

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل مقایسه‌ای آبخستگی پایین دست سرریز مرکب مثلثی - مثلثی با استفاده از روش کلاسیک

و مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان

ساسان نجاتی^۱، مهدی مفتاح هلقی^{۲*}، عبدالرضا ظهیری^۳ و یونس امین پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

چکیده

پدیده آبخستگی در پایین دست سرریزهای مرکب یکی از مسائل مهم در طراحی و ارزیابی ایمنی سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود. در این پژوهش، عملکرد یک مدل کلاسیک تجربی و یک مدل مبتنی بر هوش مصنوعی از نوع ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پیش‌بینی سه پارامتر کلیدی آبخستگی شامل بیشینه عمق، محل وقوع بیشینه و طول کلی حفره مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های فیزیکی روی یک مدل سرریز مرکب مثلثی - مثلثی در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شد و داده‌های حاصل به‌عنوان مبنای ارزیابی مدل‌ها استفاده گردید. نتایج نشان داد که اگرچه مدل کلاسیک توانسته است روند کلی تغییرات آبخستگی را بازتاب دهد، اما میزان خطاهای آماری آن در بازه‌های نسبتاً بالایی قرار داشته است (MARE بین ۱۳ تا ۲۰ درصد). در مقابل، مدل SVM با دقت بسیار بالاتری عمل کرده و توانست خطای نسبی را به کمتر از ۲ درصد کاهش دهد. تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که مدل هوش مصنوعی با قدرت تعمیم‌پذیری بالا، گزینه‌ای مطمئن برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار آبخستگی در شرایط آزمایشگاهی است. با این حال، استفاده ترکیبی از دو رویکرد، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ و حساس، می‌تواند هم دقت پیش‌بینی و هم کارایی محاسباتی را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: حفره آبخستگی، سرریز مرکب مثلثی - مثلثی، مدل ماشین بردار پشتیبان، مدل کلاسیک تجربی

مقدمه

قابل توجهی تغییر می‌یابد. این دگرگونی هیدرولیکی می‌تواند منجر به پدیده‌هایی چون تشکیل گردابه، جدایش جریان و امواج آشفته در پایین دست شود؛ شرایطی که بستر را مستعد وقوع پدیده آبخستگی می‌سازد.

در چنین وضعیتی، انرژی بالای جریان به بستر منتقل شده و موجب جابه‌جایی ذرات رسوبی و شکل‌گیری حفره‌هایی عمیق در نزدیکی پایه‌های سرریز می‌گردد. عمق و وسعت این حفرات تحت تأثیر عواملی چون نوع مصالح بستر، الگوی جریان و ویژگی‌های هندسی سازه قرار دارد. در سرریزهای مرکب با فرم مثلثی-مثلثی، به دلیل تمرکز جریان در بخش میانی، افزایش محسوس سرعت جریان مشاهده می‌شود که این موضوع پتانسیل آبخستگی را تشدید می‌کند؛ بنابراین، تحلیل دقیق این پدیده و بررسی توزیع تنش برشی در سطح بستر به‌منظور شناسایی نواحی بحرانی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تضمین پایداری سازه دارد.

در دهه‌های اخیر، مطالعات زیادی به بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای مرکب اختصاص یافته است. برای نمونه، مارتینز و

سرریزهای مرکب به‌عنوان یکی از گزینه‌های کارآمد برای تخلیه ایمن جریان‌های دارای نوسانات زیاد، در طراحی سازه‌های هیدرولیکی اهمیت ویژه‌ای دارند. این سرریزها با ترکیب هندسه‌های مختلف، امکان عملکرد چندمرحله‌ای را فراهم می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که در دبی‌های پایین، تنها بخش میانی فعال است، اما با افزایش ناگهانی جریان، اجزای جانبی نیز وارد عمل شده و الگوی جریان به طور

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۴- استادیار پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران

(Email: meftah@gau.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

طول حوضچه آرامش می‌تواند عمق بیشینه آبستتگی را تا حدود ۷۸ درصد کاهش دهد. همچنین روابطی تجربی برای پیش‌بینی عمق، مکان و حجم حفره استخراج و ارائه شد. مقایسه عملکرد سرریز پلکانی با سرریز اوجی حاکی از آن است که تلفات انرژی بیشتر در سرریز پلکانی منجر به کاهش قابل توجه در میزان آبستتگی می‌شود. علاوه بر آن، افزایش عدد فرود و کاهش شیب سرریز، منجر به افزایش عمق و طول حفره گردید.

رضازاده و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله‌ای با هدف تخمین دقیق عمق آبستتگی پایه پل در خاک‌های چسبنده، از شبکه عصبی مصنوعی به همراه الگوریتم ژنتیک استفاده کرده است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی با ضریب همبستگی ۰/۹۷ و خطای پایین‌تر نسبت به معادلات تجربی، عملکرد بهتری دارد و روش‌های هوش مصنوعی را به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی پیچیده معرفی می‌کند.

روشنگر و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی دیگر به مقایسه روش‌های تجربی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم برنامه‌نویسی ژن برای پیش‌بینی عمق آبستتگی در پایین‌دست انواع سازه‌های کنترل جریان پرداختند. آن‌ها دریافتند که شبکه‌های عصبی پیش‌خور (Feedforward ANN) در مقایسه با دیگر روش‌ها از دقت پیش‌بینی بالاتری برخوردارند؛ این برتری در مورد سازه‌هایی مانند سرریزهای متصل به پرتاب‌کننده جامی، کنترل شیب لبه‌تیز و میل نیز مشهود بود.

در مطالعه‌ای تجربی دیگر، عبیدا و همکاران تأثیر کف‌بند‌های صلب بر فرایند آبستتگی در پایین‌دست سرریزهای لبه‌تیز را بررسی کردند. یافته‌ها حاکی از آن بود که نصب کف‌بند حفاظتی موجب کاهش ۱۹.۳ درصدی در عمق نهایی حفره آبستتگی می‌شود که این امر نشان‌دهنده اثربخشی چنین راهکارهایی در کنترل فرسایش و افزایش پایداری سازه‌های هیدرولیکی است (Obaida et al., 2023). اقبال خرمی و همکاران (۱۴۰۱) نیز در پژوهشی ترکیبی با بهره‌گیری از مدل‌سازی آزمایشگاهی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، به تحلیل فرایند آبستتگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی پرداختند. پارامترهایی چون دبی جریان، ارتفاع انرژی، مشخصات فیزیکی رسوبات بستر (از جمله میانگین قطر ذرات) و زاویه پرتاب جت خروجی، به‌عنوان ورودی به مدل‌ها معرفی شدند. نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در مقایسه با روابط تجربی سنتی و مدل‌های تحلیلی، عملکرد دقیق‌تر و پایاتری در پیش‌بینی عمق حفره آبستتگی دارند؛ به‌ویژه در شرایط پیچیده و متغیر هیدرولیکی.

در همین راستا، شهرام موسوی (۱۴۰۰) عملکرد سه الگوریتم هوشمند شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) را برای

همکاران در یک پژوهش آزمایشگاهی، کارایی سرریزهای مرکب لبه‌تیز با فرم مثلثی-مثلثی را در سدهای رسوب‌گیر واقع در مناطق کوهستانی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند این سرریزها ضمن حفظ پیوستگی منحنی دبی-اشل در دامنه وسیعی از شرایط، دقت بالایی در اندازه‌گیری دبی در جریان‌های کم و زیاد دارند. همچنین با طراحی نسخه‌هایی متنوع از این سرریز و اعمال تغییراتی در پارامترهای هندسی، مدلی برای تخمین ضریب دبی کل ارائه دادند که از دقت مناسبی برخوردار بود (Martínez et al., 2005).

جان و همکاران (Jan et al., 2006) با پیروی از رویکرد مطالعاتی مارتینز و همکاران (Martínez et al., 2005)، در یک تحقیق آزمایشگاهی، عملکرد چهار نوع سرریز لبه‌تیز مرکب شامل ترکیب‌های مستطیلی-مستطیلی، مستطیلی-ذوزنقه‌ای، مثلثی-مستطیلی و مثلثی-ذوزنقه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند و ضریب دبی هر یک را محاسبه کردند. در این بررسی، مشابه روش مارتینز و همکاران، سرریزها به بخش‌هایی با هندسه‌های متمایز تقسیم شده و دبی عبوری بر اساس ترکیب این بخش‌ها تعیین شد.

