

شبیه‌سازی عددی دبی آبگیر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از مدل ماشین یادگیری

ایمان کریمی سرمیدانی^۱، محمد حیدر نژاد^{۲*}، اصلا ن اگدر نژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سواحل، بندر و سازه‌های دریایی، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^{۲*} دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۳ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

چکیده

نقش آبشکن‌ها در حفاظت از دیواره رودخانه، آن‌ها را جزء موضوع‌های مهم مهندسی رودخانه قرار داده است. در این مطالعه، عملکرد دو مدل یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) با نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی میزان دبی انحرافی در مقیاس آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. برای مدل فیزیکی در یک فلوم آزمایشگاهی با دو نوع آبشکن T-شکل و L-شکل و با زاویه‌های ۹۰ و ۱۳۵ درجه برای انحراف دبی به کانال آبگیری شبیه‌سازی شد. سه متغیر مستقل شامل عدد فرود جریان، زاویه آبگیری و طول نسبی آبشکن‌ها برای مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شدند. از ۹۶ داده آزمایشگاهی، ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل‌های یادگیری ماشین اختصاص یافت. سه شاخص RMSE، MAE و R² برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به کار گرفته شدند. نتایج تحقیق نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) نسبت به ماشین بردار پشتیبان (SVM) عملکرد بهتری دارد به طوری که در مرحله آموزش و آزمون، مقدار ضرایب ارزیابی عملکرد برای هر دو آبشکن T-شکل و L-شکل دارای برتری بودند. در نرم‌افزار FLOW-3D، ضریب زبری مانینگ و نوع معادله شبیه‌ساز آشفتگی در فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شدند. مقایسه بین مقادیر ارزیابی عملکرد نشان دهنده برتری نسبی GEP نسبت به FLOW-3D است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی عملکرد، آبشکن، دبی انحرافی، قوس رودخانه، مدل داده-مبنا

مقدمه

محل دشوار خواهد بود. از آبشکن‌ها برای افزایش دبی ورودی به آبگیرها بهره می‌برند. آبشکن‌ها از مهم‌ترین سازه‌های حفاظتی رودخانه‌ها هستند. آبشکن‌ها سازه‌هایی از جنس سنگ، بتن، شن، صخره، خاک یا فلز هستند که در مقطع عرضی رودخانه با زاویه‌ای ساخته می‌شوند تا جریان آب را به سمت مرکز رودخانه هدایت کنند. احداث آبشکن در محل آبگیرها منجر به افزایش دبی برداشت شده از رودخانه می‌شود. در واقع، آبشکن‌ها سازه‌هایی نصب شده در نقطه ورودی سیستم برداشت آب هستند تا جریان آب ورودی را بهینه‌تر کنترل و افزایش دبی آبگیری را تسهیل کنند.

یکی از قدیمی‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها برای استفاده از آب رودخانه‌ها در کاربردهای مختلف، ساخت آبگیرهای ثقیلی است. در گذشته، آبگیری از رودخانه‌ها به شکل سنتی و با استفاده از نیروی ثقل بود، اما اکنون این روش به سازه‌های هیدرولیکی پیشرفته با معیارهای مدرن تبدیل شده است. آبگیرها به عنوان سازه‌هایی طراحی می‌شوند تا آب را از رودخانه‌ها برداشت کنند. برداشت آب سطحی معمولاً به دو شیوه است: پمپاژ و ثقلی. روش ثقلی به دلیل جریان مداوم و نیاز نداشتن به انرژی پمپاژ، برتری دارد. انتخاب محل مناسب آبگیری برای موفقیت پروژه بسیار اهمیت دارد، زیرا پس از اجرای پروژه، اصلاح مشکلات ناشی از انتخاب نادرست

آبشکن T-شکل را از روش CFD به کمک FLOW-3D در مجرای صلب با قوس ۹۰ درجه بررسی کردند که نتیجه آن وجود گردابه پادساعتگرد در پایین دست آبشکن بود. اعزی و همکاران (Aezzi *et al.*, 2018) با استفاده از مدل عددی دو بعدی CCHE2D الگوی جریان و تغییرات بستر آبراهه در اطراف سازه آبشکن را شبیه سازی کردند و دریافتند مدل عددی با دقت مناسبی الگوی جریان را در اطراف آبشکن منفرد و سری آبشکن ها شبیه سازی می کند. بهنام طلب و همکاران (Behnamtalab *et al.*, 2019) آبشکن متخلخل را با استفاده از نرم افزار FLOW-3D شبیه سازی عددی کردند. در این پژوهش، تأثیر احداث تک آبشکن متخلخل بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در کانال باز با استفاده از مدل عددی به کمک کالیبراسیون مدل غیرخطی فورشه ایمر بررسی شد. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار FLOW-3D و برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل آشفستگی RNG استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش تخلخل آبشکن موجب کاهش ارتفاع آب در بالادست آبشکن و افزایش ارتفاع در پایین دست آبشکن می شود. همچنین مشاهده گردید افزایش تخلخل از مقدار بیشینه سرعت می کاهد و طول اثر آن را کاهش و کمینه سرعت را افزایش خواهد داد. پژوهش آزمایشگاهی اسمعیلی و همکاران (Esmaeli *et al.*, 2020) روی تاثیر آبشکن بر مؤلفه طولی سرعت مؤید آن بود که وجود آبشکن های متوالی منجر به کاهش سرعت جریان در دیواره خارجی می شود. شاهی نژاد و همکاران (Shahinejad *et al.*, 2023) با استفاده از الگوریتم چند هدفه به طراحی بهینه ابعاد آبشکن T-شکل پرداختند. نتایج پژوهش این محققان نشان دهنده این مطلب بود که مدل ارائه شده، در مقایسه با طراحی دیگر پژوهشگران، خروجی بهینه تری را به دست می دهد. آچاریا و دوان (Acharya & Duan, 2011) الگوی جریان در آبشکن های تیغه ای متوالی را در مسیر مستقیم در دو حالت بستر ثابت و متحرک با دو مدل آزمایشگاهی و مدل عددی FLOW-3D بررسی کردند. طلعت و همکاران (Talaat *et al.*, 2009) برای معرفی آبشکن های غیرمستغرق به منظور کاهش فرسایش کناری رودخانه ها در ناگاممدی واقع در

علینقی زاده بهبهانی (Ali-Nagizadeh-Behbahani, 2013) با استفاده از مدل فیزیکی، شرایط هیدرولیکی جریان را در آبگیرهای با زاویه انحراف ۹۰ و ۷۵ درجه بررسی کرد و نشان داد که اندازه زاویه انحراف تأثیر زیادی بر نسبت دبی انحرافی دارد. واقفی و قدسیان (Vaghefi & Ghodsian, 2010) به صورت آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر متحرک را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که با پیشروی به سمت پایین دست قوس، قدرت جریان ثانویه گردابه دوم افزایش می یابد و در انتهای قوس با غلبه بر جریان ثانویه اصلی، باعث تغییر جهت جریان از ساحل خارجی به سمت ساحل داخلی می شود. شاکر و کاشفی پور (Shaker & Kashefipour, 2014) با بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تنش برشی جریان در قوس ۹۰ درجه با وجود سری آبشکن ها و بدون آنها، نشان دادند که وجود سری آبشکن ها سبب یکنواختی سرعت بالادست و انتقال ناحیه پرسرعت از مجاورت دیواره خارجی به سمت میانه کانال تا دیواره داخلی می شود. معروفی نیا و همکاران (Maroofi-nia *et al.*, 2016) تأثیر صفحات مستغرق و آبشکن را در کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی به کمک نرم افزار SSIIM2 شبیه سازی عددی کردند. به منظور هدایت جریان به سمت آبگیر و افزایش کارایی صفحات، از آبشکن در سمت مقابل آبگیر استفاده شد و اثر پارامترهای طول آبشکن و فاصله آن از مقابل آبگیر در زاویه ۹۰ درجه با جریان در کانال اصلی به ازای نسبت های مختلف دبی آبگیری بر حجم رسوبات وارد شده به آبگیر بررسی شد. حسینی اصلی چکوسری و همکاران (Hosseini-Asli *et al.*, 2015) با نرم افزار FLUENT به شبیه سازی سه بعدی میدان جریان در آبگیرهای جانبی شامل، سازه سد انحرافی، دیواره جداکننده، مجرای تخلیه رسوب، ارتفاع آستانه و آبگیر جانبی پرداختند. نتایج مدل عددی و فیزیکی از نظر ناحیه جداشدگی جریان، الگوی جریان، گردابه ها و جریان های ثانویه مقایسه شدند. مدلسازی عددی جریان با مدل آشفستگی K-e و برای زاویه آبگیری ۱۲۰ درجه و نسبت های آبگیری ۰/۵ و ۰/۴۵ صورت گرفت. واقفی و قدسیان (Vaghefi & Ghodsian, 2010) الگوی جریان در اطراف

کردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد دیواره جداکننده بالادست تاثیر بسیار چشمگیری در آبگیری کانال دارد. عباسی‌چناری و همکاران (Chenari *et al.*, 2024) موضوع افزایش راندمان آبگیر جانبی تحت تاثیر آبشکن در محل آبگیر همت در ایران را به کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند و نشان دادند وجود آبشکن باعث افزایش تنش برشی در ورودی آبگیر می‌شود. اما به دلیل تاثیر مثبتی که روی افزایش سرعت جریان دارد باعث کاهش رسوب ورودی به کانال آبگیر می‌شود. مندل و همکاران (Mandal *et al.*, 2024) نیز اثر صفحات مستغرق را روی رسوب ورودی و باز توزیع جریان در محل آبگیر بررسی کردند.

