

Modeling and Assessment of Discharge Coefficient of Arc Labyrinth Weir Using Experimental and Meta-model Methods

MAHDI MAJEDI-ASL^{1*}, MEHDI FULADIPANAH², RASOUL DANESHFARAZ¹, KHALIL JANNAT¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, East Azerbaijan, Iran

2. Department of Civil Engineering, Ramhormoz Branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran.

(Received: Apr. 21, 2021- Revised: June. 20, 2021- Accepted: June. 26, 2021)

ABSTRACT

While having economic advantages, nonlinear labyrinth weirs have more passing flow capacity than linear weirs. Having a high capability of extracting hidden complex relationships among dependent and independent variables besides saving financial and time, intelligent algorithms are economic and time-saving and have dedicated a remarkable role among researchers. In this research, the performance of support vector machine (SVM) and gene expression programming (GEP) algorithms is figured out to predict the discharge coefficient (C_d) of the arched labyrinth weir using 226 experimental data series. Involved geometric and hydraulic parameters are total head (H_t), weir height (P), cycle arc angle (θ), Froud number (Fr), cycle wall length (L_c), the width of a cycle (w), weir nose length (A), an increase of weir height of 15% and change of weir crest shape change to quarter circle (U). Results showed that the maximum values of the C_d belong to arc labyrinth weir of arc angle 40 degrees. Numerical simulation illustrated that combination of $(C_d \cdot U \cdot \frac{A}{W} \cdot \frac{P}{W} \cdot \frac{L_{cw}}{W} \cdot \frac{\theta}{\alpha} \cdot \frac{H_t}{P})$ and $(C_d \cdot U \cdot \frac{A}{W} \cdot Fr \cdot \frac{L_{cw}}{W} \cdot \frac{\theta}{\alpha} \cdot \frac{H_t}{P})$ parameters have optimum performance in the SVM and GEP algorithms of assessment indices as ($R^2=0.9791$, RMSE=0.03, DC=0.9776) and ($R^2=0.9871$, RMSE=0.0231, DC=0.9856), respectively; showing highly accurate performance of two algorithms in the prediction of the C_d .

Keywords: Dimensional Analysis, Intelligent Algorithm, Nonlinear Weir, Optimum Performance, Overflow Capacity.

* Corresponding Author's Email: majedi@maragheh.ac.ir

مدل سازی و ارزیابی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی با روش‌های آزمایشگاهی و فرامدلی

مه‌دی ماجدی اصل^{۱*}، مه‌دی فولادی پناه^۲، رسول دانشفر از^۱، خلیل جنت^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲. گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۵)

چکیده

سرریزهای غیرخطی کنگره‌ای، ضمن برخوردار بودن از مزیت‌های اقتصادی، قابلیت عبوردهی بیشتری را نسبت به سرریزهای خطی دارند. الگوریتم‌های هوشمند به دلیل توانایی زیاد در کشف رابطه‌های دقیق پیچیده‌ی مخفی بین پارامترهای مستقل موثر و پارامتر وابسته و همچنین صرفه‌جویی مالی و زمانی، جایگاه بسیار ارزشمندی بین پژوهشگران پیدا کرده‌اند. در این پژوهش عملکرد الگوریتم‌های پشتیبان بردار ماشین (SVM) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی به کمک ۲۲۶ سری داده‌ی آزمایشگاهی بررسی می‌شود. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد استفاده در این پژوهش شامل بار آبی کل (H_t)، ارتفاع سرریز (P)، زاویه سیکل قوسی (θ)، زاویه دیواره سیکل (α)، عدد فرود (F_r)، طول دیواره سیکل (L_c)، عرض یک سیکل (w)، طول دماغه سرریز (A)، افزایش ارتفاع سرریز به مقدار ۱۵٪، تغییر فرم تاج سرریز به شکل ربع دایره‌ای (U) بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که زاویه سیکل قوسی (θ) و زاویه دیواره سیکل (α) پارامترهای موثر در تعیین ضریب دبی بوده و بیشینه ضریب دبی، متعلق به سرریز کنگره‌ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه می‌باشد. نتیجه شبیه‌سازی عددی نشان داد ترکیب پارامترهای (c)، $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{\theta}{\alpha}$ ، $\frac{L_{cw}}{W}$ ، $\frac{P}{W}$ ، $\frac{A}{W}$ ، u و (c)، $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{\theta}{\alpha}$ ، $\frac{L_{cw}}{W}$ ، F_r ، $\frac{A}{W}$ ، u ، c) به ترتیب در الگوریتم‌های SVM و GEP در مرحله‌ی آزمون با شاخص‌های ارزیابی ($R^2=0/9791$)، ($DC=0/9856$ ، $RMSE=0/0231$ ، $R^2=0/9871$) و ($DC=0/9776$ ، $RMSE=0/03$) بهینه‌ترین خروجی شده است که نشان دهنده دقت بسیار مطلوب هر دو الگوریتم در پیش‌بینی ضریب دبی جریان است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ابعادی، الگوریتم هوشمند، سرریز غیرخطی، کارکرد بهینه، ظرفیت گذردهی.

مقدمه

در زیر تیغ‌های جریان سرریزهای کنگره‌ای از عوامل موثر در عملکرد هیدرولیکی آنها هستند (Crookston, 2010). نتایج پژوهش (Dabbling (2014) نشان داد با افزایش نسبت $\frac{H_0}{P}$ در سرریزهای اصلاح شده و اصلاح نشده، نسبت استغراق افزایش پیدا می‌کند. نتایج پژوهش تجربی (Seo et al., 2016) نشان‌دهنده‌ی افزایش ۷۰ درصدی دبی عبوری در سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریز لبه تیز خطی تحت شرایط جریان آزاد است. آنها بیان داشتند با افزایش درجه استغراق سرریز، راندمان گذردهی سرریز کاهش می‌یابد که مقدار آن متناسب با نسبت $\frac{h_d}{h^*}$ است. در مطالعه‌ی تجربی انجام شده توسط (Roshangar et al., 2017)، تاثیر تغییر زاویه‌ی سیکل قوسی بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیانویی قوسی مورد بررسی قرار گرفت. آنها بیان داشتند که با افزایش زاویه‌ی سیکل قوسی، برتری سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای بیشتر می‌شود. (Dizabadi et al., 2020) به بررسی آزمایشگاهی اثر حوضچه‌ی

پیشینه‌ی ساخت سرریزهای کنگره‌ای به قبل از سال ۱۹۲۰ برمی‌گردد اما با وجود این، پژوهش‌های جامعی برای بررسی و شناخت رفتار هیدرولیکی این نوع سرریزها تا دهه‌ی ۱۹۷۰ انجام نگرفته است. (Hay and Taylor (1970 علاوه بر ارائه روشی برای محاسبه‌ی دبی این نوع سرریزها، معیارهایی برای طراحی آنها پیشنهاد دادند. شاخص‌ها و معیارهای طراحی تکمیلی توسط (Darvas (1970 ارائه شد. در پژوهش آزمایشگاهی انجام شده توسط (Tullis et al., 1995) مشخص شد راندمان گذردهی سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی به ازای بار بالادست یکسان، سه تا چهار برابر افزایش پیدا می‌کند. طبق یافته‌های پژوهش‌های تجربی انجام شده توسط (Zeirhun and Fenton (2007) و (Kabiri-Samani et al., 2010) مشخص شد با افزایش استغراق، کارآیی دماغه‌های بالادست به دلیل استغراق موضعی در بالادست دهانه‌های خروجی کاهش می‌یابد. استغراق موضعی، شکل تاج سرریز، هندسه‌ی سرریز، تاثیرات لزجت و فشار

هوشمند GMDH، GP و MARS ضریب دبی سرریزهای غیرخطی با پلان مثلثی را مدل سازی نمودند و به این نتیجه رسیدند مدل MARS کارکرد بهتری نسبت به دیگر مدل ها دارد. برای مدل سازی ضریب دبی سرریزهای غیرخطی *Norouzi et al.* (2019) ضریب دبی سرریز کنگره ای ذوزنقه ای را با استفاده از دو الگوریتم شبکه ی عصبی و SVM برای ۴۲۴ داده ی آزمایشگاهی شبیه سازی نمودند. *Kumar et al.* (2020) ضریب دبی سرریزهای کلید پیاپویی را به صورت آزمایشگاهی و الگوریتم آموزش ماشین شبیه سازی کردند. نتیجه ی پژوهش آنها حاکی از دقت بسیار مناسب الگوریتم های آموزش ماشین بود.

سرریزهای کنگره ای در زمره سرریزهایی هستند که از جنبه های مختلف هیدرولیکی و هندسی مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته اند. بررسی منابع و پژوهش های قبلی نشان دهنده ی عدم مطالعه و پژوهش در خصوص شبیه سازی همزمان آزمایشگاهی و عددی ضریب دبی جریان با استفاده از الگوریتم های هوشمند GEP و SVM توأم با اعمال اثر پارامترهای مختلف هیدرولیکی و هندسی در مورد این نوع سرریز است که جنبه بدیع و نوآوری پژوهش حاضر است. در این راستا به کمک مدل آزمایشگاهی و با استفاده از الگوریتم های هوشمند GEP و SVM تاثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی شامل زاویه سیکل قوسی، ارتفاع سرریز، فرم تاج سرریز و طول دماغه روی ضریب دبی سرریز کنگره ای قوسی مورد بررسی قرار گرفته اند و نتایج با همدیگر مقایسه شده اند.

