

ارزیابی کارایی مدل های ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی

سید مسعود سلیمان پور^{۱*}، امید رحمتی^{۱ب}، صمد شادفر^۲، مریم عنایتی^۳

- ۱- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
- ۲- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران
- ۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران ایران
- ۴- کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

فرسایش آبی یکی از مهم ترین عامل های ویرانی زمین است. در میان انواع متفاوت فرسایش آبی، فرسایش خندقی یک نوع بسیار آشکار و شاخص از فرسایش خاک است و از مهم ترین چالش های تهدیدکننده تهیه غذا، سلامت انسان ها و زیست بوم است. از آنجایی که اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، ارتباط مستقیمی با عامل های محیطی دارد؛ از این رو می توان براساس شرایط محیطی، اندازه هدررفت خاک ناشی از خندق ها را مدل سازی کرد. از سوی دیگر، اندازه گیری میدانی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، بسیار زمان بر و هزینه بر است و اندازه گیری مستقیم فرسایش خندقی در سطوح گسترده امکان پذیر نیست. در این راستا، این پژوهش، با هدف ارزیابی کارایی مدل های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در آبخیز ماهورمیلاتی در جنوب غرب استان فارس انجام شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

استناد: سلیمان پور، س.م.، رحمتی، ا.، شادفر، ص.، عنایتی، م. ۱۴۰۴. ارزیابی کارایی مدل های ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی. پژوهش های آبخیزداری. ۳۸(۳): ۹۹-۷۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.368669.1616

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

پژوهش های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴ دوره ۳۸، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۴۸ پاییز ۱۴۰۴، صفحه های ۷۸ تا ۹۹.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

در بازدیدهای میدانی، موقعیت جغرافیایی تمام خندق‌های موجود در آبخیز ماهورمیلاتی، با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد و پس از تطبیق با تصویرهای ماهواره‌ای گوگل‌ارث، این نقاط به محیط GIS منتقل و نقشه پراکنش خندق‌ها رسم شد. سنجه‌های ابعادی ۷۰ خندق، در چهار سال (۱۳۹۹-۱۴۰۲)، شامل: طول خندق، عرض بالا، عرض پایین، و ژرفای خندق اندازه‌گیری میدانی شد و حجم و وزن خاک هدررفته ناشی از فرسایش خندقی نیز محاسبه شد. به منظور فرآیند مدل‌سازی ۱۵ عامل محیطی، به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) انتخاب شدند. در فرآیند مدل‌سازی، عامل‌های محیطی به‌عنوان متغیرهای مستقل، و اندازه هدررفت خاک خندق‌ها به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. خندق‌ها به‌شکل تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شدند. مدل‌سازی به‌وسیله دو مدل ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی، با رویکرد اعتبارسنجی متقاطع انجام شد. دقت مدل‌ها با استفاده از معیارهای کمی خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، شاخص تبیین (R^2)، شاخص خطای RSR و شاخص تطابق (d) بررسی شد.

نتایج و بحث

یافته‌های ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها نشان داد کمترین اندازه خطا از نظر معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، مربوط به مدل ماشین‌بردار پشتیبان بود و بعد از آن مدل شبکه عصبی مصنوعی در جایگاه دوم بود. بر اساس معیار ارزیابی ضریب تبیین (R^2)، مدل ماشین‌بردار پشتیبان ($R^2=0/41-0/59$) در جایگاه اول و مدل شبکه عصبی مصنوعی ($R^2=0/21-0/34$) در جایگاه دوم بود. از نظر معیار ارزیابی شاخص خطای RSR، مدل شبکه عصبی مصنوعی در جایگاه اول و مدل ماشین‌بردار پشتیبان در جایگاه دوم بود. بیشترین اندازه تطابق در میان داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی از نظر شاخص ارزیابی تطابق (d) مربوط به مدل ماشین‌بردار پشتیبان (۰/۸۱) بود و مدل شبکه عصبی مصنوعی با اندازه شاخص تطابق ۰/۶۳ در جایگاه دوم عملکرد بود. از این‌رو، بر پایه نتایج این پژوهش، عملکرد مدل ماشین‌بردار پشتیبان از نظر معیارهای ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص تبیین و شاخص تطابق، در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی، بهتر بود و به‌عنوان مدل برتر برای پیش‌بینی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس معرفی شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در ارزیابی عملکرد یک مدل برای شبیه‌سازی یک پدیده متغیرهای پرشماری نقش دارند که باید به آنها توجه کرد. از این‌رو، در این پژوهش، از ۱۵ متغیر محیطی برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی استفاده شد. افزون بر این، با استفاده از متغیرها اطلاعات بسیار مهمی از نظر تغییرات مکانی و زمانی و ویژگی‌های آبخیز، برای مدل فراهم شد. همچنین، در این پژوهش، دوره پایش، بلندمدت نبود؛ اما عملکرد دو مدل استفاده‌شده برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی مناسب بود. از مزیت‌های مهم این پژوهش آن بود که دو مدل استفاده‌شده از میان کارآمدترین مدل‌های هوش مصنوعی انتخاب شدند و با در نظر گرفتن ویژگی‌های تغییرپذیر در زمان، شرایط پیش‌بینی در آینده فراهم شد و از این‌رو در سال‌های آتی، نیازی به اندازه‌گیری میدانی دوباره نیست. در حقیقت، می‌توان از مدل در سال‌های بعد بر اساس یادگیری‌های کسب‌شده در مرحله آموزش و با در نظر گرفتن اطلاعات بارندگی و پوشش گیاهی جدید، مقدار هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها را پیش‌بینی کرد. این یافته مهم‌ترین وجه تمایز این پژوهش بود و بیانگر آن است که با مدل‌سازی می‌توان در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرد و خدمات ارزنده‌ای به مدیریت حفاظت آب و خاک کشور ارائه داد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و ساختار یادگیری ماشینی در پژوهش‌های آینده استفاده شود.

واژگان کلیدی

پیش‌بینی، هوش مصنوعی، یادگیری ماشینی، ماهورمیلاتی

مقدمه

فرسایش آبی، یکی از مهم‌ترین عامل‌های ویرانی زمین است. به طوری که هرساله حدود ۲۶ میلیارد تن خاک در دنیا بر اثر فرسایش خاک از دست می‌رود که این اندازه بیشتر از خاکی است که تشکیل می‌شود (مطبیعی لنگرودی ۲۰۱۲). اندازه فرسایش خاک در کشورهای گوناگون نشان می‌دهد که بیشترین اندازه فرسایش در کشورهای در حال توسعه رخ داده است و این موضوع یک خطر جدی برای توسعه پایدار و متوازن کشاورزی به‌شمار می‌آید (رفاهی ۲۰۱۷). اگرچه با اطمینان نمی‌توان اندازه قطعی برای فرسایش کل سالانه در کشور بیان کرد؛ اما با در نظر گرفتن برآوردهای متفاوت از یک سو و قیاس کیفی وضعیت ایران در نقشه‌های جهانی فرسایش و تولید رسوب (عرب‌خدری ۲۰۲۱)، اندازه فرسایش سالانه کشور، ۸۹۵ میلیون تن (معادل پنج و نیم تن در هکتار در سال) برآورده شده است (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۱۸).

در میان انواع متفاوت فرسایش آبی، فرسایش خندقی از مهم‌ترین چالش‌های تهدیدکننده تهیه غذا، سلامت انسان‌ها و زیست‌بوم است (سورای و مارکوویچ ۲۰۰۹). از این رو، فرسایش خندقی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و ویرانگرترین شکل نابودی زمین و هدررفت خاک در سراسر جهان شناخته شده است (هین ۲۰۰۷؛ ایگوه و همکاران ۲۰۱۸).

در این راستا، با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه-خشک ایران و بروز مشکلات زیادی مانند: فرسایش، سیل، پر شدن آبگیر سدها و غیره، ضروری است تا با بهره‌گیری از مدل‌های نوین مبتنی بر یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی، اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی (که اندازه‌گیری آن بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد) تعیین شود.

از آنجایی که اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، ارتباط مستقیمی با عامل‌های محیطی دارد؛ از این رو می‌توان بر اساس شرایط محیطی، با مدل‌سازی اندازه هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها در زمان و هزینه اندازه‌گیری ویژگی‌های خندق‌ها

صرفه‌جویی کرد. افزون بر این، مدل‌های یادگیری ماشینی، مبتنی بر هوش مصنوعی، توانایی زیادی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند و با استفاده از آنها می‌توان روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرها را شناسایی کرد. به این دلیل در این پژوهش از آن‌ها برای مدل‌سازی استفاده شد. یکی دیگر از ویژگی‌های مفید این مدل‌ها آن است که برای تجزیه و تحلیل اطلاعات و مدل‌سازی، نیازمند پیش‌فرض‌های آماری نیستند (رحمتی و همکاران ۲۰۱۷). در این راستا، پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل‌های انفرادی و ترکیبی متفاوت از جمله شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه بی‌نظمی، وضعیت استعداد رخداد فرسایش خندقی آبخیز آق‌امام را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بیشترین دقت پیش‌بینی مدل وزنی ترکیبی ماشین-بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی، در سه تکرار متفاوت بود. در پژوهشی، رحمتی و همکاران (۲۰۱۷) کارایی مدل‌های یادگیری ماشینی متفاوت از جمله شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان را با چهار نوع کرنل متفاوت، درختان وایازی تقویت‌شده و جنگل تصادفی را برای شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در منطقه پل‌دختر ارزیابی کردند. در این پژوهش، دوازده عامل محیطی متفاوت برای مدل‌سازی فرسایش خندقی انتخاب شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین عملکرد از نظر دقت پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی و کمترین حساسیت نسبت به اندازه نمونه آموزشی مربوط به مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین‌بردار پشتیبان (با کرنل تابع پایه شعاعی) بود. گروسی و همکاران (۲۰۱۸) اثر قدرت تفکیک مکانی و منبع تهیه لایه‌های محیطی بر کارایی مدل‌های هوش مصنوعی در زمینه پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی در آبخیز سد اکباتان را بررسی کردند و دریافتند که می‌توان با لایه‌های محیطی با اندازه سلول ده متر، اطلاعات کافی برای مدل فراهم کرد و در پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی عملکرد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و درختان وایازی تقویت‌شده، بهتر بود. در منطقه