مرور پژوهش‌های پیشین مؤید تحقیقات آزمایشگاهی و عددی روی ویژگی‌های انواع مختلف آبشکن و تأثیرپذیری الگوی جریان از آنهاست. اما حال مطالعه‌ای در خصوص کاربرد و مقایسه همزمان مدل‌های عددی و داده‌مبنای در زمینه بررسی ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی روی میزان دبی انحرافی از کانال آبگیری با حضور دو نوع آبشکن T- شکل و L- شکل وجود ندارد. به همین دلیل، در این تحقیق عملکرد دو مدل یادگیری ماشین شامل SVM و GEP با مدل FLOW-3D، که مبتنی بر CFD است، در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

در مطالعه پدیده‌ها در آزمایشگاه، بررسی روابط میان متغیرهای مستقل با متغیر وابسته جایگاه ویژه‌ای دارد. در این میان، اعداد بدون بعد نقش کلیدی در تفسیر نتایج آزمایشگاهی و ایجاد روابط میان ورودی‌های مستقل و وابسته در فهم پدیده‌ای دارد که مطالعه شده است. در مدل‌سازی انحراف جریان آب رودخانه به یک آبگیر جانبی به کمک آبشکن، هدف اصلی تعیین مقدار دبی انحرافی تحت شرایط مختلف در کانال اصلی است. با در نظر گرفتن جریان پایدار و ثابت بودن ویژگی‌های سیال، معادله (۱) بین پارامترهای مؤثر بر دبی نسبی انحرافی در حالت تعادل برقرار است.

ساحل غربی رود نیل، دریافتند که عملکرد آبشکن با فاصله بین آبشکن‌ها رابطه معکوس دارد، اما در زاویه و فاصله ثابت با طول آبشکن رابطه مستقیم دارد. علاالدین و تسوجیموتو (Alauddin & Tsujimoto, 2011) طراحی بهینه آبشکن‌ها را با استفاده از مدل دو بعدی Nays-RIC اجرا کردند که پارامترهای کانال و جریان براساس یکی از رودخانه‌های بنگلادش تطبیق داده شد. در این تحقیق، چهار جهت و سه نوع ساختار آبشکن بررسی شد. عملکرد آبشکن‌ها از طریق سه شاخص کلیدی شامل فرسایش بستر کانال، رسوب در ناحیه آبشکن و آبستنگی در نزدیکی دماغه آبشکن ارزیابی شد. نتایج محاسبات نشان داد که عملکرد آبشکن اصلاح‌شده بهتر از آبشکن مستقیم است. کلیتا و همکاران (Kalita *et al.*, 2014) یک مدل بهینه‌سازی به همراه مدل هیدرودینامیکی را برای دستیابی به ترکیبی اقتصادی از آبشکن‌ها ایجاد کردند که باعث حفظ سرعت جریان تعریف شده توسط کاربر در بخشی از رودخانه می‌شود. مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) و مدل شبیه‌سازی جریان با استفاده از روش پرتو و گرما برای حل معادلات دو بعدی هیدرودینامیک در جریان غیرپایدار توسعه یافت و نتایج منطقی برای تمامی سناریوهای آزمایشی به دست آمد. زارع و هنر (Zare & Honar, 2016) تاثیر آبشکن ساده را بر کاهش فرسایش کناری در قوس رودخانه در شرایط آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که بیشترین عمق آبستنگی در پای آبشکن‌ها مربوط به آبشکن عمودی است و در هر سه نوع آرایش عمودی، دافع و جاذب، آبشکن اول بیشترین عمق آبستنگی را دارد و آبشکن آخر کمترین عمق را واقفی و همکاران (Vaghefi *et al.*, 2017) الگوی جریان حول یک آبشکن محافظ به صورت عددی در سه حالت دافع، قائم و جاذب در قوس ۹۰ درجه یک کانال بررسی و گزارش کردند که با افزایش زاویه آبشکن محافظ نسبت به حالت قائم، چه در حالت جاذب و چه در حالت دافع، سرعت بیشینه در محدوده آبشکن اصلی افزایش می‌یابد و این افزایش در حالت دافع بیشتر است. الزوبیدی و هیلو (Al-Zubaidy & Hilo, 2022) با استفاده از روش CFD، رفتار جریان را در محل ورودی آبگیر شبیه‌سازی

شدند. با توجه به محدودیت های فیزیکی و هیدرولیکی موحد در آزمایشگاه، طول کانال ورودی برابر با ۳ متر، طول کانال خروجی برابر با ۰/۵ متر، عرض کانال اصلی برابر با ۰/۵ متر، شعاع انحنا ۲ متر و عرض کانال آبگیر برابر با ۱۰ سانتی متر لحاظ شدند. برای هر آبشکن ۴۸ داده آزمایشگاهی اندازه گیری شده است. شکل (۱) پلان همراه با مدل فیزیکی مورد آزمایش را نشان می دهد. داده های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده اند. این داده ها شامل طول نسبی آبشکن ها ($\frac{L}{B}$)، عدد فرود جریان (Fr)، زاویه آبگیری (φ) و در نهایت میزان دبی انحرافی اندازه گیری شده است.

مروری بر نرم افزار FLOW-3D

نرم افزار FLOW-3D ابزاری است پیشرفته برای شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی که به ویژه در تحلیل و مدل سازی جریان های پیچیده سیال در مهندسی و علوم کاربردی استفاده می شود. این نرم افزار بر مبنای حل عددی معادله های ناور-استوکس (Navier-Stokes) توسعه یافته است و امکان تحلیل جریان های تراکم ناپذیر و تراکم پذیر، چندفازی و غیرنیوتنی را فراهم می کند. معادله های ناور-استوکس که قلب محاسبات در نرم افزار FLOW-3D هستند برای سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر نوشته می شوند (Gupta et al., 2022):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (4)$$

$$Q_r = \frac{Q_d}{Q_m} = F_1(y, U, B, b, L, \rho, g, \mu, r, \varphi, \theta, \alpha) \quad (1)$$

در این معادله: y عمق جریان در کانال اصلی، U سرعت جریان در کانال اصلی، B عرض کانال اصلی، b عرض کانال انحرافی، L طول آبشکن، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت سیال، g شتاب ثقل، r شعاع قوس کانال اصلی، φ زاویه آبگیری (زاویه انحراف)، θ محل آبگیری در قوس، α زاویه قرارگیری آبشکن هستند. برابر تئوری باکینگهام، برای دستیابی به پارامترهای بی بعد، سه متغیر U ، y و g به عنوان متغیرهای تکراری انتخاب شدند و در نهایت معادله (۱) شکل زیر بازنویسی شد:

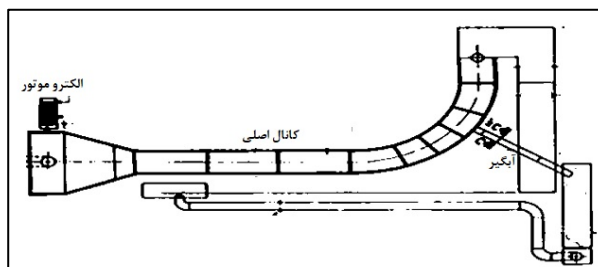
$$Q_r = F_2(Re, Fr, \frac{y}{B}, \frac{r}{B}, \frac{b}{B}, \frac{L}{B}, \varphi, \theta, \alpha) \quad (2)$$

در این پژوهش، با توجه به ثابت بودن پارامترهای B ، b ، α و θ ، از این پارامترها صرف نظر شد. متلاطم بودن جریان نیز باعث چشم پوشی کردن تاثیر عدد Re شد. به همین دلیل، فرم نهایی معادله (۲) به صورت زیر حاصل شد:

$$Q_r = F_2(Fr, \frac{L}{B}, \varphi) \quad (3)$$

داده های آزمایشگاهی

برابر معادله شماره (۳)، برای اجرای این تحقیق، اثر سه پارامتر بی بعد شامل طول نسبی آبشکن، زاویه کانال آبگیری و عدد فرود جریان بر میزان دبی انحرافی از کانال در محل قوس ۹۰ درجه مطالعه شده است. دو آبشکن T-شکل و L-شکل نیز در دیواره داخلی قوس در بالادست کانال آبشکن با طول های نسبی مختلف نصب شده اند. هدف بررسی تاثیر آبشکن های L-شکل و T-شکل بر آبگیرهاست، از این رو آبشکن ها با سه طول معادل ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد عرض فلوم (B) به ازای سه دبی ۲۵، ۴۰ و ۵۵ لیتر بر ثانیه آزمایش

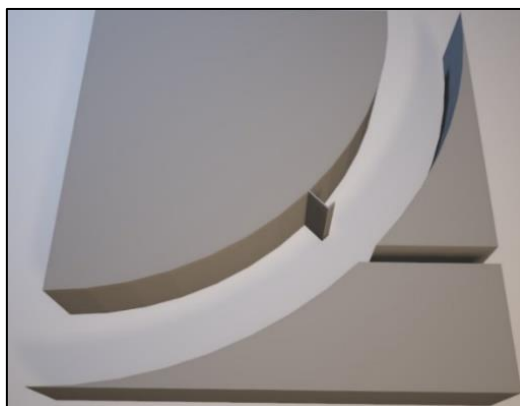


شکل ۱- نمای کلی از پلان تجهیزات آزمایشگاهی

Figure 1- Overview of the laboratory equipment layout

۹/۸۱- برای متغیر g انتخاب شد. گام بعدی، تعیین مدل اغتشاش، نیروی ثقل و نوع جریان از نظر گرانشی است. از پنجره Material در قسمت Fluid Database با توجه به اینکه یکی از شرایط استاندارد سیال برای اجرای آزمایشها در شرایط معمولی رودخانه یا کانال، آب با دمای ۲۰ درجه

سانتی گراد است، این گزینه انتخاب شد که دارای لزوجت 0.0001 متر مربع بر ثانیه و چگالی 1000 کیلوگرم بر متر مکعب است. با استفاده از نرم افزار اتوکد، نمایی سه بعدی از فلوم همراه با آبگیر طراحی و به نرم افزار معرفی شد. نمایی از آبشکن L-شکل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای سه بعدی از مدل در محیط اتوکد

