

شناسایی عوامل تأثیرگذار بر احتمال وقوع اشکال فرسایش خندقی با

استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

علی اکبر نظری سامانی^۱، غلامرضا راهی^{۲*}، نصرت الله اسماعیلی^۳، پریا پورمحمد^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷

چکیده

فرسایش خندقی یکی از شدیدترین اشکال فرسایش آبی در مناطق خشک و نیمه خشک است که با تخریب خاک و کاهش کارایی اراضی، پیامدهای قابل توجهی برای پایداری منابع خاک و آب ایجاد می کند. هدف این پژوهش، پهنه بندی حساسیت فرسایش خندقی و شناسایی عوامل محیطی مؤثر بر آن در حوزه آبخیز سمل، استان بوشهر بود. بدین منظور، ۱۴۵ موقعیت خندقی در منطقه شناسایی و مجموعه ای از متغیرهای خاکی، زمین شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی بررسی شد. مدل سازی حساسیت مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی (MaxEnt) انجام شد و اهمیت نسبی متغیرهای پیش بین بر اساس درصد مشارکت، اهمیت جایگشتی و آزمون Jackknife ارزیابی گردید. نتایج نشان داد کربنات کلسیم خاک در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر با ۴۳/۶ درصد و رس لایه های عمیق تر با ۳۹/۵ درصد، بیشترین مشارکت را در ساخت مدل داشتند و در مجموع، متغیرهای خاکی نسبت به بیشتر متغیرهای توپوگرافی نقش برجسته تری در پیش بینی مکانی فرسایش خندقی نشان دادند. مقادیر AUC برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۱۹ به دست آمد که نشان دهنده توان تفکیک مناسب مدل در داده های مورد بررسی بود. نتایج این پژوهش نشان می دهد نقشه حساسیت حاصل از مدل MaxEnt می تواند به عنوان ابزاری کمکی برای شناسایی پهنه های اولویت دار و هدف گذاری اقدامات مدیریتی و حفاظتی در محدوده مورد مطالعه به کار رود. همچنین نتایج تحلیل های آماری شکل پلان و نوع بالاکنند نشان داد که بین شکل خندق ها و نوع پلان آن ها رابطه معنی داری وجود دارد. کنترل فرسایش خندقی تابع نوع شکل و فرایند مؤثر بر رخداد و توسعه آن است؛ بنابراین در مطالعات آینده نیاز است تا علاوه بر احتمال رخداد نوع خندق ایجاد شده نیز مورد واکاوی قرار بگیرد.

واژگان کلیدی: مدیریت پایدار آبخیز، آنتروپی شانون، شاخص های توپوگرافی، شکل بالاکنند

۱. استاد، گروه مهندسی احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استادیار، مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر. نویسنده مسئول: gh.rahi@areeo.ac.ir

۳. مربی، دانشگاه شهرکرد

۴. دانشجوی دکتری. گروه مهندسی احیا مناطق خشک و کوهستانی. دانشکده مناطق طبیعی. دانشگاه تهران. کرج، ایران.

مقدمه

خاک به عنوان بستر اصلی زیست و یکی از عناصر کلیدی در تأمین امنیت غذایی و شکل‌دهی به تولید ناخالص ملی کشورها، نقشی اساسی در پایداری جوامع انسانی دارد. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که فرسایش خاک از عوامل مهم زوال یا عقب‌ماندگی تمدن‌های بزرگ بوده است. در ایران نیز هر سال میلیون‌ها تن خاک حاصلخیز به دلیل کمبود پوشش گیاهی و تشدید فرسایش از سطح مراتع و اراضی کشاورزی از بین می‌رود (رفیعی سردویی^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). در میان انواع فرسایش، فرسایش خندقی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین اشکال آن است که تحت تأثیر مجموعه‌ای از شرایط محیطی و انسانی رخ می‌دهد. خندق‌ها از پیچیده‌ترین نمودهای فرسایش خطی به‌شمار می‌روند که طی مراحل مختلف و در گذر زمان، بر اثر تعامل عوامل طبیعی و انسانی شکل گرفته و گسترش می‌یابند. بسیاری از متخصصان حفاظت خاک ظهور خندق‌ها را نشانه پیشرفته‌ترین مرحله فرسایش می‌دانند (پوسن^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). این نوع فرسایش نه تنها نقش قابل‌توجهی در تخریب خاک و اراضی دارد، بلکه در بسیاری از حوزه‌های آبخیز منشأ ۱۰ تا ۹۴ درصد رسوبات محسوب می‌شود (بوته^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). خندق‌ها از منظر هیدرولوژیکی عملکردی مشابه آبراهه‌ها دارند و با ایجاد ارتباط میان بخش‌های بالادست و پایین‌دست حوزه آبخیز، مسیر انتقال رسوبات و آلاینده‌ها را تسهیل می‌کنند. این امر موجب خسارات مالی، کاهش حاصلخیزی اراضی و تهدید منابع طبیعی و زیرساخت‌های حیاتی می‌شود. فرایند شکل‌گیری فرسایش خندقی با رشد و توسعه خندق‌ها تفاوت دارد. اگرچه عوامل اولیه مؤثر بر آغاز فرسایش خندقی در مناطق مختلف ممکن است مشابه باشند، نحوه توسعه آن در هر منطقه متفاوت و وابسته به مجموعه‌ای از عوامل ناهمگون است. فرسایش خندقی می‌تواند ناشی از جریان سطحی، فرایندهای زیرسطحی مانند جریان زیرقشری،

اشباع و پاپینگ و حرکات توده‌ای موضعی باشد (نظری سامانی^۴ و همکاران، ۲۰۱۰)؛ بنابراین فرسایش خندقی پدیده‌ای پیچیده و چندبعدی است که ارائه مدلی جامع و جهانی برای آن به دلیل تنوع عوامل مؤثر، بسیار دشوار است. در ایران و سایر نقاط جهان، مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های مختلف به شناسایی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی پرداخته‌اند. شهرپور (۱۹۹۷) با استفاده از شاخص همپوشانی و عملگرهای فازی به پهنه‌بندی فرسایش خندقی پرداخت. پس‌ازآن، قدوسی (۲۰۰۵) با بهره‌گیری از عملگرهای فازی و شاخص همپوشانی، خطر فرسایش خندقی را در حوزه آبخیز زنجان‌رود در چهار طبقه بسیار کم، کم، متوسط و زیاد پهنه‌بندی کرد. طهماسبی‌پور و همکاران (۲۰۱۶) نیز کارایی مدل عامل قطعیت^۵ را برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی بررسی کردند و نتایج تحلیل حساسیت آنان نشان داد که متغیرهای خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی و شیب از عوامل مؤثر بر دقت پیش‌بینی هستند. در ادامه، عرب‌عامری^۶ و همکاران (۲۰۱۹) اهمیت عواملی نظیر نوع خاک، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی را در وقوع فرسایش خندقی نشان دادند. در سال‌های اخیر، استفاده از رویکردهای داده‌محور و مدل‌های یادگیری ماشین در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی گسترش یافته است. برنینی^۷ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی (MaxEnt)، حساسیت فرسایش خندقی و عوامل مؤثر بر آن را در حوزه Upper Mkhomazi در آفریقای جنوبی بررسی کردند. هان^۸ و همکاران (۲۰۲۲) نیز با استفاده از MaxEnt و مجموعه‌ای از متغیرهای توپوگرافی، خاکی، پوشش زمین، بارش و پوشش گیاهی، حساسیت فرسایش خندقی را مدل‌سازی کردند و بر نقش عواملی مانند شیب، پوشش زمین، ماده آلی، شاخص سطح برگ و بارش تأکید داشتند. چوما^۹ و همکاران (۲۰۲۳) با مقایسه الگوریتم‌های Random Forest، MaxEnt، شبکه عصبی مصنوعی و Boosted Regression

6. Arabameri

7. Bernini

8. Han

9. Chuma

1. Rafiei-Sardooi

2. Poesen

3. Boota

4. Nazari Samani

5. Certainty Factor (CF)

مورفولوژیکی خندق کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در پژوهش حاضر علاوه بر مدل سازی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی، رابطه میان نوع پلان و شکل مقطع عرضی خندق های مشاهده شده نیز به عنوان یک تحلیل تکمیلی بررسی شد.

از سوی دیگر، در ایران، گستره قابل توجهی از اراضی کشاورزی، به ویژه در استان بوشهر، در معرض فرسایش خندقی قرار دارد و حدود ۲۹۵۰۰ هکتار زمین کشاورزی از بین رفته است. از این رو، شناسایی مناطق حساس برای مدیریت و برنامه ریزی کاربری اراضی اهمیت فراوان دارد. یکی از رویکردهای مؤثر در این زمینه، پیش بینی مکانی فرسایش خندقی از طریق مدل های مبتنی بر داده های جغرافیایی است که نقشه های پهنه بندی خطر ارائه می دهند. این روش ها، در ترکیب با داده کاوی مکانی و تحلیل های آماری، توانایی شناسایی مناطق مستعد فرسایش به صورت کمی را داراست (مومنی دامنه^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). از این رو، شناسایی دقیق عوامل مؤثر، سازوکارها و آستانه های وقوع فرسایش در هر منطقه ضروری است تا نتایج به دست آمده قابل تعمیم به سایر نواحی مشابه باشد. با وجود مطالعات متعددی که به شناسایی و پهنه بندی فرسایش خندقی با استفاده از روش های مختلف تصمیم گیری چندمعیاره، منطق فازی و مدل های خطی پرداخته اند، همچنان خلأ قابل توجهی در به کارگیری مدل های داده محور و غیرخطی که قادر به پیش بینی مکانی احتمال وقوع خندق بر اساس داده های حضور باشند، وجود دارد. بسیاری از رویکردهای پیشین متکی بر وزندهی ذهنی عوامل یا ساختارهای خطی بوده اند، در حالی که فرسایش خندقی ماهیتی غیرخطی و آستانه ای دارد و تعامل هم زمان عوامل خاکی، توپوگرافی، هیدرولوژیکی و زمین شناسی در آن نقش تعیین کننده ایفا می کنند. در این راستا، استفاده از مدل های احتمالی مبتنی بر بیشینه آنتروپی می تواند چارچوبی مناسب برای مدل سازی روابط پیچیده بین وقوع خندق و متغیرهای محیطی فراهم کند. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر،