چوتاناگپور هند، روی و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد مدل‌های شبکه عصبی متفاوت را برای پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی بررسی کردند و گزارش کردند که بهترین عملکرد مربوط به مدل رویکرد پرسپترون چندلایه بود. در استان گلستان، والی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌سازی مکانی پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی را با در نظر گرفتن روابط متقابل میان متغیرهای محیطی مؤثر با استفاده از دستورالعمل‌های یادگیری ماشین برای آبخیز گران‌رود انجام دادند. بر اساس نتایج این پژوهش، به ترتیب عملکرد مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان با تابع کرنل شعاعی، درختان وایزی تقویت‌شده و ماشین‌بردار پشتیبان با تابع کرنل خطی، برای شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی مناسب بود. در منطقه جفرسون ایالت ایلینوی ایالات متحده آمریکا، هن و همکاران (۲۰۲۳) نقشه حساسیت فرسایش خندقی را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی تهیه کردند. ایشان از مدل‌های جنگل تصادفی، K نزدیک‌ترین همسایه، ماشین‌های تقویت‌کننده شیب و شبکه‌های عصبی عمیق، به عنوان مدل‌های پایه استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین دقت در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی مربوط به مدل شبکه عصبی عمیق بود. لیو و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از دستورالعمل‌های یادگیری ماشینی حساسیت رخداد فرسایش خندقی در آبخیز سد گلستان ایران را پیش‌بینی کردند و مدل‌های جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان و بیشینه آنتروپی را به عنوان دقیق‌ترین مدل‌های پیش‌بینی حساسیت رخداد فرسایش خندقی در منطقه نامبرده معرفی کردند. در پژوهشی، بامو و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی حساسیت فرسایش خندقی در آبخیز تنسیف دشت هاوز مراکش را کردند. این پژوهشگران مدل‌های XGBoost و KNN، را به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها برای ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی معرفی کردند. آنها مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین‌بردار

پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی را در رده‌های بعدی گزارش کردند. جلت و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی حساسیت به فرسایش خندقی را پیش‌بینی کردند. افزون بر این، آنها مناطق مستعد و عامل‌های زمینه‌ای رخداد این پدیده را در آبخیز ارر در کشور اتیوپی را نیز شناسایی کردند. این پژوهشگران از چهار مدل، ماشین‌بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، تقویت شیب شدید و شبکه عصبی مصنوعی بهره گرفتند. یافته‌های این پژوهش نشان داد در پیش‌بینی احتمال رخداد فرسایش خندقی بیشترین دقت و مطلوبیت مربوط به مدل شبکه عصبی مصنوعی و پس از آن مدل جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و تقویت شیب شدید بود. در استان فارس، مددی و همکاران (۲۰۲۴) کاربرد ماشین‌بردار پشتیبان و درختان وایزی تقویت‌شده در مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در آبخیز رود شور شهرستان مهر را بررسی کردند و دریافتند که در پیش‌بینی و مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در آبخیز نامبرده توانایی این دو مدل بسیار مناسب بود. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون بیانگر آن است که اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از رویکرد مدل‌های یادگیری ماشینی تعیین‌نشده است. از این‌رو، این پژوهش در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس با مشکلات پرشمار ناشی از فرسایش خندقی انجام شد. هدف این پژوهش دستیابی به برآورد دقیقی از اندازه هدررفت خاک ناشی از این نوع فرسایش بود. از سوی دیگر، اندازه‌گیری میدانی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است و اندازه‌گیری مستقیم فرسایش خندقی در سطوح گسترده امکان‌پذیر نیست. در این راستا، در این پژوهش، کارایی مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان^۱ (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی^۲ (ANN)، در مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی ارزیابی شد.

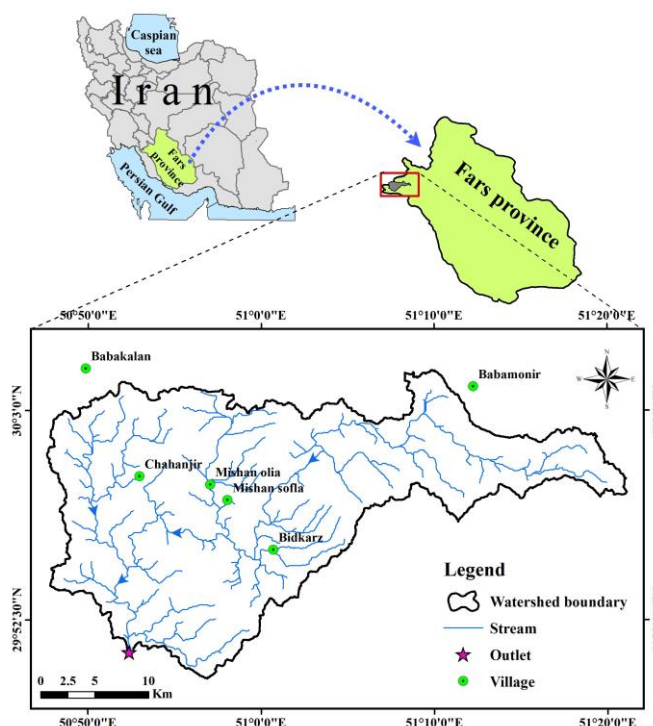
1- Support Vector Machine
2- Artificial Neural Network

مواد و روش ها

معرفی منطقه مطالعه شده

آبخیز ماهورمیلاتی در جنوب غربی استان فارس و در شهرستان ممسنی و در محدوده طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۹ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۳۰ درجه و ۰۳ دقیقه و ۲۹ ثانیه شمالی است (شکل ۱). مساحت این آبخیز، ۷۲۷/۶ کیلومترمربع است. سازند زمین شناسی منطقه، آبرفت های دوره میوسن، میشان و گچساران است. شکل زمین، تپه ماهور و میانگین بلندی از سطح دریا

۶۲۰ متر است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن گسترده، نیمه خشک معتدل است (صوفی ۲۰۰۴). میانگین بارندگی سالانه این منطقه، بر اساس آمار ۱۸ ساله ایستگاه آبدگاه، برابر با ۶۴۵ میلی متر است (تارنمای اداره کل هواشناسی استان فارس ۲۰۲۴). روستاهای میشان علیا، میشان سفلی، چاه انجیر و بیدگاز از روستاهای اصلی این آبخیز به شمار می آیند. خروجی آب شناختی این آبخیز در قسمت جنوب غربی است و الگوی شبکه زهکشی آن، شاخه درختی شکسته است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده.

Figure 1- Geographical location of the study area.

روش پژوهش

در ابتدا موقعیت تمام خندق های موجود در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس با انجام بازدیدهای میدانی و با استفاده از دستگاه GPS، ثبت شد (شکل ۲). در گام بعد، این نقاط با تصویرهای ماهواره ای گوگل ارث تطبیق داده شد و به محیط GIS منتقل شد و نقشه پراکنش خندق ها رسم شد. سپس، سنجش های ابعادی

خندق ها در چهار سال (۱۳۹۹-۱۴۰۲) شامل: طول خندق، عرض بالا، عرض پایین، و ژرفای خندق (شکل ۲)، مبتنی بر پژوهش کاسالی و همکاران (۲۰۰۶)، اندازه گیری شدند. شایان ذکر است برای رعایت هم زمانی اندازه گیری ها، تمام اندازه گیری های میدانی در پایان هر سال (اسفند)، انجام شد.



شکل ۲- اندازه‌گیری‌های میدانی خندق‌های مطالعه‌شده (به ترتیب از راست به چپ: ثبت موقعیت جغرافیایی خندق‌ها با استفاده از دستگاه GPS، اندازه‌گیری عرض بالا، عرض پایین و ژرفای خندق‌ها).

Figure 2 - Field measurements of the studied gullies (from right to left: recording the geographical location of the gullies using a GPS device, measuring the upper width, lower width, and depth of the gullies).

شد (شکل ۳) و پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه تخصصی فرسایش و رسوب، جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها محاسبه شد.

در روند اندازه‌گیری‌های میدانی، از دیواره‌های چپ، راست، پیشانی و خروجی هر خندق، نمونه‌های خاک به وسیله استوانه‌های فلزی استاندارد (کور) برداشت



شکل ۳- نمونه‌برداری خاک از پیشانی خندق به وسیله استوانه فلزی استاندارد.

Figure 3 - Soil sampling from the headcut of the gully using a standard metal cylinder.

$$CA = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) D \right) \quad (1)$$

CA: سطح مقطع عرضی خندق (مترمربع)، W_1 : عرض بالای خندق (متر)، W_2 : عرض پایین خندق (متر)، و D: ژرفای خندق (متر) است.

