

مقاله علمی- پژوهشی

مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با فرم تاج ربع‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای با استفاده از

روش‌های فرامدلی (QNET, SVM, GEP, ANN)

مهدی ماجدی اصل^{۱*}، توحید امیدپور علویان^۲، مهدی کوهدرق^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

چکیده

سرریزهای غیرخطی ضمن برخوردار بودن از مزیت‌های اقتصادی، قابلیت عبوردهی جریان بیشتری را نسبت به سرریزهای خطی دارند. این سرریزها از طریق افزایش طول تاج در یک عرض مشخص، در مقایسه با سرریزهای خطی راندمان دبی بیشتر با ارتفاع آزاد کمتر در بالادست را 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)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، نرم‌افزار (QNET) و شبکه هوش مصنوعی (ANN) در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای غیرخطی تعداد ۳۱۸ سری داده برای سناریو اول و سناریو دوم شامل تعداد ۳۶۳ سری داده و سناریو سوم شامل ادغام داده‌ها (مجموع سناریوی اول و دوم) که شامل ۶۸۱ سری داده می‌باشند. تفاوت سناریو اول و دوم در فرم تاج سرریز ربع‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای می‌باشد. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد استفاده در این پژوهش شامل نسبت بار آبی کل $\left(\frac{H_T}{p}\right)$ ، بزرگ‌نمایی $\left(\frac{L_C}{W}\right)$ ، زاویه دیواره سیکل (α) و ضریب دبی (Cd) می‌باشند. نتایج هوش مصنوعی نشان داد که ترکیب پارامترهای $(Cd, \left(\frac{H_T}{p}\right), \alpha, \frac{L_C}{W})$ در الگوریتم‌های QNET, ANN, SVM و GEP در مرحله‌ی آموزش مربوط به سناریو برتر با شاخصه‌های ارزیابی به‌ترتیب برابر است با $(RMSE=0/0080)$ ، $(R^2=0/9960)$ ، $(DC=0/9961)$ ، $(RMSE=0/0057)$ ، $(R^2=0/9980)$ ، $(DC=0/9980)$ ، $(RMSE=0/0057)$ ، $(R^2=0/9983)$ ، $(DC=0/9980)$ ، $(RMSE=0/0207)$ ، $(R^2=0/9837)$ ، $(DC=0/9980)$ می‌باشد. که در مقایسه با دیگر ترکیب‌ها منجر به بهینه‌ترین خروجی شده است که نشان دهنده دقت بسیار مطلوب به‌ترتیب در هر چهار روش عبارت است از QNET, ANN, SVM و GEP در پیش‌بینی ضریب دبی سرریز غیرخطی است. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر موثر در تعیین ضریب دبی سرریز غیرخطی در تمامی روش‌ها پارامتر نسبت بار آبی کل $\left(\frac{H_T}{p}\right)$ می‌باشد. مقایسه نتایج این تحقیق با سایر محققین نشان می‌دهد که شاخصه‌های ارزیابی برای تمامی روش‌های تحقیق حاضر نسبت به سایر محققین نسبتاً بهتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، سرریز غیرخطی، شبکه‌های عصبی، ضریب دبی

مقدمه

(1940). کوزاک و سواب، یازده سرریز کنگره‌ای با پلان دوزنقه‌ای متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که حجم دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای به ازای یک هد مشخص در بالادست، به صورت قابل توجهی از سرریز خطی بیشتر است (Crookston, 2010). تیسن و فرانسن به تحقیق بر روی سرریزهای کنگره‌ای پرداختند (Tison and Fransen, 1963). تیلور نیز عملکرد سرریزهای کنگره‌ای مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی با تاج لبه تیز و تعداد سیکل متفاوت را مطالعه نمود (Taylor, 1968). همچنین هی و تیلور اولین افرادی بودند که جامع‌ترین مطالعه را بر روی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای (با شکل تاج لبه تیز) انجام داده و به نتایج کاربردی در این زمینه دست یافتند. آنان برای

سابقه ساخت سرریزهای کنگره‌ای به قبل از سال (۱۹۲۰) می‌رسد. اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای شکل در پلان می‌باشند. هیدرولیک سرریزهای کنگره‌ای برای اولین بار توسط جنتیلینی مورد بررسی قرار گرفت (Gentilini).

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی - دانشگاه مراغه، hdvvhk

۳- گروه عمران. واحد ملکان. دانشگاه آزاد اسلامی ملکان، ملکان، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: majedi@maragheh.ac.ir)

باشد (Wormleaton and Tsang, 2000). طبق یافته‌های پژوهش‌های تجربی انجام شده توسط زیرهون و فنتون و کبیری و سامانی و همکاران مشخص شد با افزایش استغراق، کارایی دماغه‌های پایین-دست به دلیل استغراق موضعی دماغه‌ها، کاهش می‌یابد (Kabiri and Samani et al., 2010, Zerihun and Fenton, 2007). کروکستون و همکاران استغراق موضعی، شکل تاج سرریز، هندسه‌ی سرریز، تاثیرات لزجت و فشار در زیر تیغه‌ی جریان سرریزهای کنگره-ای از عوامل موثر در عملکرد هیدرولیکی آن‌ها هستند (Crookston et al., 2010). کارولو و همکاران یک رابطه هد-دبی بی‌بعد برای سرریزهای کنگره‌ای مثلی با تغییر در جهت جریان رئوس مثلث‌ها کار کردند (Carollo et al., 2012). کراکستون و همکاران آنالیز و طراحی بهینه سرریزهای کنگره‌ای برای هواده‌ی جریان، تخمین رابطه هد-دبی، پایدارسازی تیغه‌ی آبی روی سرریز را بررسی کردند و با برش قسمت‌هایی از دیواره و دماغه سرریز و همچنین با ایجاد زائده‌هایی بر روی دیواره‌ها و دماغه سرریز به بهبود عوامل مذکور اقدام نمودند (Crookston et al., 2013). نتایج تحقیقات دابلینگ نشان داد با افزایش نسبت $\left(\frac{H_d}{P}\right)$ در سرریزهای اصلاح شده و اصلاح نشده، نسبت استغراق افزایش پیدا می‌کند (Dabling, 2014). نتایج پژوهش تجربی انجام شده توسط سئو و همکاران نشان داد دبی عبوری در سرریز کنگره‌ای حدود 70٪ بیشتر از دبی عبوری از روی سرریز لبه تیز مستقیم تحت شرایط جریان آزاد است. آن‌ها بیان داشتند با افزایش درجه استغراق سرریز، راندمان گذرده‌ی سرریز کاهش می‌یابد که مقدار آن متناسب با نسبت $\left(\frac{H_d}{H^*}\right)$ است (Seo et al., 2016). کریستینسن ضمن بررسی میدان جریان ورودی به سرریزهای کنگره‌ای، تاثیر تعداد سیکل‌ها بر روی عملکرد این نوع سرریزها را مورد تحقیق قرار داد و نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیکل‌ها، ضریب آبدگزی کاهش می‌یابد (Christensen, 2015). آدریپوند و همکاران به بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزایش طول مؤثر بر دبی عبوری سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای شکل مرکب بررسی کردند (Azarpeyvand et al., 2019). منجزی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی تاثیر شعاع قوس بر ضریب دبی در سرریزهای قوسی خطی و قوسی زیگزاگی با پلان مثلی پرداختند (Monjezi et al., 2019). مشکواتی تروجنی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای دنداندار پرداختند (Meshkavati et al., 2021). توره‌بهره و همکاران به مطالعه عددی و آزمایشگاهی ترکیب سرریز کنگره‌ای با روزنه و تاثیر آن بر ضریب دبی جریان پرداختند. مسعودی و همکاران به کارایی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های یکسان و نایکسان در پلان بررسی کردند (Bahrebar et al., 2021). از مهم‌ترین نکات قابل توجه در بحث این سازه‌ها تخمین صحیح میزان دبی عبوری می‌باشد

نشان دادن عملکرد سرریزهای کنگره‌ای از نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به دبی سرریز خطی استفاده کردند. در منحنی‌های طراحی ارائه شده توسط آن‌ها ارتفاع هیدرواستاتیک جریان به عنوان بار موثر بر روی سرریز لحاظ شده بود (Taylor, 1970) (Hay and). دارواس نتایج تحقیقات خود را بر اساس مدل‌های فیزیکی سدهای ورونوا و آن ارائه کرد، این محقق همچنین یک دسته منحنی برای طراحی سرریزهای دوزنقه‌ای شکل با تاج ربع‌دایره‌ای و یک رابطه‌ی تجربی ارائه نمود (Darvas, 1971). ایندکلوfer و روو ناحیه تداخل جریان در رئوس سرریزهای مثلی لبه تیز را مطالعه کردند و یک طول برای نواحی تداخل جریان تعریف کردند (Rouve, Indlekofer and). 1975. کاسیدی و همکاران نشان دادند که برای هدهای بالا ضریب دبی سرریز کنگره‌ای بطور قابل توجهی کمتر از سایر سرریزها می‌باشد (Cassidy et al., 1985). لاکس و هینچلیف و لاکس با استفاده از تحلیل ابعادی و انجام آزمایش‌ها، نمودارها و روش طراحی را برای سرریز کنگره‌ای تک سیکل ارائه کردند، آن‌ها رابطه ضریب دبی را با نسبت هدکل سرریز به ارتفاع سرریز و نسبت طول به عرض سرریز ارائه نمودند (Lux, Lux and Hinchliff, 1985). 1989 تا کال و همکاران نشان دادند که در عرض‌های مشابه سرریزهای کنگره‌ای دو سیکلی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای سه سیکلی بهتر عمل می‌کنند (Tacail et al., 1990). تولیس و همکاران سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با ۴ سیکل و ۵ شکل تاج مختلف را کار کردند و آن‌ها دریافتند که ظرفیت سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تابعی از بار هیدرولیکی کل، طول تاج موثر و ضریب آبدگزی است. ضریب آبدگزی تابعی از ارتفاع سرریز، بار هیدرولیکی کل، ضخامت دیواره سرریز، شکل تاج، شکل راس و زاویه دیواره‌های جانبی سرریز می‌باشد. با بررسی تاثیر این پارامترها بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای نمودارهای جدیدی را ارائه دادند و دریافتند که راندمان گذرده‌ی سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای خطی به ازای بار بالادست یکسان، سه تا چهار برابر افزایش پیدا می‌کند (Tullis et al., 1995). وارمیلتون و صوفیانی بیان کردند ضریب هواده‌ی سرریزهای کنگره‌ای مثلی در مقایسه با سرریزهای خطی بستگی به زاویه راس و طول تاج سرریز دارد. در این مطالعه تاثیر ارتفاع سقوط جریان بر میزان دبی را نیز بحث کردند (Soufiani, 1998) (Wormleaton and). وارمیلتون و تسانگ مطالعات خود را بر روی هواده‌ی سرریزهای کنگره‌ای انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سرریز کنگره‌ای مستطیلی در مقایسه با شکل مثلی و آن نیز در مقایسه با سرریز خطی از کارایی بالاتری برای هواده‌ی جریان برخوردار است. این محققین همچنین اعلام کردند که با بالارفتن دبی، برتری شکل مستطیلی نسبت به شکل مثلی فزونی می‌یابد که این امر به دلیل افزایش تداخل لایه‌های ریزشی جریان در سرریز مثلی می‌باشد