همچنین در پژوهشی آزمایشگاهی توسط علی و همکاران، ضریب دبی در سرریزهای ساده و مرکب مثلثی با زوایای مختلف بررسی شد. آن‌ها با آزمایش پنج مدل شامل سه سرریز ساده (با زوایای ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه) و دو مدل مرکب (ترکیب‌های ۹۰/۱۲۰ و ۱۲۰/۱۵۰)، بیش از ۳۰ آزمایش در بازه دبی ۰/۴۶ تا ۴۷/۶۲ لیتر بر ثانیه انجام دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد ضریب دبی با افزایش زاویه سرریز افزایش می‌یابد و در بسیاری موارد، مدل‌های مرکب عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های ساده دارند. علاوه بر این، آن‌ها رابطه‌ای تجربی برای محاسبه ضریب دبی ارائه کردند که بر پایه داده‌های آزمایشگاهی قابل اطمینان بود (Ali et al., 2015).

در مطالعه‌ای دیگر، گوغوش و همکاران عملکرد سرریزهای مرکب پهن با ترکیب مستطیلی-مستطیلی را در کانال‌های باز مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با مقایسه ۹ مدل مرکب و یک مدل ساده، اثر تغییر عرض تاج پایینی و ارتفاع پله بر روی ضریب تخلیه و سرعت جریان را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که افزایش عرض تاج پایینی موجب بهبود ضریب تخلیه می‌شود، هرچند این نوع سرریزها نسبت به انواع ساده، حساسیت بیشتری به شرایط جریان پایین‌دست دارند (Göğüş et al., 2006).

پژوهش‌های متعددی با هدف شناخت بهتر پدیده آبستتگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی، به‌ویژه سرریزها، انجام شده است. در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، امین‌پور و همکاران (۱۳۹۳) با اجرای ۶۷ آزمایش، تأثیر عواملی نظیر طول و عمق حوضچه آرامش، شیب سرریز پلکانی، دبی جریان و ویژگی‌های فیزیکی بستر را بر ابعاد حفره آبستتگی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش

عدم قطعیت در رفتار سامانه‌های آبی، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی همچون ANN، ANFIS و SVM به طور گسترده در مطالعات اخیر رواج یافته است. ارزیابی کارایی این مدل‌ها در مطالعات مختلف، دقت بالا و قابلیت سازگاری آن‌ها را در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده به خوبی نشان می‌دهد (Li & Tsai, 2009).

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقت و کارایی روش‌های مختلف در پیش‌بینی ابعاد آبخستگی پایین‌دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی، از دو رویکرد کلاسیک و هوش مصنوعی استفاده شد. در روش کلاسیک، یک رابطه چندجمله‌ای درجه سوم بر اساس داده‌های آزمایشگاهی استخراج گردید. در مقابل، از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز به عنوان روش مبتنی بر هوش مصنوعی بهره گرفته شد. این مقایسه می‌تواند ارزیابی دقیقی از عملکرد دو رویکرد در مدل‌سازی پدیده‌ای پیچیده؛ مانند آبخستگی در پایین‌دست سرریزهای مرکب ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

بررسی آزمایشگاهی آبخستگی پایین‌دست سرریز مرکب مثلثی - مثلثی

سرریز مرکب مثلثی-مثلثی یکی از انواع پرکاربرد سازه‌های کنترلی در مهندسی منابع آب به شمار می‌رود که به منظور تنظیم، اندازه‌گیری و هدایت جریان در کانال‌های روباز، رودخانه‌ها و حوضچه‌های آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع سرریز با تلفیق هندسه چند سرریز مثلثی در قالب یک ساختار یکپارچه، عملکردی دوگانه دارد؛ به طوری که در شرایط دبی پایین مشابه یک سرریز ساده عمل کرده و با افزایش دبی، به واسطه‌ی افزایش بار هیدرولیکی در بالادست، ظرفیت عبور جریان را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. این قابلیت منجر به بهبود دقت اندازه‌گیری جریان، کاهش تلاطم در بالادست، و کاهش احتمال وقوع جریان برگشتی در شرایط جریان ناپایدار می‌شود.

در این تحقیق، به منظور بررسی رفتار آبخستگی در پایین‌دست این نوع سرریز، مجموعه‌ای از آزمایش‌های فیزیکی در یک فلوم آزمایشگاهی انجام شده است. سرریز مورد استفاده از جنس فلزی و با لبه‌ای از جنس برنج طراحی و ساخته شده و به گونه‌ای مهندسی شده است که بتواند شرایط متنوع هیدرولیکی را در دبی‌های مختلف شبیه‌سازی نماید. سرریز مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است. هندسه سرریز شامل دو بخش مثلثی با زوایای داخلی ۹۰ و ۱۵۰ درجه است که به صورت ترکیبی در یک ساختار مرکزی جای گرفته‌اند. ابعاد نمونه آزمایشگاهی شامل ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و عرض کلی ۱۰۰ سانتی‌متر بوده که به منظور انطباق با مقیاس فلوم و بررسی دقیق اثرات هیدرولیکی طراحی شده‌اند.

پیش‌بینی عمق آبخستگی در پایین‌دست سرریزهای لبه‌تیز بررسی کرد. تحلیل‌ها نشان داد که مدل ANFIS در مقایسه با ANN و SVM به ترتیب به میزان ۲۰ و ۸/۵ درصد عملکرد بهتری داشته است. همچنین مشخص شد که افزودن بیش از حد پارامترهای ورودی لزوماً منجر به بهبود دقت مدل نمی‌شود و انتخاب بهینه متغیرها از اهمیت بالایی برخوردار است.

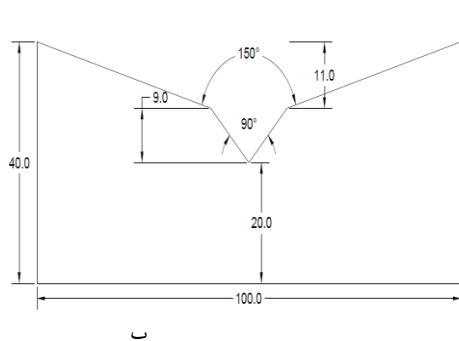
محمدنژاد و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای، عمق آبخستگی پایین‌دست شب‌شکن قائم را با استفاده از روش یادگیری ماشین SVM و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی کردند. سه مدل مختلف با ورودی‌های بدون بعد شامل عدد فرود ذره رسوبی و عمق نسبی پایاب آزمایش شدند. بهترین عملکرد مربوط به مدلی با ترکیب این دو پارامتر بود که ضریب تعیین بالا و خطای نسبتاً کم نشان داد. نتایج بیانگر دقت مناسب روش SVM در پیش‌بینی عمق نسبی آبخستگی و اهمیت بیشتر عدد فرود نسبت به عمق پایاب در این پیش‌بینی بودند.

در پژوهشی دیگر، چوئی و سئونگ ووک به پیش‌بینی عمق آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های پل در بسترهای رسوبی چسبیده با استفاده از روش یادگیری ماشین SVM پرداختند. آن‌ها نشان دادند که SVM نسبت به روش‌های موجود، مدل‌های رگرسیون و ANFIS عملکرد دقیق‌تری دارد. بررسی‌ها همچنین نشان دادند که کیفیت داده‌های آموزشی و نقش متغیرهای ورودی در دقت پیش‌بینی بسیار مؤثر هستند (Choi and Seongwook, 2022).

ماجدی اصل و همکاران نیز در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین QNET و SVM به پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای قوسی ماریچ با زاویه ۶ درجه پرداختند. هر دو الگوریتم دقت بالایی در مدل‌سازی نشان دادند، ولی SVM اندکی عملکرد بهتری داشت. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که نسبت بار کل آب نقش کلیدی در تعیین ضریب دبی دارد. این مطالعه نشان‌دهنده توانایی بالای مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی دقیق رفتار هیدرولیکی سرریزهای پیچیده است (Majedi-Asl et al., 2024).