Figure 2-Three-dimensional view of the model in AutoCAD

مدل SVM

مدل ماشین بردار پشتیبان از جمله روش های یادگیری از نوع با نظارت است که برای اجرای فرآیند آموزش نیاز به تعدادی داده ورودی دارد. مدل ماشین بردار پشتیبان به عنوان روشی جدید برای پیش بینی و شبیه سازی پارامترهای مختلف استفاده می شود. این مدل با تمرکز بر ریسک عملیاتی، مقدار جواب بهینه را به دست می آورد که این کار از طریق کمینه سازی خطا به کمک قیدهای موجود صورت می گیرد (Aminvash et al., 2024; Daneshfaraz, et al., 2021). معادله رگرسیون SVM در معادله زیر ارائه شده است:

$$f(x) = \sum_{i=1}^D W_i \phi_i(x) + b \quad (6)$$

در این معادله: $\phi_i(x)$ بیانگر ویژگی ها، b نشان دهنده مقدار خطا و W_i بردارهای وزنی است که باید با استفاده از داده های معرفی شده به مدل تخمین زده شود. این مدل قابلیت نگاشت داده های ورودی به یک فضا با ابعاد بیشتر را فراهم می کند. به کمک فرایند بهینه سازی ارائه شده در

از مهمترین بخش های شبیه سازی، تعیین تعداد مش است. مش ها در جهت های مختلف محور مختصات بر اساس طول بلوک ها نیز متفاوت اند. تعداد مش های در نظر گرفته برای شبیه سازی در نرم افزار این امکان را برای کاربر به وجود می آورد که بعد از تعیین تعداد مش ها، صحت تناسب تعداد آنها را در سه راستای x ، y و z تعیین کند. اندازه شبکه در کانال برابر با 8 میلی متر، در موقعیت آبشکن ها برابر با 5 میلی متر، فاصله 15 سانتی متری بالادست و پایین دست آبگیر اندازه شبکه برابر با 4 میلی متر و در محل ورودی کانال آبگیر اندازه شبکه 2 میلی متر لحاظ شد. گام بعدی تعیین شرایط مرزی مسئله بود. مرز ورودی از نوع Volume Flow Rate، قسمت ورودی با گزینه دبی جریان، قسمت خروجی شرط مرزی خروجی Out flow و مرز پایین دست از نوع دیواره یا Wall انتخاب شدند که برای جداسازی سیال از مرز جامد استفاده می شوند. در این شرط مرزی سرعت های عمود و مماس روی مرز دیواره صفر در نظر گرفته شدند و جداره بالایی نیز از نوع Symmetry (قرینه) انتخاب شد.

شبیه‌سازی عددی دبی آبیگر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی ...

معادله زیر، مقدار پارامتر $w_i(x)$ براساس کمینه‌سازی خطا به دست می‌آید:

$$\min \frac{1}{2} \|W\|^2 + c \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^o) \quad (7)$$

قیود مورد استفاده برای کمینه‌سازی مقدار خطا به فرار زیر هستند:

$$\begin{cases} |-y_i - \langle W^T \phi(X_i) \rangle - b| \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i \geq 0, \quad \xi_i^o \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

در این معادله: پارامتر C نشان دهنده ثابت گنجایش، W نشان دهنده بردار ضرایب، W^T بیانگر ترانزپوز بردار ضرایب، ξ_i^o و ξ_i ضرایب کمبود، N الگوی آموزش مدل، و ϕ تابع کرنل است (Vapnik, 1995). توابع کرنل موجود در مدل SVM در جدول ۲ ارائه شده‌اند (Daneshfaraz et al., 2021; Fuladipناه & Majedi-Asl, 2022).

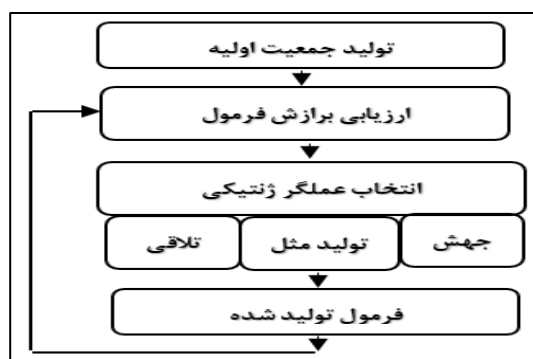
جدول ۲- انواع توابع کرنل

رابطه کرنل Kernel Equation	نام کرنل Kernel Name
$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$	خطی Linear
$K(x_i, x_j) = [(x_i, x_j) + 1]^d$	چند جمله‌ای Polynomial
$K(x_i, x_j) = \exp[-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2}]$	تابع پایه شعاعی Radial Basis Function
$K(x_i, x_j) = \tanh[-\alpha(x_i, x_j) + c]$	سیگموئید Sigmoid

از فرمول‌ها اولین‌گام در مدل GEP است که این کار به کمک ترکیب تصادفی مجموعه‌ای از توابع ریاضی همراه با متغیرهای مسئله و اعداد ثابت صورت می‌گیرد. سپس هر یک از افراد جمعیت به کمک شاخص‌های برازش موجود در مدل در گام دوم ارزیابی می‌شود. سومین گام در مدل GEP، تولید جمعیتی جدید از فرمول‌هاست. مرحله چهارم شامل تکرار گام سوم الگوریتم برای دستیابی به بیشینه مقدار تولید است.

مروری بر مدل GEP

تئوری داروین بر مبنای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و در قالب الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط فریرا (Ferreira, 2001) بنا نهاده شده است که در آن جمعیتی از افراد بر اساس شاخص برازندگی انتخاب می‌شوند و براساس یک یا چند عملگر، تغییرات ژنتیکی آنها انجام می‌شود. شکل ۳، الگوریتم مورد استفاده در مدل GEP را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است تولید جمعیت اولیه



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

Figure 3- Flowchart of the genetic programming algorithm

مقایسه کارکرد مدل‌ها

لیتر بر ثانیه با ارتفاع سطح آبیگری ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. هر آزمایش با داده‌های دبی ورودی، ارتفاع آب در خروجی، ارتفاع آب در آبیگر و یکی از مقادیر پارامترهای به‌دست آمده برای واسنجی دنبال شد. در هر آزمایش، مقدار دبی انحرافی آبیگر در نرم‌افزار محاسبه و با داده مشاهداتی مقایسه شد. این کار در هر آزمایش همراه با محاسبه میزان خطا بود. با توجه به نتایج به دست آمده، کمترین خطا در آزمایش‌ها به ازای $n=0/035$ و مدل آشفتگی طول اختلاط پراگندگی حاصل شد. پس از آن، مقادیر مختلف دبی انحرافی به ازای مقادیر مختلف شبیه‌سازی شد. در شکل (۴) و شکل (۵) به ترتیب شبیه‌سازی میدان سرعت در محدوده آبشکن و کانال آبیگری برای آبشکن‌های L-شکل و T-شکل به ازای دبی‌های ۴۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده‌اند. این شبیه‌سازی به ازای سه مقدار مختلف طول نسبی آبشکن‌ها بوده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقدار جریان انحرافی در هر یک از دو مدل مقطع T-شکل و L-شکل با استفاده از مدل FLOW-3D در جدول (۳) ارائه شده است. بیان گرافیکی از خروجی مدل FLOW-3D در شکل‌های (۶) و (۷) قابل مشاهده است. این دو نمودار در واقع نشان‌دهنده میزان انطباق‌پذیری داده‌های دبی انحرافی مشاهداتی و محاسباتی است. هر چه پراکنش داده‌ها حول خط با شیب ۱:۱ کمتر باشد نشان از دقت بسیار مناسب‌تر شبیه‌سازی خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت مدل در هر دو نوع آبشکن تقریباً با یکدیگر برابر است.

خروجی مدل‌های داده‌مبنا
آنالیز حساسیت

طبق معادله (۳)، سه پارامتر Fr ، $\frac{L}{B}$ و φ با استفاده از تئوری باکینگهام برای بررسی تاثیرگذاری روی میزان دبی انحرافی به کانال آبیگری استخراج شدند. به منظور تدقیق و تسریع در مدل‌سازی میزان دبی انحرافی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین لازم است تحلیل حساسیت روی هر یک از سه پارامتر ورودی بشود تا بهینه‌ترین ترکیب ورودی برای مدل‌ها انتخاب شود. در این پژوهش، از تحلیل حساسیت به کمک روش گاما تست استفاده شده است.

مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش طی فرآیندهای آموزش و آزمون ارزیابی می‌شوند تا بهترین مقادیر برای پارامترهای تنظیمی آنها تعیین شود. برای اجرای این مرحله، نیاز به استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد است. در این پژوهش، سه شاخص (۱) ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، (۲) میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، و (۳) ضریب تعیین با استفاده از معادله‌های زیر به کار گرفته شده‌اند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

در این معادله‌ها: y_i و \hat{y}_i به ترتیب مقدار مشاهداتی و محاسباتی داده نام، n تعداد کل داده‌ها و \bar{y} مقدار میانگین داده‌های مشاهداتی است (Fuladipana et al., 2020).

بحث و نتایج

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، دبی انحرافی به کانال آبیگر در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مدل FLOW-3D و دو مدل GEP و SVM شبیه‌سازی شده است. این بررسی با نصب دو آبشکن T-شکل و L-شکل در دیواره فلوم صورت پذیرفته است. همان‌طور که در جدول (۱) نیز مشخص است برای هر آبشکن ۴۸ داده آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است.