پژوهش آن‌ها انعطاف مناسب مدل SVM نسبت به رگرسیون غیرخطی و دقت زیاد مدل SVM را تایید کرد (Mehri et al., 2018). ماجدی و همکاران کاربرد سیستم‌های تکاملی در تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مثلی را بررسی کردند و بیان داشتند روش ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای لبه تیز عملکرد بسیار مناسبی دارد و می‌توان از این روش در موارد مشابه استفاده کرد (Majedi et al., 2018). ماجدی و ولیزاده کاربرد الگوریتم SVM در پیش‌بینی عمق آبشستگی تک پایه قائم را بررسی نمودند. برای پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف پایه پل ۱۴۶ سری داده آزمایشگاهی مختلف (در سه نوع شرایط آزمایشگاهی متفاوت) با استفاده از ماشین بردار پشتیبان مورد تحلیل قرار گرفت (Majedi and Valizadeh, 2018). روش‌نگر و همکاران به تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای با روش رگرسیون بردار پشتیبان پرداختند و با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده، مدل SVM را به عنوان مدل مناسب برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای توصیه نمودند (Roushangar et al., 2018). در پژوهش انجام شده توسط پارسایی و همکاران استفاده از مدل‌های ریاضی هوشمند GEP، GMDH و MARS ضریب دبی سرریزهای غیرخطی را مدل‌سازی نمودند (Parsaie et al., 2019). فولادی‌پناه و همکاران در مورد کاربرد الگوریتم‌های هوشمند برای مدل‌سازی رابطه دبی-اشل در شرایط استغراق سرریزهای کنگره‌ای و خطی بررسی کردند و نتایج نشان داد SVM در هر دو سرریز نسبت به GEP عملکرد بهتری در پیش‌بینی دارد (Fouladipناه et al., 2020). کومار و همکاران ضریب دبی سرریزهای کلید پیاپایی را به صورت آزمایشگاهی و الگوریتم آموزش ماشین شبیه‌سازی کردند، نتیجه‌ی پژوهش آن‌ها حاکی از دقت بسیار مناسب الگوریتم‌های آموزش ماشین بود. سرریزهای کنگره‌ای در زمره سرریزهایی هستند که از جنبه‌های مختلف هیدرولیکی و هندسی مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته‌اند (Kumar et al., 2020). ماجدی و همکاران آبشستگی پایه‌های پل براساس مشخصات هندسی پایه پل با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان بررسی نمودند. این پژوهشگران بدین منظور از ۲ سری داده صحرائی مربوط به پایه پل‌های کشور آمریکا و داده‌های فروهلیچ استفاده نمودند و نتایج مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) با نتایج برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و مدل رگرسیون غیرخطی مقایسه نمودند (Majedi et al., 2020). ماجدی و همکاران با استفاده از روش‌های داده کاوی برای بهبود پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کلید پیاپایی و کنگره‌ای مطالعاتی انجام دادند. در این کار تحقیقاتی، الگوریتم‌های SVM و GEP برای پیش‌بینی ضریب دبی (Cd) سرریز کلید پیاپایی (PKW)، سرریز کنگره‌ای مستطیلی (RLW) و

که تاکنون محققین بی‌شماری براساس محدوده مشخصی از متغیرهای انتخابی به بررسی این موضوع پرداخته و روابط گوناگونی را در شرایط مختلف ارائه نموده‌اند. مدل‌های هوش مصنوعی که در مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی پیچیده در سیستم‌های هیدرولوژی و منابع آب استفاده می‌شوند، به تازگی گسترش در دامنه کاربرد آن‌ها دیده می‌شود. اخیراً تعدادی از این مدل‌های هوش مصنوعی شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی و ... برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نوسانات سطح آب و ضرایب دبی به کار برده شده‌اند. استفاده از روش‌های محاسبات نرم مانند ماشین بردار پشتیبان می‌تواند به عنوان روشی جایگزین برای معادله‌ها و مدل‌های تجربی به حساب آید و در دهه‌های اخیر تحولی عظیم در مسائل مهندسی به‌وجود آورده‌اند. این روش‌ها قابلیت خوبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده و بهینه‌سازی مسائل مهندسی از خود نشان داده‌اند. دلیل بیشتر استفاده از مدل‌های هوشمند برآورد هزینه و وقت‌گیر بودن روش‌های عادی نسبت به مدل‌های هوشمند می‌باشد. سیواپارگاسام و همکاران از مدل SVM برای پیش‌بینی بارش رواناب حوضه‌ای در کشور هلند استفاده کردند و تحقیقات آن‌ها نشان داد که مدل SVM از عملکرد بهتری نسبت به روش ANN برخوردار می‌باشد (Sivapragasam et al., 2001). دورادو و همکاران بارش و رواناب در یک حوضه را با مدل شبکه عصبی و برنامه ریزی ژنتیک شبیه‌سازی نمودند (Dorado et al., 2003). سیمن از مدل SVM جهت پیش‌بینی ماهانه حجم رسوب معلق رودخانه دوریج واقع در استان ایلام استفاده کردند (Cimen, 2008). عظمت الله و همکاران و گوپال و همکاران با استفاده از روش (SVM, GEP, ANN) و شبکه عصبی مصنوعی (آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی و عمق آبشستگی پایه پل را در یک مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده و نشان دادن که روش‌های فوق پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به روش‌های تجربی ارائه می‌دهد (Goyal et al., 2011, Azamathulla et al., 2003). عباسپور و ارونتقی برای تخمین دبی جریان بر روی سرریزهای مرکب مثلی-مستطیلی از مدل GEP استفاده نمودند و تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر روی دبی جریان را بررسی و مقایسه کردند. نتایج نشان داد در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک تطابق خوبی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل وجود دارد (Abbaspour and Aroonghi, 2011). کیشی و همکاران از مدل کرم شب تاب ماشین بردار پشتیبان (FA_SVM) برای پیش‌بینی سطح آب یک روزه دریاچه ارومیه استفاده کردند (Kisi et al., 2015). ماجدی و فولادی‌پناه استفاده از الگوریتم SVM را برای استفاده در شبیه‌سازی‌هایی که متغیر وابسته آزمایشگاهی تابع چندین متغیر مستقل است توصیه کرده‌اند (Majedi and Fouladipناه, 2017). مه‌ری و همکاران از مدل SVM برای برآورد ضریب دبی جریان سرریزهای کلید پیاپایی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده کردند. نتیجه‌ی

کانال آزمایشگاهی مستطیلی با مشخصات (1.2 متر عرض، 14.6 متر طول و 1 متر عمق) از یک چارچوب فولادی و شیشه‌های اکریلیک برای دیوارها و کف تشکیل شده است. شیب کانال توسط جک مکانیکی بزرگ تنظیم می‌شود. برای این مطالعه شیب طولی کف کانال، S_{bed} که بطور افقی تنظیم شد. مدل‌های سرریز کنگره‌ای قوسی بر روی یک پلت فرم افقی (طول 2.44 متر در 30.5 سانتی‌متر ارتفاع) ساخته شده از پلی‌اتیلن پلاستیکی با چگالی بالا (HDPE) نصب شدند که دارای پایه‌های فولادی قابل تنظیم در هر 1 سانتی‌متر بود. پس از نصب، سکو تا سطح افقی (± 0.4 میلی‌متر) تنظیم شد. یک رمپ به طول 2.44 متر، با شیب 7 درجه در بالادست سکو نصب شده بود، امکان انتقال صاف بین کف کانال و سکورا فراهم می‌کرد. دو خط تامین، آب را به یک هدباکس فولادی می‌رساند که دارای ساختاری بافل است تا جریان‌های آرام و شرایط رویکرد یکنواخت را به کانال برقرار کند. معادله یک بعدی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای تابعی از بار آبی کل (H_T) برحسب متر، طول تاج سرریز (L) برحسب متر و ضریب جریان سرریز (C_d) بدون بعد بوده و از رابطه (۱) به دست می‌آید هندرسون (1966). پارامترهای موثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای را می‌توان به صورت رابطه تابعی (۲) نوشت.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_T^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$C_d = f(B, L, H_T, H_d, P, R, CR, Na, N) \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، (B) عرض کانالی که سرریز در آن نصب می‌گردد، (L) طول تاج سرریز، (H_T) هد کل جریان در بالادست سرریز که برابر است با $\left(\frac{h+v^2}{2g}\right)$ ، (H_d) هد کل جریان در پایین‌دست سرریز، (P) ارتفاع سرریز، (R) شعاع انحنا سیکل‌های نیم‌دایره‌ای، (CR) پارامتر معرف شکل تاج سرریز که می‌تواند بصورت لبه‌تیز، صاف، ربع دایره‌ای با شعاع‌های کوچک تا بزرگ، نیم‌دایره‌ای و اوجی باشد، (Na) نماینده شکل ریزش تیغه جریان در سرریزهای کنگره‌ای است که می‌تواند بصورت ریزش آزاد، ریزش تداخلی، هواده‌ی شده، هواده‌ی ناقص یا مستغرق باشد و (N) تعداد سیکل‌ها می‌باشد. شکل ۱ نمونه‌ای از سرریز کنگره‌ای با شکل تاج ربع‌دایره‌ای و تاج نیم‌دایره‌ای به ترتیب زیر نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۱- سرریزهای کنگره‌ای (الف): سرریز کنگره‌ای با شکل تاج ربع‌دایره‌ای، ب: سرریز کنگره‌ای با شکل تاج ربع‌دایره‌ای (کراکستون، 2010)

سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای (TLW) با مجموعه داده‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده ارزیابی شد (Majedi et al., 2021). سهرابی و همکاران به بررسی اثر زاویه در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی با استفاده از ابزار یادگیری ماشین بردار (SVM) پرداختند (Sohrabi et al., 2022a). سهرابی و همکاران به بررسی اثر زاویه در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی با استفاده از ابزار یادگیری برنامه‌ریزی بیان ژن GEP پرداختند (Sohrabi et al., 2022b). امیدپورعلویان و همکاران به مدل‌سازی و ارزیابی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی با روش فرامدلی Qnet پرداختند (Omidpour Alavian et al., 2022a). امیدپورعلویان و همکاران به مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با فرم تاج ربع‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای با استفاده از روش‌های فرامدلی (QNET) پرداختند (Omidpour Alavian et al., 2022b). امیدپورعلویان و همکاران به مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با فرم تاج ربع‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای با استفاده از روش فرامدلی (ANN) پرداختند (Omidpour Alavian et al., 2022c). در این تحقیق نتایج آزمایشگاهی با چهار روش هوش مصنوعی برای تعیین ضریب دبی سرریزهای غیرخطی با فرم تاج ربع‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای مقایسه و بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

هدف از این پژوهش، مقایسه‌ی نتایج داده‌های آزمایشگاهی و استفاده از هوش مصنوعی (با استفاده از الگوریتم‌های ANN، SVM، GEP و QNET) در تعیین ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای و همچنین ارزیابی دقت الگوریتم‌های هوش مصنوعی با استفاده از پارامترهای آماری و مقایسه آن با نتایج سری داده‌های آزمایشگاهی است. در این مقاله از داده‌های تحقیق کراکستون (2010) در آزمایشگاه تحقیقات آب یوتا استفاده شده و برای راه‌اندازی آزمایش‌ها از دو امکانات برای مدل‌سازی فیزیکی استفاده شده است. یک کانال مستطیلی برای کاربردهای کانالیزه و یک هدباکس بزرگ برای کاربردهای مخزن است.