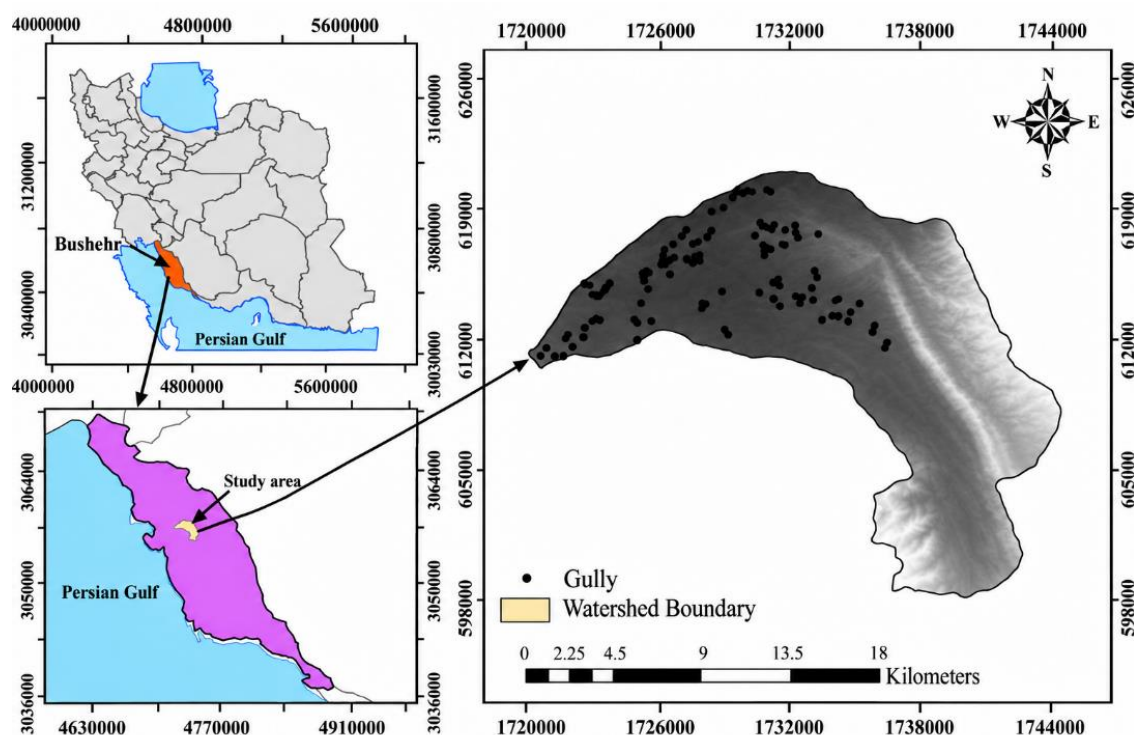
Tree نشان دادند که Random Forest و MaxEnt در منطقه مورد مطالعه عملکرد پیش بینی بهتری نسبت به دو مدل دیگر داشتند. رجیبیان و همکاران (۲۰۲۴) نیز در منطقه Baba-Arab ایران با استفاده از مدل های SVM، Maximum Entropy و ANN و مجموعه ای از عوامل خاکی، توپوگرافی، هیدرولوژیکی و محیطی، حساسیت فرسایش خندقی را ارزیابی کردند. در مطالعه ای جدیدتر، یعقوبی^۱ و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از تحلیل شیء مبنا و سه الگوریتم Random Forest، Maximum Entropy و SVM، حساسیت فرسایش خندقی را در شرق استان گلستان بررسی کردند. مجموعه این مطالعات نشان می دهد که استفاده هم زمان از متغیرهای خاکی، توپوگرافی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی در چارچوب مدل های داده محور می تواند در شناسایی عوامل مؤثر و پهنه های مستعد فرسایش خندقی مفید باشد. با توجه به پیچیدگی و ماهیت غیرخطی فرسایش خندقی، استفاده از مدل های داده محور می تواند در شناسایی روابط میان وقوع خندق و متغیرهای محیطی مؤثر باشد. در این میان، مدل بیشینه آنتروپی به دلیل قابلیت استفاده از داده های حضور و بررسی روابط غیرخطی میان متغیرهای پیش بین و وقوع خندق، برای پهنه بندی حساسیت فرسایش خندقی مناسب است (برنینی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هان و همکاران، ۲۰۲۲؛ چوما و همکاران، ۲۰۲۳). در کنار شناسایی مناطق مستعد وقوع خندق، بررسی ویژگی های مورفولوژیکی خندق ها نیز می تواند اطلاعات مهمی درباره فرایندهای حاکم بر شکل گیری و توسعه آنها فراهم کند. مقطع عرضی و الگوی پلان خندق می توانند بازتابی از نحوه تمرکز جریان، غلبه فرسایش عمقی یا جانبی، پایداری دیواره ها و مرحله تکاملی خندق باشند. ون^۲ و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان دادند که ویژگی های زمین شناسی و لایه های خاک، همراه با شیب زمین، می توانند در شکل و توسعه مورفولوژی خندق ها نقش داشته باشند. با این حال، در بسیاری از مطالعات پهنه بندی حساسیت، تمرکز اصلی بر مکان وقوع خندق بوده و ارتباط میان حساسیت مکانی و ویژگی های

حوزه آبخیز دره کره در محدوده $51^{\circ}15' E$ تا $51^{\circ}25' E$ و $28^{\circ}59' N$ تا $29^{\circ}10' N$ ، در شمال روستای چاهکوتاه و در فاصله حدود ۴۰ کیلومتری شهر بوشهر، در مسیر بوشهر-چاهپیر واقع شده است. مساحت این حوزه تا محل خروجی چاهپیر ۲۹۷۵۰ هکتار است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در ایران و استان بوشهر و همچنین پراکنش نقاط برداشت‌شده در محدوده حوزه نشان می‌دهد.

پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی و ارزیابی اهمیت متغیرهای مؤثر با استفاده از مدل MaxEnt و داده‌های جغرافیایی و همچنین بررسی تکمیلی رابطه میان نوع پلان و شکل مقطع عرضی خندق‌های مشاهده‌شده است؛ به‌طوری‌که نقشه‌ای پیوسته از احتمال نسبی وقوع خندق ارائه و مبنایی علمی برای مدیریت اراضی و برنامه‌ریزی اقدامات حفاظتی در مقیاس حوزه فراهم شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش خندق‌های برداشت‌شده

پلان به‌طور جداگانه بررسی شدند. شکل مقطع عرضی خندق‌ها در چهار گروه U شکل، V شکل، دوزنقه‌ای و UV طبقه‌بندی شد. همچنین، الگوی پلان خندق‌ها در پنج گروه خطی، پیشانی، محوری، پنجه‌ای و مرکب ثبت و طبقه‌بندی شد. این طبقه‌بندی بر اساس مشاهدات مستقیم میدانی و ویژگی هندسی غالب هر خندق انجام گرفت (شکل ۲). همچنین با برداشت نمونه‌های خاک و تجزیه آن‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل اجزای بافت خاک، مقدار ماده آلی،

روش پژوهش

شناسایی خندق‌ها در محدوده مورد بررسی

در این مرحله ابتدا با تفسیر چشمی عکس‌های هوایی، محدوده‌های خندقی در حوزه شناسایی شد. سپس با پیمایش‌های میدانی و عملیات صحرایی، ۱۴۵ خندق در منطقه شناسایی و موقعیت رأس بالاکند آن‌ها ثبت شد. به‌منظور توصیف مورفولوژی خندق‌ها، شکل مقطع عرضی و الگوی

فاصله از آبراهه، ^1TWI و ^2NDVI که عنوان متغیر پیش‌بینی کننده در روش آنتروپی شانون محاسبه شدند. پیش از ورود لایه‌های محیطی به مدل MaxEnt، تمامی لایه‌های مکانی از نظر سیستم مختصات، محدوده مکانی و اندازه سلول یکسان‌سازی شدند. اندازه سلول تمامی لایه‌های رستری 50×50 متر در نظر گرفته شد تا انطباق مکانی بین متغیرهای ورودی مدل حفظ شود و تمامی لایه‌ها با ساختار مکانی یکسان وارد فرایند مدل‌سازی شوند.

درجه شوری و اسیدیته تعیین گردید. علاوه بر این، دیگر متغیرها نظیر درصد سنگ و سنگریزه در رأس خندق، ویژگی‌های مورفولوژی خندق شامل ارتفاع بالاکنند، طول، عرض متوسط، عمق، شیب کانال بالادست منتهی به خندق (در فاصله ۲ متری از سر خندق)، شکل خندق، مقطع عرضی، پلان پیشانی خندق و نوع فرایند مؤثر در تشکیل و توسعه خندق بر اساس بازدید میدانی ثبت شد. دیگر داده‌ها با محاسبه مدل رقومی ارتفاع در محیط GIS محاسبه شد. این متغیرها عبارت‌اند از مساحت حوزه آبخیز بالادست، شیب جهت،