سپس، سطح مقطع عرضی خندق با استفاده از رابطه (۱) در سه مقطع زمانی متفاوت (سال اول، سال دوم و سال سوم)، برای هر خندق محاسبه شد (تیبو و همکاران ۲۰۱۰).

فرآیند مدل‌سازی انتخاب شدند. این عامل‌ها عبارت بودند از: بلندی، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، کاربری زمین، فاصله از جاده، انحنای سطح، شاخص موقعیت شیب نسبی، بافت خاک، توزیع مکانی اندازه بارندگی (در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)، فراوانی بارش بیش از پنج میلی‌متر (در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)، شاخص بهنجار شده پوشش گیاهی (در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲).

شایان ذکر است مقیاس مکانی تهیه نقشه‌های بلندی، شیب، جهت، انحنای سطح، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، تراکم زهکشی و فاصله از جریان، ۱:۵۰۰۰۰ بودند و بر اساس نقشه‌های پایه پستی‌بلندی تهیه شدند. نقشه بلندی، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شد. مقیاس نقشه‌های خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و بارندگی نیز در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شدند. در عامل خاک‌شناسی، بافت خاک مد نظر بود. به این منظور، نمونه‌های خاک از بخش‌های متفاوت آبخیز مطالعه شده جمع‌آوری شد و آزمایش بافت انجام شد. همچنین، نقشه بافت خاک با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، پردازش و تهیه شد. به منظور اطمینان از نقشه تولید شده، طبقه‌های نقشه بافت خاک، با داده‌های بافت خاک آزمایشگاهی انطباق داده شد تا از صحت نقشه بافت خاک اطمینان به دست آید. همچنین، در عامل زمین‌شناسی، واحدهای سنگ‌شناسی مد نظر بود. از دیدگاه پوشش گیاهی، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شد. اندازه بارندگی سالانه و تعداد بارندگی‌های بیشتر از پنج میلی‌متر نیز استفاده شد. دلیل انتخاب این عامل‌ها این بود که عامل‌های پستی‌بلندی از جمله: بلندی، شیب، جهت، انحنای سطح و شاخص موقعیت شیب نسبی، تأثیر به‌سزایی در فرآیندهای آب‌شناختی و فرسایش دارند و از این رو به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استفاده شدند. وضعیت خاک‌شناسی نیز یکی از عامل‌های مهم در

حجم خاک هدررفته ناشی از فرسایش خندقی، با استفاده از رابطه ۲ برای هر خندق محاسبه شد (تبیو و همکاران ۲۰۱۰).

$$V = \sum_{i=1}^n L \left[\left(\left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) D \right) \right] \quad (2)$$

V : حجم خاک از دست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی (مترمکعب)، L : طول خندق (متر)، W_1 : عرض بالای خندق (متر)، W_2 : عرض پایین خندق (متر)، و D : ژرفای خندق (متر) است.

سپس، وزن خاک از دست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی محاسبه شد. به این ترتیب که اندازه حجم خاک از دست‌رفته در هر خندق (V)، در جرم مخصوص ظاهری خاک هر خندق ضرب شد و پس از جمع اندازه‌های خندق‌ها، وزن خاک فرسایش‌یافته ناشی از فرسایش خندقی در این آبخیز محاسبه شد. باید توجه داشت که اندازه وزن هدررفت خاک به‌دست آمده در سال اول اندازه‌گیری (۱۳۹۹)، مربوط به تاریخچه عمر خندق بود. به بیان دیگر، وزن هدررفت خاک از ابتدای شکل‌گیری خندق تا سال ۱۳۹۹ محاسبه شد و اطلاعات هندسی اندازه‌گیری‌شده خندق‌ها در سال ۱۳۹۹ مبنای محاسبه اندازه هدررفت خاک در سال‌های بعدی (۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) بود و به این شکل، امکان تعیین اندازه هدررفت خالص سالانه فراهم شد؛ مثلاً، اندازه‌های حجم خندق و وزن هدررفت خاک به‌دست آمده از ابعاد اندازه‌گیری‌شده در سال ۱۴۰۰ به‌شکل تجمعی بود و اندازه خالص اندازه هدررفت خاک مربوط به سال ۱۴۰۰ با استفاده از تفاضل اندازه‌های سال ۱۴۰۰ و سال قبل (۱۳۹۹) به‌دست آمد و برای سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز به‌همین ترتیب انجام شد. سپس، متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برآورد فرسایش خندقی تعیین شد. از آنجایی که اندازه هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها تحت تأثیر عامل‌های پرشماری است و تاکنون چارچوب دقیقی برای تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده تعیین نشده است؛ در این پژوهش بر مبنای پژوهش گذشته، ۱۵ عامل محیطی، به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) برای

آبی است و به‌منظور برآورد هدررفت خاک، بایستی به-عنوان یکی از عامل‌های مهم پیش‌بینی‌کننده در نظر گرفته شود. شایان ذکر است لایه‌های اطلاعاتی تمام این متغیرها در سامانه اطلاعات جغرافیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شد.

در فرآیند مدل‌سازی، عامل‌های محیطی به‌عنوان متغیرهای مستقل، و اندازه هدررفت خاک خندق‌ها به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. تمام خندق‌های بررسی‌شده به‌شکل تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شدند. مدل‌سازی در این پژوهش با رویکرد اعتبارسنجی متقاطع انجام شد و داده‌ها به سه گروه تقسیم شدند. با توجه به این که داده‌های میدانی در چهار سال (۱۴۰۲-۱۳۹۹) اندازه‌گیری شد و سال اول اندازه‌گیری (۱۳۹۹)، به‌عنوان مبنا بود؛ در نتیجه داده‌های اندازه‌گیری سه سال بعد (۱۴۰۲-۱۴۰۰)، برای مدل‌سازی انتخاب شدند. به این منظور، هر بار یکی از سال‌ها به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی حذف شد و آموزش مدل‌ها با دو سال باقی‌مانده انجام شد. گروه داده‌های در نظر گرفته‌شده برای ساخت و اعتبارسنجی مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

رخداد و گسترش فرسایش خندقی است؛ به‌گونه‌ای که سرعت رشد خندق‌ها در خاک‌های حساس بسیار بیشتر است. عامل سنگ‌شناسی نیز همواره اندازه حساسیت واحد سنگ‌شناسی به فرسایش را تعیین می‌کند و می‌توان بر اساس آن اطلاعات مفیدی برای برآورد فرسایش خندقی را ارائه داد. همچنین، از آنجایی که جریان‌ها (زهکش‌ها) جریان‌های سطحی و زیرسطحی محدوده‌های پیرامون و بالادست خندق‌ها را جمع‌آوری می‌کنند؛ همگرایی جریان‌ها ظرفیت زیادی برای رخداد و رشد فرسایش خندقی دارند. از این‌رو، عامل فاصله از جریان، به‌عنوان یکی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده انتخاب شد. تراکم زهکشی نیز نشان‌دهنده اندازه تراکم جریان‌ها در واحد سطح منطقه است و بر اندازه فرسایش خاک و فرآیندهای آب‌شناختی تأثیرگذار است. شاخص رطوبت پستی‌بلندی نیز به‌عنوان یک شاخص ترکیبی پستی‌بلندی-آب‌شناختی در نظر گرفته شد که با استفاده از آن می‌توان اندازه جریان بالادست پیکسل و وضعیت شیب پیکسل را همزمان بررسی کرد و اندازه جریان بالقوه را محاسبه کرد و شرایط نفوذ را نشان داد. بارندگی نیز از عامل‌های اصلی رخداد فرسایش

جدول ۱- رویکرد اعتبارسنجی متقاطع به‌منظور تفکیک داده‌ها.

Table 1 - Cross-validation approach for data separation.

Group	Training data	Validation data
First (M ₁)	2022 and 2023	2024
Second (M ₂)	2022 and 2024	2023
Third (M ₃)	2023 and 2024	2022

ابتدا تمام لایه‌های رقومی عامل‌های تأثیرگذار بر رخداد و رشد خندق که به‌عنوان متغیرهای مستقل در مدل‌سازی انتخاب‌شده بودند، به ساختار رستری (با اندازه پیکسل برابر) تبدیل شدند. سپس، اطلاعات مکانی هدررفت خاک خندق‌های گروه آموزش (واسنجی) که در حقیقت به‌عنوان متغیر وابسته در این پژوهش انتخاب‌شده بودند، نیز به‌شکل ساختار رستری در محیط GIS تهیه شد. برای اجرای مدل ماشین‌بردار پشتیبان، تمام لایه‌های رستری ساخته‌شده وارد نرم‌افزار Matlab شد. پس از انجام

در این پژوهش، از دو مدل متفاوت یادگیری ماشینی مبتنی بر هوش مصنوعی شامل: ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. چگونگی بکارگیری این مدل‌ها به‌منظور پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی به این شرح است.

مدل ماشین‌بردار پشتیبان

مدل ماشین‌بردار پشتیبان، یکی از مدل‌های ماشینی یادگیری نظارت‌شده است که به‌منظور طبقه‌بندی تفکیک گروه‌ها به‌کار می‌رود. برای به‌کارگیری این مدل در مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها،

شایان ذکر است در این گام بر اساس داده‌های گروه آموزش (۷۰٪ داده‌ها)، آموزش مدل‌ها یا واسنجی انجام شد تا مدل‌ها بتوانند روابط میان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و اندازه هدررفت خاک خندق‌ها را شناسایی کنند. سپس، اندازه دقت مدل برای پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰٪ داده‌ها) بررسی شد که با عنوان صحت‌سنجی یا اعتبارسنجی مطرح می‌شود. از آنجایی که خندق‌های گروه اعتبارسنجی در آموزش مدل‌ها استفاده نشد؛ تعیین دقت پیش‌بینی مدل‌ها براساس آن‌ها، یک معیار مهم در ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها بود. سرانجام، پس از تعیین دقت مدل‌های متفاوت، شرایط برای مقایسه کمی مدل‌ها و تعیین مدل برتر برای پیش‌بینی هدررفت خاک فراهم شد. دقت مدل‌ها در این مرحله نیز با استفاده از معیارهای کمی خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، شاخص تبیین (R^2)، شاخص خطای RSR (نسبت RMSE به انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای) و شاخص تطابق (d) بررسی شد. اندازه‌های کمتر خطای جذر میانگین مربعات، بیانگر عملکرد بهتر مدل بود و اندازه‌های بیشتر شاخص‌های تبیین، خطای RSR و تطابق، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل بود.