مواد و روش ها

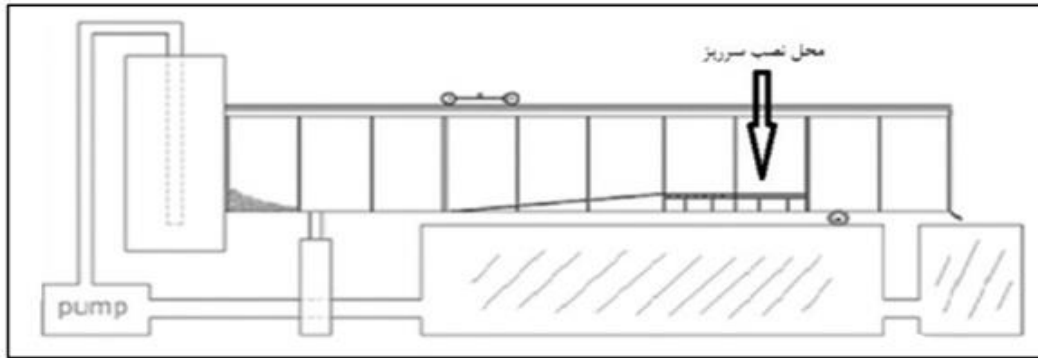
تجهیزات آزمایشگاهی

هدف از این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی و عددی (با استفاده از الگوریتم های SVM و GEP) ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره ای قوسی و همچنین ارزیابی دقت الگوریتم های عددی با استفاده از آماره های ارزیابی است. داده های مورد نیاز در این پژوهش، از آزمایش ۱۰ مدل سرریز مختلف ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه در فلومی با مقطع مستطیلی به طول ۱۳ متر، عرض ۱/۲ متر، ارتفاع ۰/۸ متر با کف فلزی (گالوانیزه) و دیواره هایی از جنس پلکسی گلس با ضخامت یک میلیمتر جمع آوری شده است. با توجه به محدودیت های فیزیکی آزمایشگاهی و در نظر گرفتن عرض کل سرریز، سرریز کنگره ای قوسی با چهار سیکل، طراحی و ساخته شد. در هر آزمایش، پس از استقرار مدل های آزمایشی، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ وارد فلوم آزمایشگاهی و اندازه گیری ها شامل قرائت ارتفاع سطح آب و دبی به ترتیب با دقت $\pm 0/1$ میلیمتر و ± 3 درصد

پایین دست سرریز کنگره ای روی مقدار دبی عبوری از روی آن با زاویه ی دیواره ی جانبی ۴۵ درجه تحت شرایط آزاد و مستغرق با لحاظ اختلاط آشفته گی پرداختند. استفاده از مدل های هوش مصنوعی مانند GEP، SVM، ANFIS و ... در سال های اخیر کاربرد زیادی در شبیه سازی پدیده های پیچیده هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و منابع آب پیدا کرده اند. *Farrokhy et al.* (2009) برای تخمین ضریب گذرده ی سرریزهای جانبی مایل از شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند با توجه به شبیه سازی های انجام شده می توان برای تخمین ضریب گذرده ی سرریزهای جانبی مایل از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی و شبکه عصبی استفاده نمود. *Abbaspour and Arovanaghy* (2009) برای تخمین دبی جریان بر روی سرریزهای مرکب مثلثی-مستطیلی از مدل GEP استفاده نمودند و تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر روی دبی جریان را بررسی و مقایسه کردند. آنها بیان داشتند در مدل برنامه ریزی ژنتیک تطابق خوبی بین مقادیر مشاهداتی و پیش-بینی شده مدل وجود دارد. *Parsaie and Haghiabi* (2016) برای تعیین ضریب دبی سرریز جانبی استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیه سازی دقت بسیار مناسبی با مقادیر اندازه گیری شده داشت. در پژوهش انجام شده توسط *Parsaie and Haghiabi* (2017) از الگوریتم SVM برای مدل سازی ضریب دبی سرریز لبه تیز با پلان W شکل استفاده شد. مطالعه ای توسط *Haghiabi et al.* (2018) با عنوان مدل سازی هوشمند ضریب دبی سرریزهای جانبی انجام گرفت. آنها سه مدل هوشمند MARS، ANN و SVM را برای پژوهش خود مورد بررسی قرار دادند. *Roushangar et al.* (2018) به تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره ای و قوسی کنگره ای با روش رگرسیون بردار پشتیبان پرداختند و با مقایسه ی داده های آزمایشگاهی و محاسبه ای، مدل SVM را به عنوان یک مدل مناسب برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره ای توصیه نمودند. *Majedi Asl and Fuladipناه* (2018) کاربرد سیستم های تکاملی در تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره ای مثلثی را بررسی کردند و بیان داشتند روش ماشین بردار پشتیبان در پیش بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره ای لبه تیز عملکرد بسیار مناسبی دارد و می توان از این روش در موارد مشابه استفاده کرد. *Mehri et al.* (2018) از مدل SVM برای برآورد ضریب دبی جریان سرریزهای کلید پیاپویی در شبکه های آبیاری و زهکشی استفاده کردند. نتیجه ی پژوهش آنها انعطاف مناسب مدل SVM نسبت به رگرسیون غیرخطی و دقت زیاد مدل SVM را تایید کرد. در پژوهش انجام شده توسط *Parsaie et al.* (2019) استفاده از مدل های ریاضی

صفحه افقی مسطح متصل می‌کرد تا خطوط جریان به طور موازی از کف کانال به صفحه افقی جریان یابند. به ازای هر دبی مشخص، برای اطمینان از برقراری جریان پایدار در فلوم، اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی پس از ده دقیقه انجام می‌شدند. نمای شماتیک از تجهیزات فلوم آزمایشگاهی در (شکل ۱) نشان داده شده است.

انجام شده‌اند. شیب کف فلوم برای تمامی آزمایش‌ها صفر درجه تنظیم شد. برای آرام نمودن جریان بالادست سرریز و کاهش نوسان‌های سطح آب، در ورودی فلوم از دو صفحه مشبک و یک صفحه شناور آرام‌کننده جریان استفاده شد. همه‌ی مدل‌ها بر روی یک صفحه افقی مسطح به ارتفاع ۲۲ سانتیمتر نصب شدند و یک صفحه شیب‌دار با زاویه‌ی ۲۵ درجه نسبت به افق، کف فلوم را به



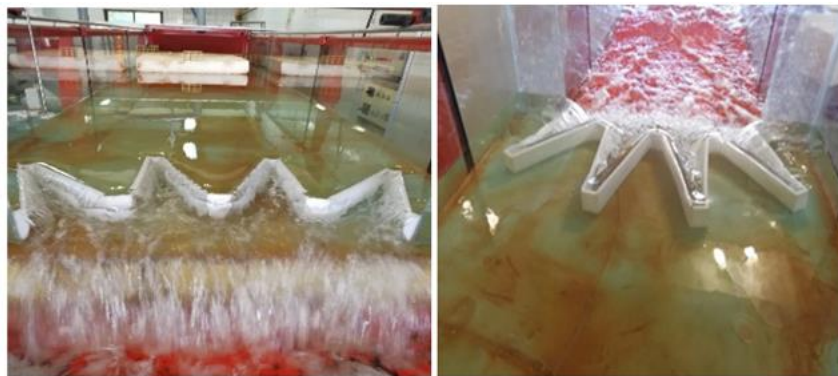
شکل ۱- نمای شماتیک از تجهیزات فلوم آزمایشگاهی

تأثیر همزمان افزایش ۱۵ درصدی ارتفاع سرریز و تغییر فرم تاج سرریز از حالت مسطح (خطی) به حالت ربع دایره‌ای بر روی ضریب دبی و کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی مورد آزمایش قرار گرفته است. تعداد سیکل‌ها برابر با چهار لحاظ شد. سرریزها در فاصله‌ی هفت متری از بالادست کانال نصب شده‌اند و با استقرار جریان پایدار اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی انجام شد. در شکل ۲ (۲) نمونه‌هایی از سرریز کنگره‌ای قوسی در شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده است.

ویژگی مدل‌های آزمایشگاهی همراه با محدوده‌ی تغییرات سنجه‌های آزمایشگاهی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در این جدول علامت‌های اختصاری ALW و M به ترتیب بیانگر سرریز کنگره‌ای قوسی و سرریز کنگره‌ای اصلاح شده هستند. همان‌گونه که در جدول (۱) مشخص است، سه زاویه‌ی سیکل قوسی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه، سه نسبت عرض سیکل ۱/۳۶، ۱/۵۱ و ۱/۷۷ برای چهار حالت مختلف بزرگنمایی سیکل ۳/۲، ۳/۵۷، ۳/۷۷ و ۴/۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. حالت اصلاح شده این سرریزها به صورت

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

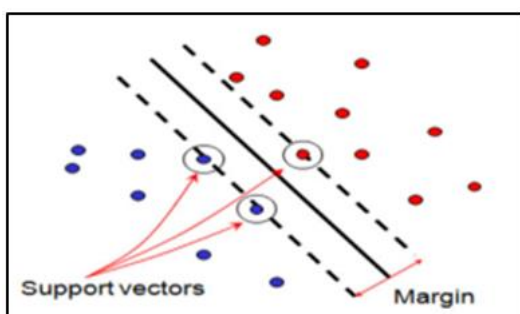
شماره‌ی مدل	نام اختصاری	نوع سرریز	زاویه‌ی سیکل قوسی (θ)	زاویه‌ی دیواره (α)	ارتفاع سرریز P(cm)	بزرگنمایی سیکل		نسبت عرض سیکل	فرم تاج سرریز	طول دماغه‌ی سرریز	
						$\frac{L}{W}$	$\frac{W}{P}$			پایین‌وسن	بالادست
۱	Linear	خطی	۰	۰	۱۰	۱	-	-	مسطح	-	-
۲	LW	کنگره‌ای خطی	۰	۵	۱۰	۴/۳۲	۱,۲۵	۱,۲۵	مسطح	۲	۲
۳	ALW20	کنگره‌ای قوسی	۲۰	۱۸	۱۰	۴/۲	۱/۳۶	۱/۳۶	مسطح	۲	۵
۴	ALWM20	کنگره‌ای قوسی	۲۰	۱۸	۱۱/۵	۳/۵۷	۱/۳۶	۱/۳۶	ربع دایره	۲	۵
۵	ALWM30-2	کنگره‌ای قوسی	۳۰	۲۸	۱۱/۵	۳/۷۷	۱/۵۱	۱/۵۱	ربع دایره	۲	۲
۶	ALW30	کنگره‌ای قوسی	۳۰	۲۴	۱۰	۳/۷۷	۱/۵۱	۱/۵۱	مسطح	۲	۵
۷	ALWM30	کنگره‌ای قوسی	۳۰	۲۴	۱۱/۵	۳/۷۷	۱/۵۱	۱/۵۱	ربع دایره	۲	۵
۸	ALW30-2	کنگره‌ای قوسی	۳۰	۲۸	۱۰	۳/۵۷	۱/۵۱	۱/۵۱	مسطح	۲	۲
۹	ALW40	کنگره‌ای قوسی	۴۰	۳۲	۱۰	۳/۲۱	۱/۷۷	۱/۷۷	مسطح	۲	۵
۱۰	ALWM40	کنگره‌ای قوسی	۴۰	۳۲	۱۱/۵	۳/۲۱	۱/۷۷	۱/۷۷	ربع دایره	۲	۵



