثبت تاثیر اعمال اصلاحات در هر یک از سرریزهای کنگره‌ای

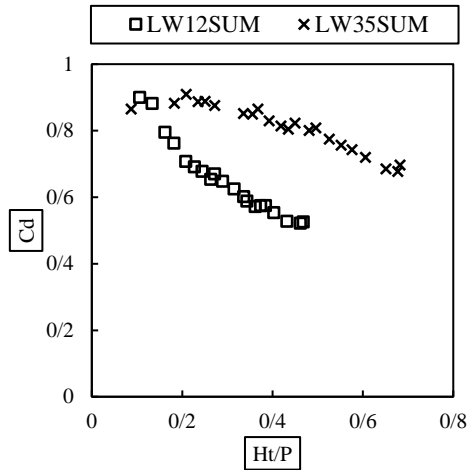
روند کاهشی ضریب دبی در سرریز RLW نسبت به سه سرریز دیگر بسیار زیاد است. طبق این نمودار، با افزایش بار آبی تاثیر زاویه‌ی دیواره



کمتر از ۳/۰، اختلاف بین ضرایب دبی چندان قابل توجه نیست اما با افزایش بار آبی نسبی، این تفاوت چشمگیرتر می‌شود.

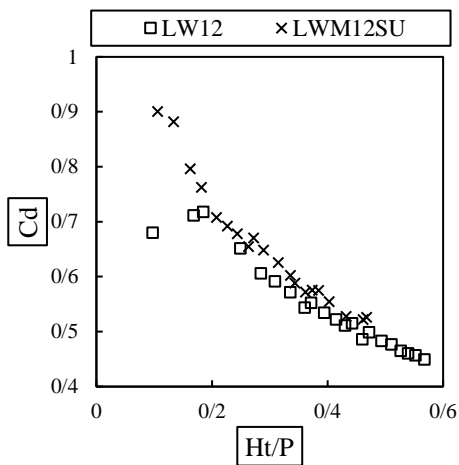
برای مقایسه‌ی بهتر بین سرریزها، منحنی تغییرات ضریب دبی برای سرریزهای RLW، LW12SU و LW35SU نسبت به $\frac{H_t}{P}$ در شکل ۸ رسم شده است. در این نمودار نیز تاثیر مثبت فرم دماغه و شیب بالادست روی ضریب دبی کاملاً روشن است. این تفاوت در $\frac{H_t}{P}$ زیاد، نمود بیشتری دارد. بهبود مقدار ضریب دبی کمینه با اعمال این دو اصلاح برابر با ۴۳ درصد است. در این حالت نیز، به ازای بار آبی نسبی

مقدار بهبود عملکرد LW35SUM در مقام مقایسه با LW35 به طور متوسط برابر با ۲۶/۵ درصد و مقدار متناظر آن برای LW12SUM در مقایسه با LW12 به طور میانگین برابر با ۲۰/۴ درصد است. مقایسه عملکرد بین این دو سرریز در

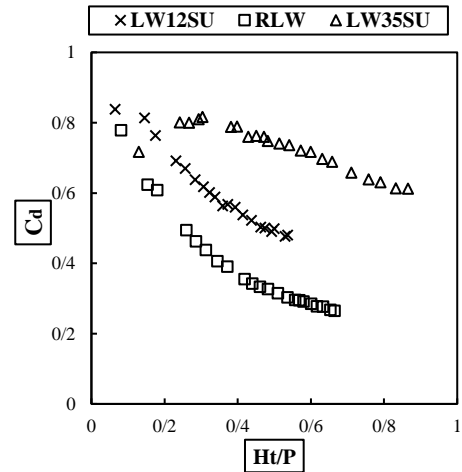


شکل ۱۰ مقایسه تغییرات Cd در LW35SUM و LW12SUM

نشان داده شده است. طبق این شکل، افزایش ضریب دبی در LW35SUM نسبت به LW12SUM بسیار زیاد است به طوری که اندازه‌گیری‌ها افزایش ۵۰ درصدی را به طور متوسط نشان می‌دهد.



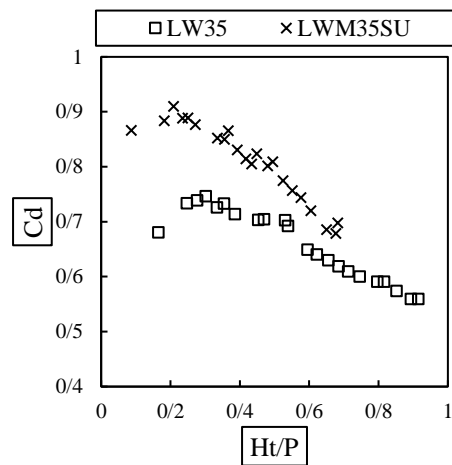
شکل ۹ تاثیر مثبت افزایش ارتفاع سرریز روی ضریب دبی جریان

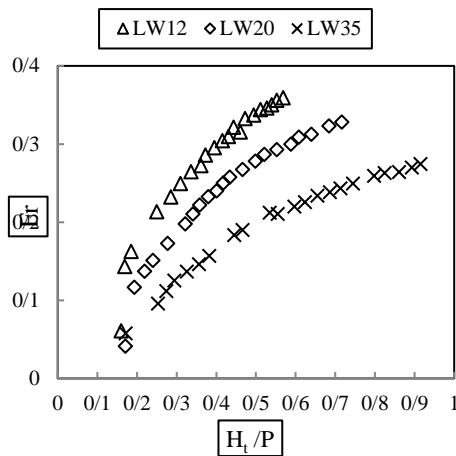


شکل ۸ تاثیر تغییر فرم دماغه و شیب بالادست بر Cd سرریز کنگره‌ای

تاثیر اعمال افزایش ارتفاع سرریز

افزایش ارتفاع سرریز آخرین اصلاحی است که روی فیزیک مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده است تا تاثیر آن روی تغییرات ضریب دبی بررسی شود. تاثیر افزایش ارتفاع سرریز روی عملکرد آن، در ابتدا با مقایسه درون گروهی هر سرریز کنگره‌ای در شکل ۹-الف و ۹-ب مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان طور که قابل مشاهده است با افزایش ارتفاع سرریز به میزان ۱/۵ درصد، ضریب دبی آنها بهتر شده است.