خروجی نرم‌افزار FLOW-3D

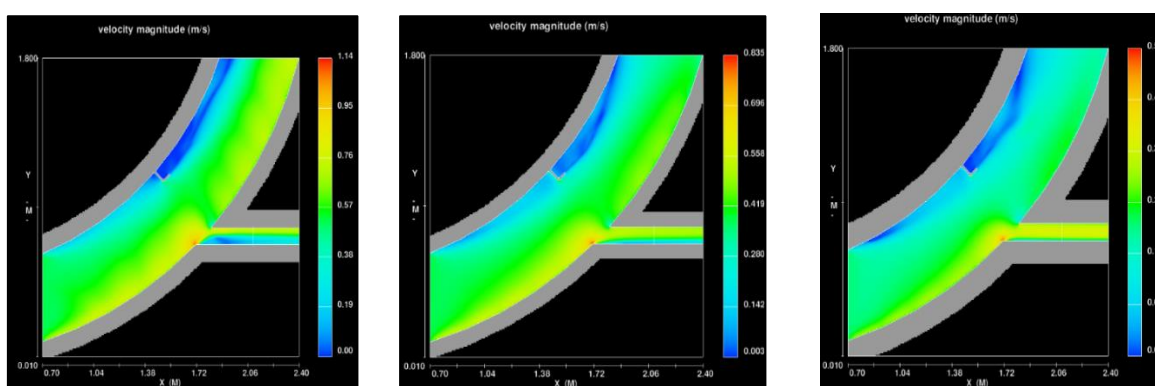
با توجه به نتایج آزمایش‌های حساسیت‌سنجی، دو پارامتر ضریب زبری مانینگ (n) و مدل‌های آشفتگی برای واسنجی مدل استفاده شدند. برای واسنجی مدل، آزمایش‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و در مقادیر مختلف n و مدل‌های آشفتگی اجرا شد. مقادیر ضریب زبری اعمال شده برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ در نظر گرفته شدند. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های مربوط به دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه با مقدار دبی انحرافی ۵/۵

شبیه‌سازی عددی دبی آبیگر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی ...

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل FLOW-3D

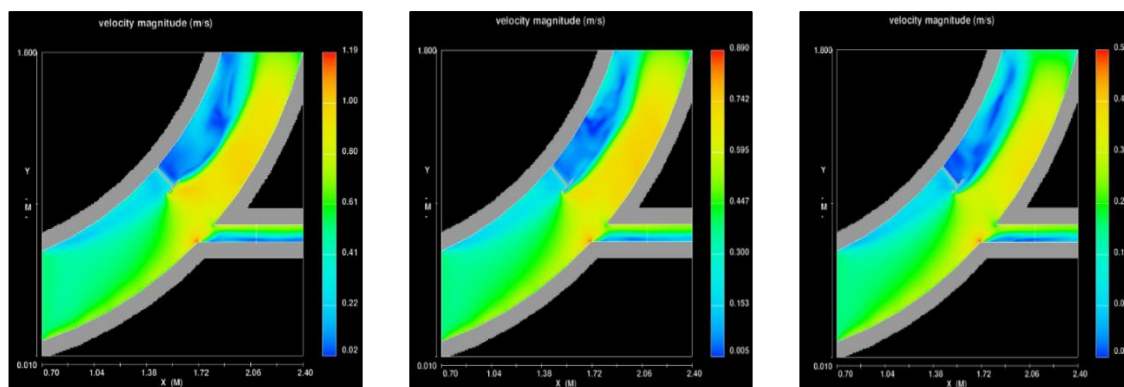
Table 3- Values of performance evaluation indices for the FLOW-3D model

شاخص‌های ارزیابی عملکرد Performance Evaluation Metrics			نوع آبشکن Type of groyne
R ²	MAE	RMSE	
۰/۹۶۰۷	۰/۹۳۶۳	۱/۲۰۷۰	مقطع T-شکل T-shaped Section
۰/۹۵۱۳	۱/۱۲۵۶	۱/۳۷۵۹	مقطع L-شکل L-shaped Section



شکل ۴- میدان سرعت آبشکن L-شکل با طول نسبی مختلف به ازای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

Figure 4- Velocity field of the L-shaped groyne with different relative lengths at a flow rate of 40 liters per second



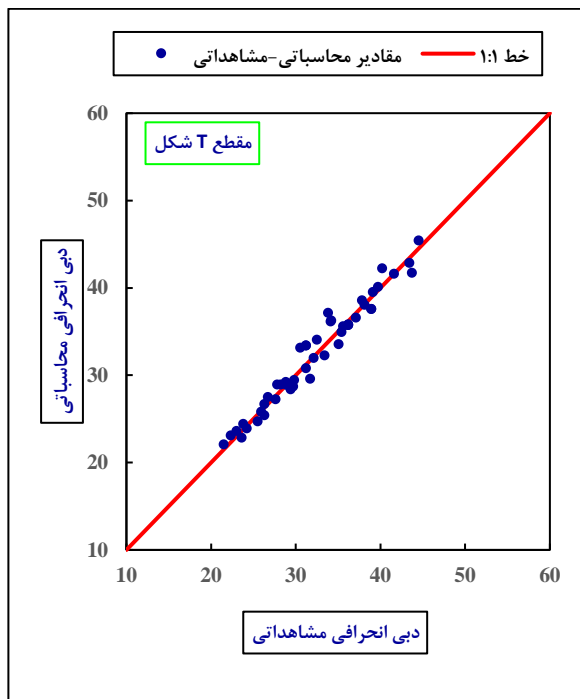
شکل ۵- میدان سرعت آبشکن T-شکل با طول نسبی مختلف به ازای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه

Figure 5- Velocity field of the T-shaped groyne with different relative lengths at a flow rate of 25 liters per second

خروجی از ورودی‌ها، به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن پدیده‌های مدلسازی‌شده، این خطا را از طریق رابطه‌ای بین مجموعه داده‌های ورودی و خروجی با تابع f نشان می‌دهد:

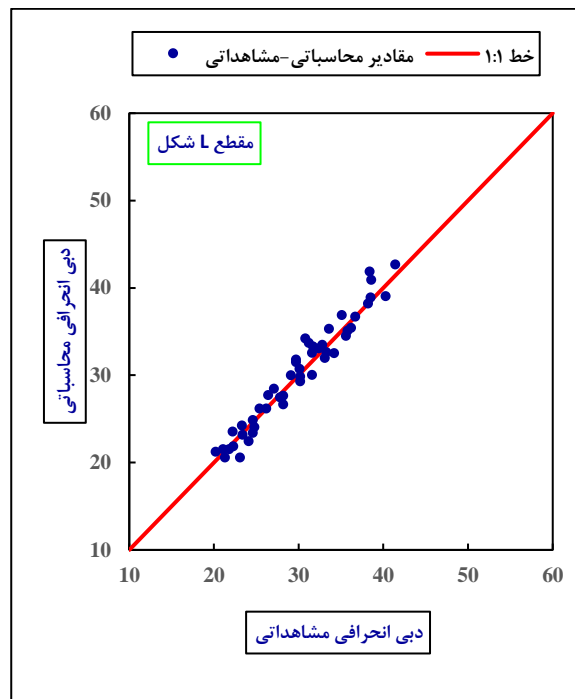
$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)+r \quad (12)$$

این روش را کنکار (Koncar, 1997) ابداع کرده و توسعه داده است. وقتی تعداد عوامل تأثیرگذار بر یک پدیده به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد، می‌توان از آزمون گاما برای تعیین اهمیت متغیرهای ورودی و به‌دست آوردن بهترین ترکیب ممکن از بین ترکیب‌های مختلف استفاده کرد. آزمون گاما با پذیرش مقدار معینی از خطا برای به‌دست آوردن



شکل ۷ - میزان انطباق پذیری خروجی مدل FLOW-3D با داده‌های مشاهداتی در آبشکن T-شکل

Figure 7- Degree of conformity of the FLOW-3D model output with observational data in the T-shaped groyne



شکل ۶ - میزان انطباق پذیری خروجی مدل FLOW-3D با داده‌های مشاهداتی در آبشکن L-شکل

Figure 6- Degree of conformity of the FLOW-3D model output with observational data in the L-shaped groyne

بین صفر تا یک را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه را استاندارد کرد. پارامتر V-Ratio به این شکل تعریف می‌شود:

$$V\text{-Ratio} = \frac{\Gamma}{\sigma^2(y)} \quad (14)$$

در آن معادله $\sigma^2(y)$ واریانس خروجی متغیر y است. هر چه مقدار V-Ratio به صفر نزدیک باشد نشان دهنده آن است که داده‌های ورودی نقش غالبی در پیش‌بینی متغیر y داشته‌اند. در این تست هر چه مقدار آماره Γ و V-Ratio به صفر نزدیک‌تر باشد به این معنا خواهد بود که ترکیب داده‌های ورودی مورد نظر بهینه خواهد بود. در جدول (۴) خلاصه نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از آزمون گاما تست ارائه شده است. طبق داده‌های این جدول، هر سه پارامتر بی‌بعد باید به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده میزان دبی انحرافی استفاده شوند.