شکل ۲- تصاویری از کانال و سرریز کنگره‌ای قوسی؛ (الف) بالادست سرریز، (ب) پایین دست سرریز

آموزشی به صفحه تفکیک کننده، بردار پشتیبان هستند. هدف SVM یافتن خطی است که از داده‌های موجود در دو کلاس بیشترین فاصله و یا به بیان دیگر کمترین خطر عملیاتی را داشته باشد. اندازه حاشیه صفحه تفکیک کننده از معادله (۳) به دست می‌آید که در شکل (۳) این حاشیه قابل مشاهده است.

$$M = \frac{2}{\|W\|} = \frac{2}{WTW} \quad (\text{رابطه ۳})$$



شکل ۳- ماشین بردار پشتیبان

بهترین صفحه تفکیک کننده صفحه‌ای است که بیشترین فاصله بین دو کلاس را داشته باشد، پس باید $\|W\|$ کمترین مقدار را برای خود اختصاص دهد. در دسته‌بندی‌های غیرخطی، که داده‌ها به صورت خطی قابل تفکیک نیستند. نگاشت‌های مختلفی (توابع کرنل) در این ماشین تعریف شده‌اند که مسئله را به فضای جدید منتقل می‌کنند تا داده‌ها در آن به صورت خطی تفکیک شوند. بنابراین تابع کرنلی به نام ϕ تعریف می‌شود که داده‌های فضای x را به فضای z ببرد: $x \rightarrow z, z = \phi(x)$. نتیجه معادله تفکیک کننده به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود:

$$W^T Z + b = f(x) = 0 \rightarrow W^T \phi(x) + b = 0 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه (۴) که رابطه بین متغیر وابسته هدف و متغیرهای مستقل ورودی است، $\phi(x)$ کرنل، $f(x)$ تابع هدف، W ضریب بردار و b مقدار ثابت است. تابع هدف یا همان $f(x)$ که

برای محاسبه‌ی ضریب جریان آزاد (C_d) در سرریزهای کنگره‌ای قوسی از معادله‌ی عمومی جریان روی سرریزها مطابق معادله‌ی (۱) استفاده شده است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L C H_t^{1.5} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Q دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، L 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 مجذور بر ثانیه هستند.

تاثیر پارامترهایی شامل عدد فرود (Fr)، طول دماغه‌ی سرریز (A)، عرض کل سرریز (W)، زاویه‌ی دیواره‌ها (α)، ارتفاع سرریز (P)، ضخامت سرریز (t_w)، تعداد سیکل‌ها (N)، زاویه‌ی سیکل قوسی (θ)، شکل تاج سرریز (U)، افزایش ارتفاع سرریز (C) در کارایی سرریز کنگره‌ای مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت منجر به پارامترهای موثر لیست شده در رابطه‌ی (۲) شدند:

$$C_d = F\left(\frac{H_t}{P}, \frac{\theta}{\alpha}, Fr, \frac{L_c}{W}, \frac{P}{W}, \frac{A}{W}, C, U\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

الگوریتم SVM

برای نخستین بار الگوریتم SVM توسط Vapnik (1963) ارائه و سپس Vapnik and Corenna (1995) آن را برای حالت طبقه بندی غیرخطی تعمیم دادند. الگوریتم SVM جزء الگوریتم‌های تشخیص الگو، دسته‌بندی می‌شود. از الگوریتم SVM در هر جایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های خاص باشد می‌توان استفاده نمود. کارکرد الگوریتم SVM مانند اغلب روش‌های هوشمند به صورت آموزش و آزمون می‌باشد. الگوریتم SVM از دقت تعمیم‌دهی زیادی برخوردار است که با فرض جداپذیری خطی کلاس‌ها از هم، منجر به ابر صفحه‌ای با بیشینه حاشیه برای ایجاد کمینه خطا می‌شود. صفحه تفکیک کننده‌ای که بیشترین فاصله را از صفحات دسته‌بندی داشته باشد بهترین صفحه تفکیک کننده نامیده می‌شود. نزدیک‌ترین داده‌های

تابع محدب است که یک جواب بهینه و منحصر به فرد دارد. برای یافتن صفحه بهینه به صورت رابطه (۵) عمل می‌شود:

$$0 \leq \alpha_i \leq c \text{ Min } \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \phi(x_i)^T \phi(x_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

به جای عبارت $\phi(x_i)\phi(x_i)^T$ یک حالت کلی‌تر به صورت $K(x_i, x_j)$ می‌توان تعریف کرد که به وسیله آن بتوان به فضاهای پیچیده‌تر راه یافت. فرایند گفته شده ترفند کرنل نامیده می‌شود، در نتیجه رابطه فوق به صورت یک معادله قابل حل و بهینه در می‌آید.

الگوریتم GEP

برنامه‌ریزی بیان ژن تعمیم یافته‌ی الگوریتم ژنتیک می‌باشد که بر اساس تئوری داروین توسط Ferreira (1999) ابداع شده است. در این مدل از الگوریتم‌های ژنتیک برای نوشتن برنامه‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. در این حالت متغیرها، ساختارهای برنامه‌ریزی هستند و خروجی نیز میزان توانایی برنامه در رسیدن به اهدافش است. این الگوریتم، یک الگوریتم ژنتیکی است که از جمعیتی از افراد استفاده می‌کند و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی اعمال می‌نماید. در برنامه ژنتیک یک جمعیت شامل عضوهای تصادفی است که کروموزوم نامیده می‌شود و توابع برازش هر یک از کروموزوم‌ها نسبت به مقادیر هدف، ارزیابی می‌گردد. در الگوریتم GEP، افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزوم) کدگذاری می‌شوند و بعد به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه و شکل‌های متفاوت بیان می‌شوند. در این الگوریتم بر ساختار درختی مجموعه‌ها تاکید می‌شود. اولین مرحله در برنامه‌ریزی بیان ژن، تولید جمعیت اولیه از راه‌حل‌ها می‌باشد. در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک از متغیرهای مختلف و عملگرهای ریاضی استفاده می‌شود. برنامه خروجی ژنتیک به صورت روابط ریاضی و نمودار درختی نمایش داده می‌شود. یکی از موارد مهم در GEP، تعیین تابع برازش است و هدف آن، یافتن راه‌حلی است که برای تمامی موارد برازش به اندازه یک خطای معین به خوبی عمل کند. معمولاً تابع برازش به وسیله پردازش تعدادی از مسئله هدف، که مورد برازش نیز نامیده می‌شود، ارزیابی می‌گردد (Fuladipناه et al., 2020). الگوریتم GEP ویرایش جدیدی از برنامه‌ریزی ژنتیک است که به استنتاج برنامه‌های رایانه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف می‌پردازد. یکی از نقاط قوت برنامه‌ریزی ژنتیک آن است که معیار تنوع ژنتیکی بسیار ساده است و از این رو عملگرهای ژنتیک در سطح کروموزوم عمل می‌نمایند. همچنین یکی دیگر از نقاط قوت این روش، عبارت است از طبیعت منحصر به فرد چند ژنی بودن آن که زمینه

ارزیابی مدل‌های پیچیده‌ای را که شامل چندین زیر مدل می‌باشند فراهم می‌آورد. گام اول، تولید یک جمعیت اولیه از فرمول‌ها است که از ترکیب تصادفی مجموعه‌ای از توابع (شامل عملگرهای ریاضی در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (شامل متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند. در گام دوم، هر یک از افراد جمعیت با استفاده از ملاک‌های برازش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. گام سوم، تولید یک جمعیت جدید از فرمول‌ها است. گام چهارم، تکرار گام سوم الگوریتم برای نیل به حداکثر تعداد تولید است. در این پژوهش از شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای انتخاب بهترین عملگر بین توابع در الگوریتم GEP استفاده شده است (Fuladipناه and Majedi Asl, 2020). در این پژوهش از نرم‌افزار Tools GeneXpro برای توسعه و اجرای مدل مبتنی بر GEP استفاده شده است. این نرم‌افزار مبتنی بر برنامه‌ریزی صریح ژنتیک است.

آماره‌های ارزیابی

در این پژوهش از سه آماره ارزیابی برای ارزیابی دقت عملکرد الگوریتم‌های SVM و GEP در پیش‌بینی ضریب‌دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی به شرح زیر استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(C_d)_m - (C_d)_p]^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - \bar{C}_d)_m \times ((C_d)_p - \bar{C}_d)_p}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_d)_m - \bar{C}_d}_m \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (C_d)_p - \bar{C}_d}_p} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - (C_d)_p)_2}{\sum_{i=1}^N ((C_d)_m - (C_d)_m)_2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این معادله‌ها زیرنویس p مربوط به مقادیرهای محاسبه‌ای، زیرنویس m مربوط به مقادیرهای مشاهده‌ای و N نیز تعداد داده‌ها هستند.