گرچه مدل‌های عددی مبتنی بر قوانین فیزیکی ابزارهای توانمندی در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی به شمار می‌روند، اما نیاز به داده‌های دقیق، زمان محاسباتی بالا و پیچیدگی ساختاری، کارایی آن‌ها را در برخی موارد با محدودیت مواجه می‌سازد. در مقابل، مدل‌های داده‌محور نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی، به واسطه‌ی قابلیت درک الگوهای غیرخطی و عدم وابستگی مستقیم به روابط فیزیکی، گزینه‌ای مناسب برای پیش‌بینی پدیده‌هایی چون آبخستگی در شرایط کم داده و پیچیده به شمار می‌آیند (Nourani et al., 2017).

با رشد روزافزون پیچیدگی در تحلیل فرایندهای هیدرولیکی و نیز



شکل ۱ - سرریز مرکب مثلثی - مثلثی مورد مطالعه: الف) مدل ساخته شده در کارگاه ب) طرح شماتیک سرریز

دانه‌بندی مصالح رسوبی مورد استفاده در شکل ۳ نمایش داده شده است. آب مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها از مخزن ذخیره مرکزی مؤسسه، با ظرفیت تقریبی ۸۰۰ مترمکعب، تأمین شد. انتقال آب از مخزن به ورودی فلوم از طریق یک پمپ گریز از مرکز مدل ۲۹-۲۵۰ انجام گرفت که قادر به تأمین دبی‌های مختلف با کنترل دقیق بوده و شرایط لازم برای تکرارپذیری آزمایش‌ها را فراهم کرده است.

برای اندازه‌گیری دبی جریان، از یک سرریز لبه‌تیز مستطیلی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۹۰ سانتی‌متر که در انتهای پایین دست فلوم نصب شده بود، استفاده شد. محاسبه دبی عبوری از این نوع سرریز بر اساس رابطه کلی سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی صورت می‌گیرد که به صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در این رابطه، Q ، دبی (مترمکعب بر ثانیه)؛ C_d ، ضریب دبی؛ L ، طول سرریز (متر)؛ h ، بار آبی بالادست سرریز (متر) و g ، شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) می‌باشد. تغییرات ضریب دبی جریان به صورت تابعی از h/p ، p ارتفاع سرریز بر حسب متر می‌باشد، بر اساس معادله ربوک و به صورت زیر بیان می‌شود (Rehbock, 1929):

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{p} \quad (2)$$

مشخصات سامانه آزمایشگاهی و شرایط اجرای آزمایش‌ها

به منظور بررسی دقیق پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز مرکب مثلثی-مثلثی، آزمایش‌ها در یک سامانه فیزیکی واقع در فلوم آزمایشگاهی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو طراحی و اجرا گردید. مدل فیزیکی سرریز، مطابق شکل ۱، درون فلومی با طول ۶/۷ متر و عرض داخلی ۹۰ سانتی‌متر نصب شد. این فلوم به گونه‌ای طراحی شده که بتواند شرایط جریان آزاد با قابلیت مشاهده مستقیم و کنترل دقیق دبی را فراهم آورد. بدنه فلوم در یک سمت دارای دیواره‌ای از جنس شیشه شفاف با ضخامت ۸ میلی‌متر بوده که امکان ثبت تصویری دقیق از فرایند آبشستگی را فراهم می‌سازد؛ درحالی که قسمت مقابل از بلوک‌های بتنی مسلح تشکیل شده تا مقاومت سازه‌ای فلوم حفظ شود.

مطابق شکل ۲، در انتهای پایین دست فلوم، یک حوضچه آرامش از جنس پلکسی‌گلاس تعبیه شده است تا با کاهش انرژی جریان خروجی، شرایط وقوع آبشستگی در بستر رسوبی به‌طور دقیق‌تری قابل ارزیابی باشد. برای جمع‌آوری رسوبات جابه‌جا شده، یک مخزن مدرج مکعب مستطیل به طول ۹۰ سانتی‌متر (شکل ۳-ب) در انتهای سامانه تعبیه شد. این مخزن امکان مشاهده میزان جابجایی و توزیع رسوبات را پس از هر آزمایش فراهم می‌سازد.

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی بستر رسوبی طبیعی، از رسوبات یکنواخت با قطر متوسط ۰/۵ میلی‌متر استفاده گردید. منحنی

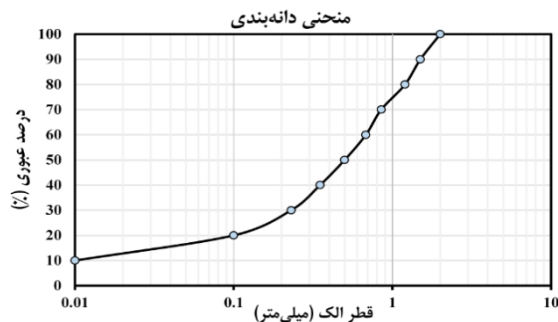


(ب)



(الف)

شکل ۲- فلوم آزمایشگاهی استفاده شده در این مطالعه: الف) نمای داخلی ب) ناحیه مدرج تعبیه شده برای تعبیه رسوب



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ذره رسوبی مورد استفاده

روش برداشت نیمرخ‌های طولی حفره آبخستگی و پارامترهای مؤثر در آزمایش

به منظور ثبت و تحلیل دقیق تغییرات هندسی ناشی از آبخستگی در پایین دست سرریز مرکب، از روش تصویربرداری دیجیتال و پردازش داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار Grapher استفاده شد. این رویکرد امکان استخراج نیمرخ‌های طولی حفره آبخستگی را با دقت بالا و بدون دخالت مستقیم در بستر آزمایش فراهم می‌سازد. در این فرایند، دوربین دیجیتال بر روی یک سه‌پایه ثابت نصب شده و به گونه‌ای تنظیم گردید که عمود بر سطح جریان و منطقه مورد نظر از حوضچه آبخستگی قرار گیرد. با تنظیم فاصله کانونی مناسب، تصاویر با وضوح بالا از کل منطقه آبخستگی در بازه‌های زمانی مشخص ثبت شد. موقعیت نصب دوربین به گونه‌ای انتخاب شد که هم‌راستا با محور

طولی فلوم بوده و از بروز خطای دید در تصاویر جلوگیری شود. آزمایش‌های صورت گرفته شامل چهار سناریوی مجزای جریان با دبی‌های مختلف در بازه ۷/۰۸ تا ۵۴/۹۴ لیتر بر ثانیه بود. هر آزمایش به مدت سه ساعت به طول انجامید و در طی آن، در ۱۷ بازه زمانی متوالی، تصاویر ثبت و نیمرخ‌های حفره برداشت شد. این بازه زمانی برای مشاهده روند شکل‌گیری، توسعه، و پایداری حفره آبخستگی در طول زمان مناسب تشخیص داده شد. خلاصه‌ای از روند اجرایی آزمایش‌ها، به همراه بازه تغییرات پارامترهای مؤثر بر آبخستگی (شامل دبی جریان، مشخصات هندسی سرریز، و ویژگی‌های رسوب)، در جدول ۱ ارائه شده است. این داده‌ها، پایه تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی در مراحل بعدی تحقیق را تشکیل می‌دهند و در ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

دبی (لیتر بر ثانیه)	عرض فلوم (سانتی‌متر)	عمق آب بالادست سرریز (سانتی‌متر)	عمق آب پایین دست سرریز (سانتی‌متر)
۷/۰۸		۵۳/۴	۳۱/۲
۱۵/۹		۵۶/۵	۱۱/۵
۳۷/۳۵	۹۰	۵۹/۵۳	۳۵/۱۵
۵۴/۹۴		۶۲/۷۰	۴۱/۰۴

استخراج پارامترهای بدون بعد

در راستای تحقق اهداف این پژوهش، نخست مجموعه‌ای از متغیرهای مؤثر بر شکل‌گیری و گسترش حفره آبخستگی در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی شناسایی شد. این مرحله از طریق بررسی دقیق پیشینه مطالعات، تحلیل نتایج آزمایشگاهی، و ارزیابی روابط فیزیکی بین پارامترهای هیدرولیکی و هندسی انجام گرفت. در این فرایند، متغیرهایی که تأثیر ناچیزی بر ابعاد نهایی حفره داشتند، از چرخه تحلیل حذف شدند تا ضمن کاهش پیچیدگی مدل‌سازی، تمرکز بر عوامل کلیدی و اثرگذار حفظ شود. بر این اساس، مشخص شد که هندسه نهایی حفره آبخستگی را