تاسیسات کانال مستطیلی

متفاوت (α) و $\frac{L_C}{W}$ و $\frac{H_T}{P}$ تفاوت در تاج سرریز کنگره‌ای می‌باشد. برای بررسی تغییرات ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای با استفاده از نرم-افزار (GEP, ANN, SVM, QNET) انجام شده است. سناریو اول، دوم و سوم، هر کدام شامل ۷ ترکیب می‌باشد که در جدول (۱) آورده شده است.

در این تحقیق در مجموع سه سناریو بررسی شده است. هر سه سناریو شامل پارامترهای $(Cd, \frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W})$ و تعداد ۳۱۸ سری داده برای سناریو اول و سناریو دوم شامل تعداد ۳۶۳ سری داده و سناریو سوم شامل ادغام داده‌ها (مجموع سناریوی اول و دوم) که شامل ۶۸۱ سری داده می‌باشند. تفاوت بین سناریو (اول، دوم و سوم) مقادیر

جدول ۱- ترکیبات مختلف ورودی سناریو اول، دوم و سوم مربوط به مدل‌های (GEP, ANN, SVM و QNET)

ترکیب	پارامترهای موثر
ترکیب ۱	$Cd, \frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W}$
ترکیب ۲	$Cd, \frac{H_T}{P}, \alpha$
ترکیب ۳	$Cd, \frac{H_T}{P}, \frac{L_C}{W}$
ترکیب ۴	$Cd, \alpha, \frac{L_C}{W}$
ترکیب ۵	$Cd, \frac{H_T}{P}$
ترکیب ۶	Cd, α
ترکیب ۷	$Cd, \frac{L_C}{W}$

ژنتیک شاخه‌ای از الگوریتم‌های ژنتیک 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. در برنامه ژنتیک یک جمعیت شامل عضوهای تصادفی بوده که کروموزوم نامیده می‌شود و توابع برازش هر یک از کروموزوم‌ها نسبت به مقادیر هدف، ارزیابی می‌گردد. اولین مرحله در برنامه‌ریزی بیان ژن، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌ها می‌باشد. در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برنامه کامپیوتری متشکل از متغیرهای مختلف و عملگرهای ریاضی (+, -, *, /) و توابع ریاضی و مثلثاتی ($e^x, \sin, \cos, \tan, \log, \text{sqrt}$, power, ln) تعیین 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.

نرم افزار (QNET)

یکی دیگر از نرم افزارهای مورد استفاده در این تحقیق نرم افزار تخصصی QNET می‌باشد. در حال حاضر توجه زیادی به سیستم‌های مدل‌سازی شبکه عصبی و کارایی آن‌ها برای حل مسائل مدل‌سازی داده‌های در دسترس وجود دارد و نرم افزار QNET به صورتی طراحی

ماشین بردار پشتیبان (SVM)

الگوریتم SVM اولیه در سال ۱۹۶۳ توسط (Vladimir Vapnik) ابداع شده و در سال ۱۹۹۵ توسط وی و همکارش Corenna برای حالت غیرخطی تعمیم داده شده است. الگوریتم SVM جزء الگوریتم‌های تشخیص الگو، دسته‌بندی می‌شود. از الگوریتم SVM در هر جایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیا در کلاس‌های خاص باشد می‌توان استفاده نمود. نحوه کارکرد الگوریتم SVM به مانند اغلب روش‌های هوشمند به صورت آموزش (Train) و آزمون (Test) می‌باشد. ابتدا سیستم توسط قسمتی از داده‌ها آموزش داده شده، در نهایت حل مسئله با داده‌های آزمون مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. ماشین بردار پشتیبان از دقت تعمیم دهی بالایی برخوردار است که با فرض جدپذیری خطی کلاس‌ها از هم ابر صفحه‌ای با حداکثر حاشیه جهت ایجاد حداقل خطا را بدست می‌دهد صفحه تفکیک کننده‌ای که بیش‌ترین فاصله را از صفحات دسته‌بندی داشته باشد بهترین صفحه تفکیک کننده است، نزدیک‌ترین داده‌های آموزشی به صفحه تفکیک کننده بردار پشتیبان نامیده می‌شود. هدف ماشین بردار پشتیبان یافتن خطی است که از داده‌های موجود در دو کلاس بیش‌ترین فاصله را دارا باشد یا به بیان دیگر کم‌ترین ریسک عملیاتی را داشته باشد.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا (۱۹۹۹) ابداع شد. برنامه‌ریزی

استفاده شده است:

۱- جذر مربع میانگین خطاها (RMSE) و ضریب تعیین (DC) یا همبستگی خطی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده و مربع ضریب همبستگی (R^2) به ترتیب از روابط ۳، ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Cdo - Cdp)^2}{N}} \quad (3)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Cdp_i - \overline{Cdp})^2}{\sum_{i=1}^N (Cdp_i - \overline{Cdp})^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Cdp_i - \overline{Cdp})(Cdo_i - \overline{Cdo})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Cdp_i - \overline{Cdp})^2 \sum_{i=1}^N (Cdo_i - \overline{Cdo})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

در روابط بالا پارامترهای Cdo، Cdp و N به ترتیب ضریب دبی پیش‌بینی شده و مشاهداتی سرریزها و تعداد داده‌ها است. معیارهای آماری فوق برای مراحل آموزش و آزمون محاسبه می‌شوند.

نتایج و بحث

همان طور که قبلاً بیان شد هدف از این تحقیق مقایسه ضریب دبی نتایج داده‌های آزمایشگاهی با ضریب دبی پیش‌بینی شده از الگوریتم‌های (ANN)، (GEP)، (SVM)، (QNET) می‌باشد. جریان عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای دارای ساختار سه بعدی و پیچیده می‌باشد از این رو، امکان حل صریح آن وجود ندارد. لذا برای محاسبه ضریب دبی از معادله عمومی سرریزها طبق معادله (۱) استفاده می‌شود.

نتایج روش QNET

جدول ۲ پارامترهای آماری (R^2 ، RMSE و DC) با استفاده از نرم‌افزار QNET برای هر سه سناریو می‌باشد. با توجه به پارامترهای آماری بدست آمده از ترکیب (۱) در هر سه سناریو نسبت به بقیه ترکیبات جواب مطلوب‌تری بدست آمده است. با توجه به سناریو اول و دوم مقادیر پارامترهای آماری بدست آمده نسبت به سناریو سوم بهتر می‌باشد. مقادیر RMSE، R^2 ، DC مربوط به سناریو اول برای بهترین ترکیب در هر دو مرحله‌ی آموزش و آزمون به ترتیب برابر است با ۰/۰۰۸۰، ۰/۹۹۶۰، ۰/۹۹۶۱ و ۰/۰۴۸۷، ۰/۸۵۶۹ و ۰/۸۵۶۹ و نتایج سناریو دوم مربوط به بهترین ترکیب (ترکیب اول) برای هر دو مراحل آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۰۲۰۸، ۰/۹۷۹۱، ۰/۹۷۹۲ و ۰/۰۵۶۷، ۰/۸۲۷۶، ۰/۸۱۰۷ و در سناریو سوم به ترتیب برابر با ۰/۰۱۶۸، ۰/۹۸۷۰، ۰/۹۸۶۹ و ۰/۰۶۸۰، ۰/۹۲۸۵، ۰/۸۳۶۶ می‌باشد. با دقت در جدول مربوطه نتایج بدست آمده از هر سناریو نشان می‌دهد که سناریو اول (سرریز کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره‌ای) تا حدودی بهتر از سناریو دوم و سوم می‌باشد.

شده است که توانایی انجام کارهای تخصصی و مبتدی با یک نرم افزار قدرتمند برای تولید و تکمیل شبکه‌های عصبی از نوع پس انتشار خطا برای حل مسائل روزمره را دارا می‌باشد. نرم افزار فوق یک سیستم مدل‌سازی عصبی پس انتشار خطا می‌باشد، که برای بالا بردن قدرت کامپیوترهای شخصی طراحی شده است. مسائل قابل حل با این نرم‌افزار نامحدود هستند. این نرم‌افزار یک ساختار طراحی شبکه پیشرفته، برای تولید شبکه‌های پیچیده ارائه می‌دهد، که برای یادگیری از الگوریتم آموزش بهینه پس انتشار خطا استفاده می‌کند. از مزیت‌های این شبکه عصبی می‌توان به سرعت بالا، روش‌های آموزش متعدد، قسمت کمک نرم افزار برای تمامی مدل‌ها، طراحی شبکه سریع و آسان، وجه مشترک آسان داده‌ها، مجموعه تست‌های خودکار برای آنالیز مدل و آموزش اضافی، آنالیز متقابل کامل فرآیند یادگیری با استفاده از گراف‌های شبکه و ساختار قدرتمند خود درشت نمایی آن، ابزار پیشرفته آنالیز شبکه، توانایی ذخیره خودکار مدل شبکه در طول آموزش، سمت کنترل سرعت یادگیری برای خودکار کردن آموزش شبکه، الگوریتم‌های آموزش متعدد، روش صحت سنجی با ساختار کامل، توانایی یکپارچگی مدل‌های شبکه عصبی به فضای کار روزمره و مسائل مثال زده شده اشاره نمود. تمام این خصوصیات QNET را به عنوان قدرتمندترین و راحت‌ترین نرم افزار شبکه عصبی برای استفاده تبدیل کرده است.