شکل (۲): نمونه‌هایی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمل

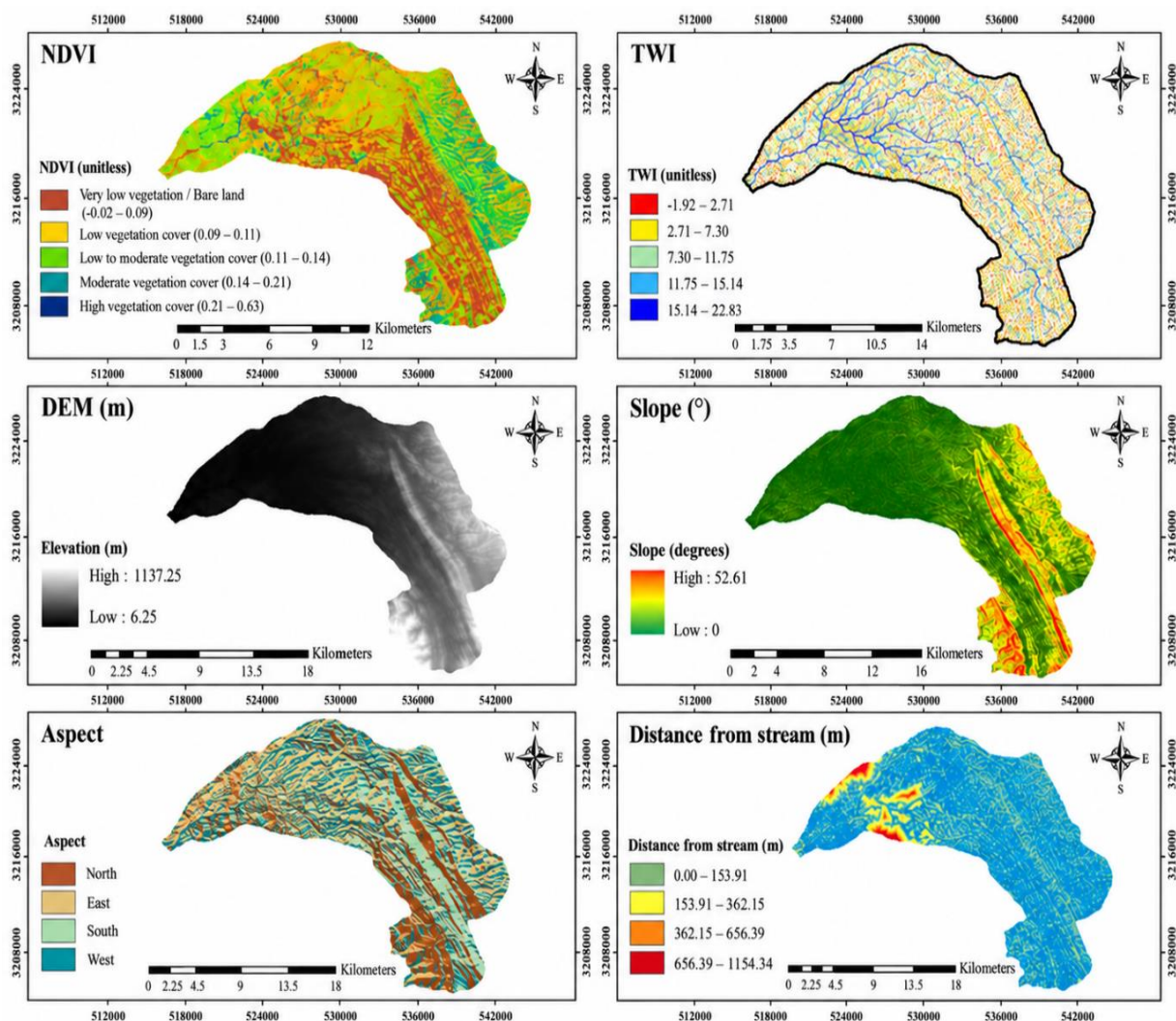
شاخص رطوبت توپوگرافی (^1TWI)

است (شهبازی و همکاران، ۲۰۲۱). به گونه‌ای که مقادیر بیشتر شاخص معمولاً نشان‌دهنده نواحی با پتانسیل بیشتر تجمع رطوبت، کاهش ظرفیت نفوذ و افزایش احتمال تولید رواناب هستند، درحالی‌که مقادیر کمتر به مناطق با زهکشی مناسب‌تر و تمایل کمتر به تجمع آب مربوط می‌شوند (شون‌آوئر^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). شاخص رطوبت توپوگرافی از ترکیب دو عامل اصلی مساحت مؤثر بالادست و شیب سطح زمین به‌دست می‌آید و به‌عنوان معیاری مناسب برای کمی‌سازی اثر توپوگرافی بر فرایندهای هیدرولوژیک شناخته می‌شود. در این پژوهش،

این شاخص یکی از شاخص‌های پرکاربرد در مطالعات هیدرولوژیک است که به‌منظور توصیف الگوی مکانی رطوبت خاک در مقیاس حوزه آبخیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص نقش ویژگی‌های توپوگرافی را در کنترل جریان سطحی و توزیع رطوبت خاک به‌صورت کمی بیان می‌کند و به همین دلیل در پژوهش‌های مرتب با رواناب، فرسایش و شکل‌گیری خندق‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. این شاخص بیانگر گرایش آب به تجمع در نقاط مختلف حوزه آبخیز و همچنین اثر شیب زمین در هدایت جریان به سمت مناطق پایین‌دست

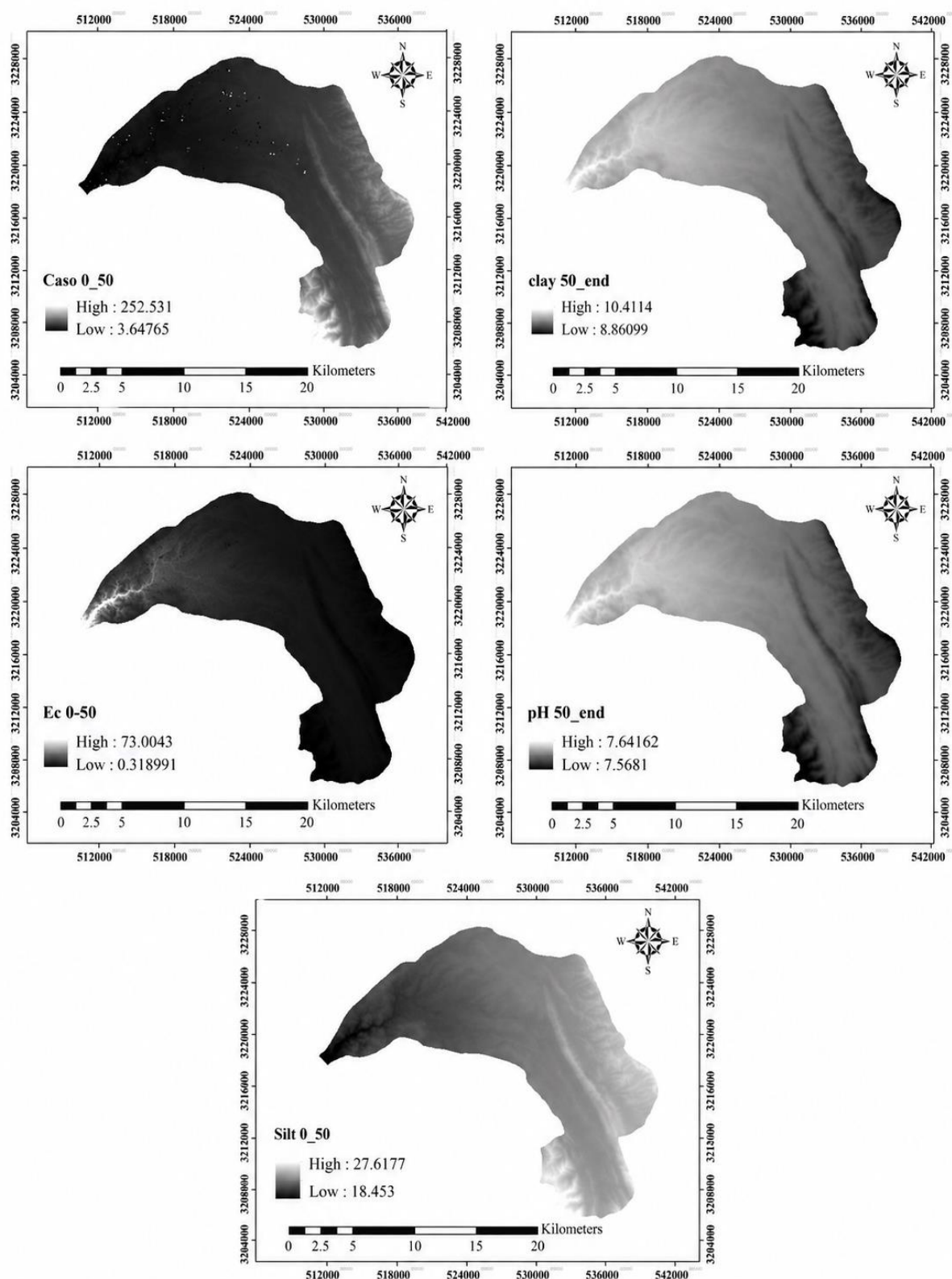
این شاخص بر اساس رابطه (۱) و با استفاده از نرم افزار Arc که در آن، A مساحت حوزه (کیلومتر) و β شیب حوزه مورد GIS محاسبه شد.

$$TWI = \frac{\ln A}{\tan \beta} \quad (1)$$



شکل (۳): نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در منطقه مورد مطالعه

برای تهیه نقشه‌های ویژگی‌های خاک بر پایه نمونه‌های برداشت‌شده و نتایج آزمایشگاهی در دو عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و از عمق ۵۰ سانتی‌متر تا کف خندق و با استفاده از روش‌های درون‌یابی (کریجینگ)، نقشه ویژگی‌های خاک برای رس، سیلت، ماسه و ... تهیه شد (شکل ۴).



شکل (۴): نقشه‌های ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه: (الف) کربنات کلسیم خاک در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متر (Caso0_50)، (ب) رس در عمق ۵۰ سانتی‌متر تا کف خندق (clay50_end)، (ج) هدایت الکتریکی خاک در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متر (ec0_50)، (د) اسیدیته خاک در عمق ۵۰ سانتی‌متر تا کف خندق (pH50_end) و (هـ) سیلت در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متر (silt0_50).

به منظور شفاف سازی متغیرهای ورودی مدل، نام، کد، واحد و همچنین برای تعیین وضعیت همبستگی درونی متغیرها بر پایه مشخصات متغیرهای پیش بین مورد استفاده در مدل MaxEnt شاخص تورم واریانس عمل شد و متغیرهایی همچون sand0-50 و silt0-50 به دلیل داشتن مقدار ضریب زیاد از مدل سازی حذف شدند.