نتایج و بحث

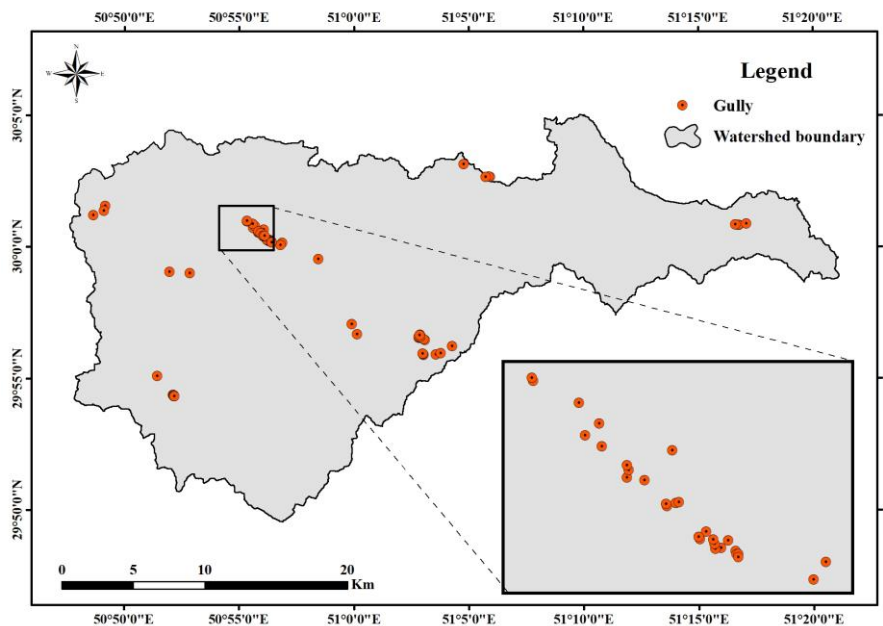
نقشه موقعیت مکانی خندق‌ها در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس بازدیدهای پرشمار میدانی و تطبیق با تصویرهای ماهواره‌ای گوگل‌ارث، ۷۰ خندق شناسایی شده در این آبخیز مبنای اندازه‌گیری‌ها شدند.

بررسی‌های اولیه، اطلاعات متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، مدل ماشین‌بردار پشتیبان برنامه‌نویسی شد و در محیط نرم‌افزار R اجرا شد. مدل ماشین‌بردار پشتیبان با چهار نوع تابع کرنال متفاوت، خطی^۱ چندجمله‌ای^۲ تابع پایه شعاعی^۳ (RBF) و هلالی^۴ است که در این پژوهش، رایج‌ترین کرنال مدل ماشین‌بردار پشتیبان، یعنی تابع پایه شعاعی، استفاده شد.

مدل شبکه عصبی مصنوعی

مدل شبکه عصبی مصنوعی، یک روش مناسب برای حل مسائل پیچیده است که تاکنون روابط و قوانین مشخصی برای تحلیل آن‌ها یافت نشده است. یکی از قابلیت‌های مهم شبکه‌های عصبی مصنوعی، درک و تحلیل رفتار غیرخطی یک ساختار است. شبکه‌های عصبی مانند شبکه عصبی طبیعی از اجزایی به نام سلول عصبی تشکیل شده‌اند. این سلول‌ها بسته به نوع مدل شبکه عصبی مصنوعی، با ساختار و ترتیب خاصی با یکدیگر ارتباط دارند. یکی از متداول‌ترین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، مدل شبکه پرسپترون چندلایه است که در آن سلول‌های عصبی در لایه‌های موازی هستند. این ساختار چندلایه شامل لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است. به‌منظور دستیابی به یک مدل کارا تر، ساختارهای متفاوت باید ارزیابی شوند و از بهترین ساختار در مدل استفاده شود. فرآیندهای طبیعی مانند رخداد و گسترش فرسایش خندقی نیز بسیار پیچیده است که شناخت روابط میان عامل‌های محیطی و این فرآیندها نیز دشوار است. در این پژوهش، به‌منظور برآورد هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها، از مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه استفاده شد.

- 1- Linear
- 2- Polynomial
- 3- Radial basis function
- 4- Sigmoid



شکل ۴ - نقشه موقعیت مکانی خندق‌های موجود در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس.

Figure 4 - Location map of gullies in the Mahurmilati watershed of Fars Province.

کنگلوما ضخیم و سخت همراه با ماسه سنگ کم هوازده) و Qft2 (رسوبات آبراه‌های و مخروط افکنه‌ای) در این آبخیز بود. تنوع سنگ‌شناسی این آبخیز، نسبتاً زیاد بود و هر واحد گاهاً در چند قسمت از منطقه مشاهده شد. بیشترین مساحت مربوط به واحدهای Mgs از سازند گچساران (۰/۴۵/۸)، Mmn از سازند میشان (۰/۲۵/۴۵) و MuPlaj از سازند آغاچاری (۰/۲۳/۴) بود. در نقشه فاصله از آبراهه، فاصله پیکسل-ها از نزدیک‌ترین آبراهه از صفر تا ۲۸۴۳ متر متغیر بود. شبکه زهکشی قسمت‌های نزدیک خروجی، متراکم‌تر بود و فاصله پیکسل‌ها تا آبراهه‌ها (در مقایسه با بخش‌های بالادست) کمتر بود. در نقشه تراکم زهکشی، شکل الگوی شبکه زهکشی این آبخیز در برخی از قسمت‌ها متراکم‌تر بود. اندازه تراکم زهکشی در بخش‌های متفاوت، از صفر تا ۱/۹۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر بود. بیشترین تراکم زهکشی در بخش‌های مرکزی، غربی و شمال شرقی مشاهده شد. بر اساس نقشه شاخص رطوبت پستی‌بلندی، بیشترین اندازه رطوبت پستی‌بلندی مربوط به بخش‌های مرکزی و شمالی این آبخیز بود. اندازه شاخص رطوبت پستی‌بلندی از ۱/۵ تا ۲۰/۶۵ متغیر بود. با توجه به

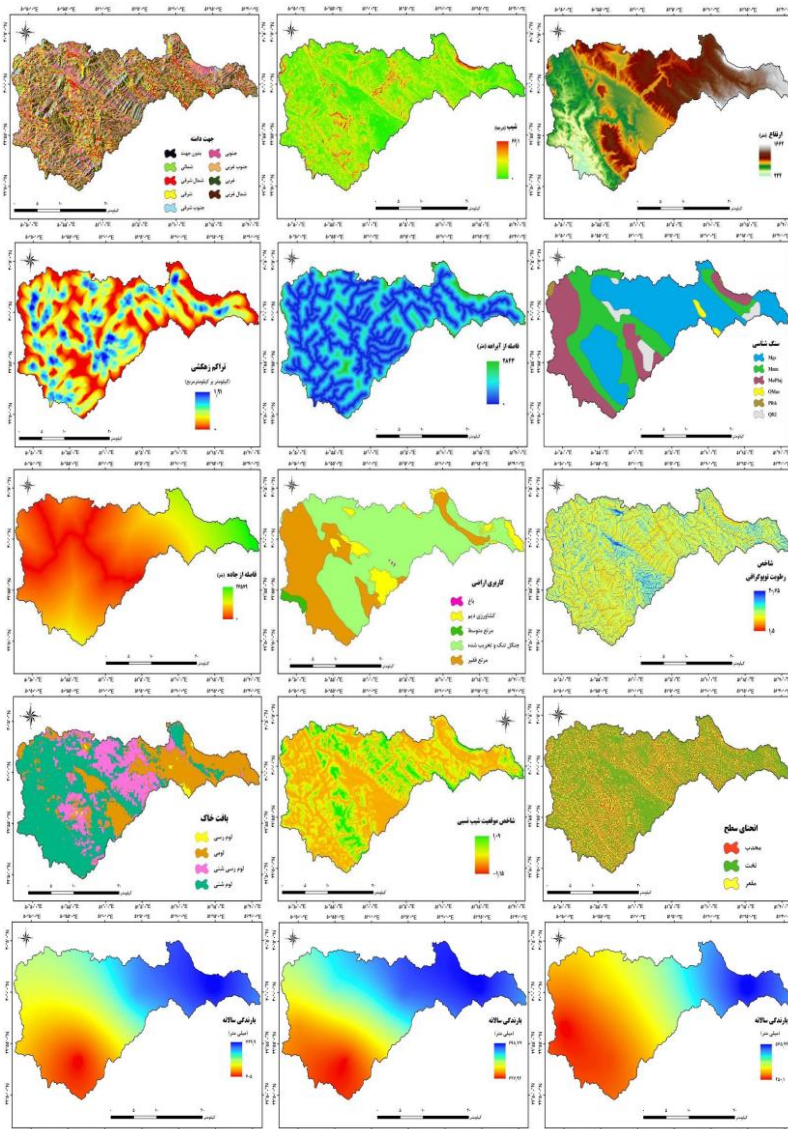
نقشه ۱۵ عامل محیطی، به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) در شکل ۵ ارائه شده است. نقشه بلندی، نشان داد تغییرات بلندی در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس نسبتاً زیاد است و از ۲۲۴ متر در قسمت جنوب‌غربی تا ۱۶۶۲ در قسمت شمالی متغیر بود. ناهمواری‌های پراکنده‌ای نیز در قسمت‌های مرکزی و جنوبی دیده شد. در نقشه درجه شیب نیز، کمترین شیب صفر درجه و در قسمت بزرگی از آبخیز مشاهده شد در حالی که بیشترین شیب ۶۶/۱ درجه بود که در قسمت‌های شمال‌شرقی، مرکزی و غربی بودند. در نقشه جهت دامنه، تنوع و تغییرات مکانی زیادی در پراکنش دامنه‌های متفاوت در سطح این آبخیز مشاهده شد. بیشترین مساحت در این آبخیز مربوط به طبقه‌های جنوب‌غربی (۰/۱۶/۳۵)، غربی (۰/۱۴/۱) و جنوبی (۰/۱۴) بود. نقشه سنگ‌شناسی بیانگر وجود واحدهای mgs (مارن قرمز و خاکستری همراه با رگه‌های نمک و متناوب با سنگ آهک و انیدریت)، Mmn (مارن خاکستری کم هوازده متناوب با سنگ آهک و شیل) و MuPlaj (ماسه سنگ آهک-دار قهوه‌ای و خاکستری، رگه‌های گچ، مارن‌های قرمز و سیلستون)، OMAs (آهک همراه با شیل)، Plbk