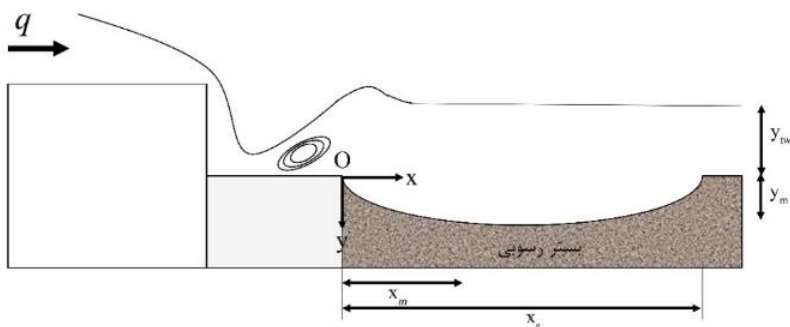
می‌توان به عنوان تابعی از چندین عامل اصلی در نظر گرفت. این عوامل که ترکیبی از شرایط جریان، ویژگی‌های هندسی سرریز و خصوصیات فیزیکی بستر می‌باشند، پایه ورودی مدل‌سازی عددی و هوشمند در مراحل بعدی تحقیق را تشکیل می‌دهند. همچنین از آنجا که ابعاد حفره آبخستگی با گذشت زمان تغییر می‌کند، دیگر پارامتر حاکم بر این پدیده، زمان (t) خواهد بود.

$$f(\text{Scour}) = \quad (3)$$

$$f(x_m, y_m, x_s) =$$

$$f(\rho, \mu, \rho_s, D_{50}, p, q, y_{tw}, y_h, g, t, x_m, y_m, x_s) = 0$$

در شکل ۴ پارامترهای مؤثر بر پدیده آبخستگی در پایین دست سرریز مرکب مثلثی-مثلثی مشاهده می‌شود.



شکل ۴- پارامترهای مؤثر بر پدیده موردنظر

پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی را می‌توان به صورت یک نیمرخ بی‌بُعد واحد توصیف کرد. برای این منظور، محققان مختلف در طول سال‌ها معادلات متعددی را برای مدل‌سازی نیمرخ‌های بی‌بُعد آبشستگی ارائه کرده‌اند. این معادلات معمولاً به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با استفاده از داده‌های تجربی، ابعاد و ویژگی‌های هندسی حفره آبشستگی در شرایط مختلف جریان را شبیه‌سازی کنند. در این پژوهش، بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده وجود نوعی تشابه در هندسه حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی است که می‌تواند به عنوان مبنای استخراج معادله‌ای عمومی برای توصیف نیمرخ طولی حفره استفاده شود. بر اساس برآزش دقیق داده‌های آزمایشگاهی، یک معادله درجه سوم برای توصیف هندسه حفره آبشستگی به دست آمد که قادر است روند تغییرات طولی و عمقی آبشستگی را در شرایط مختلف جریان پیش‌بینی کند.

این معادله عمومی به طور مؤثر می‌تواند به عنوان یک ابزار تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار آبشستگی در سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی به کار گرفته شود و در طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌های هیدرولیکی کمک شایانی نماید. شکل ریاضی معادله به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{y}{y_m} = a_0 + a_1 \frac{x}{x_m} + a_2 \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{x_m}\right)^3 \quad (7)$$

با تعریف ضرایب $K_1 = x_m/y_m$ و $K_2 = x_s/y_m$ و همچنین، استفاده از شرایط مرزی ابتدای حفره $O(0, -\varepsilon \cdot y_m)$ ، انتهای حفره $S(K_2 \cdot y_m, 0)$ و محل حفره با حداکثر عمق و با دو شرط $M(K_1 \cdot y_m, -1)$ و $\frac{dy}{dx}(x = x_m) = 0$ خواهیم داشت:

در رابطه ۳، y_m ، عمق بیشینه آبشستگی (متر)؛ x_m ، فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره (متر)؛ x_s ، طول حفره آبشستگی؛ ρ ، گرانروی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ ρ_s ، گرانروی ذره رسوبی (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ μ ، گرانروی دینامیکی سیال (نیوتن ثانیه بر مترمربع)؛ D_{50} ، دانه‌بندی ذرات رسوبی (متر)؛ p ، ارتفاع سرریز (متر)؛ q ، دبی در واحد عرض سرریز (مترمربع بر ثانیه)؛ y_{tw} ، عمق آب پایین دست سرریز (متر)؛ y_h ، عمق آب بالادست سرریز (متر)؛ g ، شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) و t ، زمان (ثانیه) است. با توجه به اینکه دو زاویه سرریز ثابت در نظر گرفته شده است، جزو پارامترهای مؤثر لحاظ نگردیده است. با استفاده از روش π باکینگهام، تحلیل ابعادی و بی بعدسازی به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\left(\frac{y_m}{D_{50}}, \frac{x_m}{D_{50}}, \frac{x_s}{D_{50}}\right) = \varphi \left(\frac{y_{tw}}{D_{50}}, \frac{y_h}{D_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{t}{t_0}, Fr_D, \frac{\mu}{\rho \cdot D_{50} \cdot \sqrt{g \cdot D_{50}}}\right) \quad (4)$$

در این تحقیق، t_0 زمان مشخصه می‌باشد که به صورت $t_0 = \sqrt{\frac{D_{50}}{g}}$ در نظر گرفته شده است و Fr_D ، عدد فرود ذره است که بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

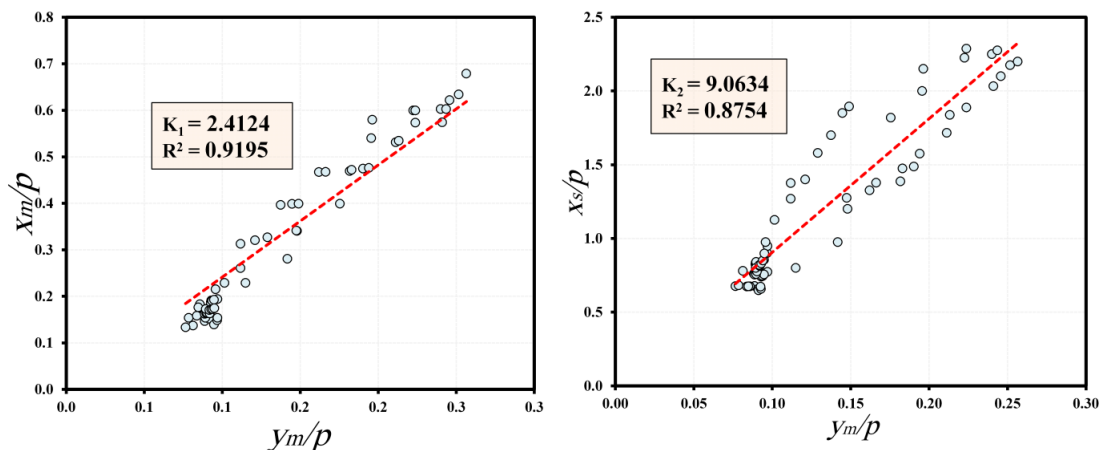
$$Fr_D = \frac{q}{\sqrt{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) D_{50}^3}} \quad (5)$$

با توجه به لحاظ نمودن پارامتر D_{50} در بخش‌های مختلف معادله (۴) و همچنین صرف نظر کردن از پارامتر $\frac{\mu}{(\rho \cdot D_{50} \cdot \sqrt{g \cdot D_{50}})}$ به دلیل ثابت بودن آن، معادله (۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