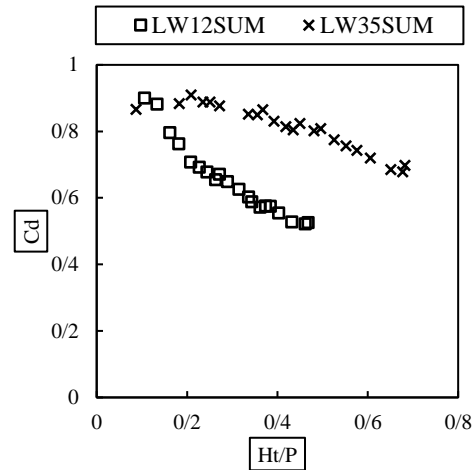




به ازای α مختلف $\frac{H_t}{P}$ در برابر Fr شکل ۱۱ تغییرات

الگوریتم‌های فرامدلی

ترکیب‌های بی‌بعد مختلفی از متغیرهای مستقل در قالب ۱۸ مدل برای استفاده در دو الگوریتم SVM و GEP برای پیش‌بینی C_d استخراج شد. این مدل‌ها براساس به کارگیری متغیرهای ذکر شده در معادله‌ی (۲) به دست آمدند. به کمک هر یک از الگوریتم‌ها بر مبنای یکی از مدل‌های هجده‌گانه، پیش‌بینی ضریب دبی جریان انجام شد و در نهایت بهترین مدل به ازای مقدارهای بهینه شاخص‌های ارزیابی انتخاب شد.



شکل ۱۰ مقایسه تغییرات C_d در LW35SUM و LW12SUM

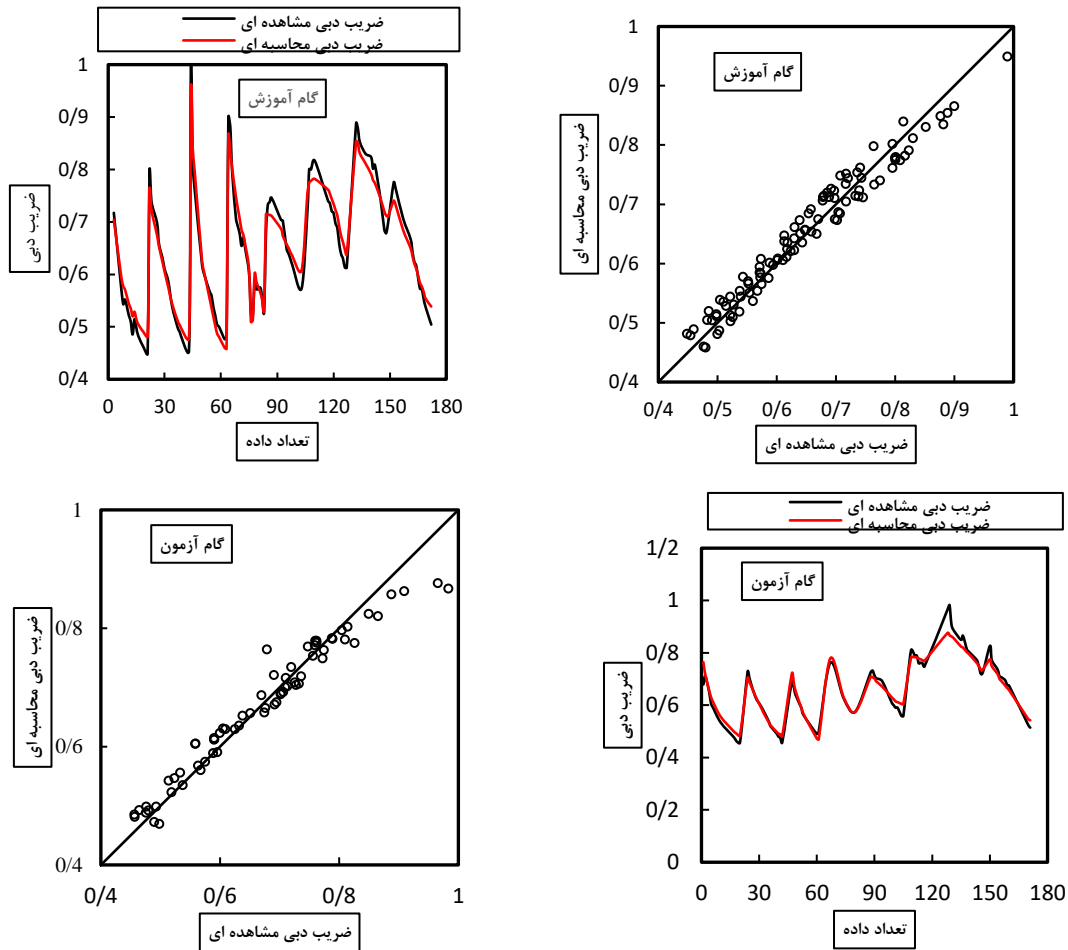
تأثیر مشخصات هندسی سرریز، خصوصیات هیدرولیکی جریان در بالادست را تحت تأثیر قرار می‌دهد که می‌توان عدد فرود جریان را به عنوان پارامتر شاخص برای این منظور در نظر گرفت. در شکل ۱۱ نمودار تغییرات عدد فرود (Fr) در مقابل نسبت بار آبی ($\frac{H_t}{P}$) به ازای مقادیر مختلف زاویه دیواره نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود رابطه مستقیمی بین عدد فرود جریان و عمق آب روی تاج سرریز وجود دارد. به طوری که در این شکل مشخص است، در تمامی سرریزها با افزایش دبی (با افزایش نسبت بار آبی)، سرعت جریان آب بیشتر شده و عدد فرود نیز افزایش یافته است و همچنین با کاهش زاویه دیواره، شدت افزایش عدد فرود نسبت به زوایای دیواره بیشتر، افزایش یافته است که علت آن اینست که با کاهش زاویه دیواره، کارایی سرریز و ظرفیت انتقال دبی افزایش می‌یابد (به ازاء یک هد مشخص) و در نتیجه سرعت جریان و عدد فرود نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴ ترکیبات مختلف پارامترهای بی‌بعد ورودی به SVM و GEP