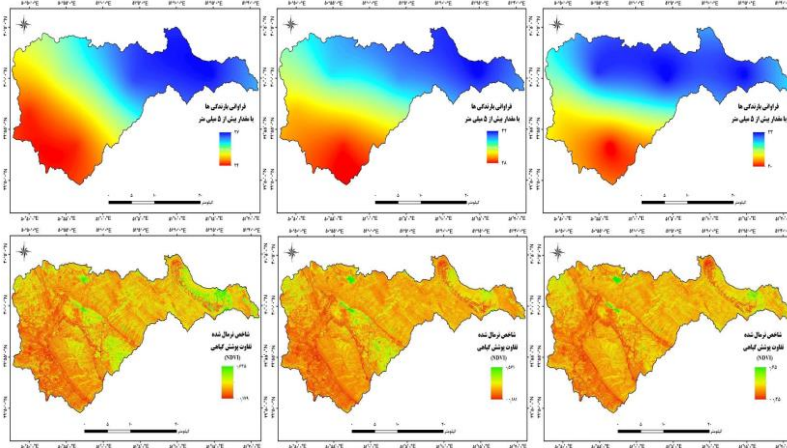
اندازه بارندگی در این آبخیز از ۶۲۷/۹۲ تا ۶۹۸/۷۷ میلی‌متر متغیر بود. اندازه‌های کمتر بارندگی در نواحی جنوب و جنوب‌غربی و اندازه‌های بیشتر در نواحی شمال و شمال‌شرقی رخ داد. توزیع مکانی اندازه بارندگی سالانه در سال ۱۴۰۲ نشان داد اندازه بارندگی در این آبخیز با تغییرات مکانی همراه بود. کمترین اندازه بارندگی ۷۰۵ میلی‌متر و بیشترین اندازه آن ۷۴۹/۹ میلی‌متر بود. بر پایه این یافته‌ها، کمترین اندازه بارندگی در سال ۱۴۰۲ در قسمت جنوبی و بیشترین اندازه آن در قسمت شمال‌شرقی و شمال این آبخیز ثبت شد. نقشه فراوانی بارندگی‌های با اندازه بیشتر از پنج میلی‌متر در سال ۱۴۰۰ در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس نشان داد بخش جنوبی این آبخیز با ۲۰ رخداد بارندگی بیشتر از پنج میلی‌متر، کمترین فراوانی را کسب کرد. از سوی دیگر، در بخش‌های شمالی این آبخیز ۲۳ رخداد بارندگی با اندازه بیشتر از پنج میلی‌متر در سال ۱۴۰۰ ثبت شد. اندازه‌های فراوانی دیگر قسمت‌های این آبخیز با میانگین ۲۱ تا ۲۲ رخداد ثبت شد. بر اساس داده‌های ثبت‌شده می‌توان گفت تعداد رخدادها نزدیک به هم و بارش‌های سنگین در بخش‌های جنوبی و مرکزی، کمتر بود. نقشه فراوانی بارندگی‌های با اندازه بیشتر از پنج میلی‌متر در سال ۱۴۰۱ در این آبخیز نشان داد کمترین فراوانی رخداد این نوع بارندگی‌ها در قسمت جنوبی این آبخیز با ۲۸ رخداد، و بیشترین فراوانی آن در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی با ۳۲ رخداد ثبت شد. بر پایه این یافته‌ها، در این آبخیز، فراوانی رخداد بارش‌های با اندازه بیشتر از پنج میلی‌متر در سال ۱۴۰۱ در مقایسه با سال ۱۴۰۰ افزایش یافت. نقشه فراوانی بارندگی‌های با اندازه بیشتر از پنج میلی‌متر در سال ۱۴۰۲ در آبخیز ماهورمیلاتی نشان داد کمترین و بیشترین فراوانی بارش‌های با اندازه بیش از پنج میلی‌متر بارندگی، به ترتیب ۲۴ و ۲۷ رخداد بود. در سال ۱۴۰۲، کمترین فراوانی این نوع بارش‌ها در قسمت جنوب‌غربی و بیشترین فراوانی در قسمت شمالی این آبخیز رخ داد. نقشه‌های شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی در سال ۱۴۰۰ نشان

ناهمواری نسبتاً زیاد این آبخیز، اندازه‌های شاخص رطوبت پستی‌بلندی متفاوتی در هر بخش، مشاهده شد. بر پایه نقشه کاربری زمین در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس، پنج نوع کاربری گوناگون تعیین شد که عبارتند از: باغ، کشاورزی دیم، جنگل تنک و ویران-شده، مرتع متوسط و مرتع فقیر. بیشترین مساحت این آبخیز مربوط به جنگل‌های تنک و ویران‌شده و مراتع فقیر بود که شرایط را برای رخداد انواع فرسایش‌ها فراهم آورده‌اند. بر اساس نقشه فاصله از جاده، در این آبخیز، تعداد اندکی جاده وجود داشت که این جاده‌ها در قسمت غربی بودند. اندازه فاصله از جاده، صفر تا ۲۶۵۷۹ متر به‌دست آمد. بخش‌های شرقی، بدون جاده اصلی بودند و جاده‌های خاکی نیز محدود بود. بر پایه نقشه انحناى سطح، تغییرات مکانی از دیدگاه وضعیت انحناى سطح در این آبخیز قابل توجه بود. به طوری که این آبخیز به سه طبقه محدب، تخت و مقعر تقسیم‌بندی شد. طبقه تخت، بیشتر در بخش مرکزی و غربی مشاهده شد و دامنه‌های مقعر و محدب به ترتیب در قسمت‌های جنوب‌غربی و شمال‌شرقی بودند. بیشترین مساحت و رتبه نخست از دیدگاه گسترش مکانی مربوط به طبقه مسطح (۴۴٪) بود. طبقه‌های مقعر و محدب نیز به ترتیب با مساحت‌های ۳۰ و ۲۶٪، در جایگاه‌های دوم و سوم بودند. بر اساس نقشه شاخص موقعیت شیب نسبی، تغییرات مکانی وضعیت این شاخص متغیر بود. قله‌ها در قسمت‌های میانی (رنگ سبز)، طبقه‌های شیب فوقانی، شیب میانی و شیب تحتانی در بخش‌های میانی، شرقی و غربی بودند. طبقه‌های پای شیب، در بخش‌های مجاور شبکه زهکشی و قسمت‌های دشتی و میانه این آبخیز مشاهده شد. نقشه توزیع مکانی اندازه بارندگی سالانه در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس در سال ۱۴۰۰ با تغییرات مکانی همراه بود. کمترین اندازه بارندگی ۴۵۰/۱ میلی‌متر و بیشترین اندازه آن ۵۶۵/۹۹ میلی‌متر ثبت شد. اندازه‌های کمتر بارندگی در نواحی جنوب و جنوب‌غربی و اندازه‌های بیشتر در نواحی شرق و شمال‌شرقی رخ داده است. توزیع مکانی اندازه بارندگی در سال ۱۴۰۱ با تغییرات مکانی همراه بود.

داد اندازه این شاخص در سال ۱۴۰۰ از ۰/۲۷- تا ۰/۱۷۹- متغیر بود. کمترین اندازه‌ها در جنوب و جنوب‌غرب و بیشترین اندازه‌ها در شمال‌شرق این آبخیز ثبت شد. اندازه‌های میانه و انحراف معیار نمودار توزیع فراوانی، به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۰۸ به دست آمد. بر پایه نقشه بافت خاک در این آبخیز، چهار نوع طبقه بافت خاک ثبت شد. بافت خاک ۵۰/۱۴٪ از سطح این آبخیز، لوم‌شنی بود و به‌عنوان بافت غالب در این آبخیز معرفی شد. پس از آن، بافت لومی با ۲۷/۵۲٪ و بافت لوم‌رسی‌شنی با ۲۱/۳۶٪ در رتبه‌های دوم و سوم بودند و بافت لوم‌رسی، کمتر از یک درصد از مساحت این آبخیز را در بر گرفته است.