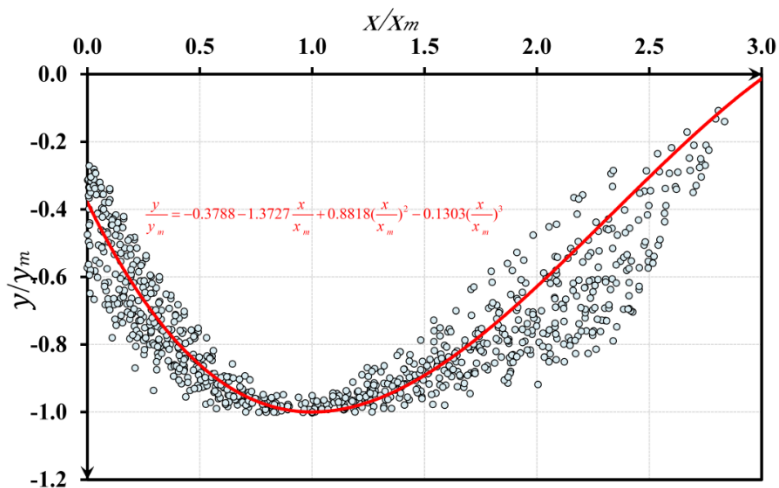
$$\left(\frac{y_m}{D_{50}}, \frac{x_m}{D_{50}}, \frac{x_s}{D_{50}}\right) = \varphi \left(\frac{y_{tw}}{y_h}, \frac{t}{t_0}, Fr_D\right) \quad (6)$$

مدل کلاسیک تجربی

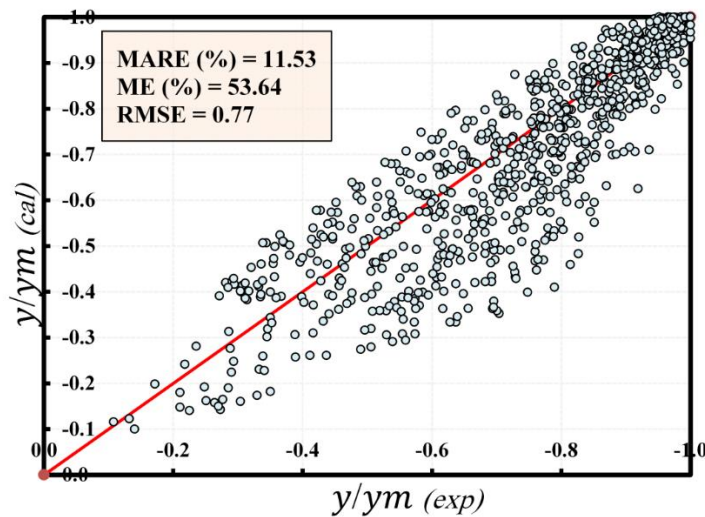
مجموعه نیمرخ‌های طولی آبشستگی در نواحی مختلف



شکل ۵- تعیین ضرایب K_1 و K_2 بر اساس داده‌های آزمایشگاهی



(الف)



(ب)

شکل ۶- الف- نیمرخ‌های آبشستگی بی‌بعد شده حاصل از نتایج آزمایشگاهی و نیمرخ آبشستگی پیشنهادی ب- ارزیابی دقت و صحت معادله پیشنهادی

جایی که روش‌های کلاسیک مبتنی بر معادلات تحلیلی، اغلب دچار ضعف در بازنمایی واقعیت می‌شوند.

در این پژوهش، از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته یادگیری داده‌محور برای مدل‌سازی و پیش‌بینی ابعاد حفره آبستگي در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی استفاده شده است. انتخاب این مدل بر پایه توانمندی بالای آن در شناسایی الگوهای پنهان، پردازش روابط پیچیده میان متغیرهای ورودی و خروجی، و برخورداری از ساختار کنترلی مستحکم در برابر داده‌های نویزی و غیرخطی صورت گرفته است.

نتایج حاصل از این مدل‌سازی بیانگر دقت بالا و قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب SVM در بازتولید رفتارهای هیدرولیکی مرتبط با پدیده آبستگي بوده و کارایی آن را در طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌های هیدرولیکی پیچیده به‌خوبی تأیید می‌کند.

ماشین بردار پشتیبان یک روش یادگیری مؤثر بر پایه نظریه بهینه‌سازی با قیود است که از اصل کمینه‌سازی خطای ساختاری پیروی می‌کند و هدف آن، دستیابی به مدلی با قدرت تعمیم بالا می‌باشد. در چارچوب رگرسیون SVM، تابعی از متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی متغیر وابسته y تخمین زده می‌شود. همانند سایر مدل‌های رگرسیونی، در اینجا نیز فرض بر این است که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی از طریق یک تابع ریاضی $f(x)$ با در نظر گرفتن یک میزان خطای مجاز ε و نویز مدل‌سازی می‌گردد. (Cortes & Vapnik., 1995). تابع پیش‌بینی در SVM به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (10)$$

$$y = f(x) + \text{noise} \quad (11)$$

در این رابطه، w بردار ضرایب، $\varphi(x)$ تابع کرنل φ و b ، ثابت مشخصه‌های تابع رگرسیونی می‌باشد. توابع متداول کرنل مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است که در این مطالعه از کرنل تابع پایه شعاعی استفاده شده است. برای آموزش مدل، تابع هدف به‌صورت زیر بهینه می‌شود:

$$1/2 W^T \cdot W + C(\sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*)) \quad (12)$$

همچنین قیود بهینه‌سازی به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌گردد:

$$y_i - w^T \varphi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \quad (13)$$

$$w^T \cdot \varphi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0$$

$$i=1,2,3,\dots,N$$

$$\begin{cases} a_0 = -\varepsilon, a_1 = \frac{(\varepsilon - 1) \left(2 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^3 - 3 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 \right) + \varepsilon}{\left(\frac{K_2}{K_1} \right)^3 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_1} \right)} \\ a_2 = \frac{(1 - \varepsilon) \left(\left(\frac{K_2}{K_1} \right)^3 - 3 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 \right) - 2\varepsilon}{\left(\frac{K_2}{K_1} \right)^3 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_1} \right)} \\ a_3 = \frac{(\varepsilon - 1) \left(\left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1} \right) \right) + \varepsilon}{\left(\frac{K_2}{K_1} \right)^3 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_1} \right)} \end{cases} \quad (8)$$

K_1 و K_2 از شیب نمودار تغییرات شکل ۵ حاصل از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند که در اینجا، p ارتفاع سرریز می‌باشد. بر اساس مقادیر K_1 و K_2 استخراج‌شده، معادله (۷) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{y}{y_m} = -0.3788 - 1.3727 \frac{x}{x_m} + 0.8818 \left(\frac{x}{x_m} \right)^2 - 0.1303 \left(\frac{x}{x_m} \right)^3 \quad (9)$$

مقدار a_0 بر اساس حداقل شدن اختلاف بین مقادیر y/y_m محاسباتی از معادله (۸) و مقادیر y/y_m آزمایشگاهی به دست آمده است. در شکل ۶- الف رابطه بین y/y_m و x/x_m برای داده‌های آزمایشگاهی و همچنین نیم‌رخ عمومی پیشنهادی ارائه شده است. همچنین شکل ۶- ب دقت معادله پیشنهادی را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میانگین قدرمطلق خطای نسبی معادله پیشنهادی برابر با ۱۱/۵۳ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در پیش‌بینی ابعاد حفره آبستگي است. این مقدار خطا در مقایسه با سایر روش‌های مشابه، میزان رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد و قابلیت استفاده از معادله پیشنهادی را در تحلیل‌های هیدرولیکی و طراحی سازه‌های هیدرولیکی تأیید می‌کند.

مدل هوش مصنوعی ماشینی بردار پشتیبان^۱

در دهه‌های اخیر، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به‌عنوان ابزارهایی نوین، قابل‌اعتماد و مستقل از روابط فیزیکی صریح، توانسته‌اند جایگاه ویژه‌ای در تحلیل مسائل پیچیده مهندسی به‌ویژه در حوزه هیدرولیک و منابع آب پیدا کنند. این مدل‌ها با بهره‌گیری از قابلیت‌های یادگیری ماشینی، قادرند رفتار سیستم‌هایی با ماهیت غیرخطی و چندمتغیره را با دقتی بالا شبیه‌سازی و پیش‌بینی کنند؛

جدول ۲- کرنل های متداول برای ساخت انواع مختلف SVM

نوع کرنل	فرمول	پارامترها
خطی (Linear)	$K(x_i, x_j) = x_i^T \cdot x_j + c$	c: جمله ثابت
چند جمله‌ای (Polynomial)	$K(x_i, x_j) = (x_i^T \cdot x_j + c)^d$	c: جمله ثابت d: درجه
توابع پایه شعاع یا گاوسی (RBF)	$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma \ x_i - x_j\ ^2}$	γ : پهنای باند

سوم براساس برآزش داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده است. در روش مبتنی بر هوش مصنوعی از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. این روش براساس بررسی‌های انجام شده نسبت به مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و شبکه عصبی - فازی تطبیقی دقت بالاتری در تخمین ابعاد حفره آبهستگی دارد. در این مطالعه به منظور پیش بینی ابعاد حفره آبهستگی در مدل ماشین بردار پشتیبان ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی (آموزش) و ۳۰ درصد برای آزمایش (تست) در محیط نرم‌افزار پایتون به کار برده شد.