در این معادله: x_i داده ورودی، y خروجی و f نشان دهنده تابع همواری است که برای مدلسازی استفاده شده است، Γ متغیر تصادفی نشان دهنده میزان خطاست. در آزمون گامانتست، مقدار آماره گاما برابر با مقدار عرض از مبدأ خط برازش یافته‌ای به قرار معادله زیر است:

$$\gamma = A\delta + \Gamma \quad (13)$$

پارامتر Γ واریانس خروجی مدل و A شیب خط برازش یافته است که اطلاعاتی در خصوص پیچیدگی سیستم مورد بررسی ارائه می‌دهد (Remesan & Mathew, 2016). آزمون گاما روشی است ناپارامتری که بدون توجه به تکنیک‌های خاصی که برای ساخت مدل‌های پیچیده استفاده می‌شود، نتایج معتبری ارائه می‌دهد. بنابراین، با در نظر گرفتن مفهومی دیگر به نام V-Ratio که برآوردی ثابت از مقیاسی

جدول ۴- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مستقل ورودی

Table 4- Results of sensitivity analysis of independent input parameters

V-Ratio	Γ	ترکیب ورودی Input combination	ردیف Row
۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۲۵	φ و $\frac{L}{B}$, Fr	۱
۰/۳۰۷	۰/۲۵۹	φ و $\frac{L}{B}$	۲
۰/۲۳۴	۰/۱۴۵	φ و Fr	۳
۰/۱۹۶	۰/۱۱۱	$\frac{L}{B}$ و Fr	۴

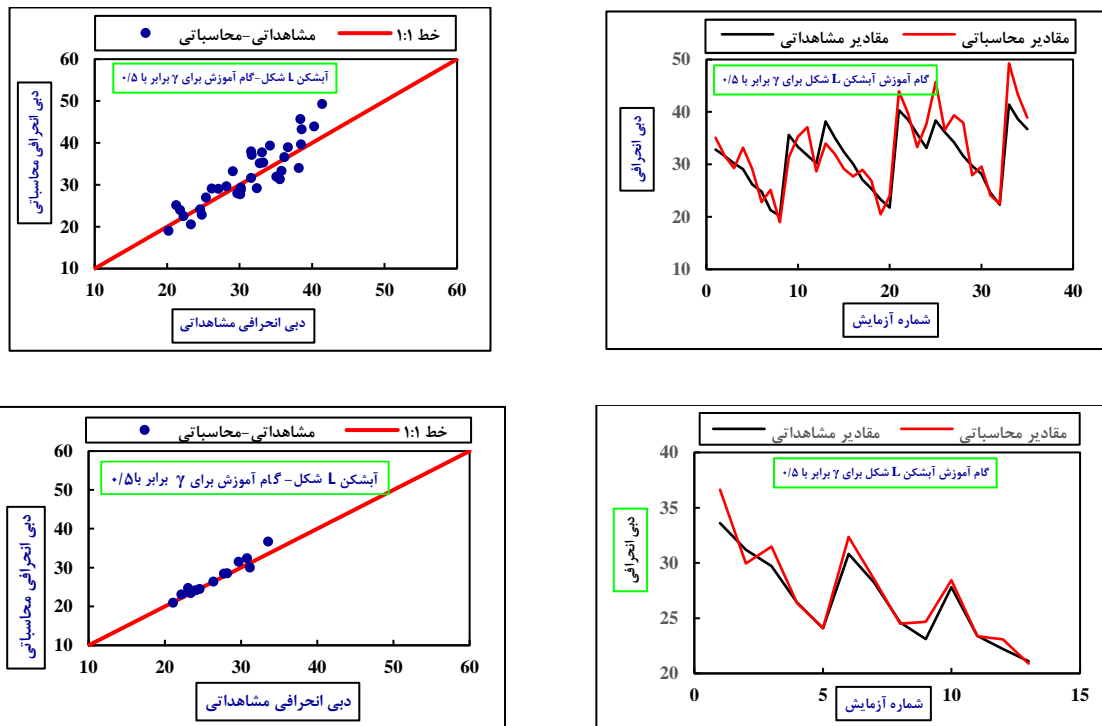
خروجی مدل SVM در مورد مدل SVM، خروجی مدل با استفاده از پارامترهای تنظیمی (C, ϵ, γ) و توابع کرنل مختلف با معیارهای ارزیابی عملکرد بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تابع RBF نسبت به دیگر توابع دقت بیشتری دارد. بنابراین، شبیه‌سازی‌های بهینه با مقادیر مختلف (C, ϵ, γ) برای یافتن بیشترین تطابق بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی از طریق روش آزمون و خطا ادامه یافت. مقدار C و ϵ به ترتیب در مقادیر ۴۰ و ۰/۱۵ منجر به بهینه‌ترین خروجی شدند. خلاصه‌ای از محاسبات بهینه‌سازی پارامتر γ برای دستیابی به دقیق‌ترین خروجی این مدل در جدول (۵) آمده است. مطابق این جدول، ضرایب ارزیابی عملکرد (RMSE, MAE, R^2) برای آبشکن L-شکل در گام آموزش است.

جدول ۵- ارزیابی عملکرد تابع کرنل RBF به ازای مقادیر مختلف γ

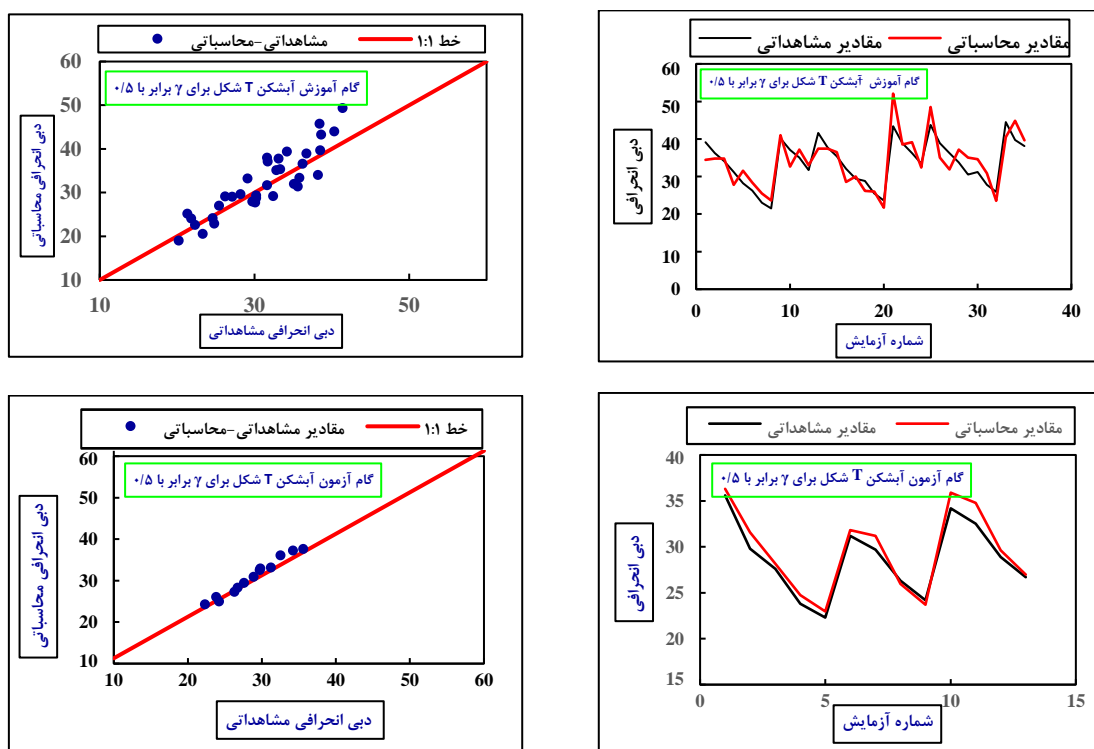
Table 5- Performance evaluation of the RBF kernel function for different γ values

آبشکن L شکل L-shaped groyne						مقدار γ Value of γ	ردیف Row
گام آزمون Testing step			گام آموزش Training step				
R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE		
۰/۶۱۶۶	۱/۵۱۷۲	۲/۳۱۹۶	۰/۳۶۴۲	۳/۰۳۶۹	۴/۷۰۶۵	۰/۱	۱
۰/۴۱۹۸	۲/۲۵۹۱	۳/۱۳۴۱	۰/۴۴۰۰	۲/۴۵۳۰	۳/۹۲۶۴	۰/۲	۲
۰/۶۴۱۹	۱/۷۶۹۹	۲/۶۱۱۵	۰/۵۶۱۳	۲/۵۲۹۷	۳/۷۲۷۶	۰/۳	۳
۰/۷۰۳۵	۱/۴۹۴۱	۲/۱۸۱۱	۰/۶۳۸۶	۲/۳۷۲۲	۳/۷۲۹۳	۰/۴	۴
۰/۹۴۶۹	۰/۵۶۷۷	۱/۰۰۱۳	۰/۸۰۲۳	۱/۶۹۰۰	۲/۶۵۳۹	۰/۵	۵

آبشکن T شکل T-shaped groyne						مقدار γ Value of γ	ردیف Row
گام آزمون Testing step			گام آموزش Training step				
R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE		
۰/۶۲۵۰	۱/۶۷۶۸	۲/۵۸۴۱	۰/۶۱۸۵	۲/۹۴۲۹	۴/۴۳۰۸	۰/۱	۱
۰/۵۵۱۷	۲/۴۳۰۲	۳/۳۹۲۹	۰/۶۶۷	۳/۱۴۰۷	۴/۸۲۱۰	۰/۲	۲
۰/۵۹۵۶	۱/۹۶۰۰	۲/۹۲۸۸	۰/۵۶۵۳	۲/۷۴۱۷	۴/۰۳۹۷	۰/۳	۳
۰/۶۵۰۱	۱/۵۸۹۹	۲/۳۰۴۰	۰/۶۲۱۵	۲/۵۵۳۵	۳/۹۹۲۴	۰/۴	۴
۰/۹۷۷۶	۰/۶۳۰۵	۰/۹۲۲۷	۰/۷۶۴۹	۱/۶۲۰۵	۲/۵۰۸۷	۰/۵	۵



شکل ۸- مقایسه کیفی داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی مدل SVM با تابع کرنل RBF در آبشکن L- شکل
 Figure 8- Qualitative comparison of observational and computational data from the SVM model with RBF kernel function in the L-shaped groyne



شکل ۹- مقایسه کیفی داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی مدل SVM با تابع کرنل RBF در آبشکن T- شکل
 Figure 9- Qualitative comparison of observational and computational data from the SVM model with RBF kernel function in the T-shaped groyne

