

ارزیابی و مدل سازی فرسایش خاک با استفاده از روش های یادگیری ماشین (منطقه مورد مطالعه: شهرستان مراوه تپه و کلاله استان گلستان)

عبدالحسین بوعلی^۱، نرگس کریمی نژاد^{۲*}، مرتضی اکبری^۳، مریم یعقوبی^۴، محسن فراهی^۵

^۱ محقق پسادکتری، آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

گرگان، ایران، عبدالحسین بوعلی، hossien.boali@yahoo.com

^۲ استادیار، بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، نرگس کریمی نژاد

narges.karimi991@gmail.com

^۳ دانشیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، مرتضی

اکبری، m-akbari@um.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، مریم یعقوبی،

yaghoobi7172@yahoo.com

^۵ استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی سراوان، سراوان، ایران، محسن فراهی،

mohsen.farahi62@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، با هدف مدل سازی فرسایش آبی در مناطق شمالی استان گلستان (شهرستان های مراوه تپه و کلاله)، نقش شاخص های زیست محیطی و اقلیمی کلیدی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص هایی مانند بارش، پوشش گیاهی (NDVI)، بافت سطحی خاک (TGSI)، کاربری اراضی، رطوبت سطحی (NDMI)، تغییرات ارتفاعی (DEM)، خاک لخت (BI) و شوری خاک (NDSI) به عنوان عوامل مؤثر شناسایی شدند. سه الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبانی و مدل رگرسیون درختی پیشرفته با ارزیابی عملکرد و شاخص های آماری مختلف به منظور مدلسازی مکانی فرسایش آبی به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد مدل ترکیبی (Ensemble) بر پایه میانگین وزنی خروجی مدل های منفرد، با دقت بالا ($TSS = 0.89$ و $ROC = 0.93$ ، $Kappa = 0.90$) توانست پهنه های پرخطر فرسایش را با وضوح و صحت بیشتری نسبت به مدل های تکی مشخص کند. نقشه های حاصل، مناطق شمالی، غربی و جنوب غربی را به عنوان محدوده های دارای پتانسیل بالای فرسایش آبی معرفی نمودند. اهمیت بالای بارش و پوشش گیاهی به عنوان عوامل اصلی فرسایش، بر لزوم بهبود مدیریت منابع خاک و برنامه ریزی حفاظتی تاکید دارد. نتایج این مطالعه، کاربرد مدل های یادگیری ماشین ترکیبی را به عنوان ابزاری مؤثر برای پیش بینی و مدیریت پایدار فرسایش آبی در مناطق حساس اقلیمی به اثبات رساند و می تواند راهنمایی برای تصمیم گیرندگان در حوزه حفاظت منابع طبیعی باشد.

کلمات کلیدی: مدل سازی، فرسایش آبی، شمال استان گلستان، روش های یادگیری ماشین.

۱-مقدمه

فرسایش خاک یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است که تأثیرات منفی قابل توجهی بر روی کشاورزی، منابع آب و بوم‌سازگان طبیعی دارد (Wijitkosum, 2020). استان استان گلستان به عنوان یکی از مناطق کلیدی در تولید محصولات زراعی نظیر گندم، جو، برنج و سیب‌زمینی شناخته می‌شود. این استان به دلیل خاک‌های حاصلخیز و شرایط اقلیمی مناسب، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند. بخش عمده‌ای از منابع تولید کشاورزی استان از اراضی لسی تأمین می‌شود که به علت فرسایش‌پذیری بالا، نیازمند توجه ویژه به کیفیت خاک و مدیریت مؤثر این اراضی است (نجفی نیا و همکاران، ۱۳۹۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان فرسایش خاک در این منطقه تحت تأثیر کاربری‌های مختلف متفاوت است؛ به‌طوری که در شهرستان‌های کلالة و مراوه تپه، کاربری‌های زراعی (۱۳۷۹۵۶ هکتار) و مرتعی (۲۸۱۶۶۲ هکتار) بیشترین تأثیر را بر فرسایش دارند (جعفری اردکانی و همکاران، ۱۳۸۸). این نهشته‌ها سرشاخه‌های گرگ‌انرود و اترک را تغذیه کرده و تولید رسوب بالا در پایین‌دست می‌تواند عواقب زیست‌محیطی و اقتصادی جدی به همراه داشته باشد. به‌طور خاص، نرخ تولید رسوب در این نهشته‌ها می‌تواند به ۲۱ تا ۲۷ تن در هکتار برسد (عرب خدری، ۱۴۰۰). که این امر نیازمند مدیریت دقیق منابع طبیعی است. مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش در اراضی لسی نه تنها برای شناسایی و مدیریت این خطرات ضروری است، بلکه به کشاورزان و مدیران منابع طبیعی کمک می‌کند تا با اتخاذ تدابیر مناسب، از کاهش کیفیت خاک (فرسایش و رسوب) و آسیب‌های حاصله به تولیدات جلوگیری کنند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰).