نتایج روش کلاسیک

شکل ۷ به مقایسه نتایج حاصل از رابطه کلاسیک استخراج شده با داده‌های آزمایشگاهی برای سه پارامتر اصلی آبهستگی شامل بیشینه عمق، محل وقوع بیشینه عمق نسبت به ابتدای حفره، و طول کلی حفره آبهستگی اختصاص دارد. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که رابطه کلاسیک توانسته است به‌طور کلی روند تغییرات پدیده آبهستگی را بازتاب دهد.

بر اساس شاخص MARE (میانگین قدرمطلق خطای نسبی)، میزان خطای این رابطه بین ۱۳ تا ۲۰ درصد متغیر بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل کلاسیک، اگرچه برای تخمین‌های اولیه قابل اتکاست، اما در بازتولید دقیق مقادیر مشاهده شده دچار کاستی است. همچنین، مقدار حداکثر خطا در بازه ۴۳ تا ۹۸ درصد و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در محدوده ۰/۱۵ تا ۱/۷۵ گزارش شده است که حاکی از پراکندگی بیشتر نتایج و کاهش دقت در شرایط خاص می‌باشد.

در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از مدل کلاسیک نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار سریع و ساده برای برآورد اولیه پارامترهای آبهستگی مورد استفاده قرار گیرد، اما برای تحلیل‌های دقیق‌تر و طراحی‌های مهندسی حساس، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر همچون مدل‌های هوش مصنوعی توصیه می‌شود.

که در آن، C، پارامتر جریمه، ϵ ، آستانه مجاز خطا و همچنین γ و ϵ_i^* ، متغیرهای کمکی برای بیان خطاهای بیش از ϵ هستند. از توابع کرنل معمولاً به‌عنوانی جایگزینی برای محاسبه مستقیم $\phi(x)$ ، به دلیل شباهت آن‌ها در فضای ویژگی استفاده می‌شود.

شاخص‌های ارزیابی

به منظور ارزیابی دقت و صحت معادله پیشنهادی جهت تخمین نیمرخ طولی حفره آبهستگی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، از پارامترهای مختلف آماری شامل میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MARE)، حداکثر خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$MARE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \left(\frac{y}{y_m} \right)_{i(Exp)} - \left(\frac{y}{y_m} \right)_{i(Cal)} \right| \right) \quad (14)$$

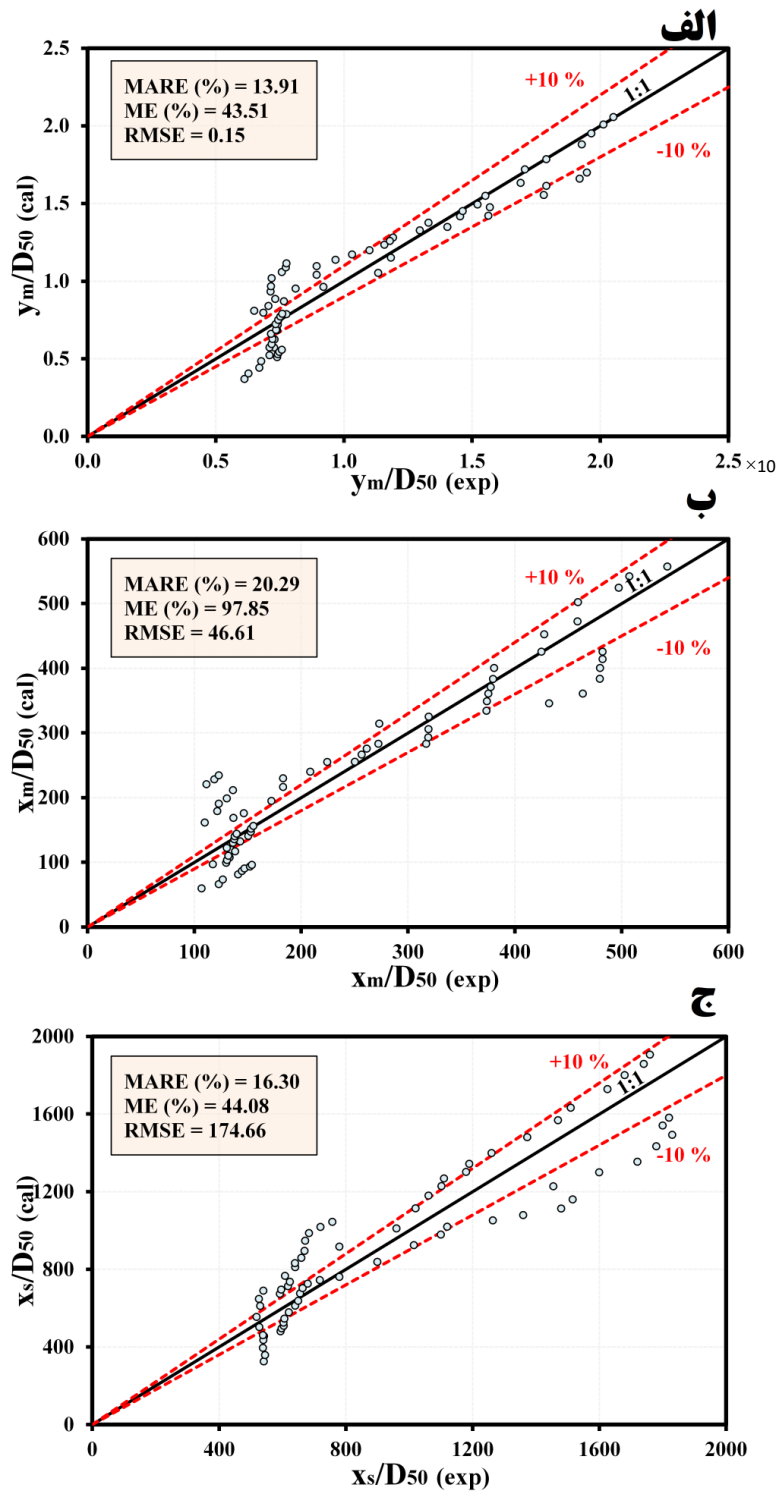
$$ME = Max \left| \left(\frac{y}{y_m} \right)_{i(Exp)} - \left(\frac{y}{y_m} \right)_{i(Cal)} \right| \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{y}{y_m} \right)_{i(Exp)} - \left(\frac{y}{y_m} \right)_{i(Cal)} \right)^2 \right)} \quad (16)$$