دومین مدل یادگیری ماشینی که در این پژوهش استفاده شد، مدل GEP بود. مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی این مدل در جدول (۶) ارائه شده است. برای دستیابی به بهینه‌ترین خروجی از مدل GEP، مقادیر مختلفی برای تعداد کروموزم، تعداد ژن و اندازه سر همراه با توابع اتصال مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت موارد ارائه شده در جدول (۶) منجر به انتخاب نهایی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل با ساختار سه ژن برای هر دو نوع آبشکن بهترین خروجی را ارائه داده است. شاخص‌های ارزیابی عملکرد (RMSE, MAE, R²) در مراحل آموزش و آزمون برای آبشکن L-شکل به ترتیب (۰/۹۳۲۵، ۰/۹۸۷۸، ۱/۲۵۳۶) و (۰/۹۸۳۶، ۰/۴۱۰۲، ۰/۶۳۲۵) محاسبه شده‌اند. این مقادیر در مراحل آموزش و آزمون برای آبشکن T-شکل به ترتیب (۰/۹۰۲۵، ۱/۲۵۳۴، ۱/۸۵۰۲) و (۰/۹۸۷۳، ۰/۳۳۳۷، ۰/۴۹۷۲) به دست آمده‌اند. ارزیابی کیفی خروجی مدل GEP برای آبشکن‌های L-شکل و T-شکل به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده است. در این شکل‌ها نیز مشخص است مدلسازی برای دبی‌هایی با مقادیر کم، دقت بیشتری دارد. البته روند بهبود دقت مدلسازی طی گام‌های آموزش تا آزمون برای هر دو آبشکن روشن است.

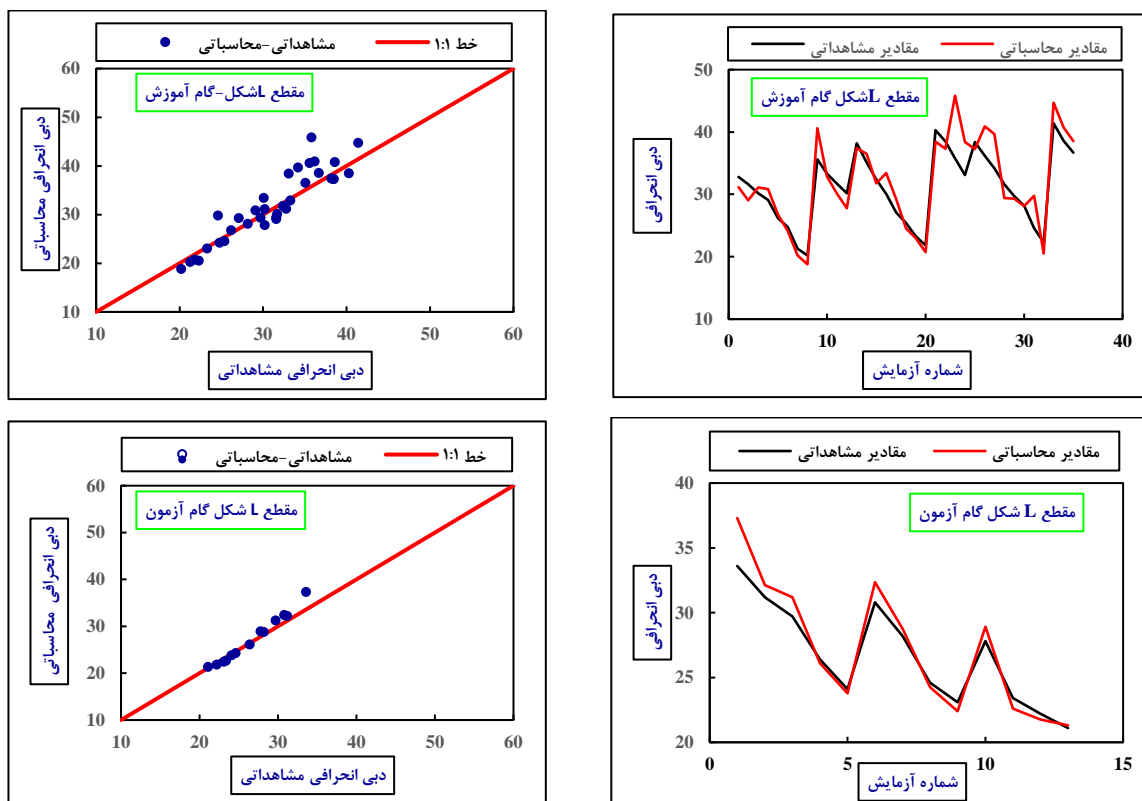
جدول ۶- مقادیر پارامترهای تنظیمی بهینه‌ترین مدل GEP برای آبشکن‌های مورد بررسی

Table 6- Values of parameters for the optimal GEP model for the examined groynes

مقدار Value		پارامتر Parameter
آبشکن T-شکل T-shaped groyne	آبشکن L-شکل L-shaped groyne	
RMSE	RMSE	تابع برازندگی Fitness function
+	+	تابع اتصال ژن‌ها Gene connection function
۵۵	۴۵	تعداد کروموزم Number of chromosomes
۳	۳	تعداد ژن Number of genes
۳۰	۳۰	اندازه رأس Size of vertex
۰/۱	۰/۱	میزان ترکیب Crossover rate
۰/۱	۰/۱	میزان جهش Mutation rate

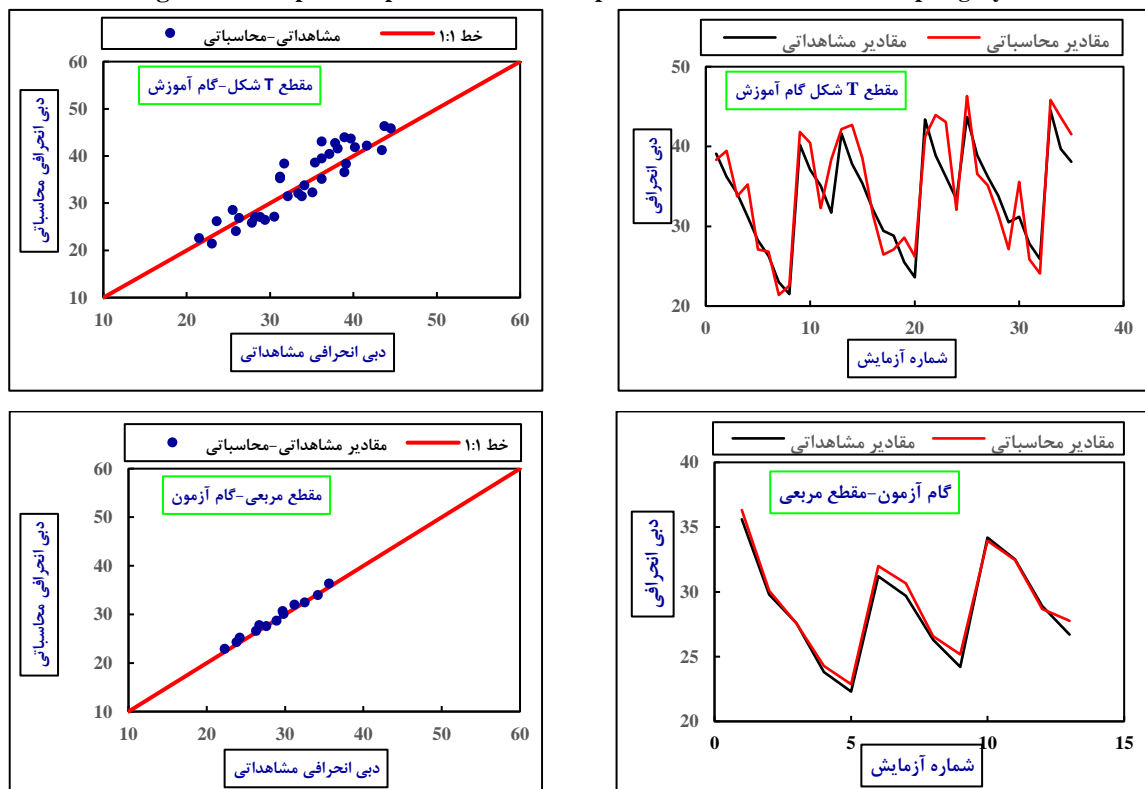
در قالب فاصله شعاعی از داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. هر چه این فاصله کمتر باشد، دقت مدلسازی بالاتر است. با توجه به شکل (۱۳)، روشن است دقت خروجی مدل GEP بیشتر است تا مدل SVM به همین دلیل، در ادامه برای تحلیل شرایط مختلف مقادیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی روی دبی انحرافی از مدل GEP استفاده شده است. حال با استفاده از نتایج به دست آمده در گام آزمون مدل GEP، مقایسه‌ای شده است بین نتایج مرحله صحت‌سنجی مدل GEP با خروجی مدل FLOW-3D در نمودار رسم شده در شکل (۱۴) که نشان می‌دهد مدل GEP دقت بیشتری نسبت به مدل FLOW-3D دارد.