با توجه به پیچیدگی عوامل مؤثر بر فرسایش خاک، استفاده از روش‌های سنتی برای ارزیابی و مدل‌سازی این پدیده ممکن است ناکافی باشد. مدل‌های سنتی مانند^۱ PSIAC و^۲ IRIFR به طور گسترده‌ای برای ارزیابی فرسایش آبی و بادی استفاده می‌شوند. این مدل‌ها معمولاً بر اساس داده‌های میدانی و ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند بافت، شیب، پوشش گیاهی و بارش طراحی شده‌اند (Bashari et al., 2023). این مدل‌ها معمولاً نمی‌توانند تعاملات پیچیده بین عوامل مختلف را به خوبی شبیه‌سازی کنند و در نتیجه ممکن است دقت پیش‌بینی آن‌ها پایین باشد (Boali, et al., 2024). به همین دلیل، در سال‌های اخیر توجه بیشتری به استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری ماشین جلب شده است. این روش‌ها می‌توانند با پردازش حجم بالای داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و توپوگرافی، الگوهای فرسایش را شناسایی کرده و پیش‌بینی دقیقی از میزان فرسایش ارائه دهند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعه‌ای که در اراضی شرق دریاچه ارومیه انجام شد، نشان داد که مدل شبکه عصبی هیبرید شده با الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA) بهترین عملکرد را در پیش‌بینی فرسایش پذیری بادی خاک داشت (راعی و همکاران، ۱۳۹۹). تحقیقاتی که توسط جلالی فرد و همکاران انجام شد، به بررسی فرسایش پایپینگ در اراضی لسی استان گلستان پرداختند. این مطالعه با استفاده از رگرسیون لجستیک، خطر تشکیل پایپینگ را پیش‌بینی کرد و نشان داد که متغیرهای مختلف مانند مقاومت خاک و فاصله از آبراهه تأثیر زیادی بر خطر تشکیل پایپینگ دارند (جلالی فرد و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین تحقیقاتی که در حوزه آبخیز باختگان انجام شده است، نشان داد که مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی فرسایش بادی و مدل ماشین بردار پشتیبانی نیز برای پیش‌بینی فرسایش آبی عملکرد خوبی داشته است. این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای مدل‌های هوش مصنوعی در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده فرسایش خاک است (جلالی و همکاران، ۱۴۰۲). در اراضی قرقری شهرستان هیرمند نیز از روش‌های هوش

¹ Iran Research Institute of Forest and Rangelands

² Pacific Southwest Inter- Agency Committee

The First National Congress of Artificial Intelligence in Agriculture, Natural Resources, and Environment (3-4 September 2025)

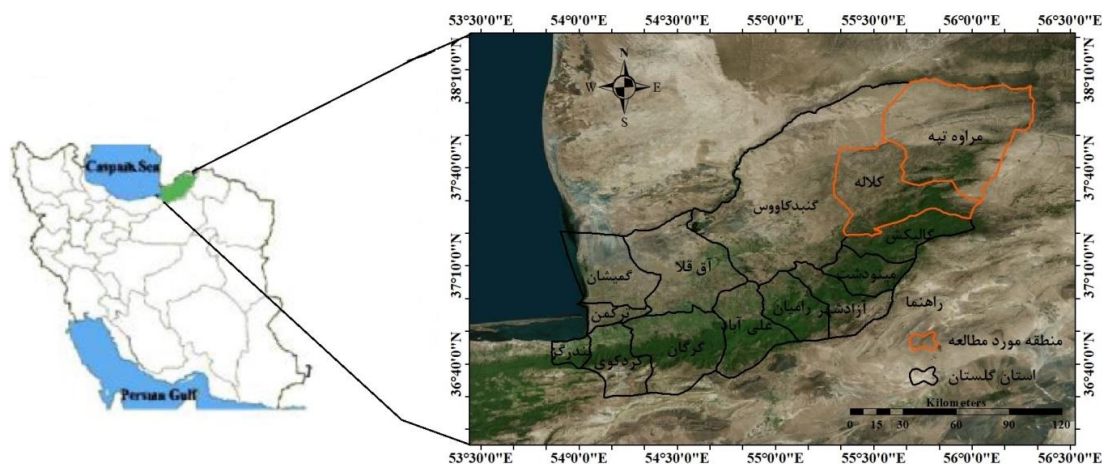
مصنوعی به منظور پیشبینی شوری خاک استفاده شده است. در این تحقیق از روش‌های زمین‌آمار و مدل‌های هوش مصنوعی شامل شبکه عصبی مصنوعی، درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌های هوش مصنوعی به طور قابل توجهی دقت بیشتری در برآورد شوری خاک نسبت به روش‌های زمین‌آمار دارند (پیری و مبارکی، ۱۴۰۰).

هدف این تحقیق ارزیابی و مدل‌سازی فرسایش خاک در نهشته‌های لسی شمال شرق استان گلستان (شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة)، با استفاده از روش‌های داده‌کاوی است. این تحقیق می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر عوامل مؤثر بر فرسایش خاک کمک کرده و راهکارهای مدیریتی مناسبی برای کاهش اثرات منفی آن ارائه دهد. با توجه به اهمیت موضوع (تهدید و فرصت نهشته‌های لسی) و نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع طبیعی، این مطالعه می‌تواند گامی مؤثر در جهت حفاظت از خاک و توسعه پایدار در منطقه محسوب شود.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شمال شرق استان گلستان شامل شهرستان‌های کلالة و مراوه‌تپه با مساحت ۴۹۴۴٫۵ کیلومتر مربع (شکل ۱) با موقعیت جغرافیایی بین ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی می‌باشد. بیش از دو سوم استان گلستان آب و هوای خشک و نیمه خشک دارد که هر چه به سوی شمال و شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة نزدیک می‌شویم بر خشکی آن افزوده می‌شود. متوسط بارش سالانه و دمای منطقه در طی دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۰) به ترتیب ۲۷۵/۴ میلی متر و ۱۶/۵ درجه سانتی گراد برآورد گردید.