متغیرهای مدل	شماره مدل	متغیرهای مدل	شماره مدل
$\frac{H_t}{P}, SF$	۱۰	$\frac{H_t}{P}, C$	۱
$\frac{H_t}{P}, Fr$	۱۱	$\frac{H_t}{P}, \frac{P}{W}$	۲
$\frac{H_t}{P}, C, SF$	۱۲	$\frac{H_t}{P}, Fr, SF$	۳
$\frac{H_t}{P}, \frac{A}{W}$	۱۳	$\frac{H_t}{P}, Fr, C$	۴
$\frac{H_t}{P}, \frac{L_{cw}}{W}$	۱۴	$\frac{H_t}{P}, Fr, SF, C$	۵
$\frac{H_t}{P}, \frac{L_{cw}}{W}, Fr, C, SF$	۱۵	$\frac{H_t}{P}, Fr, \frac{L_{cw}}{W}$	۶
$\frac{H_t}{P}, \frac{L_{cw}}{W}, \frac{A}{W}, \frac{P}{W}$	۱۶	$\frac{H_t}{P}, Fr, \frac{L_{cw}}{W}, \frac{A}{W}$	۷
$\frac{H_t}{P}, \frac{L_{cw}}{W}, Fr, \frac{A}{W}, SF, C$	۱۷	$\frac{H_t}{P}, \frac{A}{W}, Fr, \frac{L_{cw}}{W}, \frac{P}{W}$	۸
$\frac{H_t}{P}, Fr, \frac{L_{cw}}{W}, \frac{P}{W}, \frac{A}{W}, C, SF$	۱۸	$\frac{H_t}{P}, \frac{L_{cw}}{W}, \frac{P}{W}, \frac{A}{W}, SF, C$	۹

خروجی الگوریتم SVM

در اجرای الگوریتم SVM درصد‌های مختلفی از داده‌ها برای آموزش و آزمون مورد بررسی قرار گرفت تا بیشترین انطباق بین خروجی مدل و مقدارهای اندازه‌گیری شده حاصل شود. این کار از طریق فرآیند آزمون و خطا برای تعیین مقادیر بهینه سنجه‌های تنظیمی (γ, ϵ, C) انجام شد. مقدار این سنجه‌ها به ترتیب ($0.5, 0.2$) به دست آمدند. درصد داده‌های مورد استفاده در گام‌های آموزش و آزمون برای بهینه‌ترین خروجی 60% و 40% درصد بود که مقدار زوج مرتب ($R^2, RMSE$) برای این دو مرحله به ترتیب ($0.9741, 0.02$) و ($0.9502, 0.0282$) به دست آمدند. نتیجه محاسبات نشان داد الگوریتم SVM با استفاده از مدل شماره ۹ در منجر به بهترین خروجی در پیش‌بینی Cd شده است. مقدار سنجه‌های تنظیمی برای این مدل مقدار آماره‌های ($RMSE, R^2, DC$) برای گام‌های آموزش و آزمون در مدل شماره نه به ترتیب ($0.9858, 0.9502, 0.0282$) و ($0.9776, 0.9741, 0.02$) به دست آمدند. از پارامترهای بی‌بعد ترکیب برتر مشخص است که الگوریتم SVM به Fr حساسیت ندارد اما پارامترهای SF و C در این الگوریتم حساسیت زیادی دارند. منحنی پراکنش داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای Cd برای مدل شماره نه برای دو گام آموزش و آزمون در



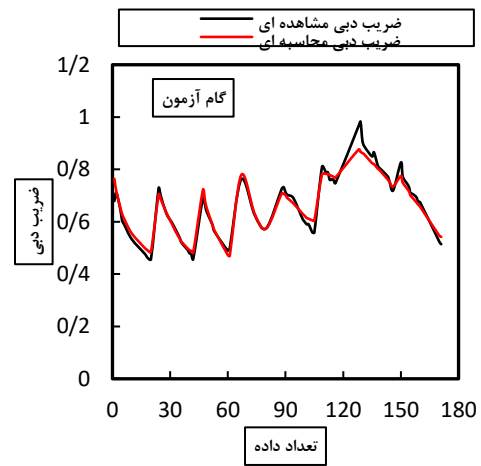
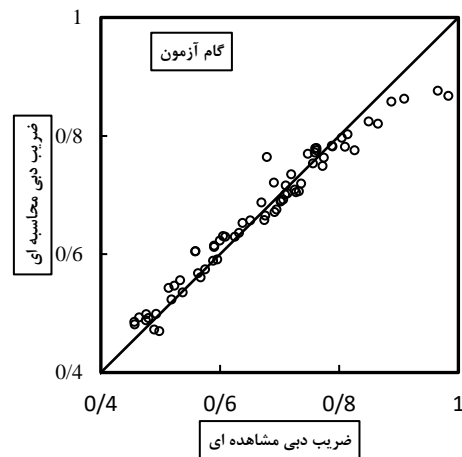
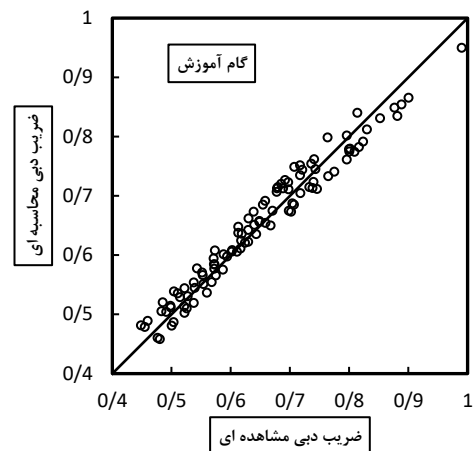
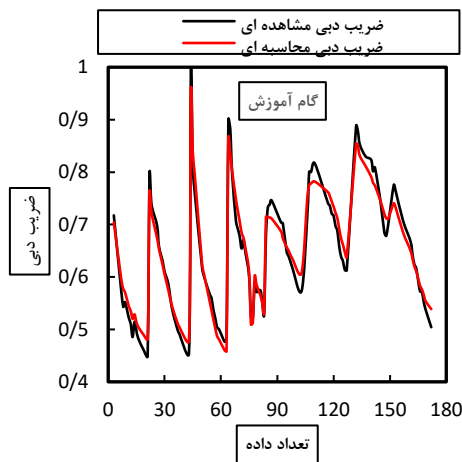
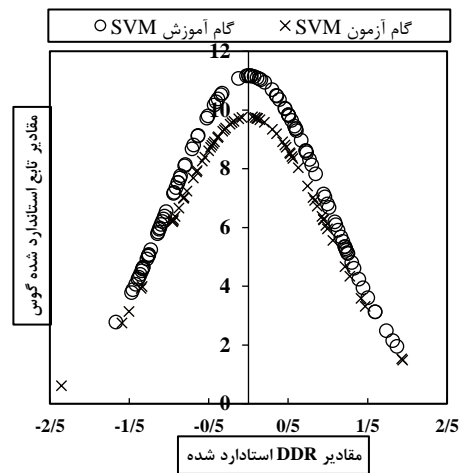
شکل ۱۲ مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای Cd در گام‌های آزمون و آموزش مدل برتر SVM