حال با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های ارزیابی عملکرد، لازم است بهترین مدل از بین دو مدل SVM و GEP برای شبیه‌سازی دبی انحرافی انتخاب شود. نمودار ارائه شده در شکل (۱۲) مقایسه بین بهینه‌ترین خروجی مدل‌های SVM و GEP را نشان می‌دهد. در حالی که مقدار R² مربوط به مدل GEP در گام‌های آموزش و آزمون نسبت به مدل SVM مقادیر بیشتری دارد، ضرایب RMSE و MAE که بیانگر میزان انحراف بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی است مقادیر کمتری دارند. مقایسه گرافیکی دیگری با دیاگرام تیلور در شکل (۱۳) ارائه شده است. دیاگرام تیلور براساس ضریب همبستگی و میزان انحراف معیار داده‌های محاسباتی و مشاهداتی، موقعیت خروجی مدل مورد نظر را



شکل ۱۰- بیان گرافیکی از مدل بهینه GEP در آبشکن L-شکل

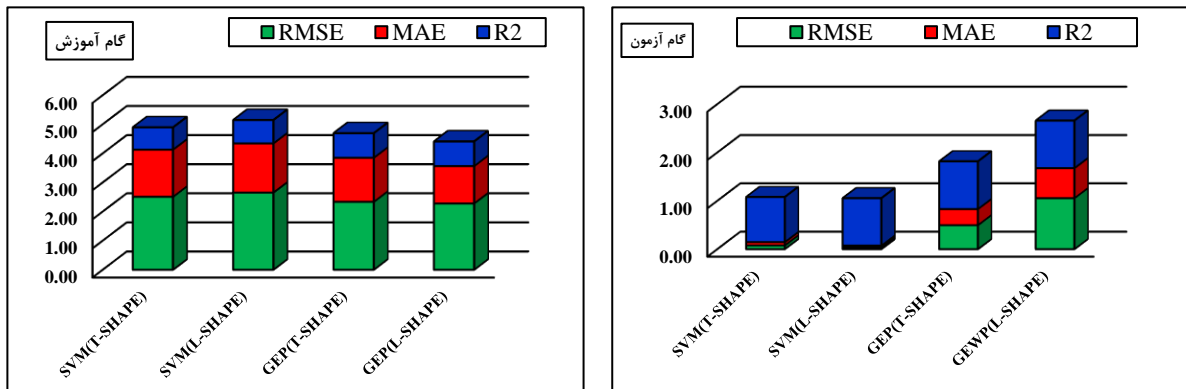
Figure 10- Graphical representation of the optimal GEP model in the L-shaped groyne.



شکل ۱۱- بیان گرافیکی از مدل بهینه GEP در آبشکن T-شکل

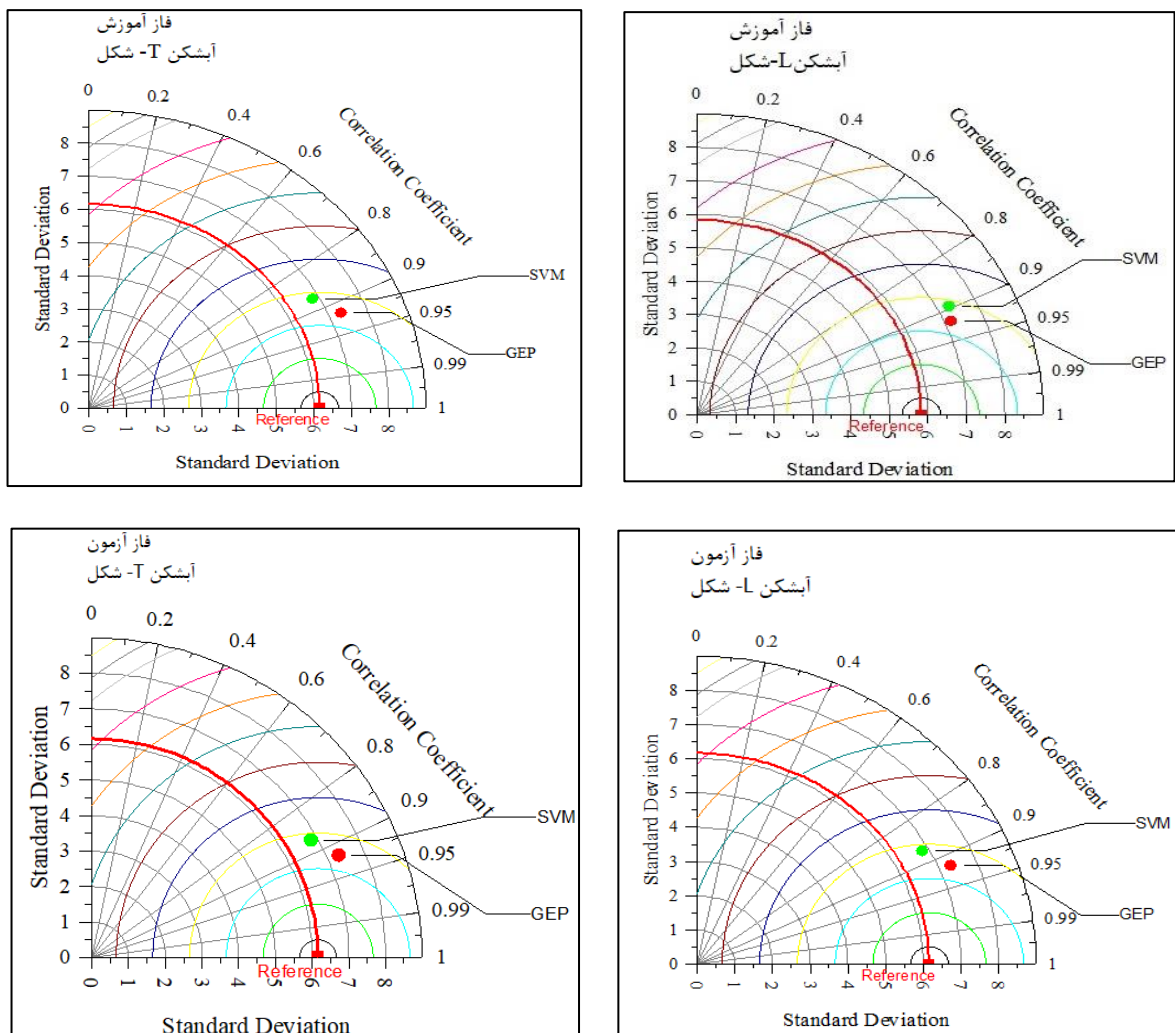
Figure 11- Graphical representation of the optimal GEP model in the T-shaped groyne

شبیه‌سازی عددی دبی آبیگر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی ...



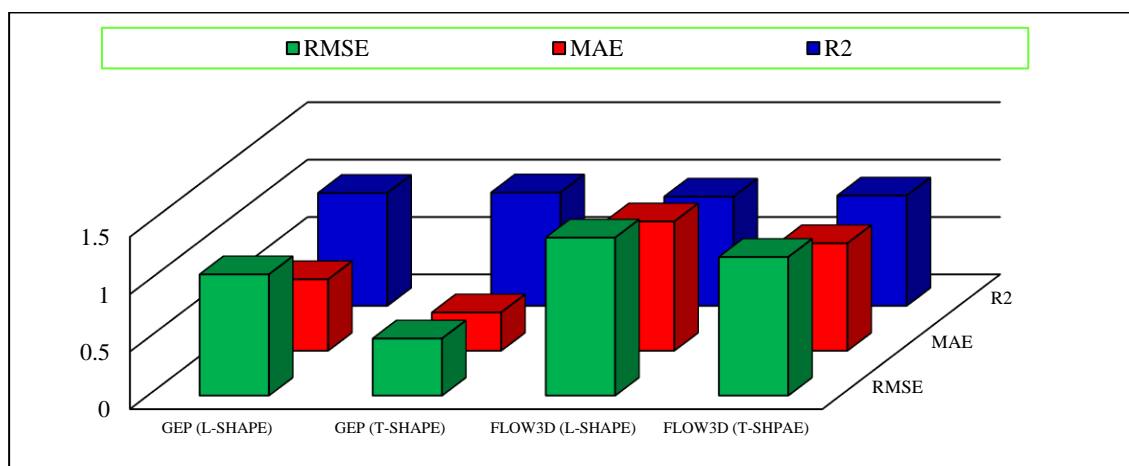
شکل ۱۲- مقایسه خروجی مدل‌های SVM و GEP در گام آموزش و آزمون

Figure 12- Comparison of the outputs of SVM and GEP models in the training and testing phases



شکل ۱۳- دیاگرام تیلور برای خروجی مدل‌های SVM و GEP

Figure 13- Taylor diagram for the outputs of the GEP and SVM models



شکل ۱۴- مقایسه خروجی GEP و FLOW-3D

Figure 14- Comparison of the outputs of FLOW-3D and GEP

استفاده شد. نتایج پژوهش موید آن است که هر سه مدل پتانسیل بسیار مناسبی برای شبیه‌سازی میزان دبی انحرافی به کانال آبیاری را دارند اما در مقام مقایسه، دقت خروجی مدل GEP نسبت به دو مدل دیگر بالاتر است. محاسبات نشان داد مقدار شاخص‌های محاسبه شده ارزیابی عملکرد ($RMSE$, MAE , R^2) برای آبشکن L-شکل در گام آموزش برابر با (۰/۹۳۲۵، ۰/۴۱۰۲، ۰/۶۳۲۵) بودند. مقادیر (۰/۹۰۲۵، ۰/۴۹۷۲، ۰/۳۳۳۷، ۰/۹۸۷۳) و (۱/۸۵۰۲) به ترتیب برای گام‌های آموزش و آزمون آبشکن T-شکل به دست آمدند.

نتیجه‌گیری

چارچوب اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین GEP و SVM با نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی مقدار دبی انحرافی به کانال آبیاری است. بدین منظور از مدل فیزیکی کانال آبیاری نصب شده در فلووم همراه با دو نوع آبشکن L-شکل و T-شکل استفاده شده است. داده‌های گردآوری شده از مدل فیزیکی شامل عدد فرود، زاویه آبیاری از کانال اصلی و طول نسبی آبشکن به عنوان متغیرهای مستقل برای تعیین میزان دبی انحرافی به عنوان پارامتر وابسته استفاده شد. برای مقایسه میزان دقت خروجی این سه مدل از شاخص‌های $RMSE$ ، MAE و R^2

مراجع

- Acharya, A., & Duan, J. G. (2011). Three dimensional simulation of flow field around series of spur dikes. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 2(7), 36-57.
- Aezzi, S., Khanjani, M. J., & Zounemat-Kermani, M. (2018). Two Dimensional Simulation of Flow pattern and Bed Changes in Straight and Meandering Channels under the Effect of Spur Dike. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(4), 970-981. (in Persian)
- Al-Zubaidy, R. A., & Hilo, A. N. (2022). Numerical investigation of flow behavior at the lateral intake using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Materials Today: Proceedings*, 56, 1914-1926.
- Alauddin, M., & Tsujimoto, T. (2011). Optimum Design of Groynes for Stabilization of Lowland Rivers. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), 145-150.
- Ali-Nagizadeh-Behbahani, H. (2013). *Investigating the hydraulic conditions of the flow in reservoirs with a deviation angle of 90 and 75 degrees using a physical model* Shahid Chamran University of Ahvaz]. Ahvaz. (in Persian)
- Aminvash, E., Kalateh, F., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2024). Investigation of the Performance of Soft Computing Methods in the Hydraulic Evaluation of the Slot Fishway on the Inclined Drop. *Journal of Hydraulic Structures*, 10(1), 46-65.