(الف)

(ب)

شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در الف- ایران، ب- شهرستان‌های کلالة و مراوه‌تپه در استان گلستان.

۲-۲- لایه‌های ورودی

عامل‌های اقلیمی، خاک، پستی بلندی و پوشش گیاهی از مجموعه عامل‌های مؤثر بر فرسایش آبی هستند (Yang et al., 2023). برای مدل‌سازی مکانی فرسایش با مدل‌های یادگیری ماشین، اولین گام تعیین و انتخاب عامل‌های مؤثر بر فرسایش است.

(Mohamadifar & Gholami, 2021). بنابراین در این طرح ابتدا با بررسی منابع و ارزیابی مدل‌های موجود، عامل‌های تأثیرگذار بر فرسایش آبی تعیین خواهد شد. دومین ورودی به مدل‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی مکانی، نقاط فرسایشی است. در این پژوهش نقاط فرسایش آبی، در طی بازدیدهای میدانی تعیین خواهد شد. براین اساس حداقل ۱۰۰ نقطه فرسایش آبی در منطقه شناسایی خواهد شد.

۳-۲- تعیین شاخص‌های سنجش از دوری و توپوگرافی

برای تهیه شاخص‌های سنجش از دوری نیز از تصویر ماهواره‌ی لندست استفاده خواهد شد. به منظور سهولت در استفاده از باندها، این تصویر از سامانه Google Earth Engine تهیه خواهد شد. در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی فرسایش آبی از مجموعه‌ای از شاخص‌های سنجش از دوری استفاده خواهد شد که به طور خاص برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف فرسایش خاک طراحی شده‌اند. این شاخص‌ها شامل NDVI (شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی)، NDMI (شاخص رطوبت نرمال شده)، NDSI (شاخص شوری نرمال شده)، TGSi (اندازه ذرات بالای سطح خاک) و BSI (شاخص خاک لخت)، CHRIPS (بارش)، کاربری اراضی و مدل رقومی ارتفاعی هستند. با استفاده از این شاخص‌ها، می‌توان به تحلیل دقیق‌تری از وضعیت رطوبت، مواد آلی و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دست یافت. همچنین نقاط تعلیمی برای اجرای مدل‌ها براساس وجود (۵۰ نمونه) و عدم وجود (۵۰ نمونه) فرسایش آبی اجرا خواهد شد. بنابراین از مناطقی که فرسایش آبی وجود ندارند هم نمونه‌گیری خواهد شد. هدف این پژوهش، ایجاد یک مدل جامع و کارآمد برای پیش‌بینی فرسایش آبی است که می‌تواند به مدیریت بهتر منابع طبیعی و کشاورزی کمک کند.

۴-۲- مدل‌های یادگیری ماشین

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی فرسایش خاک، ۳ روش یادگیری ماشین به کار گرفته خواهد شد. که هر یک ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند. تمامی این مدل‌ها در محیط برنامه‌نویسی R اجرا شدند. مدل جنگل تصادفی (Random Forest) یکی از روش‌های محبوب در یادگیری ماشین است که برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این مدل با ایجاد مجموعه‌ای از درختان تصمیم عمل می‌کند و نتایج آن‌ها را ترکیب می‌کند تا دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. جنگل تصادفی به دلیل توانایی‌اش در کاهش خطر بیش‌برازش و همچنین قابلیت پردازش داده‌های بزرگ و پیچیده، به عنوان یک روش بسیار مؤثر شناخته می‌شود (Belgiu & Drăgu, 2016). مدل ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine) یک الگوریتم قدرتمند برای شناسایی مرزهای بین کلاس‌ها است. این مدل با استفاده از هسته‌های مختلف، به ویژه هسته خطی، قادر است داده‌ها را در فضاهای چندبعدی تفکیک کند. SVM به دلیل توانایی‌اش در کار با داده‌های غیرخطی و پیچیده، برای تحلیل فرسایش خاک بسیار مناسب است (Tang, et al, 2020). مدل رگرسیون درختی پیشرفته (Boosted Regression Trees) ترکیبی از چندین درخت تصمیم است که برای بهبود دقت پیش‌بینی طراحی شده است. این مدل با تمرکز بر الگوهای پیچیده داده‌ها، قادر به شناسایی روابط غیرخطی بین متغیرها می‌باشد. BRT با استفاده از روش‌های تقویت (boosting) می‌تواند عملکرد را به طور قابل توجهی افزایش دهد و به عنوان یک ابزار مؤثر در تحلیل فرسایش خاک شناخته می‌شود (Park, et al, 2016).