نتایج و بحث

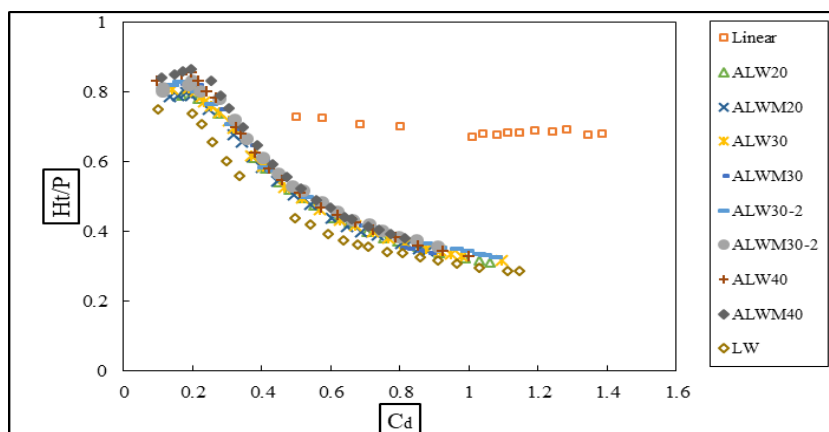
تاثیر زاویه سیکل قوسی بر سرریزهای کنگره‌ای قوسی

به طوری که در شکل (۴) مشخص است ضریب دبی تمامی سرریزهای کنگره‌ای تا محدوده‌ی $\frac{H_t}{P} < 0.7$ روند افزایشی دارند و در ادامه با افزایش این نسبت، ضریب دبی کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان چنین بیان نمود که تا محدوده‌های تقریباً $(H_t/P < 0.7)$ سرریزهای کنگره‌ای مانند سرریزهای خطی عمل نموده یعنی خطوط جریان تقریباً عمود بر دیواره سرریز می‌باشد ولی با افزایش دبی این زاویه کمتر از ۹۰ درجه شده و لذا ضریب دبی کاهش می‌یابد و علاوه بر آن با افزایش دبی و افزایش نسبت (H_t/P) ، استغراق موضعی نیز بیشتر شده و لذا ضریب دبی کاهش می‌یابد و همچنین دلیل اینکه در محدوده $\frac{H_t}{P} > 1$ این منحنی‌ها تقریباً افقی هستند این است

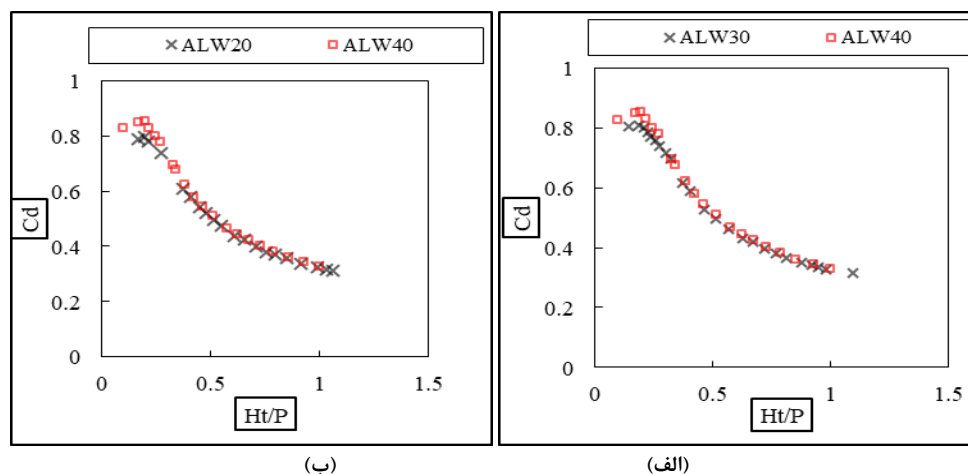
جریان به سیکل های مختلف می شود. به عبارتی دیگر شکل قوسی کنگره ای با جهت دهی به سیکل ها برای استفاده از همگرایی طبیعی جریان ورودی از سمت دیواره های کانال به افزایش کارایی کمک می کند.

در شکل (۵- الف) و (۵- ب) به ترتیب سرریزهای کنگره ای قوسی با زوایای سیکل قوسی ۲۰ و ۳۰ درجه با زاویه ۴۰ درجه مورد مقایسه قرار گرفتند. همانطور که مشاهده می شود در محدوده $\frac{H_t}{p} > 0.4$ برتری سرریز ALW40 نسبت به سرریزهای ALW20 و ALW30 کم است ولی در محدوده $\frac{H_t}{p} > 0.4$ ضریب دبی این سرریز افزایش قابل توجهی نشان می دهد و با کاهش نسبت $\frac{H_t}{p}$ این اختلاف بیشتر می شود. بیشترین اختلاف ضریب دبی سرریز ALW40 نسبت به ALW30 و ALW20 به ترتیب ۵٪ و ۸٪ است. همچنین متوسط و بیشینه اختلاف ضریب دبی سرریز کنگره ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه با سرریز کنگره ای خطی به ترتیب برابر با ۱۲٪ و ۲۱٪ به دست آمده است.

که در نسبت های نسبت بار آبی بیشتر از یک، تمامی سرریزها همانند یک سرریز لبه پهن عمل میکنند و ضریب دبی آنها کاهش یافته و تقریباً شبیه هم عمل می نمایند و علت به وجود آمدن شرایط سرریز لبه پهن این است که استغراق موضعی کامل در دهانه های خروجی سرریزها اتفاق می افتد و در دهانه های ورودی و خروجی بار آبی یکسان بوده و سرریز کنگره ای شبیه سرریز لبه پهن عمل کرده و ضریب دبی آن کاهش می یابد. ضریب دبی سرریز خطی با شکل تاج مسطح (تخت) در ابتدا کاهش جزئی نشان می دهد ولی با افزایش $\frac{H_t}{p}$ ضریب دبی آن افزایش می یابد که با نتایج (Aydin et al. (2011) مطابقت دارد. بررسی شکل (۴) نشان می دهد که ضریب دبی تمامی سرریزهای کنگره ای قوسی نسبت به سرریز کنگره ای خطی افزایش چشم گیری داشته است به طوری که در $\frac{H_t}{p} = 0.3$ اختلاف ۱۶٪ تا ۲۱٪ مشاهده می شود که علت آن را می توان در شکل قوسی این سرریزها در بهتر شدن جهت جریان به سمت سیکل ها بیان کرد؛ بدین معنی که زاویه ای امتداد جریان با جهت دیواره سرریزها به ۹۰ درجه نزدیک تر می شود. همچنین باعث کاهش نابرابری ورود



شکل ۴- منحنی تغییرات C_d انواع سرریزهای کنگره ای قوسی در مقابل $\frac{H_t}{p}$

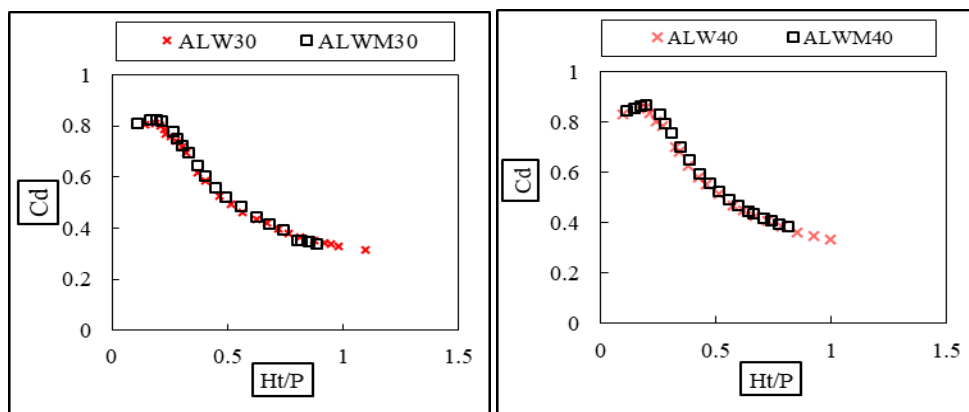


شکل ۵- منحنی تغییرات C_d سرریزهای کنگره ای قوسی با زوایای سیکل قوسی مختلف: (الف) ۲۰ و ۴۰ درجه؛ (ب) ۳۰ و ۴۰ درجه

بروز استغراق موضعی می‌شود. در این حالت در شرایط افزایش ارتفاع ۱۱/۵٪، نسبت به حالت اولیه دیرتر اتفاق می‌افتد. همچنین در سرریزهای با فرم تاج مسطح، جریان از روی تاج به حالت پرش درمی‌آیند و در سرریزهای با فرم تاج ربع دایره‌ای، جریان از روی تاج به شکل افقی است و در نتیجه ضریب دبی و کارایی سرریزهای اصلاح شده افزایش نشان می‌دهد. در شکل (۷)، به ترتیب ضریب دبی سرریزهای ۳۰، ۴۰ درجه و ۲۰ تا ۴۰ درجه در مقابل $\frac{H_t}{P}$ ترسیم شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که در دبی‌های کم اختلاف ضریب دبی در این سرریزها بیشتر است و با افزایش دبی و نسبت $\frac{H_t}{P}$ این اختلاف کمتر می‌شود به طوری که در شکل (۷-ب) در نقطه $\frac{H_t}{P} = 0.6$ اختلاف به صفر می‌رسد ولی در شکل (۷-الف) برای سرریزهای ۲۰ و ۴۰ این اختلاف تا بیشترین دبی نیز مشاهده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با اصلاح این سرریزها و با افزایش زاویه سیکل قوسی، کارایی این سرریزها رو به افزایش می‌باشد.