متغیر بود. اندازه میانه این شاخص ۰/۱۳۷ و اندازه انحراف معیار آن ۰/۰۵۲ به دست آمد. به دلیل شرایط محیطی (از جمله خاک‌شناسی و هواشناسی)، پوشش گیاهی در بیشتر قسمت‌های این آبخیز، به‌ویژه نواحی جنوبی و جنوب‌غربی، ضعیف بود. این اندازه در سال ۱۴۰۱ میان ۰/۱۸۱- و ۰/۵۶۱ متغیر بود. کمترین اندازه‌ها در جنوب و جنوب‌غربی این آبخیز مشاهده شد. اندازه‌های میانه و انحراف معیار نمودار توزیع فراوانی به ترتیب ۰/۱۱۷ و ۰/۰۴۷ به دست آمد. همچنین، اندازه این شاخص در سال ۱۴۰۲ از



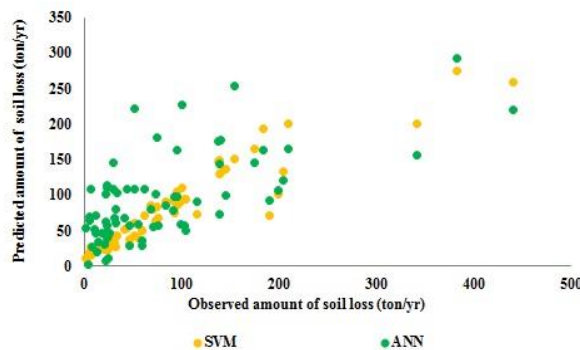


شکل ۵- نقشه‌های عامل‌های محیطی مؤثر بر هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس (از راست به چپ: نقشه بلندی، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، کاربری زمین، فاصله از جاده، انحنای سطح، شاخص موقعیت شیب نسبی، بافت خاک، توزیع مکانی اندازه بارندگی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، فراوانی بارش بیش از پنج میلی‌متر در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، شاخص بهنجار شده پوشش گیاهی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲).

Figure 5- Maps of environmental factors affecting soil loss due to gully erosion in the Mahurmilati Watershed of Fars Province (from right to left: elevation map, slope degree, slope direction, lithology, distance from watercourse, drainage density, topographic moisture index, land use, distance from road, surface curvature, relative slope position index, soil texture, spatial distribution of rainfall amount 2022 to 2024, frequency of rainfall more than five mm 2022 to 2024, normalized vegetation cover index 2022 to 2024).

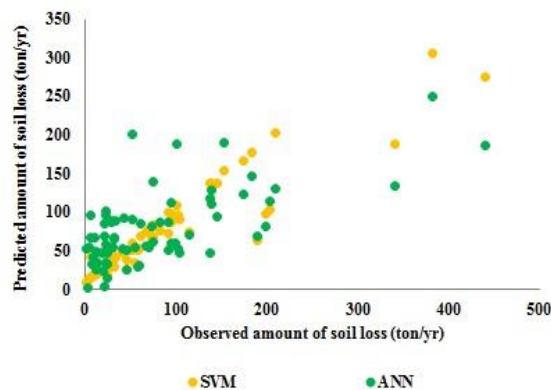
نمودارهای پراکنش داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در مرحله آموزش و با رویکردهای تقسیم داده اول (M_1)، دوم (M_2) و سوم (M_3) در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس تهیه شد. نتایج این نمودارها در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است.

نتایج اندازه هدررفت خاک ناشی از خندق‌های موجود در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس، در بازه زمانی سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، ۱۵۳۰۰/۹۴ تن بود. از این رو، میانگین هدررفت خاک هر خندق در سه سال مطالعه شده، ۲۱۸/۵۸ تن، بود که این داده برای حفاظت از منابع ارزشمند خاک کشور بسیار تأمل برانگیز و نگران‌کننده است.



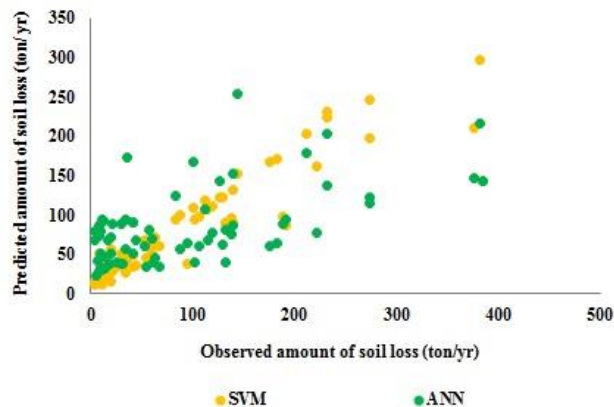
شکل ۶- نمودار اندازه‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M_1 در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس.

Figure 6- Diagram of observed and predicted soil loss values in the training phase with the M_1 data partitioning approach in the Mahurmilati Watershed of Fars Province.



شکل ۷- نمودار اندازه‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M₂ در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس.

Figure 7- Diagram of observed and predicted soil loss values in the training phase with the M₂ data partitioning approach in the Mahurmilati Watershed of Fars Province.



شکل ۸- نمودار اندازه‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M₃ در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس.

Figure 8- Diagram of observed and predicted soil loss values in the training phase with the M₃ data partitioning approach in the Mahurmilati Watershed of Fars Province.

دیدگاه علمی و فنی فراهم نیست. با توجه به این‌که داده‌های گروه آموزش در اختیار مدل است، عملکرد مدل‌ها بر اساس دقت مدل در مرحله آموزش قابل قضاوت نیست. اما بر اساس نتایج به دست آمده، هر دو مدل استفاده شده در این پژوهش، قابلیت ورود به مرحله بعدی را داشتند و با در نظر گرفتن شرایط محیطی، از آنها برای پیش‌بینی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بهره‌گیری شد.

نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی، در رویکردهای متفاوت در مرحله آموزش (واسنجی) در جدول ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است دقت این دو مدل در این مرحله، صرفاً برای اطمینان از برآزش داده‌ها و آموزش دیدن مدل‌ها بررسی شد. زیرا، مدلی در این مرحله، آموزش کافی ندیده باشد؛ امکان پیش‌بینی و تعمیم آن به داده‌هایی که در اختیار مدل نیستند، از

جدول ۲- ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها در مرحله آموزش در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس.

Table 2- Evaluation of the prediction accuracy of models in the training phase in the Mahurmilati Watershed of Fars Province.

Evaluation criteria	Data approach	SVM	ANN
RMSE	M ₁	41.31	71.00
	M ₂	34.13	55.84
	M ₃	37.37	63.67
R ²	M ₁	0.85	0.41
	M ₂	0.84	0.42
	M ₃	0.83	0.36
RSR	M ₁	0.46	0.78
	M ₂	0.46	0.76
	M ₃	0.47	0.80
d	M ₁	0.93	0.75
	M ₂	0.92	0.75
	M ₃	0.92	0.68

معیار ارزیابی شاخص خطای RSR، مدل شبکه عصبی مصنوعی در جایگاه اول و مدل ماشین بردار پشتیبان در جایگاه دوم بود. بیشترین تطابق از نظر شاخص ارزیابی تطابق (d) مربوط به مدل ماشین بردار پشتیبان (۰/۸۱) در میان داده های مشاهده ای و پیش بینی بود و مدل شبکه عصبی مصنوعی با اندازه شاخص تطابق ۰/۶۳ در جایگاه دوم بود. از این رو، در این پژوهش، از آنجایی که عملکرد مدل ماشین بردار پشتیبان از نظر معیارهای ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص تبیین و شاخص تطابق، در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی بهتر بود و به عنوان مدل برتر برای پیش بینی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس معرفی شد.

ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها فقط بر اساس مقایسه داده های مشاهده ای گروه اعتبارسنجی و داده های برآوردی مدل ها قابل ارزیابی بود. زیرا، مدل در این مرحله، داده های اندازه هدررفت خاک گروه اعتبارسنجی را ندارد. نتایج ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس برای رویکردهای متفاوت تقسیم داده در مرحله اعتبارسنجی و بر اساس معیارهای ارزیابی متفاوت در جدول ۳ ارائه شده است. کمترین اندازه معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مربوط به مدل ماشین بردار پشتیبان بود و بعد از آن مدل شبکه عصبی مصنوعی در جایگاه دوم بود. بر اساس معیار ارزیابی ضریب تبیین (R²)، مدل ماشین بردار پشتیبان (R²=۰/۴۱-۰/۵۹) در جایگاه اول و مدل شبکه عصبی مصنوعی (R²=۰/۲۱-۰/۳۴) در جایگاه دوم بود. از نظر

جدول ۳- ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در مرحله اعتبارسنجی در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس.

Table 3- Evaluation of the prediction accuracy of models in the validation phase in the Mahurmilati Watershed of Fars Province.