۲-۵- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این تحقیق از سه شاخص ضریب کاپا، منحنی تشخیص عملکرد^۱ و آمار واقعی مهارت مرتبط با آستانه^۲ به عنوان روش های ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده خواهد شد. ضریب کاپا، که میزان توافق بین پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های واقعی را می‌سنجد، به عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد کلی مدل در دسته‌بندی صحیح نمونه‌ها به کار رفته است. دامنه تغییرات این شاخص از +۱ تا -۱ متغیر است (Bofana et al., 2020). منحنی مشخصه عملکرد نیز، با نمایش تصویری از تعادل بین نرخ مثبت واقعی و نرخ مثبت کاذب در آستانه‌های مختلف، امکان ارزیابی جامع‌تری از توانایی مدل در تفکیک کلاس‌ها را فراهم کرده است. این شاخص کلاس‌های عالی (۰/۹ - ۱)، بسیارخوب (۰/۸ - ۰/۹)، خوب (۰/۷ - ۰/۸)، متوسط (۰/۶ - ۰/۷) و ضعیف (۰/۵ - ۰/۶) را برای همبستگی کیفی و کمی سطح زیر منحنی ارائه کرده‌اند (Devkota et al., 2013). در نهایت، آمار مهارت واقعی مبتنی بر آستانه، به عنوان معیاری برای ارزیابی حساسیت مدل به تغییرات در آستانه تصمیم‌گیری، به کار گرفته شده است تا اطمینان حاصل شود که مدل قادر به ارائه نتایج قابل اعتماد در شرایط مختلف است. کلاس‌های شاخص tss به ترتیب ضعیف (کمتر از ۰/۲)، متوسط (۰/۲ تا ۰/۶)، و خوب (بزرگ‌تر از ۰/۶) در نظر گرفته شود (Allouche et al., 2006). استفاده از این سه شاخص، امکان ارزیابی چندوجهی و دقیق‌تری از عملکرد مدل‌ها را فراهم آورده است.