تاثیر افزایش ارتفاع و فرم تاج سرریز بر سرریزهای کنگره‌ای قوسی

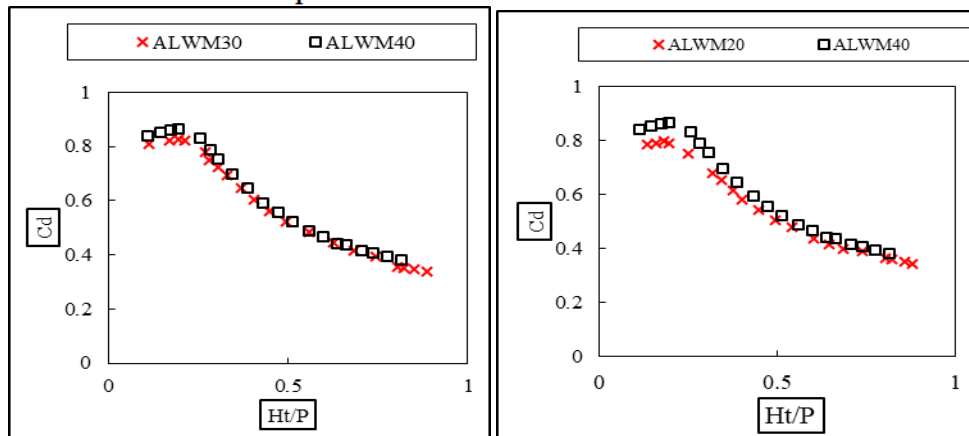
در این بخش سرریزهای کنگره‌ای قوسی با سرریزهای اصلاح شده آنها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند که سرریزهای اصلاح شده شامل (الف) تغییر فرم تاج سرریزها از حالت مسطح (تخت) به حالت ربع دایره در بالادست تاج (ب) افزایش ۱۱/۵٪ درصدی ارتفاع سرریزها هستند. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب تغییرات ضریب دبی را نسبت به $\frac{H_t}{P}$ برای دو سرریز کنگره‌ای قوسی با زاویه‌ی سیکل قوسی ۳۰ و ۴۰ درجه و اصلاح شده آنها نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، روند تغییرات ضریب دبی هر دو سرریز مشابه هستند و در محدوده $\frac{H_t}{P} < 0.7$ سرریزهای اصلاح شده کارایی بیشتری (حدود ۲٪ تا ۴٪) نسبت به سرریزهای اصلاح نشده دارند ولی با افزایش $\frac{H_t}{P} > 0.7$ مقدار ضریب دبی در سرریزها به هم نزدیک می‌شوند. علت آن را می‌توان افزایش تداخل تیغه‌های ریزشی به خصوص در بالادست کلیدهای خروجی در اثر افزایش ارتفاع آب روی سرریز دانست که باعث



(ب)

(الف)

شکل ۶- منحنی تغییرات C_d سرریز کنگره‌ای قوسی و اصلاح شده آن در مقابل $\frac{H_t}{P}$: (الف) ۳۰ درجه؛ (ب) ۴۰ درجه



(ب)

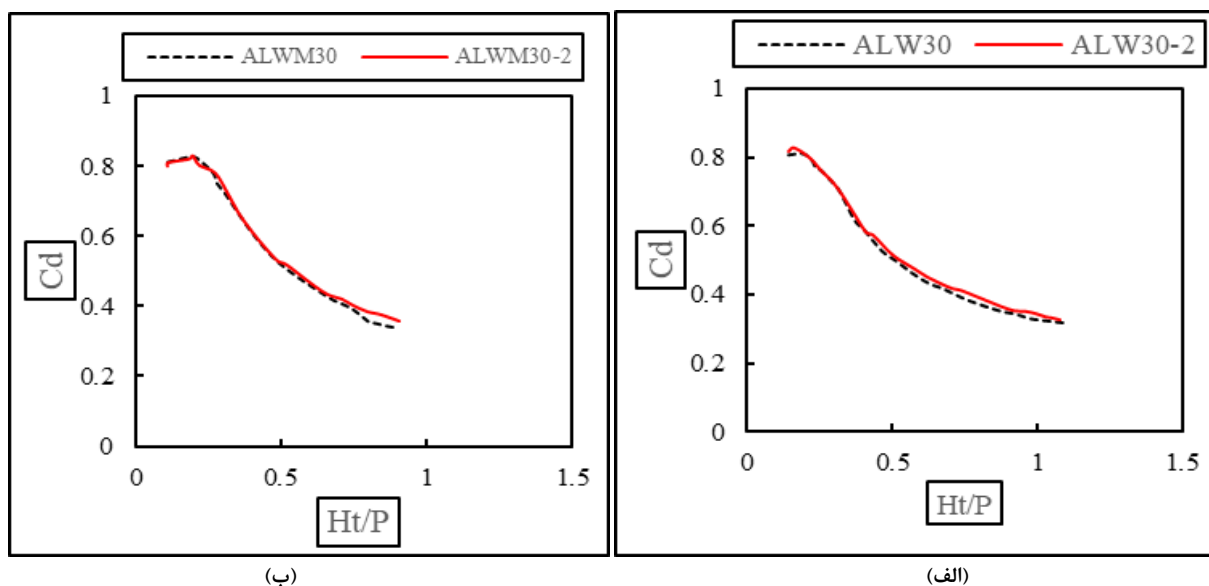
(الف)

شکل ۷- مقایسه تغییرات C_d سرریزهای کنگره‌ای قوسی اصلاح شده با زوایای سیکل قوسی مختلف: (الف) ۲۰ و ۴۰ درجه؛ (ب) ۳۰ و ۴۰ درجه

یافته است. علت آن را می توان چنین بیان نمود که با افزایش طول دماغه در بالادست، افت انرژی جریان ورودی به سیکل ها نیز افزایش و در نتیجه ضریب دبی و کارایی سرریز کاهش می یابد. در این بخش از پژوهش طول دیواره هر سیکل ثابت و برابر ۲۵ سانتیمتر انتخاب شد و با توجه به اینکه با کاهش طول دماغه ها می توان طول دیواره سیکل ها را افزایش داد و از آنجایی که دبی سرریزها تابع طول تاج سرریز می باشد لذا با کاهش طول دماغه ها کارایی سرریزها می تواند افزایش یابد. همچنین می توان گفت که کاهش کارایی سرریز به دلیل استغراق موضعی حاصل از کاهش طول دماغه ها نسبت به افزایش کارایی سرریز به دلیل افزایش طول دیواره ها، کم می باشد.

تاثیر طول دماغه ها بر سرریزهای کنگره ای قوسی

برای مقایسه تاثیر طول دماغه های بالادست، سرریزهای کنگره ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۳۰ درجه انتخاب شد و دو طول دماغه ۲ و ۵ سانتیمتر در شرایط اصلاح شده و اصلاح نشده مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل (۸) ضریب دبی سرریزهای کنگره ای قوسی با دماغه های ۲ و ۵ سانتیمتری به ترتیب برای حالت اصلاح نشده و اصلاح شده ترسیم شده اند. همان طور که مشخص است در هر دو شکل تا مقادیر $\frac{H_t}{p} > 0.6$ تفاوت چندانی در ضریب دبی برای دماغه های مختلف مشاهده نمی شود ولی با افزایش این نسبت $\frac{H_t}{p} > 0.6$ ضریب دبی سرریزهایی که در آنها طول دماغه ۲ سانتیمتر است، نسبت به طول دماغه ۵ سانتیمتری افزایش



شکل ۸- تغییرات C_d سرریزهای کنگره ای قوسی با زاویه سیکل قوسی ۳۰ درجه و با دماغه های ۲ و ۵ سانتیمتری؛ (الف) سرریزهای کنگره ای قوسی، (ب) سرریزهای کنگره ای قوسی اصلاح شده

سرریزهای کنگره ای در گام های آموزش و آزمون دارای دقت بالایی دارند. مدل SVM عملکرد خوبی دارد. همچنین در این شکل تغییرات ضریب دبی برای گام های آموزش و آزمون نیز رسم شده است. به طوری که مشاهده می شود منحنی های مربوط به ضرایب دبی مشاهده ای و محاسبه ای انطباق خوبی با هم دارند و اختلاف کمی بین آنها مشاهده می شود با دقت در این نمودارها مشخص می شود که نتایج مدل SVM برای نقاط بیشینه کمتر از مقادیر آزمایشگاهی و برای نقاط کمینه بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی هستند.

شکل (۹) تغییرات ضریب دبی جریان داده های مشاهده ای و محاسبه ای را نسبت به $\frac{H_t}{p}$ در سرریزهای کنگره ای قوسی نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود تا محدوده

الگوریتم SVM

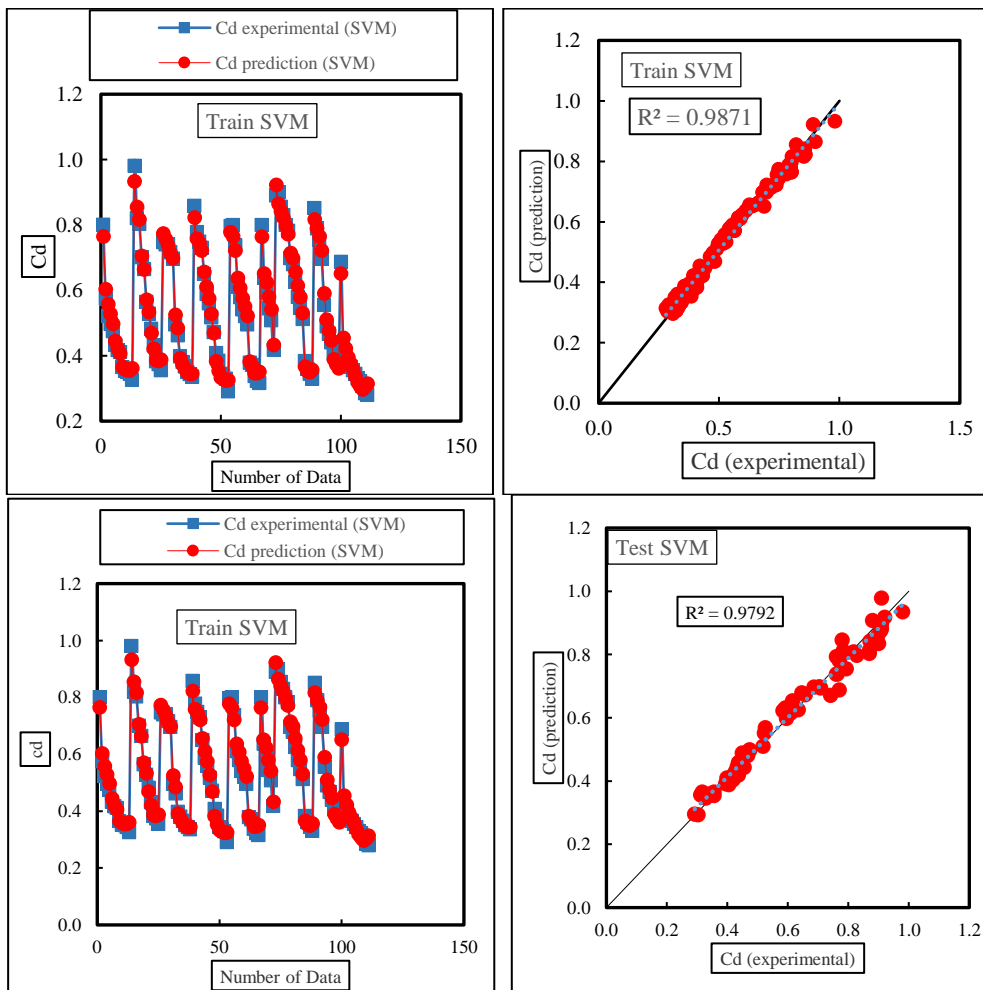
در اجرای الگوریتم SVM ترکیب های متفاوتی از متغیرهای مستقل به ازای میزان های مختلفی از فراسنجه تنظیمی γ در ۱۹ ترکیب مختلف مطابق (جدول ۸) مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت بهترین ترکیب به ازای میزان های بهینه شاخص های ارزیابی مشخص شد. در الگوریتم SVM، استفاده از ۶۰٪ داده ها برای آموزش و ۴۰٪ داده ها در گام آزمون منجر به بهینه ترین پاسخ به ازای ترکیب شماره ۱۰ با داشتن ضرایب عملکرد $R^2=0.9791$ ، $DC=0.9776$ و $RMSE=0.03$ شد. منحنی پراکنش داده های مشاهده ای و محاسبه ای ضریب دبی برای مدل برتر برای دو گام آموزش و آزمون در شکل (۹) نشان داده شده اند. همان گونه که در این شکل مشخص است ضریب دبی محاسبه ای