جدول (۱): نام، کد، واحد و مشخصات متغیرهای پیش بین مورد استفاده در مدل MaxEnt

کد متغیر	نام متغیر	واحد	توضیحات
caso0_50	کربنات کلسیم خاک (CaCO_3)	درصد (%)	عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر
caso50_end	کربنات کلسیم خاک (CaCO_3)	درصد (%)	عمق ۵۰ سانتی متر تا کف خندق
clay0_50	رس (Clay)	درصد (%)	عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر
clay50_end	رس (Clay)	درصد (%)	عمق ۵۰ سانتی متر تا کف خندق
silt0_50	سیلت (Silt)	درصد (%)	عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر
silt50_end	سیلت (Silt)	درصد (%)	عمق ۵۰ سانتی متر تا کف خندق
ph0_50	اسیدیته خاک (pH)	بدون واحد	عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر
ph50_end	اسیدیته خاک (pH)	بدون واحد	عمق ۵۰ سانتی متر تا کف خندق
ec0_50	هدایت الکتریکی خاک (EC)	دسی زیمنس بر متر (dS m^{-1})	عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر
ec50_end	هدایت الکتریکی خاک (EC)	دسی زیمنس بر متر (dS m^{-1})	عمق ۵۰ سانتی متر تا کف خندق
sp0_50	درصد اشیاع خاک (SP)	درصد (%)	عمق ۰ تا ۵۰ سانتی متر
sp50_end	درصد اشیاع خاک (SP)	درصد (%)	عمق ۵۰ سانتی متر تا کف خندق
geo	زمین شناسی / سنگ شناسی	طبقه ای	واحد های زمین شناسی منطقه
slp_dem50	شیب زمین (Slope)	درجه ($^{\circ}$)	استخراج شده از DEM
facc_dem50	تجمع جریان (Flow Accumulation)	تعداد سلول / بدون واحد	استخراج شده از DEM
fdr	جهت جریان (Flow Direction)	کد طبقه ای / بدون واحد	استخراج شده از DEM بر اساس الگوریتم D8
twi_new	شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)	بدون واحد	شاخص رطوبت توپوگرافی

مدل حداکثر آنتروپی

آنتروپی یکی از رویکردهای مدیریتی است که به منظور برخورد با بی‌نظمی، اغتشاش و عدم یقین در یک مجموعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. تئوری مزبور اولین بار به وسیله استفان بولتزمن (اصل ترمودینامیک) مطرح و در نهایت توسط شانون به صورت کمی ارائه شد (شانون^۱، ۱۹۴۸؛ هوآنگ^۲، ۲۰۲۴). آنتروپی در حقیقت بیانگر این است که چگونه از بین عوامل دخیل در یک پدیده می‌توان عوامل مؤثر را بر پایه تغییرپذیری آن‌ها استخراج و دسته‌بندی کرد. در این پژوهش برای تعیین نقش عوامل محیطی مانند جهت شیب، رطوبت توپوگرافی، شیب، سیلت، رس، ماسه، فاصله از رودخانه، ماده آلی، طول شیب، تجمع جریان، نوع کاربری اراضی، سنگ-شناسی و شاخص پوشش گیاهی از جمله عوامل پیش‌بینی کننده وارد مدل‌سازی شدند. در مرحله بعد براساس تجزیه و تحلیل آماری و روش مدل‌سازی مورد استفاده با تلفیق شاخص آنتروپی شانون و رگرسیون لاجستیک اقدام شد.

یکی از مزایای به کارگیری الگوریتم بیشینه آنتروپی در نرم‌افزار MaxEnt، امکان شناسایی و ارزیابی اهمیت متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی است. در این پژوهش، به منظور سنجش میزان اهمیت متغیرهای پیش‌بین در فرایند مدل‌سازی، از شاخص‌های درصد مشارکت^۳، اهمیت جایگشتی^۴ و آزمون Jackknife استفاده شد. درصد مشارکت بیانگر سهم هر متغیر در فرایند آموزش مدل، اهمیت جایگشتی نشان‌دهنده میزان کاهش عملکرد مدل در اثر برهم‌زدن تصادفی مقادیر یک متغیر و آزمون Jackknife بیانگر میزان اطلاعات مستقل هر متغیر و تأثیر حذف آن بر عملکرد مدل است. این شاخص‌ها برای ارزیابی اهمیت متغیرها در مدل استفاده می‌شوند و نباید به عنوان وزن یا ضریب واقعی متغیرها در معادله MaxEnt تفسیر شوند (فیلیپس^۵ و همکاران، ۲۰۰۶). علاوه بر این، مدل حداکثر آنتروپی با بهره‌گیری از روش Jackknife، حساسیت مدل نسبت به متغیرهای مختلف را تحلیل کرده و تأثیر حذف

یا استفاده مجزای هر عامل را بر عملکرد مدل بررسی می‌کند. این قابلیت، ابزاری مناسب برای ارزیابی میزان اثرگذاری عوامل و افزایش دقت نتایج مدل‌سازی فراهم می‌آورد. سهم اهمیت هر شاخص بر پایه شاخص Permutation نیز برای بررسی روند تأثیر متغیرها بر احتمال رخداد از منحنی‌های پاسخ استفاده شد. برای ارزیابی نتایج مدل MaxEnt از منحنی ROC استفاده شد. این منحنی میزان توان مدل را در تفکیک صحیح نقاط حضور و نقاط عدم حضور پدیده موردنظر نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، ROC ارتباط بین حساسیت مدل و نرخ مثبت کاذب را به صورت نموداری نمایش می‌دهد. معیار اصلی در تحلیل منحنی ROC، سطح زیر منحنی^۶ است که نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی مدل است. مقدار AUC برابر با ۰/۵ بیانگر پیش‌بینی تصادفی و ضعیف و مقدار ۱ نشان‌دهنده توان تفکیک کامل و دقت بسیار زیاد مدل است. یکی از مزایای منحنی ROC این است که ارزیابی حساسیت مدل را به صورت سلولی و بدون تأثیر خطاهای ناشی از طبقه‌بندی نقشه‌های حساسیت انجام می‌دهد. در انتها به منظور بررسی رابطه بین شکل پلان و مقطع عرضی نسبت به تحلیل فراوانی مبتنی بر جداول متقاطع و توزیع کای اسکوتر عمل شد. همچنین با مقایسه نقشه طبقه‌بندی شده خطر رخداد خندق با موقعیت خندق‌های بررسی شده و شکل پلان هر کدام برای تعیین رابطه بین خطر رخداد و نوع پلان مشاهداتی مقایسه انجام شد. علاوه بر شاخص‌های اهمیت متغیرها، ضرایب Lambda مربوط به ویژگی‌های مدل نیز از فایل خروجی MaxEnt استخراج شدند. با توجه به استفاده مدل از Feature های خطی، درجه دوم، حاصل ضربی، آستانه‌ای و Hinge، برای هر متغیر ممکن است بیش از یک ضریب Lambda برآورد شده باشد. ضرایب کامل مدل در جدول تکمیلی S1 ارائه شده‌اند.

4. Permutation Importance
5. Phillips
6. AUC

1. Shannon
2. Huang
3. Percent Contribution

نتایج و بحث

تعیین عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی بر اساس مدل آنتروپی شانون

نتایج حاصل از اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از شاخص آنتروپی شانون نشان داد که لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل خاکی، تأثیر بیشتری در ایجاد و توسعه پدیده خندق نسبت به عوامل فیزیوگرافی دارند. پس از عوامل خاکی، عوامل زمین‌شناسی، مواد آلی، استفاده از اراضی، فاصله از جاده، زهکشی، شیب، نوع پلان، فاصله از رودخانه، Ls, Tpi, twi ، جهت، بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری این پدیده دارند. برای بررسی نقش و اهمیت نسبی عوامل محیطی مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی، از سه خروجی اصلی مدل MaxEnt شامل درصد مشارکت متغیرها^۱، اهمیت جایگشتی^۲ و آزمون جک‌نایف بر اساس AUC استفاده شد. هر یک از این شاخص‌ها جنبه متفاوتی از عملکرد متغیرها را در مدل نشان می‌دهند و تفسیر هم‌زمان آن‌ها تصویر دقیق‌تری از سازوکار فرسایش خندقی ارائه می‌کند. بر اساس نتایج درصد مشارکت متغیرها، متغیر $caso0_50$ با سهم حدود ۴۳ درصد بیشترین نقش را در فرایند ساخت و آموزش مدل داشته است. این بدان معناست که در طول مراحل یادگیری مدل، این متغیر بیشترین تأثیر را در افزایش توان توضیح‌دهندگی مدل ایفا کرده است. پس از آن، متغیر $clay50_end$ با سهمی نزدیک به ۴۰ درصد در رتبه دوم قرار دارد. غلبه این دو متغیر نشان می‌دهد که ویژگی‌های مرتبط با شرایط خاک و خصوصیات سطحی زمین، عامل اصلی کنترل الگوی مکانی فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه هستند. سایر متغیرها مانند pho_50 ، $ec0_50$ ، $clay0_50$ ، geo و $sp0_50$ سهم به مراتب کمتری در ساخت مدل داشته‌اند که بیانگر نقش فرعی یا غیرمستقیم آن‌ها در مقایسه با عوامل اصلی است.

در مقابل، نتایج حاصل از اهمیت جایگشتی متغیرها تصویری متفاوت اما مکمل ارائه می‌دهد. این شاخص نشان می‌دهد که برهم زدن اطلاعات کدام متغیر بیشترین کاهش را در دقت

پیش‌بینی مدل ایجاد می‌کند. بر این اساس، اگرچه متغیر $caso0_50$ همچنان از مهم‌ترین عوامل محسوب می‌شود، اما برخی متغیرها مانند $clay50_end$ ، $silt0_50$ و $ec0_50$ با وجود درصد مشارکت کمتر، اهمیت جایگشتی نسبتاً بالاتری دارند. این موضوع نشان می‌دهد که این متغیرها در تفکیک مکانی مناطق دارای خندق و فاقد خندق نقش مؤثری دارند و اطلاعاتی را فراهم می‌کنند که به‌طور کامل توسط سایر متغیرها جایگزین نمی‌شود. این تفاوت بین نتایج Contribution و Permutation بیانگر وجود همبستگی و تعامل غیرخطی میان عوامل محیطی است.

نتایج آزمون جک‌نایف بر اساس شاخص AUC داده‌های آزمون نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند. در این آزمون، متغیر $caso0_50$ زمانی که به‌تنهایی وارد مدل می‌شود، بالاترین مقدار AUC را ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده قدرت بالای این متغیر در پیش‌بینی مستقل وقوع فرسایش خندقی است. همچنین حذف همین متغیر از مدل بیشترین کاهش مقدار AUC را به همراه دارد که بیانگر آن است که اطلاعات ارائه‌شده توسط این عامل به‌طور کامل در سایر متغیرها وجود ندارد. پس از آن، متغیرهای $clay50_end$ و $caso50_end$ نیز نقش قابل‌توجهی در حفظ دقت مدل دارند، درحالی‌که متغیرهایی مانند $facc_dem50$ و twi_new به‌تنهایی قدرت پیش‌بینی کمتری نشان داده‌اند اما در حضور سایر عوامل موجب بهبود عملکرد کلی مدل شده‌اند. در مجموع، مقایسه سه شاخص مورد استفاده نشان می‌دهد که متغیرهای مرتبط با خصوصیات خاک، به‌ویژه $caso0_50$ و $clay50_end$ ، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی در منطقه مطالعه‌شده هستند. درعین‌حال، نقش متغیرهای توپوگرافی و هیدرولوژیکی بیشتر به‌صورت مکمل و در تعامل با عوامل خاکی ظاهر می‌شود. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین که بر اهمیت ویژگی‌های فیزیکی خاک و شرایط سطحی زمین در آغاز و گسترش خندق‌ها تأکید دارند، هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که مدل MaxEnt توانسته است روابط پیچیده و غیرخطی بین عوامل محیطی و فرسایش خندقی را به‌خوبی

شناسایی کند. در همین راستا، بر اساس نتایج عرب‌عامری و همکاران (۲۰۱۹)، نوع خاک، سنگ‌شناسی و کاربری زمین مهم‌ترین عوامل در وقوع فرسایش خندقی هستند، درحالی‌که سایر عوامل نقش تکمیلی دارند.