شبکه هوش مصنوعی (ANN)

با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کند که به این عمل را یادگیری می‌گویند. اصول توانایی یادگیری، مهم‌ترین ویژگی یک سامانه هوشمند است. سامانه‌ای که بتواند یاد بگیرد منعطف‌تر است و ساده‌تر برنامه‌ریزی می‌شود. بنابراین، بهتر می‌تواند در مورد مسائل و معادلات جدید پاسخگو باشد. در این شبکه‌ها به کمک دانش برنامه‌نویسی، ساختار داده‌ای طراحی می‌شود که می‌تواند همانند نورون عمل کند که به این ساختار داده گره گفته می‌شود. با ایجاد شبکه‌ای بین این گره‌ها و اعمال یک الگوریتم آموزشی به آن، شبکه را آموزش می‌دهند. در این حافظه یا شبکه عصبی گره‌ها دارای دو حالت فعال (روشن یا یک) و غیر فعال (خاموش یا صفر) هستند و هر یال (سیناپس یا ارتباط بین گره‌ها) دارای یک وزن می‌باشد. یال‌های با وزن مثبت، موجب تحریک یا فعال کردن گره غیر فعال بعدی می‌شوند و یال‌های با وزن منفی، گره متصل بعدی را غیر فعال یا مهار (در صورتی که فعال بوده باشد) می‌کنند.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد

در این تحقیق جهت ارزیابی کارایی مدل‌ها از معیارهای زیر

جدول ۲- معیارهای ارزیابی ترکیبات مختلف ورودی برای تعیین ضریب دبی در سناریو (اول، دوم و سوم) برای مدل (QNET)

سناریو اول						
Train			Test			نام ترکیب
DC	R ²	RMSE	DC	R ²	RMSE	
۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۰	-/۰۰۸۰	۰/۸۵۶۹	۰/۹۴۵۷	-/۰۴۸۷	ترکیب ۱
۰/۹۸۲۰	۰/۹۸۲۳	-/۰۱۷۲	۰/۸۲۸۲	۰/۹۱۰۹	-/۰۵۳۴	ترکیب ۲
۰/۹۷۶۱	۰/۹۸۶۰	-/۰۰۹۰	۰/۶۶۸۹	۰/۸۲۶۶	-/۰۷۳۹	ترکیب ۳
۰/۲۹۹۱	۰/۲۹۹۱	-/۱۰۸۳	۰/۴۱۴۵	۰/۷۴۱۰	-/۱۵۵۰	ترکیب ۴
۰/۷۵۴۲	۰/۷۵۴۰	-/۰۶۴۲	۳	۰/۱۵۷۳	-/۲۵۷۹	ترکیب ۵
۰/۲۹۹۶	۰/۲۹۹۸	-/۱۰۸۳	۰/۹۹۸۰	۰/۶۹۶۹	-/۱۸۲۲	ترکیب ۶
۰/۳۱۳۳	۰/۳۱۳۶	-/۱۰۷۲	۱/۳۸۹	۰/۶۸۲۲	-/۱۹۸۸	ترکیب ۷
سناریو دوم						
۰/۹۷۹۲	۰/۹۷۹۲	-/۰۲۰۸	۰/۸۱۰۷	۰/۸۲۷۶	-/۰۵۶۷	ترکیب ۱
۰/۸۴۷۹	۰/۸۴۸۱	-/۰۳۲۹	۰/۷۹۷۳	۰/۷۴۱۴	-/۱۷۹۷	ترکیب ۲
۰/۸۷۸۹	۰/۸۷۸۹	-/۰۲۰۹	۰/۵۵۲۳	۰/۶۳۱۷	-/۰۸۷۳	ترکیب ۳
۰/۲۸۴۷	۰/۲۸۴۸	-/۱۲۲۲	۲/۱۸۹	۰/۶۰۷۶	-/۲۳۲۹	ترکیب ۴
۰/۶۹۲۰	۰/۶۹۳۰	-/۰۸۰۰	۲/۹۴۳	۰/۳۶۴۶	-/۲۵۸۹	ترکیب ۵
۰/۴۸۱۱	۰/۲۸۰۲	-/۱۲۲۷	۱/۹۹۸۹	۰/۶۳۶۸	-/۲۲۵۹	ترکیب ۶
۰/۲۷۳۰	۰/۲۷۳۳	-/۱۲۳۲	۰/۰۱۴۸	۰/۶۶۶۸	-/۱۳۱۵	ترکیب ۷
سناریو سوم						
۰/۹۸۶۹	۰/۹۸۷۰	-/۰۱۶۸	۰/۸۳۶۶	۰/۹۲۸۵	-/۰۶۸۰	ترکیب ۱
۰/۹۷۳۸	۰/۹۶۴۰	-/۰۱۸۷	۰/۸۱۹۸	۰/۹۱۷۸	-/۰۶۵۰	ترکیب ۲
۰/۹۴۹۲	۰/۹۵۹۳	-/۰۲۱۲	۰/۸۲۹۱	۰/۹۱۸۲	-/۰۵۹۵	ترکیب ۳
۰/۵۷۰۲	۰/۵۷۰۳	-/۰۹۶۳	۰/۴۶۹۳	۰/۵۲۱۸	-/۱۱۱۶	ترکیب ۴
۰/۲۸۱۳	۰/۲۸۱۴	-/۱۲۴۶	۰/۱۵۹۷	۰/۴۶۶۳	-/۱۶۵۰	ترکیب ۵
۰/۵۷۱۳	۰/۵۷۱۲	-/۰۹۶۲	۰/۴۶۷۸	۰/۵۲۰۳	-/۱۱۱۸	ترکیب ۶
۰/۵۶۶۸	۰/۵۶۶۷	-/۰۹۶۷	۰/۴۶۶۷	۰/۵۲۰۹	-/۱۱۱۹	ترکیب ۷

تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای در مدل QNET پارامتر نسبت بار آبی کل ($\frac{H_T}{p}$) می‌باشد.

نتایج روش SVM

جدول ۴ پارامترهای آماری (R^2 , RMSE و DC) با استفاده از نرم‌افزار SVM برای هر سه سناریو می‌باشد. با توجه به پارامترهای آماری بدست آمده از ترکیب (۱) در هر سه سناریو نسبت به بقیه ترکیبات جواب مطلوب‌تری بدست آمده است. با توجه به سناریو اول و دوم مقادیر پارامترهای آماری بدست آمده نسبت به سناریو سوم بهتر می‌باشد. مقادیر R^2 , RMSE, DC مربوط به سناریو اول برای برترین ترکیب در هر دو مرحله‌ی آزمون و آموزش به ترتیب برابر است با ۰/۹۸۹۲، ۰/۰۱۸۷ و ۰/۹۸۰۱ و ۰/۹۹۰۲، ۰/۰۱۸۶ و ۰/۹۸۳۰ و نتایج سناریو دوم مربوط به برترین ترکیب (ترکیب اول) برای هر دو مراحل آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۷۹۶، ۰/۰۲۲۴ و ۰/۹۷۹۲ و ۰/۹۸۹۶، ۰/۰۱۸۵ و ۰/۹۸۷۷ و در سناریو سوم به ترتیب برابر با

شکل ۲ نمودارهای مربوط به پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای هر سه سناریو برای برترین ترکیب (ترکیب اول) در مرحله‌ی آزمون نشان داده شده است. مقادیر (R^2) نشان از رابطه‌ی خطی با دقت بسیار مطلوب بین دو مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده می‌باشد. مقادیر R^2 سناریو اول، دوم و سوم برای نمودار پراکنش مرحله‌ی آزمون به ترتیب برابر ۰/۹۴۵۷، ۰/۸۲۷۶ و ۰/۹۲۸۵ می‌باشد. در مرحله‌ی آزمون سناریو اول نقاط بیشینه و کمینه تقریباً یکسان می‌باشد و در سناریو دوم در نقاط کمینه و بیشینه نقاط پیش‌بینی شده نسبت به نقاط آزمایشگاهی بیشتر و در سناریو سوم کمتر برآورد کرده است.

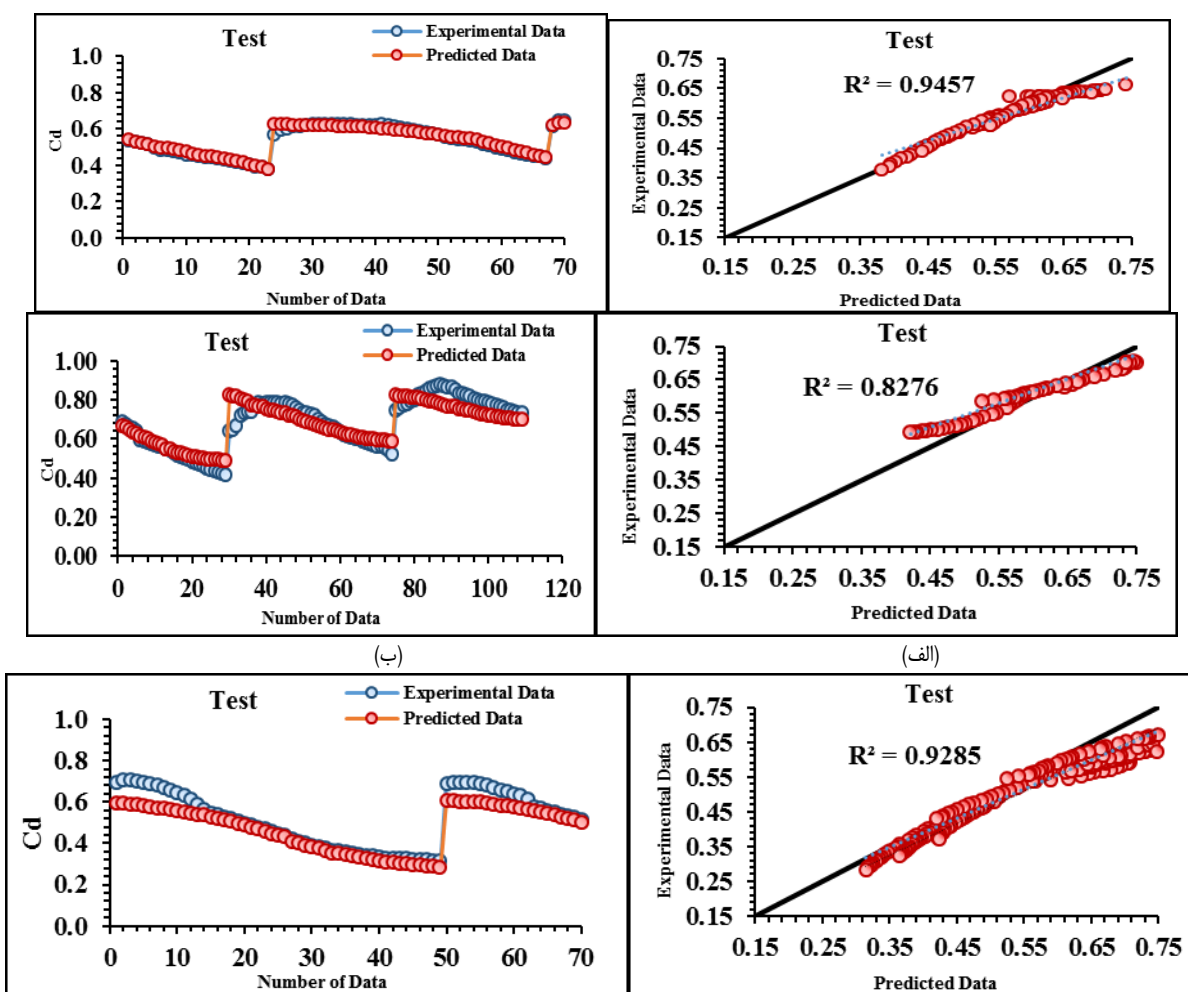
جدول (۳) آنالیز حساسیت مربوط به هر سه سناریو آورده شده است. با دقت به جدول مربوطه با حذف پارامترهای α , $\frac{L_C}{W}$ برای پارامترهای RMSE و R^2 محاسبه شده است. بطوریکه با حذف مقادیر فوق در مقایسه با حذف پارامترهای دیگر نتایج بدتری ارائه می‌دهند. لذا مشخص می‌شود مهم‌ترین و موثرترین پارامتر در

تقریباً یکسان می‌باشد.