ضرایب دبی محاسبه‌ای تقریباً منطبق بر ضرایب دبی مشاهده‌ای هستند که دلیل خوبی بر صحت نتایج این مدل دارد.

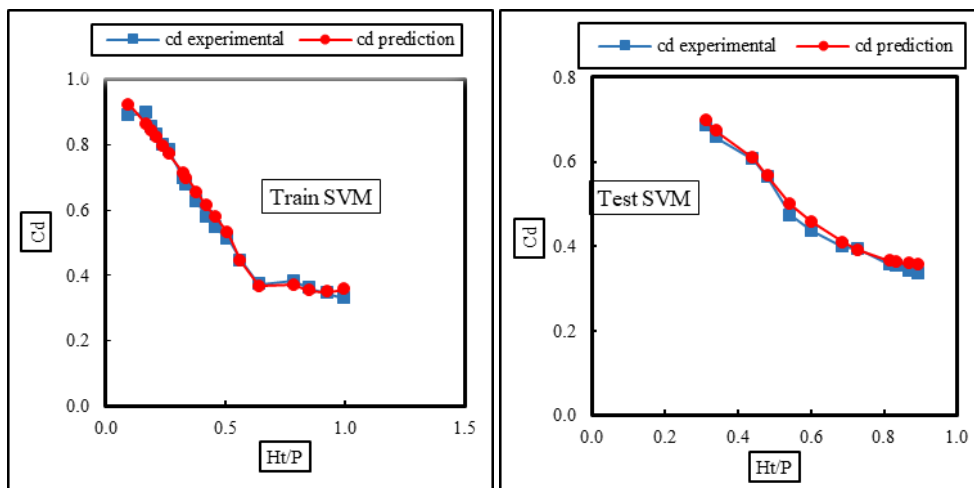
با افزایش $\frac{H_t}{p} > 0/9$ مقدار ضریب دبی کاهش می‌یابد و بعد از محدوده $\frac{H_t}{p} > 0/9$ به دلیل استغراق موضعی کامل، تغییرات چشمگیری مشاهده نمی‌شود. همچنین به طوری که مشخص است

جدول ۲- ترکیبات مختلف پارامترهای بی بعد ورودی به SVM و GEP

Models	Parameters	Models	Parameters
۱	$H_t/P, \theta/\alpha$	۱۱	$H_t/P, \theta/\alpha, u$
۲	$H_t/P, \theta/\alpha, c$	۱۲	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr$
۳	$H_t/P, \theta/\alpha, p/w$	۱۳	$H_t/P, \theta/\alpha, c, u$
۴	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr, u$	۱۴	$H_t/P, \theta/\alpha, A/w$
۵	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr, c$	۱۵	$H_t/P, \theta/\alpha, L_c/w$
۶	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr, u, c$	۱۶	$H_t/P, \theta/\alpha, L_c/w, Fr, c, u$
۷	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr, L_c/w$	۱۷	$H_t/P, \theta/\alpha, L_c/w, A/w, P/w$
۸	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr, L_c/w, A/w$	۱۸	$H_t/P, \theta/\alpha, L_c/w, Fr, A/w, u, c$
۹	$H_t/P, \theta/\alpha, A/w, Fr, L_c/w, P/w$	۱۹	$H_t/P, \theta/\alpha, Fr, L_c/w, P/w, A/w, c, u$
۱۰	$H_t/P, \theta/\alpha, L_c/w, P/w, A/w, u, c$		



شکل ۹- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی در مرحله آزمون و آموزش مدل برتر SVM

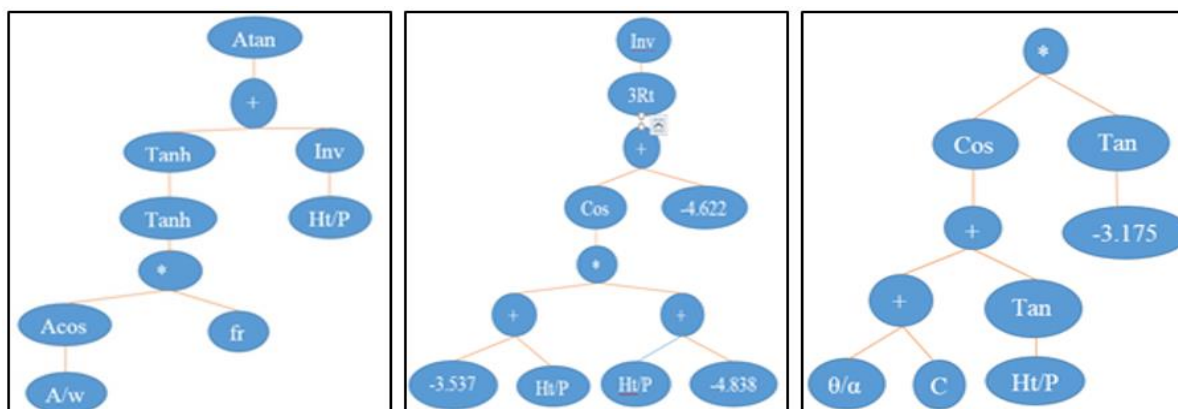


شکل ۹- تغییرات C_d جریان نسبت به $\frac{H_t}{P}$ در سرریزهای کنگره ای قوسی SVM

الگوریتم GEP

۸۰٪ و ۲۰٪ است که در ترکیب شماره ۱۸ منجر به بهینه ترین انطباق با آماره های $RMSE=0.0231$ ، $R^2=0.9871$ و $DC=0.9856$ شد. در شکل (۱۱) بیان درختی الگوریتم GEP برای ترکیب شماره ۱۸ نشان داده شده است.

برای اجرای الگوریتم GEP روی داده های مشاهده ای، ترکیب های مندرج در جدول (۲) استفاده شد. نتایج نشان داد در الگوریتم GEP درصد استفاده داده ها در گام های آموزش و آزمون به ترتیب



شکل ۱۰- بیان درختی خروجی الگوریتم GEP

آزمون با دقت بالایی پیش بینی شده است و مدل GEP نیز همانند مدل SVM عملکرد خوبی از خود نشان داده است 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 شکل ها برای نقاط بیشینه تا حدود کمی، بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است ولی در مورد نقاط کمینه، مقادیری تقریباً برابر مقادیر آزمایشگاهی پیش بینی کرده است.

شکل (۱۳) منحنی پراکنش داده های مشاهده ای و محاسبه ای در گام های آموزش و آزمون برای مدل های برتر SVM و GEP را نشان می دهد. به طوری که مشخص است هر دو مدل از دقت بالایی برای پیش بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره ای

معادله ی برازش یافته الگوریتم GEP نیز با استفاده از بیان درختی ارائه شده در این شکل به قرار رابطه (۹) است که از رابطه ارائه شده می توان در شرایط مشابه هندسی و هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای قوسی، استفاده نمود.

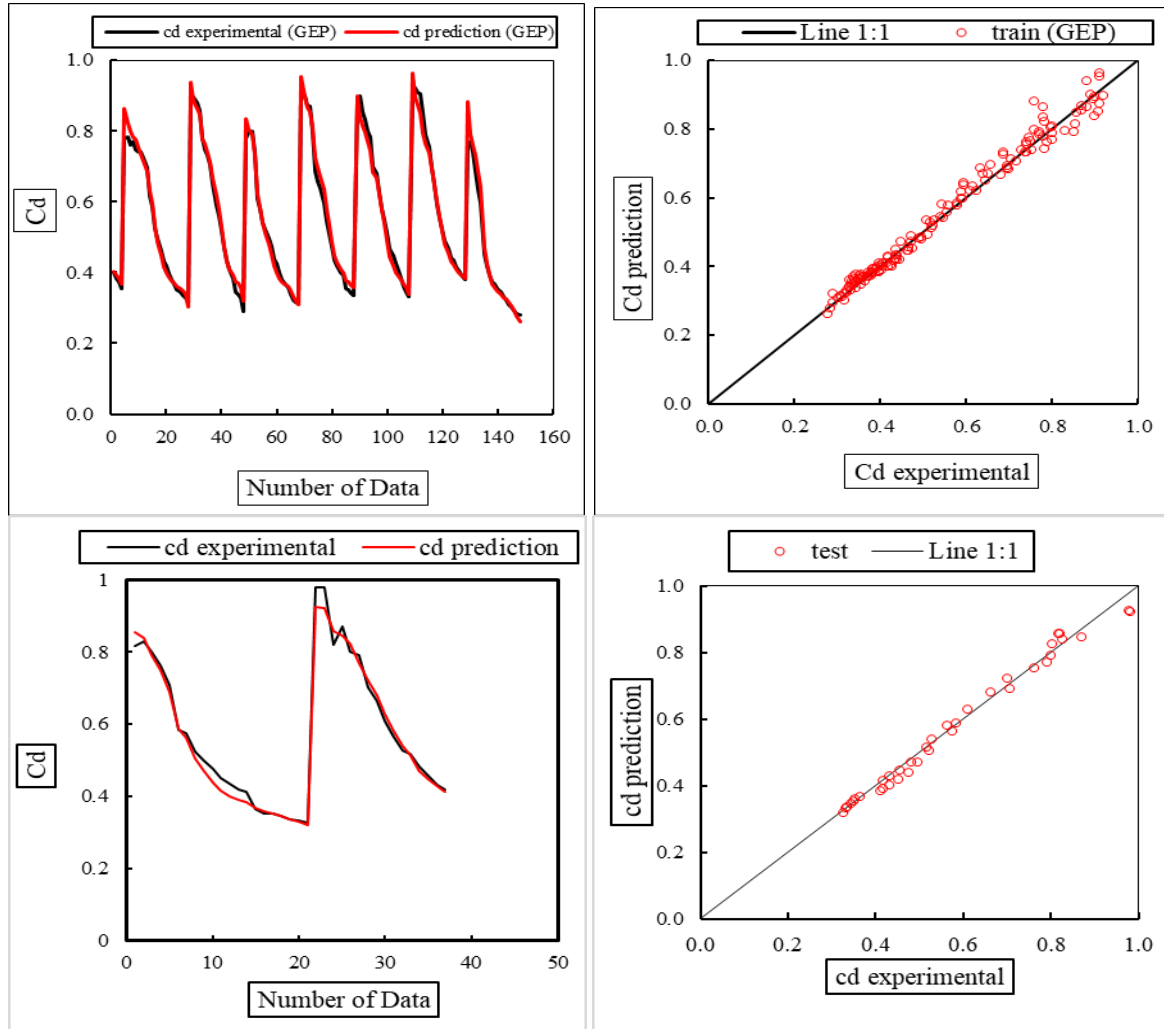
(رابطه ۹)