نشان داده شده‌اند، همانگونه که در این شکل مشخص است ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای در مرحله‌ی آموزش و آزمون با دقت بالایی پیش‌بینی شده عملکرد خوبی دارد. همچنین در این شکل تغییرات ضریب دبی برای مراحل آموزش و آزمون نیز ترسیم شده است، به طوری که SVM است و مدل مشاهده می‌شود منحنی‌های مربوط به ضرایب دبی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای انطباق خوبی با هم دارند و نشان‌دهنده‌ی انحراف کمتر مقادیر محاسبه‌ای با برای نقاط بیشینه کمتر از مقادیر مشاهده‌ای و برای نقاط SVM با دقت در این شکل‌ها مشخص می‌شود که نتایج الگوریتم. مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد کمینه بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای هستند. در

جدول ۵ مشخصات آماری ضرایب دبی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در فازهای آموزش و آزمون در الگوریتم SVM ارائه شده است. نمودار توزیع خطای استاندارد شده براساس شاخص DDR برای الگوریتم SVM در

شکل ۱۳ نمودار توزیع نرمال استاندارد شده مقادیر SVM برای مدل DDR

ارائه شده است. مقدار بیشینه DDR در گام‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۱۱/۱۶ و ۹/۷۶۱ هستند. این اعداد نشان می‌دهند شبیه‌سازی الگوریتم SVM در دوره آموزش بهتر از دوره آزمون بوده است.



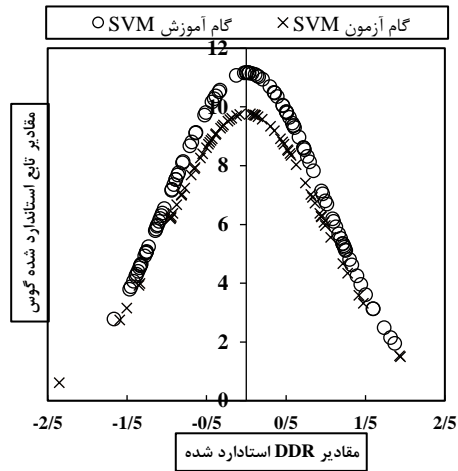
شکل ۱۴ مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای C_d در گام‌های آزمون و آموزش مدل برتر SVM

جدول ۵ مقایسه‌ی شاخص‌های آماری بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در الگوریتم SVM

شاخص‌های آماری	فرآیند آموزش		فرآیند آزمون	
	داده‌های مشاهده‌ای	داده‌های محاسبه‌ای	داده‌های مشاهده‌ای	داده‌های محاسبه‌ای
تعداد	۱۰۳	۶۹	۱۰۳	۶۹
بیشینه	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۸۸
کمینه	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۷
میانگین	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۷

انحراف معیار	۰/۱۱۸۴	۰/۱۱۰۲	۰/۱۲۸۰	۰/۱۱۱۵
ضریب همبستگی	۰/۹۸۱۴	۰/۹۷۷۹	۰/۹۷۸۹	۰/۹۷۸۹

شکل ۱۳ نمودار توزیع نرمال استاندارد شده مقادیر DDR برای مدل SVM



خروجی الگوریتم GEP

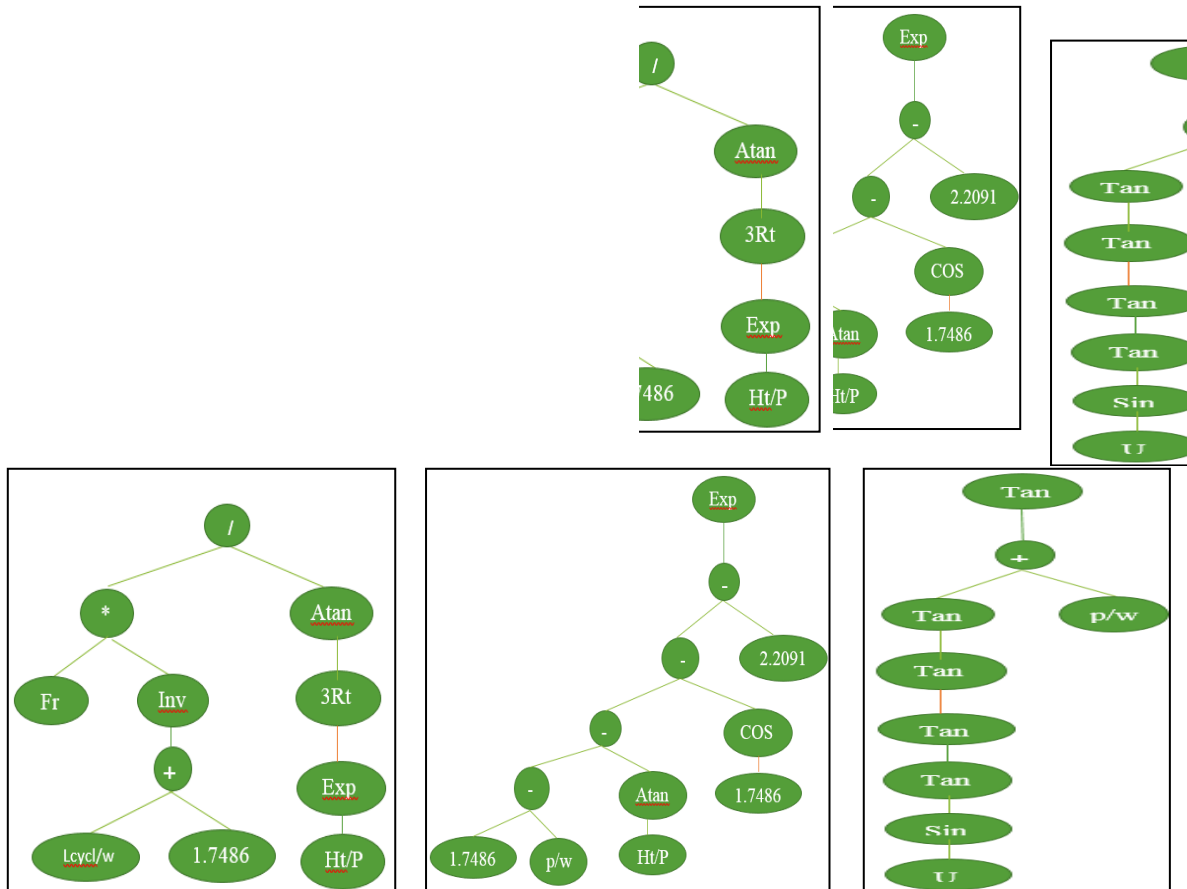
در این الگوریتم، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها برای آزمون الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت به طوری که بهترین برای فرآیندهای آموزش و آزمون به ترتیب $(RMSE, R^2)$ زوج مرتب $(۰/۰۲۴۳, ۰/۹۵۰۲)$ و $(۰/۰۳۹۸, ۰/۹۰۷۲)$ به دست آمدند. به منظور روی داده‌های مشاهده‌ای در آزمایشگاه، مدل GEP-اجرای الگوریتم های هجده گانه در