جدول (5) آنالیز حساسیت مربوط به هر سه سناریو آورده شده است. با دقت به جدول مربوطه با حذف $\left(\frac{H_T}{P}\right)$ مقادیر پارامترهای آماری نتایج بدتری ارائه می‌دهند. لذا مشخص می‌شود مهم‌ترین موثرترین پارامتر در تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با فرم تاج ربع‌دایره‌ای و تاج نیم‌دایره‌ای در مدل SVM پارامتر نسبت بار آبی کل $\left(\frac{H_T}{P}\right)$ می‌باشد.

۰/۹۵۴۲، ۰/۳۴۰۷، ۰/۹۵۳۹ و ۰/۹۵۲۶، ۰/۳۴۲، ۰/۹۵۰۶ می‌باشد. با دقت در جدول مربوطه نتایج بدست آمده از هر سناریو نشان می‌دهد که سناریو اول (سرریز کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره‌ای) تا حدودی بهتر از سناریوی دوم و سوم می‌باشد.

شکل ۳ نمودارهای مربوط به پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای هر سه سناریو برای برترین ترکیب (ترکیب اول) در مرحله‌ی آزمون نشان داده شده است. مقادیر (R^2) نشان از رابطه‌ی خطی با دقت بسیار مطلوب بین دو مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده می‌باشد. مقادیر R^2 سناریو اول، دوم و سوم برای نمودار پراکنش مرحله‌ی آزمون به ترتیب برابر ۰/۹۸۹۲، ۰/۹۷۹۶ و ۰/۹۵۴۲ می‌باشد. در هر سه مرحله‌ی آزمون نقاط بیشینه و کمینه



(ج)

شکل ۲- نمودار پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مرحله‌ی آزمون مربوط به هر سه سناریو (سناریو اول (الف)، سناریو دوم (ب) و سناریو سوم (ج))

جدول ۳- آنالیز حساسیت مربوط به سناریو (اول، دوم و سوم) به روش (QNET)

سناریو اول						حذف پارامتر	ترکیب
Test			Train				
DC	R ²	RMSE	DC	R ²	RMSE		
۰/۸۵۶۹	۰/۹۴۵۸	۰/۰۴۸۷	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۰	۰/۰۰۸۰	-	$\frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W}$
۰/۸۲۸۲	۰/۹۱۰۹	۰/۰۵۳۴	۰/۹۸۲۰	۰/۹۸۲۳	۰/۰۱۷۲	$\frac{L_C}{W}$	$\frac{H_T}{P}, \alpha$
۰/۶۶۸۹	۰/۸۲۶۶	۰/۰۷۳۹	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۰	۰/۰۰۸۰	α	$\frac{H_T}{P}, \frac{L_C}{W}$
۰/۴۱۴۵	۰/۷۴۱۰	۰/۱۵۵۰	۰/۲۹۹۱	۰/۲۹۹۱	۰/۱۰۸۳	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_C}{W}, \alpha$
سناریو دوم						حذف پارامتر	ترکیب
Test			Train				
۰/۸۱۰۷	۰/۸۲۷۶	۰/۰۵۶۷	۰/۹۷۹۲	۰/۹۷۹۱	۰/۰۲۰۸	-	$\frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W}$
۰/۸۹۷۳	۰/۹۴۱۴	۰/۱۷۹۷	۰/۹۴۷۹	۰/۹۴۸۱	۰/۰۳۳۹	$\frac{L_C}{W}$	$\frac{H_T}{P}, \alpha$
۰/۵۵۲۳	۰/۶۳۱۷	۰/۰۸۷۳	۰/۹۷۸۹	۰/۹۷۸۹	۰/۰۲۰۹	α	$\frac{H_T}{P}, \frac{L_C}{W}$
۲/۱۸۹	۰/۶۰۷۶	۰/۲۳۲۹	۰/۲۸۴۷	۰/۲۸۴۸	۰/۱۲۲۲	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_C}{W}, \alpha$
سناریو سوم						حذف پارامتر	ترکیب
Test			Train				
۰/۸۳۶۶	۰/۹۲۸۵	۰/۰۶۸۰	۰/۹۸۶۹	۰/۹۸۷۰	۰/۰۱۶۸	-	$\frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W}$
۰/۸۱۹۸	۰/۹۱۷۸	۰/۰۶۵۰	۰/۹۸۳۸	۰/۹۸۴۰	۰/۰۱۸۷	$\frac{L_C}{W}$	$\frac{H_T}{P}, \alpha$
۰/۸۴۹۱	۰/۹۳۸۲	۰/۰۵۹۵	۰/۹۷۹۲	۰/۹۷۹۳	۰/۰۲۱۲	α	$\frac{H_T}{P}, \frac{L_C}{W}$
۰/۴۶۹۳	۰/۵۲۱۸	۰/۱۱۱۶	۰/۵۷۰۲	۰/۵۷۰۳	۰/۰۹۶۳	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_C}{W}, \alpha$

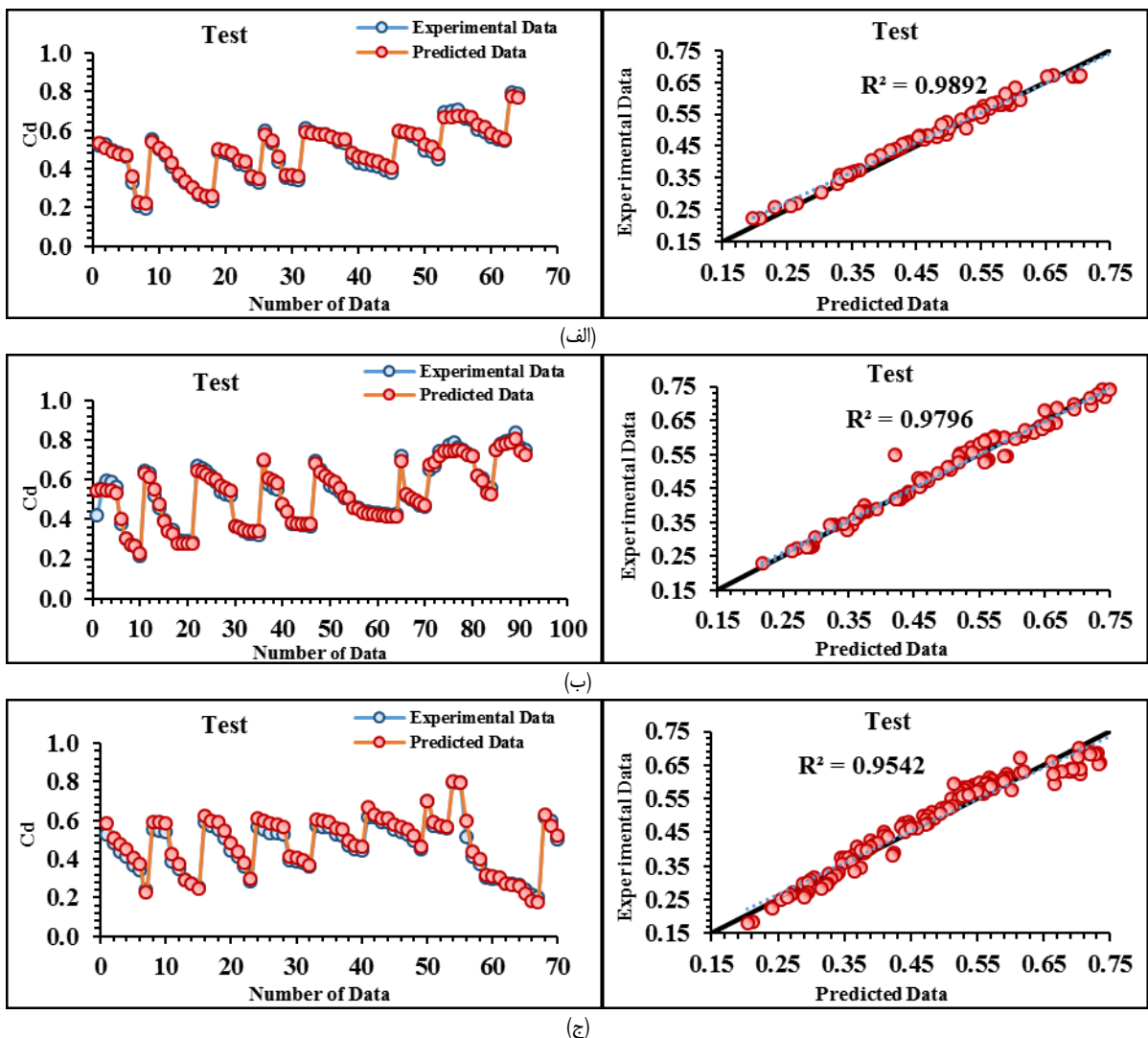
نتایج روش GEP

جدول ۶ پارامترهای آماری (R², RMSE و DC) با استفاده از نرم‌افزار GEP برای هر سه سناریو می‌باشد. با توجه به پارامترهای آماری بدست آمده از ترکیب (۱) در هر سه سناریو نسبت به بقیه ترکیبات جواب مطلوب‌تری بدست آمده است. مقادیر R², RMSE، DC مربوط به سناریو اول برای برترین ترکیب در هر دو مرحله‌ی

آزمون و آموزش به ترتیب برابر است با ۰/۹۸۳۷، ۰/۰۲۰۷، ۰/۹۸۳۸ و ۰/۹۷۱۳، ۰/۰۲۲۱، ۰/۹۵۰۰ و نتایج سناریو دوم به ترتیب برابر با ۰/۹۸۳۸، ۰/۰۲۴۲، ۰/۹۸۴۰ و ۰/۹۷۱۳، ۰/۰۲۰۹، ۰/۹۶۴۴ و در سناریو سوم به ترتیب برابر با ۰/۹۶۵۳، ۰/۰۶۴۷، ۰/۹۶۴۵ و ۰/۹۱۸۶، ۰/۰۲۷۰، ۰/۸۱۲۷ می‌باشد.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی ترکیبات مختلف ورودی برای تعیین ضریب دبی در سناریو (اول، دوم و سوم) برای مدل (SVM)

سناریو اول						نام ترکیب
Train			Test			
DC	R ²	RMSE	DC	R ²	RMSE	
۰/۹۸۳۰	۰/۹۹۰۲	۰/۰۱۸۶	۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۹۲	۰/۰۱۸۷	ترکیب برتر
سناریو دوم						نام ترکیب
۰/۹۸۷۷	۰/۹۸۹۶	۰/۰۱۸۵	۰/۹۷۹۲	۰/۹۷۹۶	۰/۰۲۲۴	
سناریو سوم						نام ترکیب
۰/۹۵۰۶	۰/۹۵۲۶	۰/۰۳۴۲	۰/۹۵۳۹	۰/۹۵۴۲	۰/۰۳۴۱	