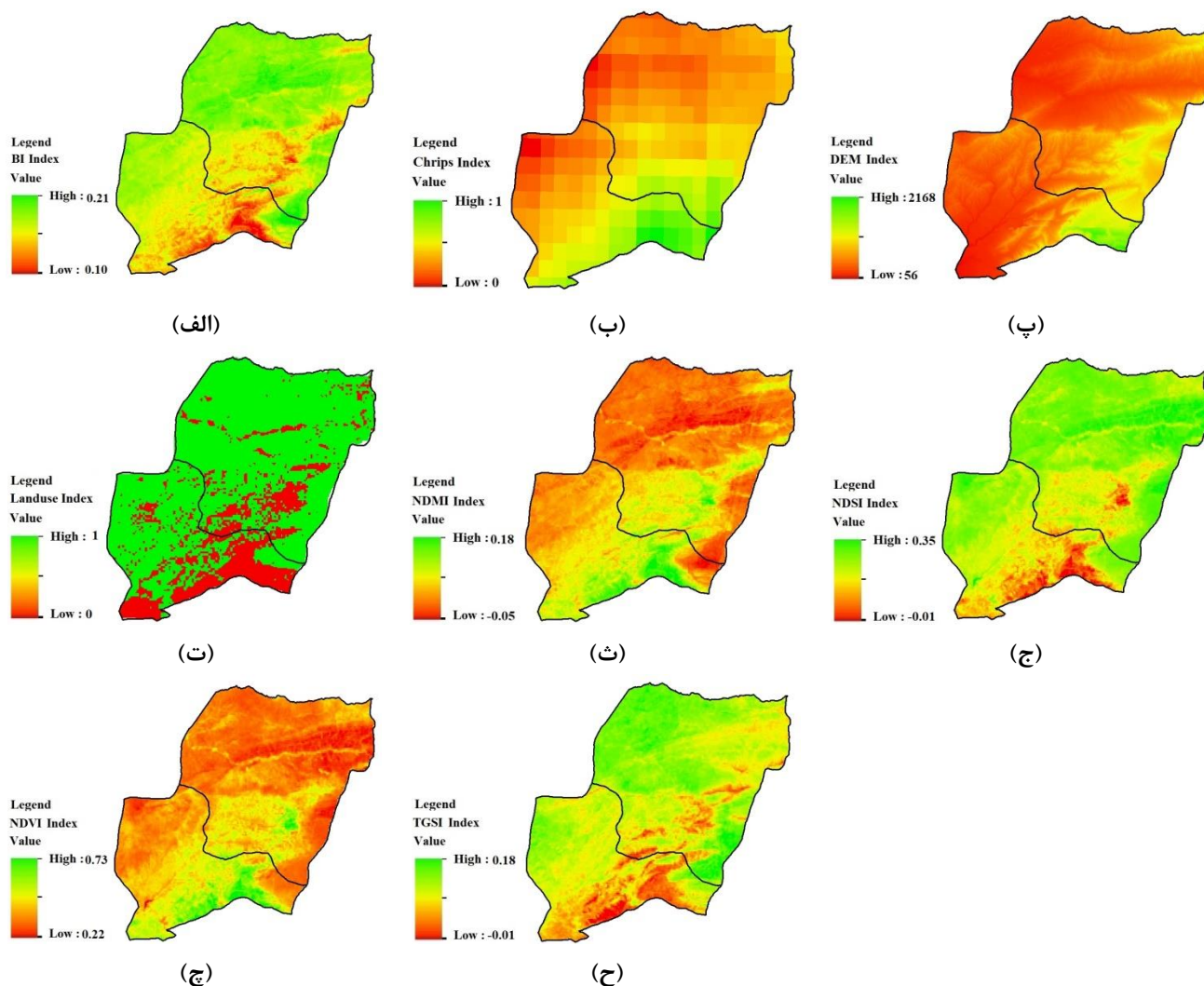
۳- نتایج و بحث

۳-۱- شاخص‌های سنجش از دوری

در مدل‌سازی فرسایش آبی منطقه شمال استان گلستان (شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة)، هر یک از شاخص‌های تعیین شده، عوامل تعیین‌کننده پتانسیل و شدت فرسایش محسوب می‌شوند. شاخص خاک لخت (BI) بیانگر مناطقی با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی است که مقادیر بالاتر آن در جنوب و جنوب شرق منطقه، آسیب‌پذیری این نواحی را در برابر فرسایش آبی نشان می‌دهد. Chirps میزان و پراکندگی بارش را مشخص می‌کند؛ نواحی مرکزی و جنوبی با مقادیر بالاتر این شاخص، پتانسیل بیشتری برای ایجاد رواناب و فرسایش دارند. مدل رقومی ارتفاع شیب و ارتفاع زمین را مشخص می‌کند که در نواحی جنوبی و شرقی با شیب زیاد، عامل مهمی در جابجایی ذرات خاک و افزایش فرسایش است. شاخص کاربری اراضی پراکندگی مناطق کشاورزی و منابع طبیعی را نشان می‌دهد و مناطق با پوشش گیاهی ضعیف‌تر به‌شدت در معرض تهدید فرسایش قرار دارند. شاخص NDMI وضعیت رطوبت خاک را منعکس می‌کند و مقادیر کمتر آن در جنوب، نشان‌دهنده خشکی و افزایش حساسیت خاک به فرسایش است. شاخص NDSI میزان شوری خاک را مشخص می‌کند؛ خاک‌های شور (بیشتر در مناطق جنوبی و شرقی) اغلب دارای ساختار فیزیکی ضعیف‌تری هستند که پایداری آن‌ها را در برابر جریان آب کاهش داده و آن‌ها را مستعد فرسایش بیشتر می‌کند. شاخص NDVI تراکم و سلامت پوشش گیاهی را می‌سنجد. شاخص TGSi نیز به طور خاص، بافت سطحی خاک و خصوصیات مرتبط با آن را نشان می‌دهد. مقادیر پایین NDVI و TGSi در جنوب منطقه، اهمیت پوشش گیاهی را به عنوان عاملی برای کاهش فرسایش برجسته می‌سازد. به طور کلی، با حرکت به سمت نواحی با ارتفاع و شیب بیشتر، خاک لخت‌تر، بارش بیشتر و شوری بالاتر، و پوشش گیاهی ضعیف‌تر خطر و شدت فرسایش آبی افزایش می‌یابد. مجموعه این شاخص‌ها، تحلیل جامع و مدل‌سازی دقیق فرسایش آبی را در شهرستان‌های مراوه‌تپه و کلالة امکان‌پذیر می‌سازد.

¹ Receiver Operating Characteristic (ROC)

² True Skill Statistic (TSS)



شکل ۲. شاخصهای سنجش از دوری انتخاب شده به منظور مدل سازی فرسایش آبی. الف- شاخص خاک لخت، ب- شاخص بارش، پ- شاخص ارتفاع، ت- شاخص کاربری اراضی، ث- شاخص رطوبت خاک، ج- شاخص شوری خاک، چ- شاخص پوشش گیاهی و شاخص بافت خاک سطحی.