شکل ۱۴ بیان درختی خروجی الگوریتم GEP در پیش-بینی

بینی C_d

بیان درختی الگوریتم GEP برای ترکیب شماره‌ی ۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۴ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد در مدل شماره ۱۸ آماره‌های $(RMSE, R^2, DC)$ در گام‌های آموزش و آزمون به ترتیب با مقادیرهای $(۰/۰۳۹۸, ۰/۹۰۷۲, ۰/۹۷۷۹)$ و $(۰/۰۳۹۸, ۰/۹۰۷۲, ۰/۹۷۷۹)$ و $(۰/۰۲۴۳, ۰/۹۵۰۲, ۰/۰۳۹۸)$ بهترین‌ترین پیش‌بینی را در میان دیگر مدل‌ها داشته است.



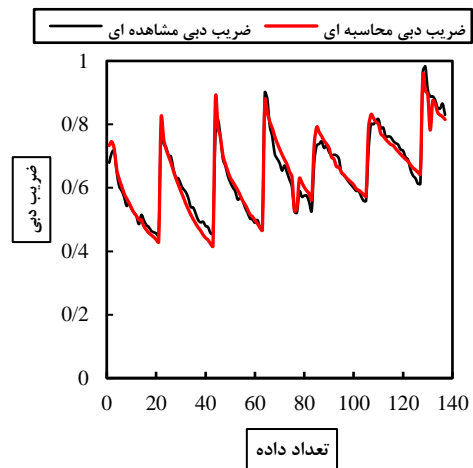
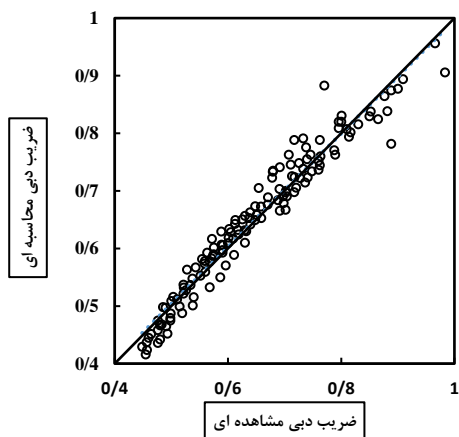
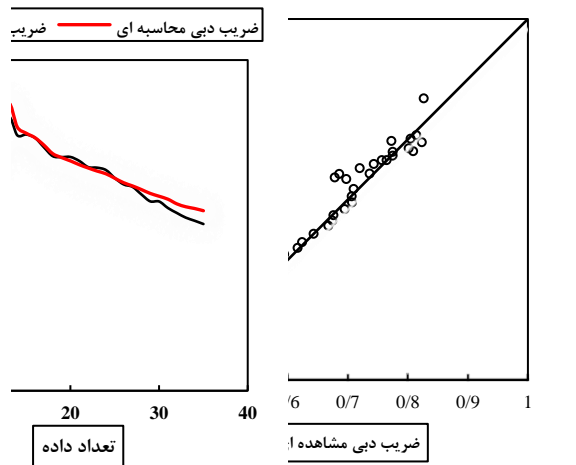
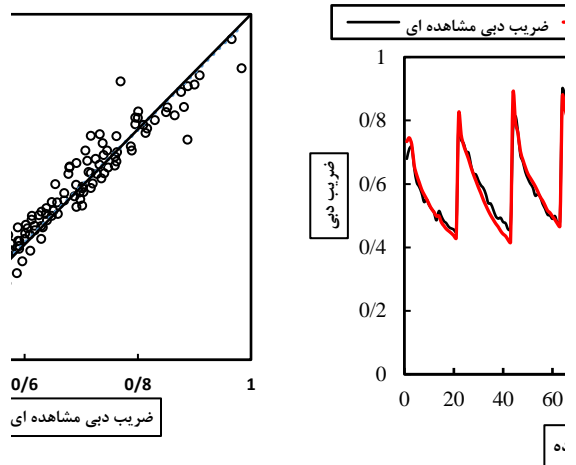
شکل ۱۴ بیان درختی خروجی الگوریتم GEP در پیش‌بینی C_d

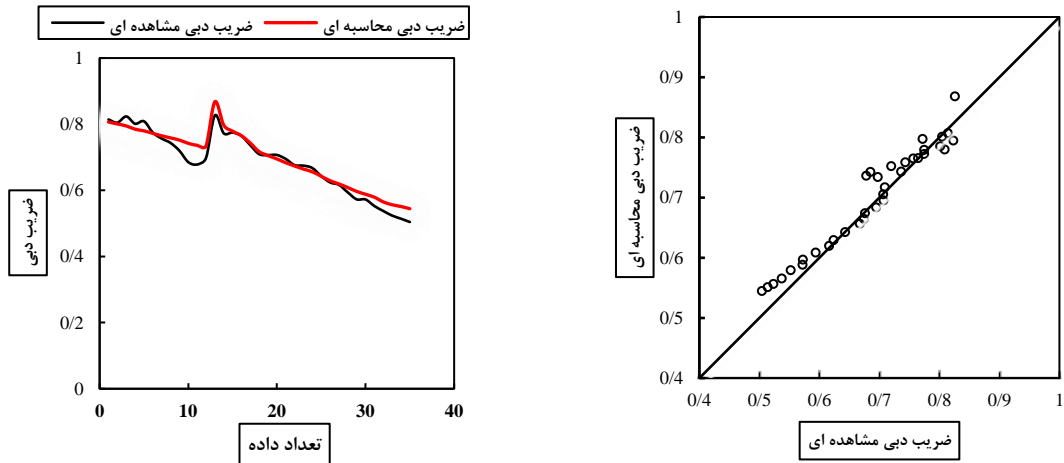
شکل ۱۵ مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای

Ca در گام‌های آزمون و آموزش مدل برتر GEP

نشان داده شده‌اند، همانگونه که در این شکل مشخص است، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای در مراحل آموزش و آزمون با دقت بالایی پیش‌بینی شده و مدل GEP نیز همانند مدل SVM عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد به طوری که در بخش قبلی بیان گردید، نتایج مدل (SVM) برای نقاط بیشینه کمتر از مقادیر آزمایشگاهی و برای نقاط کمینه بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی هستند. ولی نتایج مدل (GEP) با توجه به شکل‌ها برای نقاط بیشینه تا حدود کمی، بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی و برای نقاط کمینه، مقادیری تقریباً برابر مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده است. در جدول ۶ مشخصات آماری ضرایب دبی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در فازهای آموزش و آزمون در الگوریتم GEP ارائه شده است. توزیع خطای استاندارد برای عملکرد الگوریتم GEP بر مبنای شاخص DDR در ارائه شده است. مقدار بیشینه DDR در گام‌های آموزش و آزمون این الگوریتم به ترتیب ۹/۳۰۲ و ۱۰/۵۵۰ هستند. به عبارتی بهتر، شبیه‌سازی در دوره‌ی آزمون بهتر از دوره‌ی آموزش انجام شده است.

منحنی پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی ضریب دبی برای مدل برتر و برای دو فاز آموزش و آزمون در



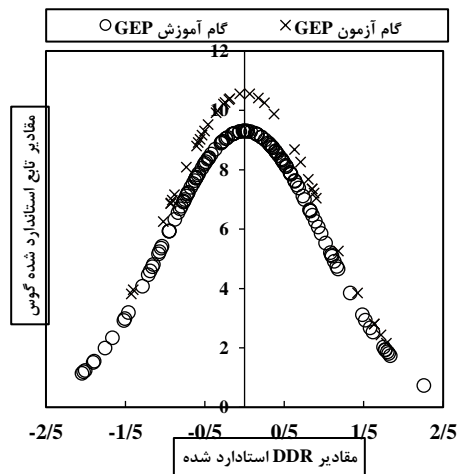


شکل ۱۵ مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای Ca در گام‌های آزمون و آموزش مدل برتر GEP

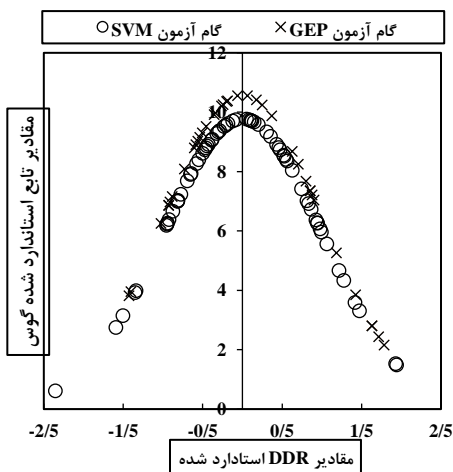
جدول ۶ مقایسه‌ی شاخص‌های آماری بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در الگوریتم GEP

شاخص‌های آماری	فرآیند آموزش		فرآیند آزمون	
	داده‌های مشاهده‌ای	داده‌های محاسبه‌ای	داده‌های مشاهده‌ای	داده‌های محاسبه‌ای
تعداد	۱۳۷	۳۵	۱۳۷	۳۵
بیشینه	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۸۷	۰/۸۷
کمینه	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۵۴	۰/۵۰
میانگین	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۶۹
انحراف معیار	۰/۱۲۳۷	۰/۱۲۵۳	۰/۰۸۸۱	۰/۰۹۶۱
ضریب همبستگی	۰/۹۷۳۹	۰/۹۷۴۸		

در گام آزمون به ترتیب ۰/۹۷۸۹ و ۰/۹۷۴۸ می‌باشند. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی می‌توان بیان کرد که در مرحله‌ی آموزش و مرحله‌ی آزمون مدل SVM دارای خطای نسبتاً کمتری نسبت به مدل GEP است. در



شکل ۱۶ نمودار توزیع نرمال استاندارد شده مقادیر DDR برای مدل GEP

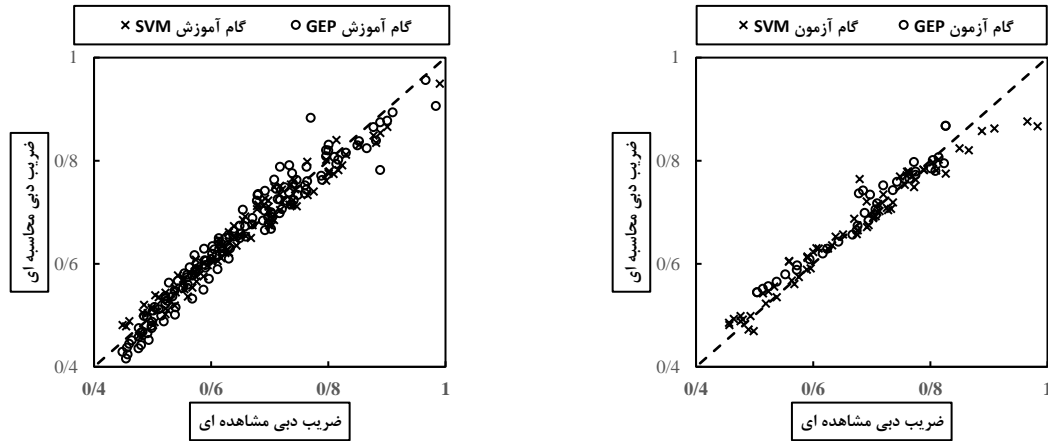


شکل ۱۸ نمودار توزیع نرمال استاندارد شده مقادیر DDR برای گام آزمون مدل‌های SVM و GEP

در شکل ۱۷ مقایسه‌ای بین مقدارهای پیش‌بینی شده توسط دو الگوریتم SVM و GEP طی دو گام آموزش و آزمون ارائه شده است. به طوری که مشاهده می‌شود هر دو مدل از دقت پیش‌بینی بالایی برخوردار هستند. مقدار ضریب همبستگی بین مقدارهای مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گام آموزش برای الگوریتم SVM و GEP به ترتیب ۰/۹۸۱۴ و ۰/۹۷۳۹ و

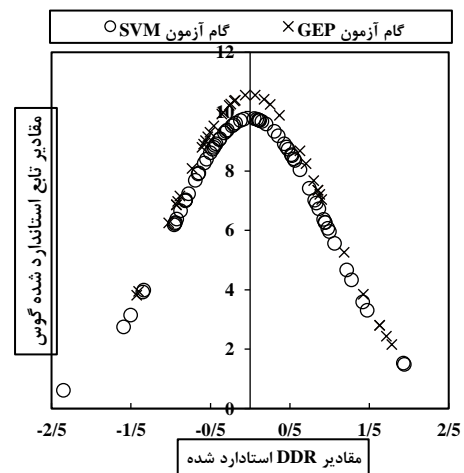
گرفت با توجه به اختلاف بسیار کم ضرایب همبستگی دو الگوریتم در گام‌های آموزش و آزمون، شبیه‌سازی براساس شاخص استاندارد شده DDR به نفع مدل GEP است.