Evaluation criteria	Data approach	SVM	ANN
RMSE	M ₁	46.70	76.84
	M ₂	88.86	92.11
	M ₃	87.35	79.05
R ²	M ₁	0.59	0.34
	M ₂	0.55	0.30
	M ₃	0.41	0.21
RSR	M ₁	0.84	1.39
	M ₂	0.93	0.97
	M ₃	1.01	0.91
d	M ₁	0.81	0.63
	M ₂	0.58	0.56
	M ₃	0.34	0.60

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آبخیز مطالعه‌شده در این پژوهش، از معروف‌ترین مناطق مستعد شکل‌گیری و رشد فرسایش خندقی در استان فارس است. به‌طوری‌که بر اساس پایش‌های سالانه انجام‌شده در این پژوهش، تغییرات ابعاد هندسی خندق‌ها در این آبخیز مشاهده شد. افزایش ابعاد هندسی خندق‌ها، نشان‌دهنده رشد فرسایش خندقی بود و یک متغیر بسیار پیچیده که عامل‌های متفاوتی بر آن تأثیرگذارند. افزون بر ویژگی‌های محیطی، پستی‌بلندی، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی، بارندگی و غیره، درجه بلوغ و تکامل فرسایش خندقی نیز یکی از عامل‌های مؤثر در پیش‌روی و اندازه هدررفت خاک بود. به‌بیان دیگر، درجه بلوغ و تکامل، یک ویژگی ذاتی مربوط به خندق است که بر حساسیت و ظرفیت رشد یک خندق تأثیرگذار است. خندق‌های موجود در آبخیز ماهورمیلاتی، بیشتر از نوع خندق‌های بالغ و تکامل‌یافته بودند که اندازه هدررفت خاک ناشی از آن‌ها بسیار زیاد بود. طول بیشتر این خندق‌ها زیاد بود و ژرفا و عرض آن‌ها به‌اندازه‌ای بود، تغییرات کوچک در ابعاد آن‌ها موجب هدررفت بسیار زیاد خاک شده است. به‌طوری‌که در مجموع، در دوره مطالعه‌شده، هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی ۱۵۳۰۰/۹۴ تن بود. این اندازه بیانگر وضعیت بسیار بحرانی

هدررفت منابع خاک در این آبخیز بود که مهار آن نیازمند یک برنامه علمی- عملیاتی است. مدل‌های یادگیری ماشینی متفاوت، بر اساس ساختار و رویکرد مدل‌سازی، قابلیت‌های متفاوتی دارند. تاکنون این مدل‌ها در پژوهش‌هایی استفاده شده‌اند (رحمتی و همکاران ۲۰۱۷ و گروسی و همکاران ۲۰۱۸)؛ اما از آنجایی که کارایی آن‌ها در زمینه مدل‌سازی هدررفت خاک، و به‌بیان دیگر، رشد فرسایش خندقی، که ماهیت زمانی- مکانی دارد، تاکنون مشخص نشده است در این پژوهش، این نکته مهم، بررسی شد.

از این‌رو، با توجه به این‌که تاکنون مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی انجام‌نشده است؛ امکان مقایسه مستقیم در این زمینه وجود ندارد. با این‌حال، در پژوهش‌های پیشین (والی‌پور و همکاران ۲۰۲۱، مددی و همکاران ۲۰۲۴، پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۷، رحمتی و همکاران ۲۰۱۷، گروسی و همکاران ۲۰۱۸، روی و همکاران ۲۰۲۰ و بامو و همکاران ۲۰۲۴)، عملکرد بهتر مدل ماشین‌بردار پشتیبان در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی تأیید شده است که با یافته‌های این پژوهش، هم‌راستا است. زیرا، نتایج مدل‌سازی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش

یادگیری‌های کسب‌شده مدل در مرحله آموزش، با در نظر گرفتن اطلاعات بارندگی و پوشش گیاهی جدید، اندازه هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها را پیش‌بینی کرد. این یافته مهم‌ترین وجه تمایز این پژوهش بود و بیانگر آن است که با مدل‌سازی می‌توان در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرد و خدمات ارزنده‌ای به مدیریت حفاظت آب و خاک کشور ارائه داد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، اندازه رشد خندق‌ها در آبخیز مطالعه‌شده زیاد بود و در شرایطی که به مهار آن‌ها توجه نشود، پیوسته ابعاد خندق‌ها بیشتر رشد خواهند کرد و منابع ارزشمند خاک و زمین بالادست و همچنین حاشیه خندق‌ها از بین می‌رود. از سوی دیگر، انتقال رسوب بسیار زیاد ناشی از فرسایش خندقی به خروجی این آبخیز سبب خسارت‌های زیادی خواهد شد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که دستگاه‌های اجرایی مربوطه با استفاده از روش‌های مبتنی بر طبیعت، و با کمک روش‌های مهندسی نرم (استقرار پوشش گیاهی بومی و سازگار به‌عنوان یکی از روش‌های بسیار مؤثر و کم‌هزینه در حفاظت خاک) ماده آلی خاک را افزایش دهند و با اصلاح خاک‌های شور و سدیمی به‌وسیله اصلاح‌کننده‌ها و در صورت لزوم، انحراف رواناب‌ها از پیشانی خندق‌ها با استفاده از عملیات سازه‌ای، اندازه پیشروی و رشد خندق‌ها را مهار کنند.

در این پژوهش، طول دوره آماری اندازه‌گیری ابعاد هندسی خندق‌ها سه سال بود و داده‌های نسبتاً اندکی برای آموزش مدل و اعتبارسنجی نتایج فراهم شد. با این حال، قابلیت مدل ماشین‌بردار پشتیبان در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی اندازه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بیشتر بود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود با توجه به زمان‌بر بودن شکل‌گیری و رشد خندق‌ها، دوره‌های بلندمدت‌تر برای پایش و اندازه‌گیری مستقیم ابعاد خندق‌ها در نظر گرفته شود تا با ثبت داده‌های رشد فرسایش خندقی در سال‌های متوالی، امکان آموزش بهتر مدل‌ها فراهم شود. یقیناً در گام بعد، اولویت‌بندی کارایی مدل‌های یادگیری ماشینی در چنین شرایطی، نیازمند بررسی

خندقی در آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس نشان داد که عملکرد مدل ماشین‌بردار پشتیبان (SVM)، بهتر از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بود. در ارزیابی عملکرد یک مدل برای شبیه‌سازی یک پدیده متغیرهای پرشماری نقش دارند که باید به آنها توجه کرد. از این‌رو، در این پژوهش، از ۱۵ متغیر محیطی برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی استفاده شد. افزون بر این، با استفاده از این متغیرها اطلاعات بسیار مهمی از نظر تغییرات مکانی و زمانی و ویژگی‌های آبخیز، برای مدل فراهم شد. از سوی دیگر، متغیر وابسته مدل‌سازی، محدود به سه سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ بود که بر اساس استانداردهای مدل‌سازی، داده‌های دو سال آن برای آموزش (واسنجی) مدل و داده‌های یک سال آن برای اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) استفاده شد. همچنین، در این پژوهش، طول دوره پایش، بلندمدت نبود اما عملکرد دو مدل استفاده‌شده برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی مناسب بود. از مزیت‌های مهم این پژوهش آن بود که دو مدل استفاده‌شده از میان کارآمدترین مدل‌های هوش مصنوعی انتخاب شدند و با در نظر گرفتن ویژگی‌های تغییرپذیر در زمان، شرایط پیش‌بینی در آینده فراهم شد و از این‌رو در سال‌های آتی نیازی به اندازه‌گیری میدانی دوباره نیست.

از این‌رو، در سال‌های آینده (۱۴۰۴ و بعد از آن)، کاربران محترم باید فقط اندازه بارندگی سالانه، تعداد بارندگی‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر و نقشه پوشش گیاهی را برای پیش‌بینی هدررفت خاک خندق‌ها تهیه کنند. در این راستا، آنها باید عامل‌های مربوط به بارندگی را از ایستگاه‌های هواشناسی و عامل پوشش گیاهی را از تصویرهای ماهواره‌ای لندست تهیه کنند. دیگر متغیرهای مستقل نیز نیازی به اندازه‌گیری مجدد ندارند. زیرا، در گذر زمان تغییرات زیادی در آن‌ها (مانند: بلندی، شیب و غیره) ایجاد نمی‌شود. همچنین، اندازه هدررفت خاک بعد از اجرای این پژوهش، نیز نیازی به اندازه‌گیری مجدد میدانی ندارد. در حقیقت، در سال‌های بعد می‌توان بر اساس

سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته‌ای از نتایج پروژه تحقیقاتی ملی با عنوان برآورد هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی و معرفی مناسب‌ترین مدل، با کد ۰۵۰-۲۹-۰۲۴-۹۹۰۵۱۴ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان این مقاله از حمایت‌های آن پژوهشکده و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سپاس‌گزاری می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکانبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، نگارش نسخه اولیه مقاله، بازبینی مقاله

نویسنده دوم: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، بررسی نتایج

نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: بازبینی و ویرایش مقاله

مجدد در پژوهش‌های آتی خواهد بود. یکی از محدودیت‌های اجرای این پژوهش که دیگر پژوهشگران در کشورهای گوناگون نیز عموماً با آن مواجه هستند، نبود ایستگاه‌های باران‌نگار در بخش‌های متفاوت آبخیزها و دسترسی نداشتن به اطلاعات شدت بارندگی بود. از سوی دیگر، با توجه به پراکنش مکانی خندق‌ها در یک آبخیز گسترده، امکان تعیین داده‌های شدت بارندگی از یک ایستگاه به بخش‌های متفاوت آن آبخیز وجود ندارد و استفاده از این اطلاعات کمک شایانی به مدل‌سازی نمی‌کند. در این راستا، پیشنهاد می‌شود در شروع پژوهش‌هایی با هدف مدل‌سازی، چند ایستگاه باران‌نگار در بخش‌های متفاوت آبخیز(های) مد نظر نصب شود تا اطلاعات دقیقی از ویژگی‌های بارندگی ثبت شود. نتایج مدل‌سازی این پژوهش بیانگر جایگاه دوم مدل شبکه عصبی مصنوعی پس از مدل ماشین‌بردار پشتیبان بود. از این‌رو، با توجه به پیشرفت مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و ظهور مدل‌های یادگیری عمیق، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، در شرایطی که داده‌های اندازه‌گیری‌شده زیاد است، از مدل‌های شبکه عصبی عمیق استفاده شود.