۲-۳- مدل سازی فرسایش آبی

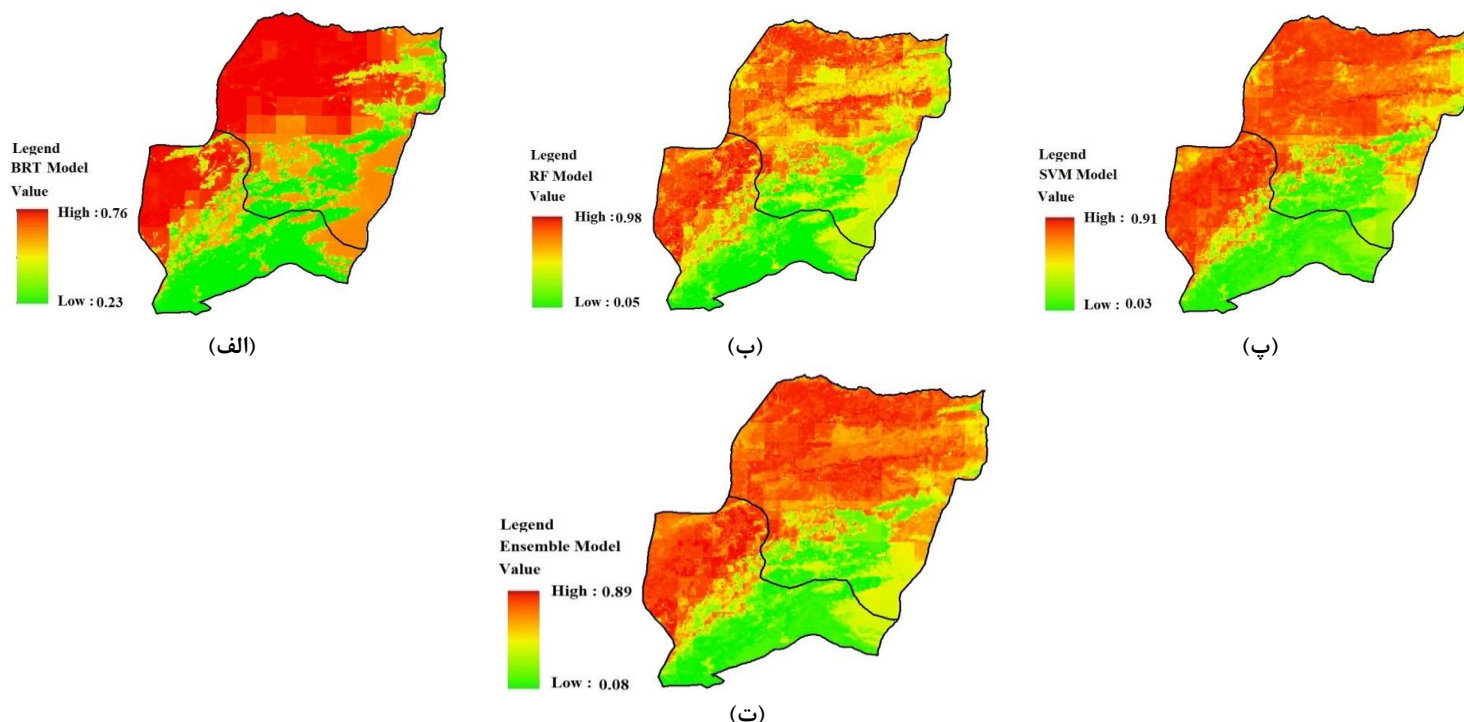
پس از تهیه نقشه‌های شاخص‌های سنجش از دوری و تعیین نقاط وجود و عدم وجود فرسایش آبی، مدل‌سازی انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۳)، سه الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین جهت مدل‌سازی مکانی پتانسیل فرسایش آبی در شمال استان گلستان به کار گرفته شد. مقایسه نقشه‌های حاصله حاکی از آن است که مدل BRT عمدتاً نواحی شمالی و مرکزی منطقه را به عنوان پهنه‌های با پتانسیل فرسایشی بالا شناسایی نموده است. مدل RF با دامنه گسترده‌تر (حداکثر مقدار ۰٫۹۸)، مناطق وسیع‌تر و پراکنده‌تری در شمال و مرکز را در کلاس‌های پرخطر قرار داده و مرزهای ریسک را گسترده‌تر ترسیم نموده است. مدل SVM ضمن مشابهت با سایر مدل‌ها، برخی تفاوت‌های محلی نشان می‌دهد و با مقدار بالاتر شاخص عملکرد $ROC = ۰٫۸۴$ ، $KAPPA = ۰٫۸۴$ و $TSS = ۰٫۸۷$ مناطق خطر را با دقت مکانی بالایی مشخص ساخته است. دلیل عملکرد بالای مدل SVM که یک الگوریتمی پیشرفته محسوب می‌شود این است که براساس شناسایی شرایط متفاوت و تعیین توابع گوناگون ناپارامتری، بیشترین میزان تفکیک را بین داده‌ها ایجاد می‌کند (Vapnik, 1995). براساس جدول (۱)، هر سه مدل منفرد دارای عملکرد

The First National Congress of Artificial Intelligence in Agriculture, Natural Resources, and Environment (3-4 September 2025)

نسبتاً مطلوبی در ارزیابی فرسایش خاک داشته‌اند، اما مدل ترکیبی (Ensemble) با برخورداری از $Kappa=0.90$ ، $ROC=0.93$ و $TSS=0.89$ ، عملکرد به مراتب برتری را نشان داده است. این مدل بر پایه میانگین وزنی خروجی سه الگوریتم و متناسب با معیارهای کارایی هر مدل ساخته شده است، به گونه‌ای که مدل‌های دقیق‌تر سهم بیشتری در ترکیب یافته‌اند.

جدول ۱- ارزیابی عملکرد مدل‌ها براساس شاخص‌های مختلف			
Models	KAPPA	ROC	TSS
BRT	۰,۷۷	۰,۸۱	۰,۵۹
SVM	۰,۸۴	۰,۸۴	۰,۸۷
RF	۰,۸۱	۰,۸۰	۰,۶۱
Ensemble	۰,۹۰	۰,۹۳	۰,۸۹