توزیع خطای مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده توسط این دو مدل ارائه شده است. همانطور که مشخص است کارکرد الگوریتم GEP در گام آزمون بهتر از الگوریتم SVM است. در مجموع می‌توان نتیجه



شکل ۱۷ مقایسه پیش‌بینی ضریب دبی در مدل‌های برتر توسط الگوریتم‌های SVM و GEP

- اعمال شیب به دیواره سیکل منجر به بهبود عملکرد سرریز می‌شود. همچنین شیب‌دار کردن دهانه بالادست همراه با تغییر فرم تاج سرریز و نیز شکل دماغه سرریز، هم‌افزایی زیادی در افزایش کارایی سرریز می‌شود. متوسط بهبود عملکرد ضریب دبی برای LW12SU نسبت به LW12 برابر با ۹/۲ درصد و متوسط بهبود عملکرد LW35SU نسبت به LW35 برابر با ۱۲/۳ درصد است.
- افزایش ارتفاع به میزان ۱/۵ درصد، بهبود عملکرد سرریز را به دنبال داشته است. مقدار بهبود عملکرد LW35SUM در مقام مقایسه با LW35 به طور متوسط برابر با ۲۶/۵ درصد و مقدار متناظر آن برای LW12SUM در مقایسه با LW12 به طور میانگین برابر با ۲۰/۴ درصد است.
- در خصوص مدل SVM، ۶۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۴۰ درصد داده‌ها برای آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفتند. مقدار آماره‌های (RMSE, R², DC) برای گام‌های آموزش و آزمون در مدل شماره نه شامل پارامترهای $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{L_{CW}}{W}$ ، C، SF، $\frac{A}{W}$ و $\frac{P}{W}$ به ترتیب (۰/۹۵۰۲، ۰/۹۸۵۸)، (۰/۲۸۲، ۰/۹۷۷۶، ۰/۹۷۴۱، ۰/۰۲) به دست آمدند. دو مقدار ۱۱/۱۶ و ۹/۷۶۱ به ترتیب بیشینه اندازه‌ی DDR در گام‌های آموزش و آزمون بودند.
- در الگوریتم GEP، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها برای آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. بهترین زوج مرتب (RMSE, R²) برای فرآیندهای آموزش و



شکل ۱۸ نمودار توزیع نرمال استاندارد شده مقادیر DDR برای گام آزمون مدل‌های SVM و GEP

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن بررسی و تعیین تجربی ضریب دبی جریان برای سرریزهای کنگره‌ای، دو الگوریتم SVM و GEP بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی برای پیش‌بینی این ضریب استفاده شدند. تعداد نه مدل فیزیکی مختلف تحت شرایط فیزیکی و هیدرولیکی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. مدل سرریز کنگره‌ای مستطیلی به عنوان مدل شاهد لحاظ شد. تعداد کل داده‌های آزمایشگاهی شامل ۱۷۲ سری داده بود. نتایج پژوهش نشان داد:

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هیچگونه هزینه مالی مترتب این پژوهش نبوده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: مهدی ماجدی اصل، مهدی فولادی پناه، رسول دانشفراز؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: مهدی فولادی پناه، رسول دانشفراز و خلیل جنت؛ نظارت و نگارش نهایی: همه نویسندگان.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Aydin, I., Sakarya, A.B. and Cigdem, S. 2011. Discharge formula for rectangular sharp crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(2):144-151.
2. Azhdari Moghadam, M and Jafari Nadoushan, E. 2013. Hydraulic Design of a Trapezoidal Labyrinth Spillway Using Computational Hydrodynamics. *MCEJ*, 13(3): 123-123. [In Persian]
3. Bahreh Bar, R., Heidarnejad, M., Masjedi, A.R., Kaman Bedast, A.A., Bordbar, A. 2018. Comparing the Discharge Coefficients of Labyrinth Weir Featuring Different Geometries and Laboratory Model Using Flow-3D Software. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(12): 982-993. [In Persian]
4. Crookston, B. M. 2010. Labyrinth weirs. Ph. D. Thesis. Utah State University. Logan. UT.
5. Delgado, F.G.A., Paulina, M.A., and Camino, S.F.J. 2015. Discharge Coefficients Spillways Labyrinth Implementing Hydrodynamic Devices in the upstream side, In: *Proceedings of*

آزمون به ترتیب (0/0.398, 0/0.972) و (0/0.243, 0/0.9502) به دست آمدند. نتایج نشان داد در مدل شماره 18 شامل پارامترهای $\frac{P}{W}$, $\frac{A}{W}$, SF, Fr, C, $\frac{L_{cw}}{W}$, $\frac{H_t}{P}$ (RMSE, R², DC) در گام‌های آموزش و آزمون به ترتیب با مقدارهای (0/0.398, 0/0.972, 0/0.9779) و (0/0.398, 0/0.972, 0/0.9779) بهینه‌ترین پیش‌بینی را داشتند.

- تغییرات عدد فرود جریان بالادست نسبت به زاویه دیواره‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی حاکی از ارتباط مستقیم بین عدد فرود و بار نسبی هیدرولیکی بوده و با افزایش زاویه دیواره‌ها، کارایی سرریز و نهایتاً عدد فرود جریان نیز افزایش می‌یابد.
- مقدارهای پیش‌بینی شده توسط دو الگوریتم SVM و GEP نشان دهنده این واقعیت هستند که هر دو مدل از دقت بسیار بالایی برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای برخوردار هستند. با این حال الگوریتم GEP دارای خطای نسبتاً کمتری نسبت به الگوریتم SVM می‌باشد.
- استفاده از الگوریتم GEP برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای تحت شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی پیشنهاد می‌شود.

36th IAHR World Congress. Hague, Netherlands, pp. 1-7.