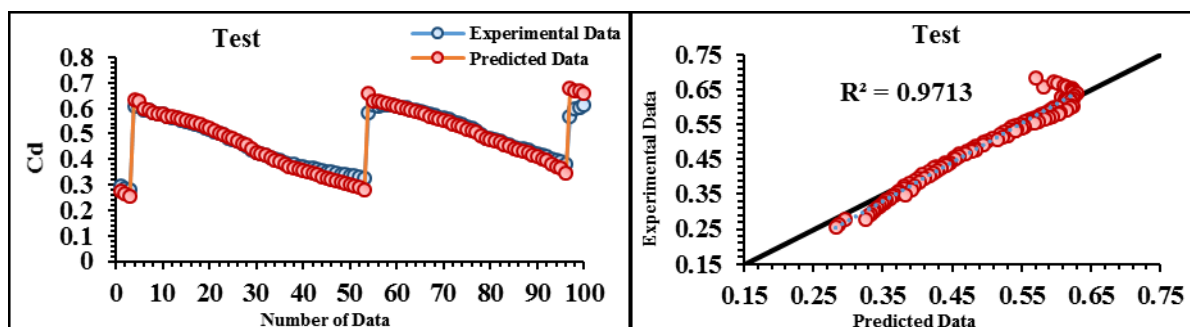
شکل ۳- نمودار پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مرحله‌ی آزمون مربوط به هر سه سناریو (سناریو اول (الف)، سناریو دوم (ب) و سناریو سوم (ج))

جدول ۵- آنالیز حساسیت مربوط به سناریو (اول، دوم و سوم) به روش (SVM)

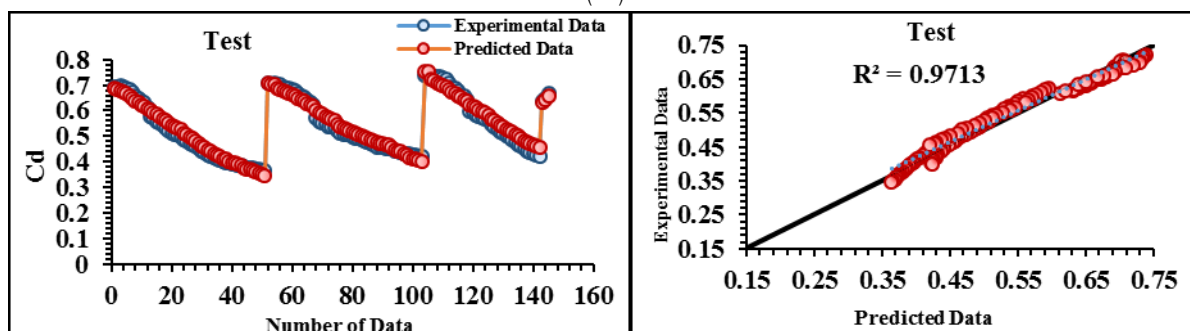
سناریو اول								
Test			Train			حذف پارامتر	ترکیب	
گاما	R^2	RMSE	گاما	R^2	RMSE			
۱۰	۰/۴۸۶۴	۰/۰۹۵۳	۱۰	۰/۶۶۷۱	۰/۰۸۴۱	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_C}{W}, \alpha$	
سناریو دوم								
۰/۱	۰/۴۶۲۴	۰/۱۱۷۱	۰/۱	۰/۵۷۹۱	۰/۱۱۵۷	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_C}{W}, \alpha$	
سناریو سوم								
۷	۰/۴۷۹۱	۰/۱۳۵۷	۷	۰/۳۴۲۴	۰/۱۲۷۱	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_C}{W}, \alpha$	

جدول ۶- معیارهای ارزیابی ترکیبات مختلف ورودی برای تعیین ضریب دبی در سناریو (اول، دوم و سوم) برای مدل (GEP)

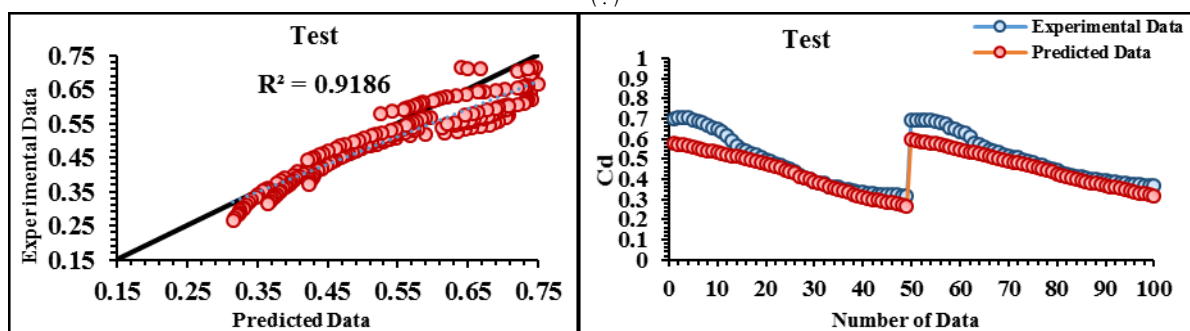
سناریو اول					
Train			Test		
DC	R ²	RMSE	DC	R ²	RMSE
۰/۹۸۳۸	۰/۹۸۳۷	۰/۰۲۰۷	۰/۹۵۰۰	۰/۹۷۱۳	۰/۰۲۲۱
سناریو دوم					
۰/۹۸۴۰	۰/۹۸۳۸	۰/۰۲۴۲	۰/۹۶۴۴	۰/۹۷۱۳	۰/۰۲۰۹
سناریو سوم					
۰/۹۶۴۵	۰/۹۶۵۳	۰/۰۲۷۰	۰/۸۱۲۷	۰/۹۱۸۶	۰/۰۶۴۷



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- نمودار پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مرحله‌ی آزمون مربوط به هر سه سناریو (سناریو اول (الف)، سناریو دوم (ب) و سناریو سوم (ج))

در مرحله‌ی آزمون نشان داده شده است. مقادیر (R²) نشان از رابطه‌ی خطی با دقت بسیار مطلوب بین دو مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و

شکل ۴ نمودارهای مربوط به پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای هر سه سناریو برای برترین ترکیب (ترکیب اول)

آماري نتايج بدتري ارائه مي دهند. لذا مشخص مي شود مهم ترين و موثرترين پارامتر در تعيين ضريب دبي سرريز كنگره اي با فرم تاج ربع دايره اي و تاج نيم دايره اي در مدل GEP پارامتر نسبت بار آبي كل $\left(\frac{H_T}{P}\right)$ مي باشد.

پيش بيني شده مي باشد. مقادير R^2 سناريو اول، دوم و سوم براي نمودار پراكنش مرحله ي آزمون به ترتيب برابر $0/9713$ ، $0/9713$ و $0/9186$ مي باشد. در هر سه مرحله ي آزمون نقاط بيشينه و كمينه تقريباً يكسان برآورد كرده است.

جدول (۷) آناليز حساسيت مربوط به هر سه سناريو آورده شده است. با دقت به جدول مربوطه با حذف $\left(\frac{H_T}{P}\right)$ مقادير پارامترهاي

جدول ۷- آناليز حساسيت مربوط به سناريو (اول، دوم و سوم) به روش (GEP)

سناريو اول							
Test			Train			حذف پارامتر	تركيب
DC	R^2	RMSE	DC	R^2	RMSE		
0/4145	0/7410	0/1550	0/2991	0/2991	0/1083	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_c}{W'} \alpha$
سناريو دوم							
2/189	0/6076	0/2329	0/2847	0/2848	0/1222	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_c}{W'} \alpha$
سناريو سوم							
0/4693	0/5218	0/1116	0/5702	0/5703	0/0963	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_c}{W'} \alpha$

0/289، 0/9682، 0/9681 مي باشد.

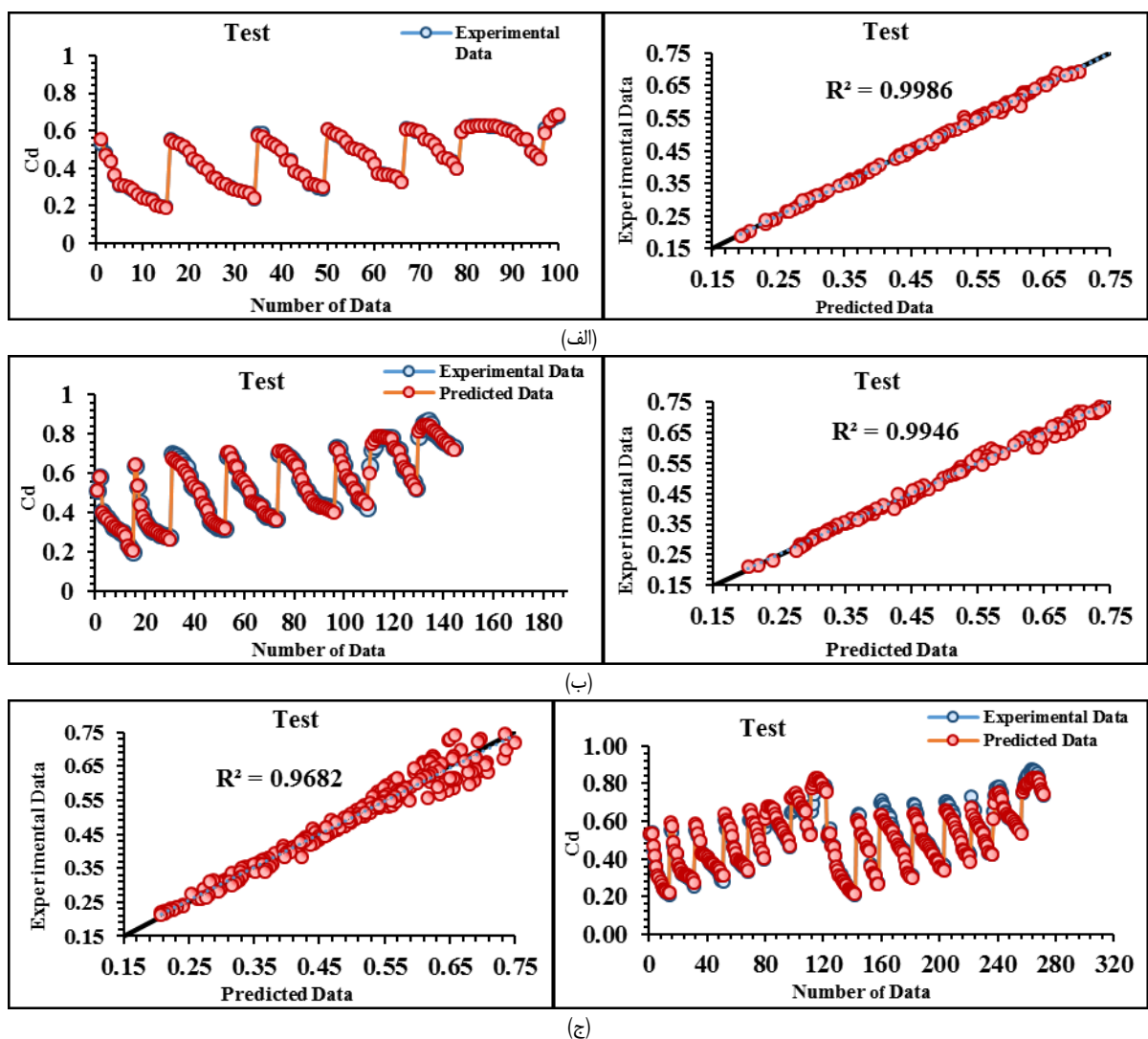
شكل ۵ نمودارهاي مربوط به پراكنش داده هاي آزمائشگهي و پيش بيني شده براي هر سه سناريو براي برترين تركيب (تركيب اول) در مرحله ي آزمون نشان داده شده است. مقادير R^2 سناريو اول، دوم و سوم براي نمودار پراكنش مرحله ي آزمون به ترتيب برابر است با 0/9986، 0/9946 و 0/9682 مي باشد. با توجه به نمودار پراكنش داده هاي آزمائشگهي و پيش بيني شده مرحله ي آزمون در هر سه سناريو تطابق داده هاي آزمائشگهي و داده هاي پيش بيني شده تقريباً يكسان برآورد كرده است.