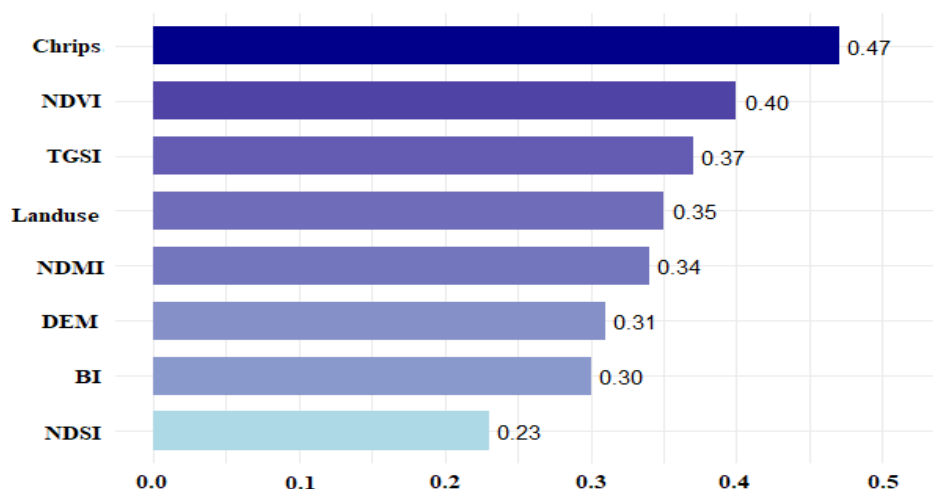
خروجی مدل ترکیبی نشان داد که این رویکرد ضمن ادغام نقاط قوت مدل‌های منفرد، مرزهای مکانی پتانسیل فرسایش را با وضوح و جزئیات بالاتری نسبت به مدل‌های تکی نمایش می‌دهد و توزیع مکانی نواحی پرریسک را به صورت واقع‌بینانه‌تری ترسیم کرده است. براساس نقشه ترکیبی مناطق شمالی، غربی و جنوب غربی منطقه پتانسیل خطر فرسایش آبی بیشتری را داشته‌اند. براساس نقشه ترکیبی ۲۳ درصد از منطقه معادل ۱۳۵۷۲,۳۱ هکتار در کلاس فرسایش آبی کم، ۱۵ درصد (۷۳۷۰۷,۲۶ هکتار) در کلاس متوسط، ۲۲ درصد (۱۱۰۴۳۲,۹۴ هکتار) در کلاس شدید و ۴۰ درصد (۱۹۶۷۳۸,۲۱ هکتار) در کلاس بسیار شدید فرسایش آبی قرار گرفت (شکل ۳).



شکل ۳. مدل سازی فرسایش آبی با استفاده از مدل‌های الف-BRT، ب-RF، ج-SVM و ت- ترکیبی.

۳-۳- مهمترین متغیرها

شناسایی متغیرهای تاثیرگذار بر فرسایش آبی اهمیت بالایی برای مطالعات محیط زیست، حفاظت از منابع طبیعی و توسعه پایدار دارد. با شناخت این متغیرها، می‌توانیم برنامه‌های مناسبی برای کنترل و کاهش فرسایش آبی ارائه دهیم و سیستم‌های مدیریت خاک را بهبود بخشیم. براین اساس میزان اهمیت شاخص‌های مورد بررسی در مدل ترکیبی تعیین شد. نتایج نشان داد که به ترتیب بارش، پوشش گیاهی (NDVI)، بافت سطحی خاک (TGSI)، کاربری اراضی، رطوبت سطحی (NDMI)، تغییرات ارتفاعی (DEM)، خاک لخت (BI) و شاخص شوری خاک (NDSI)، اهمیت بیشتری دارند (شکل ۴). این اطلاعات می‌تواند به ما در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی کمک کند تا از خطرات ناشی از فرسایش آبی جلوگیری کنیم.



شکل ۴. اهمیت متغیرهای تاثیرگذار بر فرسایش آبی در مدل ترکیبی

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌سازی فرسایش آبی در شمال استان گلستان تحت تاثیر مجموعه‌ای از شاخص‌های محیطی و اکولوژیکی قرار دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به بارش، پوشش گیاهی (NDVI)، بافت سطحی خاک (TGSI)، کاربری اراضی، رطوبت سطحی (NDMI)، تغییرات ارتفاعی (DEM)، خاک لخت (BI) و شوری خاک (NDSI) اشاره کرد. جدول ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز بیانگر برتری مدل ترکیبی (Ensemble) نسبت به مدل‌های منفرد BRT، RF و SVM بود که با تلفیق خروجی این الگوریتم‌ها و وزن‌دهی مبتنی بر عملکرد هر کدام، توانسته است دقت و وضوح مکانی پیش‌بینی فرسایش آبی را به طرز قابل توجهی افزایش دهد. محدوده‌های شمالی، غربی و جنوب غربی منطقه براساس نقشه ترکیبی، بیشترین احتمال فرسایش آبی را دارا بودند که می‌تواند متاثر از شرایط توپوگرافی، پوشش گیاهی ضعیف و وجود خاک‌های حساس به فرسایش در این مناطق باشد. اهمیت بالای متغیرهای بارش و پوشش گیاهی در تعیین شدت فرسایش، نقش محوری این عوامل در تحریک رواناب سطحی و تثبیت خاک را تأکید می‌کند. در نهایت نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد مدل‌های ترکیبی یادگیری ماشین در شناخت دقیق‌تر و مدیریت بهینه فرسایش آبی، رویکردی مؤثر و جامع جهت برنامه‌ریزی‌های پایدار حفاظت خاک در

مناطق حساس مانند؛ شمال استان گلستان محسوب می‌شود و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های علمی و مدیریتی برای مقابله با تهدیدات فرسایش آبی قرار گیرد.