همچنین تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با مدل آنتروپی و ارزیابی دقت آن با ۲۰ درصد نمونه‌برداری و منحنی ROC، نشان‌گر دقت خیلی خوب مدل برای منطقه مورد

جدول (۲): درصد مشارکت و اهمیت جایگشتی متغیرهای محیطی در مدل MaxEnt

متغیر	درصد مشارکت	اهمیت جایگشتی
caso0_50	43.6	25.7
clay50_end	39.5	31.7
ph0_50	4.6	0.9
ec0_50	3.3	9.6
clay0_50	2	1
geo	1.7	1
sp0_50	0.9	2.1
ph50_end	0.8	1.5
caso50_end	0.7	2.2
fdr	0.5	0.3
slp_dem50	0.5	5
facc_dem50	0.3	0.8
ec50_end	0.3	0.8
silt0_50	0.2	13.1
sp50_end	0.2	0
twi_new	0.1	1.1

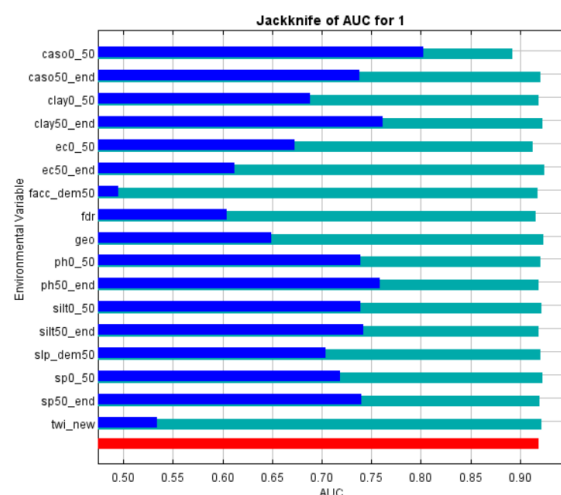
حساسیت استخراج‌شده و کاربرد آن در تحلیل‌های مکانی را افزایش می‌دهد.

نتایج حاصل از نمودار جک‌نایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها در پیش‌بینی مدل MaxEnt در شکل ۵ نمایش داده شده است. تحلیل سهم نسبی متغیرها در مدل نشان می‌دهد که ویژگی‌های خاک، به‌ویژه کربنات کلسیم خاک و درصد رس در لایه‌های عمیق‌تر خاک، نقش غالبی در کنترل پراکنش فرسایش خندقی دارند. اهمیت بالای کربنات کلسیم را می‌توان با تأثیر آن بر ساختار و نفوذپذیری خاک توضیح داد؛ زیرا خاک‌های غنی از کربنات کلسیم، ساختاری تجمع‌یافته اما شکننده دارند که در دوره‌های خشک متراکم می‌شود، اما با بارش‌های شدید یا ناگهانی، پیوندهای بین ذرات به‌سرعت گسسته شده و خاک مستعد جداشدگی می‌شود. این نتایج با مطالعات پیشین مطابقت دارد.

علاوه بر شاخص‌های درصد مشارکت و اهمیت جایگشتی، ضرایب Lambda مربوط به Feature‌های فعال مدل MaxEnt نیز از خروجی مدل استخراج شدند. این ضرایب، پارامترهای مستقیم مورد استفاده در ساختار مدل هستند و با توجه به استفاده از انواع مختلف Feature، ممکن است برای هر متغیر بیش از یک ضریب Lambda برآورد شده باشد. ضرایب کامل Lambda در جدول تکمیلی S1 ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از اجرای مدل MaxEnt نشان می‌دهد که این مدل توان بالایی در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی دارد. مقدار AUC برای داده‌های آموزشی برابر با ۰/۹۱ و برای داده‌های آزمون ۰/۹۱۹ است و نزدیکی این دو مقدار به یکدیگر، علاوه بر برازش مناسب بر داده‌های آموزشی، بیانگر قابلیت تعمیم‌پذیری مطلوب مدل و عدم وقوع بیش‌برازش است. همچنین انحراف معیار پایین معادل ۰/۰۱۹ نشان‌دهنده پایداری نتایج در تکرارهای مختلف است و این امر، اعتماد به نقشه

افزون بر این، حضور کربنات کلسیم می‌تواند باعث شکل‌گیری افق‌های نیمه‌سخت آهکی در عمق خاک شود که نفوذپذیری عمقی را کاهش داده و سهم رواناب سطحی را افزایش می‌دهد، بنابراین رواناب مؤثر در بارش‌های کوتاه‌مدت و پرشدت زمینه لازم برای آغاز شیارها و تبدیل آن‌ها به خندق‌های پایدار را فراهم می‌کند.

به‌عنوان مثال، شهرپور و کریستوفر^۱ (۲۰۱۲) نشان دادند که پایداری ذرات خاک، بافت خاک و ترکیب ذرات (رس و سیلت) مهم‌ترین عوامل در توسعه فرسایش خندقی هستند. خندق‌ها در خاک‌های با سیلت لومی و سیلت رسی لومی بیشترین فراوانی را دارند، درحالی‌که خندق‌های با بافت رسی یا رسی شنی حجم بیشتری دارند. کاهش درصد شن و افزایش رس و سیلت در سطح خاک باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب می‌شود و فرسایش خندقی را تحریک می‌کند.



شکل (۵): نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترها

عامل تشدیدکننده، زمانی اهمیت پیدا می‌کند که خاک از نظر بافت و ترکیب شیمیایی مستعد فرسایش باشد؛ بنابراین در مناطقی با خاک‌های رسی و آهکی، افزایش شیب موجب افزایش انرژی جریان سطحی و تشدید فرسایش خندقی می‌شود. از سوی دیگر، برخی شاخص‌های هیدرولوژیکی مانند شاخص رطوبتی توپوگرافی اهمیت به نسبت کمتری نشان داده‌اند که بیانگر آن است که در مقیاس مکانی مطالعه حاضر، تغییرات رطوبت نسبی خاک نسبت به ویژگی‌های ذاتی خاک و شیب، نقش کمتری در تعیین محل وقوع خندق‌ها داشته است. تحلیل حساسیت مدل نیز تأیید می‌کند که حذف متغیرهای خاکی مانند کربنات کلسیم و درصد رس موجب کاهش محسوس توان پیش‌بینی می‌شود، درحالی‌که حذف سایر متغیرها تأثیر کمتری بر عملکرد مدل دارد. همچنین اجرای مدل تنها با یک متغیر نشان داد که متغیرهای خاکی

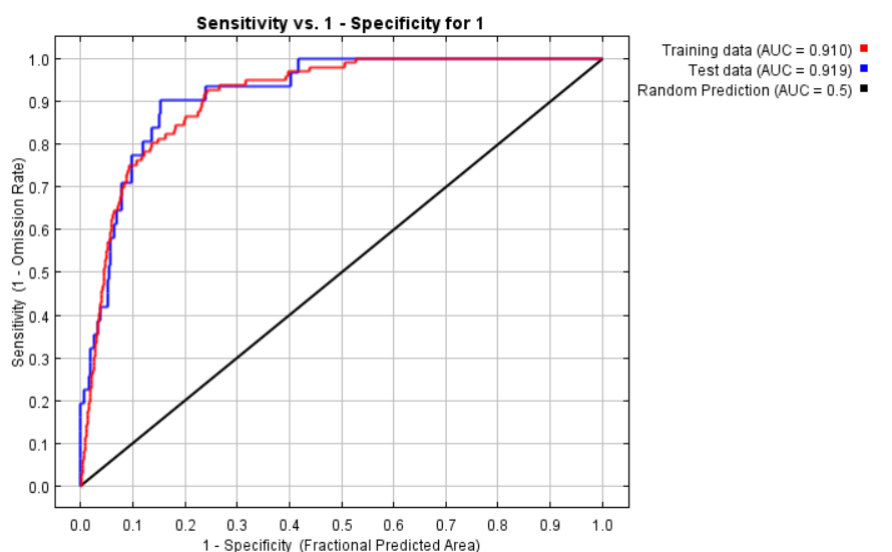
علاوه بر این، درصد بالای رس به‌عنوان دومین عامل مهم مدل، نقش بافت خاک را در تشدید فرایند فرسایش خندقی برجسته می‌سازد. خاک‌های رسی به دلیل ذرات بسیار ریز و نفوذپذیری پایین، سریعاً به حالت اشباع می‌رسند و رواناب سطحی حاصل، موجب تمرکز جریان و افزایش توان فرسایشی می‌شود. علاوه بر این، در این خاک‌ها پس از خشک‌شدن ترک‌های انقباضی ایجاد می‌شود که در آغاز بارندگی مسیرهای ترجیحی نفوذ و تمرکز جریان را فراهم کرده و به‌تدریج به نقاط ضعف جهت ایجاد فرسایش تبدیل می‌شوند. بنابراین، خاک‌های رسی و آهکی با کاهش مقاومت خاک در برابر نیروی برشی و افزایش رواناب، بستر اصلی توسعه خندق‌ها را تشکیل می‌دهند.