- Behnamtalab, E., Cheshomi, A., & Khamchin-Moghaddam, F. (2019). Numerical simulation of porous spur dyke using Flow 3D software. *Journal of Hydraulics*, 14(1), 35-48. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2019.139136.1306>. (in Persian)
- Chenari, S. A., Nadian, H. A., Ahadiyan, J., Valipour, M., Oliveto, G., & Sajjadi, S. M. (2024). Enhancing Hydraulic Efficiency of Side Intakes Using Spur Dikes: A Case Study of Hemmat Water Intake, Iran. *Water and Soil Science*, 16(16), 2254.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Abraham, J & ,.Bagherzadeh, M. (2021). SVM performance for predicting the effect of horizontal screen diameters on the hydraulic parameters of a vertical drop. *Applied sciences*, 11(9), 4238.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Mirzaee, R., & Abraham, J. (2021). Predicting the energy dissipation of a rough sudden expansion rectangular stilling basins using the SVM algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 8(2), 98-106.
- Esmaeli, P., Bodaghpour, S., Rostami, M., & Mirzaee, M. (2020). Experimental study of Longitudinal Components of Velocity Around Simple Series Spur Dikes. *Irrigation and Water Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.120721>. (in Persian)
- Ferreira, C. (2001). Algorithm for solving gene expression programming: a new adaptive problem. *Complex Systems*, 13(2), 87-129.
- Fuladipannah, M., & Majedi-Asl, M. (2022). Soft Computing Application to Amplify Discharge Coefficient Prediction in Side Rectangular Weirs. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 213-233. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150692>. (in Persian)
- Fuladipannah, M., Majedi-Asl, M., & 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. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.232388,1461>. (in Persian)
- Gupta, L.K., Pandey, M. & Anand Raj, P. (2024). Numerical simulation of local scour around the pier with and without airfoil collar (AFC) using FLOW-3D. *Environ Fluid Mech* 24, 631–649. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09932-2>.
- Hosseini-Asli, N., Parvaresh-Rizi, A., Rostami, M., & Fahoudi, J. (2015). 3D simulation of flow pattern in the vicinity of the inlet canal of lateral intake diversion dam. *Iranian Water Researches Journal*, 9(3), 89-98. (in Persian)
- Kalita, H. M., Sarma, A .K., & Bhattacharjya, R. K. (2014). Evaluation of Optimal River Training Work using GA Based Linked Simulation- Optimization Approach. *Water resources management*, 28(8), 2077-2092.
- Koncar, N. (1997). *Optimisation methodologies for direct inverse neurocontrol (Doctoral dissertation)*. University of London.
- Mandal, A., Gautam, H., & Ahmad, Z. (2024). Sediment control and flow redistribution with submerged vanes: a review. *Water Practice & Technology*, 19(5), 2197-2212.
- Maroofi-nia, E., Asna-Ashari, A., Hassan-Zadeh, Y., Khosh-tinat, S., & Amin-nejad, B. (2016). Investigation of the Effects of Submerged Vanes and Spur Dikes on Sediment Control at Lateral Intakes by SSIIM2 Software. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 169-180. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12505>. (in Persian)
- Remesan, R., & Mathew, J. (2016). *Hydrological data driven modelling*. Springer International Pu.
- Sedaghat-Shayegan, D., & Roosta, M. R. (2024). Numerical Investigation of Block Form Effect in Amount of Dissipated Energy of Baffled Apron Spillway Drop by FLOW-3D. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54.1(114), 56-62. <https://doi.org/10.22034/jcee.2020.13438.1349>. (in Persian)
- Shahinejad, B., Yonesi, H. A., & Mirbeyksabzevari, M. (2023). Optimum Design of spur dikes dimension using multi-objective of harmony search algorithm, Case study: Zanjanrood River. *Hydrogeomorphology*, 10(34), 165-141. <https://doi.org/10.22034/hyd.2023.54639.1670>. (in Persian)
- Shaker, E., & Kashefipour, S. (2014). Experimental Investigation on Velocity and Shear Stress Distributions in a 90-Degree Bend With and Without Series of Groynes. *Water and Soil Science*, 24(3), 55-68. (in Persian)

- Talaat, A., Attia, K., Elsaheed, G., & Ibraheem, M. (2009). Implementation of Spur Dike to Reduce Bank Erosion of Temporary Diversion Channels during Barrages Construction. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3190-3205.
- Vaghefi, M., & Ghodsian, M. (2010). Experimental study on flow field and scour pattern around t shaped spur dike in a 90 degree bend. *Civil engineering infrastructures journal (cej) (journal of faculty of engineering)*. *Sid*, 44(2), 265-276. <https://doi.org/https://sid.ir/paper/166592/en>. (in Persian)
- Vaghefi, M., Ghodsian, M., & Akbari, M. (2017). Experimental investigation on 3D flow around a single T-shaped spur dike in a bend. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(3), 462-470.
- Vapnik, V. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag.
- Yang, J., Shen, Z., Zhang, J., Teng, X., Zhang, W., & Dai, J. (2022). Experimental and numerical investigation of flow over a spillway bend with different combinations of permeable spur dikes. *Water Supply*, 22(2), 1557-1574.
- Zare, M., & Honar, T. (2016). The Effect of Groyne on Reduction of the Scour Depth around Bridge Piers in River Bends. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74), 167-192.

Original Research

Quantitative Simulation of Diverged Flow Using Machine Learning Techniques and FLOW-3D Numerical Modeling

I. Karimi Sarmeydani, M. Heidarnejad*, A. Egdernezhad

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Received: 28 August 2024, **Accepted:** 29 October 2024

Email: mo_he3197@yahoo.com

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2024.366862.1591

Extend Abstract

Intouduction

Groynes at water intake locations significantly increase the flow diverted from rivers by optimizing incoming water control. Vaghefi and Ghodsian (2017) experimentally studied flow patterns around a T-shaped Groyne within a 90-degree arc using a moving bed. Shaker and Kashfipour (2013) compared flow velocity and shear stress distribution with and without Groynes. Behnam-Talab *et al.* (2018) simulated porous Groynes using FLOW-3D software. Shahinejad *et al.* (2022) applied a multi-objective algorithm to optimize T-shaped Groyne dimensions, achieving superior results, compared to previous designs. Zare and Honer (2016) investigated how simple Groynes reduce lateral erosion in river arches under laboratory conditions, emphasizing the influence of Groynes on erosion patterns. These studies collectively highlight the importance of Groyne design in enhancing water extraction and mitigating erosion.

The review of literatures confirms that both laboratory and numerical studies have been conducted to examine the characteristics of various types of Groynes and the impact of flow patterns on them. However, there is a lack of studies addressing the simultaneous application and comparison of numerical and data-driven models in the investigation of geometric and hydraulic characteristics, particularly concerning the effect on the amount of diverted discharge from a canal into intake featuring T-shaped and L-shaped Groynes. Consequently, this research aims to evaluate the performance of two MLMs, specifically SVM and GEP in comparison with the Computational Fluid Dynamics (CFD)-based FLOW-3D model, on a laboratory scale.

Materials and Methods

Groynes play a crucial role in river engineering by regulating river flow. This study assesses the efficacy of two machine learning algorithms—support vector machine (SVM) and gene expression programming (GEP)—in comparison with FLOW-3D software for simulating diverted flow in a laboratory setting. The experimental model was tested in a laboratory flume with T-shaped and L-shaped Groynes positioned at 90 and 135-degree angles to channel the discharge into the intake system. The machine learning models incorporated three independent variables: the flow Froude number, the angle of water intake, and the relative length of the Groynes. Out of 96 laboratory data points, 70% were allocated for model training and 30% for model testing. Model performance was assessed using the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and coefficient of determination (R^2) indices.

Results and Discussion

The results indicated that the GEP model surpassed the SVM model. For the L-shaped Groyne, the values for (R^2 , MAE, RMSE) during both the training and testing phases were (0.9325, 0.9878, 1.2536) and (0.9836, 0.4102, 0.6325), respectively. For the T-shaped Groyne, the corresponding values were (0.9025, 1.2534, 1.8502) during training and (0.9873, 0.3337, 0.4972) during testing. In the FLOW-3D model, after calibration and validation, a Manning's roughness coefficient of 0.035 and the Prandtl's mixing length model were chosen for turbulence simulation. The performance indices during the testing phase for the L-shaped and T-shaped Groynes were (0.9607, 0.9363, 1.2070) and (0.9513, 1.1256, 1.3759), respectively. The GEP model showed a relative advantage over the FLOW-3D model.

Conclusion

This study compares the performance of MLMs (SVM, GEP) with FLOW-3D in simulating diverted flow using T-shaped and L-shaped Groynes. Results from laboratory flume tests showed GEP outperformed SVM and FLOW-3D, particularly in simulating flow diversion, evaluated by RMSE, MAE, and R^2 performance indices.

Keywords: Diverted Flow; Computational Fluid Dynamics; Data-Driven model; Performance Assessment