نتايج روش ANN

جدول ۸ پارامترهاي آماری (R^2 ، RMSE و DC) با استفاده از نرم افزار ANN براي هر سه سناريو مي باشد. با توجه به پارامترهاي آماری بدست آمده از تركيب (۱) در هر سه سناريو نسبت به بقيه تركيبات جواب مطلوب تری بدست آمده است. مقادير R^2 ، RMSE، DC مربوط به سناريو اول براي برترين تركيب در هر دو مرحله ي آموزش و آزمون به ترتيب برابر است با 0/0057، 0/9980، 0/9980 و 0/0060، 0/9986، 0/9985 و نتايج سناريو دوم به ترتيب برابر با 0/1111، 0/9952، 0/9952 و 0/276، 0/9660، 0/9662 و در سناريو سوم به ترتيب برابر با 0/276، 0/9660، 0/9662 و

جدول (۸) - معيارهاي ارزيابي تركيبات مختلف ورودی برای تعیین ضريب دبي در سناريو (اول، دوم و سوم) برای مدل (ANN)

سناريو اول					
Train			Test		
DC	R^2	RMSE	DC	R^2	RMSE
0/9980	0/9980	0/0057	0/9985	0/9986	0/0060
سناريو دوم					
0/9952	0/9952	0/1111	0/9945	0/9946	0/1222
سناريو سوم					
0/9662	0/9660	0/276	0/9681	0/9682	0/289



شکل ۵- نمودار پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مرحله‌ی آزمون مربوط به هر سه سناریو (سناریو اول (الف)، سناریو دوم (ب) و سناریو سوم (ج))

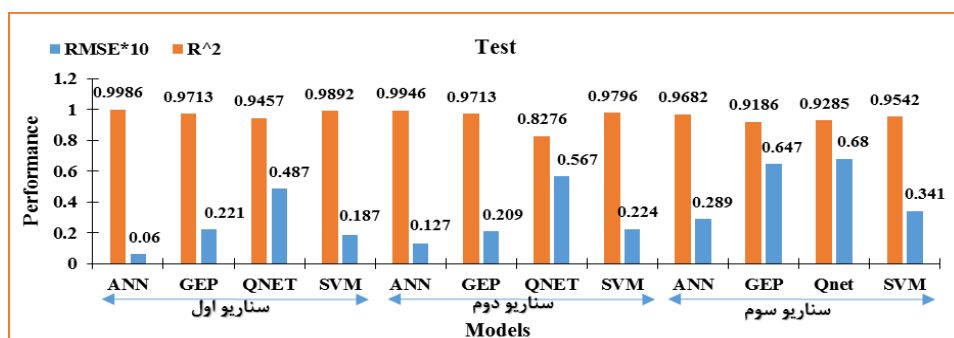
جدول ۹- آنالیز حساسیت مربوط به سناریو (اول، دوم و سوم) به روش (ANN)

سناریو اول						حذف پارامتر	ترکیب
Test			Train				
DC	R^2	RMSE	DC	R^2	RMSE		
-۰/۳۲۴۵	-۰/۷۴۱۰	-۰/۲۵۵۰	-۰/۳۹۹۱	-۰/۲۹۹۱	-۰/۲۰۸۳	$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_c}{w'} \alpha$
سناریو دوم						$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_c}{w'} \alpha$
۴/۱۸۹	-۰/۵۰۷۶	-۰/۲۳۲۹	-۰/۲۹۴۷	-۰/۲۸۴۸	-۰/۲۲۲۲		
سناریو سوم						$\frac{H_T}{P}$	$\frac{L_c}{w'} \alpha$
-۰/۴۶۹۳	-۰/۵۲۱۸	-۰/۳۱۱۶	-۰/۵۶۰۲	-۰/۵۷۰۳	-۰/۴۸۵۰		

شکل ۶ نمودارهای پراکنش داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده هر سه سناریو مربوط به برترین ترکیب که شامل پارامترهای $(Cd, \frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W})$ برای هر چهار مدل GEP, SVM, QNET و ANN در مرحله‌ی آزمون ترسیم شده است. با دقت به نمودارهای مربوط به هر چهار مدل GEP, SVM, QNET و ANN میزان مقادیر RMSE و R^2 مدل ANN نسبت به سایر مدل‌ها در هر سه سناریو نتایج بهتری بدست آورده شده است.

جدول (9) آنالیز حساسیت مربوط به هر سه سناریو آورده شده است. با دقت به جدول مربوطه با حذف مقادیر پارامترهای آماری نتایج بدتری ارائه می‌دهند. لذا مشخص می‌شود مهم‌ترین و موثرترین پارامتر در تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با فرم تاج ربع‌دایره‌ای و تاج نیم‌دایره‌ای در مدل ANN پارامتر نسبت بار آبی کل $(\frac{H_T}{P})$ می‌باشد.

مقایسه نتایج چهار مدل بررسی شده (GEP, SVM, QNET, ANN)



شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای هر سه سناریو با استفاده از روش‌های (GEP, SVM, QNET, ANN)

مربوطه نتایج این تحقیق نسبت به تحقیق نوروزی (2019) و روشنگر (1396) و مهری بهتر بوده و نتایج ANN و SVM این تحقیق نسبت به روش‌های سایر روش‌ها بهتر می‌باشد. به طور مثال با دقت به جدول مربوطه نتایج این تحقیق با تحقیق نوروزی (2019) و مهری (1397) در روش SVM نشان می‌دهد که مقدار R تحقیق حاضر بیشتر و مقدار RMSE تقریباً بهتر می‌باشد و در روش ANN تحقیق حاضر نتایج نسبت به تحقیق روشنگر بیشتر می‌باشد.

مقایسه با نتایج دیگران

استفاده از روش‌های هوشمند مانند ANN, GEP, SVM و ... برای دستیابی به معادله‌های دقیق‌تر پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای (Cd) توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است. جدول (۱۰) مقایسه نتایج این تحقیق با سایر محققین قابل مشاهده و مقایسه می‌باشد. با دقت به نتایج تحقیقات گذشته و تحقیق حاضر می‌توان بیان نمود که دقت روش ANN نسبت به همه‌ی روش‌ها حتی در شرایط متفاوت بهتر بوده است. در جدول

جدول ۱۰- مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با سایر محققین

مهری (1397)	تحقیق حاضر						
	نوروزی (2019)			روشنگر (1396)			
SVM	ANN	GEP	SVM	ANN	QNET	GEP	SVM
0.975	-	-	0.985	سناریو اول 0.9992	سناریو اول 0.9725	سناریو اول 0.9855	سناریو اول 0.9946
			R	سناریو دوم 0.9972	سناریو دوم 0.9097	سناریو دوم 0.9855	سناریو دوم 0.9897
			سناریو سوم 0.9840	سناریو سوم 0.9636	سناریو سوم 0.9584	سناریو سوم 0.9768	
0.044	0.099	0.089	0.019	سناریو اول 0.0060	سناریو اول 0.0487	سناریو اول 0.0221	سناریو اول 0.0187
			RMSE	سناریو دوم 0.0127	سناریو دوم 0.0567	سناریو دوم 0.0209	سناریو دوم 0.0224
			سناریو سوم 0.0289	سناریو سوم 0.0680	سناریو سوم 0.0647	سناریو سوم 0.0341	
-	0.77	0.818	-	سناریو اول 0.9985	سناریو اول 0.8569	سناریو اول 0.9500	سناریو اول 0.9801
			DC	سناریو دوم 0.9945	سناریو دوم 0.8107	سناریو دوم 0.9644	سناریو دوم 0.9792
			سناریو سوم 0.9681	سناریو سوم 0.8366	سناریو سوم 0.8127	سناریو سوم 0.9539	

Theses and Dissertations. Utah State University.

نتیجه گیری

- Crookstone, B.M. and Tullis, B.P. 2012. Discharge Efficiency of Reservoir-Application-Specific Labyrinth Weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 138:564-568.
- Crookstone, B.M. and Tullis, B.P. (2013). Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139:363-370.
- Cimen, M. (2008). Estimation of Daily suspended sediments using Support Vector Machine, *Hydrological sciences Jurnal*: 53 (3), 656-666.
- Carollo, F.G., Ferro, V. and Pampalone, V. (2012). Experimental Investigation of the Outflow Process over a Triangular Labyrinth-Weir. *J. Irrig. Drian Eng.*, 10.106/ (ASCE) IR. 1943-4774.0000366, 138:73-79.
- Christensen, N.A., B.P. Tullis. (2012). Arced Labyrinth Weir Flow Characteristics. 4th International Junior Reasercher and Enginner Workshap on Hydraulic Structures. IJREWHS' 12. B. Tullis and R. Janssen (Eds.) Utah State University, Logan, USA.
- Cassidy, J.J., Christopher, F., Gardner, A., Robert, T. and Peacock, M. (1985). Boardman Labyrinth-Crest Spillway. *J. Hydraul. Eng.* 1985.111: 398-416.
- Darvas, L.A., (1971). Performance and Design of Labyrinth Weir. *J. Hydr. Engg. ASCE.* 97(8):1246-1251.
- Dabling, M.R. (2014). Nonlinear weir hydraulics. M.Sc. Thesis. Utah State University, Logan, UT.
- Dorado, J., Rabuñal, J. R., Pazos, A., Rivero, D., Santos, A. and Puertas, J. (2003). Prediction and modeling of the rainfall-runoff transformation of a typical urban basin using ANN and GP. *Applied Artificial Intelligence*, 17(4), 329-343.
- Fouladipanah, M., Majedi-Asl, M. and Haghgooyi, A. (2020). Application of Intelligent Algorithm to Model Head-Discharge Relationship for Submerged Labyrinth and Linear Weirs. *Hydraulic Journal*, No. 15, Volume 2, pp. 149-164.
- Ferreira, C. (1999): "Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems", *Complex Systems*, 13:2, 87-129.
- Gentilini, B., (1949). Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. *Memorie e Studi dell istituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche Del Regil Politecnico di Milano*, 48, in Italian.
- Goyal, M.K. and Ojha, C.S.P. 2011. Estimation of scour downstream of a ski-jump bucket using support

در این پژوهش، برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای، چهار مدل GEP, SVM, QNET, SVM بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی پژوهش کراکستون (2010) استفاده شد. عملکرد الگوریتم‌های GEP, SVM, QNET و ANN در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره و نیم‌دایره به کمک ۳۱۸ سری داده برای سناریو اول و سناریو دوم شامل تعداد ۳۶۳ سری داده و سناریو سوم شامل ادغام داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که نسبت بار آبی کل $(\frac{H_T}{p})$ ، پارامتر موثر در تعیین ضریب دبی (Cd) سرریزهای کنگره‌ای با تاج ربع‌دایره و نیم‌دایره می‌باشد. در هر سه سناریو ترکیب اول با پارامترهای $(Cd, \frac{H_T}{p}, \frac{L_c}{W})$ ، نسبت به بقیه‌ی ترکیبات بهتر بوده است. با دقت به شکل (۶) نتایج روش ANN در هر سه سناریو نسبت به روش SVM نسبتاً بهتر و نسبت به روش‌های QNET و GEP مقادیر پارامترهای آماری بیشتری دارد.