در مرحله بعد و پس از متغیرهای خاکی، شیب زمین نقش مهمی در عملکرد مدل ایفا می‌کند. به‌این‌ترتیب، شیب به‌عنوان

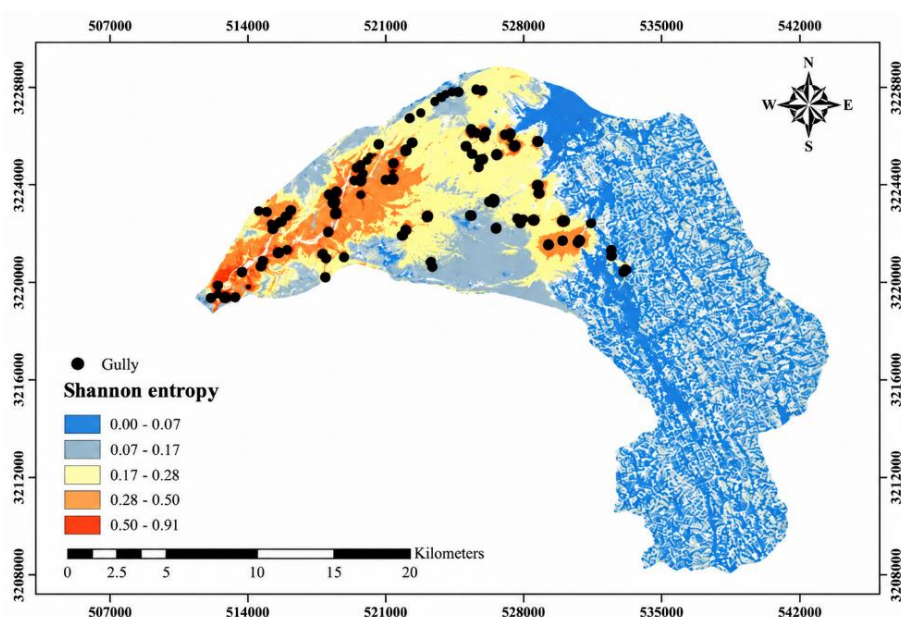
با نقشه خندق‌های واقعی و تحلیل ارتباط آن‌ها با واحدهای مورفولوژیک فراهم می‌کند.

در مرحله بعد، اعتبارسنجی مدل با بهره‌گیری از منحنی ROC انجام شد و نتایج آن در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر اساس این تحلیل، مدل در مرحله آموزش با دقت ۹۱ درصد عملکردی عالی نشان داد، درحالی‌که در مرحله اعتبارسنجی دقت آن ۹۲ درصد گزارش شد که نشان‌دهنده توان پیش‌بینی بسیار بالای مدل می‌باشد.

حتی به صورت مستقل، قدرت پیش‌بینی قابل توجهی دارند که بر نقش محوری آن‌ها در کنترل فرسایش خندقی تأکید می‌کند. با توجه به الگوهای ژئومورفولوژیکی، خندق‌ها در تپ دشت سر عمدتاً بین تپه‌ها و پایین آن‌ها شکل گرفته و به سمت دامنه‌ها و بالادست پیشروی می‌کنند، درحالی‌که تپ دشت سر فرسایشی با پوشش خاک متفاوت، حساسیت کمتری دارد و خندق‌ها تنها در مکان‌هایی با تمرکز رواناب ایجاد می‌شوند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرسایش خندقی نتیجه تعامل میان ویژگی‌های خاک و توپوگرافی است و نقشه حساسیت استخراج شده از مدل MaxEnt، مبنای مناسبی برای همپوشانی



شکل (۶): نتایج مقادیر ROC در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل



شکل (۷): نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در استان بوشهر

تحلیل تکمیلی رابطه بین نوع و مورفولوژی خندق‌ها

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر بر احتمال وقوع فرسایش خندقی است، تحلیل مورفولوژیک خندق‌ها به عنوان یک تحلیل تکمیلی انجام شد. هدف از این تحلیل، بررسی الگوی ارتباط میان نوع خندق و شکل مقطع عرضی آن و کمک به تفسیر بهتر فرایندهای مرتبط با شکل‌گیری و توسعه فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه بود. تحلیل رابطه بین نوع خندق و مورفولوژی خندق نشان می‌دهد که شکل مقطع عرضی خندق‌ها به طور معنی‌داری تحت تأثیر الگوی توسعه و سازمان‌یافتگی شبکه خندقی قرار دارد. نتایج حاصل از جدول توافقی و آزمون کای دو پیرسون بیانگر وجود ارتباط آماری معنی‌دار بین این دو متغیر است ($\chi^2 = 29.954$, $df = 12$, $p = 0.003$) که نشان می‌دهد توزیع اشکال مورفولوژیک خندق‌ها تصادفی نبوده و بازتاب‌دهنده فرایندهای غالب فرسایش و تکامل ژئومورفولوژیکی است.

بررسی دقیق‌تر نتایج جدول توافقی نشان می‌دهد که مورفولوژی U شکل فراوان‌ترین شکل خندق در منطقه مورد مطالعه است و عمدتاً با خندق‌های دندریتیک و محوری همراهی دارد. غلبه خندق‌های دندریتیک در این گروه بیانگر آن است که مورفولوژی U شکل غالباً در شرایطی توسعه می‌یابد که گسترش جانبی کناره‌ها و فرسایش تدریجی دیواره‌ها بر فرسایش عمقی پیشی می‌گیرد. در چنین شرایطی، شبکه خندقی به صورت شاخه‌دار و با تمرکز تدریجی جریان سطحی تکامل می‌یابد که نتیجه آن افزایش پهنای خندق و شکل‌گیری مقطع U مانند است. در مقابل، مورفولوژی V شکل الگوی توزیع متمایزی را نشان می‌دهد و به طور غالب با خندق‌های محوری مرتبط است. تمرکز بالای مورفولوژی V شکل در خندق‌های محوری می‌تواند نشان‌دهنده غلبه رشد طولی خندق در امتداد محور اصلی جریان باشد. در این شرایط، تمرکز رواناب و انرژی جریان در امتداد محور خندق موجب تقویت فرسایش عمقی نسبت به فرسایش جانبی می‌شود؛ بنابراین خندق بیشتر در جهت طولی توسعه یافته و

مقطع عرضی باریک‌تر و V شکل حفظ می‌شود. حضور محدود مورفولوژی V شکل در سایر انواع خندق نیز تأکید می‌کند که این شکل بیشتر بازتاب شرایط هیدرودینامیکی خاص و مسیرهای اصلی انتقال رواناب است. ون و همکاران (۲۰۲۴) دریافتند که ترتیب لایه‌های خاک و سنگ زیرین همراه با شیب زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل و توسعه خندق‌ها دارد؛ به طوری که خندق‌های U شکل در لایه‌های چسبنده مانند لوس شنی و شن ریز شکل می‌گیرند، درحالی که شیل همگن و مصالح شیل فرسوده باعث ایجاد خندق‌های V شکل می‌شوند.

خندق‌های با مورفولوژی دوزنقه‌ای اگرچه از نظر تعداد سهم کمتری دارند، اما توزیع آن‌ها اطلاعات مهمی درباره مراحل پیشرفته‌تر تکامل خندق ارائه می‌دهد. غالب بودن این گروه از خندق‌ها در الگوهای پنجه‌ای می‌تواند با افزایش تعداد شاخه‌های فرعی و تمرکز جریان از چند مسیر مرتبط باشد. ورود رواناب از شاخه‌های متعدد، علاوه بر افزایش فرسایش کف، موجب ناپایداری بیشتر دیواره‌ها، ریزش کناره‌ها و گسترش جانبی خندق می‌شود. تداوم این فرایند می‌تواند باعث افزایش پهنای مقطع و تبدیل مقطع اولیه باریک‌تر به شکل دوزنقه‌ای شود. از این رو، فراوانی بیشتر مقاطع دوزنقه‌ای در خندق‌های پنجه‌ای می‌تواند بازتاب مرحله تکاملی پیشرفته‌تر و برقراری نسبی تعادل میان فرسایش عمقی و جانبی باشد. مورفولوژی UV که تنها در یک نمونه مشاهده شده است، اگرچه از نظر آماری وزن کمی دارد، اما می‌تواند به عنوان یک شکل گذار مورفولوژیک تفسیر شود که بیانگر تغییر تدریجی شرایط فرسایشی از حالت غالب عمقی به حالتی با گسترش جانبی بیشتر است. هم‌زمانی این مورفولوژی با خندق محوری نشان می‌دهد که حتی در مسیرهای اصلی جریان نیز امکان تغییر در الگوی غالب فرسایش وجود دارد. به منظور بررسی الگوی ارتباط میان نوع خندق و شکل مورفولوژیک آن، فراوانی و درصد اشکال مختلف خندق در انواع خندق‌های مشاهده شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۳): جدول متقاطع بین شکل خندق و نوع خندق

کل	نوع خندق					تعداد	
	خطی	پیشانی	محوری	پنجه‌ای	مرکب		
۹۸	۷	۰	۳۸	۵۲	۱	۹۸	شکل خندق ذوزنقه‌ای uv شکل کل
%۱۰۰.۰	%۷.۱	%۰.۰	%۳۸.۸	%۵۳.۱	%۱.۰		
۳۶	۱	۱	۲۵	۹	۰	۳۶	
%۱۰۰.۰	%۲.۸	%۲.۸	%۶۹.۴	%۲۵.۰	%۰.۰		
۱۰	۰	۱	۱	۷	۱	۱۰	
%۱۰۰.۰	%۰.۰	%۱۰.۰	%۱۰.۰	%۷۰.۰	%۱۰.۰		
۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	
%۱۰۰.۰	%۰.۰	%۰.۰	%۱۰۰.۰	%۰.۰	%۰.۰		
۱۴۵	۸	۲	۶۵	۶۸	۲	۱۴۵	کل
%۱۰۰.۰	%۵.۵	%۱.۴	%۴۴.۸	%۴۶.۹	%۱.۴		

نتایج موداک^۱ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که بین شکل مقطع خندق‌ها و روند تکامل آن‌ها با شدت فرسایش ارتباط نزدیکی وجود دارد؛ به‌طوری‌که خندق‌های V شکل معمولاً بیانگر غلبه فرسایش عمقی، تمرکز جریان و مهاجرت فعال سر خندق هستند، درحالی‌که خندق‌های U شکل بیشتر نشان‌دهنده مراحل پیشرفته‌تر تکامل خندق و تثبیت نسبی دیواره‌ها می‌باشند. این یافته‌ها تأکید می‌کند که برهم‌کنش عوامل زمین‌شناسی، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و شرایط توپوگرافی می‌تواند نقش کلیدی در کنترل فرایند شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی ایفا کند.