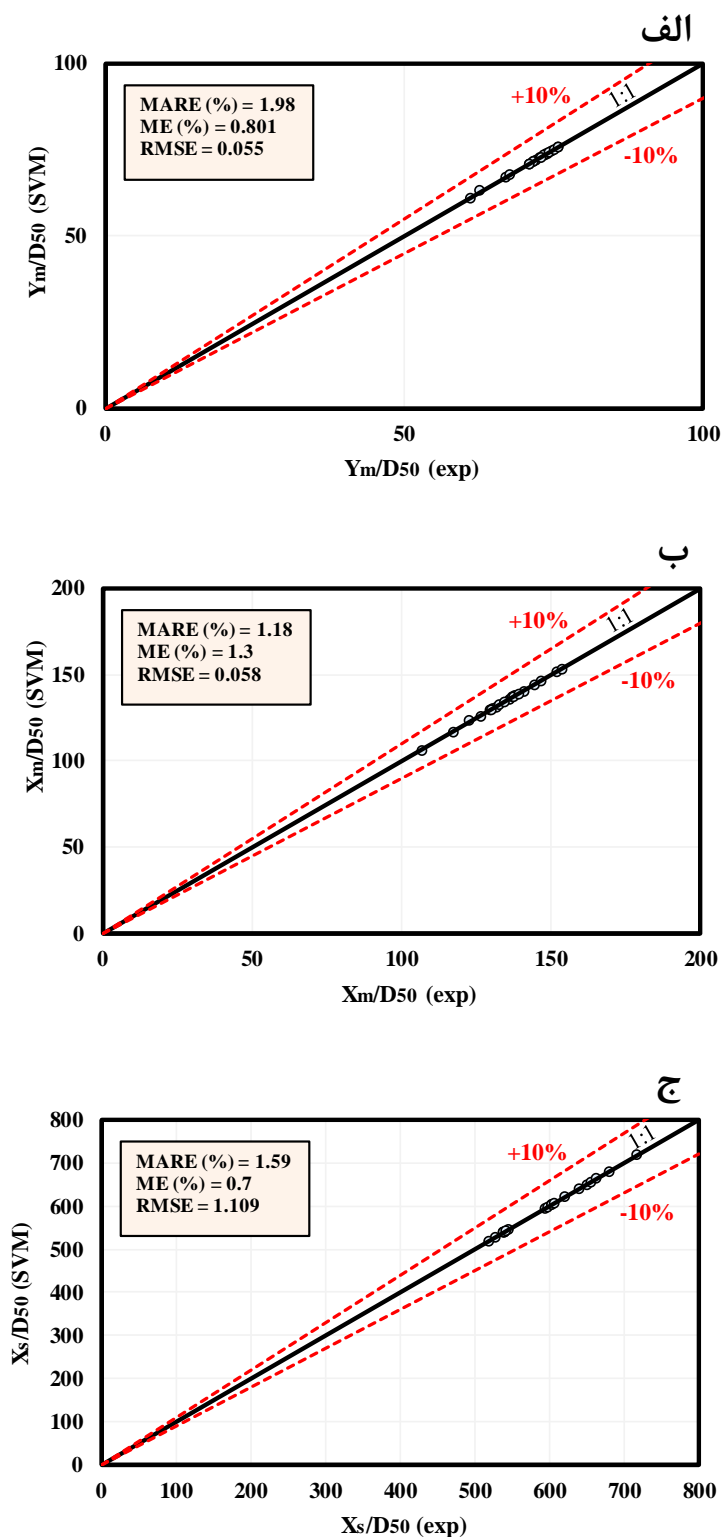
در این روابط، $(y/y_m)_{i(Cal/SVM)}$ و $(y/y_m)_{i(Exp)}$ به ترتیب، عمق آبهستگی نسبی محاسباتی و مشاهداتی در نقطه i و n تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، با هدف بررسی دقت و کارایی رویکردهای مختلف در تخمین ابعاد آبهستگی پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی، از دو روش کلاسیک و مبتنی بر هوش مصنوعی بهره گرفته شد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این دو روش، دیدگاه روشنی نسبت به توانمندی‌های هر یک در مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی فراهم ساخت و امکان ارزیابی دقیق‌تر عملکرد آن‌ها را در شرایط مختلف فراهم آورد. در روش کلاسیک، یک چندجمله‌ای درجه



شکل ۷- ارزیابی دقت روابط کلاسیک پیشنهادی برای: الف) بیشینه عمق نسبی حفره آبستگی، ب) فاصله نسبی بیشینه عمق آبستگی از ابتدای حفره ج) طول نسبی حفره آبستگی



شکل ۸ - ارزیابی دقت مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان برای: الف) بیشینه عمق نسبی حفره آبخستگی، ب) فاصله نسبی بیشینه عمق آبخستگی از ابتدای حفره ج) طول نسبی حفره آبخستگی

نتایج مدل ماشین بردار پشتیبان

در شکل ۸، مقایسه‌ای میان نتایج مدل مبتنی بر هوش مصنوعی از نوع ماشین بردار پشتیبان (SVM) و داده‌های آزمایشگاهی برای سه پارامتر کلیدی آبشستگی، شامل بیشینه عمق آبشستگی، فاصله موقعیت این بیشینه از ابتدای حفره، و طول کلی حفره آبشستگی ارائه شده است. این مقایسه گویای آن است که مدل توسعه‌یافته از دقت مناسبی در پیش‌بینی مقادیر واقعی برخوردار بوده و توانسته است رفتار پدیده را به‌درستی شبیه‌سازی کند.

بر اساس شاخص ارزیابی MARE (میانگین قدرمطلق خطای نسبی)، خطای مدل در بازه‌ای بسیار محدود و قابل قبول، یعنی بین ۱ تا ۲ درصد قرار دارد که نشان‌دهنده انطباق بالای نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی است. همچنین، بررسی دو شاخص دیگر، یعنی حداکثر خطا و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، تأییدکننده عملکرد دقیق مدل است؛ به طوری که مقادیر این دو شاخص به ترتیب در محدوده‌های ۰/۷ تا ۱/۳ درصد و ۰/۰۵ تا ۱/۲ نوسان دارند. این ارقام حاکی از پایداری و کارایی بالای مدل در بازتولید ویژگی‌های هیدرولیکی آبشستگی در شرایط متنوع آزمایشگاهی است.

به‌طور کلی، نتایج ارائه‌شده در این بخش، دقت بالای مدل SVM در پیش‌بینی ابعاد مختلف حفره آبشستگی را نشان می‌دهد و استفاده از آن را به‌عنوان ابزاری مطمئن برای تحلیل‌های مهندسی در حوزه طراحی و ارزیابی ایمنی سازه‌های هیدرولیکی توجیه‌پذیر می‌سازد.

مقایسه عملکرد روش کلاسیک و مدل مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش‌بینی پارامترهای آبشستگی

با مقایسه عملکرد مدل کلاسیک و مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پیش‌بینی آبشستگی، مشاهده می‌شود که مدل کلاسیک توانسته روند کلی پدیده را نشان دهد اما دقت آن در شرایط خاص محدود بوده و خطای نسبی (MARE) آن بین ۱۳ تا ۲۰ درصد و حداکثر خطا تا ۹۸ درصد گزارش شده است. در مقابل، مدل SVM با شناسایی بهتر روابط پیچیده، عملکرد بسیار دقیق‌تری داشته و خطای نسبی آن به ۱ تا ۲ درصد کاهش یافته و مقادیر RMSE نیز بسیار پایین بوده‌اند. دلیل این برتری، توانایی SVM در درک روابط غیرخطی و چندمتغیره بدون نیاز به فرضیات ساده‌ساز است. با این حال، مدل کلاسیک به دلیل سرعت بالا، نیاز کم به داده و سادگی در پیاده‌سازی، همچنان در ارزیابی‌های اولیه مفید است.

این یافته‌ها برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی از جمله سرریزهای مرکب مفید بوده و در پروژه‌های با داده محدود، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند جایگزین مناسبی باشند. اما در پروژه‌های حساس، استفاده همزمان از هر دو مدل و انجام آزمایش‌های تکمیلی

توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

بررسی تطبیقی نتایج حاصل از مدل کلاسیک و مدل هوش مصنوعی ماشین بردار پشتیبان (SVM) نشان می‌دهد که هر یک از این دو رویکرد دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. مدل کلاسیک، با بهره‌گیری از روابط تحلیلی و تجربی، توانسته است روند کلی تغییرات آبشستگی را بازنمایی کند، اما در بازتولید دقیق مقادیر مشاهده‌شده، به‌ویژه در شرایط خاص، دقت محدودی از خود نشان داده است. این موضوع با توجه به دامنه خطای MARE بین ۱۳ تا ۲۰ درصد و حداکثر خطا تا مرز ۹۸ درصد، به‌وضوح قابل مشاهده است. از سوی دیگر، مدل SVM با بهره‌گیری از ظرفیت‌های یادگیری ماشین، موفق شده است الگوهای پیچیده و غیرخطی پدیده آبشستگی را بهتر شناسایی و پیش‌بینی کند؛ به‌گونه‌ای که میزان خطای نسبی آن به ۱ تا ۲ درصد کاهش یافته و مقادیر RMSE نیز در محدوده‌ای بسیار پایین گزارش شده است.