$$Cd = [\cos(\left(\frac{\theta}{\alpha} + C\right) + \tan\left(\frac{H_t}{P}\right))] * \tan(-3.1754) + [1.0 / (3Rt(\cos(\left(\left(-3.537 + \frac{H_t}{P}\right) * \left(\frac{H_t}{P}\right) + -4.838\right)) + -4.622))] + [\operatorname{atan}(\tanh(\tan(\operatorname{acos}\left(\frac{A}{W}\right) * Fr))) + (1.0 / \left(\frac{H_t}{P}\right))]$$

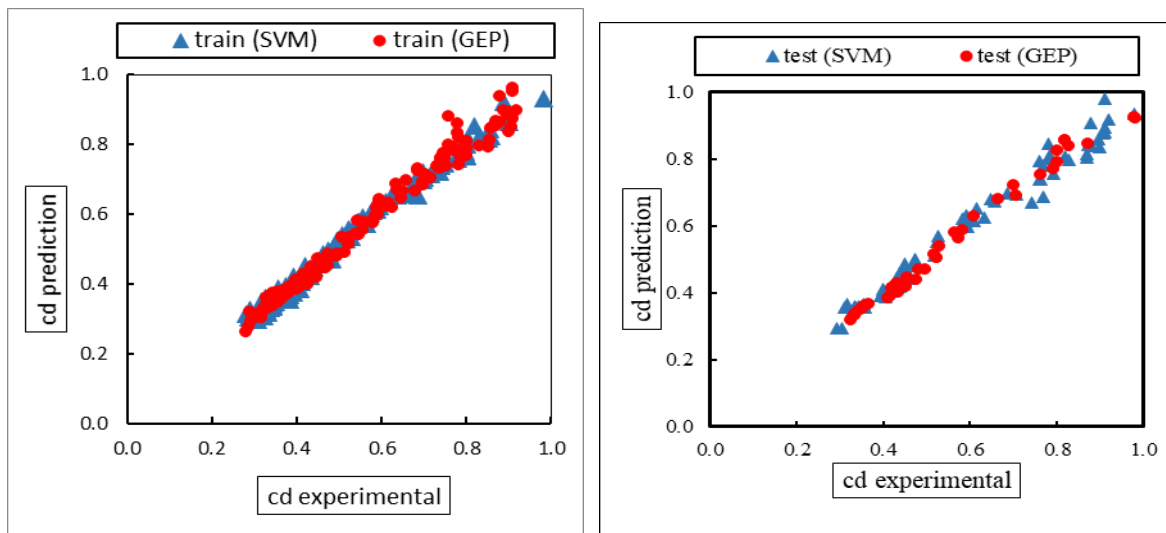
منحنی پراکنش داده های آزمایشگاهی و پیش بینی ضریب دبی برای مدل برتر و برای دو فاز آموزش و آزمون در شکل (۱۱) نشان داده شده اند. همان گونه که در این شکل مشخص است، ضریب دبی سرریزهای کنگره ای قوسی در گام های آموزش و

مقادیر پارامترهای نسبت بار آبی (Ht/P) و ضریب دبی (Cd) که در ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژن به کار گرفته شده‌اند در جدول (۳) آورده شده است.

قوسی برخوردار هستند و با توجه به مقادیر ضریب همبستگی می‌توان بیان کرد که در مرحله آموزش مدل SVM دارای خطای نسبتاً کمتری نسبت به مدل GEP است ولی در مرحله آزمون مدل GEP منجر به نتایج نسبتاً بهتری از مدل SVM شده است.



شکل ۱۱- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی در مرحله آموزش و آزمون مدل برتر GEP



شکل ۱۲- پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌های SVM و GEP در مرحله‌های آموزش و آزمون