۵-منابع

- پیری، ح.، و مبارکی، م. (۱۴۰۰). مقایسه روش‌های هوش مصنوعی و زمین‌آمار در پیش‌بینی شوری سطحی خاک در قرقری، هیرمند. محیط زیست و مهندسی آب، ۸(۳)، ۶۲۲-۶۳۵.
- جعفری اردکانی، ع.، بیات، ر.، پیروان، ح. ر.، و شریعت جعفری، م. (۱۳۸۸). بررسی وضعیت فرسایش و رسوب در نهشته‌های لسی استان گلستان. ششمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران.
- جلالی فرد، ع.، حسینعلی‌زاده، م.، کمکی چوقی، ب.، و عظیم محسنی، م. (۱۳۹۷). مدل‌سازی فرسایش پایپینگ در اراضی لسی. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۸(۴)، ۱-۱۸.
- راعی، ب.، احمدی، ع.، نیشابوری، م.، قربانی، م.، و اسدزاده، ف. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی برخی روش‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی فرسایش‌پذیری بادی خاک در بخشی از اراضی شرق دریاچه ارومیه. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱)، ۶۱-۷۶.
- عرب خدری، ح. (۱۴۰۰). وضعیت فرسایش آبی و رسوب‌دهی ایران، واکاوی آماری و مقایسه‌ای. پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۶(۲)، ۱۳۹-۱۵۶.
- موسوی، س.، سرمیدیان، ف.، امید، م.، و بوگارت، پ. (۱۴۰۰). کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر و پتاسیم خاک در بخشی از اراضی دشت آبیک. پژوهش‌های خاک، ۳۵(۴)، ۳۹۷-۴۱۱.
- نجفی‌نیا، م.، خرمالی، ف.، کیانی، ف.، و مطلق، م. ب. (۱۳۹۷). میکرومورفولوژی خاک‌های لسی اوایل پلیستوسن و مقایسه آن با لسی‌های مدرن. مهندسی زراعی، ۴۱(۴)، ۶۷-۸۲.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Bashari, H., Boali, A., & Soltani, S. (2023). Accommodating uncertainty in soil erosion risk assessment: Integration of Bayesian belief networks and MPSIAC model. *Natural Hazards Research*. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.009>
- Belgiu, M., & Drăgu, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Boali, A., Reza, H., & Mohammadian, A. (2024). Remote Sensing Applications: Society and Environment Remotely sensed desertification modeling using ensemble of machine learning algorithms. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34(January), 1-16.
- Bofana, J., Zhang, M., Nabil, M., Wu, B., Tian, F., Liu, W., ... Moyo, C. (2020). Comparison of different cropland classification methods under diversified agroecological conditions in the Zambezi River Basin. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132096>
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., ... Althuwaynee, O. F. (2013). Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65(1), 135-165. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0347-6>
- Mohamadifar, A., & Gholami, H. (2021). Assessment of the interpretability of data mining for the spatial modelling of water erosion using game theory. *Catena*, 200(105178), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105178>

- Park, S., Im, J., Jang, E., & Rhee, J. (2016). Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011>
- Tang, X., Li, J., Liu, M., Liu, W., & Hong, H. (2020). Flood susceptibility assessment based on a novel random Naïve Bayes method: A comparison between different factor discretization methods. *Catena*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104536>
- Vapnik, V. N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory. The Nature of Statistical Learning Theory*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>
- Wijitkosum, S. (2020). *Jo ur l P re. International Soil and Water Conservation Research*. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation and China Water and Power Press. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.005>
- Yang, X., Yang, Q., Zhu, H., Wang, L., Wang, C., Pang, G., ... Hussain, S. (2023). Quantitative Evaluation of Soil Water and Wind Erosion Rates in Pakistan. *Remote Sensing*, 15(9), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs15092404>

Evaluation and Modeling of Soil Erosion Using Machine Learning Methods

(Study Area: Maraveh Tappeh and Kalaleh Counties, Golestan Province)

Abdolhossein Boali¹ Narges Kariminejad², Morteza Akbari³, Maryam Yaghoobi⁴, Mohsen Farahi⁵

Abstract

This study aims to model water erosion in the northern regions of Golestan Province (Maraveh Tappeh and Kalaleh counties) by investigating the role of key environmental and climatic indices. Factors such as precipitation, vegetation cover (NDVI), soil surface texture (TGSi), land use, surface moisture (NDMI), elevation variations (DEM), bare soil (BI), and soil salinity (NDSI) were identified as influential variables. Three advanced machine learning algorithms Boosted Regression Trees (BRT), Random Forest (RF), and Support Vector Machine (SVM) were employed for spatial modeling of water erosion with comprehensive evaluation using various performance and statistical indices. The results demonstrated that the ensemble model based on the weighted average of individual model outputs achieved high accuracy (ROC=0.93, Kappa=0.90, and TSS=0.89) and delineated high-risk erosion zones with greater clarity and reliability compared to single models. The resulting maps identified northern, western, and southwestern parts of the study area as zones with elevated potential for water erosion. The significant influence of precipitation and vegetation cover as primary erosion drivers underscores the necessity for improved soil resource management and conservation planning. This study confirms the effectiveness of combined machine learning models as robust tools for the prediction and sustainable management of water erosion in climatically sensitive regions and provides valuable guidance for natural resource conservation decision-makers.

Keywords: Modeling, Water Erosion, Northern Golestan Province, Machine Learning Methods

¹ Postdoctoral Researcher, Watershed Management and Desert Regions Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran; Abdolhossein Boali (hossien.boali@yahoo.com)

² Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; Narges Kariminejad (narges.karimi991@gmail.com)

³ Associate Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; Morteza Akbari (m-akbari@um.ac.ir)

⁴ PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran; Maryam Yaghoobi (yaghoobi7172@yahoo.com)

⁵ Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources, Saravan Higher Education Complex, Saravan, Iran; Mohsen Farahi (mohsen.farahi62@gmail.com)