این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تحلیل هم‌زمان نوع و شکل خندق می‌تواند ابزار مؤثری برای درک فرایندهای حاکم بر فرسایش خندقی و طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثر در حوزه‌های آبخیز باشد. برای تعیین معنی‌داری آماری ارتباط مشاهده‌شده میان نوع خندق و شکل مورفولوژیک آن، آزمون کای‌دو پیرسون انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

با وجود معنی‌دار بودن نتایج آزمون کای‌دو، باید توجه داشت که درصد قابل‌توجهی از سلول‌های جدول دارای فراوانی مورد انتظار کمتر از ۵ هستند. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه رابطه کلی بین نوع خندق و مورفولوژی خندق معتبر و معنی‌دار است، اما تفسیر جزئی برخی ترکیب‌ها به‌ویژه آن‌هایی که فراوانی کمی دارند باید با احتیاط انجام شود. با این حال، هم‌خوانی نتایج آماری فرسایش خندقی و الگوهای شناخته‌شده تکامل ژئومورفولوژیکی، صحت نتایج را تقویت می‌کند. به‌طورکلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نوع خندق به‌عنوان بازتابی از الگوی سازمان‌یافتگی جریان و شبکه فرسایشی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری مورفولوژی خندق‌ها دارد. خندق‌های دندریتیک عمدتاً با اشکال u و ذوزنقه‌ای مرتبط هستند که بیانگر غلبه فرسایش جانبی و مراحل پیشرفته‌تر تکامل خندق است، درحالی‌که خندق‌های محوری بیشتر با مورفولوژی v شکل همراه‌اند که نشان‌دهنده تمرکز شدید جریان و فرسایش عمقی غالب است. نتایج این قسمت با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد. در این زمینه،

جدول (۴): نتایج آزمون کای دو

آماره	مقدار	درجه آزادی	سطح معنی داری مجانبی (دوطرفه)
کای دو پیرسون	۲۹/۹۵	۱۲	۰/۰۰۳
نسبت درست‌نمایی	۲۷/۵۶	۱۲	۰/۰۰۶
تعداد موارد معتبر	۱۴۵		

نتیجه‌گیری

تفسیر وضعیت پویایی و مرحله تکاملی فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج نشان داد که بین شکل پلان و مقطع عرضی خندق‌ها ارتباط مشخصی وجود دارد. در خندق‌های دارای مقطع U شکل، پلان پنجه‌ای با ۵۳/۱ درصد بیشترین فراوانی را داشت، درحالی‌که در خندق‌های V شکل، پلان محوری با ۶۹/۴ درصد غالب بود. همچنین ۷۰ درصد از خندق‌های دوزنقه‌ای دارای پلان پنجه‌ای بودند. این تفاوت می‌تواند با شرایط متفاوت لایه‌های خاک و نحوه گسترش خندق مرتبط باشد. بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده در منبع مورد استفاده، مقطع U زمانی شکل می‌گیرد که مقاومت افق سطحی و زیرسطحی به هم نزدیک باشد، درحالی‌که در مقطع V مقاومت خاک زیرین بیشتر از افق سطحی است؛ بنابراین، غلبه پلان پنجه‌ای در خندق‌های U شکل می‌تواند نشان‌دهنده فراهم بودن شرایط برای گسترش جانبی و توسعه شاخه‌های بیشتر باشد، درحالی‌که فراوانی بیشتر پلان محوری در خندق‌های V شکل را می‌توان با تمرکز جریان در یک مسیر اصلی و گسترش بیشتر خندق در امتداد همان محور مرتبط دانست. در خندق‌های دوزنقه‌ای نیز وجود لایه سطحی سست و افق زیرین مقاوم می‌تواند باعث محدود شدن تعمیق و افزایش گسترش جانبی شود. کارایی مدل MaxEnt در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و توان آن در وزن‌دهی کمی عوامل مؤثر، نشان داد که به‌کارگیری مدل‌های مبتنی بر آنتروپی، در ترکیب با داده‌های محیطی، امکان ارائه تصویری واقع‌بینانه از پیچیدگی این پدیده را فراهم می‌سازد. نتایج همچنین بر اهمیت عوامل انسانی، به‌ویژه تغییرات کاربری اراضی و مجاورت با جاده‌ها، در تشدید فرسایش تأکید دارد؛ عواملی که در مقایسه با متغیرهای طبیعی، امکان مدیریت و کنترل آن‌ها

این پژوهش با هدف بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و شناسایی الگوی فضایی مناطق مستعد وقوع آن در حوزه‌های آبخیز سمل انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که فرسایش خندقی پدیده‌ای پیچیده و چندبعدی است که شکل‌گیری و گسترش آن بیش از آنکه صرفاً متأثر از شیب زمین باشد، به تعامل میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شرایط ژئومورفولوژیکی و مداخلات انسانی وابسته است. خاک‌های دارای مقادیر بالای کربنات کلسیم و رس، به دلیل کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب سطحی و ضعف ساختاری، شرایط مساعدتری برای آغاز و توسعه خندق‌ها فراهم می‌کنند و نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به بسیاری از شاخص‌های صرفاً توپوگرافی دارند. در این میان، واحدهای مورفولوژیکی انتقالی نظیر پای‌دامنه‌ها و سطوح آبرفتی قدیمی به‌عنوان پهنه‌های با حساسیت بالا، بیشترین همپوشانی را با مناطق مستعد فرسایش خندقی نشان می‌دهند. تحلیل‌های مورفولوژیکی خندق‌ها نیز بیانگر آن است که میان شکل هندسی خندق‌ها و الگوی مورفولوژی شبکه‌ای آن‌ها رابطه‌ای معنی‌دار وجود دارد. این ارتباط نشان می‌دهد که شکل مقطع خندق‌ها تنها یک ویژگی ظاهری نیست، بلکه بازتابی از فرایندهای حاکم بر تکامل خندق، ازجمله نحوه تمرکز جریان، شدت فرسایش پس‌رونده و میزان گسترش جانبی است. تفاوت در غالب بودن انواع مورفولوژی در خندق‌های با اشکال مختلف، بیانگر نقش مقاومت مصالح خاکی، پایداری دیواره‌ها و شرایط هیدرولیکی در جهت‌دهی به مسیر تکاملی خندق‌هاست. از این منظر، مورفولوژی خندق می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب برای

چارچوبی جامع و علمی برای درک و مدیریت فرسایش خندقی فراهم می‌آورد. توسعه این رویکرد در مطالعات آتی، از طریق گسترش دامنه مکانی، بررسی تغییرات زمانی و بهره‌گیری از داده‌های بلندمدت هیدرولوژیکی، می‌تواند به ارائه راهکارهای مدیریتی پایدارتر و کاهش مؤثرتر خسارات ناشی از فرسایش خندقی در مناطق خشک و نیمه‌خشک منجر شود.

در چارچوب برنامه‌ریزی‌های حفاظتی وجود دارد. بر این اساس، نقشه حساسیت تهیه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی، هدایت مداخلات حفاظتی و کاهش مخاطرات فرسایش در مدیریت منابع آب و خاک مورد استفاده قرار گیرد. درمجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی خندق‌ها، بررسی ویژگی‌های خاک، لحاظ کردن عوامل انسانی و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی کمی،

منابع

- [1]. Arabameri, A. Cerda, A. Rodrigo-Comino, J. Pradhan, B. Sohrabi, M. Blaschke, T. Tien Bui, D. 2019. Proposing a novel predictive technique for gully erosion susceptibility mapping in arid and semi-arid regions (Iran). *Remote Sensing* 11(21), 2577.
- [2]. Bernini, A. Bosino, A. Botha, G.A. Maerker, M. 2021. Evaluation of gully erosion susceptibility using a maximum entropy model in the upper Mkhomazi River basin in South Africa. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10(11), 729.
- [3]. Boota, M.W. Soomro, S.E.H. Xia, H. Qin, Y. Azeem, S.S. Yan, C. Luo, W. Yousaf, A. Boota, M.A. 2024. Estimation of soil loss and sediment yield by using the modified RUSLE model in the Indus River basin, including the quantification of error and uncertainty in remote-sensing images. *Marine and Freshwater Research* 75(17), MF24082.
- [4]. Chuma Basimine, G. Mugumaarhahama, Y. Mondo Mubalama, J. Bagula Mukengere, E. Ndeko Byamungu, A. Lucungu, P.B. Katcho, K. Mushagalusa Nachigera, G. Schmitz, S. 2023. Gully erosion susceptibility mapping using four machine learning methods in Luzinzi watershed, eastern Democratic Republic of Congo. *Physics and Chemistry of the Earth* 129, 103295.
- [5]. Ghodousi, J. Davari, M. 2005. Investigate the effect of physical and chemical properties of soils in gully erosion occurrence. 3rd National Conference on Erosion and Sedimentation, Tehran, Iran. 8 pp. [In Persian].
- [6]. Han, J. Guzman, J.A. Chu, M.L. 2022. Gully erosion susceptibility considering spatiotemporal environmental variables: Midwest US region. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 43, 101196.
- [7]. Huang, Y. 2024. An overview of the development and applications of information entropy. *Theoretical and Natural Science* 42(1), 48–53.
- [8]. Modak, P. Mandal, M. Mandi, S. Ghosh, B. 2023. Gully erosion vulnerability modelling, estimation of soil loss and assessment of gully morphology: a study from cratonic part of eastern India. *Environmental Science and Pollution Research* 30(55), 116656–116687.
- [9]. Momeni Damaneh, J. Memarian, H. Safdari, A.A. 2025. Machine learning techniques for gully erosion susceptibility mapping (Case study: Mukhtaran watershed, south Khorasan province, Iran). *Sustainable Earth Trends* 5(3), 63–75.
- [10]. Nazari Samani, A. Ahmadi, H. Mohammadi, A. Ghoddousi, J. Salajegheh, A. Boggs, G. Pishyar, R. 2010. Factors controlling gully advancement and models evaluation (Hableh Rood Basin, Iran). *Water Resources Management* 24(8), 1531–1549.
- [11]. Phillips, S.J. Anderson, R.P. Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3–4), 231–259.
- [12]. Poesen, J. Nachtergaele, J. Verstraeten, G. Valentin, C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50(2–4), 91–133.
- [13]. Pourghasemi, H.R. Moradi, H.R. Fatemi Aghda, S.M. 2014. Prioritization of factors effective on landslide occurrence and susceptibility zoning using the Shannon entropy index. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Soil and Water Science* 18(70), 181–192. [In Persian].
- [14]. Rafiei-Sardooi, E. Mirchooli, F. Azareh, A. Clague, J.J. 2025. Impact of soil erosion on agricultural sustainability based on crop water

productivity in semi-arid Iran. *Scientific Reports* 15(1), 40462.