این تفاوت عملکرد عمدتاً ناشی از ماهیت مدل‌های هوش مصنوعی است که برخلاف مدل‌های کلاسیک، وابستگی چندانی به فرضیات ساده‌ساز ندارند و می‌توانند تعاملات چندمتغیره بین پارامترهای هیدرولیکی و هندسی را به‌صورت خودکار استخراج و در ساختار خود لحاظ کنند. در مقابل، مدل‌های کلاسیک از مزایایی چون سرعت بالا، نیاز حداقلی به داده‌های ورودی، و امکان درک و پیاده‌سازی ساده‌تر برخوردارند. این ویژگی‌ها موجب شده‌اند تا روش کلاسیک همچنان جایگاه خود را به‌عنوان ابزاری اولیه و کم‌هزینه در ارزیابی پدیده‌های مهندسی حفظ کند.

در این میان، استفاده ترکیبی از دو رویکرد می‌تواند راهکاری کارآمد و اثربخش تلقی شود. بدین صورت که ابتدا با استفاده از مدل کلاسیک، تخمینی اولیه از ابعاد آبشستگی به‌دست آمده و سپس از خروجی آن به‌عنوان مبنایی برای محدوده جست‌وجو یا تنظیم پارامترهای مدل SVM استفاده شود. این رویکرد نه تنها موجب افزایش دقت نهایی می‌شود، بلکه بهره‌وری زمانی و محاسباتی کل فرایند را نیز بهبود می‌بخشد.

یافته‌های این تحقیق می‌تواند کاربردهای مهمی در طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌های هیدرولیکی، به‌ویژه سرریزهای مرکب، داشته باشد. در پروژه‌هایی که با محدودیت داده‌های آزمایشگاهی مواجه‌اند، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند با دقت و تعمیم‌پذیری بالا جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی باشند. با این حال، در پروژه‌های حساس و بحرانی، پیشنهاد می‌شود از نتایج هر دو مدل استفاده شده و در صورت بروز اختلاف قابل توجه، با انجام

ماشین بردار پشتیبان. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۹ (۱): ۱-۱۱.

Martínez, J., Reca, J., Morillas, M. T. and López, J. G. 2005. Design and calibration of a compound sharp-crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*. (131)2: 112-116.

Jan, C. D., Chang, C. J. and Lee, M. H. 2006. Discussion of Design and calibration of a compound sharp-crested weir by J. Martinez, J. Reca, MT Morillas, and JG Lopez. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(8): 868-871.

Ali, A. A. M., Ibrahim, M. and Diwedat, A. I. 2015. The discharge coefficient for a compound sharp crested V-notch weir. *Asian Journal of Engineering and Technology*. (3)5:494-501.

Göğüş, M., Defne, Z. and Özkandemir, V. 2006. Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 3, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, USA, 272-280.

Obaida A., Khatatb N. and Mohammed A. 2023. Scour depth downstream sharp-crested weir. *Journal of Engineering and Applied Science*. 70(1): 1-11.

Nourani, V., Mousavi, S., Sadikoglu, F., & Singh, V. P. 2017. Experimental and AI-based numerical modeling of contaminant transport in porous media. *Journal of contaminant hydrology*. 205: 78-95.

Li, X. and Tsai, F. T.-C. 2009. Bayesian Model Averaging for Groundwater Head Prediction and Uncertainty Analysis Using Multimodel and Multimethod. *Water resources research*. 45(9). 1-14.

Rehbock, T. 1929. Discussion of Precise Measurements, *Trans of ASCE*. 93: 1143- 1162.

Cortes, C. and Vapnik, V. 1995. Support-vector networks. *Machine learning*. 20(3): 273-297.

Majedi-Asl, M., Omidpour Alavian, T., Seyfari, Y. and Kouhdaragh, M. 2024. Modeling of discharge Coefficient of nonlinear weirs with QNET and SVM methods, *Journal of Hydraulic Structures*. 10(2): 30-45.

Choi, S. U., & Choi, S. 2022. Prediction of local scour around bridge piers in the cohesive bed using support vector machines. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 26(5): 2174-2182.

آزمایش‌های تکمیلی، از صحت تحلیل‌ها اطمینان حاصل گردد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که مدل هوش مصنوعی، با کاهش چشم‌گیر خطاهای آماری توانسته است به‌طور معناداری آبخستگی را دقیق‌تر پیش‌بینی کند. این بهبود ناشی از قابلیت مدل هوش مصنوعی در یادگیری الگوهای غیرخطی و برهم‌کنش‌های پیچیده‌ی عوامل هندسی و هیدرولیکی است که در معادلات تجربی کلاسیک به‌سادگی قابل شناسایی نیستند. با وجود برتری محسوس مدل هوش مصنوعی، روش کلاسیک نیز مزایای خود را حفظ می‌کند؛ سادگی، شفافیت روابط و نیاز حداقلی به داده‌های آموزشی، آن را به گزینه‌ای سریع و کم‌هزینه برای برآوردهای اولیه تبدیل می‌کند. کاربردی‌سازی نتایج این تحقیق در طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی در بهره‌برداری از سرریزهای مرکب بینجامد. به‌ویژه در شرایطی که داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی محدود باشند.

مراجع

امین‌پور، ی.، فرهودی، ج.، و روشن، ر. ۱۳۹۳. بررسی پدیده آبخستگی موضعی در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش در حضور سرریز پلکانی. *نشریه هیدرولیک*. ۹(۴): ۳۸-۲۵.

خرمی، ا.، حیدری، م. و قبادیان، ر. ۱۴۰۱. برآورد میزان آبخستگی مصالح غیرچسبنده و حساسیت سنجی عوامل موثر بر آن در پایاب جام پرتابه‌ای با استفاده از شبکه عصبی و مدل آزمایشگاهی. *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*. ۲۳(۸۶): ۱۱۱-۱۳۲.

موسوی، ش. ۱۴۰۱. تخمین عمق آبخستگی سازه‌های کنترل شیب با سرریز لبه تیز با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی؛ فصلنامه علمی مهندسی منابع آب. ۱۵(۵۵): ۱۱۸-۱۰۵.

روشنگر، ک. و بهزاد روح پرور. ۱۳۹۲. ارزیابی عملکرد سیستم‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی آبخستگی پایه‌های پل در خاک‌های چسبنده. *دانش آب و خاک*. ۲۳(۳): ۱۶۹-۱۸۲.

رضازاده، ر.، بارانی، غ. و ناصری، ا. ۱۳۹۸. کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در تخمین عمق آبخستگی اطراف پایه پل در بستر با رسوبات چسبنده. *نشریه هیدرولیک*. ۱۴(۱).

محمدنژاد، ح.، محمدی، م. و باقرزاده، م. ۱۴۰۲. تخمین عمق آبخستگی پایین‌دست شیب‌شکن قائم با استفاده از الگوریتم

Scour Prediction Downstream of Triangular- Triangular Compound Weirs: Classical Equation vs. SVM Model

S.Nejati¹, M.Meftah Halaghi^{2*}, A.Zahiri³, Y.Aminpour⁴

Received: Mar.13, 2025

Accepted: May.30, 2025

Abstract

This study evaluates the performance of a classical empirical model and an artificial intelligence-based model specifically the Support Vector Machine (SVM) in predicting three key scour parameters: maximum depth, location of maximum depth, and total length of the scour hole. Physical experiments were conducted on a compound triangular-triangular weir model under various hydraulic conditions, and the resulting data were used as the basis for model evaluation. The results showed that although the classical model was able to capture the general trend of scour development, its statistical error rates were relatively high (with MARE ranging from 13% to 20%). In contrast, the SVM model demonstrated significantly higher accuracy, reducing relative error to below 2%. A comparative analysis revealed that the AI-based model, due to its strong generalization capabilities, offers a reliable tool for more precise scour prediction in laboratory settings. However, combining both approaches especially in large-scale or high-stakes projects can enhance both predictive accuracy and computational efficiency.

Keywords: Empirical classical model, Scour hole, Support Vector Machine (SVM) model, Triangular-triangular compound weir

-
- 1- Ph.D Student of Water Structures, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
 - 2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
 - 3- Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
 - 4- Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran
- (* - Coressponding Author Email: meftah@gau.ac.ir)