جدول ۳- داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

Ht/P	Cd	Ht/P	Cd	Ht/P	Cd	Ht/P	Cd	Ht/P	Cd
۰/۱۴۲	۰/۸۱۸	۰/۷۴۹	۰/۴۰۱	۰/۱۴۲	۰/۵۸۸	۰/۳۴۱	۰/۶۵۸	۰/۱۹۵	۰/۹۰۷
۰/۱۶۱	۰/۸۲۸	۰/۷۹۸	۰/۳۸۳	۰/۴۴۹	۰/۵۶۰	۰/۳۶۴	۰/۶۳۸	۰/۲۵۵	۰/۸۵۲
۰/۲۳۱	۰/۸۰۰	۰/۸۴۶	۰/۳۷۴	۰/۴۹۸	۰/۵۱۷	۰/۳۹۶	۰/۵۹۵	۰/۲۸۲	۰/۷۸۹
۰/۲۵۲	۰/۷۶۴	۰/۹۰۸	۰/۳۵۶	۰/۵۶۶	۰/۴۷۲	۰/۴۴۵	۰/۵۴۵	۰/۳۰۴	۰/۷۵۴
۰/۳۱۳	۰/۷۰۸	۰/۱۴۱	۰/۷۸۰	۰/۶۳۳	۰/۴۳۶	۰/۴۹۰	۰/۵۰۸	۰/۳۴۵	۰/۶۹۷
۰/۴۰۷	۰/۵۸۴	۰/۱۸۷	۰/۷۸۳	۰/۶۹۱	۰/۴۰۸	۰/۵۴۴	۰/۴۷۴	۰/۳۸۶	۰/۶۴۷
۰/۴۳۲	۰/۵۷۵	۰/۲۱۰	۰/۷۶۰	۰/۷۵۴	۰/۳۸۴	۰/۶۰۲	۰/۴۳۶	۰/۴۳۱	۰/۵۹۲
۰/۴۹۱	۰/۵۲۳	۰/۲۲۶	۰/۷۷۰	۰/۸۱۹	۰/۳۴۵	۰/۶۴۳	۰/۴۱۸	۰/۴۷۲	۰/۵۵۵
۰/۵۳۲	۰/۴۹۷	۰/۲۳۴	۰/۷۴۷	۰/۸۴۲	۰/۳۳۹	۰/۶۸۸	۰/۳۹۸	۰/۵۱۲	۰/۵۲۲
۰/۵۷۶	۰/۴۷۵	۰/۲۵۴	۰/۷۴۰	۰/۸۷۷	۰/۳۳۰	۰/۷۲۹	۰/۳۹۴	۰/۵۵۷	۰/۴۹۰
۰/۶۱۹	۰/۴۵۱	۰/۲۷۶	۰/۷۴۱	۰/۹۸۲	۰/۲۹۱	۰/۸۱۸	۰/۳۵۶	۰/۵۹۸	۰/۴۶۷
۰/۶۶۳	۰/۴۳۳	۰/۳۰۳	۰/۷۱۷	۰/۱۶۸	۰/۷۸۰	۰/۸۳۶	۰/۳۵۳	۰/۶۳۸	۰/۴۴۱
۰/۷۰۸	۰/۴۱۷	۰/۳۲۰	۰/۶۹۷	۰/۱۹۹	۰/۷۹۷	۰/۸۷۲	۰/۳۴۲	۰/۶۶۱	۰/۴۳۵
۰/۷۴۰	۰/۴۱۱	۰/۳۶۹	۰/۶۱۶	۰/۲۱۷	۰/۸۰۰	۰/۸۹۵	۰/۳۳۶	۰/۷۰۶	۰/۴۱۵
۰/۸۷۴	۰/۳۶۶	۰/۴۰۲	۰/۵۸۷	۰/۲۷۳	۰/۷۳۸	۰/۰۹۷	۰/۸۹۰	۰/۷۳۸	۰/۴۰۶
۰/۹۱۶	۰/۳۵۳	۰/۴۶۴	۰/۵۲۶	۰/۳۷۵	۰/۶۱۱	۰/۱۶۸	۰/۹۰۰	۰/۷۷۴	۰/۳۹۳
۰/۹۶۳	۰/۳۵۰	۰/۵۱۵	۰/۴۹۶	۰/۴۱۰	۰/۵۷۹	۰/۱۹۴	۰/۸۵۵	۰/۸۱۵	۰/۳۸۰
۰/۹۹۵	۰/۳۴۴	۰/۵۶۶	۰/۴۶۲	۰/۴۴۸	۰/۵۴۱	۰/۲۱۵	۰/۸۳۱	۰/۰۸۵	۰/۷۶۰
۱/۰۲۹	۰/۳۳۵	۰/۶۲۴	۰/۴۳۲	۰/۴۸۰	۰/۵۲۱	۰/۲۴۱	۰/۸۰۰	۰/۱۸۷	۰/۷۷۰
۱/۰۴۶	۰/۳۲۵	۰/۶۶۹	۰/۴۱۸	۰/۵۱۶	۰/۴۹۵	۰/۲۶۷	۰/۷۸۲	۰/۲۱۸	۰/۷۴۲
۱/۰۷۷	۰/۳۲۶	۰/۷۲۱	۰/۳۹۸	۰/۵۵۰	۰/۴۷۴	۰/۳۲۴	۰/۶۸۶	۰/۲۴۸	۰/۶۸۷
۰/۱۱۲	۰/۹۸۰	۰/۷۶۷	۰/۳۸۱	۰/۶۰۶	۰/۴۳۹	۰/۳۴۰	۰/۶۸۰	۰/۲۸۹	۰/۶۳۴
۰/۱۱۴	۰/۹۸۱	۰/۸۱۳	۰/۳۶۷	۰/۶۵۴	۰/۴۲۷	۰/۳۸۱	۰/۶۲۵	۰/۳۳۱	۰/۵۹۵
۰/۱۸۷	۰/۸۲۰	۰/۸۷۷	۰/۳۵۰	۰/۷۰۵	۰/۳۹۹	۰/۴۲۲	۰/۵۸۰	۰/۴۸۹	۰/۴۵۰
۰/۱۹۹	۰/۸۷۲	۰/۹۱۷	۰/۳۴۴	۰/۷۵۲	۰/۳۷۹	۰/۴۵۹	۰/۵۴۸	۰/۵۴۰	۰/۴۱۹
۰/۲۲۱	۰/۸۰۳	۰/۹۴۸	۰/۳۳۶	۰/۷۹۳	۰/۳۷۲	۰/۵۱۰	۰/۵۱۲	۰/۵۹۱	۰/۳۹۳
۰/۲۷۶	۰/۷۹۳	۰/۹۷۹	۰/۳۲۸	۰/۸۵۱	۰/۳۵۶	۰/۵۷۲	۰/۴۶۸	۰/۶۳۷	۰/۳۷۴
۰/۳۲۰	۰/۷۰۱	۱/۰۹۵	۰/۳۱۷	۰/۹۱۴	۰/۳۳۸	۰/۶۱۹	۰/۴۴۷	۰/۶۳۷	۰/۳۶۶
۰/۳۵۷	۰/۶۶۴	۰/۰۹۶	۰/۸۸۰	۰/۹۹۰	۰/۳۲۳	۰/۶۷۱	۰/۴۲۶	۰/۷۰۹	۰/۳۵۵
۰/۴۰۴	۰/۶۱۰	۰/۱۵۹	۰/۸۹۷	۱/۰۲۸	۰/۳۱۶	۰/۷۲۳	۰/۴۰۵	۰/۷۶۱	۰/۳۴۴
۰/۴۴۹	۰/۵۶۵	۰/۱۸۱	۰/۸۸۱	۱/۰۶۲	۰/۳۱۲	۰/۷۸۵	۰/۳۸۴	۰/۸۱۷	۰/۳۳۱
۰/۴۹۰	۰/۵۲۹	۰/۱۹۹	۰/۸۵۸	۰/۰۷۶	۰/۹۱۰	۰/۸۵۲	۰/۳۶۰	۰/۸۶۴	۰/۳۲۲
۰/۵۱۹	۰/۵۱۸	۰/۲۶۸	۰/۷۷۸	۰/۱۴۷	۰/۹۰۰	۰/۹۲۵	۰/۳۴۵	۰/۹۲۵	۰/۳۰۸
۰/۵۷۶	۰/۴۸۳	۰/۲۸۱	۰/۷۴۹	۰/۱۷۷	۰/۸۷۰	۰/۹۹۷	۰/۳۳۰	۰/۹۷۲	۰/۳۰۳
۰/۶۱۸	۰/۴۵۶	۰/۳۰۴	۰/۷۳۰	۰/۱۸۹	۰/۸۶۹	۰/۰۶۶	۰/۹۱۰	۱/۰۳۹	۰/۲۹۲
۰/۶۶۳	۰/۴۳۲	۰/۳۲۷	۰/۷۰۴	۰/۲۳۷	۰/۷۹۹	۰/۱۴۶	۰/۹۲۰	۱/۱۱۲	۰/۲۸۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی، از دو الگوریتم SVM و GEP بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. برای این منظور ده مدل فیزیکی مختلف در آزمایشگاه ساخته شد. در مجموع از ۲۲۶ سری داده-های آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشینه ضریب دبی، متعلق به سرریز کنگره‌ای قوسی اصلاح شده با زاویه سیکل قوسی ۴۰ درجه است. از هشت پارامتر مستقل بی‌بعد C ، Fr ، u ، $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{\theta}{\alpha}$ ، $\frac{L_{cw}}{W}$ ، $\frac{P}{W}$ و $\frac{A}{W}$ تعداد ۱۹ ترکیب بی‌بعد مختلف برای پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی با دو مدل SVM و

GEP، مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم‌های SVM و GEP برای پیش‌بینی ضریب دبی، از سه آماره R^2 ، $RMSE$ و DC استفاده شد. در خصوص الگوریتم SVM، مدل با پارامترهای ورودی C ، u ، $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{\theta}{\alpha}$ ، $\frac{L_{cw}}{W}$ ، $\frac{P}{W}$ و $\frac{A}{W}$ با شاخص‌های ارزیابی عملکرد $R^2=0/9791$ ، $RMSE=0/03$ و $DC=0/9776$ به عنوان مدل برتر انتخاب شد. در الگوریتم GEP مدل با پارامترهای ورودی C ، Fr ، u ، $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{\theta}{\alpha}$ ، $\frac{L_{cw}}{W}$ ، $\frac{P}{W}$ و $\frac{A}{W}$ به عنوان مدل برتر با آماره‌های ارزیابی عملکرد $R^2=0/9871$ ، $RMSE=0/0231$ و $DC=0/9856$ شناخته شد. نتایج نشان دهنده این است که هر دو مدل از دقت بالایی برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی

GEP نتیجه نسبتاً بهتری از مدل SVM ارائه می‌دهد.
 "هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

برخوردار هستند و با توجه به مقادیر آماره‌های ارزیابی، می‌توان بیان کرد که در مرحله آموزش مدل SVM دارای خطای نسبتاً کمتری نسبت به مدل GEP است ولی در مرحله آزمون مدل

REFERENCES

- Abbaspour A, and Arovanaghy, (2009). Flow prediction weirs Composite Triangular Regular Using Gene Expression Programming. 10th Iran Hydraulic Conference, November, Iran Hydraulic Association, University of Gilan, Iran.
- Aydin I., Sakarya A.B., Sisman Cigdem (2011). Discharge formula for rectangular sharp crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(2):144-151.
- Crookston, B.M. (2010). Labyrinth weirs. Ph.D. thesis, Utah State University, Logan, UT.
- Dabling, M.R. (2014). Nonlinear weir hydraulics. M.Sc. Thesis. Utah State University, Logan, UT.
- Darvas, L. A. (1971). Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 97(8): 1246-1251.
- Dizabadi, Sh., SeyedHakim, S. and AzimiA A.H. (2020). Discharge characteristics and structure of flow in labyrinth weirs with a downstream pool. *Flow Measurement and Instrumentation*, 71, 1-16.
- Farrokhy, A., Givachy, A., and Azhdary moghaddam. (2009). Estimating Determining the Discharge Coefficient of lateral weirs with neural network and adaptive neural-inference system. 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan University, Iran. (In Farsi)
- Fuladipناه, M. and Majedi Asl, M. (2020). Soft Computing Application to Amplify Discharge Coefficient Prediction in the Side Rectangular Weirs. *Journal Of Irrigation and Water Engineering*, DOI: 10.22125/IWE.2020.255601.1438. (In Farsi)
- Fuladipناه, M., Majedi Asl, M. and Haghgooyi, A. (2020). Application of intelligent algorithm to model head-discharge relationship for submerged labyrinth and linear weirs. *Journal of Hydraulics*, 15(2): 149-164. (In Farsi)
- Haghiabi, A.H., Parsaie, A. and Shamsi Z., 2018. Intelligent Modeling of Discharge Coefficient of Lateral Intakes. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(1): 3-11.
- Hay, N. and G. Taylor. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 96(11): 2337-2357
- Kabiri-Samani, A.R., Ansari, A., and Borghei, S.M. (2010). Hydraulic behavior of flow over an oblique weir. *Journal of Hydraulic Research*. 48(5): 669-673.
- 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.
- Lux, F. and Hinchcliff, D. (1985). Design and construction of labyrinth spillways. *Proceeding of the 15th Congress ICOLD*, Lausanne, Switzerland.
- Majedi Asl, M. and Fuladipناه M. (2018). Application of the Evolutionary Methods in Determining the Discharge Coefficient of Triangular Labyrinth Weirs. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 22(4), 279-290 (In Farsi)
- Mehri, Y., Esmaeili, S., Soltani, J., Saneie, S. 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*, 12(70): 994-1003(in Persian).
- 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.
- Parsaie, A. and Haghiabi, A.H. (2016). Prediction of discharge coefficient of side weir using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Sustainable Water Resources Management*, 2: 257-264.
- Parsaie, A. and Haghiabi, A.H. (2017). Support Vector Machine to predict the discharge coefficient of Sharp crested w-planform weirs. *AUT Journal of Civil Engineering*, 1(2): 195-204.
- Parsaie, A., Haghiabi, A.H. and Shamsi Z. (2019). Intelligent mathematical modeling of discharge coefficient of nonlinear weirs with triangular plan. *AUT Journal of Civil Engineering*, 3(2): 149-156.
- Roushangar K., Alami M. T., Shiri J. and Majedi Asl, M. (2018). Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. *Hydrology Research*, 49(3): 924-938.
- 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.
- Tullis J.P., Amanian N. and Waldron D. (1995). Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic*
- Zerihun, Y.T. and Fenton, J.D. (2007). A Boussinesq-type model for flow over trapezoidal profile weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 519-528.