6. Emadi, A. and Kakouei, S. 2020. The Experimental Study of the Effect of Gate Position on Flow Discharge Coefficient of Rectangular-Labyrinth Weir-Gate. *Iranian Water Research Journal*, 14(2): 11-20. [In Persian]
7. Emami, S., Parsa, J. and Emami, H. 2020. Estimation of Discharge Coefficient of Curved Plan-form Labyrinth Weirs using a Hybrid WOA-ANFIS Method. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(14): 1664-1676. [In Persian]
8. Feili, J., Heidarnejad, M., Kamanbedast, A.A., Masjedi, A., Asadi Lor, M. 2020. Experimental Study of Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weirs with Different Arc Radius and Cycle Length. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(5): 1115-1126. [In Persian]
9. Ferdowsi, A., Mousavi, S.F., Farzin, S., Karami, H., Karami, M. and Valikhan Anaraki, M. 2019. Optimal Design and Hydraulic Performance Improvement of Labyrinth Spillway using Cuckoo Search Algorithm. *Iranian journal of Irrigation*

- and Drainage, 12(5): 1086-1097. [In Persian]
10. Fuladipناه, M., Majedi Asl, M. and Haghgooyi, A. 2020. Application of intelligent algorithms for modeling the discharge-discharge relationship in the case of congressional and linear overflow submersion. Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics, 15(2): 150-164. [In Persian]
 11. Gholizadeh, A, Ghodsian, M. and Panahi, R. 2016. Numerical study of effect of Crest shape on Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weir. MCEJ, 16(4): 225-238. [In Persian]
 12. Hay, N. and Taylor, G. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. Journal of Hydraulic Engineering, 96(11): 2337-2357.
 13. Hu, Z., Karami, H., Rezaei, A.R., DadrasAjirlou, Y., Jalil Piran, Md., Band, S.S., Chau, K.W. and Mosavi, A., 2021. Using soft computing and machine learning algorithms to predict the discharge coefficient of curved labyrinth overflows. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 15(1): 1002-1015.
 14. Kabiri, A., Aghajanabdollah, M., and Hejazitaghanaki, R. 2014. Application of ANFIS model for estimating the discharge coefficient of labyrinth side weirs. Iranian Water Researches Journal, 8(1): 47-54. [In Persian]
 15. Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D., and Ingle, R.N. 2012. Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(6): 548-552. [In Persian]
 16. Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N.K. and Ranjan S. 2020. Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. Applied Water Science, 10, 43-52.
 17. Mahmoud, A., Yuan, X., Kheimi, M., and Yuan, Y. 2021. Interpolation accuracy of hybrid soft computing techniques in estimating discharge capacity of triangular labyrinth weir. IEEE Access, 9: 6769-6785.
 18. Majedi Asl, M and Fuladipناه, M. 2019. Application of the Evolutionary Methods in Determining the Discharge Coefficient of Triangular Labyrinth Weirs. JWSS, 22 (4): 279-290. [In Persian]
 19. Mehri, Y., Esmaeili, S., Soltani, J., Saneie, M. and Rostami, M. 2018. Evaluation of SVM and nonlinear regression models for predicting the discharge coefficient of side piano key weirs in irrigation and drainage networks. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 4(12): 994-1003. [In Persian]
 20. Noori, R., Karbassi, A.R., Moghaddamnia, A., Han, D., Zokaei-Ashtiani, M.H., Forokhnial, A. and Ghafari-Goushesh, M. 2011. Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction. Journal of Hydrology, 401: 177- 189.
 21. Noori, R., Khakpour, A., Omidvar, B., and Farokhnia, A. 2010. Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistics. Expert Systems with Applications, 37: 5856-5862.
 22. Norouzi, R., Daneshfaraz, R. and Ghaderi, A. (2019). Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines. Applied Water Science, 9(148), 1-10.
 23. Oskouei, M, Emadi, A.R. and Shahnazari A. 2019. Determination of Rectangular Labyrinth Weir's Discharge Coefficient Affecting Downstream and Upstream Ramps Slope. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 19(73): 83-98. [In Persian].
 24. Rezaee, M., Emadi, A. and Aqajani Mazandarani, Q. 2016. Experimental Study of Rectangular Labyrinth Weir. Journal of Water and Soil, 29(6): 1438-1446. [In Persian]
 25. Rezapour Tabari, M. and Hashempour, M. 2018. Development of GWO-DSO and PSO-DSO Hybrid Models to Redesign the Optimal Dimensions of Labyrinth Spillway. Dam and Hydroelectric Powerplant, 5(16): 48-63. [In Persian]
 26. Roushangar, K., Alami, M.T., Shiri, J. and Majedi Asl, M. (2017). Determining discharge coefficient of labyrinth and

- arced labyrinth weirs using support vector machine. *Journal of Hydrology Research*, 49(3): 924-938.
27. Roushangar, K., Majedi-Asl, M. and Shahnazi, S. (2021). Hydraulic Performance of PK Weirs Based on Experimental Study and Kernel-based Modeling. *Water Resources Management*, 35: 3571-3592. [In Persian]
 28. Roushangar, R., Alami, M.T., Shiri, J. and Majedi Asl, M. 2018. Evaluation Effect of Changing the Cycle Arc Angle on Discharge Coefficient of Arced Labyrinth and Arced Piano Key Weirs. *Iranian journal of soil and water research*, 49(2): 341-351. [In Persian]
 29. Sangsefidi, Y., and Ghodsian, M. 2019. Investigation of Effects of Entrance Channel Walls on the Hydraulic Performance of Arced Labyrinth Weirs. *MCEJ*, 19(1): 195-206. [In Persian]
 30. Sangsefidi, Y., Ghodsian, M., Mehraein, M. 2017. Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of Arced Labyrinth Weirs. *Dam and Hydroelectric Powerplant*, 4(12): 53-65. [In Persian]
 31. Savage, B., Crookston, B. M. and Paxson, S. 2016. Physical and numerical modeling of large headwater ratios for a 15° labyrinth spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11): 04016046, 1-7.
 32. Seo, I.W., Do, K.Y., Park, Y.S. and Song, C.G. 2016. Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings. *Environmental Earth Science*, 75(6):496-509.
 33. Shafaattalab, H., Esmaeili-Varaki, M., and Ashrafzadeh, A. 2017. Experimental investigation of the effect of tail water level on discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs. *Irrigation and drainage structures engineering research*, 17(67): 63-80. [In Persian]
 34. Shafiei, S., Najarchi, M. and Shabanlou, S. 2020. A novel approach using CFD and neuro-fuzzy-firefly algorithm in predicting labyrinth weir discharge coefficient. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1): 1-19.
 35. Valikhan Anaraki, M. 2018. Optimal Design and Hydraulic Performance Improvement of Labyrinth Spillway using Cuckoo Search Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(12): 1086-1097. [In Persian]
 36. Vapnik, V.N. 1995. *The nature of statistical learning theory*, Springer, New York.