تشکر و قدردانی

از شرکت دانش بنیان آداک تجهیز ایرانیان، بابت تمام حمایت‌هایی که از این پژوهش داشته‌اند نهایت تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Abbaspour, A. and Arvanaghi, H. 2011. Forecasting the flow on the triangular-rectangular compound overflow using planning. The 10th Iran Hydraulic Conference.
- Azamathulla, H. Md., Ghani, A.A., Nor Azazi, Z. and Aytac G. 2010. Genetic Programming to Predict Bridge Pier Scour, *Journal OF Hydraulic Engineering*, Technical Note, ASCE. DOI: 10.1061/ (ASCE) HY.1943-7900.0000133, 136(3).
- Azarpeyvand, H., A R. Emadi and M. Sedghi ASL. 2019. An Experimental Study of the Discharge of the Length Increase Effect on the Composite Trapezoidal Labyrinth Spillway. *Journal of Water and Soil Science.* 23 (1):405-418.
- Bahrebar A R., Heidarnejad, M., Masjedi, A R., and Bordbar, A. 2021. Numerical and experimental study of the combination of labyrinth weir with orifice and its effect on discharge coefficient. *Journal of Water and Soil Science* 25 (2):91-105.
- Crookston, B.M. 2010. Labyrinth Weirs. All Graduate

- Depth. 23 (4): 181-165.
- Meshkavati toroujeni, J., A. deghani, A. Emadi, M. Masoudian. (2021). Experimental Study of Discharge Coefficient at the Dentate Trapezoidal Labyrinth Weir. *Journal of Water and Soil Science* 25 (3): 209-224.
- Monjezi, R., M. Heidarnejad, A. R. Masjedi, M. H. Pourmohammadi and A. Kamanbedast. 2019. An Experimental Investigation into the Effect of Curve Radius on the Discharge Coefficient in Curved-Linear and Curved-Labyrinth Weirs with a Triangular Plan. *Journal of Water and Soil Science* 23 (2): 87-101.
- Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R., Fuladipناه, M., Abraham, J. and Bagherzadeh, M. (2020). Simulation of bridge pierscours depth base on geometric characteristics and field data using support vector machine algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(2), 137-143. Doi: 10.22126/arww.2021.5747.1189
- Majedi-Asl, M., Foladipناه, M., Arun, V. and Tripathi, R. P. (2021). Using data mining methods to improve discharge coefficient prediction in Piano Key and Labyrinth weirs. *Water Supply*.
- Masoudi, M. H., Sadeghian, J. (2021). Study of the Labyrinth Rectangular Weirs Efficiency with Equal and Unequal Congresses in Plan. *Journal of Hydraulics*, Volume 16, P. 109-122. Doi: [10.30482/JHYD.2021.295438.1541](https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.295438.1541).
- Norouzi, R., R. Daneshfaraz and A. Ghaderi. 2019. Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines. *Applied Water Science*, 9: 148-158.
- Omidpour Alavian, T., Majedi-Asl, M, Soltani, M. and Shamsi, V. 2022a. Comparison of the hydraulic efficiency of Labyrinth Weirs with quarter-circle and semi-circular crown shapes using met model methods (QNET), 8th. International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development / 07-09 March. 2023, Tehran, Iran.
- Omidpour Alavian, T., Majedi-Asl, M, Soltani, M, Mohammadi, E. and Shamsi, V. 2022b. Comparison of the hydraulic efficiency of Labyrinth Weirs with quarter-circle and semi-circular crown shape using met model method (ANN), 8th. International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development / 07-09 March. 2023, Tehran, Iran.
- Omidpour Alavian, T., and Majedi-Asl, M, Sohrabi, F, vector and M5 model tree. *Water Resour. Manage.* 25, 2177–2195.
- Hay, S. and Taylor, G. (1970). Performance of Labyrinth Weirs. *ASCE J. of Hydraulic Engg.* 96(11):2337-57.
- Indlekofer, H. and Rouve, G. (1975). Discharge over Polygonal Weirs. *J. Hydr. Div.*, 101(3), 385-401.
- 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.
- Kabiri-Samani, A.R., Ansari, A. and Borghei, S.M. (2010). Hydraulic behaviour of flow over an oblique weir. *J. Hydraulic Research.* 48(5), 669-673.
- Kisi, O., Shiri, J., Karimi, S., Shamshirband, S., Motamedi, S., Petković, D. and Hashim, R. (2015). A survey of water level fluctuation predicting in Urmia Lake using support vector machine with firefly algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 270, 731-743.
- Lux, F. (1989). Design and Application of Labyrinth Weirs. *Design of Hydraulic Structures* 89, Edited by Alberson, ML, Kia RA, Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1989.
- Lux, F., and Hinchliff, D.L. (1985). "Design and Construction of Labyrinth Spillways." 15th Congress ICOLD, Vol. IV, Q59-R15, Switzerland, 249-274.
- 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).
- Majedi-Asl, M. and Fuladi-Pناه, M. 2017. The use of evolutionary systems in determining the discharge coefficient of triangular concourse overflows. *Journal of Water and Soil Sciences. Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources*, 1.14: 279-290.
- 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).
- Majedi-Asl, M. and Valizadeh, S. (2018). Application of SVM Algorithm in Predicting Vertical Pier Scour

- conference on modern approaches in civil engineering and environment, Ramsar, Iran.
- Taylor G. 1968. The performance of Labyrinth weir, thesis presented to university of Nottingham, England.
- Tullis, B.P., Willmore, C.M., Wolfhope, J.S., (2005). Improving Performance of Low-Head Labyrinth Weirs. In Impacts of Global Climate Change. 1-9.
- Tison, G. and Fransen, T. 1963. Essais sur Deversoirs de forme Polygonal en Plan. Revue C. Brussels, Belgium. 3: 38-51.
- Tacail, F.G., Even, B. and Babb, A. 1990. Case Study of a Labyrinth Spillway. Canadian Journal of Civil Engineering, 17, 1-7.
- Tullis, B.P., Amanian, N. and Waldron, N. 1995. Approach to Improve the Discharging Capacity of Design of Labyrinth Spillways. ASCE J. of Hyraulic Sharp-Crested Triangular Plan form Weirs. Journal of Fluids Engineering. 121 (3):247-55.
- V.N. Vapnik, The nature of statistical learning theory, Springer, New York, 1995.
- Wormleaton, P.R. and Soufiani, E. 1998. Aeration of Included Angle and Sill Slope on Air Entrainment of Triangular Planform Labyrinth Weirs. Journal of hydraulic engineering. 131(3): 184-189.
- Wormleaton, P. R. and Tsang, C. C. 2000. Aeration performance of rectangular planform labyrinth weirs. Journal of environmental engineering. 126(5): 456-465.
- 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.
- Shamsi, V. and Ayami, M. 2022c. Modeling and evaluation of the discharge coefficient of an arched Labyrinth with the Qnet met model method, the first modern national conference in civil and environmental engineering. Ramsar, Iran.
- 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. 201). 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.
- Sivapragasam, C., Liong, S. Y. and Pasha, M. F. K. 2001. Rainfall and runoff forecasting with SSA-SVM approach. Journal of Hydroinformatics. 3(3). 141-152.
- Sohrabi, F., Majedi-Asl, M, Omidpour Alavian, T. and Shamsi, V. 2022a. Investigation of the effect of the prediction angle of the discharge coefficient in arched Labyrinth Weirs using vector machine tool (SVM), the first national conference of modern exhibitions. In civil and environmental engineering, Ramsar, Iran.
- Sohrabi, F., Majedi-Asl, M, Omidpour Alavian, T. and Shamsi, V. 2022b. Investigating the effect of angle in predicting the discharge coefficient in arched Labyrinth Weirs using the GEP gene expression programming algorithm, the first national

Comparison of the Hydraulic Efficiency of Labyrinth Weirs with a Quarter and Semi-Circular Crest Shape Using Neural Networks (QNET, SVM, GEP, ANN)

M. Majedi-Asl^{1*}, T. OmidPourAlavian², M. Kouhdaragh³

Recived: Mar.20, 2023

Accepted: Jun.10, 2023

Abstract

While having economic advantages, non-linear weirs have more passing flow capacity than linear weirs. These weirs have higher discharge efficiency with less free height upstream compared to linear weirs by increasing the length of the crown at a certain width. Intelligent algorithms have found a valuable place among researchers due to their great ability to discover complex and hidden relationships between effective independent parameters and dependent parameters, as well as saving money and time. In this research, the performance of support vector machine (SVM), gene expression programming (GEP), software (QNET) and artificial intelligence network (ANN) in predicting the discharge coefficient of non-linear Weirs of 318 data series for the first scenario and the second scenario includes the number of 363 data series and the third scenario includes data integration (the sum of the first and second scenario) which includes 681 data series. The difference between the first and second scenarios is in the shape of the quarter-circle and semi-circle weir crown. The geometric and hydraulic lines used in this research include total water load ratio ($\frac{H_T}{P}$), magnification ($\frac{L_C}{W}$), cycle wall angle (α) and discharge coefficient (Cd). The results of artificial intelligence showed that the combinations ($Cd, \frac{H_T}{P}, \alpha, \frac{L_C}{W}$) in QNET, ANN, GEP and SVM algorithms in the training stage related to the superior scenario are equal to the evaluation indicators respectively ($R^2=0.9960$), (RMSE=0.0080), (DC=0.9961), ($R^2=0.9980$), (RMSE=0.0057), (DC=0.9980), ($R^2=0.9837$), (RMSE=0.0207), (DC=0.9838) and ($R^2=0.9902$), (RMSE=0.0186), (DC=0.9830). Which has led to the most optimal output compared to other combinations, which indicates a very favorable accuracy in all four methods, namely ANN, QNET, SVM and GEP in predicting the weir discharge coefficient is non-linear. The results of the sensitivity analysis showed that the effective parameter in determining the nonlinear weir discharge coefficient in all methods is the total water load ratio parameter ($\frac{H_T}{P}$). Comparing the results of this research with other researchers shows that the evaluation indicators for all methods of the current research are relatively better than other researchers.

Keywords: Discharge Coefficient, Neural Networks, Non-Linear, Sensitivity Analysis Weirs

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh University, Maragheh, Iran

2- PhD candidate, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures - Maragheh University, Maragheh, Iran

3- Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Malekan Branch, Malekan Islamic Azad University, Malekan, Iran

(*Corresponding Author Email: majedi@maragheh.ac.ir-mehdi.majedi@gmail.com)