[15]. Rajabian, H. Rezaei, M. Mina, M. Kariminejad, N. Ritsema, C. 2024. Gully erosion susceptibility assessment using machine learning methods and geostatistical multivariate approach. In: *Advanced Tools for Studying Soil Erosion Processes*. Elsevier, pp. 257–273.

[16]. Schönauer, M. Asabere, S.B. Sauer, D. Drollinger, S. 2025. Topographic indices and ERA5-Land data to describe soil moisture variability in a Central European beech forest. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 59, 102456.

[17]. Shahbazi, A. Vakili Tajareh, F. Alvandi, E. Bayat, A. Asadi Nalivan, O. 2021. Assessment of artificial neural network models and maximum entropy in zoning of gully erosion sensitivity of Golestan Dam Basin. *Iranian Watershed Management* 15(52), 12–23. [In Persian].

[18]. Shahrivar, A. Christopher, T.B.S. 2012. The effects of soil physical characteristics on gully erosion development in Kohgiluyeh & Boyer Ahmad Province, Iran. *Advances in Environmental Biology* 6(1), 397–405.

[19]. Shahrivar, A., 1997. Investigation of factors affecting gully erosion and development of a model in the Souq region of Dehdasht County. M.Sc. Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. [In Persian].

[20]. Shannon, C.E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27(3), 379–423; 27(4), 623–656.

[21]. Tahmasebipoor, N. Rahmati, O. Ghorbani Nejad, S. 2016. Prediction of gully erosion susceptibility in Seimare region using certainty factor model and importance analysis of conditioning factors. *Iranian Journal of Ecohydrology* 3(1), 83–93. [In Persian].

[22]. Wen, Y. Kasielke, T. Jiang, H. Zepp, H. Zhang, B. 2024. Effects of lithology and soil horizons on gully morphology in the Mollisol region of China. *Geoderma* 446, 116907.

[23]. Yaghobi, S. Hosseinalizadeh, M. Komaki, C.B. Rossi, M. Mondini, A.C. Najafinejad, A. Pourghasemi, H.R. 2025. Application of object-based image analysis and some machine learning models in gully erosion susceptibility mapping. *Advances in Space Research* 76(10), 5988–6011.

Identifying the Factors Influencing the Probability of Occurrence of Different Gully Erosion Types Using the Maximum Entropy (MaxEnt) Model

Aliakbar Nazari Samani¹, Gholamreza Rahi^{2*}, Nosratollah Esmaeili³, Paria Pourmohammad⁴

Received: 2026/05/03

Accepted: 2026/10/19

Extended Abstract

Introduction

Soil is a fundamental natural resource that plays a critical role in food security, ecosystem functioning, and sustainable land management. Historical evidence suggests that soil erosion has contributed to the decline of major civilizations. In Iran, millions of tons of fertile soil are lost annually due to inadequate vegetation cover and intensified erosional processes. Among the various forms of soil erosion, gully erosion is one of the most destructive, resulting from the complex interactions between environmental conditions and human activities. Gullies represent an advanced stage of linear erosion and have been reported to account for 10–94% of sediment yield in many watersheds. From a hydrological perspective, gullies facilitate the transport of sediment and associated pollutants, resulting in economic losses, reduced soil fertility, and damage to infrastructure. The initiation and development of gullies are complex and site-specific processes influenced by surface runoff, subsurface flow, piping, and mass movements. Previous studies have investigated gully erosion modeling using various approaches, including fuzzy operators, Shannon entropy, and certainty factor methods. However, most existing studies have focused on the presence or absence of gullies, with comparatively less attention given to gully head morphology and planform shape. Furthermore, significant gaps remain in the application of nonlinear, presence-only modeling approaches to gully erosion assessment. In Bushehr Province, approximately 29,500 hectares of agricultural land have reportedly been lost due to gully erosion, highlighting the importance of assessing its spatial distribution and contributing factors. Accordingly, this study aimed to: (1) predict areas susceptible to gully erosion using the Maximum Entropy (MaxEnt) model; (2) evaluate the relative importance of environmental predictor variables using percent contribution, permutation importance, and Jackknife analysis; and (3) examine the relationship between gully planform types and cross-sectional morphology as a complementary morphological analysis.

Materials and Methods

The Darreh Kareh watershed is located approximately 40 km north of Bushehr, Iran, and covers an area of 29,750 ha (51°15'7"–51°25'25" E, 28°59'–29°10.5' N). A total of 145 gullies were identified through aerial photograph interpretation and field surveys. For each gully, the location of the headcut, cross-sectional shape (V-shaped or U-shaped), planform morphology (linear, lateral, or dendritic), soil properties (texture, organic matter content, salinity, and pH), and morphological characteristics (height, length, width, depth, and upstream slope) were recorded. Environmental variables, including catchment area, aspect, distance to streams, the Topographic Wetness Index (TWI), and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), were derived using a digital elevation model (DEM) and ArcGIS. The TWI was calculated using the following equation:

where (A) represents the specific catchment area and (β) denotes the local slope angle. Soil property maps for clay, silt, and sand content were generated using kriging interpolation. The Maximum Entropy (MaxEnt) model was used to assess gully erosion susceptibility based on a set of environmental predictor variables, including slope, aspect, TWI, distance to streams, soil texture, organic matter content, land

1. Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Assistant Professor, Bushehr Province Agricultural and Natural Resources Education and Research Center

3. Instructor, Shahrekord University. gh.rahi@areeo.ac.ir

4. Ph.D candidate, Department of reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

use, lithology, NDVI, flow accumulation, and the LS factor. The Shannon entropy index was integrated with logistic regression as part of the modeling approach. Model performance was evaluated using the area under the receiver operating characteristic curve (ROC-AUC). Jackknife tests and permutation importance were used to assess the relative contributions of the environmental predictor variables. In addition, the relationships between gully planform types and cross-sectional shapes were examined using cross-tabulation and chi-square tests.

Results and Discussion

The Shannon entropy analysis indicated that soil-related factors exerted a greater influence on gully erosion susceptibility than physiographic factors. Consistent with this finding, the MaxEnt percent contribution analysis identified caso0_50 (calcium carbonate content at a depth of 0–50 cm) as the most influential predictor, accounting for approximately 43% of the total contribution, followed by clay50_end (clay content in the deeper soil layer), with a contribution of approximately 40%. These results highlight the prominent role of soil properties in model development and suggest that soil characteristics are important predictors of gully erosion susceptibility in the study area. The permutation importance analysis identified clay50_end, silt0_50, and ec0_50 (electrical conductivity at a depth of 0–50 cm) as relatively important predictors, despite their lower percent contributions. Differences between percent contribution and permutation importance suggest that the apparent influence of individual predictors depends on the evaluation method and may reflect relationships among environmental variables. The Jackknife analysis further indicated that caso0_50 yielded the highest AUC when used individually, whereas its exclusion resulted in the greatest reduction in model performance. Taken together, these findings emphasize the importance of soil properties in explaining the modeled spatial distribution of gully erosion susceptibility, while topographic and hydrological variables appear to play supplementary roles. These results are consistent with previous studies by Arabameri et al. (2019) and Shahrivar and Christopher (2012).

The MaxEnt model achieved AUC values of 0.91 for the training data and 0.92 for the test data, with a reported standard deviation of 0.019. These values indicate strong discrimination between presence locations and background or absence locations, depending on the evaluation design. The similar training and test AUC values suggest that the model performed consistently across the two datasets and provide no clear indication of substantial overfitting. However, further assessment using spatially independent validation would be necessary to establish the model's transferability to other areas. The chi-square test revealed a statistically significant association between gully planform type and cross-sectional morphology ($\chi^2 = 29.954$, $(df = 12)$, $(p = 0.003)$). U-shaped gullies were the most frequent cross-sectional form and were associated primarily with dendritic and linear planform patterns. These associations may reflect differences in the relative development of lateral erosion and channel widening. In contrast, V-shaped gullies occurred predominantly in association with linear planforms, potentially indicating a greater contribution of vertical incision. Trapezoidal gullies were less frequent and were associated with dendritic planforms, possibly reflecting more advanced stages of morphological development. One UV-shaped gully was also identified, representing a transitional cross-sectional form. These morphological patterns are broadly consistent with the findings reported by Wen et al. (2024) and Modak et al. (2023).

Conclusion

This study demonstrated that gully erosion is a complex geomorphological process influenced by the combined effects of soil physicochemical properties, geomorphological conditions, and human activities, rather than by slope alone. Among the environmental predictors examined, soil properties, particularly calcium carbonate and clay content, emerged as important factors associated with gully erosion susceptibility. These relationships may be related to their effects on soil permeability, runoff generation, and soil structural stability, although the underlying mechanisms depend on local soil and environmental conditions. Transitional geomorphological units, such as piedmonts and old alluvial surfaces, exhibited the greatest overlap with areas identified as susceptible to gully erosion. The morphological analysis revealed a statistically significant association between gully cross-sectional shape and planform morphology, highlighting the potential value of these characteristics for interpreting spatial variations in gully development. The observed morphological patterns may reflect differences in flow concentration, headcut retreat, and lateral expansion. Accordingly, gully morphology can provide complementary information for understanding erosion dynamics and potential stages of morphological

development. The MaxEnt model demonstrated strong discriminatory performance in identifying areas susceptible to gully erosion, while the assessment of predictor importance helped identify the environmental variables most strongly associated with the modeled distribution. These findings indicate that combining presence-only modeling with environmental data and geomorphological analysis can provide valuable insights into the spatial patterns of gully erosion. Human-related factors, particularly land-use changes and proximity to roads, may further contribute to erosion processes and represent potential targets for management interventions, provided their effects are supported by the corresponding model results. The resulting susceptibility map can serve as a practical tool for prioritizing conservation measures, guiding soil and water management interventions, and supporting the mitigation of gully erosion hazards. Integrating soil properties, geomorphological characteristics, human-related factors, and quantitative modeling approaches provides a useful framework for assessing gully erosion susceptibility and informing land management decisions. Future research should extend the spatial coverage of investigations, examine temporal changes in gully development, and incorporate long-term hydrological observations to improve understanding of erosion processes and support more sustainable management strategies in arid and semiarid regions.

Keywords: Sustainable watershed management, Shannon entropy, Topographic indices, Headcut morphology