فهرست منابع

- Arabkhedri M. 2021. Water erosion and sediment Production Status in Iran: Statistical and Comparative Analyses. *Journal of Strategic Research in Agricultural Sciences and Natural Resources*. 6(2): 139-156. (In Persian). <https://doi.org/10.22047/SRJASNR.2021.14054>
- Arabkhedri M, Shadfar S, Jafari-Ardakani A, Bayat R, Khajavi E, Mahdian MH. 2018. Improving water erosion estimates for Iran. *Journal of Watershed Management Research*. 31(3):13-27. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/WMEJ.2018.121424.1106>
- Bammou Y, Benzougagh B, Abdessalam O, Brahim I, Kader Sh, Spalevic V, Sestras P, Ercişli S. 2024. Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift Catchment, Haouz Plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, 213, 105229. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105229>
- Casali J, Loizu J, Campo MA, De Santisteban LM, Alvarez-Mozos J. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena*. 67(2): 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.005>
- Fars Province Meteorological Department Website. 2024. Reporting meteorological statistics of Fars Province cities. (In Persian). <https://www.farsmet.ir/ReportAmar.aspx>
- Garosi Y, Sheklabadi M, Pourghasemi HR, Besalatpour AA, Conoscenti C, Van Oost K.

2018. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*. 330: 65-78.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.027>
- Gelete TB, Pasala P, Abay NG, Woldemariam GW, Yasin KH, Kebede E, Aliyi I. 2024. Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. *Sec. Environmental Informatics and Remote Sensing*. 12, 1410741.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1410741>
- Han J, Guzman JA, Chu ML. 2023. Gully erosion susceptibility mapping using the stacking ensemble machine learning method. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2023, Omaha, Nebraska, United States, July 9-12, 2023*. Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, Annual International Meeting.
<https://doi.org/10.13031/aim.202300154>
- Hein L. 2007. Assessing the costs of land degradation: A case study for the Puentescatchment, southeast Spain. *Land Degradation & Development*. 18(6): 631-642.
<https://doi.org/10.1002/ldr.802>
- Igwe PU, Chinedu OC, Nlem EU, Nwezi CC, Ezekwu JC. 2018. A Review of Landscape Design as a Means of Controlling Gully Erosion. *International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology*. 3(1): 103-111.
<https://doi.org/10.22161/ijeab/3.1.13>
- Liu G, Arabameri A, Santosh M, Asadi Nalivan O. 2023. Optimizing machine learning algorithms for spatial prediction of gully erosion susceptibility with four training scenarios. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(16): 46979-46996.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-25090-2>
- Madadi A, Asgharisaraskanroud SA, Neghaban S, Marhamat M. 2024. Application of support vector machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model the Sensitivity of Gully Erosion in the Watershed of Shour River Mohr City. *Journal of Physical Geography Research*. 55(4):83-101.(In Persian).
<https://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.360424.1007775>
- Motielangroodi SH. 2012. *Geography of the Iranian Economy (Agriculture, Industry and Services)*. Mashhad Jihad Daneshgahi Publications, First Edition. 384 p. (In Persian).
- Pourghasemi HR, Yousefi S, Kornejady A, Cerdà A. 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*. 609: 764-775.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.198>
- Rahmati O, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Feizizadeh B. 2017. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*. 298: 118-137.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
- Refahi H Gh. 2017. *Water Erosion and Its Control*. Tehran University Press, 7th edition, 672 p. (In Persian).
- Roy P, Chakraborty R, Chowdhuri I, Malik S, Das B, Pal SC. 2020. Development of different machine learning ensemble classifier for gully erosion susceptibility in Gandheswari Watershed of West Bengal, India. In book: *Machine Learning for Intelligent Decision Science*. pp. 1-26.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-3689-2_1
- Soufi M. 2004. Investigation of morphoclimatic characteristics of gullies in Fars province. Final report of the research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Publications. 130 p. (In Persian).
- Svoray T, Markovitch H. 2009. Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34: 1970-1984.
<https://doi.org/10.1002/esp.1873>
- Tebebu T, Abiy A, Dahlke H, Easton Z, Tilahun S, Collick A, Kidnau S, Moges S, Dadgari F. 2010. Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 7(4): 2207-2217.
<https://doi.org/10.5194/hessd-7-5235-2010>
- Valipour M, Mohseni N, Hosseinzadeh SR. 2021. Modeling the occurrence of gully erosion in the Gorganrood watershed. *Proceedings of the 8th National Conference of the Iranian Society of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*. (In Persian).



Evaluation of the Efficiency of Support Vector Machine and Artificial Neural Network Models in Modeling Soil Loss Due to Gully Erosion

Seyed Masoud Soleimanpour^{1*}, Omid Rahmati², Samad Shadfar³, Maryam Enayati⁴

1- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran

3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

4- M.Sc., Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Water erosion is also one of the most important factors in land degradation. Among the different types of water erosion, gully erosion is a very obvious and prominent type of soil erosion and is one of the most important challenges threatening food production, human health, and the ecosystem. Since the amount of soil loss due to gully erosion is directly related to environmental factors, it is possible to model the amount of soil loss due to gullies based on environmental conditions. On the other hand, field measurement of the amount of soil loss due to gully erosion is very time-consuming and costly, and direct measurement of gully erosion on a large scale is not possible. In this regard, this study aimed to evaluate the effectiveness of support vector machine (SVM) and artificial neural network (ANN) models in modeling soil loss due to gully erosion in the Mahurmilati watershed located in the southwest of Fars province.

Materials and Methods

In field visits, the geographical location of all gullies located in this watershed was recorded using a GPS device, and after matching with Google Earth satellite images, these points were transferred to the GIS and a gully distribution map was drawn. Field measurements of the dimensional parameters of 70 gullies were carried out over four years (2021-2024), including: gully length, upper width, lower width, and gully depth, and the volume and weight of soil lost due to gully erosion were also calculated. For the modeling process, 15 environmental factors were selected as independent variables (predictor variables).

Article Type: Research Article

*Corresponding Authors' E-mail: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

Citation: Soleimanpour, S.M., Rahmati, O., Shadfar, S., Enayati, M. 2025. Evaluation of the Efficiency of Support Vector Machine and Artificial Neural Network Models in Modeling Soil Loss Due to Gully Erosion. *Watershed Management Research*. 38(3)78-99.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.368669.1616

Received: 17 February 2025, **Received in revised form:** 25 March 2025, **Accepted:** 21 June 2025

Published online: 23 September 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.3, Ser. No: 148, Autumn 2025, pp.78-99.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



In the modeling process, environmental factors were considered as independent variables, and the rate of soil loss in gullies was considered as a dependent variable. The gullies were randomly divided into two groups: training (70%) and validation (30%). Modeling was performed using two models: support vector machine and artificial neural network, with a cross-validation approach. The accuracy of the models was evaluated using quantitative criteria such as root mean square error (RMSE), determination coefficient (R^2), RSR error index, and goodness of fit (d).

Results and Discussion

The results of the assessment of the prediction accuracy of the models showed that the smallest error size in terms of the root mean square error (RMSE) criterion was related to the support vector machine model, followed by the artificial neural network model in second place. Based on the evaluation criterion of the coefficient of determination (R^2), the support vector machine model ($R^2=0.41-0.59$) was in first place and the artificial neural network model ($R^2=0.21-0.34$) was in second place. In terms of the evaluation criterion of the RSR error index, the artificial neural network model was in first place and the support vector machine model was in second place. The highest degree of agreement between observational and forecast data in terms of agreement evaluation index (d) was for the support vector machine model (0.81), and the artificial neural network model with an agreement index size of 0.63 was in second place in performance. Therefore, based on the results of this study, the performance of the support vector machine model was better in terms of evaluation criteria of root mean square error (RMSE), explanation index, and agreement index, compared to the artificial neural network model, and it was introduced as the superior model for predicting the amount of soil loss due to gully erosion in the Mahurmilati watershed of Fars province.

Conclusion and Suggestions

In evaluating the performance of a model for simulating a phenomenon, several factors play a role in this issue that must be considered. Therefore, in this study, 15 environmental variables were used to predict soil loss due to gully erosion. In addition, using variables provided the model with very important information in terms of spatial and temporal changes and watershed characteristics. Also, in this study, the monitoring period was not long-term; but the performance of the two models used for predicting soil loss due to gully erosion was appropriate. One of the important advantages of this research was that the two models used were selected from among the most efficient artificial intelligence models, and by considering time-varying characteristics, future forecasting conditions were provided, and therefore, there is no need for repeated field measurements in the coming years. In fact, the model can predict the amount of soil loss caused by gullies in subsequent years based on the learnings gained during the training phase and by considering new rainfall and vegetation cover information. This finding was the most important distinguishing feature of this research and indicates that modeling can save time and money and provide valuable services to the country's water and soil conservation management. In this regard, it is suggested that models based on artificial intelligence and machine learning structures be used in future research.

Keywords: Artificial intelligence, Forecasting, Machine learning, Mahurmilati

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This article is derived from part of the results of the national research project entitled "Estimation of soil volume loss due to gully erosion using machine learning models and introduction of the most appropriate model", with the approved code 0-50-29-024-990514 at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. The authors of this article are grateful for the support of the aforementioned research institute and the Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, writing the first draft of the article, revising the article

Author 2: Performing software/statistical analyses, controlling the results

Author 3: Conceptualization, consulting, revising the article

Author 4: Revising and editing the article